

I. ULUSAL ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ ve SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KONFERANSI



DOĞANIN RİTMİ ENERJİNİN DÖNÜŞÜMÜ ÜRETİMİN GÜCÜ



Editörler

Utku Canci Matur
Egemen Sulukan
Gözde Konuk Ege
Begüm Erten
Tuğçe Sena Altuntaş
Ali Köse



İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI





İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI

DOĞANIN RİTMİ, ENERJİNİN DÖNÜŞÜMÜ, ÜRETİMİN GÜCÜ (I. ULUSAL ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KONFERANSI)

İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI

No: 10 | Mühendislik: 3

Editörler: Utku Canci Matur, Egemen Sulukan, Gözde Konuk Ege,
Begüm Erten, Tuğçe Sena Altuntaş, Ali Köse

Yayın Koordinatörü: Şafak Çelik

Redaksiyon: Ali Köse, Cansu Tüysüz

Dizgi-Mizanpaj: Şafak Çelik

Kapak Tasarımı: Seda Müftüoğlu

E-ISBN: 978-625-97407-3-7

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.2503>

1. Baskı: Mart 2025

Yayıncı Sertifika No: 44794

© 2025, İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI

"Doğanın Ritmi, Enerjinin Dönüşümü, Üretim Gücü"nde yayımlanan yazıların yasal ve bilimsel sorumluluğu yazarlarına aittir. Kitabın özgün özellikleri ve yayın hakkı İstanbul Gedik Üniversitesine aittir. Yayınevinin izni olmadan kısmen ya da tamamen kopyalanamaz, çoğaltılamaz, bir veri muhafaza sisteminde saklanamaz veya iletilemez. Kaynak göstermek kaydıyla alıntı yapılabilir. İstanbul Gedik Üniversitesi FSEK'e aykırı bir şekilde davranan sorumlulara karşı her türlü hukuki yolu kullanma hakkını saklı tutar.

İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI

Adres: Cumhuriyet Mah. İlkbahar Sok. No: 1 34876 Yakacık, Kartal, İstanbul

Tel: 444 5 438 - **Web:** www.gedik.edu.tr

İstanbul Gedik University Library Cataloging-in-Publication Data

DOĞANIN RİTMİ, ENERJİNİN DÖNÜŞÜMÜ, ÜRETİMİN GÜCÜ
(I. ULUSAL ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KONFERANSI)

Ed. Utku Canci Matur, Egemen Sulukan, Gözde Konuk Ege, Begüm Erten,
Tuğçe Sena Altuntaş, Ali Köse, 190 p. 16x23 cm.

E-ISBN: 978-625-97407-3-7

Tasnif Kodu: T 163.2/.U48

DOĞANIN RİTMİ, ENERJİNİN DÖNÜŞÜMÜ, ÜRETİMİN GÜCÜ

(I. ULUSAL ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KONFERANSI)

Editörler

Utku Canci Matur
Egemen Sulukan
Gözde Konuk Ege
Begüm Erten
Tuğçe Sena Altuntaş
Ali Köse

Bu kitaptaki tüm yazılar, iki hakem denetiminden geçerek kitaba dâhil edilmiştir.

İçindekiler

Utku Canci Matur	
Giriş.....	7
Elif Umut	
İleri Dönüşüm ve Sanat: Yaratıcılıkla Sürdürülebilir Gelecek.....	9
Kerem İşcanoğlu	
Edirne’de Sürdürülebilirlik Bağlamında Tramvayın Geleceği.....	22
Maqsud Quliyev	
Azerbaycan’da Yeşil Enerjiye Geçiş Araştırması: Enerji Verimliliği ve Elektrikli Araçlar	36
Eray Oğuz, İbrahim Gürsu Tekdemir, Uğur S. Selamoğulları	
Talep Tarafı Yönetimine Katkı Sağlamak Amacıyla Yük Tiplerinin Kullanım Oranlarının Tahmin Edilmesi	48
Haydar Kepekci	
Bükülü Bant Genişliği ve Kalınlığının Boru Akışındaki Akış Karakteristikleri Üzerindeki Etkisinin CFD Analizi	60

Ayşe Uğurcan Atmaca

Düşük Sıcaklıkta Isı Kaynağı Kullanan Organik Rankine Çevrimi
Uygulamaları için Hidrofloroolefinlerin
Performans Değerlendirmesi.....74

**Zeynep Yaren Açıkgüz, Gözde Konuk Ege, Ali Köse,
Mücahit Ege, Utku Canci Matur**

Enerji Etkin Otomasyon Sistemleri ile
Sürdürülebilir Mimari Tasarımlar90

Şeyda Canpolat

Sanat ve Zanaatin Ekolojik İş Birliği: Toshiko Macadam'ın
Oyun Alanları Üzerinden Sürdürülebilir Mekân Tasarımı 109

Büşra Dursun

Global Schools Aktivite Rehberleri ile STEM Dersi Planlamak:
İklim Değişikliği ve Enerji 119

Doruk Gürkan

Tel Ark Eklemeli İmalat Teknolojisinin Çevresel Etkileri
ve Sürdürülebilirlik İçin Düzenleyici Önlemler 142

Ali Köse, Alişan Gönül

Soğutma Sistemlerinde Nanoakışkan Kullanımının
Çevresel Sürdürülebilirliğinin Değerlendirilmesi..... 166

Ceren Aydın, Egemen Sulukan

Gedik MYO'nun Enerji Dönüşümüne Sürdürülebilir Yaklaşımı:
RES İncelemesi 179

Giriş

Artan nüfus, gelişen teknoloji ve sanayileşme enerji talebini artırmış ve bu konudaki Ar-Ge/Ür-Ge çalışmalarına hız kazandırmıştır. Hâlihazırda enerji ihtiyacını karşıladığımız konvansiyonel enerji kaynaklarından fosil tabanlı enerji kaynakları, çevreye vermiş oldukları zarar ve rezerv sıkıntıları nedeniyle enerji açısından büyük riskler oluşturmaya başlamıştır. Enerji kaynaklarına ilişkin yaşanan enerji krizi konusundaki farkındalık, araştırmacıları bu anlamda yeni çözüm arayışlarına ve yeni teknolojilerin kullanılmasına dair çalışmalara yönlendirmiştir. Bu bağlamda 9-10 Ocak 2025 tarihlerinde İstanbul Gedik Üniversitesinde Enerji Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi (ETUAM) tarafından düzenlenen *I. Ulusal Enerji Dönüşümü ve Sürdürülebilirlik Konferansı (EDSK'25)*, enerji dönüşümü ve sürdürülebilirlik konuları üzerine farklı bilim dallarından özgün akademik çalışmalara ev sahipliği yapmıştır. Enerji dönüşümü ve sürdürülebilirlik, günümüz dünyasında yalnızca teknik bir mesele değil, aynı zamanda çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutlarıyla ele alınması gereken hayati bir konudur. Küresel ısınma, doğal kaynakların tükenmesi ve çevresel dengenin bozulması gibi sorunlar, bizleri alternatif enerji kaynaklarını keşfetmeye ve mevcut enerji politikalarını yeniden şekillendirmeye yönlendirmiştir.

Bu doğrultuda üniversitemiz kapsamında düzenlenen *I. Ulusal Enerji Dönüşümü ve Sürdürülebilirlik Konferansı (EDSK'25)*, alanında uzman akademisyenler, araştırmacılar ve sektör profesyonellerini bir araya getirerek, enerji dönüşümüne yönelik bilimsel bir platform oluşturmaya amaçlamıştır. Konferans kapsamında sunulan bildirimler; enerji teknolojileri, yenilenebilir enerji sistemleri, enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik ve dijital dönüşüm gibi kritik başlıkları içermekte olup, geleceğin enerji poli-

tikalarına ışık tutacak değerli katkılar sunmuştur. Konferansımızın amacı, farklı disiplinlerde çalışan bilim insanlarını bir araya getirerek disiplinler arasında bilgi etkileşimini sağlamak ve nitelikli çalışmalara bilim dünyasının dikkatini çekmektir. Sunum dilinin Türkçe olduğu konferansımızda oturumlar, konu ve disiplin esaslı olarak oluşturulmuştur.

Bu kitap, konferansta enerjiye dair sunulmuş olan farklı disiplinlerdeki bildirimlerin tam metinlerini içermekte olup, enerji dönüşümü ve sürdürülebilirlik konularında yapılan araştırmalara önemli bir referans kaynağı olma niteliği taşımaktadır. Çalışmalarıyla katkı sağlayan tüm bilim insanlarına, konferans düzenleme ekibine ve destek veren kurumlara teşekkür eder, bu kitabın enerji alanında yeni araştırmalara ilham kaynağı olmasını dilerim.

Dr. Öğr. Üyesi Utku CANCI MATUR

İGÜN Enerji Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü
I. Ulusal Enerji Dönüşümü ve Sürdürülebilirlik Konferansı (EDSK'25) Başkanı

İleri Dönüşüm ve Sanat: Yaratıcılıkla Sürdürülebilir Gelecek

Elif Umut¹

Özet

Bu çalışma, çağdaş sanatta ileri dönüşüm sürecini inceleyerek, ekolojik sürdürülebilirlik ile sanat üretimleri arasında geniş bir yelpazede yer almaktadır. Sanayileşme ve hızlı tüketim kültürünün neden olduğu atık tasfiyesine karşı bir tepki olarak ileri dönüşüm sanatı, atık malzemelerin üretimde yeniden işlevselleştirilmesi yoluyla sürdürülebilir sanat kavramını geliştirdiğini gösterir. Bu süreç hem sanatçılara hem de izleyicilere çevresel farkındalık kazandırırken, sanatsal ifadenin sınırlarını zorlar. Sanat, estetik ve toplumsal bir araç olarak güçlü bir potansiyele sahiptir ve sürdürülebilir bir geleceğin temellerini atmak adına önemli bir rol oynar. Çalışmada ileri dönüşümün çağdaş sanatta nasıl kullanıldığı, nasıl benimsendiği ve ekolojik sanat ile olan literatür taraması ve sanat ürünlerini inceleme yöntemiyle ele alınmıştır. Elde edilen bulgularla ileri dönüşümün yalnızca bir üretim teknolojisi olmasının ötesinde, sanatın ekolojik ve toplumsal bir bilinç oluşturma aracı olarak görüldüğü gün yüzüne çıkar. Araştırmada, Romuald Hazoumé, Sarah Meyers Brent, Vik Muniz, Nicole Dextras, Deniz Sağdıç ve İrfan Önürmen gibi sanatçıların ileri dönüşüm tekniklerini nasıl kullandıkları incelenmiş ve bu yaklaşımın çağdaş sanattaki yeri tartışılmıştır. Sonuç olarak, ileri dönüşüm sisteminin çağdaş sanat içinde giderek daha fazla kabul gördüğü, ekolojik sürdürülebilirlik anlayışına katkı

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250301>

¹ Trakya Üniversitesi, Lisansüstü Enstitüsü-Resim, Edirne, Türkiye,
elifumut866@gmail.com, ORCID: 0009-0004-0388-9949

sunduğu ve gelecekte sanat eserlerine daha fazla entegre edilerek yaygın bir üretim pratiği hâline geleceği söz konusudur.

Anahtar Kelimeler: İleri dönüşüm (upcycling), Sanat, Yaratıcılık, Farkındalık.

Upcycling and Art: Sustainable Future through Creativity

Abstract

By examining the process of upcycling in contemporary art, this study explores the broad spectrum between ecological sustainability and artistic production. As a response to the waste generated by industrialization and fast consumer culture, upcycling art shows that it develops the concept of sustainable art through the re-functionalization of waste materials in production. This process pushes the boundaries of artistic expression while bringing environmental awareness to both artists and audiences. Art has a powerful potential as an aesthetic and social tool and plays an important role in laying the foundations for a sustainable future. This study discusses how upcycling is used in contemporary art, how it is adopted, and how it relates to ecological art through a literature review and analysis of artworks. The findings show that upcycling is not only a production technique, but also a means of creating environmental and social awareness in art. The research examines how artists such as Romuald Hazoumė, Sarah Meyers Brent, Vik Muniz, Nicole Dextras, Deniz Sağdıç, and İrfan Önürmen use upcycling techniques and discusses the place of this approach in contemporary art. It concludes that upcycling is increasingly accepted in contemporary art, contributes to the understanding of ecological sustainability, and will be increasingly integrated into artworks and become a widespread production practice in the future.

Keywords: Upcycling, Art, Creativity, Awareness.

1. Giriş

Sanat, tarihsel süreç içerisinde toplumsal dönüşümlere uyum sağlayarak eleştirel bir bakış açısı sunan dinamik bir alan olmuştur. Bu dönüşümlerde sürdürülebilir sanat, bilimi hem üretim hem de tüketim alanlarında toplum-

sal bilinç oluşturma aracı olarak konumlandırırken, aynı zamanda sanatın sürekli olarak nasıl sürdürülebilir hâle getirilebileceğine dair problemler oluşturmuştur. Bu bağlamda dolaşımın bütünlüğünü sağlayan uyum ve dönüşen yapının göz önünde bulundurulması, sürdürülebilir sanat kavramının kapsamlı mı yoksa çağdaş sistemin bir bileşeni mi olduğu problemine değinilmelidir. Bu durum, çağdaş bir doğaya sahip olan ve kendisi uyarlanabilir olan çağdaş sanatın bakış açısından, değişen topluma atıfta bulunur. Bu duruma, sözde alternatif modernizmin deneysel ve eleştirel olarak çapraz sanatı denilebilir [1]. Bu doğrultuda sürdürülebilir yaşamda sanatın katkısı, sanatın rolü ve sanatın sürdürülebilirliği nasıl sağlanmalıdır soruları önemlidir. Sanat, her alanda olduğu gibi tüketim ve üretim alanında toplumsal bilinç sağlanmasında önemli görevler üstlenmektedir. Politikalar üst düzeyde gelişirken, sürdürülebilirlik fikri aynı zamanda sanatçıların günlük yaşamlarını ve ürettiklerini de etkilemektedir. Sürdürülebilir sanat, dünyanın mevcut durumuna bir bakış açısı sağlamayı, olası çözümler önermeyi ve sanatçıların tutkulu olduğu konularda farkındalık yaratmayı amaçlamıştır. Sürdürülebilir sanatın geçmişi oldukça eskiye dayanmaktadır. Ancak literatürde kullanımı bakımından sürdürülebilir sanatla ilgili ilk metinler arasında Hildegard Kurt ve Bernd Wagner'in *Kultur-Kunst - Nachhaltigkeit* (2002) adlı eseri, Maja ve Reuben Fowkes'in yazdığı *The Principles of Sustainability in Contemporary Art* (2006) ve Sacha Kagan'ın *Sanat ve Sürdürülebilirlik* (2011) eseri yer almaktadır. Sürdürülebilirlikle ilişkisi olan sanat ve kültürlerin disiplinler arası analizlerinden oluşan bir koleksiyon, Sacha Kagan ve Volker Kirchberg tarafından düzenlenen *Sürdürülebilirlik: sanat ve kültürler için yeni bir sınır* (2008) içinde de mevcuttur [2].

Çağdaş sanatta ileri dönüşümün oluşmasındaki başlıca etken, teknolojinin gelişmesi ve sanayileşme ile birlikte dünya üzerinde üretimin ve dolayısıyla tüketimin artmasıyla gelen atık bilincine ulaşılmasıdır. Bilinçsiz tüketim ise doğrudan atık sorununu meydana getirmektedir. Zamanla atıkların kontrol edilemez boyutlara ulaşması ile birlikte çözüm için pek çok farklı kavram devreye girmiştir. Bahsi geçen çözüm yollarından birinin geri dönüşüm olduğu bilinmektedir. Ancak geri dönüşümün maliyeti ve kapsama alanı düşünüldüğü gibi sonuçlanmadığından, konu ile ilgili farklı yollara başvurulması gerekmiştir. Bu bağlamda çözüm olarak sürdürülebilirlik kavramının devreye girdiği bilinmektedir. Ekolojik anlamda sürdürülebilirlik; kullanılan nesnelerin tüketilip bir kenara atılması değil, dönüşüme ve doğaya uygun olmasına dikkat etmek ve bu yönde hareket

etmek anlamına gelmektedir [3]. Bu bağlamda farkındalık yaratacak sürdürülebilirliğin alt disiplini olan ileri dönüşüm kavramı ortaya çıkar.

2. Yöntem

Araştırmada sürdürülebilirlik türü olan ileri dönüşümün önemi üzerine çağdaş sanatın özelliklerine ve yorumlama biçimine de değinildiği bir yol izlenerek, sanatta atık tasfiyesinin ve yeniden oluşumun yanı sıra kültüründe devamlılığını sağlamanın önemine vurgu yapılmış, sürdürülebilir bir anlayışı benimseyen sanatçı çalışmaları ve yaratıcı düşünceleri üzerinden literatür taramasıyla bir inceleme ortaya konulmuştur.

2.1. İleri Dönüşümün Temelleri: Sanat ve Çevre Dostu Yaklaşımlar

21. yüzyılda dünyanın en büyük sorunlarından birinin ekolojik problemler olduğu bilinmektedir. Bu zamana kadar ekolojik problemlere çözüm, geri dönüşüm iken literatüre kazandırılan yeni bir yöntem olarak ileri dönüşüm ortaya çıkmıştır. İleri dönüşüm, geri dönüşümden farklı olarak kimyasal bir işlem uygulanmaksızın, atıkların yeniden kullanılabilir hâle getirilmesini ifade etmektedir. Bu yöntemin ileriye dönük olarak, doğrudan atık oluşumunun azaltılmasında, mevcut atık miktarının artmasını engellediği ve toplumsal bilinç oluşturmada etkili olduğu görülmektedir. İleri dönüşüm, kullanılmış ve atık niteliğindeki nesnelerin dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması anlamına gelmektedir. İleri dönüşüm yapmaktaki asıl amaç, nesneyi hammaddeye dönüştürmeden onu çöp olmaktan kurtarmak ve farklı bir bağlamda yeniden değerlendirmektir. İleri dönüşüm, geri dönüşüme göre avantajlı sayılmaktadır. Nitekim geri dönüşüm maliyetli ve yüzde yüz sonuç vermeyen bir yöntemken ileri dönüşüm daima çözüm sağlayabilecek bir yöntem olarak görülmektedir. İleri dönüşüm uygulanacak nesnelere, ilk kullanım amacından farklı amaçlarla kullanılabilir. Örneğin, kulbu kırılmış bir bardağın çöpe atılmak yerine kalemlik olarak değerlendirilmesi, ileri dönüşüm sayılmaktadır. Bu sayede nesne ömrünü doldurana kadar pek çok farklı şekilde bağlamı değiştirilerek yeniden ve yeniden kullanılacaktır [4].

Toplumsal sorunları dile getirmenin en etkili yollarından biri sanattır. Bu nedenle pek çok sanatçı, ekolojik kaygılarını dile getirmek ve daha çok kitleye ulaşıp toplumu bilinçlendirmek için kendilerini en iyi ifade ettikleri şey olan sanata yönelmişlerdir. Sanatçıların sanat pratiklerinde ileri dönüşümü entegre ettikleri bilinmektedir. Atık nesnenin yeniden kullanıla-

bilir olması ekolojiye fayda sağlarken, bir nesnenin yeni bir bağlamda sergilenmesi ve bu meydana gelirken atık nesnenin kullanılması ise ekolojik sanat kapsamında üretilmiş olduğunu göstermektedir. Bu anlamda sanatsal faaliyet gerçekleştirirken dünyaya dair olumlu adımlar atılıyor olması, ileri dönüşümün ekolojik sanatın temel anlatısı ile örtüştüğünü düşündürmektedir. Zira bir nesnenin yeniden ve farklı bir bağlamda kullanılması günümüz sanatında sıklıkla görülürken ekolojik sanatta da yer almaktadır. Bu nedenle az bilinen bir yöntem olan ileri dönüşümün ekolojik sanat başlığı altında belirtilmesinin önemli olduğu düşünülmektedir. Atık probleminin çözüm sağlayacak ve farkındalığı artıracak yöntemin pek çok sanatçı tarafından kullanıldığı ve başarılı sonuçlar verdiği bilinmektedir. Sanatçıları, nesnelerin olanakları üzerinde yeniden düşünmeye iten ileri dönüşümün çağdaş sanatta zamanla öneminin artacağı düşünülmektedir [5].

3. Bulgular

Bu bölümde, çağdaş sanat ürünlerinin ileri dönüşüm ve sürdürülebilirliğin sanatçıları tarafından nasıl benimsendiği üzerine yapılan tarama ve sanat pratiklerini incelemeleri kapsamında, literatürde yer alan alternatifler ele alınmaktadır. Bulgular, çağdaş sanatta ileri dönüşümde sanatçıların yaratıcılıkları ve toplumsal sorunları ifade biçimleri üzerinden değerlendirilmektedir. Bu bağlamda sanatçıları, ileri dönüşümün ve sürdürülebilirliğin sanata entegrasyonunu malzeme seçimleri, sanattaki üretim süreçleri ve estetik anlayışı dönüştürerek sağlar. Ekolojik sanat, ileri dönüşüm yöntemleriyle toplumsal evrensellik yaratmaktadır. Sürdürülebilirlik, ileri dönüşüm sanatı ile sürekliliğini küresel sistemde gün geçtikçe daha fazla benimsenmektedir.

Hızlı üretim ve tüketim döngüsünün neden olduğu atık problemi, var olan kaynakların tüketilmesine, insandan ziyade tüketici kaynaklı bir ekonomik sisteme, moda endüstrisine, insana ve doğal çevreye zarar vermektedir [6]. Sürdürülebilir bir yaklaşım olan ileri dönüşüm ile var olan tüketici sonrası atıklar değerlendirilerek farklı bir yorumla atığa yeni bir hayat sunulabilir. İleri dönüşüm, sanatçıya atığın gerçek değerini yeniden değerlendirme fırsatı sunarak, yaratıcı bir bakış açısıyla eserini yorumlama imkânı verir. Dahası, bu yöntemle ürünün ve materyalin sahip olduğu yaşamın ve değerlerin sürekliliği sağlanmış olur.

3.1. Romuald Hazoumè ve İleri Dönüşüm Sanat Pratiği

Romuald Hazoumè, Batı Afrika'nın Benin'inde bulunan, güçlü bir çağdaş sanatçıdır ve ileri dönüşüm yaklaşımıyla kültürel ve politik konularla sanatı politik bir eylem aracı olarak konumlandırarak eserler üretir. Hazoumè'nin yönetsel pratiği, özellikle atık malzemeleri kullanarak güçlü görsel ve kavramsal mesajlar veren eserlerdir. Hazoumè, en çok plastik benzin bidonlarından yaptığı maskelerle tanınır. Bu eserler, Afrika'daki maskelerin sembolik ve ritüelistik önemine vurgularken, aynı zamanda Batı'nın Afrika'ya yönelik sömürgeci bakışını da eleştirir. Maskelerin biçimsel değişimi geleneksel Afrika maskelerine benzese de malzeme olarak kullanılan petrol bidonları; modern tüketim, kirlilik ve yasadışı petrol ticaretindeki sömürgeciliği sembolize eder. Sanatçı, ileri dönüşüm teknikleriyle sömürgecilik, kimlik, ekonomi ve çevre sorunları gibi küresel temaları işler.



Şekil 1. Romuald Hazoumè, Tallonnée [7]



Şekil 2. Romuald Hazoumè, Béninois - Yeni 1962, Doko - 1995, Plastik ve Naylon Bidon [8]

3.2. Sarah Meyers Brent ve İleri Dönüşüm Sanat Pratiği

Sarah Meyers Brent, ileri dönüşüm sanatını estetik ve kişisel görüşlerine bir anlatı aracı olarak özgün heykel ve enstalasyonlar üreten çağdaş bir sanatçıdır. Sanatsal yaklaşım; kişisel özellikler, önemli ve toplumsal eleştiriler unsurlarıyla şekillenmektedir. Brent özellikle annelik, büyüme-çürüme konularında odaklanarak atık malzemeleri sanatsal formlara dönüştürmektedir. Brent; kumaş, tel, akrilik, plastik ve köpük gibi çeşitli atık

malzemeleri kullanarak organik ve dinamik formlarda heykeller üretir. Bu teknikler, Brent'in estetik görünümünde bozulmanın ve ortaya çıkabilen somut metaforlarıdır. Bu modeller, tüketim kültürünün sembolleri olarak işlenirken yaşam döngüselliği, büyüme ve çürüme gibi kavramları ifade etmek için kullanılır. Brent'in ürünlerinde organik formlar ve doğadan ilham alınarak yapılan yapılar görülür. Çürüme ve dönüşüm temasını ele alan bu eserler, yaşamın sürekliliğini ve kalıcılığını sorgulayan organik yapılar sunar. Akışkan, sarkmış ve yayılmış formlar, zaman ve doğallığın kaçınılmaz olarak varlığını sürdürür. Bu özellikler, büyüme, dönüşüm ve yeniden doğuş parçalarının somut temsilleri olarak ürünlerde işlenir. Sanatçı, malzemelerin doğal estetik potansiyelini keşfederken kaos ve düzen arasındaki dengeyi heykellerine taşımıştır.



Şekil 3. Sarah Meyers Brent, *Beyaz At, Yeniden Kullanılan Ürünler ve Ahşap Üzerine Akrilik* 2022 [9]



Şekil 4. Sarah Meyers Brent, *Annem Beni Seviyor III, Kmaşı Karışık Medya ve Tuval* 2017 [10]

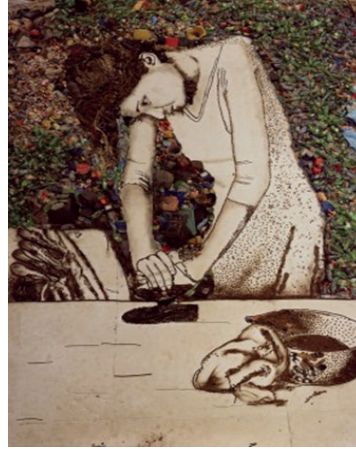
3.3. Vik Muniz ve İleri Dönüşüm Sanat Pratiği

Vik Muniz, atık malzemeler ve geri dönüştürülebilir nesnelere eserler üreten ünlü Brezilyalı bir sanatçıdır. Çalışmalarında toplumsal eleştiriyi, sanat aracılığıyla göndermelerini, ileri dönüşüm yöntemini ustalıklı birleştirir. Muniz, geleneksel sanat malzemelerini terk ederek çöp, geri dönüştürülebilir atıklar, hurda metaller, yiyecek, toprak ve şeker gibi farklı nesnelere ileri dönüşümle yeni değerler katarak topluma sunuyor. Sanat eserlerini oluştururken kolaj, asamblaj ve yerleştirme tekniklerini kullanır. Çalışma-

larını genellikle fotoğrafla belgeleyerek sistematik süreci ölümsüzleştirir. *Çöp Resimleri* Muniz'in en önemli projelerinden biridir. Brezilya'nın Rio de Janeiro'daki dünyadaki en büyük çöp sahalarından biri olan Jardim Gramacho'da, geri dönüşüm işçileriyle birlikte devasa portreler yaptı. Çöp toplayıcılarının yaşamlarını ve sanat eserlerinin yaratım sürecini konu alan bu çalışma, aynı zamanda bir belgesel olarak Oscar'a adaylığını da içeriyor. Marat (Sebastião) da Vik Muniz, Jacques-Louis David'in *Marat'ın Ölümü*'nü, çöplükten geri dönüştürülmüş parçalar kullanan bir Jardim Gramacho işçisini tasvir ederek yeniden canlandırıyor. Bay Muniz, *Çöp Resimleri* serisinin satışından elde edilen geliri Gramacho işçilerine bağışlamıştır.



Şekil 5. Vik Muniz, *Marat'ın Ölümü*, 2010 [11]



Şekil 6. Vik Muniz, *İsis (Isis)*, 2010 [12]

3.4. Nicole Dextras ve İleri Dönüşüm Sanat Pratiği

Nicole Dextras, ileri dönüşüm ve sürdürülebilirlik sanatı alanında tanınan bir sanatçıdır. Çalışmaları, doğanın zenginleşmesini artırmayı, yoğun merkezi oluşturmayı ve tüketimi eleştirel bir bakış açısıyla sunmayı içerir. Doğal ve geri dönüştürülebilir malzemelerle çalışan Dextras, ürünlerdeki sıcaklık, doğal ortam ve insan-doğa etkileşimini ön plana çıkarır. Dextras, organik ve geri dönüştürülebilir ürünleri, endüstriyel projelerin temel unsurları olarak kullanır. Çalışmalarında bitki yaşamları, yaprakları, tekstil atıkları, kağıt vb. nesnelere ileri dönüşüm gibi yöntemlerle doğadan ilham alan heykeller ve entelasyonlar yaratır. Sanatçının temel amacı, doğanın

geçiciliğini, döngüsellliğini ve insan-doğa etkileşimini ön planda sunmaktadır. Dextras, doğal olarak yapılan elbiseler ve aksesuarlarla insanı doğayla bütünleştiren eserler üretir. Bu koleksiyon, doğanın modaya entegre edilmesiyle tüketimin ve hızlı modanın eleştirel bir yaklaşımla sunulmasını sağlar.



Şekil 7. Nicole Dextras, *Yaklaşan Orman Yan-
gınları*, 2016, fotoğraf [13]



Şekil 8. Nicole Dextras, *Eko-Adam*, 2007,
fotoğraf, çeşitli bitkisel malzemelerden yapılmış
giysi [14]

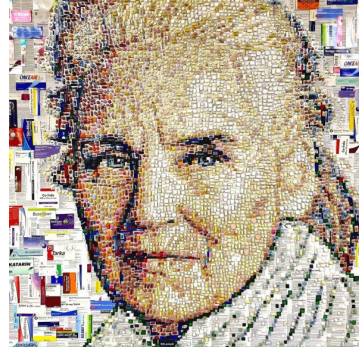
3.5. Deniz Sağdıç ve İleri Dönüşüm Sanat Pratiği

Deniz Sağdıç, atık materyallerle sanat eserleri üreten çağdaş Türk sanatçısıdır. Özellikle tekstil atıkları, denim kumaşlar, ilaç atıkları, plastik şişeler ve geri dönüştürülebilir diğer atıklarla yaptığı sürdürülebilir sanat eserleriyle tanınmaktadır. Onun sanatında, “atık” olarak kullanılan nesnelere ve malzemelere, sanatsal bir ifade biçimi olarak yeniden şekillendirilir. Sağdıç, sanatında ileri dönüşümü estetik ve kavramsal bir boyutla ele alarak, atıklara yeni yaşamlar kazandırır. Atık malzemeleri, özellikle tekstil ürünleri, sanatın malzemesine dönüştürülerek tüketim ve çevre sorunlarına dikkat çeker. Deniz Sağdıç, malzeme seçimini saklı ve tematik olarak yapar. Tekstil atıkları başta olmak üzere diğer çeşitli atıklarla portreler ve figüratif ürünler üretir. Çalışmalarında atıkların özgün dokularını ve renklerini koruyarak sanatsal öğeler olarak sunar. Kolaj, montaj ve asamblaj teknik-

lerini kullanarak katlamalı, üç boyutlu ve etkileyici bir estetikle eserlerini yaratır. “Denim Serisi” Sağdıç’ın en önemli serilerinden biridir. Eski denim kumaşları kullanarak devasa portreler gerçekleştirdiler. Denim kumaşın farklı gücü ve dokuları hem estetik hem zenginlik hem de sembolik bir anlam katar. Bu seri, moda endüstrilerinin etkilerine ve sürdürülebilirliğine dikkat çekiyor. Sağdıç, özellikle denim gibi evrensel ve karakteristik özellikleri kullanarak, izleyicileri ile daha yakın bir bağ kurarak sanatına davet eder. Sanatçı, malzemeyi özgün bir ifade biçimi olarak keşfeder ve potansiyelini duygusal olarak da hissederek ürünlerine dönüştürür. Ayrıca Sağdıç, sürdürülebilirliğin sadece belirli toplumsal kesimlere hitap etmemesi, savunulması ve atölye çalışmaları ile daha geniş kitlelere ulaşmasını hedeflemektedir. Ayrıca sanatçının eserlerinde kullanılan malzemelerin çoğu, herkesin günlük hayatında karşılaştığı atıklardır. Bu sayede izleyicinin bu yöntemlerle kolayca bağlantı kurmasını sağlar ve daha geniş bir kitleye ulaşmayı sağlar. Sağdıç, gelecekte eserlerinde kullandığı ileri dönüşüm sanatını sadece bir teknik olarak değil, sanatın toplumsal bir sorumluluğu olarak değerlendirilmesine teşvik eder.



Şekil 9. Deniz Sağdıç, *The artwork is made of denim waste pieces*, 140x140cm, 2022 [15]



Şekil 10. Deniz Sağdıç, *The artwork is made of expired medicine waste pieces*, 140x140cm, 2022 [16]

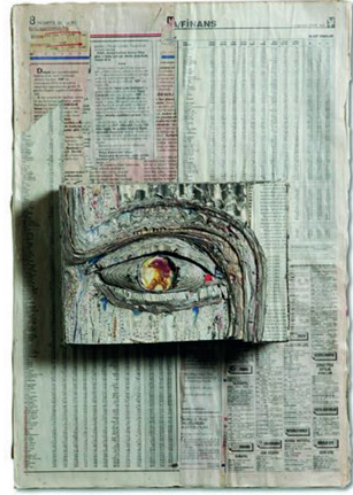
3.6. İrfan Önürmen ve İleri Dönüşüm Sanat Pratiği

İrfan Önürmen, Türk sanatçı olarak ileri dönüşüm ve atık malzemeyi sanat pratiğinde güçlü bir biçimde ifade eder. Önürmen’in sanatı; malzemeleri dönüştürmesinin yanı sıra genellikle derin felsefi ve varoluşsal mesajlar taşır. Bulunan malzemeleri kullanımını, insanlar, doğa ve üretim ve tüketim döngüleri arasındaki ilişki için bir metafor hâline gelir. Sanatçının bu yaklaşımdaki ürünlerinde, metaller, kumaşlar, plastikler ve diğer endüst-

riyel atık yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu özellikler, estetik bir form kazandırırken, aynı zamanda sosyal ve kültürel anlamlar da içerir. Önürmen'in çalışmaları, izleyiciyi bu malzemelerin geçmişlerine, tüketim döngülerine yönelik düşünmeye sevk eder. Çalışmaları, insan toplumunun doğal dünyayla nasıl etkileşime girdiğine dair düşünmeyi teşvik eder, aşırılığı ve israfı sorgular.



Şekil 11. İrfan Önürmen (1958) Pentül Karışık teknik. İmzalı.2010 tarihli. 200x130 cm [17]



Şekil 12. İrfan Önürmen, 2009, Atık Gazete rölyefi,3,57*38cm [18]

4. Sonuç ve Öneriler

Sürdürülebilirlik ve sanat arasındaki ilişki, yalnızca geri dönüşümle sınırlı kalmayıp, ileri dönüşüm (upcycling) ile daha derin bir anlam kazanır. İleri dönüşüm, atık malzemelerin sanatsal bir bakış açısıyla yeniden değerlendirilmesi ve yaratıcı bir şekilde kullanılmasıdır. Bu süreç, çevresel fayda sağlamakla birlikte, sanatçılara günlük yaşamda değeri göz ardı edilen malzemelere yeni bir anlam kazandırma fırsatı sunar. Sanatçılar, atık malzemeleri kullanarak doğaya zarar vermekten kaçınır ve toplumsal mesajlar iletmek için güçlü bir araç yaratırlar. Plastik, metal, kağıt ve tekstil gibi malzemeler, günlük yaşamda sıklıkla atılmakta, ancak sanatçılar bu materyalleri dönüştürerek her biri için yeni bir anlam oluştururlar. İleri dönüşüm, sanatın çevresel sorumlulukla birleştiği yaratıcı bir süreçtir. Bu süreç hem sanat-

çılara hem de izleyicilere çevresel farkındalık kazandırırken aynı zamanda sanatsal ifadenin sınırlarını zorlar. Sanat, bu anlamda hem estetik hem de toplumsal bir araç olarak güçlü bir potansiyele sahiptir. İleri dönüşüm, yalnızca atıkların değerlendirildiği bir süreç değil, aynı zamanda yaratıcı düşüncenin, çevre bilincinin ve toplumsal sorumluluğun harmanlandığı bir alandır. Bu bildiride, ileri dönüşümün sanatla birleşerek sürdürülebilir bir geleceğe nasıl katkı sunduğunu keşfettik. Elde edilen bulgular, sanatçıların atık malzemeleri sanata entegre edilerek sürdürülebilirliğe katkı sağlama-ya devam ettiklerini göstermektedir. Ayrıca, sanat üretiminin ileri düzeyde benimsenmesi, sadece geleneksel bir yöntemin ötesinde, ekolojik ve toplumsal sorumluluk bilincinin bir göstergesi hâline gelmiştir. Bu yaklaşım hem bireysel hem de toplumsal düzeyde daha bilinçli bir yaşam biçimi için umut verici bir yol haritası sunmaktadır. Gelecekte, ileri dönüşüm sanatı sadece estetik bir tercih değil, aynı zamanda toplumun sürdürülebilirlik yönünde atacağı adımlar için ilham kaynağı olabilir. Endüstriyel atıkları dönüştürerek sanatçılar hem yeni anlamlar yaratacak hem de çevresel etkileri minimize edecektir. Bu sonuçlar çerçevesinde ileri dönüşüm sanatı ile ilgili şu öneriler verilebilir:

- Bu yaklaşımı benimseyen sanatçılarla birlikte düzenlenen Türkiye'nin ilk ileri dönüşüm festivali olan Upcycle İstanbul Art and Design Festival'inde atıklara ikinci şans veren tasarımlar, çevre konularını ve sürdürülebilirliği sorgulayan bu ve benzeri festivallerin gelenekselleşmesi ve sayıca artması gerekmektedir.

- Bununla birlikte sanat ve tasarım okullarında gerekli düzenlemelerle müfredata atık maddeleri ileri dönüşüm ile değerlendirilebilecek yöntemler uygulanabilir.

- İleri dönüşüm sanat pratiğine sahip eserlerin sergilendiği ekolojik sanat müze ve galerileri kurulup desteklenerek, sürdürülebilirlik bilinci yaygınlaştırılabilir ve çevre dostu sanat anlayışı teşvik edilebilir.

Referanslar

[1] Aslan, T. (2023). Sürdürülebilir tüketim davranışları üzerine sürdürülebilir sanat. *Yıldız Journal of Art and Design*, 9(2), 104-114.

[2] Aslan, T. (2023). Sürdürülebilir Tüketim Davranışları Üzerine Sürdürülebilir Sanat. *Yıldız Journal Of Art And Design*, 9(2), 104-114.

[3] Atıl, A., Gülgün, B., & Yörük, İ. (2005). Sürdürülebilir Kentler Ve Peyzaj Mimarlığı. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 42(2), 215-226.

[4] Dal, İ., & Gökçe, G. C. (2019). Sürdürülebilirlik Yolunda "İleri Dönüşüm": Bir Atölye

Çalışması. İnönü Üniversitesi Sanat Ve Tasarım Dergisi, 9(20), 30-38.

[5] İlden, S. Y., & Sarıca, S. (2023). Çağdaş Sanatta İleri Dönüşüm ve Çöpün Olanaklarını Keşfetmek. Sanat ve Yorum, (41), 82-89.

[6] Binboğa, E. B., & Enes, E. (2021). Atık Kot Giysilerden İleri Dönüşüm Yöntemi ile Sanat Eseri Oluşturulması Deniz Sağdıç'ın Portre Çalışmalarının İncelenmesi. Art-E Sanat Dergisi, 14(28), 882-901.

[7] <https://www.invaluable.com/artist/hazoume-romuald-wt4uqqd9x7/?srsltid=AfmBOorzeEINdspRZzOU6GJs57gYx2FEzTVoYqV2shKH11d-CJPjokn> Erişim Tarihi: 10.12.2024

[8] <https://www.invaluable.com/artist/hazoume-romuald-wt4uqqd9x7/?srsltid=AfmBOorzeEINdspRZzOU6GJs57gYx2FEzTVoYqV2shKH11d-CJPjokn> Erişim Tarihi: 10.12.2024

[9] <https://sarahartist.com/home.html> Erişim Tarihi: 10.12.2024

[10] <https://sarahartist.com/home.html> Erişim Tarihi: 10.12.2024

[11] <https://vikmuniz.net/> Erişim Tarihi: 11.12.2024

[12] <https://vikmuniz.net/> Erişim Tarihi: 11.12.2024

[13] <https://www.artworksforchange.org/portfolio/nicole-dextras/> Erişim Tarihi: 11.12.2024

[14] <https://www.artworksforchange.org/portfolio/nicole-dextras/> Erişim Tarihi: 11.12.2024

[15] <https://www.denizsağdic.art/gallery> Erişim Tarihi: 11.12.2024

[16] <https://www.denizsağdic.art/gallery> Erişim Tarihi: 11.12.2024

[17] <https://artam.com/muzayede/283-cagdas-sanat-eserleri/irfan-onurmen-1958-pentul> Erişim Tarihi: 11.12.2024

[18] <http://mimarcasanat.com/resim/irfan-onurmen-tuller-gazeteler.html> Erişim Tarihi: 11.12.2024

Edirne’de Sürdürülebilirlik Bağlamında Tramvayın Geleceği

Kerem İřcanođlu¹

Özet

Bu bildiriye, hâlihazırda var olmayan Edirne’nin sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda tramvay sisteminin potansiyeli ve geleceği ele alınmaktadır. Tarihî dokusu, kültürel zenginlikleri ile öne çıkan ve belli ölçülerde artan nüfusu ile olduğu kadar Balkanlar’dan geçiş noktası olması ve artan turizmi ile Edirne’nin hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından ulaşım sistemlerinde yenilikçi çözümlere ihtiyaç duymakta olduğu tarafımızca tespit edilmiştir. Edirne gibi planlaması araç yüküne göre yapılmayan şehirler için otomobil taşımacılığı sürdürülebilir değildir. Çevreci olan tramvay; enerji verimliliği, düşük karbon salınımı ve trafik yoğunluğunu azaltma kapasitesiyle sürdürülebilir şehir içi ulaşımın temel unsurlarından biridir. Edirne’de tramvay sistemi; turizm bölgelerini, üniversite yerleşkelerini ve yerleşim alanlarını birbirine bağlayarak hem yerel halkın hem de ziyaretçilerin ulaşım ihtiyaçlarına çevreci bir çözüm sunabilir. Ayrıca, şehirdeki trafik yükünü hafifleterek tarihî mirasın korunmasına da katkıda bulunabilir. Edirne’nin tarihî merkezi, tramvay sayesinde motorlu araçlardan arındırılarak yayalaştırılabilir. Bu bildiri, Edirne’nin mevcut ulaşım sistemini genel bağlamda analiz ederek tramvay sisteminin çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlardaki potansiyel etkilerini tartiş-

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250302>

¹ Trakya Üniversitesi, Resim Bölümü, Edirne, Türkiye, iscanoglukerem@gmail.com,
ORCID: 0000-0003-1080-9113

maktadır. Tramvay projelerinin planlanmasında yerel yönetimlerin rolü, finansal kaynakların sağlanması ve toplumsal katılımın önemi üzerinde durulmaktadır. Sonuç olarak, Edirne’de tramvayın hayata geçirilmesinin, şehrin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında önemli bir adım olduğu vurgulanmaktadır. Bu çalışma, Edirne’nin sürdürülebilir kentsel ulaşımına dair gelecekteki yatırımlar ve politikalar için bir rehber niteliği taşımayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Edirne, Sürdürülebilirlik, Çevre, Tarihi Mirasın Korunması, Turizm ve Ulaşım.

The Future of Trams in Edirne in the Context of Sustainability

Abstract

This paper discusses the potential and future of the tram system in line with the sustainable development goals of Edirne, which does not currently exist. It has been determined by us that Edirne, which stands out with its historical texture and cultural richness and with its growing population, as well as being a transit point from the Balkans and increasing tourism, needs innovative solutions in transportation systems in terms of both environmental and economic sustainability. Automobile transportation is not sustainable for cities like Edirne whose planning is not based on vehicle load. The environmentally friendly tram is one of the key elements of sustainable urban transportation with its energy efficiency, low carbon emissions and capacity to reduce traffic density. In Edirne, the tram system can provide an environmentally friendly solution to the transportation needs of both locals and visitors by connecting tourism regions, university campuses and residential areas. It can also contribute to the preservation of historical heritage by easing the traffic load in the city. The historical center of Edirne can be pedestrianized by removing motorized vehicles thanks to the tram. This paper analyzes Edirne’s existing transportation system in a general context and discusses the potential impacts of a tram system in environmental, economic and social dimensions. The role of local governments in the planning of tram projects, the provision of financial resources and the importance of community participation are emphasized. In conclusion, it is emphasized that the implementation of the tram system in Edirne is an important step in achieving the city’s sustainability goals. This study

aims to serve as a guide for future investments and policies on sustainable urban transportation in Edirne.

Keywords: Edirne, Sustainability, Environment, Protection of Historical Heritage, Tourism and Transportation.

1. Giriş

Merkez nüfusu 2023 yılı için 194.991 (2025.01.08) ile Edirne, küçük bir kent olmasına rağmen tarihî dokusu ve stratejik konumu ile Türkiye'nin önemli şehirlerinden biridir. Balkan Coğrafyası ve Avrupa'ya açılan kapı özelliğiyle öne çıkan şehir, bir anlamda Türkiye'nin Batı'ya açılan vitrini-dir. Şehrin ulaşım altyapısı, kentin güncel ulaşım ihtiyaçlarına cevap verememektedir. Edirne-İstanbul arasında projelendirilen ve yapımına devam edilen hızlı tren projesinin tamamlanması, artan turizm ile birlikte araç sayısındaki artışın hızlanmasına sebep olacaktır. Artan araç sayısı, nüfus ve kentleşme, şehrin ulaşım altyapısını sürdürülebilir stratejilerle yeniden tasarlama ihtiyacını doğurmuştur. Kentin toplu ulaşım sistemi minibüslerle, ETUS (Edirne Toplu Ulaşım Sistemi) adı verilen özel girişime dayanan ulaşım sistemi ile sağlanmaktadır. Edirne'de araç sayısının artması ve toplu ulaşım sisteminin ihtiyaca cevap verememesiyle belli saatlerde araç trafiğinde tıkanıklık görülmektedir. Kalitesiz toplu ulaşım, kişisel araç sayısının artışıdaki temel sebeptir. Yetersiz ve kalitesiz toplu ulaşım Edirne'de araç sayılarının artışını hızlandırmakta ve bu da toplu ulaşım sistemini daha da zora sokmaktadır. Bu kısır döngü Edirne'nin sürdürülebilir geleceğini tehdit etmektedir. İstatistikler Edirne'de ciddi bir araç yükü olduğunu göstermektedir:

“Buna göre, 2024 yılı Ekim ayı sonu itibarıyla Edirne'de toplam motorlu kara taşıtı sayısı 193 bin 896'ya ulaştı.

Edirne'deki 193 bin 896 motorlu kara taşıtının; yüzde 41,8'ini otomobiller (81 bin 109), yüzde 1,1'ini minibüsler (2 bin 108), yüzde 0,9'unu otobüsler (1 bin 690), yüzde 13'ünü kamyonetler (25 bin 278), yüzde 2,5'ini kamyonlar (4 bin 858), yüzde 22,6'sını motosikletler (43 bin 761), yüzde 0,3'ünü özel amaçlı taşıtlar (491) ve yüzde 17,8'ini traktörler (34 bin 601) oluşturdu...

2023 ve 2024 Ekim Ayları Karşılaştırması, Otomobil: 76 bin 981'den 81 bin 109'a (%5,4 artış), Minibüs: 2 bin 18'den 2 bin 108'e (%4,5 artış), Otobüs: 1 bin 711'den 1 bin 690'a (%1,2 azal-

ma), Kamyonet: 24 bin 335'ten 25 bin 278'e (%3,9 artış), Kamyon: 4 bin 811'den 4 bin 858'e (%1 artış), Motosiklet: 37 bin 180'den 43 bin 761'e (%17,7 artış), Özel amaçlı taşıtlar: 450'den 491'e (%9,1 artış), Traktör: 33 bin 981'den 34 bin 601'e (%1,8 artış).” [2]

Artan araç sayıları Edirne'nin özellikle tarihî merkezi üzerinde tehdit oluşturmaktadır. Genişletilmesi olanaksız yollar, artan yoğunluğa cevap verememektedir. Tarihî merkezde ulaşım için yapılan düzenlemeler tarihi yıpratmakta ve kentsel dokuya zarar vermektedir. Edirne Kaleiçi'nde 1840'lı yıllarda yapıldığı bilinen Mezarlık Çeşmesi'nin karayolu ulaşımını engellediği için sökülmesi ve atık olarak bir yere yığıntı şeklindeki istifi buna örnek olarak görülebilir. İlk aşamada yan duvarları yıkılarak bağlantı yolu açılan yapı, bugün tamamıyla yok olmuştur. Taşınma savı, bir iddia olarak kalmıştır.



Şekil 1. 1900'lerin başında çekilmiş Mezarlık Çeşmesi'ne ait görsel [3]



Şekil 2. 27.09.2023 tarihine ait tarihî çeşmeden kalanların sökülmesi ile ilgili görsel [4]



Şekil 3. 27.09.2023 tarihine ait Mezarlık Çeşmesi'nden kalanların taşınmasına ait havadan görsel [5].

Akıcı ulaşım için çözüm olarak daha fazla karayolu yapılarak trafiğin rahatlatılması sağlanmaya çalışılmaktadır. Kent merkezi ihtiyacının çözülmesi için yapılan yan yollar, merkezin araç yükünü azaltmak yerine daha da yoğunlaştırmaktadır. Bu bağlamda tramvay sistemi; çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan sürdürülebilir bir ulaşım çözümü olarak öne çıkmaktadır. Fakat kentin yönetimince çözüm aranmamakta sadece durumun idaresi amaçlanmaktadır. Bu bakımdan kentin gelecek toplu ulaşım perspektifinin olmadığını söylemek de yanlış olmayacaktır. Edirne; özellikle eski mahallelerde kat artışına giden, yeşil alanlarını tahrip eden, sürdürülebilir olmayan yapılaşma stratejisi izleyen bir şehir olarak görünmektedir. Edirne’de hafif raylı sistemlerin uygulanabilirliği ve geleceği Edirne için hayatidir ama tramvay sistemleri tek başına kenti yaşanır yapmaya yetmez. Yeşil alanlar, kaldırımlar ve bisiklet diğer önemli sürdürülebilir olanaklar olarak değerlendirilmelidir. Edirne’nin ulaşım için hedeflediği tahmin edilen fakat var olmayan gelecek modeli, sürdürülebilirlik perspektifiyle tekrar ele alınmalıdır.



Şekil 4. ETUS'a ait güncel bir ulaşım midibüsü [6]

Köylerden kente göç ve Trakya Üniversitesinin açılması ile büyüyen Edirne kenti, doğu-batı ekseninde ve merkez-kuzey aksında büyümekte ve şekillenmektedir. Kentin güneyindeki nehir sistemi doğal bir engel olarak güneye büyümeyi sınırlamıştır. Kentsel yoğunluk Kaleiçi merkez olarak kabul edilir ise batı yönünde gelişmekte ve ilerlemektedir. Kentleşme ve eksik toplu taşıma sistemi ile birlikte Edirne’de bireysel araç kullanımı

artmış ve bu durum trafik sıkışıklığı, hava kirliliği ve enerji tüketimi gibi sorunlara yol açmıştır. Süreç insan sağlığının aleyhine işlemektedir. Dünya Bankası ve Avrupa Birliği gibi uluslararası kuruluşlar, sürdürülebilir ulaşım projelerini destekleyerek karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik çalışmaları teşvik etmektedir [7]. Tramvay, düşük karbon salınımı ve enerji verimliliği sayesinde bu hedeflere katkı sağlayabilecek önemli bir toplu taşıma aracıdır.

2. Tramvay veya Hafif Raylı Sistemlerin (HRS) Tanımlanması

Halk arasında Tramvay olarak tanımlanan toplu taşıma aracı günümüzde Hafif Raylı Sistemler olarak da adlandırılmaktadır. Metro Sistemlerinin küçük bir sürümü olarak bilinen tramvaylar Türkiye’de yer altından gitmeyen, otobüsten kapasite olarak büyük, elektrik ile çalışan ulaşım araçları olarak bilinirler. Bu doğrudur. Birçok şehirde yüzeyden giden HRS kurulmuş ve çalışmaktadır. Bunlara Kayseri, İstanbul, Eskişehir, Malatya ve Konya illeri örnek olarak verilebilir. Aslında Osmanlı geç döneminde yaşamımıza giren tramvaylar ve trolleybüsler 1950 sonrasında yaşamımızdan çıkmıştır. Bu unutulmuş yeni yapılan sistemlerle küllerinden doğan bir ulaşım aracının kent yaşamımıza tekrar girmesi ile sonuçlanmıştır. Yeniden popülerlik kazanan HRS’ler günümüzde Türkiye’de yeniden yaygınlaşmaktadır. Sürdürülebilir toplu ulaşım denildiğinde Tramvaylar ön plana çıkmaktadır. HRS’lerin genel özelliklerini Faruk Cirit şu şekilde özetlemektedir:

“HRS hattının yol ile kesiştiği noktalarda HRS araçları için sinyalizasyon sistemleriyle destekli geçiş üstünlüğü mevcuttur. İstasyonlar cadde ve yollardan net bir biçimde ayrılmış olup yolcuların güvenliği ve konforu sağlanmıştır. İstasyonların arası 300-600 metre arasında değişmektedir. Yüksek yolcu kapasiteli araçlara sahip olan sistemde trenler 2-4 araçlık setler hâlinde işletilmektedir. Araçlar hızlı ve güvenli iniş/binişler için çok sayıda kapıya sahiptir. Araçlar genelde 70 km/saatlik maksimum hıza sahiptir. Ancak 120 km’ye ulaşan HRS’ler de mevcuttur. HRS’ler trafik ile karışık bir şekilde işletilebilmekle birlikte yoğunluğun fazla olduğu yerlerde tahsisli yollar ve tüneller de kullanılmaktadır.” [8].

Görece diğer ulaşım araçlarına göre üstünlüklerini ise şu şekilde tanımlanmıştır:

“Raylı sistemler arasında gerek maliyet gerekse şehrin makro formuna adaptasyon bakımından daha esnek bir yapıdadır. Yol yapısı

metroda olduğu gibi tamamen ayrılmış olmayı gerektirmemekte birlikte ihtiyaç duyulan yerlerde karma trafikte işletmeye müsaittir. Metro sistemlerine göre maliyeti daha düşüktür. Trenlerin ebatları ve uzunlukları diğer raylı sistemlere nazaran daha esnek olup uygulanacak bölgeye göre değişiklik gösterebilir. Petrol kaynaklı yakıt kullanan araçlara göre hafif raylı sistemler çok daha az enerjiyle çok daha fazla kişiyi taşıma imkanı sunar. Elektrik enerjisinin farklı bölgelerde üretilip araçlara iletilebilmesinden dolayı esneklik sağlar. Düşük kaza riskinden ve hava koşulları gibi dışsal faktörlerden etkilenmeden işletilebilmesinden ötürü dakik ve emniyetli bir ulaşım alternatifidir. Titreşim, ses ve ivmelenme bakımından konforlu ve çekici bir sistem olmasından ötürü insanların bu sistemleri kullanmasını teşvik etmektedir. Elektrik enerjisi kullanılmasından dolayı fosil yakıt kullanan araçlar gibi lokal hava kirliliği yaratmamaktadır.” [9].

