

NET SIFIR HEDEFİNİN NERESİNDEYİZ?

Muzaffer Başaran
MMO İstanbul, Enerji Komisyonu Başkanı
mbasaran1952@gmail.com

1. GİRİŞ

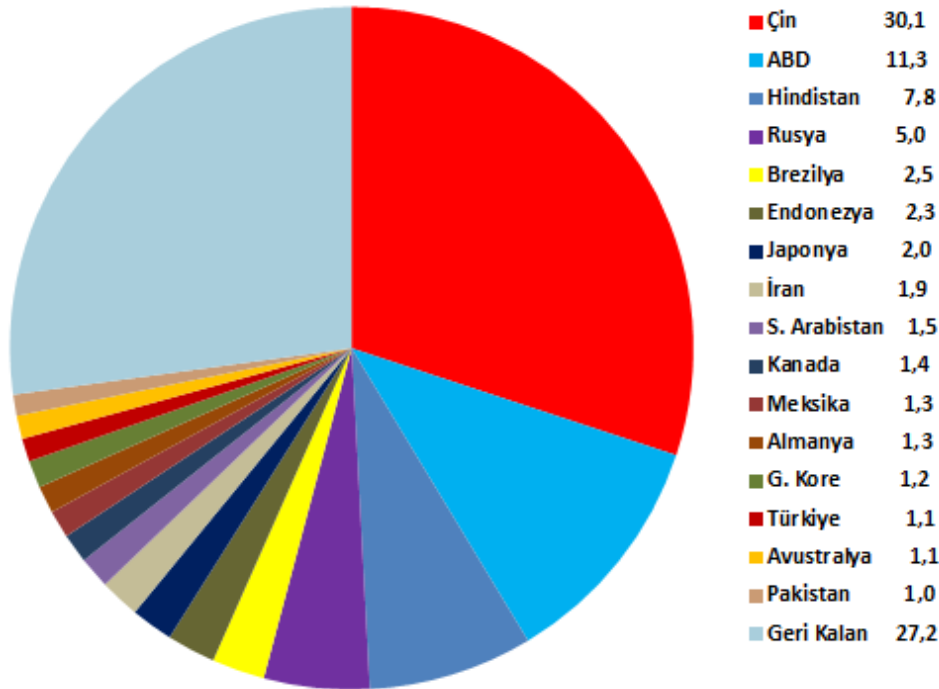
IPCC 2021 İklim Değişikliği Raporuna göre son dönemde yaşanan olaylar daha önce yaşanmamış olaylardır. ^[1] Genel olarak iklim sisteminde son zamanlardaki değişiklikler asırlardır yaşanmamıştır. CO₂ konsantrasyonları 2 milyon yıldır, CH₄ ve N₂O 800.000 yıldır, sıcaklıklar son 125.000 yılın en yüksek seviyesindedir. NOAA, 2024'ün kayıtlara göre en sıcak yaz olduğunu ilan etti. ^[2]

Bu ekstrem hava olayları 2024 yılı sonunda ulaşılan yaklaşık 1,6°C'lık sıcaklık artışından kaynaklanmıştır. En güncel bilim kaynaklarına göre, iklim değişikliğinin en kötü sonuçlarından kaçınmak için sınır olan 1,5°C aşılmıştır.

Hava kirliliğini yaratan kirleyiciler sera gazları, organik ve inorganik parçacıklar ve biyolojik moleküllerdir. Sera gazları ise Karbon Dioksit(CO₂), Metan(CH₄), Azot Oksitler(NO_x) ve florürlü gazlardır. Hava kirliliğine neden olan olaylar ve etkenler ise: yangınlar, özellikle son yıllarda artan orman yangınları, volkan püskürmeleri; tarımda gübre kullanımı, gaz ve petrol tesisleri, şehirlerin ısıtması, sanayi, termik santraller; kara, deniz, hava taşıtlarından oluşan ulaştırma sektörüdür. ^[3]

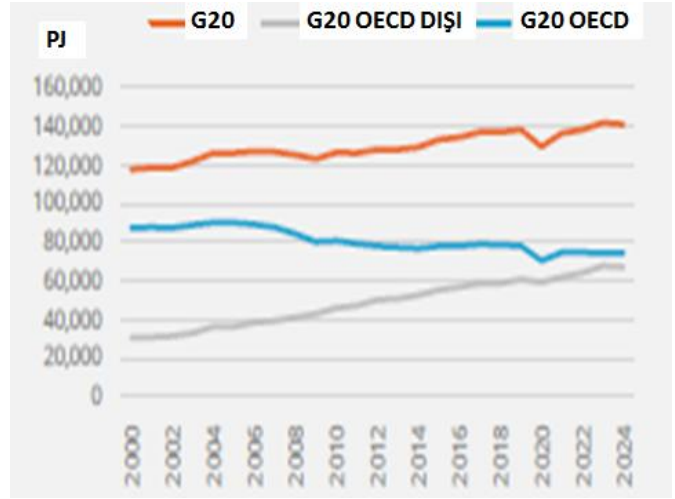
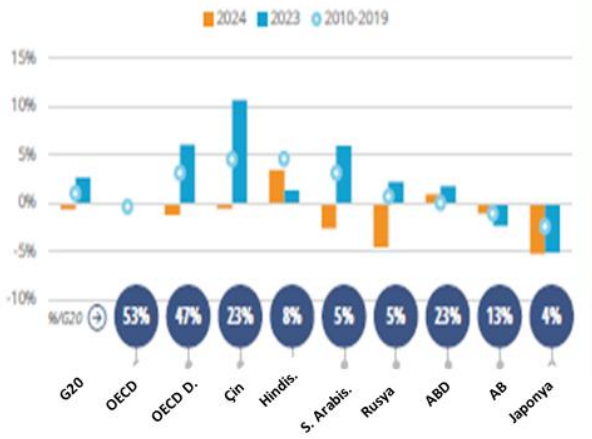
2023 rakamlarına göre Dünyada CO₂ emisyonu toplamı 52,963 milyar tondur. Şekil 1'den görüleceği gibi bunun %30,1 Çin'den, %11,3 ABD'den, %7,8 Hindistan'dan ve %5'i Rusya kaynaklıdır. Bu 4 ülke Dünya toplam emisyonunun %54,2'sinden sorumludurlar. ^[4]

Şekil 1: Dünya sera gazı emisyonlarında ülkelerin payları



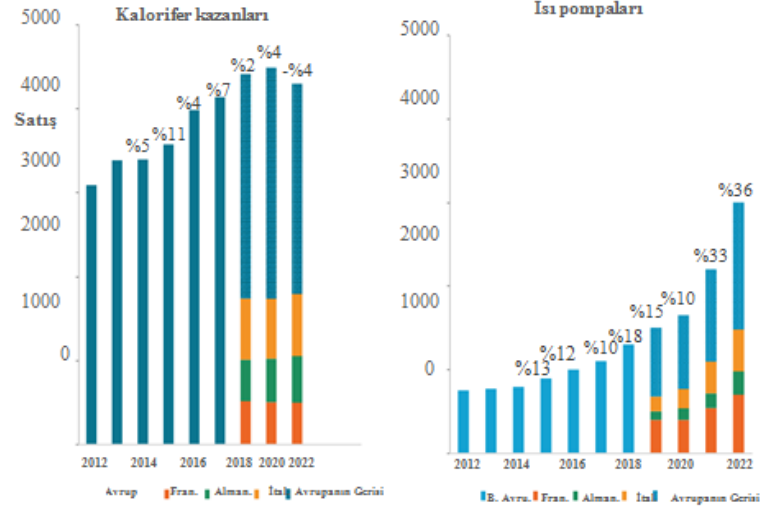
2. OLUMLU GELİŞMELER

Dünya'daki olumlu gelişmelere baktığımızda Şekil 2'de görüldüğü gibi petrol tüketimi 2023'de %2,7 artmışken 2024'de %0,6 düşmüştür. ABD'de petrol tüketim artışı yavaşladı ve %1 oldu. ^[5] Petro kimya sektöründeki yüksek talep ulaştırma sektöründeki düşüşle karşılanmıştır. Elektrikli arabalardaki artış ve kamyonların yakıtının gaza dönüştürülmesi Çin'de petrol tüketimini %1 azaltmıştır. Bu iki ülke G20 ülkeleri petrol tüketiminin %23'ünden sorumludur. Petrol talebi, AB, S. Arabistan, Rusya, Japonya ve Brezilya'da da düşmüştür. Buna karşılık Hindistan, G. Kore ve Meksika'da petrol talebi artmıştır.



Şekil 2: G20 ülkelerinde petrol tüketim trendleri ve primer petrol tüketimi

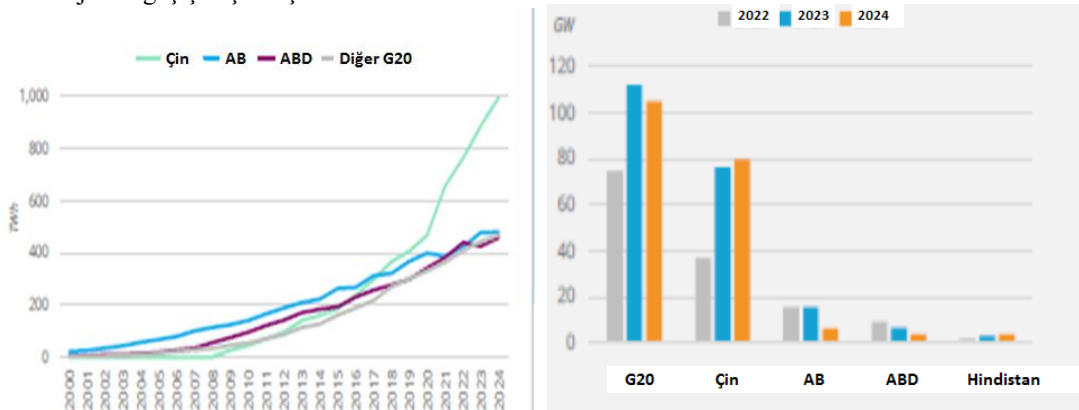
Kalorifer kazanı satışlarında hızlı bir düşüşün olduğu buna karşın ısı pompası satışlarının arttığı görülmektedir. Şekil 3'de görüleceği üzere kalorifer satışları 2020 yılında zirveye çıkmış, ondan sonra inişe geçmiştir. Diğer taraftan ısı pompalarında satışlar 2014 – 2020 arasında %10 -15 arası artış varken 2021'de artış %33 ve 2022'de %36 olmuştur. [6]



Şekil 3: Avrupa'da Kalorifer kazanı ve ısı pompası satışları

Dizel araç satışlarında hızlı bir düşüş olduğu, benzinli araç satışlarında artış olmadığı, buna karşılık elektrikli araba satışlarında büyük bir hızlanma gözlenmektedir.

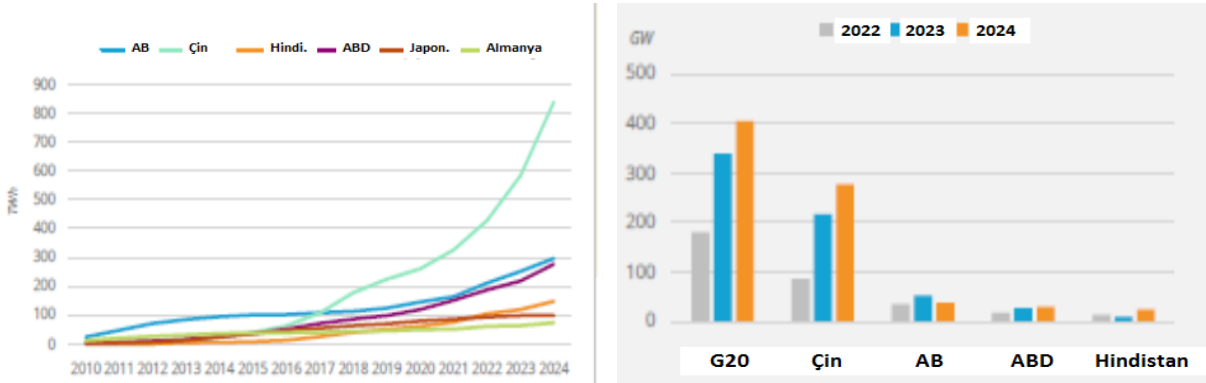
Demir çelik sanayiinde bir dönüşüm yaşanmakta yüksek fırın yerine emisyonu daha düşük Doğrudan İndirgenmiş Demir teknolojisine geçiş başlamıştır.



Şekil 4: G20 ülkelerinde rüzgardan elektrik üretimi ve ilave kurulu güç

Elektrik üretiminde rüzgar ve güneş santralleri tüm ülkelerde hızlı bir şekilde devam etmektedir. [5] Şekil 4’den görüleceği gibi Rüzgar Santralleri kurulumunda AB’de 6,3 GW, ABD’de 3,7 GW ve Hindistan’da 3,4 GW artış olurken toplam 105 MW’lık ilave kapasitenin dörtte üçü olan 80 GW’ı tek başına Çin gerçekleştirmiştir. G20 ülkelerinde rüzgar yatırımları 2024’de hafif yavaşlamıştır. 2023’de 112 GW olmuşken 2024’de 105 GW olmuştur. Rüzgardan elektrik üretimi G20’de 2024’de %8 artarken Çin’de %13 artmıştır. G20 elektrik üretimi içinde rüzgarın payı %9’a ulaşmıştır. Çin, G20 rüzgardan elektrik üretiminin %41’ini gerçekleştirmiştir ve bu ABD ve AB rüzgar üretimi toplamı kadardır.

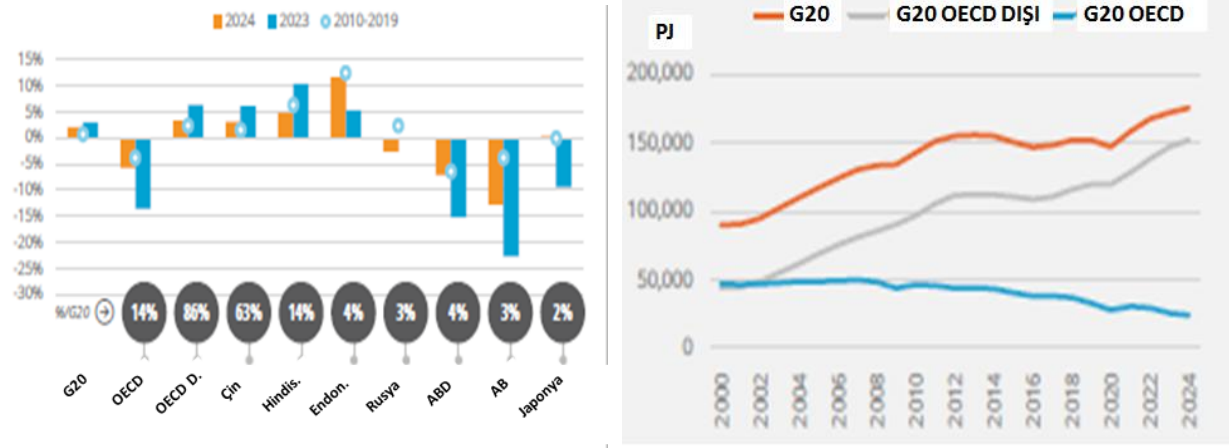
Şekil 5’de görüldüğü gibi 2024’de Güneş Santral kurulumlarında bir zıplama yaşandı. [5] 2024’de güneş kurulumunda 406 GW’la yeni rekor kırıldı. Çin son iki yılda güneş enerjisi kurulu gücünü 2 misline çıkararak G20 kapasitesinin yarısına ulaştı. Dünya kurulu güç artışı 406 GW olurken Çin’deki artış 278 GW olmuş ve bu rakam G20’deki toplam güneş kurulu güç ilavesinin %69’unu oluşturdu. Çin’deki güneş kurulu güç 888 GW’la ulaşırken G20 kapasitesinin %52’sine ulaştı. ABD’de artış 30 GW, Hindistan’da 25 GW olurken AB’de artış 38 GW olmuştur. Güneş’ten elektrik üretimi de %29 gibi hızlı bir artış göstermiştir. Çin’de artış %44’dür



Şekil 5: G20 ülkelerinde güneş enerjisinden elektrik üretimi ve ilave kurulu güç

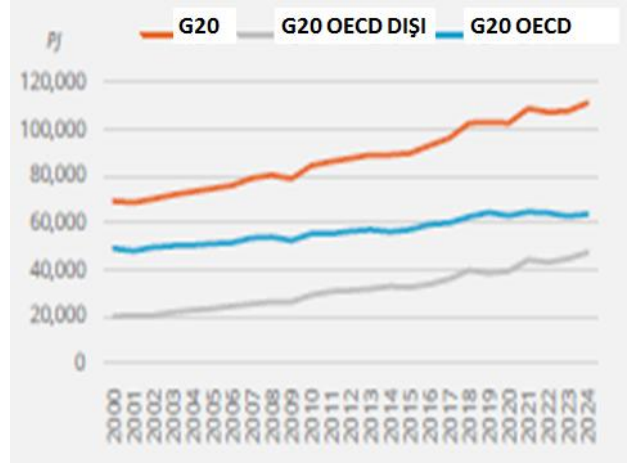
3. OLUMSUZ GELİŞMELER

Buna karşılık olumsuz gelişmelerde vardır. 2024’de Dünya’da kömür tüketimi %2 arttı. [5] Şekil 6’da görüldüğü gibi ABD ve AB’deki hızlı düşüşlere rağmen küresel artışa Çin, Hindistan ve Endonezya’daki artışlar sebep olmuştur. 2024’de G20’deki kömür talebinin %81’ini Çin, Hindistan ve Endonezya oluşturdu. Çin’in talep artışı yavaşladı ve %3’te kaldı. Endonezya’da %12 ve Hindistan’da %5 artış gözlemlendi. Çin’de talep düşüş nedeni çimento sektöründeki talep düşüşüdür, Hindistan’da ise yenilenebilir enerji üretiminin artmasıdır. G. Afrika ve Avustralya’da da artış olmuştur. Buna karşılık kömürden çıkış senaryoları ve artan yenilenebilir enerji üretimi nedeniyle OECD ülkelerinde kömür tüketimi %6 düşmüştür. Örnek olarak ABD’de %7 ve AB’de %13 düşüş gözlemlenmiştir. Aynı şekilde Güney Kore ve İngiltere’de de büyük düşüşler olmuştur.



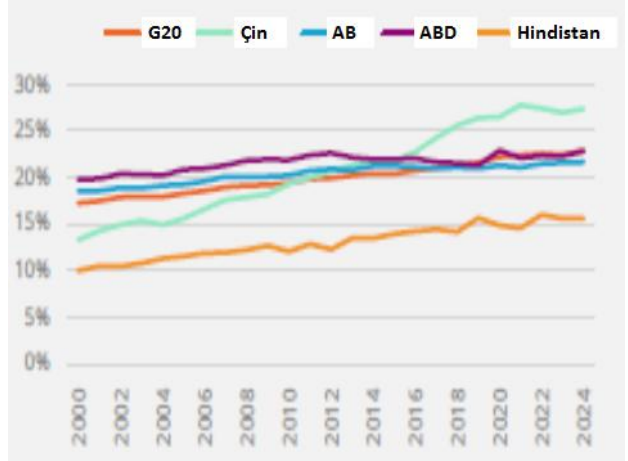
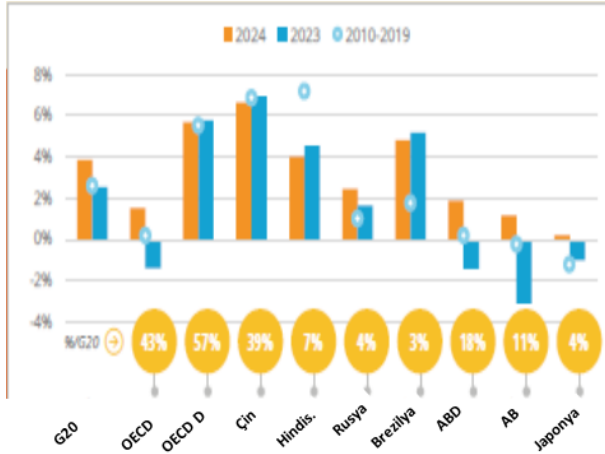
Şekil 6: G20 ülkelerinde kömür tüketim trendleri ve primer kömür tüketimi

2024’de Dünya gaz tüketimine ciddi bir artış olmuştur. 2024’de doğal gazdaki tüketim artışını 3 ülke sürüklemiştir. [5] Çin’de %7, Rusya’da %6 ve ABD’de %2 artış kaydedilmiştir. Ayrıca bu 3 ülke G20 gaz tüketiminin %61’inden sorumludur. Bununla beraber gaz tüketimi AB ve Japonya’da stabil kalmış, Hindistan ve Güney Kore’de elektrik sektöründeki talep artışı nedeniyle gaz tüketimi %7 artmıştır. Global gaz fiyatları 2024 %15 düşmüş, Avrupa ve Asya’daki LNG fiyatları 2019 ortalamasının üstünde kalmış ve ABD LNG fiyatları yüksek iç üretim nedeniyle %15 düşmüştür.

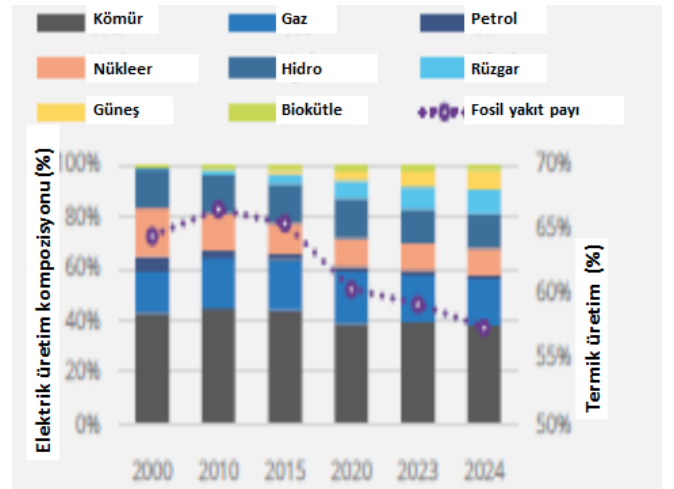
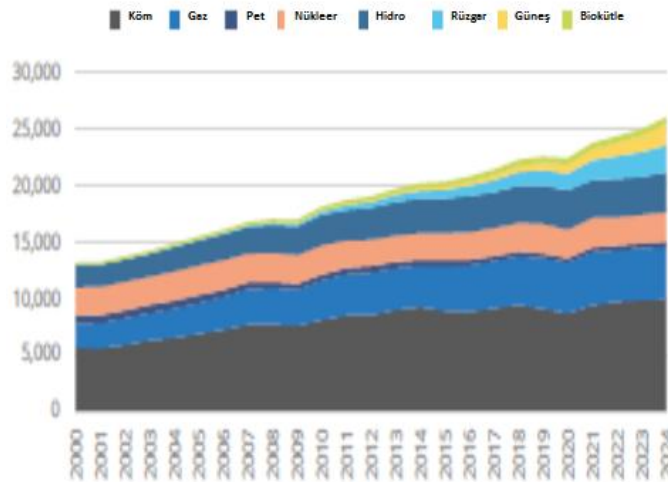


Şekil 7: G20 ülkelerinde doğal gaz tüketim trendleri ve primer doğal gaz tüketimi

G20 ülkelerinde elektrik talep artışı devam etmektedir. G20 elektrik talep artışının %66'sı Çin'den kaynaklanmıştır. Küresel elektrik tüketim artışı %3,9 olmuştur. Şekil 8'den görüleceği üzere G20 talep artışını sanayiden gelen talep artışı nedeniyle Çin'deki %7 artış ve ABD'deki %2 artışı sürüklemiştir. Çünkü G20'deki elektrik tüketiminin %39'u Çin'den ve %18'i ABD'den gelmektedir. Almanya ve Fransa'daki durgunluk nedeniyle AB'de %1, Hindistan'da %4, Rusya'da %2,4 ve Brezilya'da %4,6 artış olmuştur. OECD ülkelerinde talep artışı %2, OECD dışı ülkelerde artış %6 olmuştur. Nihai enerji tüketiminde elektriğin payı 2010'da %17'yken 2024'de %23'e çıkmıştır.



