

Sanayide Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği

Cemre YILDIZ^{1*} 

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Maslak Kampüsü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/02/2024
Düzeltilme: 28/03/2024
Kabul: 22/04/2024

Anahtar Kelimeler

Enerji verimliliği
Atık ısı
Kojenerasyon
Karbon yakalama ve
depolama
Yapay Zekâ
Sanayide robotlaşma

Article Info

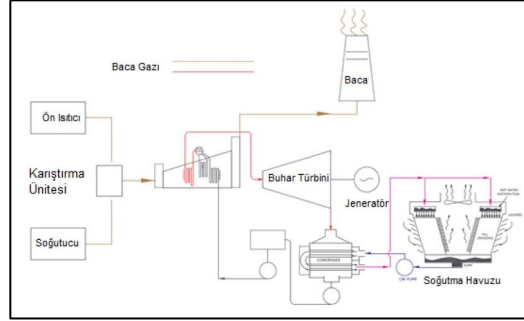
Research article
Received: 23/02/2024
Revision: 28/03/2024
Accepted: 22/04/2024

Keywords

Energy efficiency
Waste heat
Cogeneration
Carbon capture and
storage
Artificial intelligence
Robotization in industry

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, küresel enerji tüketimi ve karbon salınımının başlıca sorumlularından olan sanayi sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmalarıyla ilgili yerli ve yabancı kaynaklar taranarak olası çözüm önerileri aktarılmıştır. Sonuç olarak Türkiye'de, geniş ölçekli bir yenileme hareketi ile önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabileceği tespit edilmiştir. / In this study, local and foreign sources regarding current energy efficiency studies in the industrial sector, which is one of the main responsible for global energy consumption and carbon emissions, were scanned and solution suggestions were presented. As a result, it is shared that significant amounts of energy savings can be achieved in Türkiye with a large-scale renewal movement.



Şekil A: Atık ısı geri kazanımı / Figure A: Waste heat recovery

Önemli noktalar (Highlights)

- Yürütülecek çalışmaların verimli bir şekilde ilerleyebilmesi için öncelikle durum tespitinin doğru yapılması, sonrasında da ulaşılabilir gerçekçi hedeflerin belirlenmesi gerekmektedir. / To ensure that the work is completed efficiently, it is essential to first assess the situation accurately and then set achievable targets.
- Sanayi tesislerinde enerji verimliliğini artırmak için çalışanlara yönelik bilinçlendirme ve eğitim programları düzenlenmelidir. / Awareness and training programs should be organized for employees to enhance energy efficiency in industrial facilities.
- Enerji verimliliğini artırmak için gerekli yasal düzenlemelerin güçlendirilmesi ve uygulanabilirliklerinin sağlanması önemlidir. / Strengthening the necessary legal regulations and ensuring their applicability are crucial steps in enhancing energy efficiency.

Amaç (Aim): Türkiye'nin enerji görünümü, yürürlükte olan verimlilik politikaları derlenerek, sanayideki enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütecek akademi ve özel sektör çalışanlarına katkıda bulunulması amaçlanmıştır / By compiling Turkey's energy outlook and current efficiency policies, it is aimed to contribute to academic and private sector employees who will conduct studies to increase energy efficiency in industry.

Özgünlük (Originality): Küresel enerji tüketimine bağlı olarak giderek artan çevresel sorunlarda önemli payı olan sanayi sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmaları, yerli ve yabancı kaynaklar taranarak belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilmeye çalışılmıştır. / Current energy efficiency studies in the industrial sector, which has a significant share in the increasing environmental problems due to global energy consumption, have been tried to be brought together in a certain order by scanning domestic and foreign sources.

Bulgular (Results): Türkiye'deki toplam tüketimin yaklaşık %43'nün sanayide tüketildiği ortaya çıkmaktadır. / It has been determined that industry consume around 43% of overall consumption in Türkiye.

Sonuç (Conclusion): Türkiye'deki sanayi sektörünün enerji tasarruf potansiyelinin en az %20 olduğu ve bunun yaklaşık %50'sinin küçük yatırım miktarları ile iki yıldan az sürede kendini amorti ederek gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir. / It has been estimated that Turkey's industrial sector has an energy savings potential of at least 20%, with about 50% of this achievable with minimal investments and amortization in less than two years.