3. Tramvayın Çevresel Avantajları

Tramvay sistemleri, diğer toplu taşıma yöntemlerine kıyasla daha az enerji tüketir ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalıştırılabilir. Örneğin, Fransa'nın Strasbourg şehrindeki tramvay sistemi, elektrik ihtiyacını yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayarak sıfır karbon emisyonuna yaklaşmıştır [10]. Benzer bir modelin Edirne'de uygulanması, şehrin hava kalitesini artırabilir ve karbon ayak izini azaltabilir. Tramvay sistemlerinin çevresel avantajlarını sıraladığımızda;

- Tramvay sistemleri düşük karbon emisyonuna sahip olduğu için karbon ayak izi daha azdır. Diğer fosil yakıt ile çalışan toplu ulaşım sistemlerine göre daha az sera gazı (CO₂) salınımına sebep olurlar.
- Tramvaylar, egzoz üretmezler dolayısıyla kent merkezlerinin hava kalitesinin bozulmaması, hava kirliliğinin azaltılmasına yardımcı olurlar.
- Tramvaylar, enerji verimliliği açısından da en önemli kentsel seçeneklerden biridir. Bireysel otomobil, otobüs ve minibüs gibi araçlara göre daha az enerji tüketerek daha çok insan taşır.
- Tramvaylar, trafiği azaltarak daha az aracın kullanılmasına ve dolayısıyla daha az karbon emisyonuna katkı sağlarlar. Araç trafiğini azaltırlar.
- Tramvaylar, yenilenebilir enerjiler kullanım potansiyeliyle de çevresel olarak öne çıkmaktadır. Rüzgâr, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile bütünleşen sistemlerle çevresel sürdürülebilirliği artırır.
- Tramvaylar, uzun ömürlü ulaşım sistemleridir. Bu bakımdan atık

üretimi tramvay ulaşımında diğer fosil yakıtlı bireysel veya tekerlekli toplu taşıma sistemlerine göre daha azdır.

4. Ekonomik ve Şehrin Gelişimi Üzerindeki Etkileri

Tramvay sistemleri, ilk yatırım maliyeti diğer seçeneklere göre yüksek olmasına rağmen uzun vadede ekonomik fayda sağlar. Trafik sıkışıklığının azalması, yakıt tüketiminin düşmesi ve bireysel araç sahipliğine olan talebin azalması gibi etkiler, ekonomik kazançlar sunar [11]. Ayrıca, tramvay hatlarının geçtiği bölgelerde ticaretin canlandığı ve emlak değerlerinin arttığı bilinmektedir [12]. Bilet başına maliyetler bakımından da tramvay iyi bir seçenektir. Uzun ömürlü olması araç yenileme harcamalarını düşürerek uzun vadede bilet fiyatlarını düşürür. Yenilenebilir enerji projeleri ile birlikte bütünleşik projeler yapıldığında ulaşım maliyetleri tramvay için daha da düşecektir. Yerli tramvay sistemlerinin kullanılması hem araç maliyetlerinin azaltılması hem de yedek parça ve tamirat giderlerinde azalma yaratacak bu da bilet fiyatlarına yansıtacaktır. Konya Tramvayı bu noktada örnek olarak gösterilebilir. 27,5 km lik hat üzerinde 42 istasyona sahip olan hat 1992'den bu yana kullanılmaktadır. Kent gelişiminin ana aksını kuran tramvay kentin temel aksının oluşumuna da katkı sağlar. 1992 yılında Almanya'dan gelen Obermeyer firmasının üretimi olan vagonlar günümüze kadar ulaşım hizmetini sağlayabilmiştir [13]. Bu vagonların yenilenmesi için harekete geçen belediyenin vagonların ikonik görüntüsünün kent estetiğine katkı sağladığı için kalabilecek olduğu tartışması da tramvayların yüzlerce yıl kullanılacak araçlar olduğunu bizlere göstermektedir. Aynı zamanda zaman kayıplarını azaltacağı için de kent ekonomisi ile doğrudan ilgilidir. "Amerika'da yapılan bir araştırmaya göre 2013 yılında trafik tıkanıklığının direkt ve dolaylı maliyeti 120 milyar \$'dır. 2030 yılında bu rakamın 180 milyar \$'ı bulacağı tahmin edilmektedir. Toplu ulaşım araçları ile hizmet verilen bölgelerde yaşayan Amerikalılar toplu ulaşım araçlarını kullanmak suretiyle her yıl trafik tıkanıklığı maliyetlerinde 13 milyar \$'dan fazla tasarruf sağlamaktadırlar. Birleşik Krallık'ta 87 şehir ve büyük kentsel alanı kapsayan bir çalışmada trafik tıkanıklığının direkt ve dolaylı maliyeti 2016 yılında 6 milyar €'u geçmiştir. Bu maliyet hesabı yapılırken yolculuk süresi maliyeti, taşıt işletim maliyeti ve hava kirliliği maliyeti hesaplanmaktadır" [14]. Kentler tramvay gibi ulaşım sistemlerine yönelmedikleri için bu ekonomik yükleri de kaldırmak zorunda kalmaktadır.



Şekil 5. Konya'nın ikonik Obermeyer firmasından ithal edilen tramvay vagonu [5]

5. Edirne İçin Uygulanabilirlik

Edirne; engebesiz, düz arazi yapısı ve bir araya getirilmiş, sıkıştırılmış kent yapısı ile tramvay sistemi için ideal bir altyapıya sahiptir. Edirne'de tramvay Osmanlı Devleti Dönemi'nde de düşünülmüş fakat Trablusgarp Savaşı ve mali durum bu projenin tamamlanmasına engel olur. Fakir ve borç altında ezilen, yıkılmak üzere olan bir ülkenin aydınlarının bu kadar ilerici bir hayali kurmuş olmaları ayrıca düşünülmesi gereken bir durumdur. Cumhuriyet Dönemi boyunca seçim kampanyalarında bazı azınlık partilerin başkan adaylarının gündemine alması dışında dillendirilmez. Aydınların sorumluluğu ve rolü burada öne çıkmaktadır. Kentte küçük bir grubun dahi bu konuda düşünce geliştirmemesi kentte aydın rolünün boş olduğunu bizlere göstermektedir. “Aydınlanma ve modernite projesi kendi yayılma süreçleri içinde gerek ekonomik ilişkileriyle, gerek bilim anlayışı ve eğitim kanallarıyla er ya da geç geleneksel toplumdaki küçük bir gruba ulaşacaktır. Başka bir deyişle geleneksel toplumda erken aydınlananlar olacaktır.” [15]. Cumhuriyet öncesi yaratılan bu idealist iklim bugün bile bizleri bazı açılardan şaşırtmaktadır. Geç Osmanlı Tramvay Projeleri buna örnek olarak gösterilebilir.

Edirne'de 1873-1911 yıllarında üretilen tramvay projeleri; Karaağaç-Saraçhane Köprüsü, Zindanaltı-Yıldırım, Saraçhane Köprüsü-Saray Bahçesi, İstanbul Yolu-Balık Pazarı, Abacılarbaşı-Kıyık gibi tramvay hatlarını kapsamaktadır [16]. Edirne'nin o dönemde de tramvay için uygun

fiziksel koşulları sağladığı düşünülmüştür. Şehrin en yüksek noktası 130 metre rakımda iken en alçak noktası 40 metre rakımdadır. Ana arter denilebilecek doğu batı hattı görece düz bir satih üzerinde bulunmaktadır. Şehrin küçük oluşu da yapımı kolaylaştıran bir diğer etkidir.

6. Tarihi Kent Kimliğinin, Turizmin Sürdürülebilirliğine Katkısı

Edirne anıt taşınmaz kültür varlıkları bakımından zengin bir şehir olarak görülmektedir. Uzun yıllar İstanbul ile Balkanlar arasında ulaşım hattının önemli bir noktası olması gelişmesine katkı sağlamıştır. Osmanlı Devleti'ne bir dönem başkentlik yapan şehir; özellikle Osmanlı Dönemi dini, askeri ve sivil mimari örnekleri açısından yaşayan bir müze kimliğindedir. Kentsel bir erozyona uğrayan bir bakıma örselenen bu kimlik, yerli turistin ilgisini çekmektedir. Edirne gelişmek ile tarihi kimliğini muhafaza etmek arasında çok ciddi sorunlar yaşamaktadır. Özellikle karayolu taşımacılığının kentin ulaşımının neredeyse tamamını sağlaması tarihi alanda ki araba yoğunluğunu artırmakta bu da daha az yeşil alan, daha fazla otopark ve betonlaşmış alan demektir. Kent merkezindeki hava kalitesini düşüren egzoz gazları ve oluşan ses kirliliği de turizmi baltalamaktadır. Artan turizmin de kentte araç yükünü artırması özellikle hafta sonu kentin tıkanan trafiğinin başlıca sebebidir. Şehirde yapılması gereken ulaşım tramvay hatlarına paralel olarak yapılacak tarihi ve turistik alanlar arasında bağlantı sağlayacak bir daha hafif bir tramvay hattı, turizm potansiyelini artırabilir ve yerel halk için cazip bir ulaşım seçeneği sunabilir. Ancak, bu konuda yapılan herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Yapılması gereken uygulanabilirlik için detaylı bir fizibilite çalışması turizmi de konunun içeriğine dâhil etmelidir. Kentin gelecek vizyonunda turizmin önemli rol oynayacağı düşünülmektedir.

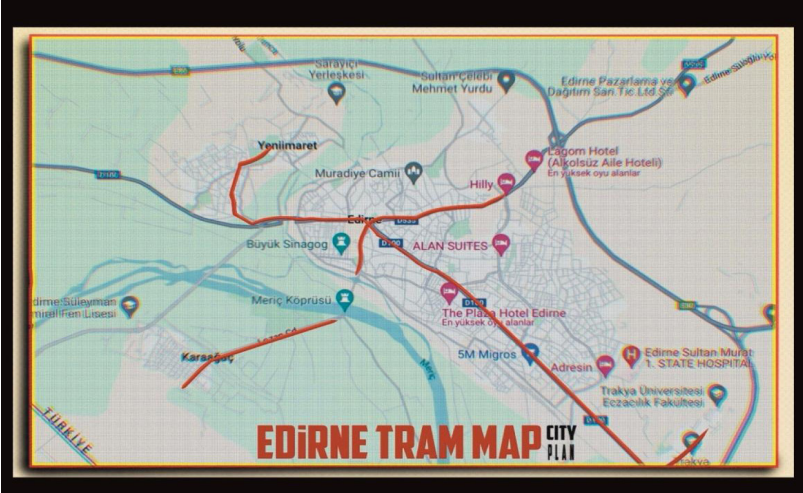
7. Sosyal Fayda ve Katılım

Tramvay sistemleri, yalnızca bir ulaşım aracı olmanın ötesinde, sosyal yaşamı destekleyen bir unsurdur. Engelli erişimine uygun yapısı, geniş kapasitesi ve düzenli seferleri ile toplumsal kapsayıcılığı artırır. Ayrıca, sürdürülebilir ulaşım politikalarının benimsenmesi, Edirne halkının çevre bilincini artırarak yaşam kalitesine doğrudan katkı sağlar [17]. Ortalama yaşam sürelerinin artırılması daha temiz bir çevre ile mümkündür. Tramvay aynı zamanda kentte yapılacak yayalaştırmalar için bir ön hazırlık veya ön

koşul olarak görülebilir. Bir diğer ifade ile ulaşım için karayolunun yerini tramvay sisteminin alması ile geniş kaldırımların ön koşuludur. Hafif raylı sistemler çok daha verimlidir ve daha az alan kaplarlar. Bu aynı zamanda daha fazla kentsel yeşil alan demektir. Kentte sürdürülebilirlik bağlamında öne çıkan yeşil alanlar HRS olmadan gerçekleştirilemez. Aynı zamanda ucuz ve eşit bir ulaşım stratejisi yurttaşların araç alımı, fosil yakıtlar, araç bakımları, tamirat vb. gibi harcamaların yapılmamasına paralel ekonomik olarak fayda sağlayacaktır. Türkiye otomobile bağlı olarak çok ciddi bir ithalat gerçekleştirmektedir. Araç ithali dışında, yakıt, yedek parça, vb. gibi maddi bedeller ekonomimiz için önemli bir sorun yaratmaktadır. HRS'ler ekonomik olarak maddi fayda sağlar. Ulaşım stratejileri sosyal yaşamımızı doğrudan etkiler. Eğer sokaklar otomobillerin işgalindeyse çocuklar sokağa inemez ve sosyalleşemezler. Ulaşımın sadece otomobil merkezli düşünülmesi de aynı sonucu yaratır. İnsanların sosyal davranışlarını etkiler. “Ulaşımın sosyal etkilerini anlatırken, otomobilden farklı anlatamıyoruz. Çünkü kentler giderek otomobile daha bağımlı hâle geliyor. Otomobil kullanımını teşvik eden politikalar yalnızca çevresel ve mekânsal açıdan olumsuzluk yaratmıyor, aynı zamanda sosyal açıdan izole yaşamlar ve toplumlar yaratıyor.” [18]. Bu bakımdan Tramvay sosyalleşmenin önündeki ulaşım sistemlerine bağlı engelleri kaldırmaya yardım eder. Otomobillere bağlı trafik sosyolojik çok önemli olumsuz etkiler yapar. Doğu batı ve kuzey güney ekseninde yerleşimin yoğunlaştığı Edirne’de tramvay hatlarının bu ekseninde yapılması akla yakın olmandır. Kente şekil vermek için HRS’ler kullanılabilir. Günümüz planlaması bireysel araçlara yöneliktir ve bu bakımdan karmaşık ve küreseldir. Eğer doğu batı ve kuzey güney ekseninde ulaşım hattı planlanırsa Edirne’nin köylerini de kente bağlayarak daha büyük ölçekli yaşanabilir planlamalar yapılabilir. Mevcut durumda ise yoğunluğu taşıyan karayollarının tramvaya ayrılması ile raylı sistemlerin Edirne’de uygulanması için elzemdir. Raylı ulaşım kamununun asfalt gibi yüksek maliyetli harcamalarını düşüreceği için kamunun maddi yükünü azaltır. Bunun dışında sadece şirketlere ya da belediyelere bırakılmış ulaşım sistemi gerekli toplumsal katılımı sağlayamaz. Büyümeye kapalıdır. Bunun için belediyenin de hissedar olduğu aynı zamanda kentlilerin de paydaş olduğu kooperatif veya benzeri katılımcı bir aidiyet yöntemi ile yapılmalıdır. Halk paydaş olmalıdır. Bir kentin ulaşımı şirketlere veya belediye yönetimlerine bırakılamayacak kadar önemli ve stratejik bir konudur.

8. Bulgular ve Tartışma

Edirne’de HRS hatları yapılması; turizm potansiyelinin artırılması, ulaşım sorunlarının azaltılması, sürdürülebilir ulaşım ve sürdürülebilir çevre bakımından akılcı bir seçenek olarak görülmektedir. Büyük oranda mevcut yollar üzerinde yapılacak HRS hatları, trafik yoğunluğunu azaltarak özel araç kullanımını düşürebilir ve tarihi alanlara erişimi turistler açısından kolaylaştırarak turist sayısında artış sağlayabilir. Ayrıca daha önce belirtmiş olduğumuz düşük karbon salınımı ile çevre dostu sürdürülebilir bir ulaşım seçeneği sunar. Ancak, HRS projesi çeşitli tartışmaları da beraberinde getirmektedir. Yüksek inşaat ve işletme maliyetleri, tarihi dokunun zarar görme riski, altyapı çalışmalarının çevresel ve sosyal etkileri dikkate alınmalıdır. Özellikle kazı çalışmalarının arkeolojik buluntulara zarar verme potansiyeli ve inşaat süresince yaşanacak ticari ve ulaşım kesintileri önemli riskler arasındadır. Tramvay hattının uzun vadeli başarıya ulaşması, kooperatif gibi stratejiler ile yerel halkın katılımının sağlanması, ihtiyaçlarının doğru analiz edilmesi ve alternatif ulaşım çözümleriyle kıyaslanarak kapsamlı bir fizibilite çalışması yapılmasına bağlıdır.



Şekil 6. Edirne’de ilk etapta yapılmasını önerdiğim hatlar kırmızı olarak işaretlenmiştir. [19]

9. Sonuçlar

Edirne’de tramvay sistemi kentin sürdürülebilir geleceğinin temel bileşimidir. Edirne’de tramvay sisteminin hayata geçirilmesi, şehrin ulaşım so-

runlarına çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunabilir. Bu konuda çalışmayan idari organlar kentin yaşadığı sosyal, doğal ve tarihi tahribatların ortağıdır. Gelecekte daha çok yaşanacak maddi harcamaların, daha çok kaybedilecek zamanın, daha azalacak yeşil alanların, daha da küçülecek kaldırımların, engellilerin zorlaşacak yaşamının sebebidir. Dünya da öne çıkan temel kavramlar arasında en çok önemsenenlerden biri olan sürdürülebilirlik konusunu yerel yönetimin yeteri kadar önemsemediği açıktır. Çözüm önerileri düşünmemek bu kavramın önemsenmediğini göstermektedir.

Edirne Belediye Başkanlığı tramvayı kent ulaşım stratejileri arasında yer vermemiştir. Gelecek ulaşım hedefi yoktur. Gündelik çözümler ulaşım politikalarının neredeyse tamamını oluşturmaktadır. Kent bireysel otomobil sayısının artışı ile ulaşımını sağlamaya çalışmakta ve bu Edirne'nin tarihi kimliğinin ve kentteki biyoçeşitliliğin yıpranması ile sonuçlanmaktadır. Daha fazla asfaltlanmış alan ve daha az kaldırım bu seçimin doğal sonucudur. Tramvay ile beraber daha fazla yeşile ve yayaya ayrılmış alan ile karşılaşacağız. Bu da yürüme ve bisiklet gibi diğer sürdürülebilir ulaşım yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak tramvay sistemleri sürdürülebilirlik konusunda Edirne'nin ana ulaşım seçeneğidir. Ancak, başarılı bir uygulama için fizibilite, finansman ve halkın katılımını içeren çok boyutlu bir planlama gerekmektedir. Bu bağlamda, yerel yönetimlerin uluslararası sürdürülebilir ulaşım hedefleri doğrultusunda harekete geçmesi büyük önem taşımaktadır.

Referanslar

- [1] Merkez Nufusu, Edirne. Erişim Adresi: https://www.nufusu.com/ilce/merkez_edirne-nufusu, Erişim tarihi: 08.01.2025.
- [2] Edirne'de Trafığe kayıtlı Motorlu Kara Taşıtlarının Sayısı 193 Bin 896'ya Ulaştı. Batı Ekspres Gazetesi. Erişim tarihi: 2024,12,13, Erişim Adresi: <https://www.batiekspres.com/edirne/edirne-de-trafige-kayitli-motorlu-kara-tasitlarinin-sayisi-193-bin-896-ya-ulas-ti-80166>
- [3] <https://www.ih.com.tr/edirne-haberleri/edirnede-tarihi-cesme-yeni-yerine-tasinacak-32243146>
- [4] <https://www.aa.com.tr/tr/kultur/edirnede-yol-ortasindaki-tarihi-cesme-tasindi/3002397>
- [5] <https://www.batiekspres.com/edirne/edirne-de-trafige-kayitli-motorlu-kara-tasitlarinin-sayisi-193-bin-896-ya-ulasi-ti-80166>
- [6] Litman, T. Evaluating Public Transit Benefits and Costs: Best Practices Guidebook. Victoria Transport Policy Institute, 2021.
- [7] Cirit, F. Sürdürülebilir Kentiçi Ulaşım Politikaları ve Toplu Taşıma Sistemlerinin Karşı-

- laştırılması, TC. Kalkınma Bakanlığı Yayınları, No:2891, Ankara, s.31, 2014
- [8] Cirit, F. Sürdürülebilir Kentçi Ulaşım Politikaları ve Toplu Taşıma Sistemlerinin Karşılaştırılması, TC. Kalkınma Bakanlığı Yayınları, No:2891, Ankara, s.31-32, 2014
- [9] UITP Advancing Public Transport: Renewable Energy in Urban Transit Systems. International Association of Public Transport. 2018
- [10] Litman, T. Evaluating Public Transit Benefits and Costs: Best Practices Guidebook. Victoria Transport Policy Institute, 2021.
- [11] Cervero, R., & Kang, C. D. (2011). Bus rapid transit impacts on land uses and land values in Seoul, Korea. *Transport Policy*, s.102-106, 2011.
- [12] Konya’da Raylı Ulaşım Sistemi Tarihçesi. Konya Büyükşehir Belediyesi ATUS. Erişim tarihi: 2024,12,12. Erişim Adresi: <https://atus.konya.bel.tr/tramvay-tarihcesi>
- [13] Hayırlıoğlu, M. Demiryolu Mühendisliği, Sayı 6, 2017,s. 43 42 – 46, 2017.
- [14] Tekeli, İ. Modernizm, Modernite ve türkiye’nin Kent Planlama Tarihi, Tarih Vakfı Yurt Yayınları, İstanbul, s. 31, 2014
- [15] Tekdemir, A. Edirne Tramvay Hattı Projeleri. Kitabevi Yayınları, 2019
- [16] UITP Advancing Public Transport: Renewable Energy in Urban Transit Systems. International Association of Public Transport. 2018
- [17] Beyazıt, E. Ulaşım Yatırımlarının Sosyo-Ekonomik Faydaları. P. Özcan (Ed.), *Kentlerde Yeşil Ulaşım*. İstanbul: Ezgi Matbaacılık, s.42, 2013.
- [18] Konya’da sadece bisikletliler için tasarlanan tramvay yolculuğa başladı, https://www.ntv.com.tr/galeri/seyahat/konyada-sadece-bisikletliler-icin-tasarlanan-tramvay-yolculuga-basladi,o2C70nJLvUm812BHRrCBtA/Ne04gVqc70yTU9R_tseSuA

Azerbaycan'da Yeşil Enerjiye Geçiş Araştırması: Enerji Verimliliği ve Elektrikli Araçlar

Maqsud Quliyev¹

Özet

Yeşil enerjiye geçiş, sadece ülkelerin değil, bir bütün olarak gezegenimizin sürdürülebilirliğinin sağlanması ve yaşanabilirliğinin gelecek nesillere bırakılması anlamına geliyor. Bu bağlamda Azerbaycan, yeşil enerjiye geçiş konusunda devlet düzeyinde stratejik kararlar almış olup, yeşil enerjinin toplam enerji üretimindeki payını 2030 yılına kadar %35,5'e çıkarmayı hedeflemektedir. Araştırma çalışmasının önemi yeşil enerjiye geçiş sürecinin ve Azerbaycan'ın bu süreçteki rolünün incelenmesidir. Makalede Azerbaycan'ın yeşil enerji politikası ve yeşil enerji projeleri detaylandırılmıştır. Orta Asya ülkeleri Kazakistan ve Özbekistan ile birlikte Avrupa'ya elektrik ihracatı süreçlerine değinildi. Araştırma yöntemleri arasında anket, istatistiksel analiz ve karşılaştırma yer alır. Anket yönteminin uygulanması, nüfusun temiz enerji kullanımına ilişkin görüşlerini incelemeyi amaçlamaktadır ve beş sorudan oluşmaktadır. İlk soru, yeşil enerjiye ne ölçüde ve neden geçmek istediklerini araştırmaktı ve soru şuydu: Sokağınızda veya bölgenizde yeşil enerjiye geçiş konusunda yatırım yapmak için herkesle anlaştınız mı? Bu durumda yatırım yapmanın asıl sebebi nedir? Çoktan seçmeli soruya yanıt veren katılımcılar, birinci öncelik olarak karbon emis-

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250303>

¹ Azerbaycan Kooperasiya Üniversitesi, Bakü, Azerbaycan e-mail adresi: magsud226@gmail.com, ORCID: 0009-0009-5973-394X

yonunun azaltılmasını, ardından aylık elektrik maliyetlerinin düşürülmesini belirttiler. “Evinizi aydınlatmak için düşük tüketimli (60w’a kadar) ampul kullanıyor musunuz?” sorusuna çoğunluk (%53) “bazı odalarda” yanıtını verdi. “Evinizde enerji tasarrufu yapmayı ne kadar düşünüyorsunuz?” sorusuna katılımcıların %55’i “yeterli” yanıtını verdi. “Yatırımcıların ülkede yenilenebilir enerji teknolojileri üretimine yönelik yatırımlarını nasıl değerlendiriyorsunuz?” anket sorusuna katılımcıların büyük çoğunluğu (%60) olumlu bir yaklaşım sergileyerek desteklerini ifade etti. “Ülkede elektrikli otomobil otoyollarının ve yollarının (resim anket katılımcılarına örnek olarak gösterildi) oluşturulmasını nasıl değerlendiriyorsunuz?” sorusuna yanıt verenlerin %59’u “Avrupa ülkelerinde yaşanan bu deneyimin benim ülkemde de yaşanmasını istiyorum.” cevabını verdi. %26’sı “Hareket hâlindeyken şarj etmenin tehlikeli olduğunu düşünüyorum.” seçeneğini tercih etti. Azerbaycan’ın 2019-2023 dönemindeki elektrikli otomobil ithalatı istatistiksel ve karşılaştırmalı analiz yoluyla analiz edildi. Petrol ve doğalgaz zengini bir ülke olmasına rağmen ülke nüfusunun yeşil enerji gündemini desteklediği anketle doğrulanırken, elektriğin verimli kullanımı ve tasarrufunun da insanların sıklıkla düşündüğü konular arasında olduğu öğrenildi.

Anahtar Kelimeler: Yeşil Enerji, Katılımcılar, Elektrik, Anket.

Green Energy Transition Survey in Azerbaijan: Energy Efficiency and Electric Vehicles

Abstract

The transition to green energy means ensuring the sustainability and livability of not only countries but also our planet as a whole to future generations. In this context, Azerbaijan has made strategic decisions at the state level on the transition to green energy and aims to increase the share of green energy in total energy production to 35.5% by 2030. The importance of the research study is the examination of the process of transition to green energy and the role of Azerbaijan in this process. The article details Azerbaijan’s green energy policy and green energy projects. The processes of electricity export to Europe, together with the Central Asian countries of Kazakhstan and Uzbekistan, are discussed. The research methods include surveys, statistical analysis and comparison. The application of the survey

method aims to examine the views of the population on the use of clean energy and consists of five questions. The first question was to investigate to what extent and why they want to switch to green energy, and the question was: Have you agreed with everyone to invest in the transition to green energy on your street or in your area? What is the main reason for investing in this case? Respondents who answered the multiple-choice question indicated that reducing carbon emissions was the top priority, followed by reducing monthly electricity costs. “Do you use low-consumption (up to 60W) bulbs to light your home?” The majority (53%) answered “in some rooms.” “How much do you think you can save energy in your home?” 55% of respondents answered “sufficiently.” “How do you assess investors’ investments in renewable energy technologies in the country?” The vast majority (60%) of respondents expressed their support for the survey question. “How do you assess the creation of electric highways and roads in the country (the picture was shown to survey participants as an example)?” 59% of respondents answered “I want this experience experienced in European countries to be experienced in my country as well.” 26% chose the option “I think charging while moving is dangerous.” Azerbaijan’s electric car imports in the period 2019-2023 were analyzed through statistical and comparative analysis. Despite being a country rich in oil and natural gas, the survey confirmed that the country’s population supports the green energy agenda, while it was learned that the efficient use and saving of electricity is among the issues that people frequently think about.

Keywords: Green Energy, Respondents, Electricity, Survey.

1. Giriş

Güney Kafkasya’da Hazar Denizi’nin batı kıyısında yer alan Azerbaycan, büyük petrol ve gaz rezervleri olmak üzere hidrokarbon kaynaklarına sahiptir. Devlet, küresel ısınmayı önlemek ve iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağlamak amacıyla bazı adımlar atıyor. 2030 “Ulusal Öncelikler” stratejisinde yeşil büyümenin sağlanması, ekolojik açıdan temiz bir çevre yaratılması ve elektrik üretiminde yenilenebilir enerjinin özgül ağırlığının %30’a çıkarılması hedefleniyor. Dünyanın en büyük küresel iklim etkinliği olarak kabul edilen COP29, 2024 yılında Azerbaycan’ın başkenti Bakü’de düzenlendi ve bu etkinlik sırasında Azerbaycan, hedeflerini yenileyerek yeşil enerjinin elektrik üretimindeki payının 2030’a kadar %35,5’e çıkarı-

lacağını duyurdu. Çalışmanın amacı Azerbaycan’da elektrikli otomobillerle ilgili yeniliklerin uygulanması durumunda halkın görüşlerini öğrenmek ve enerji kullanımında verimlilik ve ekonomi konularını incelemektir. Bu amaçla nüfus arasında bir anket yapılmış olup katılımcı sayısı 100 kişidir. Araştırma çalışmasında istatistik, karşılaştırma ve anket yöntemleri kullanılmıştır. Alizada tarafından yürütülen çalışmada Karabağ bölgesinin yeşil enerji potansiyeline değinilerek, coğrafi olarak gaz hattı yapılmasının mümkün olmadığı koşullarda (bu bölgenin dağlık kısımları) yeşil enerji alternatifinin enerji güvenliğine paha biçilmez katkı sağlayacağı kaydedildi [1]. Şahin’in 2024 yılında gerçekleştirdiği çalışmada Azerbaycan’ın COP gibi büyük bir zirveye ev sahipliği yapmasının önemi vurgulanarak, Azerbaycan’ın sera gazı hacmini 2030 yılına kadar (baz yılı 1990) %35, 2050 yılına kadar ise %40 oranında azaltmayı planladığı belirtildi [12].

Bekkari, araştırmasında Uluslararası Enerji Ajansı’na atıfta bulunarak uzun vadede Azerbaycan hükümetinin petrol ve gaz gelirlerindeki düşüşe ve dalgalanmaya hazırlıklı olması gerektiğini kaydetti. Bunu önlemek için yenilenebilir enerji sektörünün büyük ölçekte geliştirilmesi ve ekonominin diğer alanlarının geliştirilmesine özel önem verilmesi gerekmektedir [3]. Azerbaycan’ın hidrokarbon ve yeşil enerji politikaları Pekgöz tarafından birlikte incelenmiştir. Çalışma, 2022 yılında imzalanan anlaşmaya göre Azerbaycan’ın Avrupa Birliği’ne gaz ihracatını 2027 yılına kadar 20 milyar metreküpe çıkarması gerektiğini gösteriyor. Buna paralel olarak yenilenebilir enerji türlerinin geliştirilmesine yönelik bir program benimsenmiş olup ülkede büyük projeler hayata geçirilmektedir [10]. Guliyev’in araştırmasında elektrikli otomobil kullanımına ilişkin anket yapıldı ve ankete katılanların %54’ü doğrudan elektrikli otomobil alabileceklerini ve bu konuda herhangi bir sorun görmediklerini söyledi [6].

2. Azerbaycan’ın Yeşil Enerji Politikası ve Projeleri

2.1. Azerbaycan’ın Yeşil Enerji Yolculuğu

Hidrokarbon kaynakları açısından zengin olan Azerbaycan, artık temiz enerji politikası çerçevesinde fosil kaynaklardan elde ettiği geliri yeşil enerjiye dönüştürüyor. Ülkenin yenilenebilir enerji potansiyeli değerlendirildiğinde Nahçıvan bölgesinde 5000 megavat, Doğu Zengezur ve Karabağ bölgelerinde 9200 megavat, Hazar Denizi’nde ise 157 gigawatt yeşil enerji olduğu tespit edildi. Hazar Denizi’ndeki offshore rüzgar potansiyelinin 157

gigawatt, ülkenin karadaki rüzgar potansiyelinin ise 135 gigawatt olduğunu belirtmekte fayda var. Bu potansiyel, Azerbaycan'ın gelecekte Avrupa'ya yeşil enerji ve yeşil hidrojen ihraç etme olasılığını gösteriyor. Yeşil elektrik ihracatına ilişkin olarak Azerbaycan ile Avrupa Birliği arasında 2022 yılında bir anlaşma imzalandı [3, 10]. Anlaşmaya göre Azerbaycan'da üretilen yeşil enerji Gürcistan üzerinden geçerek Karadeniz'in dibinden Romanya ve Macaristan'a ulaştırılacak. Orta Asya ülkelerinden Kazakistan ve Özbekistan, Avrupa'ya yeşil enerji ihracatı konusunda Azerbaycan ile anlaşmaya vardı. 3 Türk devleti, 4 gigawatt'lık elektrik kablosuyla Avrupa'ya yeşil enerji ihraç ederek yeşil enerji koridorunun katılımcısı olacak.

Temiz bir çevre ve yeşil büyümenin sağlanması devletin 2030 için benimsediği hedeflerden biridir. Azerbaycan'ın enerji güvenliğini sağladığı ve elektrik üretiminin %90'ından fazlasının doğalgazdan sağlandığı biliniyor. Doğalgazdan elektrik üretmek için her yıl 5 milyar metreküp doğalgaz kullanılıyor. Böyle bir durumda yeşil enerjiye geçmek büyük miktarda gaz tasarrufu anlamına geliyor. 2030 hedefine göre yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payı yüzde 35,5'e çıkarılacak. Sera gazı emisyonlarının hacminin 2030 yılına kadar %35 (1990'a kıyasla) ve 2050 yılına kadar %40 oranında azaltılması Azerbaycan tarafından alınan gönüllü taahhütlerdir [12]. 2020 yılında İkinci Karabağ Savaşı sonucunda Ermenistan'ın işgalinden kurtarılan Doğu Zengezur ve Karabağ ekonomik bölgeleri Azerbaycan'ın ilk "yeşil enerji bölgeleri" ilan edildi. Kelbecer ve Laçın bölgeleri (Doğu Zengezur ekonomik bölgesi) 2000 megavatlık rüzgar enerjisi potansiyeline sahipken, Gubadlı, Zengilan, Cebrayıl ve Fuzuli bölgeleri toplam 7200 megavatlık güneş enerjisi potansiyeline sahiptir [1, 11]. Karabağ ve Doğu Zengezur'da sıfırdan inşa edilen şehir, bölge ve köyler yeşil enerji tüketicisi olacak, bu bölgelerde kurulacak altyapılar "akıllı şehir" ve "akıllı köy" prensibine göre inşa edilecek, şehirlerinde toplu taşıma bile elektrikli olacak.

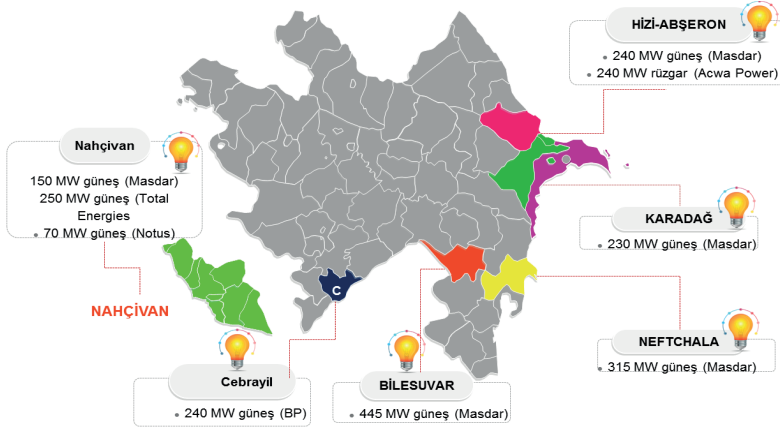
Yenilenebilir enerjiye geçişte devlet desteğini esirgemeyen Azerbaycan, bu yönde bir takım adımlar attı [5,6,9]:

- 1) Yenilenebilir enerji projeleri için tahsis edilen arsalar hükümet kararıyla vergiden muaf tutuldu,
- 2) Karabağ, Doğu Zengezur ve Nahçıvan yeşil enerji bölgeleri olacak,
- 3) Ülkeye ithal edilen elektrikli otomobiller katma değer vergisinden muaf. Hibrit otomobillerin ithalatında ithalat vergilerinde ciddi tavizler uygulanıyor,

- 4) Yeşil enerjiyle ilgili ekipmanların ithalatı vergiden muaftır,
- 5) Yenilenebilir enerjiye yatırım yapan şirketlere kurumlar vergisi avantajı sağlanıyor,
- 6) Ülkedeki şarj istasyonlarının sayısını artırmak amacıyla 2024 yılında 3.000 yeni şarj istasyonunun kurulması kararı alındı,
- 7) Başkent Bakü'nün insan odaklı şehir statüsüne geçişini teyit eden Bakü'nün 2040 yılına kadar kalkınma planı hazırlanıp kabul edildi. 2024 yılında toplu taşımada elektrikli otobüsler hizmete girdi. Bunun için Çin'in "BYD" firması ile anlaşma imzalandı ve ilk olarak Azerbaycan'a 160 adet elektrikli otobüs getirildi. 2030 yılına kadar şehir içi ulaşımda elektrikli otobüslerin sayısı artacak [4].

2.2. Azerbaycan'ın Yeşil Enerji Projeleri

Azerbaycan'da rüzgar ve güneş enerjisinin büyük potansiyeli nedeniyle bu potansiyeli hayata geçirmek için büyük şirketler yatırım pahasına temiz enerji santralleri inşa etmekte olup, bunlar Şekil 1'de detaylı olarak gösterilmektedir [5]. Şekil 1, Masdar ve ACWA Power'ın en büyük yeşil enerji yatırımcıları olduğunu göstermektedir. Karadağ'daki 230 megavatlık güneş enerjisi santrali, Güney Kafkasya'nın en büyük yenilenebilir enerji projesidir. Diğer projelere gelince, Nahçıvan'daki güneş enerjisi projeleri 150 megavat (Masdar), 250 megavat (TotalEnergies), 70 megavat (Notus), Azerbaycan'ın uzun vadeli enerji ortağı BP'nin Cebrayıl'daki 240 megavat güneş enerjisi projesi, 445 megavat güneş enerjisi projesidir. Bilasuvar (Masdar), Neftchala'da (Masdar) 315 megawatt güneş enerjisi, Hizi-Abşeron bölgesinde 240 megawatt güneş (Masdar) ve 240 megavatlık rüzgar (ACWA Power) santralleri yapılıyor. Nahçıvan bölgesinde yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin Türkiye ve Avrupa'ya ihraç edilmesi bekleniyor. Bu, İğdır-Nahçıvan doğalgaz boru hattı projesinden sonra iki kardeş devlet arasında Nahçıvan'a ilişkin ikinci proje olma özelliğini taşıyor [5, 10].



Şekil 1. Azerbaycan'da yeşil enerji projeleri ve yatırımcıları

Kasım 2024'te Birleşmiş Milletler (BM) Çerçeve Sözleşmesi Taraflar Konferansı'nın (COP) 29. oturumu başkent Bakü'de düzenlendi. Bu iklim zirvesinde 3,5 gigawattlık offshore rüzgar santrallerinin inşası konusunda anlaşmaya varılırken, Azerbaycan'ın yeşil enerji çaişmaları yolunda yeni sözleşmeler imzalandı. Yeni sözleşmeler enerji şebekesinin dijitalleştirilmesi, iletim hatlarının yenilenmesi ve enerji altyapısında yeniliklerin getirilmesiyle ilgilidir [7].

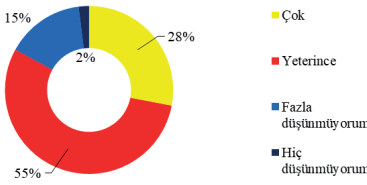
Azerbaycan'dan Avrupa'ya uzanan bir gaz boru hattının varlığı, gelecekte doğalgazla birlikte hidrojenin de ihracatı açısından olumlu bir gelişmedir. Bunun için kayışların repurpose edilmesi yeniden kullanılması gerekir. Azerbaycan'da hidrojen üretimi için 2030 normalleştirilmiş hidrojen maliyetinin analizi, yeşil hidrojenin -yenilenebilir enerji kaynakları yoluyla hidrojen üretiminin- Avrupa'da üretilecek yeşil hidrojenden daha ucuz olduğunu gösterdi [5]. Mavi hidrojenin üretim maliyeti (doğalgaz yoluyla hidrojen üretimi, karbon salınımı, ancak karbon depolama sistemleri ile karbon depolama sistemlerinde depolanma) karbon depolama sistemlerine göre daha pahalıdır.

3. Azerbaycan'da Yeşil Anket Sonuçları

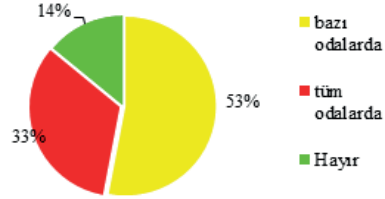
3.1. Enerji Verimliliği ile İlgili Sorular

Ocak-Mart 2024'te Azerbaycan'da halk arasında yeşil enerjiyle ilgili bir anket yapılmıştır. 100 katılımcının katıldığı ankette yeşil enerjiye geçişteki

hedefler, enerji tasarrufu, halkın yeşil teknolojilere yaklaşımı ve elektrikli araçlara özel şerit oluşturulmasına ilişkin sorular yer aldı. Aşağıdaki Grafik 1 ve Grafik 2’de enerji ile ilgili sorular yer almaktadır. Grafik 1, halka “Evinizde enerji tasarrufu yapmayı ne kadar düşünüyorsunuz?” sorusunu, Grafik 2 ise “Evinizi aydınlatmak için düşük tüketimli (60W’a kadar) ampul kullanıyor musunuz?” sorusunu soruyor. Enerji tasarrufu yapmayı ne sıklıkla düşünüyorsunuz? sorusuna yüzde 28’i bu konu hakkında çok düşündüğünü, yüzde 55’i fazla düşünmediğini, yüzde 15’i fazla düşünmediğini, yüzde 2’si ise hiç düşünmediğini söyledi. Düşük enerjili ampul kullanımını sorusuna bakıldığında katılımcıların %53’ü bazı odalarda, %33’ü tüm odalarda, %14’ü ise hiç kullanmadığını ifade etti.



Grafik 1. Enerji tasarrufu ile ilgili soru



Grafik 2. Evlerdeki düşük enerjili ampuller hakkında soru

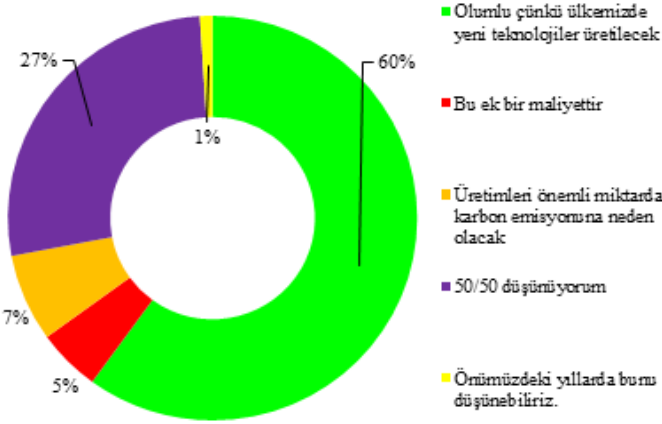
3.2. Yeşil Enerji Dönüşümü Soruları

Sonraki sorularda ülkede yeşil enerjiye geçiş ve yeşil enerji tesislerine yatırım konusunda halkın yaklaşımı inceleniyor (bk. Grafik 3 ve 4). Grafik 3’teki soru: Sokağınızda veya bölgenizde yeşil enerjiye geçiş konusunda yatırım yapmak için herkesle anlaştınız. Bu durumda yatırım yapmanın asıl sebebi nedir? Grafik 4’teki soru: Yatırımcıların ülkede yenilenebilir enerji teknolojileri üretimine yönelik yatırımlarını nasıl değerlendiriyorsunuz? Grafik 3’teki çoktan seçmeli soruya nüfus %66 destekle karbon emisyonlarının azaltılmasını ana tercih olarak kabul etti. İkinci sırada ise nüfus (%63) aylık elektrik maliyetlerinin azaltılmasını asıl mesele olarak görüyor. Katılımcıların %33’ü yatırımdan gelir elde etmeyi planladığını kanıtladı ve en düşük yüzde olan %21’i, bölge halkının şebekeye elektrik satışından gelir elde etmesinin temel önceliklerden biri olduğunu düşünüyor. Grafik 4’deki yatırımcıların yenilenebilir enerjiye yaptığı yatırımı nasıl değerlendiriyorsunuz? sorusuna katılımcıların %60’ı bu ülkede yeni teknolojilerin üretimini kolaylaştıracağı için soruya olumlu yaklaştıklarını söyledi. %27’si 50/50, %5’i ek bir maliyet olduğunu düşünüyor ve %7’si bu cihazların üretiminin büyük miktarda karbon emisyonuna neden olaca-

ğını söylüyor. Sadece %1'i önümüzdeki yıllarda bu konu üzerinde düşünmenin gerekli olduğunu düşünüyor.



Grafik 3. İnsanların yeşil enerjiye geçiş hedefleri (çoktan seçmeli soru)



Grafik 4. İnsanların yeşil enerji tesislerine yatırım yapılmasına yönelik tutumları

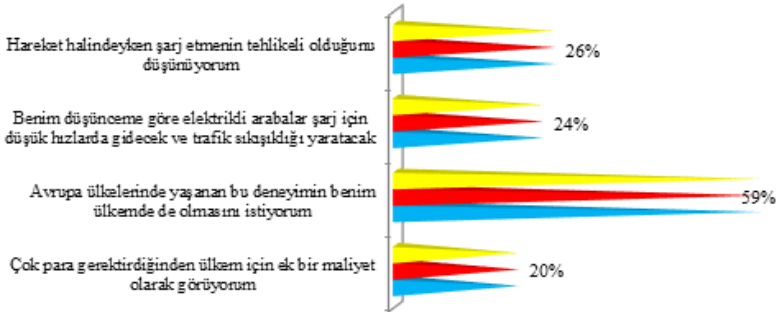
3.3. Elektrikli Arabalar

Elektrikli otomobillere uygulanan indirimler önceki bölümlerde anlatılmıştı. Bunun sonucunda ülkeye 2021 yılında 160, 2022 yılında 486, 2023 yılında ise 3102 adet elektrikli otomobil ithal edildi [8]. Karşılaştırmalı istatistikler neredeyse 20 kat büyüme oranı gösteriyor (2021'e kıyasla). Bu nedenle artan dinamikleri ve ilgiyi dikkate alarak anket katılımcılarına

şu soruyu yönelttik: Ülkede elektrikli otomobil otoyollarının ve yollarının (resim, anket katılımcılarına örnek olarak gösterildi (şekil 2)) oluşturulmasını nasıl değerlendiriyorsunuz. Grafik 5'te çoktan seçmeli soruda Avrupa ülkelerinde uygulanan uygulamayı %59 oranında desteklediği görülmektedir. %26'sı trafikte şarj etmenin tehlikeli olduğunu düşünüyor, %24'ü ise elektrikli araçların trafikte şarj için düşük hızda hareket edeceğini ve bunun trafik sıkışıklığına neden olacağını düşünüyor, %20'si ise bu altyapının oluşturulmasının ülkemiz için ek bir maliyet olacağını söylüyor. Daha önce yapılan bir araştırmada, elektrikli arabalara geçişle ilgili sorular sorulmuş ve katılımcıların %54'ü arabalarını elektrikli arabaya geçirmek istediklerini belirtmişti [6].



Şekil 2: Elektrikli araçlara özel şerit



Grafik 5. İnsanların elektrikli otomobillere yönelik şeride karşı tutumları (çoktan seçmeli soru)

Azerbaycan'da elektrikli ve hibrit otomobillere artan ilgiyi bankaların kredi portföyünden değerlendirmek mümkün. İstatistiklere göre 2022 yılında Azerbaycan bankalarında elektrikli ve hibrit otomobil kredi

portföyü %17,8 iken, 2024 yılının ilk yarısında bu rakam %59,9'a ulaştı [8]. Azerbaycan'da elektrikli otomobillere olan ilgiyi artıracak bir diğer önemli konu ise "BYD" firması ile imzalanan sözleşmedir. Buna elektrikli otobüs, hafif kamyon ve elektrikli otomobil üretimi de dâhildir. 2026 yılından itibaren başlaması planlanan proje, 2025 yılından itibaren başlayacak ve 2030 yılına kadar üretimin yüzde 40'ı yerlileşecek [2].

4. Sonuçlar

Azerbaycan'ın yeşil enerji potansiyeli, politikası ve projelerinin analizi sonucunda ülkenin çok büyük bir yenilenebilir enerji potansiyeline sahip olduğunu ve bu potansiyeli hayata geçirecek güçlü ortak yatırımcıların bulunduğu açıklığa kavuşmuş. AB ile imzalanan anlaşmaya göre yakın gelecekte Azerbaycan aynı zamanda yeşil enerji ihracatçısı hâline gelecek ve Kazakistan ve Özbekistan'da üretilen temiz enerjinin Avrupa'ya ihracatında da transit ülke olacak. Yenilenebilir enerji sektörünün gelişimi için devletin uyguladığı tavizler bu sektörün gelecekteki gelişimi açısından umut verici olacaktır. Makalede rüzgar ve güneş enerjisi projeleri ülkenin bölgelerine göre harita üzerinde görsel olarak gösterilmektedir. Sera gazı emisyonlarına ilişkin 2030 ve 2050 taahhütleri ile yenilenebilir enerjiye ilişkin 2030 hedefleri, Azerbaycan'ın yeşil geçişe olan bağlılığını göstermektedir. Yapılan araştırmanın sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Evinizde enerji tasarrufu yapmayı ne kadar düşündüğünüz sorulduğunda katılımcıların %55'i "yeterli" yanıtını verdi;
- Düşük enerjili ampul kullanıp kullanmadığınızı sorulduğunda %53'ü bazı odalarda, %33'ü ise tüm odalarda kullandığını söyledi;
- Sokağınızda veya bölgenizde yeşil enerjiye geçiş konusunda yatırım yapmak için herkesle anlaştınız. Bu durumda yatırım yapmanın asıl sebebi nedir? Sorulduğunda (çoktan seçmeli soru) katılımcıların %66'sı karbon emisyonlarını azaltmayı, %63'ü ise aylık elektrik maliyetlerini azaltmayı ana hedef olarak seçti;
- Ankete katılanların %60'ı ülkede yeşil teknolojilerin üretilmesini desteklediğini belirtirken, %27'si bu konuda yüzde 50/50 görüş bildirdi;
- Elektrikli otomobillere yönelik yollarda özel şerit oluşturulması yönündeki soruya katılımcıların %59'u bu süreci desteklediğini söyledi.

Etik Onay

Bu çalışma için Azerbaycan Kooperasiya Üniversitesi Etik Komitesinden 09.01.2025 tarihinde etik onay alınmıştır.

Referanslar

- [1] Alizada, N., 2022. Yeşil enerji bağlamında Karabağ'ın enerji potansiyeli. *Avrasya İncelemeleri Dergisi / Journal of Eurasian Inquiries*, 11(1), 1–15. <https://doi.org/10.26650/jes.2022.001>
- [2] Azizov, F. BYD, Azerbaycan'da binek otomobil üretimini beklenenden daha erken gerçekleştirebilir! *Tedroid.com* <https://tedroid.com/elm-sosial/byd-azerbaycanda-avtomobil-istehsalini-daha-tez.html> (Azerbaycan dilinde)
- [3] Bekkari, A., 2023. Azerbaycan Enerji Güvenliği ve Avrupa Birliği İlişkileri. *Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi Cilt:9, Sayı:2*. 31-44
- [4] BYD firması ile işbirliğine ilişkin belgeler imzalandı. Azerbaycan Cumhuriyeti Ekonomi Bakanlığı. <https://economy.gov.az/index.php/az/post/2108/byd-sirketi-ile-emekdasliga-dair-senedler-imzalanib> (Azerbaycan dilinde)
- [5] Guliyev, M. (2024). Clean energy transition dilemma: future value of green investment in Azerbaijan. *Special Issue on "Global Strategy for sustainable development: Innovation, modelling, and alliances. International Journal of Humanities and Social Development Research*. 104-111. DOI:10.30546/ BAKUCOP29.2024.1.098
- [6] Guliyev, M. (2024). Green Energy Transition in Azerbaijan: Analyzing Survey Results. *Journal of Actual Problems of Humanities and Social Sciences*, 4(6). 208-214. <https://doi.org/10.47390/spr1342v4i6y2024n32>
- [7] İsmayilov, E. SOCAR, "Masdar" and ACWA Power sign MoU. *Apa.az* <https://en.apa.az/energy-and-industry/socar-masdar-and-acwa-power-sign-mou-453445>
- [8] Madatov, F. Azerbaycan'da hibrit ve elektrikli otomobil kredi portföyü arttı. *Fins.Az* <https://www.fins.az/bank/327104/azerbaycanda-hibrid-ve-elektrik-avtomobilleri-uzre-kredit-portfeli-artib/> (Azerbaycan dilinde)
- [9] Order of the President of the Republic of Azerbaijan on approval of "Azerbaijan 2030: National Priorities for Socio-Economic Development" <https://president.az/en/articles/view/50474>
- [10] Pekköz, Ö.F., 2024. Azerbaycan'ın Yeşil Enerji Hamleleri. Ankara Kriz ve Siyaset Araştırmaları Merkezi. <https://www.ankasam.org/anka-analizler/azerbaycanin-yesil-enerji-hamleleri/>
- [11] Potential of RE in Azerbaijan. Azerbaijan Renewable Energy Agency under the Ministry of Energy of the Republic of Azerbaijan. <https://area.gov.az/en/page/yasil-texnologiyalar/boem-potensial>
- [12] Şahin, K., 2024. Azerbaycan COP29'a Doğru: Yeşil Enerji ve İşgalden Kurtarılan Topraklar. Ankara Politikalar Merkezi. <https://apm.org.tr/2024/05/10/azerbaycan-cop29a-dogru-yesil-enerji-ve-ısgalden-kurtarılan-topraklar>

Talep Tarafı Yönetimine Katkı Sağlamak Amacıyla Yük Tiplerinin Kullanım Oranlarının Tahmin Edilmesi

Eray Ođuz¹, İbrahim Gürsu Tekdemir², Uğur S. Selamođulları³

Özet

Ülkemizde ve dünyada enerji talebi, hızla artan nüfus ve enerjiye olan bağımlılığın sürekli yükselmesiyle giderek artmaktadır. Her yıl yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artsa da bu kaynakların doğa olaylarına bağlı performans göstermesi ve enerji arzı konusunda yeterince güvenilir olmaması, fosil yakıtlara olan bağımlılığın devam etmesine neden olmaktadır. Bu soruna çözüm olarak enerji kullanımını azaltmaya yönelik çeşitli çalışmalar yapılmış olsa da istenilen sonuçlara tam anlamıyla ulaşılamamıştır. Bu bağlamda, mevcut elektrik santrallerinin daha verimli ve etkin kullanımı için Talep Tarafı Yönetimi (TTY) çözümleri kullanılmaya başlanmıştır. TTY, temel olarak tüketicilerin enerji kullanımını etkileyen bir

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250304>

- 1 İstanbul Gedik Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü Elektrik Programı, İstanbul, Türkiye, eray.oguz@gedik.edu.tr; Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Programı, İstanbul, Türkiye, eray.oguz@std.yildiz.edu.tr, ORCID:0000-0002-2164-8215
- 2 Bursa Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye, ibrahim.tekdemir@btu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1381-3513
- 3 Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, selam@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2272-4355

planlama yöntemidir. Talep tarafı yönetilebilirliğinin düzeyi yalnızca yük tiplerinin doğru bir şekilde bilinmesi ile ölçülebilir. Bu amaçla tüketicilere ait verilerin istatistiksel olarak modellenmesi ve yeni tüketici davranışlarının tasarlanması amacıyla Center for Renewable Energy Systems Technology (CREST) talep modeli üzerinden tüketim verileri elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak, özellikle konut tipi elektrik kullanıcılarının günlük tüketim profillerine göre yük tiplerinin tahmin edilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapay Sinir Ağları (YSA) modelinde, zaman, sıcaklık, rüzgar hızı, ışınım ve teknik kayıplar olmak üzere toplam beş giriş verisi kullanılmıştır. Çıkış veri seti ise sabit yük, kaydırılabilir yük ve ayarlanabilir yükler olmak üzere üç kategoriye ayrılmıştır. MATLAB programında “nntool” araç kiti kullanılarak yapılan modelleme çalışmaları için Elman YSA yöntemi kullanılmıştır. Veri seti eğitim ve test veri seti olarak ikiye ayrılmıştır. Eğitim veri setiyle birçok kez yapılan ağ eğitme çalışmaları sonucu yüksek regresyon değeriyle Elman YSA modeli elde edilmiştir. Test veri seti kullanılarak modelin doğruluğu kanıtlanmıştır. Daha sonra CREST modelinden elde edilen yeni veriler ve tasarlanan YSA modeli ile başarılı bir yük tahmini gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde, tasarlanan YSA modelinin TTY için etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapay Zekâ, Yük Tahmini, Elman YSA, Eğitim, Talep Tarafı Yönetimi.

