

Mühendislik Alanında Akademik Araştırmalar

Editör
Prof. Dr. Özlem Sallı Bideci

Mühendislik Alanında Akademik Araştırmalar

Editör

Prof. Dr. Özlem Sallı Bideci

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Prof. Dr. Özlem Sallı Bideci

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Haziran, 2025

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-8464-03-0

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak,
Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuspublishing.com
e-mail: platanuskita@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1.....	5
Feistel Şifreleme Yönteminin İncelenmesi	
Ercan Buluş	
BÖLÜM 2.....	15
Deniz Ekosisteminde Petrol Kirliliği	
Serpil Savcı	
BÖLÜM 3.....	23
Üretim için Tasarım Bakış Açısına Göre İmplant Uygulamalarının İncelenmesi	
Hakan Burçin Erdoğan	
BÖLÜM 4.....	31
Dünyada ve Türkiye’de Elektrik Üretim Maliyetlerinin İncelenmesi	
Abdullah Alaa Abdulwahhab Al-İmam& Mustafa Tahir Akkoyunlu & Fatih Akkurt	
BÖLÜM 5.....	55
Hidrojen İle İlgili Kaza Olayları ve Sonuçları	
Melek Türk & Arda Yılmaz	
BÖLÜM 6.....	73
Kompresör Atık Isı Kazanımının İncelenmesi	
Neşe Taşdemir & Muhammet Şaka & Mustafa Tahir Akkoyunlu & Alparslan Turanboy	
BÖLÜM 7.....	97
Makine Öğrenmesi Tabanlı Şifreleme Algoritması Seçimi için Kriptografik Algoritmalarının Çok Kriterli Karşılaştırması	
Ferdî Azboy & Esra Şatır	
BÖLÜM 8.....	107
Mikroplastik Kirliliği: Kaynakları, Çevre Sağlığı	
Serpil Savcı	
BÖLÜM 9.....	115
Zemin Sıvılaşmasına Karşı Uygulanabilecek İyileştirme Yöntemleri	
Mehmet Hayrullah Akyıldız & Kübra Adar	

BÖLÜM 10 125

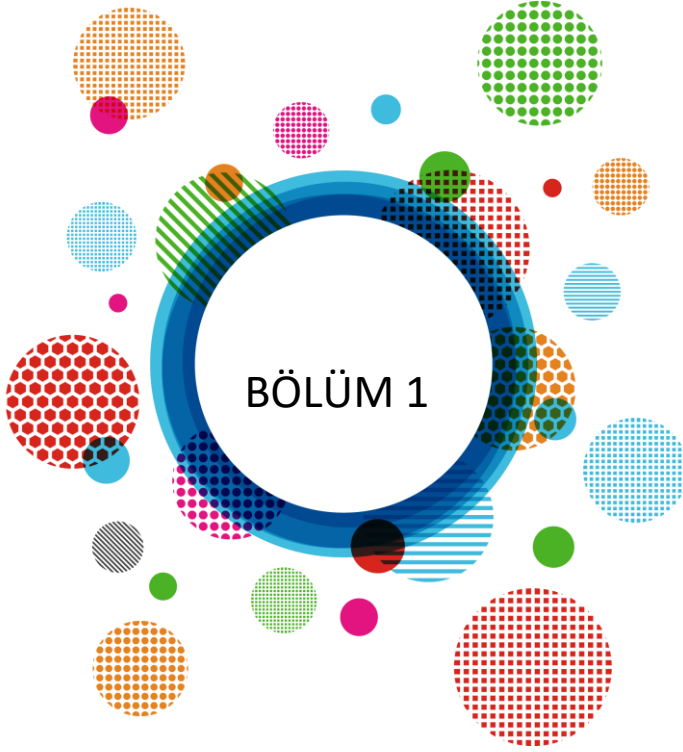
**Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine Giden Yolda Hidrolik Yapılar ve
Hidrolik Yapı Mühendisliği**

Cengiz Koç

BÖLÜM 11 173

**Makine Öğrenmesinde Öznitelik Seçimi için Metasezgisel Algoritmaların
Kullanımı**

Umut Dökmen & Nusin Akram & Onur Uğurlu



Feistel Şifreleme Yönteminin İncelenmesi

Ercan Buluş¹

¹ Prof. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, ORCID: 0000-0001-9442-6253

GİRİŞ

Feistel şifreleme yöntemi, Alman kökenli Amerikalı kriptograf Horst Feistel (30 Ocak 1915 – 14 Kasım 1990) tarafından 1970'lerin başında IBM'deki çalışmaları sırasında geliştirilmiştir [1, 3, 4]. Yöntem, güvenli, esnek ve hesaplama açısından verimli şifreleme sistemleri tasarlamak için sunulmuştur. On yıllar boyunca dijital güvenliğin temel taşı haline gelen Veri Şifreleme Standardı'ndaki (DES) uygulamasıyla yaygın bir şekilde kullanılmıştır [2].

Feistel yapısı düz metni ikiye bölerek ve bir ana anahtardan türetilen bir yuvarlama işlevi ve alt anahtarlar kullanarak birden fazla işlem turu uygulayarak çalışan simetrik bir blok şifreleme yöntemidir. Bu yöntem, yalnızca alt anahtar sırasını tersine çevirerek hem şifreleme hem de şifre çözme için aynı algoritmayı kullanması nedeniyle ön plana çıkmıştır.

Teknik bir bakış açısından, Feistel tasarımının basitliği ve uyarlanabilirliği onu birçok kriptografik algoritma için pratik bir temel haline getirmiştir. Çeşitli tur işlevlerine, anahtar çizelgelerine ve blok boyutlarına izin vererek kriptografların sistemlerini belirli güvenlik ve performans gereksinimleri için ince ayar yapmalarını sağlamaktadır. DES'e ek olarak, Blowfish ve Twofish gibi modern yöntemlerde Feistel yapısını kullanmaktadır [5, 6].

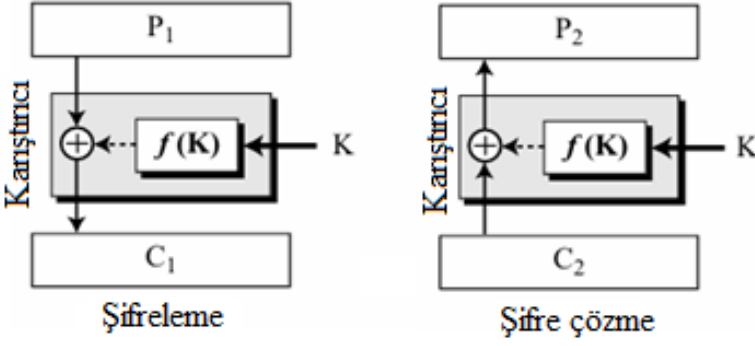
Feistel yönteminin uygulamaları, güvenli iletişim, finansal sistemlerde veri koruması, kimlik doğrulama protokolleri ve gömülü sistem güvenliği dahil olmak üzere çok çeşitli alanları kapsamaktadır [7, 8].

FEISTEL ŞİFRELEME YÖNTEMİ

Feistel, onlarca yıldır kullanılan çok akıllı ve ilginç bir şifre tasarladı. Bir Feistel şifresi üç tür bileşene sahip olabilir: kendi kendine ters çevrilebilir, ters çevrilebilir ve ters çevrilemez. Bir Feistel şifresi, tüm ters çevrilemez öğeleri bir birimde birleştirir ve şifreleme ve şifre çözme algoritmalarında aynı birimi kullanır.

İlk Hali:

Feistel şifresini daha iyi anlamak için, şifreleme ve şifre çözme algoritmalarında aynı geri döndürülemez bileşeni nasıl kullanabileceğimizi inceleyelim. Şekil 1'de gösterildiği gibi Xor işlemini kullanırsak, şifreleme algoritmasındaki geri döndürülemez bir bileşenin etkileri şifre çözme algoritmasında iptal edilebilmektedir.



Şekil 1. Feistel şifreleme yönteminin tek blokluk ilk hali

Şekil 1’de, P harfi ile başlayan simgeler Açıkmetin (Plaintext), C ile başlayanlar şifreli metin (ciphered text), K ile başlayanlar şifreleme anahtarı (Key) dir.

Şifrelemede, ters çevrilemez bir fonksiyon, $f(K)$, K anahtarını girdi olarak kabul eder. Bu bileşenin çıktısı düz metinle Xor’lanarak şifreli metin elde edilir. Fonksiyonun Xor’landığı birleşimine karıştırıcı (mixer) adını veririz. Karıştırıcı, Feistel şifresinin daha sonraki gelişiminde önemli bir rol oynar.

Şifreleme ve şifre çözmeye anahtar aynı olduğundan, iki algoritmanın birbirinin tersi olduğunu kanıtlayabiliriz. Başka bir deyişle, eğer $C_2=C_1$ ise (iletim sırasında şifreli metinde değişiklik olmazsa) o zaman $P_2=P_1$ dir.

Şifreleme:

$$C_1 = P_1 \oplus f(K)$$

Şifre çözme:

$$\begin{aligned} P_2 &= C_2 \oplus f(K) = C_1 \oplus f(K) = P_1 \oplus f(K) \oplus f(K) \\ &= P_1 \oplus (00...0) = P_1 \end{aligned}$$

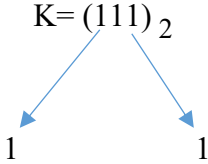
Xor işleminin iki özelliğinin kullanıldığını unutmayın (tersinin varlığı ve özdeşliğin varlığı). Yukarıdaki argüman, karıştırıcının tersinir olmayan bir elemanı olmasına rağmen, karıştırıcının kendisinin kendi kendine tersinir olduğunu kanıtlar. Ayrıca Feistel tasarımındaki karıştırıcı kendi kendini çevirebilir.

Örnek:

Düz metin ve şifreli metin her biri 4 bit uzunluğundadır ve anahtar 3 bit uzunluğundadır. Fonksiyonun anahtarın ilk ve üçüncü bitlerini aldığını, bu iki biti ondalık sayı olarak yorumladığını, sayının karesini aldığını ve sonucu 4 bitlik ikili bir desen olarak yorumladığını varsayalım. Orijinal düz metin 0111 ve anahtar 111 ise şifreleme ve şifre çözme sonuçlarını gösterin.

Cözüm:

$$P = (0111)_2$$



$$(11)_2 = (3)_{10}$$

$$f(K) = ((3)_{10})^2 = (9)_{10}$$

$$f(K) = (9)_{10} = (1001)_2$$

Şifreleme:

$$C = P \oplus f(K) = 0111 \oplus 1001 = (1110)_2$$

Şifre çözme:

$$P = C \oplus f(K) = 1110 \oplus 1001 = (0111)_2$$

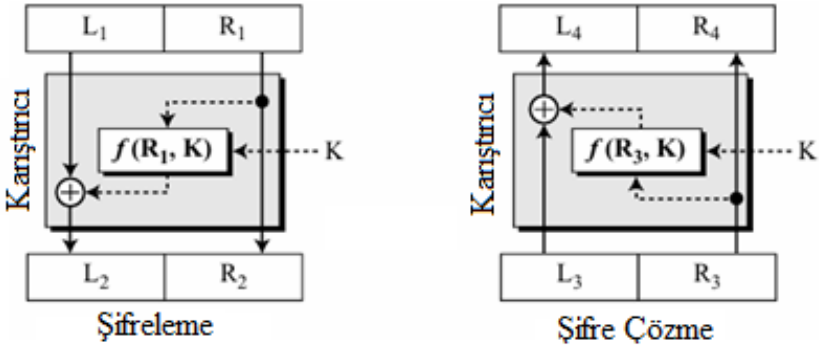
açık metin bulunur.

$f(101) = 1001$ fonksiyonu tersinir değildir, ancak Xor işlemi fonksiyonu hem şifreleme hem de şifre çözme algoritmalarında kullanmamızı sağlar. Başka bir deyişle, fonksiyon tersinir değildir, ancak karıştırıcı kendi kendine tersinirdir.

İvileştirme:

Feistel şifresini anlayabilmek için önceki düşüncemizi bir ileriye götürelim. Tersine çevrilemez öğeye (fonksiyona) aynı girdiyi kullanmamız gerektiğini biliyoruz, ancak yalnızca anahtarı kullanmak istemiyoruz. Fonksiyona girdinin şifrelemede düz metnin ve şifre çözmede şifreli metnin bir parçası olmasını istiyoruz. Anahtar, fonksiyona ikinci girdi olarak kullanılabilir. Bu şekilde, fonksiyonumuz bazı anahtarsız öğeler ve bazı anahtarlı öğeler içeren karmaşık bir öge olabilir. Bu hedefe ulaşmak için düz metni ve şifreli metni sol ve sağ

olmak üzere iki eşit uzunlukta bloğa böleriz. Sol bloğa L ve sağ bloğa R diyoruz. Sağ bloğun fonksiyona girdi olmasına ve sol bloğun fonksiyon çıktısıyla özel olarak Xor'lanmasına izin verin. Önemli bir noktayı hatırlamamız gerekiyor: Fonksiyona gelen girdiler şifreleme ve şifre çözmede tam olarak aynı olmalıdır. Bu, şifrelemedeki düz metnin doğru bölümünün ve şifre çözmedeki şifreli metnin doğru bölümünün aynı olması gerektiği anlamına gelir. Başka bir deyişle, doğru bölüm şifreleme ve şifre çözme süreçlerine değişmeden girmeli ve çıkmalıdır. Şekil 2 bu fikri göstermektedir.



Şekil 2 Feistel tasarımının geliştirilmiş hali

Şifreleme ve şifre çözme algoritmaları hala birbirinin tersidir. $L_3 = L_2$ ve $R_3 = R_2$ olduğunu varsayalım (iletim sırasında şifreli metinde hiçbir değişiklik olmaz).

$$R_4 = R_3 = R_2 = R_1$$

$$L_4 = L_3 \oplus f(R_3, K) = L_2 \oplus f(R_2, K)$$

$$= L_1 \oplus f(R_1, K) \oplus f(R_1, K) = L_1$$

Şifreleme algoritmasında kullanılan düz metin, şifre çözme algoritması tarafından doğru şekilde yeniden üretilir.

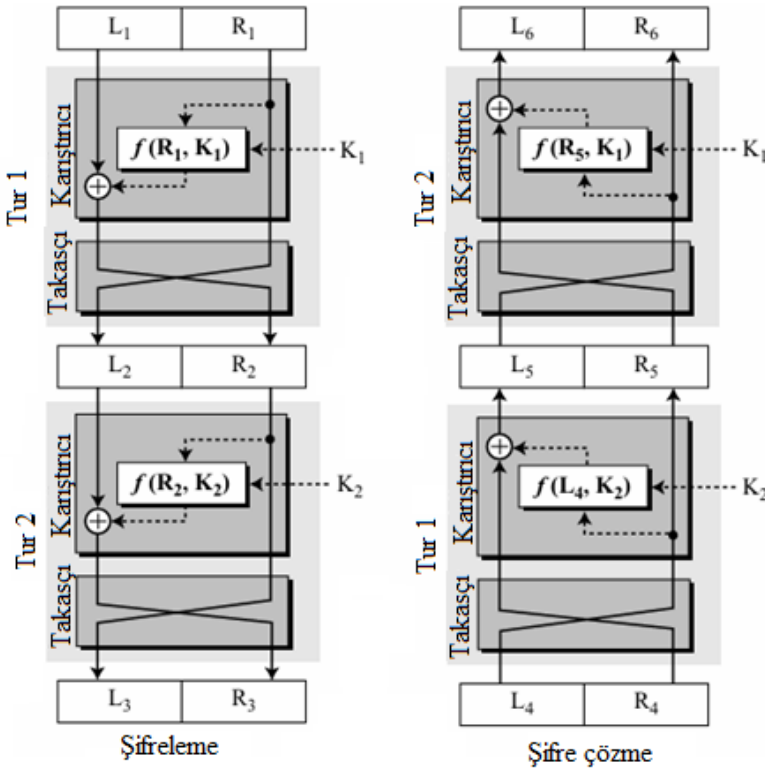
Son Tasarım:

Önceki iyileştirmenin bir kusuru vardır. Düz metnin sağ yarısı asla değişmez. Eve (bilgi çalan şahıs) şifreli metni yakalayıp sağ yarısını çıkararak düz metnin sağ yarısını hemen bulabilir. Bu yüzden tasarımın daha fazla iyileştirmeye ihtiyacı vardır. İlk olarak, tur (round) sayısını artırırız, ikinci olarak, her tura yeni

bir takasçı (swapper) ekleriz. Şifreleme turundaki takasçının etkisi, şifre çözme turundaki takasçının etkisi tarafından iptal edilir. Ancak, her turda sol ve sağ yarıları değiştirmemize olanak tanır. Şekil 3, iki turlu son tasarımı göstermektedir.

K_1 ve K_2 olmak üzere, iki tur anahtarı olduğunu unutmayın. Anahtarlar şifreleme ve şifre çözmede ters sırada kullanılır. İki karıştırıcı birbirinin tersi ve takasçılar birbirinin tersi olduğundan, şifreleme ve şifre çözme şifrelerinin birbirinin tersi olduğu açık olmalıdır.

Ancak, her şifredeki sol ve sağ bölümler arasındaki ilişkiyi kullanarak bu gerçeği kanıtlayıp kanıtlamayacağımıza bakalım. Başka bir deyişle, $L_4 = L_3$ ve $R_4 = R_3$ olduğunu varsayarak (iletim sırasında şifreli metinde hiçbir değişiklik olmaz) $L_6 = L_1$ ve $R_6 = R_1$ olup olmadığına bakalım. İlk önce orta metin için eşitliği kanıtlıyoruz.



Şekil 3. İki turlu bir Feistel şifresinin son tasarımı

$$L_5 = R_4 \oplus f(L_4, K_2) = R_3 \oplus f(R_2, K_2)$$

$$= L_2 \oplus f(R_2, K_2) \oplus f(R_2, K_2) = L_2$$

$$R_5 = L_4 = L_3 = R_2$$

Buradan aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$L_6 = R_5 \oplus f(L_5, K_1) = R_2 \oplus f(L_2, K_1)$$

$$= L_1 \oplus f(R_1, K_1) \oplus f(R_1, K_1) = L_1$$

$$R_6 = L_5 = L_2 = R_1$$

Buna göre $P = (10111001)_2$, $K = (11010111)_2$, $f(R, K) = R \oplus K$ olsun 2 turluk Feistel şifreleme yöntemiyle şifrelenmiş C metnini bulmaya çalışalım.

1.Tur:

$$P = (10111001)_2$$

$P = L1 + R1$ olduğundan açık metni ikiye böleriz.

$$L1 = (1011)_2 \quad \text{ve} \quad R1 = (1001)_2$$

$K = (11010111)_2$ olduğundan K anahtarını ikiye böleriz.

$$K1 = (1101)_2 \quad \text{ve} \quad K2 = (0111)_2$$

$$f(R1, K1) = 1001 \oplus 1101 = 0100$$

$$L2 = R1 = 1001$$

$$R2 = L1 \oplus f(R1, K1) = 1011 \oplus 0100 = 1111$$

Birinci Tur Çıktısı : $L2 = (1001)_2$ ve $(R2 = 1111)_2$ olarak elde edilir. $K2 = (0111)_2$ için 2. Tura geçelim,

$$f(R2, K2) = (1111)_2 \oplus (0111)_2 = (1000)_2$$

$$L3 = R2 = (1111)_2$$

$$R3 = L2 \oplus f(R2, K2) = (1001)_2 \oplus (1000)_2 = (0001)_2$$

İkinci tur Çıktısı: $L3 = (1111)_2$ $R3 = (0001)_2$ ve $C = (11110001)_2$ olarak elde edilir.

Sonuç

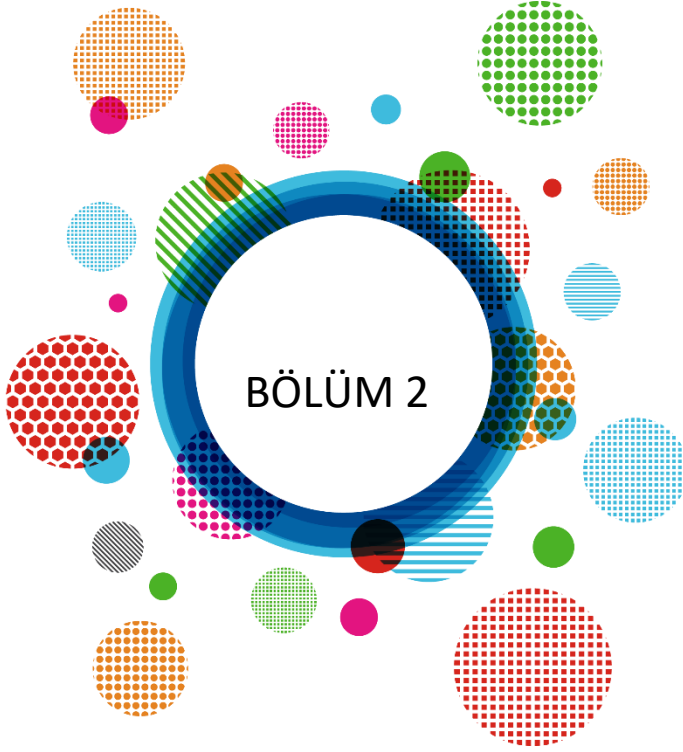
Feistel şifreleme yapısı, modern blok şifreleme algoritmalarının temelini oluşturan modüler ve esnek bir çerçeve sunmaktadır. Bu yapı sayesinde, her turda uygulanan basit fakat etkili işlevlerin birleşimiyle yüksek düzeyde güvenlik sağlanırken, algoritmanın hem şifreleme hem de şifre çözme işlemleri için aynı yapısal bileşenlerin kullanılabilmesi, uygulama açısından önemli bir avantaj sunar. Özellikle DES ve türevi algoritmalarda yaygın olarak kullanılan Feistel yapısı, doğrusal olmayan fonksiyonlar ve anahtarların farklı turlarda dönüşümlü olarak kullanılması sayesinde doğruluk, karışıklık (confusion) ve belirsizlik (diffusion) ilkelerini başarıyla uygular.

Feistel ağlarının matematiksel olarak terslenebilirliği, algoritmaların güvenli olmasının yanı sıra performans açısından da tercih edilmesini sağlar. Ayrıca bu yapı, simetrik şifreleme algoritmalarının tasarımında modüler güvenlik analizi yapılmasına olanak tanır. Günümüzde AES gibi bazı modern şifreleme algoritmaları Feistel yapısı kullanmasa da, Feistel mimarisi özellikle gömülü sistemlerde, donanıma uygun hafif şifreleme tasarımlarında ve klasik şifreleme sistemlerinin değerlendirilmesinde hâlâ önemli bir yere sahiptir.

Sonuç olarak, Feistel şifreleme yöntemi, tarihsel önemi, yapısal avantajları ve güvenlik özellikleri ile simetrik anahtarlı kriptografi alanında temel bir yapı taşı olmayı sürdürmektedir.

Kaynakça

- [1] Biryukov, A., Nikolić, I. (2014). Complementing Feistel Ciphers. In: Moriai, S. (eds) Fast Software Encryption. FSE 2013. Lecture Notes in Computer Science(), vol 8424. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-43933-3_1
- [2] E. Biham and A. Shamir (1991), Differential cryptanalysis of DES-like cvptosystems, Journal of Cryptology, Vol 4, No i, (pp. 3-72).
- [3] Feistel, H. (1973). Cryptography and Computer Privacy. *Scientific American*, 228(5), 15–23. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0573-15>.
- [4] Forouzan, Behrouz A.(2008), Introduction to cryptography and network security, The McGraw-Hill Companies (pp139-143).
- [5] Nyberg, K. (1996). Generalized Feistel networks. In: Kim, K., Matsumoto, T. (eds) Advances in Cryptology — ASIACRYPT '96. ASIACRYPT 1996. Lecture Notes in Computer Science, vol 1163. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0034838>
- [6] Sakallı, M. T., Buluş, E., Şahin, A., Büyüksaraçoğlu, F.(2006), "A. Şahin, S-kutularında Doğrusal Eşitlik - Affine Equivalence in S-boxes", IEEE Sinyal işleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, 17-19 Nisan 2006, Antalya,Türkiye. DOI: 10.1109/SIU.2006.1659838
- [7] Stallings, W. (2017). Cryptography and Network Security: Principles and Practice (7th ed.). Pearson.
- [8] Schneier, B. (1996). Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C (2nd ed.). John Wiley & Sons.



Deniz Ekosisteminde Petrol Kirliliği

Serpil Savcı¹

¹ Doç. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,

GİRİŞ

Ham petrol, dünyanın en büyük yenilenemeyen enerji üretim kaynağıdır, ardından kömür ve doğal gaz gelmektedir. Bu yakıtlar modern endüstriyel dünyanın temelini oluştururlar ve petrol bazlı ekonomiler için tek zenginlik kaynağıdır. Günlük yaşamın hemen hemen her yönü artık ham petrollerden ve enerji üretiminden elde edilen petrol bazlı ürünlere (petrokimyasallar) dayanmaktadır. Ham petrol dünyanın yalnızca bazı bölgelerinde mevcuttur. Büyük küresel talebin bir sonucu olarak, ham petrol, kaynaktan çıkarıldıktan sonra, yoğunlukla en ekonomik ulaşım şekli oldukları için deniz yollarıyla dünyanın her yerine taşınırlar. Ham petrol ve sıvı hidrokarbonların karaya ve suya kazara boşaltılması genellikle petrol sızıntısı olarak adlandırılır. Petrol sızıntıları, ham petrol arama, depolama, taşıma ve tüketim sırasında kaçınılmaz hale gelmiştir (Purohit ve ark., 2024).

Deniz petrol sızıntıları, doğal afetler, petrol sondajı, ulaşım ve savaş sırasında meydana gelen tanker kazaları nedeniyle ortaya çıkabilmektedir. Bu sızıntılar enerji kaynaklarının önemli ölçüde tükenmesi ve ekosistemler üzerindeki zararlı etkisi nedeniyle küresel petrol şirketleri için önemli bir sorun haline gelmiştir (Purohit ve ark., 2024). Bu kitap bölümünde deniz ekosisteminde petrol kirliliği anlatılmıştır.

ÇEVRESEL ETKİLER

Denizdeki petrol sızıntıları, suyu kirleterek, sulak alanlara zarar vererek ve buharlaşma yoluyla atmosfere uçucu hidrokarbonlar salarak hem kıyı ortamı hem de okyanus ekosistemleri için en büyük tehlikeyi oluşturur. Kıyı şeritlerine ulaşan petrol sızıntıları mercan resiflerine, hayvan türlerine ve deniz ekosistemindeki diğer birçok bitkiye önemli ölçüde zarar verir. Deniz petrol sızıntıları ayrıca kıyı turizmi ve balıkçılık endüstrileri üzerinde önemli olumsuz etkilere sahiptir. Bu endüstrilerin, sosyal, ticari ve ekonomik yönlerini olumsuz etkiler. Petrol sızıntılarının neden olduğu hasarın şiddeti genellikle petrolün kimyasal bileşimi ve hacmi, etkilenen alan, çevredeki hava koşulları, temizleme için benimsenen yaklaşım ve müdahale süresi gibi faktörlere bağlıdır (Purohit ve ark., 2024).

Küçük bir petrol sızıntısı bile deniz ortamını önemli ölçüde etkileyebilir. Etkileri, tek tek organizmaların ölümünden tüm ekosistemlerin bozulmasına kadar uzanan, anında ve uzun süreli olabilir. Dizel, benzin, gazyağı, yağlama yağları, yakıt yağı, ağır yağlar, çözücüler ve diğerleri dahil olmak üzere birçok farklı petrol ürünü türü, deniz suyundaki petrol sızıntılarının çoğunu oluşturur. Genellikle, ister karada ister suda olsun, petrol sızıntıları meydana geldiğinde iki farklı dönüşüm meydana gelir. Birincisi, bir sızıntının ardından petrolün fiziksel

ve kimyasal özelliklerini değiştiren bir zincirleme reaksiyon olan aşınmadır. İkincisi, petrolün çevresel hareketiyle ilgili bir dizi prosedürdür. Petrol çevreye sızdığı anda aşınma süreçleri çok farklı hızlarda gerçekleşir. Bu durum petrolün özelliklerine ve sıcaklık koşullarına bağlıdır. Malzemelere yapışma, biyolojik bozunma, çözünme, buharlaşma, mineral parçacıklarıyla etkileşim, katran topları üretimi, doğal dispersiyon, fotooksidasyon ve sedimantasyon aşınmanın parçaları olarak sıralanabilir. Yağın bileşimi ve sıcaklığı öncelikle buharlaşma oranını belirler. Daha yüksek sıcaklıklarda daha uçucu bileşenlere sahip olan yağ, atmosfere daha fazla gaz salarak hava kirliliğine neden olabilir. Yine, buharlaşma derecesi yağın viskozitesini, yoğunluğunu ve parlama noktasını önemli ölçüde artırabilir. Foto-oksidasyon, molekülleri kimyasal olarak değiştirerek belirli yağ bileşenlerini ortadan kaldırabilir ve yeni kimyasallar üretebilir. Bu süreç hidrokarbonların yoğunluğunu ve davranışını değiştirerek petrol sızıntısına müdahale tekniklerinin verimliliğini etkileyebilir. Bileşiklerin çözünme, buharlaşma veya dönüşme hızı, basınç, sıcaklık, pH, ışıınım, salınan petrol hacmi vb. dahil olmak üzere çeşitli çevresel faktörlere bağlıdır (Passow ve Li, 2022; Purohit ve ark., 2024).

Deniz yaşamına birçok şekilde zarar verebilen ve hem kıyı hem de açık deniz ekosistemlerini etkileyebilen petrol sızıntıları, su kütlelerinde yaşayan yerel organizmaların büyümesini ve gelişimini tehlikeye atabilir. Petrolle doğrudan temas eden veya fiziksel olarak boğulan organizmalar, petrol sızıntısının en acil etkilerini yaşarlar. Bunlar arasında kuşlar, memeliler, balıklar ve omurgasızlar yer alabilir. Petrol, memelilerin ve kuşların kürklerini kaplayarak nefes almalarını, uçmalarını, yüzmelerini, sıcak kalmalarını ve su geçirmez kalmalarını zorlaştırabilir. Petrol lekeleri, kuşların tüylerinde ince bir tabaka oluşturur ve bu tabaka yalıtım özelliğini kaybeder ve donarak ölüme neden olabilir (Purohit ve ark., 2024).

Hayvanlar ayrıca petrolü yutabilir ve bu da potansiyel olarak zehirlenmeye veya kimyasal toksisiteye yol açabilir. Hayvanların sinir sistemine, karaciğerine ve böbreklerine zarar verebilir. Petrol sızıntıları, tek tek organizmaları öldürmenin yanı sıra tüm ekosistemleri de bozabilir. Ham petroler bitkileri ve algleri boğabilir, diğer organizmaları yiyecek ve yaşam alanından mahrum bırakabilir. Ham petroler ayrıca suyun kimyasal bileşimini değiştirebilir ve bazı organizmaların hayatta kalmasını zorlaştırabilir. Ham petroler, algler için besin görevi görebilen daha küçük moleküllere parçalanabilir. Bu, sudan oksijeni alan ve balıkları ve diğer deniz canlılarını öldüren alg büyümesine neden olabilir. Bir petrol sızıntısının uzun vadeli etkileri, ani etkilerinden bile daha yıkıcı olabilir. Ham petroler çevrede yıllarca kalabilir ve sızıntıdan uzun süre sonra bile organizmalara zarar vermeye devam edebilir. Bunlar ayrıca birikebilir ve besin

zincirlerinin bozulmasına neden olabilir ve bu da hayvanlarda sağlık sorunlarına yol açabilir (Pezeshki ve ark., 2000).

Deniz yaşamı üzerindeki doğrudan etkilere ek olarak, petrol sızıntıları insan sağlığına da zarar verebilir. Petrol hidrokarbonları, poliaromatik hidrokarbonlar, uçucu organik bileşikler ve petrolde bulunan diğer yanıcı maddelerin birleşimi, insanlarda ciddi fiziksel ve ruhsal sağlık sorunlarına yol açma potansiyeline sahiptir. Bunlara kardiyovasküler bozukluklar, astım, baş ağrıları, iltihaplanma, tahriş, böbrek ve karaciğer hasarı, sinir sistemi ve bağışıklık sistemi üzerindeki etkiler ve üreme ve gelişimsel anormallikler şeklinde sıralanabilir. Petrol sızıntıları ayrıca insanların petrolle kirlenmiş plajları ve diğer kıyı alanlarını ziyaret etme olasılığını azaltarak kıyı ekonomilerine zarar verebilir. Çevre üzerindeki olumsuz sonuçları nedeniyle, petrol sızıntısı temizleme kritik bir endişe kaynağıdır (Singh ve ark., 2020).

Denizlerdeki petrol sızıntıları, teknolojideki ilerlemeler ve deniz çevre güvenliğine ilişkin artan farkındalık nedeniyle her yıl azalmaktadır. Ancak, deniz ortamının karmaşıklıkları, bir petrol sızıntısı meydana geldiğinde, bunun zararını ve etkisini ortadan kaldırmak için gereken maliyetlerin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Bu tür olaylar, yalnızca ekonomik kayıplara ve kaynak israfına yol açmakla kalmaz, aynı zamanda deniz ve kıyı bölgelerinin doğal ekolojik ortamına da ciddi zararlar verebilmektedir (Cao ve ark., 2025). Petrol sızıntıları, ekonomik kayıplara, deniz ekosistemlerine ve kıyı topluluklarına önemli uzun vadeli zararlara neden oldukları için büyük endişe yaratmaktadır (Rao ve ark., 2022). Petrol ürünlerinin taşınması, sanayi devrimi nedeniyle her geçen gün katlanarak artmaktadır ve esas olarak deniz taşımacılığı tarafından desteklenmektedir.

DÜNYADA PETROL SIZINTILARINA İLİŞKİN HÜKÜMET DÜZENLEMELERİ VE YASALARI

Petrol kirliliği, antropojenik faaliyetler veya doğal yollarla sıvı petrol hidrokarbonlarının çevreye salınması şeklinde tanımlanabilir. Deniz biyoçeşitliliği antropojenik faaliyetlerden önemli ölçüde etkilenmiştir (Yaghmour ve ark., 2022). Bunlar sıklıkla deniz ortamında gözlemlenir. Ancak sonunda denizlere ulaşabilen derelerde, akarsularda ve nehirlerde de meydana gelebilir. Ham petrol, petrol ve diğer çeşitli yan ürünler şeklinde olan ve kazara veya kasıtlı olarak salınan petrol, su sistemlerinin ekolojik işleyişine zarar verebilir, balıkçılık ve turizm gibi sosyoekonomik faaliyetleri kötü etkileyebilir ve halk sağlığını tehlikeye atabilir (Alea, 2022; Schmidt-Etkin, 2011).

Petrol sızıntıları genellikle kazara meydana gelir ancak çevreye zarar verir ve büyük ekonomik kayıplara neden olabilir. Dünya çapında hükümetler ve çok sayıda uluslararası kuruluş, petrol sızıntılarının etkisini azaltmak için çeşitli

düzenlemeler ve yasalar yürürlüğe koymuştur. Petrol sızıntılarının küresel çerçevesini anlamak ve düzenlemek için çeşitli uluslararası yasalar ve kuruluşlar oluşturulmuştur.

Operasyonel petrol sızıntıları, gemilerden denize bilinçli olarak petrol kirleticilerinin boşaltılması, mürettebat üyelerinin yanlış çalışması veya tesislerin hasar görmesi sonucu oluşan kasıtsız petrol sızıntısını içerir. Operasyonel petrol sızıntılarındaki büyük miktarda kirlilik, gemilerden balast suyu, temizleme suyu ve yağlı atık suyun boşaltılmasıyla oluşur. Petrol kirleticilerinin yasadışı boşaltımı MARPOL sözleşmesi tarafından kesinlikle yasaklanmış olsa da, operasyonel petrol sızıntıları çok sık meydana gelebilmektedir (Xie ve ark., 2025). Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), Birleşmiş Milletler'in küresel nakliyenin emniyetini, güvenliğini ve verimliliğini artırmakla görevli uzmanlaşmış bir örgüttür. Petrol kirliliğiyle ilgili çeşitli antlaşmalar ve kurallar uygulamıştır. Bu anlaşmalar; Gemilerden Kirliliğin Önlenmesine Dair Uluslararası Sözleşme (MARPOL) ve Petrol Kirliliği Hasarından Dolayı Sivil Sorumluluk Hakkında Uluslararası Sözleşmedir (CLC). Gemilerden Kirliliğin Önlenmesine Dair Uluslararası Sözleşme (MARPOL), gemilerin operasyonel veya kazara sebeplerden kaynaklanan kirliliği düzenleyen en kapsamlı uluslararası sözleşmedir.

Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi (UNCLOS), ülkelerin deniz kirliliğini önlemek, azaltmak ve kontrol etmek için önlemler almaları için planlar yürütmektedir. Ayrıca kirliliği önlemek için bölgesel ve küresel kurallar oluşturulmasını teşvik etmektedir. Uluslararası Petrol Kirliliği Önleme Federasyonu (IOPP), petrol kirliliğini önlemeye ve üyelerine teknik yardım sağlamaya adanmış bir endüstri grubudur. Uluslararası Tanker Sahipleri Kirlilik Federasyonu (ITOPF), petrol sızıntısı olayları sırasında denizcilik sektörüne rehberlik ve destek sunan kar amacı gütmeyen bir kuruluştur (Hadavand ve ark., 2022).

Çevre Koruma Ajansı (EPA), temizlik faaliyetlerini denetlemekte ve sorumlu tarafları maliyetlerden sorumlu tutmaktadır. Birleşik Krallık'ta, miktarı ne olursa olsun, denize kazara veya plansız petrol salınımını bildirmek zorunludur. Bu tür olayları bildirmek, gemi sahipleri veya operatörleri, açık deniz tesisleri ve liman kaptanlarına aittir. Bu taraflar, başka bir gemiden veya açık deniz tesisinden denize yapılan herhangi bir petrol deşarjını mümkün olan en kısa sürede en yakın kıyı devletine bildirmelidir.

Çeşitli yasa ve yönetmeliklerin uygulanması, 1980'lerden bu yana dünya çapında denizlerdeki petrol sızıntılarını önemli ölçüde azaltmıştır. Ancak, büyük petrol sızıntıları düzensiz olarak meydana gelmeye devam etmektedir. Örneğin, 20 Nisan 2010'daki Deepwater Horizon patlaması, Meksika Körfezi'ne üç ay boyunca petrol dökülmesine neden olmuştur. Bu felaket, kayıtlara geçen

dünyanın en büyük kazara deniz petrolü kazasıdır. Kuyu kapatılmadan önce tahmini 4,9 milyon varil ham petrol denize salınmıştır. Kasım 2010'un sonlarında, Louisiana'daki 510 km'lik kıyı şeridi ham petrol yığınlarıyla kaplanmıştır. Sızıntı, Körfez'deki deniz ve yaban hayatı habitatlarına ve balıkçılık ve turizm endüstrilerine büyük zarar vermiştir (Liu ve ark., 2016).

SONUÇLAR

Deniz ekosistemlerini petrol sızıntılarının etkilerinden korumak için en iyi yol, bunların ilk etapta olmasını önlemektir. Petrol sızıntılarını önlemek için birkaç şey yapılabilir, bunlar arasında petrol sondajı ve taşımacılığı için güvenlik prosedürlerini iyileştirmek, petrol sızıntılarını temizlemek için daha iyi teknolojiler geliştirmek ve petrol endüstrisi için katı düzenlemeler oluşturmak yer alır. Petrol sızıntılarını önleyerek deniz ekosistemlerini ve onlara bağımlı olanları korumaya yardımcı olunabilir (Purohit ve ark., 2024).

Birçok farklı ülkenin hükümetleri birkaç temel kural üzerinde anlaşmıştır. Petrol şirketleri herhangi bir petrol sızıntısı veya dökülmesi için önceden bir eylem planı hazırlamalıdır. Eylem planlarında ele alınması gereken konular belirlenebilir. Örneğin olay bilgilerinin nasıl ve kiminle paylaşılması gerektiği, doğru temizleme yöntemini kullanarak bu sızıntı ve dökülmelerin nasıl durdurula bilirliği, petrolün dökülen veya salınan yerden uzaklaşmasının nasıl durdurula bilirliği, petrolün yer altına veya yüzey suyuna ulaşmasının ve onu etkilemesinin nasıl önlenebileceği, bunların dışında, petrol tankeri tasarımındaki kusurlar, petrol sızıntıları için acil müdahale sistemleri, yangın ve patlamaları önleme teknolojileri, petrol kirliliğinin neden olduğu hasarı telafi etme prosedürleri, insan faktörleri ve gemi kayıt sistemlerinin yönetimi gibi kritik endişeleri de belirlemelidir (Zhang ve ark., 2021).

KAYNAKLAR

- Purohit, B. K., Tewari, S., Prasad, K. S. N. V., Talari, V. K., Pandey, N., Choudhury, P., & Panda, S. S. (2024). Marine Oil Spill Clean-up: A Review on Technologies with Recent Trends and Challenges. *Regional Studies in Marine Science*, 103876.
- Passow, U., Lee, K., (2022). Future oil spill response plans require integrated analysis of factors that influence the fate of oil in the ocean. *Curr. Opin. Chem. Eng.* 36, 100769.
- Pezeshki, S.R., Hester, M.W., Lin, Q., Nyman, J.A., (2000). The effects of oil spill and cleanup on dominant US Gulf coast marsh macrophytes: a review. *Environ. Pollut.* 108 (2), 129–139.
- Singh, H., Bhardwaj, N., Arya, S.K., Khatri, M., (2020). Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials. *Environ. Nanotechnol., Monit. Manag.* 14, 100305.
- Hadavand, M., Azadbakht, F., Ghazanfari, H., (2022). International Maritime Organization and Civil Liability for Offshore Oil Pollution. *Int. Stud. J. (ISJ)* 18 (4), 161–177.
- Zhang, W., Li, C., Chen, J., Wan, Z., Shu, Y., Song, L., Xu, L., Di, Z., (2021). Governance of global vessel-source marine oil spills: Characteristics and refreshed strategies. *Ocean Coast. Manag.* 213, 105874.
- Xie, M., Li, Y., Zhang, Z., Fu, Q., & Jiang, H. (2025). Remote sensing of the oil spills caused by ships: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 214, 117754.
- Alea, C., Ruiz, C. I., Yap, J. B., Molina, E. F., Saballa, A. J., Ñuneza, J. S., & Bacharo, K. B. B. (2022). An investigation of aquatic oil spills in the Philippines from 2000 to 2021. *Marine Pollution Bulletin*, 185, 114241.
- Schmidt-Etkin, D., 2011. Spill occurrences: a world overview. In: *Oil Spill Science and Technology*. Gulf Professional Publishing, pp. 7–48.
- Yaghmour, F., Els, J., Maio, E., Whittington-Jones, B., Samara, F., El Sayed, Y., & Mupandawana, M. (2022). Oil spill causes mass mortality of sea snakes in the Gulf of Oman. *Science of the Total Environment*, 825, 154072.
- Cao, R., Guo, J., Rong, Z., Chen, H., & Lv, X. (2025). Oil pollution risks on coastlines in the Eastern China Seas. *Environmental Pollution*, 372, 125994.
- Rao, V. T., Suneel, V., Raajvanshi, I., Alex, M. J., & Thomas, A. P. (2022). Year-to-year variability of oil pollution along the Eastern Arabian Sea: The impact of COVID-19 imposed lock-downs. *Marine Pollution Bulletin*, 175, 113356.

Liu, X., Guo, M., Wang, Y., Yu, X., Guo, J., Tang, C., & Li, B. (2016). Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea. *Marine pollution bulletin*, 110(1), 194-202.



Üretim için Tasarım Bakış Açısına Göre İmplant Uygulamalarının İncelenmesi

Hakan Burçin Erdoğan¹

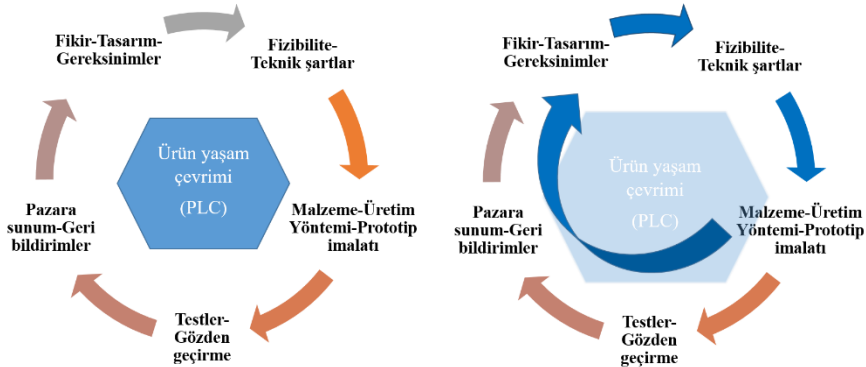
¹Dr. Öğr. Üyesi ,İzmir Kavram Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı, İzmir, Türkiye, ORCID: 0000-0002-2947-7510

1. Giriş

Endüstriyel uygulamalarda ürün tasarımına doğrudan etki eden malzeme ve üretim yönteminin seçimi önemli rol oynamaktadır. Ürün tasarımında müşteri beklentilerinin en uygun biçimde karşılanması için göz önünde bulundurulması gereken iki temel unsur olarak; yarar ve görünüm ön plana çıkmaktadır. Ürün tasarım sürecinin başlamasını sağlayan ürün geliştirme işlemleri, firmaların ticari rekabette yeni bir ürün ortaya koymalarına veya mevcut ürüne yeni özellikler katarak piyasaya sürmelerine imkân tanımaktadır. Geleneksel üretim yöntemlerinin yanında son yıllarda hızla gelişim gösteren üç boyutlu (3D) baskı veya eklemeli/katmanlı imalat yöntemleri, ürün geliştirme süreçlerine olumlu katkı sağlamıştır. 3D baskı yöntemleriyle polimer, kompozit, seramik malzemelerin kalıp maliyeti olmaksızın hızla üretilmesi sağlanmaktadır [1-3]. Ayrıca, ürün tasarımında ağırlık azaltılması (topoloji optimizasyonu) ve mekanik özelliklerin artırılması eş zamanlı yapılabilmektedir [4-6]. Bu kapsamda, üretilen parçanın imalat yöntemine göre tasarım esaslarının önemi artmıştır. Üretim için tasarım (Design for Manufacturing) üretim kriterlerine göre ürün tasarım sürecinin uyumuna odaklanan bir kavramdır. Bu yaklaşımın temeli, ürün tasarımı ve süreç planlamasının eşgüdüm içerisinde tamamlanmasıdır [7-9]. Bu çalışmada, 3D baskı yöntemiyle üretilen medikal implantların üretim yöntemine göre tasarım süreçleri incelenmiştir.

2. Üretim için Tasarım İhtiyaçları

Ürün tasarım sürecinin genel kabul görmüş modeli, ürün yaşam çevrimi (Product Life Cycle) aşamalarından gelen girdilerle, istenen gereksinimlere dayalı çözüm üreten bir kavramdır (Şekil 1). Her sektörün veya firmanın ihtiyaçları, tasarım sürecini bölme biçimleri bakımından farklılık göstermektedir. Buna rağmen, birçok ürün tasarım yönteminde boyutlandırma ve alt montajların içerdiği kavramsal tasarım, fonksiyonel tasarım, analiz ve gereksinimler ortaktır.



Şekil 1. Ürün yaşam çevrimi ve döngünün değişimi

Fikirden piyasaya sürülen ürüne kadar olan adımların zorlayıcı kısmı üretim yönteminin belirlenmesidir. Buna göre, ürün yaşam çevrimindeki tasarım aşamasında seçilen malzemeye göre üretim yönetiminin ve döngü içerisinde yeni bir çevrim oluşması anlamına gelmektedir (Şekil 1).

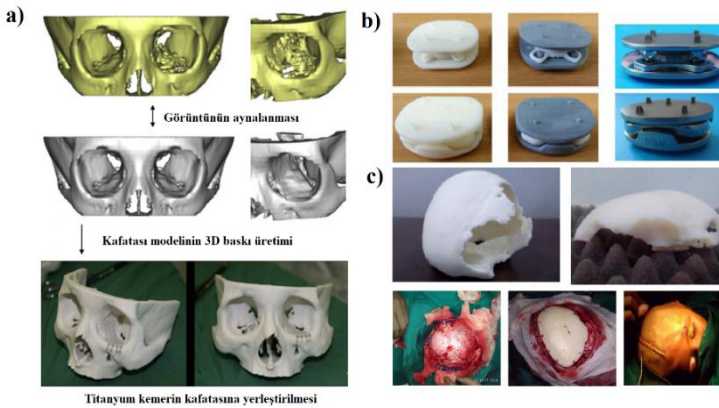
Mekanik ürün tasarımı için üretim yöntemi belirlenirken dikkate alınan temel noktalardan bazıları şunlardır;

- 1- Tekil parçaların ağırlıkları ve montaja uygulanabilirliği
- 2- Mümkün olan en az bağlantı elemanı kullanarak montaj yapılması
- 3- Takım maliyetleri ve proses esnasında gereken malzemelerin seçimi
- 4- Zaman planlamasının uygunluğu

Bu temel noktalar sayesinde maliyet minimizasyonu, yeniden üretilebilirlik ve atık takibi açısından ele alınmaktadır.

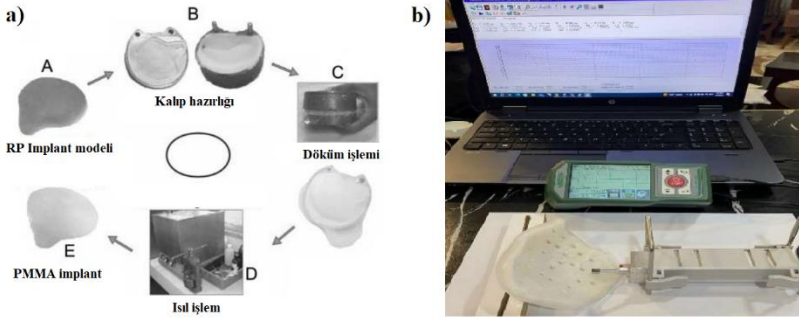
3. 3D Baskı için Tasarım

Mevcut üretim teknolojileri arasında yer bulan ve hızlı prototipleme terimiyle endüstride kullanılmaya başlayan 3D baskı yöntemleri önemli tercihlerden biri olmuştur [10.11]. Başta otomotiv, savunma ve uzay sanayi, eğitim ve medikal konular olmak üzere geniş kullanım alanına sahiptir [12-15]. Üretim için tasarımın temel fikrine uyum sağlayan 3D baskı yöntemi sayesinde hızı ve basit çözümler sağlanmıştır. Şekil 2’de omurilik diski, çene ve kafatası cerrahisi BT (Bilgisayarlı Tomografi) görüntüsünün işlenmesiyle başlayan üretim sürecinin sonuçları yer almaktadır. Burada, cerrahi müdahale öncesi ön operasyon planlamasında faydalı olduğu gibi doğrudan kullanım için de uygun olmaktadır [16-18].



Şekil 2. (a) Görüntünün oluşturulması, işlenmesi ve prototip üretimi, (b) Omurilik diski prototipi, (c) Kafatası için bölgesel implant üretimi ve cerrahi uygulaması.

3D baskı yöntemiyle hızlı prototipleme olarak model çıkarılması ve kalıpta üretimi gerçekleştirilen bir kafatası implantı Şekil 3’de görülmektedir. Geçmiş uygulamalarda biyouyumlu mazlemelerin doğrudan üretimine imkân tanıyan 3D baskı yöntemleri yetersiz kaldığından, model üretimi sonrasında uygun kalıplama tekniğiyle elde edilmektedir [19]. PMMA (Polimetil Metakrilat) malzemeden implant örneğinde olduğu gibi, fiziksel model ve planlanan model arasındaki ölçüsel sapmanın minimum olduğu doğrudan 3D baskı imalatı sağlanabilmektedir [20].



Şekil 3. (a) Hızlı prototipleme implant modeli ve üretimi, (b) Modelin geometrik toleransının ölçülmesi.

Böylece, ilave kalıp maliyeti ve malzemeye uygulanan ısıl işlem proses maliyetleri süreç içerisinde çıkarılmaktadır. İmplant üretimi için tasarım ve montaj açısından ele alındığında ürün-yaşam çevriminde doğrudan hastaya nakil edilebilir implant üretimi avantaj sağlamaktadır. Başka bir çalışmaya göre, hastaya ait kafatası görüntüsü ve yapısal bütünlük verilerinin sanal ortamda yeniden oluşturularak doğrulanmasıyla 3D üretim yapılabilir [21]. Benzer bir yaklaşımla, göğüs kafesi kusuru bulunan bir hastaya, özel olarak implant tasarımı gerçekleştirilmiştir [22]. Ameliyat sırasında oluşan hataları en aza indirmenin yanı sıra; titanyum alaşımının kemik ve eklem bağlantısı kullanılmıştır. Bu sayede, solunumun uygun değerlerde olmasıyla, enfeksiyona daha az duyarlılık ve genel olarak fizyolojik ve morfolojik açıdan göğüs kafesine uyum sağlamıştır. Hastaya nakil öncesinde hızlı prototipleme, bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve gerilme analizleri sayesinde son ürün için yeterli hassasiyete ulaşıldığı belirtilmiştir.

4. Sonuç

Üretim için tasarım bakış açısına göre faydalı görülebilecek birçok unsur dikkati çekmektedir. Özellikle hızlı prototipleme proses adımları incelendiğinde, tarama görüntüsüyle nokta bulutu olarak alınan veri kümesinin katı model haline getirilmesi ve sonrasında optimum tasarımın yine üretim yöntemi tercihiyle göre

belirlenmesi önem kazanmıştır. Tasarım temelindeki yaklaşım sayesinde montajlı parça sayısının azaltılması, kalıp ve takım maliyetlerinin düşürülmesi ve çevreye zararlı etkilerin azaltılması sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, üretim için tasarım açısından medikal implant konusu ele alınmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, 3D baskı üretim yönteminin seçiminde implantın kullanım amacı ve görüntü verisinin uygun yöntemlerle işlenerek geometrik hassasiyete ulaşılmasının önemi vurgulanmıştır. Buna göre, medikal alanda kullanılan implant tasarımlarının üretimi incelendiğinde dört temel sonuca ulaşılmaktadır:

- Hastaya ait kişiye özel üretim için görüntü verisinin alınması ve geometrik modelin oluşturulması,
- 3D baskı yöntemi seçiminde; yüzey hassasiyeti, ölçüsel uygunluk ve ölçüsel sapma değerlerinin detaylı analizinin yapılması,
- Cerrahi operasyon öncesi somut katı model ya da üretilen parçanın doğrudan hastaya nakli konularında yöntem ve hassasiyet farklılığının gözetilmesi,
- Hastanın tarama verisinden implant üretimine kadar olan süreçte aradaki geometrik tolerans farklılıkları dikkate alınarak nakil yapılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

1. Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. J. P. M. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia manufacturing*, 35, 1286-1296.
2. Su, A., & Al'Aref, S. J. (2018). History of 3D printing. In *3D printing applications in cardiovascular medicine* (pp. 1-10). Academic Press.
3. Prince, J. D. (2014). 3D printing: an industrial revolution. *Journal of electronic resources in medical libraries*, 11(1), 39-45.
4. Belhabib, S., & Guessasma, S. (2017). Compression performance of hollow structures: From topology optimisation to design 3D printing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 133, 728-739.
5. Kazakis, G., Kanellopoulos, I., Sotiropoulos, S., & Lagaros, N. D. (2017). Topology optimization aided structural design: Interpretation, computational aspects and 3D printing. *Heliyon*, 3(10).
6. Sulaymon, T. A., Petri, H. T., & Rayko, T. (2022). Towards a complex geometry manufacturing: A case study on metal 3D printing of topology optimised bicycle parts with lattices. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1515-1520.
7. Battaia, O., Dolgui, A., Heragu, S. S., Meerkov, S. M., & Tiwari, M. K. (2018). Design for manufacturing and assembly/disassembly: joint design of products and production systems. *International Journal of Production Research*, 56(24), 7181-7189.
8. Fatima, S. B. A., Effendi, M. S. M., & Rosli, M. F. (2018, November). Design for manufacturing and assembly: A review on integration with design sustainability. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2030, No. 1). AIP Publishing.
9. More, N. K., Buktar, R. B., Ali, S. M., & Samant, S. (2015). Design for manufacture and assembly (DFMA) analysis of burring tool assembly. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 2(06,843-849).
10. Chua, C. K., & Leong, K. F. (2014). *3D Printing and additive manufacturing: Principles and applications (with companion media pack)-of rapid prototyping*. World Scientific Publishing Company.
11. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.

12. Macdonald, E., Salas, R., Espalin, D., Perez, M., Aguilera, E., Muse, D., & Wicker, R. B. (2014). 3D printing for the rapid prototyping of structural electronics. *IEEE access*, 2, 234-242.
13. Kroll, E., & Artzi, D. (2011). Enhancing aerospace engineering students' learning with 3D printing wind-tunnel models. *Rapid Prototyping Journal*, 17(5), 393-402.
14. Oleksy, M., Dynarowicz, K., & Aebisher, D. (2023). Rapid prototyping technologies: 3D printing applied in medicine. *Pharmaceutics*, 15(8), 2169.
15. Wawryniuk, Z., Brancewicz-Steinmetz, E., & Sawicki, J. (2024). Revolutionizing transportation: An overview of 3D printing in aviation, automotive, and space industries. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134(7), 3083-3105.
16. Kim, Y. C., Jeong, W. S., Park, T. K., Choi, J. W., Koh, K. S., & Oh, T. S. (2017). The accuracy of patient specific implant prebented with 3D-printed rapid prototype model for orbital wall reconstruction. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 45(6), 928-936.
17. Domanski, J., Skalski, K., Grygoruk, R., & Mróz, A. (2015). Rapid prototyping in the intervertebral implant design process. *Rapid Prototyping Journal*, 21(6), 735-746.
18. Gill, D. K., Walia, K., Rawat, A., Bajaj, D., Gupta, V. K., Gupta, A., ... & Jindal, P. (2018). 3D modelling and printing of craniofacial implant template. *Rapid Prototyping Journal*, 25(2), 397-403.
19. Hieu, L. C., Zlatov, N., Vander Sloten, J., Bohez, E., Khanh, L., Binh, P. H., ... & Toshev, Y. (2005). Medical rapid prototyping applications and methods. *Assembly Automation*, 25(4), 284-292.
20. Obaeed, N. H., & Hamdan, W. K. (2024). Reconstruction and evaluation of 3D Printing PMMA cranioplasty implants. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 18(6), 4233-4245.
21. Neamaha, Z. H., Al-Kindia, L. A., & Al-Kindib, G. (2024). Design and manufacturing of custom 3D printed bone implants. *Engineering and Technology Journal*, 42(6 [Production & Metallurgy Engineering]).
22. Wen, X., Gao, S., Feng, J., Li, S., Gao, R., & Zhang, G. (2018). Chest-wall reconstruction with a customized titanium-alloy prosthesis fabricated by 3D printing and rapid prototyping. *Journal of cardiothoracic surgery*, 13, 1-7.



Dünyada ve Türkiye’de Elektrik Üretim Maliyetlerinin İncelenmesi

***Abdullah Alaa Abdulwahhab Al-Imam¹ & Mustafa Tahir
Akkoyunlu² & Fatih Akkur³***

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye ORCID: 000-0001-5425-6616

² Prof. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye ORCID:0000-0001-5748-6759

³ Dr.Öğr.Üyesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID: 0000-0001-8727-8854

GİRİŞ

Son yıllarda, artan enerji talebi tüm dünyada kritik bir konu haline gelmiştir. Sanayileşme, kentleşme ve aşırı nüfus, enerji tüketimi üzerinde doğrudan etkilere sahip olmaktadır. Öte yandan enerji talebi ve arz açığı, dünya çapındaki ülkelerde endişe kaynağı haline gelmektedir. Ekonomik büyüme, artan enerji talebini karşılamak için enerji yatırımlarını önemli ölçüde etkilemektedir.

Dünya çapında enerji yatırımlarını yönetmek için birçok türev bulunmaktadır. Finansal endişeler, farklı enerji alternatiflerine yönelik belirsiz ve esnek olmayan talep, kapasite gereksinimleri ve hükümet politikaları, uygun enerji alternatiflerinin seçimini etkileyen faktörlerden bazılarıdır. Özellikle elektrik, dünya çapında enerjinin son kullanım alanları arasında yükselen bir güçtür. Elektrik üretim kaynaklarına olan talep, dünyanın son yıllarda tanık olduğu ekonomik büyüme nedeniyle hızla artmıştır. 1990 ile 2016 yılları arasında küresel elektrik talebi iki katına çıkmış ve 2040 yılına kadar toplam enerji tüketiminin %40'ını oluşturmaya beklenmektedir (EIA, 2017).