Şekil 8: G20 ülkelerinde elektrik tüketim trendleri ve primer enerji tüketiminde elektriğin payı



Şekil 9: G20 ülkelerinde elektrik üretiminin kaynaklara göre gelişimi ve üretim kompozisyonu

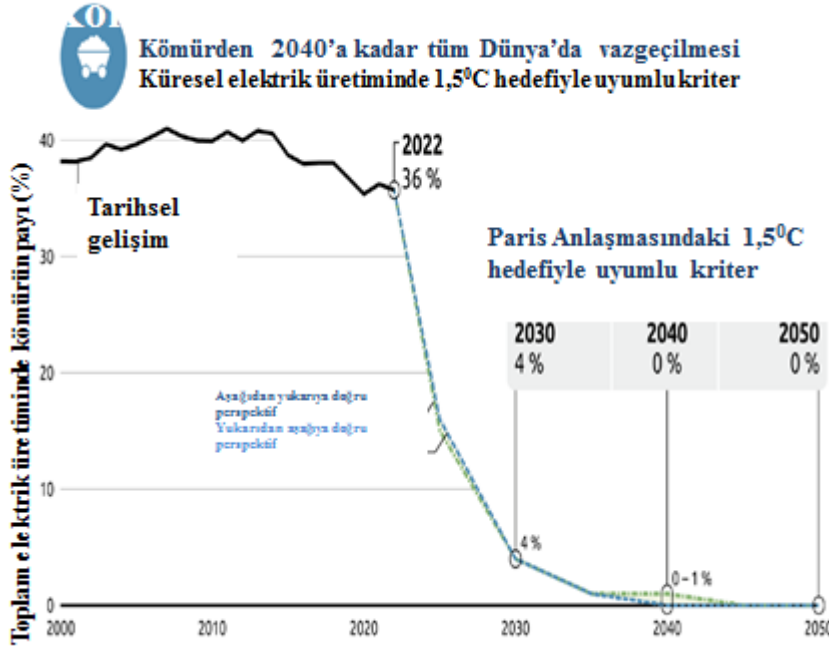
2024'de fosil yakıt tüketimi artmaya devam etti. 2024'de G20'de primer enerji tüketiminde fosil yakıtların payı %80 oldu. Kömürün payı 2000'de %27'ye 2024'de %34 oldu. Petrolün payı %35'den %27'ye düştü. Fosil yakıtların payı %60 eşliğinin altına düşerken yenilenebilir enerjinin payı %30'a ulaştı. Gazın payı stabil olarak %21'de kaldı. Şekil 9'dan görüldüğü üzere termik elektrik üretimi 2024'de %1 artış gösterdi ve elektrik üretimindeki payı %60'da kaldı. Güneş'ten elektrik üretimi %29 ve rüzgardan elektrik üretimi %8 arttı. Elektrik üretim kompozisyonundaki payları rüzgarın %9 ve güneşin %7 oldu. 2010'da rüzgarın payı %2 ve güneşin payı %0'dı.

2024'de CO₂ emisyonları artışında yavaşlama olmuştur ve elektrik üretimi ve sanayi proseslerine dayalı artışa (%1,1) sebep olan ülkeler Çin, Hindistan ve Endonezya'dır. Bu üç ülke G20 emisyonlarının %55'inden sorumludur. Çin'de emisyonların artış hızının yavaşlaması yenilenebilir enerji kullanımının hızla artışından kaynaklanmıştır. OECD ülkelerinde emisyonlar %0,7 düşerken OECD dışı ülkelerde emisyonlar %2 artmıştır. Tüm bu veriler 1,5 °C, hatta 2 °C yol haritaları için yeterli veriler değildir.

4. ALINMASI GEREKLİ TEDBİRLER

Alınması gereken tedbirlere gelince: [7]

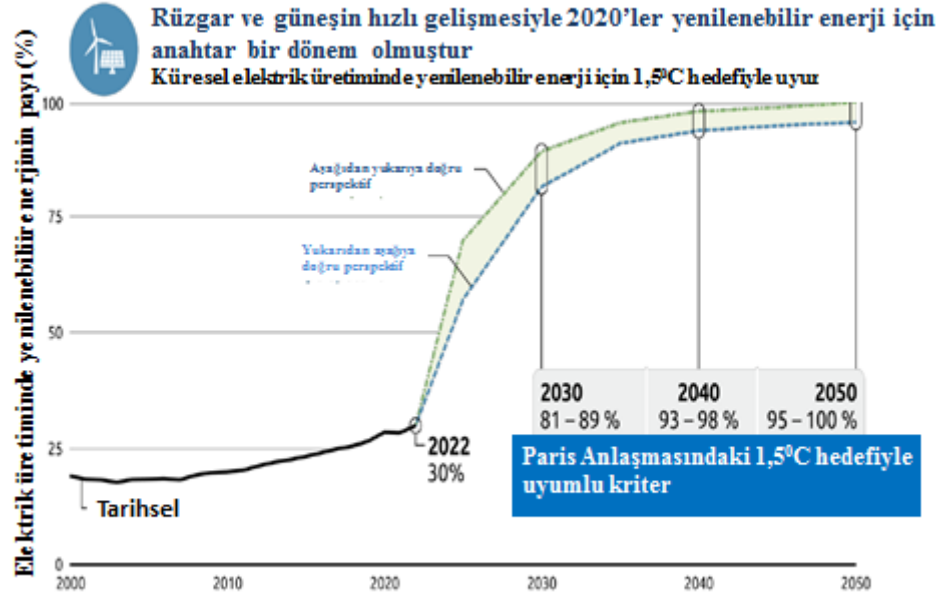
- Şekil 10'de görüldüğü gibi 1,5 °C ısınma limiti için 2040'a kadar tüm Dünya'da kömürden vazgeçilmelidir. 2030'dan önce kömürden küresel elektrik üretimi %5'in altına düşmelidir. Karbon tutma ve depolamalı kömür santralleri de kabul edilebilir değildir. Çünkü bu kömür kullanımının devam etmesini sağlayacaktır. Gelişmiş ülkeler 2030'a kadar kömürden vazgeçmelidir. Gelişmekte olan ülkeler 2040'a kadar kömürden vazgeçmelidir, ancak 2030'a kadar kömürden elektrik üretimini önemli ölçüde düşürülmelidir. Küresel kömürden çıkışta haksızlık olmaması için önemli ölçüde uluslararası destek gereklidir.



Şekil 10 : 1,5 °C hedefiyle uyumlu senaryo

- Gelişmiş ülkeler elektrik üretiminde daha çok doğal gaz kullanıyorlar, doğal gazdan çıkışta liderlik yapmalılar. Gelişmiş ülkeler 2035'den önce doğal gazdan çıkmalı ve temiz enerjiye geçmelidir. Gelişmekte olan ülkeler doğal gazı geliştirme tuzağından kaçınmalı (örneğin Hindistan, Güney Afrika) ve 2040'dan önce doğal gazdan çıkmalılar. Gelişmekte olan ülkelerin henüz değerlendirilmemiş ve fosil yakıtlardan daha ucuz olan büyük miktarda yenilenebilir enerji potansiyelleri bulunmaktadır. Doğal gaza geçiş ilave yükümlülükler ve ilave borç yükü anlamına gelir. Çoğu gelişmekte olan ülke önlerindeki doğru seçimin doğal gaz değil de yenilenebilir enerji olduğunun farkındadır. Yenilenebilir enerji, 2030'dan önce küresel enerji talebinin %80'den fazlasını karşılamalıdır. Yenilenebilir enerji 2030'da 26.000 TWh üretmelidir. 1.5°C hedefiyle uyumlu olmak için 2050'den önce yenilenebilir enerjinin payı ~%100 olmalıdır. Şekil 11'de görüldüğü üzere gelişmiş ülkeler 2030'dan önce elektrik üretiminde yenilenebilir enerjinin payını %80'nin üzerine çıkarmalıdır. Gelişmekte olan ülkeler 2030'dan önce elektrik üretiminde yenilenebilir enerjinin payını %50-75 seviyesine çıkarmalıdır. Tüm ülkeler yenilenebilir enerjinin payını 2035'den önce %80'nin üzerine çıkarmalıdır. Gelişmekte olan ülkelerin, yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmek için uluslararası desteğe ihtiyaçları vardır. Rüzgar ve güneş enerjisi tüm Dünya'da hızla artmaktadır. Şu anda Dünya yenilenebilir enerjide %50'ye ulaşma yolundadır ve 2035'e kadar %70 yolundadır. Ancak bu konuda hızlanmak

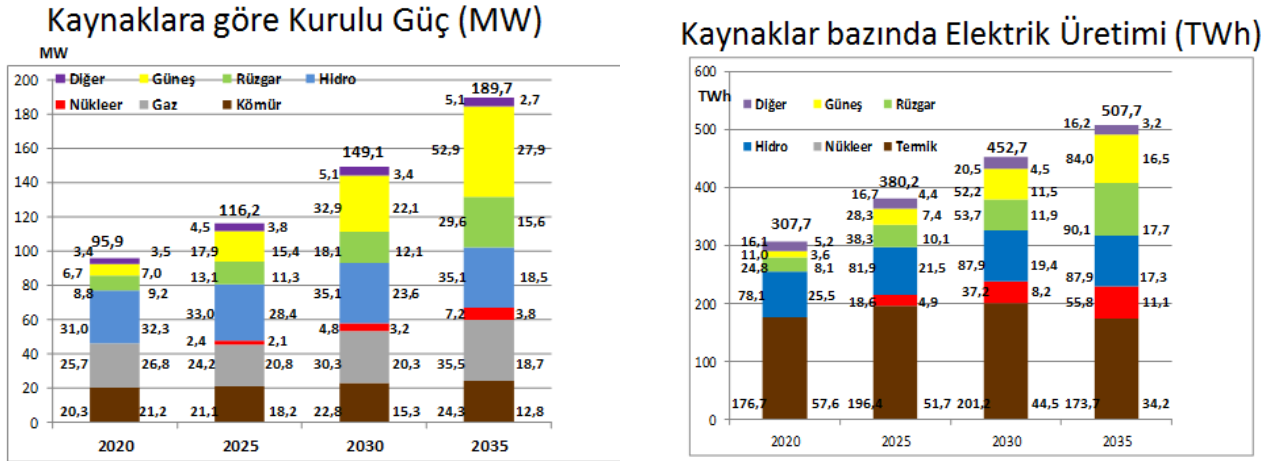
gereklidir ve 1,5°C hedefiyle uyumlu enerji sektörünün dönüşümü hala mümkündür. Bazı ülkelerde ümit veren sinyaller vardır (örneğin Şili, Türkiye, İngiltere gibi), fakat bu durum sürdürülmeli ve diğer yerlerde harekete geçilmelidir.



Şekil 11 : 1,5 °C hedefiyle uyumlu yenilenebilir enerji senaryosu

5. TÜRKİYE

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 19.01.2023 tarihinde Türkiye Ulusal Enerji Planını yayınlamıştır. [8] Bu planda Türkiye'nin Şekil 12'de görülen 2025, 2030 ve 2050 Elektrik Kurulu Güç ve Üretim Projeksiyonları yer almıştır.

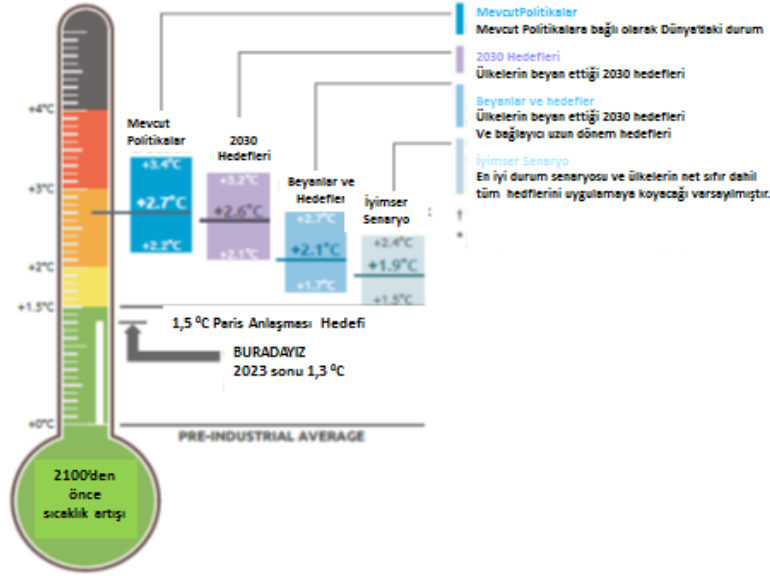


Şekil 12 : Türkiye Ulusal Enerji Planı projeksiyonları

Türkiye 2053'ü net sıfır hedefi olarak deklare etmiştir. Ancak kömürden çıkış için henüz bir yol haritası belirlenmemiştir.

6. SONUÇ

Şekil 13'den görüldüğü gibi ülkelerin Birleşmiş Milletlere verdiği 2030 hedefleriyle asrın sonunda 2,4 °C'lık sıcaklık artışına tekabül etmektedir. Mevcut politika ve uygulamalarla asrın sonunda sıcaklık artışı 2,4°C'a ulaşacaktır. Net sıfır hedefleri de dahil olmak üzere en iyimser senaryoda sıcaklık 1,9 °C olmaktadır. Bu bir ilerleme olarak görünebilir, ancak 1,5°C hedefi ulaşılabilir görünmemektedir. Politika uygulamaları çok yavaştır, 2030'a kadar emisyonlar daha hızlı azaltılmalıdır.



Şekil 13 : 2100 CAT global sıcaklık artışı projeksiyonu^[9]

Paris 2015 zirvesi sonrası ülkelerin tedbir beyanları sonrası hazırlanan projeksiyonlar 2100'de 1,5 °C hedefine ulaşamayacağını gösterdi. Daha sonra deklere edilen ek taleplerle de hedefe ulaşamamaktadır. Bazı olumlu gelişmeler vardır. Bunlar kalorifer kazanları satışlarının düşmesi, buna karşılık ısı pompası satışlarının hızla artması; dizel ve benzinli araç satışlarının düşmesi, elektrikli araç satışlarında patlama yaşanması; rüzgar ve güneş yatırımlarının hızla artmasıdır. Olumsuz gelişmelerde dikkati çekmektedir. 2024'de kömür, doğal gaz ve elektrik tüketimlerinde artış olmuştur. Gelişmiş ülkeler 2030'a, gelişmekte olan ülkeler 2040'a kadar kömürden elektrik üretimini sonlandırmalıdır. Bundan sonra uygulanacak en iyimser senaryoda bile sıcaklık artışı 1,9 °C olmaktadır.

Türkiye'de 2053 için net sıfır hedefi deklere etmiştir. Rüzgar ve güneş santral yatırımları hızla artmaktadır, ancak kömür, petrol ve doğal gazdan çıkış için yol haritası hazırlanmamıştır

7. KAYNAKLAR

- [1] IPCC 2021 Raporu
- [2] NOAA, National Centres for Environmental Information.
- [3] Prof. Dr. Şener Oktit, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmeleri ve Enerji Sektörü, MMO İstanbul, Enerji Verimliliği Haftası Sunumu, Makine Hangar, 08.01.2025
- [4] Union of Concerned Scientists
- [5] Enerdata Webinarı, 24.06.2025, Global Energy Trends 2025
- [6] Enerdata Webinarı, 15.06.2023, Global Energy Trends 2023
- [7] CAT, Climate Action Tracker, Pulling the plug on fossile fuels, 19.09.2023.
- [8] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Ulusal Enerji Planı
- [9] CAT, Climate Action Tracker, Warming Projections November 2024 Update.

İKLİM KRİZİNİN AZALTILMASINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Energy Efficiency in Mitigating the Climate Crisis

Muammer Akgün¹
Dr. Barbaros Batur²
Dr. M. Cem Çelik³

ÖZET

İklim kriziyle mücadelede enerji verimliliği önemli bir role sahiptir. Enerji verimliliği uygulamaları ile sera gazı emisyonlarının azaltılmasına, enerji kaynaklarının daha sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasına ve iklim değişikliği etkilerinin azaltılmasına yardımcı olacaktır. Küresel enerji talebinin artışıyla birlikte, fosil yakıtlara olan bağımlılık ve sera gazı emisyonları da artmaktadır. Bu döngüyü kırmak için enerji verimliliği, hem kısa vadeli hem de uzun vadeli çözümler arasında önemli bir yer tutmaktadır.

Enerji verimliliği, iklim kriziyle mücadelede önemli stratejilerden biridir. Politika yapımcılar, şirketler ve bireyler enerji verimliliğini artırmaya yönelik önlemler alarak iklim değişikliğinin azaltılmasına katkıda bulunabilirler. Bu, enerji tüketiminin azaltılması, fosil yakıt kullanımının azaltılması ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçiş gibi adımları içerebilir.

Binalardan sanayiye, ulaşımdan tarıma kadar birçok sektörde uygulanabilen enerji verimliliği projeleri, doğrudan sera gazı salınımlarını azaltarak iklim değişikliğiyle mücadelede güçlü bir araç sunar. Aynı zamanda, bireysel farkındalığın artırılması ve sürdürülebilir teknolojilere yapılan yatırımlar, bu süreçte kritik bir rol oynar. Azaltılmış enerji tüketimi, azaltılmış fosil yakıt kullanımı, yenilenebilir enerji kaynaklarına en kısa sürede geçiş, bu süreçteki ekonomik faydalar enerji verimliliğinin kısa sürede artırılmasına ve iklim krizi ile mücadeleye ciddi anlamda katkı sağlanmasına yol açacaktır.

Enerji krizinin azaltılmasında dünyada en popüler konular olan Binaların enerji verimliliği, endüstriyel süreçlerde verimlilik, ulaşım sektöründe verimlilik, tarım ve gıda üretiminde verimlilik, enerji yönetimi ve bilinç, yenilenebilir enerji kaynakları, yasal düzenlemeler ve teşvikler, işbirlikleri ve ortaklıklar, araştırma ve inovasyon gibi konulardır. Bu çalışmada, iklim değişikliğinin azaltılması için uygulanması gereken enerji verimliliği uygulamalarının analizi yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Enerji Krizi, Enerji Verimliliği, Sera gazı emisyonları

ABSTRACT

Energy efficiency plays a crucial role in combating the climate crisis. By implementing energy efficiency measures, greenhouse gas emissions can be reduced, energy resources can be used more sustainably, and the impacts of climate change can be mitigated. As global energy demand increases, dependence on fossil fuels and greenhouse gas emissions also rise. To break this cycle, energy efficiency holds a significant place among both short-term and long-term solutions.

Energy efficiency is one of the key strategies in addressing the climate crisis. Policymakers, companies, and individuals can contribute to reducing climate change by adopting measures to improve energy

efficiency. This may involve reducing energy consumption, decreasing fossil fuel use, and transitioning to sustainable energy sources.

Energy efficiency projects, applicable across various sectors from buildings to industry, transportation, and agriculture, directly reduce greenhouse gas emissions, offering a powerful tool in combating climate change. Additionally, increasing public awareness and investing in sustainable technologies play a critical role in this process. Reduced energy consumption, lower fossil fuel use, and a swift transition to renewable energy sources provide economic benefits and significantly contribute to climate crisis mitigation by boosting energy efficiency in the short term.

Globally, key topics in reducing the energy crisis include building energy efficiency, efficiency in industrial processes, transportation sector efficiency, efficiency in agriculture and food production, energy management and awareness, renewable energy sources, legal regulations and incentives, collaborations and partnerships, as well as research and innovation. This study analyzes the energy efficiency measures required to mitigate climate change.

Key words: Energy Crisis, Energy Efficiency, Greenhouse Gas Emissions

1. GİRİŞ

Her dönemin kendine özgü zorlukları ve sorunları bulunur. Yaşadığımız çağın en büyük sorunu da küresel iklim değişikliğidir. Küresel sıcaklık ortalamalarının Sanayi Devrimi öncesi düzeyinin 2°C'nin üzerine yükselmesini engellemek, yaşamsal öneme sahiptir. Atmosfere salınan karbondioksit ve diğer sera gazlarının çoğu enerji üretiminden ve kullanımından kaynaklanır. Birim enerji başına daha çok enerji hizmeti ve ürünü almak anlamına gelen enerji verimliliği, enerjide %73'ler seviyesinde olan dışa bağımlılık oranımızın azaltılmasında ve iklim değişikliği ile mücadelenin etkinliğinin artırılmasında büyük bir önem taşır. Enerji ihtiyacını, dolayısıyla emisyonları azaltmanın en ekonomik ve etkin yolu enerji verimliliğinin sağlanmasıdır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (UEA) en son senaryoları, enerji verimliliğinin 2050 yılında toplam karbondioksit emisyonlarının azalmasının % 31-%53 arası bir değer oluşturabileceği tahmin etmektedir[1].

Türkiye'nin sera gazı emisyonları, 1990 ila 2022 yılları arasında %144,9 artış göstermiştir. Öte yandan, Türkiye'nin emisyonlarının 2022 yılı itibarıyla 2005 yılına göre yaklaşık 1,61 katına ulaştığı görülmektedir. Bununla birlikte 2022 yılında, 2021 yılına göre %2,4 düşüşü umut vermektedir[2]. Ülkemizde, bina sektöründe %30, sanayi sektöründe %20 ve ulaşım sektöründe %15 olmak üzere önemli düzeyde enerji tasarruf potansiyeli olduğu tespit edilmiştir. Bu potansiyelin değerlendirilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması amacıyla 2007 yılında Türkiye'de Enerji Verimliliği Kanunu ve bu Kanuna dayanılarak 2008 yılında ise Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik yürürlüğe girmiştir. Bununla birlikte, uygulama ve yaygınlaştırmada atılması gereken pek çok adım bulunduğu görülmektedir.

Enerji verimliliği, tüm sektörlerde geniş kapsamlı dönüşümü zorunlu kılıyor. Bununla birlikte; yeni iş olanakları yaratmaktadır. Düşük karbon ekonomisine geçiş; hem yerel, hem ulusal hem de küresel ölçekte, yeni iş imkânları, yeni endüstriler, yeni pazarlar ve daha verimli, daha üretken ve daha yeşil bir ekonomi için bir başlangıç noktası olabilir. Enerji verimliliği uzun vadede, emisyonların azaltılmasının yanı sıra, pahalı ve sınırlı bir kaynak olan petrol ve doğal gaz bağımlılığın azaltılması için en etkin seçenektir. İşin kilit noktası, en verimli ekipmanın yatırım maliyetinin karşılanması için gerekli kaynağın oluşturulmasıdır. Sonuç olarak; enerji verimliliğine yönelik teknolojileri geliştirmek ve bunu ucuz hale getirerek yaygınlaştırmak bir öncelik halini almak zorundadır.

2. ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE İKLİM KRİZİ ARASINDAKİ İLİŞKİ

Enerji verimliliği, yaşam standardımızı, üretim kalitesini ve miktarını düşürmeden, daha az enerji kullanarak aynı miktardaki işi yapabilmektir. Gaz, buhar, ısı, hava ve elektrik üretiminde enerji kayıpları enerji verimliliğiyle önlenir. Atıkların gelişmiş teknolojiler kullanılarak değerlendirilmesi üretimi düşürmeden enerji talebini azaltılır. Enerji verimliliği; daha verimli enerji kaynaklarının kullanımının yanı sıra gelişmiş endüstriyel süreçler ve enerji geri kazanımları gibi etkinliği artırıcı önlemlerle de gerçekleştirilebilir. Enerji verimliliği konusunda kamuoyunda farkındalık oluşturulması, kamusal düzenlemelerin hayata geçirilmesi, sektörel dönüşümün hızlandırılması ve verimliliği teşvik eden yasal düzenlemelerin devreye sokulması kapsayan uzun soluklu bir süreçtir.

İklim değişikliğine neden olan emisyonları ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak için yenilenebilir enerji kullanımının artmasının ve mevcut enerji talebinin düşürülmesi gerekir. Enerji talebinin düşürülmesinde enerji verimliliği çok önemli bir role sahiptir. Enerjiyi verimli kullanmak, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında en hızlı ve maliyeti en düşük çözümdür. Özellikle; hızla artan dünya nüfusu göz önünde bulundurulduğunda, artan talebin karşılanmasında enerji verimliliğinin ne denli önemli olduğu daha iyi anlaşılır.

2.1 Enerji Tüketimi ve Sera Gazı Emisyonları Arasındaki Temel Bağlantılar:

2.1.1. Fosil Yakıtların Yanması:

Elektrik üretimi, ulaşım, sanayi ve binaların ısıtılması için kullanılan enerji kaynaklarının çoğu fosil yakıtlardan elde edilir. Fosil yakıtların yanması sonucunda atmosfere büyük miktarda CO₂ salınır. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %75'i enerji sektöründen kaynaklanmaktadır. Enerji santralleri, kömür ve gaz santralleri bu emisyonların en büyük payına sahiptir.

Örnek:

- 1 kWh elektrik üretimi için kömür kullanıldığında yaklaşık 820 gram CO₂ salınır. Doğalgaz kullanıldığında bu miktar yaklaşık 490 gram CO₂'ye düşer. Ancak, yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar) bu miktarı neredeyse sıfıra indirir.

2.1.2. Sanayi ve Üretim Sektörü:

Demir-çelik, çimento ve kimyasal üretimi gibi enerji yoğun sektörler, yüksek miktarda enerji tüketir ve doğrudan sera gazı emisyonlarına neden olur. Çimento üretimi sırasında, kireç taşının kalsinasyon sürecinde büyük miktarda CO₂ açığa çıkar.

Örnek:

- Çimento üretimi küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'ini oluşturur.

2.1.3. Ulaşım Sektörü:

Petrol bazlı yakıtlar (benzin ve diesel) ulaşım sektörünün ana enerji kaynağıdır. Araçların, gemilerin ve uçakların çalışması için büyük miktarda yakıt yakılır ve bu da önemli bir sera gazı emisyon kaynağıdır.

Örnek:

- Bir benzinli aracın yılda 15.000 km yol kat etmesi yaklaşık 4,6 ton CO₂ emisyonu üretir.

2.1.4. Binalar ve Isıtma:

Binaların ısıtılması, soğutulması ve elektrik tüketimi, enerji tüketiminin yaklaşık %40'ını oluşturur. Binalarda fosil yakıtlarla çalışan kazanlar ve ocaklar doğrudan CO₂ salınımına yol açar.

Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) raporuna göre, enerji verimliliği önlemleri ile 2030 yılına kadar küresel emisyonlar %40'a kadar azaltılabilir [3].

2.2. Enerji Verimliliğinin İklim Değişikliğiyle Mücadeledeki Rolü

Atmosferdeki sera gazı emisyonlarının yüzde 77'si, petrol, kömür, doğal gaz gibi fosil yakıtların yanmasıyla oluşmaktadır. Günümüzde, başlıca sera gazlarından olan karbondioksitin atmosferdeki miktarı, doğanın kabul edebileceği miktardan çok daha hızlı artmaktadır. Bunun sonucunda, yeryüzünün ortalama sıcaklığı geçtiğimiz yüzyıl içinde 0,7 °C artmıştır. Enerji üretiminde ve tüketimindeki tüm süreçlerde açığa çıkan emisyonlar, iklim değişikliğinin en önemli nedenidir. Buna ek olarak kömür ve doğal gaz gibi yakıtların kullanımı, sera gazlarının yanı sıra azot oksitler ve sülfür oksitler gibi zehirli gazlar açığa çıkarmakta, bu gazlar asit yağmuru gibi birçok sağlık ve çevre sorununa neden olmaktadır.

Enerji ihtiyacını, dolayısıyla emisyonları azaltmanın en ekonomik ve etkin yolu enerji verimliliğidir. 2010-2030 yılları arasında; ulaşım, binalar ve sanayide verimlilik sağlanması ve yeni teknolojilere yönelik 8,3 trilyon dolarlık yatırımın gerçekleşmesi durumunda; aynı dönemde küresel ölçekte 8,6 trilyon dolar tasarruf edilebilecektir[4]. Başka bir deyişle, verimlilik için yapılan yatırım kendi kendini karşılamaktadır. İklim değişikliğiyle mücadelede vazgeçilmez öneme sahip olan enerji verimliliği, artan enerji ihtiyacı için doğal kaynakların tahribini önlemenin yanı sıra ekonomik açıdan da kârlıdır.

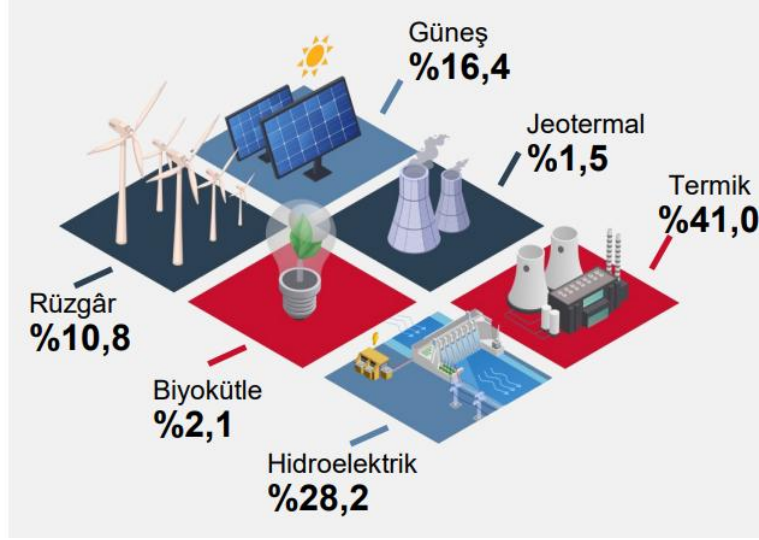
2020-2025 yılları itibarıyla nüfus ve kalkınma düzeyi artarken, enerji verimliliği sayesinde tahmini talep yılda yüzde 39 oranında azaltılabilir. Enerji verimliliği ve düşük karbon ekonomisine uygun enerji türleri kullanılarak bir yandan kalkınma ve refah seviyesinin artması sağlanırken, diğer yandan yoğunluğu düşük ve fosil kaynaklı olmayan enerji biçimlerinin yaygınlaştırılması mümkün olabilir. Enerji arzında güvenliğin sağlanmasında, yüzde 73'ler seviyesinde olan dışa bağımlılık oranı ve bundan kaynaklanan risklerin azaltılmasında ve iklim değişikliğiyle mücadelede etkinliğin artırılmasında, enerjinin üretiminden kullanımına kadar tüm süreçte verimliliğin sağlanması, israfın önlenmesi ve enerji yoğunluğunun azaltılması büyük bir önem taşımaktadır. Sürdürülebilirlik penceresinden baktığımızda, enerji tüketimindeki artış en aza indirilirken, refah seviyesinin yükseltilmesi düşük karbon ekonomisiyle mümkündür. Enerji yoğunluğunu azaltılırken, ekonomik büyümeyi dengelemek ve enerji tüketimini azaltmak, hükümet politikalarında öncelikli hale getirilmelidir. Karbon yoğunluğunun düşürülmesini hedefleyen politikalar yerel, ulusal ve küresel ölçekte benimsenmelidir[5].

Avrupa Birliği (AB) için enerji verimliliği, enerji ve iklim politikasının en önemli bileşenlerindendir. AB'nin, 2008 Aralık'ta yenilediği ve kısaca 20/20/20 olarak açıkladığı iklim ve enerji ile ilgili hedefleri; 2020'ye kadar, 1990 rakamlarına göre, yüzde 20 sera gazı emisyonu azaltımı, enerji verimliliğinde yüzde 20 artış ve enerji kullanımında yenilenebilir enerjilerin payının yüzde 20'ye çıkarılması şeklindedir. AB'de enerji sektöründe 2020'de yıllık değeri 60 milyar Euro olan ve Almanya'nın enerji tüketimine eş değer olan yüzde 20 oranında enerji tasarrufu sağlanması bekleniyordu. Ülke, birincil enerji tüketimini 2020 yılına kadar seviyelerine kıyasla yüzde 20 azaltmayı hedefliyordu. Ancak koronavirüs pandemisinin neden olduğu durgunluğa rağmen tüketim yüzde 18 oranında azaltabildi.

3. TÜRKİYE' DE ENERJİ

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde, kişi başına düşen enerji tüketimi kalkınma hamlelerine paralel olarak artmaktadır. Türkiye'de enerji faaliyetleriyle oluşan emisyonların 1990 yılı ile kıyaslandığında toplam

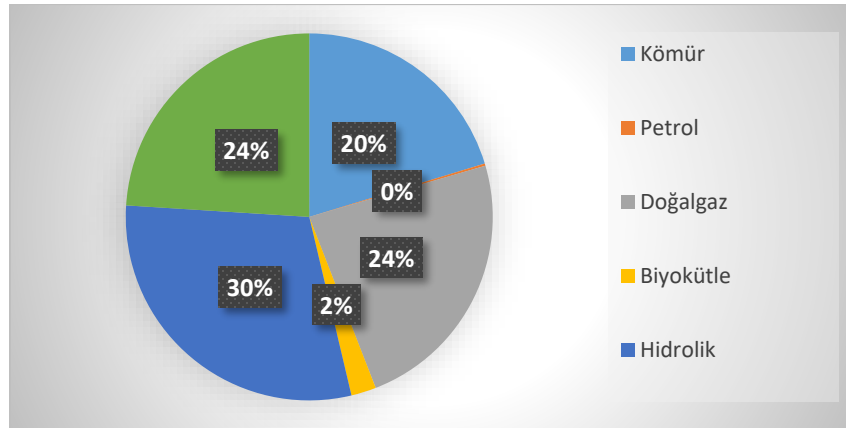
emisyonlardaki payı 2010 yılında %81,7 iken Bu değer 2022 yılında %144,9 olmuştur. 2010 yılı itibariyle, karbondioksitin sera gazı emisyonlarındaki payı yüzde 106 ve enerji kaynaklı emisyonlardaki payı ise yüzde 103,24 iken 2022 yılı itibariyle, karbondioksitin sera gazı emisyonlarındaki payı yüzde 186,38 ve enerji kaynaklı emisyonlardaki payı ise %180 olmuştur. 2010 yılında sanayi sektöründe kullanılan enerjiden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının artışı %40 iken le bu değer 2022 yılında bu değer %80'e yükselmiştir[2].



Şekil.1 Kurulu Güç Dağılımı (Eylül 2024) [6].

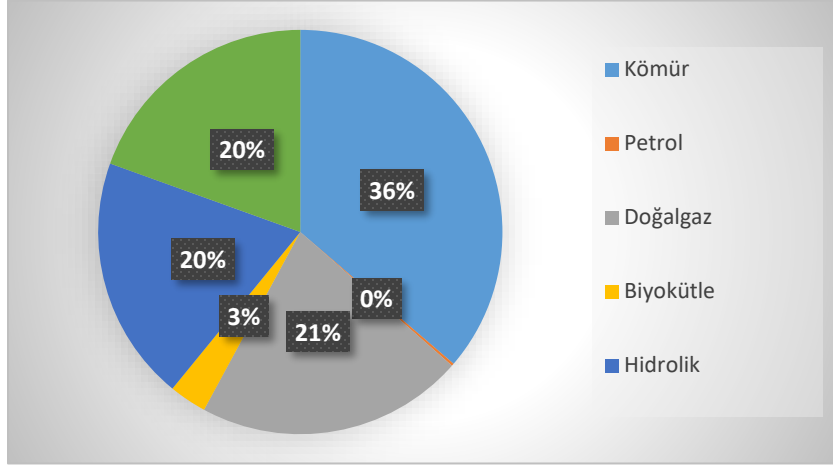
2023 yılında toplam birincil enerji arzı 158,4 milyon tep (ton eşdeğer petrol) olarak gerçekleşmiş olup 2022 yılındaki 157,8 milyon Tep'lik değere göre %0,4 oranında artmıştır. Birincil enerji arzındaki yerlilik oranı %31 seviyesindedir.

Bir önceki yıla göre katı yakıt arzı % 4,7 oranında azalarak 40 milyon tep, petrol arzı %6 oranında artarak 47,8 milyon tep, doğal gaz arzı %4,1 oranında azalarak 41,5 milyon tep ve yenilenebilir enerji arzı %5,9 oranında artarak 28,7 milyon tep düzeyinde gerçekleşmiştir. Yenilenebilir kaynaklar bazında incelendiğinde; bir önceki yıla göre güneş %19,3, jeotermal %7,5, biyoenerji ve atıklar %13,2 oranında artış göstermiştir. Dağılım Şekil 1 de görülmektedir. Bu rakamlar incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının düşük oranda kullanıldığını görülmektedir[7].

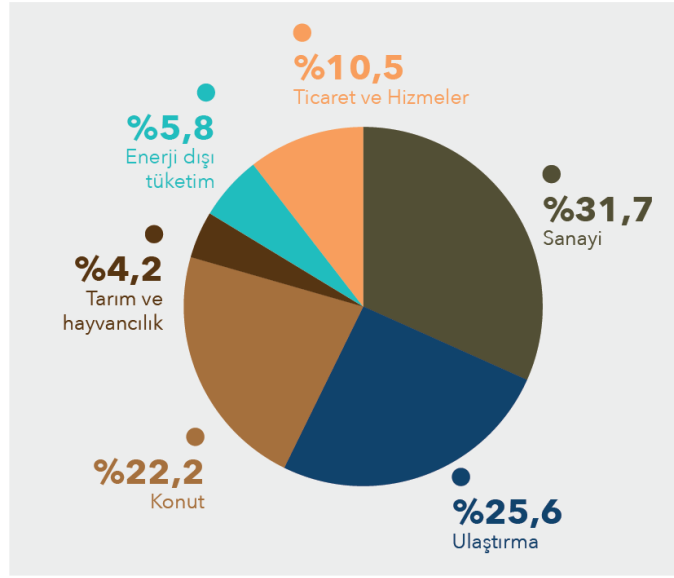


Şekil 1-Türkiye Toplam Kurulu Gücünün Kaynaklara Göre 2023 Dağılımı[8].

Nihai enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımı incelendiğinde en yüksek payın %34 ile sanayi sektörüne ait olduğu görülmektedir. Salgın sonrası normalleşme ile birlikte ulaştırma sektöründe 2020 yılına kıyasla 2021 yılında %13 oranında artış görülmüştür. Dağılım Şekil 2 de görülmektedir.



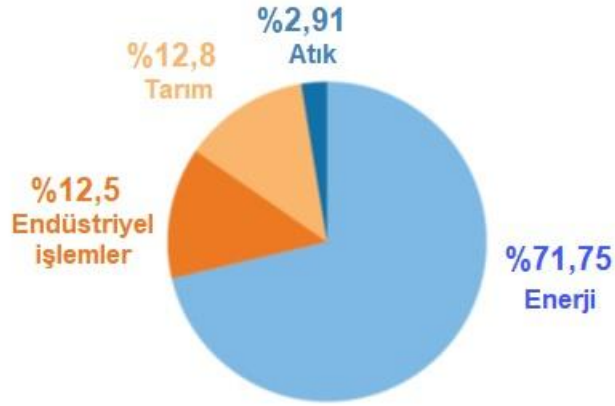
Şekil 2- Türkiye Toplam Üretim Kaynaklarına Göre 2023 Dağılımı[8].



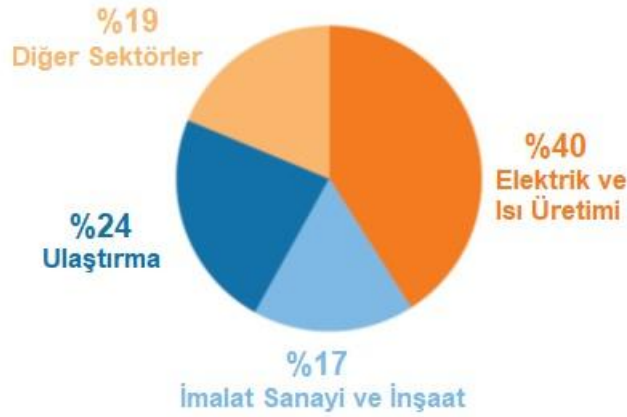
Şekil. 3- 2022 yılında gerçekleşen nihai enerji tüketimi Sektörlere göre dağılımı[9]

TÜİK'in yayımlamış olduğu verilere göre 2022 yılı toplam sera gazı emisyon miktarı 558,3 Mton CO₂ olarak gerçekleşmiş olup bir önceki yıla göre %2,4 azalış göstermiştir. Şekil 3'te 2022 yılı toplam sera gazı emisyon miktarının sektörlere göre dağılımı görülmektedir.

2022 yılında enerji kaynaklı karbon emisyonlarında en büyük pay (%32,6) elektrik ve ısı üretimi için kullanılan birincil kaynakların yakılması sonucunda ortaya çıkan emisyonlara aittir. Şekil 4'te Enerji Kaynaklı Karbon Emisyonlarının Sektörel Dağılımının sektörlere göre dağılımı görülmektedir[6].



Şekil 4- 2022 yılında gerçekleşen toplam sera gazı emisyonlarının sektörlere göre dağılımı[2]



Şekil. 5- 2022 yılında gerçekleşen Enerji Kaynaklı Karbon Emisyonlarının Sektörel Dağılımı[2]

Türkiye'nin kişi başına düşen enerji tüketimi ise Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) ortalamasının yaklaşık beşte biridir. Buna karşın, Türkiye'nin enerji yoğunluğu OECD ortalamasının iki katıdır. Türkiye'nin kişi başına düşen sera gazı emisyonu gelişmiş ülkelerle kıyaslandığında düşük olsa da, enerji yoğunluğu oldukça yüksektir ve düşük karbon ekonomisine geçişte yoğunluğun azaltılması büyük önem taşır[6].

3.1. Türkiye'nin Enerji Yoğunluğu

Enerji yoğunluğu, bir dolarlık mal ya da hizmet üretmek için tüketilen enerji miktarıdır. Bir ülkenin enerji yoğunluğunun düşük olması; üretilen mal ya da hizmetin daha az enerjiyle elde edilmesi anlamına gelir. Türkiye'nin kişi başına düşen enerji tüketimi OECD ortalamasının yaklaşık beşte biri olmasına karşın, Türkiye'nin enerji yoğunluğu OECD ortalamasının iki katıdır. Başka bir deyişle; Türkiye bir dolarlık mal ya da hizmet üretmek için OECD ülkelerinde kullanılan enerji miktarının iki katı enerji kullanmaktadır.

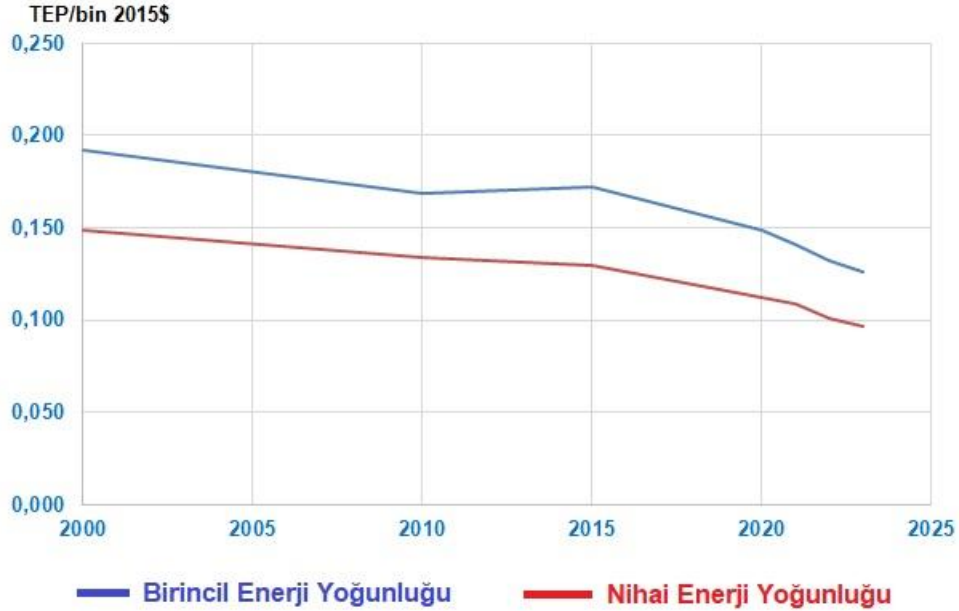
Türkiye'nin enerji yoğunluğu AB ülkelerinin yaklaşık iki buçuk, OECD ülkelerinin ise iki katıdır.

Türkiye'nin 2023 yılı birincil enerji yoğunluğu 0,126 tep/bin 2015\$, nihai enerji yoğunluğu ise 0,097 tep/bin 2015\$ olarak hesaplanmıştır. 2023 yılında bir önceki yıla göre birincil enerji yoğunluğunda %4,5; nihai enerji yoğunluğunda %4,0 azalma gerçekleşmiştir. 2000 yılına göre bir kıyaslama yapıldığında ise birincil enerji

yoğunluğunda %34,3; nihai enerji yoğunluğunda %35,0 oranında iyileşme söz konusudur.. Şekil 5'te Türkiye Enerji Yoğunluğu İndeksinin Gelişimi görülmektedir[6].

Ülkemizde, enerjinin yoğun kullanıldığı sektörlerde %20-30 dolayında enerji tasarruf potansiyeli olduğu bilinmektedir. (Sanayi \geq %20, Bina ve Hizmet \geq %30, Ulaşım \geq %20) % 15'lik elektrik tasarruf potansiyeli geri kazanıldığında 6,5 milyar TL'lik doğal gazlı santral yatırımı önlenebilir. Yılda 3,0 milyar USD'lık doğal gaz ithal edilmeyebilir. Binaların ve işletmelerin ısıtma ve soğutmasında yüzde 35 ve ulaşımda yüzde 15 tasarruf sağlandığında yılda 1,4 milyar dolarlık petrol ve doğal gaz ithalatına ihtiyaç kalmayabilir. Sanayi, bina ve hizmet sektörleri, toplam nihai enerji tüketimi ve verimlilik potansiyellerinin yüksek olması sebebiyle öncelikli sektörlerdir[7].

2022 yılı sonu itibarı ile Türkiye'nin toplam elektrik kurulu gücünün %54'ü, brüt elektrik üretiminin ise %42'si yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır. Öte yandan elektrik sektörü dışındaki sanayi, ulaşım ve konut gibi enerji yoğun son kullanım sektörlerinin karbonsuzlaşması için atılması gereken önemli adımlar olduğu görülmektedir. Özellikle enerjiyi yoğun tüketen sanayi, ulaştırma ve binalar gibi son kullanım sektörlerinde enerji verimliliği artırılarak enerji yoğunluğunun düşürülmesi, enerji sisteminin karbonsuzlaşması için kritik önemdedir. Enerji verimliliğine yönelik uygulamalara ek olarak son kullanım sektörlerinde 'temiz elektrifikasyon' hem enerji kullanımında fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi sağlayan, hem de verimliliği artıran başlıca strateji olarak öne çıkmaktadır. Doğrudan elektrifikasyonun mümkün olmadığı sektörlerin ise yeşil hidrojen ve diğer temiz yakıtların kullanılması ile karbonsuzlaşması gündemdedir. Bu anlamda enerji dönüşümünün başarısında hala geliştirilmekte olan yeni teknolojilerin durumu da önemli olacaktır.



Şekil 6- 2000-2023 yılları arasında Türkiye enerji yoğunluğu indeksinin birincil ve nihai enerji yoğunluğu açısından gelişimi[10].

3.2. Türkiye'nin Enerji Verimliliği Stratejisi

Türkiye'de enerji tüketimi yılda yaklaşık yüzde dört-beş oranında artarken, elektrik tüketimindeki artış yüzde yedi-sekiz düzeyindedir. Türkiye'de elektriğin yaklaşık yarısı sanayi tarafından kullanılmaktadır.

Enerjinin etkin kullanımı, israfın önlenmesi, kayıp ve kaçaklar nedeniyle kurulu gücün üretime dönüşmesinde yaşanan açığın azaltılması ve enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün azaltılmasını amaçlayan Türkiye Enerji Verimliliği Kanunu, 2007 yılında yürürlüğe girmiştir. Türkiye İstatistik Kurumu ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na göre, kurulu gücün üretime dönüşmesinde mega watt başına yılda yaklaşık %10'luk bir iyileşme söz konusudur. Bununla birlikte; kurulu gücün üretime dönüşme oranına bakıldığında Türkiye OECD ülkelerinin ortalamasının altındadır.

Bina sektöründe %30, sanayi sektöründe %20 ve ulaşım sektöründe %15 olmak üzere yaklaşık 7,5 milyar TL değerinde enerji tasarruf potansiyelimizin olduğu tespit edilmiştir. Bu da, dört Keban Barajı'nın ürettiği enerjiye eşdeğerdir. Potansiyelin değerlendirilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması amacıyla 2007 yılında Enerji Verimliliği Kanunu ve 2008 yılında Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik yürürlüğe girmiştir. Kanun; enerjinin üretim, iletim, dağıtım ve tüketim aşamalarında, endüstriyel işletmelerde, binalarda, elektrik enerjisi üretim tesislerinde, iletim ve dağıtım şebekelerinde ve ulaşım da enerji verimliliğinin artırılması ve desteklenmesi, toplum genelinde enerji bilincinin geliştirilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması ile ilgili hükümleri kapsar. Ulaşım sektörü, verimliliği artırmanın yanı sıra temiz kaynaklardan elde edilen yakıtları kullanmalıdır. Elektrik İşleri Etüd İdaresi'nin enerji verimliliği stratejisindeki ana hedefi; sanayide, binalarda, ulaşım da ve enerji sektöründe alınacak tedbirlerle 2023 yılında birim milli gelir başına tüketilen enerjinin (enerji yoğunluğunun) 2010 yılına göre %20 oranında azalmasıdır [11].

Türkiye'nin birçok stratejik plan dokümanında enerji verimliliği ve iklim değişikliği konuları birlikte ele alınmış, iklim değişikliği ile mücadelede enerji verimliliği bir fırsat ve araç olarak değerlendirilmiştir. Bina, ulaşım ve hizmet sektörlerinde enerji verimliliğinin artırılması ve yerli kaynakların optimum kullanımının sağlanmasında 2010-2023 yılları için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından Enerji Verimliliği Stratejisi'nde belirlenen temel amaçlar şunlardır:

- Sanayi ve hizmet sektörlerinde enerji yoğunluğunu ve enerji kayıplarını azaltmak,
- Enerji verimliliği yüksek binaların enerji taleplerini ve karbon emisyonlarını azaltmak ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanan sürdürülebilir çevre dostu binaları yaygınlaştırmak,
- Enerji verimli ürünlerin piyasa dönüşümünü sağlamak,
- Elektrik üretim, iletim ve dağıtımında verimliliği artırmak; enerji kayıplarını ve zararlı çevre emisyonlarını azaltmak,
- Motorlu taşıtların birim fosil yakıt tüketimini azaltmak, kara, deniz ve demiryollarında toplu taşımanın payını artırmak ve şehir içi ulaşım da gereksiz yakıt sarfiyatını önlemek,
- Kamu kuruluşlarında enerjiyi etkin ve verimli kullanmak,
- Kurumsal yapıları, kapasiteleri ve işbirliklerini güçlendirmek; ileri teknoloji kullanımını ve bilinçlendirme etkinliklerini artırmak; kamu dışında finansman fırsatları yaratmak.