Estimating the Usage Rates of Load Types to Contribute to Demand Side Management

Abstract

The demand for energy in our country and the world is increasing due to the rapidly growing population and the continuous increase in dependence on energy. Although the trend towards renewable energy sources increases every year, the performance of these sources depend on natural events and their lack of reliability in terms of energy supply cause the dependence on fossil fuels to continue. Although various studies have been conducted to reduce energy consumption as a solution to this problem, the desired results have not been fully achieved. In this context, Demand Side Management (DSM) solutions have begun to be used for more efficient

and effective use of existing power plants. DSM is basically a planning method that affects consumers' energy usage. The level of demand side manageability can only be measured by correctly knowing the load types. For this purpose, consumption data is obtained from the Demand Model of the Center for Renewable Energy Systems Technology (CREST) to statistically obtain consumption data and create new consumer profiles. Using the data, a study is conducted to estimate the type of load, especially using daily consumption profiles of residential electricity users. In the analyses performed with Artificial Neural Networks (ANN), a total of five input data were used, time, temperature, wind speed, radiation and technical losses. The output data set is divided into three categories: fixed, shiftable and adjustable loads. Elman ANN method is used for the analyses using the 'nntool' toolkit in the MATLAB program. The dataset is divided into two: training dataset and testing dataset. As a result of network training studies performed many times with the training data set, the Elman ANN model is obtained with a high regression value. The accuracy of the model has been proven using the test dataset. Later, a successful load estimation procedure is completed using the developed ANN model with the new data obtained from CREST model. Obtained results show that the designed ANN model can be used effectively for DSM applications.

Keywords: Artificial Intelligence, Load Forecast, Elman ANN, Training, Demand Side Management.

1. Giriş

Günümüzde giderek artan nüfus ve enerjiye olan bağımlılığın da onun paralelinde artması nedeniyle enerjinin üretimi kadar enerjiyi verimli ve doğru tüketmek de yüksek önem arz etmektedir. Bu sebeple mevcut elektrik santrallerinin verimli ve doğru kullanılabilmesi için talep tarafı yönetimi yöntemleri kullanılmaktadır. Talep Tarafı Yönetimi (TTY) tüketicilerin enerji kullanımını yöneten planlamaların bütünüdür. TTY temel olarak tüketicilerin enerji kullanımını etkileyen planlama şeklidir. Bir başka şekilde tanımlanırsa, TTY müşterilerin elektrik kullanımının, elektrik üretim şirketlerine katkı sağlayacak değişiklikleri yapabilecek şekilde tasarlanması ve enerji iletim ve dağıtım faaliyetlerinin uygulanmasıdır [1]. TTY, A.B.D. Enerji Bakanlığı tarafından ise şu şekilde tanımlanır; "Elektrik kullanıcılarının, piyasadaki fiyat dalgalanmaları veya sistem güvenliğinin tehlikede

olması nedenleri ile tüketimin düşürülmesi yönünde teşvik edilmesidir” [2]. TTY’nin amacı, farklı enerji tüketim davranışları üzerindeki çevresel ve ekonomik etkiyi analiz etmek ve analiz sonucunda hem tüketici hem üretici tarafına fayda sağlamaktır. Örneğin; bir elektrik şebekesinin azami yüklenme miktarını TTY ile azaltabilmek, elektrik sistemindeki yüklenmenin hafifletilmesi, sistem güvenliğinin artırılması, yüksek yakıt maliyetinin azaltılması ve daha fazla enerji üretim santrali inşa etmek zorunda kalınmaması gibi faydalı etkiler sağlar.

TTY, iki temel şekilde uygulanmaktadır [3];

i) Enerji Tüketimini Azaltma Uygulamaları - (Elektrik enerjisi tüketen cihazların daha tasarruflu muadilleri ile değiştirilmesi.)

ii) Yük Yoğunluğu Yönetimi Uygulamaları - (Yük yoğunluğunun yönetimi, elektrik enerjisi talebinin yoğun olduğu saatlerden elektrik enerjisi talebinin az olduğu saatlere kullanıcı yönlendirmektir. Söz konusu yük yoğunluğu yönetim uygulamaları hem kullanıcı adına hem de dağıtım şirketleri adına en verimli dinamik tarifeyi oluşturarak katkı sağlamaktır [4].)

Yük yoğunluğunu yönetim uygulamaları için kullanıcıların yönlendirilmesi gerekmesi ve bu amaçla bazı teşvik mekanizmalarının kullanılması gereklidir. Teşvik mekanizması olarak dinamik fiyatlandırma metodu kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Dinamik fiyatlandırma bir ürün veya hizmetin fiyatının değişen piyasa koşullarını yansıtacak şekilde yeniden düzenlenmesidir, özellikle daha fazla talebin olduğu bir zamanda daha yüksek bir fiyatın uygulanması en temel özelliğidir [5].

TTY teknolojide yaşanan ilerlemelerle birlikte akıllı şebeke yapısına geçişin de etkisiyle zamana bağlı olarak gelişmektedir. TTY’de yük yoğunluğunun yönetimi, uygulamaları açısından ele alındığında teknolojik gelişmenin aşağıdaki adımları izlemeye devam ettiği söylenebilir:

1. Adım: İlk olarak TTY hiç uygulanmamış ve kullanıcılar isteklerine göre hiçbir şarta bağlı kalmaksızın kullanım sergilemektedir.

2. Adım: Elektrik dağıtım firmaları tarafından gün içi tarife uygulamasına geçilmiştir. Zamana bağlı tarifeler ile tüketiciyi yönetebilme amaçlanmaktadır. Tüketici ise uygun ve ekonomik çözümü kendi aldığı kararlarla sağlamaktadır. Günümüzde kullanılan üç zamanlı tarife buna örnek gösterilebilir [1,3].

3. Adım: Elektrik dağıtım firmaları tarafından gün içi tarife uygulaması mevcuttur. Tüketicilerin elektrikli cihazları gün içi tarifeye uygun olarak kendi kendine yüklenme davranışı geliştirebilmektedir. Buzdolabı

gibi termostat kontrollü yüklerin gün içi tüketim davranışları geliştirmesi buna örnek gösterilebilir [6,7].

4. Adım: Şebeke tarafında zamana bağlı tarife uygulaması mevcuttur ve tüketici tarafındaki akıllı cihaz ve elektrikli cihazlar birbirleriyle haberleşerek ortak bir tüketim modeli üretebilmektedir [8].

5. Adım: Şebeke tarafında dinamik olarak değişen bir tarife yapısı mevcuttur [9, 10]. Cihazlar ile şebeke arasında bir haberleşme altyapısı bulunmaktadır ve cihazlar, şebekeden gelen üretim, tüketim, enerji fiyatı gibi parametrelere uygun olarak tüketim davranışı geliştirmektedir [11].

Dinamik fiyat ile birlikte kullanıcı fiyat üzerinden elektrik enerjisi kullanımı yoğun saatlerden elektrik enerjisi kullanım yoğunluğunun az olduğu zaman dilimlerine yönlendirilecektir. Burada söz konusu durum sadece basit bir ürün olmadığı için ve elektrik enerjisi kullanımının bazı durumlarda kesintiye uğraması gerektiğinden bu durumların tespit edilmesi gerekmektedir. Tüketicilerin kullandığı elektrik enerjisinin hangi yük tiplerinde kullanıldığının belirlenmesi kullanıcının yönetilebilirlik seviyesinin belirlenmesi için son derece önemlidir. Bu çalışmada evsel müşteriler açısından yük tiplerinin belirlenmesi amacıyla MATLAB kullanılarak Yapay Sinir Ağları modeli ile tahmin modeli oluşturulmuştur.

2. Yük Tiplerinin Belirlenmesi

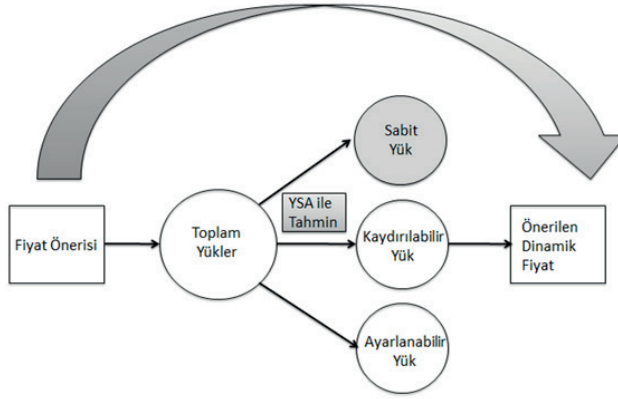
Dinamik tarife oluşturmanın temelinde talep tarafını yönetebilmek olduğu için öncelikle tüketicilerin yük tipleri talep tarafı yönetimi uygulamaları dikkate alınarak belirlenmiştir. Elektriksel yükler ya da elektrik enerjisi tüketen cihazlar TTY açısından bakıldığında üçe ayrılmaktadır. Bu yükler sabit yük, kaydırılabilir yük ve ayarlanabilir yük olarak adlandırılmaktadır.

Sabit yükler; çalışma zaman aralığı kesinlikle değiştirilemeyen, değiştirildiğinde kullanım amacına hizmet etmeyen yük çeşididir. Örneğin aydınlatma için kullanılan yükler sabit yüke örnek olarak gösterilebilir ve çalışma zaman aralığını değiştirdiğimiz takdirde kullanım amacına hizmet etmediği çok net bir şekilde görülmektedir.

Kaydırılabilir yükler; çalışma zaman aralığı değiştirilebilir bir yük tipi olup, çalışma zaman aralığını kaydığımızda da ihtiyacınızı karşılayabildiğiniz yüklerdir; çamaşır makinesi, bulaşık makinesi gibi yükler bu tanıma uygun yük gruplarıdır.

Ayarlanabilir yükler ise tükettiği enerji miktarında kullanıcının konforundan bir miktar feragat ederek değişiklik yapmasına imkân sağlayan

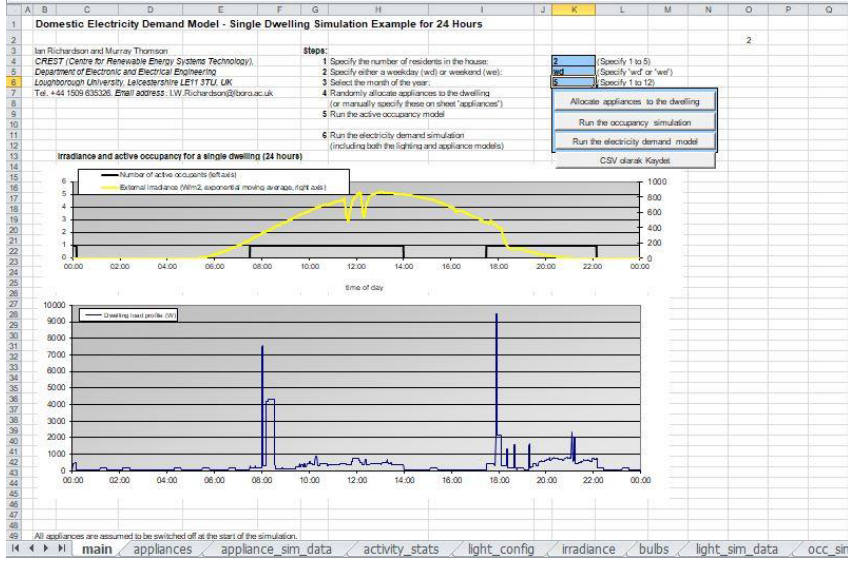
yüklerdir. Klima ve fan gibi yükler ayarlanabilir yük grubuna örnek olarak gösterilebilir. Söz konusu örneklerden yola çıkarak elektrik enerjisi tüketicilerinin yük tiplerinin belirlenerek ileriye yönelik tahmini, yüklerin yönetilebilirliği açısından oldukça kıymetlidir. Şekil 1’de çalışmanın genel mimarisi gösterilmiş olup ilk olarak veri setinden elde edilen yüklerin ayırt edilmesi ve sonrası için YSA ile belirlenmiş olan yük tipleri cinsinden tahmin edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 1. Çalışmaya ait mimari

Söz konusu çalışmada ileriye yönelik tahmin analizlerinin yapılabilmesi için anlık olarak yük tiplerini görebildiğimiz bir veri seti olarak CREST veri setinden yararlanılmıştır. CREST veri seti konut tipi kullanıcıları örneklemekte olup çalışma mesken aboneler için gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen veri seti talep yükü profilinin yapısını çeşitli fiziksel ve davranışsal faktörleri göz önüne alarak sunmaktadır. Bu veri setinde konut tipi kullanıcılar, faaliyetleri ve ilgili cihazların kullanımıyla elektrik enerjisinin günlük kullanım profilini belirleyen kişilerdir. Veri seti 1 dakikalık çözünürlükte veri sağlamaktadır. Yapılan yük tipi tahminleri de aynı şekilde 1 dakikalık çözünürlükte gerçekleşmektedir. Bu çalışmada konut tipi kullanıcıları için yük tiplerinin ayrıştırılarak tahmin edilmesi amaçlanmaktadır.

CREST programı genel olarak, her bir cihaz için kullanım sıklığı, kullanım süresi ele alınarak ayrıca konutta yaşayan kişi sayısının da cihaz kullanımına etkisini dikkate alarak konuttaki elektrik enerjisi tüketim profillerini ortaya koyan bir programdır. CREST programına ait ana sayfa görseli Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. CREST programı anasayfası

Çalışma için ihtiyaç duyulan veri istenilen girdi değerleri seçilerek oluşturulmuş ve farklı koşullar göz önüne alınarak elde edilmiştir. Veri setinin esneklik imkânı tanınması bu çalışma için avantaj sağlamıştır. Söz konusu avantajlar dâhilinde farklı durumlar göz önüne alınarak senaryolar kurgulanmış ve bu şekilde veri seti elde edilmiştir.

3. Yöntemin Uygulanması

Çalışmada kullanılmak üzere CREST programından farklı dağılımlarda yük profili elde etmek üzere veri setleri üretilmiştir. Elde edilen veriye ait tablo ekte yer almaktadır. Bu veri ile yapay sinir ağları kullanılarak ileriye yönelik günlük tahmin çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tablo 1’de farklı koşullar (konutta yaşayan kişi sayısı, yılın farklı zaman dilimleri ve hafta içi hafta sonu gibi) dikkate alınarak oluşturulan toplam veri seti ve özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 1. CREST programına ait farklı koşullarda konut tipi tüketiciye ait kullanıcı veri seti.

Konutta yaşayan kişi sayısı	Aylık dağılımlara göre veri seti					Hafta içi	Hafta Sonu
	Ocak	Nisan	Temmuz	Ekim	Aralık		
1	✓					✓	
2		✓					✓
3			✓			✓	
4				✓			✓
5					✓	✓	

Tablo 1’den elde edilen verilerin YSA ile tahmin çalışmalarının gerçekleştirilebileceği şekilde düzenlenerek ayarlanabilir yük, kaydırılabilir yük ve sabit yüklerin belirlenip tasnif edilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca CREST programında yer almayan söz konusu güne ait hava durumuna ait veriler meteoblue web sitesinden alınarak modele eklenmiştir [12]. Tablo 2 ‘de CREST programından elde edilmiş ve uygun hâle getirilmiş veri setinden bir örnek gösterilmektedir.

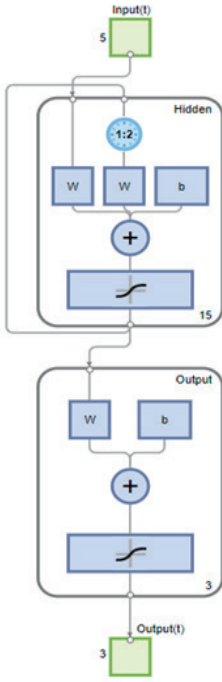
Tablo 2. CREST veri tasnifi ve hava durumu verilerinin birleştirilmesi

Tarih	Günün hangi dakikası	Sıcaklık (°C)	Rüzgar Hızı (km/sa)	Işınım (Güneş)	Teknik Kayıplar	Sabit Yükler	Kaydırılabilir Yükler	Ayarlanabilir Yükler	Tüm Yükler
04.04.23	1	15	17,5	0	5,2	51	1	0	52
04.04.23	2	15	17,5	0	5,2	51	1	0	52
04.04.23	3	15	17,5	0	5,2	51	1	0	52
04.04.23	4	15	17,5	0	5,2	51	1	0	52
04.04.23	5	15	17,5	0	5,2	51	1	0	52
04.04.23	6	15	17,5	0	5,2	51	1	0	52
04.04.23	7	15	17,5	0	5,2	51	1	0	52
04.04.23	8	15	17,5	0	5,2	51	1	0	52
04.04.23	9	15	17,5	0	5,2	51	1	0	52
04.04.23	10	15	17,5	0	5,2	51	1	0	52

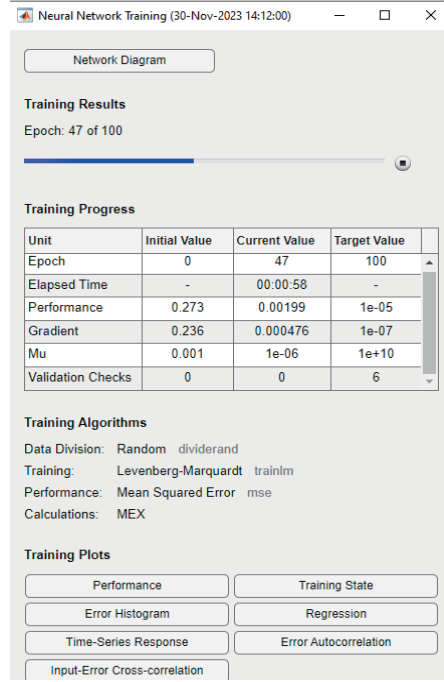
Bu çalışmada, Elman tipi bir yapay sinir ağı (YSA) modeli kullanılarak tahminleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Kullanılan veri seti toplamda 7200 satırdan oluşmakta olup, 5 giriş değişkeni (zaman, sıcaklık, rüzgar hızı, ışınım, teknik kayıplar) ve 3 çıkış değişkeni (sabit yük, kaydırılabilir

yük ve ayarlanabilir yükler) içermektedir (Tablo 2). Model, MATLAB ortamında geliştirilmiş ve eğitim sürecinde Levenberg-Marquardt (trainlm) algoritması kullanılmıştır. Eğitim işlemleri sırasında, modelin performansı ve hata metrikleri detaylı bir şekilde takip edilmiştir.

Modelin yapısında, Şekil 3a’da görüleceği üzere iki katmanlı bir Elman ağı tercih edilmiştir. Gizli katmanda 15 nöron bulunmakta olup, bu katmanda tansig aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Çıkış katmanında ise yine tansig fonksiyonu uygulanmıştır. Modelin performans değerlendirilmesi için ortalama kare hata (Mean Squared Error, MSE) kriteri seçilmiş ve hedef hata değeri 10^{-5} olarak belirlenmiştir. Eğitim süreci 100 epoch ile sınırlandırılmıştır.



(a)



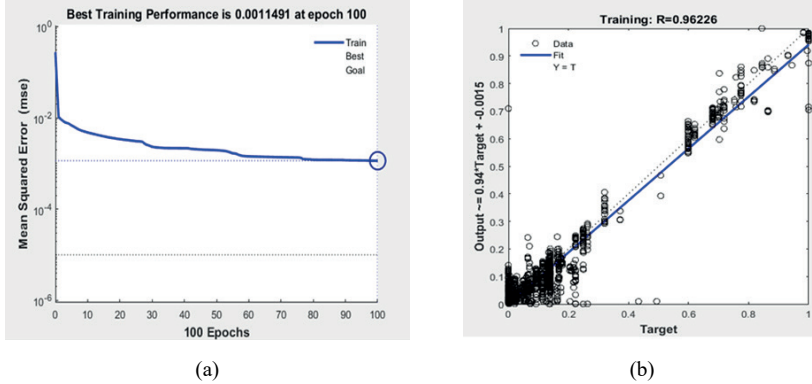
(b)

Şekil 3. Elman YSA ve çalışmaya ait bazı değerler

Veri rastgele bir dağılım ile eğitim ve test setlerine ayrılmıştır. Eğitim sırasında model performansı düzenli olarak izlenmiş ve gradyan, performans ve öğrenme katsayısı (μ) gibi metrikler değerlendirilmiştir. Şekil 3b’de verilen eğitim sonuçlarında model performans fonksiyonunun

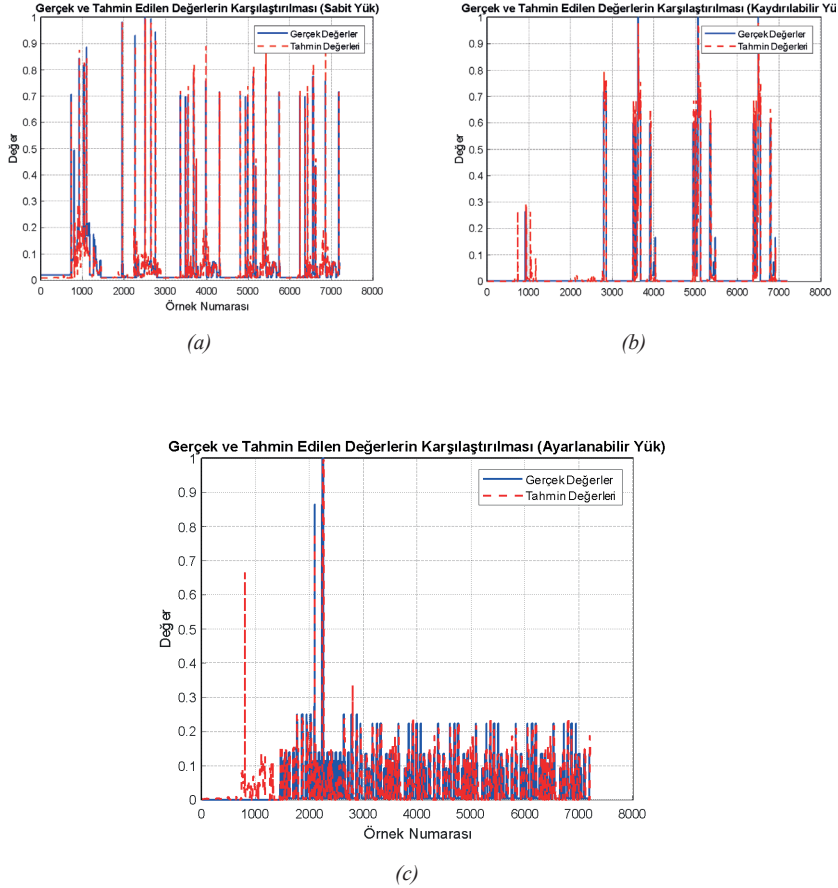
MSE=0.00199 seviyesine ulaştığı, gradyanın 0.0004767 olarak optimize edildiği ve öğrenme katsayısının 10^{-6} seviyesine geldiği gözlemlenmiştir. Model, toplamda 47 epoch sonunda hedeflenen seviyeye yakın bir performans göstermiştir.

Eğitim sürecindeki performans, regresyon ve hata azalışı gibi detaylar görsel olarak incelenmiştir. Şekil 4a'da verilen performans grafiği, modelin öğrenme sürecindeki hata azalmasını açık bir şekilde göstermiştir. Ayrıca, Şekil 4b'de verilen regresyon analizleri tahmini ve gerçek değerler arasındaki uyumu ortaya koymuştur. Eğitim sürecinin genel olarak hızlı bir yakınsama sağladığı ve belirlenen tahminleme probleminde tatmin edici bir doğruluk seviyesine ulaşıldığı değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Tahmin sonucu MSE ve Regresyon değeri sonuçları

Bu sonuçlar, modelin doğru bir şekilde yapılandırıldığını ve hedeflenen tahminleme görevinde etkili bir performans sergilediğini göstermektedir. Bütün veri seti tasarlanan YSA modeli ile test edildiğinde elde edilen normalize edilmiş tahmin sonuçları ve gerçek değerlerin karşılaştırılması Şekil 5'te verilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bütün performans değerleri ve karşılaştırmalı grafiklere bakıldığında Elman YSA modelinin TTY ile dinamik fiyatlandırma yönteminde başarılı bir şekilde kullanılacağı kanıtlanmıştır.



Şekil 5. Tasarlanan Elman YSA ile yüklerin tahmini

Sonuçlar

Kısıtlı enerji kaynaklarının üretimi kadar elde edilen enerjinin planlı bir şekilde kullanılması ve yönetilmesi de son derece önemlidir. Bu amaca yönelik olarak TTY uygulamaları ortaya çıkmıştır. TTY uygulamalarında yük tiplerinin bilinmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, Elman tipi yapay sinir ağı (YSA) modeli kullanılarak konut tüketicileri için sabit yük, kaydırılabilir yük ve ayarlanabilir yük tahminleri gerçekleştirilmiştir. Toplamda 7200 satırdan oluşan veri seti ile gerçekleştirilen analizlerde, geliştirilen YSA modelinin hızlı bir yakınsama

sağladığı ve yüksek bir doğruluk seviyesine ulaştığı görülmüştür. Eğitim sürecinde MSE = 0.00199 seviyesinde hata oranına ulaşan model, regresyon analizlerinde de yüksek uyum göstermiştir. Normalize edilmiş tahmin sonuçları ve gerçek değerlerin karşılaştırması, YSA modelinin başarılı bir tahminleme performansı sergilediğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar dağıtım sistemlerinde konut tüketicileri için dinamik fiyatlandırma senaryolarının incelenmesinde kullanılabilir.

Referanslar

- [1] Gellings, C. 1985. “The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities”, Proceedings of the IEEE, 73 (10), 1468-1470.
- [2] Özay,C.2019, “Stokastik Optimizasyon Metodu Kullanılarak Enerji Talep Yönetim Sisteminin Modellenmesi” Doktora Tezi, Ege Üniversitesi.
- [3] Rad,M., Wang W.S., Jatskevich J., Schober R., Garcia A.L. 2010. “Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling For The Future Smart Grid”, IEEE Transactions on Smart Grid, 1 (3), 320-331.
- [4] Karunanithi, K., Saravanan, S., Prabakar, B.R., Kannan, S., Thangaraj, C. 2017. “Integration of Demand and Supply Side Management strategies in Generation Expansion Planning”,Renewable and Sustainable Energy Reviews 73, 966–982.
- [5] Dong J.,Jiang Y. Liu D., Dou X.,Liu Y.,Peng S. 2022. “Collaboration model between Distribution System Operator and flexible prosumers based on a unique dynamic price for electricity and flexibility”, Energy Policy 167 (113059).
- [6] Finn,P., O’Connel, M., Fitzpatrick, C. 2013. “Demand Side Management Of a Domestic Dishwasher: Wind Energy Gains, Financial Savings and Peak-Time Load Reduction” ,Applied Energy 101, 678–685.
- [7] Zehir, M. A. 2013. “Akıllı şebekelerde Termostat Kontrollü Yükler için Gelişmiş Yerel Talep Yönetim Sistemi Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [8] Wang, Y., Liang, H., Dinavahi, V. 2018. “Two-Stage Stochastic Demand Response In Smart Grid Considering Random Appliance Usage Patterns”, IET Generation Transmission & Distribution, 12 (18), 4163–4171.
- [9] Zhao,Z., Wu, L., Song G. 2014. “Convergence of Volatile Power Markets With Price-Based Demand Response”, IEEE Transactions on Power Systems, 29 (5), 2107–2118.
- [10] Kovacs A. 2018. “On the Computational Complexity of Tariff Optimization for Demand Response Management”, IEEE Transactions on Power Systems, 33 (3), 3204–3206.
- [11] Adika, O., Wang, L. 2014. “Smart Charging and Appliance Scheduling Approaches To Demand Side Management”, Applied Energy, 232-240.
- [12] Meteoblue, <https://www.meteoblue.com/tr/hava/archive/> Erişim tarihi : 04.07.2024.

Bükülü Bant Genişliği ve Kalınlığının Boru Akışındaki Akış Karakteristikleri Üzerindeki Etkisinin CFD Analizi

Haydar Kepekci¹

Özet

Bu çalışmada, boru içi akışta bükülü bant geometrisinin ısı transferi performansı üzerindeki etkilerini, genişlik oranı, kalınlık ve akış hızındaki değişimlere odaklanarak incelenmiştir. 25 mm çapında ve 1 metre uzunluğunda bir boru kullanılmış ve akışkan olarak su seçilmiştir. Yapılan analizlerde, akış hızları 0,05 m/s ve 0,2 m/s olarak alınmış; bükülü bant genişlik oranları (%20, %40, %80) ve kalınlıkları (0,5 mm, 1 mm, 2 mm) olarak belirlenmiştir. Reynolds sayısı (Re), Nusselt sayısı (Nu), sürtünme faktörü (f) ve basınç kaybı (ΔP) gibi önemli parametreler hesaplanmıştır. Sonuçlar, bükülü bant genişlik oranı ve kalınlığının artışının, hidrolik çapı etkileyerek Re ve Nu değerlerini önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir. Genişlik oranının artışı, ısı transferini iyileştirirken sürtünme ve basınç kaybını da artırmıştır. Benzer şekilde, kalınlığın artışı akış direncini artırmış ve bu durum, basınç kaybı ve ısı transferi performansını etkilemiştir. Daha yüksek akış hızlarında türbülanslı akış, Nu değerinde artışa yol açarak ısı transferini iyileştirmiş, ancak bu iyileşme sürtünme ve basınç kayıplarının artışı pahasına gerçekleşmiştir. Elde edilen sonuçlar, bükülü bant kullanılmayan referans durumla karşılaştırıldığında, ısı transferi performansının belirgin

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250305>

¹ İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, hikepekci@gelisim.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0037-8332

şekilde düşük olduğu görülmüştür. Elde edilen bulgular, bükülü bant tasarımının optimize edilmesinin, ısı transferi etkinliği ile basınç kaybı arasındaki dengeyi sağlamada kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Bükülü Bant, Akış Karakteristiği, Boru Akışı, Isı Transferi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.

CFD Analysis of the Influence of Twisted Tape Width and Thickness on Flow Characteristics in Pipe Flow

Abstract

This study investigates the impact of twisted tape geometry on heat transfer performance in pipe flow, focusing on width ratio, thickness, and flow velocity variations. A 25 mm diameter and 1-meter-long pipe were utilized, with water as the working fluid. The analyses considered flow velocities of 0.05 m/s and 0.2 m/s, twisted tape width ratios (20%, 40%, 80%), and thicknesses (0.5 mm, 1 mm, 2 mm). Key parameters such as Reynolds number (Re), Nusselt number (Nu), friction factor (f), and pressure drop (ΔP) were calculated. The results revealed that increasing the width ratio and thickness of the twisted tape significantly influenced the hydraulic diameter, altering the Re and Nu values. Higher width ratios improved heat transfer but increased friction and pressure loss. Similarly, thicker twisted tapes elevated flow resistance, affecting pressure loss and heat transfer performance. At higher flow velocities, turbulent flow enhanced heat transfer, reflected by increased Nu, though at the expense of friction and pressure losses. Baseline comparisons without twisted tape showed significantly lower heat transfer performance. These findings highlight the critical role of optimized twisted tape design in balancing heat transfer efficiency and pressure loss for improved system performance.

Keywords: Twisted tape, Flow Characteristics, Pipe flow, Heat transfer, Computational Fluid Dynamics.

1. Introduction

Since it has been realized that one of the biggest spending items of the

states is energy, energy efficiency has become the focus of research. Air conditioning systems are one of the areas where energy is used commonly [1]. Studies are frequently conducted to ensure that the fluids used in air conditioning systems do not lose their energy during their movements and to increase heat transfer within the system. An example of studies carried out for this purpose is pipe geometry optimization [2]. Because pipes are the main components used in heat transfer and energy efficiency systems. As a result of studies implemented using different geometric modifications, it has been determined that the designs that increase heat transfer the most are corrugated, helical, and dimpled pipes [3]. In addition to these, the use of twisted tape has also been investigated recently [4]. Twisted tape is accepted as a passive heat transfer enhancement technique that increases heat transfer without giving extra energy to the system [5]. In pipes where twisted tape is used, turbulence occurs in the tape region during flow and the laminar regime is disrupted, increasing heat transfer [6]. The rate at which twisted tapes increase heat transfer and energy efficiency depends on the geometry of the tape and the twist frequency.

Since they are useful in reducing energy costs, twisted tapes have a wide range of applications in engineering. The most common application areas are power plants where energy efficiency is of great importance. Twisted tapes are frequently used in systems designed using boilers, condensers, and panels. The twisted tape creates turbulence and secondary flow in the flow area, allowing the laminar layer to become thinner and the heat transfer coefficient to increase [7]. In addition, it increases system efficiency by minimizing pressure drop, thanks to geometric modifications. In addition to providing energy savings, this technology also contributes to reducing the carbon footprint.

There are many studies on this subject in literature. Some of them are as follows. Al-Obaidi aimed to increase heat transfer in the pipe and improve hydraulic performance by using twisted tape. He analyzed 16 different twisted tape geometries with CFD simulations and Taguchi methods. According to his results, twisted tape provides a 42.81% increase in heat transfer and a 42.72% increase in heat transfer rate. However, the increased heat transfer caused a significant pressure loss. Future studies suggested that different geometric combinations and optimization methods should be examined to increase heat transfer while reducing pressure loss [8]. Crespo-Quintanilla et al. investigated the effects of twisted pipes and tapes on heat transfer performance. In their studies, they analyzed in

detail the effects of the width ratio and thickness of the twisted tapes on the Nusselt number and pressure drop. With the help of experimental and numerical simulations, they observed how the twisted tapes changed the flow characteristics and increased heat transfer. In a model called TT-3C, the twisted strips thinned the boundary layer by forcing the flow in the tube to rotate and increased the heat transfer performance by 27.50%. In this model, a 4,010.60-kW thermal load was provided with a 923.20 m² heat transfer area, but the turbulence created by the twisted strip increased the pressure drop on the tube side to 13,840 Pa. Their study showed that energy efficiency can be increased by optimizing the width ratio and thickness and that it has potential for industrial applications [9]. Nilpueng et al. designed a heat exchanger with twisted tape, made of copper foam, and conducted an experimental study on heat transfer and pressure drop. The study examined the effect of the Reynolds number and twist ratio. As a result, they found that decreasing the twist ratio provided a thermal resistance reduction of 14.2% for stationary strips and 14.8% for rotating strips. They also observed that rotating twisted strips had a lower pressure drop (4.86% less) and higher thermal-hydraulic performance (TF) than stationary strips. They suggested that the effects of copper foam pore density and larger twist ratios should be investigated in future studies [10].

Wang et al. investigated the effect of using twisted tape with ultrasonic technology on thermo-hydraulic performance in shell and tube heat exchangers. They measured the maximum Nusselt number increase as 36.53% in their study. They also observed that the increase in Reynolds number increased the heat transfer performance but limited the resistance reduction effect [11]. Aldawi investigated the effects of twisted tapes with different configurations placed in spiral tubes on heat transfer, friction factor, and exergy destruction. In his study, he presents numerical analyses performed under different geometric configurations by considering various design parameters of the tubes (strip diameter, thickness, and pitch distance). He stated that when the strip diameter was increased from 10 mm to 22 mm, a decrease in the Nusselt number was observed at the beginning, but an increase occurred after a certain threshold value. In this case, a significant increase in exergy destruction was observed. In addition, as the pitch distance of the twisted tapes increased, a decrease in heat transfer performance was observed. However, this decrease was balanced by a greater friction factor, causing an increase in the thermal performance factor. He emphasized the potential of twisted tapes to increase thermal efficiency

in engineering applications and the importance of future research on optimizing such systems [12]. Göksu investigated the cooling effect of using twisted tapes in PV/T systems with varying Reynolds numbers (500-1900) and different geometric configurations using numerical methods. At the end of the study, it was found that there was a direct proportion between the surface temperature and the thickness. He found that the thermal efficiency decreased with the increase in the thickness and width of the twisted tapes [13].

Liaw et al. proposed to use helical pipe heat exchangers in the cooling systems of power plants. They added a twisted tape to the helical pipe in their study to examine its effect on heat transfer. They confirmed their numerical studies with experimental data. As a result, they found that the addition of a twisted tape increased the heat transfer by increasing the secondary flows in the tube. They found that the most significant heat transfer increase was in the region near the wall [14]. Oketola et al. designed a system for parabolic corrugated solar collectors using geometrically modified twisted tape. They performed the thermodynamic analysis of the designed system using the CFD method. As a result, they observed that as the twist ratio increases, the thermal efficiency also increases [15]. Farhadi et al. investigated the effects of twist ratio, Reynolds number and perforation of twisted tapes when used in heat exchangers. They confirmed their calculations for both laminar and turbulent flow with experimental data. As a result, they stated that all twisted tape pipes showed better performance in heat transfer compared to straight pipes. They also observed that the friction coefficient decreased with increasing Reynolds number. In addition, they found that perforation of twisted tapes did not increase heat transfer [16]. Ghalambaz et al. investigated the effects of shortened twisted tapes placed in a tube heat exchanger on heat transfer and hydraulic performance. In their study, they used different twisted strip steps (L , $L/2$, $L/3$, $L/4$), shortening percentages (25%, 50%, 75%), and positions (inlet, middle, outlet) and selected Reynolds numbers as 250, 500, 750 and 1000. When they compared the result of the analysis they made using a fully twisted strip with the straight pipe, they found a 151% increase in Nusselt number for Reynolds number 1000. They also found that heat transfer rate and pressure loss decreased when the strip was shortened [17].

In this study, the effects of the width ratio and thickness of twisted tapes on the flow and heat transfer performance in the pipe have been investigated in detail. Numerical calculations have been performed using

geometric configurations created by changing the flow rate, width ratio (20%, 40%, and 80%), and tape thickness (0.5 mm, 1 mm, and 2 mm). Analyses have been performed using CFD software and Nusselt number (Nu), friction factor (f), and pressure loss (ΔP) have been calculated separately for each design. Also, calculations have been performed using straight pipe, and the results obtained have been used in comparisons to assess the effect of twisted tapes on heat transfer. The findings obtained as a result of this manuscript are aimed at conducting a better understanding of the effect of geometric modifications of twisted tapes on heat transfer.

2. Material And Methods

2.1. Geometry

The length of the pipe used in the calculations made in this manuscript has been selected as 1000 mm and its inner diameter as 25 mm. The pipe length has been identified by calculating the distance required for the flow to become fully developed. The twisted tape structures used in the analyses have been designed as helical structures placed inside the pipe. These structures have been created with thicknesses of 0.5 mm, 1 mm, and 2 mm and widths corresponding to 20%, 40%, and 80% of the pipe diameter, respectively. An example of these models designed using CAM software is presented in Figure 1.

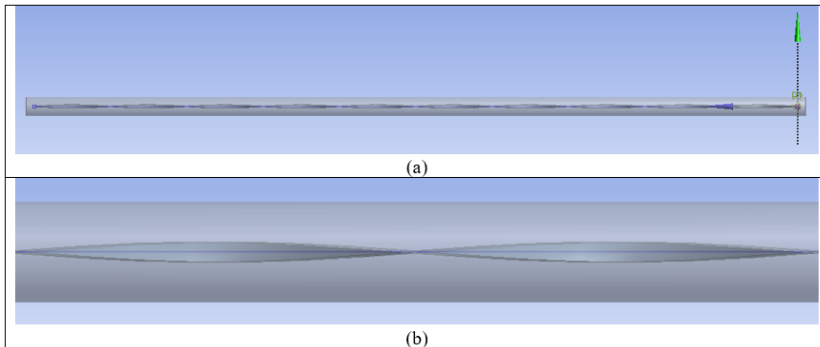


Figure 1. Appearances of designed pipe; a) General view, b) Twisted tape's view.

2.2. Meshing

Before CFD analysis, the geometry must be divided into small grids. This process aims to increase the accuracy of the analysis and is called meshing

[18]. Dividing the pipe geometry into more parts increases the accuracy of the analysis results, while smaller grid sizes reinforce this accuracy even more. In this study, hexagonal cell structures, reported in the literature to provide superior performance in heat transfer analyses within the boundary layer, have been preferred [19]. However, since increasing the number of grids prolongs the solution time, keeping the number of grids at the optimum level when creating the mesh structure is important. For this purpose, mesh independence analysis has been performed using a twisted tape geometry with a width of 20% and a thickness of 0.5 mm. As a result of this study, it has been decided that a mesh structure consisting of approximately 500,000 elements is suitable for the pipe geometries used in this study.

2.3. Governing Equations

This study selected and analyzed two basic parameters to evaluate the effect of twisted tape width ratio, thickness, and flow rate on heat transfer. These have been determined as Nusselt number and friction factors. The results obtained from numerical analysis have been compared with straight pipes, and the effectiveness of twisted tape applications has been evaluated. As a result of flow analysis, it has been observed that in pipes where twisted tape has been used, the flow became regular along the pipe due to the turbulence effect. Therefore, the data used in the Nusselt number and friction factor calculations have been taken from the regions where the flow became stable in the numerical analysis. It has been observed that the flow in the bent tape became regular in the last 25 mm.

The Nusselt number (Nu) is given in Equation 1.

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot D_h}{k} \quad (1)$$

k and h represent the thermal conductivity and heat transfer coefficient, respectively. Equation 2 provides the heat transfer coefficient (h) formula that was computed using the values taken from the channel.

$$h = \frac{1}{3s} \int_0^s h_x dx \quad (2)$$

The calculation of the friction factor (f) is given in Equation 3.

$$f = -\frac{dP}{dx} D_h / \frac{1}{2} \rho u_0^2 \quad (3)$$

ρ and u represent density and velocity, respectively.

3. Results

In this manuscript, the effect of different configurations of the twisted tape on the heat transfer performance has been investigated using the Nusselt number. In addition, when straight pipe and twisted tape pipes have been compared, it has been seen that the twisted tape profoundly enhanced the heat transfer performance. When the effects of the width ratio and thickness of the twisted tape on the heat transfer performance have been examined, it has been seen that the Nu number decreased with the increase of these parameters. Among the parameters used in the analysis, only the increase in the flow rate significantly increased the Nu number. These results shed light on the importance of optimizing the geometric parameters used in the twisted tape design. Nusselt number (Nu), friction factor (f), and pressure loss (ΔP) values calculated according to the data obtained from the analyses are presented in Table 1.

Table 1. Calculated Nu, f, and ΔP Values for Different Twisted Tape Configurations

Analysis No	Twisted Tape Width Ratio (W/D)	Thickness (mm)	Flow Velocity (m/s)	Nusselt Number	Friction Factor (f)	Pressure Drop (kPa)
1	%20	0.5	0.05	19.899	0.054	3.513
2	%20	0.5	0.2	60.335	0.038	38.857
3	%20	1.0	0.05	19.555	0.055	3.607
4	%20	1.0	0.2	59.237	0.039	40.929
5	%20	2.0	0.05	18.830	0.056	3.877
6	%20	2.0	0.2	57.082	0.039	43.203
7	%40	0.5	0.05	16.172	0.059	5.070
8	%40	0.5	0.2	49.037	0.041	56.382
9	%40	1.0	0.05	15.796	0.059	5.252
10	%40	1.0	0.2	47.848	0.042	59.82
11	%40	2.0	0.05	14.982	0.060	5.752
12	%40	2.0	0.2	45.430	0.043	65.955
13	%80	0.5	0.05	7.129	0.079	21.878
14	%80	0.5	0.2	17.167	0.056	24.814
15	%80	1.0	0.05	6.565	0.081	25.236
16	%80	1.0	0.2	19.902	0.057	28.143
17	%80	2.0	0.05	5.367	0.087	36.141

18	%80	2.0	0.2	16.272	0.062	41.20
19	-	-	0.05	3.66	0.45	2.24
20	-	-	0.2	34.440	0.009	7.178

In the design with a width ratio of 20% and a thickness of 0.5 mm, the Nusselt number has been calculated as 60.335 for water entering the pipe at a speed of 0.2 m/s. However, when the width ratio was 40%, and the thickness remained the same, it was found that the Nu number decreased to 49.037, and when the width ratio increased to 80%, the Nu number decreased to 17.167. This result shows that the increase in the width ratio reduces the heat transfer performance by limiting the effective access of the fluid to the pipe surface.

Similarly, in a design with a width ratio of 40% and a thickness of 0.5 mm, the Nu number has been calculated as 16.172 for water entering the pipe at a speed of 0.05 m/s. At the same time, it has been observed that when the thickness was increased to 1 mm, the Nu number decreased to 15.796, and when the thickness was 2 mm, the Nu number decreased to 14.982. This situation reveals that the increase in the strip thickness affects the pipe's hydraulic diameter, reducing the fluid's turbulence-creation capacity and thus negatively affecting the heat transfer.

On the other hand, in a design with a width ratio of 80% and a thickness of 0.5 mm, the Nu number is 7.129 for water entering the pipe at a speed of 0.05 m/s, while it has been observed that the Nu number increased to 17.167 when the flow velocity has been increased to 0.2 m/s. This analysis emphasizes the significant effect of the increase in the flow velocity on the heat transfer performance. In addition, in the analyses performed for the straight pipe as a reference, it has been observed that the Nu number was 3.66 when the water entered at a speed of 0.05 m/s and when the flow rate was increased to 0.2 m/s, the Nu number increased to 34.440. This situation shows that using twisted tape significantly increases the heat transfer performance, especially at low flow rates, but its effect is relatively more limited at high flow rates. While increasing the flow rate increases heat transfer in straight pipes and pipes modified with twisted tapes, the turbulence-creation effect of twisted tapes plays a more dominant role at low speeds.

These results demonstrate that the Nusselt number is explicitly related to the parameters of width ratio, tape thickness, and flow rate. Nevertheless, according to the results obtained from the analysis, if the parame-

ters used are compared, the flow rate has a stronger effect on the Nusselt number than the others. The reason for this is that while parameters such as width ratio and tape thickness increase the turbulence capacity of the fluid, the velocity of the flow in the pipe is thought to unambiguously increase the convective heat transfer. Therefore, it is important to correctly select the flow rate and determine the parameters such as width ratio and thickness in a balanced manner in design optimization.

3.1. Analysis of Velocity Contours

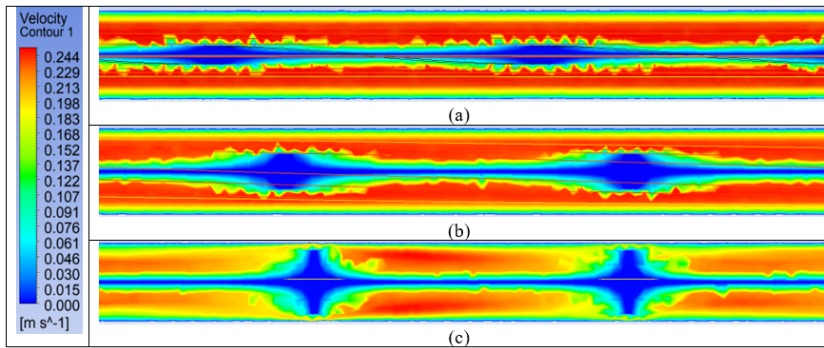


Figure 2. Velocity contours for different twisted tape width ratios (a) 20%, (b) 40%, and (c) 80% with a tape thickness of 0.5 mm and a flow velocity of 0.2 m/s.

Velocity contours for different twisted tape width ratios as 20%, 40%, and 80% with a tape thickness of 0.5 mm and a flow velocity of 0.2 m/s are given in Fig. 2. The twisted tape with a width ratio of 20% maintains the regularity of the fluid as it creates less turbulence and contributes to the energy transfer without disturbing the flow profile in the pipe too much. The limited turbulence provides an effective energy transfer in the boundary layer. This results in a high Nu number because the flow interacts better with the surface area. When the width ratio increases to 80%, it causes more mixing and irregularities in the fluid. This situation causes speed losses and decreases flow efficiency instead of increasing energy transfer in the boundary layer. Excessive turbulence can cause the fluid to separate from the pipe surface and lose energy instead of effectively operating the energy transfer mechanisms, which causes a decrease in the Nu number. As the twisted tape width ratio is increased, the turbulence effect increases, but this only sometimes leads to an increase in the Nu number. When evaluating the effect of increasing the width ratio on performance, heat transfer, pressure loss, and flow stability should be considered.

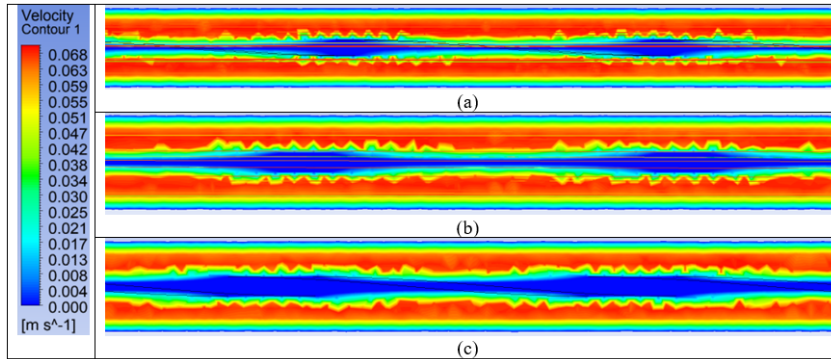


Figure 3. Velocity Contours for 20% Width Ratio at 0.05 m/s Flow Rate: (a) 0.5 mm Thickness, (b) 1.0 mm Thickness, (c) 2.0 mm Thickness.

From Figure 3 and the analyses, it is understood that the change in twisted tape thickness creates certain effects on the flow, but this effect is less significant than the effect of the change in width. Although differences are observed in the flow pattern and velocity distribution in the thicknesses of 0.5 mm, 1 mm, and 2 mm, these changes are limited. In terms of heat transfer performance, it is seen that the increase in thickness provides less significant improvement or deterioration than the change in width ratio. This situation reveals that the twisted tape width is a more dominant parameter of the flow dynamics and heat transfer performance. The effect of the increase in thickness mostly manifests itself by creating local differences in the flow pattern. This situation shows that unnecessary thickness increases should be avoided in engineering designs.

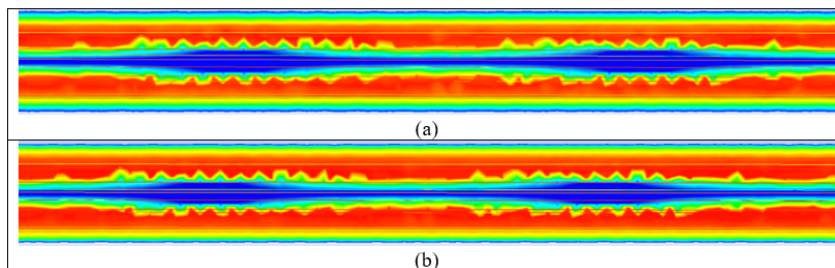


Figure 4. Velocity Contours for Different Flow Rates: (a) 0.05 m/s, (b) 0.2 m/s.

The velocity contours in Figure 4 show the situations that occur at

different flow rates (0.05 m/s and 0.2 m/s) for a width ratio of 20% and a thickness of 1 mm. In Figure 4. a (0.05 m/s), the flow progresses slower due to the low velocity, and the boundary layer effect is observed more clearly. In Figure 4.b (0.2 m/s), the kinetic energy of the fluid increases with the increase in the flow velocity, which causes the velocity gradients to spread over a wider area. It is evaluated that the flow at high velocity increases the turbulence on the boundary layer, and this situation positively contributes to heat transfer. The images clearly show that increasing the flow velocity provides a faster flow in the pipe and increases the turbulence effect of the twisted strip.

4. Conclusions

This study investigated the effects of twisted tape applications on pipe flow and heat transfer performance. Parameters such as width ratio, thickness, and flow rate have been analyzed, and the effects of these parameters on important performance metrics such as Nusselt number, friction factor, and pressure loss have been evaluated.