Enerji kaynaklarının tüketiminin olumsuz etkisini azaltmak ve düşük karbonlu teknolojileri teşvik etmek için Ekim 2016'da Paris Anlaşması imzalanmıştır. Bu iklim anlaşmasının kaçınılmaz bir sonucu, yenilenebilir enerji teknolojilerine yapılan yatırımların ciddi oranda büyüme göstermesidir. Ancak gerçekte, yenilenebilir elektrik üretiminin büyümesini teşvik etmeye yönelik hükümet politikaları, yüksek elektrik maliyetleri ve ekonomik büyümeye zarar veren sınırlı elektrik arzıyla sonuçlanmaktadır. Sonuç olarak, yenilenebilir elektrik üretim kaynaklarının avantajlarına rağmen, kömür hala diğer tüm elektrik üretim kaynaklarına kıyasla dünya çapında enerji pazarında güçlü bir rol oynamaktadır (Topçu vd., 2019, Akkoyunlu vd, Pekel vd).

Yukarıda dile getirilenler, politika yapıcılarının toplam maliyetlerini ve faydalarını dikkate almak için elektrik enerjisi üretim alternatiflerini farklı perspektiflerden değerlendirmeleri gerektiğini göstermektedir. Hızla gelişen bir ülke olan Türkiye, Çin'den sonra elektrik talebinde dünyanın ikinci en yüksek büyüme oranına sahiptir (Kaplan ve Aladağ, 2016). Türk ekonomisinin büyümesiyle birlikte, elektrik talebi de hızla artmıştır. Türkiye, ilerleyen yıllarda elektrik üretim maliyetlerini azaltma amacıyla hidro, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının payını artırmayı planlamaktadır. Hükümet ayrıca elektrik üretimi için nükleer santraller inşa etmeyi de planlamaktadır.

Elektrik talebindeki büyüme nihai enerji talebindeki büyümeyi geride bırakmaya devam ettikçe, elektriğin toplam enerji kullanımı içindeki payı da artmıştır. Toplam elektrik talebindeki artış nedeniyle önemli yenilenebilir kaynak yatırımları yapılsa da, ülke giderek enerji ithalatına bağımlı hale gelmiştir; öyle ki, toplam birincil enerji arzının yaklaşık %74'ü, en yüksek paya doğal gaz ve

petrol olmak üzere diğer ülkelerden ithal edilen enerjiyle karşılanmaktadır (IEA, 2016). Bu durumun dünya genelinde de artan petrol fiyatları ile birlikte benzer bir görünüm içerisinde olduğu dile getirilebilir. Bu nedenle hem dünya genelinde hem de Türkiye özelinde elektrik üretim maliyetleri önem kazanmaktadır. Bununla beraber üretim maliyetleri farklı tahmin metodları ile de tahmin edilmektedir.(Akkoyunlu MT vd, Malaslı MZ vd Akkoyunlu MT) . Bu çalışmada da elektrik üretim maliyetleri dünya geneli ve Türkiye özelinde incelenmiştir. Çalışma içerisinde elektrik enerjisinin elde edilmesi ve elde etme yöntemleri, dünyada ve Türkiye’de elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı ve üretim maliyetlerine ait değerler verilmektedir.

1. Elektrik Enerjisinin Elde Edilmesi

1.1. Kısa Tarihçe

Elektrikle ilgili ilk belirtiler bütün kaynaklarda milattan önce 600’lü yılları işaret etmektedir. O dönemde Ege bölgesindeki Aydın ilinde yaşayan Thales hayvan derisi ile ovulan amber ya da kehribarın, saman ya da tüy gibi hafif cisimlere karşı çekme kuvveti gösterdiğini keşfetmiştir. Bu bilgiye göre aslında elektriğin ilk keşfinin Anadolu’da gerçekleştiği söylenebilir. Bundan tam 2200 yıl kadar sonra İngiliz Doktor William Gilbert tarafından statik elektrik ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Oğurlu, 2021). Bu dönemde yapılan çalışmaların ardından Yunanca kehribar anlamına gelen “electricra” kelimesinden şu anda kullandığımız “elektrik” ismi türetilmiş olmuştur. Sonrasında İngiliz Fizikçi Stephen Gark tarafından 1729 yılında “yalıtkanlık” ve “iletkenlik” tanımları yapılmıştır. Daha sonra Fransız Charles François, 1935 yılında pozitif ve negatif maddeleri ortaya koyarak “zıt kutuplar birbirini çeker, aynı kutuplar birbirini iter” temel kuralını tanımlamıştır. 1746 da Amerikalı mucit Benjamin Franklin tarafından meşhur “uçurtma deneyi” ile elektriğin atmosferde bulunan bir şey olduğu kanıtlanmıştır. 1771 yılında de Alessandro Volta, 1820’de Andre Marie Ampere ve 1827’de Simon Ohm tarafından isimlerinden de anlaşılacağı üzere Volt, Amper ve Ohm tanımlamaları yapılmıştır. İngiliz bilim adamı Michael Faraday tarafından elektromanyetizmanın keşfedilmesi ve bu güçten elektriğin elde edilebileceğinin ortaya çıkması önemli bir ilerleme sağlamıştır (Doğanay ve Coşkun, 2020). Alman fizikçiler Friedrich Gauss ve Wilhelm Eduard Weber elektromanyetik bir telgraf sistemi geliştirmişlerdir. 1876 yılına gelindiğinde Graham Bell, elektrik titreşimlerini sese dönüştürmeyi başararak telefonu icat etmiştir. Hemen ardından çalışmalarını yayınlayan Thomas Alva Edison, akkor lambayı (ampul) keşfettiğini duyurmuştur. 1883 yılında Nikola Tesla tarafından Tesla bobini ile başlatılan alternatif akım çalışmaları hızlanmıştır. Bu bobin sayesinde elektriğin gerilimi dönüştürülebilecek ve uzak mesafelere iletimi kolaylaştırılacaktır. Sonuç olarak bakıldığında ilk keşfi milattan öncesine dayanan ve şu ana kadar

yapılmış en faydalı teknolojik icat olduğu düşünölen elektrik günlük hayatımızın en önemli araçlarından biri haline gelmiştir (Ceylan, 2023).

1.2. Elektriğin Elde Edilme Yöntemleri

Elektrik enerjisi, günümüz dünyasında ve muhtemelen gelecekte de vazgeçilemez ihtiyaçların en başında olacaktır. İnsanoğlunun elektrik enerjisine olan ihtiyacı her geçen gün artmakta ve bu nedenle farklı kaynaklardan elektrik enerjisi elde edebilme ile ilgili arayışları da hızlanmaktadır. Bu bölümde elektriğin elde edilmesi için kullanılan en temel yöntemlerden bahsedilecektir. Bu yöntemlerden bazıları zamanla geliştirilerek büyük çaplı santrallerde kullanılabilir hale gelebilmiştir. Bazıları ise henüz üretim tesislerinde kullanılabilecek şekilde geliştirilememiştir. Halen teorik olarak değerlendirilen yöntemler de bulunmaktadır. Özellikle çevreci ve sürdürülebilir kaynak arayışının hızlandığı bu yüzyılda çok daha farklı kaynaklardan elektrik elde edilebileceği düşünülmektedir (Kaşıkçı, 2013). Bu yöntemlerden en çok bilinenleri şu şekilde sıralanabilir (Oğurlu, 2021).

- Elektrostatik etki ile elektrik
- Basınç ile elektrik
- Işık ile elektrik
- Isı ile elektrik
- Kimyasal tepkimeler ile elektrik
- Elektromotor kuvvet ile elektrik enerjisi elde etme yöntemi

Dile getirilen elektrik enerjisi üretim yöntemleri alt başlıklarda kısaca açıklanmıştır.

1.2.1. Elektrostatik Etki İle Elektrik Üretimi

Statik ya da durağan elektrik, doğal yollarla ya da farklı malzemelerin birbiri ile etkileşmesi sonucu ortaya çıkan yüktür. Bir maddenin pozitif ya da negatif elektrik yüke sahip olması olarak tanımlanabilir. Statik elektrik yükü ile yüklü olan maddelerde herhangi bir elektron akışı ya da hareketi yoktur. Sadece kendileri ile aynı yükle yüklü olan maddeleri itmekte zıt yükle yüklü olan maddeleri ise çekmektedir (Kocaman, 2003).

Bir cismin nötr olması cisimde hiç yük olmadığı anlamına gelmemekte, artı yüklerin sırasıyla eksi yüklerin sayısının birbirine eşit olduğu anlamına gelmektedir. Normal durumda, yüksüz bir cismin üzerindeki artı ve eksi yüklerin sayısı eşit bulunmaktadır. Cisimlerin normal durumunda daha fazla artı veya eksi elektrik yüküyle yüklenmesine elektriklenme denilmektedir (Oğurlu, 2021).

Elektrostatik jeneratörler, mekanik işi elektrik enerjisine dönüştürmek için manuel (veya başka) güç kullanarak veya elektrik akımları kullanarak çalışmaktadırlar. Bu makinelerin çalışmaları için normal durumdan fazla artı ya da eksi yük olması ve cisimler arasında farklı şekillerde etkileşimlerin olması gerekmektedir. Bunlar ise sürtünme, dokunma ya da etki ile elektriklenme şeklinde olmaktadır. Sürtünme ile elektriklenmeye en basit örnek yıldırım olayının gerçekleşmesidir. Dokunma ile elektriklenmeye örnek olarak negatif yüklü plastik bir çubuğun metal küreye dokundurularak elektriklenmenin gerçekleşmesi olayı gösterilebilir. Etki ile elektriklenme ise bir cisme dokunmadan uzaktan etki ile (elektiriksel indüksiyon) gerçekleşmektedir (Ceylan, 2023).

1.2.2. Basınç İle Elektrik Üretimi

İletken olmayan ve kristal yapıda bulunan bazı özel maddelere basınç uygulandığında her iki yüzü arasında potansiyel fark oluştuğu 1800’lü yıllarda keşfedilmiştir. Bu malzemeler Latince bastırma anlamına gelen “piezo” ve elektrik kelimelerinin birleşiminden oluşan piezoelektrik malzemeler olarak isimlendirilmişlerdir. Piezoelektrik malzemelerin üzerine basınç uygulandığında uçları arasında bir iletken bağlantı yapılırsa mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi sağlanmış olmaktadır (Kocaman, 2003).

Piezoelektrik malzemelerin elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan türleri kurşun-zirkonyum-titanyum (PZT) piezo-seramiklerdir. Bu malzemelere basınç uygulandığında malzemenin kutupları arasındaki uzaklık azalmaktadır. Yüzey kısmında yük birikimi artmaktadır. Böylece basınç uygulanan her iki yüzey arasında bir potansiyel fark meydana gelmektedir. Bu yüzeyler arasında bir iletken yol olması durumunda bir akım meydana gelmektedir. Böylece mekanik etki elektiriksel büyüklüğe dönüşmektedir. Bu yöntemin yaygın olarak elektrik santrallerinde bir kullanımı henüz bulunmamaktadır. Ancak günümüzde quartz saatler, manyetolu olarak bilinen çakmaklar ve otomobillerdeki hava yastıklarında bu teknolojiye dayanılarak kullanılmaktadır (Doğanay ve Coşkun, 2020).

1.2.3. Işık İle Elektrik Üretimi

Işığın en küçük birimi olarak bilinen fotonlardan elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Bu tür sistemler en genel haliyle fotovoltaiik sistemler olarak tanımlanmaktadır. Fotovoltaiik sistemlerin en küçük ünitesi güneş pilleridir. Güneş pillerinden elde edilen çok küçük potansiyeller birbirlerine eklenerek büyük çaplı üretim tesisleri kurulabilmektedir. Bu teknoloji ile kurulan elektrik santralleri gün geçtikçe yaygınlaşmakta ve daha verimli hale gelmektedir. Kısaca güneş enerjisi sistemleri (GES) olarak dile getirilen bu yöntem ile elektrik elde etme şekilleri termal güneş santralleri (SV) ve fotovoltaiik güneş santralleri (PV) olarak iki ana gruba ayrılabilir. Termal güneş santralleri parabolik yansıtıcı

(CSP), güneş kulesi, stirling motoru ve CLFR şeklinde dile getirilebilir. fotovoltaiik güneş santralleri ise şebekeye bağlı sistemler (on-grid), şebekeye bağlı olmayan sistemler (off-grid) ve yoğunlaştırılmış fotovoltaiik sistemler (CPV) şeklinde dile getirilebilir (Sayar, 2003).

1.2.4. Isı İle Elektrik Üretimi

Isı ile elektrik akımı elde etme yöntemi, birbirinden farklı özellikteki iki metalin kaynak yapılarak birleştirilmesi ile elde edilen yeni malzemenin ısıtıldığında uçları arasında potansiyel fark meydana gelmesi prensibine dayanmaktadır. Isı enerjisinden faydalanılarak elektrik üreten bu tür sistemler ısııl çift ya da “termokupl” olarak isimlendirilmektedirler (Çavuş ve Usta, 2015).

Bu yöntemle elektrik elde etme yönteminin, termik santraller ile karıştırılmaması gerekmektedir. Termik santraller, herhangi bir yakıtın yanması sonucu elde edilen sıcaklık ile yine bir mekanik enerji elde edilmesi için kullanılmaktadır. Termik santrallerden farklı olarak ısı farklarından yararlanılarak elektrik enerjisi üreten sistemler “termoelektrik jeneratör” olarak isimlendirilmektedir. Thomas Seebeck tarafından ortaya çıkarılan ve kendi adıyla isimlendirildiği olayda termoelektrik modülün bir yüzeyinin ısıtılıp diğer yüzünün soğutulması ile termoelektrik jeneratör elde edilmektedir (Oğurlu, 2021).

Isıl çift yöntemi ile elektrik enerjisi elde edilmesi henüz büyük çaplı üretimler için ticari olarak kullanım alanı bulamamıştır. Ancak elektronik ev aletleri başta olmak üzere endüstrinin farklı alanlarında kullanılan önemli bir özelliktir (Ceylan, 2023).

1.2.5. Kimyasal Tepkimeler İle Elektrik Üretimi

Bakır ve çinko levhaların sülfürik asit çözeltisine daldırılması ile her bir levha çözelti içinde farklı kimyasal tepkimelere maruz kalmaktadır. Bu iki levhanın bir iletkenle birleştirilmesi sonucunda levhaların arasında bir elektron akışı elde edilmektedir. Kimyasal olarak “elektroliz” olayının tersi olan bu etkiden faydalanılarak akü ve pil teknolojileri geliştirilmiştir. Bu tür elektrik üretimi daha çok depolama teknolojilerinde kullanılmaktadır (Doğanay ve Coşun, 2020).

1.2.6. Elektromotor Kuvvet İle Elektrik Üretimi

Elektrik enerjisi üretmek için kullanılan yöntemlerden biri de manyetik etkidir. Santrallerde üretilen ve elektrik şebekesinde kullanılan elektrik enerjisinin büyük çoğunluğu, sanayide ve evlerde kullanılan pek çok elektrikli aletin çalışması da aynı etki ile sağlanmaktadır. Bu etki en basit anlatımıyla içinden akım geçen bir iletkenin etrafında bir elektrik alan oluşturması prensibine dayanmaktadır. Aynı şekilde yönü değiştirilen manyetik alanın içerisinde bulunan bir iletkenin içinden akım geçecektir. Yine sabit bir manyetik alanın

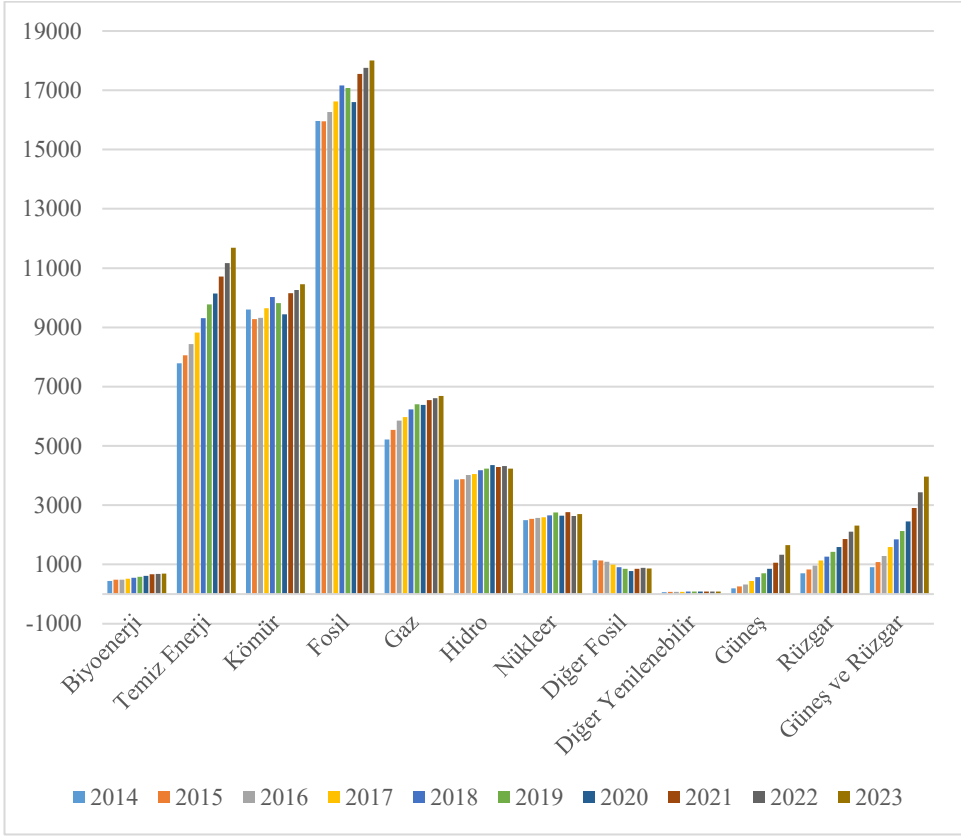
içindeki iletken uygun şekilde hareket ettirildiğinde yine iletken içinden bir akım akması sağlanmış olmaktadır (Oğurlu, 2021).

2. Dünyada ve Türkiye’de Elektrik Enerjisi Üretimi

Elektrik enerjisi üretimi kaynaklara göre dokuz üretim türüyle eşleştirilmiştir. Bunlar, Biyoenerji, Kömür, Gaz, Hidro, Nükleer, Diğer Fosil, Diğer Yenilenebilir, Güneş ve Rüzgârdır. Biyoenerji tipik olarak (IPCC, IEA ve diğerleri tarafından) yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak varsayılmıştır, çünkü fosil yakıtların aksine orman ve enerji bitkileri yeniden yetiştirilebilir ve yenilenebilirdir.

Grafiklerde, güneş enerjisi hem termal güneş enerjisi hem de fotovoltaik güneş enerjisi üretimini içermekte ve mümkün olan yerlerde dağıtılmış güneş enerjisi üretimi de dâhil edilmektedir. Mümkün olan yerlerde, Hidro üretim, pompajlı hidro üretimden gelen herhangi bir katkıyı hariç tutmaktadır. Biyoenerji yenilenebilir olarak sınıflandırılmıştır. Yenilenebilir enerji içerisinde rüzgâr, güneş, hidro, biyoenerji ve diğer yenilenebilir enerjiden elde edilen elektrik üretimi bulunmaktadır. Temiz enerji kapsamında yenilenebilir enerji ve nükleer enerjiden elde edilen elektrik üretimi bulunmaktadır. Diğer Yenilenebilir Enerji üretimi jeotermal, gelgit ve dalga üretimini içermektedir. Diğer Fosil üretimi, petrol ve petrol ürünlerinin yanı sıra üretilen gazlar ve atıklardan elde edilen üretimi kapsamaktadır.

Grafik 1: Kaynaklara Göre Dünyada Elektrik Üretimi (TWh)



Kaynak: EMBER Veriseti, 2025. <https://ember-energy.org/data/electricity-data-explorer/>

Grafik 1, kaynaklara göre dünya geneli elektrik üretimini göstermektedir. 2014-2023 dönemini kapsayan verilere göre en fazla kömür ve gazdan elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Fakat güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi son yıllarda ciddi oranda artış göstermiştir.

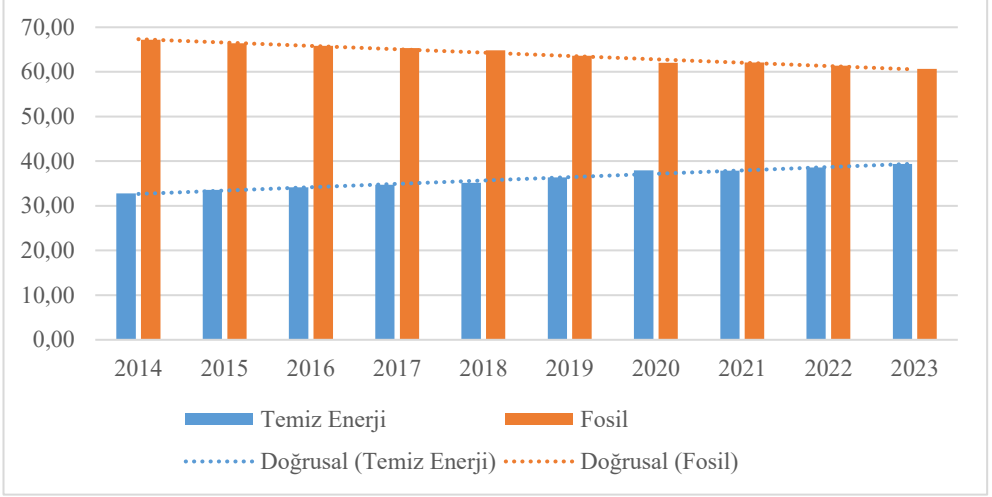
Tablo 1. Kaynaklara Göre Dünyada Elektrik Üretimi (%)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Biyoenerji	1.88	2.02	1.98	2.03	2.07	2.16	2.30	2.37	2.37	2.33
Kömür	40.42	38.65	37.75	37.91	37.88	36.58	35.29	35.92	35.48	35.21
Gaz	21.97	23.08	23.69	23.49	23.53	23.86	23.88	23.15	22.84	22.52
Hidro	16.30	16.16	16.25	15.93	15.78	15.75	16.26	15.17	14.94	14.27
Nükleer	10.52	10.55	10.41	10.19	10.04	10.26	9.90	9.77	9.13	9.09
Diğ. Fosil	4.81	4.72	4.39	3.91	3.43	3.18	2.90	3.02	3.06	2.91
Diğ.Yenil.	0.29	0.30	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	0.31	0.30	0.30
Güneş	0.83	1.07	1.33	1.75	2.17	2.62	3.20	3.73	4.60	5.58
Rüzgâr	2.97	3.45	3.89	4.48	4.79	5.29	5.95	6.57	7.28	7.79

Kaynak: EMBER Veritabanındaki bilgiler ile yazar tarafından hazırlanmıştır.

2014-2023 yılları arasında dünya genelinde kaynaklara göre elektrik enerjisi üretimi paylarına bakıldığında, kömür, gaz ve hidro kaynaklar, en fazla elektrik üretimine sahiptir. 2023 yılı verilerine göre elektrik üretiminde kömür %35,21 ile lider konumdadır. Bunu %22,52 ile gaz, %14,27 ile hidro, %9,09 ile nükleer izlemektedir. Rüzgâr enerjisinin elektrik üretimindeki payı %7,79 iken güneş enerjisinin payı %5,58'dir. (

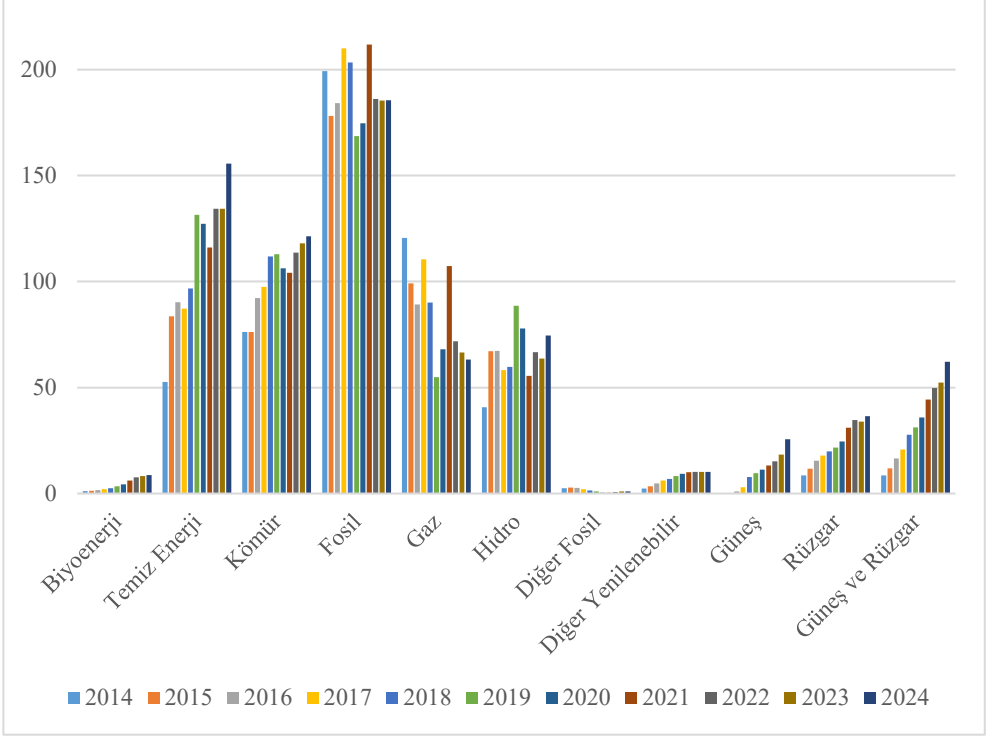
Grafik 2. Dünyada Temiz Enerji ve Fosil Yakıtlardan Elektrik Üretimi (%)



Kaynak: EMBER Veritabanındaki bilgiler ile yazar tarafından hazırlanmıştır.

Grafik 2, dünya genelinde elektrik üretim paylarını temiz enerji ve fosil yakıtlar olarak 2014-2023 dönemini kapsayacak şekilde göstermektedir. Fosil yakıtların elektrik üretimindeki payı 2014 yılından itibaren düşüş göstermektedir. Buna karşın temiz enerjinin elektrik üretimindeki payı yükselmektedir. 2014 yılında elektrik üretiminde fosil yakıtların payı %67,21 iken 2023 yılına gelindiğinde bu oran %60,64'e düşmüştür. Elektrik üretiminde temiz enerjinin payı ise 2014 yılında %32,79 olarak gerçekleşirken 2023 yılına gelindiğinde bu oran %39,36'ya çıkmıştır. Grafikteki doğrusal eğimlerden de bu durum gözükmemektedir.

Grafik 3. Kaynaklara Göre Türkiye’de Elektrik Üretimi (TWh)



Kaynak: EMBER Veriseti, 2025.

Kaynaklara göre Türkiye’de elektrik üretimine bakıldığında kömür, güneş, rüzgâr ve hidro yıllara göre artış eğilimindedir. Buna karşın gazdan üretilen elektrik değerinde düşüş görülmektedir. Grafikte dikkat çeken bir ayrıntı, temiz enerjinin elektrik üretiminde son yıllarda fosil yakıtlardan üretilen elektrik miktarına yakınlığıdır. Bunda son yıllarda Türkiye’de gerçekleştirilen güneş ve rüzgâr enerjisinden elektrik üretimine yapılan yatırımların payı bulunmaktadır.

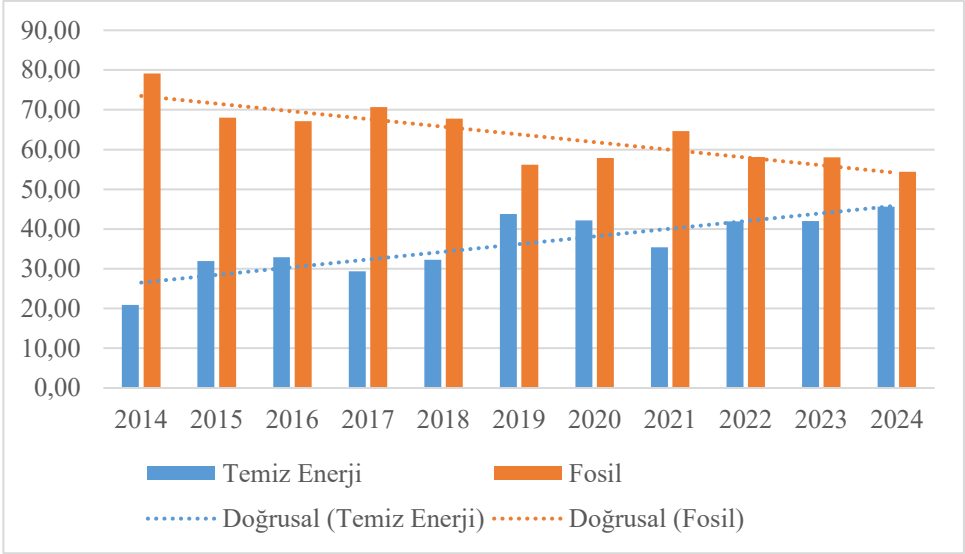
Tablo 2. Kaynaklara Göre Türkiye’de Elektrik Üretimi (%)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Biyoenerji	0.43	0.47	0.59	0.71	0.83	1.13	1.44	1.88	2.38	2.57	2.54
Kömür	30.27	29.09	33.63	32.79	37.25	37.60	35.19	31.76	35.44	36.91	35.55
Gaz	47.86	37.90	32.52	37.17	30.01	18.28	22.54	32.74	22.42	20.79	18.55
Hidro	16.13	25.65	24.50	19.58	19.91	29.53	25.78	16.93	20.79	19.93	21.85
Diğ. Fosil	0.99	1.05	0.97	0.70	0.48	0.32	0.11	0.11	0.23	0.29	0.29
Diğ.Yenil.	0.94	1.31	1.76	2.06	2.30	2.74	3.09	3.08	3.19	3.17	2.99
Güneş	0.01	0.07	0.38	0.97	2.60	3.19	3.71	4.05	4.73	5.75	7.52
Rüzgâr	3.38	4.45	5.66	6.02	6.62	7.21	8.15	9.46	10.82	10.59	10.71

Kaynak: EMBER Veritabanındaki bilgiler ile yazar tarafından hazırlanmıştır.

Tablo 2, Türkiye özelinde kaynaklara göre elektrik üretim paylarını vermektedir. 2024 yılı için en yüksek payın %35,55 ile kömür, %21,85 ile hidro ve %18,55 ile gaz olduğu görülmektedir. Elektrik üretiminde güneş enerjisinin payı 2024 yılı için %7,52, rüzgâr enerjisinin payı ise %10,71 olarak gerçekleşmiştir.

Grafik 4. Türkiye’de Temiz Enerji ve Fosil Yakıtlardan Elektrik Üretimi (%)



Kaynak: EMBER Veritabanındaki bilgiler ile yazar tarafından hazırlanmıştır.

Grafik 4, Türkiye için elektrik üretiminde temiz kaynakların ve fosil yakıtların payını 2014-2024 dönemi için göstermektedir. Grafik incelendiğinde yıllar içerisinde temiz enerji ile fosil yakıtların yakınsandığı görülmektedir. 2014 yılında elektrik üretiminde temiz enerjinin payı %20,89 iken 2024 yılına gelindiğinde bu oran %45,62’ye çıkmıştır. 11 yılda 2 katından daha fazla bir artış yaşandığı dile getirilebilir. Buna karşın elektrik üretiminde fosil yakıtların payı 2014 yılında %79,11 iken 2024 yılına gelindiğinde %54,38’e düştüğü görülmektedir.

3. Dünyada ve Türkiye’de Elektrik Enerjisi Üretimi Maliyetleri

Farklı elektrik üretim yöntemleri önemli ölçüde farklı maliyetlere yol açabilmekte ve bu maliyetler elektriğin kullanıldığı zamana göre önemli ölçüde farklı zamanlarda ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca, bu maliyetlerin hesaplamaları bir yüke veya elektrik şebekesine bağlantı noktasında yapılabilmektedir. Maliyetler başlangıç sermayesi, sürekli işletme, yakıt ve bakım maliyetlerinin yanı sıra işletmeden çıkarma ve çevreye verilen zararın giderilmesi maliyetlerini de içermektedir. Farklı yöntemleri karşılaştırmak için, genellikle kilovat-saat veya megavat-saat başına verilen enerji birimi başına maliyetleri karşılaştırmak yararlıdır. Bu tür bir hesaplama politika yapıcılara, araştırmacılara ve diğerlerine tartışmaları ve karar alma süreçlerini yönlendirmede yardımcı, ancak genellikle bir iskonto oranı aracılığıyla zamanlamadaki farklılıkları dikkate alma ihtiyacı nedeniyle karmaşık olmaktadır.

3.1. Birim Başına Maliyet Ölçümleri

Birime indirgenmiş enerji maliyeti (LCOE), farklı elektrik üretim yöntemlerinin tutarlı bir temelde karşılaştırılmasına olanak tanıyan bir güç kaynağı ölçüsüdür. LCOE ayrıca, projenin ömrü boyunca zarar etmemek için elektriğin satılması gereken asgari sabit fiyat olarak da düşünülebilir. Bu, varlığın ömrü boyunca tüm maliyetlerin net bugünkü değerinin, varlığın o ömür boyunca uygun şekilde iskonto edilmiş toplam enerji çıktısına bölünmesiyle kabaca hesaplanabilmektedir (IEA, 2020).

Tipik olarak LCOE, genellikle 20 ila 40 yıl olan bir tesisin tasarım ömrü boyunca hesaplanır ve kilovatsaat veya megavattgün başına, örneğin AUD/kWh veya EUR/kWh veya megavatsaat başına, örneğin AUD/MWh cinsinden verilmektedir. Ancak, belirli bir enerji kaynağı için LCOE'nin analiz edilen varsayımlara, finansman koşullarına ve teknolojik dağıtıma büyük ölçüde bağlı olması nedeniyle, farklı LCOE çalışmalarını ve bilgi kaynaklarını karşılaştırırken dikkatli olunmalıdır. Özellikle, kapasite faktörünün varsayımı, LCOE'nin hesaplanması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Branker vd., 2011).

ABD Enerji Bilgi İdaresi, rüzgâr veya güneş gibi dağıtılamayan kaynakların dengelenmiş maliyetlerinin, fosil yakıtlar veya jeotermal gibi dağıtılabılır kaynakların LCOE'sinden ziyade kaçınılan enerji maliyetiyle karşılaştırıldığında daha iyi olabileceğini önermiştir. Bunun nedeni, dalgalanan güç kaynaklarının tanıtımının yedek dağıtılabılır kaynakların sermaye ve bakım maliyetlerinden kaçınılması veya kaçınamaması olabilir. Dengelenmiş kaçınılan enerji maliyeti (LACE), diğer kaynaklardan kaçınılan maliyetlerin dağıtılamayan kaynağın yıllık çıktısına bölünmesidir. Ancak kaçınılan maliyetin doğru bir şekilde hesaplanması çok daha zordur (EIA, 2017).

Daha doğru bir ekonomik değerlendirme, elektriğin marjinal maliyeti olabilir. Bu değer, bir kaynaktan artan elektrik üretiminin eklenen sistem maliyetini diğer elektrik üretim kaynaklarından gelen maliyetle karşılaştırarak çalışır (Brennan ve Palmer, 2013).

3.2. Elektrik Üretiminde Maliyet Faktörleri

Maliyetleri hesaplarken, çeşitli dâhili maliyet faktörlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Sübvansiyonlar ve vergiler gibi çeşitli faktörlerden etkilenebileceğinden, gerçek satış fiyatı olmayan maliyetler kullanımına dikkat edilmesi gerekmektedir. Aşağıda kısaca bu maliyetler verilmektedir (EIA, 2022).

Sabit maliyetler: Ekipman, arazi, finansman, proje yönetimi, şebeke bağlantısı ve santralin inşası maliyetidir. Bunlar genellikle kurulu kapasite birimi başına (kW veya MW başına) ifade edilir. Sabit maliyetler "batık maliyetler" olarak

kabul edilir, çünkü santral kurulduktan ve sabit maliyetler oluştuktan sonra bunlar geri kazanılamaz.

Değişken maliyetler: Yakıt maliyeti, işletme ve bakım giderleri ve varsa karbondioksit emisyon ücretlerinden oluşur. Genellikle üretilen elektrik birimi başına (MWh başına) hesaplanırlar. Mevcut bir santralin elektrik üretmek için kullanılıp kullanılmayacağına karar vermek gerektiğinde yalnızca değişken maliyetler rol oynar.

Sermaye maliyetleri: Güç üretim kapasitesi için sermaye maliyetleri genellikle watt başına gecelik maliyet olarak ifade edilmektedir. Nükleer enerji için atık bertarafı ve devre dışı bırakma maliyetleri de dâhil edilmektedir. Gaz ve petrol santralleri için düşük olma eğilimindedir; karadaki rüzgâr türbinleri ve güneş fotovoltaikleri için orta düzeydedir; kömür santralleri için daha yüksektir ve atıktan enerji, dalga ve gelgit, güneş termal, açık deniz rüzgârı ve nükleer için daha da yüksektir.

Yakıt maliyetleri: Fosil yakıt ve biyokütle kaynakları için yüksek, nükleer için düşük ve birçok yenilenebilir enerji için sıfırdır. Yakıt maliyetleri, politik ve diğer faktörler nedeniyle üretim ekipmanının ömrü boyunca biraz öngörülemez şekilde değişebilir.

İşletme maliyetleri: Yakıt maliyeti, bakım maliyeti, tamir maliyeti, ücretler, atıkların yönetimi vb. gibi kalemleri içermektedir. Yakıt maliyetleri kWh başına verilebilir ve genellikle petrol yakıtlı üretimde en yüksek olma eğilimindedir, kömür ikinci sıradadır ve gaz daha ucuzdur. Nükleer yakıt kWh başına çok daha ucuzdur.

Enerji kaynaklarının dış maliyeti: Tipik olarak çeşitli enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin fiyatlandırması tüm dış maliyetleri içermeyebilir; yani, o enerji kaynağının kullanılmasının bir sonucu olarak toplumun bir bütün olarak dolaylı olarak üstlendiği maliyetler. Bunlara etkinleştirme maliyetleri, çevresel etkiler, kullanım ömürleri, enerji depolama, geri dönüşüm maliyetleri veya sigorta kapsamı dışındaki kaza etkileri dâhil olabilir.

Elektrik üretiminin toplam maliyetini değerlendirmek için, maliyet akışları paranın zaman değerini kullanarak net bugünkü değere dönüştürülmektedir. Bu maliyetlerin tümü iskontolu nakit akışı kullanılarak bir araya getirilmektedir.

3.3. Dünyada ve Türkiye’de Elektrik Üretim Maliyetlerinin İncelenmesi

Elektrik üretim maliyetlerinin incelenmesi dünya üzerinde çeşitli kurum ve kuruluşlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde bu kurumların elde ettiği veriler paylaşılmış ve hem küresel hem de Türkiye özelinde elektrik üretim maliyetleri incelenmiştir.

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), ülkeleri sürdürülebilir bir enerji geleceğine geçişlerinde destekleyen ve uluslararası işbirliği için temel platform, bir mükemmeliyet merkezi ve yenilenebilir enerji konusunda politika, teknoloji, kaynak ve finansal bilgi deposu olarak hizmet veren hükümetler arası bir kuruluştur. IRENA yenilenebilir enerji maliyetlerine ilişkin raporu (Renewable Power Generation Costs in 2023) en son 2023 yılı özelinde hazırlamıştır. Rapora göre, yenilenebilir enerji kapasitesi ilaveleri, 2023 yılında 473 GW yeni kurulu güç ile rekor kırmıştır. 2023 yılında 2022 ilavelerine kıyasla %54 artış ve 2000 yılından bu yana en büyük yıllık büyüme gerçekleşmiştir. Toplam küresel yenilenebilir enerji kapasitesi 2022’de 3391 GW iken 2023’te 3865 GW’a yükselerek %14 oranında artmıştır. Çin 2023 yılında güneş enerjisi (%63), kara rüzgârı (%66), açık deniz rüzgârı (%65) ve hidroelektrik (%44) için en büyük pazarı temsil etmiştir. Bunun nedeni, ülkenin 2023’te bu teknolojiler için küresel ağırlıklı ortalama maliyetlerdeki düşüşü sağlayan önemli yenilenebilir eklemeleridir. 2023 yılında, 2000 yılından bu yana küresel olarak kullanılan toplam yenilenebilir enerji, enerji sektöründeki yakıt maliyetlerinde tahmini 409 milyar ABD doları tasarruf sağlamıştır. Bununla birlikte rapora göre fosil yakıt fiyatlarının 2010 sonrası maliyet aralığına yaklaşmasına rağmen yenilenebilir teknolojilerin rekabet gücü devam etmektedir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansının (IRENA) hazırlamış olduğu rapora ait veriler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3. Birim Başına Maliyet Değerleri-Dünya (2023 USD/kWh)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	%
Bioenerji	0,09	0,08	0,08	0,08	0,06	0,07	0,08	0,07	0,06	0,07	-19,1
Jeotermal	0,07	0,06	0,07	0,08	0,07	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07	0
Hidro	0,04	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	54
Solar PV	0,18	0,13	0,12	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	-75,1
CSP	0,26	0,25	0,29	0,28	0,16	0,24	0,12	0,12	0,12	0,12	-54,3
Kara Rüzgârı	0,09	0,07	0,07	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	-61,6
Açık Deniz Rüzgârı	0,19	0,15	0,13	0,12	0,11	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	-59,7

Kaynak, IRENA, 2024.

2010 yılında, kara rüzgârının küresel ağırlıklı ortalama LCOE maliyeti fosil yakıtın ağırlıklı ortalama maliyetinden %23 daha yüksekti. 2023 yılında, yeni kara rüzgâr projelerinin küresel ağırlıklı ortalama maliyeti fosil yakıtla çalışan çözümlerin ağırlıklı ortalamasından %67 daha düşüktür. 2010 yılında, güneş enerjisinin küresel ağırlıklı ortalama maliyeti, en ucuz fosil yakıtlı çözümün ağırlıklı ortalama maliyetinden %414 daha yüksekti. Ancak, maliyetlerdeki olağanüstü düşüşün etkisiyle, 2023 yılında güneş enerjisinin maliyeti, en düşük maliyetli ağırlıklı ortalama fosil yakıtlı çözümden %56 daha az olarak gerçekleşmiştir.

2023 yılında, yeni devreye alınan şebeke ölçekli güneş fotovoltaik (PV), kara rüzgârı, açık deniz rüzgârı, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) ve hidroelektrikten elde edilen elektriğin küresel ağırlıklı ortalama maliyetleri düşmüştür. Bununla birlikte jeotermallerden elde edilen elektrik üretim maliyeti 2014-2023 döneminde aynı kalmıştır. Hidroelektrik santrallerinden üretilen elektriğin maliyeti ise artmıştır.

Tablo 3'ün en sağındaki sütunda 2014-2023 yılı özelinde kaynaklarına göre elektrik üretim maliyetlerindeki değişim verilmiştir. Buna göre elektrik üretim maliyetlerinde kaynaklara göre en yüksek maliyet azaltımı %75,1 ile Solar PV'de gerçekleşmiştir. Bunu %61,6 ile kara rüzgârı, %59,7 ile açık deniz rüzgârı takip etmiştir. CSP için 2014-2023 döneminde elektrik üretim maliyetleri %54,3 oranında düşmüştür. Bioenerji için ise bu oran %19,1 olarak gerçekleşmiştir. Hidroelektrik santrallerinin enerji üretim maliyetleri ise 2014-2023 döneminde %54 oranında artmıştır.

Tablo 4. Birim Başına Maliyet Değerleri-Türkiye (2023 USD/kWh)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	%
Solar PV			0,14	0,13	0,10	0,09	0,07	0,07	0,07	0,09	-36
Kara Rüzgârı	0,10	0,09	0,08	0,07	0,08	0,07	0,05	0,05	0,06	0,08	-29

Kaynak: IRENA, 2024.

Raporun Türkiye üzerine incelemesine bakıldığında yenilenebilir enerji kaynakları için sadece solar PV ve kara rüzgârı olduğu görülmektedir. 2016 yılında solar PV ile gerçekleştirilen elektrik üretim maliyeti 0,14 \$/kWh iken aynı yıl kara rüzgârı için bu değer 0,08 \$/kWh olarak gerçekleşmiştir. Solar PV ile elektrik üretiminin maliyeti 2016-2023 döneminde %36 azalırken, bu oran kara rüzgârı için 2014-2023 dönemi için %29 olarak gerçekleşmiştir.

Küresel anlamda elektrik maliyetlerini inceleyen diğer bir kuruluş ise Uluslararası Enerji Ajansı'dır (IEA). Her 5 yılda bir OECD ile ortak olarak "Projected Costs of Generating Electricity - Elektrik Üretiminin Öngörülen Maliyetleri" ismiyle yayınladığı raporda kaynaklara göre elektrik enerjisi üretim maliyetlerini açıklamaktadır. Kurum en son 2020 yılına ait raporunu yayınlamıştır. Bu rapor, doğal gaz, kömür, nükleer ve çok çeşitli yenilenebilir teknolojilerden elde edilen güç üretimine ilişkin maliyet verilerini içermektedir. Hem OECD üyesi hem de OECD üyesi olmayan 24 ülkedeki 243 güç santrali için ayrıntılı tesis düzeyindeki maliyet verileri, katılımcı hükümetlerin katkılarına dayanmaktadır.

Tablo 5, Elektrik Üretiminin Öngörülen Maliyetleri - 2020 baskısında yer alan çeşitli teknolojiler için büyüklük ve gecelik maliyet istatistiklerini sunmaktadır. Ortalama ve medyan değerlerin hesaplanmasında, her ülke için değerlerin eşit ağırlıkta olması amacıyla, aynı teknoloji için birden fazla veri kümesi olması durumunda her ülke için medyan vakalar seçilmiştir. Aksi takdirde herhangi bir ağırlıklandırma yapılmamıştır.

Tablo 5. Maliyet Değerleri-Dünya (USD/kWe)

	Min	Ort.	Medyan	Max
Biyokütle	833	2501	1095	6545
Kömür	800	1897	1785	4382
Gaz	254	823	955	1109
Jeotermal	3851	6647	6647	10959
Hidro	2326	3557	3026	6681
Nükleer	2157	3606	3370	6920
Solar PV	860	860	860	860
CSP	5238	5857	5857	6475
Açık Deniz Rüzgârı	1721	2876	2740	4039
Kara Rüzgârı	1782	2852	2852	5539

Kaynak: IEA, 2020.

Rapor, doğal gaz yakıtlı üretim, kömür yakıtlı üretim, nükleer santraller, güneş fotovoltaik ve konsantre güneş enerjisi (CSP), kara ve deniz rüzgarı, jeotermal, biyokütle ve birleşik ısı ve güç (çeşitli yakıt türlerine dayalı) dahil olmak üzere çok çeşitli üretim teknolojilerini içermektedir. Elektrik üretim maliyetlerinin ana etkenleri tipik olarak inşaat, yakıt (CO2 emisyonları için yapılan harcamalar dâhil) ile işletme ve bakım maliyetleridir. Tüm bu faktörler

münferit ünitelerin büyüklüğünden etkilenmekte ve ölçek ekonomileri tipik olarak daha büyük ölçekte maliyetleri düşürmektedir. Tablo 5'te ortalama değerler üzerinden inceleme yapıldığında elektrik üretim maliyetlerinin gecelik olarak en yüksek jeotermal tesislerde gerçekleştiği görülmektedir. Elektrik üretim maliyetleri açısından en düşük ortalama değere sahip kaynak ise 823 \$/kWe ile gaz ve 860 \$/kWe ile solar PV'dir.

IEA ve OECD'nin ortak hazırladığı raporda LCOE yöntemine göre de elektrik üretim maliyetleri hazırlanmıştır. Hatta LCOE'ye göre üretim maliyetleri seçili ülkeler özelinde değerlendirilmiştir. Aşağıdaki tabloda seçili ülkeler için LCOE tekniği ile elektrik üretim maliyetleri verilmiştir.

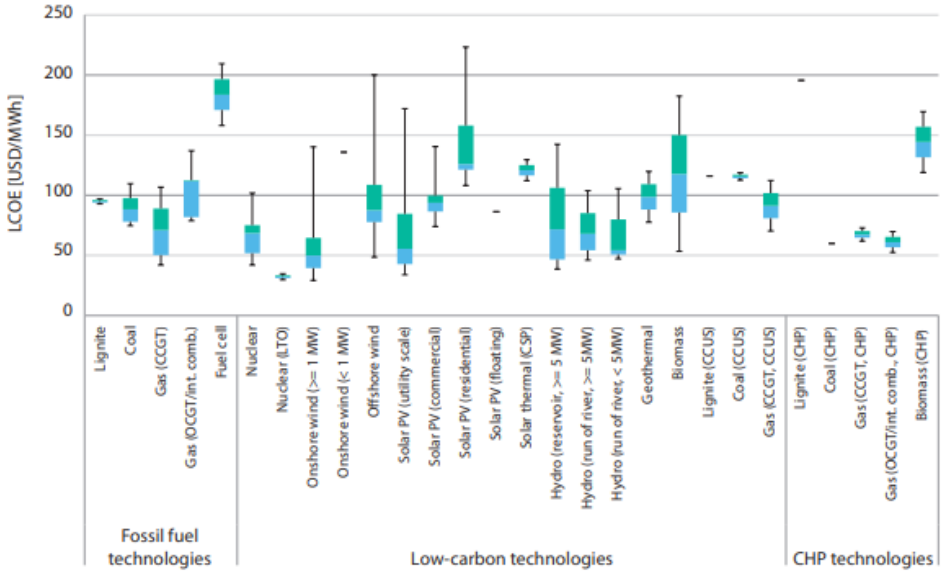
Tablo 6. Birim Başına Maliyet Değerleri-Seçili Ülkeler (USD/MWh)

	Avustralya	Amerika	Japonya	G.Kore	Fransa	Kanada	İtalya	Rusya
Kömür	112,66	117,23	99,84	75,59	-	-	-	-
Gaz	86,51	44,98	92,52	95,89	-	77,50	69,47	-
Jeotermal	-	61,83	-	-	-	-	68,13	-
Hidro	-	90,21	142,40		-	-	94,16	-
Nükleer	-	33,25	86,67	53,30	35,15	-	-	42,02
Solar PV	38,65	34,59	172,05	96,57	33,94	62,47	62,96	-
CSP	129,55	117,11	-	-	-	-	-	-
Açık Deniz Rüzgârı	85,36	74,09	200,18	160,99	89,82	-	-	-
Kara Rüzgârı	43	35,19	140,17	113,33	56,08	46,83	91,44	67,35

Kaynak: IEA, 2020.

Tablo 6, 2020 yılındaki değerlere göre seçili ülkelerdeki elektrik üretim maliyetlerinin LCOE tekniği ile hesaplanmış görünümünü vermektedir. Seçili her bir ülke için farklı kaynak türlerine göre LCOE tekniği ile elektrik üretim maliyetleri değişkenlik göstermektedir. Tabloda en düşük maliyet nükleer kaynaklardan üretilen elektriğe aittir. Bununla birlikte Fransa'da solar PV için elektrik üretim maliyetinin de düşük olduğu görülmektedir.

Şekil 1. Genel Olarak LCOE Değerleri (USD/MWh)



Kaynak: IEA, 2020.

Şekil 1, ilgili raporda bulunan tüm ülkeler için LCOE değerlerinin ortalama verilerini göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi düşük karbonlu teknolojiler ile elektrik üretim maliyetlerinin daha düşük olduğu görülmektedir.

SONUÇ

Elektrik, modern yaşamın vazgeçilmez bir parçasıdır ve dünya ekonomileri için önemlidir. İnsanlar elektriği aydınlatma, ısıtma, soğutma ve dondurma için ve cihazları, bilgisayarları, elektronik aletleri, makineleri ve toplu taşıma sistemlerini çalıştırmak için kullanmaktadırlar. Tüm dünyada bu denli kullanım alanı olan elektriğin üretim maliyetleri de ülke ekonomileri için önemli bir yere sahiptir.

Çalışma kapsamında incelenen veriler doğrultusunda yenilenebilir enerji açısından elektrik üretim maliyetleri dünya genelinde LCOE tekniği verilerine göre 0,03 ila 0,12 \$/kWh düzeyindedir. Burada en düşük maliyet 2023 yılı verilerine göre 0,03 ile kara rüzgârından elde edilen elektriğe aitken en yüksek maliyet 0,12 ile CSP'ye aittir. Aynı yıllarda Türkiye özelinde solar PV kaynaklı elektrik üretim maliyeti 0,09 \$/kWh olarak gerçekleşmiştir. Yaygın olarak kullanımı olan kara rüzgâr tribünlerinden elde edilen elektriğin maliyeti ise 0,08 \$/kWh olarak gerçekleşmiştir. Aynı kaynaklara ait dünya ortalaması ise sırasıyla 0,04 \$/kWh ve 0,03 \$/kWh'dir. Bu açıdan değerlendirildiğinde Türkiye'de benzer kaynaklardan elektrik üretimi Türkiye'de dünya ortalamasının üstünde gerçekleşmektedir.

Birim başına elektrik üretim maliyetlerinin ülkeler açısından karşılaştırılmasına bakıldığında ise kömürden üretilen elektrik maliyeti Avustralya'da 112,66 \$/MWh iken bu rakam ABD'de 117,23 \$/MWh, Japonya'da 99,84 \$/MWh ve Güney Kore'de 75,59 \$/MWh olarak gerçekleşmiştir. Bu karşılaştırma solar PV için yapıldığında ise Avustralya'ya ait değer 38,65 \$/MWh, ABD'ye ait değer 34,59 \$/MWh, Fransa'ya ait değer 33,94 \$/MWh ve İtalya'ya ait değer 62,96 \$/MWh olarak gerçekleşmiştir. Genel olarak birim başına elektrik üretim maliyetleri incelendiğinde ise düşük karbonlu teknolojiler ile üretilen elektriğin maliyetinin daha az olduğu belirtilebilir.

Uluslararası Enerji Ajansı'nın Dünya Enerji Görünümü 2020 raporunda son on yılda yaşanan keskin maliyet düşüşleriyle birlikte, güneş enerjisinin çoğu ülkede yeni kömür veya gaz yakıtlı enerji santrallerinden sürekli olarak daha ucuz olduğu ve güneş enerjisi projelerinin şu ana kadar görülen en düşük maliyetli elektrikten bazılarını sunduğu ifade edilmiştir. Çoğu pazarda, solar PV veya rüzgâr artık yeni elektrik üretimi için mevcut en ucuz kaynağı temsil etmektedir. Bununla birlikte yenilenebilir enerji, maliyet avantajlarının ötesinde, aynı zamanda çok daha çevre dostudur.

Türkiye özelinde durum değerlendirmesi yapıldığında Türkiye, 2023 yılında Avrupa'nın en büyük ikinci kömür yakıtlı elektrik üreticisi haline gelmiştir ve toplam elektrik üretiminin üçte birinden fazlasını kömür oluşturmaktadır. 2023 yılında fosil yakıtlar ülkenin elektriğinin %58'ini üretmiştir. Kişi başına düşen

emisyonlar küresel ortalamaaya eşdeğer görünmektedir. Muazzam potansiyele rağmen, Türkiye 2023 yılında elektriğinin yalnızca %16'sını rüzgâr ve güneş enerjisinden üretmiştir. Elektrik üretiminin sadece %6'sını güneş enerjisinden sağlayan ülke, Yunanistan (%19) gibi benzer güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkelerin ve hatta Polonya (%7) gibi daha düşük güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkelerin gerisinde kalmaktadır. Bu nedenle Türkiye 2030 yılına kadar %47 yenilenebilir elektrik üretimi hedeflemektedir. Rakamlar incelendiğinde de yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen elektriğin yıllar içerisinde Türkiye özelinde de düşüş yaşadığı ifade edilebilir.

KAYNAKÇA

- Branker, K., Pathak, M. J. M., & Pearce, J. M. (2011). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(9), 4470-4482.
- Brennan, T. J., & Palmer, K. L. (2013). Energy efficiency resource standards: Economics and policy. *Utilities Policy*, 25, 58-68.
- Ceylan, M. (2023). Elektrik enerji santralleri. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Çavuş, D., & Usta, H. (2015). Evaporatörü güneş destekli ısı pompasının tasarımı, imalatı ve performans deneyleri. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 3(3), 535-544.
- Doğanay, H., & Coşkun, O. (2020). Enerji kaynakları. Ankara: Pegem Akademi Yayıncılık.
- EIA (2017). U.S. Energy Information Administration Annual Energy Outlook 2017, https://www.eia.gov/pressroom/presentations/sieminski_01052017.pdf
- Eia, U. (2022). Cost and performance characteristics of new generating technologies, annual energy Outlook 2022. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table_8.2.pdf
- IEA (2016). Energy Policies of IEA Countries: Turkey 2016 Review, <https://www.iea.org/reports/energy-policies-of-iea-countries-turkey-2016-review>
- MT Akkoyunlu, E Pekel, MC Akkoyunlu, S Pusat... - International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, (2019) Moisture content estimation during fixed bed drying process with design of experiment and ANFIS methods
- MZ Malaslı, MC Akkoyunlu, E Pekel, M Taşova... - Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, (2025) Prediction of drying kinetics and energy consumption values of purple carrots dried in a temperature-controlled microwave dryer by decision tree, random forest and ada boost approaches
- MT Akkoyunlu, E Pekel, MC Akkoyunlu, S Pusat... - International Journal of Coal Preparation and ..., (2018) Determination of effective parameters for coal moisture content determination using a ‘design of experiment’ method
- IEA (2020). Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ae17da3d-e8a5-4163-a3ec-2e6fb0b5677d/Projected-Costs-of-Generating-Electricity-2020.pdf>
- IRENA (2024). Renewable power generation costs in 2023. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf

- Kaplan, Y. A., & Aladağ, C. (2016). The importance of the different kinds of energy sources for energy future of Turkey. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 128, p. 05002). EDP Sciences.
- Kaşıkcı, İ. (2013). Elektrik mühendisliği-elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtım. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Kocaman, B. (2003). Elektrik enerjisi üretim santralleri. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Oğurlu, H. (2021). Teorik ve uygulamalı elektrik enerjisi üretimi ve iletimi. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Sayar, H. (2003). Alternatif enerjilerle elektrik üretimi. *Avrasya Dosyası*,9(1), 259-270.
- Topcu, I., Ülengin, F., Kabak, Ö., Isik, M., Unver, B., & Ekici, S. O. (2019). The evaluation of electricity generation resources: The case of Turkey. *Energy*, 167, 417-427.
- MC Akkoyunlu, E Pekel, MT Akkoyunlu, S Pusat - Drying Technology,(2020) Using hybridized ANN-GA prediction method for DOE performed drying experiments
- E Pekel, MC Akkoyunlu, MT Akkoyunlu, S Pusat - International Journal of Coal Preparation and ..., (2020) Decision tree regression model to predict low-rank coal moisture content during convective drying process



Hidrojen İle İlgili Kaza Olayları ve Sonuçları

Melek Türk¹ & Arda Yılmaz²

¹ Üsküdar Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-1304-7505

² Üsküdar Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-0950-5502

GİRİŞ

Günümüzde küresel ısınma ve karbon emisyonlarının gün geçtikçe artıyor olması, çevre dostu hidrojen kullanımı için araştırmaları desteklemektedir. Hidrojen neredeyse sıfır karbonlu bir yakıttır ve azot oksitler hariç tüm kirletici emisyonları ortadan kaldırmaktadır (Yosri et al., 2023). Ancak, hidrojen oldukça yanıcı bir gaz olduğundan ve patlamaya yol açtığından, güvenli kullanımını engelleyen faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir. Hidrojen gazı, yaklaşık olarak havada %4-%75 arasında bir konsantrasyonda bulunduğu, geniş bir yanma aralığına sahiptir (Kim et al., 2024). Normal şartlar altında konsantrasyonu yaklaşık olarak havadan 14 (on dört) kat daha düşüktür ve atom numarası bir olan en hafif maddedir (Kim et al., 2024). Bu nedenle, kazara bir sızıntı olduğunda hızlı bir şekilde atmosfere dağılır ve tutuşma kaynağı mevcutsa kolayca yanar. Bu tehlikeli durumundan dolayı; hidrojen gazının yanma ve patlama riskleri birçok bilim insanı tarafından araştırma konusu olmaktadır (Kim et al., 2024).

Bu bölümde hidrojen kazaları ve hidrojen kazası sonuçlarıyla ilgili olaylar sekiz başlık altında toplanmıştır (Kim et al., 2024).