Benzer şekilde, Ulusal İklim Değişikliği Strateji Belgesi'nde (2010-2020); Sera Gazı Emisyon Kontrolü başlığı altındaki enerji bölümünde; binalarda enerji verimliliği potansiyelinin tespit edileceği, sanayi ile işbirliği içinde enerji verimliliğini sağlayacak yapı malzemeleri ve teknolojilerine yönelik öncelikli projeler belirleneceği, binalarda enerji kimlik belgesi uygulaması için gerekli altyapının sağlanacağı, sanayi ve bina sektörlerinde sertifikalı enerji yöneticileri ile standartlara uygun enerji yönetimi uygulanacağı belirtilmekte, uzun vadede ise 2020 yılına kadar enerji yoğunluğunun 2004 yılına göre daha düşük seviyelere indirileceği, kamu kuruluşlarının bina ve tesislerinde iyileştirme sağlanacağı ifade edilmektedir[11].

3.3. Türkiye'de Enerjinin Verimli Kullanılması

Türkiye'nin enerji verimliliği ile ilgili atabileceği birçok adım bulunmaktadır. 1970'lerden bu yana elektrik ve doğalgaz ihtiyacımız hızla artıyor. Bu artış, nüfus ve elektrikli cihazların kullanımı arttıkça daha da hız kazanmaktadır. Enerji verimliliği potansiyeli sektörden sektöre farklılık göstermektedir. Fosil yakıtlı enerji üretiminde ortalama %25 verimlilik artışı potansiyeli bulunurken, Ulaşım sektöründe bu potansiyel yüzde

40'tır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından belirtilen %15'lik tasarruf sağlandığında petrol ve doğal gaz ithalatında yıllık 1,4 milyar dolarlık azalma sağlanabileceği belirtilmektedir.

Şebeke kayıplarının ülkemizde oldukça yüksek olduğu görülüyor. 2022 yılında Türkiye'deki iletim hattı kayıpları 5,4 TWh (terawatt saat), dağıtım hattı kayıpları ise 23,6 TWh olarak gerçekleşmiştir. Başka bir deyişle Türkiye'de şebeke kayıpları yaklaşık olarak yüzde 10 'dur. Bu kayıpların düşürülmesi 1,7 milyar TL'lik kazanım anlamına gelmektedir. Şebeke kayıpları Almanya ve Japonya'da yaklaşık yüzde beş, Güney Kore'de dört, ABD'de yedidir.

Büyük çapta enerji verimliliği bütün ekonomilerde mümkündür. Ülkelerin altyapıları, enerji verimliliği artırımına dirençli görünebilir. Engellerin başında bilgilendirme eksikliği ile hukuki ve kurumsal yetersizlik geliyor. Bu bağlamda 2007 yılında çıkarılan Enerji Verimliliği Kanunu ve 2008 yılında çıkarılan Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik hukuki düzlemde atılmış ileriye dönük olumlu gelişmelerdir, ancak uygulanmasında ve yaygınlaştırılmasında atılması gereken adımlar vardır.

4. ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE KARBON AYAK İZİNİ DÜŞÜRMEK İÇİN GEREKLİ ENERJİ GERİ KAZANIM UYGULAMALARI

Enerji verimliliği artırım potansiyeli sektörden sektöre farklılık göstermektedir. Küresel ölçekte fosil yakıtla enerji üretimi için ortalama %25 verimlilik artırım potansiyeli bulunuyor. Ulaşım için bu potansiyel yüzde 40 düzeyine çıkıyor. Mümkün olan bütün verimlilik artırımını tek bir politika veya teknoloji ile elde etmek mümkün değildir. Birden çok politika ve yükümlülüğün uygulamaya girmesi zorunludur.

Enerji verimliliğinin sağlanması ve bu konuyla ilgili politikaların etkin bir şekilde hayata geçirilmesi için aşağıdaki fırsatların değerlendirilmesi gerektiğini savunulmaktadır:

- **Tüm dünya ülkelerinde enerji verimliliği potansiyelinin harekete geçirilmesi için uluslararası işbirliği gerekmektedir.** Günümüzde ülkeler arası işbirliği yalnızca kalkınma programları ile sınırlı kalmıyor, bunun yanı sıra, enerji ve iklim politikaları da işbirliğine konu olabiliyor. Enerji verimliliğinin uluslararası işbirliği programlarının öncelikli konusu olması gerekmektedir.
- **“Kırleten öder” ilkesi uygulanmalıdır.** “Kırleten öder” ilkesi¹⁶ doğrultusunda fosil yakıtlar üzerinden alınan vergiler artırılmalı ve geleneksel enerji kaynaklarına yönelik devlet desteği zamanla azaltılmalıdır.
- **Enerji verimliliği için net hedefler belirlenmeli ve buna uymayanlar için cezalar konulmalıdır.** Enerji verimliliği için net hedeflerin belirlenmesi, verimlilik artışının sağlanmasında ön koşuldur. Düzenli denetim yapılması ve buna uymayanların cezalandırılması başarılı bir strateji için önemlidir.
- **Yeni ve mevcut binalar için performans standartları belirlenmelidir.** Standartların, gelişen teknolojiye paralel olarak sıkılaştırılması, zamanı geldiğinde ayarlamalar yapılması ve uyulmadığı takdirde cezaların uygulanması verimli bir strateji için önemlidir.
- **Beyaz eşya ve ofis cihazları için minimum verimlilik ve bekleme modunda enerji kullanımı standartları ortaya konmalıdır.** Bu standartlar tercihen uluslararası ölçekte olmalı ve geniş bir kitleye hitap etmelidir. Standartların hızla gelişen teknolojiye ayak uydurması, gerektiğinde güncellenmesi ve uyulmadığı takdirde cezaların uygulanması verimli bir strateji için önemlidir. Ayrıca beyaz eşya ve ofis cihazlarında enerji verimliliği etiketlendirme sistemi getirilmelidir.
- **Kargo ve yolcu taşıtları için minimum enerji verimliliği standartları ortaya konmalıdır.** Kargo ve yolcu taşıtları için iddialı ve bağlayıcı enerji verimliliği veya emisyon standartlarının uygulamaya konulması, ulaşım sektöründe enerji kullanımını azaltmada etkili olacaktır. Eğer araçlar için maksimum bir değer belirlenirse veya çok enerji kullanan araçlara yüksek vergi uygulanırsa, enerji kullanımı daha da azaltılabilir.

- **Teknolojik işbirliği ve uluslararası programlarda enerji verimliliğine öncelik verilmelidir.** Enerji verimliliği, tüm ekonomik faaliyetlerin planlanmasında göz önünde bulundurulmalı, yeni teknolojik işbirlikleri kapsamında ele alınmalıdır.
- **Sanayi sektörünün enerji verimliliği sağlayan teknolojileri devreye sokarak kullanması sağlanmalıdır.** Sanayi sektöründe faaliyet gösteren şirketlerin enerji verimliliği sağlayan teknolojileri uyarlaması için gerekli teşvik mekanizmaları oluşturulmalıdır [1].

4.1. Evlerde karbon ayak izini düşürmek için gerekli enerji geri kazanım uygulamaları

Evlerde karbon ayak izini düşürmek için enerji geri kazanım uygulamaları önemlidir. Bu uygulamalar, enerji tasarrufunu teşvik eder ve sürdürülebilir bir yaşam tarzını destekler. İşte evlerde karbon ayak izini azaltmaya yardımcı olabilecek bazı enerji geri kazanım uygulamaları:

- **Yalıtım:** İyi bir yalıtım, ısı kaybını azaltır ve ısıtma/soğutma maliyetlerini düşürür. Bu, evin daha verimli bir şekilde ısıtılmasına veya soğutulmasına yardımcı olur.
- **Enerji Verimli Cihazlar:** Evde kullanılan beyaz eşyalar, aydınlatma sistemleri ve HVAC (Isıtma, Soğutma, Havalandırma ve Klima) sistemleri gibi enerji verimli cihazlar seçmek, enerji tüketimini azaltır.
- **Güneş Enerjisi:** Güneş panelleri kullanarak evde güneş enerjisi üretebilirsiniz. Bu, evin enerji ihtiyacını karşılayabilir veya fazla enerjiyi elektrik şebekesine satabilir.
- **Suyu Geri Kazanma:** Gri su geri dönüşüm sistemleri, duş ve lavabo suyunu temizleme ve tekrar kullanma işlevine sahiptir. Bu, su tasarrufu sağlar ve su ısıtma maliyetlerini düşürür.
- **Rüzgar Enerjisi:** Rüzgar türbinleri, rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Evinizin yakınında rüzgar enerjisi üretebileceğiniz bir alan varsa, bu bir seçenek olabilir.
- **Isı Geri Kazanımı:** Isı geri kazanım sistemleri, kullanılmış sıcak hava veya suyun enerjisini kullanarak yeni gelen temiz hava veya suyu ısıtmak için kullanır.
- **Doğal Aydınlatma ve Doğal Havalandırma:** Doğal aydınlatma ve havalandırma tasarımları, elektrik enerjisi kullanımını azaltır ve iç mekanlarda konforu artırır.
- **Akıllı Ev Teknolojisi:** Akıllı ev sistemleri, enerji verimliliğini artırmak ve enerji tüketimini izlemek için kullanılabilir.
- **Enerji Geri Kazanımı Havalandırma Sistemleri:** Enerji geri kazanımı havalandırma (EHRV) sistemleri, evin içindeki sıcak veya soğuk hava akışını düzenlerken, dışarıdaki hava ile enerji transferini sağlar. Bu, ısıtma veya soğutma maliyetlerini azaltır.
- **Atık Geri Dönüşümü:** Atık malzemeleri geri dönüştürmek ve tekrar kullanmak, kaynakları korur ve enerji tasarrufu sağlar.

Bu uygulamalar, evinizin karbon ayak izini azaltmanıza yardımcı olabilir. Ayrıca, enerji tasarrufu sağlayan alışkanlıkların benimsenmesi ve sürdürülebilir bir yaşam tarzının desteklenmesi de önemlidir.

4.2. İş yerlerinde karbon ayak izini düşürmek için gerekli enerji geri kazanım uygulamaları

İş yerlerinde karbon ayak izini düşürmek için enerji geri kazanım uygulamaları, işletmelerin sürdürülebilirlik hedeflerini destekler ve enerji verimliliğini artırmaya yarar. İş yerlerinde karbon ayak izini azaltmaya yardımcı olabilecek enerji geri kazanım uygulamaları:

- **Enerji Verimli Aydınlatma:** Enerji tasarruflu LED aydınlatma sistemleri kullanmak, iş yerlerinde enerji tüketimini azaltabilir. Otomatik ışık kontrol sistemleri ve gün ışığına dayalı aydınlatma da enerji tasarrufu sağlar.
- **HVAC (Isıtma, Soğutma, Havalandırma ve Klima) Sistemleri:** İş yerlerinde enerji verimliliği için HVAC sistemlerini düzenli olarak bakım yaparak ve gelişmiş kontrol sistemleri kullanarak daha iyi yönetebilirsiniz. Ayrıca ısı geri kazanım sistemleri, kullanılmış hava ve enerjiyi geri kazanmak için kullanılabilir.

- **Enerji Geri Kazanımı Sistemleri:** Endüstriyel işletmeler için özel olarak tasarlanmış enerji geri kazanımı sistemleri, işlemler sırasında açığa çıkan ısıнын veya basınç enerjisinin geri kazanılmasını sağlar.
- **Yalıtım:** İş yerlerinin duvarları, çatıları ve pencereleri gibi binaların yalıtımı artırılarak ısı kaybı azaltılabilir. Bu, ısıtma ve soğutma maliyetlerini düşürebilir.
- **Güneş Enerjisi:** Çatıda güneş panelleri kullanarak elektrik enerjisi üretebilirsiniz. Bu, iş yerinizin elektrik ihtiyacının bir kısmını karşılayabilir ve karbon ayak izinizi azaltabilir.
- **Su Geri Kazanma:** Endüstriyel işletmeler için suyun geri kazanılması, işlem suyu veya soğutma suyu olarak kullanılarak su tüketimini azaltabilir.
- **Atık Isı Geri Kazanımı:** Endüstriyel işletmelerde sıcak su veya buhar üretimi sırasında açığa çıkan atık ısıyı geri kazanarak ısıtma veya elektrik üretimi için kullanabilirsiniz.
- **Elektrikli Araç Şarj İstasyonları:** İş yerlerinde elektrikli araç şarj istasyonları kurmak, çalışanların elektrikli araçlarını şarj etmelerine olanak tanır ve fosil yakıtlı araç kullanımını azaltır.
- **Enerji Yönetim Sistemleri:** Akıllı enerji yönetim sistemleri, enerji tüketimini izlemek, analiz etmek ve optimize etmek için kullanılır. Bu sistemler, enerji maliyetlerini düşürebilir.
- **Geri Dönüşüm ve Atık Azaltma:** İş yerlerinde geri dönüşüm programları ve atık azaltma stratejileri, kaynak kullanımını azaltır ve çevresel etkiyi azaltır.

İşletmeler, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik konularına odaklanarak hem maliyetleri düşürebilir hem de çevreye katkıda bulunabilirler.

4.3. Ulaşımında karbon ayak izini düşürmek için gerekli enerji geri kazanım uygulamaları

Karbon ayak izini düşürmek için ulaşımda enerji geri kazanımı, önemli bir stratejidir. Bu uygulamalar, enerjinin atılmasını önlemek veya geri kazanarak daha verimli bir ulaşım sistemi oluşturmayı amaçlar. İşte karbon ayak izini azaltmaya yardımcı olabilecek enerji geri kazanım uygulamaları:

- **Elektrikli Araçlar:** Geleneksel içten yanmalı motorlu araçların yerine elektrikli araçlar kullanarak, enerji verimliliği artırabilirsiniz. Elektrikli araçlar, regeneratif frenleme gibi teknolojiler kullanarak frenleme sırasında enerjiyi geri kazanabilirler.
- **Hibrit Araçlar:** Hibrit araçlar, benzinli veya dizel motorlarla birlikte elektrik motorları kullanır ve frenleme sırasında enerjiyi geri kazanır.
- **Toplu Taşıma Sistemleri:** Toplu taşıma sistemleri, enerjiyi daha etkili bir şekilde kullanabilir. Özellikle metro ve tramvay sistemleri, frenleme sırasında enerjiyi depolamak ve geri kazanmak için süperkapasitörler veya bataryalar kullanabilirler.
- **Yakıt Hücreli Araçlar:** Yakıt hücreli araçlar, hidrojen kullanarak elektrik üretir ve sadece su buharı salar. Bu araçlar enerjiyi verimli bir şekilde kullanır ve karbon ayak izini azaltır.
- **Bisiklet Paylaşım Sistemleri:** Şehir içi ulaşım için bisiklet paylaşım sistemleri enerji tasarrufu sağlar ve karbon ayak izini düşürebilir.
- **Enerji Depolama:** Enerji depolama sistemleri, enerjiyi daha verimli bir şekilde kullanmak için yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen enerjiyi depolayabilir ve taşıma araçlarına sağlayabilir.
- **Aerodinamik Tasarım:** Araçların aerodinamik tasarımı, hava direncini azaltarak yakıt tüketimini azaltabilir ve böylece enerji verimliliğini artırabilir.
- **Daha İyi Trafik Yönetimi:** Akıllı trafik yönetimi sistemleri, trafik sıkışıklığını azaltabilir ve yakıt tüketimini düşürebilir.
- **Enerji Verimliliği Standartları:** Araç üreticileri, daha enerji verimli araçlar üretmek için enerji verimliliği standartlarına uymalıdır.
- **Paylaşımlı Ulaşım:** Paylaşımlı ulaşım hizmetleri, özel araçların kullanımını azaltabilir ve daha az enerji tüketen toplu taşıma araçlarını teşvik edebilir.

Ayrıca, toplumun bu tür çözümleri benimsemesi ve desteklemesi de önemlidir.

4.4. Endüstriyel tesislerde karbon ayak izini düşürmek için gerekli enerji geri kazanım uygulamaları

Endüstriyel tesislerde karbon ayak izini düşürmek için enerji geri kazanımı oldukça önemlidir. Karbon ayak izini azaltmak için aşağıdaki enerji geri kazanımı uygulamalarını yapılabilir:

- **Isı Geri kazanımı:** Endüstriyel süreçler sırasında oluşan ısı enerjisi, ısı geri kazanım sistemleri kullanılarak yakalanabilir ve tekrar kullanılabilir. Bu ısı enerjisi, binaların ısıtılması veya soğutulması gibi farklı alanlarda kullanılabilir.
- **Buhar ve Basınç Enerjisinin Geri Kazanımı:** Endüstriyel işlemlerde oluşan buhar ve basınç enerjisi geri kazanılarak enerji tasarrufu sağlanabilir. Bu enerji, farklı süreçlerde veya tesis içindeki farklı cihazlarda kullanılabilir.
- **Enerji Geri Kazanımı ile Elektrik Üretimi:** Endüstriyel tesislerde oluşan atık ısının veya basınç enerjisinin kullanılmasıyla elektrik üretimi mümkündür. Bu sayede tesisin ihtiyaç duyduğu elektriğin bir kısmı kendi içinden üretilir.
- **Atık Enerjiyi Değerlendirme:** Endüstriyel tesislerde atık olarak ortaya çıkan enerji, örneğin atık su veya gazlar, geri kazanılabilir. Bu atık enerji, tesis içinde başka amaçlar için kullanılarak enerji tasarrufu sağlanabilir.
- **Enerji Verimliliğini Arttırma:** Endüstriyel tesislerde enerji verimliliğini artıran önlemler almak da önemlidir. Bu, ekipmanların daha verimli kullanılması, süreçlerin optimize edilmesi ve enerji tasarrufu sağlayan teknolojilerin uygulanması anlamına gelir.
- **Güneş ve Rüzgar Enerjisi Kullanımı:** Eğer uygun koşullar varsa, endüstriyel tesislerde güneş ve rüzgar enerjisi kullanarak elektrik üretimi gerçekleştirilebilir. Bu yenilenebilir enerji kaynakları, tesisin enerji ihtiyacını karşılamada yardımcı olabilir.
- **Geri Dönüşüm ve Malzeme Tasarrufu:** Enerji geri kazanımının yanı sıra, atık malzemelerin geri dönüşümü ve kullanımıyla da enerji tasarrufu sağlanabilir. Bu, ham madde kullanımını azaltarak çevreye ve enerjiye daha az yük getirir.

Her tesisin yapısı ve ihtiyaçları farklı olduğundan, en etkili stratejileri belirlemek için uzman danışmanlık almak ve spesifik durumu incelemek önemlidir.

4.5 Karşılaşılan Zorluklar ve Çözüm Yolları

4.5.1 Enerji Verimliliği Projelerinde Finansman Sorunları

Enerji verimliliği projeleri, başlangıçta büyük yatırımlar gerektiren ancak uzun vadede tasarruf ve sürdürülebilirlik sağlayan projelerdir. Ancak, bu projelerin hayata geçirilmesinde karşılaşılan en büyük engellerden biri finansman eksikliğidir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde ve küçük çaplı işletmelerde enerji verimliliği projelerine yatırım yapacak sermaye bulmak zor olabilmektedir.

Bu sorunun üstesinden gelmek için şu çözümler önerilebilir:

1. **Kamu ve Özel Sektör Ortaklıkları (PPP):** Kamu sektörü, özel sektör projelere dahil ederek finansman çözümleri yaratabilir. Özellikle enerji tasarrufu sağlayan bina projelerinde bu model başarılı sonuçlar vermektedir.
2. **Yeşil Finansman ve Teşvikler:** Bankalar ve finans kurumları yeşil krediler, karbon ticareti ve enerji verimliliği sertifikaları gibi mekanizmalarla projeleri destekleyebilir.
3. **Uluslararası Fonlar ve Hibeler:** Birleşmiş Milletler, Avrupa Birliği ve diğer uluslararası kurumlar, enerji verimliliği projelerine yönelik hibe ve fonlar sunmaktadır.
4. **Vergi Teşvikleri ve Düşük Faizli Krediler:** Devletler, enerji verimliliği projelerine yönelik vergi indirimleri ve düşük faizli kredi imkanları sağlayarak finansman sorunlarını hafifletebilir.

4.5.2. Kamu Farkındalığı ve Teşviklerin Önemi

Enerji verimliliği projelerinin başarılı olabilmesi için kamuoyunun farkındalığının artması kritik bir rol oynamaktadır. Bireylerin ve işletmelerin enerji tasarrufu konusunda bilinçlendirilmesi, projelere olan talebi artırabilir. Ancak, enerji verimliliği konusundaki bilgi eksikliği ve yanlış algılar bu alanda ilerlemeyi yavaşlatabilir.

Teşvikler ve kamu farkındalığını artırma yöntemleri şunlar olabilir:

1. **Eğitim ve Bilinçlendirme Kampanyaları:** Okullarda, üniversitelerde ve şirketlerde enerji verimliliği eğitimleri verilmesi, genç yaştan itibaren sürdürülebilirlik bilincini aşılayabilir.
2. **Yerel Yönetimlerin Rolü:** Belediyeler, enerji verimliliği projelerini destekleyen yerel teşvikler ve programlar başlatabilir.
3. **Medya ve Dijital Kampanyalar:** Kitle iletişim araçları, enerji tasarrufu konusunda farkındalık yaratmak için etkili bir araç olabilir.
4. **Örnek Projeler ve Gösterim Alanları:** Pilot projeler ve enerji verimliliği başarı hikayeleri, diğer işletme ve bireylere ilham kaynağı olabilir.

SONUÇ

Enerji verimliliği; ülkelerin ekonomik büyüme, enerji arz güvenliği, iklim değişikliği ve sürdürülebilirlik gibi birçok hedefinin gerçekleştirilmesinde önemli bir kaynak olarak değerlendirilmektedir. Enerji verimliliği çalışmaları üzerinde durulmadığı takdirde oluşan fazla enerji talebini karşılamak amacıyla yapılan yeni yatırımların daha yüksek kapasitelerde dolayısıyla daha yüksek maliyetlerle gerçekleştirilmesi kaçınılmaz olacaktır. Enerji verimliliği konusunda gerekli planlamalar yapılmaz ise, Türkiye için enerji sorunu daha da büyüyecek ve ekonomi daha fazla enerji yoğun bir hale gelecektir. Türkiye’de enerji talebinin giderek arttığı ve sanayi sektöründeki gelişmelere paralel olarak bu artışın devam edeceği görülmektedir. Sanayi sektörünün enerji talebinin karşılanması konusunda yapılması gereken ilk uygulama, tüm sektörlerde sürdürülebilir enerji verimliliği çalışmalarının hayata geçirilmesidir. Türkiye’de hızla artmakta olan enerji talebini karşılamak için sınırlı olan doğal kaynaklarımızın kullanımını optimize etme, yeni teknolojilerle enerji üretimini daha verimli hale getirme, mevcut teknolojilerin verimliliğini artırma konularına yönelik politika ve stratejilerin geliştirilmesi ve uygulanması büyük önem arz etmektedir.

Nüfus artışı, sanayileşme ve enerji talebinde artışa, bunlar da kaynak kullanımındaki artışa sebep olur. Böylece daha fazla fosil yakıt kullanımı ile bir zincirleme döngüyü oluşturmaktadır. Bu döngü beraberinde iklim değişikliğine neden olan karbondioksit ve diğer sera gazlarını beraberinde getirmektedir. Dünyayı tehdit eden en büyük çevre sorunlarından biri sera gazı artışı ile küresel ısınmadır.

Evlerde, işyerlerinde, ulaşımda ve endüstride enerji verimliliği uygulamaları uygulanması Enerji geri kazanım uygulamalarının, karbon ayak izini azaltma potansiyeline sahiptir ve çeşitli faydalar sağlayabilir. İşte bu uygulamaların olası sonuçları:

- **Enerji Tasarrufu:** Enerji geri kazanımı uygulamaları, daha az enerji tüketerek çalışabilir. Bu, enerji faturalarını azaltır ve işletme veya hane bütçesine tasarruf sağlayacaktır.
- **Karbon Ayak İzi Azalması:** Enerji geri kazanımı uygulamaları, enerji verimliliği artırarak ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak karbon ayak izini azaltabilir. Bu, iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir rol oynayacaktır.
- **Mali Faydalar:** Daha verimli enerji kullanımı, işletmeler için enerji maliyetlerini düşürebilir. Ayrıca, enerji verimliliği teşvikleri ve devlet destekleri gibi finansal teşviklerden yararlanmak da mümkün olacaktır.