The results show that twisted tape is a very effective method of increasing heat transfer inside the pipe. However, it has been determined that the pressure loss increased significantly with the width ratio. While the Nu number has been calculated as 60.335 for the analysis in which water entered the pipe at a speed of 0.2 m/s in the design with a width ratio of 20% and a thickness of 0.5 mm, it has been observed that the Nu number decreased to 17.167 when the width ratio has been increased to 80% under the same conditions. This result shows that the increase in the twisted tape width may affect the turbulent behavior of the fluid differently and, as a result, may lead to unexpected changes in the heat transfer performance. Similarly, the increased twisted tape thickness affected the Nu number and pressure loss. However, this change has been determined to be a manageable size compared to the width parameter. Comparisons made with straight pipes revealed that the Nusselt numbers and heat transfer performance increased significantly in pipes using twisted tape. This result proves that twisted tape is a potential improvement method in engineering applications, especially in energy efficiency systems. Future studies can focus on various aspects to make twisted tape applications more effective and efficient. Further optimization of design parameters such as width ratio, thickness, and torsion angle of twisted tape can improve heat transfer performance and minimize pressure loss. Only water has been used in this study,

and examining the effects of twisted tape for fluids with different thermophysical properties will contribute to obtaining more general results. In addition, only aluminum has been used as pipe material. Therefore, the effects of different materials and pipe shapes (e.g., flat, square, or oval) on twisted tape can be investigated in the future. Since the study is completely based on numerical analysis, verifying the results with experimental studies will help obtain more robust and practically applicable results. Finally, conducting energy efficiency analyses that consider the effects of twisted tape on pressure loss and evaluating the potential contribution of this method in systems requiring energy saving will be an important step for future research. Such comprehensive studies can enable twisted tape to have a wider application area in engineering systems.

References

- [1] Zuo, Y., Li, Y., Wang, Z., Liu, G., Yang, Q., Zhao, Y., Li, L., Wang, J., 2024. Energy consumption analysis of building air-conditioning systems using a centrifugal compressor with gas bearing under annual operating conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 64, 105522.
- [2] Zheng, Z., Yan, F., Shi, L., 2021. Numerical study on multi-head twisted spiral tube's heat transfer and flow resistance characteristics. *Thermal Science*, 25, 224-206.
- [3] Al-Haidari, S.R., Mohammed, A., Al-Obaidi, A.R., 2024. Analysis of thermal-hydraulic flow and heat transfer augmentation in dimpled tubes based on experimental and CFD investigations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 110, 109604.
- [4] Sivasubramaniam, M., Rajan, D.P., Vijayakumar, C.T., 2015. Heat transfer and friction factor characteristics of pipe-in-pipe heat exchanger with twisted tape insert. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 58, 1639-1648.
- [5] Dhupal, G.S., Havaladar, S.N., 2023. Enhancing heat transfer performance in a double tube heat exchanger: Experimental study with twisted and helical tapes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 51, 103613.
- [6] Balderlou, M.A., Agrawal, M.K., Rao, B.N., El Jery, A., Al Alwan, B., Sadeq, A.M., 2024. Influence of twist ratio of twisted tape turbulator on the spiral tube's thermal and second law efficiency. *Results in Engineering*, 24, 103489.
- [7] Mangtani, M.P., Watt, K.M., 2015. Effect of twisted-tape inserts on heat transfer in a tube—A review. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 4(2), 97-104.
- [8] Al-Obaidi, A.R., 2024. Investigation of the hydraulic performance heat improvement in the 3D pipe by a variable of novel twisted tape configurations based on CFD and DoE analysis methods. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 110, 109581.
- [9] Crespo-Quintanilla, J.A., García-Castillo, J.L., Minchaca-Mojica, J.I., Picón-Núñez, M., 2024. Enhancing heat exchanger performance with combined twisted tubes and twisted tapes: Design and retrofit strategies. *Thermal Science and Engineering Progress*, 54,

102817.

[10] Nilpueng, K., Kaseethong, P., Wongwises, S., 2024. Heat transfer and flow characteristics of a plate-fin heat sink equipped with copper foam and twisted tapes. *Heliyon*, 10, 32307.

[11] Wang, W., Yu, C., Lv, X., Yang, Y., Zhang, H., 2024. Effect of ultrasonic on thermo-hydraulic characteristics of shell and tube heat exchangers with twisted tape. *Case Studies in Thermal Engineering*, 60, 104706.

[12] Aldawi, F., 2024. Efficiency enhancement of flat coiled tube using spiral twisted tape inserts with various configurations; thermal, hydraulic, and energetic analysis. *Results in Engineering*, 22, 102098.

[13] Göksu, T.T., 2024. Energy, exergy analysis, and RSM modeling of different designed twisted tapes in placed PV/T systems. *Energy*, 304, 132041.

[14] Liaw, K.L., Kurnia, J.C., Sasmito, A.P., 2024. Enhancing supercritical carbon dioxide heat transfer in helical tube heat exchangers with twisted tape inserts: A computational investigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 227, 125598.

[15] Oketola, T., Mwesigye, A., 2024. Numerical investigation of the overall thermal and thermodynamic performance of a high concentration ratio parabolic trough solar collector with a novel modified twisted tape insert using supercritical CO₂ as the working fluid. *Thermal Science and Engineering Progress*, 51, 102592.

[16] Farhadi, S., Shekari, Y., Omidvar, P., 2024. Numerical and experimental investigation of laminar and turbulent convective heat transfer in a coiled flow reverser with twisted tape insert. *International Journal of Thermal Sciences*, 197, 108781.

[17] Ghalambaz, M., Mashayekhi, R., Arasteh, H., Ali, H.M., Talebizadehsardari, P., Yaïci, W., 2024. Thermo-hydraulic performance analysis on the effects of truncated twisted tape inserts in a tube heat exchanger. *Symmetry*, 12, 1652.

[18] Katsidoniotaki, E., Shahroozi, Z., Eskilsson, C., Palm, J., Engström, J., Göteman, M., 2023. Validation of a CFD model for wave energy system dynamics in extreme waves. *Ocean Engineering*, 268, 113320.

[19] Kadivar, M., Tormey, D., McGranaghan, G., 2023. A comparison of RANS models used for CFD prediction of turbulent flow and heat transfer in rough and smooth channels. *International Journal of Thermofluids*, 20, 100399.

Düşük Sıcaklıkta Isı Kaynağı Kullanan Organik Rankine Çevrimi Uygulamaları İçin Hidrofloroolefinlerin Performans Değerlendirmesi

Ayşe Uğurcan Atmaca¹

Özet

Organik Rankine Çevrimi, Rankine çevrimi ile aynı çalışma prensibine sahiptir. Aradaki fark aracı akışkan olarak su yerine organik maddelerin kullanılmasıdır. Su bir aracı akışkan olarak bazı kısıtlamalara sahip olduğu için organik Rankine çevrimi popüler bir seçenektir. Su yüksek basınçlarda yüksek kaynama sıcaklıklarına sahip olduğu için yüksek sıcaklıktaki ısı kaynaklarına ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple endüstriyel proseslerden gelen atık ısı, güneş enerjisi ile ısıtılan sıcak akışkanlar, jeotermal sıcak su gibi düşük sıcaklıktaki enerji kaynaklarının önemli bir miktarı değerlendirilememektedir. Organik Rankine çevrimi, organik maddelerin göreceli olarak daha düşük kaynama noktalarına sahip olmaları sebebiyle atık ısı ve yenilenebilir enerji kaynakları gibi düşük ve orta dereceli ısı kaynaklarından güç elde edebilme potansiyeline sahiptir. Yaygın olarak kullanılan soğutkanlar aracı akışkan seçimi için önemli alternatifler olsa da F-gaz yönetmeliği maddelerin küresel ısınma potansiyeli değerlerine katı sınırlamalar koymuştur. Yüksek küresel ısınma potansiyeli değerlerine sahip aracı akışkanların üstündeki kısıtlamalar sebebiyle yeni seçenekler

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250306>

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, ugurcan.atmaca@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5581-6184

çevrim performansından kayıp olmaksızın devreye alınmaya çalışılmaktadır. Hidrofloroolefin grubu akışkanlar çevre dostu olarak sınıflandırıldıklarından dolayı umut verici seçenekler arasındadır. Bu çalışmada R1234yf, R1234ze(E) ve R1234ze(Z) gibi hidrofloroolefinlerle çalışan organik Rankine çevrimi ile ilgili performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Yaygın olarak kullanılan aracı akışkanlardan R134a yüksek küresel ısınma potansiyeli değerine sahip olmasına rağmen kıyaslamalı bir değerlendirme yapabilmek için analizlere eklenmiştir. Net güç çıktısı ve termal verim her bir aracı akışkan için türbin giriş basıncına göre analiz edilmiştir. Organik Rankine çevriminin performansı için aracı akışkan seçimi kritik bir öneme sahip olduğundan dolayı literatürde aracı akışkanlarla ilgili birçok araştırma bulunmaktadır. Bununla birlikte bu araştırma sadece hidrofloroolefin grubu aracı akışkanlara odaklanmaktadır ve bu grubun adaylarını 360 K gibi düşük sıcaklıktaki bir ısı kaynağı kullanımındaki performanslarına göre karşılaştırmaktadır. Enerjinin ve kütleinin korunumuna dayalı termodinamik model denklemleri MATLAB® ortamında çözülmüştür ve aracı akışkanların termodinamik özellikleri REFPROP versiyon 10.0'dan elde edilmiştir. Her aracı akışkan için maksimum net güç çıktısını sağlayan spesifik bir türbin giriş basıncı vardır. Her biri kendi çalışma aralığında değerlendirilmek üzere en yüksek net güç çıktısı R1234yf için 25,17 kW olarak 13,5 bar türbin giriş basıncında hesaplanmıştır. Aracı akışkanların maksimum net güç çıktısını veren türbin giriş basınçlarındaki termal verimleri karşılaştırıldığında, en yüksek değer R134a için 14 bar türbin giriş basıncında %5,38 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Organik Rankine Çevrimi, Küresel Isınma Potansiyeli, Hidrofloroolefinler, Termal Verimlilik, Termodinamik Modelleme.

Performance Evaluation of the Hydrofluoroolefins for the Organic Rankine Cycle Applications Utilizing Low-Temperature Heat Source

Abstract

The organic Rankine cycle has the same working principle as the Rankine cycle. The difference is the utilization of organic substances as the working fluid instead of water. The organic Rankine cycle is a popular alternative since water has some limitations as a working fluid. As water has

high boiling temperatures at high pressures, it requires high-temperature heat sources. Thus, an important amount of low-temperature energy sources, i.e. exhaust heat from industrial processes, hot fluids heated by solar energy, and geothermal hot water, etc., is wasted. The organic Rankine cycle has the potential for power generation from low- and medium-grade heat sources, i.e. waste heat and renewable energy sources, due to the relatively low boiling point of the organic substances. Although commonly used refrigerants are good alternatives for working fluid selection, F-gas regulation puts strict limitations on the global warming potential of the substances. As a result of the restrictions on the working fluids having high global working potential values, new alternatives are tried to be adapted without compensation for the cycle performance. Hydrofluoroolefin group working fluids are among the promising options since they are categorized as environmentally friendly. This study displays a performance assessment on the organic Rankine cycle employing hydrofluoroolefins such as R1234yf, R1234ze(E), and R1234ze(Z). The commonly used working fluid, R134a is added to the performance assessments to create a comparative base although it has a high global working potential value. Net power output and thermal efficiency are analyzed based on the turbine inlet pressure for each working fluid. There are various working fluid investigations in the literature as the selection of the working fluids is of critical importance to the organic Rankine cycle performance. However, this investigation focuses on the Hydrofluoroolefin group working fluid alternatives only and compares candidates of this group according to their performance for the utilization of a low-temperature heat source of 360 K. Thermodynamic modeling equations based on the conservation of energy and mass are solved in MATLAB® and the thermodynamic properties of the working fluids are obtained from REFPROP version 10.0. There is a specific turbine inlet pressure yielding the maximum net power output for each working fluid. While evaluating within their own operating range, the highest net power output is calculated for R1234yf as 25.17 kW at the turbine inlet pressure of 13.5 bar. When comparing the thermal efficiencies of the working fluids at turbine inlet pressures giving the maximum net power outputs, the highest value is calculated as 5.38% at the turbine inlet pressure of 14 bar for R134a.

Keywords: Organic Rankine Cycle, Global Warming Potential, Hydrofluoroolefins, Thermal Efficiency, Thermodynamic Modeling.

1. Introduction

The operation of the organic Rankine cycle (ORC) is similar to that of the steam Rankine cycle since it is composed of the same components as a steam generator, turbine, condenser, and pump [1]. ORC uses organic compounds such as hydrocarbons, refrigerants, ethers, siloxanes, ammonia, and silicon oil instead of water due to their relatively low boiling points. Therefore, power could be produced from low-temperature heat sources, i.e. waste heat from the industry, geothermal hot water, and hot fluids obtained from the concentrating-solar collectors [1, 2]. The wasted amount of the world's energy consumption in heat form is approximately 50% because of the inadequacies in the energy conversion systems. ORC is a promising and reliable technology enabling the conversion of low- to medium-temperature heat sources into power [2].

The schematic view of ORC and its corresponding T-s diagram is shown in Figure 1 (a) and (b), respectively. The heat from the energy source is transferred to the working fluid in the steam generator. The working fluid is heated until it becomes a superheated vapor as is obvious from the T-s diagram. The working fluid having a high pressure and temperature drives the turbine in order to generate electricity. After the turbine, it flows through the condenser for the heat rejection and it is in the state of compressed liquid at the outlet. Lastly, the pressure of the working fluid is increased in the pump, thereby completing the cycle. The model established in this study includes the superheat temperature difference and subcooling temperature difference at the outlet of the steam generator and condenser, respectively. Hence, the T-s diagram in Figure 1 (b) shows the execution of the cycle with superheating and subcooling.

In this study, performance evaluation of an ORC is made for the commonly used hydrofluoroolefins (HFOs) with a low-temperature heat source of 360 K. Net power outputs, thermal efficiencies, and mass flow rates of R1234yf, R1234ze(E), and R1234ze(Z) are compared according to the turbine inlet pressure. By the way, R134a is added to the list since it is one of the most popular working fluids in most of the systems and its use is restricted by the F-gas Regulation [3] due to its high global warming potential (GWP). There are various working fluid investigations in the literature since selecting the best working fluid is still a good challenge for the systems from the viewpoint of both efficiency and environmental concerns.

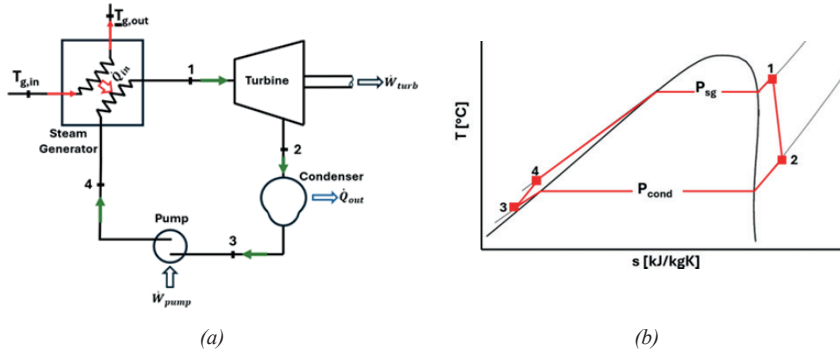


Figure 1. (a) Schematic view of the ORC and (b) its T - s diagram [2].

There are various comments regarding the efficiency of working fluids in the literature. The highest thermal efficiencies are theoretically obtained for R123, R1233zd(E), R134a, R600, R290, R1234yf, and R245fa at temperatures lower than 120°C [4]. A review study on the low GWP working fluids for ORC applications proposes three categories as follows; (i) hydrocarbons, (ii) hydrofluoro chemicals, and (iii) the mixture of working fluids. Flammability is the main concern regarding the hydrocarbons. R1366mzz(Z), R1233zd(E), and R1234ze(Z) are the promising candidates among the HFOs [5]. R123, R236fa, R245fa, R600, and n-pentane were investigated in main for the performance of an ORC having 50 kW capacity. Jacob number was combined with the ratio of the condensation and evaporation temperatures to present figure of merit which was a useful parameter for the selection of working fluids in terms of thermal efficiency [6]. From theoretical performance evaluation for 20 working fluids, R134a was found to be the most appropriate. R152a, R600a, R600, and R290 were also proposed as promising alternatives needing safety considerations due to their flammability characteristics [7].

Previous investigations are focusing on R1234yf mainly as obvious from the review study of Pabon et al. [8]. Yamada et al. (2012) compared the performance of R1234yf with R134a, R245fa, iso-pentane, and ethanol in five types of ORCs as trilateral, saturated, superheated, sub-critical, and supercritical. Useful performance maps were provided to declare the best efficiency ranges according to the above-mentioned cycle configurations at various turbine inlet and condensation temperatures. The highest thermal efficiency range was between 8.8% and 11.4%, and it is calculated for the

supercritical ORC concept [9]. Invernizzi et al. (2016) analyzed the use of R1234yf and R1234ze(E) as the replacement for R134a. The results obtained from their off-design simulations showed that there is a decrease in the net power output for both HFOs [10]. Li et al. (2017) made thermodynamic assessments on the subcritical and transcritical ORCs utilizing R1234ze(E) for the heat source temperature between 100 °C and 200 °C. According to their conclusions, maximized net power output of the cycle is larger than R245fa and R600a [11]. However, the thermal stability of the HFOs in the supercritical ORC is crucial to safe operations. Irriyanto et al. (2019) analyzed the thermal stability of R1234ze(E) and concluded that both pressure and temperature affect the decomposition rate of R1234ze(E). They stated that R1234ze(E) could be used in long-term operations without deformation when the temperature is kept below 453.15 K at 5 MPa [12]. Xin et al. (2021) designed an experimental system to investigate the pyrolysis process of R1234yf. They declared the pyrolysis temperature of R1234yf between 170 °C and 190 °C [13]. The other HFOs such as R1336mzz(Z) and R1233zd(E) were also studied commonly as seen from the previous investigations [14-16].

As the previous studies show, there are plenty of performance assessments on the ORCs using HFOs. Although there are some contradictions among the outcomes of the studies, all of them have unique conclusions regarding their modeling approaches. In this study, a thermodynamic model of the ORC is established to make a performance evaluation and the modeling equations are solved in MATLAB®. Thermodynamic properties of the working fluids are obtained from REFPROP version 10.0 [17]. The biggest motivation for this study is the challenge to propose the best working fluids for the ORC system because of the strict environmental legislation and to achieve the highest efficiency targets with those environmentally-friendly working fluids. The thermodynamic model and its outcomes include the following aspects as; (i) The mass flow rates of the working fluids are determined with respect to the pinch point temperature difference in the steam generator at the point where evaporation starts. Therefore, direct capacities could be calculated for each component. (ii) Turbine inlet and condenser outlet temperatures are expressed with superheating and subcooling temperature differences, respectively. (iii) Low-temperature heat source is modeled as an exhaust gas from a typical kiln. (iv) Thermal efficiency of each working fluid is analyzed according to the turbine inlet pressure yielding the maximum net power output. In conclusion, an elabo-

rate thermodynamic model including the most critical parameters to obtain performance evaluations that are the closest to actual ones is proposed. Hence, the comparative evaluation of the HFOs investigated in this study and R134a is a unique contribution to the literature with reference to the aforementioned respects.

2. Working Fluids

Table 1 presents the thermodynamic properties, environmental characteristics, and safety classes of the working fluids investigated in this work. In addition to GWP values, ozone depletion potential (ODP) values are declared in the table to ensure that all selected working fluids are environmentally friendly. According to ANSI/ASHRAE Standard [18], R134a is in the A1 class meaning lower toxicity and no flame propagation; whereas the HFOs given in the table are in the A2L class designating lower flammability (maximum burning velocity ≤ 10 cm/s) and lower toxicity. ORC in subcritical operation mode is analyzed in this study. Hence the selection of the heat source temperature is to be made so that the maximum pressure and temperature of the working fluid within the cycle must be lower than its critical pressure and temperature to operate under the saturation dome of the working fluid.

Table 1. Thermodynamic and environmental properties of the working fluids with safety classes (a: [17], b:[19], c:[18])

Working Fluid	Formula	Molar Mass (kg/kmol) ^a	GWP ^b	ODP ^b	ASHRAE Safety Class ^c	Normal Boiling Point (°C) ^a	Critical Pressure (MPa) ^a	Critical Temperature (°C) ^a
R1234yf	CF ₃ CF=CH ₂	114.04	4	0	A2L	-29.45	3.38	94.7
R1234ze(E)	CHF=CHCF ₃ (trans)	114.04	7	0	A2L	-18.97	3.63	109.36
R1234ze(Z)	CHF=CHCF ₃ (cis)	114.04	6	0	A2L	9.73	3.53	150.12
R134a	CF ₃ CH ₂ F	102.03	1430	0	A1	-26.07	4.06	101.06

3. Thermodynamic Model

Conservation of energy and mass are applied through the inlet and outlet of each component with the isentropic efficiencies of the turbine and pump. The modeling equations are solved in MATLAB[®] and thermodyna-

mic properties included by these equations are retrieved from REFPROP version 10.0 [17]. The heat source is modeled as the exhaust gas from a kiln and it is composed of 51.2% CO₂ and 48.8% N₂ with a mass flow rate of 15 kg/s [20]. The heat source temperature is selected as 360 K lower than the lowest critical temperature given in Table 1. The main outcomes of this study, namely net power output, thermal efficiency, and mass flow rate are presented concerning the turbine inlet pressure. It is checked for each turbine inlet pressure of each working fluid that the turbine inlet temperature is lower than the inlet temperature of the exhaust gas. The other principal input parameters of the ORC model other than the heat source are turbine inlet pressure, pinch point temperature difference in the steam generator, superheat temperature difference for the turbine inlet, ambient air temperature, temperature difference between the condensing fluid and the ambient air, subcooling temperature difference for the condenser outlet, and turbine and pump isentropic efficiencies. Condenser pressure is the saturation pressure corresponding to the condensing temperature and this temperature is defined according to the temperature difference between the condensing fluid and the ambient air. The condenser outlet temperature is formulated concerning the subcooling temperature difference. Lastly, the pinch point temperature difference in the steam generator is defined according to point where the evaporation starts [21].

3.1. Modelling Equations

There are some basic modeling assumptions as follows [21]; (i) The system operates under steady-state operating conditions, (ii) Pressure drops are neglected in the steam generator, condenser, and connecting pipes, (iii) The irreversibilities within the turbine and pump are taken into consideration employing isentropic efficiencies.

The first equation is used to calculate the mass flow rate of the working fluid. It is derived from the energy balance between the exhaust gas and the working fluid within the steam generator. $h_{g,out,e}$ is the enthalpy of the exhaust gas at the temperature of the gas at which the evaporation of the working fluid starts and it is defined according to the saturation temperature of the working fluid at the turbine inlet pressure and the pinch point temperature difference. $h_{sg,in,e}$ is the enthalpy of the working fluid at the location where evaporation of the working fluid starts.

$$m_{wf} = \frac{\dot{m}_g (h_{g,in} - h_{g,out,e})}{(h_{sg,out} - h_{sg,in,e})} \quad (1)$$

The energy transfer rate to the working fluid is expressed as

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{wf}(h_{sg,out} - h_{sg,in}) \quad (2)$$

Turbine power output is as follows;

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{wf}(h_{turb,in} - h_{turb,out}) \quad (3)$$

The rate of energy rejected through the condenser is calculated as

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{wf}(h_{cond,in} - h_{cond,out}) \quad (4)$$

Pump power input is formulated as

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_{wf}(h_{pump,out} - h_{pump,in}) \quad (5)$$

Net power output of the cycle is the difference between the turbine power output and the pump power input and expressed as

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pump} \quad (6)$$

Lastly, the thermal efficiency is the ratio of the net power output of the cycle to the heat transfer rate to the working fluid as

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \quad (7)$$

3.2. Validation of the Model

The study of Tchance et al. (2009) [7] is used to make validation. Theoretical data obtained from thermodynamic analysis of R290, R32, R152a, R717, and R134a for performance evaluations are used to validate the base model and the percentage errors between this work and the reference study are displayed in Table 2. It is understood from the percentage error values that the established model could be used for the performance analysis.

Table 2. Percentage error between the results of this study and the work of Tchance et al. (2009) [7] for the base thermodynamic model.

Working Fluid	\dot{V}_2 (%)	VFR (%)	\dot{m} (%)	η_{hs} (%)	η_{ht} (%)	ϕ (%)	\dot{Q}_{abs} (%)	Δh_{fg} (%)	x_2 (%)
R290	0.051	0.257	0.241	0.040	0.034	0.150	0.025	0.081	0.156
R32	0.004	0.021	0.203	0.051	0.007	0.026	0.003	0.059	0.041
R152a	0.020	0.266	0.305	0.195	0.200	0.312	0.107	0.479	0.039
R717	0.043	0.152	1.398	0.039	0.042	0.019	0.043	0.018	0.016
R134a	0.069	0.052	0.078	0.017	0.014	0.019	0.009	0.088	0.112

4. Results and Discussion

Variations in the net power output, thermal efficiency, and mass flow rate for the turbine inlet pressure are the main results of this study. However, each working fluid has its own characteristics so its own pressure range. Moreover, the other operating conditions affect this pressure range. The pressure range of R134a and R1234yf is typically the same, averagely between 7-23 bar. R1234ze(E) and R1234ze(Z) can operate between 5-18 bar and 2-7.5 bar, respectively. The other simulation parameters according to which all these turbine inlet pressure ranges are defined are given in Table 3.

Table 3. Operating conditions of the ORC.

Operating Conditions	Value
Pinch point temperature difference in the steam generator, $\Delta T_{pp,sg}$ (K)	10
Superheat temperature difference, ΔT_{sh} (K)	5
Ambient air temperature, T_0 (°C)	20
Temperature difference between condensing WF and the ambient air, ΔT_{cond} (K)	5
Subcooling temperature difference, ΔT_{sc} (K)	5
Turbine isentropic efficiency, η_{turb}	0.75
Pump isentropic efficiency, η_{pump}	0.8

Figure 2 shows the variation of net power output of the working fluids for the aforementioned pressure ranges. The pressure points corresponding to the maximum net power outputs are different for each working fluid. As it is obvious from the figure, the narrowest and lowest pressure range

belongs to R1234ze(Z) at the described operating conditions. Its maximum net power output is 24.45 kW at 4 bar. Secondly, a larger operation range is displayed for R1234ze(E) with its maximum net power output of 24.89 kW at 10.5 bar. The largest pressure range is declared for R134a and R1234yf. The maximum net power outputs within their operational ranges are calculated 25.17 kW at 13.5 bar and 24.88 kW at 14 bar for R1234yf and R134a, respectively. It is seen that R1234yf and R134a typically display very similar behavior. Within their operational ranges among all working fluids, R1234yf has the maximum net power output and R1234ze(Z) produces the minimum net power output.

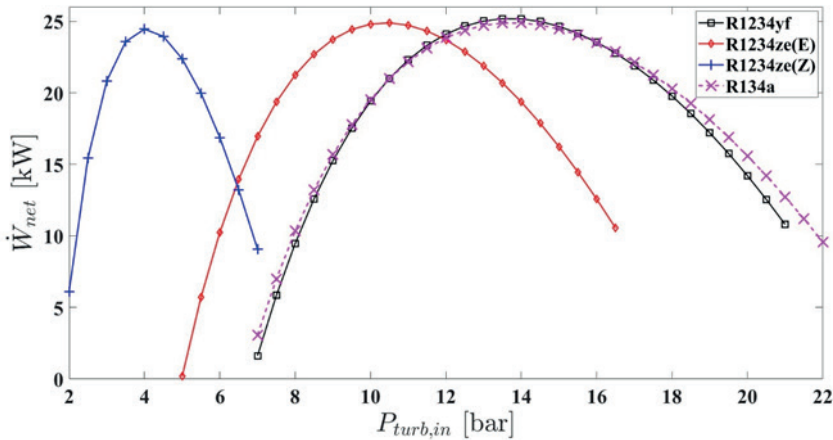


Figure 2. Variations of the net power output according to the turbine inlet pressure.

When the turbine inlet pressure increases, firstly net power output increases until it reaches a maximum point and then starts decreasing. The reason for this decrease after obtaining a maximum net power output is the effect of the decrease in the mass flow rates of the working fluids. As Figure 3 shows, the mass flow rates of the working fluids decrease with the turbine inlet pressure. When turbine inlet pressure is increased, the enthalpy difference between the inlet and outlet of the turbine increases. However, after reaching a turbine inlet pressure yielding the maximum net power output, the decrease in the mass flow rate cancels out the positive effect of the enthalpy increase between the inlet and outlet of the turbine. The increase in the turbine inlet pressure decreases the heat transfer rate between the exhaust gas and the working fluid in the steam generator, thereby decreasing the mass flow rate of the working fluid. By the way, R134a

and R1234yf display a similar profile for the variation of mass flow rates, especially at higher turbine inlet pressures.

Figure 4 compares the thermal efficiency of the working fluids with reference to the turbine inlet pressure. The efficiency of the working fluids increases with the increased pressure, but as it is seen from Figure 2, it is meaningful to evaluate the efficiencies at the pressure points yielding the maximum net power output. At their own turbine inlet pressures yielding the maximum net power output, the highest thermal efficiency is calculated 5.38% for R134a; whereas the lowest efficiency belongs to R1234yf as 5.06%. As for R1234ze(E) and R1234ze(Z), the thermal efficiency values are closer to R134a at their maximum net power output points. As a result, it is important to obtain such kind of performance displays since the evaluation of thermal efficiency without considering the net power output will leave a gap.

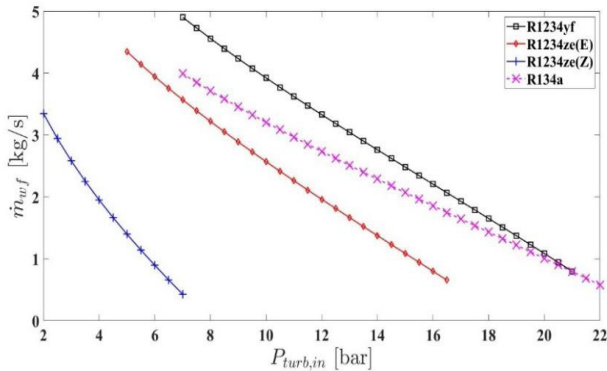


Figure 3. Change of mass flow with the increase in the turbine inlet pressure.

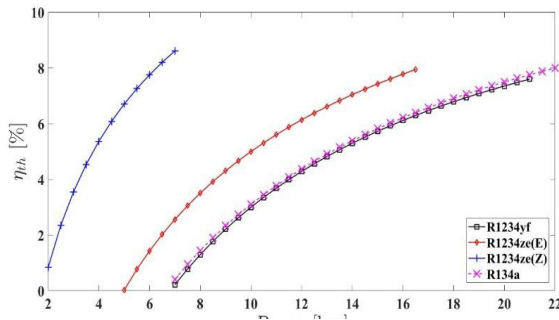


Figure 4. Comparison of the thermal efficiency for the working fluids with reference to the turbine inlet pressure.

5. Conclusions

A thermodynamic model is established in this study to analyze the ORC for the working fluids including R1234yf, R1234ze(E), R1234ze(Z), and R134a. A typical performance evaluation is displayed in this study. With the calculation of the mass flow rates of the working fluids, performance evaluations are made through the net power output capacity of the turbine in addition to thermal efficiency variations. There is a specific operation range in terms of turbine inlet pressure for each working fluid and each working fluid has a turbine inlet pressure yielding the maximum net power output within this range. When comparing all maximum amounts of net power outputs at their specific pressure points for each working fluid, R1234yf has the maximum value as 25.17 kW at 13.5 bar. Hence, evaluating the thermal efficiency at the pressure point yielding the maximum net power output is meaningful. Within this viewpoint, R134a has the highest thermal efficiency as 5.38% at 14 bar when compared to the thermal efficiencies of the other working fluids corresponding to their own maximum net power outputs. R1234yf typically displays the most similar variations in the thermal efficiency and net power output to R134a according to the operational ranges. There are various evaluations regarding different types of HFOs in the literature. However, these outcomes are unique since this study compares the HFOs under consideration and R134a with performance analyses including their operating ranges yielding maximum net power outputs. Working fluid selection is still a challenging target for the ORCs due to the strict environmental legislation on the GWP values. Hence, such elaborate performance evaluations covering various operational conditions would yield more realistic results, especially when comparing the working fluids.

6. Future Study

Finding the best working fluid alternatives is still crucial for the ORCs due to the strict environmental legislation regarding the GWP values. In addition to environmental characteristics, thermodynamic properties, efficiency, cost, and safety must be considered when selecting a working fluid. This study includes some preliminary performance evaluations including one of the most environmentally friendly working fluid groups based on the turbine inlet pressure for a specific operation condition set. However, there are other working fluid alternatives compatible with the current le-

gislasyon, i.e. low-GWP hidrofluorocarbons (HFCs), doğal soğutucular, hidrokarbonlar, vb. Performans karşılaştırmaları farklı çalışma fluid alternatifleri için farklı çalışma koşullarında yapılarak yapılabilir. Kritik basınç veya sıcaklık aralıkları gibi türbin giriş basıncı gibi detaylı değerlendirmeler için. Böylece detaylı karşılaştırmalar için düşük-GWP çalışma fluidleri ve geniş çalışma koşulları aralıkları için önemli olacaktır. Ayrıca, termodinamik modeller geliştirilerek gerçekçi sonuçlar elde edilebilir.

Appendix A. Nomenclature

Symbols		Subscripts	
1,2,3,4	States in the ORC	0	Ambient air
h	Enthalpy (kJ/kg)	II	Second-law
P	Pressure (bar)	cond	Condenser
	Heat transfer rate (kW)	e	Point at which the evaporation of the working fluid starts in the steam generator
s	Entropy (kJ/kgK)	fg	Phase change from saturated liquid to saturated vapor
T	Temperature (°C)	g	Exhaust gas
	Volume flow rate (m ³ /h)	in	Inlet
VFR	Volume flow ratio () (-)	net	Net amount
	Power (kW)	out	Outlet
x	Quality (-)	pp	Pinch point
		pump	Pump
		sc	Subcooling
		sg	Steam generator
		sh	Superheat
		th	Thermal
		turb	Turbine
		uhx	Upper heat exchanger
		wf	Working fluid

Greek Letters

Δ	Change
η	Efficiency (%)
ϕ	Enthalpy ratio (%)

Abbreviations

HFC	Hydrofluorocarbon
HFO	Hydrofluoroolefin
GWP	Global warming potential
ODP	Ozone depletion potential
ORC	Organic Rankine cycle

References

- [1] Rahbar, K., Mahmoud, S., Al-Dadah R.K., Moazami, N., Mirhadizadeh, S.A., 2017. Review of organic Rankine cycle for small-scale applications. *Energy Conversion and Management*, 135-155.
- [2] Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boetter, D.D., Bailey, M.B. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 7th Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [3] Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006. *Off. Official Journal of the European Union*, 2014.
- [4] Jiménez-García, J.C., Ruiz, A., Pacheco-Reyes, A., Rivera, W., 2023. A Comprehensive Review of Organic Rankine Cycles. *Processes*, 11, 1982.
- [5] Bahrami, M., Pourfayaz, F., Kasaeian, A., 2022. Low global warming potential (GWP) working fluids (WFs) for Organic Rankine Cycle (ORC) applications. *Energy Reports*, 8, 2976–2988.
- [6] Kuo, C.R., Hsu, S.W., Chang, K.H., Wang, C.C., 2011. Analysis of a 50 kW organic Rankine cycle system. *Energy*, 36, 5877-5885.
- [7] Tchanche, B.F., Papadakis, G., Lambrinos, G., Frangoudakis, A., 2009. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 29, 2468–2476.
- [8] Pabon, J.J.G., Khosravi, A., Belman-Flores, J.M., Machado, L., Revellin, R., 2020. Applications of refrigerant R1234yf in heating, air conditioning and refrigeration systems: A decade of researches. *International Journal of Refrigeration*, 118, 104–113.
- [9] Yamada, N., Mohamad, M.N.A., Kien, T.T., 2012. Study on thermal efficiency of low- to medium-temperature organic Rankine cycles using HFO-1234yf. *Renewable Energy*, 41, 368-375.
- [10] Invernizzi, C.M., Iora, P., Preißinger, M., Manzolini, G., 2016. HFOs as substitute for R-134a as working fluids in ORC power plants: A thermodynamic assessment and thermal stability analysis. *Applied Thermal Engineering*, 103, 790–797.
- [11] Li, J., Liu, Q., Ge, Z., Duan, Y., Yang, Z., 2017. Thermodynamic performance analyses and optimization of subcritical and transcritical organic Rankine cycles using R1234ze(E) for 100–200 °C heat sources. *Energy Conversion and Management*, 149, 140–154.
- [12] Iriyanto, M.Z., Lim, H.S., Choi, B.S., Myint, A.A., 2019. Thermal stability and decomposition behavior of HFO-1234ze(E) as a working fluid in the supercritical organic

Rankine cycle. *The Journal of Supercritical Fluids*, 154, 104602.

[13] Xin, L., Liu, C., Tan, L., Xu, X., Li, Q., Huo, E., Sun, K., 2021. Thermal stability and pyrolysis products of HFO-1234yf as an environment-friendly working fluid for Organic Rankine Cycle. *Energy*, 228, 120564.

[14] Kontomaris, K., 2014. HFO-1336mzz-Z: High Temperature Chemical Stability and Use as A Working Fluid in Organic Rankine Cycles. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. Paper 1525.

[15] Kontomaris, K., Simoni, L.K., Nilsson, M., Hamacher, T., Rislå, H.N., 2016. Combined Heat and Power From Low Temperature Heat: HFO-1336mzz(Z) as a Working Fluid for Organic Rankine Cycles. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. Paper 1815.

[16] Moles, F., Navarro-Esbrí, J., Peris, B., Mota-Babiloni, A., Barragan-Cervera, A., Kontomaris, K., 2014. Low GWP alternatives to HFC-245fa in Organic Rankine Cycles for low temperature heat recovery: HCFO-1233zd-E and HFO-1336mzz-Z. *Applied Thermal Engineering*, 71, 204-212.

[17] Lemmon, E.W., Bell, I.H., Huber, M.L., & McLinden, M.O., NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018.

[18] ANSI/ASHRAE Standard 34-2010 ASHRAE, Designation and Safety Classification of Refrigerants. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, 2010.

[19] The Linde Group. Retrieved on January 7, 2025, from <https://www.linde-gas.com/what-we-offer/gases/refrigerants>.

[20] Wang, J., Yan, Z., Wang, M., Ma, S., Dai, Y., 2013. Thermodynamic analysis and optimization of an (organic Rankine cycle) ORC using low grade heat source, *Energy*, 49, 356-365.

[21] Wang, D., Ling, X., Peng, H., Liu, L., Tao, L., 2013. Efficiency and optimal performance evaluation of organic Rankine cycle for low grade waste heat power generation. *Energy*, 50, 343-352.

Enerji Etkin Otomasyon Sistemleri ile Sürdürülebilir Mimari Tasarımlar

Zeynep Yaren Açıkğüz¹, Gözde Konuk Ege², Ali Köse³,
Mücahit Ege⁴, Utku Canci Matur⁵

Özet

Enerji tüketimi her geçen gün artmakta ve dünya genelinde enerji tüketiminin yaklaşık %40'ının binalardan kaynaklandığı bilinmektedir. Binalarda konfor koşullarının sağlanması için gerekli olan ısıtma, soğutma, havalandırma, aydınlatma ve elektrikli cihazların kullanımından kaynaklanan enerji tüketim değerleri oldukça yüksektir. Akıllı otomasyon sistemlerinin kullanımı, mimari çözümler sunan bina yalıtımı, enerji tüketiminin izlenmesi ve analiz edilmesi gibi enerji verimli yaklaşımlarla binalarda enerji tüketimini azaltmak mümkündür. Hareket, sıcaklık, ışık, basınç ve karbon-

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250307>

- 1 İstanbul Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, yarenacikguz@gmail.com, ORCID: 0009-0007-8337-13152
- 2 İstanbul Gedik Üniversitesi, Gedik MYO, Mekatronik Programı, İstanbul, Türkiye, gozde.konuk@gedik.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7349-0416
- 3 İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Bölümü, İstanbul, Türkiye, akose22@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0426-5159
- 4 İstanbul Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, mucahit.ege@gedik.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7822-3528
- 5 İstanbul Gedik Üniversitesi, Gedik MYO, Mekatronik Programı, İstanbul, Türkiye, utku.canci@gedik.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6342-5645

dioksit (CO₂) sensörleri kullanılarak enerji tüketimi optimize edilebilir. Bu sensörlere ek olarak, zamanlayıcılar ve programlanabilir termostatlar gibi unsurları kullanarak HVAC (Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme) ve aydınlatma sistemlerinin çalışmasını kontrol eden entegre sensör sistemlerinin kullanımı bu çalışmanın önemli bir araştırma alanı olacaktır. Çalışmanın bir diğer araştırma alanı ise binalarda enerji kaynaklarından yüksek oranda yararlanabilen mimari tasarımlar, enerji kaybını azaltan yalıtım uygulamaları ve ısı kaybını önleyen çok katmanlı camların kullanımı gibi sürdürülebilir mimari tasarımların araştırılmasıdır. Araştırma sonucunda enerji verimli otomasyon sistemlerine sahip olacak bir bina için enerji performansını artırıcı yaklaşımlar önererek karbon ayak izini azaltan ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayan yol gösterici bir çalışma ortaya konulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir Tasarım, Otomasyon Sistemleri, Mimari Tasarım, Enerji Etkin Tasarım, Sensörler.

Sustainable Architectural Designs with Energy-Efficient Automation Systems

Abstract

Energy consumption is increasing day by day and it is known that approximately 40% of energy consumption worldwide is caused by buildings. Energy consumption values arising from the use of heating, cooling, ventilation, lighting and electrical devices required to provide comfort conditions in buildings are quite high. It is possible to reduce energy consumption in buildings with energy efficient approaches such as the use of smart automation systems, building insulation offering architectural solutions, monitoring and analysing energy consumption. Energy consumption can be optimised by using motion, temperature, light, pressure and carbon dioxide (CO₂) sensors. In addition to these sensors, the use of integrated sensor systems that control the operation of HVAC (Heating, Cooling and Air Conditioning) and lighting systems using elements such as timers and programmable thermostats will be an important research area of this study. Another research area of the study is to investigate sustainable architectural designs such as architectural designs that can make high use of energy resources in buildings, insulation applications that reduce energy loss and the use of multi-layer glasses that prevent heat loss. As a result of

the research, a guiding study will be put forward that proposes approaches that reduce the carbon footprint and contribute to sustainability goals by offering approaches to increase energy performance for a building that will have energy efficient automation systems.

Keywords: Sustainable Design, Automation Systems, Architectural Design, Energy Efficient Design, Sensors.

1. Giriş

Dünya nüfusunun artışı ve teknolojik gelişmelerle birlikte enerji talebindeki hızlı artış, büyük ölçüde fosil yakıtların kullanımına dayanmaktadır. Ancak, fosil yakıtların sınırlı rezervleri ve çevreye verdikleri olumsuz etkiler, sürdürülebilir enerji çözümlerine yönelme zorunluluğunu ortaya koymaktadır [1]. Bu bağlamda, enerji etkin otomasyon sistemleri, yalnızca yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji tüketiminin etkin bir şekilde yönetilmesini sağlayarak çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir [2]. Akıllı bina teknolojileri ve otomatikleştirilmiş sistemler, binaların enerji tüketimini optimize ederek hem çevre dostu çözümler sunmakta hem de kullanıcı konforunu artırmaktadır [3]. Şekil 1’de yeşil bina tasarım örneği Şekil 2’de ise enerji etkin bina tasarımının örneği verilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, enerji etkin otomasyon sistemlerinin sürdürülebilir mimari tasarımlar üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu sistemler, enerji kullanım verilerini analiz ederek daha bilinçli tüketim alışkanlıkları geliştirilmesine olanak tanır ve çevresel, ekonomik sürdürülebilirlik hedeflerine önemli katkılar sağlar. Ayrıca, sürdürülebilir mimari tasarımlarının önemli bir bileşeni olan enerji etkin otomasyon sistemlerinin gelecekte daha geniş bir ölçekte nasıl uygulanabileceği tartışılacaktır. Çalışma, bu teknolojilerin kullanıcı deneyimini iyileştirme ve sürdürülebilir mimarinin temellerini atma potansiyelini ele alarak, gelecekteki uygulama olanakları üzerine bir perspektif sunmayı amaçlamaktadır.



Şekil 1. Yeşil bina tasarım örneği [4]

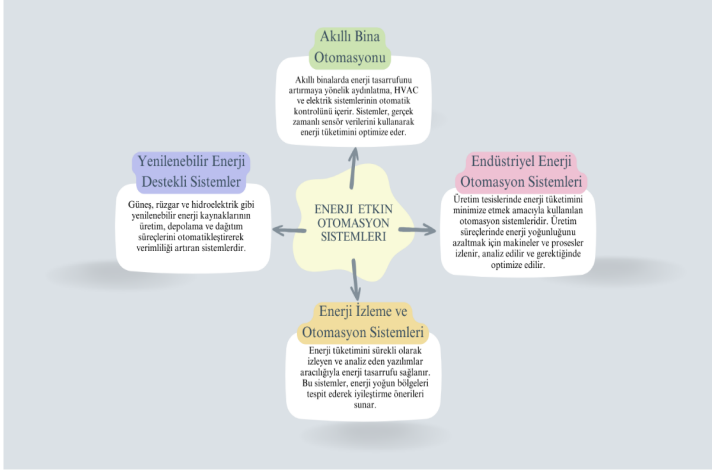


Şekil 2. Enerji etkin bina tasarım örneği [5]

2. Enerji Etkin Otomasyon Sistemleri

Enerji etkin otomasyon sistemleri, enerji kaynaklarının verimli kullanımını sağlamak amacıyla geliştirilen teknolojik çözümler ve süreçleri kapsamaktadır. Bu sistemler, enerji tüketimini optimize etmek, israfı önlemek ve çevresel etkileri azaltmak için akıllı sensörler, otomatik kontrol cihazları ve yazılımlar aracılığıyla enerji tüketimini izlemek, analiz etmek ve yönetmektedir. Yapı sektöründe, minimum enerji harcayacak sistemlerle entegre edilen akıllı binalar, kullanıcı konforunu artırırken enerji tüketimini azaltmayı hedeflemektedir [6].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve ileri teknolojik sistemlerin entegrasyonu sayesinde ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma gibi süreçleri kontrol altında tutulabilmekte, böylece enerji verimliliği sağlamaktadır. Yapının enerji performansında büyük rol oynayan kabuk sistemlerinin tasarımı, seçilen malzemeler, gün ışığının etkin kullanımı ve rüzgâr enerjisinden faydalanma gibi yaklaşımlarla desteklenerek binanın enerji verimliliği önemli ölçüde artırılabilir. Bu bağlamda, sürdürülebilirlik ve çevre duyarlılığı, yapı sektöründe vazgeçilmez bir unsur hâline gelmiştir. Şekil 3'te enerji etkin otomasyon sistemlerinin alt kollarını gösteren şema yer almaktadır.



Şekil 3. Enerji etkin otomasyon sistemlerinin alt kolları

2.1. Otomasyon Sistemlerinin Genel Tanımı

Sanayi, yönetim ve teknik alanlarda insan emeği yerine makinelerin kullanıldığı süreç, otomasyon olarak tanımlanmaktadır. Bu süreçte, üretimdeki hizmetlerin bir kısmı ya da tamamı makineler tarafından gerçekleştirilmektedir. İnsan emeğinin daha yoğun olarak yer aldığı sistemler ise yarı otomasyon kavramıyla ifade edilmektedir [7].

Otomasyon, verimliliği artırmak ve enerji tasarrufu sağlamak açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu avantajların, ev otomasyonu gibi günlük yaşamı kolaylaştıran uygulamalarda da geçerli olduğu bilinmektedir. Geniş bir kullanım alanına sahip olan sanayi, ev otomasyonu sistemlerini de kapsamaktadır. Ev otomasyonu, kontrol teknolojilerinin günlük yaşam ihtiyaçlarına entegre edilmesi şeklinde özetlenebilir.

2.2. Akıllı Ev Sistemleri ve Enerji Yönetimi

Akıllı evler, sakinlerine daha güvenli, konforlu ve ekonomik bir yaşam tarzı sunarken aynı zamanda günlük yaşamı kolaylaştıran modern yapılar olarak tanımlanabilmektedir. Bu tür evlerde, mevcut elektrik altyapısı kullanılarak tüm elektrikle çalışan cihazların uzaktan veya otomatik olarak kontrol edilmesi mümkündür. Akıllı ev sistemleri, sıcaklık, nem, ışık ve

diğer çevresel koşulları optimize ederek yaşam alanını kullanıcı ihtiyaçlarına göre düzenlemektedir [8].

Akıllı Ev projesi komplike bir sistem olup tek bir kontrol noktasından hareketle ev ile ilgili; her türlü aletin çalıştırılmasından, güvenliğe, bahçe sulamasına kadar her işlemi en üst düzeyde konfor ve ekonomi sağlayacak bir bütünlük içerisinde gerçekleştirilmektedir [8]. Kullanıcıların evdeki elektrikli cihazları tam anlamıyla kontrol edebilmesini sağlamak ve manuel müdahale gerektiren birçok işlemi otomatik bir şekilde yapabilmektedir. Bu sayede ise ev sakinleri hem zamandan ve enerjiden tasarruf ederken hem de daha verimli bir yaşam alanına sahip olmaktadır. Şekil 4'te yer alan akıllı binalar ve enerji verimliliği görselinden de anlaşılacağı üzere katı atık, su, enerji ve karbon emisyonundaki etkisi belirtilmiştir.

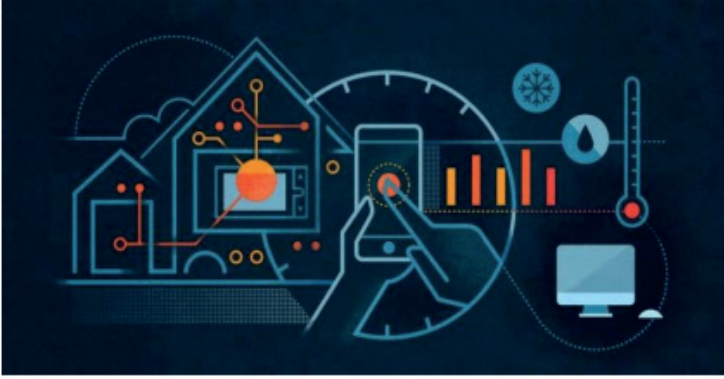


Şekil 4. Akıllı binalar ve enerji verimliliği [9]

2.3. IoT (Nesnelerin İnterneti) Tabanlı Çözümler

Nesnelerin İnterneti (IoT / Internet of Things), fiziksel cihazların, araçların, sensörlerin ve diğer akıllı nesnelerin internete bağlanarak birbiriyle iletişim kurduğu bir sistemdir. Bu sistem, verilerin toplanmasını, paylaşılmasını ve analiz edilmesini sağlayarak hayatı kolaylaştırmakta ve çeşitli alanlarda yenilikçi çözümler sunmaktadır. IoT tabanlı çözümler, genellikle

cihazların uzaktan kontrolü, otomasyon, veri analizi ve gerçek zamanlı izleme gibi uygulamaları içermektedir [10]. Şekil 5'te akıllı ev sistemi ile ilgili bir görsel yer almaktadır.



Şekil 5. Akıllı ev sistemi [11].

Nesnelerin İnterneti kavramı, 1999 yılında Radyo Frekanslı ile Tanımlama (RFID) teknolojisinin P&G firması için sağladığı yararlarla ilgili bir sunumda Kevin Ashton tarafından ilk kez kullanılmıştır [11]. Ancak tarihteki ilk Nesnelerin İnterneti uygulaması, 1991 yılında Cambridge Üniversitesindeki bir grup akademisyen tarafından kameralı bir sistem ile bir kahve makinesinin görüntülerinin internet üzerinden paylaşılmasıdır [12]. Bu sistem 22 Ağustos 2001 yılına dek kullanılmıştır.

3. Sürdürülebilir Mimari Tasarımlar

Günümüzde, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve enerji rezervlerindeki azalma, çevre kirliliğiyle birleşerek mimarlık disiplininde çözülmesi gereken öncelikli sorunlar arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, sürdürülebilirlik yaklaşımı mimarlık alanında daha fazla önem kazanmıştır. Çevresel hassasiyet doğrultusunda enerji tasarrufu, geri dönüşüm, atık yönetimi ve sürdürülebilir tasarım ilkeleri, mimarlık üretim süreçlerinin ayrılmaz bir parçası hâline gelmiştir [13]. Böylelikle hem günümüzdeki hem de gelecekteki nesillerin yaşam kalitesini korumayı hedefleyen bir yaklaşım benimsenmektedir. Sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması için Şekil 6'da gösterilen üçlü kâr hanesinde, ekonomik, ekolojik ve sosyal gelişmenin birlikte gerçekleşmesi gerekmektedir [14].



Şekil 6. Sürdürülebilirliğin üçlü karhanesi.

3.1. Sürdürülebilirlik Kavramı ve Mimaride Uygulanması

Sürdürülebilirlik kavramı, ilk kez 1987 yılında Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Komisyonu'nun "Ortak Geleceğimiz" başlıklı raporunda ele alınmıştır. Bu raporda, insanlığın günlük ihtiyaçlarını karşılarken, gelecekteki nesillerin gereksinimlerini karşılama kapasitesini riske atmadan kalkınmayı sürdürebileceği vurgulanmıştır. Hem devletlerin hem de bireylerin ortak sorumluluğu olan sürdürülebilirlik, günümüzün küresel çevresel sorunlarına bir çözüm arayışı olarak önem kazanmaktadır [13]. Bu bağlamda, "sürdürülebilir tasarım" kavramı, küresel çevresel krizler, hızla artan ekonomik faaliyetler, nüfus artışı ve doğal kaynakların yanı sıra ekosistemlerin zengin tür çeşitliliğinin yok oluşuna bir tepki olarak şekillenmiştir.

Sürdürülebilir mimarlık, çok boyutlu ve disiplinler arası bir yaklaşım gerektiren bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu alanda uygulanan stratejiler, birbiriyle ilişkili ya da iç içe geçmiş yöntemlerden oluşur ve her biri farklı uzmanlık alanlarına yönelik çözümler sunabilir. Örneğin, gün ışığının etkin kullanımı gibi spesifik yaklaşımlar, sürdürülebilir mimarlık ilkelerine uygun şekilde özelleşmiş uygulamalara örnek teşkil etmektedir [15]. Şekil 7'de temiz enerji posterini, Şekil 8'de ise İtalya'nın Milano şehrinde bulunan ve yeşil bina örneği olan Bosco Verticale bina görseli bulunmaktadır.

3.2. Yeşil Bina Standartları

Sürdürülebilir, ekolojik, yeşil ve çevre dostu gibi pek çok isimle anılan doğayla uyumlu yapılar, arazi seçiminden başlayarak yaşam döngüsü çer-

çevesinde değerlendirilen ve bütüncül bir anlayışla tasarlanan yapılardır. Bu yapılar, sosyal ve çevresel sorumluluk anlayışını benimseyerek, iklim verilerine ve bulunduğu yere özgü koşullara uygun şekilde tasarlanmaktadır. İhtiyaç kadar tüketen, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelen, doğal ve atık üretmeyen malzemelerin kullanıldığı, ekosistemlere duyarlılığı ön planda tutan ve katılımı teşvik eden bir yaklaşım sergilemektedir [18].