Sanayide Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği

Cemre YILDIZ^{1*}

¹Istanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Maslak Kampüsü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/02/2024
Düzeltilme: 28/03/2024
Kabul: 22/04/2024

Anahtar Kelimeler

Enerji verimliliği
Atık ısı
Kojenerasyon
Karbon yakalama ve
depolama
Yapay Zekâ
Sanayide robotlaşma

Abstract

Ülkelerin kalkınma sürecindeki vazgeçilmez faktörlerden birisi olan üretimin kesintisiz bir şekilde sürabilmesi için uygun maliyetli, sürekli, güvenli ve temiz enerjiye ulaşabilmeleri büyük önem arz etmektedir. Ülkeler bir yandan büyümeye devam ederken, diğer yandan 2030 için belirlenen 2° ve 2050 yılına kadar karbon nötr hedeflerini göz önüne almak durumundadır. Bu amaç doğrultusunda çeşitli sektörel inovasyonların kullanılması gerekmektedir. Bu derlemede, küresel enerji tüketimi ve karbon salınımının başlıca sorumlularından olan sanayi sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmalarıyla ilgili yerli ve yabancı kaynaklar taranarak, ulaşılan olası çözüm önerileri başlıklar altında aktarılmıştır. Araştırmalar sonucunda, atık ısı geri kazanım sistemi ile ısıtma veriminin %32,32 artarak tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %30'nun geri kazanılabildiği hesaplanmıştır. Kojenerasyon sistemlerinin var olan yapıya entegrasyonu ile gaz türbinlerinin elektrik dönüşüm verimliliğinin %30-40 seviyelerinden %80-90'lara çıktığı görülmüştür. Yapılan denetimlerde yatırımın kendini 1,5-3 yıl gibi bir sürede amorti ettiği tespit edilmiştir. Çalışmanın devamında, Türkiye'nin enerji görünümü, yürürlükte olan verimlilik politikaları ile güncel sanayi istatistikleri derlenerek, endüstrideki enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütecek akademi ve özel sektör çalışanlarına katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Sanayi sektöründeki en kapsamlı yasal düzenleme 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ve ISO 50001 Enerji Yönetimi Sistemi Standardı'dır. Türkiye'deki sanayi sektörünün enerji tasarruf potansiyelinin en az %20 olduğu ve bunun yaklaşık %50'sinin küçük yatırım miktarları ile iki yıldan az sürede kendini amorti ederek gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün çalışmalarına göre, sanayi sektöründe atılacak doğru adımlar ile Türkiye'nin toplam birincil enerji talebinin %15 düşürülebileceği hesaplanmıştır.

Recent Developments in Energy Efficiency of Industry: The Case of Türkiye

Article Info

Research article
Received: 23/02/2024
Revision: 28/03/2024
Accepted: 22/04/2024

Keywords

Energy efficiency
Waste heat
Cogeneration
Carbon capture and
storage
Artificial intelligence
Robotization in industry

Abstract

It is critical that countries have access to affordable, continuous, safe, and clean energy in order for production, which is one of the most important aspects in their development processes, to continue uninterrupted. While countries continue to grow, they must also consider the 2°C targets for 2030 and carbon neutrality by 2050. For this purpose, various sectoral innovations need to be used. In this review, domestic and foreign sources related to current energy efficiency studies in the industrial sector, which is one of the main responsible for global energy consumption and carbon emissions, have been scanned and possible solution suggestions have been presented under headings. As a result of the research, it was calculated that with the waste heat recovery system, the heating efficiency could increase by 32.32% and approximately 30% of the consumed electrical energy could be recovered. It has been observed that with the integration of cogeneration systems into the existing structure, the electricity conversion efficiency of gas turbines increased from 30-40% to 80-90%. During the audits, it was determined that the investment amortized itself in a period of 1.5-3 years. In the continuation of the study, it is aimed to contribute to academic and private sector employees who will carry out studies to increase energy efficiency in the industry by compiling Turkey's energy outlook, current efficiency policies and current industrial statistics. The most comprehensive legal regulation in the industrial sector is the Energy Efficiency Law numbered 5627 and the ISO 50001 Energy Management System Standard. It has been estimated that Turkey's industrial sector has an energy savings potential of at least 20%, with about 50% of this achievable with minimal investments and amortization in less than two years. According to research conducted by the General Directorate of Renewable Energy, Turkey's overall primary energy demand can be decreased by 15% with the proper industrial sector policies implemented.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji, üretimin temel bileşeni olarak ülkelerin kalkınmasına yön veren temel faktörlerden birisidir [1–4]. Bu bağlamda ülkeler ihtiyaç duydukları enerjiyi uygun maliyetli, sürekli, kaliteli, güvenli ve temiz bir şekilde karşılayabilmelidir [5]. Enerjiye duyulan ihtiyaç, enerji verimliliği kavramının önemini küresel ve ulusal düzeyde artırmaktadır. Enerji verimliliği, endüstriyel işletmelerde üretim kalitesi ve miktarını düşürmeden, birim hizmet veya ürün miktarı başına enerji tüketimini azaltmayı ifade etmektedir. Sanayileşme, yaşam standartlarının yükselmesi ve nüfus artışı gibi sebeplerle enerji tüketimi dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de artmaktadır [6]. Yükselen enerji fiyatları, enerji güvenliğine ilişkin endişeler, teknolojik ilerlemeler, iklim değişikliği ve enerji bağımsızlığına yönelik eğilimler, enerji verimliliği çalışmalarının önemini artırmaktadır [7].