- Hidrojen Tehlike Tespiti
- Ateşlenmemiş/Tutuşmamış Salınımlar
- Kapalı Alanlarda/Ortamlarda Hidrojen Gazı Dağılımı
- Hidrojen Gazı Karışımlarının Ateşlenmesi/Tutuşması
- Mikro Alevler
- Jet Yangınları
- Parlamalar
- Patlamalar

1. HİDROJEN TEHLİKE TESPİTİ

Hidrojen (H_2) enerjisi, günümüzde giderek artan bir ilgi görmektedir. Yakıt hücreleri aracılığıyla hidrojen enerjisi üretimiyle; sadece ısı ve su açığa çıkmaktadır (Panda et al., 2017; Yang et al., 2021). Bu durum otomobillerde, enerji üretiminde ve diğer sektörlerde ortaya çıkabilecek olan enerji ve çevre sorunlarına yönelik birçok çözüm önerisi sunacaktır (Panda et al., 2017; Yang et al., 2021). Ancak; hidrojen gazının doğası gereği; üretiminde, taşınmasında, depolanmasında ve kullanımında güvenliğini sağlamak kolay değildir (Yang et al., 2021). Hidrojenin geniş yanma aralığı, yüksek kaldırma kuvveti, düşük tutuşma (ateşleme) enerjisi, gün ışığında görünmez alevi ve yüksek basınçta sıkıştırılmış (düşük yoğunluğu nedeniyle daha az yer kaplaması) bir gaz olması

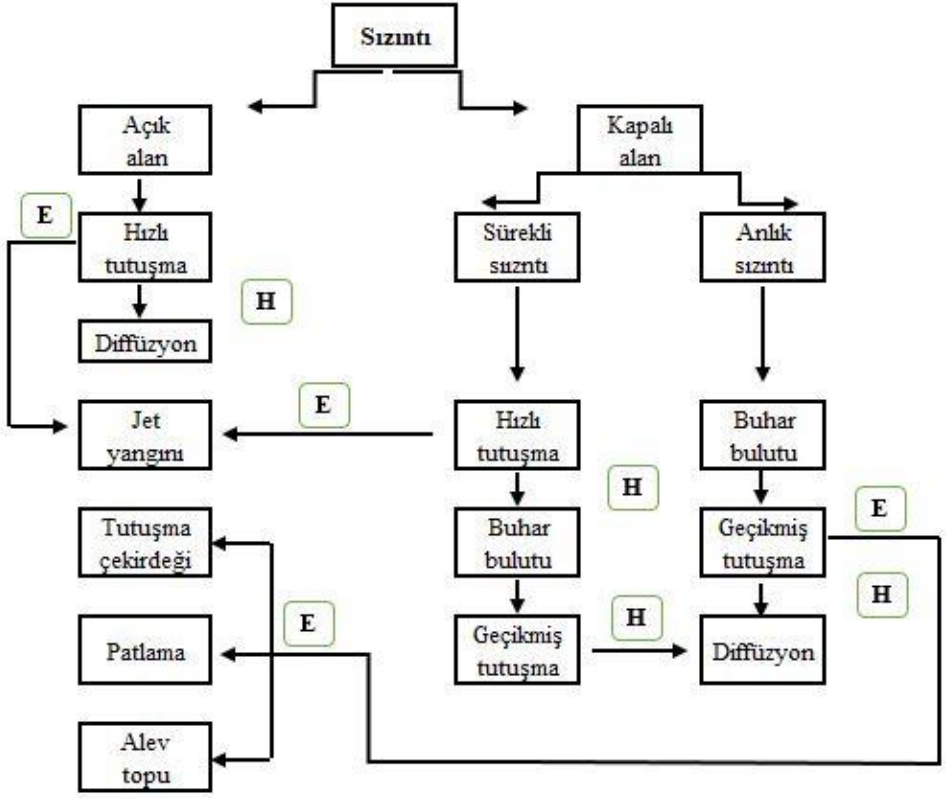
hidrojenin farklı tehlike özelliklerini ortaya çıkarmaktadır (Sun and Li, 2021). Hidrojen, renksiz ve kokusuz olması (işlemin zorluğunu artırır), düşük alev alma olasılığı ve düşük molar kütle ile tanımlanmaktadır (Yang et al., 2021). Hidrojenin patlamasından, tutuşmasından ve sızıntısından kaçınmak için belli koşullarda güvenli kullanımı sağlanmalı ve hidrojen ile ekipman temasından kaynaklanacak zararları önlemek için ayarlama yapılmalıdır. Hidrojenin minimum tutuşma enerjisi, enerji yoğunluğu ve tutuşma sınır aralığı; hidrojenin büyük miktarda gaz açığa çıkardığını ve kolayca tutuşabildiğini göstermektedir (Yang et al., 2021). Ayrıca; hidrojen doğal gaz ile karşılaştırıldığında daha düşük tutuşma sıcaklığı ve daha hızlı yanma hızı ile karakterizedir ve sıcak yüzeyler veya kıvılcımlar ile karşılaştığında kendiliğinden yanma olasılığı bulunmaktadır (Yang et al., 2021). Bu nedenle, hidrojen kullanımı sırasında güvenliğinin sağlanması en büyük önceliktir. Tablo 1'de hidrojen ve doğal gazın fiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır (Yang et al., 2021).

Tablo 1. Hidrojen ve Doğal gazın Fiziksel Özellikleri

Hidrojen ve Doğal Gazın Fiziksel Özellikleri		
Parametre	Hidrojen	Doğal gaz (%85/CH4)
Yoğunluk (STP, g/L)	0.089	0.717
Minimum tutuşma enerjisi (havda, mJ)	0.017	0.31
Yanma aralığı (havada, %)	4-75	5-15
Enerji yoğunluğu (LHV, mJ /Kg)	119.96	50.07
Kaynama noktası (°C)	-253	-162
Tutuşma sıcaklığı (°C)	574	650
Yanma hızı (m/s)	2.65-3.25	0.38

Kaynak: Yang, F., Wang, T., Deng, X., Dang, J., Huang, Z., Hu, S., Li, Y. and Ouyang, M. (2021). Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 31467-31488.

Hidrojen bağıl molekülü en küçük moleküler kütledir (Yang and et al, 2021). Bu nedenle hidrojen gazı, doğal gaz ile karşılaştırıldığında tank veya boru gibi yüksek basınçlı alanlardan kolayca sızmaktadır. Hidrojen gazı sızıntısı öncelikle başlangıç hareketi yönünde ilerleyerek yukarı doğru yüzme hareketi gerçekleştirir. Kapalı bir alanda hidrojen-hava karışımı mevcutsa bulunduğu hacmin üst kısmında birleşmektedir. Bir ısı kaynağı mevcutsa ve hacim oranı uygunsa, hidrojen tutuşması meydana gelecektir. Ancak, hidrojen sınırsız bir bölgede yayılırsa gerekli yoğunluk sağlanamadığı için tutuşma olmayacaktır. Hidrojen çelik ve diğer metaller içine kolayca dağılabilmekte ve kırılgenliklerini artırabilmektedir (Yang and et al., 2021). Aynı zamanda hidrojen gazı bölgesel bir gerilim ve sızıntı oluşturarak boru boşluklarına kolayca girebilmektedir (Yang and et al., 2021). Hidrojen sızıntısı meydana geldiğinde; hidrojen hava karışımı, kaldırma kuvveti altında hızlı bir şekilde yukarı doğru süzülen bir duman bulutuna dönüşerek, bir jet alevi üretir. Karışımın konsantrasyonu yanıcı bölgede olduğu zaman ve en küçük ateşleme/tutuşma enerjisi ile karşılaştığı zaman hidrojen tutuşması meydana gelecektir. Alev sürekli olarak hızlandıkça, patlamadan patlamaya geçiş sıklıkla meydana gelerek, birkaç saniye içinde tamamlanacaktır (Yang and et al., 2021). Şekil 1’de hidrojen sızıntısı nedeniyle meydana gelen tehlikenin akış şemasını göstermektedir (Yang and et al., 2021).



Şekil 1. Hidrojen sızıntısı nedeniyle meydana gelen tehlikenin akış şeması

Kaynak: Yang, F., Wang, T., Deng, X., Dang, J., Huang, Z., Hu, S., Li, Y. and Ouyang, M. (2021). Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 31467-31488.

Normalde küçük bir sızıntı tehlikeye neden olmazken, büyük miktardaki sızıntı jet alevi ve patlamalar üretmektedir. Yanma durumu oluştuğunda hidrojen tutuşarak patlayacaktır. Yüksek sıcaklık ve basınç altında, can ve mal kaybına neden olacak şekilde tutuşma ve patlama gerçekleşecektir. Ayrıca sıkıştırılmış hidrojen havaya aniden salınırsa, görünürde herhangi bir tutuşma kaynağı olmaksızın kendiliğinden tutuşur. Bu yüzden kendiliğinden tutuşma mekanizmasını tanımlamak ve patlama tehlikelerini değerlendirmek gerekmektedir (Yang et al., 2021).

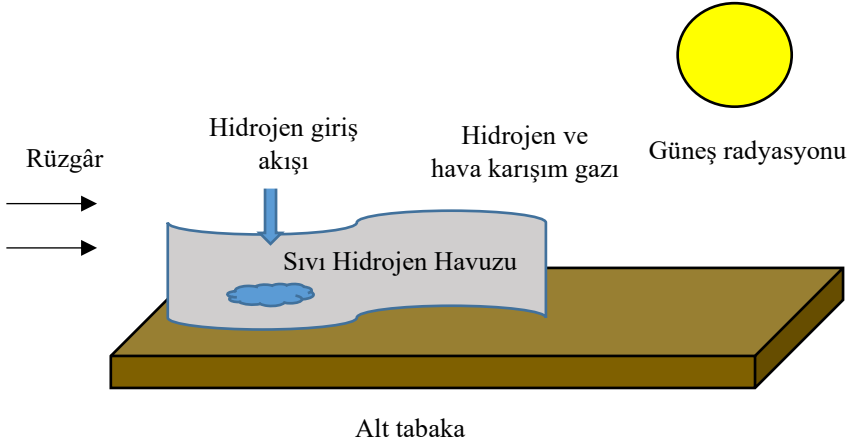
Bir kaza sonucu hidrojen salınımı açık hava ortamında meydana geldiğinde önemli derecede hidrojen tehlike oluşumuna neden olmazken; otopark, tünel gibi kapalı alanlarda meydana geldiğinde hidrojen tehlikesinin ortaya çıkma

olasılığını artırmaktadır. Hidrojenin güvenlik açısından değerlendirilebilmesi için; hidrojenin yanma, dağılım ve salınım süreçlerinin incelenmesi büyük önem taşımaktadır (Li et al., 2020). Hidrojen kullanımı ile ilgili tehlikeleri tanımlamak, kontrolsüz salınımı veya sızıntısını azaltmak ve değerlendirmek hidrojenin tutuşmasına, yanmasına ve patlamasına engel olacaktır (Liu et al., 2023).

2. ATEŞLENMEMİŞ/TUTUŞMAMIŞ SALINIMLAR

Hidrojen ideal bir enerji kaynağıdır. Hidrojen, gaz fazında yüksek basınçlı kaplarda, sıvı fazında kriyojenik tanklarda ve katı fazında metal hidritler ve kimyasal taşıyıcılar şeklinde depolanabilmektedir. Kullanım kolaylığı ve enerji yoğunluğu açısından sıvı hidrojen diğer depolama yöntemlerine göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Hidrojen sıvı formatına getirildiğinde birim hacmi başına düşen kütlesi 70.8 kg/m^3 olur ve enerji depolama açısından daha verimli olmasını sağlar (Liang et al., 2024). Ancak bu durum, kazara sızıntı olduğu zaman çok büyük zararlara neden olabilir. Sıvı hidrojen sızıntısı; dağılıma, ısı ve kütle transferi, yoğunlaşma, buharlaşmayı içeren çok fazlı karmaşık bir süreçtir (Liang et al., 2024). Depolama tankında kazara sıvı hidrojen sızıntısı meydana geldiğinde, sıvı hidrojen havuzunun oluşumuna neden olacak ve gerçekleşen sıvı hidrojen sızıntısı gaz bulutunu meydana getirerek buharlaşacak ve dökülen havuzdan uzaklaşacaktır. Sonrasında, doğal veya mekanik havalandırma durumuna bağlı olarak dağılacaktır (Alfarizi et al., 2023; Liang et al., 2024).

Liang ve arkadaşları (2024) tarafından İngiltere Buxton'da Sağlık ve Güvenlik Laboratuvarında sıvı hidrojen hortumlarındaki olası hataların araştırılması için büyük ölçekli bir dizi sıvı hidrojen salınımları gerçekleştirilmiştir (Liang et al., 2024). Çalışma sonucunda dört sıvı hidrojenin herhangi bir tutuşma veya alevlenme olmaksızın gerçekleştirilen test sonuçları belirtilmiştir. Hidrojen gaz dağılımının rüzgâr hızına karşı hassas olduğu görülmüştür. Rüzgâr hızı 3 m/s eşit veya daha az olduğu zaman bulut yüzmeye başlamış ve rüzgâr hızı 5 m/s 'den daha büyük olduğu zaman bulut yere yakınlaşmış ve sıvı hidrojen soğuyarak aşağı bölümde havuz oluşturmuştur. Şekil 2'de sıvı hidrojenin salınımı gösterilmiştir (Liang et al., 2024).



Şekil 2. Sıvı hidrojenin salınımı

Kaynak: Yang, F., Wang, T., Deng, X., Dang, J., Huang, Z., Hu, S., Li, Y. and Ouyang, M. (2021). Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 31467-31488.

Amerika Birleşik Devleti'ndeki Sandia Ulusal Laboratuvarı'nda da herhangi bir tutuşma olmadan oda sıcaklığındaki hidrojenin değerlendirilmesi üzerine küçük ölçekli deneyler gerçekleştirilmiştir. Hidrojenin hortum veya boru gibi bir sistemdeki hareketini ifade eden Froude (Fr) (akışkan) sayısı 99 ila 268 arasında tespit edilmiştir. Burada, düşük froude sayısı yerçekimi kuvvetinin baskınlığını, yüksek froude sayısı momentum kuvvetinin baskınlığını belirtmektedir. Bu süreçte kaldırma kuvveti ve momentum hareketi eş zamanlı bulunmuştur. Ayrıca araştırmacılar bir yavaş-sızıntı modeli olduğunu öngörmüşlerdir (Liang et al., 2024). Geçikmiş ateşleme, hidrojen patlamalarına yol açabilmektedir. Yüksek basınçlı kriyojenik hidrojen kaza senaryolarını anlamak, hidrojenin güvenli kullanımını sağlamak için önemlidir (Ren et al., 2022).

3. KAPALI ALANLARDA/ORTAMLARDA HİDROJEN DAĞILIMI

Dünyanın enerji ihtiyacının çoğunu karşılayan fosil yakıtlar (petrol, doğal gaz ve kömür) günümüzde hızlı bir şekilde tükenmektedir. Ayrıca fosil yakıtlar; ozon tabakasının incelmesi, asit yağmuru ve diğer çevre kirliliği etkilerinden dolayı çevre ve yaşam için önemli bir risk oluşturmaktadır (Meng et al., 2017; Patel et al., 2023). Sürdürülebilirliği sağlamak ve çevresel etkileri en aza indirmek için potansiyel enerji kaynaklarından olan hidrojenin kullanımı ön plana çıkmaktadır (Meng et al., 2017; Patel et al., 2023). Yenilenebilir enerji (güneş, su, rüzgâr) kaynaklarının kullanımı ile üretilen hidrojen, fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan zararlı gazların emisyonunu azaltmak ve fosil yakıtlar üzerine

bağımlılığımızı azaltmayı yardımcı olmak açısından temiz bir enerji seçeneği olacaktır (Meng et al., 2017; Patel et al., 2023; Kobeissi, 2024).

Temiz bir enerji kaynağı olan yeşil hidrojenin sızıntı ihtimalinin ve dağılımının olması güvenli bir hidrojen altyapısı oluşturmada zorluk oluşturmaktadır (Patel et al., 2023). Önemli hidrojen güvenliği konularından bir diğeri ise, gaz birikiminin daha fazla olduğu kapalı tesislerin (ortam/alan) içindeki gaz sızıntısıdır. Kimyasal ve petrokimyasal endüstri yapılarındaki gelişmeler ile birlikte yer altı tesislerinde kurulan ve tehlikeli operasyonları içeren firmalar gelişmiştir. Bu tür tesislerin kapalı kalma seviyelerinin daha fazla olması nedeniyle, hidrojen yangını dahil olmak üzere yanıcı ve patlayıcı hidrojen salınımı sonucu patlamalar oluşmaktadır. Kapalı alanlarda serbest bırakılan hidrojen salınımı sonucu yanıcı gaz bulutları oluşabilmekte, bu durumda can ve mal kaybına neden olabilecek ciddi sonuçlar meydana getirebilmektedir (Patel et al., 2023). Hidrojenin geniş patlama sınır aralığında olması, yüksek hava diffüzyon katsayısı ve düşük yoğunluğu nedeniyle son derece yıkıcıdır (Zhang et al., 2022). Hidrojen gazı ortaya çıktığında kaldırma kuvveti etkisi altında yukarıya doğru dağılmaktadır. Kapalı ortamda hidrojen sızıntısı yukarı doğru dağılım gösterdiğinde hidrojen tavanda birikim gösterecektir. Bu durumda patlama olasılığını artıracaktır (Li and et al., 2023). Abbas ve arkadaşları (2020) tarafından kapalı bir silindirik odasında hidrojen sızıntısını değerlendirmek için nicel bir çalışma yapılmıştır. Çatıda havalandırma sisteminin bulunmasının tesiste hidrojen birikiminin azalmasına yardımcı olduğu tespit edilmiştir. Özellikle uzun süreli sızıntı vakalarında yukarı yöne doğru olan hidrojen sızıntısı aşağı yöne doğru olan hidrojen sızıntısından çok daha geniş bir yanma alanı yaratmaktadır. Hidrojen konsantrasyon sızıntısı tesisin orta kısmına doğru yaklaştıkça azalır ve hidrojen-hava karışımının homojen olmasını sağlamaktadır. Huang ve arkadaşları (2022) tarafından garajın ortasında ve köşesinde park edilen araçtan serbest bırakılan hidrojen seviyesi araştırılmış ve yan duvarın yanından salınan hidrojen seviyesi yüksek oranda birikmiş olarak saptanmıştır (Patel et al., 2023). Li ve arkadaşları (2019) tarafından dikey yönde hidrojen yoğunluğunun sızıntısının dağılımı incelenmiştir. Hidrojen konsantrasyonunun tabakalaşma kalınlığının, yanıcı bölgenin ve hidrojen mol fraksiyonunun küboid alanlarda dikey sızıntı durumunda giriş alanında yükseldiği tespit edilmiştir (Patel et al., 2023). Chang ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan çalışmada, farklı geometrik şekilli engellerin önemli türbülans oluşturabileceği belirtilmiştir (Patel and et al., 2023). Çoğu tehlikeli durumların garaj gibi kapalı bir alandan salınım yapıldığı zaman olduğu görülmüştür. En çok etkileyen unsurların muhafaza hacmi, havalandırma durumu ve hidrojen salınım oranları olduğu belirtilmiştir (Brzezinska, 2021). Sonuç olarak hidrojen salınımı havada %4-%75 aralığında bulunduğunda yanıcı, %18-%58 aralığında bulunduğunda patlayıcı olduğunu göstermektedir (Soto et al., 2024). Bir akü odasındaki hidrojen salınımı

çalışmasında kapalı bir odada olma durumu ve havalandırma sisteminin etkileri araştırılmıştır. Uygun havalandırma sisteminin olmadığı zaman patlama riskine maruz kalındığı ortaya çıkmıştır (Lach et al., 2020). Kapalı bir alanda havalandırmanın olması, yanan maddenin büyümesini önlemede, yangın ve patlama riskini azaltmada etkili olacaktır. 0,25 m/s’lik en düşük havalandırmanın olması kapalı alandaki gaz yoğunluğu seviyesinde %29,34’lük bir iyileştirme oluşturacaktır (Liu et al., 2023). Sonuç olarak; hidrojenin dağılım mekanizması salınan gazın hareketi ve tesisin kapalı olmasına bağlıdır. Açığa çıkan gaz engellere çarptığında enerjisini kaybeder, gaz tavana kadar yükselir ve yüksek yoğunlukta gradyanlar oluşturur. Sızıntı hızı veya kütle akış hızı özellikle hidrojen-hava karışımı birikimi ve zaman içindeki değişimi risk açısından önemlidir. Bu durum; Jet yangını ve gaz patlamasını kapsayan ciddi kazaların ortaya çıkma olasılığını artırır, bu nedenle gelecekte yapılacak araştırmaların çeşitli sızıntı senaryoları açısından değerlendirilmesi önemlidir (Patel et al., 2023).

4. HİDROJEN KARIŞIMLARININ ATEŞLENMESİ/TUTUŞMASI

Dünya çapında ve Avrupa Birliği’nde sera gazı emisyonlarını (karbondioksit, azot oksit, metan, florlu gazlar) azaltma çabaları devam etmektedir. Enerji sektöründe stratejik bir hedef doğal gaz yerine hidrojen kullanmayı tercih etmektir. Bu hedefe, doğal gaz karışımına giderek daha fazla hidrojen ekleyerek ulaşılması amaçlanmaktadır. Küresel çapta doğal gaz taşıma ve depolama, doğalgaz-hidrojen karışımları hatta %100 hidrojen gazının kullanılıp kullanılmayacağına yönelik araştırma faaliyetleri sürdürülmektedir. Çelikler ve diğer metalik alaşımların hidrojenin etkisi altında bozulduğu yaygın olarak bilinmektedir. Bu etkiye yaygın olarak “hidrojen gevrekliği” olarak tanımlanmaktadır (Michler et al., 2021). Ayrıca; çelik içindeki hidrojen yoğunluğunun, hidrojen kaçağının ve hidrojen gazı basıncının artmasıyla çeliklerin mekanik özelliklerinin bozulduğu da bilinmektedir (Michler et al., 2021). Hidrojen-hava karışımlarının minimum ateşleme enerjisi, yanıcı karışımların güvenli çalışmasını sağlamak için temel bir parametredir. Bu parametre özellikle yanıcı karışımları tutuşturabilen kıvılcım veya sıcak nokta gibi güvenlik uygulamalarında önemlidir (Tarrazo et al., 2023). Havaya hidrojen salınımı olduğunda, minimum ateşleme enerjisi daha düşük olması nedeniyle kolayca tutuşabilmektedir ve diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında hidrojenin %4-%75 aralığında geniş bir yanıcılık özelliğine sahip olması nedeniyle alevi yaymaktadır (Cirrone et al., 2023). Minimum ateşleme enerjisi genellikle metan veya etan gibi yanıcı gazlar için 100 metre/Joule (mJ) iken, normal şartlar altında havadaki hidrojenin minimum ateşleme enerjisi 17 metre/Joule (mJ) kadar daha düşüktür (Cirrone et al., 2023). Bu nedenle hidrojen-hava karışımlarının tutuşma potansiyeli diğer yakıtlara göre daha büyük kabul edilmektedir. Karışımdaki

oksijen içeriği minimum ateşleme enerjisi değerini etkileyerek onun bozulmasını neden olur ve hacimce %35'e kadar oksijenle zenginleştirilmiş hava için bu değer 5,7 metre/Joule'e (mJ) düşmektedir (Cirrone et al., 2023).

5. MİKRO ALEVLER

5.1. Hidrojen Depolama Teknolojisinde Güvenli Bir Yaklaşım

Mikro alevler, hidrojen depolama sistemlerinde sıkça rastlanan bir olgu olarak belirtilir (Smith, 2022). Mikro alevler, belirli koşullar altında hidrojenin reaksiyona girmesi sonucunda meydana gelir ve depolama tanklarının veya boru hatlarının güvenliğini etkileyebilir (Johnson, 2023).

5.2. Mikro Alevlerin Oluşumu ve Mekanizması

Mikro alevler, hidrojenin belirli konsantrasyonlarda havayla karıştığı ortamlarda ortaya çıkar (Brown, 2021). Bu alevler genellikle gözle görülemeyecek kadar küçüktür ve çıplak gözle fark edilemezler. Ancak hidrojenin yanıcı özellikleri nedeniyle, depolama tanklarında veya boru hatlarında tehlikeli bir durum oluşturabilirler. Mikro alevlerin oluşum mekanizması, hidrojenin basıncı, sıcaklığı ve ortamdaki oksijen miktarı gibi faktörlere bağlıdır ve belirli konsantrasyonlarda havayla karıştığı durumlarda meydana gelebilir.

5.3. Mikro Alevlerin Etkileri

Mikro alevlerin varlığı, depolama tanklarının veya boru hatlarının güvenliğini etkileyebilir (Lee ve ark., 2021). Bu alevlerin varlığı, patlama veya yangın riskini artırabilir ve çevresel zararlarla sonuçlanabilir. Ayrıca mikro alevlerin varlığı, depolama tanklarının malzeme deformasyonuna neden olabilir ve bu durum daha ciddi güvenlik sorunlarına yol açabilir.

5.4. Güvenli Depolama İçin Önlemler

Mikro alevlerin oluşumunu önlemek veya etkilerini azaltmak için çeşitli önlemler alınabilir. Bunlar arasında depolama tanklarının düzenli bakımı ve kontrolü, havalandırma sistemlerinin kullanılması ve hidrojenin güvenli bir şekilde depolanması için uygun tekniklerin kullanılması bulunur (Martinez, 2024). Ayrıca mikro alevlerin varlığını tespit etmek için sensörlerin kullanılması da önemli bir tedbirdir. Mikro alevler, hidrojen depolama sistemlerinde dikkate alınması gereken önemli bir fenomendir (Wang, 2019). Mikro alevlerin oluşumu ve etkileri, güvenli depolama için alınması gereken önlemleri vurgular. Bu sebeple, hidrojen depolama teknolojileri geliştirilirken, mikro alevlerin potansiyel riskleri dikkate alınmalıdır.

5.4.1. Fiziksel Hidrojen Depolama Yöntemleri

5.4.1.1. Sıkıştırılmış Gaz Halinde Hidrojen Depolama Yöntemi

Hidrojen depolama, hidrojenin hacimsel özelliklerinden kaynaklanan zorluklarla karşılaşır. Normal şartlar altında, hidrojen gazı 1 gramı için 11 litre hacim gerektirir, bu da büyük hacimler ve yüksek basınçlar gerektirir (Sabaz, 2018). Tipik olarak, hidrojen genellikle 200-250 bar'lık basınç altında 50 litrelik silindirik tanklarda depolanır, ancak bu değer bazen 600-700 bar'a kadar çıkabilir. Yüksek basınçlı depolama tankları ağır olup, taşıma verimliliğini azaltır (Ar ve ark., 2013). Sıkıştırılmış gaz halindeki hidrojen depolamasının dezavantajlarından biri sıkıştırma işlemi sırasında harcanan enerjidir. Örneğin, hidrojeni 35 MPa' da depolamak için hidrojenin %12'si, 70 MPa' lık tanklarda ise bu oran %15'e kadar enerji harcanır. Ayrıca, sıkıştırma işlemi sırasında hidrojen tankının sıcaklığını ve basıncını güvenli seviyelerde tutmak ve mümkün olduğunca çok hidrojen depolamak için soğutulması gerekir (Demirocak, 2017). Ancak, soğutma işlemi de enerji sarfiyatını artırır. Bu nedenle, sıkıştırma ve soğutma işlemlerinin enerji sarfiyatı dikkate alındığında sıkıştırma maliyetinin hidrojenin sıvılaştırılması maliyetinden daha yüksek olacağı tahmin edilmektedir (Sabaz, 2018).

5.4.1.2. Sıvılaştırılmış Halde Hidrojen Depolama Yöntemi

Sıvılaştırılmış hidrojen depolaması, sıkıştırılmış gaz halinde depolamaya kıyasla daha yüksek gravimetrik ve hacimsel yoğunluk sağlar. Sıvılaştırılmış hidrojen depolama tanklarının basıncı, sıkıştırılmış hidrojen depolamaya göre çok daha düşüktür (<1 MPa). Bu, karbon fiber takviyeli kompozit tankların maliyetini azaltır. Ancak, sıvılaştırma için gerekli enerji ve kaynama kayıpları bu depolama yönteminin dezavantajlarıdır (Demirocak, 2017). Sıvı hidrojenin yoğunluğu 71 kg/m³'tür ve hidrojeni sıvı hale getirip depolayabilmek için -253°C'ye soğutulması gerekir. Ancak, mevcut teknolojiyle hidrojeni bu sıcaklığa soğutup depolamak oldukça maliyetlidir ve uzun zaman alır. Ayrıca, sıvı depolarının iyi bir ısı yalıtımına sahip olması gerekmektedir (Sabaz, 2018).

5.4.1.3. Kriyojenik Sıkıştırma ile Hidrojen Depolama

Kriyojenik sıkıştırmalı hidrojen depolaması, hidrojenin yüksek basınçlarda ve kriyojenik sıcaklıklarda (-140°C ve altı sıcaklıklar) depolanması prensibine dayanır. Bu yöntem, sıkıştırılmış gaz ve sıvılaştırılmış hidrojen depolama teknolojilerinin temel dezavantajlarını aşmayı amaçlar (Aceves, 2019). Sıkıştırılmış hidrojen depolamasının dezavantajlarından biri yüksek basınçlarda bile hidrojenin düşük gravimetrik ve hacimsel yoğunluğudur. Sıvılaştırılmış hidrojen depolamasında ise hidrojenin kaynama kaybı önemli bir sorundur. Sıvı hidrojen tankları genellikle düşük basınçlı tanklardır ve maksimum çalışma basıncı yaklaşık 1 MPa civarındadır. Bu nedenle, sıvı hidrojen tanklarının en

fazla birkaç günlük bir uyku süresi vardır (Demirocak, 2017). Ancak, yüksek basınç kabiliyetine sahip kriyojenik tanklar kullanılarak uyku süresi önemli ölçüde artırılabilir. Bu, depolama süresini ve verimliliğini artırmak için önemli bir avantaj sağlar (Aceves, 2019).

5.4.2. Kimyasal Hidrojen Depolama Yöntemleri

Katı halde hidrojen depolama yöntemleri, hidrojen ile depolama malzemesi arasındaki etkileşimin gücüne dayanarak tersinir hidrüllere ve fiziksel adsorpsiyon malzemeleri olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Koşar, 2021). Tersinir hidritler genellikle güçlü etkileşimlere dayalıdır ve metal hidritler ile kompleks hidritler olarak sınıflandırılabilir. Bu yöntemler, hidrojenin depolama malzemesiyle kimyasal olarak etkileşime girdiği için katı halde depolama sağlar. Öte yandan fiziksel adsorpsiyon malzemeleri daha zayıf etkileşimlere dayanır ve hidrojen moleküllerini yüzeylerine adsorbe ederek depolarlar. Bu yöntemler de katı halde hidrojen depolama alanında önemli bir rol oynar (Koşar, 2021).

6. JET ALEVLERİ

6.1. Endüstriyel Tehlikelerin Yönetimi

Jet alevleri ve hidrojen güvenliği, endüstriyel tesislerde önemli güvenlik sorunları arasında yer almaktadır (Smith, 2021). Bu tür tehlikeler ciddi maddi hasara, insan kaybına ve çevresel zararlara yol açabilir (Brown, 2020).

6.2. Jet Alevlerinin Oluşumu ve Hidrojen Güvenliği

Jet alevleri, endüstriyel tesislerde sıkça karşılaşılan bir yangın riski olarak kabul edilir (Martinez, 2023). Yüksek basınç altında yanıcı bir gazın bir boşluğa salınmasıyla oluşurlar (Wang, 2018). Hidrojen, endüstriyel tesislerde sıkça kullanılan bir gazdır ve jet alevlerinin oluşumunda etkili olabilir (Garcia ve ark., 2020). Hidrojenin yanıcı özellikleri jet alevlerinin etkisiyle yangın riskini artırır (Kim ve ark., 2019).

6.3. Jet Alevlerinin Etkileri ve Hidrojen Güvenliği Önlemleri

Jet alevlerinin etkileri, endüstriyel tesislerde ciddi sonuçlara neden olabilir (Tan, 2021). Jet alevleri, çevredeki malzemelerin yanmasına ve patlamalara neden olabilir bu da domino etkisi yaratabilir. Hidrojen güvenliği önlemleri tesislerde hidrojenin güvenli bir şekilde depolanması, taşınması ve kullanılması için çeşitli önlemleri içerir (Li, 2022). Bu önlemler arasında havalandırma sistemlerinin kullanılması, kaçak dedektörlerinin kurulması ve yangın söndürme ekipmanlarının hazır bulundurulması yer alır.

6.4. Endüstriyel Tehlikelerin Yönetimi ve Güvenlik Stratejileri

Endüstriyel tesislerde jet alevleri ve hidrojen güvenliği risklerinin yönetilmesi için stratejiler geliştirilmelidir (Zhang, 2023). Bu stratejiler arasında tesislerde güvenlik eğitimlerinin düzenlenmesi, risk analizinin ve risk değerlendirmelerinin yapılması ve uygun güvenlik ekipmanlarının sağlanması bulunmaktadır (Wang, 2024). Endüstriyel tesislerin güvenlik planlarının düzenli olarak gözden geçirilmesi ve güncellenmesi de önemlidir.

7. DEFLAGRASYON VE DETONASYON TEHLİKELERİ

Hidrojen, çevre dostu bir enerji kaynağı olarak kabul edilmesinin yanı sıra endüstriyel alanlarda da yaygın olarak kullanılan bir gazdır. Ancak, hidrojenin yanıcı ve patlayıcı özellikleri uygun şekilde kontrol edilmediğinde ciddi tehlikelere yol açabilir (Smith, 2021).

7.1. Deflagraşyon ve Detonasyonun Anlamı ve Özellikleri

Deflagraşyon ve detonasyon, yanıcı maddelerin yanma reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan iki farklı patlama türüdür. Bu terimler sıklıkla karıştırılsa da aslında farklı patlama mekanizmalarını ifade ederler. Deflagraşyon, yanıcı bir maddenin yavaş ancak sürekli bir şekilde yanmasıdır (Smith, 2021). Bu yanma sürecinde ateş hızı kontrol altındadır ve genellikle düşük basınç ve ses düzeyleri ile karakterizedir. Bir gazın ateşle teması sonucunda ortaya çıkan bir yangın, tipik bir deflagraşyon örneğidir (Smith, 2021). Detonasyon ise yanıcı bir maddenin ani ve şiddetli bir şekilde yanmasıdır (Johnson, 2022). Bu tür yanma reaksiyonu sonucunda patlama dalgaları oluşur ve bu dalgalar süpersonik hızlarda hareket edebilir. El bombası patlaması veya TNT'nin ateşlenmesi, tipik bir detonasyon örneğidir (Johnson, 2022).

7.2. Deflagraşyon ve Detonasyon Arasındaki Farklar

Deflagraşyon ve detonasyon arasındaki temel fark, yanma hızı ve patlama karakteristikleridir. Deflagraşyon, yavaş ve kontrollü bir yanma şekli olduğu için basınç dalgaları yavaş ilerler ve genellikle düşük ses seviyesi vardır. Diğer yandan, detonasyon aniden gerçekleşen ve şiddetli bir patlamayla sonuçlanan bir yanma türüdür. Bu nedenle basınç dalgaları hızla ilerler ve yüksek ses seviyesine sahiptir (Brown, 2020). Deflagraşyon ve detonasyon, yanıcı maddelerin farklı patlama türlerini ifade eder. Deflagraşyon, yavaş ve kontrollü bir yanma şekli iken, detonasyon aniden gerçekleşen ve şiddetli bir patlamayla sonuçlanan bir yanma türüdür. Bu farklar yanıcı maddelerin tehlikeli özelliklerini anlamak ve uygun güvenlik önlemlerini almak için önemlidir (Brown, 2020).

7.3. Hidrojenin Güvenli Kullanımı ve Deflagrasyon Tehlikesi

Hidrojen, endüstriyel tesislerde yaygın olarak kullanılan bir gaz olmasına rağmen, doğru güvenlik önlemleri alınmadığında riskler taşır. Hidrojenin havayla karışması durumunda belirli bir konsantrasyonda tutulduğunda deflagrasyon riski ortaya çıkar (Brown, 2020). Bu durumda yanıcı gazın hızlı yanmasıyla sınırlı ancak potansiyel olarak tehlikeli bir yanma meydana gelir.

7.4. Detonasyon Tehlikesi ve Hidrojen Kullanımı

Hidrojenin yanması, yeterli oksijenle karıştırıldığında patlayıcı bir karışım oluşturabilir. Bu koşullar altında, hidrojenin ani ve şiddetli bir şekilde yanması sonucu detonasyonlar meydana gelebilir (Garcia, 2021). Detonasyonlar, patlama dalgalarıyla karakterizedir ve ciddi zararlara neden olabilir.

7.5. Güvenli Hidrojen Kullanımı İçin Önlemler

Hidrojenin güvenli bir şekilde kullanılması için alınabilecek önlemler arasında tesislerde havalandırma sistemlerinin düzenli bakımı ve kontrolü, sızıntı dedektörlerinin kullanılması ve uygun yangın söndürme ekipmanlarının bulundurulması yer alır (Kim, 2022). Ayrıca, hidrojen depolama ve taşıma işlemlerinin de titizlikle yönetilmesi gerekir. Hidrojen, geleceğin enerji kaynaklarından biri olarak öne çıkıyor olsa bile doğru güvenlik önlemleri alınmadan kullanıldığında ciddi tehlikelere yol açabilir. Bu nedenle, endüstriyel tesislerde hidrojenin güvenli kullanımı için titizlikle çalışılmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır.

8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu kitap bölümünde, endüstriyel tesislerdeki hidrojen tehlike tespiti, ateşlenmemiş/tutuşmamış salınımlar, kapalı alanlarda/ortamlarda hidrojen gazı dağılımı, hidrojen gazı karışımlarının ateşlenmesi/tutuşması, mikro alevler, jet alevleri, deflagrasyon ve detonasyon gibi önemli tehlikeler ve bu tehlikelerin oluşturabileceği riskler ele alındı. Hidrojenin yanıcı ve patlayıcı özellikleri incelendi ve güvenli kullanımı için alınması gereken önlemler vurgulandı. Bu tehlikelerin endüstriyel tesislerde doğru bir şekilde yönetilmesi, ciddi maddi hasar, insan kaybı ve çevresel zararların önlenmesine yardımcı olabilir. Bu sebepten dolayı, tesislerde iş güvenliği eğitimlerinin düzenlenmesi, risk analizi ve risk değerlendirmesinin yapılması ve uygun güvenlik ekipmanlarının sağlanması gibi teknik konuların geliştirilmesi önemlidir. Hidrojen geleceğin enerji kaynaklarından biri olarak öne çıkmasıyla birlikte hidrojenin güvenli kullanımı için en ince ayrıntısına kadar çalışılmalı ve gerekli tüm iş sağlığı ve güvenliği önlemleri alınmalıdır. Tüm bu güvenlik önlemleri ile birlikte endüstriyel tesislerde çalışanların sağlıklı ve güvenli iş ortamlarında görevini ifa etmesi ayrıca çevresel tehlikeleri ve riskleri en aza indirmek için en üst yönetimden en alt kademe çalışana kadar benimsenmesi gerekmektedir.

9. KAYNAKÇA

- Alfarizi, M. G., Ustolin, F., Vatn, J., Yin, S., Paltrinieri, N. (2023). Towards accident prevention on liquid hydrogen: A data-driven approach for releases prediction. *Reliability Engineering and System Safety* (Vol. 236, ss. 109276).
- Ar, I., Taplamacıoğlu, M. C. ve Ar, F. (2013). Hidrojen depolama amacıyla kimyasal yöntemle metal hidrat sentezi. *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, No. 9, ss. 1689–1699).
- Brown, M. (2021). Understanding the formation mechanism of micro flames. In *Proceedings of the National Hydrogen Association* (pp. 112–125).
- Brzezinska, D. (2021). Hydrogen dispersion phenomenon in nominally closed spaces. *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 46, ss. 2835-2865).
- Cirrone, D., Makarov, D., Proust, C., Molkov, V. (2023). Minimum ignition energy of hydrogen-air mixtures at ambient and cryogenic temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 48, ss. 16530-16544).
- Demirocak, D. E. (2017). Hydrogen storage technologies. In *Nanostructured Materials for Next-Generation Energy Storage and Conversion: Hydrogen Production, Storage, and Utilization* (pp. 117–142). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53514-1>
- Fernández-Tarrazo, E., Gómez-Miguel, R., Sánchez-Sanz, M. (2023). Minimum ignition energy of hydrogen–ammonia blends in air. *Fuel* (Vol. 337, ss. 127128).
- Garcia, A. ve ark. (2020). Hydrogen storage and safety guidelines. *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 35, No. 7, ss. 3210–3225).
- Johnson, E. (2022). Hydrogen safety measures in industrial facilities. *Proceedings of the International Conference on Hydrogen Technologies*.
- Johnson, E. (2023). Safety measures for micro flames in hydrogen storage. *Proceedings of the International Conference on Hydrogen Technologies*.
- Kim, J., Kim, Y., Park, B., Yoon, U., Kang, C. (2024). The effect of natural ventilation through roof vents following hydrogen leaks in confined spaces. *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 50, ss. 1395-1405).
- Kim, S. ve ark. (2019). Analysis of hydrogen deflagration hazards in industrial facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (Vol. 28, No. 3, ss. 567–580).
- Kobeissi, S., Ling, N. N. A., Yang, K., May, E. F., Johns, M. L. (2024). Dispersion of hydrogen in different potential cushion gases. *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 60, ss. 940-948).

- Koşar, C. (2021). Hidrojen depolama yöntemleri. In *Open Journal of Nano* (Vol. 6, No. 1, pp. 1–10).
- Lach, A. W., Gaathaug, A. V., Vaagsaether, K. (2020). Pressure peaking phenomena: Unignited hydrogen releases in confined spaces e Large-scale experiments. *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 45, ss. 32702-32712).
- Lee, D. ve ark. (2019). Effects of deflagrations on industrial equipment. *Journal of Fire Engineering* (Vol. 15, No. 2, ss. 45–57).
- Lee, D. ve ark. (2020). Assessment of micro flames' impact on hydrogen storage tanks. *Journal of Safety Engineering* (Vol. 10, No. 4, ss. 78–89).
- Li, C. (2022). Safety guidelines for hydrogen handling in industrial environments. *Safety Engineering* (Vol. 18, No. 4, ss. 112–125).
- Li, Y., Wang, Z., Shi, X. And Fan, R. (2023). Safety analysis of hydrogen leakage accident with a mobile hydrogen refueling station. *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 171, ss. 619-629).
- Li, Y., Xiao, J., Zhang, H., Breitung, W., Travis, J., Kuznetsov, M., Jordan, T. (2020). Numerical analysis of hydrogen release, dispersion and combustion in a tunnel with fuel cell vehicles using all-speed CFD code GASFLOW-MPI. *International Journal of Hydrogen Energy* (ss. 1-13).
- Liang, Y., Liu, L., Peng, N., Ghidaglia, J. M., Qu, Y. (2024). Numerical simulation of small-scale unignited hydrogen release. *International Journal of Hydrogen Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.08>.
- Liu, H., Salehi, F., Abbassi, R., Lau, T., Yeoh, G. H., Mitchell Corbett, F., Raman, V. (2023). Experimental and numerical analysis of low-density gas dispersion characteristics in semi-confined environments. *Journal of Prevention in the Process Industries* (Vol. 86, ss. 105184).
- Martinez, M. (2023). Preventive measures against deflagrations in industrial plants. *Proceedings of the International Conference on Industrial Safety* (ss. 205–217).
- Meng, B. et al. (2017). Hydrogen effects on X80 pipeline steel in high-pressure natural gas/hydrogen mixtures, *Int. J. Hydrogen Energy* (Vol. 42).
- Michler, T., Elsässer, C., Wackermann, K., Schweizer, F. (2021). Effect of hydrogen in mixed gases on the mechanical properties of steels-theoretical background and review of test results. *Metals* (Vol. 11, ss. 1847).
- Panda, P.P., Hecht, E.S. (2017). Ignition and flame characteristics of cryogenic hydrogen releases, *Int. J. Hydrogen Energy* (Vol. 42, No. 1, ss. 775–785).

- Patel, P., Baalisampang, T., Arzaghi, E., Garaniya, V., Abbassi, R., Salehi, F. (2023). Computational analysis of the hydrogen dispersion in semi-confined spaces. *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 176, ss. 475-488).
- Ren, Z., Giannissi, S., Venetsanos, A. G., Friedrich, A., Kuznetsov, M., Jordan, T., Wen, J. X. (2022). The evolution and structure of ignited highpressure cryogenic hydrogen jets. *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 47, ss. 29184-29194).
- Sabaz, P. (2018). Hidrojen depolama için mandalina kabuğundan aktif karbon üretimi.
- Smith, J. (2021). Detonations: Causes and prevention strategies. *Journal of Industrial Safety* (Vol. 30, No. 4, ss. 78–89).
- Smith, J. (2022). Micro flames in hydrogen storage systems. *Journal of Hydrogen Safety* (Vol. 25, No. 2, ss. 45–57).
- Soto, V., Baalisampang, T., Arzaghi, E., Garaniya, V. (2024). Numerical modelling of hydrogen release and dispersion in under-deck compressed hydrogen storage of marine ships. *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 59, ss. 1244-12569).
- Sun, K., Li, Z. (2021). Development of emergency response strategies for typical accidents of hydrogen fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy* (ss. 1-18).
- Tan, W. (2021). Deflagrations risk assessment in hydrogen storage facilities. *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 210, Nos. 2–3, ss. 421–435).
- Wang, L. (2018). Risk management strategies for deflagrations in industrial facilities. *Safety Science* (Vol. 40, No. 3, ss. 321–355)
- Wang, L. (2019). Risk analysis of micro flames in hydrogen storage systems. *Safety Science* (Vol. 40, No. 3, ss. 321–355).
- Yang, F., Wang, T., Deng, X., Dang, J., Huang, Z., Hu, S., Li, Y., Ouyang, M. (2021). Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process. *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 46, ss. 31467-31488).
- Yosri, M.R., Palulli, R., Talei, M., Mortimer, J., Poursadegh, F., Yang, Y., Brear, M. (2023). Numerical investigation of a large bore, direct injection, spark ignition, hydrogen-fuelled engine. *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 48, ss. 17689-17702).
- Zhang, X., Wang, O., Hou, X., Li, Y., Miao, Y., Li, K., Zhang, L. (2022). Effect of the position and the area of the vent on the hydrogen dispersion in a naturally ventilated cuboid space with one vent on the side wall. *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 47, ss. 9071-9081).

Zhang, Y. ve ark. (2023). Risk analysis of hydrogen deflagrations in industrial plants. *Safety Science* (Vol. 50, No. 1, ss. 205–217).



Kompresör Atık Isı Kazanımının İncelenmesi

Neşe Taşdemir¹ & Muhammet Şaka¹ &

Mustafa Tahir Akkoyunlu² & Alparslan Turanboy³

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye ORCID: 0009-0001-2490-1343, ORCID: 0009-0008-0807-334X

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID:0000-0001-5748-6759

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID: 0000-0002-9908-5387

GİRİŞ

Günümüzde sanayi sektöründe enerji yönetimi, yalnızca ekonomik verimlilik açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve enerji arz güvenliği bakımından da stratejik bir öneme sahiptir. Özellikle enerji ihtiyacının büyük oranda ithalatla karşılandığı Türkiye gibi ülkelerde, sanayi işletmelerinde uygulanacak verimlilik artırıcı önlemler hem kaynak kullanımının etkinliğini artırmakta hem de dışa bağımlılığın azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Enerji ithalatımız 1990 yılında 31 Mtep iken 2011 yılında bu rakam neredeyse üç kat artarak 90 Mtep seviyesine ulaşmış 2012’de ise 99 Mtep olarak gerçekleşmiştir [1]. ETKB verilerine göre, Türkiye’nin 2022 yılındaki toplam enerji arzı 157,7 milyon TEP(ton eşdeğer petrol)’ [2] dir.

Türkiye için artan enerji talebi ve ithalat miktarı yerli kaynakların önemini daha da artırmaktadır [3]. Bu çerçevede, mevcut sistemlerde oluşan enerji kayıplarının analiz edilmesi ve bu kayıpların geri kazanımı için uygun teknolojik çözümlerin geliştirilmesi, enerji dönüşüm sürecinin önemli bir parçası haline gelmiştir.

Vidalı hava kompresörleri, sanayi tesislerinde basınçlı hava ihtiyacının karşılanmasında yaygın olarak kullanılmakta olup, elektrik enerjisi tüketimi açısından sistemin en yoğun bileşenlerinden birini oluşturur. Bu cihazların çalışma sürecinde harcanan enerjinin çok büyük bir kısmı, doğrudan faydalı işe dönüşmeden ısı enerjisine çevrilerek çevreye yayılmaktadır. Normal koşullarda dış ortama atılan bu termal enerji, uygun mühendislik yöntemleri ile geri kazanıldığında, ikincil bir enerji kaynağına dönüşebilmekte ve işletmelerde önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Geri kazanılan bu ısı enerjisi, personel duşları, lavabolar ve yemekhane gibi sosyal alanlarda sıcak su ihtiyacının karşılanması için kullanılabileceği gibi, proses öncesi kazan besleme suyu gibi teknik uygulamalarda da faydalı hale getirilebilir. Bu sayede hem doğalgaz gibi fosil yakıtlara olan bağımlılık azaltılır hem de enerji maliyetleri düşürülürken çevresel etkiler minimize edilir.

Bu çalışmada, 110 kW gücünde bir vidalı hava kompresöründen elde edilen atık ısıının sıcak su üretimi amacıyla değerlendirilmesi ele alınmakta; teknik hesaplamalarla birlikte ekonomik analizler de sunulmaktadır. Geri kazanılan enerjinin miktarı, kullanım senaryoları ve yatırımın geri dönüş süresi detaylı biçimde incelenmiştir. Ayrıca sistem bileşenlerinin performans karakteristikleri de dikkate alınarak, toplam verimlilik değerlendirilmiştir.

Çalışmanın sonunda, Konya ilindeki sanayi işletmeleri özelinde yapılan yaygınlaştırma analizine yer verilerek, bölgesel enerji tasarrufu potansiyeli ve karbon salımı azaltımı gibi çevresel katkılar ortaya konmuştur. Bu doğrultuda elde edilen veriler, yalnızca teorik değil, aynı zamanda pratik düzeyde de

uygulanabilir çözüm önerileri sunmakta ve enerji verimliliği alanında somut bir uygulama örneği oluşturmaktadır.

1. SANAYİ TESİSLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE UYGULANABİLİR FIRSATLAR

1.1. Kompresörlerde Atık Isı Enerjisinin Değerlendirilmesi

Optimizasyon, hemen her alanda kullanılan bir kavram olup, kazancı maksimum ve maliyeti minimum yapmayı amaçlamaktadır. [4]

Çoğu enerji kaynağı iklim şartlarına bağlıdır bu yüzden enerjinin tasarım, planlama ve kontrol aşamasında optimizasyon yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. [5]

Enerji verimliliği, belirli bir hedefe ulaşmak veya istenen bir görevi tamamlamak için enerjinin en iyi şekilde kullanılmasıyla ilgilidir. Kavram, söz konusu görevin veya sistemin kalibresini ve etkinliğini korurken veya arttırırken enerji tüketimini azaltmayı gerektirir. Enerji verimliliğinin amacı; konfor, üretkenlik ve işlevselliğin tehlikeye atılmamasını sağlarken enerji israfını azaltmak ve toplam enerji kullanımını azaltmaktır[6].

Basınçlı hava elde etmek için kompresörlerde harcanan elektrik enerjisinin %80~93'ü ısı enerjisine dönüşmektedir [7]. Üretim veya proses aşamasında, ısıtma amaçlı elektrik, gaz veya sıvı yakıt kullanılıyorsa, bu yöntemlerden birinin kısmen ya da tamamen yerini kompresörden elde edilecek ısı enerjisine bırakma olasılığı vardır. Çeşitli sistemler kullanılarak kompresör yağ, soğutma suyu veya sıcak havadan çekilen ısı; konfor ısıtması, kazan yanma havası, besleme suyu ön ısıtması, proses ısıtması ve diğer amaçlar için kullanılabilir. Geri kazanılan ısı enerjisi kazancı belirlerken, elde edilecek sıcaklık seviyeleri, olası kullanım alanlarını belirler. [8].

Enerji sistemlerine yapılan yatırımların teknolojik, sosyo-ekonomik ve çevresel özelliklere göre değerlendirilmesi gerekmektedir[9].

Yüksek güç tüketiminde bulunan kompresörler için atık ısı geri kazanımı projesi önerilmektedir. Ölçümü gerçekleştirilen kompresörün yağ devresine entegre edilecek ısı geri kazanım sistemi ile make up suyunun ısıtılması, kullanım suyu ya da mahal ısıtma olarak kullanılması değerlendirilebilir. Projede kompresör atık ısısı değerlendirilerek doğalgaz tasarrufu sağlanabilecektir. Yapılan hesaplamalar ve teknik veriler aşağıda bilgilerinize sunulmuştur.

Bir kompresörün ürettiği ısı yaklaşık %78'i sıkıştırma işlemi sırasında ısıya dönüşmektedir. [10] Bu ısı, alanların ısıtılmasında kullanılabilir şekilde yönlendirilebilirse kışın ısıtma maliyetleri düşürülebilecektir.

Bunun için, hava soğutmalı bir kompresörün soğutulmasında kullanılan hava, bir kanal sistemi aracılığıyla kompresörlerin bulunduğu mekanik odaya bitişik hacimlere yönlendirilebilir. Buradan da kışın ısıtma uygulamasının söz konusu olduğu açık hava endüstriyel tesislerinin doğrudan ısıtılması için buralara tahliye edilebilir. Ayrıca, bu atık ısı kanallar vasıtasıyla bir ısı pompası üzerinden geçirilerek havadan suya bir ısı pompası ile kışın ısıtma yazın kullanım sıcak suyu üretimi sağlanabilir. [11]

1.1.1. Kompresörlerde Atık Isının Geri Kazanım Yöntemleri

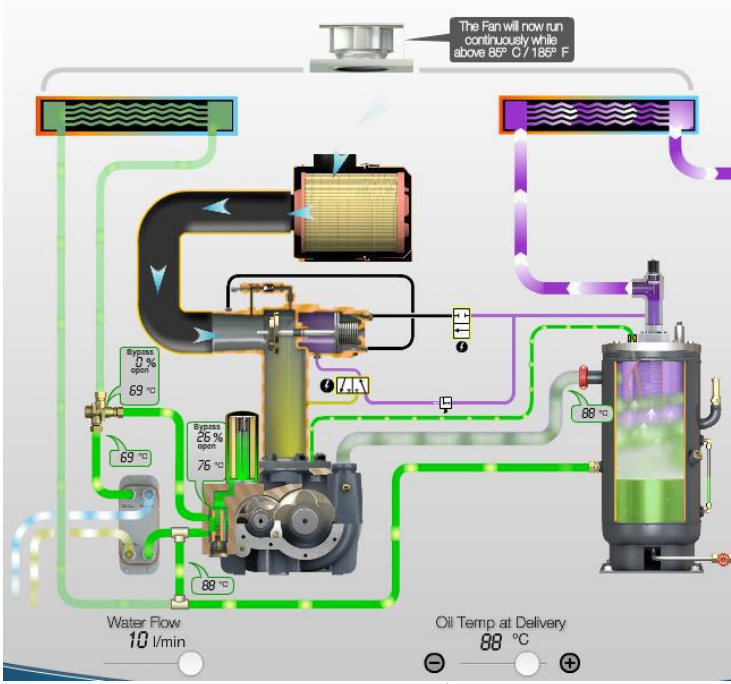
Vidalı kompresörlerden elde edilen atık ısının geri kazanımı, iki temel yöntemle gerçekleştirilebilir:

1. Yağ Soğutmalı Sistem Geri Kazanımı: Kompresör yağının soğutulması amacıyla kullanılan plaka tipi eşanjörler, yağdan alınan ısıyı suya aktarır. Bu sistemde su 60°C'ye kadar ısıtılabilir.

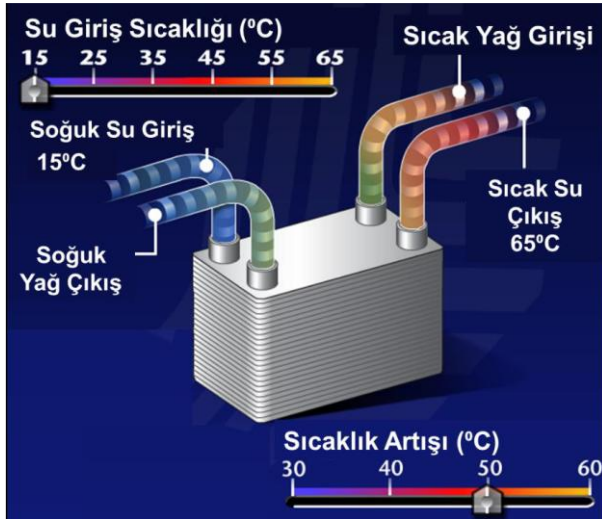
2. Sıkıştırılmış Hava Geri Kazanımı: Kompresörden çıkan basınçlı havanın sıcaklığı yüksektir. Bu havanın hava-su eşanjörü üzerinden geçirilmesiyle ısı enerjisi suya transfer edilir.

Sıcak Yağ ile Su Isıtma

Yağ enjekteli vidalı kompresörlerde, vida bloğunun (element) yüksek çalışma devri ve basınçlandırma işlemi sırasında soğutma yağı sıcaklıkları yaklaşık 85-90°C civarına ulaşabilmektedir. Bu kızgın yağ; seperatör tankı sonrasında, soğumak üzere radyatöre girmeden önce bir eşanjöre yönlendirilerek, dışardan beslenen soğuk suyla ısı transferi yapması sağlanır ve kompresör atık ısısından sıcak su elde edilmiş olur. [12]

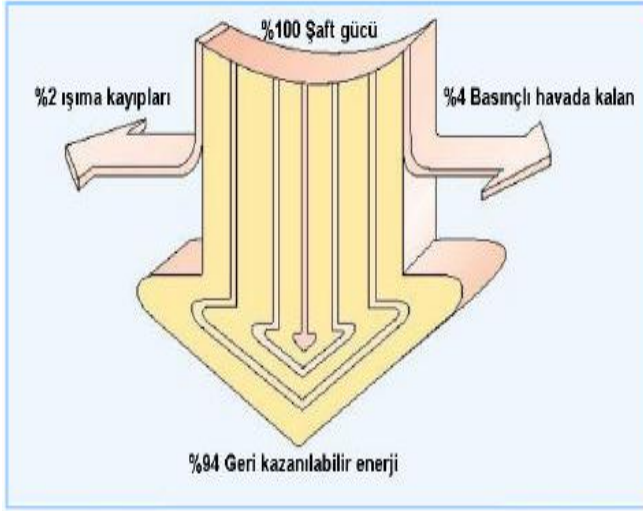


Şekil 1: Isı Geri Kazanım / Kompresör İçi Eşanjör Yerleşimi [13]

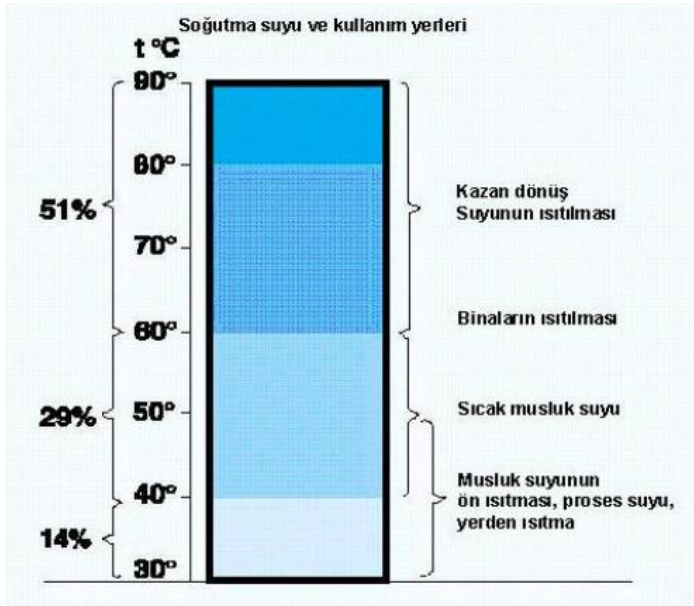


Şekil 2: Isı Geri Kazanım / Eşanjör Çalışma Prensibi[14]

1.1.2. Geri Kazanılan Sıcak Suyun Kullanım Alanları



Şekil 3: Kompresörlerde Tipik Enerji Akışı [15]



Şekil 4: Su Sıcaklıkları ve Tipik Kullanım Alanları [16]

Geri kazanılan sıcak suyun işletme içi kullanımı hem enerji verimliliğini artırır hem de çevresel etkileri azaltır. Bu uygulama kapsamında, atık ısıdan elde edilen sıcak su aşağıdaki alanlarda değerlendirilerek enerji tasarrufu sağlanabilir:

Endüstriyel tesislerde faaliyet gösteren hava kompresörleri, yalnızca basınçlı hava üretmekle kalmaz, aynı zamanda ciddi miktarda termal enerji açığa çıkarır. Genellikle çevreye yayılan bu ısı, uygun sistemlerle geri kazanıldığında farklı süreçlerde değerlendirilebilir hale gelir. Geri kazanılmış bu enerjinin çeşitli alanlara entegre edilmesi, enerji tüketiminin azaltılmasında ve işletme giderlerinin düşürülmesinde önemli rol oynamaktadır.