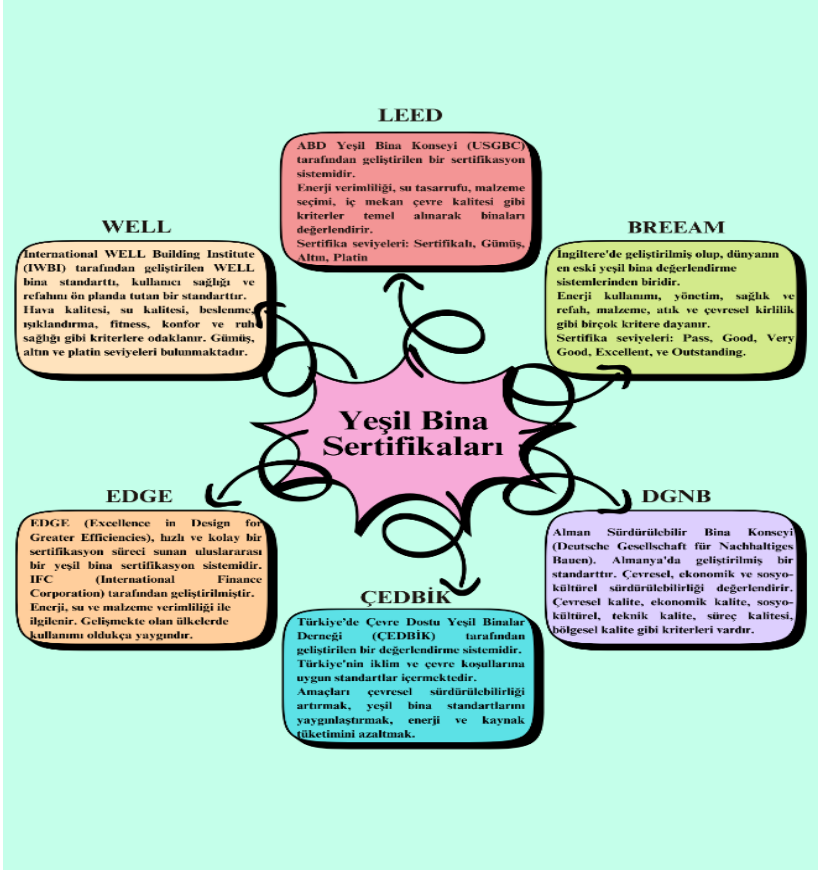


Şekil 7. Temiz enerji posteri [16].



Şekil 8. Bosco verticale (Milano, İtalya) [17].

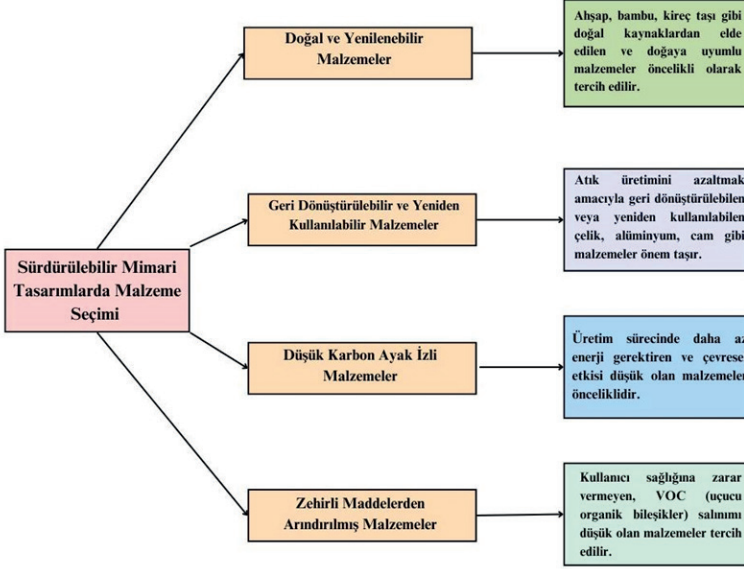
Yeşil bina, çevresel sürdürülebilirliği esas alarak tasarlanan, inşa edilen ve işletilen yapıları tanımlayan bir kavramdır. Bu binalar, enerji ve su gibi doğal kaynakların verimli kullanılmasını sağlamayı, atık üretimini ve çevresel etkileri en aza indirmeyi hedeflemektedir. Çevre dostu tasarım, inşaat ve işletme yöntemlerini benimseyen yeşil binalar, aynı zamanda kullanıcı sağlığına ve konforuna önem vererek karbon ayak izini azaltır ve çevreye duyarlı bir yaşam alanı sunmaktadır. Şekil 9'da yeşil bina standartları ve sertifika programları yer almaktadır.



Şekil 9. Yeşil bina standartları ve sertifika programları.

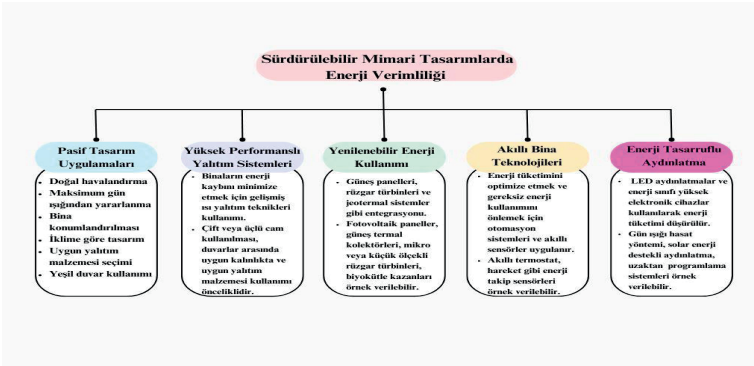
3.3. Malzeme Seçimi ve Enerji Verimliliği

Çevreye duyarlı yapılar, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmaları, çevreyle uyumlu olmaları, çevre kirliliğini azaltmaya katkı sağlamaları ve kullanılan malzemelerin sürdürülebilir özelliklere sahip olması gibi nitelikleriyle ülkelerin politikalarında giderek daha fazla yer bulmaktadır. Binaların çevresel etkilerinin azaltılması, ekonomik, çevresel ve sosyal sürdürülebilirliğin geliştirilmesiyle mümkün hâle gelmektedir. Doğal çevre üzerindeki olumsuz etkilerin büyük bir kısmı, yapılaşma sürecinde kullanılan yapı malzemelerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 10'da ise sürdürülebilir mimari tasarımlarda yapılan malzeme seçimleri açıklanmıştır.



Şekil 10. Sürdürülebilir mimari tasarımlarda malzeme seçimi.

Malzemelerin çıkarılmasından nihai işlem aşamasına kadar geçen süreçte meydana gelen atıklar; hava, su ve toprak kirliliğine yol açarak çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu nedenle yapı malzemelerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi ve bu etkilerin azaltılmasına yönelik mevcut çalışmaların yanı sıra gelecekte yapılacak araştırmalar büyük bir önem taşımaktadır [19]. Şekil 11’de ise sürdürülebilir mimari tasarımlardaki enerji verimliliği kriterleri açıklanmıştır.



Şekil 11. Sürdürülebilir mimari tasarımlarda enerji verimliliği kriterleri

3.4. Enerji Etkin Otomasyon Sistemlerinin Katkıları

Enerji etkin otomasyon sistemleri, enerji tüketiminin izlenmesi ve optimize edilmesi yoluyla israfı azaltırken enerji kaynaklarının daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar. Akıllı sensörlerin yardımıyla enerji kullanımını analiz eden bu sistemler, gereksiz tüketimi önleyerek özellikle aydınlatma ve HVAC (ısıtma, havalandırma, iklimlendirme) sistemlerini yalnızca ihtiyaç duyulan anlarda devreye sokar, böylece enerji tasarrufu sağlar [20]. Aynı zamanda, enerji tüketimini azaltarak fosil yakıt kullanımını sınırlar ve karbon salınımını düşürerek çevresel etkilerin hafifletilmesine katkıda bulunur. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyon sağlandığında bu olumlu etkiler daha da artar.

Bu sistemler, enerji yönetiminde etkinliği artırarak işletme maliyetlerini düşürür ve enerji faturalarını azaltarak uzun vadeli ekonomik avantajlar sunar [1]. Kullanıcı alışkanlıklarına uyum sağlayarak iç mekan koşullarını otomatik olarak optimize eden enerji etkin otomasyon sistemleri; sıcaklık, nem ve hava kalitesi gibi unsurlar üzerinde etkili bir kontrol sunarak konfor seviyesini artırır [21]. Ayrıca, güneş panelleri ve rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir enerji teknolojileri ile uyumlu çalışarak enerji yönetiminde sürdürülebilir bir yaklaşım sunar [2]. Çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bu sistemler, yalnızca enerji tasarrufu ve karbon emisyonlarını azaltmak ile kalmaz, aynı zamanda daha yaşanabilir ve çevreye duyarlı bir gelecek inşa edilmesine katkıda bulunur [1]. Şekil 12’de enerji verimliliğini artırma ile ilgili görsel yer almaktadır.



Şekil 12. Akıllı evler verimliliğini artırma yöntemi görseli [22].

4. Örnek Uygulamalar

Tablo 1, enerji etkin otomasyon sistemlerinin kullanıldığı çeşitli projeleri ve bu projelerde uygulanan sürdürülebilir tasarım stratejilerini özetlemektedir. Bu projeler, farklı coğrafi bölgelerde ve sektörlerde enerji verimliliğini artırmak, karbon ayak izini azaltmak ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla yenilikçi teknolojiler ve akıllı sistemler kullanılmaktadır. Tablo, her bir projenin sahip olduğu otomasyon sistemleri ile elde edilen enerji ve sürdürülebilirlik kazanımlarını kapsamlı bir şekilde sunmaktadır.

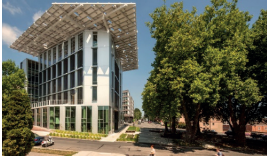

Tablo 1. Enerji Etkin Otomasyon Sistemlerinin Kullanıldığı Projeler Tablosu





Makale İsmi	Kullanılan Otomasyon Sistemleri	Enerji ve Sürdürülebilirlikte Kazanımlar
Akıllı Sürdürülebilir Binalarda Bina Enerji ve Konfor Yönetimi İçin Optimize Edilmiş Kontrol Sistemleri Üzerine Bir İnceleme [23]	Akıllı HVAC sistemleri, enerji izleme sensörleri	Enerji tüketiminde %20 tasarruf, kullanıcı konforunda artış, karbon salınımlarında azalma.
Binaların Enerji Tasarruflu Otomasyonu İçin Entegre Bir Sistem: Üçüncül Sektörde Uygulama [24]	Aydınlatma kontrol sistemleri, hareket sensörlü ışıklandırma	Aydınlatma kaynaklı enerji tüketiminde %30 azalma, çevresel etkilerde hafifleme.
Bina Enerji ve Konfor Yönetimi İçin Bina Sakinlerinin Davranışlarına Dayalı Çok Etmenli Sistem Geliştirilmesi [25]	Kullanıcı davranışlarına uyumlu akıllı kontrol sistemleri	İç mekan konforunda %25 iyileşme, enerji kullanımında optimize edilmiş %15 tasarruf.
Akıllı Binalarda Yenilenebilir Enerjinin Optimize Edilmiş Entegrasyonu: Scopus Verilerinden Sistematik Bir İnceleme [26]	Güneş panelleri entegrasyonu, enerji depolama sistemleri	Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranında %40 artış, karbon ayak izinde belirgin düşüş.
Enerji Verimliliği İçin Akıllı Binalarda Yapay Zekâ Evrimi [27]	Akıllı bina otomasyon sistemleri, akıllı ısıtma-soğutma sistemleri	Enerji tüketiminde toplam %25 azalma, sürdürülebilir kentsel tasarıma katkı.
Binaların Enerji Verimli Tasarımı: Bir İnceleme [28]	Enerji modelleme ve simülasyon araçları	Tasarım aşamasında %20 daha az enerji harcayan yapıların hayata geçirilmesi, tasarım süreçlerinde enerji verimliliğinin artırılması.

Akıllı Şebeke ve Binalar İçin Yenilenebilir Enerji ve Elektrik İhtiyacı Tahmin Modelleri Üzerine Bir İnceleme [29]	Yenilenebilir enerji entegrasyonu, elektrik talep tahmin modelleri, akıllı enerji yönetim sistemleri (EMS), şebeke iletişim ve entegre denetim sistemleri	Enerji verimliliği artışı, karbon ayak izinden azalma, çevresel sürdürülebilirliğe katkı, enerji talebinin optimizasyonu, işletme maliyetlerinde azalma, enerji israfının azaltılması, şebeke verimliliği ve enerji bağımsızlığı artırılması.
--	---	---

Sürdürülebilir Mimari Tasarımlarla Entegrasyon örnekleri Tablo 2’de verilmiştir. Farklı projelerde uygulanan sürdürülebilir tasarım stratejilerinin entegrasyonunu ve bu stratejilerle elde edilen çevresel, ekonomik ve sosyal kazanımları göstermektedir. Bu projeler, doğa dostu ve enerji verimli çözümlerle çevresel etkileri azaltmanın yanı sıra, sürdürülebilirliğin sosyal ve ekonomik boyutlarına da katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Sürdürülebilir Mimari Tasarımlarla Entegrasyon Örnekleri

Proje	Proje İsmi	Sürdürülebilir Tasarım Stratejileri	Kazanımlar
<p>Şekil 13. Bullitt Center [30].</p> 	<p>Bullitt Center (Seattle, ABD)</p>	<p>Güneş panelleri, yağmur suyu hasadı, doğal havalandırma, enerji verimli bina kabuğu</p>	<p>Net sıfır enerji tüketimi, %60 su tasarrufu sağlanması, karbon salınımında denge sağlanarak karbon nötr bina elde edilmesi [31].</p>
<p>Şekil 14. OneCentral Park [32].</p> 	<p>OneCentral Park (Sydney, Avustralya)</p>	<p>Yeşil cephe tasarımı, gri su geri dönüşümü, güneş enerjisi ile çalışan hareketli aynalar</p>	<p>Bina cephesindeki bitkisel yaşam alanı, su kullanımında %30 azalma, enerji verimliliğinde belirgin bir artış sağlanması [33].</p>

<p>Şekil 15. The Edge [33].</p> 	<p>The Edge (Amsterdam, Hollanda)</p>	<p>Akıllı bina otomasyonu, sensörlü aydınlatma ve HVAC sistemleri, güneş panelleri</p>	<p>%70 enerji tasarrufu, çalışan konforunda iyileşme, düşük karbon emisyonu ile çevre dostu bir çalışma alanı yaratılması [33].</p>
<p>Şekil 16. Masdar City [34].</p> 	<p>Masdar City (Abu Dhabi, BAE)</p>	<p>Güneş enerjisi sistemleri, doğal soğutma yöntemleri, sürdürülebilir ulaşım çözümleri ve yaya dostu şehir planlaması</p>	<p>Fosil yakıt kullanımının önemini ölçüde azalması, %40 enerji tasarrufu sağlanması, sürdürülebilir ulaşım çözümleri ile çevreye duyarlı bir şehir yapısının oluşturulması [35].</p>
<p>Şekil 17. Bosco Verticale [36].</p> 	<p>Bosco Verticale (Milano, İtalya)</p>	<p>Yeşil bina cepheleri, doğal ısı yalıtımı, çevre dostu malzemelerin kullanımı</p>	<p>Kentsel ısı adası etkisini azaltma, enerji tüketiminin düşürülmesi, hava kalitesinin iyileştirilmesi ve yaşam alanlarının doğayla uyumlu hâle getirilmesi [37].</p>
<p>Şekil 18. California Academy of Sciences [38].</p> 	<p>California Academy of Sciences (ABD)</p>	<p>Yeşil çatı tasarımı, doğal ışık kullanımına öncelik verme, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu</p>	<p>%40 enerji tasarrufu sağlanması, iç mekan sıcaklık kontrolünde iyileşme, doğaya uyumlu bir tasarımla çevre dostu bir yapı elde edilmesi [39].</p>

<p>Şekil 19. Khoo Teck Puat Hospital [40].</p> 	<p>Khoo Teck Puat Hospital (Singapur)</p>	<p>Doğal havalandırma, biyofilik tasarım, yağmur suyu toplama sistemlerinin entegrasyonu</p>	<p>Sağlık çalışanları ve hastalar için yaşam koşullarının iyileştirilmesi, enerji ve su tüketiminde %30 oranında azalma sağlanması [41].</p>
---	---	--	--

5. Sonuçlar

Enerji etkin otomasyon sistemleri, sürdürülebilir mimarinin önemli bir bileşeni olarak, enerji verimliliğini artırmak, karbon salınımlarını azaltmak ve yenilenebilir enerji kullanımını desteklemek amacıyla giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışma, enerji etkin otomasyon sistemlerinin sürdürülebilir mimariye katkılarını inceleyerek, çeşitli projelerdeki uygulamaları ve elde edilen kazanımları değerlendirmiştir.

- Akıllı bina otomasyon sistemleri (HVAC, aydınlatma, enerji izleme sistemleri) enerji tüketimini optimize ederek binalarda önemli tasarruflar sağlamış, karbon salınımlarını azaltmıştır.

- Güneş panelleri, rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin otomasyon teknolojileriyle entegrasyonu, sürdürülebilir tasarım stratejilerinin uygulanmasını desteklemiş ve enerji bağımsızlığını artırmıştır.

- IoT tabanlı cihazlar ve sensörler, enerji tüketimini izleyerek gerçek zamanlı veri analizi sağlamış, enerji yönetimini optimize etmiş ve kullanıcı davranışlarına uygun çözümler geliştirmiştir.

- Enerji etkin otomasyon sistemleri, çevresel sürdürülebilirliği artırırken, enerji maliyetlerini düşürerek ekonomik fayda sağlamış ve kullanıcı memnuniyetini artırarak sosyal sürdürülebilirlik üzerinde olumlu etkiler yaratmıştır.

- Yeşil çatılar, dikey bahçeler, pasif tasarım yöntemleri ve doğa dostu yapı malzemelerinin kullanımı, sürdürülebilir mimarinin çevresel etkilerini azaltmada önemli bir katkı sağlamıştır.

- Enerji depolama teknolojilerinin uygulanması, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlamış ve enerji sürekliliğini desteklemiştir.

- Akıllı otomasyon sistemleri, binaların enerji performansını süre-

li izleyerek enerji verimliliği hedeflerine ulaşmayı kolaylaştırmış ve uzun vadeli iyileştirmeler için zemin hazırlamıştır.

▪ Sürdürülebilir mimari tasarım stratejilerinin yaygınlaşması ve uygulanması için kamu ve özel sektör arasındaki iş birlikleri teşvik edilmiş, bu sayede projelerin daha geniş ölçekte benimsenmesi sağlanmıştır.

Teşekkürler

Bu çalışma İstanbul Gedik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje numarası “GDK202309-11”). Destekleri için İstanbul Gedik Üniversitesine ve Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine destekleri için teşekkür ederiz.

Referanslar

- [1] Jiang, Mohan, et al. “Life cycle greenhouse gas emissions of Marcellus shale gas.” *Environmental Research Letters* 6.3 (2011): 034014.
- [2] Zhang, Nannan. “A wearable all-solid photovoltaic textile.” *Electrochemical Society Meeting Abstracts* 233. No. 26. The Electrochemical Society, Inc., 2018.
- [3] Boait, Peter John, D. Fan, and A. Stafford. “Performance and control of domestic ground-source heat pumps in retrofit installations.” *Energy and Buildings* 43.8 (2011): 1968-1976.
- [4] Interfiks Blog, <https://blog.interfiks.com.tr/tr/2015/02/mimaride-biyofilik-tasarim-trendleri-hersey-insan-ve-doga-butunlesmesi-icin/>, Erişim Tarihi: 11.01.2025
- [5] Engineer Daily, <https://www.engineersdaily.com/2011/01/energy-efficient-design-of-buildings.html>, Erişim Tarihi: 11.01.2025
- [6] Dikmen, Çiğdem Belgin. “Enerji etkin yapı tasarım ölçütlerinin örnekleme.” *Politeknik Dergisi* 14.2 (2011): 121-134.
- [7] Tanrıver, Noyan, Burak Berkan Bostancı, And Doç Dr İbrahim Yücedağ. “Akıllı Ev Otomasyonu
- [8] Aslan, Akin. Akıllı ev kavramı ve otomasyon sistemleri. MS thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [9] Tesisat Org, <https://www.tesisat.org/yesil-binalar-ve-leed-sertifikalari.html>, Erişim Tarihi: 12.01.2025
- [10] Ashton, Kevin. “That ‘internet of things’ thing.” *RFID journal* 22.7 (2009): 97-114.
- [11] Erko Elektrik, <https://erkoelektrik.com/Hizmetlerimiz/akilli-ev-ve-otomasyon-sistemleri>, Erişim Tarihi: 12.01.2025
- [12] López-de-Armentia, Juan, Diego Casado-Mansilla, and Diego López-de-Ipina. “Fighting against vampire appliances through eco-aware things.” 2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing. IEEE, 2012.
- [13] Can, Sevim Ateş, and Duygu Kurtoğlu. “Sürdürülebilir mimari kapsamında geliştirilen

teknoloji ve ürünler.” Yalvaç Akademi Dergisi 2.2 (2017): 22-31.

[14] Erdede, S. Bilge, and Sebahattin Bektaş. “Türkiye için yeşil bina sertifika sistemi gerekliliği.” 2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, November. 2018.

[15] Tatar, Elif. “Sürdürülebilir mimarlık kapsamında çalışma mekanlarında gün ışığı kullanımını için bir öneri.” Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 17.1 (2013): 147-162.

[16] Solenser, <https://www.solenser.com>, Erişim Tarihi: 15.01.2025

[17] Istock Photo, <https://www.istockphoto.com/tr/fotoğraf/sürdürülebilir-mimari-gm1323143814-408892270>, Erişim Tarihi: 15.01.2025

[18] Çedbik. «Yeşil Bina Nedir? <http://www.cedbik.org/sayfalar.asp?KatID=3&ID=2>. Erişim Tarihi: 15.01.2025

[19] Güner, Cansu, Fulya Gökşen, and Ahmet Koçhan. “Sürdürülebilir kalkınma modeli için çevre duyarlı yapılarda malzeme seçiminin incelenmesi.” Akademia Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Dergisi 3.2 (2017): 1-14.

[20] Rylatt, R. Mark, et al. “Exploring smart grid possibilities: A complex systems modeling approach.” Smart Grid 1.1 (2016): 1-15.

[21] Yang, Lili, Shuang-Hua Yang, and Linda Plotnick. “How the internet of things technology enhances emergency response operations.” Technological Forecasting and Social Change 80.9 (2013): 1854-1867.

[22] Innova, <https://www.innova.com.tr/blog/akilli-evler-ve-enerji-yonetimi-enerji-verimligini-artirma>, Erişim Tarihi: 15.01.2025

[23] Shaikh, Pervez Hameed, et al. “A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings.” Renewable and Sustainable Energy Reviews 34 (2014): 409-429.

[24] Marinakis, Vangelis, et al. “An integrated system for buildings’ energy-efficient automation: Application in the tertiary sector.” Applied energy 101 (2013): 6-14.

[25] Yang, Rui, and Lingfeng Wang. “Development of multi-agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors.” Energy and Buildings 56 (2013): 1-7.

[26] Le, Toan-Vu, Hoang ChuDuc, and Quynh Xuan Tran. “Optimized Integration of Renewable Energy in Smart Buildings: A Systematic Review from Scopus Data.” 2024 9th International Conference on Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB). IEEE, 2024.

[27] Farzaneh, Hooman, et al. “Artificial intelligence evolution in smart buildings for energy efficiency.” Applied Sciences 11.2 (2021): 763.

[28] Pacheco, Rosalia, Javier Ordóñez, and Germán Martínez. “Energy efficient design of building: A review.” Renewable and sustainable energy reviews 16.6 (2012): 3559-3573.

[29] Ahmad, Tanveer, Hongcai Zhang, and Biao Yan. “A review on renewable energy and electricity requirement forecasting models for smart grid and buildings.” Sustainable Cities and Society 55 (2020): 102052.

[30] Zingat, <https://www.zingat.com/blog/dunyayi-kurtaran-7-yesil-bina/>, Erişim Tarihi: 15.01.2025

- [31] Pena, Robert. “Living Proof: Seattle’s Net Zero Energy Bullitt Center.” University of Washington, Department of Architecture 6 (2014). Pena, Robert. “Living Proof: Seattle’s Net Zero Energy Bullitt Center.” University of Washington, Department of Architecture 6 (2014).
- [32] Regupol Acoistics, <https://acoustics.regupol.com/project/one-central-park/>, Erişim Tarihi:15.01.2025
- [33] Nouvel, Jean. “One Central Park.” ARQ (Santiago) 102 (2019): 134-145.
- [34] Tripadvisor, Erişim Tarihi:15.01.2025 https://www.tripadvisor.com.tr/Attraction_Review-g294013-d2409120-Reviews-Masdar_City-Abu_Dhabi_Emirate_of_Abu_Dhabi.html,
- [35] Cugurullo, Federico. “How to build a sandcastle: An analysis of the genesis and development of Masdar City.” Journal of urban technology 20.1 (2013): 23-37.
- [36] Mimdap, <https://mimdap.org/mimarlik-dnyasindan/bosco-verticale-duthey-ornama-dodhru-ilerleme/>, Erişim Tarihi:15.01.2025
- [37] Giacomello, Elena. “Case study: Bosco verticale, Milan: A new urban forest rises in Milan.” CTBUH JOURNAL 1 (2015): 12-18.
- [38] Rehlat, <https://om.rehlat.com/en/explore/san-francisco/science-center-science-museum-in-san-francisco-united-states-of-america-cty1952-ctn21-sub43>, Erişim Tarihi:15.01.2025
- [39] Schoups, Gerrit, et al. “Sustainability of irrigated agriculture in the San Joaquin Valley, California.” Proceedings of the National Academy of Sciences 102.43 (2005): 15352-15356.
- [40] Mimarobot, Erişim Tarihi:15.01.2025 <https://mimarobot.com/tasarim/tasarim-ornekleri/photos/19855/saglik-merkezi-ve-hastane-yapilari>,
- [41] Yen, Tan Shao. “The practice of integrated design: The case study of Khoo Teck Puat Hospital, Singapore.” Degree of Masters of Science in Sustainable Building Design in BCA Academy, University of Nottingham (2012).

Sanat ve Zanaatın Ekolojik İş Birliği: Toshiko Macadam'ın Oyun Alanları Üzerinden Sürdürülebilir Mekân Tasarımı

Şeyda Canpolat¹

Özet

Toshiko MacAdam'ın devasa örgü oyun alanları, sanat ve zanaatı bir araya getirerek sürdürülebilirlik kavramına hem estetik hem de işlevsel bir boyut kazandıran öncü bir yaklaşım sunmaktadır. Bu oyun alanları, sadece çocukların güvenle oynayabileceği estetik mekânlar değil, aynı zamanda sürdürülebilir tasarım anlayışının toplumsal farkındalık yaratmak için kullanılabileceğini gösteren başarılı bir model olarak dikkat çekmektedir. MacAdam, el emeğiyle üretilmiş ve çevre dostu iplikler kullanarak hem doğal kaynakların korunmasına hem de sanatın günlük yaşamda daha görünür kılınmasına katkıda bulunmaktadır. Sanatçının çalışmalarında, yenden kullanılabilir malzemelerle inşa, toplumsal katılımı teşvik eden zanaat süreçleri, estetik ve işlevselliğin dengesi ve kentsel mekânlarda sanatın demokratikleşmesi gibi unsurlar ön plana çıkmaktadır. MacAdam, sadece bir sanat eseri oluşturmakla kalmamakta, bu eserleriyle çocuklar ve aileler için estetik bir deneyim sunarken ekolojik farkındalık da oluşturmaktadır. Onun oyun alanları, hem toplulukların fiziksel olarak bir araya gelmesini hem de çevre dostu mekânların önemini kavranmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada, Toshiko MacAdam'ın örgü oyun alanları, sürdürülebilir tasarım

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250308>

1 Trakya Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Resim Bölümü, Edirne, Türkiye, seydacnplt@gmail.com, ORCID: 0009-0003-3242-4668

açısından ele alınarak, sanat ve zanaatın ekolojik değerlerle nasıl birleştirilebileceği üzerinde durulmaktadır. Çalışma, oyun alanlarının toplumsal katılımı artıran süreçlerden çevreye duyarlı malzeme seçimine kadar geniş bir perspektiften analiz edilmesini amaçlamaktadır. Ayrıca, bu mekânların gelecekte kamusal alan tasarımına ilham verme potansiyeli tartışılmaktadır. Sonuç olarak, Toshiko MacAdam'ın çalışmaları, sanat ve zanaatın hem çevresel hem de toplumsal değerler oluşturmada ne kadar etkili olabileceğini ortaya koymaktadır. Bu eserler, sürdürülebilir mekân tasarımında estetik ve işlevselliğin uyumlu bir şekilde nasıl bir araya getirilebileceğini göstermesi açısından önemli bir model sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Toshiko MacAdam, Sürdürülebilir Tasarım, Sanat-Zanaat, Estetik ve İşlevsellik, Kamusal Alan Tasarımı.

The Ecological Collaboration of Art and Craft: Sustainable Space Design Through Toshiko Macadam's Playgrounds

Abstract

Toshiko MacAdam's monumental knitted playgrounds present a pioneering approach that brings art and craft together, adding both aesthetic and functional dimensions to the concept of sustainability. These playgrounds are not only aesthetic spaces where children can play safely but also serve as successful models demonstrating how sustainable design can be utilized to raise social awareness. By using handcrafted and eco-friendly yarns, MacAdam contributes to both the preservation of natural resources and the visibility of art in everyday life. MacAdam's works highlight key elements such as construction with reusable materials, craft processes that foster social participation, the balance of aesthetics and functionality, and the democratization of art in urban spaces. Her creations do more than offer an artistic experience for children and families; they also create ecological awareness. These playgrounds facilitate the physical gathering of communities while emphasizing the importance of environmentally friendly spaces. This study examines Toshiko MacAdam's knitted playgrounds from the perspective of sustainable design, focusing on how art and craft can be combined with ecological values. It aims to analyze these playgrounds from a broad perspective, covering aspects from social participation in

their creation to the use of environmentally conscious materials. Furthermore, the potential of these spaces to inspire future public space design is discussed. In conclusion, Toshiko MacAdam's works demonstrate how art and craft can be highly effective in creating both environmental and social values. These creations provide a significant model for integrating aesthetics and functionality harmoniously within sustainable space design.

Keywords: Toshiko MacAdam, Sustainable Design, Art-Craft, Aesthetics and Functionality, Public Space Design.

1. Giriş

Sanat ve tasarım, insan yaşamının estetik ve işlevsel boyutlarını zenginleştirirken ötesinde, toplumsal değişim ve çevresel sürdürülebilirlik için güçlü araçlar sunmaktadır. Modern çağda hızla artan kentsel yapılaşma ve doğal kaynakların tükenme riski, yaşam alanlarının yeniden tasarlanmasını ve bu süreçte estetik ile çevresel duyarlılığın bir araya getirilmesini zorunlu kılmaktadır. Sürdürülebilir mekan tasarımında, doğru düzenlemeler, gerekli koşulları sağlayan iç mekan organizasyonları, doluluk-boşluk, esnek kullanımla dönüşebilen alanlar, ekolojik malzeme seçimleri ile doğa dostu ve insan odaklı yaklaşımlarla kullanıcıyla etkileşim hâlinde olan alanlar sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır [1]. Bu bağlamda Toshiko MacAdam'ın devasa örgü oyun alanları, sanat, zanaat ve sürdürülebilirlik kavramlarının bir arada nasıl çalışabileceğini gösteren önemli bir örnektir. MacAdam'ın eserleri, çocuklar için fiziksel aktivite alanları oluşturur. Aynı zamanda bireyleri sanatsal deneyime dâhil ederek toplumsal farkındalık geliştirir. Çocukların oyun oynarken hayal gücünü geliştirdiği bu mekânlar, sanatın demokratikleşmesine de katkıda bulunmaktadır. Bu tasarımlar, hem fiziksel mekânların hem de toplulukların sürdürülebilir bir yaklaşımla yeniden inşa edilebileceğini göstermektedir [2]. Çalışmada, Toshiko MacAdam'ın örgü oyun alanlarının estetik, işlevsel ve ekolojik katkıları ele alınarak sürdürülebilir mekân tasarımına olan etkileri incelenmiştir. Bunun yanı sıra bu eserlerin kamusal alan tasarımına getirdiği yenilikler ve gelecekteki tasarım süreçlerine ilham verme potansiyeli de ele alınmıştır. Özellikle doğal malzemelerin kullanımından toplumsal katılımı teşvik eden yapısına kadar birçok açıdan değerlendirilmiş olan MacAdam'ın çalışmaları, sanatın çevresel ve toplumsal değerler üretme kapasitesine dair önemli bir perspektif sunmaktadır [3]. Günümüzde kamusal alan tasarımı, fiziksel ih-

tiyaçlar, toplulukların sosyal, estetik ve çevresel gereksinimlerine de cevap verebilmelidir. Toshiko MacAdam'ın eserleri, bu gereksinimleri bir arada ele alarak sanatın dönüştürücü gücünü göstermektedir. Çocukların oynadığı, ailelerin bulunduğu ve bireylerin sanatla etkileşim kurduğu bu mekânlar, sürdürülebilir tasarımın ideal bir modeli olarak değerlendirilebilir [4]. Bu çalışmada, MacAdam'ın sanat ve zanaat anlayışının sürdürülebilirlik kavramına katkıları ayrıntılı bir şekilde ele alınmış ve bu yaklaşımların toplumsal yaşam üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

2. Toshiko MacAdam ve Sürdürülebilir Oyun Alanları

Toshiko MacAdam, Kanada'nın Nova Scotia eyaletindeki Bridgetown'da yaşayan bir Japon tekstil sanatçısıdır. Özellikle çocuklara yönelik "tekstil oyun alanları", tığ işi iplerden yapılmış parlak renkli ağ benzeri yapılar olmak üzere büyük ölçekli tekstil yapılarıyla yaptığı çalışmalarla tanınır. Doğanın yumuşak kıvrımlarından ve organik şekillerinden ilham alan İspanyol mimar Antino Gaudi'den etkilenmiştir. Toshiko MacAdam, sanat ve zanaatın birleşiminden doğan yenilikçi tasarımlarıyla hem estetik hem de işlevsellik açısından öncü bir sanatçı ve tasarımcıdır. Eserlerini yaparken sanat ve zanaat arasındaki çizgiyi bulanıklaştırmıştır. MacAdam'ın devasa örgü oyun alanları, çocuklar için fiziksel bir oyun mekanı oluşturur ve sürdürülebilir tasarım anlayışına katkıda bulunur. Bu oyun alanları, sanatın kentsel yaşamla nasıl entegre edilebileceğine dair çarpıcı bir örnek sunmaktadır. El yapımı örgü teknikleri, doğal ve geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı ile bir araya gelerek sürdürülebilir bir tasarım modeli oluşturur. MacAdam'ın eserleri, hem sanat hem de zanaat disiplinlerini bir araya getirirken aynı zamanda çevre dostu yaklaşımları topluma tanıtır ve sanatı günlük yaşamın bir parçası hâline getirir [4].



Resim 1. Toshiko Horiuchi MacAdam ve Interplay'in Hakone Açık Hava Müzesi'ndeki Wonder Space II eseri [5]



Resim 2: Toshiko Horiuchi MacAdam ve Interplay'in Hakone Açık Hava Müzesi'ndeki Wonder Space II eseri [6]

2.1. Toshiko MacAdam'ın Sanatsal Yaklaşımı

Toshiko MacAdam'ın sanatsal yaklaşımı, geleneksel zanaat tekniklerini yenilikçi bir şekilde uygulayarak çağdaş tasarıma entegre etmek üzerine kuruludur. Sanatçı, el yapımı örgülerin dokusal ve renkli yapısını kullanarak çocuklar için hem fiziksel hem de duygusal bir deneyim sunar. Renkli ipliklerden oluşturulan devasa örgü yapılar, çocukların motor becerilerini geliştirirken aynı zamanda hayal gücünü teşvik eden yaratıcı bir alan sağlar.

MacAdam, sanatı estetik bir olgu olarak görmektedir. Onun için sanat, toplumda birleştirici bir rol oynar ve toplumsal farkındalık geliştirmenin bir aracı olarak hizmet eder. Bu bağlamda, oyun alanları bireyler için sanatı deneyimleyebilecekleri demokratik mekânlar olarak öne çıkar [3]. Ayrıca, eserlerinde kullanılan organik formlar ve canlı renkler, hem çocuklar hem de yetişkinler için sanatsal bir keyif sunar ve mekânlara hayat katar.



Resim 3: Toshiko MacAdam El İşi Oyun Alanlarını Oluştururken [6]

2.2. Çevre Dostu Malzemelerin Kullanımı

Sürdürülebilirlik, yalnızca doğal kaynakların korunmasıyla ilgili değil, aynı zamanda bu kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan

ekonomik, sosyal ve kültürel bir yaklaşımdır. Bu bağlamda, çevre dostu malzemelerin kullanımı, enerji dönüşümü ve sürdürülebilir enerji politikalarının hayata geçirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. MacAdam'ın tasarımlarında sürdürülebilirliğin en önemli unsurlarından biri, kullanılan malzemelerin çevre dostu olmasıdır. Sanatçı, yapılarında geri dönüştürülebilir ve biyolojik olarak çözünür iplikler kullanarak doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunur. Bu iplikler, dayanıklılık ve esneklik sağlarken aynı zamanda toksik olmayan yapısıyla çocukların güvenliği için idealdir. Malzeme seçimindeki bu bilinçli tercihler, MacAdam'ın tasarımlarını birer oyun alanı ve ekolojik farkındalık yaratmaya yönelik birer araç hâline getirir [4].

Ayrıca, bu malzemelerin uzun ömürlü olması, oyun alanlarının bakım maliyetlerini düşürmekte ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Geri dönüştürülebilir malzemeler kullanılarak inşa edilen bu mekânlar, hem doğal kaynak kullanımını optimize etmekte hem de çevresel ayak izini azaltmaktadır. Bu bağlamda, MacAdam'ın oyun alanları, kentsel mekânlarda çevreye duyarlı tasarımın nasıl uygulanabileceğine dair örnek bir model sunmaktadır.

Çevre dostu malzemelerin kullanımı, enerji verimliliğini artırırken aynı zamanda ekolojik dengenin korunmasına da yardımcı olur. Enerji dönüşümüne yönelik politikalar, daha verimli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi teşvik ederken, bu süreçte kullanılan malzemeler de büyük bir öneme sahiptir. Toshiko MacAdam'ın tasarımlarında kullandığı geri dönüştürülmüş ve doğal malzemeler, ekolojik fayda ve sanatın halkla buluşmasını sağlar.

2.2.1. Geri Dönüştürülebilir Malzemelerin Seçimi ve Enerji Verimliliği

MacAdam'ın tasarımlarında tercih ettiği doğal iplikler, yenilenebilir kaynaklardan elde edilir. Pamuk, bambu, yün gibi malzemeler doğal döngüde yer alır ve işlenmesi sırasında düşük enerji tüketimi gerektirir. Bu tür malzemeler, plastik ve sentetik malzemelere göre çok daha çevre dostudur. Bu seçim, sadece çevresel açıdan değil, aynı zamanda insan sağlığı için de önemlidir. Doğal malzemelerin kullanımı, kimyasal madde içermediğinden, yaşam alanlarında sağlıklı bir ortam yaratır. Ayrıca, bu tür malzemeler geri dönüştürülebilir ve biyolojik olarak çözünür, bu da onların çevreye daha az zarar verdiği anlamına gelir.

MacAdam, aynı zamanda dönüştürülebilir naylon kullanımını da tasarımlarına dâhil etmiştir. Naylonun geri dönüştürülmüş şekilde kullanıl-

ması, hammadde israfını önlemiş ve döngüsel ekonomi modeline katkıda bulunmuştur. Bu yaklaşım, doğal kaynak tüketimini azaltmıştır. Dayanıklı yapısı sayesinde uzun ömürlü kullanım sunan naylon, hızlı tüketim alışkanlıklarını sınırlandırmış, tamir edilebilir özelliğiyle ürünlerin yenilenebilirliğini sağlamıştır. Ayrıca, ekonomik olarak uzun vadeli bir çözüm sunarak sık yenileme ihtiyacını ortadan kaldırmış ve kaynakların etkin kullanımını desteklemiştir. MacAdam, bu malzemeleri geri dönüştürülmüş şekilde kullanarak topluma önemli bir çevresel farkındalık kazandırmış ve sürdürülebilirlik ilkelerine uygun bir model sunmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen üretim süreçleri, karbon ayak izini azaltmış, çevresel etkileri en aza indirmiştir. Bu bütüncül ve yenilikçi yaklaşımıyla, estetik ve işlevsellik sunmanın ötesine geçerek, çevreye duyarlı ve toplumsal farkındalık oluşturan bir tasarım anlayışı benimsemiştir.

2.2.2. Çevre Dostu Malzemelerin Ekonomik Etkisi

Çevre dostu malzemeler, ekonomik anlamda da sürdürülebilir kalkınma süreçlerine katkı sağlar. Geri dönüştürülmüş ve doğal malzemelerin üretimi genellikle daha düşük maliyetlidir. Ayrıca, bu malzemelerin kullanımı, enerji ve kaynak tasarrufu sağlayarak ekonomik büyümeye katkı sunar. Bu tür malzemelerin teşvik edilmesi, sürdürülebilir ekonomik sistemlerin kurulmasına yardımcı olabilir. Toshiko MacAdam'ın tasarımları da çevre dostu niteliği taşır ve toplumun bu tür ürünlere olan talebini artırarak sürdürülebilir üretim ve tüketim alışkanlıklarının yayılmasına yardımcı olur.

2.3. Toplumsal Katılım ve Sanatın Demokratikleşmesi

Sürdürülebilir malzemelerin kullanımı, çevresel bir katkı sağlar. Toplumda çevre bilincini artırma işlevi görür. Toplumda çevre dostu malzemelerle tanıştırmak, insanların günlük yaşamlarında daha bilinçli seçimler yapmalarına neden olabilir. MacAdam'ın oyun alanları, çocuklar ve aileler için estetik bir deneyim sunarken, aynı zamanda çevre dostu malzemelerle oluşturulmuş olmaları nedeniyle ekolojik farkındalık oluşturur. Bu tür kamusal sanat projeleri, insanlara çevreye duyarlı tasarımın ne kadar önemli olduğunu gösterir ve onlara bu tür düşünceleri günlük yaşamlarında da benimsemeleri gerektiğini öğretir.

MacAdam'ın oyun alanlarının bir diğer önemli yönü, toplumsal katılımı teşvik etmesidir. Bu yapılar, yalnızca çocuklar için bir oyun alanı değil, aynı zamanda ailelerin, arkadaşların ve topluluk üyelerinin bir araya gelebileceği sosyal mekânlar oluşturur. Eserler, çocukların fiziksel

gelişimlerini desteklemenin yanı sıra, topluluk içinde bir dayanışma ruhu oluşturur. Bunun yanı sıra, el yapımı olması, bireyleri üretim sürecine dâhil edebilme potansiyelini taşır ve bu da sanatın toplum tarafından daha erişilebilir ve katılımcı bir deneyim olarak algılanmasını sağlar [3].

Sonuçlar

Toshiko MacAdam'ın oyun alanları; sanat, zanaat ve ekoloji arasındaki iş birliğini güçlü bir şekilde ortaya koymuştur. Sanatçının kullandığı el dokuması teknikler ve geri dönüştürülebilir malzemeler, yalnızca estetik bir değer yaratmakla kalmamış, aynı zamanda sürdürülebilir bir yaşam anlayışının pratikte nasıl uygulanabileceğini de göstermiştir. Bu oyun alanları, enerji verimliliğini artıran ve çevresel kaynakların korunmasını sağlayan bir tasarım modeli olarak dikkat çekmiştir. MacAdam, eserleriyle çevre dostu malzeme kullanımının yalnızca çevreyi korumakla kalmayıp, aynı zamanda uzun vadede ekonomik faydalar sağladığını da kanıtlamıştır. Sanatçının eserleri, sanatın demokratikleşmesi sürecine de önemli katkılarda bulunmuştur. Toplumun her kesimine açık, erişilebilir ve katılımı teşvik eden bu mekânlar, bireylerin çevre bilinci kazanmasına olanak sağlamıştır. Oyun alanları, çocukların ve ailelerin bir araya geldiği, sosyal etkileşimlerin güçlendiği yerler olarak toplumsal bağların güçlenmesine de hizmet etmiştir. Bu bağlamda, MacAdam'ın eserleri toplumsal katılımı artıran, bireylerin ortak deneyimler paylaşmasını sağlayan bir platform sunmuştur. MacAdam'ın "Tüm enerjimi güzel olana adıyorum" sözü, çalışmalarının temelini oluşturan felsefeyi yansıtmaktadır. Bu ifade, sanatçının enerjinin dönüşümü kavramını estetik bir yaklaşımla birleştirerek, çevresel ve toplumsal farkındalığı artıran projelere yönlendirdiğini göstermiştir. Oyun alanlarının tasarımı, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik ilkelerini içeren bir mekânsal dönüşümü mümkün kılmıştır.

Sonuç olarak, Toshiko MacAdam'ın oyun alanları, sanat ve zanaatın çevresel, toplumsal ve ekonomik faydalarını görünür kılan bir model oluşturmuştur. Bu alanlar, sürdürülebilir mekân tasarımının estetikle buluştuğu, toplumsal katılımı teşvik eden ve çevre bilincini artıran bir yaklaşımı temsil etmektedir. Gelecekte bu tür uygulamaların yaygınlaşması hem bireysel düzeyde hem de toplumsal ölçekte daha bilinçli ve sürdürülebilir bir yaşam tarzının benimsenmesine katkı sağlayacaktır. MacAdam'ın yaklaşımı, sanatın sadece bir estetik üretim aracı değil, aynı zamanda toplumsal ve çevresel dönüşüm için güçlü bir araç olduğunu kanıtlamıştır.

Referanslar

- [1] Geçimli, M.(2022). Mekân Tasarımında Sürdürülebilir Yaklaşımlar: İstiklal Üniversite-si.İstanbul: İksad Yayınevi. 103.
- [2] MacAdam, T. (2015). Knitted Playgrounds: Art Meets Function. Tokyo: Sustainable Art Press.
- [3] Jones, R. (2020). “Art, Craft, and Sustainability: Toshiko MacAdam’s Playgrounds.” Journal of Contemporary Art and Ecology, 12(3), 45-59.
- [4] Smith, L. (2018). Sustainable Public Spaces: Case Studies in Art and Design. London: Green Design Publishers.
- [5] Arch Daily, Meet the Artist Behind Those Amazing, Hand-Knitted Playgrounds, <https://www.archdaily.com/297941/meet-the-artist-behind-those-amazing-hand-knitted-playgrounds>
- [6] Colossal, Crochet Playgrounds by Toshiko Horiuchi MacAdam, <https://www.thisiscolossal.com/2012/07/crochet-playgrounds-by-toshiko-horiuchi-macadam/>

Global Schools Aktivite Rehberleri ile STEM Dersi Planlamak: İklim Değişikliği ve Enerji

Büşra Dursun¹

Özet

Bu ders tasarımı, enerji sorununa sürdürülebilir bir çözüm getirmek amacıyla multidisipliner bir eğitim modeli sunmaktadır. Enerji üretiminde kullanılan yöntem ve teknolojilerin iklim değişikliği üzerindeki etkisi, 2030 hedefleri doğrultusunda dikkatle ele alınması gereken konulardan biridir. Global Schools Advocate bakış açısıyla hazırlanan bu ders planı, Global Schools'un sınıf içi uygulama rehberleri, Smithsonian Science for Global Goals'un aktivite modülleri ve Türkiye eğitim sisteminin fizik, kimya, biyoloji, matematik ve STEM kazanımları ile zenginleştirilmiştir. Bu bağlamda, EN-ROADS simülatörü kullanılarak öğrencilerin sürdürülebilir bir enerji üretim modeli oluşturmayı deneyimlemeleri amaçlanmıştır.

Ders planında SKH 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji), SKH 9 (Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı), SKH 13 (İklim Hareketi) ve SKH 16 (Barış, Adalet ve Güçlü Kurumlar) hedeflerine atıfta bulunulmuştur. Smithsonian Science for Global Goals'un "Energy" (enerji) ve "Climate Resilience" (iklim direnci) modülleri ile birlikte enerji ve iklim değişikliği kavramları ele alınarak, STEM ile sürdürülebilirlik birleştirilmiştir. Grafik okuma ve yorumlama becerileri matematik kazanımlarını hedeflerken, enerji ve eko-

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250309>

¹ Bahçeşehir Koleji Kocaeli Kampüsü, Lise Biyoloji, Kocaeli, Türkiye,
busradursun88@gmail.com, ORCID: 0009-0003-6223-2309

loji boyutlarıyla biyoloji ve kimya kazanımları da kapsamıştır. Teknoloji kullanımıyla ise bilgisayar bilimleri kazanımlarına temas edilmiş, multidisipliner bir plan oluşturulmuştur. Bu ders tasarımı, öğrencilere hem enerji kaynaklarının verimli kullanımı hem de iklim değişikliğiyle mücadelede etkili yöntemler hakkında farkındalık kazandırmayı hedeflemektedir. Günümüz dünyasında enerji sürdürülebilirliğine yönelik sorumluluğumuzun bilincinde olarak hazırlanan bu çalışma, öğretmenlere de çok boyutlu bir eğitim modelinin rehberliğini sunmaktadır. Bu plan, eğitimin geleceğini şekillendirecek STEM ve sürdürülebilirlik birleşiminin etkileyici bir örneğini teşkil etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Küresel Okullar, STEM, Enerji, Sürdürülebilirlik, İklim Değişikliği, Eğitim Teknolojileri.

Planning a STEM Lesson with Global Schools Activity Guides: Climate Change and Energy

Abstract

This lesson design offers a multidisciplinary educational model to provide a sustainable solution to the energy problem. The impact of energy production methods and technologies on climate change is a crucial issue that needs to be carefully addressed in line with the 2030 targets. Designed from a Global Schools Advocate perspective, this lesson plan is enriched with Global Schools' classroom application guides, Smithsonian Science for Global Goals' activity modules, and Turkey's education system outcomes in physics, chemistry, biology, mathematics, and STEM. In this context, the EN-ROADS simulator is used to enable students to experience building a sustainable energy production model.

The lesson plan references SDG 7 (Affordable and Clean Energy), SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure), SDG 13 (Climate Action), and SDG 16 (Peace, Justice, and Strong Institutions). Through Smithsonian Science for Global Goals' "Energy" and "Climate Resilience" modules, energy and climate change concepts are explored by integrating STEM with sustainability. While aiming to develop mathematics skills in graph reading and interpretation, the plan also covers biology and chemistry outcomes through energy and ecology dimensions. Furthermore,

technology use touches upon computer science competencies, creating a multidisciplinary plan. This lesson design aims to raise students' awareness of both the efficient use of energy resources and effective methods to combat climate change. This work, prepared with an awareness of our responsibility toward energy sustainability in today's world, offers teachers a guide for a multifaceted educational model. This plan exemplifies the impactful combination of STEM and sustainability that will shape the future of education.

Keywords: Global Schools, STEM, Energy, Sustainability, Climate Change, Educational Technologies.

1. Giriş

Sürdürülebilirlik eğitimi, günümüz dünyasındaki hızlı değişimlerle birlikte modern eğitimin vazgeçilmez bir unsuru hâline gelmiştir. Bu kapsamda, Küresel Okullar (Global Schools) programı, sürdürülebilirlik eğitiminin uygulanmasında kritik bir platform sunmaktadır. Bu programda yer alan öğretmenler, UNESCO ve BM tarafından sağlanan kaynaklardan yararlanarak, sürdürülebilirlik kavramını okullara taşımak ve müfredata entegre etmek için çalışmalar yürütmektedir. Bu makalede ele alınan ders planının uygulandığı Bahçeşehir Koleji Kocaeli Kampüsü'nde, Küresel Okullar aktivite rehberleri ve "Smithsonian Science for Global Goals" modülleri gibi araçlarla ders içi ve ders dışı aktiviteler geliştirilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada eğitim teknolojilerinin de dâhil olduğu EN-ROADS iklim simülatörü kullanılarak sürdürülebilirlik eğitimi desteklenmiştir.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA), dünya genelinde ekonomik, sosyal ve çevresel kalkınmanın sağlanmasını hedeflemektedir. Bu hedefler arasında yer alan SKA 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji), herkesin ekonomik olarak uygun, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerjiye erişimini sağlamayı amaçlar. Enerji, ekonomik büyüme, eğitimde ilerleme ve sağlık hizmetlerine erişim gibi modern yaşamın temel bileşenlerini desteklemede hayati bir rol oynamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, enerjiye erişimi artırırken fosil yakıt kullanımını azaltmakta ve çevresel zararlara karşı önemli bir çözüm sunmaktadır.

Bu süreç, doğrudan SKA 13 (İklim Eylemi) ile ilişkilidir. Enerji üretimi ve tüketimi, sera gazı emisyonlarının başlıca kaynaklarından biri olarak iklim değişikliğinin temel nedenlerinden birini oluşturmaktadır. Bu

nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına geçiş yapılması, enerji verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilir enerji politikalarının benimsenmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, iklim değişikliğine uyum sağlanması ve etkilerinin azaltılması için ulusal ve uluslararası iş birliklerinin güçlendirilmesi gerekmektedir. SKA 16'da (Barış, Adalet ve Güçlü Kurumlar) bu hedeflerle güçlü bir bağ içerisindedir. Enerjiye erişim eksiklikleri ve iklim değişikliği, toplumsal eşitsizlikleri ve çatışmaları tetikleyebilmektedir. Bu bağlamda, temiz enerjiye erişim sağlanması, çevresel sorunların azaltılması ve güçlü, hesap verebilir kurumların oluşturulması, sürdürülebilir kalkınmayı destekleyecek kritik adımlardır. Adaletli enerji politikaları ve iklim değişikliğine karşı etkili eylemler, toplumlar arasında güven ve barış ortamının oluşturulmasına katkı sağlayabilir.

Sonuç olarak, SKA 7, SKA 13 ve SKA 16 birbiriyle yakından ilişkilidir. Enerjiye erişimin iyileştirilmesi, iklim eylemlerinin hayata geçirilmesi ve güçlü kurumların inşa edilmesi, sürdürülebilir ve barışçıl bir gelecek için temel bir zemin oluşturmaktadır. Bu hedeflerin başarılması, hem sosyal hem de çevresel refah düzeyini artıracaktır.