Projeksiyonlar 2040 yılında dünya nüfusunun 9 milyara çıkacağını gösterirken, bu durum yaklaşık 1 milyar insan için ek enerji sağlanmasını gerekli kılmaktadır. 1990 yılında 8.779 Mtep olan dünya enerji arzı yaklaşık %58 artarak günümüzde 13.865 Mtep'e ulaşmıştır [8]. Bu değer, artan nüfus ve gereksinimlerle birlikte 2040 yılına kadar yıllık ortalama %2 olmak üzere toplamda %70 artması beklenmektedir [9]. Buna karşılık kontrolsüz büyümenin neden olduğu yüksek enerji yoğunluğu, iklim değişikliğine bağlı çevresel tahribatı hızlandırarak sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Bu durum uluslararası düzenlemelerin gerekliliğini ortaya koymaktadır [10–13].

İklim değişikliğinin neden olduğu çevresel etkileri araştıran Abbass ve arkadaşları [14], sera gazı emisyonlarındaki artış ile küresel ısınma arasında 1851-2021 dönemi boyunca pozitif bir korelasyon olduğunu tespit etmiştir [15]. Bu bağlamda, enerji yoğunluğunu etkileyen faktörlerin belirlenerek enerji yoğunluğunun azaltılması, küresel enerji talebinin artış eğilimini engellemekle kalmayacak, aynı zamanda çevresel sorunlara duyarlı sürdürülebilir bir ekonomik gelişimi de mümkün kılacaktır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), Paris Anlaşması'nda belirlenen iki derece hedefine ulaşılabilmesi için gereken yatırımların %40'ının enerji verimliliği alanına yönlendirilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır [16].

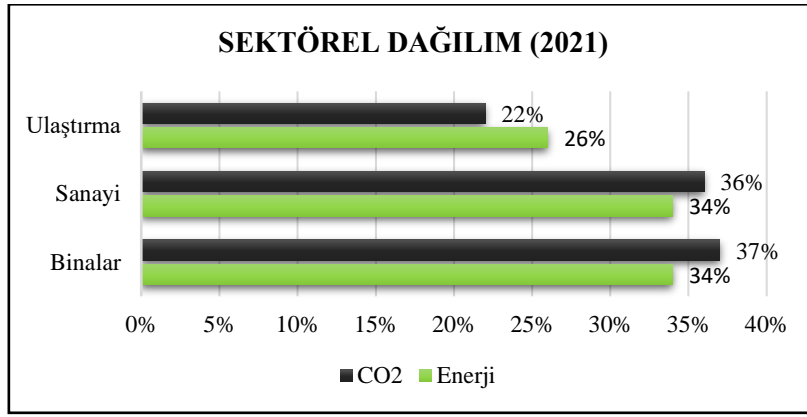
IEA, diğer enerji kaynaklarına nazaran ülkeler için uygulanabilirliği daha yüksek olan enerji

verimliliğini "ilk yakıt" olarak adlandırmaktadır [17]. Görüşe göre, en temiz ve ucuz enerji kaynağı israf edilmeyip tasarruf edilen enerjidir. Bu nedenle, dünya genelinde ilk yakıt olarak kabul edilen enerji verimliliğine olan ilginin destekleyici politikalarla artırılması gerekmektedir. Ortaya konan kavram daha sonra Avrupa Birliği (AB) tarafından enerji politikası çerçevesinde "önce enerji verimliliği" ilkesi olarak benimsenmiştir. Bu yaklaşım, arz yönlü enerji altyapısına göre daha az maliyetle daha fazla değer dönüşü sağladığı için enerji verimliliğine yapılan yatırımlara öncelik verilmesine yol açmıştır [18].