1. Personel Duşları ve Lavabo Alanları

Sanayi tesislerinde çalışan personelin günlük kullanımına yönelik sıcak su ihtiyacı çoğunlukla elektrikli ısıtıcılar veya doğalgazla karşılanmaktadır. Ancak kompresörlerden elde edilen atık ısı kullanılarak bu alanlardaki sıcak su gereksinimi, ilave bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulmadan karşılanabilmektedir. Bu yaklaşım yalnızca enerji maliyetlerini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda enerji altyapısı üzerindeki yükü hafifletir.

2. Mutfak ve Yemekhane Kullanımları

İşletme bünyesindeki yemekhaneler ve endüstriyel mutfaklar, sıcak suyu yoğun olarak kullanan bölümler arasında yer alır. Bulaşık yıkama, hijyen uygulamaları ve yemek hazırlama süreçleri yüksek sıcaklıkta su gerektirir. Bu tür uygulamalarda geri kazanılmış sıcak suyun kullanılması hem enerji kullanım süresini azaltır hem de suyun daha kısa sürede istenen sıcaklığa ulaşmasını sağlar. Bu da doğrudan maliyet avantajı ve operasyonel verimlilik sağlar.

3. Kazan Besleme Suyunun Ön Isıtılması

Buhar üretimi yapan kazan sistemlerinde kullanılan besleme suyu, yüksek sıcaklıklara çıkarılmak zorundadır. Bu işlemin tamamen fosil yakıtla yapılması, önemli bir enerji sarfiyatına yol açar. Geri kazanılmış sıcak su ile besleme suyunun önceden ısıtılması, yakma sistemlerinin daha az çalışmasını sağlayarak yakıt tüketimini azaltır, böylece doğalgaz giderlerinde kayda değer bir düşüş sağlanır. Ayrıca sistemin genel verimliliği artar, kazan ömrü uzar.

4. Endüstriyel Temizlik Uygulamaları

Üretim alanlarında ve proses ekipmanlarında yapılan temizlik faaliyetleri çoğunlukla sıcak su gerektirir. Zemin, hat ve cihaz temizliği gibi işlemlerde atık ısıdan elde edilen sıcak su kullanıldığında, harici ısıtma sistemlerine ihtiyaç azalır ve temizlik süreci hem ekonomik hem de çevresel açıdan daha sürdürülebilir hale gelir.

Bu uygulamaların ortak noktası, mevcut enerji kaynaklarının verimli değerlendirilmesiyle yeni bir yatırım yapmadan sıcak su ihtiyacının karşılanabilmesidir. Böylece hem doğalgaz ve elektrik tüketimi azaltılmakta hem de karbon emisyonları düşürülmektedir. Bu durum, işletmenin çevresel etkilerini

azaltırken aynı zamanda enerji performansını da iyileştirmektedir. Geri kazanılmış ısının etkin kullanımı, işletmelere uzun vadeli bir rekabet avantajı ve sürdürülebilirlik katkısı sunmaktadır.

1.1.3. Kompresör ve Yardımcı Ekipmanların Teknik Özellikleri ve Saha Yerleşimi

İşletmede mevcut olan basınçlı hava sistemi detaylı bir şekilde incelenmiş ve sistemin genel yapısı teknik veriler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, tesisin üretim süreçlerinde ihtiyaç duyduğu basınçlı havayı karşılamak amacıyla bir adet vidalı tip hava kompresörünün kullanılmakta olduğu belirlenmiştir. Bu kompresörün, sürekli ve güvenilir hava temini sağlamak üzere kesintisiz çalışma prensibine göre işletildiği tespit edilmiştir.

Basınçlı hava sisteminin etkinliğini artırmak amacıyla sisteme bir adet hava kurutucu ile bir adet 1.000 litrelik basınçlı hava tankının entegre edildiği görülmüştür. Hava kurutucunun, basınçlı hava içerisindeki nemi uzaklaştırarak sistem elemanlarının korunmasına ve genel sistem verimliliğinin artırılmasına katkı sağladığı anlaşılmıştır. Basınçlı hava tankının ise ani basınç dalgalanmalarını dengeleyerek, sistemin daha kararlı çalışmasına olanak tanıdığı ve kompresörün yük-altı çalışma süresini optimize ettiği değerlendirilmiştir.

Yapılan saha incelemelerinde, kompresörün tesisin güney cephesinde konumlandığı gözlemlenmiş, hava kurutucusu ve basınçlı hava tankının da bu alanda sistemle entegre biçimde yerleştirildiği belirlenmiştir. Yukarıda envanter bilgileri verilen bu ekipmanlara ait genel görünüş görselleri aşağıda sunulmuştur.

Tablo 1: İncelenen Kompresöre Ait Teknik Özellikler

İncelenen Kompresöre Ait Teknik Özellikler	
Özellik	Değer
Nominal Güç	110 kW
Serbest Hava Debisi	20.290 L/dk
Çalışma Basıncı	7,5 bar
Motor Devri	2980 d/d (rpm)
Gerilim / Faz / Frekans	380 V / 3 Faz / 50 Hz
Boyutlar (UxGxY)	1850 x 1530 x 1955 mm
Ağırlık	2.740 kg
Çıkış Bağlantı Çapı	DN 80
Üretim Yılı	2023
Menşei	Türkiye



Resim 1: Kompresör Örnek Görseli



Resim 2: Kompresör Hava Tankı Örnek Görseli



Resim 3: Kurutucu Genel ve Etiket Örnek Görseli

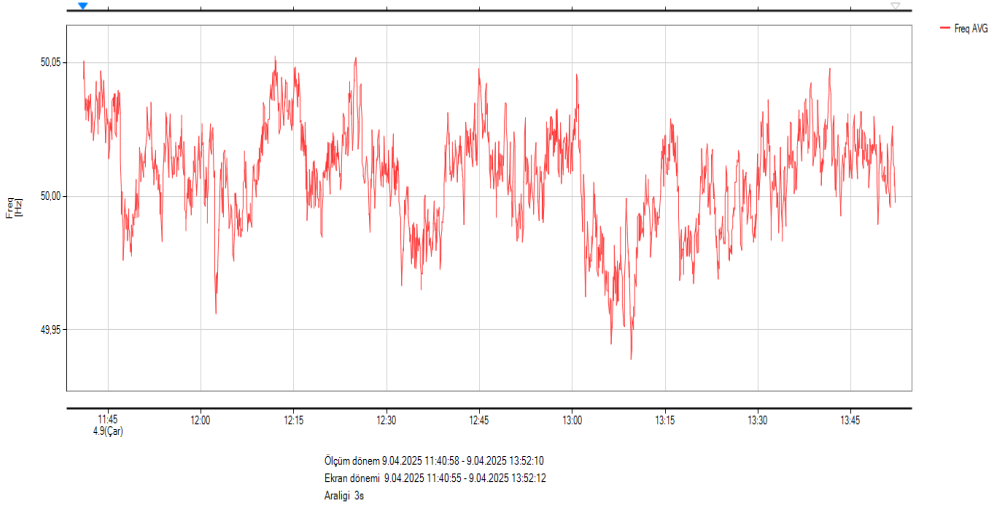
Tablo 2: Kurutucu Etiket Bilgileri
Kurutucuya Ait Teknik Özellikler

Özellik	Değer
Maksimum Basınç	16 Bar
Maksimum Akım	13.35 A
Sigorta Akımı	15.0 A
Güç (Power)	2.25 kW
Soğutucu Gaz	R134a
Gaz Miktarı	5.00 kg
Gerilim / Frekans	230 V / 1 Faz / 50 Hz
Menşei	Türkiye

1.1.4. Kompresör Sistemi Üzerinde Gerçekleştirilen Enerji Ölçümleri



Resim 4: Enerji Analizörü ile Ölçüm Görseli



Grafik 1: Frekans Ölçüm Sonuçları Grafiği

Tablo 3: Frekans Ortalama Değerleri

Dönem : 9.04.2025 11:40:55 - 9.04.2025 13:52:12

- Max -

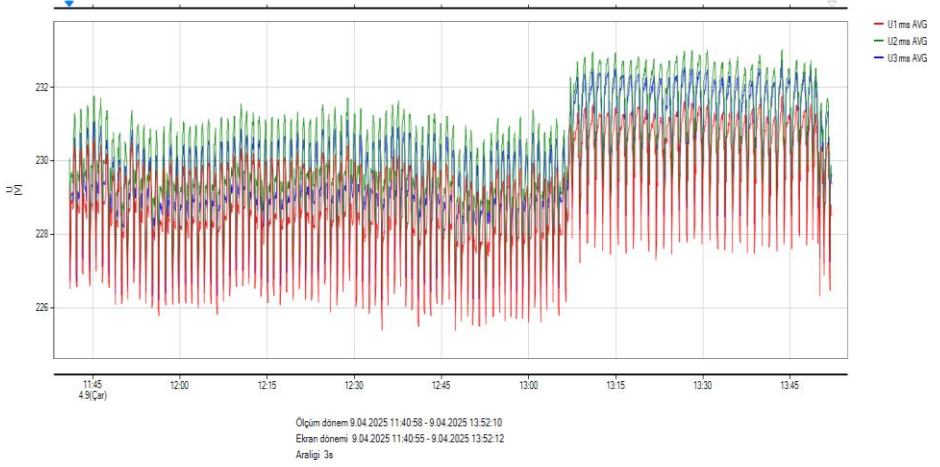
	Kac Defa	Ölçülmüş değerler	Ortalama	Standart sapma	5%	50%	95%
Freq MAX [Hz]	2625	50,050 (9.04.2025 12:25:01.0) 49,949 (9.04.2025 13:09:31.0)	50,012	0,019	49,980	50,014	50,036

- Avg -

	Kac Defa	Ölçülmüş değerler	Ortalama	Standart sapma	5%	50%	95%
Freq AVG [Hz]	2625	50,052 (9.04.2025 12:12:01.1) 49,999 (9.04.2025 13:09:31.0)	50,007	0,019	49,975	50,009	50,036

- Min -

	Kac Defa	Ölçülmüş değerler	Ortalama	Standart sapma	5%	50%	95%
Freq MIN [Hz]	2625	50,050 (9.04.2025 12:12:01.1) 49,995 (9.04.2025 13:09:31.0)	50,003	0,019	49,969	50,005	50,036

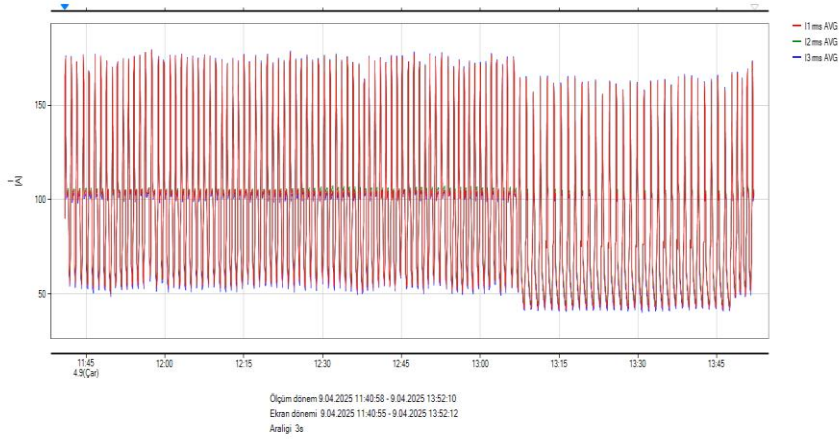


Grafik 2: Gerilim Ölçüm Sonuçları Grafiği

Tablo 4: Gerilim Ortalama Değerleri

Dönem : 9.04.2025 11:40:55 - 9.04.2025 13:52:12								
- Avg -								
	Kac Defa	Ölçülmüş değerler	Ortalama	Standart sapma	5%	50%	95%	
U1 rms AVG [V]	2625	231,77 (9.04.2025 13:43:37.1) 225,38 (9.04.2025 12:47:25.0)	229,11	1,40	226,48	229,18	231,24	
U2 rms AVG [V]	2625	233,03 (9.04.2025 13:43:37.1) 226,34 (9.04.2025 12:47:25.0)	230,28	1,51	227,41	230,36	232,59	
U3 rms AVG [V]	2625	232,74 (9.04.2025 13:43:37.1) 225,94 (9.04.2025 12:47:25.0)	229,85	1,51	227,03	229,87	232,22	

	Kac Defa	Ölçülmüş değerler	Ortalama	Standart sapma	5%	50%	95%	
U1 rms MIN [V]	2625	231,68 (9.04.2025 13:43:37.1) 224,57 (9.04.2025 12:25:58.0)	228,86	1,48	226,10	228,89	231,11	
U2 rms MIN [V]	2625	232,94 (9.04.2025 13:28:10.0) 225,41 (9.04.2025 12:25:58.0)	230,01	1,60	227,06	230,05	232,48	
U3 rms MIN [V]	2625	232,67 (9.04.2025 13:43:37.1) 225,02 (9.04.2025 12:25:58.0)	229,60	1,59	226,69	229,57	232,11	



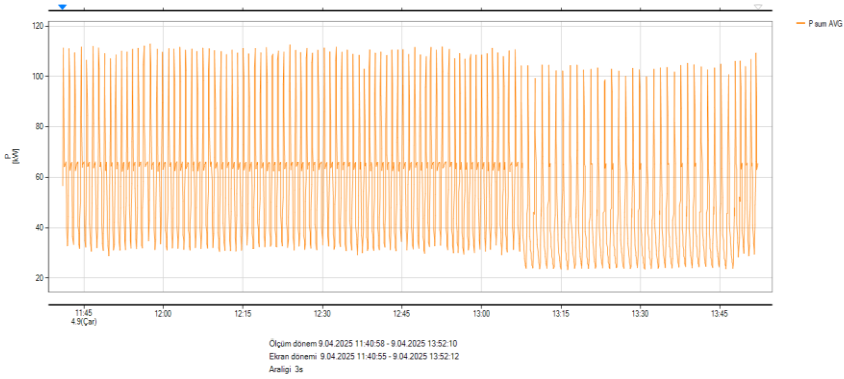
Grafik 3: Akım Ölçüm Sonuçları Grafiği

Tablo 5: Akım Ortalama Değerleri

	Kac Defa	Ölçülmüş değerler	Ortalama	Standart sapma	5%	50%	95%
I1 rms AVG [A]	2625	178,82 (9.04.2025 11:57:34.0) 41,60 (9.04.2025 13:16:22.0)	89,75	35,49	45,90	85,26	166,26
I2 rms AVG [A]	2625	178,14 (9.04.2025 11:57:34.0) 43,54 (9.04.2025 13:16:22.0)	90,81	34,99	47,53	86,46	165,94
I3 rms AVG [A]	2625	179,46 (9.04.2025 11:57:34.0) 40,21 (9.04.2025 13:30:49.1)	89,00	36,16	44,53	85,00	166,76

	Kac Defa	Ölçülmüş değerler	Ortalama	Standart sapma	5%	50%	95%
I1 rms MAX [A]	2625	184,21 (9.04.2025 12:06:25.0) 41,92 (9.04.2025 13:16:22.0)	95,39	38,94	47,38	100,95	174,90
I2 rms MAX [A]	2625	184,34 (9.04.2025 11:42:16.0) 43,80 (9.04.2025 13:16:22.0)	96,39	38,35	49,08	101,79	174,73
I3 rms MAX [A]	2625	184,49 (9.04.2025 11:53:10.1) 40,51 (9.04.2025 13:30:49.1)	94,74	39,67	45,90	100,78	175,75

	Kac Defa	Ölçülmüş değerler	Ortalama	Standart sapma	5%	50%	95%
I1 rms MIN [A]	2625	177,41 (9.04.2025 11:57:34.0) 41,21 (9.04.2025 13:16:22.0)	83,88	32,08	44,93	74,79	154,51
I2 rms MIN [A]	2625	176,55 (9.04.2025 11:57:34.0) 42,90 (9.04.2025 13:39:52.0)	85,01	31,66	46,59	75,26	154,40
I3 rms MIN [A]	2625	176,50 (9.04.2025 11:57:34.0) 39,94 (9.04.2025 13:30:49.1)	83,00	32,68	43,54	74,17	155,49



Grafik 4: Aktif Güç Ölçüm Sonuçları Grafiği

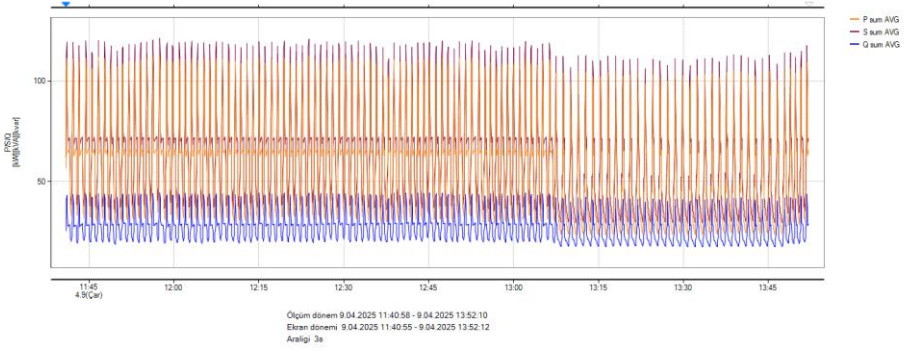
Tablo 6: Aktif Güç Ortalama Değeri
Dönem : 9.04.2025 11:40:55 - 9.04.2025 13:52:12

- Avg -

	Kac Defa	Ölçülmüş değerler	Ortalama	Standart sapma	5%	50%	95%
P Sum AVG [kW]	2625	113,00 (9.04.2025 11:57:34.0) 23,32 (9.04.2025 13:16:22.0)	55,40	23,43	26,00	52,72	105,16

	Kac Defa	Ölçülmüş değerler	Ortalama	Standart sapma	5%	50%	95%
P Sum MAX [kW]	2625	116,16 (9.04.2025 11:53:10.1) 23,49 (9.04.2025 13:16:22.0)	59,20	25,62	26,84	63,36	110,70

	Kac Defa	Ölçülmüş değerler	Ortalama	Standart sapma	5%	50%	95%
P Sum MIN [kW]	2625	111,98 (9.04.2025 11:57:34.0) 23,08 (9.04.2025 13:16:25.0)	51,63	21,36	25,35	45,65	97,89



Grafik 5: Aktif, Reaktif ve Görünür Güç Ölçüm Sonuçları Grafiği

Tablo 7: Aktif, Reaktif ve Görünür Güç Ortalama Değeri

	Kac Defa	Ölçülmüş değerler	Ortalama	Standart sapma	5%	50%	95%
P Sum MAX [kW]	2625	116,16 (9.04.2025 11:53:10.1) 23,49 (9.04.2025 13:16:22.0)	59,20	25,62	26,84	63,36	110,70
S Sum MAX [kVA]	2625	124,80 (9.04.2025 11:53:10.1) 29,41 (9.04.2025 13:16:22.0)	65,59	26,33	33,03	69,68	119,16
Q Sum MAX [kvar]	2625	46,97 (9.04.2025 12:19:31.1) 17,52 (9.04.2025 13:30:49.1)	27,91	7,58	19,10	28,33	44,19
P Sum AVG [kW]	2625	113,00 (9.04.2025 11:57:34.0) 23,32 (9.04.2025 13:16:22.0)	55,40	23,43	26,00	52,72	105,16
S Sum AVG [kVA]	2625	121,46 (9.04.2025 11:57:34.0) 29,24 (9.04.2025 13:16:22.0)	61,68	23,98	31,95	58,69	113,29
Q Sum AVG [kvar]	2625	44,53 (9.04.2025 11:57:34.0) 17,45 (9.04.2025 13:30:49.1)	26,73	6,75	18,75	26,02	42,01
P Sum MIN [kW]	2625	111,98 (9.04.2025 11:57:34.0) 23,08 (9.04.2025 13:16:25.0)	51,63	21,36	25,35	45,65	97,89
S Sum MIN [kVA]	2625	120,33 (9.04.2025 11:57:34.0) 28,93 (9.04.2025 13:33:28.1)	57,81	21,77	31,37	51,75	105,52
Q Sum MIN [kvar]	2625	44,04 (9.04.2025 11:57:34.0) 17,20 (9.04.2025 13:33:28.1)	25,59	6,02	18,43	24,51	39,47

Kompresörden alınan güç ölçümünde, ölçüm süresi boyunca ortalama **55,40** kW güç çekildiği görülmektedir.

1.1.5. Kompresör Atık Isısının Geri Kazanımı için Uygulama Analizi

Ölçümü gerçekleştirilen kompresörün yağ devresine entegre edilecek ısı geri kazanım sistemi ile kullanım suyunun ısıtılması planlanmaktadır.

Bu konuda bize yardımcı olacak termodinamik yasasına göre ‘ısı alışverişi olan olaylarda alınan ısı her zaman verilen ısıya eşit olmalıdır.’

$$Q=m \cdot c \cdot \Delta t$$

Q: Isı (kcal ya da kW)

m: kütle (kg/saat)

c: Öz ısı (kJ/ (kg. °C)

Δt : Giriş-Çıkış Sıcaklık Farkıdır (°C)

Tablo 8: Kazanılan Enerji ile Isıtılacak Su Debisi

Açıklama	Değer
Kompresör Ortalama Güç Tüketimi	55,40 kW/Saat
Kazanılacak Enerji Miktarı	38,78 kW/Saat (%70)
1 kWh	859,85 kcal
Kazanılan Enerji Miktarı (Q)	33.344,98 kcal/Saat
Su Giriş Sıcaklığı	15 °C
Su Çıkış Sıcaklığı	45 °C
Özgül Isı (c)	1 (kJ/kg.°C)
Kazanım ile Isıtılacak Su Debisi	1,10 m³/Saat

Tablo 9: Maliyet Tablosu

Açıklama	Değer
Yıllık Çalışma Süresi	7.200 Yıl/Saat
Doğalgaz Maliyeti	14,84 TL/Sm³
Doğalgaz Alt Isıl Değer	8.250,0 kcal/Sm³
Yıllık Tasarruf	240.083,85 kcal/Yıl
Yıllık Doğalgaz Tasarrufu	29.101,07 Sm³/Yıl
Yıllık Maddi Tasarruf	431.859,88 TL/Yıl
Yatırım Bedeli	504.000,0 TL
Geri Ödeme Süresi	1,17 Yıl

Kompresör atık ısı geri kazanımı ile enerji tasarrufu sağlanacaktır. Aşağıda bu projeye ait özet bilgilerin yer aldığı tablo sunulmuştur.

Tablo 10: Kompresör Atık Isı Geri Kazanım Projesi Özet Tablosu [10]

Enerji Verimliliği Önlemi	Enerji Türü	Tasarruf Miktarı				CO ₂ Azalma Miktarı	Yatırım Maliyeti	Basit Geri Ödeme Süresi	İç Karlılık Oranı	Net Bugünkü Değer	Ekonomik Ömür
		Miktar	Birim	TEP/Yıl	TL/Yıl	Ton CO ₂ eşdeğer/Yıl	TL	Yıl	%	TL	Yıl
Kompresör Atık Isı Geri Kazanımı	Doğal gaz	29.101,07	Sm ³	24,01	431.859,88	52,458	504.000,0	1,17	129,83	2.474.344,0	10

Ayrıca Ekonomik Ömür 10 yıl ve iskonto oranı %45 kabul edilerek yatırımın Net Bugünkü Değeri ve İç Karlılık Oranı hesaplanmıştır. Aşağıdaki tabloda bu değerler bilginize sunulmuştur.

Tablo 11: Kompresör Atık Isı Geri Kazanımı Finansal Analiz Tablosu

[illegible]

1.2. Konya İli Sanayisinde Atık Isıdan Enerji Elde Etme Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Konya ili sanayi altyapısı bakımından Türkiye'nin önde gelen üretim merkezlerinden biri olup, bölgede faaliyet gösteren yaklaşık 2.500 orta ve büyük ölçekli sanayi tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerin büyük bir kısmı, yüksek enerji tüketimine sahip ekipmanlarla donatılmış olup, özellikle basınçlı hava sistemleri işletmelerin vazgeçilmez unsurları arasında yer almaktadır.

Sahadan elde edilen gözlemler ve sektörel veriler doğrultusunda, bu işletmelerin yaklaşık %40'ında etiket gücü 55 kW ve üzeri hava kompresörlerinin aktif olarak kullanıldığı tahmin edilmektedir. Bu da, en az 1.000 sanayi tesisinde yüksek güçlü kompresörlerin mevcut olduğu ve bu sistemlerin atık ısı potansiyelinin ciddi düzeyde olduğu anlamına gelmektedir.

Bu kapsamda değerlendirildiğinde, atık ısı geri kazanımı temelli sıcak su üretim sistemlerinin yalnızca Konya özelinde dahi binlerce ton karbon salımının önlenmesine, milyonlarca lira enerji maliyeti tasarrufuna ve ülke genelinde yaygınlaştırılması halinde önemli bir enerji dönüşüm hamlesine öncülük edebileceği öngörülmektedir. Enerji verimliliği ve sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda, bu tür uygulamaların sanayi ölçeğinde stratejik yaygınlaştırma potansiyeli oldukça yüksektir.

Doğalgaz Tasarrufu: 29.101,07 Sm³

CO₂ emisyonu hesaplamalarında IPCC tarafından önerilen Tier yaklaşımları kullanılmaktadır [18]. Bu çalışmada karbon ayak izi hesaplamaları için ilk olarak IPCC [19] kılavuzunda yer alan Tier-1 yaklaşımının hesaplama metodolojisi ve emisyon faktörleri seçimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 12: Doğalgaz Net Kalorifik Değeri [19]

Yakıt Türü	Dönüşüm Faktörü (TJ/Gg)
Doğal Gaz	48

Tablo 13: Doğalgaz Emisyon Faktörü [19]

Yakıt Türü	CO ₂ (kg/TJ)	CH ₄ (kg/TJ)	N ₂ O (kg/TJ)
Doğal Gaz	56100	5	0,1

Tablo 14: Emisyon Tablosu

ECO ₂	ECH ₄	EN ₂ O
52.453,5 kg CO ₂	4,675 kg CH ₄	0,0935 kg N ₂ O

Tablo 15: Tasarruf Potansiyeli Tablosu

	Tasarruf (TEP)	Tasarruf (Ton CO ₂ eşdeğer)
1 Tesis	24,01	52,458
1000 Tesis	24.010	52.458

SONUÇ

Endüstriyel tesislerde faaliyet gösteren vidalı hava kompresörleri, yüksek elektrik enerjisi tüketimlerinin yanı sıra ciddi miktarda atık ısı üretmektedir. Genellikle çevreye kaybedilen bu ısının geri kazanımı, enerji verimliliği açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır. Yapılan teknik ve ekonomik analizler, bu atık enerjinin sıcak su üretiminde değerlendirilmesiyle hem işletme maliyetlerinin düşürülebileceğini hem de çevresel etkilerin önemli ölçüde azaltılabileceğini ortaya koymaktadır.

Örnek uygulamada 110 kW gücündeki bir hava kompresöründen elde edilen veriler, yıllık yaklaşık 24,01 TEP enerji tasarrufu ve buna karşılık gelen 52,5 ton CO₂ eşdeğeri emisyon azaltımı sağlanabileceğini göstermiştir. Bu kazanımlar, yalnızca tek bir tesis özelinde hesaplanmış olup; uygulamanın yaygınlaştırılması durumunda etkisi katlanarak artmaktadır.

Konya ili sanayi yapısı göz önüne alındığında, yaklaşık 2.500 orta ve büyük ölçekli sanayi tesisinin %40'ında 55 kW ve üzeri güce sahip hava kompresörlerinin kullanıldığı varsayılmaktadır. Bu doğrultuda en az 1.000 tesiste benzer sistemlerin uygulanabileceği öngörülmekte, bu da toplamda 24.010 TEP enerji tasarrufu ve 52.458 ton CO₂ eşdeğeri sera gazı emisyonunun önlenmesi

anlamına gelmektedir. Bu değerler, yalnızca bölgesel değil, ulusal ölçekte de etkili bir enerji verimliliği politikası için ciddi bir altyapı oluşturmaktadır.

Kompresör sistemleri, artık sadece basınçlı hava üretimi için değil; aynı zamanda bir ikincil enerji kaynağı olarak ele alınmalı, işletmelerin sosyal alanlarında sıcak su temini, kazan ön ısıtması gibi birçok farklı kullanım alanına hizmet edecek biçimde yapılandırılmalıdır. Bu tür uygulamalar, enerji yoğun sektörlerde sürdürülebilirliğin sağlanması ve enerji maliyetlerinin kontrol altına alınması açısından stratejik bir araç haline gelmiştir.

Genelleştirildiğinde, atık ısı geri kazanımı gibi düşük yatırım maliyetli ancak yüksek geri dönüşlü çözümler, Türkiye'nin enerji verimliliği hedeflerine ulaşmasında önemli rol oynayacaktır. Üstelik bu tür projeler yalnızca ekonomik fayda sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik, karbon ayak izinin azaltılması ve enerji arz güvenliği gibi temel politikalara da somut katkılar sunacaktır.

Sonuç olarak, vidalı hava kompresörlerinden elde edilen atık ısının değerlendirilmesi, enerji yönetimi açısından yüksek potansiyelli bir uygulama alanıdır. Uygun mühendislik çözümleri ve destek mekanizmaları ile bu sistemlerin yaygınlaştırılması, enerji verimliliği ile çevresel performansın birlikte optimize edildiği bir sanayi dönüşümünü mümkün kılacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Akkoyunlu, M. T. (2016). Investigation of drying of Yatagan lignite in fluidized bed. *Proceedings of the p. 22*
- [2] 5.6.13.ETKB/EİGM (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı/Enerji İşleri Genel Müdürlüğü). 2022 Yılı Genel Enerji Dengesi. Son erişim tarihi 15.01.2024. https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EİGM/tr/Raporlar/Ulusal_Enerji_Denge_Tablolari/2022.xlsx
- [3] Akkoyunlu, M. T. (2016). *Investigation of drying of Yatagan lignite in fluidized bed*. Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion, (pp. 29-36).
- [4] Akkoyunlu, M. C., & Engin, O. (2011). Kesikli harmoni arama algoritması ile optimizasyon problemlerinin çözümü: Literatür araştırması. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 26(4), 140-148.
- [5] Çayır Ervural, B., Ervural, B., & Evren, R. (2022). Optimization models in energy: A literature review. *International Journal of Energy Research*, 46(8), 1234–1250
- [6] Baneaz, M. O. O., & Akkoyunlu, M. T. (2023). A study of energy efficiency simulation programs and energy saving optimization analysis of building envelopment parameters in Turkey. *Journal of Ecological Engineering*, 24(2), 198–210.
- [7] Saidur, R., Mekhilef, S. 2010. “Energy Use, Energy Savings and Emission Analysis in the Malaysian Rubber Producing Industries,” *Applied Energy*, vol. 87, p. 2746–2758.
- [8] Rabie, M. G. 2009. *Fluid Power Engineering*, Mc Graw-Hill, New York, USA.
- [9] A. SARUCAN, M. C. AKKOYUNLU, A. ‘Baş Analitik Hiyerarşi Proses Yöntemi İle Rüzgar Türbin Seçimi’
- [10] Rauer, W. And Camber, M. (2013, August). ‘Turning Air Compressors into an Energy Source.’ Kaeser Compressors, Inc. 6 July 2014, www.kaeser.com
- [11] Enerji Verimliliği Eğitim Kitabı, Sayfa No:526-527
- [12] Alfa Basınçlı Hava Sistemleri Mühendislik San. Tic. Ltd. Şti.
- [13] Alfa Basınçlı Hava Sistemleri Mühendislik San. Tic. Ltd. Şti.
- [14] Alfa Basınçlı Hava Sistemleri Mühendislik San. Tic. Ltd. Şti.
- [15] III. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi Sayfa No:319
- [16] III. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi Sayfa No:320

- [17] <https://enerji.gov.tr/evced-enerji-verimlilik-kamu-binalarinda-tasarruf-hedefi>
EK-3 TEP Dönüşüm Tablosu
- [18] Atabey, T. 2013. Karbon Ayak İzinin Hesaplanması: Diyarbakır Örneği. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 83s, Elazığ.
- [19] IPCC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. General Guidance and Reporting. <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html> (Erişim Tarihi: 20.01.2022).



Makine Öğrenmesi Tabanlı Şifreleme Algoritması Seçimi için Kriptografik Algoritmalarının Çok Kriterli Karşılaştırması

Ferdi Azboy¹ & Esra Şatır²

¹ Bilgisayar Mühendisliği YL Öğrencisi, Düzce Üniversitesi,
ORCID: 0009-0002-0260-8581

²Doç. Dr., Düzce Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği, ORCID: 0000-0003-1793-2472

GİRİŞ

Bilişim teknolojilerinin hızla ilerlemesi sonucunda son yıllarda üretilen veri miktarı tarihte eşi görülmemiş bir boyuta ulaşmıştır. IBM (2017) tarafından yayımlanan bir rapora göre, dünya üzerindeki verilerin %90'ı yalnızca son iki yılda üretilmiştir. Bu ciddi artış “büyük veri” (big data) çağında yaşadığımızı göstermektedir. Bu veri yığının güvenliğini sağlamak için şifreleme algoritmaları geliştirilmektedir. Bilgi güvenliğinin üç temel taşı vardır; gizlilik, bütünlük ve erişilebilirlik. Şifreleme algoritmaları, bu kritik maddeleri temel alarak veri güvenliğini sağlamaktadır.

Şifreleme algoritmaları, yetkisiz kişilerin verilere erişmesini engellemek amacıyla geliştirilmiştir. Bu algoritmalar verilere sadece yetkili kişilerin ulaşmasını garanti ederek bilgi güvenliğini gizlilik, bütünlük ve erişilebilirlik çerçevesinde sağlarlar (Stallings, 2014). Kriptografik sistemler temelde simetrik şifreleme algoritmaları ve asimetrik şifreleme algoritmaları olarak ikiye ayrılır. Simetrik yapıda hem şifreleme hem de şifre çözme için aynı anahtar kullanılmaktadır. Asimetrik yapıda ise iki anahtar (genel ve özel anahtar) vardır (Schneier, 1996). Simetrik algoritmalar sunduğu hız sayesinde veri şifrelemede daha çok tercih edilirken; asimetrik algoritmalar ise çoğunlukla anahtar değişimi ve dijital imza için kullanılır.

Günümüz kriptografik sistemlerinde bir şifreleme algoritmasının henüz kırılmamış olması tek başına bir güçlü güvenlik göstergesi değildir. Asıl odaklanılan nokta bu algoritmanın neden güvenli olduğu ve bir saldırganın bunu ne kadar sürede kırabileceğidir. Ayrıca algoritmaların hız, kaynak kullanımı, donanım uyumu gibi kriterleri de analiz edilmektedir. Özellikle kaynak yönetiminin önemli olduğu İot sistemlerinde şifreleme algoritmasının maliyet-performans dengesini koruması beklenmektedir. (Schneier, 1996). Sonuç olarak; algoritma seçiminde yalnızca güvenliğe odaklanmak modern sistemlere uygun değildir. Artık birden çok kriterin karşılaştırmalı analiziyle uygun algoritmanın seçimi yapılmaktadır.

Bu çalışmanın diğer bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde: simetrik şifreleme algoritmaları (AES, Blowfish, Kalyna) ve asimetrik şifreleme algoritmaları (RSA, Diffie-Hellman, ECC) beş kritere göre karşılaştırılmıştır. Üçüncü bölümde, belirlenen beş temel sistem parametresi doğrultusunda algoritmalar karşılaştırılmış ve detaylı analizler yapılmıştır. Dördüncü bölümde ise elde edilen bulgular değerlendirilmiş, özellikle İoT gibi kaynak kısıtlı ortamlara uygun algoritmalar üzerinde durulmuştur. Son bölümde ise çalışmanın genel sonuçları sunulurken, ileriye yönelik önerilere yer verilmiştir.

1. Şifreleme Algoritmalarının Değerlendirme Kriterleri

Bu bölümde literatürde sıkça yer verilen simetrik ve asimetrik şifreleme algoritmalarından bazıları Tablo 1’de yer alan karşılaştırmalı analizde beş kritere göre kıyaslanmıştır. Bu kriterler; Şifreleme/deşifreleme hızı, anahtar uzunluğu, güvenlik seviyesi, CPU/bellek kullanımı ve IoT uyumluluğudur. Bu parametreler sayesinde farklı sistem ihtiyaçlarına göre daha doğru algoritma seçimi yapılabilmektedir.

Tablo 1. Seçilen Şifreleme Algoritmalarının Temel Kriterlere Göre Karşılaştırılması

Algoritma	Hız	Anahtar Uzunluğu	Güvenlik	CPU/Bellek Kullanımı	IoT Uygunluğu
AES	Yüksek	128 / 192 / 256 bit	Çok Yüksek	Orta	Orta
Blowfish	Çok Yüksek	32 – 448 bit	Yüksek	Düşük	Yüksek
Kalyna	Orta	128 / 256 / 512 bit	Yüksek	Orta	Yüksek
RSA (2048 bit)	Düşük	2048 bit	Yüksek	Yüksek	Düşük
Diffie-Hellman	Düşük	Değişken	Orta	Orta	Düşük
ECC (256 bit)	Orta	256 bit	Çok Yüksek	Düşük	Çok Yüksek

Kaynak: Stallings (2014), Schneier (1996), Chinbat ve ark. (2024), Panda (2016)

Hız açısından Blowfish algoritması simetrik yapısı ve küçük blok boyutu sayesinde en hızlı algoritma olarak görülmektedir. Güvenlik seviyesi kısmında ise AES ve ECC algoritmaları, literatürde en yüksek güvenliğe sahip olan yapılar olarak kabul edilmektedir. Anahtar uzunluğu açısından en geniş esnekliği Kalyna algoritması sunmaktadır. Kalyna, 128 ila 512 bit arası yapılandırılabilir anahtarlar sayesinde farklı senaryolara uyarlanabilmektedir. ECC, küçük anahtar boyutuna rağmen yüksek güvenlik sağlamaktadır. AES ise donanım destekli sistemlerde optimum güvenlik-performans dengesi sunmaktadır. CPU ve bellek kullanımında Blowfish ve ECC düşük kaynak tüketimi ile niyi bir performans gösterdikleri için çoğunlukla IoT uygulamalarında tercih edilmektedir. Tablo verileri genel olarak değerlendirildiğinde, uygulama alanına bağlı olarak algoritmaların farklı kriterlerde ön plana çıktığı görülmektedir.

1.1. AES (Advanced Encryption Standard)

AES, 128 bit sabit blok boyutlu bir simetrik şifreleme algoritmasıdır. Anahtar uzunluğu 128, 192, 256 bit olabilmektedir. 2001 yılında NIST tarafından standartlaştırılmıştır (NIST, 2001). Rijndael algoritmasına dayalı ve SubBytes,

ShiftRows, MixColumns ve AddRoundKey gibi dört temel işlem adımına sahiptir (Stallings, 2014).

AES güçlü matematiksel yapısı ve performas verimi sayesinde yüksek güvenlik sağlamaktadır. Özellikle AES-NI (Advanced Encryption Standard – New Instructions) gibi donanımsal destek içeren sistemlerde, yazılım temelli çözümlere göre daha hızlı çalışmaktadır. Bu nedenle AES, günümüzde yaygın olarak kullanılmakta ve neredeyse endüstri standardı hâline gelmiştir.

1.2. Blowfish

Blowfish, 1993 yılında Bruce Schneier tarafından tasarlanmış açık kaynak kodlu simetrik şifreleme algoritmasıdır. 64-bit blok boyutu ve 32 ile 448 bit arasında esnek anahtar uzunluğuna sahiptir (Schneier, 1996). Şifreleme 16 turdan oluşan klasik bir Feistel ağ yapısına sahiptir.

En önemli avantajı kaynak kısıtlı sistemlerde stabil olmasıdır. Bu özellik sayesinde gömülü sistemler ve IoT cihazlarında tercih sebebi olmuştur. 64-bit blok boyutu nedeniyle büyük veriler şifrlenirken blok çakışması (birthday attack) riski arttığından modern sistemlerde yerini AES gibi algoritmalarla bırakmıştır.

1.3. Kalyna

Kalyna algoritması, Ukrayna tarafından 2015 yılında ulusal şifreleme standardı olarak kabul edilmiş bir blok şifreleme algoritmasıdır. AES' e benzer SPN (Substitution-Permutation Network) yapısına sahiptir ve 128, 256 ve 512 bitlik blok ve anahtar uzunluğu seçenekleri sunar. AES algoritmasından farklı yönü blok boyutunun değişken olmasıdır. Güvenlik açısından bazı senaryolarda AES'ten daha iyi performans göstermesine rağmen AES'in donanımsal desteğinin fazla olması Kalyna'nın kullanım alanının dar bir çerçevede kalmasına sebep olmuştur. (Oliynykov ve ark., 2015; Ruzhentsev ve ark., 2018).

1.4. RSA(Rivest–Shamir–Adleman)

RSA algoritması, 1978 yılında Ron Rivest, Adi Shamir ve Leonard Adleman tarafından geliştirilen bir asimetrik şifreleme algoritmasıdır. Temel prensibi, iki büyük asal sayının çarpımıyla oluşturulan açık ve özel anahtar çiftine dayanır. Açık anahtar veri şifrelemede özel anahtar ise şifreyi çözmede kullanılır (Rivest ve ark., 1978). Bu algoritmada çoğunlukla 1024, 2048 veya 4096 bit uzunluğunda anahtarlarla kullanılmaktadır. Güvenlik seviyesi de anahtar uzunluğu ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

RSA modüler üs alma gibi karmaşık matematiksel modeller kullanır ve büyük boyutlu anahtar uzunlukları ile çalışır. Bu sebeple yüksek güvenlik sağlarken simetrik algoritmalara göre daha yavaştır. RSA veri şifrelemede tercih edilmezken daha çok dijital imzalama ve anahtar yönetimi süreçlerinde kullanılır.

1.5. Diffie-Hellman (Anahtar Değişim Protokolü)

Diffie-Hellman algoritması, 1976 yılında Whitfield Diffie ve Martin Hellman tarafından geliştirilen ilk açık anahtar değişim protokolüdür. Bu protokolün amacı, tarafların birbirleriyle daha önceden hiçbir bilgi paylaşmadan ortak bir anahtar üretmelerini sağlamaktır (Diffie & Hellman, 1976). Protokol, büyük asal sayılar ve modüler üs alma işlemleri kullanılarak matematiksel olarak güvenli bir yapı oluşturur.

Diffie-Hellman genellikle veri şifrelemede kullanılmaz. Şifreleme algoritmalarında kullanılacak olan geçici anahtarların güvenli bir şekilde üretilmesinde kullanılır. Kimlik doğrulamayı içermediğinden “man-in-the-middle” saldırılarına karşı savunmasızdır. Bundan dolayı dijital imza veya sertifika ile birlikte uygulanır.

2.6 ECC (Elliptic Curve Cryptography)

Eliptik Eğri Kriptografisi (ECC), 1985 yılında Victor Miller ve Neal Koblitz tarafından birbirinden bağımsız olarak önerilen ve açık anahtarlı şifreleme sistemlerinin daha verimli hâle getirilmesini amaçlayan bir yapıdır (Miller, 1985). ECC, eliptik eğri denklemleri kullanarak açık anahtarlı şifreleme gerçekleştirir. Bu nedenle klasik algoritmalara göre daha kısa anahtarlarla eşdeğer güvenlik sağlayabilir. Bu yapı, özellikle CPU gücü ve bellek kapasitesi sınırlı cihazlarda avantaj sağlar.

Günümüzde ECC, dijital imza, oturum anahtarı üretimi ve kimlik doğrulama gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Hem güvenlik hem verimlilik dengesini başarıyla kurması, onu modern kriptografi sistemlerinde vazgeçilmez hâle getirmiştir.

2. Değerlendirme Kriterlerinin Analizi

Bu bölümde, Tablo 1’deki şifreleme algoritmaları; hız, anahtar uzunluğu, CPU/bellek kullanımı ve IoT uygunluğu gibi beş kriter çerçevesinde ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu kriterlerden bazıları sistemin türüne göre daha fazla önem kazanmaktadır. Örneğin; IoT sistemlerde işlem hızı ve kaynak tüketimi, büyük ölçekli sistemlerde ise güvenlik seviyesi ve anahtar yönetimi ön plandadır. Tablo 1’deki karşılaştırma sonuçları, kriter bazlı olarak aşağıda analiz edilmiştir.

2.1. Hız (Şifreleme/Deşifreleme)

Simetrik şifreleme algoritmalarının matematiksel altyapısı asimetrik algoritmalarla göre daha sadedir. Bundan dolayı simetrik algoritmalar daha az sistem kaynağı kullanır ve asimetrik algoritmalarla göre daha hızlıdır.

Simetrik algoritmalarından Blowfish algoritması 64 bit blok boyutu ile düşük donanımlı sistemlerde bile hızlı çalışır. AES ise 128 bit blok boyutu ile Blowfish'e göre daha güvenli olmakla birlikte donanımsal destek sağlanmadığı durumlarda yakın hızlarda çalışabilir. Ayrıca Intel tarafından geliştirilen AES-NI (Advanced Encryption Standard – New Instructions) komutlarının bulunduğu cihazlarda (Intel i5,i7,i9 vb.) AES' in performansı ciddi şekilde artmıştır. Kalyna algoritması ise 2015'te Ukrayna tarafından DSTU 7624:2014 adıyla resmi ulusal şifreleme standardı olarak kabul edilmiştir (Oliynykov ve ark., 2015). Bu algoritma AES benzeri bir yapıya sahip olmasına rağmen 128, 256 ve 512 bit blok boyutu sunarak farklı güvenlik ihtiyaçlarına göre sistem esnetilebilir. Genel olarak blok boyutu büyüdükçe güvenlik düzeyi artar ve işlem hızı da yavaşlar.

Asimetrik algoritmalarından RSA ve Diffie-Hellman gibi algoritmalar modüler üs alma işlemi (modular exponentiation) gibi karmaşık matematiksel işlemler gerektirdiği için daha yavaştır. (Stallings, 2014; Schneier, 1996). ECC, RSA'ya göre daha kısa anahtar kullandığı için hız açısından daha avantajlıdır. Genellikle mobil cihazlarda kullanılır. (Goldreich, 2004).

2.2. Anahtar Uzunluğu

Anahtar, şifreleme ve şifre çözmede kullanılan gizli veya açık bilgidir. Anahtar uzunluğu bu bilginin bit sayısını ifade eder. Anahtar uzunluğu kaba kuvvet saldırılarına (brute-force attacks) karşı bir şifreleme algoritmasının direncini belirleyen önemli bir faktördür. Anahtar uzunluğu arttıkça şifreleme algoritmasının güvenlik düzeyi de artmaktadır.

Asimetrik algoritmalarından RSA 1024, 2048, 3072, 4096 bit gibi uzun anahtarlar kullanır ve bu sayede yüksek güvenlik sağlamaktadır. ECC ise RSA ya göre daha karmaşık matematiksel model kullanmasına rağmen daha küçük boyutlu anahtarlarla (160, 192, 224, 256, 521 bit) RSA düzeyinde güvenlik sağlamaktadır. (Stallings, 2014). Bu avantaj özellikle mobil cihaz ve IoT sistemlerinde ECC'yi öne çıkarmaktadır.

Simetrik algoritmalarından AES 128, 192, 256 bit, Kalyna 128, 256, 512 bit, Blowfish 32 – 448 bit (esnek) gibi anahtar uzunlukları kullanırlar. AES ve Kalyna farklı anahtar uzunlukları ile farklı senaryolara uyarlanabilmektedir.

Blowfish'in ise anahtar aralığı geniş olmasına rağmen standartlaşmış bir anahtar uzunluğu yoktur.

2.3. Güvenlik Seviyesi

Güvenlik seviyesi, bir şifreleme algoritmasının kırılma zorluğunu ifade eder. AES ve ECC algoritmaları, günümüzde güvenlik seviyesi en yüksek algoritmalar olarak kabul edilmekte ve NIST gibi kuruluşlar tarafından da önerilmektedir (Stallings, 2014). Kalyna algoritması, güvenlik açısından AES ile benzer bir seviyede bulunmaktadır. 128, 256 ve 512 bitlik blok ve anahtar uzunluğu seçenekleri ile esnek bir yapı sunar. Büyük blok boyutları teorik olarak yüksek güvenlik sağlamasına rağmen donanım desteğinin sınırlı kalmasından dolayı uygulama alanı AES'e göre daha dardır (Stallings, 2014; Oliynykov ve ark., 2015). Ayrıca literatürde Kalyna algoritmasının diferansiyel saldırılar ve hata enjeksiyonu temelli analizler gibi gelişmiş kriptanaliz yöntemlerine karşı yüksek direnç gösterdiğini belirten çalışmalar bulunmaktadır (Ruzhentsev et al., 2018; Duman & Youssef, 2017). Ancak Kalyna algoritmasının yan kanal saldırılarına (side-channel attacks) karşı zayıflık gösterebileceği bazı çalışmalarda tespit edilmiştir. (Chuengsatiansup ve ark., 2022).RSA geleneksel sistemler için hala önemli bir güvenlik seviyesi sağlarken kuantum sistemler için yeterli olmayacağı öngörülmektedir. Blowfish kullanım alanlarında yeterli bir güvenlik sağlarken standart olmayan anahtar seçimi senaryolarından kaynaklı az tercih edilmektedir. Diffie-Hellman ise veri şifrelemeden ziyade anahtar değişimi için kullanılır ve bu sebeple diğer algoritmalarla göre daha düşük seviyede güvenlik sağlar (Schneier, 1996).

2.4. CPU ve Bellek Kullanımı

ECC ve Blowfish, daha düşük CPU ve bellek kullanımı nedeniyle gömülü sistemlerde ve IoT cihazlarda daha çok tercih edilir. AES algoritması, donanımsal hızlandırmalarla birlikte daha iyi verimlilik sağlasa da, yazılım tabanlı senaryolarda işlem yükü ve bellek kullanımı orta düzeydedir. RSA kullandığı matematiksel model gereği uzun anahtarlarla çalışma prensibi gereği işlem yoğunluğu ve kaynak tüketimi de fazladır. Diffie-Hellman kaynak tüketimi açısından ortalama bir düzeydedir, ancak büyük anahtarlar kullanıldığında bellek kullanımı artar.

2.5. IoT Uygunluğu

IoT sistemlerde donanımsal kısıtlar gereği düşük kaynak tüketimi sağlayan algoritmalar verimli olmaktadır. Önceki başlıkta incelendiği üzere ECC ve Blowfish bu uygulamalarda öne çıkmaktadır. Kalyna algoritması da gömülü

sistemlere uyum sağlayabilen bir yapıya sahiptir. AES algoritması donanım destekli cihazlarda kabul edilebilir bir başarı sağlamaktadır. RSA ve Diffie-Hellman ise yüksek işlem gerektiren algoritmalar olduğundan IoT gibi sınırlı kaynaklı sistemlerde kullanımı önerilmemektedir.

3. Sonuç

Bu çalışmada kriptografik algoritmalar tercih edilirken güvenlik seviyesinden ziyade diğer sistem gereksinimlerinin de baz alarak çok yönlü bir değerlendirilme yapılması önerilmektedir. Bu doğrultuda özellikle IoT gibi donanımsal kısıtları olan sistemlerde tercih edilecek şifreleme yöntemlerinin; işlem süresi, hafıza kullanımı ve cihazla uyumluluğu gibi faktörler açısından analiz edilmesi doğru seçim için önemlidir. Bu sistemlerde ECC gibi algoritmalar öne çıkarken, donanım desteğiyle AES' in de kullanım alanlarının genişlediği görülmektedir.

Ayrıca bu çalışmada sunulan çok kriterli karşılaştırma ileride geliştirilecek makine öğrenmesi tabanlı optimum şifreleme algoritması seçim modelleri için giriş parametresi olarak kullanılacaktır. Böylece sistem gereksinimlerine göre otomatik şifreleme algoritması öneren modelin eğitilmesi hedeflenmektedir.

5. Kaynakça

- Chinbat, T., Madanian, S., Airehrour, D., & Hassandoust, F. (2024). Machine learning cryptography methods for IoT in healthcare. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 24(153). <https://doi.org/10.1186/s12911-024-02548-6>
- Goldreich, O. (2004). *Foundations of Cryptography: Volume 2 – Basic Applications*. Cambridge University Press.
- IBM. (2017). 10 Key Marketing Trends For 2017. IBM Corporation. <https://www.ibm.com/downloads/cas/GB8ZMQZ3>
- Panda, M. (2016). Performance Analysis of Encryption Algorithms for Security. In *Proceedings of the SCOPES 2016 Conference* (pp. 278–284). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SCOPES.2016.7955835>
- Schneier, B. (1996). *Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Stallings, W. (2014). *Cryptography and Network Security: Principles and Practice* (6th ed.). Pearson Education.
- Oliynykov, R., Gorbenko, I., Kazymyrov, O., Ruzhentsev, V., Kuznetsov, O., Gorbenko, Y., Dyrda, O., Dolgov, V., Pushkaryov, A., Mordvinov, R., & Kaidalov, D. (2015). *A New Encryption Standard of Ukraine: The Kalyna Block Cipher*. IACR Cryptology ePrint Archive, Report 2015/650. <https://eprint.iacr.org/2015/650.pdf>
- Ruzhentsev, V., Sokurenko, V., & Ulyanchenko, Y. (2018). Analysis of probabilities of differentials for block cipher Kalyna (DSTU 7624:2014). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(9(94)), 14–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139682>
- Duman, O., & Youssef, A. M. (2017). Fault analysis on Kalyna. *Information Security Journal: A Global Perspective*, 26(5), 249–265. <https://doi.org/10.1080/19393555.2017.1371361>
- Chuengsatiansup, C., Genkin, D., Yarom, Y., & Zhang, Z. (2022). Side-channeling the Kalyna key expansion. In M. Tibouchi & H. Wang (Eds.), *Topics in Cryptology – CT-RSA 2022* (pp. 272–296). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95312-6_12
- NIST. (2001). *Specification for the Advanced Encryption Standard (AES)*. FIPS PUB 197. U.S. Department of Commerce. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.197.pdf>
- Rivest, R. L., Shamir, A., & Adleman, L. (1978). A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. *Communications of the ACM*, 21(2), 120–126. <https://doi.org/10.1145/359340.359342>

Miller, V. S. (1985). Use of elliptic curves in cryptography. In *Advances in Cryptology* — *CRYPTO '85* (pp. 417–426). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-39799-X_31



Mikroplastik Kirliliği: Kaynakları, Çevre Sağlığı

Serpil Savcı¹

¹ Doç. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2015-2223>

GİRİŞ

Son yıllarda 1 ila 5000 µm boyutlarındaki parçacıklar olarak tanımlanan mikro plastikler, önemli bir çevre kirleticisi olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle kentsel ortamlarda mikro plastikler üzerine yapılan araştırmalarda önemli bir artış olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, kentsel alanlarda mikro plastik kirliliğinin incelenmesinin mevcut çevresel bağlamda önemli olması, sucul yaşam ve karasal ekosistemler üzerindeki etkisidir. Kentsel alanlarda mikro plastik kirliliğinin incelenmesinin insan sağlığı üzerine olan etkileri, çevresel etkiler, kaynak tespiti, politika geliştirme, kamuoyu farkındalığı ve teknolojik yenilikler açısından önem taşımaktadır. Uygunsuz arıtma, kararlı yapısı nedeniyle önemli miktarda plastik atığın çevreye girmesine ve birikmesine neden olarak, dünya çapındaki plastik kirliliği sorununu daha da kötüleştirmiştir (Jiang ve ark., 2025). Son çalışmalar, karasal ortamlardaki mikro plastiklerin, plastik ürünler, tekstiller ve araç lastikleri gibi çeşitli kaynaklardan ortaya çıktığını göstermiştir. Mikro plastiklerin kentsel çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkisini anlamak için, plastik kullanımını azaltmayı ve atık yönetimi altyapısını iyileştirmeyi amaçlayan kanıta dayalı politikalar ve düzenlemeler için kentsel alanlardaki mikro plastik kirliliğinin kaynaklarını belirleme ve tartışma konusunda daha kapsamlı çalışmalar yürütmek gerekmektedir. Bu kitap bölümünde, mikro plastik kirliliği, kaynakları, çevre ve insan sağlığı üzerine olan etkileri anlatılmıştır.

KAYNAKLARI

Mikroplastikler alıcı ortamlarda dağılmıştır ve tortular deniz yaşamını etkilemektedir. Yapılan çalışmalar mikroplastiklerin topraklarda birikmesinin çevre ve insan sağlığı için çok sayıda zorluk oluşturduğunu göstermiştir (Chia ve ark., 2022; He ve ark., 2021).

Kentsel ortamlardaki mikroplastikler çeşitli birincil ve ikincil kaynaklardan ortaya çıkmaktadır. Araç lastikleri yol yüzeyiyle sürtünme nedeniyle aşındıkça, havaya ve yollara küçük kauçuk parçacıkları salınır. Bu lastikler, plastikleştiriciler ve katkı maddeleri içeren sentetik kauçuklardan oluşur.

Kentsel alanlardaki diğer yaygın mikroplastik kaynakları kanalizasyon ve yağmur suyudur. Kentsel alanlarda kanalizasyonun mikroplastik kaynağı olma eğilimi, mikrofiberler, noodle'lar, plastik peletler ve reçinelerden oluşan mikroboncuklar ve peeling fırçaları, duş jelleri ve diş macunları gibi çeşitli kişisel bakım ve kozmetik ürünlerinde kullanılan ve yıkanıp kanalizasyon sistemine giren plastik tozlar gibi birincil mikroplastik kaynakları arasında sayılabilir. Küçük plastik peletler ve reçine parçacıkları da çeşitli üretim süreçlerinde kullanılır. Bu malzemelerin dökülmesi ve uygunsuz şekilde bertaraf edilmesi, bunların doğrudan kanalizasyon sistemine girmesine ve zamanla mikroplastiklere dönüşmesine yol açabilir. Bu kanalizasyon sistemleri, yoğun yağış, kar erimesi ve yüzey akışı dönemlerinde taşma potansiyeline sahiptir.

Dördüncüsü, çöp deponi alanları kentsel mikroplastik kirliliğinin önemli kaynaklarıdır. Çöp deponi alanlarının kentsel alanlardaki mikroplastiklere katkısı, plastik atıkların uygunsuz şekilde bertaraf edilmesine bağlanabilir ve bu da doğal yaşam alanlarında plastik malzemelerin birikmesine yol açabilir. Bu plastikler, karasal ve sucul ekosistemleri kirleten ikincil mikroplastik oluşturmak için aşınmaya ve parçalanmaya uğrar. Çöp deponi alanları, mikroplastiklerin bozunması veya parçalanması nedeniyle dolaylı olarak salınmasına neden olur. Plastik şişeler, poşetler ve diğer ambalaj malzemeleri güneş ışığına veya diğer çevre koşullarına maruz kaldığında fiziksel ve kimyasal olarak bozulmaya uğrayabilir.

Endüstriyel alanlar, özellikle plastik üretimiyle uğraşanlar, kentsel alanlarda mikroplastiklerin bir başka kaynağı olarak görülmektedir. Zamanla, bu plastikler daha küçük parçacıklara parçalanmış ve ikincil mikroplastik kaynakları haline gelmiştir. Bazı boyalar, kaplamalar ve sızdırmazlık maddeleri, doku ve dayanıklılık dâhil olmak üzere çeşitli amaçlar için mikroplastik içermektedir. Bu kaplamalar zamanla bozuldukça, özellikle bu malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı kentsel alanlarda mikroplastikleri çevreye yayabilirler. Endüstriyel alanların mikroplastik kaynağı olma eğilimi, plastik tozu üretmek için plastik malzemelerin öğütülmesi ve kesilmesi gibi endüstriyel işlemlere atfedilebilir. Bu ince toz, rüzgar veya su ile taşınabilir ve sonunda mikroplastiklere dönüştüğü doğal ortamlarda yerleşebilir (Lee ve ark., 2024).

Kentsel ortamlarda çeşitli mikroplastik türleri bulunur ve çok çeşitli kaynaklardan çevresel ortamlara yayılabilir. Mikroplastikler, benzersiz özelliklere ve uygulamalara sahip farklı polimer türlerinden oluşur. Kentsel alanlarda bulunan yaygın polimer türleri, polietilen, polipropilen, polietilen tereftalat ve polistirendir (Lee ve ark., 2024).

Ambalaj malzemeleri, plastik poşetler, şişeler ve kaplarda yaygın olarak kullanılan çok yönlü bir polimer olan polietilendir. Kentsel atıklardaki bozulmuş plastik poşetlerden, ambalaj malzemelerinden ve tek kullanımlık plastik ürünlerden gelen mikroplastik parçacıkları, çevrede polietilen varlığına katkıda bulunabilir (Lee ve ark., 2024).