1.1. Küresel İklim Değişikliği ve Enerji

1.1.1. Küresel İklim Değişikliği

Küresel iklim değişikliği, atmosferdeki sera gazlarının birikimiyle ilişkili olarak dünya yüzeyindeki sıcaklığın artması anlamına gelir. Bu değişim, insan faaliyetleri ve doğal süreçlerin birleşimiyle ortaya çıkmaktadır. Özellikle sanayi devrimi sonrası artan karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azotoksit (N₂O) emisyonları, atmosferdeki sera etkisini yoğunlaştırmış ve bu da küresel ısınmayı hızlandırmıştır. 1850'lerden bu yana dünya yüzeyi yaklaşık 1,1°C ısınmış olup, bu artışın önümüzdeki yirmi yıl içinde 1,5°C'yi aşması beklenmektedir. [14]

Küresel ısınma, dünya genelinde eşit olmayan etkiler yaratmaktadır. Kutuplarda buzullar hızla erirken deniz seviyeleri yükselmektedir. Örneğin, bu yüzyılın sonunda deniz seviyelerinin 30–110 cm arasında yükselmesi öngörülmektedir. Bu durum kıyı bölgelerinde toprak kaybına, temiz su kaynaklarının tuzlanmasına ve ekosistemlerin bozulmasına yol açabilir. Aynı zamanda, yüksek enlemlerde aşırı ısınma, daha kuru tropikal bölgelerde ise kuraklık risklerini artırmaktadır. Bu süreç, sadece doğal ekosistemleri değil, tarımsal üretimi, insan sağlığını ve yaşam koşullarını da

olumsuz etkilemektedir. [15]

İklim değişikliğinin temel nedenlerinden biri fosil yakıtların yoğun kullanımınıdır. Enerji üretimi, sanayi faaliyetleri ve ulaşım gibi insan kaynaklı faaliyetler, atmosferdeki karbon emisyonlarının büyük bir kısmını oluşturur. Ormansızlaşma ve arazi kullanımı değişiklikleri de bu süreci hızlandırmaktadır. Atmosferdeki CO₂ seviyeleri, sanayi öncesi döneme kıyasla %50 artmış ve bu artışın devam etmesi durumunda küresel sıcaklıkların ciddi şekilde yükselmesi beklenmektedir. Küresel iklim değişikliğini durdurmak için karbondioksit emisyonlarının azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş ve ormanların korunması gibi stratejilerin uygulanması gerekmektedir. Ancak, mevcut emisyonlar nedeniyle bazı etkilerin uzun süre devam edeceği tahmin edilmektedir. Örneğin, okyanusların termal genişlemesi ve buzulların erimesi nedeniyle deniz seviyesindeki yükselme, yüzyıllar boyunca sürebilir. Sonuç olarak, iklim değişikliği, hem çevresel hem de toplumsal boyutta ciddi tehditler oluşturmakta olup, acil eylem gerektiren küresel bir krizdir.

1.1.2. Küresel İklim Değişikliği ve Enerji

İklim değişikliği, enerji tüketimi ve sera gazı salınımları arasındaki güçlü bağlantı nedeniyle ciddi bir küresel sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların yoğun kullanımı, atmosfere büyük miktarda karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azotoksit (N₂O) salınımına yol açarak dünya genelinde sıcaklık artışını hızlandırmaktadır. Bu durum, deniz seviyelerinin yükselmesi, buzulların erimesi ve aşırı hava olaylarının artışı gibi önemli çevresel sorunlara neden olmaktadır.

Tarihsel olarak bakıldığında, enerji politikalarının iklim değişikliği üzerindeki etkisi oldukça belirgindir. Özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısında enerji talebindeki artış ve enerji jeopolitiği, uluslararası iklim anlaşmalarının etkinliğini sınırlamıştır. Örneğin, Kyoto Protokolü, sera gazı emisyonlarını azaltmayı hedefleyen bir girişim olmasına rağmen ekonomik ve politik farklılıklar nedeniyle beklenen başarıya ulaşamamıştır. Gelişmiş ülkelerin desteğinin yetersizliği ve finansman eksikliği, bu tür anlaşmaların uygulanabilirliğini sınırlandıran temel faktörler arasında yer almıştır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, iklim değişikliğiyle mücadelede kilit bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Güneş enerjisi, rüzgar, biyokütle ve jeotermal gibi yenilenebilir kaynaklar, fosil yakıt bağımlılığını azaltmanın yanı sıra çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Paris Anlaşması gibi uluslararası inisiyatifler, küresel sıcaklık

artışını 2°C'nin altında tutmayı ve ideal olarak 1,5°C hedefine ulaşmayı amaçlamaktadır. Ancak bu hedeflerin başarısı büyük ölçüde, gelişmiş ülkelerin finansal ve teknolojik desteklerini geliştirmekte olan ülkelere sağlamasına bağlıdır. Yenilenebilir enerji sistemleri yalnızca çevresel faydalar sunmakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik kazançlar yaratır. Bu sistemlere yapılan yatırımlar, istihdamı artırır ve enerji üretim maliyetlerini düşürür. Ancak bu dönüşüm, enerji tüketim alışkanlıklarının değiştirilmesi ve teknolojik inovasyonların hızlandırılmasını da gerektirmektedir.

Sonuç olarak, enerji politikalarının küresel iklim hedeflerine uyumlu hâle getirilmesi elzemdir. Karbon salınımlarını azaltmaya yönelik yenilikçi stratejilerin benimsenmesi ve yenilenebilir enerjiye geçişin hızlandırılması, iklim risklerini en aza indirmenin temel yollarından biridir. Bu değişim, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda toplumların refahını artırmayı da hedeflemektedir.

2. Simülasyon Oyunları ve STEM Eğitimi: Dijital Eğitimin Gücü

STEM (Fen, Teknoloji, Mühendislik ve Matematik) eğitimi, 21. yüzyılın önemli becerileri olan eleştirel düşünme, yaratıcı problem çözme ve hesaplamalı düşünmeyi geliştirme hedefiyle dünya genelinde yaygınlaşmaktadır. Aynı zamanda enerji, çevre ve sağlık gibi gerçek dünya sorunlarına çözümler üretmede önemli bir rol oynar. Ancak geleneksel STEM sınıfları, öğrencilerin ilgisini çekmekte ve karmaşık problem çözme becerilerini geliştirmekte yetersiz kalmaktadır. Bu durum, dijital oyun tabanlı öğrenme (DGBL) gibi yenilikçi yaklaşımlara olan ihtiyacı artırmaktadır.

Dijital eğitim oyunları, etkileşimli bir öğrenme ortamı sağlayarak öğrencilerin öğrenme motivasyonunu artırır. Simülasyonlar ve gerçek dünya problemleri gibi araçlarla STEM okuryazarlığını destekler. Bu oyunlar, öğrencilere sadece bilgi sunmakla kalmaz, aynı zamanda onları aktif bir şekilde öğrenme sürecine dâhil eder. Öğrenciler, oyun ortamında keşif yaparak ve problem çözerek eleştirel düşünme becerilerini geliştirirler [7].

2.1. Yerleşik Öğrenme Teorisi ve STEM Eğitimi

Lave ve Wenger'in (1991) yerleşik öğrenme teorisine göre dijital oyunlar, öğrenmeyi bağlama dayalı olarak destekler ve öğrencilerin oyun içinde bilgi inşa etmelerine olanak tanır. Bu oyunlar, pedagojik ajanlar ve öz açıklama stratejileri gibi öğrenme destek mekanizmalarını içerir. Grivokostopoulou ve arkadaşları (2020) tarafından önerilen simülasyon tabanlı

bir oyunda, sanal toplulukların öğrencilere keşif ve öğrenme fırsatları sunduğu gösterilmiştir. Bu bağlamda, dijital oyunlar bir öğrenme topluluğu yaratarak STEM eğitimi için güçlü bir araç hâline gelir [7, 8].

2.1.1. STEM Eğitimi İçin Dijital Oyunların Potansiyeli

Dijital eğitim oyunları, öğrencilere uygulamalı ve ilgi çekici öğrenme deneyimleri sunar. Simülasyonlar, gerçek dünya problemleri ve işbirlikçi öğrenme bağlamları sayesinde öğrencilerin STEM becerilerini geliştirme süreci hızlanır. Aynı zamanda bu oyunlar, öğrencileri hem temel bilgi düzeyinden ileri seviyelere taşır hem de onları geleceğin karmaşık problemleriyle başa çıkmaya hazırlar [7, 8]. Sonuç olarak, dijital oyunlar STEM eğitiminde dönüşüm yaratacak potansiyele sahiptir. Yenilikçi pedagojik yaklaşımlar ve dijital araçlar, öğrencilerin STEM okuryazarlığını artırarak onları daha yaratıcı ve problem çözmeye yatkın bireyler olarak yetiştirecektir. Bu da geleceğin eğitim sistemlerinin temellerini şekillendirmede kritik bir adım olacaktır.

2.2. Simülasyon Oyun Örnekleri

İklim değişikliği eğitiminde çeşitli simülasyonlar ve simülasyon oyunları kullanılmaktadır. Bazı örnekler aşağıda verilmiştir.

2.2.1. Fields of Fuel

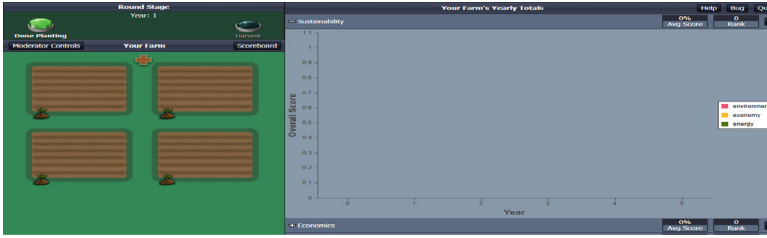
Fields of Fuel, sürdürülebilirlik eğitimi için yenilikçi bir dijital oyundur. Fields of Fuel oyunu, hem öğrencilere hem de genel katılımcılara, sürdürülebilir biyoenerji üretimini ve ekosistem yönetimini deneyimleme fırsatı sunan etkileyici bir dijital öğrenme platformudur. Şekil 1'de görüldüğü gibi dört tarla ve 3 çeşit ekin ile grafiklerden oluşan bir arayüze sahiptir. Oyuncular, enerji kaynakları üretmek, gelir elde etmek ve ekosistem hizmetlerini iyileştirmek için ürün yetiştiren çiftçiler rolünü üstlenirler. Bu süreçte, sistem düzeyinde karmaşık düşünme becerilerini kullanarak çeşitli sürdürülebilirlik kavramlarını öğrenirler:

- **Sürdürülebilirliğin Ekolojik ve Ekonomik Yönleri:** Oyuncular, tarımsal üretimde ekolojik koruma ile ekonomik kazanç arasındaki dengeyi anlamaya çalışırlar. Bu, doğal kaynakları verimli kullanmanın yanı sıra ekonomik sürdürülebilirliğe yönelik stratejiler geliştirmeyi içerir.

- **Kısa ve Uzun Vadeli Dinamikler:** Oyun, kararların yalnızca kısa vadeli etkilerini değil, aynı zamanda uzun vadede ekosistem ve ekonomi

üzerindeki sonuçlarını gözlemlemeyi sağlar. Oyuncular, bir sistemin sürdürülebilirliğini zaman içinde nasıl yönetebileceklerini öğrenirler.

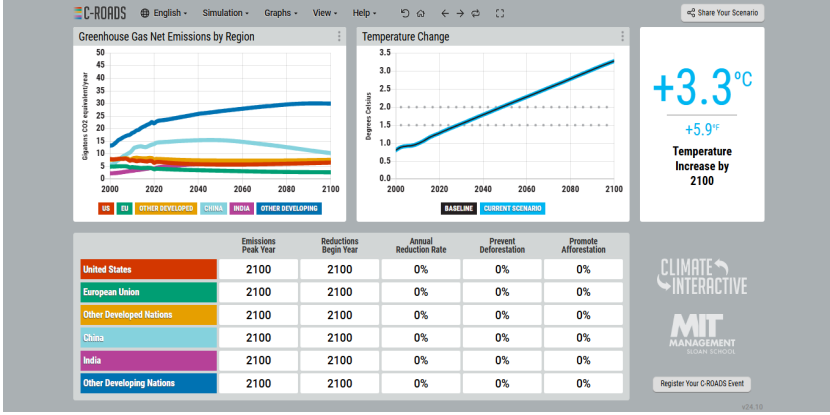
▪ **Yerel ve Küresel Etkiler:** Oyundaki her karar, yalnızca çiftlik seviyesinde değil, daha geniş çevresel ve toplumsal sistemlerde de etkiler yaratır. Bu, oyuncuların bireysel eylemlerinin küresel ölçekteki etkilerini fark etmelerine olanak tanır.



Şekil 1. *Fields of Fuel* ara yüzü(*fieldsoffuel.org* 2024)

2.2.2. C-ROADS

C-ROADS, bölgesel grupların iklim stratejilerinin uzun vadede ortaya çıkaracağı etkileri analiz eden ve görselleştiren çevrimiçi bir politika simülasyon aracıdır. Şekil 2'de görüldüğü gibi verileri ülkelere göre ayıran ve üst kısmında grafikleri barındıran bir arayüze sahiptir. Bu araç, ülkelerin Birleşmiş Milletler'e sundukları emisyon azaltma taahhütlerinin etkilerini değerlendirmek için önemli bir kaynak olmuştur. Söz konusu taahhütler, farklı azaltma oranları ve hedef yılları içerirken, C-ROADS sayesinde bu politikaların küresel sıcaklık artışını 2°C'nin altında tutmak için yeterli olup olmadığı hızla analiz edilebilir. Simülatör, iklim değişikliği ile mücadelede bilgileri daha geniş kitlelere ulaştırmayı hedefleyerek ücretsiz olarak sunulmaktadır.

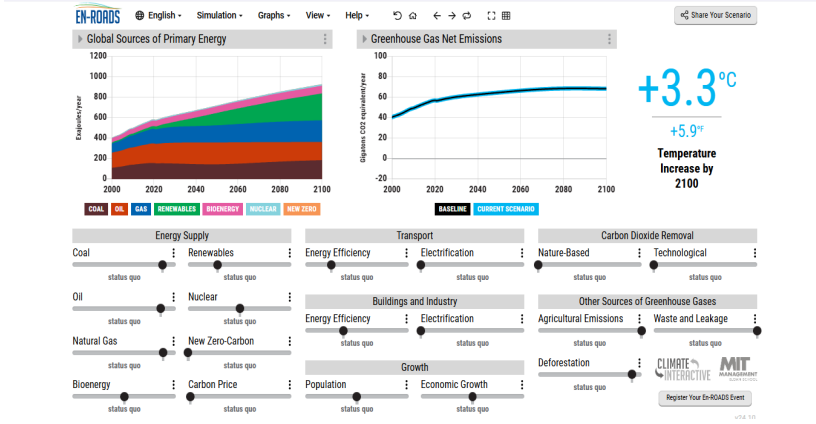


Şekil 2. C-ROADS ara yüzü(Climata Interactive & MIT Sloan Sustainability Initiative,2024).

C-ROADS, Climate Interactive, MIT, Ventana Systems ve UML İklim Değişikliği Girişimi ortaklığında geliştirilmiştir. İsminin açılımı, “Climate Rapid Overview and Decision Support” (Hızlı İklim Genel Bakışı ve Karar Desteği) şeklindedir. Model, eski Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli Başkanı Sir Robert Watson liderliğindeki bağımsız bir bilimsel komite tarafından detaylı bir şekilde incelenmiş ve yaygın kullanım için tavsiye edilmiştir.

2.2.3. EN-ROADS

EN-ROADS, enerji ve iklim politikalarının küresel etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmeyi mümkün kılan bir simülasyon aracıdır. Şekil 1’de EN-ROADS’un arayüzü görünmektedir. Arayüzde petrol fiyatı, kömür fiyatı, ormansızlaştırma, elektrifikasyon gibi birçok parametre mevcuttur. Kullanıcılar, karbon fiyatlandırması, ulaşımın elektrikli hâle getirilmesi ve sürdürülebilir tarım teknikleri gibi çeşitli politikaların enerji maliyetleri, küresel sıcaklık artışı, hava kalitesi ve deniz seviyesindeki değişiklikler gibi pek çok faktör üzerindeki etkilerini keşfedebilir.



Şekil 3. EN-ROADS ara yüzü (Climate Interactive & MIT Sloan Sustainability Initiative, 2024)

Bu simülasyon, Climate Interactive, MIT Sloan Sürdürülebilirlik İnisiyatifi ve Ventana Systems tarafından geliştirilmiştir. EN-ROADS, en güncel bilimsel verilere dayanan bir sistem dinamikleri modeliyle tasarlanmış ve kapsamlı iklim, enerji ve entegre değerlendirme modelleriyle uyumlu hâle getirilmiştir. Çevrimiçi olarak ücretsiz sunulan simülasyon, basit bir dizüstü bilgisayarda dahi hızlı bir şekilde çalışabilir ve kullanıcı dostu bir arayüz sunar. Ayrıca, birçok dil seçeneğiyle daha geniş bir kitleye hitap etmektedir.

EN-ROADS'un hedefi, kullanıcıların öncelik verdikleri konular ile sürdürülebilir bir geleceği şekillendiren politikalar arasındaki bağlantıları anlamalarını sağlamaktır.

2.3. EN-ROADS İklim Simülasyonu ve Enerji

EN-ROADS simülasyonu, enerji sistemleriyle ilgili çeşitli grafikler sunmakta ve bu grafikler aracılığıyla kullanıcıların enerji politikalarının etkilerini analiz etmeleri sağlanmaktadır. Bu grafikler, enerji kaynaklarının tüketiminden fiyatlarına ve karbon emisyonlarından yenilenebilir enerji yatırımlarına kadar geniş bir yelpazede bilgi sunmaktadır. Aşağıda, enerjiyle ilgili temel grafikler özetlenmiştir:

Enerji Kullanımı (Energy Consumption by Source);

- Enerji tüketiminin, farklı kaynaklara (fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji, nükleer enerji vb.) göre zaman içindeki dağılımı görselleştirilmektedir. Bu grafik, enerji sistemindeki değişimlerin kaynağa dayalı olarak

analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

Karbon Emisyonları Kaynağa Göre (CO₂ Emissions by Source);

▪ Karbon emisyonları, fosil yakıt türlerine (kömür, petrol, doğal gaz) göre ayrılarak sunulmaktadır. Bu grafik, farklı enerji kaynaklarının emisyon profillerinin anlaşılmasını sağlamaktadır.

Enerji Fiyatları (Energy Prices by Source);

▪ Enerji kaynaklarının fiyatlarının (kömür, doğal gaz, petrol, rüzgar, güneş vb.) zaman içindeki değişimi modellenmektedir. Karbon fiyatlandırması gibi müdahalelerin fiyatlar üzerindeki etkisi bu grafik ile değerlendirilmektedir.

Küresel Enerji Talebi (Global Energy Demand);

▪ Enerji talebi, sektörler (sanayi, ulaşım, binalar vb.) arasında dağılımı ile birlikte incelenmektedir. Bu grafik, toplam talebin zaman içindeki değişimlerini ortaya koymaktadır.

Elektrik Üretimi (Electricity Generation by Source);

▪ Elektrik üretiminin enerji kaynaklarına göre dağılımı zaman içinde analiz edilmekte ve yenilenebilir enerjiye geçiş süreçleri izlenebilmektedir.

Enerji Verimliliği (Energy Efficiency Impacts);

▪ Enerji verimliliği politikalarının enerji tüketimi ve karbon emisyonları üzerindeki etkileri bu grafikte görselleştirilmektedir.

Fosil Yakıt Kullanımı (Fossil Fuel Use);

▪ Fosil yakıtların kullanım miktarları ve bu miktarların zaman içinde değişimleri detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

Yenilenebilir Enerji Yatırımları (Renewable Energy Investments);

▪ Yenilenebilir enerji kaynaklarına (örneğin, rüzgar ve güneş enerjisi) yapılan yatırımlar ile bu yatırımların elektrik üretimine etkisi incelenmektedir.

Küresel Enerji Karışımı (Global Energy Mix);

▪ Farklı enerji kaynaklarının toplam enerji üretimindeki oranları görselleştirilmekte ve bu oranların zaman içindeki değişimleri analiz edilmektedir.

Biyoenerji Kullanımı (Bioenergy Use);

▪ Biyoenerji kaynaklarının enerji sistemindeki rolü ve bu rolün zaman içindeki büyüme veya azalma eğilimleri görselleştirilmektedir.

Bu grafikler, enerji politikalarının uzun vadeli etkilerinin değerlendirilmesi ve enerji sistemlerindeki dönüşümlerin izlenmesi için güçlü bir analiz aracı sunmaktadır. Her bir grafik, politika müdahalelerinin enerji kaynakları ve çevresel sonuçlar üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde inceleme olanağı sağlamaktadır.

2.4. Global Schools Aktivite Rehberleri ve Smithsonian Science for Global Goals Modülleri

2.4.1. Global Schools Aktivite Rehberleri

Global Schools Aktivite Rehberleri, 14'ten fazla kapsamlı çalışmayı içeren literatür incelemelerine dayanmakta olup, Sürdürülebilir Kalkınma Eğitimi'nin (ESD) akademik başarı üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koymaktadır. Stanford Üniversitesi tarafından yapılan bir değerlendirmede incelenen 119 hakemli çalışmanın %90'ında öğrenci becerilerinin arttığı, %86'sında ise öğrencilerde olumlu değişiklikler gözlemlendiği belirtilmiştir. Bunun yanı sıra ESD müfredatının özsaygı, özerklik, karakter gelişimi, olgunluk, güçlendirme, sözlü iletişim, liderlik ve iş birliği gibi sosyal-duygusal ve yumuşak becerilerin gelişimine katkı sağladığı görülmektedir.

Araştırmalar, okullardaki yeşil alanların hafıza ve bilişsel yetenekler üzerinde olumlu etkileri olduğunu ve sosyal etkileşim için açık alanların sağlanmasının öğrencilerin zihinsel ve fiziksel iyilik hâllerini destekleyen sağlıklı bir sosyal iklim oluşturduğunu göstermektedir.

Global Schools aktivite rehberleri, Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) 3, 4, 6 ve 12 üzerine odaklanarak tasarlanmıştır. Bu rehberlerde sınıf içi aktiviteler, konu içeriği, araştırma ve veri çalışmaları, harekete geçme etkinlikleri, öğrenci faaliyetleri ve değerlendirme gibi bölümler bulunmaktadır. Her rehber, sınıf ve okul ortamında uygulanabilecek etkinlik önerileri, faydalı bağlantılar, uygulama araçları ve çalışma kağıtlarını içermektedir.

2.4.2. Smithsonian Science for Global Goals Modülleri

Smithsonian Science for Global Goals Modülleri, bilim ve sosyal bilimler eğitimini birleştirerek kapsamlı bir öğrenme yaklaşımı sunmaktadır. Bu yöntem, öğrencilerin öncelikle kendi kimliklerini ve topluluklarının kimliğini anlamalarına, ardından sorgulama ve araştırma süreçlerine katılmalarına olanak tanır. Bu süreçte eleştirel düşünme ve sistematik analiz

becerileri geliştirilirken, öğrencilerin bilimsel bilgilerini toplumsal eyleme dönüştürmeleri teşvik edilmektedir.

Smithsonian Science for Global Goals, araştırmaya dayalı bilim eğitimi ile toplumsal katılımı bir araya getiren bir yaklaşıma sahiptir. 8-17 yaş grubundaki öğrenciler; iklim değişikliği, okyanus sağlığı ve temiz enerji gibi küresel öneme sahip konuları sosyal, etik, ekonomik ve çevresel yönlerden ele almaktadır. Bu modüller, karmaşık sosyo-bilimsel sorunlar hakkında farkındalık yaratarak, öğrencilerin, öğretmenlerin ve ebeveynlerin toplumsal ve sağlıkla ilgili problemlere karşı aktif bir şekilde çözüm geliştirmelerine olanak sağlar. Smithsonian Science for Global Goals, farklı temalar altında çeşitli eğitim modülleri sunmaktadır. Bazıları şu şekildedir:

- Sıtma! Sivrisinek kaynaklı hastalıklara karşı nasıl korunabiliriz? (Şu anda mevcut!)
- Beslenme! Herkes için dengeli ve iyi bir beslenmeyi nasıl sağlayabiliriz? (Şu anda mevcut!)
- Sürdürülebilir Şehirler! Daha sağlıklı ve yaşanabilir şehirler nasıl oluşturabiliriz? (Geliştirme aşamasında)
- Biyoçeşitlilik! Dünya'nın doğal kaynaklarını koruma ile insan ihtiyaçlarını nasıl dengeleyebiliriz? (Geliştirme aşamasında)
- Su! Herkes için adil bir su kullanımını nasıl sağlayabiliriz?
- Enerji! Enerjiye erişim ve çevresel kaygılar arasındaki dengeyi nasıl kurabiliriz?
- Hava ve İnsanlar! Ekonomik gereklilikler ile hazırlık süreçlerini nasıl dengeleyebiliriz?
- Biyoteknoloji ve İnsanlar! Teknolojiyi, etik değerlerle birlikte nasıl kullanabiliriz?
- Pandemi! Bir pandemiye hazırlık süreçlerini nasıl yönetebiliriz?
- Kalkınma ve Okyanuslar! Bugünkü ihtiyaçları, geleceğin hedefleriyle nasıl uyumlu hâle getirebiliriz?
- Tarım! Üretim, ekonomi ve çevre arasındaki dengeyi nasıl sağlayabiliriz?

2.4.3. Modül Yapısı

Her modül; Keşfet, Anla ve Harekete Geç adımlarıyla yapılandırılmıştır. Bu yapı sayesinde öğrenciler:

1- Sistem içerisindeki ilişkileri ve mevcut hafifletme stratejilerini keşfeder,

2- Sistem üzerindeki değişiklik alanlarını anlamak için analitik bir bakış açısı geliştirir,

3- Harekete geçerek, belirlenen sistem alanlarında çözümler üretmeye yönlendirilir.

Bu modüller, öğrencilerin hem bilimsel hem de toplumsal becerilerini geliştirirken, sürdürülebilir bir dünya için farkındalık ve katılım sağlamayı hedeflemektedir.

2.5. Ders Planı

Tablo 1. Ders planı tablosu

Aktivite	Tanım	Materyaller ve Teknoloji	Yaklaşımlar-Uygulamalar	Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri
Keşfet	Hayat Tarzi Ve Sera Gazı Üretimi İlişkisi	En-Roads Simülator https://www.Climateinteractive.Org/Tools/En-Roads/	İklim Değişikliği Enerji İlişkisi En-Roads Senaryosu Oluşturma	SKH 7, SKH 13, SKH 9
Anla	İklim Değişikliği Ve Enerji Arasında Nasıl Bir İlişki Var	En-Roads Grafikleri Okuma	En-Roads Enerji Grafiklerini Yorumlama	SKH 7, SKH 13-SKH 16
Harekete Geç	Enerji Kaynaklarının Geleceği	Wwf.webenergy Hesaplayıcı https://recalc.wwf.no/	Enerjinin Geleceğini Tahminleme Data Yorumlama	SKH 13, SKH 11, SKH 12, SKH 10

Tablo 2. STEM Kazanımları

Fen	Teknoloji	Matematik
İklim değişikliği kavramını tanıtır. Şehirleşme ile sera gazları arasındaki ilişkiyi açıklar. Karbon ayak izi ve ekolojik ayak izi kavramlarını açıklar.	Yapay zekâ tabanlı simülasyonlar ile karbon ayak izi ölçer.	Grafik okuma ve yorumlama bilgisini kullanır. Yüzde hesabı yapar.

2.6. MEB Kazanımları

2.6.1. Biyoloji

“BİY.10.2.5. Ekolojik sürdürülebilirliğin önemini yorumlayabilme

a) Ekolojik sürdürülebilirliğin önemini inceler.

b) Ekolojik sürdürülebilirliğin önemini bağlamdan kopmadan dönüştürür.

c) Ekolojik sürdürülebilirliğin önemini anlamı değiştirmeyecek şekilde yeniden ifade eder.” [1].

“BİY.10.2.6. Çevresinde sürdürülebilirliği kısıtlayan durumlarla ilgili gözleme dayalı tahmin yapabilme

a) Çevresinde sürdürülebilirliği kısıtlayan durumları gözlem ve deneyimleriyle ilişkilendirir.

b) Çevresinde sürdürülebilirliği kısıtlayan durumlara ilişkin çıkarım yapar.

c) Çevresinde sürdürülebilirliği kısıtlayan durumlara ilişkin yargıda bulunur.” [1].

“BİY.10.2.7. Ekolojik ayak izini küçültebilme yollarını bilimsel olarak sorgulayabilme [1].

a) Ekolojik ayak izini küçültebilme yollarıyla ilgili araştırma sorusu belirler.

b) Ekolojik ayak izini küçültebilme yollarıyla ilgili araştırma sorusunu cevaplamak için bir tablo/model oluşturur.

c) Ekolojik ayak izini küçültebilme yollarıyla ilgili araştırma planlar.

ç) Ekolojik ayak izini küçültebilme yollarıyla ilgili elde ettiği verileri analiz eder ve yorumlar.” [1].

“BİY.10.2.8. Doğal kaynakların ve biyoçeşitliliğin korunması için alınan önlemleri sorgulayabilme [1]

a) Doğal kaynakların ve biyoçeşitliliğin korunması için alınan önlemlere ilişkin merakını ifade eder.

b) Doğal kaynakların ve biyoçeşitliliğin korunması için alınan önlemler ile ilgili sorular sorar.

c) Doğal kaynakların ve biyoçeşitliliğin korunması için alınan önlemler ile ilgili bilgi toplar.

ç) Doğal kaynakların ve biyoçeşitliliğin korunması için alınan önlemler ile ilgili topladığı bilgilerin doğruluğunu değerlendirir.

d) Doğal kaynakların ve biyoçeşitliliğin korunması için alınan önlemler ile ilgili topladığı bilgiler üzerinden çıkarım yapar.”

“BİY.10.2.9. Çevresinde atık yönetimi konusunda yapılan çalışmalarla ilgili bilgi toplayabilme [1].

a) Çevresinde atık yönetimi konusunda yapılan çalışmalarla ilgili bilgilere ulaşmak için kullanacağı araçları belirler.

b) Belirlediği araçları kullanarak çevresinde atık yönetimi konusunda yapılan çalışmalarla ilgili bilgilere ulaşır.

c) Çevresinde atık yönetimi konusunda yapılan çalışmalarla ilgili ulaştığı bilgileri doğrular.

ç) Çevresinde atık yönetim konusunda yapılan çalışmalarla ilgili ulaştığı bilgileri kaydeder.” [1].

2.6.2. Fizik

“FİZ.10.4.5.Yenilenebilen ve yenilenemeyen enerji kaynaklarını karşılaştırabilme [1].

a) Yenilenebilen ve yenilenemeyen enerji kaynaklarına ilişkin özellikleri belirler.

b) Yenilenebilen ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının avantajlarını listeler.

c) Yenilenebilen ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının dezavantajlarını listeler [1].”

2.6.3. Kimya

“KİM.10.3.2. Kimyasal tepkimeler sonucunda atmosferin doğasındaki değişimin ekosisteme etkilerine yönelik problem çözebilme

a) Kimyasal tepkimeler sonucunda atmosferin doğasındaki değişimin ekosisteme etkilerine yönelik problemleri (hava kirliliği, ozon azalımı, asit yağmurları, sera etkisi, küresel ısınma vb.) belirler.

b) Belirlediği problemlerin ekosistem (canlı, cansız, sucul sistem, toprak, hava,vb.) üzerindeki etkilerini özetler.

c) Problemlerin çözümüne yönelik veriye dayalı tahminlerde bulunur.

c) Problemin çözümüne yönelik önermeler üzerinden akıl yürütür.

d) Problemin çözümüne ilişkin değerlendirmelerde bulunur [1].”

“KİM.12.3.3. Yapay zekâ uygulamalarının sürdürülebilirliğe etkilerine yönelik eleştirel düşünebilme [1].

a) Yapay zekâ uygulamalarının sürdürülebilirliğe etkilerini sorgular.

b) Yapay zekâ uygulamalarının sürdürülebilirliğe etkileri ile ilgili akıl yürütür.

c) Yapay zekâ uygulamalarının sürdürülebilirliğe etkilerine ilişkin ulaştığı çıkarımlar üzerine yansıtma yapar.”

2.6.4. Matematik

“MAT.H.1.1. Doğrusal ilişkiler içeren problemlerin çözümlerinde matematiksel araç ve teknolojilerden yararlanabilme [1]

a) Doğrusal ilişkiler içeren problemlerin çözümlerinde kullanılacak matematiksel araç ve teknolojileri tanıır.

b) Doğrusal ilişkiler içeren problemlerin çözümleri için kullanılacak matematiksel araç ve teknolojilerden uygun olanları seçer.

c) Doğrusal ilişkiler içeren problemlerin çözümleri için belirlediği matematiksel araç ve teknolojiyi kullanır.”

“MAT.H.5.1. Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım veya tahminleri tartışabilme [1]

a) Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım veya tahminlere yönelik istatistiksel temellendirme yapar.

b) Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım veya tahminlere yönelik hataları/yanlılıkları tespit eder.

c) Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım veya tahminleri çürütür/kabul eder.”

“MAT.9.7.1. Tek nicel değişkenli veri dağılımları ile çalışabilme ve tek nicel değişken içeren veriye dayalı karar verebilme [1]

a) Nicel veriye dayalı istatistiksel araştırma gerektiren gerçek yaşam durumlarını belirler.

b) Bağlam içerisinde nicel veri dağılımlarını betimleyen ve karşılaştıran araştırma soruları oluşturur.

c) Nicel verileri toplamak/elde etmek için plan yapar.

ç) Nicel verileri toplayarak/elde ederek analize hazırlar.

d) Araştırma sorusu bağlamında toplanan/elde edilen nicel verileri analiz etmek için görselleştirme (nokta grafiği, histogram, kutu grafiği) ve/veya özetleme [aritmetik ortalama, ortanca (medyan), tepe değer (mod), açıklık, standart sapma] araçlarından uygun olanı seçer.

e) Araştırma sorusu bağlamında toplanan/elde edilen nicel verileri belirlediği araçlarla analiz eder.

f) Nicel veri dağılımlarına dayalı istatistiksel araştırma sonucu elde edilen çıktılardan hareketle verilerin arasını ve ötesini yorumlayarak sonuç çıkarır.

g) Nicel veriye dayalı araştırmadan elde edilen sonuçları, araştırma sorusu bağlamında değerlendirir.”

“MAT.9.7.2. Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan tek nicel değişkenli veri dağılımlarına ilişkin istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım ve/veya tahminleri tartışabilme [1]

a) Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan nicel veri dağılımlarına ilişkin istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım ve/veya tahminlere yönelik istatistiksel temellendirme yapar.

b) Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan nicel veri dağılımlarına ilişkin istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım ve/veya tahminlere yönelik hataları ve/veya yanlışlıkları tespit eder.

c) Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan nicel veri dağılımlarına ilişkin istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım ve/veya tahminleri çürütür/kabul eder.”

“MAT.10.6.2. Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan iki kategorik değişkenli verilerin ilişkililiğine dayalı istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım ve/veya tahminleri tartışabilme [1]

a) Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan iki kategorik değişken arasındaki ilişkililiği yansıtan istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım ve/veya tahminlere yönelik istatistiksel temellendirme yapar.

b) Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan iki kategorik değişken arasındaki ilişkililiğe dair istatistiksel görsel, özet,

sonuç, yorum, çıkarım ve/ veya tahminlere yönelik hataları ve/veya yanlışlıkları tespit eder.

c) Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan iki kategorik değişken arasındaki ilişkililiğe dair istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım ve/ veya tahminleri çürütür/kabul eder.”

“MAT.11.3.2. Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan iki nicel değişkenli verilerin ilişkililiğine dayalı istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım ve/veya tahminleri tartışabilme [1]

a) Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan iki nicel değişken arasındaki ilişkililiğe dair istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım ve/veya tahminlere yönelik istatistiksel temellendirme yapar.

b) Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan iki nicel değişken arasındaki ilişkililiğe dair istatistiksel görsel, özet, sonuç, yorum, çıkarım ve/veya tahminlere yönelik hataları ve/veya yanlışlıkları tespit eder.

c) Günlük hayatta karşılaşılan veya başkaları tarafından oluşturulan iki nicel değişken arasındaki ilişkililiğe dair çürütür/kabul eder.” [1].

2.7. EN-ROADS Simülatörü ve Ders Planı: Çıkarımlar

EN-ROADS simülatöründen elde edilen enerji grafikleri, STEM ders planında belirtilen kazanımlar doğrultusunda kullanıldığında, öğrencilere sürdürülebilirlik ve enerji-iklim değişikliği ilişkisini anlamaları açısından çok boyutlu bir bakış açısı kazandırılabileceği düşünülmektedir. Bu kapsamda şu çıkarımlar yapılmıştır:

▪ **İklim Değişikliği ve Enerji Kaynakları:** EN-ROADS simülatörünün, farklı enerji senaryolarının iklim değişikliği üzerindeki etkilerinin görselleştirilmesine olanak sağladığı tespit edilmiştir. Bu sayede yenilenebilir enerji kaynaklarının öneminin vurgulanabileceği ve fosil yakıtların sürdürülebilirlik üzerindeki olumsuz etkilerinin açıklanabileceği değerlendirilmiştir.

▪ **Karar Verme ve Politika Geliştirme:** Simülatörün, politikalar ve enerji yatırımları arasındaki bağlantıların kurulmasında etkili olduğu ve öğrencilerin sürdürülebilir enerji çözümleri geliştirmelerine katkı sağlayabileceği öngörülmüştür. Karbon vergisi veya enerji verimliliğini artırma stratejilerinin etkilerinin analiz edilebilmesi, çözüm odaklı düşüncenin teşvik edilmesini mümkün kılmaktadır.

▪ **Veri Okuma ve Yorumlama:** EN-ROADS'un sağladığı grafiklerin, öğrencilerin grafik okuma, yorumlama ve veri analizi becerilerinin geliştirilmesine katkı sunduğu belirlenmiştir. Bu grafikler aracılığıyla enerji tüketim trendleri ve karbon salınımı analiz edilerek geleceğe yönelik tahminlerde bulunulabileceği ifade edilmiştir.

▪ **Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH):** Simülâtörün, SKH 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji), SKH 13 (İklim Eylemi) ve diğer ilgili hedeflerle bağlantılı olarak, enerji üretimi ve tüketiminin sürdürülebilir kalkınma üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine olanak sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

▪ **Disiplinler Arası Yaklaşım:** STEM kazanımları ile uyumlu bir şekilde, öğrencilerin iklim değişikliği ve enerji arasındaki ilişkiyi bilimsel, teknolojik, matematiksel ve biyolojik perspektiflerden ele alabilmelerinin mümkün olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede hem analitik düşünme hem de çevresel farkındalık kazanılabileceği öngörülmüştür.

▪ **Eyleme Geçme Fırsatları:** Simülâtör çıktılarının, öğrencilerin yerel veya küresel ölçekte enerji ve iklim çözümleri üretmeleri için teşvik edici bir araç olarak kullanılabilceği belirlenmiştir. Bu bağlamda, karbon ayak izini azaltmaya yönelik önerilerin geliştirilmesi veya enerji tasarrufu kampanyalarının planlanması gibi eylemlerin gerçekleştirilebileceği ifade edilmiştir.

Yapılan bu çıkarımların, dersin genel amaçlarına ve sürdürülebilirlik bilincinin kazandırılmasına katkı sunacağı değerlendirilmiştir. EN-ROADS simülâtörünün, karmaşık enerji-iklim dinamiklerinin anlaşılmasına ve sürdürülebilir çözümlerin üretilmesine olanak sağlayan etkili bir eğitim aracı olduğu sonucuna varılmıştır.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada, EN-ROADS simülâtörü ve STEM tabanlı ders planı kullanılarak sürdürülebilirlik bilincinin öğrencilere kazandırılması hedeflenmiştir. İklim değişikliği, enerji kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve çevresel etkilerin analiz edilmesi gibi konuların eğitim içeriğine entegre edilmesi, öğrencilerin bu alanlarda farkındalık ve bilgi düzeylerinin artırılmasına olanak sağlamıştır. Eğitim teknolojileriyle desteklenen bu yaklaşım, öğrencilerin hem analitik düşünme becerilerini geliştirmiş hem de iklim ve enerji sorunlarına yönelik çözüm üretme kapasitesini artırmıştır.

Ders planında yer alan multidisipliner yapı, fizik, kimya, biyoloji ve

matematik gibi farklı STEM alanlarının harmanlanmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, öğrencilere yalnızca disiplinler arası bağlantıları keşfetme fırsatı sunmakla kalmamış, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda enerji ve çevre sorunlarını daha iyi anlamalarını sağlamıştır. Özellikle, grafik okuma, veri analizi ve problem çözme gibi becerilerin geliştirilmesi, öğrencilerin gerçek dünya problemlerine yönelik bilimsel bir bakış açısı kazanmalarını desteklemiştir.

1- Simülasyonların Eğitimde Daha Yaygın Kullanımı

EN-ROADS gibi simülasyonların eğitim süreçlerine entegrasyonu artırılmalıdır. Bu tür araçlar, öğrencilere enerji senaryolarını görselleştirme ve politika etkilerini analiz etme imkânı sunarak, öğrenme deneyimlerini derinleştirmektedir. Eğitimciler için bu teknolojilere yönelik profesyonel gelişim programları düzenlenmelidir.

2- Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ile Daha Güçlü Bağlantılar

Ders planlarında SKH 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji), SKH 13 (İklim Eylemi) gibi hedeflere daha fazla atıfta bulunularak, küresel bağlamda enerji ve iklim değişikliği ile ilgili farkındalık artırılabilir. Bu bağlamda, yerel ve küresel enerji problemlerine dayalı vaka analizleri yapılabilir.

3- Disiplinlerarası Çalışma ve Projelerin Teşvik Edilmesi

Fizik, kimya, biyoloji ve matematik gibi farklı disiplinlerin bir arada ele alındığı projeler teşvik edilmelidir. Örneğin, öğrencilerin yenilenebilir enerji sistemleri üzerine tasarım ve modelleme yapmaları, multidisipliner bir öğrenme deneyimi sunabilir.

4- Öğrenci Katılımının ve Geri Bildiriminin Artırılması

Ders planları, öğrenci geri bildirimlerine dayalı olarak güncellenmelidir. Öğrencilerin hangi aktivitelerden daha fazla fayda sağladığı ve hangi alanlarda desteğe ihtiyaç duyduğu analiz edilerek içerik daha etkili hâle getirilebilir.

5- Uluslararası Eğitim İş Birliklerinin Güçlendirilmesi

Global Schools gibi sürdürülebilirlik odaklı uluslararası platformlarla iş birliği yapılabilir. Bu tür iş birlikleri, öğrencilerin farklı kültürlerdeki yaşlılarıyla bilgi paylaşımlarını sağlarken, küresel vatandaşlık bilincini artıracaktır.

6- Toplumsal Farkındalık ve Eyleme Geçme

Öğrencilerin sürdürülebilir enerji ve çevre projelerine katılımı teşvik edilmelidir. Yerel topluluklara yönelik farkındalık kampanyaları veya

enerji verimliliği projeleri, öğrencilere toplumsal sorumluluk bilinci kazandırırken, pratik deneyimler edinmelerine olanak tanır.

Bu ders planı, STEM eğitimine sürdürülebilirlik temasını entegre ederek çok boyutlu bir öğrenme modeli sunmaktadır. Bu tür yaklaşımların diğer eğitim kurumlarında da benimsenmesi, öğrencilerin hem sürdürülebilir enerji kullanımı hem de çevresel sorunlarla mücadelede aktif roller üstlenmelerini sağlayacaktır. Eğitim teknolojilerinin ve disiplinler arası yaklaşımların kullanımı, geleceğin küresel sorunlarına duyarlı bireyler yetiştirilmesinde kritik bir adım olarak değerlendirilmelidir.

Referanslar

- [1] MEB (Milli Eğitim Bakanlığı). (2024). Maarif modeli kazanımları. Alındığı adres: <https://tymm.meb.gov.tr/ogretim-programlari>.
- [2] Babiker, M., Berndes, G., Blok, K., Cohen, B., Cowie, A., Geden, O., Ginzburg, V., Leip, A., Smith, P., Sugiyama, M., & Yamba, F. (2022). Cross-sectoral perspectives (Chapter 12). In P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley (Eds.), *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.005>.
- [3] Ediger, V. Ş. (2017). Enerji jeopolitiğinin uluslararası iklim değişikliği girişimleri üzerindeki etkisi. *Uluslararası İlişkiler*, 14(54), 45-70.
- [4] Uzmen, R., & Arar, A. A. (2024). 21. yüzyılda enerji kullanımı ve iklim değişikliği. T.C. Dışişleri Bakanlığı. https://www.mfa.gov.tr/21_yuzyilda-enerji-kullanimi-ve-iklim-decisikligi.tr.mfa.
- [5] Akın, F. N. (2021). Küresel iklim değişikliği hakkında en çok merak edilenler. *Bilim ve Teknik*, Kasım 2021.
- [6] Aksay, C. S., Ketenoğlu, O., & Kurt, L. (2005). Küresel ısınma ve iklim değişikliği. *SÜ Fen Dergisi*, 25, 29-41.
- [7] Yapraklı, S., & Bayramoğlu, T. (2017). Türkiye’de enerji kullanımı ve iklim değişikliği: 1990-2030 dönemine ilişkin tanımsal bir uygulama. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 19(2), 430-453.
- [8] Teaching for Future.(2018) Module 4: Data, tools, and resources – Using climate simulations and games. <https://teachingthefuture.eu/module-4-data-tools-and-resources-using-climate-simulations-and-games/>.
- [9] Şen, A. İ., Kocabaşoğlu, B., Biçer, B., Kalkan, Ç., Şahin, E., Özel, E., Evren Özer, İ., Selvi, M., Büyükkata, M., Çevik, M., Keleş, Ö., Oktay, Ö., Canbazoğlu Bilici, S., Çevik, U., & Özdem Yılmaz, Y. (2023). Sürdürülebilir kalkınma ve STEM eğitimi. Nobel Akademik Yayıncılık. <https://www.nobelyayin.com/surdurulebilir-kalkinma-ve-stem-egitimi-20988.html>.
- [10] Çorlu, M. S., & Çallı, E. (2020). STEM kuram ve uygulamaları.
- [11] Smithsonian Science For Global Goals. (2024). Climate resilience! How can commu-

nities adapt to a changing climate? Smithsonian Institution.

[12] Smithsonian Science For Global Goals. (2024). Climate Action! Smithsonian Institution.

[13] Global Schools Platform. (2024). Global schools activities guide, Responsible Consumption.

[14] 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. DOI: 10.1017/9781009157896.

[15] Church, J. A., & White, N. J. (2011). Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, 32(4–5), 585–602. [DOI: 10.1007/s10712-011-9119-1](<https://doi.org/10>)

[16] FieldsofFuel.org. (2024). Fields of Fuel: A sustainable farming game simulator [Screenshot]. Retrieved from <http://fieldsoffuel.org/>

[17] Climate Interactive & MIT Sloan Sustainability Initiative. (2024). EN-ROADS Climate Solutions Simulator [Screenshot]. Retrieved from <https://en-roads.climateinteractive.org/>

[18] Climate Interactive & MIT Sloan Sustainability Initiative. (2024). C-ROADS Climate Change Policy Simulator [Screenshot]. Retrieved from <https://c-roads.climateinteractive.org/>

Tel Ark Eklemeli İmalat Teknolojisinin Çevresel Etkileri ve Sürdürülebilirlik İçin Düzenleyici Önlemler

Doruk Gürkan¹

Özet

Tel Ark Eklemeli İmalat (TAEİ), büyük ölçekli metal parçaların verimli üretiminde tercih edilen bir eklemeli imalat yöntemidir. TAEİ teknolojisi; havacılık, uzay, savunma, denizcilik, otomotiv, petrol, enerji, biyomedikal gibi pek çok alanda sıklıkla tercih edilen bir yöntem olmaya doğru gitmektedir. Geleneksel imalat yöntemlerine göre malzeme israfını azaltması ve hızlı üretim sağlaması TAEİ'nin öne çıkan avantajlarındanır. TAEİ uygulamaları, yüksek enerji gereksinimi nedeniyle özellikle elektrik tüketimi ve buna bağlı olarak ortaya çıkan karbon emisyonları açısından çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle çelişebilir. Bu durum, TAEİ süreçlerinin çevreye olan olumsuz etkisini azaltmaya yönelik düzenleyici önlemleri gündeme getirmektedir. Özellikle Avrupa Birliği'nin 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri doğrultusunda, enerji verimliliği, atık yönetimi ve emisyon azaltımını teşvik eden düzenlemeler TAEİ'nin çevresel performansını iyileştirmeye yönelik çalışmaları başlatmıştır. Bu çalışmada, TAEİ teknolojisinin çevresel etkileri derinlemesine incelenmekte ve bu etkilerin azaltılması amacıyla uygulanan sürdürülebilirlik odaklı düzenlemeler değerlendirilmektedir. TAEİ süreçlerinde enerji tüketimini azaltmaya yönelik yeni

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250310>

¹ İstanbul Gedik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, dorukgrkan@yahoo.com, ORCID: 0000-0001-8507-8592

teknolojilerin geliştirilmesi, kapalı döngü malzeme sistemlerinin entegrasyonu, düşük karbonlu metal alaşımlarının kullanılması ve geri dönüşüm oranlarının artırılması gibi konular üzerinde durulmaktadır. Ayrıca, Avrupa Birliği tarafından belirlenen çevre standartlarının TAEİ süreçlerine nasıl uygulanabileceği, sürdürülebilir imalat için belirlenen emisyon azaltma hedeflerinin ve kaynak yönetim stratejilerinin endüstriye uyarlanması da ele alınmaktadır. TAEİ'nin çevresel ayak izini küçültmeye yönelik gelişmeler, daha çevre dostu bir endüstriyel üretim yapısına ulaşmak için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada değerlendirilen düzenleyici gelişmelerin ve sürdürülebilir uygulamaların TAEİ süreçlerine entegre edilmesi, hem çevresel hem de endüstriyel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. TAEİ'nin sürdürülebilir imalat çerçevesiyle uyumlu hâle getirilmesi, gelecekteki üretim süreçlerinin çevresel etkisini azaltarak endüstriyel ekosistemin daha dayanıklı ve çevre dostu bir yapıya kavuşmasını destekleyecektir.

Anahtar Kelimeler: Tel Ark Eklemeli İmalat, Çevresel Etki, Sürdürülebilirlik, Düzenleyici Önlemler, Atık Yönetimi.

Environmental Impact of Wire Arc Additive Manufacturing Technology and Regulatory Measures for Sustainability

Abstract

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is a preferred additive manufacturing method in the efficient production of large-scale metal parts. WAAM technology is becoming a frequently preferred method in many fields such as aviation, space, defense, marine, automotive, petroleum, energy, and biomedical. Reducing material waste and providing fast production compared to traditional manufacturing methods are prominent advantages of WAAM. WAAM applications may conflict with environmental sustainability goals, especially in terms of electricity consumption and carbon emissions resulting from high energy requirements. This situation brings regulatory measures to the agenda to reduce the negative impact of WAAM processes on the environment. In line with the European Union's 2030 Sustainable Development Goals, regulations encouraging energy efficiency, waste management, and emission reduction have initiated studies to improve WAAM's environmental performance. In this

study, the environmental impacts of WAAM technology are examined in depth and sustainability-focused regulations implemented to reduce these impacts are evaluated. In WAAM processes, issues such as the development of new technologies to reduce energy consumption, the integration of closed-loop material systems, the use of low-carbon metal alloys and increasing recycling rates are emphasized. In addition, how the environmental standards determined by the European Union can be applied to WAAM processes, and how the emission reduction targets and resource management strategies determined for sustainable manufacturing can be adapted to the industry are also discussed. Developments aimed at reducing the environmental footprint of WAAM are critical importance to achieve a more environmentally friendly industrial production structure. Integrating the regulatory developments and sustainable practices evaluated in this study into WAAM processes is of great importance in terms of both environmental and industrial sustainability. Aligning WAAM with the sustainable manufacturing framework will reduce the environmental impact of future production processes and support the industrial ecosystem to become more resilient and environmentally friendly.

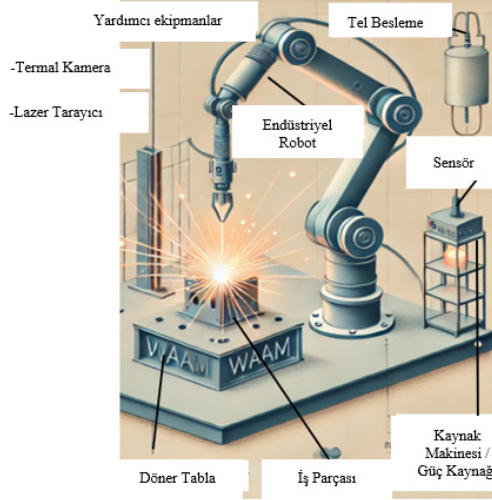
Keywords: Wire Arc Additive Manufacturing, Environmental İmpact, sustainability, Regulatory Measures; Waste Management.

1. Giriş

Tel Ark Eklemeli Üretim (TAEİ-WAAM), özellikle büyük ölçekli ve karmaşık şekilli metal parçaların imalatında, eklemeli imalatta dikkate değer bir ilerlemeye işaret etmektedir [1]. Metalik teli eritmek ve katman katman inşa etmek için ısı kaynağı olarak elektrik arkını kullanan TAEİ, geleneksel üretim yöntemlerine çok yönlü ve etkili bir alternatif sağlar [2]. Bu teknoloji; malzeme israfını en aza indirme, üretim zaman çizelgelerini hızlandırma ve takım masraflarını azaltma yeteneği nedeniyle büyük rağbet görmekte ve bu da onu havacılık, otomotiv, denizcilik ve enerji gibi çeşitli endüstrilerde cazip bir seçim hâline getirmektedir. Bununla birlikte, özellikle küresel sürdürülebilirlik hedefleri bağlamında giderek daha fazla benimsenmesiyle, enerji kullanımı, çevresel etkisi ve düzenleyici standartlara uyumluluk konusunda önemli endişeler ortaya çıkmaktadır [3].

TAEİ, geleneksel kaynak işlemlerinin özelliklerini modern eklemeli imalat ilkeleriyle birleştiren, onu büyük ölçekli metal bileşenlerin üretimi

için çok yönlü ve verimli bir teknoloji hâline getiren hibrit bir yöntemdir (Şekil 1). TAEİ, yüksek biriktirme oranlarına ve uygun maliyetli üretime olanak tanıyan bir tel besleme stoğu ve bir elektrik arki kullanarak ergimiş metali katman katman biriktirerek çalışır. Başlangıçta bir kaynak teknolojisi olarak geliştirilmiş olmasına rağmen TAEİ, karmaşık geometrileri kalıplara veya çıkarmalı işlemeye ihtiyaç duymadan doğrudan dijital bir modelden oluşturma yeteneğinden dolayı eklemeli imalat ailesinin bir parçası olarak kabul edilir [4]. Proses, paslanmaz çelikler, titanyum alaşımları, alüminyum alaşımları ve nikel bazlı süper alaşımlar dâhil olmak üzere çok çeşitli metalik malzemelerle uyumludur ve bu da onu çeşitli endüstrilerdeki uygulamalara uygun hâle getirir [5]. TAEİ, eklemeli imalatın hassasiyetini kaynak teknolojilerinin sağlamlığıyla birleştirerek malzeme verimliliği, üretim hızı ve ölçeklenebilirlik açısından benzersiz avantajlar sunmaktadır.