Ekonomik faktörler enerji verimliliğini açıklama konusunda en sık kullanılan değişkenlerdir. Ulusal düzeyde yapılan çalışmalar, gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH) ile ulusal enerji arzı ve tüketimi arasında pozitif bir ilişki olduğunu doğrulamıştır [19–23]. Bazı araştırmalar, ekonomideki büyümeyle birlikte enerji yoğunluğundaki düşüşün doğrudan yabancı yatırımlardaki artışla ilişkili olduğunu gösterirken [24], diğerleri kişi başına düşen GSYİH'nın enerji verimliliğini artırdığını öne sürmektedir [25–28]. Endüstriyel büyüklük genellikle bir ülkenin sanayi sektörünün GSYİH içindeki payı olarak tanımlanırken, imalat sektörünün hizmet sektörüne kıyasla daha fazla enerji tükettiği bir ülkede ulusal enerji verimliliği performansının daha düşük olacağı dile getirilmektedir. [28–32].

Küresel enerji kullanımında sanayi sektörünün payı 2022 yılında %37 (170 EJ) olurken [33], bu oranın 2002'de %34 olduğu belirtilmektedir. Enerji verimliliği çalışmalarının giderek yaygınlaşmasına rağmen, sanayinin genel enerji tüketimindeki payının artmaya devam ettiği gözlemlenmektedir. Bu artışın büyük ölçüde enerji yoğun sanayi alt sektörlerindeki üretim artışından kaynaklandığı anlaşılmaktadır [34]. Özellikle, çelik, çimento ve alüminyum gibi başlıca alt sektörlerin endüstriyel enerji tüketiminin %60'ını oluşturduğu ifade edilmektedir [33].

Küresel endüstriyel enerji tüketiminin yaklaşık %38'i Çin'de gerçekleşirken, bu oran Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri, Hindistan ve Japonya'nın toplamından (%28) daha yüksektir [33]. Endüstriyel enerji kullanımında elektriğin payı artan yatırımlara rağmen %23 seviyesinde kalırken, günümüzde sektöre ağırlıklı olarak fosil yakıtlar (%28 kömür, %18 doğal gaz, %19 petrol) hakimdir [33].



Şekil 1. Sektörel tüketim ve emisyon dağılımı (Sectoral consumption and emission distribution)

2021 yılındaki enerji tüketimi ile CO₂ emisyonunun küresel ölçekteki sektörel dağılımları Şekil 1’de gösterilmektedir [35].

IEA’na göre, fiziksel ve/veya kimyasal süreçler kullanarak ara veya nihai ürünler üretmek amacıyla hammaddelerin çıkarılması, taşınması ve işlenmesini kapsayan proses (süreç) endüstrisi, sanayi sektörünün tükettiği toplam enerjide en büyük paya sahiptir [16]. Toplam endüstriyel fosil yakıt tüketiminin yaklaşık %80-90’ı, ısıtma ve soğutma prosesleriyle birlikte buhar üretimi için

kazanlarda kullanılmaktadır [36, 37]. Bu nedenle, sanayi sektörünün verimliliğini artırmayı hedefleyen ülkelerin yatırımlarını yoğunlaştırdıkları başlıca alanlardan birisi süreç endüstrisidir [38, 39]. Öyle ki, bu yatırımlar doğrultusunda Avrupa’daki süreç endüstrisinin enerji yoğunluğunun 1991’den 2020’ye kadar %45 azaldığı Avrupa kimya endüstrisi konseyi tarafından paylaşılmıştır [39]. Ancak bu kayda değer iyileşmeye rağmen, talepte beklenen artış nedeniyle enerji tüketiminin artmaya devam ederek fosil yakıtların sektördeki ağırlığını sürdürüleceği öngörülmektedir [40].

$$\text{Spesifik Enerji Tüketimi (SET)} = \frac{\text{tüketilen enerji}}{\text{üretim adedi}} \quad (1)$$

Yukarıdaki denkleme göre spesifik enerji tüketimini düşürmenin iki yolu olduğu ortaya çıkmaktadır:

- Aynı miktarda üretimi daha az enerji tüketerek gerçekleştirmek,
- Ya da aynı enerji tüketimiyle daha fazla üretim adedine ulaşmak.