İkincisi ambalaj, tekstil ve tek kullanımlık ürünler dâhil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılan bir termoplastik polimer olan polipropilendir. Bozulmuş plastik şişe kapakları, pipet, yiyecek kapları ve polipropilenden oluşan ambalaj malzemelerinden gelen mikroplastikler kentsel alanlarda yaygındır (Lee ve ark., 2024).

Üçüncüsü polietilen tereftalat, içecek şişelerinde, gıda ambalajlarında ve tekstillerde kullanılan hafif ve güçlü bir polimerdir. Polietilen tereftalat tipi mikroplastikler genellikle kentsel atık akışlarında yaygın olarak bulunan

içeceklerde ve gıda maddelerinde kullanılan bozulmuş plastik şişelerden türetilir (Lee ve ark., 2024).

Dördüncüsü ise polistiren, köpük ürünlerinde (genişletilmiş polistiren veya EPS) ve tek kullanımlık plastiklerde kullanılan sentetik bir polimerdir. Köpük ambalaj malzemeleri, tek kullanımlık atal bıçak takımları ve polistirenden yapılmış gıda kaplarından elde edilen mikroplastikler, kentsel ortamlardaki polistiren mikroplastiklerinin kaynakları arasında sıralanabilir (Lee ve ark., 2024).

Beşincisi inşaatta, giyimde ve çeşitli tüketim mallarında yaygın olarak kullanılan polivinil klorürdür. Binalarda bulunan borular, kablolar ve vinil döşemeler gibi bozulmuş polivinil klorür bazlı ürünlerden kaynaklanabilir.

Altıncısı naylon (poliamid), tekstilde, balık ağılarında ve endüstriyel parçalarda kullanılan sentetik bir polimerdir. Giyim elyafları ve balıkçılık takımları dâhil olmak üzere bozulmuş naylon ürünlerinden elde edilen mikroplastikler, kentsel ortamlardaki naylon mikroplastiklere katkıda bulunur;

Yedincisi poliüretan, köpük ürünlerinde, kaplamalarda, yapıştırmalarda ve tekstillerde kullanılan çok yönlü bir polimerdir. Poliüretan mikroplastikler, köpük şilteler, ayakkabılar ve kaplamalı kumaşlar dâhil olmak üzere çeşitli tüketici ürünlerinden ve ayrıca bozulmuş boya ve sızdırmazlık maddelerinden kaynaklanabilir.

Sekizincisi akrilik poli metil metakrilat, genellikle akrilik cam, tabela ve tıbbi cihazlar gibi ürünlerde kullanılan şeffaf bir termoplastiktir. Bozulmuş akrilik ürünlerden, tabela ve tüketim malları gibi mikroplastikler kentsel ortamlarda mevcut olabilir.

Toplam plastiklerin yaklaşık %10'u ve dünyadaki plastik çöplerin %60-88'i deniz ortamına ulaşmaktadır. Deniz ortamı, yüzey suyunda ve plajlarda, kıyılarda, deniz tabanı tortularında çeşitli konsantrasyonlarda mikroplastiklerden oluşabilir. Tatlı su kaynaklarına kıyasla daha fazla mikroplastik içeriğine sahiptir. Derin okyanus bölgeleri toplam plastik bütçesinin %99'unu içerirken, geri kalan %1'i yüzeye doğru olabilir. Nehirlerden okyanuslara ve denizlere giren mikroplastikler okyanus akıntıları ve hidrodinamik etki nedeniyle uzun mesafeler kat edebilir. Mikroplastiklerin üretim noktalarına, endüstrilere ve büyük kıyı şehirlerine doğru daha fazla görölme olasılığı vardır. Tortullardaki mikroplastikler uzun süreler boyunca ortamda kalabilir. Bu nedenle tortular, tortulların bozulması nedeniyle suya yeniden girebilecek mikroplastiklerin büyük bir emicisi olarak işlev görebilir (Kumar ve ark., 2025).

ÇEVRESEL ETKİLER

Esas olarak karbon, hidrojen, oksijen, klorür ve silikondan oluşan plastikler, günlük yaşama kapsamlı bir şekilde entegre edilmiştir. Küresel plastik üretiminin

2050 yılına kadar 2 milyar tona ulaşması beklenmektedir. Ancak, bu üretimin çoğunun çevreye gireceği düşünülmekte ve mevcut geri dönüşüm oranı yalnızca %9 seviyesindedir (Geyer ve ark., 2017; Sun ve ark., 2023).

Mikro plastikler, atmosfer, okyanuslar, göller ve tortular da dahil olmak üzere dünyanın dört bir yanındaki çeşitli ekosistemlerde tanımlanmıştır. Yeni bir çevre kirleticisi türü olarak hizmet veren mikroplastikler, yalnızca doğrudan toksisiteleri nedeniyle değil, aynı zamanda mikroplastiklerin diğer kirleticiler ve mikroorganizmalar için bir taşıyıcı olarak kullanılabilmesi nedeniyle de önemli bir ekolojik tehlike oluşturmaktadır (Jin ve ark., 2025).

Deniz canlıları, gıda temini, rekreasyon olanakları, ekosistem hizmetleri ve iklim yönetimi dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sunmaktadır. Birkaç çalışma, özellikle kentsel ortamlarda Mikroplastiklerin çevrede bulunmasının, deniz ve tatlı su organizmalarını çeşitli şekillerde bozarak su ortamlarını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Zooplanktondan büyük memelilere kadar su organizmaları genellikle mikroplastikleri yanlış tanımlayıp yiyecek olarak yutarlar, bu da oksidatif strese, iç aşınmalara, tıkanıklıklara ve toksik kimyasalların sızmasına neden olarak yetersiz beslenmeye, bozulmuş büyümeye ve üreme sorunlarına yol açabilir. Mikro plastiklerin toksik olma kapasitesi deniz organizmalarındaki hücre hasarına yol açabilir. Ayrıca mikroplastikler zararlı patojenlerin taşıyıcısı olarak hizmet edebilir ve deniz popülasyonlarında hastalık bulaşmasını şiddetlendirir. Midye ve istiridye gibi filtreyle beslenen organizmalar, mikroplastikleri yiyecekleriyle birlikte yutar ve bu da besin zincirinde biyolojik birikime yol açabilir. Ekosistem dengesi için çok önemli olan su böcekleri, genellikle mikroplastikleri av sanarak popülasyonların azalmasına ve su besin ağlarının bozulmasına yol açabilir. Mikroplastiklerle ilişkili toksinler tatlı su organizmalarında fizyolojik ve davranışsal değişikliklere neden olarak hayatta kalma ve üreme yeteneklerini etkileyebilir (Lee ve ark., 2024).

Okyanustaki mikroplastikler yoğun nüfuslu kıyı bölgelerinde daha yüksek konsantrasyonda dağılmış olabilir ve ayrıca tarımsal uygulamalar ve endüstriyel faaliyetlerden etkilenebilir. Taşkınlar ve fırtınalar da deniz ortamındaki mikroplastiklerin dağılımını ve birikimini etkileyebilir. Kuzey Pasifik Okyanusu'ndaki Kuzey Pasifik girdabı da deniz atıklarını biriktirir ve buna büyük Pasifik çöp alanı adı verilmiştir. Mekanik kuvvetler nedeniyle mikroplastığe parçalanmış plastikler içerir. Daha önceki bir çalışmada uçak araştırmaları ve çok sayıda gemi kullanılmış ve Hawaii ile Kaliforniya arasındaki 1,6 milyon km²'lik bir alanda 45-129 bin ton plastik gözlemlenmiştir (Kumar ve ark., 2025).

Okyanus akıntıları, rüzgarlar, gelgitler ve tsunamiler gibi fiziksel faktörler, mikro plastiklerin taşınmasını ve dönüşümünü etkileyen dış faktörler arasındadır (Duan ve ark., 2021). Ayrıca, sıcaklık ve basınç gibi fiziksel faktörler, su

sütununun hareketini ve mikroplastiklerin bozulma oranını değiştirerek mikroplastiklerin dönüşümünü dolaylı olarak etkileyebilir (Li ve Meng, 2025).

Öte yandan, mikro plastiklerin birikim davranışları, mikro plastiklerin kendi yoğunlukları, şekilleri, boyutları, sürtünme katsayıları ve yüzey sürtünmelerinden de etkilenir; bu da mikro plastiklerin kaldırma kuvvetini, hareketliliğini, yerleşme sürecini ve yüzeylerdeki biyolojik dağılımlarını belirler (Liu ve ark., 2022).

Yüzen organizmalar mikroplastikleri doğrudan veya dolaylı olarak yutabilir ve sindirim sistemlerini önemli ölçüde etkileyebilir. Şu anda, çok sayıda mikroplastik maruziyet deneyi balıklarda yürütülmektedir, maruziyet süresi bir haftadan birkaç aya kadar değişmektedir. Balıklarda bulunan polimer tipleri arasında PE, PS ve PVC bulunur (Mattsson ve ark., 2017). Bu besin dışı maddelerin birikmesi vücutta tıkanıklığa yol açacak, gıda alımını azaltacak ve yetersiz beslenmeye neden olacak ve bu da nihayetinde suda yaşayan organizmaların sayısında önemli bir azalmaya yol açacaktır. Diğer yandan, mikroplastiklere maruz kalma bağırsak yollarındaki mikrobiyal topluluğu değiştirebilir ve hastalığa neden olan organizmaların sayısı önemli ölçüde artabilir. Mikro plastikler ayrıca yüzen organizmalarda oksidatif strese neden olabilir (Li ve Meng, 2025).

SONUÇLAR

Mikroplastikler, atık su deşarjı, atmosferik birikim ve biyolojik etkileşimler dâhil olmak üzere çeşitli yollarla kentsel ortamlara girerler. Yutulması, solunması ve dermal maruziyetinden kaynaklanan insan sağlığı riskleri, bu sorunun ele alınması ihtiyacını vurgular. Ülkeler, mikroboncuklar ve atık su arıtma standartları üzerindeki yasaklar da dâhil olmak üzere çeşitli düzenlemeler uygulamıştır. Ancak standart test yöntemlerinin, karmaşık kaynakların ve küresel ticaret dinamiklerinin eksikliği nedeniyle zorluklarla karşı karşıyadırlar. Mikroplastik kirliliğini azaltmak, iyileştirilmiş atık yönetimi, yağmur suyu yönetimi, kamu farkındalığı kampanyaları ve toplum katılımı gibi kapsamlı yaklaşımlar gerektirmektedir (Lee ve ark., 2024).

Deniz mikro plastiklerinin kirlilik özelliklerini anlamak etkili yönetim stratejileri geliştirmek için bir ön koşuldur. Deniz mikro plastik kirliliğini azaltmaya yönelik gelecekteki çabalar, sürekli kamuoyu farkındalığını artırmayı, atık ayırma yöntemlerini, plastik atıkların geri dönüşümü ve yeniden kullanımı için yeni teknolojilerin yükseltilmesini gerektirecektir. Ayrıca, entegre ekolojik restorasyon tekniklerinin uygulanması, verimli atık yönetimi uygulamaları ve dairesel ekonomi modelinin benimsenmesi, mikro plastik kirliliğiyle etkili bir şekilde mücadele etmek için temel stratejilerdir (Li ve Meng, 2025).

KAYNAKLAR

- Chia, R.W., Lee, J.Y., Jang, J., Kim, H., Kwon, K.D., 2022. Soil health and microplastics: a review of the impacts of microplastic contamination on soil properties. *J. Soil. Sediment.* 22 (10), 2690–2705.
- Duan, J., Bolan, N., Li, Y., Ding, S., Atugoda, T., Vithanage, M., Sarkar, B., Tsang, D.C.W., Kirkham, M.B., 2021. Weathering of microplastics and interaction with other coexisting constituents in terrestrial and aquatic environments. *Water Res.* 196, 117011.
- He, D., Zhang, Y., Gao, W., 2021. Micro, nano plastic contaminations from soils to plants: human food risks. *Curr. Opin. Food Sci.* 41, 116–121.
- Lee, J. Y., Chia, R. W., Veerasingam, S., Uddin, S., Jeon, W. H., Moon, H. S., & Lee, J. (2024). A comprehensive review of urban microplastic pollution sources, environment and human health impacts, and regulatory efforts. *Science of the Total Environment*, 174297.
- Liu, S., Huang, Y., Luo, D., Wang, X., Wang, Z., Ji, X., Chen, Z., Dahlgren, R.A., Zhang, M., Shang, X., 2022. Integrated effects of polymer type, size and shape on the sinking dynamics of biofouled microplastics. *Water Res.* 220, 118656.
- Li, W., & Meng, F. (2025). Microplastics in marine systems: A review of sources and sinks, typical environmental behaviors, and biological effects. *Marine Pollution Bulletin*, 214, 117758.
- Kumar, P., Kumar, A., Kumar, D., Prajapati, K. B., Mahajan, A. K., Pant, D., Panjla, R. (2025). Microplastics influencing aquatic environment and human health: A review of source, determination, distribution, removal, degradation, management strategy and future perspective. *Journal of Environmental Management*, 375, 124249.
- Mattsson, K., Johnson, E.V., Malmendal, A., Linse, S., Hansson, L.A., Cedervall, T., 2017. Brain damage and behavioural disorders in fish induced by plastic nanoparticles delivered through the food chain. *Sci. Rep.* 7 (1), 11452.
- Sun, X.L., Xiang, H., Xiong, H.Q., Fang, Y.C., Wang, Y., 2023. Bioremediation of microplastics in freshwater environments: a systematic review of biofilm culture, degradation mechanisms, and analytical methods. *Sci. Total Environ.* 863 (10), 160953.
- Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3 (7), 1700782.
- Jin, Z., Chen, K., Zhu, Q., Hu, X., Tian, S., Xiang, A., Yao, H. (2025). Non-degradable Microplastic Promote Microbial Colonization: A Meta-analysis Comparing

the Effects of Microplastic Properties and Environmental Factors. *Environmental Research*, 121053.

Jiang, W., Yan, X., & Lv, Y. (2025). A critical review on the migration, transformation, sampling, analysis and environmental effects of microplastics in the environment. *Journal of Environmental Sciences*, 154, 645-664.



Zemin Sıvılaşmasına Karşı Uygulanabilecek İyileştirme Yöntemleri

Mehmet Hayrullah Akyıldız¹ & Kübra Adar²

¹ Dr. Öğrt. Üyesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Orcid: 0000-0001-7239-3518

² Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Orcid: 0000-0001-6595-2879

1.GİRİŞ

Depremsellik etkisiyle zemin tabakalarında sıvılaşma durumu ortaya çıkmakta ve hasara neden olmaktadır. Bu nedenle hem İnşaat Mühendisliği hem de Geoteknik Deprem Mühendisliği için önem arz eden sıvılaşma durumu ve oluşturacağı tehlikeler araştırılması gereken konular arasında yer almaktadır. Bu sebeple bu bölümde, zeminlerin sıvılaşma durumu, sıvılaşmaya neden olan faktörler ve bu durum karşısında alınabilecek iyileştirme yöntemlerine özet mahiyetinde değinilmiştir.

2.SIVILAŞMANIN TANIMI VE TARİHSEL SÜRECİ

Sıvılaşma, kohezyonsuz ve doymuş zeminler üzerinde boşluk suyu basıncının artması ve buna bağlı olarak efektif gerilmenin azalmasıyla meydana gelen mukavemet kaybına denir. Bu olay, bir yükleme ya da deprem gibi bir sarsıtıcı etkiyle zeminde boşluk suyu basıncının oluşması ile ortaya çıkmaktadır (Durmaz ve Soyaslan, 2023). Yükleme esnasında boşluk suyu drenajı olamamasından ötürü sıkışan su, basınç artışına sebep olur ve sıvılaşma olayı gerçekleşir. Bu olay Geoteknik Deprem Mühendisliği alanında çalışılması gereken en önemli konuların başında gelmektedir.

Zemin mekaniğinin kurucu olarak bilinen Terzaghi' e (1925) göre “sıvılaşma, suya doymun zeminin çökmesi sırasında zemini oluşturan katı parçacıkların ağırlığının zemini çevreleyen suya aktarılması durumunda oluşabilir. Bu olay sonunda zeminin herhangi bir derinliğinde hidrostatik su basıncı artarak büyüklüğü suya batan zeminin birim ağırlığına yaklaşır” (Castro, 1969). Terzaghi ve Peck (1948), çok gevşek kumların ani güç kaybı yaşaması ve az da olsa örselenmesiyle oluşan kayma durumuna ‘kendinden sıvılaşma’ tabirini kullanmışlardır. Fakat sıvılaşma hakkında ilk tabir Mogami ve Kubo (1953) tarafından ortaya atılmıştır.

1938 yılında Montana Fort Peck, 1920 yılında California Calvers, 1948 yılında Fukui, 1964 yılında Niigata, 1971 yılında California San Fernando (Şekil 1), 1964 yılında Alaska’da (Şekil 2) meydana gelen depremler sıvılaşmanın görüldüğü depremler olarak sıralanabilirler (Çetin ve Unutmaz, 2004).



Şekil 1. San Fernando (1971) depreminde sıvılaşma sonucu oluşan hasarlar (Kramer, 1996).



Şekil 2. Alaska (1964) depreminde sıvılaşma sonucu köprüde oluşan hasar (Kramer, 1996).

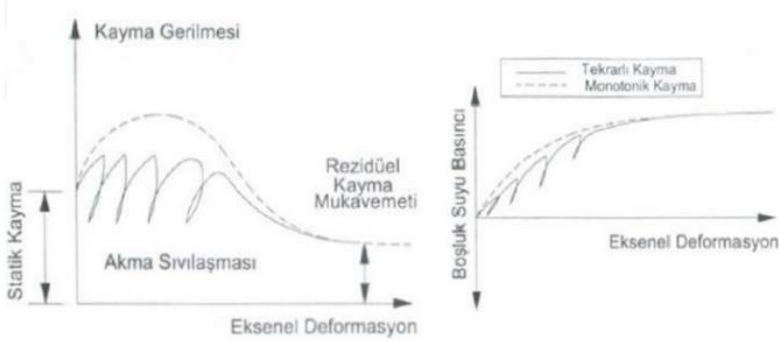
Türkiye de sıvılaşma olayının farkına varılması 1993 Erzincan depremi ile fark edilmiştir. Sonrasında 1999 Gölcük ve Kocaeli depremleri, 2011 Van depremi sonrasında meydana gelen sıvılaşma olayları bu durumun önemini tekrar ortaya koymuştur (Aydan vd., 2000).

3.SIVILAŞMA TÜRLERİ

3.1 Akma Sıvılaşması

Ciddi hasarlar oluşturan akma türü sıvılaşma, zeminin rezidüel mukavemetinin statik denge için gerekli kayma gerilmesinden daha düşük olduğu

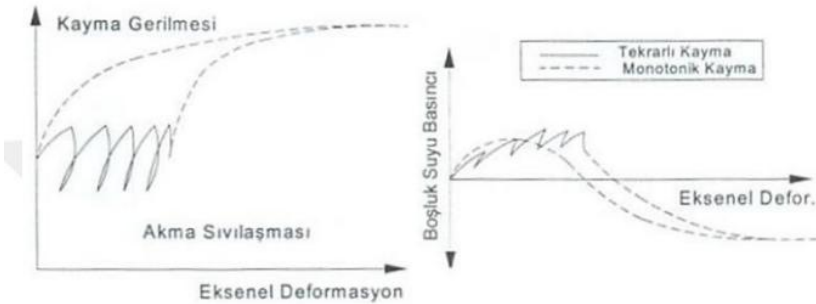
durumlarda meydana gelmektedir. Çok hızlı bir şekilde oluşup büyük zemin kütlelerini etkilemektedir (Kramer, 1996).



Şekil 3. Gevşek zeminlerde drenajın yeterli olamadığı durumlarda yeraltı su seviyesinin davranışı (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

3.2 Çevrimsel Hareketlilik

Zeminin rezidüel mukavemetinin statik denge için gerekli kayma gerilmesinden daha yüksek olduğu durumlarda meydana gelmektedir. Sismik etkiyle oluşup kalıcı deformasyon ve yıkıcı hasarlara neden olmaktadır. Zeminlerde deprem etkisiyle en çok görülen sıvılaşma çeşidi çevrimsel hareketlilik durumudur ve birçok çalışmada buna sebebiyet veren durumlar incelenmektedir (NCEER, 1997).



Şekil 4. Sıkı zeminlerde drenajın yeterli olamadığı durumlarda yeraltı su seviyesinin davranışı (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

3.2 Düz Yüzey Sıvılaşması

Deprem ya da sismik olaylar sonrasında boşluk suyu basıncının aşırı dağılması anında suyun yukarı hareketi ile meydana gelen yenilme durumudur. Bu süreç hidrolik kararlılığa erişinceye kadar devam edebilmektedir (Durmaz ve Soyaslan, 2023).

4. SIVILAŞMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Yapının konumlandırılacağı zemin hakkında incelemelerin yapılması gerekmektedir. Deprem riski barındıran yerlerde, deprem esnasında oluşabilecek sıvılaşma durumunda zemin mukavemetini kaybedip sıvı gibi hareket edeceğinden taşıma gücü azalır yapı dönme veya devrilmeye sebep olacaktır.

Sıvılaşmaya birden fazla etken neden olmaktadır. Bu etki durumu laboratuvar ve saha deneyleri ile tespit edilebilmektedir. Sıvılaşmaya etki eden faktörler;

- Deprem süresi ve büyüklüğü,
- Zemin cinsi,
- Dane şekli ve dağılımı,
- Yeraltı su seviyesi,
- Drenaj durumu,
- Rölatif sıklık,
- Çökelme ortamı ve çevre koşulları
- Gerilme geçmişi
- Yaş ve çimentolanma olarak sıralanabilmektedir (Day, 2002).

4.1 Deprem Süresi ve Büyüklüğü

Sıvılaşmanın oluşması için zeminin bir yer hareketine ihtiyacı vardır. Deprem esnasında açığa çıkan sismik enerji, tekrar eden kayma gerilmeleri sonucunda boşluk suyunun artışına sebep olur. Deprem süresi ve büyüklüğü arttıkça sıvılaşma riski de artmaktadır. Deprem süresinin sıvılaşma üzerindeki etkisini gösteren en önemli örnek 1964 yılında meydana gelen Alaska depremi ($M_w = 9,2$; $M_L = 8,4$; süre: 240 s) olarak gösterilmektedir (Tezcan ve Özdemir, 2004).

4.2 Zemin Cinsi

Zeminin sıvılaşma durumunu tespit etmek için yapılan çalışmalarda ilk olarak zemin cinsi incelenmektedir. Çeşitli çalışmalar sonucunda yapılan tanımlamalarda kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma riskinin fazla olduğu belirtilmektedir. Sıvılaşma potansiyeli en yüksekten en aza doğru sıralanırsa

temiz kumlar, plastik olmayan siltli kumlar, plastik olmayan silt ve çakıllar diye sıralanmaktadır (Day, 2002; Özaydın, 2007).

4.3 Dane Şekli ve Dağılımı

Çevrimsel yüklemeler sonucunda boşluk suyunun artışı sıvılaşmaya neden olarak gösterilen hacim değişimi üzerinde dane şekli ve dağılımının önemli bir etkisi vardır. Gevşek zeminler, temiz kil ya da siltli malzemeler ve kohezyonsuz kumlar sıvılaşmaya meyilli zemin daneleri olarak belirtilmektedir (Özaydın, 2007).

4.4 Yeraltı su seviyesi

Yeraltı su seviyesi, zemine yakın olmasına paralel olarak sıvılaşma riskini arttırmaktadır. Yeraltı su seviyesi zamana bağlı olarak değişim gösterirse buna bağlı olarak sıvılaşma ihtimali de artmaktadır (Kumar,2008).

4.5 Drenaj durumu

Gevşek, kohezyonsuz ve suya doymuş ortamlarda zeminde sıvılaşmaya sebep olan artan boşluk suyunun yeteri kadar drene olamamasından meydana gelmektedir. Boşluk suyu arttıkça efektif gerilme artacak ve buna bağlı olarak sıvılaşma oluşacaktır. Fakat suyun drenajı sağlanabilirse sıvılaşmanın önüne geçilmiş olacaktır (Çavuş, 2015).

4.6 Rölatif sıklık

Boşluk suyunun meydana gelmesi ve buna bağlı olarak sıvılaşma olayının oluşmasında bir diğer önemli etkende rölatif sıklıktır. Seed ve Idriss (1971), yaptıkları çalışmalar neticeinde rölatif sıklık ile sıvılaşma arasında pik ivmeye baplı olarak sıvılaşma ihtimalinin arttığını belirtmişlerdir.

4.7 Çökelme ortamı ve çevre koşulları

Su altında inşa edilen yapısal elemanlar suyla tema ettiği için daha gevşek ve dağınık bir yapıya bürünebilmektedir. Bu tip yapılarda sıvılaşma ihtimali artmaktadır (Yıldız, 2011)..

4.8 Gerilme geçmişi

Daha önce herhangi bir sismik etki görmüş zeminler, aynı zemin özelliklerine sahip sismik etki görmemiş zemine oranla sıvılaşma ihtimali daha yüksektir (Day, 2002).

4.9 Yaş ve Çimentolanma

Sıvılaşmaya etki eden bir faktörde yaş ve çimentolanma durumudur. Genç zemin çökellerinin sıvılaşma hassasiyeti eski zemin çökellerine oranla daha yüksektir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

5.SIVILAŞMAYA KARŞI ZEMİNLERDE UYGULANABİLECEK İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Zemin iyileştirme için uygulanabilecek yöntemleri enjeksiyon teknikleri ve sıkıştırma teknikleri olmak üzere iki ana başlık altında toplayabilmek mümkündür.

5.1 Enjeksiyon Teknikleri

Zemin özelliklerini iyileştirmek amacıyla çimento bazlı bağlayıcı maddenin zemine enjekte edilmesiyle veya karıştırılmasıyla yapılan işlemdir.

5.1.1 Gözenek enjeksiyonu

Zeminin kendi yapısı bozulmayacak şekilde zemine viskoz sıvı enjekte edilerek yapılan iyileştirme yöntemidir. çimento, uçucu kül, bentonit, mikro çimento gibi taneli ya da silikat jel, fenolik reçineler gibi kimyasal maddeler bu enjeksiyon işlemlerinde kullanılmaktadır (Alparslan, 2006).

5.1.2 Derin karıştırma

Büyük çaplı ya da çok eksenli burgular vasıtasıyla zemine kimyasal enjekte edilmesiyle yapılan iyileştirme işlemidir. Karıştırma işlemi sonucunda zemin alt yüzeyinde kolon oluşumu gerçekleşir.

5.1.3 Jet enjeksiyonu

İstenilen tasarım derinliğine uygun olarak su vasıtasıyla delinip, açılan o boşluklara yüksek basınçla çimento püskürtülerek iyileştirme işlemi yapılmaktadır. Bu iyileştirme yöntemi istenilen derinlik ve boyutlarda yapılmaktadır. Ülkemizde en yaygın olarak kullanılan iyileştirme yöntemidir (Alparslan, 2013).

5.2 Sıkıştırma Teknikleri

Zemin sıvılaşma durumlarında yaygın olarak kullanılan iyileştirme yöntemleridir.

5.2.1 Vibroflotasyon tekniği

Çökel zemini sıkıştırmak amacıyla vince asılı 30- 46 cm çapında, 3-9 m uzunluğunda bir vibroflotun kullanılmasıyla yapılan iyileştirme tekniğidir.

5.2.2 Vibrotij yöntemi

Zemine titreşimli bir kazık çakma çekici yardımıyla uzun bir tijin zemine itilmesiyle ve bu esnada oluşan sıkıştırma ile yapılan iyileştirme yöntemidir.

5.2.3 Dinamik kompaksiyon

Zemini sıkıştırmak amacıyla 5,5-27 t ağırlığa sahip tokmağın 10-30 metre yükseklikten tekrarlı olarak bırakılmasıyla yapılan iyileştirme tekniğidir.

5.2.4 Kompaksiyon enjeksiyonu

Düşük slump değerine sahip zemini yoğunlaştırmak için yüksek basınçla zemine özel olarak hazırlanan şerbetin enjekte edilmesi işlemidir.

5.2.5 Sıkıştırma kazıkları

Zemine kazık çakılarak yapılan sıkıştırma işlemidir. Titreşim ve sıkıştırma aralığına bağlı olarak yapılmaktadır

6.SONUÇ

Zeminde sıvılaşma, boşluk suyu basıncının artmasına bağlı olarak zeminin katı bir halden viskoz bir duruma geçmesi olayıdır. Deprem ya da sismik bir etkiye bağlı olarak meydana gelen bu olay, çeşitli deformasyon ve yıkımlara sebebiyet vermektedir.

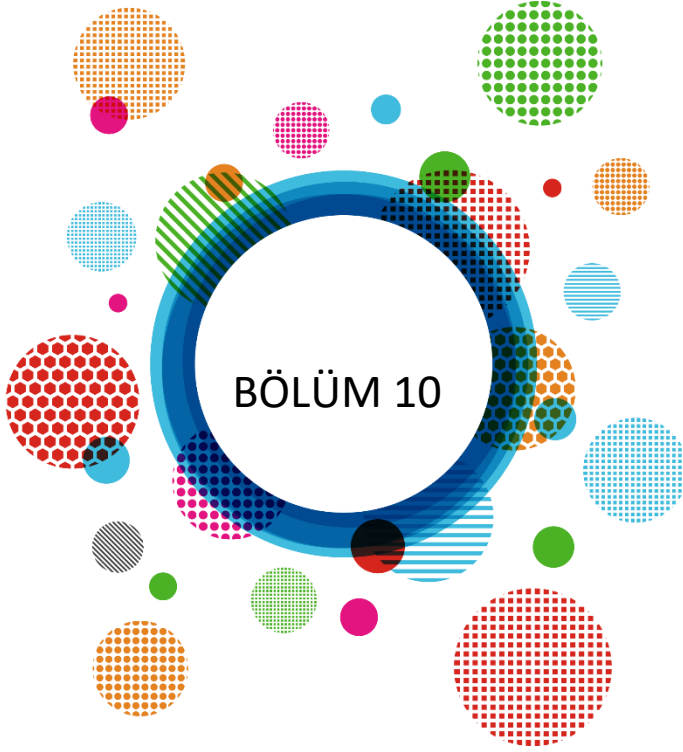
Sıvılaşma durumunu azaltmak ya da ortadan kaldırmak amacıyla çeşitli iyileştirme yöntemleri sunulmaktadır. Zemin özelliğine bağlı olarak seçilen bu yöntemlerle zemin taşıma gücü artırılıp hasara neden olan durumlar ortadan kaldırılmaktadır. Artan nüfusa paralel olarak yaşam alanlarının azalmasıyla kullanılacak yerler için her zaman sağlam zemine erişilememektedir. Ülkemiz gibi deprenselliğe sahip tüm alanlarda sıvılaşma risk oluşturmaktadır. Bu nedenle yapı ya da yapıları inşa edilecek zemin durumu öncesinden incelenip gerektiği durumlarda iyileştirme gidilmelidir.

KAYNAKÇA

- Alpaslan, N. (2013). Zemin sıvılaşması ve mekanizması. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 3(2), s. 67- 89.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsak, H., Tuncay E. (2000). Site Investigation and Engineering Evaluation of the Düzce-Bolu Earthquake of November 12,1999, Turkish Earthquake Foundation, TDV/DR 095-51, p.
- Castro, G. (1969). Liquefaction of sands, Harvard Soil Mechanics Series 87, Harvard University, Cambridge, Massachusetts
- Çavuş, U. Ş. (2015). Zeminlerin Sıvılaşması ve Barajların Alüvyon Temellerinin Sıvılaşma Riskinin Pratik Değerlendirilmesi, DSİ Teknik Bülteni, 119, s.32-33.
- Day, R. W. (2002). Geotechnical Earthquake Engineering Handbook, McGrawHill, 6.1-6.22
- Durmaz, S. G., & Soyaslan, İ. İ. (2023). Zemin sıvılaşmasını denetleyen koşulların ve sıvılaşma nedenli deformasyonların incelenmesi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14(2), 401-411.
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Kumar, K. (2008). Basic Geotechnical Earthquake Engineering, New Age International (P) Limited Publishers, New Delhi, 142 s
- Mogami, T. ve Kubo, K. (1953). “The Behavior Of Soil During Vibration” Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Mollamahmutoğlu, M. ve Babuçcu, F. (2006). Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, Ankara.
- National Center for Earthquake Engineering Research-NCEER (1997). “Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils”, Edited by Youd, T. L., Idriss, I. M., Technical Report No. NCEER-97-0022, Buffalo, New York.
- Özaydın, K. (2007). Zeminlerde Sıvılaşma, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Ekim, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 231-255.
- Seed, H.B. ve Idriss, I.M. (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No SM9, Proc. Paper 8371, 1249-1273.
- Terzaghi, K. (1925). Erdbaumechnik auf Bodenphysikalischer Grundlage. Vienna, Deuticke

Terzaghi, K. ve Peck, R.B. (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, Hoboken.

Tezcan, S. ve Özdemir, Z. (2004). Liquefaction Risk Analysis and Mapping Techniques, Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Yazar sayısına bağlı olarak yukarıda verilen düzende tüm



Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine Giden Yolda Hidrolik Yapılar ve Hidrolik Yapı Mühendisliği

Cengiz Koç¹

¹ Prof. Dr., Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi. Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü. Muğla / Türkiye, ORCID: 0000 0001 7310 073X

1. Giriş

Tüm hidrolik yapıların ve ilişkili hizmetlerin aniden yok olduğu bir dünyayı hayal edelim. Birçok hanenin temiz içme ve kullanma suyu olmayacak, kanalizasyon altyapısının olmaması kritik sanitasyon ve ciddi halk sağlığı sorunlarıyla kendini gösterecektir. Yerel ortamlar ve mevcut ekosistemler; kirlilik, taşkın, kuraklık ve sediment taşınmasından kaynaklanan olumsuz etkiler nedeniyle önemli bir değişim içinde olacaktır. Hidroelektrik enerjisinin olmaması, yenilenebilir enerji üretimini önemli ölçüde azaltacak, enerji fiyatlarını ve sera gazı emisyonunu etkileyecek, kıyı erozyonu ve taşkınlar kıyı şeridi ve haliç topluluklarını tehdit edecekti. Ancak, inşa edilen birçok hidrolik yapı, küresel sürdürülebilir kalkınmanın tam kalbinde yatan suyla ilgili hizmetlerde güvenlik sağlamıştır (Felder vd., 2021; Schleiss, 2017). Hidrolik hizmetler, ister yerin derinliklerinde drenaj veya depolama sistemleri olarak işlev görsün, ister uzaktan çalışarak suyu çeşitli amaçlarla taşınsın, toplumsal kalkınmanın ve ekonomik zenginliğin temelini oluşturur (Schleiss, 2000; 2017). Toplumun gözünden kaçan ve bir sorun ortaya çıkana kadar tam olarak takdir edilemeyen temel su altyapısı, topluma sürekli su temini, atıkları ortadan kaldırma, enerji ve gıda güvenliği gibi birçok fayda sağlamaktadır (Felder vd., 2021; Schleiss, 2000; Burkett, 2020). Bununla birlikte, 2030 yılına kadar tüm küresel altyapı için gereken bütçenin yarısından fazlasını oluşturan su altyapısı gereksinimleriyle birlikte sürdürülebilir hidrolik yapılara yönelik artan bir ihtiyaç vardır (Pörtner vd., 2022). Nüfus artışı, enerji ve gıda tüketimi, doğal ve insan kaynaklı bozulmalar nedeniyle hasar gören ekosistemler gibi 21. yüzyılın toplumsal, çevresel ve ekonomik baskıları ve artan iklim değişikliğinin etkileriyle birlikte hidrolik yapılar topluluğu artık (SKH)'ne (Felder vd., 2021) doğru bir dönüm noktasındadır. Hidrolik yapıların çevreyle nasıl etkileşime girdiğine ilişkin yenilenmiş bir bilimsel anlayışa, önceki nesillerden miras kalan sorunları yönetmeye ve onarmaya ve gelecekteki sürdürülebilir hidrolik yapıların gelişimi için daha iyi planlama yapmaya yönelik bir çağrı vardır. 21. yüzyılın zorluklarını ele almak için uyum - azaltma - hidrolik yapıların geliştirilmesiyle dayanıklılık konusunda somut eylem gereklidir. Ancak, dayanıklı sürdürülebilir kalkınma yalnızca bir projenin toplumsal, çevresel ve ekonomik hedefleri arasında iyi bir dengeyi koruyarak elde edilebilir.

Hidrolik yapılar binlerce yıldır toplumların gelişimini desteklemekte ve küresel su altyapısının ayrılmaz bir parçası olmaya devam etmektedir. Bu mühendislik yapılarının tasarımı ve düzgün çalışması, yapının amaçlarını ve önceliklerini temel almaktadır. Su altyapısı mühendisliği, maksimum güvenlik ve işlevselliği sağlamak için suyun yapı ile nasıl etkileşime girdiğine ilişkin özel bir anlayış gerektirir. En büyük hidrolik yapıların bazıları, evsel ve tarımsal su temini, taşkın koruma, hidroelektrik güç üretimi, rekreasyon ve diğer kullanımlar için rezervuar oluşturan barajlarda yer almaktadır. Bunlara, su alma yapıları,

taşkın kanalları, dinlendirme havuzları, kanallar ve balık geçitleri de dâhil edilebilir. Diğerk hidrolık yapılar daha küçük (su girişleri, sulama yönlendirmeleri, vb.) veya doğal veya kentsel çevreye karışabilir (doğabenzeri balık yolları, setler, yağmur suyu ağıları, vb.). Diğerkleri temel ev hizmetlerini ve ekonomik faaliyetleri destekler. Bu tür yapılar arasında barajlar, farklı su iletim çalışmaları (su kemerleri, kanalizasyon, iletim ve arıtma sistemleri), taşkın koruma çalışmaları, deniz duvarları, dalga kıranlar ve liman yapıları bulunur. Aşırı işlevsel koşullar altında performans gösteren bu hidrolık yapılar için sıkı güvenlik gereksinimleri en önemli unsurdur.

Sürdürülebilirliğin küresel su gündeminin ön sıralarında yer almasıyla sürdürülebilir tasarımların hidrolık altyapıya entegre edilmesinden elde edilebilecek değerin, toplum üzerinde uzun vadeli, çok yönlü olumlu etkiler yaratmadaki önemi göz ardı edilmemelidir (Koç, 2025). Günümüzde birçok projenin birden fazla amacı ve belki de çatışan işlevleri ve etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle, hidrolık yapıların tasarımı bütünsel bir şekilde en sürdürülebilir çözümleri kullanmalı (Erpicum vd., 2021) ve aynı zamanda ekonomik gereklilikleri karşılamalı, riskleri en aza indirmeli, düzenlemelere uyma ve miras alanlarındaki etkilerden kaçınma gibi proje hedeflerini göz ardı etmemelidir. Bu zorluklardan anlaşıldığı üzere, hidrolık yapıların tasarımının çok yönlü olması ve topluca ele alınma gerekliliği büyük ve birbirine bağımlı sistemlerin parçası olduğu anlayışını ortaya koymaktadır.

İnsanlık daha sürdürülebilir ve adil toplumlar yaratmayı hedeflerken, hidrolık yapıların oynayacağı önemli bir rol vardır. Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri 'ne ulaşma çabası küresel tartışmanın ön sıralarında yer aldığından hidrolık yapı mühendisleri yalnızca SKG 6 (Temiz Su ve Sanitasyon) değil, aynı zamanda diğerk birçok hedefi (Gene vd., 2020; Schleiss, 2017) önemli ölçüde etkileyecek teknik çözümler sunmak için uygun bir konumdadır. Ayrıca, Birleşmiş Milletler Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC, 2014, 2021) yakın zamanda hidrolık yapıların olumlu bir katkı sağlayabileceği SKG 13'ün (İklim değişikliği ve etkileriyle mücadele için acil eylemde bulunun) ele alınmasının acil bir ihtiyaç olduğunu vurguladı. Geçmişte, hidrolık yapıların tasarımı ve inşası büyük ölçüde performans ve maliyet değerlendirmeleriyle belirlenmekteydi. Sürdürülebilirliğe doğru bir yönelimle birlikte mühendislerin (SKH)'nin temel çerçevesinin bileşenleri olan insan hakları ve sosyal adaletle ilgili yönleri de buna dâhil etmeleri gerekiyor. Hidrolık yapı disiplininin evrimindeki bu kavşakta, hidrolık yapı mühendisleri (SKH)'ne katkıda bulunabileceği sürdürülebilirliğin temel unsurlarını belirliyor. Hidrolık yapı mühendisliği, yeni ve karmaşık çevresel sorunlar, eskiyen altyapının yenilenmesi ve iklim değişikliğine karşı dayanıklılığı artırma ihtiyacı gibi zorluklarla karşı karşıya kalan inşaat ve çevre mühendisliğinin en önemli alanlarından biridir. Araştırmacılar ve uygulayıcılar

tarafından hidrolik yapıların planlanması, tasarımı, inşası ve yaşam döngüsü bakımında ele alınması gereken önemli yeni gelişmeler bulunmaktadır.

2. Değişen Dünyada Hidrolik Yapıların Rolü ve Etkisi

Dünya hızla değişmekte ve su mühendisliği altyapısı farklı toplumsal hedefleri dengelemek için evrimleşmelidir. Hidrolik yapılar, bunlardan faydalanan halk tarafından sıklıkla yanlış anlaşılabilir, göz ardı edilebilir veya bazen görmezden gelinebilirken, kentsel ve sulama suyu temini, taşkın koruma, hidroelektrik üretimi ve nakliye kabiliyetleri kritik bir rol oynamaya devam etmektedir. Hidrolik yapıların kullanımını gerektiren bazı güncel önemli küresel su zorlukları burada kısaca açıklanmaktadır. Mühendisler ayrıca, sürdürülebilirliğin temel anlamının ötesine de bakmalıdır. Örneğin, SKH'lerin temel çerçevesinin ana bileşenleri olan insan hakları ve sosyal adaletle ilgili yönleri de dâhil etmelidir.

Hidrolik yapı mühendisliği ilk aşamalarında öncelikle deşarj, akış derinliği, hız vb. gibi suyla ilgili gereksinimleri karşılamak için ekonomik çözümlere odaklanmıştır. Bu bağlamda, tek bir hedef (pik deşarj, taşkın giriş tasarımı vb.) bazen tüm hidrolik yapıyı tanımlamıştır. Hidrolojik veriler daha ayrıntılı hale geldikçe ve hidroloji geliştikçe, bu tek amaçlı yaklaşım da gelişmiştir. Örneğin, tek bir tasarım deşarjının dikkate alınması, tüm işletme aralığının dikkate alınmasına dönüşmüştür. Tasarım politikaları ve kriterlerinin değiştirilmesi zor olsa da hidrolik yapı yenilikçileri, hem yapının ömrü boyunca deneyimleyebilecekleri hem de iklim değişikliği bağlamındaki uzun ömürlülüğü açısından dayanıklılığı dikkate alarak daha da ileri gitmektedirler. Hidrolik yapılar yaşlandıkça, yaşam döngüsü yönetimi daha önemli hale gelmekte ve yeni yaklaşımlar gerektirmektedir. Ayrıntılı incelemeler, onarımlar ve ağır bakım yeterli finansman gerektirmektedir. Uygun tasarım seviyesini sağlamak için hidrolik yapının öngörülen gelecekteki taleplerle eşleştirilmelidir. Kaliforniya'daki Oroville Barajında 2017 yılında meydana gelen olaylar ve büyük ölçüde eskiyen hidrolik altyapı, hidrolik yapı yaşam döngüsü yönetiminde yeni bir yaklaşımın önemini vurgulamıştır (France vd., 2018). Küresel güvenliğin önemi ve yapının farkındalığı hidrolik yapılar topluluğunda yenilenmelidir. Yapının bütünlüğünü sürdüren, ancak rutin işletmeler ve yerinde eğlence faaliyetleriyle ilgili daha yüksek riskli olayları da göz önünde bulunduran küresel güvenliğe yönelik daha kapsamlı bir yaklaşım gereklidir. Bu bağlamda, hidrolik yapı mühendislerinin hidrolik yapılarda değişen güvenlik sorunları konusunda politikacılar ve halkla yaşam boyu öğrenme ve açık iletişim kurma görevleri vardır. Hidrolik yapı mühendisliğinin yeni çerçevesindeki önemli bir adım kullanılabilirlik sorunu olacaktır. Topluluklar ve çeşitli bakış açıları, mevcut hidrolik yapıları göz ardı etmeye veya bunların yararlılığını toplumsal ve ekolojik talepler açısından değerlendirmeye devam edecektir. Taleplerin veya yapının

amacının değişip değişmediğini sorgulamak tüm ilgili ve sorumlu tarafların sorumluluğundadır. Yapıyı yükseltme, yeni inşaatlara başlama veya kaldırma ihtiyaçı var mı? İlerlemek için mevcut durumda hangi yenilikler mevcut? Bu bağlamda, birçok rezervuarın sedimantasyonu ve kapsamlı sonuçları (Annandale vd., 2016) nemli bir sorundur. Bu sonraki adımlar ve gereklilikler hakkında bir sonuca varmak için hidrolik topluluğunun yeni bir hidrolik altyapı mühendisleri sınıfının gelişimini desteklemesi gerektiğine inanmaktadır. Hidrolik yapıların bu yöneticileri, gelecekteki toplumsal ihtiyaçlara yanıt vermek için bazı alanlar (kullanılabilirlik - yöneticilik - küresel güvenlik - dayanıklılık - yönetim) göz önünde bulundurarak ileri görüşlü olmalıdır.

2.1. Değişen Bir İklimde Kuraklık ve Taşkın Dayanıklılığı

Yağış desenlerindeki değişiklikler (IPCC, 2021) ve artan küresel nüfus, geçmişte kuraklık yaşamamış veya mevcut durumda su kaynakları kıtlılığının eşiğinde olan bölgelerde giderek artan bir stres yaratabilir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nin Güneybatısı ile Orta kısımda yer alan ovalarında kuraklıkların daha yoğun hale gelmesi beklenmekte olup, gelecekte daha sık meydana gelmesi ve daha uzun sürmesi öngörülmektedir (Cook vd., 2015). Daha aşırı kuraklıklar büyük bir olasılıkla su depolamasının çok yıllık düzenlemesini gerektirecek, bu durum iyileştirilmiş su yönetim yapılanmasını ve daha büyük rezervuar depolama kapasitesini gerektirecektir. Ayrıca, daha yoğun yağış olayları (IPCC, 2021) ABD'deki Ida Kasırgası'nın neden olduğu gibi dünyanın bazı bölgelerinde daha yoğun taşkınlarla neden olabilecektir (Hirabayashi vd., 2013). Daha sık meydana gelen taşkınlar yda bu yapılara yönelik artan talepler genellikle hazırlık için ek bakım ve denetim gerektirmekte ve eksikliklerin fark edildiği durumlarda riski azaltmak amacıyla yatırımlarla birlikte kapasite artışlarına ihtiyaç duyulmaktadır. İnsanlık bu değişimlere uyum sağlamayı başaramazsa maliyet kaçınılmaz olarak yüksek olacaktır (IPCC, 2014). Bu gözlemler, durağan hidroloji varsayımı altında geliştirilen hidrolik yapıların statik, katı tasarımıyla çelişmekte ve belirli bir dönüş periyodundaki yağış olaylarının yoğunluğunun ve büyüklüğünün yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir.

2.2. Sıfır Karbon Emisyonlarının Yaşı

Hidroelektrik, retim ve depolama için verimli, düşük karbonlu bir enerji seçeneği olması nedeniyle sıfır karbonlu bir geleceğe katkıda bulunabilir. Ayrıca, mevcut birçok hidroelektrik projesi orijinal tasarım ömürlerinin ötesinde işletilmeyi gerektirebilir. Enerji depolaması da temiz bir enerji geleceğine geçişte önemli bir rol oynayacaktır. Büyük lekli pompalı depolama hidroelektrik planları enerjiyi verimli bir şekilde depolamanın uygun bir yolunu sağlamaktadır (Rogner ve Troja, 2018; Bayazit vd., 2021; Koç, 2014). Örneğin, Wivenhoe Barajı, Brisbane için taşkın azaltma ve içme suyu ve sağlamakla kalmıyor, aynı

zamanda 570 MW'lık bir pompajlı depolama hidroelektrik santralinde alt rezervuar olarak da hizmet vermektedir. Avustralya'daki Snowy 2.0 santrali, ABD, Virginia'daki Cobbs Creek santrali ve Çin'deki çok sayıda santral gibi daha birçok pompajlı depolama hidroelektrik santrali planlama veya inşa aşamasındadır (IHA, 2021).

2.3. Kritik Su Altyapısı

Hidrolik yapılar dolaylı olarak ekonomiyi destekler, genellikle arka planda çalışır, su ve atık su hizmetlerini ve kentsel drenajı sağlar, elektrik üretimini ve endüstriyel üretimi mümkün kılar, yerel ve küresel nakliye rotalarını destekler. Ancak, Çin'in Zhengzhou kentinde ve Batı Avrupa'da son zamanlarda yaşanan yoğun yağışlar gibi aşırı olaylar altyapı kapasitesini aşabilmekte, önemli kentsel hasara, kanalizasyon taşmasıyla ilgili kirliliğe ve atık su arıtma sorunlarına neden olabilmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelebilmek için kentsel hidrolik yapıların önemli örnekleri arasında, yağmur suyu yönetimi için derin tüneller, birleşik kanalizasyon taşmalarının azaltılması ve fırtına gayzerlerinin önlenmesi veya hafifletilmesi yer almaktadır. Bu tür yapılara örnek olarak Chicago'nun TARP sistemi ve Londra'nın derin kanalizasyon iletim sistemi verilebilir. Bu projelerde, küçük bir yatay alanda önemli yükseklik farkları bulunan birleşik kanalizasyon akışlarının güvenli bir şekilde iletilmesiyle ilgili zorluklar, akış enerjisini verimli bir şekilde dağıtırken, mansap iletim tünellerinde sürüklenen hava hacmini sınırlayan dev girdaplı düşü yapıları kullanılarak aşılmıştır. Bu örnekler, tasarım, modelleme ve yapısal malzeme bileşiminin erken planlama aşamalarında dikkatli olarak ele alınmasıyla, kritik su altyapısını geleceğe hazırlamak ve çevreyi korumak için hidrolik yapılar alanında teknik ve sürdürülebilir yenilikçi çözümlerin nasıl geliştiğini göstermektedir. Bu projeler sürdürülebilir ve yenilikçi tasarımın etkisini göstermesi bakımından örnek teşkil etmesine karşın, gelecekteki kentsel dayanıklılığı artırmak için yatırıma ve teknik yenilikçi çözümlere olan ihtiyaç devam etmektedir.

2.4. Yaşlanan Su Altyapısı

Yaşlanan altyapı, tüm dünyada büyük yatırım ve dikkatli değerlendirmeyi gerektiren ciddi bir sorundur. Bu duruma örnek, ABD de yer alan taşkın kontrolü/su temini rezervuarında alkali-silika reaksiyonundan (ASR) etkilenen ve beton mukavemetinin kaybolmasına neden olan kapaklı bir dolu savak gösterilmektedir. Bu savak daha sonra işletme deşarj aralığını artırmak ve kamu güvenliğini iyileştirmek için değiştirilmiştir. Dünyadaki büyük barajların çoğu 50 yıldan daha önce inşa edildiği için tasarım ömürlerini doldurmuş ve birçok baraj özel ilgi gerektirmektedir (Perera vd., 2021). Kaliforniya'daki Oroville Barajı, 2017 yılında, işletilirken beton bir levhanın kaldırılması sonucu dolu savağın yetersiz bakımı ve kötü inşaatıyla bağlantılı olan ciddi savak hasarı; kritik su altyapısının yalnızca tasarımına göre inşa edilmesinin gerektiğini değil, aynı

zamanda işletme sırasında güvenli ve istenen performansı sağlamak için uygun şekilde bakımının yapılması ve denetlenmesi gerektiğini göstermiştir. Mevcut birçok büyük hidrolik yapı, tasarım sırasında başlangıçta amaçlanan zamandan çok daha uzun süre işletmede kalmaktadır.

Bu nedenle, tasarım kapasiteleri artık günümüz koşulları için yeterli olmayabilir. Ayrıca, tasarım ve inşaları ile ilgili yapılan varsayımlar güncelliğini yitirmiş olabilir ve bu yapıların gelecekte işlev görme yeteneği, faydaları ve güvenliği sorgulanabilir. Uzun kullanım ömrü ilgili personel emekliye ayrılırken kritik bilgilerin kaybolmaması, bu bilgileri tekrar sağlamak zorunda olan yapı sahipleri için bir zorluk olabilir. Tarih, veri, belirli olaylar vb. hakkında iyi bir dokümantasyon mevcut değilse uygun bakım bir zorluk haline gelir. Yaşlanan su depolama altyapısı yavaş yavaş önemli bir küresel kalkınma sorunu haline gelmektedir. Geçtiğimiz yüzyılın ortalarında inşa edilen binlerce büyük baraj, tasarım ömürlerinin alt sınırı olan 50 yılı çoktan aşmış veya aşacak, birçoğu da 100 yıla yaklaşmaktadır. Sonuç olarak, etkili işlevsellikte düşüş yaşanırken, çevre ve insan güvenliği için tehdit oluştururken daha önemli bakım maliyetlerine maruz kalacaktır. Bu durum, ortaya çıkan sorunla etkili bir şekilde başa çıkmak için devre dışı bırakma süreçlerini ve sonuçlarını anlamada yeni çerçeveler geliştirmek önemli olacaktır. Doğru verilere, yerel bağlamda baraj yaşlanması faktörlerinin ve etkilerinin anlaşılmasına, ilgili politikaların er ya da geç oluşturulmasına bağlıdır.

İklim değişikliği hususları bir barajın yaşlanma sürecini ve devre dışı bırakma kararlarını hızlandırabilir. Aşırı hava olaylarının, özellikle taşkınların, değişen iklimle birlikte daha şiddetli ve sık hale gelmesi beklenmektedir. Sonuç olarak, bu olaylar tarihsel hidrolojik veriler kullanılarak tasarlanan ve yaşlanan büyük barajlar için tehdidi artırmaktadır (Payne vd., 2004; Choi vd., 2020). Bu tür olayların artan sıklığı ve şiddeti, rezervuarın ve barajın tasarım sınırlarını aşabilir ve farklı (ve durağan) bir iklim durumu için belirlenmiş olan baraj güvenliğini zayıflatabilir (Fluixá Sanmartín vd., 2018).

3. Hidrolik Yapı Mühendisliği

Toplumlar yüzyıllardır, çeşitli hedeflere ulaşmak için su havzalarımız ve suyollarımız boyunca su döngüsünü etkileyecek yapılar geliştirmektedir. En temel olanı ise evsel su kullanımı ve tarımsal sulama için inşa edilen yapılardır. Tarihsel kayıtlar, "hidrolik yapıların" zaman içinde nasıl amaçlandığını, uyarlandığını ve evrimleştiğini (Mays, 2008; Rouse ve Ince, 1957; Viollet, 2007) ve bilimsel anlayışımızı (Castelli, 1628) ve insan toplumlarının ekonomik refahına ve kültürel zenginliğine nasıl katkıda bulunduğunu (Schleiss, 2017) göstermektedir. Geçmişteki mühendislerin ve bilim insanlarının birçoğu grafiksel veya deneysel olan kümülatif çabaları, bugüne kadar hidrolik mühendisleri için miras tasarım araçları sağlayan kitaplar, transkriptler, makaleler ve tasarım

kılavuzları biçiminde bol miktarda literatür üretmiştir (Tanchev, 2014). Bu durum, istemeden de olsa hidrolik yapı mühendisliğine karşı bir basitlik ve hatta sıradanlık algısı yaratmaktadır. Bununla birlikte, seleflerimiz tarafından elde edilen hidrolik yapılardaki zengin bilgi mirası bir ilham ve bilgelik kaynağı olup (Mays, 2008), nesilleri birbirine bağlamak için bir fırsat sunar. Günümüzde, en büyük ve en etkili inşaat projelerinden bazıları toplum ve çevre için artan su sorunlarına yanıt olarak gerçekleştirilmektedir. Su altyapısının geliştirilmesi, Birleşmiş Milletler tarafından tanımlanan 16 sürdürülebilir kalkınma hedefinden altısıyla doğrudan bağlantılıdır (Schleiss, 2017). Kesinlikle hidrolik altyapı, dünya genelinde su temini, atık su arıtımı, taşkın azaltma, nehir yolu taşımacılığı ve hidroelektrik sistemlerinin temellerini oluşturur Batı ABD Rezervuar Ağı, Güney-Kuzey Çin Saptırma Projesi, Euro Derin Kanalizasyon Yapıları, Itaipu ve Üç Boğaz Barajları, G-Cans Tünelleri, Maeslantkering Fırtına Bariyeri, Panama Kanalı, Snowy Hidroelektrik Planı, önemli örnekleri oluşturmaktadır. Mevcut birçok su projesi, artan seviyelerde taşkın koruması sağlarken çevresel etkileri en aza indirmek gibi çeşitli paydaşların ve toplulukların çatışan hedeflerini ele almaktadır. Hidrolik yapıların sürdürülebilirliğini dikkate alma konusuna ihtiyaç vardır. Kentsel bölgelerdeki birçok hidrolik mühendislik iyileştirme projesi, önceki ihmal ve yetersiz finansmanın (ASCE, 2017) bir sonucu veya önceki projelerle bağlantılı eksiklikleri düzeltmeyi amaçlamaktadır. Su kaynaklarının birçok yönünde yer alan disiplinler arası araştırmalar yaygın hale gelmiş, çevre, su ekolojisi, iklim eğilimleri ve doğal sistemlerdeki yüzey suyunun karmaşık davranışları arasındaki hassas bağlantılar açısından zengin iş birliği sunmuştur. Akademi ve endüstri giderek farklı yollar izlemektedir. Her yıl binlerce bilimsel belge yayınlanmasına karşın, bunlar büyük ölçüde bilimsel topluluklar dışında okunmamakta, bu durum, bazı akademik çalışmaların değerinin ve etkisinin sorgulanmasına yol açmaktadır. Büyük ölçekli hidrolojik modeller, su hareketlerine ilişkin benzeri görülmemiş içgörüler sağlar, ancak ana akım çalışmalar genellikle aşırı basitleştirir veya zaman zaman akış düzenleyici hidrolik yapıları ihmal eder. Üçüncü sanayi devrimi, bilim ve mühendisliğin birçok alanında önemli ilerlemeler sağlarken, bugün dünyanın birçok yerinde hidrolik yapı mühendisliği çoğunlukla güvenliğe odaklı, riskten kaçınan ve eski araçlar yerine kanıtlanmamış yenilikleri kullanma konusunda tereddüt gösteren bir mühendislik olarak tanımlanmaktadır.

Tarihin en hızlı toplumsal değişimlerinin ortasında (Davis, 2016), hidrolik yapı mühendisliği nasıl evrimleşecek (diğer su kaynakları disiplinlerinin yaptığı gibi), bugünün ve geleceğin artan sürdürülebilirlik zorluklarına nasıl yanıt verecek? Hidrolik yapı mühendisliğinin temel rolü insan toplumunun gelişimi için su altyapısı sağlamak (Liggett, 2002; Schleiss, 2000) olacağı açıktır. Ancak, bu rol çevresel ve toplumsal maliyetlerin daha fazla dikkate alınmasını gerektirmektedir (Syvitski vd. 2009). Ayrıca, hidrolik yapılar iklim değişikliği ve

tüm yaşam sürelerinin dışında nüfus artışının ortaya çıkardığı yoğunlaşan koşullarla başa çıkması gereken çok uzun ömürlü yapılardır. Bu durum, hidrolik yapıları değişen bir dünyanın merkezine yerleştirmekte; ilişkili mühendislik yaklaşımlarının sürekli evrimini gerektiren bir zorluk olarak kendini göstermektedir. Bu bağlamda, yazarlar sürdürülebilirlik olarak tanımladığımız çevrenin ve toplumun tüm mevcut ve gelecekteki ihtiyaçlarını vurgulayan hidrolik yapı mühendisliği için yeni bir çerçeve önermektedir. Bu yeni çerçeve, hidrolik yapı mühendisliği gelişimini destekleyen, birbirine bağlı araçların ve yöntemlerin sürekli evrimine dayanmaktadır. Bu gelişimin başarısı, akademiye endüstriyle bağlayan iletişimlere ve işbirliklerine dayanmaktadır

3.1. Sürdürülebilir Hidrolik Yapı Mühendisliğinin Temel Unsurları

Erpicum vd. (2021), hidrolik yapılar için daha sürdürülebilir bir bakış açısı benimsemek için mevcut araçları tanımlamıştır. Daha önce ana hatlarıyla belirtilen zorluklarla birlikte, sürdürülebilir hidrolik yapı mühendisliğinin aşağıda belirtilen temel unsurlarının Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri üzerinde olumlu etkilere sahip olması öngörülmektedir.