- **Daha İyi Hava Kalitesi:** Karbon ayak izini azaltma çabaları, hava kirliliğini azaltabilir ve insan sağlığını koruyacaktır.
- **Daha Yüksek Verimlilik:** Endüstriyel işletmelerde enerji geri kazanımı uygulamaları, üretim süreçlerinin verimliliğini artırabilir. Daha iyi verimlilik, işletmelerin rekabet avantajı elde etmelerine yardımcı olacaktır..
- **Çevre Koruma:** Enerji geri kazanımı uygulamaları, doğal kaynakların korunmasına ve çevre zararlarının azaltılmasına katkıda bulunacağından atık azaltma ve su geri kazanma gibi uygulamalar, doğal kaynakların korunmasına fayda sağlayacaktır.
- **Daha İyi İş İmajı:** Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik önemli bir iş pratiği haline geldiğinden, bu tür uygulamalar iş yerleri ve işletmeler için daha olumlu bir iş imajı yaratabilir.
- **Daha İyi İş Sağlığı ve Güvenliği:** Endüstriyel işletmelerde enerji geri kazanımı uygulamaları, işçi sağlığı ve güvenliği konusunda da fayda sağlayabilir. Daha iyi havalandırma ve ısıtma sistemleri, çalışanların rahatlığını artırabilir.
- **Daha Düşük Atık Yönetimi Maliyetleri:** Endüstride atık enerji geri kazanımı uygulamaları, atık yönetimi maliyetlerini azaltabilir. Aynı zamanda, atık üretimini azaltarak çevreye olan olumsuz etkileri azaltır.
- **Daha Az Bağımlılık:** Enerji geri kazanımı uygulamaları, enerji kaynaklarının daha etkili kullanılmasını teşvik eder ve enerji arzının güvence altına alınmasına yardımcı olur.

Sonuç olarak, enerji geri kazanım uygulamaları, hem ekonomik hem de çevresel açıdan bir dizi fayda sağlamaktadır. Hem bireysel kullanıcılar hem de işletmeler, bu uygulamaları benimseyerek enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine ciddi anlamda katkıda bulunabilirler.

KAYNAKÇA

- [1] Enerji Verimliliği ve İklim Değişikliği, WWF-Türkiye (Doğal Hayatı Koruma Vakfı) İstanbul, Türkiye, 2011
- [2] TUIK Verileri; <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2022-53701>
- [3] https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22105/EGR_2017_ch_4.pdf?form=MG0AV3
- [4] Türkiye Enerji Verimliliği Meclisi (TEVEM), Enerji Verimliliği Derneği (ENVERDER) ve Economy: Türkiye Enerji ve Enerji Verimliliği Çalışmaları Raporu, İstanbul, 2010.
- [5] "İklim Çözümleri: 2050 Türkiye Vizyonu", WWF-Türkiye (Doğal Hayatı Koruma Vakfı) İstanbul, Türkiye, 2009
- [6] <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/enerji-bulteni-eylul-20241009.pdf>
- [7] www.obi.bilkent.edu.tr/ekookul/pdf/enerjiverimliliği.pdf
- [8] https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/türkiyenin_enerji_gorunumu_kitap.pdf
- [9] Türkiye Enerji Dönüşümü Görünümü 2023, SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi
- [10] <https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EVCED/tr/EnerjiVerimlili%C4%9Fi/OVDegerlendirme/Belgeler/EYogunluklari/2023.pdf>
- [11] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı web sitesi, <http://www.enerji.gov.tr/>

TÜRKİYE'DE RÜZGAR ENERJİSİ SEKTÖRÜNÜN GELİŞİMİ VE KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR: TEKNOLOJİK İLERLEMELER, ŞEBEKE ENTEGRASYONU VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFLERİ

Darya AMINI, Prof. Dr. Sermin ONAYGIL

İTÜ ENERJİ ENSTİTÜSÜ, Ayazağa Kampüsü, Maslak, İstanbul

amini21@itu.edu.tr, onaygil@itu.edu.tr

ÖZET

Bu bildiride, Türkiye'nin rüzgar enerjisi sektörünün gelişimindeki teknolojik ilerlemeler, şebeke entegrasyonu zorlukları ve politikaların kritik rolü odaklı olarak incelenmiştir. Bu amaçla rüzgar potansiyeli değerlendirme yöntemleri, türbin teknolojisi yenilikleri ile şebeke entegrasyonunun teknik, sosyo-ekonomik ve düzenleyici engelleri konusundaki literatür irdelenmiştir. Çalışmada ayrıca, küresel ölçekte ve özellikle Türkiye'de destekleyici politikaların etkisi de değerlendirilmiştir. Bu bulgulara dayanılarak, Türkiye için kapsamlı politika önerileri geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu öneriler arasında rüzgar kaynak değerlendirmesi ve stratejik planlamanın güçlendirilmesi, yerli teknoloji gelişimi ve inovasyonun teşvik edilmesi, şebeke altyapısının modernizasyonu ve akıllı şebeke çözümlerinin benimsenmesi, piyasa mekanizmalarının iyileştirilmesi ve izin süreçlerinin kolaylaştırılması ile sosyal kabulün ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması yer almaktadır. Öneriler, Türkiye'nin artan enerji güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri için rüzgar enerjisi potansiyelinin tam ve efektif bir şekilde kullanılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar Enerjisi, Türbin Teknolojisi, Enerji Politikaları, Sürdürülebilirlik

ABSTRACT

This paper examines the technological advancements, grid integration challenges, and the critical role of policies in the development of Turkey's wind energy sector. For this purpose, the literature on wind potential assessment methodologies, innovations in turbine technology, and the technical, socio-economic, and regulatory barriers to grid integration is reviewed. The study also analyzes the impact of supportive policies on a global scale and specifically in Turkey. Based on these findings, comprehensive policy recommendations for Turkey have been developed. These recommendations include strengthening wind resource assessment and strategic planning, promoting domestic technology development and innovation, modernizing grid infrastructure and adopting smart grid solutions, improving market mechanisms and streamlining permitting processes, and ensuring social acceptance and environmental sustainability. The recommendations aim to contribute to the full and effective utilization of Turkey's wind energy potential for its growing energy security and sustainable development goals.

Keywords: Wind Energy, Turbine Technology, Energy Policies, Sustainability

1. GİRİŞ

Enerji, modern toplumların ekonomik ve sosyal gelişimi için vazgeçilmez bir unsurdur. Ancak, fosil yakıtlara dayalı geleneksel enerji üretiminin çevresel etkileri ve kaynakların sınırlı olması, dünya genelinde ülkeleri daha temiz, sürdürülebilir ve güvenli enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Bu bağlamda rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji portföyü içerisinde öne çıkan ve hızla gelişen bir alternatif olarak küresel enerji dönüşümünde kritik bir rol oynamaktadır. Türkiye gibi enerji talebi sürekli artan ve enerji ithalatına bağımlılığı yüksek olan ülkeler için rüzgar enerjisi, hem enerji arz güvenliğinin sağlanması hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması açısından önem taşımaktadır.

Türkiye'nin coğrafi konumu ve iklimsel özellikleri nedeniyle önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeli mevcuttur. Bu potansiyelin etkin bir şekilde değerlendirilmesi, ülkenin enerji politikalarının temel hedefleri arasında yer alsa da, sektörün gelişimi çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Teknolojik gelişmelerin yakından takip edilmesi ve yerli sanayinin bu alanda güçlendirilmesi, rüzgar türbinlerinin verimliliğini ve rekabetçiliğini artırmak için gereklidir. Bununla birlikte, rüzgar enerjisinin değişken ve kesintili doğası, mevcut elektrik şebekelerine entegrasyonunda teknik ve operasyonel zorluklar yaratmakta; bu durum, şebeke altyapısının modernizasyonunu ve akıllı şebeke çözümlerinin benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Ayrıca, destekleyici ve öngörülebilir politika çerçevelerinin oluşturulması, yatırım ortamının iyileştirilmesi ve toplumsal kabulün sağlanması da sektörün sağlıklı büyümesi için önemlidir.

Bu çalışma, Türkiye'nin rüzgar enerjisi sektörünün mevcut durumunu ve gelecekteki potansiyelini kapsamlı bir şekilde analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, öncelikle rüzgar enerjisi potansiyeli değerlendirilerek türbin teknolojilerindeki yenilikler incelenmekte, ardından rüzgar enerjisinin şebeke entegrasyonunda karşılaşılan teknik, sosyo-ekonomik ve düzenleyici politikalar ile bu engellerin aşılmasına yönelik stratejiler ele alınmaktadır. Çalışmada ayrıca, hem küresel ölçekte hem de Türkiye özelinde rüzgar enerjisi sektörünün gelişiminde destekleyici politikaların ve teşvik mekanizmalarının rolü değerlendirilmektedir.

Çalışmanın temel hedefi, bu analizler doğrultusunda Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyelini en üst düzeyde ve sürdürülebilir bir şekilde kullanabilmesi için bilimsel temellere dayanan, uygulanabilir ve kapsamlı politika önerileri geliştirmektir. Bu önerilerin, rüzgar kaynak değerlendirmesinin güçlendirilmesinden yerli teknoloji ve inovasyonun teşvikine, şebeke altyapısı modernizasyonundan piyasa mekanizmalarının iyileştirilmesine ve çevresel sürdürülebilirlik ile sosyal kabulün sağlanmasına kadar geniş bir yelpazeyi kapsaması hedeflenmektedir. Bu çalışmanın bulgu ve önerilerinin, Türkiye'nin enerji güvenliğini artırma ve sürdürülebilir kalkınma yolculuğunda rüzgar enerjisinin rolünün değerlendirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMA

Rüzgar enerjisi, daha temiz ve daha sürdürülebilir enerji sistemlerine doğru küresel geçişte önemli bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Birçok ülke fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmaya çalıştıkça, rüzgar enerjisinin durumunu anlamak giderek daha önemli hale gelmiştir. Derleme niteliğindeki bu bildiride, rüzgar enerjisi teknolojileri ve potansiyelinin değerlendirilmesi, rüzgar enerjisinin mevcut elektrik şebekelerine entegre edilmesinde karşılaşılan zorluklar ve destekleyici politikaların kritik rolü olmak üzere üç temel alana odaklanılarak rüzgar enerjisinin mevcut durumu incelenmektedir. Çalışmada, yakın zamanda yapılan araştırmalardan elde edilen bilgiler bir araya getirilerek, sektörün geleceğini şekillendiren fırsatlar ve engeller hakkında çok yönlü bir bilgi birikimi sunulması amaçlanmaktadır.

2.1. Rüzgar Enerjisi Teknolojileri ve Potansiyelleri

Literatür taramasının bu bölümü, rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesini ve ilgili teknolojileri araştırmakta, yöntemleri, bulguları ve çeşitli çalışmalardan elde edilen katkıları analiz etmektedir.

Ritter ve diğerleri (2015) bir rüzgar enerjisi endeksi tasarlayarak yerel rüzgar enerjisi potansiyelini değerlendirmek için yeni bir yaklaşım ortaya koymuştur. Bu yöntem, belirli türbin konumlarında ve göbek yüksekliklerinde uzun vadeli düşük ölçekli rüzgar hızı verileri elde etmek için meteorolojik analiz verilerini kullanmaktadır [1]. Rüzgar verileri ile enerji üretimi arasındaki ilişki, gerçek yüksek frekanslı enerji üretim verileri kullanılarak beş parametrelili

bir lojistik fonksiyon aracılığıyla belirlenmektedir. Elde edilen rüzgar enerjisi endeksi, gözlemlenemeyen bir konumda beklenen rüzgar gücünün türbine özgü bir tahminine olanak tanımaktadır. Roga ve diğerleri (2022) çalışmalarında türbin tiplerine ve gelecekteki gelişmelere odaklanarak rüzgar enerjisi teknolojilerinin bir incelemesini sunmaktadır. Makalede yatay eksenli rüzgar türbinleri (Horizontal Axis Wind Turbines-HAWTs) ve dikey eksenli rüzgar türbinlerinin (Vertical Axis Wind Turbines-VAWTs) yanı sıra hava, açık deniz ve çok rotorlu sistemler gibi gelişmekte olan teknolojiler tartışılmaktadır. Ayrıca türbin verimliliğini artırma yöntemlerine ve güvenilir rüzgar enerjisi değerlendirme metodolojilerinin önemine de değinilmektedir [2].

Düzcan ve Kara (2025), Gökçeada'ya odaklanarak Türkiye'deki rüzgar enerjisi potansiyelini değerlendirmektedir. Araştırmacılar çalışmalarında Power-law yöntemi ve Windsim yazılımını kullanan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics-CFD) olmak üzere iki farklı yaklaşım kullanmışlardır. Rüzgar hızı alanını hesaplamak için power-law yöntemi ve Windsim yazılımı kullanılmış ve ardından her iki yaklaşımda da Weibull yöntemi ile enerji analizleri yapılmıştır. Bu karşılaştırmalı çalışma, rüzgar kaynağı değerlendirmesinde arazi pürüzlülüğü ve rüzgar yönü gibi faktörlerin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Pürüzlülük, power-law yönteminde ölçüm sahası ve türbin sahası olmak üzere sadece iki noktada elde edilirken, CFD yönteminde tüm alan için dikkate alınmaktadır. Ayrıca, Power-law yönteminde rüzgar yönü dikkate alınmazken, CFD yönteminde dikkate alınmaktadır [3]. Çakmakçı ve Hüner (2022) de Türkiye'de, özellikle Kırklareli Üniversitesi Kayalı Kampüsü'nde rüzgar enerjisi potansiyelini değerlendirmişlerdir. Araştırmalarında, Moment ve Maksimum Olasılık Tahmini (Maximum Likelihood Estimate-MLE) yöntemleriyle hesaplanan parametrelerle istatistiksel dağılım tekniklerini kullanmışlardır. MLE yöntemi, incelenen istatistiksel dağılımlar arasında en uygun model olarak tanımlanmıştır [4].

Moustakas ve diğerlerinin (2020) belirttiği gibi, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin genelinde rüzgar enerjisi önemli bir rol oynamaktadır [5]. İncelemeleri, rüzgar enerjisinin biyoyakıtlar ve atıktan enerji sistemleri gibi diğer teknolojilerin yanı sıra sürdürülebilir enerjiye geçişin kilit bir bileşeni olduğunu vurgulamaktadır. Bu bakış açısı, Ritter , Düzcan ve Kara ve Çakmakçı ve Hüner'de tartışıldığı gibi rüzgar potansiyeli ve teknolojilerinin ayrıntılı analizlerinin, rüzgar enerjisinin etkili entegrasyonu için doğru değerlendirmelerin ve teknolojik ilerlemelerin gerekli olduğu tezini desteklemektedir [1], [3], [4].

Bu makaleler, rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik çeşitli yaklaşımlar ortaya koymaktadır. Ritter ve Roga, sırasıyla rüzgar enerjisi endeksi ile geliştirilmiş bir metodoloji ve rüzgar enerjisi teknolojilerine daha geniş bir genel bakış sunmaktadır [1], [2]. Düzcan ve Kara ile Çakmakçı ve Hüner, bölgeye özel yöntemler ve verilerle ayrıntılı vaka çalışmaları gerçekleştirmektedir. Düzcan ve Kara , Windsim yazılımı aracılığıyla power-law yöntemini ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemini kullanmakta ve bu yöntemlerin sonuçlarını karşılaştırmaktadır [3]. Çakmakçı ve Hüner, rüzgar enerjisi potansiyelini değerlendirmek için Moment ve Maksimum Olabilirlik (MLE) yöntemleriyle hesaplanan parametrelerle istatistiksel dağılım tekniklerini uygulamaktadır [4].

Her bir çalışma, alana farklı katkılar gerçekleştirmektedir. Türkiye odaklı çalışmalar, ülkenin rüzgar enerjisi sektöründeki belirli zorluklarına ve fırsatlarına ilişkin bilgiler oluşturmada ve proje geliştirme için pratik rehberlik sağlamaktadır. Ritter ve diğerleri, farklı coğrafi bağlamlarda uygulanabilir rüzgar enerjisi endeksi ile yenilikçi bir yaklaşım sunarken [1] Roga, rüzgar enerjisi teknolojilerine kapsamlı bir genel bakış getirmektedir [2]. Bu makaleler toplu olarak, doğru değerlendirme yöntemlerinin önemini, teknolojik yaklaşımların çeşitliliğini ve vaka bazlı çözümlere duyulan ihtiyacı vurgulayarak rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi ve teknolojilerine ilişkin görüşler oluşturmaktadır.

2.2. Rüzgar Enerjisinin Şebekeye Entegrasyonu ve Karşılaşılan Zorluklar

Rüzgar enerjisinin mevcut elektrik şebekelerine entegrasyonu, şebeke istikrarını ve güvenilirliğini sağlamak için ele alınması gereken karmaşık bir dizi zorluk ortaya koymaktadır. Çeşitli çalışmalar bu zorlukları ve potansiyel çözümleri araştırmıştır.

Ahmed ve diğerleri (2020) çalışmalarında, rüzgar enerjisi ile ilişkili şebeke entegrasyon zorluklarının kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Rüzgar enerjisi gibi büyük ölçekli kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) mevcut

elektrik şebekelerine entegrasyonu önemli ölçüde artmıştır. Ancak bu entegrasyon, şebekelerin güvenilir ve istikrarlı çalışmasını engelleyen birçok operasyonel ve kontrol zorluğunu beraberinde getirmektedir. İnceleme, üretim belirsizliği, güç kalitesi sorunları, açısız ve gerilim kararlılığı, reaktif güç desteği ve arıza giderme kabiliyeti gibi temel zorlukları tanımlamaktadır. Yazarlar ayrıca sosyoekonomik, çevresel ve elektrik piyasası zorluklarını da tartışmaktadır. Makale enerji depolama sistemleri, rüzgar enerjisi politikası ve şebeke kodları gibi çözümleri de incelemektedir [6].

Kataray ve diğerleri (2023) akıllı şebekelerin yenilenebilir enerji kaynakları ile entegrasyonunu tartışmaktadır. Çalışmalarında yenilenebilir enerji kaynaklarının genişletilmesi ve etkin yönetiminde akıllı şebekelerin önemi vurgulanmaktadır. İnceleme, yenilenebilir enerji ile akıllı şebeke entegrasyonu için önemli konuları irdeleyerek, iletişim ağının ve uygun algoritmalarla uygun talep tarafı yönetiminin önemli olduğunu açıklamaktadır [7].

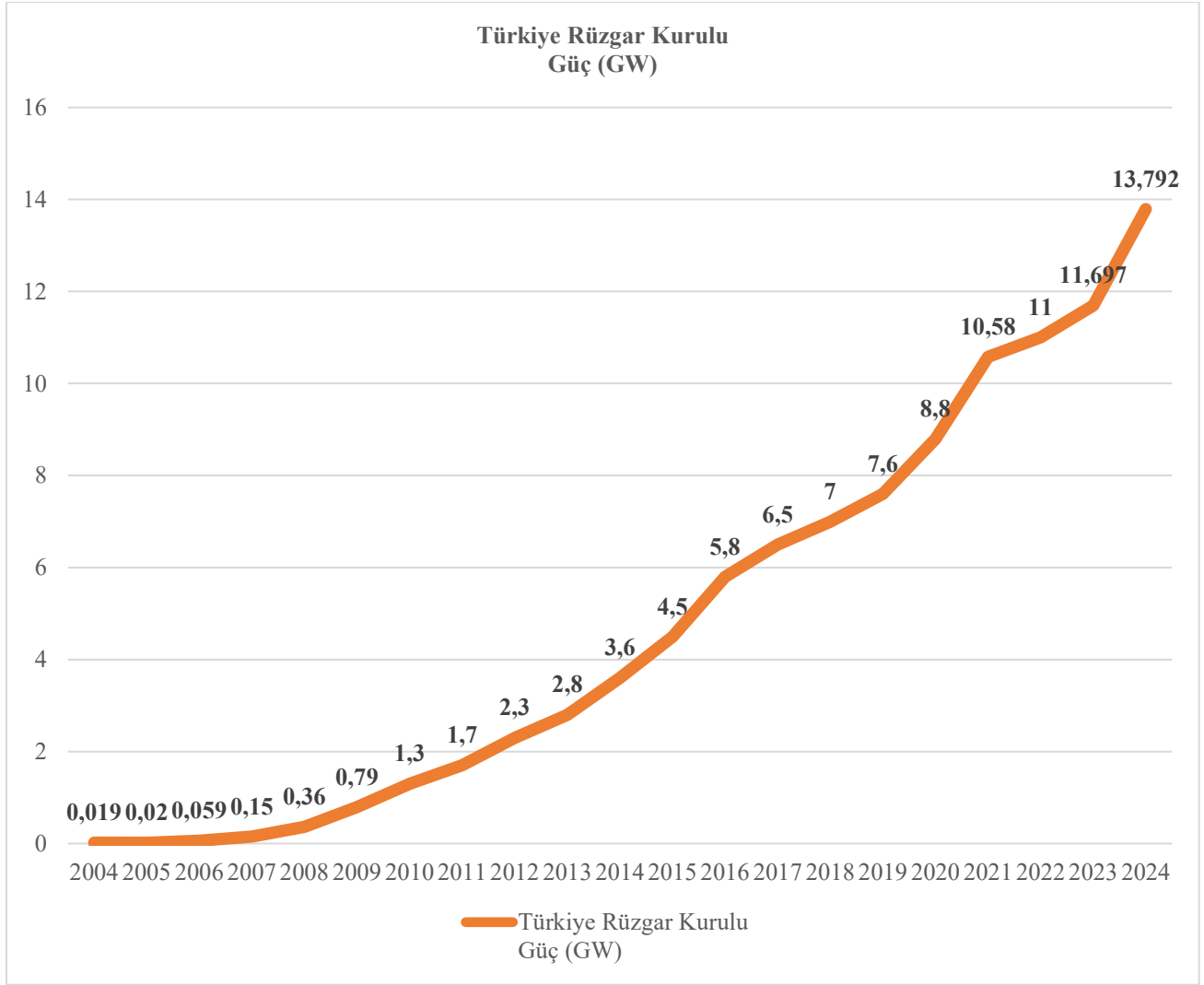
Diógenes ve diğerleri (2020), karada rüzgar enerjisi uygulamasının önündeki engellerin sistematik bir incelemesini yapmışlardır. Kıyı rüzgar enerjisi ve rüzgar çiftliklerinin büyük ölçekli uygulamalarının önünde çok sayıda engel bulunmasına rağmen dünya çapında önemli bir yayılma gösterdiğini açıklamışlardır. Çalışma, dünya genelinde karada rüzgar enerjisinin yaygınlaşmasını zorlaştıran ve hatta engelleyen teknik, ekonomik, finansal ve sosyal engeller de dahil olmak üzere çeşitli zorlukları tanımlamaktadır. Teknik engellerden biri de yetersiz iletim şebekeleridir [8].

Çelik ve diğerleri (2022), Türkiye'deki bir vaka çalışması ile açık deniz rüzgar enerjisi santrallerinin entegrasyonu için şebeke kodu gerekliliklerine odaklanmaktadır. Açık deniz rüzgar enerjisi santrallerinin Türkiye'deki elektrik üretim karmasındaki artan rolü, bazı kritik grioperasyon sorunlarını gündeme getirmektedir. Büyük ölçekli açık deniz rüzgar enerjisi santrallerinin Türkiye'nin elektrik sistemine entegrasyonuna ilişkin şebeke yönetmeliği, güvenilir bir şebeke işletiminin geliştirilmesinde önemli bir faktör haline gelmiştir. Bu çalışma, büyük ölçekli açık deniz rüzgar enerjisi santrallerine sahip Avrupa ülkeleri ve Türkiye'nin şebeke kodları için gerilim ve frekans regülasyonu, arıza geçişi ve güç kalitesini göz önünde bulundurarak kapsamlı bir karşılaştırma yapmaktadır [9].

İncelenen makaleler, rüzgar enerjisi şebeke entegrasyonunun ve bununla ilgili zorlukların birkaç önemli yönünü vurgulamaktadır. Ahmed, teknik zorluklara geniş bir genel bakış gerçekleştirirken, Diógenes ekonomik, sosyal ve politika ile ilgili engelleri de dahil ederek daha geniş bir perspektif sunmaktadır [6], [8]. Kataray, akıllı şebekelerin yenilenebilir enerji entegrasyonunu kolaylaştırmadaki rolünü vurgulamaktadır [7]. Çelik tarafından yapılan çalışma, açık deniz rüzgar entegrasyonu için şebeke kodlarının önemine odaklanarak Türkiye'ye özgü bir bakış açısı getirmektedir. Bu çalışmalar, ulusal güç sistemlerinde ve düzenleyici mevzuatlarda rüzgar enerjisi üretimi ile ilgili belirli özellikleri dikkate alan şebeke entegrasyonuna yönelik özel yaklaşımlara duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır [9]. Sliz-Szkliniarz ve diğerleri (2019) de rüzgar enerjisinin yaygınlaştırılmasında ekonomik ve sosyal boyutların dikkate alınmasının önemine vurgu yapmaktadır [10].

Şekil 1'de 2004–2024 yılları arasında Türkiye'nin rüzgar kurulu gücündeki gelişim gösterilmektedir. Veriler, 2004 yılında yalnızca 19 MW olan kurulu gücün 2024 yılında yaklaşık 13,8 GW seviyesine ulaştığını ortaya koymaktadır. Bu hızlı artış, rüzgar enerjisinin elektrik üretimindeki payının sürekli yükseldiğini ve dolayısıyla şebeke entegrasyonuna ilişkin tartışmaların önem kazandığını göstermektedir. Artan kurulu güç, şebekeye daha fazla değişken üretim kaynağının dahil edilmesi anlamına gelmekte; bu durum ise şebeke istikrarı, dengeleme kapasitesi, yedekleme sistemleri ve esnek işletme ihtiyaçlarını daha kritik hale getirmektedir.

Özetle literatür, başarılı rüzgar enerjisi şebeke entegrasyonunun gerçekleştirilebilmesi için teknik, ekonomik, sosyal ve düzenleyici zorlukların karmaşık bir etkileşiminin ele alınması gerekliliğinin altını çizmektedir.