Endüstride daha fazla üretim gerçekleştirmek, kapasite kullanımını artırmaktan geçmektedir. Avrupa’nın 1995-2022 arasındaki ortalama kapasite kullanımı %81,6 seviyesindedir [39]. Kapasite kullanımının artırılması, daha yüksek enerji verimliliği ile üretim yapılmasını mümkün kılarak birim başına üretim maliyetinin düşmesine imkân sağlamaktadır [41].

Enerji Verimliliği Hareketi (Energy Efficiency Movement) endüstri forumu tarafından yapılan yeni bir çalışma [42] IoT (Nesnelerin İnterneti), akıllı bina yönetimi ve endüstriyel ısı entegrasyonu gibi sistemik önlemlerin, enerji verimliliği önlemleri arasında en yüksek emisyon tasarrufu potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, sanayide kullanılan kompresör, fan ve

pompa gibi sistemlerin kilit bileşeni olan motorların, hafif sanayi süreçlerindeki enerji yoğunluğunun azaltılmasına yönelik atılacak tekil adımlar içerisinde en yüksek potansiyele sahip olduğu belirtilmektedir. Maksimum verimliliği sağlamak için motorun kendisinin verimlilik performansı önemli olsa da, diğer sistem bileşenlerinin de verimli motorla kullanım için optimize edilerek uygun şekilde boyutlandırılması gerektiğinin altı çizilmektedir [43].

Jiao ve arkadaşlarının çalışmasında [44], sanayide verimliliği artırarak enerji tasarrufu sağlamanın en önemli adımının teknolojik gelişmelerin takibi olduğu vurgulanmaktadır. Bu yaklaşıma örnek olarak, İsveç çelik endüstrisinin karbon yoğunluğunu azaltmak amacıyla geliştirdiği yeni yüksek fırın teknolojisi gösterilebilir [45]. Ek olarak Hindistan’daki ağır sanayi üzerine yapılan çalışmalar, teknolojik yatırımların enerji ve karbon yoğunluğunu önemli ölçüde azaltabileceğini göstermesi bu görüşü desteklemektedir [46]. Worrell ve Boyd’un çalışmalarına göre, karbondan arındırma tekniği ile imalat sanayinin çevresel etkileri azaltılabilir [47]. Roy ve arkadaşları ise,

nesnelerin interneti (IoT) gibi modern kontrol teknolojilerinin var olan yapılara entegre edilerek verimliliğin artırılabilceğini paylaşmaktadır [48]. Enerji verimliliğini Enerji Stratejisi 2050'nin temel taşlarından biri olarak gören İsviçre, farklı politika senaryoları altında 2010'daki seviyeye göre 2050 yılında toplam nihai enerji talebini %22-46 oranında azaltmayı hedeflemektedir [49]. Bu senaryoların bir parçası olarak, sanayide nihai enerji kullanımının 2010'dan 2050'ye %26-39 oranında azalması öngörülmektedir [50].

Dünya genelinde çeşitli ülkelerde enerji verimliliği ve alınması gereken tedbirlerle ilgili araştırmalar yürütülmeye devam etmektedir [51]. Çalışma yürütülen ülkelere örnek olarak;

- Amerika Birleşik Devletleri [52],
- Bangladeş [53]
- Çin [54],
- Etiyopya [55],
- Hollanda [56],
- İsveç [57],
- İsviçre [49],
- Tayland [58],
- Türkiye [59] gösterilebilir.

Son yıllarda enerji verimliliği konusunda büyük atılım içerisinde olan Çin'de artan kentleşme, cam, petrokimya, çimento ve demirçelik gibi enerji yoğun ağır sanayiye olan ihtiyacı da artırmaktadır [60, 61]. Yayınlanan 2021 ekoloji raporuna göre, 2020 yılındaki sanayi kaynaklı kükürt dioksit emisyon oranının ulusal miktarın %79,6'sını, sanayi kaynaklı partikül madde emisyon oranının ise ulusal miktarın %65,6'sını oluşturduğu görülmektedir [62].

Çin'in 2019 yılındaki toplam CO₂ emisyon miktarı 11,6 milyar tonu aşarak, 2006 yılından bu yana küresel çapta ilk sırada yer almaya devam etmektedir [63]. CO₂ emisyonunu azaltmayı hedefleyen Çin hükümeti, 2030 yılına kadar karbon yoğunluğunun 2005'teki seviyeye göre %60 ila %65 oranında azaltılacağını taahhüt etmektedir [64]. Bu koşullar altında, Çin'in toplam CO₂ emisyonunun yaklaşık %55'ini oluşturan ağır sanayide karbon yoğunluğunun azaltılması, 2030 hedefleri kapsamında atılması gereken önemli adımlardan biri olarak öne çıkmaktadır [65, 66].