3.1.1. Etik Karar Alma

Hidrolik yapı mühendisleri, diğer tüm mühendisler gibi toplumun çıkarları doğrultusunda hareket etmek için ahlaki ve etik yükümlülüğe sahiptir (Layton 1986; Waller vd. 2021). Ancak, güvenlik her zaman birinci önceliği oluşturur. Bu durum, sadece bir mühendisin bir hidrolik yapının tasarımında teknik olarak neler başarabileceğiyle ilgili değildir. Daha genel olarak, hidrolik yapı mühendislerinin, müşteri beklentilerini karşılamak için proje hedeflerinin sorumluları olurken her durumu bütünsel ve eleştirel bir şekilde ele alma konusunda ahlaki bir sorumluluğu vardır. Genellikle müşteri hedefleri, paydaş çıkarları ve öncelikleri uyuşmadığı için bu sorumluluk tarihsel olarak zorlayıcı olmuştur. Hidrolik yapılar, çevrenin, toplumun, ekonominin ve kültürel mirasın refahı ile ilgili çıkarlar arasında paylaşılan sistemlerdir. Bu nedenle, hidrolik yapı mühendislerinin etik yargıları çok önemlidir. Etik karar alma sürecinde bir değişim insan hakları bağlamında da gerçekleşmelidir. Örneğin, temiz suya ve sanitasyona erişim bir insan hakkıdır (Birleşmiş Milletler 2010), ancak günümüzde hala birçok kişi buna sahip değildir. Bu nedenle, mühendisler sadece gelişen toplumların karşılayabileceği çözümler geliştirmeye devam etmekle kalmamalı, aynı zamanda bu çözümleri düşük ve orta gelirli ülkelerinde kolaylıkla karşılayabileceği miktara uyarlamak ve aktarmak için düşüncelerini değiştirmelidirler. Dünyanın karşı karşıya olduğu zorluklar göz önüne alındığında, hidrolik yapı mühendislerinin Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunmak gibi bir ahlaki sorumluluğu bulunmaktadır.

Doğal bir nehir sistemine yapılan herhangi bir antropojenik müdahalenin yerel, memba ve mansap ekosistemleri üzerinde bir etkisi vardır (Gill vd., 2018; Koç, 2010; 2015). Bu sistemlerde yer alan barajların, saptırma yapılarının vb. tasarımıyla sorumlu hidrolik yapı mühendisleri de dâhil olmak üzere toplum bunların etkisine kapsamlı bir şekilde bakmalıdır. Hidrolik yapı mühendisleri, karşılaştıkları zorlukları göz önünde bulundurarak doğaya büyük değer vermeli ve doğal ekosistemler üzerindeki olumsuz etkileri sınırlamalıdır. Hidrolik yapılar sadece flora ve faunayı değil, aynı zamanda yerel popülasyonları, mirasları ve geçim kaynaklarını da etkileyebilir. Bu tür etkiler önemli olup projenin erken aşamalarında uygun şekilde değerlendirilmelidir. Tarih, insanların yeniden yerleştirilmesi gerekiyorsa, aileleri, geçim kaynakları ve hatta kültürleri üzerindeki etkilerin ciddi olabileceğini göstermiştir. Karar alma sürecindeki seslerine saygı gösterilmeli ve uygun bir tazminat sağlanmalıdır. Birçok yerli kültür için su kütleleri özellikle önemlidir. Rezervuarların oluşturulması için su seviyelerinin yükseltilmesi kutsal alanların tahribine ve ABD'nin kuzeybatısındaki Columbia Nehri Havzasında olduğu gibi kültürel mirasın kaybına yol açabilir. Hidrolik yapı mühendisleri karar alma sürecine doğrudan dâhil olmasalar da yerel topluluklar etkilenirse veya haksız muamele görürse profesyonel mühendislik etiğine uygun şekilde hareket etmelidirler.

3.1.2. Kapsayıcılık

Hidrolik yapılar büyük ölçüde erkekler tarafından tasarlanma mirasına sahiptir. Son zamanlarda çeşitlilik ve kapsayıcılık yönünde iyileştirmeler yapılmış olsa da hala ek çabalara çok ihtiyaç duyulmaktadır. SKH 5 cinsiyet eşitliğini sağlamayı ve tüm kadınları güçlendirmeyi amaçladığı için bu hedef belirgin olmalıdır. Bir sonraki adım olarak, hidrolik yapı mühendisliği, kadın ve ikili olmayan meslektaşların katılımını en iyi şekilde teşvik etmeli ve karşılama yolları konusunda bu grupları dinlemelidir. Bu adım, SKH'lerine en iyi şekilde nasıl katkıda bulunulacağına ilişkin daha çeşitli değerlendirmeler için temel oluşturur. Hidrolik yapı mühendisleri kültürel açıdan hassas bir şekilde küresel öğrenmeyi ve en iyi uygulamayı teşvik etmek için kültürel çeşitlilik ve mirası benimsemelidir. Yerli topluluklardan yeterince temsil edilmeyen diğer grupların üyelerini çekmek bu hedefe ulaşmaya yardımcı olabilir.

3.1.3. Sürdürülebilirlik Yönünde Bakış Açısını Değiştirmek

Sürdürülebilirlik yönünde değişimi sağlamak için hidrolik yapı mühendisliği uygulamalarında aşağıdaki değişiklikler dikkate alınmalıdır;

Hidrolik yapı mühendisleri, bir hidrolik yapının güvenliğinden ve performansından ödün vermeksizin her zaman en sürdürülebilir çözümü hedeflemelidir. Bu tür bir çözüm, ekosistemlerden ve çevre kalitesinden ödün vermeden insan yerleşimleri ve toplumların refahı için mümkün olan en iyi

sonucu sağlamalıdır. Bu değişim, mühendisler ve toplum genelinde en iyi sürdürülebilir ve ileriye dönük yol hakkında açık ve sağlıklı tartışmalar yoluyla gerçekleştirilebilir. Bu da kararlaştırılmış çözümlerin daha geniş bir kesim tarafından kabul görmesine yol açar.

Doğa esaslı yaklaşımla inşa etmede görülen son gelişmeler, yenilikçi, sürdürülebilir alternatif tasarımlar için gerekli bir çabanın unsuru olan hidrolik yapı tasarımcıları tarafından benimsenmelidir. Zaten etkilenmiş ekosistemler için daha doğal bir duruma geri döndürme bir seçenektir. Hidrolik yapı mühendisi, en kapsamlı sürdürülebilir mühendislik çözümünü sağlamak için mevcut bir yapıyı kaldırma veya değiştirme potansiyelini değerlendirmek için en iyi konumdadır. Hidrolik yapı mühendisleri, altyapının sağlam olması gerektiği ve hatta güvenlik hususlarının çok önemli olduğu durumlarda kritik bakış açıları sunmaktadır. En iyi sürdürülebilir çözümün değerlendirilmesi, iklim değişikliği senaryoları altında güvenli işletmeyi, hidrolik yapıların ve rutin işlevlerin olabilecek bir felaket ile ilgili riskleri en aza indirmeyi, yapının yaşam döngüsü değerlendirmesini, sismik aktiviteleri, çevresel ayrıcalıkları ve güvenliği tehlikeye atabilecek jeoteknik, yapısal ve işlevsel yönleri diğer mühendislik konularıyla birleştirmelidir. Güvenlik çok önemli olsa da her zaman en iyi sürdürülebilir seçenek mevcuttur. İnsan altyapısının gerçek karbon ayak izi dikkatlice değerlendirilmeli (Calamita vd., 2021), inşaat, işletme ve devre dışı bırakma sırasında iklim değişikliğinin etkisini azaltma düşünölmelidir. Bu durum, proje tasarım aşamasının temel bir parçası haline gelirse ve ihalede açıkça ele alınırsa veya hatta değerlendirilirse başarılı olabilir. IPCC (2014), mühendislerin iklim kaynaklı etkilere mümkün olan en kısa sürede uyum sağlamak için yapmaları gereken önemli katkıyı vurgulamaktadır. Hidrolik yapılar bu uyumda önemli bir rol oynamalıdır. Altyapı ortamlarında daha sürdürülebilir uygulamalar (kentsel alanlarda sürdürülebilir drenaj sistemleri) genellikle merkezsisz ve yereldir. Hidrolik yapı mühendislerinin çevre dostu su iletim sistemlerinin tasarımı ve inşasına yardımcı olmak için katılımcılık bir fırsat yaratmaktadır. Özellikle, kırsal ve gelişmekte olan ölkelerde, yerel küçük ölçekli yapılar, çevre dostu menfez ve baraj sistemleri, çok az düşöülü hidroelektrik santralleri, küçük ölçekli pompajlı depolama hidroelektrik santralleri veya yoğun yağış-akış olaylarıyla başa çıkmaya yönelik işletme planlaması gibi önemli fırsatlar sunmaktadır. Kamerun'daki Lom Pangar rezervuarının su kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için uygulanan temel unsurlardan biri olan 3 m yüksekliğindeki havalandırma kademesi; çevresel akışlar için soğuk su bırakan Linville, Kuzey Carolina'daki 4,5 m yüksekliğindeki labirent baraj; yerel topluluğa hizmet eden küçük bir hidroelektrik ünitesi ve küçük baraj tarafından engellenen su göçünü kolaylaştırmak için bir balık geçidi ile donatılmış Idaho'daki yüksek dağ rezervuarı, farklı sürdürülebilir hidrolik yapıları göstermektedir.

3.1.4. İletişim ve Eğitim

İletişim ve eğitimin iyileştirilmesi temel stratejik bir gerekliliktir. Karmaşık, teknik, hidrolik yapı projeleri geliştirirken, risklerin halk tarafından kolayca anlaşılabilmesi için iyi bir iletişim temeldir. Olumlu etkiler elde etmek ve iyileştirmek için paydaşlardan geri bildirimler projenin erken aşamalarında alınmalıdır (Koç, 2015). Halk arasında bir proje hakkında çelişkili görüşlerle karşılaşmak yaygındır. Bu nedenle, iletişim, etkilenen tüm tarafları dikkate alan uygun bir çözüme ulaşmak için en etkili yöntemdir. Hidrolik yapılar tipik olarak onlarca yıl dayanacak şekilde tasarlandığından ve potansiyel olarak yüzyıllara kadar uzandığından, iletişim yalnızca planlama ve tasarım aşamalarında değil, aynı zamanda yaşam döngüsü yönetimi çabalarında da önemlidir. Bu şekilde, yeni nesiller projenin amaçları ve faydaları hakkında bilgi sahibi olabilir. Mevcut ve gelecek nesil mühendisler, sürdürülebilir hidrolik yapıların tasarımı konusunda eğitilmeli, sürdürülebilir mühendislik alternatifleri, toplumsal sorumluluklar ve müşteri beklentileri entegre edilmelidir. Bu kapsayıcı çok disiplinli eğitim üniversitelerde ve endüstride gerçekleştirilmelidir.

3.1.5. Birlikte Çalışmak

SKH'lerine katkıda bulunmak için hidrolik yapı mühendisleri disiplinler arası yaklaşımları benimsemeli ve benzer sürdürülebilirlik hedeflerine sahip diğer bakış açılarını dikkate almalıdır. Proje sahipleri, operatörler, düzenleyiciler ve diğer mühendislik uzmanlarıyla etkileşimin yanı sıra sürdürülebilir çözümler hidrolik yapı içeren bir projedeki diğer tüm paydaşlarla etkileşimi gerektirir:

Aktif işbirlikçiler olarak hidrolik yapı mühendisleri, yerel topluluklar, paydaşlar, politikacılar ve diğer mühendislik dışı profesyoneller dâhil olmak üzere su altyapısını kullanan veya bundan etkilenen tüm gruplarla çalışmalıdır. Günümüze kadar hidrolik yapıların çoğunluğu inşaat mühendisliği etrafında merkezlenmiştir. Bu durum, inşaat mühendisinin su altyapısı projelerinin araştırma, planlama, tasarım ve modelleme aşamalarında mekanik ve elektrik sistemleri, kontrol ve otomasyon konuları da dâhil olmak üzere birçok disiplinde genel olarak bilgi sahibi olması beklentisine dayanmaktadır. Disiplinler arası bir yaklaşımın benimsenmesiyle bilim insanları, aktivistler, yatırımcılar vb. gibi diğer topluluklar da dâhil edilerek genel hidrolik yapılar topluluğu daha da güçlendirilebilir.

Bir su projesinin planlama aşamalarında mevcut yerel flora ve fauna popülasyonunu ve yeni su altyapısının olası olumsuz etkilerini değerlendirmek için ekologlar, biyologlar, korumacılar ve diğer flora ve fauna uzmanlarına danışılmalıdır. Bu tür uzmanların katılımı, mevcut veya planlanan altyapı projelerinin çevresel etkilerini tam olarak değerlendirmek için önemli olup, değerlendirmeleri bir projenin iptaline bile yol açabilir. Diğer durumlarda,

olabilecek olumsuz ekolojik etkiler mühendislik yaratıcılığıyla hafifletilebilir. Örneğin, uluslararası öneme sahip sulak alanlar Ramsar listesinde yer alan Avustralya'daki bir sulak alanda doğal su seviyelerini eski haline getiren bir dizi kaldırma kuvveti otomatik gelgit kapağı gösterilmekte, inşa edilen bu sistem tehdit altındaki türler için önemli bir yaşam alanı olan tuz bataklığının doğal yenilenmesini teşvik etmeye yardımcı olmaktadır.

Multi-disiplin uzmanlarla birlikte çalışmak bakım/uyarlama, devre dışı bırakma/kaldırma dâhil olmak üzere yaşanan hidrolik yapılarla başa çıkmak için istenen yolların değerlendirilmesinde oldukça önemlidir. Yaşlanan su altyapı sorunu, güvenlik düzenlemelerini uygulama konusunda sınırlı kapasiteye sahip ülkeler ile önceliğin siyasi kararların uzun vadeli güvenlikten daha çok kısa vadeli düzeltmelere verildiği ülkelerde daha kritik bir hale gelmektedir. Hidrolik yapı mühendisleri, diğerleriyle birlikte, belirli bir altyapı unsuruna duyulan ihtiyacın dürüst bir değerlendirmesini yapmalı ve devre dışı bırakma/kaldırma için en iyi uygulamaları ve dikkatli değerlendirmeyi sunmalıdır (Habel vd., 2020). Geçtiğimiz yüzyıldan alınan dersler akılda tutularak, hidrolik yapı mühendisleri geçmiş projelerde yapılan ve çevre ve yerel topluluklar üzerinde zararlı etkilere yol açan hataları kabul etme, anlama ve iyileştirme cesaretine de sahip olmalıdır. Örneğin, artık ihtiyaç duyulmayan (veya çevresel ve sosyal faydaların barajı koruma ihtiyacından daha ağır bastığı) yaşanan bir baraj, toplumsal ve su mühendisliğiyle ilgili tüm yönleri iyice düşünülerek devre dışı bırakılmalıdır.

Büyük ölçekli su altyapısı genellikle büyük miktarlarda beton kullanır ve bu da sera gazı emisyonlarına katkıda bulunur. Hidrolik yapılar güvenliklerini korumak için yeterli ağırlığa ihtiyaç duyarken, malzeme bilimleri ve yapı mühendisliği alanındaki meslektaşlar ile aktif işbirliği yaparak daha az karbon yoğunluklu beton alternatifleri düşünülmelidir. Etkin örnekler arasında betonda geri dönüştürülmüş atık bileşenlerinin veya daha çevre dostu bileşenlerin kullanımı yer almaktadır (Monteiro vd. 2017). Bir proje yaşam döngüsünün sonunda %100 geri dönüştürülebilen malzemelere öncelik verilmelidir. Örneğin, geri dönüştürülebilir olan paslanmaz çelik, bazı yakın tarihli baraj projelerinde kullanılmıştır (Epicum vd. 2017).

Hidrolik yapı mühendislerinin tam inovasyon potansiyelini ortaya çıkarmak için endüstri, yerel yönetim ve araştırmacılar arasında gelişmiş etkileşim ve iş birliğine ihtiyaç vardır. Mevcut engeller güvenlik hususları ve endüstri verilerine erişimden kaynaklanmaktadır. Prototip gözlem ve verileri genellikle baraj tasarımcıları ve uygulayıcılar için mevcuttur, ancak bu tür veriler rekabet avantajını kaybetme veya bazı hidrolik yapıların potansiyel zayıflıklarını ortaya çıkarma korkusuyla araştırma topluluklarıyla nadiren paylaşılmaktadır. Bu tür hassas verileri kullanılabilir hale getirmek, tam ölçekli yapıların performansına

dayalı akış süreçlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacak ve önemli hidrolik yapı inovasyonlarını kolaylaştıracaktır.

3.1.6. Yenilikler

Daha sürdürülebilir işlevsellikleri destekleyen ve mevcut önemli küresel su zorluklarından bazılarını ele alan yaratıcı ve yenilikçi çözümler benimsenmelidir. Sürdürülebilirliğin temel unsurlarının daha önceki tartışmasında belirtildiği gibi hidrolik yapı mühendisleri SKH'lere çeşitli şekillerde katkıda bulunabilir. En sürdürülebilir hidrolik yapı çözümlerine doğru bir bakış açısı değişimi hidrolik yapı araştırmacıları ve uygulayıcılar için yenilikçi teşvikler sağlayacaktır. Bu tür yeniliklere bir örnek, yapıların yenilenmesinde doğrusal olmayan barajların artan kullanımınıdır. Bu yenilik, deşarj kapasitesini artırmakta ve gelecekteki hidrolojik yükleri karşılamak için gerekli olacak önemli yapısal değişikliklerden kaçınmaya yardımcı olmaktadır.

3.1.7. Teknolojik İlerlemeler

Son otuz yılda teknoloji ve dijitalleşmede hızlı gelişmeler yaşandı (Valero vd., 2021) ve hidrolik yapıların tasarımı, inşası ve işletimi için yeni fırsatlar sağlandı. Uydu veya İnsansız Hava Araçları (İHA) aracılığıyla uzaktan algılama gibi mevcutta var olan teknolojik çözümler, hidrolik yapıların işletme performansını izleme ve değerlendirme şeklimizi değiştirmektedir. Su şebekeleri ve iletim altyapısına yerleştirilen yüksek seviyeli algılayıcılar, hidrolik altyapının işletmesi için yeni güvenlik değerlendirme seviyeleri ve eyleme geçirilebilir içgörüler sağlamak için kullanılmaktadır. Nesnelerin İnterneti ve Yapay Zeka sistemlerine entegre edilen bu teknoloji ilerlemeleri (Savic, 2019), maliyeti düşürdüğü ve mevcut yapıların etkili bir şekilde izlenmesini sağladığı ve gelecekteki yapıların planlanması ve tasarımı için önemli arka plan verileri sağladığı için hidrolik yapı mühendisleri tarafından benimsenmelidir.

Teknolojik ilerleme ve yenilik, hidrolik yapıların sürdürülebilir gelişimi için önemli olmaya devam edecektir. Etkili araştırmaların bazı örnekleri arasında, sediment baypas tünellerinin verimliliğini belirlemek için Akustik Doppler Akım Profilleyici kullanımı, tam ölçekli yüksek Reynolds sayılı akışlarda faz algılamalı İntrüzif Enstrümantasyonun uygulanması (Hohermuth vd., 2021), hızlı fiziksel model geliştirme için 3B baskının iyileştirilmesi (Oertel ve Shen, 2022) ve hidrolik yapılarda karmaşık akışların davranışlarını tahmin etmek için çok fazlı modellemedeki ilerlemeler (Catucci vd., 2021) yer almaktadır. Araştırmadaki bu ilerlemeler, hidrolik yapıların geliştirilmesinde önemli fırsatlar sağlamakta, ancak hidro-makine, arıtma, sedimantoloji, doğa tabanlı çözümler ve su yönetim sistemlerinin dijitalleştirilmesi (Erpicum vd., 2021) dâhil olmak üzere birçok uygulamada saha verilerine büyük ihtiyaç duyulmaktadır.

Su mühendislerinin (uygulayıcılar ve araştırmacılar) SKH çalışmalarıyla nasıl ilişkili olduğunun farkında olmaları, daha iyi ilerleme ve faaliyetlerini teşvik etmelidir. Altı tematik uygulama alanının tartışılmasının amacı toplulukta sürdürülebilir kalkınmada hidrolik yapı mühendisliğinin rolü hakkında farkındalık yaratmaktır. Ayrıca, her uygulama alanının bağımsız olmadığını ve diğer uygulama alanlarıyla geniş ölçüde örtüştüğünü belirtmek önemlidir. Örneğin, çevresel restorasyon ve koruma, barajlar, taşkın/kıyı savunması, sanitasyon vb. ‘deki etkiler ve hedeflerle örtüşürken, teknolojik gelişme tüm temalarla örtüşmektedir. Ancak, toplum, çevre ve ekonomi unsurlarının hedefleri büyük ölçüde değişebilen tüm tematik alanlarda mevcut olduğu göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle, güçlü bir sürdürülebilir kalkınmayı yürürlüğe koymak için bu hedefler iyi anlaşılmalı ve gelecekteki projelerde üçayağın kapsayıcı ve pratik bir dengesi sağlanmalıdır.

Hidrolik yapı mühendisliğindeki ilerlemeyi hızlandırmak için sürekli ele alınması gereken temel zorluklar hala mevcut olup, bazı temel örnekler aşağıda verilmektedir;

- Zorlukların ele alınmasında, özellikle politikacılar, kamu görevlileri, yükleniciler ve akademisyenler arasındaki çeşitli disiplinler arası ortaklıklara artan bir ihtiyaç vardır,
- Doğal ve iklimle ilgili afetlerin artmaya devam edeceği öngörülmektedir. Hidroloji, veri analizi, akışkan dinamiği ve inşaatı kapsayan deneyim göz önüne alındığında, hidrolik yapılar topluluğunun, uyum, azaltma ve dayanıklılık önlemleriyle gelecek yıllarda bu kritik zorlukları ele almak için çözümler geliştirmede sunabileceği çok şey vardır,
- Hidrolik yapılar topluluğu, küresel karbonsuzlaştırma çabalarına yönelik rolünü daha da ileriye taşıyabilir. Örneğin, kalan uygulanabilir hidroelektrik projeleri, fosil yakıtlardan elde edilen elektriğin yerini önemli ölçüde alabilir (Schleiss, 2017; Koç, 2015). Ancak bu tür projeler, çevre ve toplum üzerindeki etkileri bütünsel olarak değerlendirmek ve ölçmek için bir tarama sürecinden geçirilmeli ve faydaların olumsuz etkilere göre yeterince ağır basıp basmadığı belirlenmelidir (Felder vd., 2021). Hidrolik altyapının enerji verimliliği, gelecekteki gelişmelerde düşük karbonlu malzemelerin ve inşaat yöntemlerinin entegrasyonu ile birlikte önemli bir katkı sağlayabilir.

Hidrolik yapı mühendisliğindeki mevcut uygulamaları değiştirmedeki zorluklar, akademi, hükümet ve endüstrideki profesyoneller arasında eğitim, iletişim ve daha iyi etkileşim yoluyla ele alınmalıdır.

3.2. Hidrolik yapı mühendisliğinde tartışmalar ve zorluklar

Sürdürülebilir hidrolik yapı mühendisliğinin yukarıdaki temel unsurlarından, bu disiplinin SKH'lere katkıda bulunması için geniş bir kapsam ve fırsata sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, mühendislik içindeki mevcut uygulamaları değiştirmenin zorlu olacağı da açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, bu zorluklar gerçekten de akademi, hükümet ve endüstrideki profesyoneller arasında eğitim, iletişim ve daha iyi etkileşim yoluyla çözümlenmelidir. Sürdürülebilir hidrolik yapı mühendisliğinin temel unsurlarına yönelik kritik zorluklardan bazıları burada ayrıntılı olarak ele alınmakta ve potansiyel çözümlere ilişkin bir tartışma ve bakış açısı sunulmaktadır.

3.2.1. Parasal Kısıtlamalar

Su altyapısının planlanması ve inşasında mevcut uygulama önemli sermaye maliyetlerinin dikkate alınmasını içermektedir. Sürdürülebilirlik çoğunlukla kabul edilse de geçmiş uygulamalarda, projeler için en düşük teklif genellikle ihaleyi kazanmıştır. Sürdürülebilir bir hidrolik yapı gerçekten pahalı olabilir, ancak tanımı gereği, tüm gizli toplam yaşam döngüsü maliyetleri dikkate alındığında uzun vadede genellikle en uygun fiyatlı olabilir. Daha düşük işletme ve bakım maliyetleri, çevresel etki ve maksimum güvenlik sunan bir teklif, hem sermaye hem de 50-100 yıllık bir yaşam döngüsü (veya daha uzun) boyunca işletme masrafları dikkate alındığında en uygun teklif olarak ortaya çıkabilir. Ayrıca, mevcut uygulamalar genellikle projelerin karbon ve ekolojik ayak izlerini (Wackernagel ve Rees, 1998) ve diğer çevresel etkileri hesaba katmamaktadır. Bu etkilerin bir altyapı projesinin tüm yaşam döngüsü boyunca niceliksel olarak ölçülmesi ve parasal olarak değerlendirilmesi, planlama aşamalarında en sürdürülebilir çözümün dikkate alınması için ek teşvikler sağlayacaktır. Bu eylem, SKH'lerle en uyumlu hidrolik yapının en maliyet etkin çözüm olabileceği anlamına gelmektedir. Olumsuz çevresel etkilerin parasal olarak değerlendirilmesi (karbon dengeleme veya emisyon ticareti planları) iklim değişikliğine karşı koymada önemli bir araçtır. Bu planların, iklim değişikliğinin etkileriyle mücadele etmek için genişletilmesi ve güçlendirilmesi gerekmektedir.

3.2.2. Düşük ve Orta Gelirli Ülkeler

Bazı ülkelerde ulaşım rotaları, temiz su temini için çok amaçlı barajlar, yağmur suyu ve atık su sistemleri gibi önemli su altyapı sistemleri olmasına karşın, mevcut durumda nüfusun tüm katmanlarına ulaşan sanitasyon veya su temini için yeterli su altyapısına sahip değildir. SKH'lerine ulaşmanın en büyük etkisi bu ülkelerde olacaktır, ancak en büyük zorluklar da burada mevcut olabilir. Örneğin, Hindistan'ın atık suyunun yalnızca yaklaşık %33'ü arıtılmakta, bir tahmine göre 257 milyar ABD doları tutarında bir su altyapısı finansman açığı bulunmaktadır (Nikore ve Mittal, 2021). Hindistan genelinde yaklaşık 1000

arıtma tesisi mevcut olduğundan önemli kentsel drenaj sistemleri ve hidrolik altyapı gerektiren arıtma kapasitesine ihtiyaç bulunmaktadır. Uygulanabilir merkezi olmayan alternatifler mevcut olana kadar bunların kentsel alanlarda merkezileştirilmesi gerekmektedir. Benzer gereklilikler dünyanın birçok yerinde de mevcut olup sadece atık su sistemleriyle sınırlı değil, aynı zamanda su temini, taşkın azaltma, drenaj ve ulaşım gibi su altyapısının diğer tüm alanlarında da bulunmaktadır. SKH'lerin merkezi bir unsuru, su altyapısının sürdürülebilir, ancak aynı zamanda finansal olarak uygun fiyatlı olarak nasıl geliştirileceği ve inşa edileceği zorluğudur. Bağışçı teşvikleri ve finansman mekanizmaları, sanayileşmiş ülkelerin aktif olarak dâhil olması gereken sürdürülebilirliğe ulaşmak için potansiyel çözümler olarak görülmektedir.

3.2.3.Siyasi Kararlar

Karar vericiler, su güvenliği, biyolojik çeşitliliğin kaybı ve iklim değişikliği gibi acil sorunları ele almak için yerel, ulusal ve küresel düzeyde politik çerçevesini belirlemektedir. Birleşmiş Milletler ve ilgili kuruluşlar gibi küresel örgütler, genel hedefleri belirleme ve siyasi söylemi yönlendirmede önemli bir rol oynarken, ulusal ve yerel hükümetler ise gerçek, yerinde faaliyetlerden sorumludur. Küresel faaliyetlerin olumlu örnekleri, SKH'ler ve iklim değişikliği toplantıları ve anlaşmaları olup bu konuda daha fazla eyleme ihtiyaç vardır. Ancak, ulusal hükümetlerin taahhütlerini yerine getirmek için bağlayıcı gereklilikleri bulunmamaktadır. Siyasi söylem ve bunun sonucunda ortaya çıkan diplomatik baskı taahhütlerini yerine getirmeye teşvik etmek için genellikle en umut verici, ancak bağlayıcı olmayan yaklaşımlardır. Ulusal düzeydeki siyasi kararlar, iklim değişikliği hedefleri, karbon fiyatlarının belirlenmesi veya daha düşük emisyonları ve iyileştirilmiş su kalitesini hedefleyen diğer faaliyetler hakkındaki kararlar gibi eylem ihtiyacına doğrudan yanıt vermektedir. Hidrolik yapılar alanında, bu tür kararlar düşük emisyonlu bir gelecek için çok önemli olacak yeni pompalı depolama hidroelektrik santral tasarımlarını geliştirme taahhüdünü içerebilir.

Diğer kararlar, gereksiz hale gelen barajların devre dışı bırakılmasını veya ekosistem yönetiminde iyileştirmeler yapılmasını içermektedir. Ancak, siyasi partilerin iktidarda dönüşümlü olarak yer aldığı ve parasal kısıtlamaların baskın olduğu durumlarda, diğer toplumsal ihtiyaçların (ulaşım, iletişim) sudan daha öncelikli olduğu kararları verilebilir. Bununla birlikte, su altyapısı, tüm insanlar için temiz suya ve sanitasyona güvenli erişimin temel olması nedeniyle stratejik altyapının en önemli unsurlarından biri olmaya devam etmektedir. SKH'ler, toplumları ve siyasi liderleri çeşitli örneklerde ortaya konduğu gibi sürdürülebilir hidrolik yapı mühendisliğinin gelecek yıllarda oynayacağı temel rolü anlamada bir araya getirebilecek umut verici bir ortak şemsiyedir. Su altyapısı, tüm

insanların temiz suya ve sanitoryona güvenli erişiminin temeli olması nedeniyle stratejik altyapının en önemli unsurlarından biri olmaya devam etmektedir.

4. Hidrolik Yapı Mühendisliğinde Altyapının Uyarlanabilir Yönetimi

Uyarlamanın iki boyutu vardır; ilki, devam eden bir yönetim yaklaşımının parçası olarak kolayca uygulanabilen ve mevcut su yönetim sistemlerinin dayanıklılığını ve sağlamlığını artırmaya hizmet edecek çok sayıda değişiklik, diğeri ise, yeni hidrolik altyapı için gelecekte oldukça belirsiz iklim senaryolarına uyum sağlamak için gerekli temel tasarım değişiklikleridir. Mevcut su altyapısındaki işletme değişiklikleri ve su hizmetine yönelik talep ve süreçlerdeki değişikliklerle ilişkilendirilip geleneksel yöntemler kullanılarak nispeten kolayca gerçekleştirilebilecek çok sayıda uyarlanabilir yönetim işlevi vardır. Etki, iklim değişikliğine karşı en savunmasız olan insan yerleşimleri ve gıda güvenliği için kritik iki alanda (tarımsal sulama ve taşkın yatağı yönetimi ve taşkın tehlikesi/hasarının azaltılması) olacaktır. Taşkın ve kuraklık sıklıkları temel bilgisine bağlı olan işlevler (yeni uzun ömürlü hidrolik yapıların planlanması için hidrolik ve hidrolojik tasarım kriterlerindeki değişikliklerin temeli oldukça belirsiz iklim değişikliği senaryolarının bir unsuru olarak) tüm dünyadaki uygulayıcılar arasında önemli bir araştırma ve iş birliği yatırımı için bir uyum yaklaşımı gereksinim duyacaktır. Uyarlanabilir yönetim, “yönetim eylemlerinden ve diğer olaylardan elde edilen sonuçlar daha iyi anlaşıldıkça belirsizlikler karşısında ayarlanabilen esnek karar almayı teşvik eden” bir karar sürecidir (NRC, 2004). İklim değişikliğine uyum, uyarlanabilir yönetimin yalnızca yakın bir akrabası olup toplumlarımızda, ekonomilerimizde ve teknolojilerimizde giderek artan değişikliklerle başa çıkmaya çalışan sürekli bir esnek uyum sürecidir. Uyarlanabilir yönetim, mevcut altyapıda işletme esaslı ayarlamalar için gereken acil çabaların çoğuna (süreçlerdeki ve taleplerdeki değişikliklere ve mevcut altyapının bakım ve onarımına - nehir havzalarının taşkın yataklarındaki sulama sistemleri ve taşkın riski yönetimine) mükemmel şekilde uygundur. Bunlar, mevcut sistemlerin kırılganlıklarını azaltarak, üretkenliği ve su kullanım verimliliğini artırarak ve taşkın hasar kayıplarını azaltarak iklim değişikliğine uyumda en büyük ve en acil getirileri sağlayan iki su yönetimi sektörüdür. Ancak, uyarlanabilir yönetimin başarılı olması için gerekli ön koşul, uygulanan değişiklikleri izlemek, uygulanabilirliğini ve performansını test etmek için gerekli bilgileri toplayacak iyi konumlandırılmış bir izleme ağını kurmaktır. Bu başarılırsa gerekli ayarlamalar ve düzenlemeler zamanında yapılabilir. Taşkın sigortası veya ürün sigortası planları, sedde sertifikasyonu ve taşkın dönemlerinde rezervuarlar için yeni işletme kuralları ile birleştirilen yeni taşkın yatağı bölgelerinin kurulması, bir izleme ağı ve bilgi geri bildirimiyle geliştirilecek modüller veya tedrici uyarlamanın bir örneğidir. Uyarlanabilir yönetim stratejilerinin başarısının diğeri bir kritik yönü, bu

yaklaşımı oluşturan artımlı ve gerçekte deneysel programların bir parçası olarak tanıtılacak değişikliklerin sosyal kabul görmesidir. Bilgilendirilmiş, fikir birliğine dayalı karar alma ve kamu katılımı, mevcut duruma değişiklikler getirmenin merkezinde yer almaktadır. Bu planlama süreçlerinde paydaş katılımı esas olup, rekabet eden çıkar grupları arasında kolaylaştırılmış tartışmalar ve çatışma çözümü için iyi düşünülmüş ve devamlılığı olan bir süreç, iklim değişikliğine yanıt olarak öngörülen değişiklikler için yaşamsal bir öneme sahiptir.

İklimle uyumun temeli, mevcut hidrolik altyapıyı planlamak, tasarlamak, işletmek ve sürdürmek için günümüzde kullanılan hidrolojik yöntemlerde yatmaktadır. Bu nedenle, su kaynakları sektörü, gelişen dünyada bu yöntemleri uygulama kapasitesi ve kabiliyeti eksik olmasına karşın, iklim değişikliğine yanıt vermek için çoğundan daha iyi hazırlanmıştır. Tipik olarak doğası gereği belirsiz bir su yönetim sistemine eklenen tek yeni boyut iklim değişikliği etkilerinin ve hidrolojik uçların etkisinin eklenen belirsizliğidir. 20, 50 ve 100 yıl sonrasına ait uzun vadeli iklim tahminleri, planlamacıların, tasarımcıların ve su sistemi operatörlerinin çağdaş ihtiyaçlarına uygun değildir. Bugün ihtiyaç duyulan 30, 60 ve 90 günlük hidrolojik değişkenliğin daha güvenilir kısa vadeli, yıllık tahminlerini sağlayabilen yöntemlerdir. Ancak, tüm su yönetiminin temelleri olan iklim belirsizliği altında hidrolojiyi analiz etmek için yeni pratik teknikler geliştirmede (rezervuar işletmeleri, su tahsisi, risk ve güvenilirlik analizi, su altyapısı tasarımı, taşkın sigortası ve taşkın yatağı yönetimi) çok az ilerleme kaydedildi. Herhangi bir su yönetim kuruluşunun temel görevi, müşterilerini iklim değişkenliğinin uç noktalarından ve belirsizliklerinden korumaktır. İklim değişikliği, çok az işlevsel aracımız olan belirsizliğin başka bir boyutunu daha ekler. Dünya çapındaki su yönetim kuruluşlarının iklim değişikliği etkilerinin pratik sonuçlarıyla ilgilenmesi ve bu eğilimlerin yoğunlaşmasının beklendiği çeşitli senaryoları öngören mantıklı stratejiler geliştirmek için ulusal, federal ve eyalet kuruluşları arasında iş birliği yapılması son derece önemlidir. Tarihsel iklim değişkenliğinin sınırları içinde bile karmaşıklığı kaçınılmaz olarak küresel ısınma ile birleşecek olan temel soruları çevreleyen zor kararlar bulunmaktadır. Herhangi bir bölge veya konumda, planlamacılar ve tasarımcılar aşağıdakileri belirlemek zorundadır (Eugene ve Robert, 2009).

- Bir sedde ne kadar yükseklikte olmalı ve arkasında yaşayan ve çalışanlar için risk nedir?
- 100 yıllık bir taşkın yatağı nasıl karakterize edilir ve tanımlanır?
- Giderek belirsizleşen bir bahar akışını karşılamak için bir rezervuar nasıl uyarlanabilir bir şekilde yönetilir? Bir rezervuardaki depolama hacmi, gelecekteki sulamaya ve diğer rekabet eden gelecekteki ihtiyaçlara ne kadar ayrılmalıdır?

- Akış frekansları değişmiş veya değişme sürecinde olan taşkın azaltma yapılarını 'yeniden sertifikalandırmak' için hangi kriterler kullanılmalıdır?
- Yaşam döngüsü altyapı yönetimi ve performansına ilişkin çağdaş fikirlerimiz, iklim değişikliğine ilişkin gelişen bilimsel anlayışımıza nasıl uyum sağlamalıdır?

Su kaynakları yönetimi aşırılıkların (taşkınlar ve kuraklıklar) nasıl tanımlandığı ve toplum için riskleri azaltma yöntemleriyle sınırlıdır. Tüm büyük altyapılar, tasarım, taşkın sigortası oranları, ürün sigortası, kasırgaların vb. belirlenmesi için olasılık temel olarak aşırı olayların tarihsel anlamda ne olduğuna ilişkin bir tahmini gerektirir. Birçok durumda deneyimlediğimiz aşırılıklar ve değişimler hala doğal iklim değişkenliğinin 'normları' içinde kalmış ve mevcut su kaynakları altyapımız bu büyüklükteki değişkenliği barındıracak şekilde tasarlanmıştır. İklim değişikliği modelleme topluluğu, iklim araçlarında ve eğilimlerinde bir değişim 'sinyalleri' olduğuna ikna olmuştur. Hazırlık eylemi olarak, işletme kuruluşları ve bilim topluluğu, araştırmacılarını, planlamacılarını ve rezervuar operatörlerini diğer kuruluşların araştırmacıları, planlamacıları ve rezervuar operatörleriyle bir araya getirerek bu değişikliklerin doğasını daha iyi anlamaya ve planlamacıların ve operatörlerin bu değişen eğilimlerin üstesinden gelmesine yardımcı olabilecek yöntemler geliştirmeye başlamalıdır. Günümüzde planlanan su kaynakları kamusal çalışmaları, gelecekteki aşırı olaylara karşı sağlam ve dayanıklı olmalı ve küresel ısınma nedeniyle bunların tekrarlanma sıklığı ve/veya büyüklüğünde ek bir belirsizlik derecesiyle tasarlanmalıdır. Bugün yönettiğimiz altyapı kayıtları korunmalı ve belki daha sonra bu belirsizlikleri ele almak için ekstra bir güvenlik, dayanıklılık ve güvenilirlik derecesi sağlamak üzere yükseltilmelidir. İklim değişikliğine uyum sağlamada başarılı olmak istiyorsak, su altyapımızı planlamak, tasarlamak ve işletmek için bir 'bakış açısı değişimine' ve yeni bir araç ve teknik sınıfına ihtiyacımız vardır. Su yönetimi kararlarının çoğu yerel proje düzeyinde alınsa da, iklim belirsizliğini ele alabilen oldukça özel tasarım standartları ve modelleri gerektirse de, bu çabanın havza ve nehir havzası planlama ve değerlendirme konularıyla (sınır aşan su tahsisleri) ilgilenen önemli bir yönü bulunmaktadır. Bu bölgesel analiz düzeyi, deşarjlar, olası maksimum taşkınlar, olası maksimum yağış, taşkın ve kuraklık sıklıkları, taşkın yatağı yönetimi, su temini ve sulama için verim güvenilirliği hesaplamaları açısından bölgesel değişikliklerin muhtemel aralığını belirleyecek daha üst düzeyde bir hidro-klimatik analiz gerektirmektedir. Bu analiz düzeyi Entegre Su Kaynakları Yönetiminin bir parçası olarak önemlidir. Bu şekilde, havza ve yerel düzeylerde alınan tüm yardımcı kararlar, karmaşık bir nehir havzası sistemindeki rezervuar işletmesiyle birlikte alternatiflerin planlanması ve değerlendirilmesi için aynı temel çizgiyi kullanır.

Örneğin, Amerika Mühendisler Birliği, Katrina büyüklüğünde V. kategori kasırgaların, bizim 'normal' iklim değişkenliği olarak düşündüğümüz sınırlar içinde bile öngörüldüğünü uzun zamandır bilmekteydi, ancak hiç kimse bu tür olayların sıklığını tahmin edemezdi ve daha da zor olanı, büyüklüğün ve sıklığın farklı iklim değişikliği senaryoları altında nasıl değişeceğidir. Toplum ve mühendislik mesleği, tarihsel deneyim, yasalar, mühendislik uygulamaları ve yönetmelikler birikimi yoluyla, uyum sağlamayı seçtiği daha dar bir kabul edilebilir 'beklenen' olay aralığı tanımlamıştır. Bu nedenle, taşkın sigortası amaçları için 100 yıllık taşkın yatağımız, kentsel drenaj sistemlerimizi daha küçük, ancak daha sık olaylar için tasarlıyoruz, yaklaşık 10.000 yıllık bir tekrar periyoduna sahip çok düşük olasılıklı taşkınlar için dolusavak tasarımları yaparak baraj güvenliğini sağlamaktayız. Bunlar, karşılanabilirlik, göreceli nüfus kırılğanlığı, ulusal ve bölgesel ekonomik faydalar dâhil olmak üzere birçok faktöre dayanılarak yapılan toplumsal yargılardır. Bunlar, ampirik (deneysel) veya simülasyon modellemesine dayanarak yapılan belirlenmiş kriterler değildir. İklim değişikliğine uyumu amaçlayan resmi bir sistematik yaklaşım, Entegre Su Kaynakları Yönetimiyle birleştirildiğinde ideal bir amaç olmasına karşın, bir ülkedeki herhangi bir büyük olay (büyük hasar verici taşkın, kuraklık veya altyapı arızası) iklim değişikliğini sistematik uyarlanabilir yönetim temeline yaklaştırmak için su yönetiminde yapılan bir dizi organize değişiklik için katalizör görevi görebilir.

Toplumlar çağdaş ve öngörülebilir su yönetimi ihtiyaçlarının üstesinden gelemiyorsa, büyük bir olasılıkla son derece belirsiz olan iklim değişikliği sonuçlarıyla da başa çıkamayacaklardır. Çağdaş uyum, iklim değişikliği belirsizliğiyle başa çıkmak için gerekli bir ön koşuldur. Uyum, mevcut geleneksel yöntemler, araçlar ve kaynaklarla etkili bir şekilde başlayabilir. Çoğu sistem, mevcut yöntemleri, uygulamaları ve süreçleri yeniden düşünerek ve yeniden düzenleyerek oldukça fazla uyarlanabilir verimlilik elde edebilir. İklim değişikliği ve değişkenlik daha aşırı hale geldikçe, daha yeni, daha yenilikçi teknolojiler, ekonomik teşvikler ve finansal araçlar ve kurumsal düzenlemeler getirilmelidir. Su yöneticilerinin iklim değişikliğine uyum sağlamalarının beş yolu vardır, Bunlar;

1. Yeni yatırımlar veya kapasite artırımı planlamak (rezervuarlar, sulama sistemleri, seddeler, su temini, atık su arıtma),
2. Yeni kullanımlara veya koşullara uyum sağlamak için mevcut sistemlerin işletilmesi, izlenmesi ve düzenlenmesi (ekoloji, iklim değişikliği, nüfus artışı),
3. Mevcut sistemlerin bakımı ve büyük onarımı (barajlar, bentler, sulama sistemleri, kanallar, pompalar, vb.),

4. Mevcut sistemler ve su kullanıcıları için süreçlerde ve taleplerde değişiklikler (su tasarrufu, fiyatlandırma, düzenleme, mevzuat),

5. Yeni verimli teknolojilerin tanıtılması (tuz giderme, biyoteknoloji, damla sulama, atık suyun yeniden kullanımı, geri dönüşüm, güneş enerjisi).

4.1. İzleme Sistemleri

Uzun vadeli izleme ağları, iklim değişikliği ve etkilerini tespit etmek ve ölçmek için son derece önemlidir. Uyum stratejilerinin ve eylemlerinin etkinliği (uyarlanabilir yönetim), uzayda, atmosferde, okyanuslarda ve dünyanın yüzeyinde konuşlandırılmış sensörleri kapsayan bu ağlar tarafından sağlanan bilgilere dayalı olarak sürekli geri bildirim ve ayarlamalar gerektirir. Su yönetimine yararlı olması için izleme ağlarının önemli bir kısmının su yöneticileriyle ilgili yerlere yerleştirilmesi gerekmektedir (belediye su temini için önemli olan havzalarda veya özellikle hidrolojik olarak hassas alanlarda). İzleme ağları, hidrolojik eğilim analizi ve tahmin yöntemlerinin doğruluğunda gerekli iyileştirmeleri yapmak için önemlidir. Yağış ve akış eğilimlerindeki istatistiksel değişimleri tespit etmek mevcut su kaynakları sistemlerinin yönetimi ve yeni sistemlerin tasarımı için çok önemlidir. Genel Dolaşım Modeli projeksiyonlarının durumu gözlemlerle önemli ölçüde tutarsızdır. Bu nedenle, su yönetimi ihtiyaçları için güvenilir bilgi olarak kullanılamaz (ne mevcut operasyonel ihtiyaçlar ne de gelecekteki altyapının tasarımı) (Brekke vd., 2009; Bayazıt ve Koç, 2020).

4.2. İşletme Değişiklikleri

İşletme değişiklikleri, doğal olarak, tüm tasarlanmış ve gerçekleşmiş kullanımlar için mevcut su kaynakları dağıtım sistemlerinin yararını ve performansını iyileştirmeye yöneliktir. ABD'deki çoğu rezervuar, yeni ve genişletilmiş hidrolojik kayıtların bir parçası olarak veya yeni kullanımlar ve amaçlar eklendikçe (rekreasyon, çevresel akışlar, nesli tükenmekte olan türlerin korunması vb.) işletim kuralları periyodik incelemelerden geçmektedir (Koç, 2025). Bunlar, sistemin genel dayanıklılığını, sağlamlığını ve güvenilirliğini artırabilecek yeni bilgilere dayanarak kuraklık ve taşkın acil durum planlarını güncelleme fırsatları sunmaktadır. Bu revizyonlar, en yüksek taşkın dönemlerindeki değişiklikleri, kar erime zamanlamasını veya taşkın ve kuraklık sıklığı analizlerinin yeni yöntemlere ve genişletilmiş verilere dayalı olarak güncellenmesini ve işletim sisteminin sağlamlığını test ederek Bilgisayar destekli Dolaşım Modelleri 'ne dayalı senaryoları dikkate alabilir. El Niño olasılıklarıyla olası akış tahminleri gibi yeni risk tabanlı tahmin yöntemleri ve karar kriterlerinin tanıtılmasıyla işletme esnekliği artırılabilir. Tahmin yöntemlerinin güvenilirliği artırılabilirse, daha iyi tahminler çoğu rezervuarda su dağıtımını ve hidroelektrik üretimini artırabilir. Daha sofistike bir su yönetim stratejisinin parçası olarak

yeraltı suyu ve yüzey suyunun birlikte kullanımı, uyarlanabilir bir yönetim planıyla (izleme, geri bildirim ve işletme kurallarına uyum) ilişkilendirilen oldukça geleneksel yöntem ve tekniklerle artık uygulanabilen işletme değişikliklerin bir başka yönüdür.

4.3. Hassasiyet Değerlendirmesi

Hidrolojik akış hassasiyetinin iklim değişikliğine karşı duyarlılığını, iklim değişikliğinin bir sonucu olarak su yönetimi hassasiyetinden ve toplumsal olarak ekonomik kesintilere ve yerinden edilmelere karşı duyarlılıktan ayırmak faydalıdır. Hashimoto vd. (1982) su kaynakları sistemi performans değerlendirmesinde içsel olan risk ve belirsizliği hesaba katmak için bir taksonomi sunmuştur. Aşağıda sunulan beş sözcük, daha geleneksel mühendislik güvenilirlik analizinin temel bileşenlerini karakterize etmekte ve genişleten bir dizi tanımlayıcıyı temsil etmektedir. Stratejik belirsizliğin bazı yönleri de dâhil olmak üzere belirsizlik hususlarına ilişkin parametrelerin ve karar değişkenlerinin hassasiyetine odaklanırlar. Sözcükler aşağıda verilmekte olup, Bunlar;

Güvenilirlik - bir sistemin ne sıklıkla başarısız olma olasılığının bir ölçüsü,

Sağlamlık - bir sistemin belirsiz koşullar altında ekonomik performansı,

Dayanıklılık - bir sistemin başarısızlıktan (taşkın, kuraklık) ne kadar çabuk kurtulduğu,

Hassasiyet - başarısızlığın sonuçlarının ne kadar ciddi olabileceği,

Kırılganlık - belirsiz bir geleceğe ilişkin öngörülemeyen koşulları karşılayacak en iyi çözümlerin bulunamaması,

Bu nedenle, bir su kaynakları sisteminin göreceli kırılganlığı, hidrolojik hassasiyetin (yönetilen sisteme girdi olarak) ve bir su yönetim sisteminin toplumun ihtiyaç duyduğu hizmetlerin sunumunu etkilemesi nedeniyle göreceli performansının (sağlamlık) bir fonksiyonudur. Bu, daha çok, iklim değişikliğinin çeşitli senaryolarına göre sayısallaştırılabilen teknik olarak tanımlanmış bir yönetim fonksiyonudur. Diğer yandan, iklim değişikliğine karşı toplumsal duyarlılık, arazi kullanım düzenlemeleri, su kaynaklarının uygun şekilde tahsisi ve su kullanımlarıyla ilgili nüfus artışı ve ekonomik politikalar gibi su yöneticilerinin kontrolü dışındaki çok sayıda faktöre bağlıdır. Entegre bir su yönetim kabiliyeti olmadan, toplum nüfus kaynaklı su taleplerindeki artışlara ve iklim değişikliği değişkenliğine karşı giderek daha duyarlı hale gelmektedir. Başka bir deyişle, duyarlılık ve kırılganlık, artan hidrolojik değişkenlik nedeniyle değil, daha çok bu kaynakları yönetmek için gereken yetersiz kurumsal altyapının bir fonksiyonu olarak artmaktadır. Birçok durumda, gelişmekte olan ülkelerin sağlam su yönetimi uygulamalarını gerçekleştirmek için kurumsal kapasitelerini

yükseltmek iklim değışikliğınden kaynaklanan kırılganlığı azaltmanın en etkili yoludur. Bu süreçler aşağıda verilmekte olup, Bunlar;

- Aşırıliklar ve beklenmedik durumlarla başa çıkmak için mevcut yasaları, genelgeleri, tüzükleri, politikaları ve düzenlemeleri değerlendirin - kimin ne için yetkisi ve sorumluluğı var?
- İklim adaptasyonu planlamasından kim sorumludur?
- Mevcut su altyapısını kim işletiyor ve bakımını yapıyor? Kapasitesi dolu mu? Tahmini ihtiyaçları karşılayabilir mi? Önümüzdeki 10-20 yıl içinde neye ihtiyaç var?
- Büyüme ve gelişmenin sosyo-ekonomik senaryolarını değerlendirin - gelecek nasıl görünüyor? Gelecekteki kaynak talepleri nasıl karşılanacak? Suyun rolü nedir?
- Mevcut iklim değışkenliğıne karşı kırılganlığı değerlendirin - taşkınlar ve kuraklıklar. Bu, gelecekteki iklim senaryoları ve 2050'deki büyüme altında nasıl değışecek?

4.4. Acil Durum Hazırlığı ve Müdahale

Sonuç olarak, geliştirilmesi gereken bir dizi hazırlık tedbiri, strateji ve planın gerçek uygulamasını hızlandırmak için siyasi irade ve önemli miktarda mali kaynak gerektirmektedir. Ancak yıkıcı bir kuraklık, taşkın, tayfun veya kasırga olsun, bir sonraki 'büyük olaya' hazırlıklı olmak gerekir. Acil durum hazırlığı ve müdahalesi, proaktif iklim adaptasyonunun hem 'öncü kenarı' hem de çekirdeğidir. Her baraj, sedde sistemi, su temin sistemi ve sulama sistemi, tasarım kriterlerinin (taşkın yolu, baraj arızası, sedde taşması vb.) veya sistemin kesin veriminin ötesindeki olaylarla başa çıkmak için bir acil durum müdahale planına sahip olmalıdır. Öngörülemeyen veya felaket niteliğindeki her olay, uyarlanabilir çözümlerin ve stratejilerin reformu ve uygulanması için bir fırsattır. Su yöneticileri, kendi kontrolleri altında olan ve doğası gereği teknik olarak uyarlanabilir yönetimin temel unsurlarını teşvik etmede öncülük etmeli ve daha proaktif olmalıdır. Bu, adaptasyon için temel başlangıç noktasıdır.

4.5. Teknolojik Gelişmeler

Teknolojik gelişime yapılan ve kısa sürede geri ödemesi beklenen yatırımlardan biri, mevcut su dağıtım sistemlerinin işleme ve yönetimini iyileştirecek ve su hakları ve diğer risk paylaşım programlarının ticareti için olanaklar açacak olan gelişmiş tahmin teknikleridir. Ancak tahmin, her nehir havzasında hidro-klimatik izleme sistemlerinin kurulması ve bakımının yanı sıra bilimsel araştırmalara çok daha fazla yatırım yapılmasını gerektirir. Genetik mühendisliği ve biyo-teknolojideki son gelişmelerin gıda güvenliği ve tarım

üzerinde büyük etkiye sahip olması tatlı su tedarikindeki bazı stresleri hafifletecektir. Geniş tuzlu yeraltı suyu rezervuarları belirli yem bitkileri için kullanılabilir. Füzyon enerjisindeki gelişmeler ve daha ucuz güneş enerjisi, kıyılardaki büyük kentsel alanlar için su tedarik sorunlarını hafifletecek ve tuzdan arındırmayı ekonomik olarak rekabetçi bir seçenek haline getirecektir. Daha ucuz güneş enerjisi, küçük köyler ve uzak kırsal alanlar için de aynısını yapacak, su temini için yeraltı suyu kaynaklarını ve hayvancılık için küçük çiftlik sulama suyunu kullanılabilir hale getirerek geçimliği çok daha kolay hale getirecek ve su arıtma ve sanitasyon maliyetlerini azaltacaktır. Bu teknolojik gelişmeler iklim değişikliğine uyum için oldukça önemlidir, ancak uygulanması için karmaşık kurumsal sistemler gerektirmez, tam olarak organize edilmiş bir 'Entegre Su Kaynakları Yönetimi' stratejisi ve kurumsal altyapı olmadan uygulanabilirler (Koç, 2015).

4.6. Geleceğe Giden Yol

İklim değişikliği çalışmalarının odak noktası, genel küresel etki değerlendirmesinden daha çok adaptasyon ve yanıt mekanizmalarına doğru kaymalı, zor kaynak yönetimi uzlaşmalarının sosyo-ekonomik ve politik boyutlarıyla ilgilenmelidir. Hiçbir bireysel su yönetimi kurumu ve bağlı araştırma enstitüsü, su yöneticilerinin ve tasarım mühendislerinin iklim değişikliğine uyum sağlamak için etkili bir şekilde kullanabilecekleri bir dizi yeni ilke ve araç geliştirme sorunuyla başa çıkamaz. Sorunlar çok karmaşıktır ve sorunlar tarımsal mühendislikten savak tasarımına kadar çok çeşitlidir. Küresel düzeyde, Dünya Bankası'ndan Küresel Su Ortaklığı'na kadar her kurum, sürdürülebilir kalkınma ve ESKY ile iç içe geçmiş benzer sorunlarla mücadele etmektedir.

Su yönetimi için pratik uygulama konularıyla rutin olarak ilgilenen birkaç seçkin su araştırma merkezi tarafından uluslararası koordineli ve işbirlikçi uygulamalı araştırma ve geliştirme çabası yürütülmelidir. Bu çabaya katılan araştırma kurumlarının, bu konuya akademik bir çalışma veya IPCC tipi bir çaba olarak yaklaşmak yerine, su yönetimi kurumlarının işletme sorunlarıyla ilişkilendirilmesi önemlidir. Su yöneticilerinin ve altyapı tasarımcılarının karşı karşıya olduğu sorunlar, doğası gereği geçişken olsalar da oldukça pragmatik yaklaşımlar ve araçlar gerektirmektedir. Geliştirilen yöntemlerin mümkün olduğunca yararlı olması, risk ve belirsizlik analizi için mevcut geleneksel yöntemlerden türetilmesi ve tipik bir kurumdaki orta düzey kariyer uygulayıcıları tarafından kullanılabilmesi önemlidir. Yöntemler tekdüzelik ve tutarlılık için çabalamalıdır.

Yeni su kaynakları yatırımlarını ve projelerini haklı çıkarmak için kullanılan yöntemlerde çok farklı ekonomik karar kriterleri içeren yeni bir 'paradigma değişimi' gerekmektedir. Yeni hidrolik altyapının planlanması ve tasarımı, sadece durağan olmayan bir iklimle başa çıkmak için yeni hidrolojik araçlar ve çok

belirsiz ve nitel iklim değışikliği senaryosu bilgilerini dâhil etmek için mekanizmalar değil, aynı zamanda bu bilgileri çok maliyetli seçenekler arasında karar verme temeli olarak özümseyebilen (sosyal, ekonomik, çevresel ve eşitlik açısından) yeni bir ekonomik karar çerçevesi de gerektirir. Mevcut ekonomik kriterler, katı fayda-masraf analizlerine veya iç karlılık oranını maksimize etmeye dayanmaktadır. İklim belirsizliğiyle başa çıkmak üzere tasarlanan altyapılar için yeni ekonomik değeriendirme ve karar kurallarının, risk-maliyet etkinliğini en üst düzeye çıkarma veya risk-maliyetini en aza indirme gibi farklı karar kurallarını uygulaması gerekiyor.

5. Hidrolik Yapı Mühendisliğinde Planlama ve Tasarım Hususları

Su kaynakları projelerinin planlanması, doğası gereği, nüfus, ekonomik büyüme, arazi kullanımı vb. olmak üzere gelecekteki koşullar hakkında çok sayıda bilgi ve projeksiyon içermektedir (Koç, 2025). Her projeksiyon, farklı derecelerde belirsizlik taşımaktadır. Belirsizlik, geleceğe yönelik herhangi bir planlama çabasının doğal bir özelliğini oluşturmaktadır. Risk ve belirsizlik analizi, mümkün olduğuunca belirli bir sorunu çözmek için en uygun proje alternatifinin seçimi için temel kararları etkileyen önemli belirsizlikleri sayısallaştırmayla ilgilidir; yani, projenin ne kadar büyük olması gerektiği (rezervuar kapasitesi, sedde yüksekliği, boru hattı çapı, kanal derinliği vb.) ve ekonomik olarak uygulanabilir ve çevresel açıdan kabul edilebilir olup olmadığıdır. Diğer yandan, mevcut mühendislik standartları ve kriterleri genellikle maliyetler ve toplumsal olarak belirlenmiş risk tolerans normları arasında bir kombinasyonu ve takası temsil etmektedir. Örneğin, taşkın sigortası amaçları ve taşkın koruması için kullanılan iyi kabul görmüş 100 yıllık taşkın koruma standardı. Ayrıca, depremler, taşkınlar, kasırgalar ve kuraklıklar gibi doğal afet olaylarının aşırılıklarına karşı koruma sağlamak için 'olası maksimum taşkın', 'olası maksimum kasırğa', 'taşkın tasarım debisi' veya 'olası maksimum yağış' gibi birçok başka niceliksel standart bulunmaktadır (Auld, 2008; Ayyub, 2018). Son zamanlarda, iklim değışikliği belirsizlikleri nedeniyle risk analizi ve yönetimi, mevcut ve uzun süredir benimsenen 'güvenlik' ve 'güvenilirlik' mühendislik kıstaslarına ek olarak, proje planlama hedefleri olarak 'dayanıklılık' ve 'sağlamlık' gibi geniş kavramları da kapsayacak şekilde gelişmiş ve genişlemiştir.