Şekil 1. TAEİ şematik gösterim

TAEİ, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla malzeme verimliliği ve üretim sürecindeki esneklik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak, bu teknoloji yoğun enerji tüketimi, karbon emisyonları ve atık yönetimi gibi çevresel faktörlerle doğrudan ilişkilidir. Günümüzde endüstriyel üretimde çevresel sürdürülebilirlik giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Üretim süreçlerinin düşük karbonlu, enerji-malzeme verimli ve çevre dostu hâle getirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, TAEİ'nin sürdürülebilir üretim stratejileri ile nasıl uyumlu hâle getirilebileceği kritik bir

araştırma konusu hâline gelmiştir. Avrupa Birliği'nin 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve Yeşil Mutabakat gibi küresel düzenlemeleri, endüstriyel süreçlerin çevresel etkilerini en aza indirmeyi teşvik etmektedir. TAEİ'nin sürdürülebilir üretim entegrasyonu için enerji tüketiminin azaltılması, geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı ve atık yönetiminde yenilikçi çözümler geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma, TAEİ süreçlerinin çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesini, enerji tüketimi ve karbon emisyonları bağlamında mevcut durumun analiz edilmesini ve sürdürülebilirlik odaklı iyileştirme önerilerinin geliştirilmesini amaçlamaktadır.

Son yıllarda iklim değişikliğini hafifletmeye ve endüstriyel karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik küresel çabalar yoğunlaşmıştır. Avrupa Birliği'nin 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH'ler) gibi çerçevelerle örneklenen bu çabalar, daha yeşil, daha sürdürülebilir üretim süreçlerine geçişin acil ihtiyacını vurgulamaktadır [6]. TAEİ, çeşitli endüstriyel avantajlar sunarken benzersiz çevresel ve sürdürülebilir zorluklar da sunmaktadır. Öncelikle, elektrik ark tabanlı bir süreç olduğu için yüksek enerji tüketimi gerektirir. Bazı geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük olsa da, sürdürülebilir üretim açısından hâla iyileştirilmesi gereken bir noktadır [2-3]. TAEİ süreçlerinin enerji tüketiminin yoğun odaklı olması, özellikle enerjinin ağırlıklı olarak yenilenemeyen fosil yakıtlardan sağlandığı bölgelerde karbon emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Ek olarak, metalik hammaddelerin üretimi ve kullanımının yanı sıra üretim süreci sırasında atık ve yan ürünlerin oluşması da karbon ayak izini artırmaktadır. Bir diğer kritik zorluk ise metal dumanları ve ince partiküller içeren emisyonlardır [7]. TAEİ süreçleri sırasında, havada asılı partiküller ve metal oksit emisyonları oluşarak, işçi sağlığı ve çevresel hava kirliliği açısından riskler yaratabilmektedir. Bu partiküllerin filtrelenmesi ve emisyonların kontrol altına alınması için yeni nesil hava tahliye sistemlerine ve düzenleyici standartlara uyulması gerekmektedir. Ayrıca, TAEİ'nin sunduğu yüksek üretim hızı, bazı durumlarda malzeme israfına da yol açabilir. Aşırı malzeme birikimi, destek yapıları ve hatalı üretim parçaları atık oluşumuna sebep olabilir. Bu bağlamda, kapalı döngü malzeme geri dönüşüm sistemlerinin entegrasyonu ve özelleştirilmiş üretim parametrelerinin kullanılması büyük önem taşımaktadır [8]. Bu avantajlar ve zorluklar birlikte değerlendirildiğinde, TAEİ'nin geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla sunduğu yenilikçi çözümlerin yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik açısından ele alınması gereken çeşitli iyileştirme alanlarının da bulunduğu

görülmektedir.

TAEİ'nin çevresel etkisi, enerji tüketiminin ötesine geçerek malzeme kullanımı ve atık yönetimi zorluklarını da içermektedir. TAEİ doğası gereği geleneksel çıkarmalı imalat yöntemlerinden daha fazla malzeme verimli olmasına rağmen aşırı biriktirme, destek yapısı gereklilikleri ve belirli metal alaşımlarının geri dönüştürülmesindeki sınırlamalar gibi faktörlerden dolayı hâlâ verimsiz durumdadır [8]. Bu sorunlar, israfı en aza indirmek ve kaynak verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için kapalı döngü malzeme sistemlerini benimsemenin ve geri dönüşüm teknolojilerini entegre etmenin önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, hammadde malzemelerinin seçimi çevresel yükün azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır [9]. Örneğin, düşük karbonlu ve geri dönüştürülmüş metal alaşımlarının kullanılması, TAEİ tarafından üretilen bileşenlerin genel yaşam döngüsü emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir.

TAEİ'nin sürdürülebilirliğini iyileştirmenin kritik boyutu, enerji verimliliğinin artırılmasında yatmaktadır. Son araştırmalar, enerji açısından daha verimli ark teknolojileri geliştirmeye, proses parametrelerini optimize etmeye ve yenilenebilir enerji kaynaklarını üretim operasyonlarına dâhil etmeye odaklanmıştır [10]. Bu yenilikler yalnızca enerji tüketimini azaltmakla kalmıyor, aynı zamanda endüstriyel üretimi karbondan arındırma hedefine de katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, TAEİ süreçlerinin hassasiyetini ve verimliliğini artırmak için gerçek zamanlı sensörler ve makine öğrenme algoritmaları gibi süreç izleme ve kontrol teknolojileri araştırılmıştır [11]. Bu tür ilerlemeler, TAEİ'nin teknolojik ve ekonomik faydalarını korurken sürdürülebilirlik hedeflerine uyum sağlama potansiyelinin altını çizmektedir.

Teknolojik gelişmelere paralel olarak, düzenleyici çerçeveler ve politika girişimleri üretimde sürdürülebilirliğin desteklenmesinde merkezi hâle geldi. Özellikle Avrupa Birliği içindeki hükümetler ve uluslararası kuruluşlar, endüstriyel emisyonları azaltmayı, enerji verimliliğini teşvik etmeyi ve sürdürülebilir kaynak yönetimini teşvik etmeyi amaçlayan katı düzenlemeler oluşturmuştur [12]. Çevre standartlarına uyum çoğu zaman mevcut süreçlerde önemli değişiklikler yapılmasını gerektirdiğinden, bu önlemlerin TAEİ açısından önemli etkileri vardır. Örneğin, emisyon azaltma hedefleri ve enerji verimliliği direktifleri, üreticilerin daha temiz teknolojileri benimsemesini ve operasyonlarını optimize etmesini gerektiriyor. Ayrıca döngüsel ekonomi ilkeleri gibi kaynak yönetimi stratejileri, TAEİ süreçlerinde yenilenebilir ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı-

nı teşvik etmektedir. Bu düzenleyiciler yalnızca yeniliği teşvik etmekle kalmamakta, aynı zamanda TAEİ'nin giderek daha önemli hâle gelen sürdürülebilirlik bilincine sahip küresel pazarda rekabetçi kalmasını da sağlamaktadır.

TAEİ ile ilgili çevresel zorluklar ve düzenleyici gereksinimler aynı zamanda dijitalleşmeye geçiş ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin entegrasyonu gibi daha geniş endüstriyel trendlerle de kesişmektedir. TAEİ süreçlerini optimize etmek, israfı azaltmak ve genel süreç verimliliğini artırmak için gelişmiş veri analitiği, gerçek zamanlı izleme sistemleri ve dijital ikizler giderek daha fazla kullanılıyor [13-14]. Bu araçlar, TAEİ'nin çevresel performansı hakkında değerli bilgiler sunarak üreticilerin iyileştirme alanlarını belirlemesine ve hedeflenen sürdürülebilirlik önlemlerini uygulamasına olanak tanımaktadır. Ayrıca dijital teknolojilerin benimsenmesi, emisyonlar, enerji kullanımı ve malzeme tüketimine ilişkin şeffaf ve izlenebilir veriler sağlayarak düzenleyici standartlara uyumu kolaylaştırmaktadır.

Bu çalışma, teknolojik gelişmeler, düzenleyici çerçeveler ve sürdürülebilirlik girişimleri arasındaki etkileşimi inceleyerek TAEİ'nin çevresel etkisinin kapsamlı bir incelemesini amaçlamaktadır. TAEİ teknolojisinin çevresel etkilerini geniş çapta değerlendirilerek bu etkileri azaltımına yönelik avantajlar ve uygulamalar çalışma içinde değerlendirilmiştir. Çalışmada enerji tüketimi, malzeme verimliliği, atık yönetimi ve emisyon azaltma stratejilerinin ayrıntılı analizleri de dâhil olmak üzere TAEİ'nin sürdürülebilirliğinin belirli yönleri ele alınacaktır. Ayrıca, gelişmiş sensörler, yapay zekâ ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi yeni gelişen teknolojilerin TAEİ'nin çevresel performansını artırmadaki rolünü değerlendirecektir. Bu araştırma, birbiriyle bağlantılı bu konuları ele alarak, sürdürülebilir üretime ilişkin daha geniş söylemlere katkıda bulunmayı ve TAEİ'yi küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu hâle getirmek için eyleme dönüştürülebilir bilgiler sağlamayı amaçlamaktadır. Bu çalışmanın bulguları, endüstriyel verimliliği çevresel sorumlulukla dengeleme potansiyelini vurgulayarak TAEİ için sürdürülebilir bir çerçevenin geliştirilmesini desteklemeyi amaçlamaktadır. Endüstriler, modern üretimin taleplerini karşılamak için TAEİ'yi giderek daha fazla benimsedikçe, sürdürülebilirlik ilkelerini süreçlerine entegre etmek, uzun vadeli sürdürülebilirliği sağlamak açısından kritik öneme sahip olacaktır. TAEİ, teknolojik yenilik ile ekolojik yönetim arasındaki boşluğu doldurarak, yeni nesil sürdürülebilir üretim teknolojileri için bir model görevi görebilir ve çevreye duyarlı bir endüstriyel ekosistemin önünü açabilir.

2. TAEİ'nin Çevresel Etkileri

TAEİ, hem geleneksel kaynaktan hem de eklemeli üretimden gelen özellikleri miras olarak benzersiz bir etki sağlar [15]. Bu etkileri anlamak, TAEİ'nin sürdürülebilirliğini değerlendirmek ve onu küresel çevre hedefleriyle uyumlu hâle getirecek yolları belirlemek için çok önemlidir.

TAEİ ile ilgili temel çevresel kaygılardan biri enerji tüketimidir. TAEİ, önemli miktarda elektrik enerjisi gerektiren bir işlem olan tel besleme stoğunu ergitmek için elektrik arkına dayanır (Tablo 1). Enerji yoğunluğu malzeme türü, biriktirme oranı ve bileşen boyutu gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Örneğin, titanyum ve nikel bazlı alaşımlar gibi yüksek ergime noktalı malzemeler daha fazla enerji gerektirir ve elektriğin fosil yakıtlardan elde edildiği bölgelerde daha fazla karbon emisyonuna katkıda bulunur [16]. Bununla birlikte, enerji verimli güç kaynakları ve uyarlanabilir akım kontrolü ve gerçek zamanlı izleme gibi süreç optimizasyonundaki son gelişmeler, TAEİ'nin enerji taleplerini azaltma konusunda gelişimini göstermektedir [18]. Üstelik yenilenebilir enerji kaynaklarının TAEİ operasyonlarına entegre edilmesi karbon ayak izini önemli ölçüde azaltabilir.

Tablo 1. Üretim teknolojilerinin enerji tüketimi [18-25].

Üretim Teknolojisi	Enerji Tüketimi (kg başına)	Temel Özellikler
Tel Ark Eklemeli İmalat	~10–30 kWh/kg	Tel hammaddesini ergitmek için yüksek enerji gerektirir, ancak verimli malzeme kullanımı ve düşük atık sağlar.
Seçici Lazer Ergitme (SLE-SLM)	~50–200 kWh/kg	Yüksek geometrik hassasiyetlidir, ancak lazer ısıtma ve toz yatağı gereklilikleri nedeniyle enerji kullanımı fazladır.
Elektron Işın Ergitme (EIE-EBM)	~30–100 kWh/kg	SLM'e benzer ancak vakum kullanımı nedeniyle belirli uygulamalar için enerji açısından daha verimlidir.
Ergiyik Yığılma Modeli (EYM-FDM)	~1–5 kWh/kg	Özellikle polimer işleme için düşük enerji tüketimi.
CNC İşleme	~40–80 kWh/kg	Kapsamlı malzeme kaldırma (çıkarıcı üretim) nedeniyle yüksek enerji kullanımı.

Döküm	~10–20 kWh/kg	Yüksek hacimli üretim için enerji tasarrufludur ancak belirli geometrilerle sınırlıdır.
Geleneksel Kaynak	~5–15 kWh/kg	TAEİ’den daha düşük enerji tüketimi.
Enjeksiyon Kalıplama	~2–6 kWh/kg	Seri üretimdeki polimerler için oldukça verimlidir.

TAEİ, tel besleme stoğunun ergitilmesi için elektrik ark ısıtmasına bağlı olması nedeniyle genellikle döküm veya CNC işleme gibi geleneksel yöntemlerden daha fazla enerji tüketir [25]. Bununla birlikte, daha düşük malzeme israfı ve net şekle yakın üretim, bu enerji talebinin bir kısmını karşılayarak onu daha malzeme verimli hâle getirmektedir. TAEİ, lazerler veya elektron ışınları kullanarak metal tozlarını ergitmek için önemli miktarda enerji gerektiren SLM ve EBM gibi toz bazlı katmanlı üretim yöntemlerinden genellikle daha fazla enerji verimlidir. TAEİ, daha düşük ergime noktalı malzemeleri işleyen FDM gibi polimer bazlı katmanlı üretime göre çok daha fazla enerji tüketir. Aynı şekilde TAEİ, FDM’nin başaramayacağı uygulamaları mümkün kılan metallere odaklanır.

TAEİ’nin bir diğer önemli çevresel yönü de metal ergitme işlemi sırasında duman ve partikül emisyonudur. Metal tellerin ergimesi ve birikmesi, operatörler için sağlık riskleri oluşturabilen ve hava kirliliğine neden olan metal oksitler ve ultra ince parçacıklar dâhil olmak üzere proses yan ürünleri üretir [26]. Bu emisyonların bileşimi ve hacmi işlenen malzemeye bağlıdır. Örneğin, paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımları gibi malzemeler, çevreyi kirletebilen ve insan sağlığını etkileyebilen ince metal oksitler açığa çıkarır [27-28]. Bu etkileri azaltmak için modern TAEİ sistemleri genellikle gelişmiş duman tahliye ve filtreleme sistemleriyle donatılmıştır.

TAEİ, metali yalnızca ihtiyaç duyulan yerde biriktirerek malzeme israfını en aza indirir. Aşırı birikim, gözeneklilik veya yüzey kusurları gibi kusurlar çoğu zaman ek malzeme israfına yol açan son işlemleri gerektirir. Ayrıca, TAEİ’de kullanılan bazı yüksek performanslı alaşımların geri dönüştürülememesi çevresel yükü artırmaktadır. Bu sorunları çözmeye yönelik çabalar, atık malzemelerin ve arızalı parçaların geri dönüştürüldüğü ve üretim döngüsüne yeniden entegre edildiği kapalı döngü malzeme sistemlerine odaklanmaktadır. Bu yaklaşım sadece TAEİ’nin çevresel etkisini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda malzeme maliyetlerini en aza indirerek ekonomik verimliliğini de artırır [9]. Karbon azaltma potansiyeli açısından

dan TAEİ hem zorluklar hem de fırsatlar sunmaktadır (Tablo 2).

Tablo 2. Üretim teknolojilerinin karbon emisyonları [3, 19, 29-32].

Üretim Teknolojileri	Karbon Azaltımı	Karbon Emisyonları
TAEİ	Üretim sırasında daha yüksek karbon emisyonlarına yol açan süreç.	~6,0 – 10,0 kg CO ₂ /kg malzeme başına
Lazer Toz Yatak Füzyon (LTYF-LPBF)	Metal tozlarının ergitilmesinde yüksek enerji tüketimi	~8,0 – 12,0 kg CO ₂ /kg malzeme başına
EBM	Elektron ışınlarını kullanarak metal tozunu eritmek için yüksek enerji gereksinimleri	~9,0 – 14,0 kg CO ₂ /kg malzeme başına
CNC İşleme	Özellikle kapsamlı işlemin gerekli olduğu karmaşık parçalarda enerji tüketimi yüksek olabilir	~4,5 – 7,0 kg CO ₂ /kg malzeme başına
Kaynak (MIG, TIG, vb.)	Kaynak işlemlerinde yüksek enerji tüketiminin yanı sıra dolgu malzemelerinin potansiyel israfı.	~6,0 – 9,0 kg CO ₂ /kg malzeme başına
Döküm	Özellikle yüksek sıcaklıkta metal ergitmede enerji tüketimi	~5,0 – 8,0 kg CO ₂ /kg malzeme başına
FDM	Filament üretimiyle ilgili emisyonlar endişe verici olabilir.	~3,0 – 4,5 kg CO ₂ /kg malzeme başına

Bir yandan, sürecin enerji tüketimi ve buna bağlı karbon emisyonları sürdürülebilirlik açısından zorluk teşkil etmektedir. Öte yandan, TAEİ'nin net şekilde yakın bileşenler üretme kapasitesi, kapsamlı işleme ihtiyacını en aza indirerek üretim döngüsü boyunca hem enerji hem de malzeme tüketimini azaltır. Ek olarak TAEİ, özellikle yakıt verimliliğinin kritik olduğu havacılık ve otomotiv gibi sektörlerde son kullanım aşamasında önemli miktarda enerji tasarrufu sağlayabilecek hafif ve yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımına olanak sağlar [33]. Bu faydalar, ürün yaşam döngüsü boyunca değerlendirildiğinde TAEİ'nin genel karbon azaltımına katkıda bulunma potansiyelini vurgulamaktadır. “Malzemenin kg'ı başına kg CO₂” terimi, üretimde, işlemede kullanılan enerjiyi ve malzemelerle ilişkili emisyonları dikkate alan belirli bir üretim yöntemi yoluyla işlenen veya üretilen her bir kilogram malzeme için yayılan karbondioksit miktarını ifade eder. [34]. Bu ölçüm türü, üretim yöntemlerinin çevresel etkisini tahmin etmek için kullanılır ve üretim bağlamlarında karbon emisyonlarını ifade etmenin yaygın bir yoludur.

Hammadde malzemesi seçiminin aynı zamanda çevresel açıdan da önemli etkiler vardır. TAEİ tipik olarak alüminyum, titanyum ve çelik gibi metalik teller kullanır. Örneğin, alüminyum üretimi enerji yoğun bir pro-

sestir ancak TAEİ ile üretimi karbon azaltımı söz konusu olduğunda hem zorluklar hem de fırsatlar arasında benzersiz bir denge sunmaktadır. Prosesin yüksek enerji talebi ana dezavantajlarından biridir. Bununla birlikte, büyük ölçek için net şekle yakın parçalar üretme yeteneği, işleme ihtiyacını önemli ölçüde azaltır ve bu da genel malzeme israfını ve enerji tüketimini azaltır. LPBF ve EBM, hassasiyetleri nedeniyle bir miktar malzeme tasarrufu sunabilirken, her ikisi de enerji tüketimi yoğun yöntemlerdir ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla veya malzemelerin verimli bir şekilde geri dönüştürülmesiyle eşleştirilmediği sürece önemli miktarda karbon azaltımına yol açmayabilir [35]. CNC, frezeleme, döküm, işleme ve metal ergitme için önemli enerji gereksinimleri nedeniyle tipik olarak daha fazla karbon tüketimine neden olurlar. [36]. Bu yöntemler daha basit parçalarda daha düşük emisyon üretebilir ancak yine de enerji tüketimi ve atık üretimi nedeniyle daha yüksek bir karbon ayak izine neden olurlar.

Su kullanımı ve potansiyel kirlenme başka bir çevresel sorunu temsil etmektedir (tablo 3). Her ne kadar TAEİ biriktirme sırasında doğrudan su tüketirse de, belirli kurulumlarda kullanılan soğutma sistemleri sabit çalışma sıcaklıklarını korumak için su sirkülasyonuna ihtiyaç duyar [39]. Bu soğutma sistemlerinin yanlış yönetimi, prosesten kaynaklanan kirleticilerin prosese karışması durumunda su israfına veya kirlenmeye yol açabilir. Verimli su kullanımını sağlayan ve çevreye zararı önleyen bu sorunu çözmek için kapalı devre soğutma sistemleri ve uygun filtreleme mekanizmaları giderek daha fazla benimsenmektedir [40].

TAEİ'nin çevresel etkisinin azaltılması, aynı zamanda, ısı işlemler veya makineyle işleme gibi imalat sonrası adımları gerektirebilir. Proses parametrelerini optimize etmek, düzeltici önlemlere olan ihtiyacı azaltmak ve genel proses verimliliğini artırmak için gelişmiş kontrol sistemleri ile gerçek zamanlı izleme teknolojileri kullanmak öne çıkan sorun giderici yaklaşımlardır [45].

TAEİ çeşitli çevresel zorluklar sunarken, aynı zamanda yenilikçi teknolojiler, malzeme optimizasyonu ve düzenleyici çerçevelerin rehberliğinde sürdürülebilir üretim için önemli fırsatlar da sunmaktadır. Hedeflenen müdahaleler ve sistem iyileştirmeleri yoluyla enerji tüketimini, emisyonları ve atık üretimini ele almak, sürdürülebilirliğin artırılması açısından kritik öneme sahip olacaktır. Malzeme verimliliği ve net şekle yakın üretim gibi doğal avantajlarından yararlanan TAEİ, 21. yüzyılda çevreye duyarlı üretimin temel taşı olma potansiyeline sahiptir.

Tablo 3. Üretim teknolojilerinin su tüketimi [41-44].

Üretim Teknolojisi	Su Tüketimi	Su Kirleticileri
TAEİ	Orta derecede su tüketimi	- Minimal doğrudan su kirleticileri.
LPBF	Düşük ila orta düzeyde su tüketimi	- Proses sırasında kullanılan metal kalıntıları, yağlar veya soğutuculardan kaynaklanan olası kirleticiler
CNC	Orta ila yüksek su tüketimi	- Kirleticiler arasında baskı veya toz işleme aşamalarında kullanılan metal kalıntıları, yağlar ve yağlayıcılar bulunabilir.
Döküm	Yüksek su tüketimi	- Suyu doğrudan kirleten maddeler minimum düzeydedir ancak temizlik için atık yönetimi gereklidir.
Kaynak (MIG, TIG, vb.)	Düşük ila orta düzeyde su tüketimi	- Potansiyel kirleticiler arasında atık sudaki yağlar, soğutucular ve metal tozu bulunur.
FDM	Düşük su tüketimi	- Çevre kirliliğini önlemek için atık su arıtması gereklidir.

3. TAEİ İçin Çevresel Düzenleyici Çerçevesel ve Standartlar

Düzenleyici çerçeveler ve standartlar, TAEİ'nin çevresel etkisini ve sürdürülebilirliğini şekillendirmede çok önemlidir (Şekil 2). Bu çerçeveler, enerji tüketiminden atıkların azaltılmasına, emisyon kontrolüne ve çevre dostu uygulamaların entegrasyonuna kadar TAEİ sürecinin çeşitli yönlerini etkilemektedir. Düzenleyiciler, açık yönergeler ve hedefler belirleyerek, küresel çevre hedefleriyle uyumlu, daha temiz, daha sürdürülebilir üretim yöntemlerinin benimsenmesini teşvik eder. Politikalar ve düzenlemeler, üreticileri enerji verimliliğine, kaynakların korunmasına ve çevreye minimum düzeyde zarar verilmesine öncelik vermeye teşvik ederek endüstriyel gelişim ve ekolojik sürdürülebilirliğe dengeli bir yaklaşım yaratır. Düzenleyici çerçevelerin ve standartların rolü, TAEİ teknolojilerinin yalnızca yüksek düzeyde üretkenlik elde etmesini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda karbon ayak izini ve genel çevresel etkilerini azaltmaya da katkıda bulunmasını sağlamak açısından çok önemlidir.

3.1. İlgili Standartlar

TAEİ üzerindeki en önemli düzenleyici etkilerden biri, çevre yönetim sistemlerine adanmış ISO 14001 gibi uluslararası çevre standartlarının benimsenmesidir [3]. ISO 14001'in uygulanması, sürdürülebilir uygulamaların üretim süreci boyunca entegrasyonunu sağlayarak, kuruluşları çevresel performanslarını sistematik olarak değerlendirmeye ve iyileştirmeye teşvik eder. TAEİ üreticileri için bu, enerji tüketimini, malzeme kullanımını,

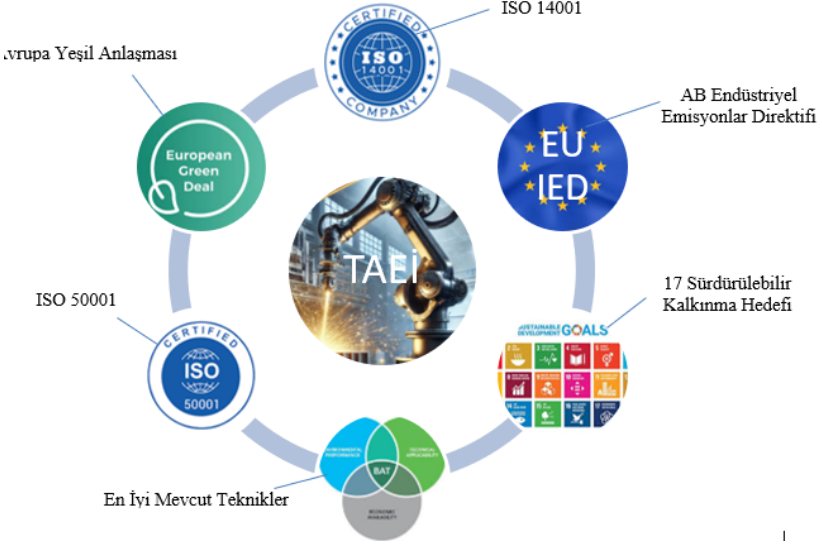
atık üretimini, emisyonları değerlendirmek ve tüm süreçlerin minimum çevresel etki için optimize edilmesini sağlamak anlamına gelir. Üreticiler, ISO 14001 sertifikasını alarak, TAEİ operasyonlarının ekolojik ayak izini azaltmada sürekli iyileştirmeyi teşvik eden bir çerçeve sağlayarak çevresel sorumluluğa olan bağlılıklarını ortaya koymaktadırlar. Bu tür standartlara bağlılık, daha temiz teknolojilere geçişi kolaylaştırır ve kuruluşların hem yasal gereklilikleri hem de gönüllü çevre hedeflerini karşılamalarına yardımcı olur.

Enerji yönetim sistemleri (EnMS) için uluslararası standart olan ISO 50001, özellikle enerji tüketiminin genel çevresel etkide kritik bir rol oynadığı TAEİ gibi endüstriler için geçerlidir [46]. TAEİ süreçleri, özellikle yüksek güçlü kaynak arklarıyla uğraşırken enerji tüketimi yoğun olabilir. TAEİ üreticileri ISO 50001'i benimseyerek enerji kullanımlarını optimize etmeye, enerji performansını iyileştirmeye ve enerji maliyetlerini azaltmaya yönelik sistematik bir yaklaşım uygulayabilirler. Bu sadece sürecin çevresel sürdürülebilirliğini arttırmak için değil, aynı zamanda operasyonel verimliliği artırmak ve genel üretim maliyetini azaltmak için de çok önemlidir. ISO 50001, TAEİ üreticilerinin net enerji performansı hedefleri oluşturmalarına ve zaman içindeki ilerlemelerini takip etmelerine yardımcı olur. Enerji denetimleri yapmayı, enerji tüketimini izlemeyi ve daha fazla enerji tasarruflu güç kaynaklarının veya gelişmiş ısı yönetimi sistemlerinin kullanılması gibi enerji tasarrufu girişimlerine yönelik fırsatların belirlenmesini içerir. TAEİ operatörleri enerji performanslarını sürekli iyileştirerek karbon ayak izlerini ve enerji maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilirler. Ayrıca ISO 50001 sertifikası, havacılık ve otomotiv gibi sektörlerdeki müşteriler ve paydaşlar tarafından giderek daha fazla değer verilen enerji verimliliği ve çevre yönetimine olan bağlılıklarını göstererek TAEİ üreticilerinin rekabet gücünü artırabilir.

3.2. Uluslararası Politikalar

ISO 14001 ve 50001'in yanı sıra Avrupa Birliği (AB) ve Birleşmiş Milletler (BM), TAEİ teknolojilerini etkileyen küresel çevre düzenlemelerinin oluşturulmasında önemli roller oynamaktadır. AB Yeşil Anlaşması, Avrupa'yı 2050 yılına kadar diğer kıtalara göre çevresel etkilerini minimuma indirmeyi planlayan bir politikadır [47]. Bu çerçeve, karbon emisyonları, enerji tüketimi ve atık yönetimine ilişkin katı düzenlemeleri içermektedir. AB içinde faaliyet gösteren üreticilerin, daha temiz teknolojileri benimseyerek, emisyonları azaltarak ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırarak bu düzenlemelere uymaları gerekmektedir. Örneğin, AB Emisyon Ticaret Sistemi (ETS), şirketlerin CO₂ emisyonlarını azaltmaları

için mali teşvikler yaratmakta; bu da TAEİ üreticilerini enerji açısından daha verimli süreçlere entegre etmeye ve karbon ayak izlerini azaltmaya yönlendirmektedir. AB düzenlemelerine uyum, muhtemelen TAEİ sistemlerine güç sağlamak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik edecek ve bu teknolojilerin sürdürülebilirliğine daha fazla katkıda bulunacaktır.



Şekil 2. TAEİ için ilgili çevresel düzenleyici çerçevelerin ve standartların şematik gösterimi

Birleşmiş Milletler sürdürülebilir kalkınma hedeflerini, özellikle de endüstrilerin sürdürülebilir uygulamaları benimseme ve çevresel etkileri azaltma ihtiyacını vurgulayan Hedef 9 (Sanayi, Yenilik ve Altyapı) ve Hedef 12'yi (Sorumlu Tüketim ve Üretim) TAEİ ile en çok ilişkilendirilen düzenleyici çerçevelerdir. [48]. SKH 9 hedefi doğrultusunda, TAEİ'nin imalat süreçlerinde dijitalleşme, yenilikçi üretim teknikleri ve kaynak verimliliği açısından önemli katkılar sunduğu görülmektedir. TAEİ, karmaşık ve büyük ölçekli metal bileşenlerin üretiminde geleneksel yöntemlere kıyasla daha az malzeme israfına neden olarak kaynak kullanımını iyileştirmeye odaklanmaktadır. Bununla birlikte, SKH 12 kapsamında değerlendirildiğinde, TAEİ'nin atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçlerine entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Kapalı döngü malzeme sistemlerinin geliştirilmesi ve yeniden kullanılabilir metal alaşımlarının tercih edilmesi, sürdürülebilir üretimi destekleyen kritik adımlardır. Ancak, süreç optimi-

zasyonu ve enerji tüketiminin azaltılması için daha ileri mühendislik çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır [46-48]. Ayrıca, SKH 13 (İklim Eylemi) hedefi doğrultusunda, TAEİ'nin karbon ayak izini azaltmaya yönelik stratejiler geliştirilmesi gerekmektedir. TAEİ süreçlerinde enerji tüketiminin yüksek olması nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunun karbon salımını önemli ölçüde düşürebilmesi mümkündür. Bu nedenle, üretim tesislerinde güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve süreçlerin enerji verimliliği açısından optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.

TAEİ sektöründe bu hedeflerin benimsenmesi, malzeme kullanımı ve enerji verimliliğinin optimizasyonu da dâhil olmak üzere tüm üretim süreci boyunca daha sürdürülebilir uygulamalara yol açabilir. Bu hedefler atıkların azaltılmasının, tehlikeli madde kullanımının en aza indirilmesinin ve daha temiz teknolojilerde yeniliğin teşvik edilmesinin önemini vurgulamaktadır. TAEİ üreticileri, bu uluslararası çerçevelere bağlı kalarak, operasyonlarının çevresel performansını artırırken aynı zamanda küresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunabilir.

3.3. İlgili Teşvikler

Ulusal hükümetlerden ve uluslararası kuruluşlardan gelen teşvikler de TAEİ ekosisteminde çevre dostu uygulamaların benimsenmesini teşvik etmede önemli bir rol oynamaktadır. Güneş, rüzgar veya hidroelektrik enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını benimseyen şirketlere yönelik mali sübvansiyonlar veya vergi teşvikleri, daha yeşil teknolojilere geçişin ilk maliyetlerini hafifletmeye yardımcı olabilir. Örneğin üreticiler, TAEİ sistemlerine güç sağlamak için güneş panellerinin kurulumunu kapsayan sübvansiyonlardan yararlanabilir veya enerji tasarruflu makinelerin kullanımını için vergi indirimleri alabilir. Ayrıca, TAEİ'de kullanılan metalik tozların veya sarf malzemelerinin yeniden kullanılabilmesi atık geri dönüşüm programlarının teşvik edilmesi, ham madde talebinin azaltılmasına ve üretim atıklarının azaltılmasına yardımcı olur. Bu teşvikler yalnızca üreticiler için maliyetleri azaltmakla kalmıyor, aynı zamanda TAEİ ekosistemi içinde sürdürülebilir teknolojilerin yaygın şekilde benimsenmesini hızlandırarak genel çevresel sürdürülebilirliği artırmaktadır.

Enerji verimliliği ve atık yönetiminin yanı sıra emisyon kontrolü de düzenleyici çerçeveler tarafından yönetilen önemli bir unsurdur. Birçok TAEİ prosesi, çevreye ve insan sağlığına zararlı olabilecek partikül madde, duman ve gazlar üretir. Emisyon standartlarının ve hava filtreleme sistem-

leri gibi kirlilik kontrol önlemlerinin benimsenmesi bu risklerin azaltılmasına yardımcı olur. AB Endüstriyel Emisyon Direktifi (IED), endüstrilerin emisyonları en aza indirmek için mevcut en iyi teknikleri (BAT) uygulamasını zorunlu kılar. TAEİ üreticilerinin, bu emisyon kontrol düzenlemelerine bağlı kalarak, zararlı dumanları ve partikülleri yakalayıp filtreleyen ve böylece bunların çevre ve sağlık üzerindeki etkilerini azaltan teknolojileri benimsemeleri gerekmektedir. Düzenleyici kurumların emisyonları en aza indirmeye yönelik artan baskısı, TAEİ teknolojisi geliştiricilerini daha iyi filtreleme için sistemlerini geliştirmeye sevk edecek ve bu da daha temiz ve daha güvenli çalışma ortamlarına yol açacaktır.

4. TAEİ-Son Teknoloji Uygulamaları

Dünyanın dört bir yanındaki endüstriler iddialı sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmaya çalışırken TAEİ, geleneksel üretim süreçleriyle karşılaştırıldığında umut verici bir teknolojiyi temsil etmektedir. TAEİ, gelişmiş sensörler, yapay zekâ (AI) ve yenilenebilir enerjinin entegrasyonu gibi yeni ortaya çıkan teknolojilerin rolünü araştırarak, üretim operasyonlarının çevresel ayak izinin azaltılmasına katkıda bulunabilir.

TAEİ'nin çevre profilinin önemli bir unsuru enerji tüketimidir, çünkü enerji yoğun operasyonlar genellikle üretimde önemli bir karbon emisyonu kaynağıdır. TAEİ, çıkarımlı üretim gibi geleneksel yöntemlere göre enerji açısından daha verimli olabilse de, enerji kullanımını en aza indirmek için süreç yine de dikkatli bir optimizasyon gerektirir. Son araştırmalar, TAEİ'nin net şekle yakın üretim yeteneklerinin sonraki işleme ihtiyacını önemli ölçüde azaltarak enerji tasarrufu sağladığını göstermiştir. Örneğin Verhoef vd. [49], eklemeli imalatta enerji kullanımı üzerine, ark gücü ve ilerleme hızı gibi biriktirme parametrelerinin optimize edilmesinin, geleneksel işleme yöntemlerine kıyasla enerji tüketiminde %25'e kadar bir azalmaya yol açabileceğini belirtmiştir. Ek olarak, güneş veya rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının TAEİ sistemleriyle entegrasyonunun, sürecin karbon ayak izini daha da azalttığı gösterilmiştir. Devam eden birçok proje, özellikle yenilenebilir kaynakların bol olduğu bölgelerde TAEİ sistemlerine güç sağlamak için yenilenebilir enerjinin kullanımını araştırmış ve temiz enerjiyi üretim sürecine dâhil ederek yeşil üretim potansiyelini ortaya koymuştur [50-51].

Enerji kullanımının ötesinde malzeme verimliliği TAEİ'nin önemli bir sürdürülebilirlik unsurudur. Geleneksel üretim süreçleri, özellikle

büyük metal bileşenlerin kesilmesi veya frezelenmesi sırasında sıklıkla büyük miktarlarda malzeme israfına neden olur. Buna karşılık TAEİ, yalnızca gerekli miktarda malzeme biriktirerek malzeme israfını önemli ölçüde azaltan, katman katman imalat yaklaşımını kullanır. Çalışmalar, TAEİ'nin geleneksel malzeme çıkarma yöntemleriyle karşılaştırıldığında malzeme israfını %60-70'e kadar azaltabildiğini göstermiştir [8]. Ayrıca TAEİ'nin kabiliyeti, üreticilerin titanyum ve havacılık sınıfı alüminyum gibi yüksek performanslı malzemeleri kullanmalarına olanak tanır. Malzeme geri dönüşümü de kritik bir faktördür. İşlem sırasında sıklıkla ortaya çıkan kullanılmamış metal alaşımları toplanıp gelecekteki yapılarda yeniden kullanılabilir [52]. Örneğin, pahalı malzemeler kullanmasıyla bilinen havacılık ve uzay endüstrisi, hurda malzemeyi en aza indirme ve genel üretim maliyetlerini azaltma yeteneği nedeniyle TAEİ giderek daha fazla benimsemektedir.

Etkin atık yönetimi aynı zamanda TAEİ'nin sürdürülebilirliği açısından da hayati öneme sahiptir. TAEİ malzeme açısından verimli bir süreç olmasına rağmen, çevresel etkilerini en aza indirmek için dikkatli bir şekilde yönetilmesi gereken metal tozu, duman ve destek yapıları şeklinde atık üretmeye devam etmektedir [53]. Gelişmiş filtreleme üniteleri ve duman tahliye teknolojileri gibi emisyon kontrol sistemlerindeki gelişmeler, TAEİ'nin çevresel ayak izinin azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Örneğin, yüksek verimli partikül hava (HEPA) filtreleri ve elektrostatik çökticilerin entegrasyonunun, kaynak işlemi sırasında oluşan zararlı dumanları ve partikülleri yakaladığı gösterilmiştir [54]. Ayrıca, proses sırasında ortaya çıkan metal tozunun yakalanıp geri dönüştürülmesine yönelik kapalı döngü geri dönüşüm sistemleri geliştirilerek atıkların en aza indirilmesi ve yeniden kullanılması sağlanmaktadır. Hassas ve uygun maliyetli üretimin çok önemli olduğu otomotiv endüstrisinde, malzeme ve atık yönetimi maliyetlerini azaltırken yapısal parçalar oluşturmak için TAEİ kullanılmıştır [55].

Yapay zekâ, gelişmiş sensörler ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi gelişen teknolojiler, TAEİ'nin çevresel performansını geliştirmektedir. Gelişmiş sensörler sıcaklık, voltaj, malzeme besleme hızları ve biriktirme hızı gibi değişkenlerin gerçek zamanlı izlenmesini sağlayarak proses kontrolünün iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar. Bu gerçek zamanlı veriler, operatörlerin parametreleri dinamik olarak ayarlamasına, enerji kullanımını, malzeme tüketimini ve atık azaltımını optimize etmesine olanak tanır. Yapay zekâ odaklı süreç optimizasyonu, tahmine dayalı algoritalara

dayalı süreç ayarlamalarını otomatikleştirerek enerji verimliliğini artırma konusunda şimdiden umut verici sonuçlar vermiştir. Örneğin, yapay zekâ sistemleri geçmiş süreç verilerini analiz edebilir ve enerji tüketimini en aza indirmek ve malzeme verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için en uygun parametreleri tahmin edebilir. Makine öğreniminin (ML) entegrasyonu, her binadan sürekli öğrenmeyi mümkün kılarak TAEİ'nin çevresel performansını daha da artırır, bu da giderek daha iyi süreç verimliliğine ve atık oluşumunun azalmasına yol açar [56]. Yapay zekâ sistemleri, sıçramayı ve zararlı duman üretimini en aza indirmek için ark kararlılığı, biriktirme hızı ve ısı yönetimi gibi parametreleri tahmin edip ayarlayabilir. Havacılık ve uzay endüstrisindeki araştırmalar, yapay zekâ tabanlı sensörlerin TAEİ ekipmanıyla entegre edilmesinin, kaynak sürecini daha hassas bir şekilde kontrol ederek emisyonları azaltabileceğini ve bunun sonucunda daha temiz bir üretim ortamı elde edilebileceğini göstermiştir.

5. Bulgular ve Tartışma

TAEİ, yenilikçi bir üretim teknolojisi olup üretim süreçlerini kolaylaştırılmaktadır; ancak enerji tüketimi hâlâ yüksek seviyededir. Enerji tüketimi, lazer tabanlı alternatiflere kıyasla daha düşük olmasına rağmen, üretim sürecinin tamamı göz önünde bulundurulduğunda çevresel etkisinin en aza indirilmesi gerekmektedir. Özellikle, fosil enerji ile güçlendirilmiş güç cihazları, TAEİ prosedürleri sırasında önemli bir karbon emisyonu üretebilir. Bu nedenle, endüstriyel kompleksler içinde sürdürülebilir enerji kaynaklarının entegre edilmesini ve kullanım verimliliğini optimize eden yenilikçi maddeleri ve metodolojileri kullanmak pek çok açıdan önemlidir. Önceki bölümlerde verilen araştırmalar, TAEİ'nin malzeme kaybının diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında azaldığını göstermektedir, ancak destek alt yapıları ve aşırı atıklar malzeme israfına yol açabilir. İmalatta kapalı döngü geri dönüşürme ve özelleştirilmiş imalat parametreleri atık malzemeyi azaltmaya yardımcı olabilir. Ayrıca, TAEİ'de yeşil, yeniden kullanılabilir metaller hakkında bilgi paylaşımı ve çevre dostu maddelerin seçimi daha sürdürülebilir bir prosedüre yol açar.

Küresel ve ulusal politikalar çevresel sürdürülebilirliği arttırmak için tasarlanmış ve önemli ölçüde ekolojik katkıda bulunur. Avrupa Birliği'nin Yeşil Protokolü ve ISO 14001 gibi çevre standartları, TAEİ'nin CO₂ emisyonlarının azaltılmasına, enerji tüketiminin düşürülmesine ve imalat-malzeme perspektifinde verimliliğin artması yönünde olumlu etkiler bırakmıştır. Bununla birlikte, bu ve benzer yaklaşımlar hâlen küçük ve orta

ölçekli işletmeler için oldukça zordur. Bu nedenle, söz konusu standartlara uyumu kolaylaştırmak amacıyla, yerel ve küresel düzeyde finansal destek ve teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi gerekmektedir.

Literatürde TAEİ'nin malzeme verimliliği açısından avantajlı olduğu belirtilirken, gerçek endüstriyel uygulamalarda destek yapılarının fazlalığı nedeniyle bu avantajın tam anlamıyla sağlanamadığı görülmüştür. Uygulamada süreç ve imalat optimizasyonuna daha fazla önem verilmesi gerektiği buradan anlaşılabilir. Pek çok akademik çalışma ve Endüstriyel uygulamanın son yıllarda bu konuya eğildiği bilinmektedir [10]. Karbon emisyonlarının azaltılması için enerji kaynağı değişimi ve süreç iyileştirmelerinin gerekliliği de öne çıkan bir diğer konudur. Özellikle, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve akıllı üretim teknolojilerinin kullanımıyla bu sorunların büyük ölçüde aşılabileceği görülmektedir [16,26]. Kapalı döngü geri dönüşüm sistemleri, atıkların azaltılması ve çevre dostu metal alaşımlarının tercih edilmesi ise TAEİ süreçlerinin daha sürdürülebilir hâle getirilmesi için uygulanabilir stratejilerden biri olarak öne çıkmaktadır [55].

6. Sonuçlar

Bu çalışma, TAEİ süreçlerinin çevresel etkilerini ve sürdürülebilir üretime yönelik düzenleyici çerçeveleri kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Bulgular, TAEİ'nin malzeme verimliliği ve üretim hızı açısından önemli avantajlar sunduğunu, ancak yüksek enerji tüketimi ve karbon emisyonları nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik açısından çeşitli zorluklar içerdiğini göstermektedir. TAEİ, azaltılmış malzeme israfı ve artırılmış verimlilik ile büyük ölçekli metal bileşenlerin üretilmesi için umut verici bir teknolojidir. Ancak enerji kullanımının fazla olması ve çevresel ayak izi, hedeflenen iyileştirmeleri ve sürdürülebilirlik odaklı düzenlemelere bağlı kalmayı gerektirir. Bu çalışma, TAEİ süreçlerinin çevresel etkisini azaltmak için yenilikçi teknolojilerin ve düzenleyici önlemlerin entegre edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Elde edilen sonuçlar, sadece üretim mühendisliği ve malzeme bilimi alanlarında değil, aynı zamanda enerji yönetimi, çevre mühendisliği ve politika çalışmaları gibi disiplinlerle iş birliğini gerektiren konulara da işaret etmektedir. Bu çalışma ile aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

Proses parametrelerinin optimizasyonu ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, TAEİ'nin enerji tüketimini ve buna bağlı karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir. Üretim süreçlerinde güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi temiz enerji kaynaklarının kullanımının artırılması

gerekmektedir.

Metal besleme stoklarının geri dönüştürülebilirliğinin artırılması, malzeme israfının en aza indirilmesi için çok önemlidir. Çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlaması açısından önlemler alınmalıdır.

Gelişmiş duman tahliyesi ve filtreleme teknolojileri, hava kirliliğinin azaltılması ve işyeri güvenliğinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir.

ISO standartları ve AB sürdürülebilirlik direktifleriyle uyum, TAEİ'nin küresel çevre hedefleriyle uyumluluğunu sağlayarak sürdürülebilir üretim uygulamalarını teşvik edecektir. Küçük ve orta ölçekli işletmeler için bu standartlara uyum sağlamak çeşitli zorluklar içermektedir. Bu bağlamda, küresel ve yerel ölçekte teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi tekniklerinin uygulanması ile daha verimli imalat süreci TAEİ teknolojisinde gerçekleştirilebilir.

Gelecekteki araştırmalar, TAEİ'nin enerji tüketimini ve çevresel etkisini daha da azaltacak yenilikçi malzemeler, süreç optimizasyon teknikleri ve düşük karbonlu üretim modelleri üzerine yoğunlaşmalıdır.

Referanslar

- [1] Liu, J., Xu, Y., Ge, Y., Hou, Z. and Chen, S., 2020. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(1), pp.149-198.
- [2] Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M., Santos, T.G. and Oliveira, J.P., 2019. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12(7), p.1121.
- [3] Su, J., Ng, W.L., An, J., Yeong, W.Y., Chua, C.K. and Sing, S.L., 2024. Achieving sustainability by additive manufacturing: a state-of-the-art review and perspectives. *Virtual and Physical Prototyping*, 19(1), p.e2438899.
- [4] Sharma, G., Rathore, S., Kumar, H. and Yadav, K.K., 2024. Wear Properties of Wire and Arc Additive Manufacturing Components: A review on recent developments on Processes, Materials and Parameters. *Library Progress International*, 44(3), pp.18374-18394.
- [5] Yurtkuran, H., 2021. An evaluation on machinability characteristics of titanium and nickel based superalloys used in aerospace industry. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2(2), pp.10-29.
- [6] GIRALT, L., 2024. A Comprehensive Analysis of the European Union's Integration of the Right to Development and the Sustainable Development Goals: EU Development: From Policy to Practice.
- [7] He, F., Yuan, L., Mu, H., Ros, M., Ding, D., Li, H. and Pan, Z., 2024. Integrating human

expertise to optimize the fabrication of parts with complex geometries in WAAM. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, pp.858-868.

[8] Kokare, S., Oliveira, J.P. and Godina, R., 2023. A LCA and LCC analysis of pure subtractive manufacturing, wire arc additive manufacturing, and selective laser melting approaches. *Journal of Manufacturing Processes*, 101, pp.67-85.

[9] Kokare, S., Shen, J., Fonseca, P.P., Lopes, J.G., Machado, C.M., Santos, T.G., Oliveira, J.P. and Godina, R., 2024. Wire arc additive manufacturing of a high-strength low-alloy steel part: environmental impacts, costs, and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134(1), pp.453-475.

[10] Sproesser, G., Chang, Y.J., Pittner, A., Finkbeiner, M. and Rethmeier, M., 2017. Energy efficiency and environmental impacts of high power gas metal arc welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, pp.3503-3513.

[11] Guo, Y., Zhang, Y., Pan, Z. and Zhou, W., 2024. Recent progress of sensing and machine learning technologies for process monitoring and defects detection in wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 125, pp.489-511.

[12] Bertoldi, P., 2022. Policies for energy conservation and sufficiency: Review of existing policies and recommendations for new and effective policies in OECD countries. *Energy and Buildings*, 264, p.112075.

[13] Mu, H., He, F., Yuan, L., Commins, P., Wang, H. and Pan, Z., 2023. Toward a smart wire arc additive manufacturing system: A review on current developments and a framework of digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, pp.174-189.

[14] Jain, R., Bharat, N. and Bose, P.S.C., 2023, March. Digital Twins of Hybrid Additive and Subtractive Manufacturing Systems—A Review. In *International Conference on Production and Industrial Engineering* (pp. 173-183). Singapore: Springer Nature Singapore.

[15] Paul, A.R. and Mukherjee, M., *Metal Alloys and Beyond: Analysing the Horizon of WAAM Materials*. In *Wire arc additive manufacturing* (pp. 89-138). CRC Press.

[16] Rashid, M., Sabu, S., Kunjachan, A., Agilan, M., Anjilivelil, T. and Joseph, J., 2024. *Advances in Wire-Arc Additive Manufacturing of Nickel-Based Superalloys: Heat Sources, DfAM Principles, Material Evaluation, Process Parameters, Defect Management, Corrosion Evaluation and Post-Processing Techniques*. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*.

[17] Hamrani, A., Bouarab, F.Z., Agarwal, A., Ju, K. and Akbarzadeh, H., 2023. Advancements and applications of multiple wire processes in additive manufacturing: a comprehensive systematic review. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1), p.e2273303.

[18] Bekker, A., Verlinden, J.C. and Galimberti, G., 2016. Challenges in assessing the sustainability of wire+ arc additive manufacturing for large structures.

[19] Reis, R.C., Kokare, S., Oliveira, J.P. and Godina, R., 2023. Life Cycle Assessment of Wire Arc Additive Manufacturing Products. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 422, p. 02003). EDP Sciences.

[20] Enemuoh, E.U., Menta, V.G., Abutunis, A., O'Brien, S., Kaya, L.I. and Rapinac, J., 2021. Energy and eco-impact evaluation of fused deposition modeling and injection molding of polylactic acid. *Sustainability*, 13(4), p.1875.

[21] Tiwari, A.S. and Yang, S., 2023. Energy consumption modeling of 3D-printed car-

bon-fiber-reinforced polymer parts. *Polymers*, 15(5), p.1290.

[22] Kazmer, D., Peterson, A.M., Masato, D., Colon, A.R. and Krantz, J., 2023. Strategic cost and sustainability analyses of injection molding and material extrusion additive manufacturing. *Polymer Engineering & Science*, 63(3), pp.943-958.

[23] Heinemann, T., 2016. Energy and resource efficiency in aluminium die casting. Cham: Springer International Publishing.

[24] Zeng, B., Salonitis, K. and Jolly, M.R., 2014. Investigating the energy consumption of casting process by multiple life cycle method. In *International conference on Sustainable Design and Manufacturing*.

[25] Marqués, A., Dieste, J.A., Monzón, I., Laguía, A., Javierre, C. and Elduque, D., 2024. Analysis of Energy and Material Consumption for the Manufacturing of an Aeronautical Tooling: An Experimental Comparison between Pure Machining and Big Area Additive Manufacturing. *Materials*, 17(13), p.3066.

[26] Chen, R., Yin, H., Cole, I.S., Shen, S., Zhou, X., Wang, Y. and Tang, S., 2020. Exposure, assessment and health hazards of particulate matter in metal additive manufacturing: A review. *Chemosphere*, 259, p.127452.

[27] Rodríguez-González, P., Ruiz-Navas, E.M. and Gordo, E., 2023. Wire Arc additive manufacturing (WAAM) for aluminum-lithium alloys: a review. *Materials*, 16(4), p.1375.

[28] Karpagaraj, A., Baskaran, S., Arunnellaiappan, T. and Kumar, N.R., 2020, July. A review on the suitability of wire arc additive manufacturing (WAAM) for stainless steel 316. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2247, No. 1). AIP Publishing.

[29] Mecheter, A., Tarlochan, F. and Kucukvar, M., 2023. A review of conventional versus additive manufacturing for metals: life-cycle environmental and economic analysis. *Sustainability*, 15(16), p.12299.

[30] Vanerio, D., Guagliano, M. and Bagherifard, S., 2024. Emerging trends in large format additive manufacturing processes and hybrid techniques. *Progress in Additive Manufacturing*, pp.1-28.

[31] Rupp, M., 2023. *Additive Manufacturing in Industry 4.0: Economical Analysis of Metal Components*.

[32] Rahman, M.A., Saleh, T., Jahan, M.P., McGarry, C., Chaudhari, A., Huang, R., Tauhiduzzaman, M., Ahmed, A., Mahmud, A.A., Bhuiyan, M.S. and Khan, M.F., 2023. Review of intelligence for additive and subtractive manufacturing: current status and future prospects. *Micromachines*, 14(3), p.508.

[33] Raut, L.P., Taiwade, R.V., Fande, A., Narayane, D. and Taweale, P., *Additive Manufacturing Integration with Welding*. In *Advanced Welding Techniques* (pp. 198-210). CRC Press.