Endüstriyel gelişimde yeşil ve düşük karbonlu teknolojilere yönelim, karbon nötr hedefi açısından kritik bir stratejik fırsatı temsil etmektedir [67].

Eko-verimlilik kavramı, ekonomik ve çevresel kazançları koordine ederek, minimum kaynak tüketimi ve çevresel etki ile maksimum ekonomik girdi yaratmayı amaçlamaktadır [68]. Endüstriyel enerji verimliliğine ilişkin itici faktörlerin doğru şekilde analiz edilmesi, karar vericilerin önceki politik hatalardan kaçınarak gelecekte atacakları adımları belirlemelerine yardımcı olabilir. Bu doğrultuda hazırlanacak detaylı yol haritası rehberliğinde, sanayi sektöründe verimli ve sürdürülebilir kalkınma süreci teşvik edilerek geniş çaplı katılım sağlanabilir [69, 70].

Enerji ekonomisi alanında yapılmış çalışmalar araştırıldığında;

- Kişi başına düşen gelir özelinde [71, 72],
- Teknolojik yenilikler bakımından [73],
- Kentleşmenin etkileri söz konusu olduğunda [74],
- Ticari açıklık ve ülkeler arası bağlantılar hakkında [75, 76],
- Enerji fiyatlarındaki dalgalanmaların etkileri için [77, 78] incelenebilir.

Bu çalışma, binalardaki enerji verimliliğinin incelendiği bir araştırmanın devamı niteliğindedir ve endüstriyel tesislerde enerji verimliliği üzerine odaklanmaktadır [79]. Çalışmada, küresel enerji tüketimi ve karbon salınımının başlıca sorumlularından olan sanayi sektöründeki güncel enerji verimliliği gelişmeleri yerli ve yabancı kaynaklar taranarak belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilmiştir. Çalışmanın ileriki bölümlerinde, Türkiye'nin enerji görünümü, yürürlükte olan verimlilik politikaları ile güncel sanayi istatistikleri derlenerek, sanayideki enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütecek olan paydaşlara katkıda bulunulması amaçlanmaktadır.

2. SANAYİDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ (ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRY)

Verimlilik, üretim sürecinde yer alan unsurların nicel bir ilişki içinde olması ve bu unsurlar arasındaki etkileşim yoluyla elde edilen üretimi en iyi noktaya çıkarmasıdır. Bu tanımdan da anlaşılacağı üzere verimlilik, bir sürecin ürettiği ürün ile o ürünü üretmek için kullanılan girdi arasındaki ilişkilerin bütünüdür. Ekonomik bir terim olarak verimlilik, bir ürün veya hizmetin üretim sürecinde kullanılan üretim faktörleri ile gerçekleştirilen üretim arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir katsayı olarak da ifade edilebilir [80, 81].

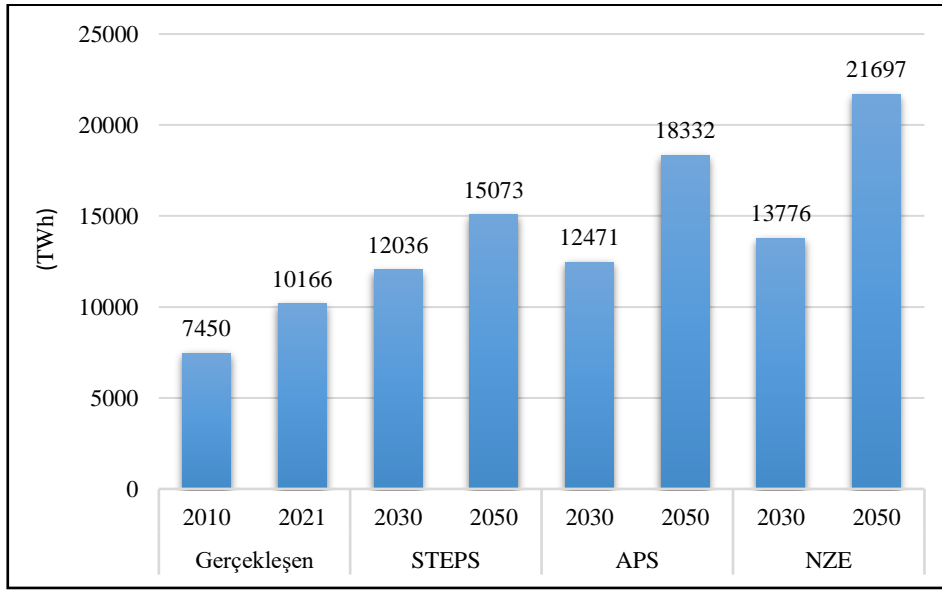
Verimlilik, durağan değil dinamik bir ölçüdür. Verimliliği ölçmek için, belirli bir üretim döneminde üretime dahil olan her faktörün birim başına çıktı miktarını ölçmek ve faktörlerin verimliliğini farklı dönemler arasında karşılaştırmak gerekir. Enerji verimliliği ise, üretimin miktar ve kalitesini düşürmeden, ekonomik kalkınmayı ve sosyal refahı engellemeden tüketilen enerji miktarının en aza indirilmesini ifade etmektedir.