Şekil 1–Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Kurulu Güç Gelişimi [11]

2.3. Rüzgar Enerji Politikaları

Etkili politikalar, rüzgar enerjisinin gelişim ve benimsenme yörüngesini şekillendirmede önemlidir. Bu politikalar, yatırım için uygun koşulların yaratılmasında, teknolojik inovasyonun teşvik edilmesinde ve rüzgar enerjisinin enerji karışımına sürdürülebilir entegrasyonunun sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bir dizi çalışma, çeşitli ülke ve bölgelerde politikanın rüzgar enerjisi sektörü üzerindeki çok yönlü etkisini araştırmıştır.

Sadorsky (2021), rüzgar enerjisinin gelişimini destekleyen temel faktörleri incelemekte ve gelecekteki gelişimine ilişkin içgörüler sunmaktadır. Çalışma, sürdürülebilir kalkınmanın temel taşlarından biri olarak rüzgar enerjisinin büyümesini teşvik etmede politikaların oynadığı önemli role vurgu yapmaktadır. Belirli politika araçlarını ve bunların rüzgar enerjisi projelerini teşvik etmede ve yaygın kullanımını desteklemedeki etkinliğini incelemektedir [12].

Chang ve diğerleri (2022), yenilenebilir enerji politikalarının çevresel sürdürülebilirliği nasıl etkilediğine dair bir analiz gerçekleştirmişler ve özellikle Avrupa Birliği’ndeki en büyük on rüzgar enerjisi tüketicisi ülkeye odaklanmışlardır. Bu araştırma, rüzgar enerjisi de dahil olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının benimsenmesini teşvik etmek için tasarlanan çeşitli politika önlemlerinin etkinliğini titizlikle değerlendirmekte ve bunların çevresel sonuçlar üzerindeki etkisini irdelemektedir. Bu karşılaştırmalı yaklaşım, en iyi uygulamalar ve politika etkinliği konusunda değerli çıkarımlarda bulunmaktadır [13].

Idoko ve diğerleri (2023) Nijerya ve ABD olmak üzere iki farklı bölgede yenilenebilir enerji politikalarının karşılaştırmalı analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma, gelişmiş ve gelişmekte olan ekonomiler arasındaki politika yaklaşımlarındaki zıtlıkları vurgulayarak, farklı politika çerçevelerinin rüzgar enerjisi de dahil olmak üzere yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişimini nasıl etkilediğini, her bölgeye özgü zorlukları ve fırsatları araştırmaktadır [14].

Zhang ve diğerleri (2020) Çin'in küresel rüzgar enerjisi gelişimi üzerindeki önemli rolünü, mevcut durumunu ve genel etkisini incelemektedir. Bu çalışma, Çin'in küresel rüzgar enerjisi pazarında baskın bir güç olarak ortaya çıkmasını sağlayan belirli politikaları ve stratejik girişimleri irdelemektedir. Bu politikaların rüzgar enerjisi kapasitesinin hızla genişlemesindeki etkinliği ve küresel enerji ortamına etkileri analiz edilmektedir [15].

Gönül ve diğerleri çalışmalarında (2021) Türkiye'deki rüzgar enerjisi durumu, teşvik mekanizmaları ve piyasa dinamikleri üzerine odaklanmış bir değerlendirme sunmaktadır. Bu çalışma, rüzgar enerjisi gelişimini desteklemek için tasarlanan mevcut teşvik mekanizmalarının etkinliğini titizlikle analiz ederek politika ortamına Türkiye'ye özgü bir öneri geliştirmektedir. Ayrıca bu politikaların Türkiye'deki rüzgar enerjisi piyasasının büyümesini ve rekabet gücünü nasıl şekillendirdiğini de incelemektedir [16].

İncelenen makaleler toplu olarak, rüzgar enerjisi gelişimi için bir katalizör olarak politikanın hayati rolünün altını çizmektedir. Uluslararası çalışmalar, küresel eğilimler, farklı ülkelerdeki politika stratejilerinin karşılaştırmalı analizleri ve politika etkinliğine ilişkin değerlendirmeler hakkında değerli içgörüler sunmaktadır. Gönül tarafından yapılan çalışma, Türkiye'ye odaklanmış bir analiz sunarak bu anlayışı zenginleştirmekte ve ülkeye özgü içgörüler geliştirmektedir [16]. Bu çalışmalar toplu olarak, iyi hazırlanmış ve etkili bir şekilde uygulanan politikaların, engellerin aşılması, yatırımların gerçekleştirilmesi, inovasyonun teşvik edilmesi ve rüzgar enerjisi sektörünün uzun vadeli sürdürülebilir büyümesinin sağlanması için vazgeçilmez olduğunu vurgulamaktadır.

İncelenen literatürün genişliği göz önüne alındığında, rüzgar enerjisi sektörünün gelişiminin, özellikle Türkiye bağlamında, teknolojik ilerlemeler, şebeke entegrasyonundaki engeller ve politika çerçevelerinin karmaşık bir etkileşimine bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi ve teknolojisi üzerine yapılan çalışmalar, enerji sektörünün büyümesi için önemli bir temel araç olan rüzgar kaynaklarından faydalanma verimliliğinin ve doğruluğunun artırılması konusunda araştırmaların ve gelişmelerin devam ettiğini vurgulamaktadır. Şebeke entegrasyonuna ilişkin araştırmalar, rüzgar enerjisinin mevcut elektrik altyapısına güvenilir ve istikrarlı bir şekilde dahil edilmesini sağlamak için diğer ülkeler gibi Türkiye'nin de aşması gereken önemli engellerin olduğunu altını çizmektedir. Diğer yandan, politikaya yapılan vurgu, destekleyici mekanizmalar oluşturarak ve potansiyel engelleri ele alarak Türkiye'de rüzgar enerjisi sektörünün sürdürülebilir gelişimini yönlendirmedeki merkezi rolünü pekiştirmektedir.

Sonuç olarak bu literatür taraması, Türkiye'nin rüzgar enerjisi sektörünün başarılı bir şekilde gelişiminin teknolojik ilerleme ve etkili politika uygulamalarından yararlanılarak belirlenen zorlukların çözümlenmesine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Doğru rüzgar kaynağı değerlendirmesine, türbin teknolojisindeki ilerlemelere ve güvenilir şebeke entegrasyon stratejilerine duyulan ihtiyaç ortadadır. Ayrıca, yatırımı teşvik etmek, inovasyonu desteklemek ve sürdürülebilir bir piyasa ortamını teşvik etmek için iyi tasarlanmış politikalar gereklidir.

3. POLİTİKA ÖNERİLERİ

Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyelini tam olarak kullanabilmesi, enerji arz güvenliğini artırması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşması için kapsamlı ve iyi koordine edilmiş politikalara ihtiyaç duyulmaktadır. Gerçekleştirilen literatür taraması, sektörün gelişimini etkileyen teknolojik, şebeke entegrasyonu ve politika ile ilgili temel faktörleri ortaya koymaktadır. Bu bulgular ışığında ve Türkiye'nin özgün koşulları göz önünde bulundurularak aşağıdaki politika önerileri geliştirilmeye çalışılmıştır.

3.1. Rüzgar Kaynak Değerlendirmesi ve Stratejik Planlamanın Güçlendirilmesi

Literatür, doğru rüzgar kaynağı değerlendirmesinin başarılı proje geliştirme için kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır. Türkiye özelinde yapılan çalışmalar (örneğin, Düzcan & Kara, 2021; Adem Çakmakçı & Hüner,

- **Öneri 2.2: Yerli Üretim Teşviklerinin Gözden Geçirilmesi:** Mevcut yerli aksam kullanımını destekleyen mekanizmalar (YEKDEM kapsamındaki yerli katkı ilavesi gibi) etkinlikleri açısından değerlendirilmeli ve teknolojik gelişmelere paralel olarak güncellenmelidir. Sadece montaj değil, yüksek katma değerli bileşenlerin (kanat, jeneratör, dişli kutusu, güç elektroniği vb.) yerli üretimi stratejik olarak desteklenmelidir. Bu, ithalat bağımlılığını azaltacak ve yerel istihdamı artıracaktır.
- **Öneri 2.3: Denizüstü (Offshore) Rüzgar Enerjisi Stratejisinin Geliştirilmesi:** Türkiye'nin önemli denizüstü rüzgar potansiyeli göz önüne alınarak, bu alana yönelik özel bir yol haritası ve strateji belgesi hazırlanmalıdır. Bu strateji, potansiyel alanların belirlenmesi, teknoloji seçimi, şebeke bağlantısı, liman altyapısı, tedarik zinciri geliştirme ve özel teşvik mekanizmalarını kapsamalıdır (Çelik et al., 2022 çalışmasındaki şebeke kodu gereklilikleri gibi özel konular dahil edilerek). Türkiye'nin denizüstü rüzgar enerjisi potansiyeli değerlendirilirken, Marmara, Ege ve Karadeniz gibi farklı deniz alanlarının özgün coğrafi ve batimetrik özellikleri dikkate alınmalıdır. Bu bölgelerde su derinliği, kıyı morfolojisi, rüzgar rejimi, deniz tabanı yapısı ve liman altyapısının uygunluğu gibi faktörler, teknolojik çözüm seçimlerinde belirleyici olmaktadır. Örneğin, Marmara Denizi'nin nispeten sığ bölgelerinde sabit temelli türbinler uygun olurken, Karadeniz'deki derin sular için yüzer türbin teknolojileri daha avantajlıdır. Ayrıca, kablo döşeme zorlukları, korozyon etkileri ve deniz ekosistemine duyarlılık gibi teknik engellerin azaltılması için malzeme dayanımı yüksek sistemler, gelişmiş izleme teknolojileri ve modüler montaj çözümleri geliştirilmelidir. Bu kapsamda, coğrafi yapının getirdiği teknik zorlukları aşmaya yönelik mühendislik çözümlerinin teşvik edilmesi, Türkiye'nin offshore rüzgar yatırımlarında rekabet gücünü artıracaktır.

3.3. Şebeke Altyapısının Modernizasyonu ve Entegrasyon Zorluklarının Aşılması

Rüzgar enerjisinin değişken doğası, mevcut elektrik şebekeleri için önemli zorluklar yaratmaktadır. Üretim belirsizliği, güç kalitesi sorunları, gerilim ve frekans kararlılığı gibi teknik sorunların yanı sıra yetersiz iletim altyapısı da önemli bir engel teşkil etmektedir [6], [8].

- **Öneri 3.1: İletim ve Dağıtım Altyapısının Güçlendirilmesi ve Genişletilmesi:** Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından yürütülen şebeke yatırım planları, rüzgar enerjisi potansiyelinin yoğun olduğu bölgelere ve planlanan yeni RES'lere öncelik verecek şekilde hızlandırılmalı ve genişletilmelidir. Özellikle denizüstü santrallerin bağlantısı için gerekli yüksek gerilim doğru akım (High Voltage Direct Current-HVDC) teknolojileri gibi modern altyapı yatırımları planlanmalıdır.
- **Öneri 3.2: Akıllı Şebeke (Smart Grid) Uygulamalarının Yaygınlaştırılması:** Rüzgar enerjisinin şebekeye daha etkin entegrasyonu için akıllı şebeke teknolojileri kritik öneme sahiptir. Gelişmiş ölçüm altyapısı (Advanced Metering Infrastructure-AMI), talep tarafı yönetimi programları, enerji depolama sistemleri ve gelişmiş kontrol algoritmaları yaygınlaştırılmalıdır. Bu teknolojiler, şebeke esnekliğini artırarak rüzgarın değişkenliğini dengelemeye yardımcı olacaktır [7].
- **Öneri 3.3: Şebeke Yönetmeliği (Grid Code) Güncellemeleri:** Özellikle büyük ölçekli ve denizüstü RES'lerin sisteme entegrasyonu için şebeke yönetmeliği gereklilikleri (gerilim/frekans regülasyonu, arıza giderme kapasitesi, güç kalitesi vb.) uluslararası standartlar ve Türkiye'nin sistem ihtiyaçları doğrultusunda düzenli olarak gözden geçirilmeli ve güncellenmelidir. Bu, şebeke güvenilirliğini ve kararlılığını sağlayacaktır [9].
- **Öneri 3.4: Enerji Depolama Sistemlerinin Teşvik Edilmesi:** Rüzgar enerjisinin kesintiliğini yönetmek ve şebeke esnekliğini artırmak için batarya enerji depolama sistemleri (Battery Energy Storage Systems-BESS) gibi çözümlerin RES projeleriyle birlikte veya bağımsız olarak kurulması teşvik edilmelidir. Depolama sistemleri için özel tarife mekanizmaları veya kapasite piyasaları oluşturulabilir.

3.4. Piyasa Mekanizmaları, Teşvikler ve İzin Süreçlerinin İyileştirilmesi

Etkin ve öngörülebilir politika ve piyasa mekanizmaları, özel sektörün rüzgar enerjisi yatırımlarına ilgisini çekmek için hayati öneme sahiptir. Türkiye'deki mevcut teşvik mekanizmalarının (YEKDEM gibi) ve piyasa dinamiklerinin etkinliği sürekli değerlendirilmelidir [16]. Bürokratik engeller ve uzun izin süreçleri de yatırımcılar için caydırıcı olabilmektedir.

- **Öneri 4.1: Destek Mekanizmalarının Gözden Geçirilmesi ve Öngörülebilirliğin Artırılması:** Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) veya alternatif olarak geliştirilecek ihale (YEKA) modelleri, maliyet düşüşlerini yansıtacak, piyasa koşullarına uyum sağlayacak ve yatırımcılar için uzun vadeli öngörülebilirlik sunacak şekilde tasarlanmalıdır. Farklı teknolojiler (karasal, denizüstü) ve proje ölçekleri için farklılaştırılmış destekler düşünülebilir. Politika istikrarı sağlanarak yatırımcı güveni artırılmalıdır [12], [16].
- **Öneri 4.2: İzin Süreçlerinin Basitleştirilmesi ve Hızlandırılması:** RES projeleri için gerekli olan ÇED, imar, lisanslama ve diğer izin süreçleri, ilgili kurumlar (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB), Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Başkanlığı (EPDK) vb.) arasında daha iyi koordinasyon sağlanarak basitleştirilmeli ve hızlandırılmalıdır. Tek pencere (one-stop-shop) sistemi veya dijital platformlar üzerinden başvuru ve takip süreçleri iyileştirilebilir.
- **Öneri 4.3: Şeffaf ve Rekabetçi İhale Süreçleri:** Özellikle büyük ölçekli projeler için düzenlenen Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) ihaleleri, şeffaf, rekabetçi ve düzenli aralıklarla yapılmalıdır. İhale şartnameleri, teknolojik gelişmeleri ve yerli katkı hedeflerini destekleyecek şekilde hazırlanmalıdır.

3.5. Sosyal Kabul ve Çevresel Sürdürülebilirliğin Sağlanması

Rüzgar enerjisi projelerinin başarılı bir şekilde hayata geçirilmesi, sadece teknik ve ekonomik faktörlere değil, aynı zamanda sosyal kabule ve çevresel sürdürülebilirliğe de bağlıdır. Proje geliştirme süreçlerinde yerel halkın katılımı ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi esastır.

- **Öneri 5.1: Yerel Halkın Katılımı ve Fayda Paylaşımı Mekanizmaları:** Proje geliştirme süreçlerinin en başından itibaren yerel halk ve paydaşlarla şeffaf bir iletişim kurulmalı, endişeler dinlenmeli ve bilgilendirme yapılmalıdır. Projelerin yerel ekonomiye katkısını artıracak (istihdam, yerel tedarik vb.) ve yerel halkın projeden doğrudan fayda sağlayabileceği (örneğin, kooperatif modelleri, yerel kalkınma fonları) mekanizmalar geliştirilmelidir.
- **Öneri 5.2: Çevresel Etkilerin Azaltılması ve Biyoçeşitliliğin Korunması:** RES projelerinin çevresel etkileri (gürültü, görsel etki, kuş ve yarası ölümleri vb.) titizlikle değerlendirilmeli ve bu etkileri en aza indirecek önlemler alınmalıdır. Özellikle hassas ekosistemlerde ve kuş göç yolları üzerinde proje geliştirilmesinden kaçınılmalı veya ileri teknoloji çözümlerle (örneğin, radar tabanlı türbin durdurma sistemleri) riskler yönetilmelidir. Proje sahalarında biyoçeşitliliğin korunması ve geliştirilmesine yönelik ekolojik restorasyon çalışmaları teşvik edilmelidir.
- **Öneri 5.3: Ömür Döngüsü Yönetimi ve Geri Dönüşüm:** Rüzgar türbinlerinin hizmet ömrü sonunda sökülmesi ve bileşenlerinin (özellikle kanatlar gibi kompozit malzemelerin) geri dönüştürülmesine yönelik yasal düzenlemeler ve teşvik mekanizmaları geliştirilmelidir. Sürdürülebilir bir rüzgar enerjisi sektörü için ömür döngüsü yaklaşımı benimsenmelidir.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma, Türkiye’de rüzgar enerjisi sektörünün gelişiminde teknolojik ilerlemeler, şebeke entegrasyonu zorlukları ve politika çerçevelerinin kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Literatürde incelenen bulgular, doğru rüzgar kaynağı değerlendirmesi, gelişmiş türbin teknolojileri ve güvenilir şebeke entegrasyon stratejilerinin sektörün sürdürülebilir büyümesi için birlikte dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Özellikle Türkiye bağlamında, yerli üretim kapasitesinin artırılması ve yenilikçi çözümlerin desteklenmesi, enerji arz güvenliği açısından stratejik önem taşımaktadır. Bununla birlikte, rüzgar enerjisinin değişken doğası nedeniyle ortaya çıkan teknik engellerin, akıllı şebeke uygulamaları, enerji depolama çözümleri ve güncellenmiş şebeke yönetmelikleriyle aşılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Politika boyutu ise sektörün gelişiminde belirleyici bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Yatırımların teşvik edilmesi, izin süreçlerinin kolaylaştırılması, piyasa mekanizmalarının öngörülebilirliğinin artırılması ve sosyal kabulün güçlendirilmesi, Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyelini en verimli şekilde değerlendirmesi için temel şartlardır. Bu bağlamda, uluslararası deneyimlerden elde edilen iyi uygulamaların Türkiye’nin özgün koşullarıyla uyumlu bir

şekilde adapte edilmesi önemlidir. Sonuç olarak, Türkiye'nin rüzgar enerjisi sektörünün ilerlemesi, teknolojik gelişmelerin benimsenmesi, güçlü bir politika desteği ve paydaşlar arası koordinasyonla daha da hızlanacak; böylece hem enerji arz güvenliği hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerine önemli katkılar sağlanacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] M. Ritter, Z. Shen, B. López Cabrera, M. Odening, and L. Deckert, "Designing an index for assessing wind energy potential," *Renew Energy*, vol. 83, pp. 416–424, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.04.038.
- [2] S. Roga, S. Bardhan, Y. Kumar, and S. K. Dubey, "Recent technology and challenges of wind energy generation: A review," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102239.
- [3] A. Düzcan and Y. A. Kara, "Assessment of wind energy potential: a case study," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 2021, doi: 10.1080/15567036.2021.1903119.
- [4] B. Adem Çakmakçı and E. Hüner, "Evaluation of wind energy potential: a case study," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 44, no. 1, pp. 834–852, 2022, doi: 10.1080/15567036.2020.1811810.
- [5] K. Moustakas, M. Loizidou, M. Rehan, and A. S. Nizami, "A review of recent developments in renewable and sustainable energy systems: Key challenges and future perspective," Mar. 01, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2019.109418.
- [6] S. D. Ahmed, F. S. M. Al-Ismail, M. Shafiullah, F. A. Al-Sulaiman, and I. M. El-Amin, "Grid Integration Challenges of Wind Energy: A Review," 2020, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964896.
- [7] T. Kataray *et al.*, "Integration of smart grid with renewable energy sources: Opportunities and challenges – A comprehensive review," Aug. 01, 2023, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.seta.2023.103363.
- [8] J. R. F. Diógenes, J. Claro, J. C. Rodrigues, and M. V. Loureiro, "Barriers to onshore wind energy implementation: A systematic review," Feb. 01, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.erss.2019.101337.
- [9] Ö. Çelik *et al.*, "Grid code requirements – A case study on the assessment for integration of offshore wind power plants in Turkey," Aug. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.seta.2022.102137.
- [10] B. Sliz-Szkliniarz, J. Eberbach, B. Hoffmann, and M. Fortin, "Assessing the cost of onshore wind development scenarios: Modelling of spatial and temporal distribution of wind power for the case of Poland," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 109, pp. 514–531, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.04.039.
- [11] Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, "Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu," 2025. Accessed: Jun. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.tureb.com.tr/haber/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-ocak-2025/320>
- [12] P. Sadorsky, "Wind energy for sustainable development: Driving factors and future outlook," *J Clean Prod*, vol. 289, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125779.

- [13] L. Chang, H. B. Saydaliev, M. S. Meo, and M. Mohsin, “How renewable energy matter for environmental sustainability: Evidence from top-10 wind energy consumer countries of European Union,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 31, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.segan.2022.100716.
- [14] Idoko Peter Idoko, Onuh Matthew Ijiga, Kimberly D. Harry, Chijioke Charles Ezebuka, Ifeanyi Emmanuel Ukatu, and Abutu Ehi Peace, “Renewable energy policies: A comparative analysis of Nigeria and the USA,” *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 21, no. 1, pp. 888–913, Jan. 2024, doi: 10.30574/wjarr.2024.21.1.0071.
- [15] S. Zhang, J. Wei, X. Chen, and Y. Zhao, “China in global wind power development: Role, status and impact,” Jul. 01, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2020.109881.
- [16] Ö. Gönül, A. C. Duman, K. Deveci, and Ö. Güler, “An assessment of wind energy status, incentive mechanisms and market in Turkey,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, no. 6, pp. 1383–1395, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jestch.2021.03.016.
- [17] T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, “Türkiye Rüzgar Atlası.” Accessed: Jun. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.mgm.gov.tr/genel/ruzgar-atlasi.aspx>

ENERJİ VERİMLİLİĞİ İLE EMİSYON AZALTIMI: SANAYİ VE İKLİMLENDİRME SEKTÖRLERİNDE UYGULAMALAR

Sema GÜNEŞ¹, Furkan HAMZAOĞLU²

1: Termo Isı Sistemleri Ticaret ve Sanayi A.Ş. Tasarım Merkezi, Türkiye
sema.gunes@ecostar.com.tr
e-mail: info@ecostar.com.tr, web: <http://www.ecostar.com.tr>

2: Termo Isı Sistemleri Ticaret ve Sanayi A.Ş. Tasarım Merkezi, Türkiye
furkan.hamzaoglu@ecostar.com.tr
e-mail: info@ecostar.com.tr, web: <http://www.ecostar.com.tr>

Anahtar Kelimeler: Enerji Verimliliği, Karbon Salımı, Sürdürülebilir Enerji, İklim Değişikliği, CO ve NO_x emisyonları

ÖZET

İklim krizi, küresel düzeyde çevresel, ekonomik ve sosyal tehditleri beraberinde getirirken; bu krizle mücadelede en etkili stratejilerden biri enerji verimliliğinin artırılmasıdır. Enerji verimliliği, mevcut enerji kaynaklarını daha az tüketerek aynı hizmeti sunmak anlamına gelir ve karbon salımını azaltmada doğrudan rol oynar. Bu bildiri, sanayi, binalar ve iklimlendirme sektörlerinde uygulanabilir enerji verimliliği politikalarının iklim üzerindeki olumlu etkilerini ele almaktadır. Sanayiden kaynaklanan emisyonlar, toplam sera gazı salınımının yaklaşık %30–40'ını NO_x ve %25–30'unu CO emisyonları olarak oluşturmaktadır.

Endüstriyel ve ticari yakma sistemlerinin iklim değişikliğine olan etkileri incelenmiştir. Mevcut enerji verimliliği potansiyellerini, yüksek verimli ve düşük NO_x emisyonlu brülör teknolojileri ile bu potansiyelleri ortaya çıkaracak yenilikçi uygulamalar ışığında değerlendirdik.

Enerji verimliliği yalnızca çevresel kazanımlar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik kalkınmaya da ivme kazandırır. Bu çerçevede, enerji verimliliğinin artırılması; yenilenebilir enerji yatırımları, bilinçlendirme kampanyaları ve mevzuat düzenlemeleriyle desteklendiğinde, iklim krizine karşı güçlü ve sürdürülebilir bir çözüm sunar. Verilen uygulama örnekleriyle, enerji tüketiminin nasıl optimize edildiği ve çevresel etkilerin nasıl azaltıldığı verilerle sunulacaktır. Bildiri, sürdürülebilir bir gelecek için teknoloji odaklı çözümlerin önemini vurgularken, özel sektörün bu dönüşümdeki rolünü de ortaya koymaktadır.

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte etkilerini giderek artıran iklim krizi, enerji üretimi ve tüketimi üzerine kurulu mevcut sistemlerin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Sera gazı emisyonlarının büyük bir bölümü enerji sektöründen kaynaklanmakta olup, bu durum enerji verimliliğini iklim değişikliğiyle mücadelede öncelikli çözüm alanlarından biri haline getirmektedir. Artan sera gazı emisyonları, özellikle karbon dioksit (CO₂) ve azot oksitler (NO_x), atmosferde birikerek küresel sıcaklık artışını hızlandırmakta ve ekosistemler üzerinde geri dönüşü zor etkiler yaratmaktadır.