Artık kanıtlanmış mühendislik standartlarını kullanarak yalnızca tanımlanmış bir doğal afet olayına karşı koruma sağlamak kabul edilebilir değildir. Risk yönetimi stratejileri ve çözümleri toplulukların yerleşik 'normların' dışında öngörülemeyen olaylara dayanabilmelerini (sağlam çözümler) sağlamalı, aynı zamanda yıkıcı bir olaydan sonra kritik altyapı hizmetlerini geri kazandırarak ve ticari ve ekonomik faaliyetleri yeniden başlatarak hızla toparlanabilmelerini sağlamalıdır (dayanıklı çözümler). Geçmişte, 'güvenilirliğe' odaklanmak

sağlamlık ve dayanıklılığın yerini alıyordu, çünkü hidrolik yapılar yalnızca tarihsel aşırılıkları aşan 'yüklerle' dayanmak zorunda kalmıyordu (sağlam tasarımlar), aynı zamanda çeşitli aşırı olaylar altında su temini, hidroelektrik, taşkın kontrolü, sulama veya atık su yönetimi gibi güvenilir hizmetlerin sunulması açısından yüksek derecede performans sağlamaktaydı. Gelecekteki su kaynakları projelerinin (hidrolik yapılar) planlanması ve tasarlanması için risk tabanlı tasarım genellikle üç önemli bileşene sahiptir (Eugene, 2021). Bunlar;

- Yapının hizmetlerine yönelik gelecekteki taleplerin olasılık analizi, yani gelecekteki çeşitli büyüme ve gelişme koşulları altında gerekli hizmetler,
- Yapının çeşitli koşullar altında (taşkın koruması, su temini, çevresel akışlar, hidroelektrik vb.) sağladığı hizmetlerin güvenilirliğinin olasılık analizi,
- Yapının farklı çevresel yüklere nasıl dayanabileceğini belirlemede yapının kendisinin olasılık güvenilirlik analizi,

İlk ikisi, gelecekteki talepler ve hizmet sunumunun güvenilirliği, genellikle proje gerekçesinin ayrılmaz bir unsuru olan planlama süreçlerinde yürütülür. Proje ekonomik olarak uygulanabilir mi? Ekolojik ve sosyal hedefleri ele alıyor mu? Tüm yasal ve toplumsal kısıtlamaları karşılıyor mu? Diğer yandan, proje tasarım yöntemleri, bu tür yapıların işlevselliği, performansı, güvenliği ve ekonomik uygulanabilirliği arasında makul bir denge sağlamak için geliştirilmiştir. Güvenilirliğe dayalı tasarım, bir dizi koşulda tutarlı ve kabul edilebilir bir yapısal arıza olasılığı elde etmeyi amaçlar. Riske dayalı tasarım, arızanın beklenen sonuçlarını karar verme ve tasarım için bir temel olarak ele alır (Retief vd., 2013; Diamantidis vd., 2016; Sykora vd., 2017). Ancak, proje planlamasının bir unsuru olarak kullanılan risk tabanlı analitik yaklaşımlar ile ilişkili ekonomik gerekçelendirme süreçlerinin optimizasyonu ve seçilen 'optimize edilmiş' seçenek ile uzlaşılan mühendislik tasarımı arasında kavramsal bir farklılık vardır. Su kaynakları yönetiminin altında yatan birçok kurumsal ve yasal gereklilikteki farklılıklar nedeniyle, aynı sorun kümesi için çeşitli kurum veya bakanlık proje seçim çerçevelerinin farklı planlama süreçleri, proje kapasitesi, performansı, maliyetleri veya temel tasarım açısından aynı sonuçlara yol açmayabilir. Ancak, mühendislik tasarım işlemlerindeki daha fazla tekdüzelik nedeniyle seçilen herhangi bir projenin gerçek tasarımı, mühendislik tasarım uygulamaları içindeki daha fazla tekdüzelik nedeniyle muhtemelen birçok farklı ortamda daha tutarlı olacaktır.

Proje fizibilite planlaması ile mühendislik tasarımı arasındaki analitik işlemler ve karar kurallarındaki farklılıkların özünde toplumsal veya topluluk 'güvenliğinin' önemi yer almaktadır. Proje fizibilite planlaması, ekonomik

gerekçelendirme analizlerine ve karar kurallarına odaklanır. Örneğin net ekonomik faydaları maksimize ederken, proje tasarımı arıza riskini ve can kaybını en aza indirmeye odaklanır (Yoe, 2017; Koç, 2011)).

ABD Mühendisler Birliğin en son mühendislik ve tasarım kılavuzu (ACE, 2019) aşığıdaki ilkeleri ortaya koymaktadır. Yeni projeler, değişiklikler, iyileştirmeler veya onarımlar için tüm baraj ve sedde tasarımlarında risk bilgili bir yaklaşım kullanılacaktır. Risk değerlendirmeleri, risk bilgili bir karar alma yaklaşımının uygulanması için temel unsurdur. İzlenecek genel ilkeler aşığıda verilmekte olup, Bunlar;

(a) Can güvenliği en üst düzeyde tutulmalı. İnsanlar, mülk ve çevre için riski yönetmeye çalışırken, USACE yaşam güvenliği riskini öncelik olarak değerlendirecektir. Yaşam güvenliği için risk bilgili karar hedefi olarak tolere edilebilir risk yönergeleri kullanılacaktır.

(b) Risk bilgili karar alma. Risk yönetimi eylemleri için kararlar, akıllıca federal yatırımlar sağlamak için bir baraj veya sedde mevcut olduğuunda mevcut olan risk düzeyine göre belirlenecektir.

(c) Açık ve şeffaf katılımı sağlayın. US. ACE, barajları ve/veya seddeleriyle ilgili tüm tasarım faaliyetlerinde proje sponsorlarını dâhil edecektir.

(d) Öğrenin ve uyum sağlayın. Risk değerlendirmeleri, yalnızca geleneksel standartları dikkate almak ile karşılaştırıldığında, risk bilgili bir yaklaşım kullanılarak tasarımların büyütülmesi (yani daha katı tasarım kriterleri kullanılması) veya küçültülmesi (yani daha az katı tasarım kriterleri kullanılması) gerekıp gerekmediğini değerlendirmek için kullanılacaktır.

(e) Zarar vermeyin. Risk bilgili tasarımlar, nüfusun ve mülkün riskini, nüfusun şu anda deneyimlediği riskin üzerine çıkarmamalıdır.

(USCA 2019a) risk analizi ve risk toleransı hakkındaki en son kılavuzu (Baraj ve Set Projeleri için Risk Bilinçli Tasarımlar için Geçici Yaklaşım) birden fazla faktörü dengeleyen risk bilgili karar vermeyi savunurken hala can güvenliğini en önemli öncelik olarak görmektedir. Bu, Mühendisler Kolordusu (ACE, 2019) tarafından taşkın riski yönetimi çalışmaları için risk değerlendirmelerinin nasıl yürütüleceğine ilişkin olarak yayınlanan ilgili planlama kılavuzuyla çelişmektedir. Bu planlama kılavuzu (ER 1105-2-101), çevresel kısıtlamalara bağlı olarak net ekonomik faydaları en üst düzeye çıkaran bir proje ölçeğinin seçilmesini vurgulamaktadır. İki tamamlayıcı kılavuz belge, gerçekte 'risk ve tolere edilebilir risk' kavramını iki ayrı bileşene ayırmakta; tasarlanan yapıların başarısızlığıyla ilişkili can güvenliğini vurgulayan tasarım aşaması ve nedensel taşkın olayıyla ilişkili ekonomik hasarlara dayalı olarak projenin uygulanabilirliğini vurgulayan planlama aşaması. Mühendislik tasarım kılavuzu,

yapının çok çeşitli aşırı hidrolojik yükleme koşulları altında başarısız olmamasını sağlamak için güvenilirliğini ele alan risk analitik işlemlerini vurgulayarak çok daha fazla riskten kaçınmaktadır.

Ekonomik optimizasyon prosedürleri kapsamında, daha sık ve/veya daha zararlı olaylardan/tehlikelerden kaynaklanan hasarları önlemenin bir yolu daha geniş bir gelecekteki iklim belirsizlikleri yelpazesini kapsayacak bir projeye veya sisteme esneklik ve sağlamlık unsurları eklemektir, ancak bu durum genellikle proje ek maliyetler getirmektedir (Liu ve Son, 2020). Bu tür bir tasarım, projenin boyutunu/kapasitesini genişletmeyi ve/veya gelecekteki aşırı iklim belirsizliklerini hesaba katmak için ek mühendislik güvenlik faktörlerini gerektirmekte; bu belirsizlikler kaçınılmaz olarak proje maliyetlerini artırmakta, çoğu zaman başlangıçta optimize edilen finansal veya ekonomik fizibilite düzeyinin ötesine geçmektedir.

Planlama ve tasarım arasındaki diğer önemli farklar çok sayıda ekonomik değerlendirme ve karar kriterinde yatmaktadır. Proje planlama ve gerekçelendirmede geleneksel bir fayda-masraf analizinde beklenen yıllık hasarların kullanılması, gerçekte büyük veya aşırı olayları en aza indirmede iki yönlü bir etkiye sahiptir. ABD yasalarının gerektirdiği ve Mühendisler Birliği gibi kurumlar tarafından yaygın olarak kullanılan beklenen yıllık hasar yaklaşımı, büyük olayların maliyetlerini ve kaçınma faydalarını en aza indirir veya bastırır, yüksek bir indirim oranının kullanılması ise 15-25 yıllık bir planlama ufkunun ötesinde gelecekteki büyük olayların etkisini azaltır (Stakhiv, 2011).

Bu nedenle, mevcut riskleri en aza indirirken risk azaltma ve maliyet artışları arasında her zaman karşılıklı bir ilişki vardır. Bu nedenle, proje planlamasının temel hedeflerinden biri, çeşitli hafifletici eylemler yoluyla hizmet arızasının ve hidrolik arızanın 'kalıcı risklerinin' belirlenmesi ve azaltılmasıdır. Bu eylemler ayrıca ek riskler, belirsizlikler ve maliyetler de getirir. Ayrıca, eşitlik açısından, bu kalıcı riskleri hangi kesimlerin üstleneceği ve planın bir unsuru olarak hangi tür azaltma ve/veya telafi önlemlerinin sağlanacağı belirlenmelidir.

ABD'nin suyla ilgili altyapı için standartlar geliştiren önde gelen federal ajanslarından ikisi olan ABD Kara Kuvvetleri Mühendisler Birliği (USACE) ve Reclamation Bürosu (BoR), iklim belirsizliklerini karşılamak ve daha sağlam ve dayanıklı projeler tasarlamak için risk tabanlı analize daha fazla güvenmek amacıyla birçok planlama ve tasarım standardının revizyonlarını hızlandırmıştır (BoR, 2019). Federal hükümetin performans izleme birimi olan ABD Genel Hesap Verebilirlik Ofisi (GAO, 2013), USACE ve BoR iklim değişikliği uyum programlarını değerlendirmiş, her iki ajansın da 'su kaynağı ve altyapı zaafalarını değerlendirdiğini ve iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlamak için rehberlik ve stratejiler geliştirmek üzere adımlar attığını' ortaya koymuştur. ABD Ulaştırma Bakanlığı da çok önemli bir standart belirleme ajansıdır. Ayrıca yollar,

köprüler ve menfez tasarımları için çok sayıda standartlarını revize ederek iklim belirsizlikleri sorununu ele almıştır. Ulusal Araştırma Konseyi'ne bağlı Ulaştırma Araştırma Kurulu, iklim belirsizlikleriyle başa çıkmak için hidrolojik ve kıyı altyapısına yönelik bir 'Tasarım Uygulamaları Kılavuzu' (TRB, 2019) hazırlamıştır.

6. Mühendislik Tasarımı ve Hidrolojik Durağanlık

Değişen bir iklimin, sadece proje planlama işlemlerini değil, aynı zamanda mühendislik tasarım kriterleri ve standartlarını da değiştirmenin temelini oluşturan bir dizi durağan olmayan ve tarihsel olarak öngörülemeyen koşullara neden olması beklenmektedir (Milly vd., 2008; IPCC, 2021). En son IPCC (2021) değerlendirmesine göre, aşırı olayların (yağış, akış, sıcaklık, kar, buz vb.) sıklığı, yoğunluğu ve süresi zamanla değişecek, ancak bu değişikliklerin hangi yön ve hangi yerlerde veya hangi büyüklükte gerçekleşeceği oldukça belirsizdir. Çok sayıda çalışma, genel dolaşım modelinin hangisinde kullanıldığına, hangi kalkınma senaryosunun seçildiğine ve değişikliklerin hangi kıta veya bölgede gerçekleştiğine bağlı olarak bölgesel ve küresel olarak taşkın ve kuraklığın sıklığı, süresi ve şiddeti konusunda farklı görüşlere sahiptir (Pechlivanidis vd., 2017; Kettner vd., 2018). İklim etkilerinin hidrolojik süreçlere yansıtılması kaçınılmaz olarak sera gazı emisyon senaryolarının seçimi, iklim modelleri ve değişkenleri, ölçek küçültme teknikleri, önyargı düzeltme yöntemleri, hidrolojik model yapısı ve değişkenlerden kaynaklanan belirsizliklerin bir araya gelmesine eğilimlidir. Belirsizlikler çok karmaşık ve bazen bilinmeyen şekillerde yayılarak sonuçları uzun vadeli su projesi tasarım kararları için kullanılamaz hale getirebilir (Wilby ve Dessai, 2010; Pielke ve Wilby, 2012; Pechlivanidis vd., 2017).

IPCC (1990-2021) periyodik raporları dizisi bir iklim modeli, senaryo odaklı 'yukarıdan aşağıya' analitik bakış açısı oluşturdu. Bu senaryonun, birçok mühendislik uygulayıcısı tarafından çoğu su kaynağı yönetim sorunun (özellikle sahaya özgü altyapı tasarımıyla ilgili olanlar) çözümüne uygun olmadığı şeklinde değerlendirildi (Kundzewicz ve Stakhiv, 2010; Stakhiv, 2011; Retief vd., 2013; Sykora vd., 2017; Sykora vd., 2018; Underwood vd., 2020). Bu nedenle, durağan olmayan iklim koşullarından sahaya özgü proje analiz yöntemleriyle başa çıkmak için mühendislik kurumları tarafından günümüzde kullanılan planlama ve tasarım bakış açılarında bazı önemli düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar aşağıda verilmektedir;

- Yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya iklim küçültme/karar ölçekleme: proje düzeyinde iklim odaklı senaryo analizi ile hidrolojik durağan olmama arasındaki boşluğu kapatılmalıdır.
- Mevcut ekonomik optimizasyon ve fayda-masraf analizleri altında 'sağlam' yapılar ve dayanıklı sistemler tasarlamak,

- Durağan olmayan hidrolojiyi hesaba katmak - tasarım için durağan olmayan uç noktalar, planlama için durağan olmayan ortalama ve varyans,
- Planlama ve tasarım bakış açısıyla ilişkili karar kriterleri arasındaki boşluğu kapatmak; risk-maliyeti en aza indirmek ile hidrolik arızayı en aza indirmek ve güvenliği en üst düzeye çıkarmak,

Bu boşluklardan bazılarını kapatmak ve proje sağlamlığını, dayanıklılığını ve güvenilirliğini artırmak için su altyapısının planlanmasına yardımcı olan son yöntemler, Dünya Bankası, Asya Kalkınma Bankası, Mühendisler Birliği ve UNESCO gibi önde gelen kurumlar tarafından geliştirilmiştir (Ray ve Brown, 2015; Mendoza vd., 2018; Watkiss vd., 2020). Bu yöntemler, 'iklim riski bilgisine dayalı karar alma' başlığı altında iklim değişikliği ve durağan olmama gibi ek belirsizliklere odaklanan ve günümüzde kurumsal olarak kabul görmüş planlama protokollerinin uzantılarıdır. Temel amaç, hangi koşullar altında giderek daha ayrıntılı iklim analizi düzeylerinin kullanılması gerektiğine veya mevcut analitik yöntemlerin, planlama protokollerinin ve tasarım standartlarının eldeki sorun için yeterli olup olmadığına karar vermektir (karar ölçekleme).

Planlama ve mühendislik tasarımının anahtarı, sahaya özgü proje düzeyinde analiz için temel oluşturan ampirik bir hidrolojik veri kümesinin soyutlanması ve işlevsel bir dağılım biçimine veya ampirik parametrik olmayan dağılım türüne dönüştürülmesidir (Beven, 2016). Bir sonraki adım, durağan iklim koşullarını yansıtan seçili olasılık dağılımını tasarım için kullanılan durağan olmayan bir uç dağılıma dönüştürmektir (Salas vd., 2018; Serago ve Vogel, 2018). Ancak, sürecin her adımında hala çözülmesi gereken birçok epistemik (bilgi eksikliği) ve bilimsel belirsizlik bulunmaktadır. Mühendisler, kararlarını daha iyi bilgilendirmek için kabul görmüş istatistiksel analizlerin farklı dizilimlerini yaparken bu belirsizlikleri aşmanın pratik yollarını bulmuşlardır. Bu belirsizliklerin nasıl ele alınacağı, iklimin durağan olmama durumuyla başa çıkmak için resmi olasılık ve istatistiksel çerçevelerin seçimi de dâhil olmak üzere bir seçim ve yargı meselesi haline gelmiştir (Beven, 2016). Mondal ve Mujumdar (2017) ve Salas vd. (2018) tarafından gösterildiği gibi uygulayıcı mühendis için birçok seçenek mevcuttur, ancak kurum prosedürleri günümüzde önemli derecede resmileştirilmemiş olan bu sorunlara yönelik tek tip, standart bir yaklaşıma gereksinim duymaktadır.

Bununla birlikte, kısmi bir pratik ikame olarak mevcut tasarım standartlarının durağanlık hipotezi altında sürekli güncellenen tarihsel kayıtların analizine dayandığını kabul etmekte bir miktar rahatlık vardır (Kunkel vd., 2013; Olsen, 2015; Ayyub, 2018; ACE, 2021). Bu durum, tekrarlanan büyük, ancak

öngörülemeyen olaylarla başa çıkmada pratik ve etkili bir yaklaşım olmakta, çünkü aynı anda birçok federal ve eyalet tasarım kılavuzunun yanı sıra temel yağış ve akış veri kümeleri periyodik olarak güncellenmektedir. Bu kademeli yükseltmelerin pratik etkileri, bugünün yükseltilmiş standartları ve verileriyle tasarlanan altyapının risk seviyesinin gelecekte çok fazla değişmeyeceğini göstermektedir (Serinaldi ve Kilsby, 2015). Ayrıca, Serinaldi ve Kilsby (2015), mühendislik tasarımının iklimin durağan olmaması şekliyle çağdaş tasarıma dâhil etmenin önemli olduğu fikrine karşı çıkmaktadır. Durağan olmayan modellerin ek belirsizlik kaynakları getirdiğini savunmaktadırlar; durağan olmayan modellerin yanlış belirlenmesinin fiziksel olarak tutarsız sonuçlara yol açabileceğini ve durağan olmayan modellerin sonuçların güvenilirliğini pratik olarak artırmayacağını savunmaktadırlar. Tasarım amaçları için daha gerçekçi bir risk ölçüsü ve karar alma amaçları için daha anlaşılır bir ölçü olarak bir projenin tasarım ömrü boyunca “başarısızlık riskini” vurgulayan bir yaklaşımı savunmaktadırlar. Read ve Vogel (2015, 2016) aynı sonucu ortaya koymaktadır.

Ancak, temel ve işlevsel ayırım, hidrolojik ve hidrolik mühendislerinin gelecek nesillerin nüfusunu etkileyen önemli tasarım kararlarını sürekli olarak almalarıdır. Kritik kararlar, gelişmiş hesaplamalı teknolojilerden gelecekteki iklim koşulları hakkında daha iyi veriler bekleyemez. Bu nedenle, kararları, sadece ilgili meslek toplulukları tarafından periyodik ve yoğun pratik akran incelemesinden ve tasarım kriterlerinin ve standartlarının kademeli olarak güncellenmesinden değil, hepsinin en önemli sonuçları ve bakış açısı incelemelerinden geçen, zamanla denenmiş bir dizi “en iyi yönetim uygulamaları” (tasarımların ve yaratımların başarısızlığı veya başarısı)’na dayanmalıdır.

Örneğin, 2005 yılı New Orleans'taki Katrina Kasırgası veya 2017 yılı Porto Riko'daki Maria Kasırgası gibi felaket olaylarından sonra meydana gelen altyapının yeniden inşası, iklim belirsizliklerinin daha iyi bir açıklamasını beklemedi. Tasarım kararları, yeni fiziksel koşullar ve toplumsal risk toleransı kriterleri göz önünde bulundurularak en iyi mühendislik yargısına dayalı geçerli standartlara, yeni verilere ve daha iyi modellere göre verilmiştir. Yeni kriterler, ABD Kongresi, Katrina Kasırgası Kurumlar Arası Performans Değerlendirme Görev Gücü (Link ve Harris, 2007) aracılığıyla mühendislik mesleği ve Ulusal Bilimler Akademisi'nin (Ulusal Araştırma Konseyi, 2009) önerileri gibi akademik girdiler arasında işbirliğiyle belirlenmiştir. Toplu olarak, bu standartlar ve analitik yöntemler, iklim uyumu için mühendislik tasarımında son teknolojinin önemli bir ilerlemesini temsil etmektedir.

7. Güncel Mühendislik Risk Yönetimi Uygulamalarının İklim Belirsizliklerine Uyarlanması

İklim değişikliğini tahmin etmenin oldukça belirsiz bir teknik çaba olduğu anlaşılabılır. Ancak, bu belirsizliklerin çoğunu belirleme ve nicelemedeki zorluklara karşın, toplum temelli planlama ve tasarım şeffaflığını sağlamak için tekdüze ve tekrarlanabilir bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bu belirsiz bilgileri topluma ve karar vericilere iletmek oldukça güçtür. Hidroloji biliminde belirsizlik tahmini hakkında çok fazla varsayımın olduğunu kabul eden mühendislik mesleği, bir dizi risk yönetimi uygulamasıyla bu tür analitik olarak çetrefilli ve büyük ölçüde çözümsüz teorik sorunlarla başa çıkmanın farklı yollarını tasarlamıştır. Bu uygulamalar, çeşitli en iyi yönetim uygulamaları ve risk yönetimi önlemleriyle belirsizlikleri çözmek ve ortaya koymak için daha pratik ve dolaylı yollar sağlamak üzere geliştirilmiştir. Su kaynakları mühendislik mesleği tarafından iklimle ilgili risk yönetimi uygulamalarının bir unsuru olarak günümüzde izlenen birkaç yol bulunmakta (Auld, 2008) olup, Bunlar;

- Hidro-klimatolojik tasarım kriterlerinde iklim kaynaklı değişikliklerden doğrudan etkilenen mühendislik ilkeleri ve standartlarını güncelleme ve gözden geçirme (%1 taşkın olasılığı; taşkın tasarımı; olası maksimum yağış veya kasırga' vb.),
- Bilinen iklim belirsizliklerini hesaba katmak için tasarımda yaygın olarak kullanılan güvenlik faktörlerini artırmak,
- Yeni bilgileri, analitik teknikleri, tasarım yöntemleri ve teknolojileri hesaba katmak için planlama ve mühendislik rehberliğini ve düzenlemelerini periyodik olarak gözden geçirmek,
- İklimin durağan olmayışıyla etkili bir şekilde başa çıkabilen yeni analitik teknikler geliştirmek,

Tüm bu standart yükseltmeleri ve diğer yöntemler Avrupa ve ABD'de birçok federal kurum tarafından özenle takip edilmektedir. Güvenlik faktörleri ve tasarım yedekleri, mühendislerin doğal afetler, modelleme ve veri toplama belirsizlikleriyle başa çıkmak için her zaman kullandıkları bir yöntemdir. Belirsizlik analizi, ilkeleri, standartları ve ilişkili düzenleyici süreçleri kapsayan mühendislik uygulamasının iyi kabul görmüş bir unsuru olduğundan, kanıtlar belirli bir yapının ömrü boyunca artan iklim riskleri olasılığına işaret ettiğinde güvenlik faktörlerini belirleyerek ve yükselterek gelecekteki iklimle ilgili tasarım değerlerinin artan belirsizliğiyle başa çıkmak mümkün olmaktadır (Yen ve Tung, 1993; Tung vd., 2006; Sykora vd., 2017; Sykora vd., 2018). Büyük bir felaketin meydana gelme riskini en aza indirmek için kullanılan bu güvenlik faktörleri, doğal olarak artan proje ve sistem sağlamlığını hesaba katmaktadır. İklim durağanlığını analiz etmek için kolayca uyarlanabilen mevcut risk tabanlı analitik

yöntemlerin ilk örneği taşkın deşarjlarının ve aşamalarının birden fazla kademesinin Monte Carlo simülasyonuna dayanan Taşkın Hasar Analizi için Mühendisler Birliği işlemleridir (Kalyanapu vd., 2011). Kolordu Hidrolojik Mühendislik Merkezi tarafından geliştirilen Taşkın Hasarı Azaltma Analizi (HEC-FDA) yazılımı, Taşkın Risk Yönetim planlarının formüle edilmesi ve değerlendirilmesinde bütünlük bir hidrolojik mühendislik ve ekonomik analiz gerçekleştirme yeteneğini sağlamaktadır (ACE, 2021).

ABD Ulusal Araştırma Konseyi (NRC) komitesi ayrıca, Kolordu'nun Eşdeğer Yıllık Hasar (AEP) mühendislik riskinin performans ölçüsü olarak kullanmasını önermiştir. Bu analiz, herhangi bir yılda insanların sular altında kalma olasılığının (setler gibi su baskını hasar azaltma yapılarının arızalanma olasılığı dâhil) bir ölçüsü olup meydana gelebilecek tüm su baskınlarını ve belirsizlik kaynaklarını göz önünde bulundurmaktadır. Read ve Vogel (2015) benzer bir yaklaşımı önererek, durağan süreçler için dahi ortalama bir geri dönüş periyodunun yaygın uygulamasının bir planlama ufku hesaba katmaması ve bir sonraki su baskınına kadar geçen süreyi temsil etmeyecek ortalama bir değer olması nedeniyle sorunlu olduğunu belirtmiştir. Read ve Vogel, bir projenin ömrü boyunca arıza riskini açıklamak için daha kullanışlı bir terim olarak 'geri dönüş periyodu' yerine 'güvenilirlik' kavramını sunmaktadır. Güvenilirlik, bir sistemin ömrü boyunca tatmin edici bir durumda kalma olasılığı, diğer bir söylem ile n yıllık bir proje ömrü içinde bir aşma olayının meydana gelmemesi olarak tanımlanmaktadır.

Uç noktalara dayalı tasarım standartları ve hesaplamalı yöntemler, iklim değişikliğine ve ilişkili belirsizliklere giderek artan bir şekilde 'otonom uyum' ilkesini temsil etmektedir. Mühendislik mesleğinin bir bölümü, iklim değişikliğiyle ilgili tüm belirsizlikleri gerçekçi bir şekilde barındırmanın çok güç olması nedeniyle geleneksel risk tabanlı tasarım yöntemlerinin günümüzde durağan olmayan yaklaşımlardan daha yararlı olabileceğini öne sürmektedir. Aslında, birçok yazar-araştırmacı, çoğu 'bilinmeyen bilinmezler' olan bu belirsizlikleri hesaba katmanın, analizleri toplum ve siyasi karar vericiler için daha karmaşık ve kafa karıştırıcı hale getirdiğini savunmaktadır (Serinaldi ve Kilsby, 2015; Underwood vd., 2020).

Örneğin, 'serbest bordür', değişen iklimde amaçlanan güvenlik seviyesini sağlayamayan sedde ve dolguların güvenilirliğini artırmak amacıyla bir güvenlik faktörü olarak hidrolojik tasarıma dâhil edilmiştir. 'Serbest bordür', Federal Acil Durum Yönetim Ajansı (FEMA, 2020) tarafından genellikle taşkın yatağı yönetimi amacıyla bir taşkın seviyesinin üzerindeki ayak (foot) cinsinden ifade edilen bir güvenlik faktörü olarak tanımlanmıştır. 'Serbest bordür', dalga hareketi, köprü ve kanal daralmaları veya bir havzanın kentleşmesinin gelişen hidrolojik etkileri gibi seçilen bir tasarım taşkını ve taşkın yolu koşulları için hesaplanan

yükseklikten daha büyük taşkın yüksekliklerine katkıda bulunmakta birçok bilinmeyen faktörü telafi etmektedir.

Serbest bordür, mühendislik analizinin belirsizliklerini ve bilinmeyenlerini (hidrolojik ve hidrolik hesaplamaları) telafi etmektedir. Serbest bor, 100 yıllık tasarım taşkınlarının %95 güven sınırları içinde tutulabileceğini garanti etmektedir. Ayrıca, durağan iklim varsayımları altında 500 yıla kadar geri dönüş periyoduna sahip bir taşkına karşı potansiyel olarak koruma sağladığı da görülmektedir.

Mevcut durağan iklim 'tasarım taşkını' bakış açısına bir 'güvenlik faktörü' eklemenin bir başka yolu da olası bir projeyi analiz etmek için 'uygun' bir taşkın frekans dağılımını seçmektir. Uygun bir olasılık dağılımı ve parametre tahmin yönteminin seçimi yerinde frekans analizinde hayati bir rol oynamaktadır. ABD federal kurumlarının Log-Pearson tip 3 (LP3) dağılımını (England vd., 2018) kullanması yasa gereği zorunluyken, Birleşik Krallık ve Japonya Genelleştirilmiş Aşırı Değer (GEV) dağılımını önermektedir (Kazama vd., 2010). Castellarin vd. (2012), Avrupa'da taşkın sıklığı analizinde uygulanan istatistik yöntemleri incelemiş, GEV dağılımının Avusturya, İtalya, Almanya ve İspanya tarafından kullanılmasının uygun olacağını önermiştir.

Uygun bir olasılık dağılımının seçimi, taşkın yataklarını doğru bir şekilde belirlemek ve ulusal taşkın sigorta fonlarını sermayeleştirmek ve uygun ölçekte taşkın koruma altyapısı seçmek için önemlidir. Taşkın sıklığı dağılımını doğru bir şekilde karakterize etmek, belirli bir taşkın yönetim stratejisinin seçimi (belirli bir konum için yapısal veya yapısal olmayan taşkın korumasının uygun olup olmadığına karar vermek) üzerinde en büyük etkiye sahiptir.

Vogel vd. (2011), ABD için taşkın büyüme ve tekrar azaltma faktörleri biçiminde taşkın tolerans faktörlerinin eşdeğerini hesapladılar. Gözlemlenen taşkın eğilimlerini ve durağan olmayan bir dünyadaki taşkın sıklığını taklit edebilen basit bir istatistiksel model geliştirdiler. ABD genelindeki tarihi taşkın verilerini kullanarak, ABD'nin birçok bölgesi, özellikle daha yüksek nüfus yoğunluğuna sahip kentsel alanlar için 2-5'in üzerinde sel büyüme faktörleri hesapladılar. Benzer şekilde, bir zamanlar 100 yılda bir görülen taşkının birçok havzada çok daha yaygın hale gelebileceğini gösteren tekrar azaltma faktörleri hesapladılar. Ancak, taşkın piklerindeki eğilimler, arazi kullanım değişiklikleri, kentleşme veya nehir yapıları (köprüler, daralmalar, kanal değişiklikleri) gibi birçok başka antropojenik faktörden kaynaklandığını, mutlaka iklim değişikliği anlamına gelmeyeceğini belirttiler. Vogel vd. (2011), kentsel alanlarda ve yukarı havzalarda arazi kullanımı değişikliklerine tabi olan daha yüksek nüfus yoğunluklu bölgelerde genellikle büyük artışlar gözlemlendiğini buldular. Özellikle, taşkınlarda durağan olmama, arazi kullanımı, iklim ve su kullanımındaki değişiklikler de dâhil olmak üzere çeşitli antropojenik

süreçlerden kaynaklandığını ve bu süreçler arasındaki olası etkileşimler, eğilimleri belirli bir nedene atfetmeyi çok zorlaştırdığını ortaya koydular.

Örnekler, sabit bir iklimi varsayan tasarımla ilgili ilkelerin ve standartların belirli bir ölçüde mevcut iklim eğilimlerini ve durağan olmayan süreçleri yansıtan bilgiler mevcut oldukça periyodik olarak ayarlandığını ve yükseltildiğini göstermektedir. Bilginin düzenli olarak yaşanan iklim uçlarına odaklanması, bu güncelleme faktörünün tek başına iklimin durağan olmamasından kaynaklanan gelecekteki belirsizliklerin önemli bir kısmını açıklayabilecektir. Hidrolojik ve hidrolik modeller ve kentleşmeyle bağlantılı diğer belirsizlikleri hesaba katmak için tasarımda taşkın ödenekleri, serbest bordür ve diğer güvenlik faktörleri gibi ek tedbirler kullanıldığında hidrolojik yönden durağan olmayan durumla ilişkili önemli iklim belirsizliklerinin çoğunun mevcut tasarım ilkeleri ve standartlarının periyodik olarak düzenlenmesiyle proje tasarımına dâhil edilebileceğini varsaymak mümkün olabilecektir.

Popüler olarak savunulan 'pişmanlık yok' iklim uyum uygulamalarının çağdaş risk tabanlı tasarım, güvenlik faktörleri ve baraj ve taşkın yapılarının tasarımına rutin olarak dahil edilen serbest bordür değerlendirmeleri de dahil olmak üzere mevcut mühendislik 'en iyi yönetim uygulamalarını' kapsadığı belirtilmektedir (Bhave vd., 2016). Özellikle, gelecekteki değişikliklerin etkileri oldukça belirsiz kaldığında aşağıdan yukarıya 'pişmanlık yok' eylemleri en gerçekçi uyum seçeneğini sunabilir. Bu anlamda, geleneksel durağanlık tabanlı bir çerçeve içinde yükseltilmiş risk tabanlı yöntemler altında altyapı planlama ve tasarımı yapmak 'pişmanlık yok' iklim adaptasyonuna yönelik en mantıklı yaklaşım olabilir.

8. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, hidrolik yapı mühendislerinin Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine (SKH) ulaşmaya yardımcı olmak için geleceğe yönelik daha çevre dostu ve sosyal olarak bilinçli bir vizyon benimsemeleri gerektiğini savunmaktadır. Bu hedeflere doğru ilerlemenin temelini oluşturan sürdürülebilir hidrolik yapı mühendisliğinin birkaç temel unsuru belirlenmiş, tasarımcıların uygulama durumunu olumlu olarak nasıl ileriye taşıyabileceklerine ilişkin örnekler sunulmuştur. Günümüz, hızlanan iklim değişikliği, daha adil ve hakkaniyetli bir topluma duyulan ihtiyaç ve bilgi teknolojisinin sürekli evrimiyle karakterize edilmektedir. Tasarımcılar, iklim değişikliğine uyum için pratik çözümler sunarak, su altyapısını toplum içinde bütünsel olarak ele alarak ve teknolojik ilerlemeleri ve dijitalleşmeyi benimseyerek bu değişime olumlu katkıda bulunmalıdır. Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine ulaşma çabasını desteklemek için, hidrolik yapı mühendisleri, toplum ve çevre için fayda sağlayan su altyapısı için mümkün olan en iyi sürdürülebilir sonucu nasıl elde edecekleri konusunda açık fikirli olarak diğer tüm ilgili disiplinlerle birlikte çalışmalıdır. Bu

bakış açısı değişimi sürdürülebilirliği ön plana çıkarmalı ve siyasi karar vericiler tarafından desteklenmelidir.

Yeni ve sürdürülebilir altyapı, nüfuslar arttıkça ve farklı cephelerde ilerleme kaydedildikçe değişen hedefler altında toplum ve çevreye uzun vadeli faydaların yanı sıra önemli üretkenlik kazanımları sağlayacaktır. Sürdürülebilir çözümler kısa vadeli maliyetlerine göre daha pahalı görünse de uzun vadeli faydalarını hesaba katmak çok daha rekabetçi hale getirebilir. Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine ulaşmayı hedefleyen tasarımcılar, su endüstrisinde kalıcı ve sürekli ilerlemeyi sağlayan bir çerçevenin geliştirilmesinde sorumluluk almalı, tavsiyelerde bulunmalı ve siyasi kararları bilgilendirmek için akademi, endüstri ve hükümet sektörleriyle bir araya gelmelidir.

Hidrolik yapı mühendisliği her zaman evrimleşen bir bilim olmuş, olmaya da devam edecektir, "ada" bir disiplin olmaktan çıkıp bugün ve gelecekte çeşitli yetkinlikleri birleştiren çok disiplinli bir alana dönüşmüştür (Liggett, 2002). Bu evrim, toplumun suyla ilgili en önemli ihtiyaçlarının karmaşıklığındaki sürekli artışla yakından ilgili olup yerelden su kaynaklarının uyumlu küresel sürdürülebilir yönetimine duyulan ihtiyaca doğru ilerlemektedir. Bu zorlukları çözmek için yazarlar-araştırmacılar, hidrolik yapı mühendisliğinin gelişmiş modelleme ve enstrümantasyon yeteneklerinden güçlü eğitim ve inovasyon becerilerine kadar uzanan teknolojik gelişmelerle sürekli olarak evrimleşen tamamlayıcı araçlara dayandığı bir sürdürülebilirlik çerçevesi sunmaktadır. Bu araçların geliştirilmesi, akademi ve endüstri arasındaki yakın bağlantılardan ve iş birliğinden faydalanmış ve faydalanmaya devam etmelidir. Bu araçlar, sık ve aşırı koşullar için sahada hidrolik yapı tasarımını ve işletimini doğrulama yetersizliğinden kaynaklanmıştır. Bu nedenle, uygun tasarıma ulaşmak için bu araçların mühendislik yargısıyla uygulanmasını akılcı bir şekilde birleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, topluluk modelleme araçlarının en son doğrulaması için prototip veri kümeleri elde etme zorluğunun üstesinden gelmek için çabalarını sürdürmelidir. Çerçeve evrimleşirse, çıktıların da evrimleşmemesi için hiçbir neden yoktur. Goethe (1783) dediği gibi "En doğal olmayan şey bile Doğa'dır... Onu her yerde görmeyen, onu hiçbir yerde doğru şekilde göremez... Ona karşı geldiğimizde bile yasalarına uyarız; ona karşı çalışmak istediğimizde bile onunla çalışırız." Nehirlerimizde gördüğümüz gibi, doğaya hükmetmek için inşa edilen hidrolik yapılar dar görüşlüdür. Aslında, doğanın bir parçasıdır ve yalnızca onunla etkileşime girebilirler, karşılığında yeni doğal koşullar yaratırlar. Bu bakış açısına göre, fiziksel olayları kontrol etme çabaları insan ihtiyaçları ile çevresel sorunları birleştirme girişimiyle sonuçlanmalıdır. Bu kaçınılmaz olarak insan yapımı sistemin doğal bir evrimine ve insanın evrimine yol açacak, ciddi sorunlar ortaya çıkaracak ve hidrolik mühendislerini su akışlarını kontrol etmede yeni stratejiler geliştirmeye itecektir. Bu tür bir akıl yürütme, hidrolik yapı

mühendisliğin asla bitmeyen ve gelişen bir bilim olduğunu göstermektedir. Hiçbir belirli çözüm veya sistem mükemmel değildir. Aksine, hidrolik yapılar da dâhil olmak üzere her sistem veya çözüm, akıllı, yenilikçi ve sürdürülebilir mühendislik eylemlerini gerektiren yeni zorluklar yaratacaktır.

Atmosferik sera gazı konsantrasyonları artmaya devam ederken ve iklim değişikliğinin sonuçları giderek daha yıkıcı hale gelirken, mühendisler, bilim insanları ve daha geniş nüfus iklim değişikliğinin artık kaçınamayacağımız bir tehdit olduğunun farkına varmıştır. İklim değişikliğini ele almak birbiriyle ilişkili iki zorlukla yüzleşmeyi gerektirir. Birincisi, ekonominin tüm sektörlerinde sera gazı emisyonlarını azaltırken hızla karbon nötr veya hatta karbon negatif enerji sistemlerine geçiş yapmaktır. İkinci zorluk, özellikle en savunmasız nüfuslar için sürdürülebilir ve dayanıklı sistemler inşa ederek iklim değişikliğinin etkilerini en aza indirmektir. Bu zorlukların ele alınması, mühendislik eğitiminin temelden yeniden şekillendirilmesini gerektirecektir. Gelecek nesil mühendisler ve mevcut uygulayıcılar, bu belirsizlik ve hızlı değişim ortamında topluma hizmet etmek için yeni becerilere ihtiyaç duyacaktır. Mühendisleri iklim değişikliğinin yarattığı zorlukları ele alma becerileriyle güçlendirmek, mühendislik eğitiminde kullanılan teknolojik ve felsefi çerçeveleri uyarlamayı gerektirmektedir. Özellikle, mühendislerin, (1) iklimin ve sürdürülebilirliğin mühendislik tasarımıyla nasıl bağlantılı olduğunu anlamaları gerekecektir; (2) mühendislik çözümlerine geniş bir disiplin yelpazesini dâhil etmek; (3) mühendisliğin etik ve adalet boyutlarını anlamak; (4) çeşitli toplulukları dinlemek ve onlarla işbirliği yapmak. Bu becerileri geliştirmek, mühendislik eğitiminin yeniden tasarlanmasını ve öğrenciden kıdemli uygulayıcıya kadar sürekli mesleki gelişimi gerektirir.

Risk tabanlı planlama ve tasarım standartlarının mevcut uygulamaları, bazıları değişen bir iklim rejiminin habercisi olabilecek her bir felaket niteliğindeki doğal afete yanıt vererek kademeli olarak gelişmiştir. Tasarım standartları ve ilkeleri, büyük ölçüde iklim uçlarını ele almaya dayalı oldukları için son elli yılda değişen iklim koşullarını yansıtan değişikliklerin birikimini kapsamaktadır. Bu uçlar, durağan olmayan bir iklim rejiminin beklenen değişikliklerinin çekirdeğini kapsayabilir ve gelecekte bilinmeyen iklim belirsizliklerinin büyük bir bölümünü dolaylı olarak ele alabilir. Gelişen tasarım standartlarının temelini oluşturan risk analizi yöntemleri, algılanan iklim değişiklikleriyle uyumlu bir şekilde ilerler ve aşırı olayları vurgular. Geniş bir belirsizlik yelpazesıyla başa çıkmayı amaçlayan standartlar, ilkeler ve yerleşik mühendislik güvenlik faktörlerinin birleşimi daha dayanıklı bir altyapı inşa etmeye yönelik 'pişmanlık duyulmayan', ihtiyati bir yaklaşımın kolektif bir temeli olarak görülebilir (OECD, 2018a, 2018b). Planlama ve tasarım, gerçekte farklı hedef ve karar kriterlerine sahip olan ayrı işlevlerdir. 'Planlama' işlevi, taşkın hasarını azaltma, belediye su temini veya

hidroelektrik üretimi gibi güvenilir su temelli hizmetleri sağlamak için ekonomik performans ölçümlerini optimize eden bir değerlendirme çerçevesine odaklanır. Uygun bir proje seçildikten sonra, proje 'tasarım' kriterleri proje ve sistem arızalarından kaçınmaya odaklanır ve çok çeşitli belirsizlikleri hesaba katmak için tasarım güvenlik faktörlerini ve ilaveleri dâhil eder.

İklim adaptasyonuna ve ilişkili iklim belirsizliklerine yönelik pratik bir yaklaşım, mevcut en iyi yönetim uygulamalarını yaşama geçirmek olacaktır. Bunlar arasında çağdaş tasarım prosedürlerinin uyarlanması; sağlamlık, dayanıklılık ve uyarlanabilir yönetim hükümlerini içeren risk yönetimi yaklaşımları (istenen performans ve hizmet seviyelerindeki değişikliklere nominal, 'pişmanlık yok' ayarlamaları ve yeni verilere ve izlemeye dayalı güncellemelerle teknolojik uyarlamalar) yer almaktadır. 'En iyi yönetim uygulamaları' topluluğunun bir parçası, 'taşkın ödenekleri' gibi iklim ayarlama faktörlerini ve altyapının kritik bileşenleri için tasarım güvenlik faktörlerinin yükseltilmesini içermektedir. Özellikle, ABD federal ajansları bu yolu izlemiştir ve ABD Kara Kuvvetleri Mühendisleri, Reclamation Bürosu ve Federal Karayolu İdaresi gibi ajanslar, planlama ve tasarım işlemlerini güncelleyerek, iklimle ilgili belirsizlikleri hesaba katan daha geniş bir risk analiz araçları ve prosedürleri dizisi kullanmışlardır. Ayrıca, iklim değişikliğiyle ilişkili belirsizlikleri değerlendirmek ve ölçmek için kullanılan risk analiz yöntemlerini daha iyi koordine etmek için çalışmışlardır.

Mühendislik ilke ve standartlarının temel avantajları (yaklaşımın tekdüzeliği, analizlerin tekrarlanması ve mühendislik tasarımının sonuçlarında ve hidrolik yapıların inşa edildiği her yerde dünya genelinde tutarlılık) 'en iyi yönetim uygulamaları' için merkezi öneme sahiptir. Bu tür standartlar ve uygulamalar, şeffaflık, kamu güveni ve hesap verebilirliğin temelini oluşturmaktadır. Dünya Bankası ve Asya Kalkınma Bankası gibi birçok ülke ve uluslararası kredi kuruluşu, iklim analizi çalışmalarını artırmakta, risk analizi ve altyapı planlaması için yeni rehberlik biçiminde uluslararası mühendislik örgütlerine sahip olmakta ve yapısal tasarım için yeni ilkeler ve standartlar geliştirmektedir.

Kaynaklar

- ACE (U.S. Army Corps of Engineers). (2019). Interim approach for Risk-Informed designs for dam and Levee projects. Engineering and Construction Bull., Washington, DC.
https://www.wbdg.org/FFC/ARMYCOE/COEECB/ecb_2019_15.pdf.
- ACE (U.S. Army Corps of Engineers). (2021). Certification of the hydrologic engineering center's flood damage analysis software version HEC-FDA v1.4.3.
https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-fda/documentation/FRMPCX_Certification_HEC-FDA_v1.4.3_Sep_2021.pdf
- Annandale, G. W., Morris, G. L. & Karki, P. (2016). Extending the life of reservoirs: Sustainable sediment management for dams and run-off-river hydropower. Directions in Development-Energy and mining, World Bank. Available from
<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/25085>
- ASCE (American Society of Civil Engineers). (2017). 2017 Infrastructure report card. American Society of Civil Engineers (ASCE).
<https://www.infrastructurereportcard.org/>
- Auld, H. (2008). Adaptation by design: the impact of changing climate on infrastructure. Journal of Public Works and Infrastructure 1. 276–288.
- Ayyub, B. (2018). Climate-Resilient infrastructure adaptive design and risk management. ASCE Committee on Adaptation to a Changing Climate. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 140.
- Bayazit, Y., Bakış, R., & Koç, C. (2021). A study on transformation of multi-purpose dams into pumped storage hydroelectric power plants by using GIS model. International Journal of Green Energy. Volume 18, 308-318.
- Beven, K. (2016). Facets of uncertainty: epistemic uncertainty, non-stationarity, likelihood, hypothesis testing, and communication. Hydrological Sciences Journal 61(9), 1652–1665.
- Bhave, A., Mittal, N., Mishra, A., & Raghuwanshi, N. (2016). Integrated assessment of no-regret climate change adaptation options for reservoir catchment and command areas. Water Resources Management 30, 1001-1018
- BoR (Bureau of Reclamation). (2019). Best practices in dam and Levee safety risk analysis. Manual, Joint Publication of Bureau of Reclamation and Corps of Engineers. <https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/methodology.html>.
- Brekke, L.D., Kiang, J.E., Olsen, J.R., Pulwarty, R.S., Raff, D.A., Turnipseed, D.P., Webb, R.S., & K.D. White (2009). Climate Change and water resources management – A federal perspective. U.S. Geological Survey Circular 1331. 65 pp.

- Burkett, M.H. (2020). Silent and unseen: Stewardship of water infrastructural heritage. *Adaptive Strategies for Water Heritage*, p.21.
- Castellarin, A., Kohnová, S., Gaál, L., Fleig, A., Salinas, J. L., Toumazis, A., Kjeldsen, T., & Macdonald, N. (2012). Review of Applied Statistical Methods for Flood Frequency Analysis in Europe, Milestone Report for WG2 of COST Action ES0901. Tech. Rep., Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford, UK.
- Castelli, B. (1628). Della misura dell'cque correnti (On the measurement of running water). (In Italian) Stamperia Camerale.
- Catucci, D., Briganti, R., & Heller, V. (2021). Numerical validation of novel scaling laws for air entrainment in water. *Proceeding of the Royal Society, A* 477 (2255)
- Choi, J.-H., Jun, C., Liu, P., Kim, J.-S., & Moon, Y.I. (2020). Resolving emerging issues with aging dams under climate change projections. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146 (5), 04020025.
- Cook, B.I., Ault, T.R., & Smerdon, J.E. (2015). Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains. *Science Advances*, 1(1), e1400082.
- Davis, N. (2016). What is the fourth industrial revolution? World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/what-is-the-fourth-industrial-revolution/>
- Diamantidis, D., Holický, M., & Sýkora, M. (2016). Reliability and risk acceptance criteria for civil engineering structures transactions of the VŠB – technical university of Ostrava. *Civil Engineering Series* 16 (2), 1–10.
- England, J., Cohn, T., Faber, B., Stedinger, J., Thomas, W., Veilleux, A., Kiang, J., & Mason, R. (2018). Guidelines for determining flood flow frequency – Bulletin 17C. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 4, Chap. B5, p. 148.
- Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., Pirotton, M., Tralli, H., & Alende, J. (2017) A piano key weir to improve the discharge capacity of the Oule dam spillway (France). *Labyrinth and Piano Key Weirs III PKW 2017*, CRC Press, London, U.K.
- Erpicum, S., Crookston, B., Bombardelli, F., Bung, D.B., Felder, S., Mulligan, S., Oertel, M., & Palermo, M. (2021). Hydraulic structures engineering: An evolving science in a changing world. *WIREs Water*. 8(2), e1505.
- Eugene Z. Stakhiva. (2021). The centrality of engineering codes and risk-based design standards in climate adaptation strategies. *Water Policy* Vol 23 No S1, 107

- Eugene, Z., Stakhiv, R., & A. Pietrowsky. (2009). Adapting to climate change in water resources and water services, Institute for Water Resources. U.S. Army Corps of Engineers, p.12.
- Felder, S., Erpicum, S., Mulligan, S., Valero, D., Zhu, D., & Crookston, B. (2021). Hydraulic structures at a crossroads towards the SDGs. IAHR White Paper.
- Fluixá-Sanmartín, J., Altarejos-García, L., Morales-Torres, A., & Escuder-Bueno, I. (2018). Review article: Climate change impacts on dam safety. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(9), 2471-2488.
- France, J. W., Alv, I. A., Dickson, P. A., Falvey, H. T., Rigbey, S. J., & Trojanowski, J. (2018). Independent forensic team report: Oroville dam spillway incident. California Department of Water Resources. <https://damsafety.org/sites/default/files/files/Independent>
- Gene, G., Alabaster, G., Sancho, T., Mulligan, S., Soo, T., Schweitzer, R., Mishra, A., Amani, A., Heller, L., Qayum, S., Kraft, C., Witmer, L., Gumbo, T., & Cudennec, C. (2020) The role of engineers in the effort to achieve SDG 6. IAHR White Paper Series, Madrid, Spain and Beijing, China.
- Gill, A.B and S.N.R Birchenough, A Jones, A. Judds, S. Juda, Paya, A., & B. Wilson (2018) Environmental implications of offshore energy pp.132-169 in *Offshore Energy and Marina Spatial Planning* K.L Yates and C.J.A Braoaw eds. London.
- Goethe, J. W. (1783). *Die Natur: Fragment* (Nature: A Fragment). *Schriften zur Naturwissenschaft: Auswahl*. M. Böhler (Ed.), (originally published in 1783 in *Tiefurter Journal*) (Stuttgart: Philipp Reclam, 1977); pp. 28–31. <http://www.alan-shapiro.com/nature-a-fragment-by-johann-wolfgang-goethe/>
- Habel, M., Mechkin, K., Podgorska, K., Saunes, M., Babinski, Z. Chalov, S., Absalon, D., Podgórski, Z., & Obolewski, K. (2020) Dam and reservoir removal projects: a mix of social-ecological trends and cost-cutting attitudes. *Scientific Reports* 10, 19210
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., & Loucks, D.P. (1982). Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water Resources Systems performance evaluation. *Water Resources Research* 18 (1), 14–20.
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., & Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature climate change*, 3(9), 816-821.
- Hohermuth, B., Boes, R.M., & Felder, S. (2021). High-velocity air–water flow measurements in a prototype tunnel chute: Scaling of void fraction and interfacial velocity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147 (11), p.04021044.

- IHA (2021). Pumped storage tracking tool. www.hydropower.org/hydropower-pumped-storage-tool, London, U.K.
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
- IPCC (2021). Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, U.K.
- Kalyanapu, A., Judi, D., McPherson, T., & Burian, J. (2011). Monte Carlo-based flood modelling framework for estimating probability weighted flood risk. *Journal of Flood Risk Management* 5, 37-48.
- Kazama, S., Sato, A., & Kawagoe, S. (2010). Evaluating the cost of flood damage based on changes in extreme rainfall in Japan. In: *Adaptation and Mitigation Strategies for Climate Change*. Sumi, A., Fukushi, K. & Hiramatsu, A. (eds.). Springer, Tokyo, Japan. doi:10.1007/978-4-431-99798-6_1.
- Kettner, A., Cohen, S., Overeem, I., Fekete, B., Brakenridge, G., & Syvitski, J. (2018). Estimating change in flooding for the 21st century under a conservative RCP forcing: a global hydrological modeling assessment. In: *Global Flood Hazard: Applications in Modeling, Mapping, and Forecasting*. Schumann, G., Bates, P., Apel, H. & Aronica, G. (eds.). AGU Geophysical Monograph Series.
- Koç, C. (2010). A Study on the pollution and water quality modeling of the River Büyük Menderes, Turkey. *Clean-Soil, Air, Water*, Volume 38, No.12, 1169-1176
- Koç, C. (2015). A study on the role and importance of irrigation management in integrated river basin management. *Environmental Monitoring and Assessment*. Volume 187, Issue 8, 488, 1-20.
- Koç, C. (2014). A study on the development of hydropower potential in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 39. 498–508.
- Koç, C. (2011). A Study on construction costs per unit area of irrigation schemes. *Irrigation and Drainage Systems*, Volume 25, Issue 4, pp 255-263.
- Koç, C. (2025). Su kaynaklarında ve su hizmetlerinde iklim değişikliğine uyum. *Mühendislik Alanında Uluslararası Çalışmalar*. Serüven Yayınları. Mart 2025. Birinci Baskı, ISBN: 978-625-5552-77-8: 95-121s
- Kunkel, K., Karl, T., Easterling, D., Redmond, K., Young, J., Yin, X., & Hennon, P. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters* 40 (7), 1402–1408

- Layton, E.T. (1986). *Revolt of the Engineers*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, ML, USA.
- Liggett, J. A. (2002). What is hydraulic engineering? *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (1), 10–19.
- Link, L., & Harris, J. (2007). Hurricane Katrina interagency performance evaluation task force (IPET). In: *World Environmental and Water Resources Congress 2007*. American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/40927(243)609.
- Liu, W., & Son, Z. (2020). Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks. *Reliability Engineering & System Safety* 193, 106617.
- Mays, L. W. (2008). A very brief history of hydraulic technology during antiquity. *Environmental Fluid Mechanics*, 8, 471–484.
- Mendoza, G., Jeuken, A., Matthews, J., Stakhiv, E., Kucharski, J., & Gilroy, K. (2018). *Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA), Collaborative Water Resources Planning for an Uncertain Future*. UNESCO and ICIWaRM, Paris, France, p. 162.
- Milly, P., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R., Kundzewicz, Z., & Lettenmaier, D. P. (2008). Stationarity is dead: whither water management *Science* 319 (5863), 573–574.
- Monteiro, P., Miller, S., Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete. *Nature Materials*. 16, 698–699.
- Nikore, M., Mittal, M. (2021). *Arresting India's water crisis: The economic case for wastewater use*. ORF Issue Brief No. 453, Observer Research Foundation, Delhi, India.
- NRC (National Research Council) (2004). *Adaptive management for water resources project planning*. National Academies Press, Washington DC. 160
- NRC (National Research Council). (2009). *The New Orleans Hurricane Protection System: Assessing Pre-Katrina Vulnerability and Improving Mitigation and Preparedness*. The National Academies Press, Washington, DC, USA. doi:10.17226/12647.
- Oertel, M., & Shen, X. (2022). 3D printing technique for experimental modeling of hydraulic structures: Exemplary scaled weir models. *Water*, 14 (14), p.2153.
- Olsen, R. (2015). *Adapting Infrastructure and Civil Engineering Practice to a Changing Climate*. ASCE Committee on Adaptation to a Changing Climate. doi:10.1061/9780784479193org/10.1007/s10652-008-9095-2

- Payne, J. T., Wood, A. W., Hamlet, A. F., Palmer, R. N., & Lettenmaier, D. P. (2004). Mitigating the Effects of Climate Change on the Water Resources of the Columbia River Basin. *Climatic Change*, 62 (1–3), 233–256.
- Pechlivanidis, I., Arheimer, B., Donnelly, C., Hundecha, V., Huang, S., Aich, V., Samaniego, L., Eisner, S., & Shi, P. (2017). Analysis of hydrological extremes at different hydro-climatic regimes under present and future conditions. *Climatic Change* 141(3), 467–481
- Perera, D., Smakhtin, V., Williams, S., North, T., & Curry, A. (2021). Ageing water storage infrastructure: An emerging global risk. *UNU-INWEH Report Series*, Issue 11. United Nations University Institute for Water, Environment and Health, Hamilton, Canada.
- Pielke, R., & Wilby, R. (2012). Regional climate downscaling: what's the point? *Eos Transactions American Geophysical Union* 93(5), 52–53.
- Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Adams, H., Adler, C., Aldunce, P., Ali, E., Begum, R.A., Betts, R., Kerr, R.B., Biesbroek, R., & Birkmann, J. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. *IPCC Sixth Assessment Report*, pp.37-118.
- Ray, P. A., & Brown, C. M. (2015). Confronting climate uncertainty in water resources planning and project design: The decision tree framework. World Bank, Washington, DC, USA. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22544>.
- Read, L., & Vogel, R. (2015). Reliability, return periods, and risk under non stationarity. *Water Resources Research* 51. doi:10. 1002/2015WR017089.
- Read, L., & Vogel, R. (2016). Hazard function analysis for flood planning under nonstationary. *Water Resources Research* 52. doi:10.1002/2015WR018370.
- Retief, J., Bernardo-Vijoen, C., van der Klashorst, E., & Diamantides, D. (2013). Extreme actions and climate change: experience gained in South Africa and Germany. In: *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures*. Deotides, G., Ellingwood, B. R., & Frangopol, D. M. (eds.). Taylor and Francis Group, London, pp. 1543 1550.
- Rogner, M., & Troja, N. (2018) The world's water battery: Pumped hydropower storage and the clean energy transition. IHA Working paper, London, U.K.
- Rouse, H., & Ince, S. (1957). History of hydraulics. Iowa City, Iowa: Iowa Institute of Hydraulic Research, State University of Iowa.
- Salas, J., Obeysekera, J., & Vogel, R. (2018). Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: a review. *Hydrological Sciences Journal* 63, 325–352.