Enerji üretim ve tüketiminin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan ölçü birimi “Ton Eşdeğer Petrol (TEP)”dür. Endüstride üretim veya ısıtma amacıyla bir veya daha fazla yakıt türü

kullanılabilirken, her yakıtın kendine ait ısıl değeri ve birimi bulunmaktadır. Bir ton ham petrolün eşdeğeri olarak tanımlanan TEP, yakıtların ısıl değerlerinin bir çevrim katsayısı ile ortak bir enerji birimine dönüştürülmesine imkân sağlamaktadır.

IEA, sanayi sektörünün güncel tüketim miktarı üzerinden 2030 ve 2050 enerji talebini belirleyebilmek için genel kabul gören senaryolar üzerinden çeşitli projeksiyonlar hazırlamıştır. Yapılan çalışmada kullanılan senaryolar:

- Açıklanan Politikalar Senaryosu (STEPS)
- Açıklanan Taahhütler Senaryosu (APS)
- Net Sıfır Emisyon (NZE)

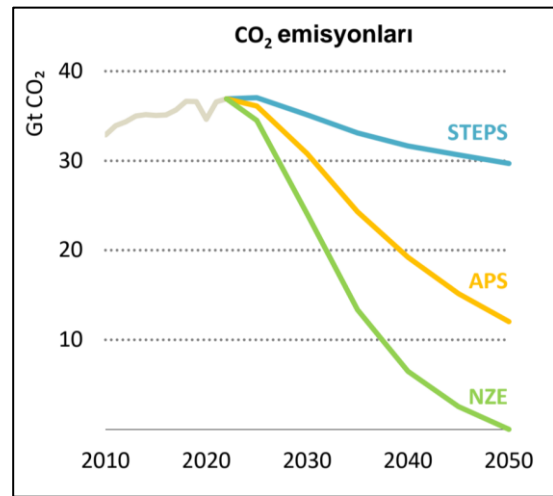


Şekil 2. Çeşitli senaryolara göre sanayi sektörünün global enerji talebi (The global energy demand of the industrial sector according to various scenarios)

Küresel elektrik talebinin her üç senaryoda da 2050 yılına kadar önemli ölçüde artacağı Şekil 2’de görülmektedir. 2021’de gerçekleşen 10.166 TWh tüketim miktarının, STEPS’e göre yaklaşık %70, APS’ye göre %110 ve NZE’ye göre ise %145 oranında yükseleceği hesaplanmaktadır [82].

Enerji kaynaklı küresel CO₂ emisyonu, 2022’de 37 gigaton (Gt) ile tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşmıştır. STEPS’e göre emisyon miktarı 2020’lerin sonuna kadar büyük ölçüde sabit kalırken, sonrasında yavaş yavaş 30 Gt’a kadar düşmesi beklenmektedir. APS tahminlerine göre ise emisyon miktarının yıllık bazlı yaklaşık %2 düşerek 2030’da 31 Gt, 2050’de ise 12 Gt seviyesine gerileyeceği aktarılmaktadır. Son olarak NZE Senaryosunda, CO₂ miktarının yıllık %5’ten fazla düşerek 2030’da 24 Gt ardından ise 2050’de net sıfıra düşeceği belirtilmektedir [82]. Üç tahmin için