Enerji üretiminden tüketime kadar tüm süreçlerde enerji verimliliğinin artırılması hem çevresel hem de ekonomik açıdan en etkili çözüm stratejilerinden biridir. Enerji verimliliği, mevcut enerji kaynaklarının kayıpsız ve yüksek performansla kullanılmasını ifade eder. Sanayi ve iklimlendirme sektörleri, toplam enerji tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturduğundan, bu alanlarda uygulanacak verimlilik odaklı teknolojiler iklim krizinin azaltılmasında kritik rol oynar. Nitekim sanayi kaynaklı emisyonlar, toplam sera gazı salımının yaklaşık %30–40'ını NO_x ve %25–30'unu CO emisyonları olarak oluşturmaktadır.

Bu çalışma, özellikle endüstriyel ve ticari yakma sistemlerinde kullanılan yüksek verimli ve düşük NO_x emisyonlu teknolojilerin enerji verimliliği ve emisyon azaltımındaki etkilerini ele almaktadır. Modern yakma sistemlerinde yanma optimizasyonu, hava-yakıt oranı kontrolü, modülasyon kabiliyeti ve yoğunlaşma teknolojisi gibi teknik gelişmeler hem yakıt tüketimini düşürmekte hem de atmosfere salınan zararlı gaz miktarını azaltmaktadır. Saha verileri, ticari yakma sistemlerinde yapılan modernizasyon yatırımlarının enerji faturalarında %10–35 arasında tasarruf sağladığını ve emisyon seviyelerinde belirgin düşüşler elde ettiğini göstermektedir.

Ayrıca, enerji verimliliği odaklı çözümlerin etkinliği yalnızca teknik iyileştirmelerle sınırlı değildir. Yenilenebilir enerji entegrasyonu, mevzuat düzenlemeleri, ekonomik teşvik mekanizmaları ve farkındalık çalışmaları ile desteklendiğinde, enerji verimliliği hem çevresel hem ekonomik açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunar. Bu bağlamda çalışma, ticari yakma sistemlerinde enerji tüketiminin nasıl optimize edildiğini ve çevresel etkilerin nasıl azaltıldığını hem teknolojik hem de politika odaklı bir perspektifle ortaya koymaktadır.

2. METARYEL VE YÖNTEM

Bu derleme çalışmasında, 2015–2025 yılları arasında yayımlanan literatürler Scopus, Web of Science ve ScienceDirect veri tabanları kullanılarak taranmıştır. Arama anahtar kelimeleri olarak “ticari brülör”, “yoğuşmalı kazan”, “enerji verimliliği”, “NOx emisyon azaltımı” ve “endüstriyel ısıtma sistemleri” kullanılmıştır. Çalışmaya dahil etme kriterleri, hakemli makaleler, teknik raporlar ve ticari/ endüstriyel uygulama örneklerini içermektedir. Toplam 120’den fazla kaynak taranmış ve 35 çalışma bu derlemeye dahil edilmiştir.

Değerlendirilen üç tip ticari ısıtma sistemi şunlardır:

TB: Geleneksel Ticari Brülör (Conventional Commercial Burner)

YYK: Yüksek Verimli Yoğuşmalı Kazan (High-Efficiency Condensing Boiler)

DNB: Düşük NOx Brülör (Low-NOx Burner)

2.1. Yakıt Akışı ve Enerji Tüketimi Analizi

Doğal gaz yakıtlı ticari ısıtma sistemleri için yakıt akış oranları, üretici verileri ve saha ölçümleri kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 1’de, geleneksel sisteme göre tahmini yakıt tasarruf oranları gösterilmektedir.

Tablo 1 Ticari Isıtma Sistemlerinin Yakıt Akış Oranları

Sistem Türü	Yakıt Tasarrufu (%)	Yakıt Akışı (Nm ³ /h)
TB	0	120,5
YYK	20	96,4
DNB	35	78,33

2.2. Emisyon Hesaplamaları

CO₂ ve NO_x emisyonları, yakıt tüketimi ve standart emisyon faktörleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Tablo 2, her sistem için CO₂ ve NO emisyonlarının kütle hesaplarını sunmaktadır.

Tablo 2 Ticari Isıtma sistemlerinden CO₂ ve NO Emisyon Kütleleri

Sistem Türü	Toplam CO ₂ Emisyonu (Nm ³ /h)	Toplam CO ₂ Emisyonu (kg/h)	Toplam NO Emisyonu (Nm ³ /h)	Toplam NO Emisyonu (kg/h)
TB	145,2	288,5	0,085	0,098
YYK	116,16	230,72	0,065	0,075
DNB	94,33	187,47	0,045	0,052

2.3. Uzun Dönem Emisyon Değerlendirmesi

Sistemlerin 10 yıllık kullanım ömrü boyunca toplam emisyonları, nominal kapasitede sürekli çalıştığı varsayılarak hesaplanmıştır. Tablo 3, 10 yıl üzerinden CO₂ ve NO emisyonlarının karşılaştırmasını sunmaktadır.

Tablo 3 Ticari Isıtma Sistemlerinin 10 Yıllık CO₂ ve NO Emisyon Karşılaştırması

Sistem	CO Emisyonu (ton/10 yıl)	CO ₂ Emisyonu (ton/10 yıl)
TB	11,72	26.025,60
YYK	8,97	20.857,60
DNB	6,24	16.309,20

2.4. Analiz Yaklaşımı

Yukarıdaki verilere dayanarak, Düşük NO_x Brülör (DNB) sistemlerinin en yüksek verimliliği sağladığı, geleneksel ticari brülörlere göre %35'e kadar yakıt tasarrufu ve CO₂ ile NO_x emisyonlarında belirgin azalma sağladığı belirlenmiştir. Yüksek Verimli Yoğuşmalı Kazanlar (YYK) ise %20 oranında tasarruf sağlayarak emisyonları önemli ölçüde düşürmektedir. Bu yöntem, ticari ısıtma sistemlerinin çevresel ve operasyonel faydalarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini ve enerji verimliliği teknolojilerinin etkinliğinin ölçülmesini sağlamaktadır.

3. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, endüstriyel ve ticari yakma sistemlerinin enerji verimliliği ve emisyon azaltımı potansiyeli incelenmiştir. Sanayi ve iklimlendirme sektörleri, küresel enerji tüketimi ve sera gazı salımının önemli kaynakları arasında yer almakta; özellikle NO_x ve CO emisyonları hem iklim değişikliği hem de hava kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır.

Yüksek verimli ve düşük NO_x emisyonlu yakma teknolojileri, yanma optimizasyonu, hava-yakıt oranı kontrolü, modülasyon kabiliyeti ve yoğuşma teknolojisi gibi uygulamalarla enerji kayıplarını azaltmakta ve zararlı gaz salımını minimuma indirmektedir. Saha verileri, ticari yakma sistemlerinde yapılan modernizasyon yatırımlarının enerji faturalarında %10–20 tasarruf sağladığını ve emisyon seviyelerinde belirgin düşüşler elde edildiğini göstermektedir.

Enerji verimliliğinin sağladığı çevresel ve ekonomik faydalar, yalnızca teknik iyileştirmelerle sınırlı kalmayıp, yenilenebilir enerji entegrasyonu, mevzuat düzenlemeleri, teşvik mekanizmaları ve farkındalık çalışmaları ile desteklendiğinde sürdürülebilir çözümlere dönüşmektedir. Elde edilen bulgular, teknoloji odaklı yaklaşımların ve özel sektörün Ar-Ge ve inovasyon faaliyetlerinin, iklim kriziyle mücadelede kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

1. A. Bilgin, “Kazanlarda Enerji Verimliliği ve Emisyonlar,” *Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, cilt 17, no. 8, 2007.
2. Ecostar, “Ecodense Yer Tipi Yoğuşmalı Kazanlar,” Ecostar, 2025. [Online]. Erişim: <https://www.ecostar.com.tr/ecoblog/yer-tipi-yogusmali-kazanlar-nelerdir>.
3. BC Endüstriyel, “Yoğuşmalı Kazan Hizmetleri,” BC Endüstriyel, 2025. [Online]. Erişim: <https://www.bcendustriyel.com.tr/yogusmali-kazan-hizmetleri-p-14>.
4. Raadman Burner, “Yoğuşmalı Kazanlar Üzerine Kapsamlı Bir İnceleme,” Raadman Burner, 2025. [Online]. Erişim: <https://raadmanburner.com/tr/blog/condensing-boiler/>.
5. BC Endüstriyel, “Oilon LN30 ile Düşük Emisyonlarda Büyük Başarı,” BC Endüstriyel, 2025. [Online]. Erişim: <https://www.bcendustriyel.com.tr/blog/oilon-ln30-ile-dusuk-emisyonlarda-buyuk-basari-b-5>.
6. Aktaş, “Aktedens Yer Tipi Yoğuşmalı Kazan,” Aktaş, 2025. [Online]. Erişim: <https://www.aktes.com/yogusmali-kazanlar/aktedens/>.
7. J. Wang, L. Xia, C. Bales, X. Zhang, B. Copertaro, S. Pan, and J. Wu, “A systematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources,” *arXiv preprint arXiv:2102.09797*, 2021. [Online]. Erişim: <https://arxiv.org/abs/2102.09797>.
8. G. H. Merabet, M. Essaïdi, M. Ben Haddou, B. Qolomany, J. Qadir, M. Anan, A. Al-Fuqaha, M. R. Abid, and D. Benhaddou, “Intelligent building control systems for thermal comfort and energy-efficiency: A systematic review of artificial intelligence-assisted techniques,” *arXiv preprint arXiv:2104.02214*, 2021. [Online]. Erişim: <https://arxiv.org/abs/2104.02214>.
9. B. Zhao, G. Pei, and A. P. Raman, “Modeling and optimization of radiative cooling based thermoelectric generators,” *arXiv preprint arXiv:2008.12107*, 2020. [Online]. Erişim: <https://arxiv.org/abs/2008.12107>.
10. R. Bjørk and K. K. Nielsen, “The performance of a combined solar photovoltaic (PV) and thermoelectric generator (TEG) system,” *arXiv preprint arXiv:1508.01344*, 2015. [Online]. Erişim: <https://arxiv.org/abs/1508.01344>.

SANAYİDE BİR İKLİMLENDİRME SİSTEMİNİN ZAMANA BAĞLI ENERJİ OPTİMİZASYONU

Ömer UDUN¹, Gamze GEDİZ İLİŞ^{2,*}

^{1,2} Gebze Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

¹e-posta: o.udun2020@gtu.edu.tr ²e-posta: ggediz@gtu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, otomotiv fabrikalarında kullanılan parça soğutma sistemi MATLAB/Simulink aracılığıyla simüle edilmiştir. Simülasyon sayesinde sistemin farklı durumlardaki enerji tüketimi ve maliyetleri öngörülmüş, böylece kurulum öncesinde en uygun senaryoların belirlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca elde edilen verilere regresyon uygulanarak, maliyet ve enerji tüketimini en çok etkileyen girdiler görülebilmektedir. Sonuçlar, soğutma sisteminin optimize edilmesiyle hem enerji verimliliğinin hem de ekonomik performansın artırılabilirliğini göstermiştir.

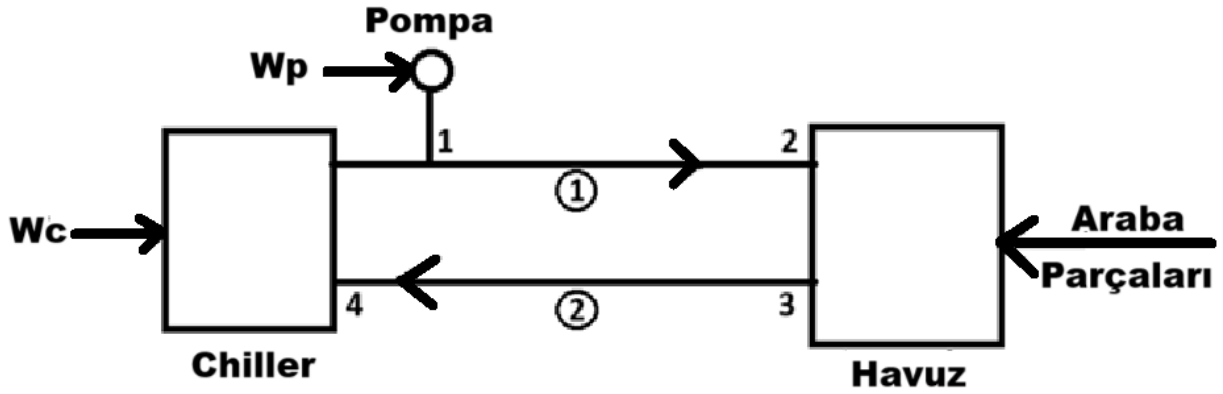
Anahtar Kelimeler- Endüstriyel soğutma sistemleri, Simülasyon, MATLAB/Simulink, Regresyon analizi, Enerji verimliliği, Maliyet optimizasyonu.

1. AMAÇ

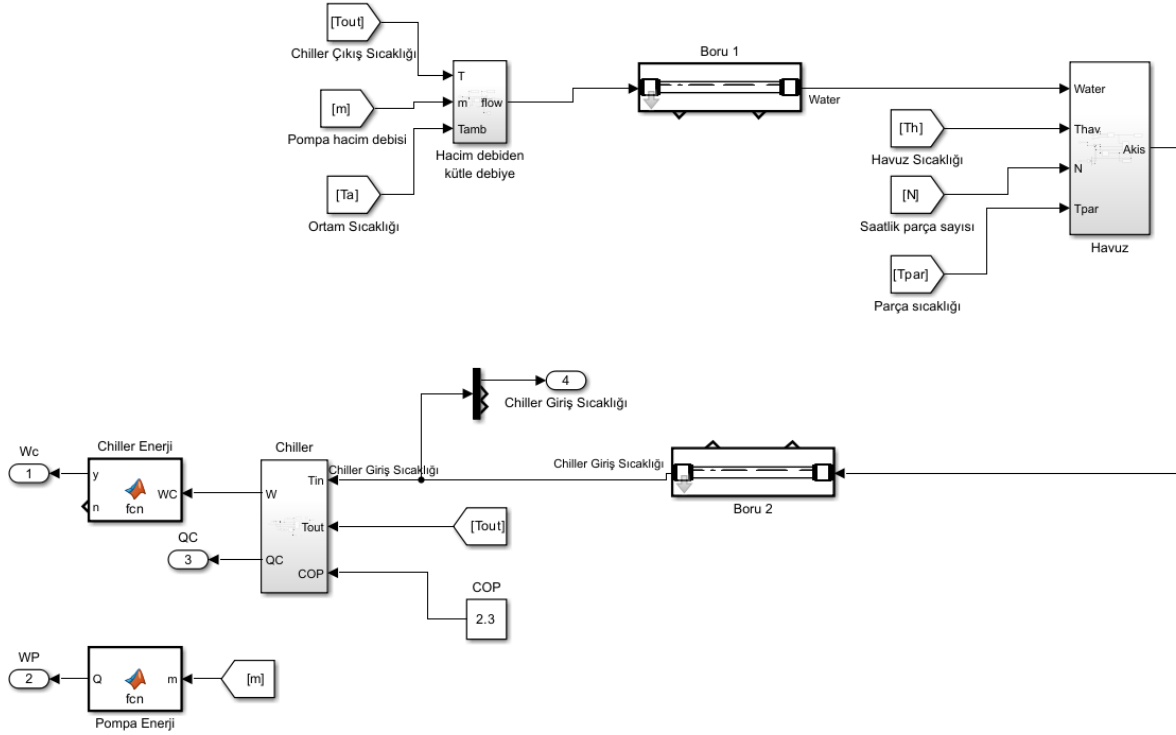
Sanayide enerji verimliliği, çevresel etkilerin azaltılması ve ekonomik kayıpların önlenmesi açısından büyük bir öneme sahiptir. Enerji harcayan işlemlerin optimize edilmesi enerji tüketimini azaltarak üretim maliyetlerini düşürür ve sera gazı emisyonlarının kontrol altına alınmasına katkı sağlar. Özellikle HVAC sistemleri, endüstriyel tesislerde toplam enerji tüketiminin %15 ila %60'ından sorumludur [1]. Bu sistemlerin verimsiz çalışması, gereksiz enerji kayıplarına ve yüksek işletme maliyetlerine yol açmaktadır. Dolayısıyla HVAC sistemlerinin ve bu sistemlere hizmet eden pompaların optimize edilmesi, sanayide enerji verimliliğini artırmada önemli rolü vardır.

Bu çalışmada, bir otomotiv fabrikasında parçaların soğutma sistemi ele alınmıştır. Sistem; parçaların daldırıldığı soğutma havuzu ve havuzun sabit sıcaklıkta tutulmasını sağlayan çiller ünitesinden oluşmaktadır. Simulink ortamında geliştirilen model ile sistem, zamana bağlı olarak borulama uzunluğu, dış ortam sıcaklığı, pompa debisi gibi değişkenlere göre bir boyutlu olarak simüle edilmiştir. Amaç, değişen koşullar altında soğutma ihtiyacının en düşük enerji maliyetiyle karşılanmasını sağlamak ve farklı çalışma senaryolarına göre sistemin enerji tüketim profilini ortaya koymaktır. Ayrıca, elde edilen simülasyon verileri kullanılarak regresyon tabanlı bir tahmin modeli geliştirilmiş, böylece gelecekte yapılacak analizlerde öngörü süresinin kısaltılması ve girdilerin maliyete etkisinin büyüklüklerinin görülmesi amaçlanmıştır.

2. SİSTEM TASARIMI



Şekil 1 Sistem Şeması



Şekil 2 Simulink Sistem Şeması

Simulink aracılığıyla Şekil 1’de gösterilen sistem modellenmiştir, Simulink sistemi Şekil 2’de gösterilmiştir. Çillerden çıkan su, pompa yardımıyla belirli bir debiye ulaşmakta ve boru hattı üzerinden soğutma havuzuna gitmektedir. Havuzda sürekli olarak sıcak otomotiv parçaları suya daldırılmakta ve çillerden gelen soğutma suyu sayesinde havuz sıcaklığı sabit tutulmaktadır. Isınan su, havuzdan çıkarak başka bir boru hattı aracılığıyla yeniden çillere gitmektedir.

Ayrıca, borudan geçişin akışa etkisi de modellenmiştir; geçiş süresi, ortam sıcaklığı ve boruya giriş sıcaklığına bağlı olarak boru çıkışındaki suyun sıcaklık ve debi değerleri hesaplanmaktadır.

2.1 Sistem Girdileri

Sisteme girilecek değişkenler çiller çıkış sıcaklığı ($T_1 [C^\circ]$), pompa hacimsel debisi ($\dot{V}_1 [\frac{m^3}{saat}]$), havuz sıcaklığı ($T_{havuz} [C^\circ]$), saatlik havuza giren parça sayısıdır ($N_{parça} [\frac{Adet}{saat}]$).

Sistemin kabul ettiği sabitler ise boru uzunlukları ($L_1 [m], L_2 [m]$), boru çapları ($D_1 [mm], D_2 [mm]$), ortam sıcaklığı ($T_{ortam} [C^\circ]$), pompa basma yüksekliği ($H [m]$) ve sanayi saatlik elektrik maliyetidir ($x [\frac{\text{₺}}{kW*saat}]$).

Bu girdiler ile sistem saatlik elektrik maliyeti ($Maliyet [\frac{\text{₺}}{saat}]$), çiller giriş sıcaklığı ($T_4 [C^\circ]$), çillerin saatlik elektrik harcaması ($\dot{W}_{çiller} [kW]$), pompanın saatlik elektrik harcaması ($\dot{W}_{pompa} [kW]$), ve çiller soğutma yükünü ($\dot{Q} [kW]$) hesaplanır.

Kullanılan Formüller

Simulink sistemi hazırlanırken verilen formüller kullanılmıştır.

$$Maliyet = \dot{W}_{toplam} * x \quad (1)$$

$$\dot{W}_{toplam} = \dot{W}_{çiller} + \dot{W}_{pompa} \quad (2)$$

$$\dot{W}_{çiller} = \frac{\dot{Q}_{soğutma}}{COP} \quad (3)$$

$$\dot{W}_{pompa} = \dot{m}gh = \frac{\dot{V}\rho gH}{3.6 * 10^6 \frac{saat}{saniye} \frac{W}{kW}} \quad (4)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T \quad (5)$$

$$\dot{m} = \rho\dot{V} \quad (6)$$

(5) ve (6) denklemleri Ref.[2]'den, (3) denklemi ise Ref.[3]'den alınmıştır.

Yoğunluk ($\rho [\frac{kg}{m^3}]$) ve öz ısı ($c_p [\frac{J}{kg^\circ C}]$) değerleri suyun verilen sıcaklıktaki değerlerinden alınmıştır.

Kabuller

Havuza giren her parçanın araba kapısı olduğu ve her birinin hacminin $0.042 m^3$ olduğu kabul edilmiştir.

Pompa basma yüksekliği: $H = 90 m$

Çiller Soğutma performansı $COP = 2.3$

Sanayi saatlik elektrik maliyeti: $x = 4.99398131 \frac{\text{₺}}{kW*saat}$

Boru boyutları: $L_1 = L_2 = 16 m, D_1 = D_2 = 10 mm$

Borular açıkta ve izolasyonsuz kabul edilmiştir.

2.1.1 Sistem Verileri

Formüller ve girdiler ile Simulink sistemi kurulmuş ve sonuçlar alınmıştır. Pompa debisi için 10, 15, 40 ve 60 $\frac{m^3}{saat}$ değerleri; çiller çıkış sıcaklığı için 5, 10, 15 ve 20 °C değerleri; saatlik havuza daldırılan parça sayısı için 50, 80, 110 ve 140 değerleri kullanılmıştır. Havuz suyu sıcaklığı 33 °C ve parça giriş sıcaklığı 80 °C kabul edilip sabit alınmıştır.