- Savic, D. (2019). Artificial Intelligence. How can water planning and management benefit from it? IAHR White Paper Series, 1, Madrid, Spain and Beijing, China.
- Schleiss, A. (2017). Better water infrastructures for a better world. The important role of water associations. *Hydrolink*, (3), 86–87.
- Schleiss, A. (2000). The importance of hydraulic schemes for sustainable development in the 21st century. *Hydropower & Dams*, 7(1), 19–24.
- Serago, J., & Vogel, R. (2018). Parsimonious nonstationary flood frequency analysis. *Advances in Water Resources* 112, 1–16.
- Serinaldi, F., & Kilsby, C. (2015). Stationarity is undead: uncertainty dominates the distribution of extremes. *Advances in Water Resources* 77, 17–36
- Stakhiv, E. (2011). Pragmatic approaches for water management under climate change uncertainty. *Journal of American Water Resources Association (JAWRA)* 47(6), 1183–1196.
- Sykora, M., Diamantidis, D., Retief, J., Viljoen, C., & Roszas, A. (2017). On risk-based design of structures exposed to climatic action. In: *Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure*. Bakker, F. & van Breugel (eds.). Taylor & Francis Group, London, pp. 472.
- Sykora, M., Holicky, M., Jung, K., & Diamantidis, D. (2018). Human safety criteria for risk-based structural design. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 8 (2), 287–298.
- Syvitski, J. P. M., Kettner, A. J., Overeem, I., Hutton, E. W. H., Hannon, M. T., Brakenridge, G. R., & Nicholls, R. J. (2009). Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, 2(10), 681–686. <https://doi.org/10.1038/ngeo629>
- Tanchev, L. (2014). *Dams and appurtenant hydraulic structures* (2nd ed.). England: CRC Press.
- TRB (Transportation Research Board) (2019). Applying climate change information to hydrologic and coastal design of transportation infrastructure. NCHRP Project 15-61. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP1561FinalReport.pdf>.
- Tung, Y. -K., Yen, B., & Melching, C. (2006). *Hydrosystems engineering reliability and risk Assessment*. McGraw-Hill, NewYork, NY, p. 483.
- Underwood, B. S., Mascaro, G., Chester, M., Fraser, A., Lopez-Cantu, T., & Samaras, C. (2020). Past and present design practices and uncertainty in climate projections are challenges for designing infrastructure to future conditions. *Journal of Infrastructure Systems* 26 (3),

- Valero, D., Schalko, I., Friedrich, H., Abad, J., Bung, D., Donchyts, G., Felder, S., Ferreira, R., Hohermuth, B., Kramer, M., Li, D., Mendes, L., Moreno-Rodenas, A., Nones, M., Paron, P., Ruiz-Villanueva, V., Wang, R., & Franca, M. (2021). Pathways towards democratization of hydro-environment observations and data. IAHR White Paper Series, 2021, 1, Madrid, Spain and Beijing, China.
- Viollet, P. L. (2007). Water engineering in ancient civilizations: 5000 years of history. IAHR.
- Vogel, R., Yaindl, C., & Walter, M. (2011). Nonstationary: flood magnification and recurrence reduction factors in the United States. *Journal of American Water Resources Association* 47(3), 464–474.
- Wackernagel, M., & Rees, W. (1998). Our ecological footprint: reducing human impact on the earth (Vol. 9). New Society Publishers, Canada.
- Waller, S.T., Kayvani, K., Care, R., & Marshall, L. (2021) Ethical Civil Infrastructure and Sustainable Environments. Vision paper, School of Civil & Environmental Engineering, UNSW Sydney, Australia.
- Watkiss, P., Wilby, R., & Rodgers, C. 2020 Principles of climate risk management for climate proofing projects. ADB Sustainable Development Working Paper Series 69. Manila, Philippines, 34 pp
- Wilby, R., & Dessai, S. (2010). Robust adaptation to climate change. *Weather* 65, 180–185. doi:10.1002/wea.543.
- Yen, B., & Tung, Y.-K. (1993). Reliability and uncertainty analyses in hydraulic design. Subcommittee on Uncertainty and Reliability Analyses in Design of Hydraulic Structures of the Technical Committee on Probabilistic Approaches to Hydraulics, American Society of Civil Engineers, New York, NY, USA, p. 305.
- Yoe, C. (2017). Principles of risk analysis for water resources. U.S. Army Institute for Water Resources. Technical Report TR- 2017-R-01. Fort Belvoi, Alexandria, VA, USA.



Makine Öğrenmesinde Öznitelik Seçimi için Metasezgisel Algoritmaların Kullanımı

Umut Dökmen¹ & Nusin Akram² & Onur Uğurlu³

¹ Bilgisayar Mühendisliği, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, TÜRKİYE
ORCID: 0000-0001-6919-4278

² Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE
ORCID: 0000-0002-6446-4256

³ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE
ORCID: 0000-0003-2743-5939

GİRİŞ

Makine Öğrenmesi (MÖ) algoritmalarının temelinde, girdiler (veri) ve çıktılar arasındaki ilişkileri anlamak ve bu ilişkileri gelecekteki tahminler veya sınıflandırmalar için kullanmak yatar. MÖ algoritmalarının genel işleyişi veri toplama, ön işleme, model oluşturma, model eğitimi ve değerlendirme gibi ardışık adımlardan oluşur. Bu süreç aşağıdaki temel adımlarla özetlenebilir:

- Veri toplama: İlgili problemin çözülmesi için yeterli ve kaliteli verinin toplanmasıdır. Verinin çeşitliliği ve temsil gücü, modelin performansı üzerinde doğrudan etkili olur.

- Veri ön işleme: Toplanan veri genellikle eksik, hatalı veya gürültülü olabilir. Veri ön işleme aşamasında temizleme, normalize etme ve öznitelik seçimi gibi adımlar gerçekleştirilir. Bu adımlar veri kalitesini artırarak modelin daha iyi performans göstermesini sağlar.

- Model seçimi ve eğitimi: Problem türüne göre en uygun MÖ algoritması belirlenir. Bu algoritmalar denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme olarak sınıflandırılabilir. Model eğitimi sırasında algoritma, verilen veriye göre parametrelerini optimize eder.

- Model değerlendirme: Eğitilen model, ayrılmış bir test verisi üzerinde değerlendirilir. Performans metrikleri (doğruluk, hassasiyet, vb.) kullanılarak modelin başarısı analiz edilir.

Bu adımların her biri, modelin genel doğruluğu, genellenebilirliği ve işlem verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle öznitelik seçimi (feature selection), hem ön işleme aşamasının bir parçası hem de model performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Öznitelikler, ham veriden çıkarılan anlamlı temsillerdir ve aşağıdaki nedenlerle önemlidir:

- Anlamlı veri temsili: Ham veriler genellikle karmaşık yapıda olduğu için doğrudan analiz edilmeleri zordur. Öznitelikler, veriyi özetleyerek daha anlamlı ve işlenebilir hale getirir. Bu, algoritmanın daha hızlı ve etkili bir şekilde öğrenmesine yardımcı olur.

- Gereksiz karmaşıklıktan kaçınma: Gereksiz veya alakasız öznitelikler algoritmanın gereksiz karmaşıklığa sahip olmasına ve fazla öğrenmeye (overfitting) neden olabilir. Bu durum algoritmanın genelleme yeteneğini zayıflatır.

- Tahmin gücünü artırma: Doğru öznitelik seti, algoritmanın çıktıları tahmin etme yeteneğini önemli ölçüde artırabilir.

Bu kapsamda öznitelik seçimi, MÖ sürecinin hem ön işleme adımında hem de genel model performansının iyileştirilmesinde temel bir etken olarak öne

çıkılmaktadır. Bu bölümde, MÖ çerçevesinde özniteliklerin rolü ele alınmış; uygun öznitelik seçiminin etkileri ve önemi detaylandırılmıştır. Devamında özellikle yüksek boyutlu ve karmaşık veri setlerinde öznitelik seçimi problemine çözüm sunmada etkili olan metasezgisel algoritmaların katkıları açıklanmış; literatürde bu amaçla yaygın olarak kullanılan çeşitli metasezgisel algoritmalar tanıtılmış ve etkinlikleri incelenmiştir.

ÖZNİTELİK SEÇİMİ PROBLEMİ

Öznitelik seçimi, yalnızca modelin doğruluğunu artırmakla kalmaz; aynı zamanda yorumlanabilirliği iyileştirir, işlem süresini azaltır ve aşırı öğrenme riskini düşürerek genelleme yeteneğini artırır (Rostami vd., 2021). Bu süreç, bir veri setinde yer alan tüm öznitelikler arasında en anlamlı olanların belirlenerek kullanılması esasına dayanır. Gereksiz veya alakasız özniteliklerin elenmesi, modelin daha doğru tahminler yapmasını sağlarken; daha az sayıda öznitelikten oluşan bir yapı, eğitim ve test sürecinin daha hızlı ve verimli gerçekleşmesine katkı sunar. Aynı zamanda, daha sade modellerin kullanıcılar tarafından anlaşılması da kolaylaşır. Özellikle yüksek boyutlu veri setlerinde, anlamlı özniteliklerin seçimi sayesinde modelin gereksiz bilgiyle yüklenmesi engellenir ve böylece daha dengeli, genellenebilir sonuçlar elde edilir.

Öznitelik seçimi, yüksek boyutlu verilerle çalışılan pek çok alanda model başarımını artırmak ve anlamlı bilgi elde etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle biyoinformatik, metin madenciliği, duygu analizi ve tıbbi teşhis gibi alanlarda, veri setlerinde yer alan çok sayıda özelliğin yalnızca bir kısmı sınıflandırma veya tahmin performansına anlamlı katkı sağlar. Bu nedenle, ilgili problem için en bilgilendirici özniteliklerin belirlenmesi hem model doğruluğunu artırmakta hem de sonuçların alan uzmanları tarafından daha kolay yorumlanmasını sağlamaktadır. Örneğin, tıbbi veri analizlerinde binlerce genetik öznitelik arasından yalnızca hastalıkla doğrudan ilişkili olan küçük bir alt kümenin seçilmesi, hem daha yalın ve etkili modellerin oluşturulmasına olanak tanımakta hem de klinik açıdan daha anlamlı sonuçların elde edilmesine katkı sunmaktadır (Meenachi ve Ramakrishnan, 2021). Benzer şekilde, finansal veri analizi gibi sayısal özniteliklerin yoğun olduğu uygulamalarda da yalnızca piyasa hareketlerini etkileyen göstergelerin seçilmesi; hem modelin karmaşıklığını azaltmakta hem de daha isabetli tahminler yapılmasına olanak tanımaktadır. Örneğin, onlarca ekonomik değişken içeren bir veri setinde yalnızca faiz oranı, enflasyon ve döviz kuru gibi temel göstergelerin dikkate alınması, gereksiz değişkenlerin modele dahil edilmesini engelleyerek tahmin doğruluğunu artırabilir.

Bununla birlikte, öznitelik seçimi problemi teorik ve pratik açıdan bazı önemli zorluklar barındırmaktadır. Özellikle öznitelik sayısının fazla olduğu veri setlerinde, anlamlı alt kümelerin belirlenmesi oldukça karmaşık bir hale gelir.

Çünkü n adet öznitelikten oluşan bir veri kümesinde, olası alt kümelerin sayısı 2^n kadar olup bu sayı öznitelik sayısı arttıkça üssel biçimde büyür. Bu durum, arama uzayının genişliği nedeniyle geleneksel yöntemlerin yeterli olmadığı noktada alternatif çözüm yollarına ihtiyaç duyulur. Bu noktada, özellikle metasezgisel algoritmalar, yüksek boyutlu problemlerde arama uzayını verimli biçimde tarama kapasiteleri sayesinde öne çıkar. Metasezgisel yöntemler, geleneksel deterministik yaklaşımların aksine, rastlantısal ve sezgisel stratejilerle çalışarak, global optimuma yakın sonuçlara ulaşmayı hedefler. Bu özellikleriyle, çok boyutlu ve doğrusal olmayan ilişkilerin bulunduğu öznitelik seçim problemleri için güçlü araçlar sunarlar.

ÖZNİTELİK SEÇİMİNDE METASEZGİSEL ALGORİTMALAR

Metasezgisel algoritmalar, geniş bir optimizasyon problemi yelpazesinde uygulanabilen, problemten bağımsız ve esnek yapılarıyla dikkat çeken yöntemlerdir. ‘Meta’ terimi, bu algoritmaların genel ve üst düzey doğasını; ‘sezgisel’ ise deneyim temelli arama stratejileri kullandıklarını ifade eder. Doğadan, fizikten ya da insan davranışlarından ilham alan bu algoritmalar, özellikle karmaşık ve yüksek boyutlu çözüm uzaylarında global optimuma ulaşma potansiyelleriyle, geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda öne çıkar.

Bu algoritmaların temel başarısı, çözüm uzayını etkili biçimde tarayan keşif ve potansiyel çözümlerin bulunduğu bölgelerde yapılan derinlemesine arama süreçleri arasında kurdukları dengeden kaynaklanır. Örneğin, genetik algoritmalarda mutasyon işlemi keşfi desteklerken, çaprazlama işlemi derinlemesine aramaya katkı sağlar. Benzer biçimde, parçacık sürüsü optimizasyonunda parçacıkların hem bireysel hem de toplu bilgiye dayalı hareket etmesi bu dengeyi korur. Rastgelelik, algoritmaların yerel optimumlara takılmadan daha geniş çözüm alanlarını keşfetmesini sağlarken; adaptasyon, çevresel değişimlere uyum sağlayarak daha nitelikli çözümler üretilmesine katkı sunar. Örneğin, karınca kolonisi optimizasyon algoritmasında feromon izlerinin rastgele güncellenmesi ve zamanla daha iyi çözümlere yoğunlaşması bu sürecin işleyişini göstermektedir.

Metasezgisel algoritmaların öne çıkan avantajları arasında esneklik (flexibility), ölçeklenebilirlik (scalability), yerel optimumdan kaçınma (avoidance of local optima) ve dengeli bir keşif–derinlemesine arama (exploration–exploitation) mekanizması yer alır. Bu özellikler, söz konusu algoritmaları büyük veri setleri ve yüksek boyutlu problemler için etkili araçlar hâline getirmektedir. Özellikle genetik algoritmalar ve parçacık sürüsü optimizasyonu gibi yöntemler, işlem süresi açısından sağladıkları avantajlar nedeniyle öznitelik seçimi problemlerinde yaygın biçimde tercih edilmektedir (Rostami vd., 2021).

Bu bölümde, çeşitli metasezgisel algoritmaların öznitelik seçimi problemlerindeki uygulamaları ele alınmaktadır. Öznitelik seçimi, yüksek boyutlu veri setlerinde sınıflandırma doğruluğunu artırmak, modelin yorumlanabilirliğini iyileştirmek ve işlem maliyetlerini azaltmak amacıyla, gereksiz veya alakasız özniteliklerin elenmesini hedefleyen zorlu bir optimizasyon problemidir. Geniş ve karmaşık çözüm uzaylarına sahip bu tür problemler, geleneksel yöntemlerle etkili biçimde çözülememekte; bu nedenle esnek yapıları ve güçlü arama kabiliyetleri sayesinde metasezgisel algoritmalar ön plana çıkmaktadır.

Metasezgisel algoritmalar, bu süreçte farklı stratejiler benimseyerek çözümler üretir ve çoğunlukla bir uygunluk fonksiyonu üzerinden değerlendirilir. Bu fonksiyonlar; model doğruluğu, seçilen öznitelik sayısı ve hesaplama süresi gibi ölçütleri dikkate alarak optimal veya Pareto-optimal çözümlerin elde edilmesine yardımcı olur. Özellikle çok amaçlı optimizasyon gerektiren durumlarda (hem model başarımını artırmak hem de minimum sayıda öznitelik kullanmak) metasezgisel yaklaşımlar kullanıcıya dengeleyici ve esnek çözümler sunar (Sharma ve Kaur 2021, Priyadarshini vd., 2023).

İzleyen alt bölümlerde öznitelik seçimi problemine yönelik olarak en çok tercih edilen bazı metasezgisel algoritmalar detaylı bir şekilde ele alınacak; bu algoritmaların temel yapıları, öznitelik seçimi sürecine nasıl uyarlanabildikleri ve performansları örnek çalışmalarla birlikte açıklanacaktır.

Genetik Algoritmalar

Holland (1975) tarafından önerilen Genetik Algoritmalar (GA), biyolojik evrimde olduğu gibi doğal seleksiyon, genetik çeşitlilik ve adaptasyon mekanizmalarını taklit ederek problem çözme yeteneği sunar. Genetik algoritmalarda her birey, bir çözümü temsil eden genetik bir yapıya sahiptir ve bu bireylerden oluşan bir popülasyon üzerinden çözüm arayışı yürütülür. Popülasyondaki bireyler, belirli bir uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirilir. Yüksek uygunluğa sahip bireyler, yeni nesillere genetik bilgilerini aktarırken, düşük uygunluğa sahip olanlar elenir. Evrimsel süreç seçim, çaprazlama (rekombinasyon) ve mutasyon gibi genetik operatörler aracılığıyla ilerler. Seçim işlemi, daha uygun bireyleri ön plana çıkarırken; çaprazlama, bu bireylerin genetik özelliklerini birleştirerek yeni çözüm adayları üretir. Mutasyon ise küçük, rastgele değişikliklerle çeşitliliği artırır ve algoritmanın daha geniş bir çözüm uzayını keşfetmesini sağlar. Bu yapı, zamanla daha iyi çözümlere ulaşmayı sağlayan iteratif bir süreci mümkün kılar. Özellikle büyük ve karmaşık çözüm uzaylarında etkili çözümler üretebilirler. Aynı zamanda değişken ortamlarda da uyum sağlayarak çözüm üretmeye devam edebilirler. Bu yönleriyle genetik algoritmalar, yapay zekâ ve optimizasyon alanlarında yaygın olarak kullanılan güçlü araçlar arasında yer alır.

Kannan (2018) çalışmasında, farklı görsel temsillerden oluşan büyük ve çeşitli bir veri kümesi üzerinde öznitelik seçiminin etkisi incelenmiştir. Kullanılan PACS veri seti, 9991 görüntü ve 984 öznitelikten oluşmakta olup, tüm özniteliklerin bir arada kullanılması hem işlem süresini uzatmakta hem de model performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, GA kullanılarak en uygun öznitelik alt kümelerinin seçilmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında Rastgele Orman (RO), Destek Vektör Makineleri (DVM) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) olmak üzere üç farklı algoritma değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, RO algoritması öznitelik seçimine karşı daha duyarsız kalırken; DVM'nin doğruluk oranı %81'den %90'a, YSA'nın ise %73'ten %90'a yükselmiştir. Ali ve arkadaşları (2019), elektroensefalografi (EEG) verileri üzerinde göz durumu sınıflandırması yapmak amacıyla genetik algoritma tabanlı bir öznitelik seçimi yöntemi önermiştir. Çalışmada, biri 15 öznitelikli 14.977 örnekten, diğeri ise 179 öznitelikli 11.500 örnekten oluşan iki farklı veri seti kullanılmıştır. Çalışmada GA ile k-en Yakın Komşu (k-NN) (k Nearest Neighbor) algoritması birlikte kullanılarak en uygun öznitelik alt kümesi seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar, GA ile seçilen öznitelik alt kümesiyle yapılan sınıflandırmalarda doğruluğun, tüm özniteliklerin kullanıldığı duruma göre ortalama %3 oranında arttığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, GA'nın öznitelik seçiminde etkili bir yöntem olduğunu ve özellikle belirli sınıflandırma algoritmalarının performansını anlamlı ölçüde artırabileceğini göstermektedir.

Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) (Particle Swarm Optimization), kuş ya da balık sürüleri gibi sürülerin kolektif zekasını taklit eden bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu yöntemde, her çözüm adayı “parçacık” olarak adlandırılır ve çözüm uzayında belirli bir hızla hareket eder. Parçacıklar, hız ve konumlarını uygunluk fonksiyonuna göre günceller. Bu hareket, parçacığın kendi ulaştığı en iyi çözüm ile sürü genelinde elde edilen en iyi çözüm dikkate alınarak yönlendirilir. PSO, GA gibi evrimsel bir yapıya sahiptir; ancak genetik bilgilerle çalışmak yerine, sürü içi bilgi paylaşımıyla yönlenir. Bu özelliği sayesinde, özellikle sürekli değişkenli optimizasyon problemlerinde başarılı sonuçlar verir. Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından geliştirilen PSO, geniş çözüm uzaylarında hızlı ve etkili sonuçlar üretme potansiyeline sahiptir. İlk olarak yapay sinir ağlarının eğitimi için geliştirilmiş olsa da zamanla pek çok farklı alanda uygulanmaya başlanmıştır.

Liu ve arkadaşları (2011), öznitelik seçimi problemi için Parçacık Sürüsü Optimizasyonu tabanlı yeni bir yaklaşım önermiştir. Geliştirilen yöntem, klasik PSO algoritmasındaki yerel en iyi çözüme sıkışma ve erken yakınsama gibi sorunları azaltmak amacıyla farklı hız ve konum güncelleme stratejileri ile küresel arama yeteneğini artırmaktadır. Ayrıca, önerilen İyileştirilmiş PSO

(IPSO) yöntemi, öznitelik seçim sürecine özel olarak tasarlanarak, çözüm uzayında daha etkili ve hızlı bir şekilde yüksek kaliteli alt kümeler bulabilmektedir. Yapılan deneylerde, IPSO algoritması, geleneksel PSO ve GA gibi diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında hem daha az sayıda öznitelikle daha yüksek sınıflandırma doğruluğu sağlamış hem de genel performansta istatistiksel olarak anlamlı üstünlük göstermiştir.

Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu

Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu (BAO) (Bacterial Foraging Optimization), Passino (2002) tarafından önerilen, doğadan esinlenen bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu yöntem, bakterilerin doğada besin ararken izlediği stratejileri matematiksel bir modelle taklit eder ve optimizasyon problemlerine çözüm sunmayı amaçlar. Algoritmanın temelinde, bakterilerin çevrelerini keşfetme, besin kaynaklarına yönelme ve olumsuz ortamlardan kaçınma davranışları yer alır. BAO dört temel adımdan oluşur: kemotaksi (chemotaxis), üreme (reproduction), eliminasyon (elimination) ve dağılım (dispersal). Kemotaksi adımı bakteriler, daha yoğun besin kaynaklarına doğru hareket ederken toksik ortamlardan uzaklaşmaya çalışır. Bu hareketler bazen rastgele, bazen yönlendirilmiş olur. Üreme aşamasında başarılı bakteriler çoğaltılırken, düşük performanslılar elenir; böylece popülasyon genelinde güçlü bireyler baskın hâle gelir. Eliminasyon ve dağılım adımı ise bazı bakteriler rastgele yeni konumlara yerleştirilerek algoritmanın yerel maksimumlara sıkışması önlenir. BAO, sürü zekâsına dayalı diğer yöntemlerle benzerlik gösterir ve özellikle karmaşık çözüm uzaylarında etkili sonuçlar üretebilir.

Niu ve arkadaşları (2021), Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu (BAO) algoritmasını öznitelik seçimi problemleri için çok amaçlı bir optimizasyon yöntemi olarak uyarlamışlardır. Çalışmanın temel amacı, 2.309 ile 15.009 arasında değişen özniteliklere ve 50 ila 308 örneğe sahip veri kümelerinde, gereksiz öznitelikleri eleyerek makine öğrenmesi modellerinin performansını artırmaktır. Deneysel sonuçlar, bu çok amaçlı yaklaşımın, geleneksel tek amaçlı öznitelik seçimi yöntemlerine kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Örneğin, Wine veri kümesinde tüm 13 öznitelikle %23,46 hata oranı elde edilirken, yalnızca 5 öznitelik kullanıldığında bu oran %3,77'ye düşmüştür. Benzer şekilde, 9_Tumors veri kümesinde 5.726 öznitelikle %57,59 hata oranı gözlenmişken, seçilen 48 öznitelikle hata oranı %11,11'e kadar gerilemiştir. Bu sonuçlar, özellikle tıp ve biyoinformatik gibi yüksek boyutlu veri içeren alanlarda BAO'nun öznitelik seçimi için etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Yapay Arı Koloni Algoritması

Yapay Arı Koloni (YAK) (Artificial Bee Colony) algoritması, bal arılarının doğada yiyecek kaynağı arama ve bilgi paylaşma davranışlarından esinlenilerek geliştirilen, doğaya dayalı bir metasezgisel optimizasyon yöntemidir. Karaboga (2005) tarafından geliştirilen bu algoritma, özellikle çok boyutlu, süreksiz ve doğrusal olmayan problemler için etkili çözümler sunmasıyla öne çıkar. YAK'ta her çözüm adayı bir yiyecek kaynağı olarak temsil edilir ve bu kaynaklar, arıların etkileşimleriyle her iterasyonda güncellenir. Arı kolonisi üç gruptan oluşur: işçi arılar (employed bees), gözcü arılar (onlooker bees) ve keşifçi arılar (scout bees). İşçi arılar, belirli bir yiyecek kaynağına atanır, bu kaynağın uygunluk değerini (fitness) değerlendirir ve yerel arama yoluyla mevcut çözümün çevresinde yeni alternatifler üretir. Gözcü arılar ise kovan içinde kalarak, işçi arıların paylaştığı bilgilere göre yüksek kaliteli kaynaklara yönelir; bu süreç, algoritmanın derinlemesine arama yeteneğini temsil eder. Eğer bir kaynak belirli bir süre boyunca iyileştirilemezse, terk edilir ve o kaynağa bağlı işçi arı, keşifçi arıya dönüşerek rastgele yeni bir kaynak arar. Bu davranış, algoritmanın keşif kabiliyetini güçlendirir. Her iterasyonda algoritma, işçi arıların mevcut kaynakları değerlendirmesi, gözcü arıların yönelimi ve keşifçi arıların yeni kaynak arayışı adımlarını takip eder. İlerleyen iterasyonlar boyunca en iyi çözüm sürekli güncellenir ve algoritma küresel optimuma ulaşmayı hedefler. YAK'ın basit yapısı, düşük parametre gereksinimi ve yüksek başarı potansiyeli, onu birçok karmaşık optimizasyon problemi için tercih edilen bir yöntem haline getirmiştir.

Palanisamy ve arkadaşları (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, YAK algoritması öznitelik seçimi problemine uygulanmıştır. Önerilen yöntemde, her bir işçi arı bir özniteliği temsil ederken, gözcü arılar farklı öznitelik kombinasyonlarını değerlendirerek en uygun alt kümeleri belirlemiştir. Bu süreçte, her öznitelik alt kümesinin başarımı, Karar Ağacı (KA) (Decision Tree) algoritması kullanılarak ölçülmüş ve elde edilen doğruluk oranı, öznitelik kombinasyonunun uygunluğunu belirlemek için kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, UCI veri deposundan seçilen 10 farklı veri kümesi üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, YAK algoritmasının öznitelik sayısını azaltırken sınıflandırma başarımını koruyabildiğini ya da artırdığını göstermektedir. Örneğin, “Dermatology” veri kümesinde toplam 34 öznitelikten yalnızca 24’ü seçilmiş ve %98,55 doğruluk elde edilmiştir. Benzer şekilde, “Pima Indian Diabetes” veri kümesinde 8 öznitelikten 6’sı seçilmiş ve %90,08 doğruluk oranına ulaşılmıştır. Ayrıca, YAK tabanlı öznitelik seçimi yöntemi, diğer metasezgisel yöntemlerle karşılaştırılmış ve bazı veri kümelerinde daha az sayıda öznitelikle daha yüksek doğruluk oranlarına ulaştığı görülmüştür. Bu sonuçlar, YAK algoritmasının hem veri boyutunu azaltmada hem de sınıflandırma

doğruluğunu artırmada güçlü bir araç olduğunu ortaya koymakta ve öznitelik seçimi problemlerinde uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Kiril Sürü Algoritması

Kril Sürü Algoritması (KSA) (Krill Herd Algorithm), Gandomi ve arkadaşları (2012) tarafından geliştirilmiş doğadan esinlenen bir metasezgisel optimizasyon yöntemidir. Algoritma, kril sürülerinin besin arama ve sosyal etkileşim davranışlarını taklit ederek karmaşık problemleri çözmeyi amaçlar. Bu yöntemde her kril bireyi, çok boyutlu çözüm uzayında potansiyel bir çözüm olarak temsil edilir. Her bireyin hareketi üç temel bileşene dayanır: sosyal etkileşim, hedefe yönelim ve rastgele difüzyon. Sosyal etkileşim bileşeni, bir krilin çevresindeki diğer kril bireylerinin konumlarına göre yönünü ayarlamasını sağlar. Bu sayede kriller, daha iyi çözümlere doğru birlikte hareket ederek kolektif bir arama süreci yürütür. Hedefe yönelim, bireyin küresel en iyi çözüme doğru hareket etmesini sağlar ve algoritmanın belirli bir çözüme doğru odaklanmasına yardımcı olur. Rastgele difüzyon ise her bireyin hareketine belli bir oranda rastlantısallık katarak çözüm çeşitliliğini korur ve algoritmanın yerel minimumlarda takılmasını engeller. Bu üç hareket bileşeni her iterasyonda güncellenerek, bireylerin konumları sürekli olarak yenilenir. Böylece algoritma, çözüm uzayında daha iyi sonuçlara ulaşmak için hem keşif hem derinlemesine arama dengesini kurarak ilerler.

Abualigah ve arkadaşları (2021) çalışmalarında, KSA'yı yüksek boyutlu veri kümelerinde öznitelik seçimi problemini çözmek amacıyla geliştirmiş ve bu algoritmayı paralel hibrit bir yapıda uygulamışlardır. Çalışmada önerilen yaklaşım, KSA'nın keşif ve derinlemesine arama dengesini iyileştirmek amacıyla GA ve PSO gibi diğer metasezgisel yöntemlerle birleştirilmiştir. Böylece daha hızlı ve daha isabetli sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. Algoritmada uygunluk fonksiyonu olarak hem sınıflandırma doğruluğu hem de seçilen öznitelik sayısı dikkate alınmıştır. Amaç, mümkün olan en az sayıda öznitelikle en yüksek doğruluğu yakalamaktır. Paralel yapı sayesinde algoritma aynı anda birden fazla çözüm üzerinde işlem yaparak hem işlem süresini azaltmış hem de büyük veri kümelerinde daha iyi ölçeklenebilirlik sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin hem öznitelik sayısını azaltmada hem de sınıflandırma başarımını artırmada etkili olduğunu göstermiştir. Sınıflandırma doğruluğu açısından GA %54,32, PSO %56,56 doğruluk sağlarken, KSA %56,94 doğruluğa ulaşmıştır.

Sosyal Örümcek Optimizasyon Algoritması

Sosyal Örümcek Optimizasyon (SÖO) (Social Spider Optimization), James ve Bernhard (2015) tarafından geliştirilmiş, doğadan esinlenen bir metasezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bu yöntem, sosyal örümcek kolonilerinin doğadaki

yaşam tarzı ve kolektif etkileşimlerinden esinlenir. Algoritmada her bir örümcek, çözüm uzayında bir potansiyel çözümü temsil eder ve bireyler cinsiyete göre dişi ve erkek olmak üzere iki gruba ayrılır. Dişi örümcekler, kolonideki sosyal yapının temel taşıdır; diğer bireylerle sürekli etkileşim halindedirler ve konumlarını, çevrelerindeki bireylerin yerlerine ve uygunluklarına bağlı olarak güncellerler. Bu etkileşim, örümcek ağı üzerindeki titreşimler aracılığıyla gerçekleşir. Titreşimler, çözüm uzayındaki diğer bireylerin konumları ve elde ettikleri başarıya göre hesaplanır. Dişiler, bu titreşimleri algılayarak kendilerini daha uygun çözümlere doğru yönlendirir. Erkek örümcekler ise algoritmanın evrimsel yönünü temsil eder. Popülasyondaki en başarılı dişi bireylerle eşleşme eğilimindedirler ve bu eşleşmeler yeni bireylerin (yeni çözümlerin) oluşmasına katkı sağlar. Bu sayede popülasyona genetik çeşitlilik katılır ve çözüm uzayının daha geniş alanları etkin şekilde taranabilir. SÖO, doğadaki sosyal iş birliği, bilgi paylaşımı ve üreme davranışlarını modelleyerek, global optimum çözümlere ulaşmayı hedefler.

Baş ve Ülker (2020) tarafından yayımlanan çalışmada, Sosyal Örümcek Optimizasyon (SÖO) algoritması öznelik seçimi problemleri için uyarlanmış ve bu amaçla algoritmanın ikili versiyonunu (İSÖOA) geliştirilmiştir. Ayrıca, İSÖOA'nın keşif ve derinlemesine arama yeteneklerini artırmak amacıyla algoritmaya bir çaprazlama operatörü entegre edilmiş ve bu geliştirilmiş versiyon İSÖOA-CR olarak adlandırılmıştır. Çalışmada her iki algoritma, 21 farklı veri kümesi üzerinde test edilmiştir. Örneğin, "Arrhythmia" veri kümesinde İSÖOA-CR algoritması 279 öznelikten yalnızca 10'unu seçerek %94,5 sınıflandırma doğruluğuna ulaşmıştır. Benzer şekilde, "Lung Cancer" veri kümesinde 56 öznelikten sadece 12'sini kullanarak %96,2 doğruluk oranı elde etmiştir. Ayrıca, diğer popüler metasezgisel yöntemlerle karşılaştırıldığında, İSÖOA-CR hem daha hızlı yakınsama sağlamış hem de daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Bu sonuçlar, İSÖOA-CR algoritmasının gereksiz öznelikleri başarıyla eleyebildiğini ve sınıflandırma performansını artırırken aynı zamanda hesaplama maliyetini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

Balina Optimizasyon Algoritması

Balina Optimizasyon Algoritması (BOA) (Whale Optimization Algorithm), Mirjalili ve Lewis (2016) tarafından geliştirilen, doğadan esinlenen bir metasezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bu yöntem, kambur balinaların avlanma sırasında kullandığı baloncuk ağı (bubble-net) stratejisinden ilham alır ve çözüm uzayında etkili bir şekilde gezinmeyi amaçlar. Algoritmada her balina (birey) potansiyel bir çözümü temsil eder. BOA üç temel davranış biçimiyle çalışır: sarmalama (encircling prey), spiral hareket (spiral updating position) ve avın yerini keşfetme (search for prey). Sarmalama aşamasında balinalar, en iyi bilinen çözümün etrafında konumlarını güncelleyerek onu çevrelemeye çalışır;

spiral hareketle bireyler bu çözüm çevresinde döngüsel yollar izleyerek yön ve mesafe açısından daha esnek bir arama gerçekleştirir; keşif aşamasında ise bireyler rastgele seçilen diğer bireyleri takip ederek çözüm uzayının farklı bölgelerini tarar. Bu stratejiler, rastgelelik ve parametre ayarlarıyla dengelenerek hem keşif hem de derinlemesine arama süreçlerinin dengeli şekilde yürütülmesini sağlar. BOA'nın basit yapısı, az sayıda ayarlanması gereken parametreye sahip olması ve yüksek çözüm kalitesi sunması, onu özellikle karmaşık optimizasyon problemleri için etkili ve pratik bir araç haline getirmiştir.

Sharawi ve arkadaşları (2017) tarafından yürütülen çalışmada, BOA öznitelik seçimi problemini çözmek amacıyla uygulanmıştır. Bu çalışmada BOA, k-NN algoritması ile entegre edilerek kullanılmıştır. Çalışmada, BOA'nın performansı GA ve PSO gibi yaygın metasezgisel yöntemlerle karşılaştırılmış ve algoritma 16 farklı UCI (Machine Learning Repository) veri seti üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, BOA'nın hem daha yüksek sınıflandırma doğruluğu sağladığını hem de daha az sayıda öznitelikle bu başarıyı elde ettiğini göstermiştir. Örneğin, "Australian" veri setinde BOA ortalama 0,1463 fitness değeri, %16,1 doğruluk oranı ve %15,8 seçilen öznitelik oranı ile başarılı sonuçlar üretmiştir. Bu bulgular, BOA'nın öznitelik seçimi problemlerine güçlü ve etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Karga Arama Algoritması

Karga Arama Algoritması (KAA) (Crow Search Algorithm), Askarzadeh (2016) tarafından geliştirilen, doğadan esinlenen bir metasezgisel optimizasyon yöntemidir. Algoritma, kargaların yiyeceklerini saklama ve diğer kargaların sakladığı yiyecekleri bulma davranışını model alır. Her birey, yani her karga, önceki en iyi deneyimlerine göre hareket eder ve bu bilgileri belleğinde saklayarak yeni çözüm noktalarına yönelir. Algoritma, temel olarak bir karga topluluğunun bellek tabanlı arama stratejisi ile çalışmasını modeller. KAA'nın temelinde bellek kullanımı, keşif ve derinlemesine arama süreçleri yer alır. Her iterasyonda, kargalar kendi belleğindeki en iyi konuma yönelir ya da belli bir olasılıkla başka bir karganın en iyi konumunu izlemeye çalışır. Bu takip sürecinde, hedef bireyin farkındalık düzeyi önemli bir rol oynar. Farkındalık olasılığı yüksekse, kargalar hedefin takip edildiğini fark edip yön değiştirerek rastgele keşif yapar; farkındalık düşükse, mevcut hedef doğrultusunda daha kararlı bir şekilde ilerlenir. Bu mekanizma sayesinde algoritma, hem geniş bir arama alanında yeni çözümler keşfedebilir hem de mevcut iyi çözümlere odaklanarak yerel aramada etkin olabilir. KAA, bu çift yönlü stratejisiyle, özellikle çok boyutlu ve karmaşık çözüm uzaylarında etkili sonuçlar üretebilen bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Ouadfel ve Elaziz (2020), KAA'nın geliştirilmiş bir versiyonunu öznitelik seçimi problemine uyarlamıştır. Bu çalışmada, kargaların bellek mekanizması

optimize edilmiş ve uygunluk fonksiyonuna dayalı dinamik bir öğrenme stratejisi eklenmiştir. Ayrıca, klasik KAA'da karşılaşılan yerel maksimumlara takılma sorununu azaltmak için adaptif bir farkındalık parametresi kullanılmıştır. Geliştirilen bu yeni versiyon, daha az sayıda öznitelik kullanarak yüksek sınıflandırma doğruluğu elde etmeyi hedeflemektedir. Çeşitli makine öğrenimi sınıflandırıcılarıyla yapılan testlerde, önerilen yöntem KOA ve PSO vğibi yaygın metasezgisel yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen KAA tabanlı yaklaşımın ortalama %92,20 doğruluk oranı ile en yüksek başarıyı gösterdiğini ortaya koymuştur.

Yusufçuk Algoritması

Yusufçuk Algoritması (YA) (Dragonfly Algorithm), doğadaki yusufçukların avlanma ve göç davranışlarını taklit eden bir metasezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Mirjalili (2016) tarafından geliştirilen bu yöntem, özellikle ayrık optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Yusufçuk Algoritması, beş temel kurala dayanarak çalışır: ayrılma (separation), hizalanma (alignment), uyum (cohesion), besin kaynağına yönelme (attraction to food source) ve düşmandan uzaklaşma (distraction from enemy). Yakınsama, bireylerin birbirine fazla yaklaşmadan hareket etmesini sağlar; bu, çözümlerin çeşitliliğini artırır. İtme, bireylerin aynı yönde hareket etmesini sağlayarak çözümlerin belirli bir stratejik çizgiye yönelmesini mümkün kılar. Uyum, bireylerin grup merkezine yönelmesini sağlar ve bu sayede çözümler bir arada kalır. Bağlılık kuralı, bireylerin en iyi çözüme doğru yönelmesini teşvik ederken, beslenme kuralı ise tehlikeli bölgelerden uzaklaşmayı sağlayarak kötü çözümlerden kaçınmaya yardımcı olur. Bu kurallar sayesinde algoritma, çözüm uzayında dengeli bir keşif ve derinlemesine arama yapısı kurar ve hem yeni çözüm bölgelerini keşfetme hem de iyi çözümlere odaklanma yeteneğine sahip olur.

Jingwei Too ve arkadaşları (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Yusufçuk Algoritması, öznitelik seçimi problemine uyarlanmıştır. Bu çalışmada, YA'nın arama davranışını ve yerel optimumdan kaçınma yeteneğini geliştirmek için hiper öğrenme stratejisi entegre edilerek Hiper Öğrenme İkili Yusufçuk Algoritması (HÖİYA) önerilmiştir. HÖİYA, yusufçukların davranışlarına ek olarak kelebeklerin koku alma mekanizmalarını taklit eden bir yapı ile arama uzayında daha etkili gezinmeyi ve en uygun öznitelik alt kümelerini bulmayı amaçlar. Önerilen yöntem, iki farklı üniversiteden alınan 21 veri kümesi üzerinde test edilmiş ve PSO, GA gibi toplam sekiz farklı metasezgisel yöntemle karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, HÖİYA 21 veri kümesinin 16'sında en iyi uygunluk değerine ulaşmıştır. Ayrıca HÖİYA, COVID-19 veriseti üzerinde de uygulanmış ve %92,21 sınıflandırma doğruluğu ile en iyi sonucu vermiştir. Bu bulgular, HLBDA'nın öznitelik seçimi

problemlerinde etkili bir yöntem olduğunu ve makine öğrenmesi modellerinin başarımını artırmada değerli bir araç olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Çoklu Evren Optimizasyonu

Çoklu Evren Optimizasyonu (ÇEO) (Multi-Verse Optimizer), Mirjalili ve arkadaşları (2016) tarafından geliştirilen, doğadan ve kozmolojiden ilham alan bir metasezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bu yöntem, evrenin genişleme prensiplerine dayanan çoklu evren teorisine dayanır. MVO’da her bir evren bir çözüm adayını temsil eder ve bu evrenlerin kalitesi, yani çözüm başarımı, bir tür genişleme oranı (inflation rate) ile ölçülür. Algoritmanın temel yapısı, üç önemli kozmolojik kavramla modellenmiştir: beyaz delikler (white holes), kara delikler (black holes) ve solucan delikleri (wormholes). Beyaz delikler, yüksek kaliteli evrenlerden (iyi çözümlerden) bilgi aktarımını temsil ederken, kara delikler düşük kaliteli evrenlerin bu bilgileri almasını sağlar. Bu mekanizma, daha iyi çözümlerin yayılmasını ve diğer bireylerin bu bilgiden faydalanarak gelişmesini sağlar. Öte yandan, solucan delikleri, evrenlerin (yani çözüm adaylarının) rastgele konumlara sıçramasına olanak tanıyarak çözüm uzayında keşif (exploration) yapma yeteneğini artırır ve algoritmanın yerel minimumlara takılmasını engeller. CEO’da tüm evrenler problem uzayında rastgele başlatılır ve her iterasyonda beyaz delik–kara delik mekanizması ile bilgi akışı, solucan deliği hareketleriyle ise çeşitlilik sağlanır. En iyi evren sürekli olarak izlenir ve iterasyonlar boyunca geliştirilerek en iyi çözüme ulaşılır.

Faris ve arkadaşları (2018) gerçekleştirdiği çalışmada, CEO algoritması hem öznitelik seçimi hem de DVM için hiperparametre optimizasyonu amacıyla bütünsel bir yapıda uygulanmıştır. Bu çift amaçlı yaklaşım, bir yandan veri boyutunu azaltarak daha hızlı ve yalın modeller oluşturmayı, öte yandan sınıflandırma doğruluğunu en üst düzeye çıkarmayı hedeflemiştir. Bu çalışmada her çözüm adayı bir evren olarak modellenmiş ve bu evrenin genetik yapısı hem seçilen öznitelikleri hem de DVM’ye ait hiperparametreleri içerecek şekilde yapılandırılmıştır. Yöntem, on farklı UCI veri kümesi üzerinde test edilmiş ve sonuçlar, diğer popüler optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Örneğin, Heart Disease veri kümesinde özniteliklerin %50’si elenmesine rağmen, sınıflandırma doğruluğu %95,33 seviyesinde korunmuştur. Breast Cancer veri kümesinde ise %98,24 gibi dikkat çekici bir doğruluk elde edilmiştir. Ayrıca, CEO tabanlı bu yaklaşım, diğer yöntemlere kıyasla daha hızlı yakınsama göstermiştir. Çalışmanın sonuçları, MVO’nun esnek yapısıyla hem öznitelik seçimi hem de hiperparametre ayarlaması gibi iki önemli görevi aynı anda başarıyla yerine göstermektedir.

Çekirge Optimizasyon Algoritması

Çekirge Optimizasyon Algoritması (ÇOA) (Grasshopper Optimization Algorithm), Saremi ve arkadaşları (2017) tarafından geliştirilmiş bir metasezgisel optimizasyon yöntemidir. Algoritma, çekirge sürülerinin doğadaki besin arama ve göç davranışlarını matematiksel olarak modelleyerek, karmaşık problemlere çözüm üretmeyi amaçlar. Çekirgelerin sosyal etkileşimleri, yerçekimi etkisi ve rüzgâr gibi dış kuvvetlerle yönlendirilmesi, algoritmanın temel mekanizmasını oluşturur. Her çekirge, yani çözüm adayı, konumunu bu üç etkene göre günceller. Sosyal bileşen, çekirgelerin birbirleriyle olan etkileşimlerini temsil eder; bireyler arasındaki mesafeye göre çekme veya itme kuvvetleri oluşur. Yerçekimi bileşeni, her bireyin bir çekim merkezi doğrultusunda hareket etmesini sağlar. Rüzgâr etkisi ise bireylerin belirli bir yöne yönelmesini teşvik ederek, arama sürecine yön verir. Algoritmanın başlangıç aşamasında, çekirgeler geniş bir çözüm uzayına dağınık ve farklı bölgeleri keşfeder. İlerleyen iterasyonlarda ise bu dağılım daralır ve bireyler en iyi çözüme yakın bölgelere yönelerek daha odaklı bir arama gerçekleştirir. Bu yapısı sayesinde algoritma, hem yeni çözüm alanlarını keşfetme potansiyeline sahiptir hem de güçlü aday çözümleri iyileştirme yeteneği sunar.

Majarfa ve arkadaşları (2019) çalışmalarında, ikili ÇOA'sını öznitelik seçimi problemine uyarlamışlardır. İÇOA, sürekli çözüm uzayını ikili forma dönüştürerek her özniteliği bir boyut olarak temsil eder; böylece her çekirgenin konumu, bir öznitelik alt kümesini ifade eder. Öznitelik seçimi sürecinin başarımı, (kNN) algoritması kullanılarak değerlendirilmiştir. İÇOA'nın performansı, GA ve ikili PSO gibi yaygın metasezgisel yöntemlerle karşılaştırılmıştır. 25 farklı veri kümesi üzerinde yapılan deneylerde, İÇOA ortalama 13,32 öznitelik seçerek %92,15 doğruluk elde etmiştir. Aynı deneylerde GA, ortalama 15,08 öznitelikle %92,02 doğruluk; PSO ise ortalama 17,48 öznitelikle %91,25 doğruluk sağlamıştır. Bu sonuçlar, İÇOA'nın daha az sayıda öznitelik kullanarak daha yüksek sınıflandırma doğruluğu elde ettiğini göstermekte ve yöntemin öznitelik seçimi problemlerinde güçlü bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Salp Sürü Algoritması

Salp Sürü Algoritması (SSA) (Salp Swarm Algorithm), Mirjalili ve arkadaşları (2017) tarafından geliştirilen, doğadan esinlenen bir metasezgisel optimizasyon yöntemidir. Bu algoritma, okyanuslarda zincirler halinde hareket eden salp adı verilen deniz canlılarının davranışlarını taklit eder. SSA popülasyonu iki gruba ayırır: lider salp ve takipçiler. Lider salp, grubun öncüsüdür ve çözüm uzayındaki besin kaynağına, yani hedef çözüme doğru yönelir. Bu yönelim, belirli bir rastgelelik içeren denklemler aracılığıyla gerçekleştirilir ve algoritmanın keşif yeteneğini artırır. Takipçiler ise zincir

yapısına uygun biçimde liderin izinden gider; her bir birey, kendisinden önce gelen salpın konumuna göre kendi pozisyonunu günceller. Bu yapı, grubun bütünlüğünü korurken çözüm uzayında düzenli bir ilerlemeyi de sağlar. SSA, liderin geniş çaplı serbest hareketi ile keşif sürecini desteklerken, takipçilerin daha yapılandırılmış ve kontrollü hareketleri ile derinlemesine arama sürecini dengeler. Zamanla hem lider hem de takipçiler hedef çözüme yakınsarken, algoritma daha iyi sonuçlara ulaşmak için çözüm uzayını etkin bir şekilde taramaya devam eder. Bu özelliği sayesinde SSA hem yeni çözüm alanlarını keşfetme hem de kaliteli çözümlere odaklanma konusunda etkili bir yapı sunar.

Hegazy ve arkadaşları (2020), Salp Sürü Algoritması'nı (SSA) öznitelik seçimi problemini için iyileştirilmiş bir SSA (İSSA) versiyonunu önermiştir. Çalışmada, İSSA'nın başarımı çeşitli veri kümeleri üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, algoritmanın yalnızca yüksek sınıflandırma doğruluğu sağlamakla kalmadığını, aynı zamanda daha az sayıda öznitelikle bu başarıyı yakalayabildiğini göstermektedir. Örneğin, meme kanseri veri kümesinde İSSA, yalnızca 9 öznitelik seçerek %96,5 doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu, orijinal 30 öznitelikten yaklaşık %70'lik bir azalma anlamına gelir. Ayrıca, İSSA'nın geleneksel metasezgisel algoritmalarla karşılaştırıldığında daha hızlı yakınsadığı ve daha yüksek doğruluk oranları sağladığı belirtilmiştir. Bu çalışma, SSA'nın öznitelik seçimi problemlerine uyarlanabilirliğini ortaya koymakta ve önerilen iyileştirilmiş versiyonunun bu alanda güçlü bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

Kelebek Optimizasyon Algoritması

Kelebek Optimizasyon Algoritması (KOA) (Butterfly Optimization Algorithm), Arora ve Singh (2019) tarafından önerilen doğadan esinlenmiş bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu yöntem, kelebeklerin koku yayma ve algılama davranışlarını taklit ederek çözüm uzayında etkili bir arama süreci yürütmeyi amaçlar. Her birey, çevresini kokusal yoğunluklara göre algılar ve daha yoğun kokuya sahip bölgelere doğru hareket eder. KOA, bu yönüyle keşif (exploration) ve derinlemesine arama (exploitation) arasında bir denge kurmayı hedefler. Algoritma iki temel aşamadan oluşur: küresel arama ve yerel arama. Küresel arama aşamasında kelebekler, popülasyondaki en iyi bireyin yaydığı kokuya doğru yönelirken; yerel arama aşamasında rastgele seçilen bireylerle etkileşime geçerek çözüm uzayında farklı alanları keşfetmeye çalışırlar. Adaptif parametreler sayesinde, arama davranışı süreç içinde dinamik biçimde ayarlanabilir ve algoritmanın yerel maksimumlara takılma riski azaltılır. GA ve PSO gibi klasik yöntemlerle karşılaştırıldığında, KOA'nın bazı durumlarda daha iyi performans gösterdiği rapor edilmiştir.

Arora ve Singh (2019) yaptıkları çalışmada, KOA'yı öznitelik seçimi problemlerine uyarlamışlardır. Standart KOA sürekli çözüm uzaylarında

çalışacak şekilde tasarlanmış olsa da, bu çalışma öznitelik seçimi problemini hedef almış ve algoritmanın ikili (binary) versiyonlarını geliştirmiştir. Geliştirilen ikili KOA, GA ve PSO gibi popüler yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek başarı ortalama 80,5 sıralama puanı ile KOA tarafından elde edilmiştir. Deneysel bulgular, KOA'nın sadece yüksek sınıflandırma doğruluğu sağlamakla kalmadığını, aynı zamanda daha az sayıda öznitelik seçerek hesaplama maliyetini düşürdüğünü de göstermiştir. Bu yönüyle, özellikle büyük veri setlerinde KOA'nın hızlı ve etkili bir öznitelik seçimi aracı olarak kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Ateşböceği Algoritması

Ateşböceği Algoritması (AA) (Firefly Algorithm), doğadaki ateşböceklerinin ışık yayarak birbirlerini cezbetme davranışından esinlenilerek geliştirilen, doğaya dayalı bir metasezgisel optimizasyon yöntemidir. Algoritma, Yang (2008) tarafından önerilmiştir. AA'nın temel prensibi, her ateşböceğinin çözüm uzayında bir çözüm adayını temsil etmesi ve bu bireylerin birbirlerine olan cazibesinin (attractiveness), sahip oldukları parlaklık düzeyine (brightness) bağlı olarak değişmesi esasına dayanır. Parlaklık optimize edilmek istenen amaç fonksiyonunun değeriyle doğrudan ilişkilidir; daha yüksek parlaklığa sahip bireyler daha iyi çözümleri temsil eder ve diğer ateşböcekleri bu bireylere doğru yönelir. AA'da cazibe, bireyler arasındaki mesafeye bağlı olarak azalan bir fonksiyondur. Yani bir ateşböceği, kendisinden daha parlak olan bir başka bireye ne kadar yakınsa, o oranda etkilenir ve ona yaklaşır. Her iterasyonda, tüm bireyler, kendilerinden daha parlak ateşböceklerine doğru hareket eder ve bu da algoritmanın güçlü bir şekilde derinlemesine arama yapmasını sağlar. Bununla birlikte algoritma, belirli bir ölçüde rastgelelik de içerdiğinden, çözüm uzayının farklı bölgelerini keşfetme yeteneğine de sahiptir. FA'nın öne çıkan avantajları arasında, basit yapısı, az sayıda parametre gereksinimi ve paralelleştirmeye uygunluğu yer almaktadır.

Selvakumar ve arkadaşları (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ağ saldırılarının tespiti amacıyla öznitelik seçimi sürecinde AA kullanılmıştır. Çalışma, KDD CUP 99 veri kümesi üzerinde gerçekleştirilmiş ve iki aşamalı bir yöntem önerilmiştir. İlk aşamada, filtre yöntemiyle özniteliklerin önem dereceleri belirlenmiş; ardından AA algoritması devreye girerek en uygun öznitelik alt kümesini seçmiştir. Elde edilen bu alt kümeler, KA ve Bayes Ağları (Bayesian Networks) (BA) sınıflandırıcıları ile değerlendirilmiştir. Deneysel bulgular, toplam 41 öznitelikten yalnızca 10 tanesinin seçilmesinin hem işlem yükünü azalttığını hem de sınıflandırma başarımını artırdığını ortaya koymuştur. Örneğin, KA algoritması kullanıldığında, tüm özniteliklerle %94,63 doğruluk elde edilirken; AA ile seçilen 10 öznitelikle bu oran %95,75'e yükselmiştir. Benzer şekilde, BA algoritması ile doğruluk oranı %92,37'den %93,68'e

çıkmiştir. Bu sonuçlar, gereksiz özniteliklerin elenmesinin sadece işlem maliyetini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda modelin doğruluğunu da artırabildiğini göstermektedir.

SONUÇ

Öznitelik seçimi, makine öğrenmesi uygulamalarında hem model doğruluğunu artırmak hem de hesaplama maliyetlerini azaltmak amacıyla kullanılan kritik bir ön işleme adımıdır. Özellikle yüksek boyutlu veri kümeleriyle çalışırken, gereksiz özniteliklerin ayıklanması, yalnızca modelin performansını iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda işlem süresini ve kaynak kullanımını da önemli ölçüde azaltır.

Bu çalışmada, öznitelik seçimi sürecinde metasezgisel algoritmaların rolü kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Metasezgisel algoritmalar, geleneksel yöntemlerin sınırlı kaldığı durumlarda çözüm uzayını daha esnek ve etkili bir şekilde tarayabilmeleriyle ön plana çıkmaktadır. Doğadan ve fizikten esinlenen bu algoritmalar, esnek yapıları, geniş uygulanabilirlik alanları ve farklı problem türlerine uyum sağlayabilme yetenekleri ile öznitelik seçimi problemlerine güçlü çözümler sunmaktadır. Keşif ve derinlemesine arama süreçleri arasında kurdukları denge sayesinde hem yerel minimumlardan kaçınabilmekte hem de daha kaliteli çözümlere ulaşabilmektedirler.

Bununla birlikte, metasezgisel yöntemlerin bazı sınırlamaları da göz ardı edilmemelidir. Hesaplama maliyetlerinin yüksek olması, parametre ayarlarının deneyime ve probleme bağlı olarak değişmesi ve bazı durumlarda algoritmaların kararsız sonuçlar üretebilmesi bu sınırlamalardan bazılarıdır. Bu nedenle, söz konusu algoritmaların dikkatli seçilmesi ve uygulanması, problem yapısına uygun parametrelerle yapılandırılması önem arz etmektedir.

Gelecekte yapılacak araştırmalar, metasezgisel algoritmaların derin öğrenme modelleriyle entegrasyonu ve çok amaçlı optimizasyon (multi-objective optimization) stratejilerinin kullanımı gibi yönle odaklanabilir. Ayrıca, farklı algoritmaların güçlü yönlerini bir araya getiren hibrit yaklaşımlar sayesinde daha kararlı, hızlı ve etkili sonuçlar elde edilebilir. Özellikle, hibrit yapılarla hem keşif gücü hem de yerel arama başarımı artırılabilir, böylece daha dengeli ve güvenilir modeller oluşturulabilir.

KAYNAKÇA

- Ahmad, S., Bakar, A. A., & Yaakub, M. R. (2015). Metaheuristic algorithms for feature selection in sentiment analysis. *Science and Information Conference 2015*. London, UK.
- Abualigah, L., Alsalibi, B., Shehab, M., Alshinwan, M., Khasawneh, A. M., & Alabool, H. (2021). A parallel hybrid krill herd algorithm for feature selection. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 12, 783-806.
- Ali, T., Khan, M. A., & Abbas, S. (2019). Genetic Algorithm Based Feature Selection Technique for Electroencephalography Data. *Applied Computer Systems*, 24(2), 119-127
- Arora, S., & Singh, S. (2019). Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization. *Soft Computing*, 23(3), 715-734.
- Askarzadeh, A. (2016). A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm. *Computers & Structures*, 169, 1-12.
- Baş E. & Ülker, E. (2020). An efficient binary social spider algorithm for feature selection problem. *Expert Systems with Applications*, 146, 113185.
- Chiaradonna, S., Di Giandomenico, F., & Murru, N. (2020). On enhancing efficiency and accuracy of particle swarm optimization algorithms. *arXiv preprint arXiv:2004.06326*.
- Faris, H., Aljarah, I., Mirjalili, S., Al-Zoubi, A. M., & Alfaris, A. (2018). A multi-verse optimizer approach for feature selection and optimizing SVM parameters based on a robust system architecture. *Neural Computing and Applications*, 29(1), 271–288.
- Gandomi, A. H., & Alavi, A. H. (2012). "Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm." *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 17(12), 4831–4845.
- Hegazy, A. E., Makhoulf, M., & El-Tawel, G. S. (2020). Improved salp swarm algorithm for feature selection. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 32(3), 335–344.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press. Ann Arbor, MI, 1(97), 5.
- James, J., & Bernhard, T. (2015). Social spider algorithm for global optimization. *Applied Soft Computing*, 30, 614–627.
- Kannan, V. (2018). *Feature Selection using Genetic Algorithms*. San Jose State University Master's Projects.

- Karaboga, D. (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization (Technical Report No. TR06). Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 1942-1948
- Liu, Y., Wang, G., Chen, H., Dong, H., Zhu, X., & Wang, S. (2011). An improved particle swarm optimization for feature selection. *Journal of Bionic Engineering*, 8(2), 191-200.
- Mafarja, M., Aljarah, I., Faris, H., Hammouri, A. I., Al-Zoubi, A. M., & Mirjalili, S. (2019). Binary grasshopper optimisation algorithm approaches for feature selection problems. *Expert Systems with Applications*, 117, 267-286.
- Meenachi, L., & Ramakrishnan, S. (2021). Metaheuristic search based feature selection methods for classification of cancer. *Pattern Recognition*, 119, 108079.
- Mirjalili, S. (2016). Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. *Neural computing and applications*, 27, 1053-1073.
- Mirjalili, S., Gandomi, A. H., Mirjalili, S. Z., Saremi, S., Faris, H., & Mirjalili, S. M. (2017). Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems. *Advances in engineering software*, 114, 163-191.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Hatamlou, A. (2016). Multi-verse optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization. *Neural Computing and Applications*, 27, 495-513.
- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67.
- Niu, B., Yi, W., Tan, L., Geng, S., & Wang, H. (2021). A multi-objective feature selection method based on bacterial foraging optimization. *Natural Computing*, 20, 63-76.
- Ouadfel, S., & Elaziz, M. Abd. (2020). Enhanced crow search algorithm for feature selection. *Expert Systems with Applications*, 159, 113572.
- Palanisamy, S., & Kanmani, S. (2012). Artificial bee colony approach for optimizing feature selection. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 9(3), 432-438.
- Passino, K. M. (2002). Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. *IEEE Control Systems Magazine*, 22(3), 52-67.

- Priyadarshini, J., Premalatha, M., Cep, R., Jayasudha, M., & Kalita, K. (2023). Analyzing physics-inspired metaheuristic algorithms in feature selection with k-nearest neighbor. *Applied Sciences*, 13(2), 906.
- Rostami, M., Berahmand, K., & Forouzandeh, S. (2021). A novel community detection based genetic algorithm for feature selection. *Journal of Big Data*, 8(1), 2.
- Saremi, S., Mirjalili, S., & Lewis, A. (2017). Grasshopper optimisation algorithm: Theory and application. *Advances in Engineering Software*, 105, 30–47.
- Selvakumar, B., & Muneeswaran, K. (2019). Firefly algorithm based feature selection for network intrusion detection. *Computers & Security*, 81, 148–155
- Sharawi, M., Zawbaa, H. M., & Emary, E. (2017). Feature selection approach based on whale optimization algorithm. In 2017 Ninth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI) (pp. 145–150). IEEE
- Sharma, M., & Kaur, P. (2021). A comprehensive analysis of nature-inspired meta-heuristic techniques for feature selection problem. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, 1103-1127.
- Too, J., & Mirjalili, S. (2020). A Hyper Learning Binary Dragonfly Algorithm for Feature Selection: A COVID-19 Case Study. *Knowledge-Based Systems*, 212.
- Yang, X.-S. (2008). *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver Press.