[34] Helbrych, P., 2024. The influence of monofilament polypropylene fibers on the mechanical properties of concrete. *80 Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, (80).

[35] Monteiro, H., Carmona-Aparicio, G., Lei, I. and Despeisse, M., 2022. Energy and material efficiency strategies enabled by metal additive manufacturing—A review for the aeronautic and aerospace sectors. *Energy Reports*, 8, pp.298-305.

[36] Jung, S., Kara, L.B., Nie, Z., Simpson, T.W. and Whitefoot, K.S., 2023. Is additive

manufacturing an environmentally and economically preferred alternative for mass production?. *Environmental science & technology*, 57(16), pp.6373-6386.

[37] Al-Alimi, S., Yusuf, N.K., Ghaleb, A.M., Lajis, M.A., Shamsudin, S., Zhou, W., Altharan, Y.M., Abdulwahab, H.S., Saif, Y., Didane, D.H. and Ikhwan, S.T.T., 2024. Recycling aluminium for sustainable development: A review of different processing technologies in green manufacturing. *Results in Engineering*, p.102566.

[38] Pesode, P. and Barve, S., 2023. Additive manufacturing of metallic biomaterials: sustainability aspect, opportunity, and challenges. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 40(6), pp.464-505.

[39] Reisinger, U., Sharma, R., Mann, S. and Oster, L., 2020. Increasing the manufacturing efficiency of WAAM by advanced cooling strategies. *Welding in the World*, 64(8), pp.1409-1416.

[40] Kozamernik, N., Bračun, D. and Klobčar, D., 2020. WAAM system with interpass temperature control and forced cooling for near-net-shape printing of small metal components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(7), pp.1955-1968.

[41] Shah, I.H., Hadjipantelis, N., Walter, L., Myers, R.J. and Gardner, L., 2023. Environmental life cycle assessment of wire arc additively manufactured steel structural components. *Journal of Cleaner Production*, 389, p.136071.

[42] Bruneau, J., Dupont, D. and Renzetti, S., 2013. Economic instruments, innovation, and efficient water use. *Canadian Public Policy*, 39(Supplement 2), pp.S11-S22.

[43] Levänen, J., Hossain, M., Lyytinen, T., Hyvärinen, A., Numminen, S. and Halme, M., 2015. Implications of frugal innovations on sustainable development: Evaluating water and energy innovations. *Sustainability*, 8(1), p.4.

[44] Sachidananda, M. and Rahimifard, S., 2012. Reduction of water consumption within manufacturing applications. In *Leveraging Technology for a Sustainable World: Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, University of California at Berkeley, Berkeley, USA, May 23-25, 2012 (pp. 455-460). Springer Berlin Heidelberg.

[45] Sivakumar, M., Karthikeyan, R., Balaji, N.S. and Kannan, G.R., 2024. Advanced Techniques in Wire Arc Additive Manufacturing: Monitoring, Control, and Automation. *Advances in Additive Manufacturing*, pp.443-466.

[46] Aregarot, P., Kubaha, K. and Chiarakorn, S., 2024. A Study of Sustainability Concepts for Developing Green Universities in Thailand. *Sustainability*, 16(7), p.2892.

[47] Main, H. and Lemaster, C., *The European Green Deal: A Pathway to Climate Neutrality by 2050*.

[48] Wonglimpiyarat, J., 2024. Achieving the United Nations sustainable development goals—innovation diffusion and business model innovations. *foresight*.

[49] Verhoef, L.A., Budde, B.W., Chockalingam, C., Nodar, B.G. and van Wijk, A.J., 2018. The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach. *Energy Policy*, 112, pp.349-360.

[50] Alami, A.H., Olabi, A.G., Alashkar, A., Alasad, S., Aljaghoub, H., Rezk, H. and Abdelkareem, M.A., 2023. Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(11), p.102516.

- [51] Wan, L., Moan, T., Gao, Z. and Shi, W., 2024. A review on the technical development of combined wind and wave energy conversion systems. *Energy*, p.130885.
- [52] Lanzutti, A. and Marin, E., 2024. The Challenges and Advances in Recycling/Re-Using Powder for Metal 3D Printing: A Comprehensive Review. *Metals*, 14(8), p.886.
- [53] May, G. and Psarommatis, F., 2023. Maximizing Energy Efficiency in Additive Manufacturing: A Review and Framework for Future Research. *Energies*, 16(10), p.4179.
- [54] Pyo, J., Ock, Y., Jeong, D., Park, K. and Lee, D., 2017. Development of filter-free particle filtration unit utilizing condensational growth: With special emphasis on high-concentration of ultrafine particles. *Building and Environment*, 112, pp.200-208.
- [55] Hagelüken, C. and Goldmann, D., 2022. Recycling and circular economy—towards a closed loop for metals in emerging clean technologies. *Mineral Economics*, 35(3), pp.539-562.
- [56] Balasubramanian, A., Integration of Artificial Intelligence and Blockchain in Robotic Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Patent Landscape Analysis.

Soğutma Sistemlerinde Nanoakışkan Kullanımının Çevresel Sürdürülebilirliğinin Değerlendirilmesi

Ali Köse¹, Alişan Gönül²

Özet

Nanoakışkanlar; elektronik soğutma sistemleri, güneş enerjisi, havacılık ve uzay sektörleri, nükleer tesisler gibi birçok alanda soğutma verimliliğini artırmak için kullanılmaktadır. Nanoakışkanlar; nanometre boyutundaki partiküllerin su, etilen, glikol, yağ gibi baz akışkanlar içerisinde homojen bir şekilde dağılması ile elde edilmektedir. Nanopartiküllerin üretimi; nanoakışkanların hazırlanması, nanopartiküllerin karıştırılması ve stabilite- nin artırılması gibi aşamalardan oluşmaktadır. Bu aşamalar su kullanımı, atık oluşumu, enerji tüketimi, karbon ayak izi oluşumu gibi önemli çevresel parametreleri içermektedir. Nanoakışkanların soğutma sistemlerinde kullanımının çevresel sürdürülebilirlik üzerinde toksisite, metal bazlı nanopartiküller kullanıldığında korozyon, nanopartikül üretimi sırasında yüksek enerji gereksinimi, doğal kaynakların aşırı ve pahalı kullanımı, su kirliliği gibi birçok olumsuz etkisi bulunmaktadır. Bu çalışmada, nanoakışkanların üretim ve kullanım aşamalarında ortaya çıkan çevresel etkilerin sınıflandırılması ve çevresel sürdürülebilirliğin artırılması gibi önemli

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250311>

- 1 İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Bölümü, İstanbul, Türkiye, akose22@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0426-5159 (Sorumlu Yazar)
- 2 Siirt Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye, alisan.gonul@siirt.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6106-2251

konular detaylı olarak incelenecektir. Nanoakışkan kullanılması ile oluşan çevresel zararlarının azaltılarak sürdürülebilir soğutma sistemlerinin tasarımının nasıl gerçekleştirilebileceği konusunda görüşlere yer verilecektir.

Anahtar Kelimeler: Nanoakışkan, Sürdürülebilir Soğutma Sistemi, Sürdürülebilirlik, Enerji Verimliliği.

Evaluation of Environmental Sustainability of Nanofluid Use in Cooling Systems

Abstract

Nanofluids are used to increase cooling efficiency in many areas such as electronic cooling systems, solar energy, aviation and space sectors, nuclear facilities. Nanofluids are obtained by homogeneous dispersion of nanometre sized particles in base fluids such as water, ethylene, glycol, oil. The production of nanoparticles consists of stages such as preparation of nanofluids, mixing of nanoparticles and increasing stability. These stages include important environmental parameters such as water use, waste generation, energy consumption, carbon footprint formation. The use of nanofluids in cooling systems has many negative effects on environmental sustainability such as toxicity, corrosion when metal-based nanoparticles are used, high energy requirement during nanoparticle production, excessive and expensive use of natural resources, water pollution. In this study, important issues such as the classification of environmental impacts that occur during the production and use stages of nanofluids and increasing environmental sustainability will be examined in detail. Opinions on how the design of sustainable cooling systems can be realised by reducing the environmental damages caused by the use of nanofluid will be given.

Keywords: Nanofluid, Drivable Cooling System, Sustainability, Energy Efficiency.

1. Introduction

Current research areas such as increasing energy efficiency and reducing environmental impacts require the development of innovative solutions in

modern cooling systems. With the development of nanotechnology in the late 1980s, it has been observed that materials can be intervened at the atomic and molecular level and have superior thermal and physical properties. While traditional cooling fluids (such as water, oil, ethylene, glycol) have low thermal properties, technologies that achieve more efficient cooling fluids with added nanoparticles have started to develop. In this way, electronic cooling (such as microprocessors), solar energy (photovoltaic technologies), the automotive sector (engines) and the aerospace sector (jet engines) have emerged with the use of nanofluids in areas such as refrigerants [1-3]. Taking into account the Scopus data, the number of year-based studies collected as a result of the studies containing the words ‘Nanofluid’ and ‘Cooling’ together is shared in Figure 1. When Figure 1 is examined, it is observed that the studies in this field are increasing day by day.

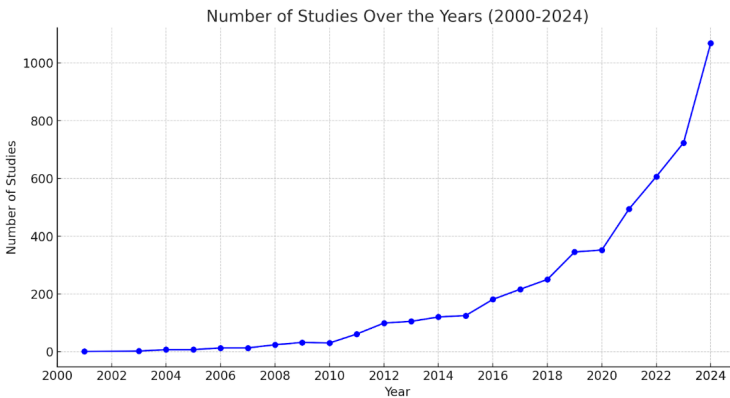


Figure 1. Year-based Nanofluid cooling systems studies calculated with the help of Scopus data (2000-2024)

Taking Scopus data into account, a bibliometric analysis was carried out using the words ‘nanofluid’ and ‘cooling’ along with the literature data to observe their research areas and what common features they have. This bibliometric literature analysis, which shows that the observed increase in the number of studies with nanofluid is due to the positive physical properties of nanofluid, is shared in Figure 2.

The fact that these two concepts are frequently mentioned together in the bibliometric analysis is an indication that researchers are showing great interest in increasing efficiency and energy savings by using nanofluids in cooling technologies. When Figure 2 is examined, it is observed

2.1. Nanofluid Application Areas

Nanofluids have been used for cooling purposes in many fields such as automotive, defense, space, manufacturing, nuclear industry. Table 1 was created by considering the literature [1-11].

Table 1. Application areas and intended uses of nanofluids in refrigeration technologies [1-11]

Application Area	Purpose of use
Automotive Industry	To achieve smaller and more efficient cooling systems [1], The use of nanofluid to minimize the footprint of compact heat exchangers preferred in the automotive industry [2] and to improve heat management [3], Effective management of heat in engine oil applications, transmission oil applications and radiator coolers [4], To regulate the temperature of the engine and other systems more efficiently [5], To extend the life of mechanical components by reducing friction in vehicles [9-10]
Electronic Cooling	In microchannel coolers to rapidly deliver heat to high power density electronic devices (CPU, GPU, MEMS) [1], [5]. Miniaturized thermal management applications to provide effective temperature control in confined spaces [7].
Cooling in HVAC Systems	To increase cooling capacity and energy efficiency in refrigeration and HVAC systems [1].
Machinery and Manufacturing Sector	For their high thermal performance in space, defense and marine applications subjected to extreme heat loads [1].
Medical Applications	In medical applications such as drug delivery, functional tissue cell interaction, biosensors [1]. To take advantage of the heat and mass transfer advantages of nanofluids in medical applications such as targeting cancer cells, drug containment [3]. It is used in targeted drug delivery systems, antibacterial applications, cancer treatment methods, imaging and diagnostic applications [8], [11].
Solar Energy Systems	In solar thermal systems, converting solar energy into heat and increasing efficiency in heat storage systems [1], Heat collection and transfer in solar collectors and thermal energy storage systems with better performance than conventional fluids [3], To collect more energy from the plates, increasing the energy conversion efficiency of the collectors [5], To improve both sensible and latent heat capacity by the addition of nanoparticles into phase change materials or eutectic salts in solar thermal energy storage systems [5]. For energy conversion in concentrated solar energy systems [6].

Heat Exchanger Industry	Providing more compact and high performance energy exchange by increasing surface efficiency in industrial heat exchangers [1], Plate, shell and tube, double tube and compact heat exchanger types provide more efficient heat transfer at lower flow rates with the use of nanofluid [2], To adjust heat transfer by increasing the heat transfer coefficient in closed circuit heat pipes [5], To increase the heat transfer of the fluid in microchannel heat exchangers and to provide efficient thermal management [7].
Nuclear Reactor Cooling	In order to optimize heat transfer in nuclear reactors due to critical heat flow and safety requirements [1], [10].
Geothermal Energy Applications	To ensure energy transfer in geothermal heat exchange systems [6].
Waste Heat Recovery	For energy recovery from waste heat from industrial processes or power generation plants [5].
Oil and Natural Resource Production	To improve heat transfer efficiency in oil extraction processes [3].

When Table 1 is examined, it is observed that nanofluids are used in many different fields due to their properties such as energy management, energy efficiency increase, and life extension.

2.2. Types of Nanoparticles Used

It is possible to classify nanofluids according to the nanoparticles used in their production. When the literature is examined, metal-based, metal oxide-based, carbon-based, ceramic-based nanoparticles are commonly encountered [1-14]. Figure 4 shows the classification of nanofluids according to the nanoparticle materials used.

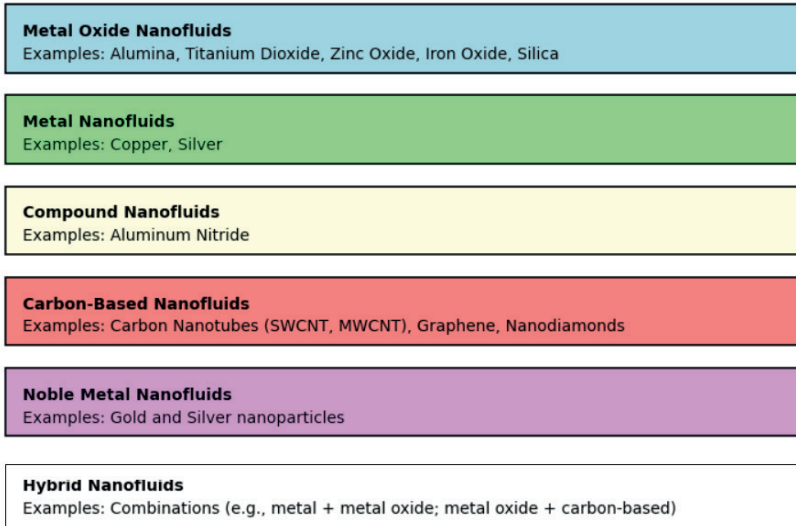


Figure 4. Classification of nanofluids according to the type of material used

In nanofluids where metals such as Copper (Cu), Silver (Ag) are used, an important advantage is obtained with the superior thermal conductivity of the particles [9]. Inhomogeneous dispersion, which is generally experienced in metals, can be prevented by the use of metal oxides such as Al_2O_3 (Alumina), CuO (Copper Oxide), TiO_2 (Titanium Oxide), ZnO (Zinc Oxide) [4], [13]. Metal oxides can offer additional functionality (antibacterial) despite their high chemical stability [4], [13]. Carbon-based (CNT, Graphene) nanoparticles can be used to provide the nanofluid with very high thermal conductivity over a large surface area [3]. It is known that ceramic-based (AlN, SiC) is widely used in the cooling of electronic circuit elements as it provides both heat transfer enhancement and electrical insulation [8]. In addition, combining different types of nanoparticles and providing properties such as high thermal conductivity and low viscosity can be achieved by using hybrid nanofluids [5]. In Table 2, the type and general properties of nanofluids are shared according to the material used.

Table 2. Classification of nanofluids according to the type of material used

Nanoparticle	Category	Properties
Al ₂ O ₃ (Alumina)	Metal Oxide	High thermal conductivity, improved thermal performance, low cost [1], [4]
CuO (Copper Oxide)	Metal Oxide	Efficient heat transfer, high thermal conductivity [4], [13]
TiO ₂ (Titanium Oxide)	Metal Oxide	Chemical stability, increased thermal conductivity [13]
ZnO (Zinc Oxide)	Metal Oxide	Antibacterial properties increase, thermal stability increases [13]
Fe ₂ O ₃ (Magnetite)	Metal Oxide	Magnetic properties, thermal conductivity increase [2], [9].
Cu (Copper)	Metal	High thermal conductivity, good heat dissipation method [9]
Ag (Silver)	Metal	Antibacterial properties, high thermal conductivity [9]
CNT (Carbon Nanotubes)	Carbon Based	High thermal conductivity, high aspect ratio, mechanical strength [3]
Graphene	Carbon Based	High thermal conductivity, large surface area, light weight [3], [5]
Nano-Diamond	Carbon Based	High thermal conductivity, low friction, chemical inertness [3]
AlN (Aluminum Nitride)	Ceramic Based	High thermal conductivity, electrical insulation, chemical stability [8]
SiC (Silikon Carbide)	Ceramic Based	High thermal conductivity, electrical insulation, chemical stability [8]

When Table 2 is examined, it is seen that nanofluids produced from metal, metal oxide, carbon-based or other nanomaterials have different advantages such as thermal conductivity, viscosity and stability, and by evaluating these advantages, the most suitable nanoparticle specific to the application to be studied can be selected.

2.3. Types of Base Fluid Used

In order to better understand the internal structure of nanofluids, it is necessary to examine the type of base fluid in which they are produced. The use of different base fluids affects the thermophysical properties, cooling performance and stability of nanofluids [10-12]. Considering that the base fluid affects the properties of the nanofluid considerably, the types and properties of nanofluids according to different base fluid types used in the literature are shared in Table 3.

Table 3. Classification and general properties of nanofluids according to the types of base fluid used

Category	Base Fluid	Properties
Water-Based Nanofluids	Deionized Water Distilled Water	Increase in thermal conductivity with the use of water, homogeneous dispersion of nanoparticles in the water fluid, wide usage area, environmental friendliness, low cost [3], [10].
Glycol Based Nanofluids	Ethylene glycol (EG) Propylene Glycol (PG) Water-Glycol mixtures	Glycol is used because of its low freezing point and antifreeze properties. If it is mixed with water, both high heat capacity and lower freezing point are achieved [4], [10].
Oil Based Nanofluid	Mineral oil Transformer oil Motor oil Transmission oil	It is used in processes such as lubrication and cooling, suitable for working in high temperature environment. Although viscosity increase is a negative feature in some cases, it provides much increase in heat transfer performance [2], [4].
Ionic Liquid Based	Ionic Liquids	Due to its low volatility, high thermal and chemical resistance, it is preferred in low pressure, high temperature environments. It is generally used in space applications [11].
Organic Solvent Based	Alcohols (e.g. ethanol, isopropanol)	It is widely used in the biomedical field due to its low viscosity and specificities in optical and chemical properties. Due to their behavior in organic solvents, they can be used in specific areas [10-11].

3. Effects Of Cooling Nanofluids

In this section, the environmental impacts of nanofluids during production, use and disposal will be evaluated within the scope of the literature review.

3.1 Effects in the Production Phase

Many situations such as the method to be used in the production of nanofluids, the energy consumed, the waste generated, and the use of chemicals affect environmental sustainability [13], [16]. In this case, it can be said that the production stage of nanofluids has both some advantages and some disadvantages in terms of environmental sustainability.

Homogeneous distribution of nanoparticles produced with advanced production techniques can significantly improve heat transfer efficiency [13]. Homogeneous distribution of non-particles in the base fluid can reduce the environmental burden by reducing the use of unnecessary raw materials and increasing energy efficiency.

Optimizing the amount of nanoparticles to be used in the production phase can reduce the environmental burden by reducing raw material

consumption [13]. Single-stage production aspects in nanofluid production can increase carbon emissions by causing both the accumulation of environmentally harmful materials and unnecessary energy consumption with high energy consumption and high reactive inheritance rate [16]. Waste and residue formation of active chemical products, surfactants and other harmful materials used in the production of nanofluids can also be expressed as a significant environmental hazard [13], [16].

3.2 Effects during the Utilization Phase

Nanoparticles added to the base fluids significantly increase the thermal heat transfer value of the fluid. Figure 5 shows the values of some particles and nanofluids used for nanoparticles. When the figure is examined, it can be said that the fluid thermal performance is considerably increased with the added nanoparticle [15-21]. When the literature is examined, it can be said that nanofluids in many fields such as industrial, automotive, electronics, biomedical, nuclear and petroleum reduce carbon emissions by reducing energy consumption with the increase in thermal performance [1-21]. In addition to their environmental effects, it is necessary to choose the right nanoparticle and basefluid to be used to improve the environmental sustainability of nanofluids, since negative situations such as water pollution, instability, corrosion, agglomeration are encountered [4], [13], [18-21].

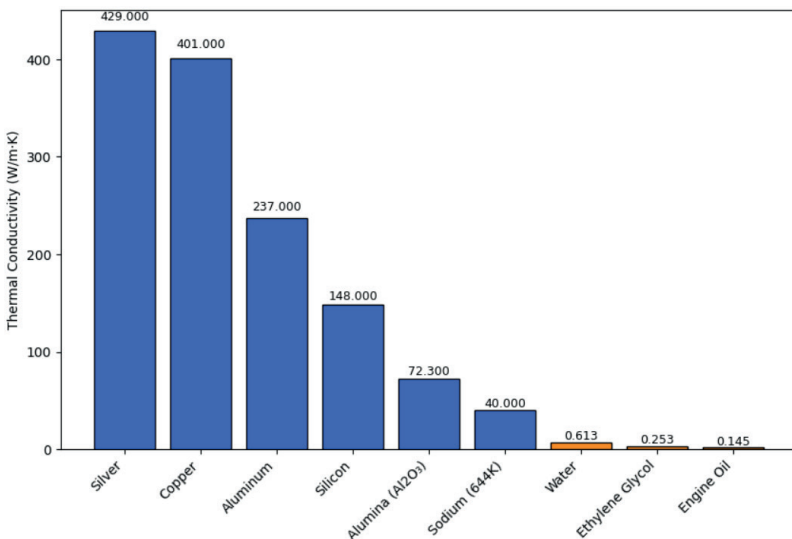


Figure 5. Thermal conductivity values of particulate and base fluids commonly used in nanofluids

When Figure 5 is examined, it is seen that the thermal conductivity value is significantly increased by using nanoparticles in nanofluid production. In this way, it is known that the energy efficiency in cooling systems is increased with the low pressure drop they have gained together with the increased thermal conductivity of the nanofluids used [3], [4]. In addition, by using nanofluids in cooling technologies in automotive, industrial and electronic industries, it is possible to reduce energy consumption by designing more compact and highly energy efficient systems [3], [4]. Considering such situations, it can be interpreted that the use of nanofluids in cooling systems in general will increase environmental sustainability. Considering specific cases, failure to ensure long-term stability of nanofluids during nanofluid cooling may lead to additional maintenance costs due to nanoparticle agglomeration and performance degradation, which may be a disadvantage in terms of environmental sustainability [1]. In addition, the additional cost and chemical burden caused by the stabilizer (surfactant) used to stabilize the nanoparticles in the nanofluid can be said to negatively affect environmental sustainability [1], [4].

3.3. Effects during the Recycling Phase

Nanofluids produced with metal oxide are said to contain non-toxic nanoparticles [21]. By choosing metal oxide as nanoparticles, the disposal or recycling process of the nanofluid can significantly reduce the damage to the environment [13], [21]. It can be said that post-use recycling and disposal methods of nanofluids are not sufficiently developed and may cause long-term environmental problems such as water and soil pollution with the direct release of nanoparticles into the environment [20-21].

5. Conclusion And Future Works

In this study, general information such as the formation of nanofluids, the classification of the elements used, and the advantages and disadvantages of nanofluids in terms of environmental sustainability in the production, use and disposal (recycling) stages were examined.

- In the production phase of nanofluids, different production methods can be used to ensure homogeneous distribution of nanoparticles, increasing energy efficiency and reducing the use of raw materials. In addition, waste and by-products from substances such as chemical reagents and sur-

factants used may cause environmental pollution and damage environmental sustainability if waste management is not performed.

- Nanofluids contribute positively to environmental sustainability with reduced carbon emissions by providing more efficient cooling by increasing heat transfer efficiency during the use phase. Failure to ensure long-term stability of nanofluids, nanoparticle agglomeration and associated additional maintenance costs may increase environmental risks during use

- Since the nanofluid types preferred in the recycling phase of nanofluids (e.g. metal oxide-based systems) contain non-toxic nanoparticles, environmental risks in disposal processes can be reduced when managed correctly.

New studies on the use of nanofluids in cooling systems can be classified as follows.

- In the production of nanofluids, it is necessary to develop methods that minimize waste generation by using lower energy consumption and environmentally friendly chemicals.

- Research on increasing nanofluid stability and eliminating agglomeration problems will support environmental sustainability by maintaining system performance.

- Life cycle analysis of nanofluids and optimization of recycling and disposal processes are critical to reduce negative environmental impacts.

References

- [1] Saidur, R., Leong, K. Y., & Mohammed, H. A. (2011). A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1646-1668.
- [2] Huminic, G., & Huminic, A. (2012). Application of nanofluids in heat exchangers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5625-5638.
- [3] Li, J., Zhang, X., Xu, B., & Yuan, M. (2021). Nanofluid research and applications: A review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 127, 105543.
- [4] Sidik, N. A. C., Yazid, M. N. A. W. M., & Mamat, R. (2015). A review on the application of nanofluids in vehicle engine cooling system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 68, 85-90.
- [5] Dey, D., & Sahu, D. S. (2021). A review on the application of the nanofluids. *Heat Transfer*, 50(2), 1113-1155.
- [6] Xiong, Q., Altnji, S., Tayebi, T., Izadi, M., Hajjar, A., Sundén, B., & Li, L. K. (2021). A comprehensive review on the application of hybrid nanofluids in solar energy collectors. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101341.

- [7] Apmann, K., Fulmer, R., Scherer, B., Good, S., Wohld, J., & Vafaei, S. (2022). Nanofluid heat transfer: enhancement of the heat transfer coefficient inside microchannels. *Nanomaterials*, 12(4), 615.
- [8] Sheikhpour, M., Arabi, M., Kasaeian, A., Rokn Rabei, A., & Taherian, Z. (2020). Role of nanofluids in drug delivery and biomedical technology: Methods and applications. *Nanotechnology, Science and Applications*, 47-59.
- [9] Puliti, G., Paolucci, S., & Sen, M. (2011). Nanofluids and their properties. *Applied Mechanics Reviews*, 64(3), 030803.
- [10] Devendiran, D. K., & Amirtham, V. A. (2016). A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 21-40.
- [11] Yu, W., & Xie, H. (2012). A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of nanomaterials*, 2012(1), 435873.
- [12] Taylor, R., Coulombe, S., Otanicar, T., Phelan, P., Gunawan, A., Lv, W., ... & Tyagi, H. (2013). Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids. *Journal of applied physics*, 113(1).
- [13] Wong, K. V., & De Leon, O. (2010). Applications of nanofluids: current and future. *Advances in mechanical engineering*, 2, 519659.
- [14] Mishra, P. C., Mukherjee, S., Nayak, S. K., & Panda, A. (2014). A brief review on viscosity of nanofluids. *International nano letters*, 4, 109-120.
- [15] Choi, S. U., & Eastman, J. A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles (No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29). Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States).
- [16] Haddad, Z., Abid, C., Oztop, H. F., & Mataoui, A. (2014). A review on how the researchers prepare their nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 76, 168-189.
- [17] Hwang, Y., Lee, J. K., Lee, J. K., Jeong, Y. M., Cheong, S. I., Ahn, Y. C., & Kim, S. H. (2008). Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids. *Powder technology*, 186(2), 145-153.
- [18] He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D., & Lu, H. (2007). Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *International journal of heat and mass transfer*, 50(11-12), 2272-2281.
- [19] Philip, J., & Shima, P. D. (2012). Thermal properties of nanofluids. *Advances in colloid and interface science*, 183, 30-45.
- [20] Angayarkanni, S. A., & Philip, J. (2015). Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments. *Advances in colloid and interface science*, 225, 146-176.,
- [21] Tabora, E. A., Franco, C. A., Lopera, S. H., Alvarado, V., & Cortés, F. B. (2016). Effect of nanoparticles/nanofluids on the rheology of heavy crude oil and its mobility on porous media at reservoir conditions. *Fuel*, 184, 222-232.

Gedik MYO'nun Enerji Dönüşümüne Sürdürülebilir Yaklaşımı: RES İncelemesi

Ceren Aydın¹, Egemen Sulukan²

Özet

Bu çalışma, Gedik Meslek Yüksekokulunun (Gedik MYO) enerji sistemlerini analiz etmek ve enerji yönetimini daha verimli hâle getirmek amacıyla referans enerji sistemi (RES) yaklaşımını uygulamaktadır. RES, enerji arz ve talep süreçlerinin detaylı ve sistematik bir şekilde modellenmesine olanak tanıyan güçlü bir analiz aracıdır. Çalışmada, Gedik MYO'nun mevcut enerji altyapısı titizlikle incelenmiş ve enerji akışları şematik olarak ortaya konmuştur. Böylece, enerji arzından nihai enerji talebine kadar olan süreçler arasındaki etkileşimler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Analiz sırasında Gedik MYO'nun enerji arz kaynakları, enerji dönüşüm teknolojileri ve nihai enerji taşıyıcıları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elektrik üretim ve dağıtım süreçleri ile bu süreçleri destekleyen dizel yakıtlar gibi teknolojiler analiz edilmiştir. Bu teknolojiler, hem enerji dönü-

DOI: <https://doi.org/10.61150/gedikyay.250312>

1 İstanbul Gedik Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, İstanbul, Türkiye, ceren.aydin@gedik.edu.tr, ORCID: 0009-0009-3377-9798

2 İstanbul Gedik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, egemen.sulukan@gedik.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1138-2465

şüm süreçlerinde oynadığı rol açısından hem de verimlilik seviyeleri bakımından değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, Gedik MYO'nun enerji tüketim profilleri belirlenmiş ve bu tüketimin karşılanmasında kullanılan sistemlerin performansı analiz edilmiştir. Örneğin, ısıtma, soğutma, aydınlatma gibi temel enerji talebi alanlarında kullanılan teknolojiler ile bu teknolojilerin sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, Gedik MYO'nun enerji yönetiminde daha sürdürülebilir stratejiler geliştirmesi için somut öneriler sunmaktadır. Örneğin, mevcut enerji dönüşüm teknolojilerinin modernizasyonu, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji tasarrufuna yönelik davranışsal değişikliklerin teşvik edilmesi gibi çözümler önerilmiştir. Ayrıca, bu çalışma, eğitim kurumlarının enerji sistemlerini daha verimli ve sürdürülebilir hâle getirmek için RES tabanlı bir yaklaşımın uygulanabilirliğini vurgulamaktadır. Yerel ölçekteki bir kurumun enerji dönüşümüne yönelik bu detaylı yaklaşımı, diğer benzer kurumlar için de bir model oluşturabilir. Bu bağlamda, Gedik MYO özelinde gerçekleştirilen bu çalışma, hem akademik literatüre hem de enerji yönetimi uygulamalarına katkı sağlayabilecek nitelikte önemli bir örnektir.

Anahtar Kelimeler: Referans Enerji Sistemi, Gedik MYO, Enerji Yönetimi, Sürdürülebilirlik, Enerji Verimliliği.

A Sustainable Approach to Energy Transition at Gedik Vocational School: An Analysis of the Reference Energy System (RES)

Abstract

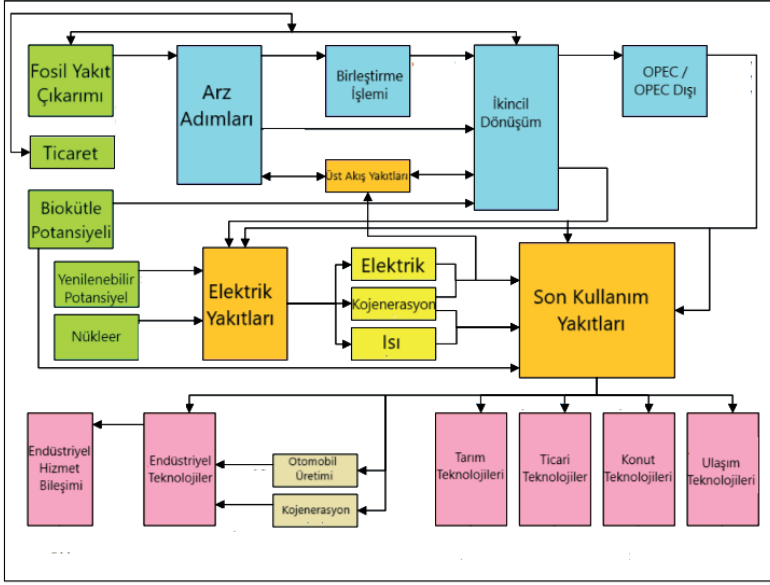
This study applies the Reference Energy System (RES) approach to analyze and enhance the energy management systems of Gedik Vocational School (MYO). RES is a robust analytical tool that enables the detailed and systematic modeling of energy supply and demand processes. In this context, the existing energy infrastructure of Gedik Vocational School has been thoroughly examined, and energy flows have been schematically represented. Thus, the interactions between energy supply and final energy demand processes have been comprehensively evaluated. The analysis involved a detailed examination of Gedik Vocational School's energy supply sources, energy transformation technologies, and final energy carriers. Te-

chnologies such as diesel fuels used in electricity production and distribution processes were analyzed in terms of their roles in energy transformation processes and their efficiency levels. Additionally, the energy consumption profiles of Gedik Vocational School were determined, and the performance of systems used to meet this demand was evaluated. For example, the technologies employed in core energy demand areas such as heating, cooling, and lighting were assessed, including their impacts on sustainability. The findings provide concrete recommendations for Gedik Vocational School to develop more sustainable strategies in energy management. Proposed solutions include the modernization of existing energy transformation technologies, the integration of renewable energy sources, and the promotion of behavioral changes aimed at energy conservation. Furthermore, this study emphasizes the applicability of RES-based approaches to improving the energy systems of educational institutions, making them more efficient and sustainable. This comprehensive approach to energy transformation at a local-scale institution not only serves as a model for similar organizations but also contributes significantly to academic literature and energy management practices. In this context, the study conducted at Gedik Vocational School represents an important example that offers valuable insights for both theoretical and practical advancements.

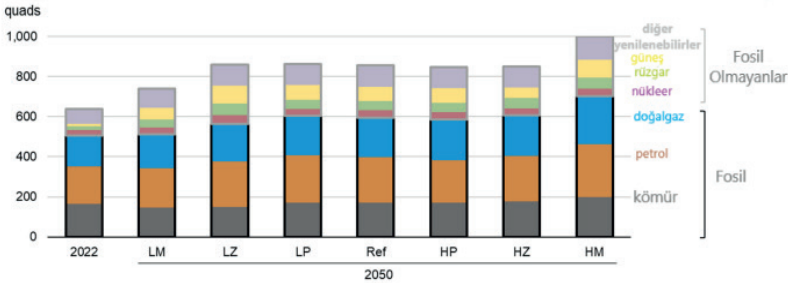
Keywords: Reference Energy System, Gedik Vocational School, Energy Management, Sustainability, Energy Efficiency.

1. Giriş

Enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği ve verimliliği günümüzün öncelikli konularındandır. Bu çalışmada, Gedik MYO'nun mevcut enerji altyapısı, Referans Enerji Sistemi (RES) yaklaşımıyla analiz edilmiştir. RES, enerji arz ve talep süreçlerini detaylı ve sistematik bir şekilde modelleme imkânı sunar. Çalışmanın temel amacı, Gedik MYO'nun enerji yönetiminde daha verimli ve sürdürülebilir stratejiler geliştirilmesine katkı sağlamaktır. Bu doğrultuda, enerji dönüşüm teknolojileri, nihai enerji taşıyıcıları ve temel enerji talep alanları incelenmiş, elde edilen bulgularla iyileştirme önerileri sunulmuştur. Aşağıda Şekil 1'de, Genel Referans Enerji Sistemi yapısı gösterilmektedir. Bu yapı, enerji arz ve talep süreçlerini modelleme açısından önemli bir temel sunar.



Şekil 1. Genel Referans Enerji Sistemi Yapısı (Energy Information Administration, 2003).



Şekil 2. Dünyada Yakıtı Göre Birincil Enerji Kullanımı (U.S. Energy Information Administration, 2023).

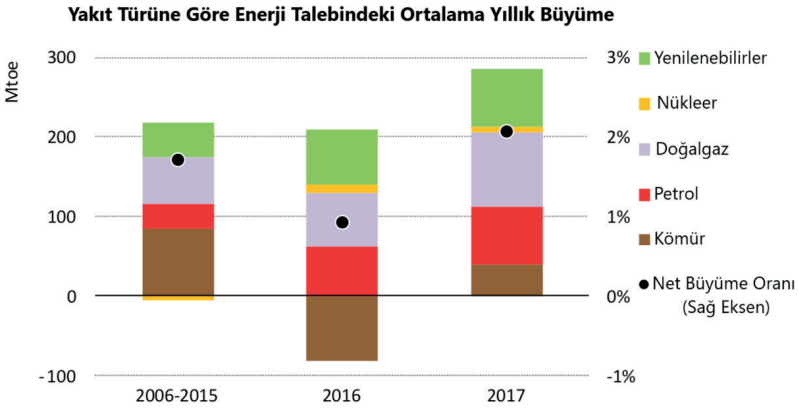
Yukarıdaki Şekil 2'de ise dünya genelinde yakıtı göre birincil enerji kullanım oranları gösterilmektedir. Farklı enerji kaynaklarının küresel ölçekteki dağılımını ve eğilimlerini anlamak için bu veri önemlidir.

Enerji sistemlerinin sürdürülebilir dönüşümü, hem çevresel hem de ekonomik etkileri nedeniyle son yıllarda yoğun bir şekilde incelenmektedir. Referans Enerji Sistemi (RES) modeli, enerji arz ve talep süreçlerini modellemede etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır [16]. MARKAL ailesinin standart versiyonunda enerji sistemlerinin intertemporal dengelerini

sağlamak için detaylı bir yapı sunduğunu ve bu sistemin sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağladığını belirtmiştir. SAGE modeli ise kısa vadeli kararların önemine vurgu yaparak enerji piyasalarındaki belirsizlikleri ele alır [14]. Bu model, enerji sistemlerini bölgesel ve küresel düzeyde analiz ederek karar alma süreçlerini optimize etmeyi hedefler. Bunun yanında MARKAL-MACRO modeli, ekonomik büyüme ve enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi detaylı bir şekilde ele alarak, teknolojik yatırımların ve maliyetlerin uzun vadeli etkilerini inceler [17].

2. Literatür Taraması

Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) ön tahminlerine göre küresel enerji talebi 2017 yılında %2,1 oranında, 2016 yılındaki büyüme oranının 2 katından daha fazla büyümüştür. 2010 yılında 10.035 milyon ton petrol eşdeğerinde (Mtoe) olan küresel enerji talebi 2017 yılında tahmini 14.050 milyon ton petrol eşdeğerine (Mtoe) ulaşmıştır. Aşağıdaki Şekil 3'te, yakıt bazında enerji talebindeki yıllık ortalama büyüme oranları gösterilmektedir. Küresel enerji talebinin yıllara göre değişimini analiz etmek için kullanılmaktadır.



Şekil 3. Yakıt ile enerji talebinde ortalama yıllık büyüme (International Energy Agency 2018).

Fosil yakıtlar, dünyadaki enerji talebindeki büyümenin %70'ini karşılamaktadır. 2017 yılında küresel enerji talebindeki fosil yakıtların toplam payı %81 seviyesinde kalırken, yenilenebilir enerjideki güçlü büyümeye rağmen otuz yılı aşkın bir süredir sabit kalmıştır. 2017 yılında küresel

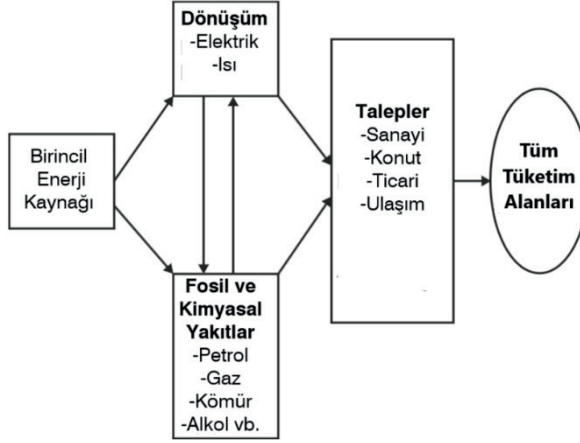
enerji verimliliğindeki iyileşmeler yavaşladı [5]. Gemiler, dünyamızdaki en önemli nakliye ve ticaret araçlarından biridir. Artan küresel nakliye hacimleri nedeniyle gemi kaynaklı sera gazı emisyonları 2050 yılına kadar 2012 seviyesine göre %250 artabilir [19]. Kontrol edilmeyen bu emisyon seviyelerinin, 2050 yılına kadar küresel CO₂ emisyonlarının %17'sini oluşturması öngörülmektedir [20]. Bir geminin enerji verimliliğini artırmak, esas olarak yakıt tüketimini ve GHG emisyonlarını azaltmaya da olanak tanır. Gemilerden kaynaklanan emisyonların kontrolü için geminin dizayn esnasında enerji verimliliğini etkileyen yenilikçi ve teknolojik gelişmeler kadar hâlihazırdaki gemilerin enerji verimliliğinin arttırılması ve gemi kaynaklı emisyon salınımının azaltılması da önemli bir yere sahiptir [21]. Enerjinin değerli bir meta olması sebebiyle üretilmesinden tüketilmesine kadar her aşamasında özen gösterilmesini de birlikte getirmektedir. Gemilerin kullanım sürelerini; gemi yapımından deniz sökme aşamalarına kadar analiz eden, operasyon ve bakım konuları dâhil olmak üzere deniz taşımacılığına odaklanan önemli çalışmalar yapılmıştır [10]. Fosil yakıtlar, en önemli birincil enerji kaynağıdır ve sosyo-politik dinamiklere göre fiyatları büyük ölçüde dalgalanmaktadır [4]. Enerji ürünlerinin ithalatına yüksek bağımlılık, toplam maliyet ve tedarik güvenliğinin risklerini artırır [9]. Bu bakımdan, bir geminin enerji sistemi, teknoloji, ekonomi ve çevre konularını aynı noktada göz önünde bulundurarak bütünsel bir yaklaşımla dikkatlice analiz edilmelidir.

Bu çalışmalar ışığında, RES tabanlı analizlerin eğitim kurumları gibi spesifik alanlarda uygulanabilirliği değerlendirilmektedir. Gedik MYO özelinde yapılan bu çalışma, mevcut literatürdeki modellerin yerel ölçekteki kurumlar için nasıl uygulanabileceğini göstermesi açısından önemlidir.

3. RES Konsepti ve Karar Destek Araçları

Referans Enerji Sistemi (RES) adı verilen yapı, temel olarak sabit ve değişken maliyetler, teknoloji kullanılabilirliği, performans ve kirlenici emisyonlar dâhil olmak üzere, enerji dengesini elde etmek için kullanılan teknolojilerin ve kaynakların özelliklerini tanımlayan bir dizi parametredir. RES, son kullanım faaliyetlerine çeşitli enerji biçimlerini sağlamak için gerekli olan tüm teknoloji faaliyetlerinin bir ağ temsilidir [2]. RES, her bir son kullanım talebine çeşitli dönüşüm adımlarıyla her bir birincil enerji kaynağından olası tüm yolları gösteren bir akış şemasıdır. Bu şema belirli bir zaman dilimine ait (ör.:2010 ya da 2015 gibi.) bir an için tanımlanır ve mevcut teknoloji ya da enerji gereksiniminin referans senaryolar ile karşı-

laştırılmasında kullanılır. Aşağıdaki Şekil 4’de, örnek bir Referans Enerji Sistemi (RES) gösterilmektedir. Bu model, enerji akışlarını sistematik olarak analiz etmeye yardımcı olur.

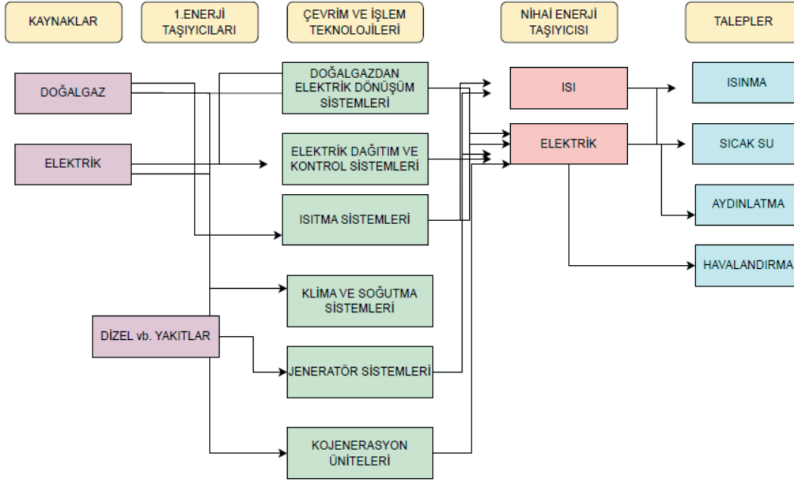


Şekil 4. Örnek bir RES [16].

3.1. Gedik MYO RES Çalışmasının Yorumu

Gedik MYO’nun Enerji sistemlerini kaynaklardan son kullanıcılara kadar görselleştiren bir referans enerji sistemi diyagramıdır. Başlangıçta, enerji kaynakları arasında doğalgaz, elektrik ve dizel gibi birincil enerji kaynakları bulunur. Bu kaynaklar, sistemin ilk girdilerini oluşturur ve birinci enerji taşıyıcıları aracılığıyla çevrim ve işlem teknolojilerine yönlendirilir.

Çevrim aşamasında doğalgazdan elektrik dönüşüm sistemleri, elektrik dağıtım ve kontrol sistemleri, ısıtma sistemleri, klima ve soğutma sistemleri, jeneratör sistemleri ve kojenerasyon üniteleri yer alır. Bu sistemler, enerji kaynaklarını nihai enerji taşıyıcılarına dönüştürerek son kullanıcı ihtiyaçlarına uygun hâle getirir. Nihai enerji taşıyıcıları arasında ısı ve elektrik bulunur. Bu taşıyıcılar, kullanıcıların ihtiyaçlarını karşılamak üzere taleplere yönlendirilir. Talepler arasında ısınma, sıcak su, aydınlatma ve havalandırma gibi enerji kullanım alanları yer alır. Bu sistem, enerji akışını kaynaklardan son kullanıcılara kadar etkili bir şekilde takip eder. Kojenerasyon üniteleri gibi teknolojiler, enerji verimliliğini artırmayı hedeflerken, çeşitlendirilmiş enerji kaynakları enerji güvenliğini sağlamayı amaçlar. Aşağıdaki Şekil 5’te Gedik Meslek Yüksekokulunun RES incelemesi yer almaktadır.



Şekil 5: Gedik MYO RES İncelemesi.

Sonuçlar

Bu çalışma, Referans Enerji Sistemi (RES) modeli kullanılarak Gedik Meslek Yüksekokulunun (MYO) enerji yönetim süreçlerini analiz etmek ve iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, enerji arzı ve talebi arasındaki etkileşimler detaylı bir şekilde ele alınarak, mevcut enerji altyapısının sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Elde edilen bulgular, hem teknolojik modernizasyon gerekliliğini hem de yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunun önemini vurgulamaktadır. Çalışmada Gedik MYO'nun mevcut enerji yönetim sistemleri kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve özellikle elektrik üretimi ve dağıtımı, ısıtma ve soğutma sistemleri, aydınlatma gibi temel enerji kullanım alanlarında çeşitli verimsizlikler tespit edilmiştir. Elektrik enerjisinin büyük ölçüde dizel jeneratörler gibi fosil yakıt tabanlı sistemlerden sağlanıyor olması, uzun vadede ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir olmayan bir yapı oluşturduğunu göstermektedir.

Ayrıca, enerji arz güvenliğini artırmak adına alternatif enerji kaynaklarının araştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Çalışmada elde edilen veriler, Gedik MYO'nun enerji dönüşüm süreçlerinde verimlilik artırıcı önlemler alması gerektiğini göstermektedir. Özellikle elektrik ve ısı enerjisinin üretimi ve kullanımı ile ilgili süreçlerde daha modern ve çevre dostu

teknolojilere geçiş yapılmasının enerji maliyetlerini düşüreceği ve karbon ayak izini azaltacağı görülmüştür. Mevcut sistemin sürdürülebilirlik açısından ele alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının (örneğin güneş ve rüzgar enerjisi) henüz aktif olarak sistemin bir parçası hâline getirilmediği tespit edilmiştir. Ancak, yapılan analizler, Gedik MYO'nun fotovoltaik güneş panelleri ve küçük ölçekli rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir enerji çözümlerine yönelerek karbon salınımını azaltabileceğini ve uzun vadede enerji maliyetlerini düşürebileceğini göstermektedir. Özellikle Referans Enerji Sistemi modeli kullanılarak yapılan değerlendirmeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edilmesinin hem teknik hem de ekonomik olarak mümkün olduğunu göstermiştir. Bu doğrultuda, Gedik MYO'nun mevcut fosil yakıt tabanlı enerji altyapısını aşamalı olarak yenilenebilir enerji çözümleri ile değiştirmesi, enerji arz güvenliğini artıracak ve enerji yönetiminde daha sürdürülebilir bir yol haritası oluşturacaktır.

Referanslar

- [1] İşcan, Erhan. "Petrol Fiyatının Hisse Senedi Üzerinde Etkisi." *Maliye Dergisi*, no. 158 (2010): 607-617.
- [2] Beller, Morris. "Methodology For Assessing The Full Costs of Technology." *Energy Research* 4 (1980): 235-251.
- [3] EnergyPLAN. "LEAP." *Advanced Energy System Analysis Computer Model*. <http://www.energyplan.eu/othertools/national/leap/> (accessed June 10, 2018).
- [4] Heperkan, Hasan Alpay. "Efficient Use of Energy in the Industry." In *Towards %100 Renewable Energy Techniques, Costs and Regional Studies*, by Tanay Sıdkı Uyar, 3-16. Switzerland: Springer, 2017.
- [5] International Energy Agency. *Global Energy & CO2 Status Report 2017*. OECD/ IEA, 2018.
- [6] Soyad1, F., Soyad2, G., Soyad3, A., 2023. How to prepare a paper: Guide for authors. *International Journal of New Findings in Engineering, Science And Technology (IJONFEST)*, 191, 202.
- [7] Wikipedia. Kyoto Protokolü. mayıs 10, 2016. [//tr.wikipedia.org/w/index.php?title=Kyoto_Protokol%C3%BC&oldid=17074513](http://tr.wikipedia.org/w/index.php?title=Kyoto_Protokol%C3%BC&oldid=17074513) (accessed ocak 22, 2018).
- [8] Lloyds Register. *Implementing the Energy Efficiency Design Index*. Lloyds Register, 2012.
- [9] Mutluel, Fatih, and Egemen Sulukan. "Reference Energy System Development for Turkish Residential Sector." In *Towards %100 Renewable Energy Techniques, Cost and Regional Studies*, by Tanay Sıdkı UYAR, 179-186. Switzerland: Springer, 2017.
- [10] Nian, Victor, And Jun Yuan. "A Method for Analysis of Maritime Transportation Systems in The Life Cycle Approach-The Oil Tanker Example." *Applied Energy* 206 (November 2017): 1579-1589.
- [11] Pamir, Necdet. "Enerji Politikaları ve Küresel Gelişmeler." *Stratejik analiz*, 2005: 57-

73.

[12] Statista. June 08, 2018. <https://www.statista.com/statistics/264117/tonnage-of-worldwide-maritime-trade-since-1990/> (accessed June 08, 2018).

[13] Sulukan, Egemen. Energy Modelling and Applications. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2017.

[14] Energy Information Administration. (2003). System for the Analysis of Global Energy Markets (SAGE): Model documentation, Volume II. U.S. Department of Energy. Retrieved from [https://www.eia.gov/outlooks/archive/m072\(2003\)2.pdf](https://www.eia.gov/outlooks/archive/m072(2003)2.pdf)

[15] U.S. Energy Information Administration. (2023). International Energy Outlook 2023: Narrative. U.S. Department of Energy. Retrieved from https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/IEO2023_Narrative.pdf

[16] Loulou, R., Goldstein, G., & Noble, K. (2004). Documentation for the MARKAL Family of Models. Energy Technology Systems Analysis Programme.

[17] Manne, A. S., & Wene, C. O. (1992). MARKAL-MACRO: Linking Bottom-Up and Top-Down Models to Assess Costs of Mitigation Strategies. *Energy Economics*, 14(3), 1–6.

[18] Sari, A., Sulukan, E., & Özkan, D. (2021). Analysis and modeling the energy system of a chemical tanker by LEAP. *Journal Paper*, February 17, 2021.

[19] Buhaug,, et al. Second IMO GHG Study 2009. London: International Maritime Organization, 2009.

[20] Cames, Martin, Jakob Graichen, Anne SIEMENS, and Vanessa COOK. Emission Reduction Targets for International Aviation and Shipping. Brussels: European Parliament, 2015.

[21] Talay, Cemil Yücel. Deniz Ticaret Odası. 05 12, 2017.



İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI

DOĞANIN RİTMİ, ENERJİNİN DÖNÜŞÜMÜ, ÜRETİMİN GÜCÜ (I. ULUSAL ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KONFERANSI)

I. Ulusal Enerji Dönüşümü ve Sürdürülebilirlik Konferansı (EDSK'25), alanında uzman akademisyenler, araştırmacılar ve sektör profesyonellerini bir araya getirerek, enerji dönüşümüne yönelik bilimsel bir platform oluşturmayı amaçlamıştır.

Konferans kapsamında sunulan bildiriler; enerji teknolojileri, yenilenebilir enerji sistemleri, enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik ve dijital dönüşüm gibi kritik başlıkları içermekte olup, geleceğin enerji politikalarına ışık tutacak değerli katkılar sunmuştur.

Konferansımızın amacı, farklı disiplinlerde çalışan bilim insanlarını bir araya getirerek disiplinler arasında bilgi etkileşimini sağlamak ve nitelikli çalışmalara bilim dünyasının dikkatini çekmektir.