Verilen girdilerin her bir kombinasyonu Simulink sistemine girilip sonuçlar alınmıştır ve bu sonuçlar girdileriyle birlikte Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 Sistem Girdileri ve Sonuçları

$\dot{V}_1 [\frac{m^3}{saat}]$	$T_1 [^{\circ}C]$	$N_{Par\text{a}} [\frac{Adet}{saat}]$	Maliyet $[\frac{\text{₺}}{saat}]$	$T_4 [^{\circ}C]$	$\dot{W}_{\text{iller}} [kW]$	$\dot{W}_{Pompa} [kW]$	$\dot{Q} [kW]$
10	5	50	240.3	14.5	45.7	2.5	105.0
10	5	80	378.9	20.1	73.4	2.5	168.8
10	5	110	516.4	25.8	101.0	2.5	232.2
10	5	140	652.7	31.5	128.2	2.5	294.9
10	10	50	242.1	19.5	46.0	2.5	105.9
10	10	80	381.6	25.2	74.0	2.5	170.1
10	10	110	520.2	30.9	101.7	2.5	234.0
10	10	140	657.7	36.6	129.2	2.5	297.3
10	15	50	243.3	24.5	46.3	2.5	106.4
10	15	80	383.5	30.2	74.3	2.5	171.0
10	15	110	522.8	35.9	102.2	2.5	235.1
10	15	140	661.2	41.6	129.9	2.5	298.9
10	20	50	243.9	29.5	46.4	2.5	106.7
10	20	80	384.5	35.2	74.5	2.5	171.4
10	20	110	524.3	40.9	102.5	2.5	235.8
10	20	140	663.3	46.7	130.4	2.5	299.9
25	5	50	252.9	8.8	44.5	6.1	102.4

25	5	80	392.0	11.1	72.4	6.1	166.4
25	5	110	531.1	13.3	100.2	6.1	230.5
25	5	140	670.0	15.6	128.0	6.1	294.5
25	10	50	254.9	13.8	44.9	6.1	103.3
25	10	80	395.1	16.1	73.0	6.1	167.9
25	10	110	535.2	18.3	101.0	6.1	232.4
25	10	140	675.1	20.6	129.0	6.1	296.8
25	15	50	256.2	18.8	45.2	6.1	103.9
25	15	80	397.1	21.1	73.4	6.1	168.8
25	15	110	537.8	23.4	101.6	6.1	233.6
25	15	140	678.4	25.6	129.7	6.1	298.3
25	20	50	257.0	23.8	45.3	6.1	104.2
25	20	80	398.2	26.1	73.6	6.1	169.3
25	20	110	539.3	28.4	101.9	6.1	234.3
25	20	140	680.2	30.7	130.1	6.1	299.2
40	5	50	265.6	7.4	43.4	9.8	99.8
40	5	80	404.6	8.8	71.2	9.8	163.8
40	5	110	543.6	10.2	99.1	9.8	227.8
40	5	140	682.7	11.6	126.9	9.8	291.9
40	10	50	267.7	12.4	43.8	9.8	100.7
40	10	80	407.8	13.8	71.8	9.8	165.2
40	10	110	548.0	15.2	99.9	9.8	229.8
40	10	140	688.1	16.6	128.0	9.8	294.3

40	15	50	269.0	17.4	44.1	9.8	101.3
40	15	80	409.9	18.8	72.3	9.8	166.2
40	15	110	550.8	20.2	100.5	9.8	231.1
40	15	140	691.6	21.7	128.7	9.8	296.0
40	20	50	269.8	22.4	44.2	9.8	101.7
40	20	80	411.1	23.8	72.5	9.8	166.8
40	20	110	552.4	25.2	100.8	9.8	231.9
40	20	140	693.6	26.7	129.1	9.8	296.9
60	5	50	282.7	6.6	41.9	14.7	96.4
60	5	80	421.5	7.5	69.7	14.7	160.3
60	5	110	560.5	8.5	97.5	14.7	224.3
60	5	140	699.5	9.4	125.4	14.7	288.3
60	10	50	284.7	11.6	42.3	14.7	97.3
60	10	80	424.8	12.5	70.3	14.7	161.8
60	10	110	564.9	13.5	98.4	14.7	226.3
60	10	140	705.1	14.4	126.5	14.7	290.9
60	15	50	286.1	16.6	42.6	14.7	97.9
60	15	80	426.9	17.5	70.8	14.7	162.8
60	15	110	567.8	18.5	99.0	14.7	227.7
60	15	140	708.7	19.4	127.2	14.7	292.6
60	20	50	286.9	21.6	42.7	14.7	98.3
60	20	80	428.2	22.5	71.0	14.7	163.4
60	20	110	569.6	23.5	99.3	14.7	228.5

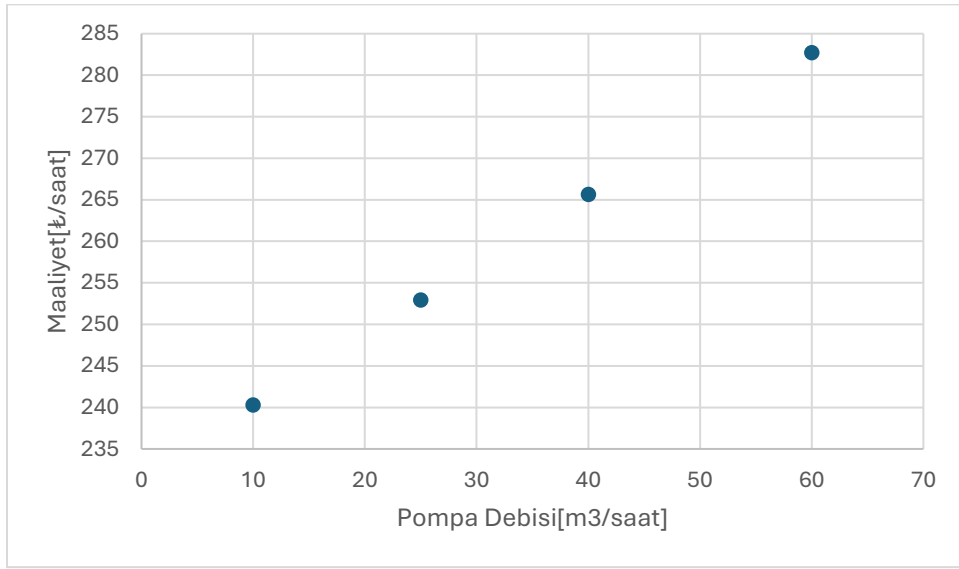
60 20 140 710.9 24.4 127.6 14.7 293.6

3. SONUÇLAR

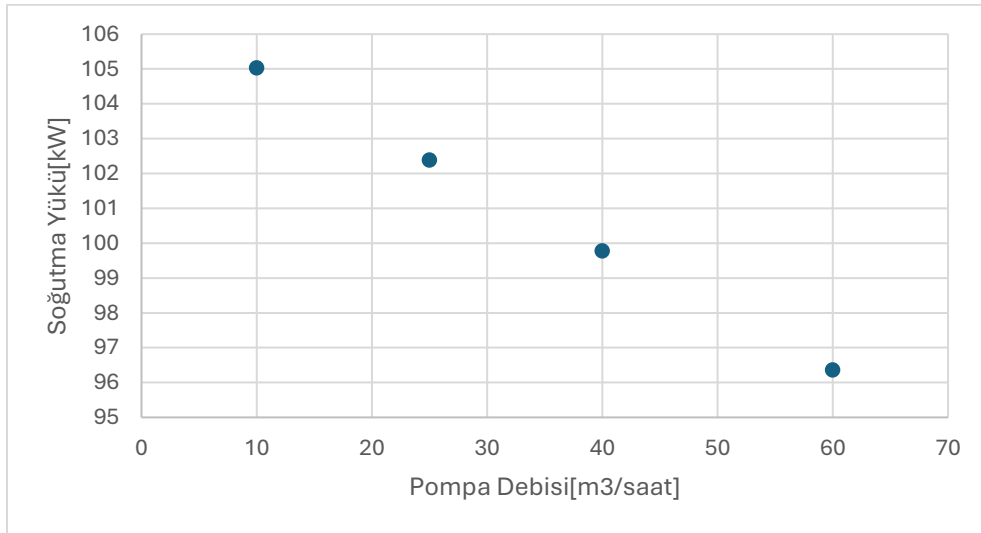
Sistemin 3 değişkeni ayrı ayrı incelenmiştir her durum için diğer iki değişken sabit tutulmuştur. Her değişkenin maliyete ve çillerin soğutma yüküne etkisini gözlemlenmek amaçlanmıştır.

3.1 Pompa Debisi Değişkeni

Havuz Suyu Sıcaklığı= 33 °C , Parça Giriş Sıcaklığı = 80 °C , $N_{parça} = 50$, $T_1 = 5$ C° değerleri sabit tutulmuş ve Şekil 3 ile Şekil 4'teki veriler elde edilmiştir. Grafiklerden anlaşıldığı üzere pompa debisinin, maliyete doğru orantılı etkisi varken çiller soğutma yüküne ters orantılı etkisi vardır.



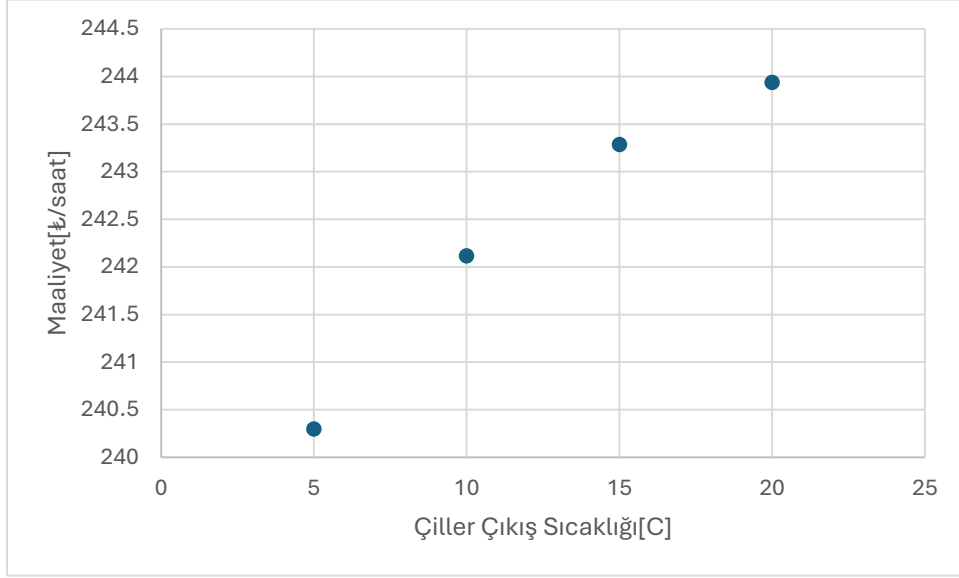
Şekil 3 Elektrik Maliyeti-Pompa Debisi



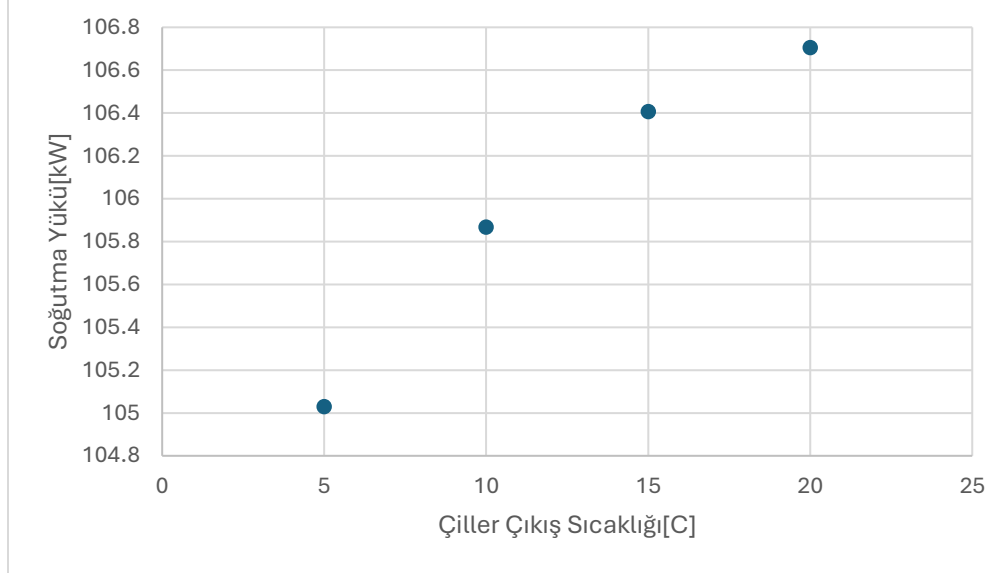
Şekil 4 Çiller Soğutma Yükü-Pompa Debisi

3.2 Giriş Sıcaklığı Değişken

Havuz Suyu Sıcaklığı= 33 °C, Parça Giriş Sıcaklığı = 80°C, $\dot{V}_1 = 10 \frac{m^3}{saat}$, $N_{parça} = 50$ değişkenleri sabit tutulmuş ve Şekil 5 ve 6'daki sonuçlara ulaşılmıştır. Grafiklerden anlaşıldığı üzere çiller çıkış sıcaklığının, maliyete ve çiller soğutma yüküne artış yönünde ve logaritmik etkisi bulunmaktadır.



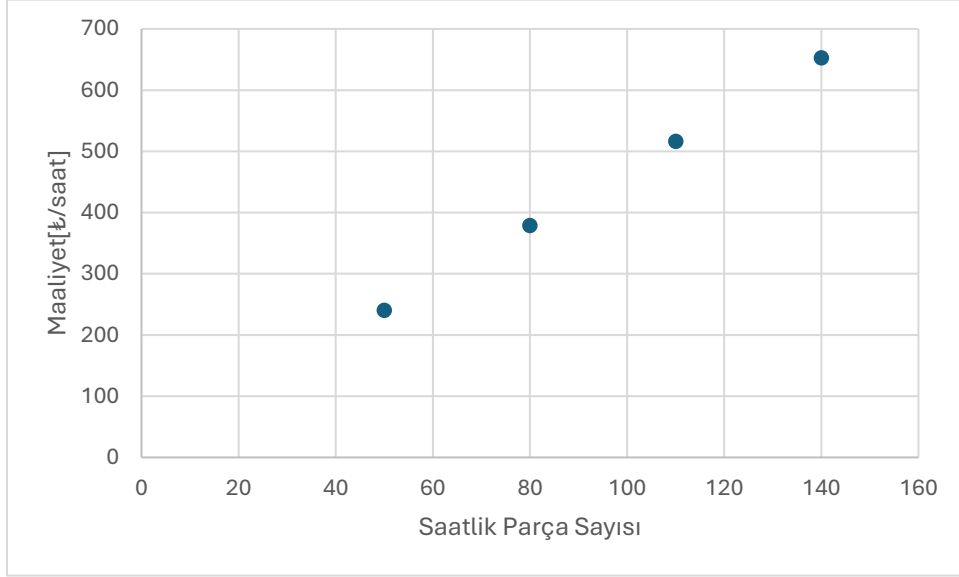
Şekil 5 Elektrik Maliyeti-Parça Giriş Sıcaklığı



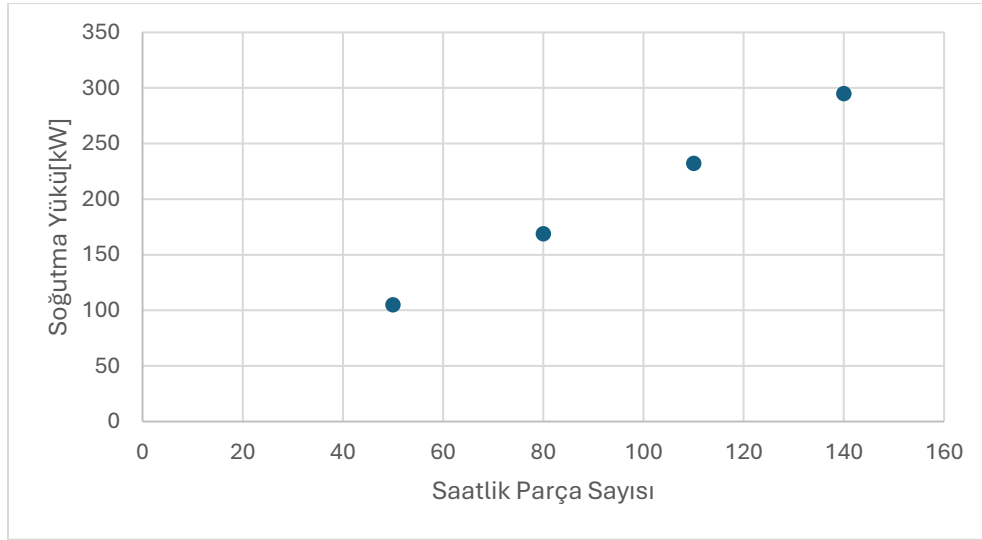
Şekil 6 Çiller Soğutma Yüğü-Parça Giriş Sıcaklığı

3.3 Saatlik Parça Sayısı Değişken

Havuz Suyu Sıcaklığı= 33 °C ,Parça Giriş Sıcaklığı = 80 °C, $\dot{V}_1 = 10 \frac{m^3}{hr}$, $T_1 = 5 C^\circ$ sabit tutulmuş ve Şekil 7 ile 8’deki sonuçlar elde edilmiştir. Grafiklerden anlaşıldığı ve beklendiği üzere havuza saatlik parça giriş sayısı, maliyete ve çiller soğutma yüküne doğru orantılı etki etmiştir.



Şekil 7 Elektrik Maliyeti-Saatlik Parça Giriş Sayısı



Şekil 8 Çiller Soğutma Yüğü-Parça Giriş Sayısı

4. REGRESYON

“Tablo 1”deki veriler kullanılarak regresyon analizi gerçekleştirilmiş ve bu işlem için MATLAB tercih edilmiştir. Analizlerde havuz suyu sıcaklığı 33 °C, parça giriş sıcaklığı ise 80 °C olarak kabul edilmiştir.

Denemeler sonucunda, sıcaklık değerleri yerine bu değerlerin logaritmalarının kullanılmasıyla modelin doğruluğunun arttığı görülmüştür. Ayrıca, debi ve sıcaklık değişkenlerinin çarpımlarının ayrı girdi olarak verilmesinin regresyonun uyumunu arttırmıştır.

$$\begin{bmatrix} \text{Maliyet} \left[\frac{\text{₺}}{\text{saat}} \right] \\ \ln(T_4 [^{\circ}\text{C}]) \\ \dot{W}_{\text{Çiller}} [kW] \\ \dot{W}_{\text{Pompa}} [kW] \\ \text{Soğutma Yüğü} [kW] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{V}_1 \left[\frac{m^3}{\text{saat}} \right] & \ln(T_1 [^{\circ}\text{C}]) & N_{\text{Parça}} & \ln(T_1 [^{\circ}\text{C}]) * \dot{V}_1 \left[\frac{m^3}{\text{saat}} \right] \end{bmatrix} \theta$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 0.011018 & 0.481837 & -0.00374 & -0.00027 & 0.003543 \\ 0.868606 & -0.01157 & -0.07132 & 0.245269 & -0.16398 \\ -0.04817 & 1.003628 & -0.00701 & -0.00085 & -0.02155 \\ 4.529487 & 0.012915 & 0.907067 & -4.64 * 10^{-6} & 2.086124 \\ 0.058931 & -0.00372 & 0.011766 & 8.78 * 10^{-6} & 0.027114 \end{bmatrix}$$

Lineer regresyon analizinde, çıktılar üzerinde hangi girdilerin daha çok etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

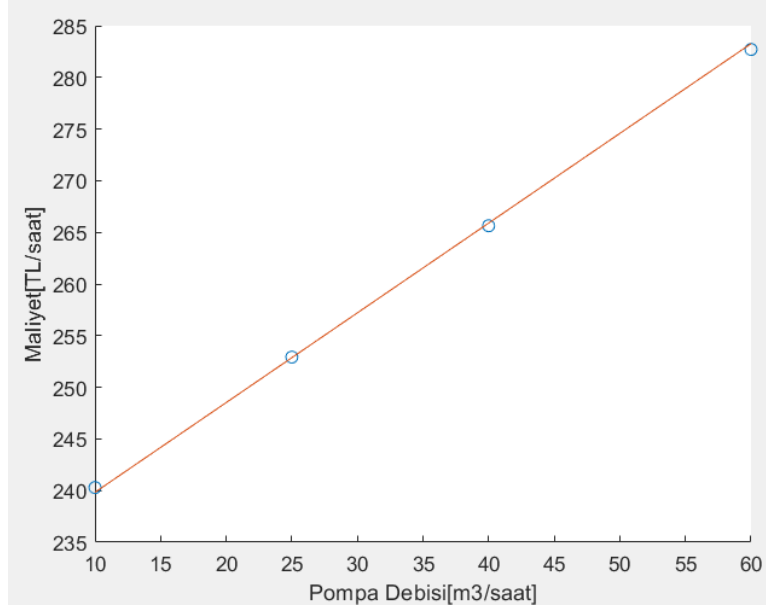
Regresyon katsayı matrisine (θ) göre maliyet üzerinde en yüksek etkinin parça sayısından, daha sonra ise pompa debisinden kaynaklandığı görülmüştür. Çiller giriş sıcaklığını en çok etkileyen değişken çıkış sıcaklığıyken, çillerin enerji tüketimi ve soğutma yükü üzerinde en baskın etken parça sayısı olmuştur. Pompanın elektrik tüketimi ise neredeyse tamamen pompa debisine bağlıdır.

4.1 Regresyon Doğruluğu

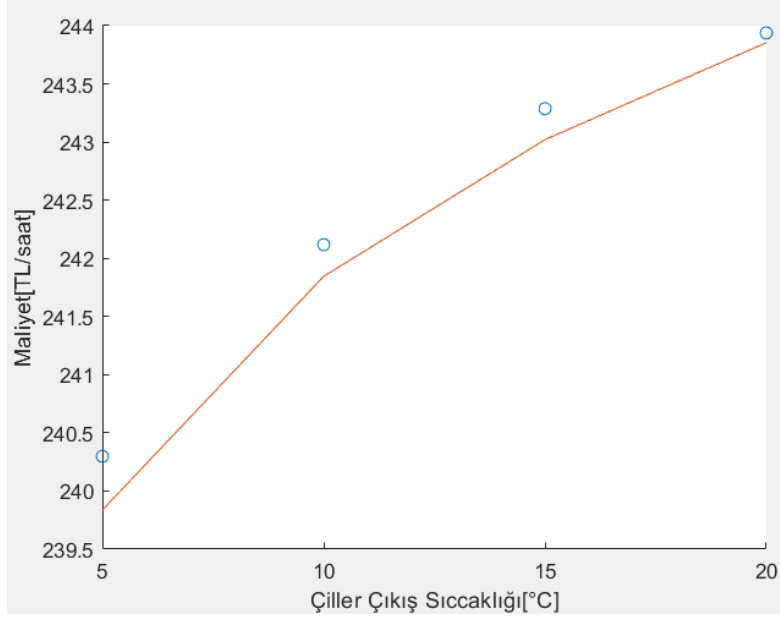
Korelasyon Katsayısı (R^2) Değerleri

Regresyon sonuçlarına göre; Maliyet için $R^2 = 1.0000$, T_4 için $R^2 = 0.8663$, $\dot{W}_{\text{Çiller}}$ için $R^2 = 1.0000$, \dot{W}_{Pompa} için $R^2 = 1.0000$ ve Soğutma Yüğü için $R^2 = 1.0000$ elde edilmiştir.

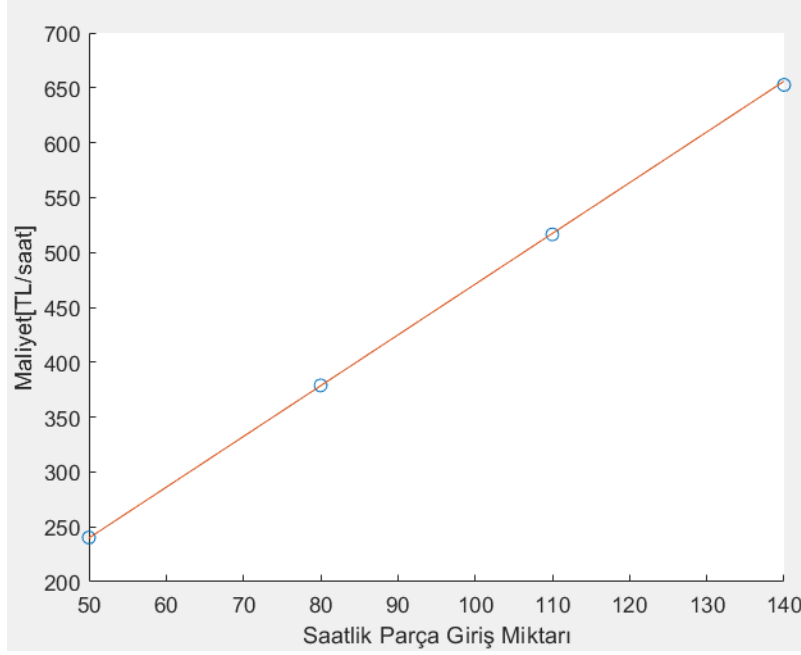
Bu değerler, regresyon modelinin çiller giriş sıcaklığı dışındaki tüm çıktıları neredeyse mükemmel bir tahmin edebildiğini göstermiştir. Şekil 9, 10, 11’deki çemberler, simülasyondan elde edilen gerçek değerleri; çizgiler ise regresyon modelinin tahminlerini göstermektedir. Şekiller incelendiğinde, regresyon sonuçlarının mükemmel yakın olduğunu ve sistemin davranışını öngörmeye güvenle kullanılabileceği görülmektedir.



Şekil 9 Regresyon: Maliyet-Akış Debisi



Şekil 10 Regresyon: Maliyet-Çiller Çıkış Sıcaklığı



Şekil 11 Regresyon: Maliyet-Saatlik Parça Sayısı

5. BULGULAR ve YORUM

Çalışmada geliştirilen Simulink modeli ile soğutma sistemi başarıyla simüle edilmiştir ve verilen girdiler için sistemin maliyet tahminleri elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları, sistemin fiziksel olarak kurulmasına gerek kalmadan farklı senaryoların denenmesine ve maliyet öngörülerinin yapılmasını sağlamıştır. Bu sayede, sistem kurulmadan önce çeşitli parametreler üzerinden en düşük maliyetli tasarımın bulunması ve seçilmesi mümkün olmuştur. Oluşturulan bu sistemde; 80°C sabit sıcaklıktaki parçalarının bir havuza batırılması, 65 farklı durumda simüle edilmiştir. Havuz sıcaklığının 33 °C’de sabit tutulması amacı ile sisteme bir çiller bağlanmıştır ve bu çillerin elektrik harcaması hesaplanmıştır. Kurgulanan soğutma sistemine göre en düşük maliyet saatlik 50 parça sayısında, $10 \frac{m^3}{saat}$ debide, 5 °C sıcaklıkta elde edilmekte, en yüksek maliyet ise saatlik 80 parça sayısında, $60 \frac{m^3}{saat}$ debide, 20 °C sıcaklıkta de oluşmaktadır.

Ayrıca elde edilen verilerle regresyon modeli geliştirilmiştir ve yüksek doğrulukla ($R^2 \approx 1$) sonuçlar elde edilmiştir, sıcaklık girdi ve çıktıların doğal logaritmaları kullanılıncı regresyonun daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Regresyon modelinin korelasyon katsayıları incelenerek maliyet ve diğer çıktılar üzerinde hangi girdilerin daha baskın etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bu sayede, tasarım ve işletme süreçlerinde hangi değişkenlere öncelik verilmesi gerektiği daha net biçimde belirlenmiştir. Maliyet üzerinde; en çok saatlik parça sayısı parametresinin, en az ise da çiller çıkış sıcaklığının logaritması parametresinin etkisinin olduğu belirlenmiştir.

6. KAYNAKÇA

1. Çelik, U., 2018, HVAC Nedir?, <https://blog.wago.com.tr/hvac-nedir/>.
2. INCROPERA, F.P. et. al., 2002 Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed., John Wiley & Sons, Jefferson City
3. ÇENGEL, Y. A., 2010, Thermodynamics: An Engineering Approach, 8th ed., Mc Graw Hill Education, New York City