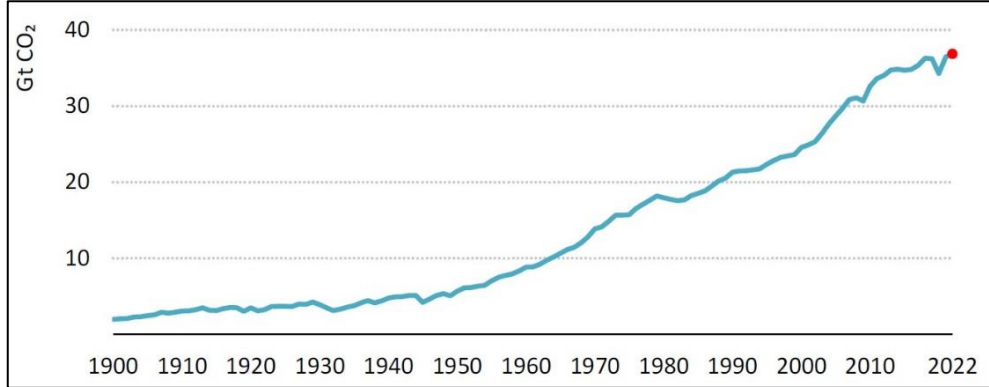
de oluşması beklenen süreç Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3. 2050 küresel CO₂ emisyon senaryoları (Global CO₂ emission scenarios for 2050) [82]

Sanayi bazlı CO₂ emisyonu 2022'de %1,7 düşerek 9,2 Gt seviyesine gerilemiştir. Yıl içerisinde çeşitli bölgelerde yaşanan üretim kesintilerinin yanı sıra, küresel düşüşün asıl nedeni olarak Çin'in sanayi

emisyonlarını 161 Mt azaltması gösterilmektedir [83]. 1900-2022 arasındaki toplam küresel CO₂ salınımı Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Enerji tüketimi kaynaklı küresel CO₂ emisyonları 1900-2022 (Global CO₂ emissions from energy consumption 1900-2022) [83]

Global enerji verimliliği çalışmaları için örnek teşkil edebilecek Çin'in elektrik tüketimi 2000-2013 yılları arasında yıllık ortalama %11,22 artarken, yoğunlaşan enerji verimliliği yatırımlarının etkisiyle bu oran 2014-2019 yılları arasında ortalama %5,55 olarak gerçekleşmiştir [84]. Guang ve arkadaşları [85] ekonomik büyümenin elektrik tüketimini teşvik eden birincil faktör olduğunu belirtirken, uygulanacak enerji politikalarının enerji yoğunluğunu azaltmaya yönelik olması gerektiği vurgulanmaktadır. Atılacak adımlar arasında;

- Teknolojik iyileştirmeye yönelik girişimlerin kolaylaştırılması,
- İşleme tekniklerinin geliştirilerek eski nesil üretim tesislerinin kullanımdan çıkarılması [86],
- Enerji yönetimi uygulamalarının geliştirilmesi yer almaktadır.

Enerji verimliliği aynı miktarda çıktıyı üretmek için daha az enerji kullanılması olarak tanımlanmakla birlikte, özellikle sanayi gibi enerji yoğun alanlarda verimliliğinin belirlenebilmesine yönelik pek çok çalışma bulunmaktadır [87-90]. Enerji verimliliği oranının belirlenmesinde kullanılan göstergeler araştırma alanlarına göre farklılık göstermektedir [52, 91-94]. Bir sistemin enerji verimliliğini belirleyebilmek için; olasılık teorisi [95], çok kriterli karar verme sistemi (MCDM) [96], en iyi-en kötü yöntemi (BWM) gibi birçok farklı yöntem kullanılmaktadır [97].

MCDM'lerinden biri olan veri zarflama analizi (VZA), doğrusal programlama modeline dayalı

parametrik olmayan bir analiz yöntemidir. Benzer girdileri kullanarak, aynı tür çıktıları üreten karar verme birimlerinin (KVB) görece etkinliğinin ölçülmesine olanak sağlamaktadır [98]. VZA, kamudan özel sektöre kadar çok geniş bir uygulama alanına sahiptir [99-102]. Charnes ve arkadaşları [103] tarafından önerilen Charnes, Cooper ve Rhodes (CCR) modelinden sonra geliştirilen bu yöntem 40 yılı aşkın süredir büyük ölçüde geliştirilerek farklı sektörlerin verimliliğinin değerlendirilebilmesi için popüler olarak kullanılmaya başlanmıştır:

- Tarım [104, 105],
- Ulaşım [106, 107],
- Finans [108, 109],
- Demirçelikte [110],
- Demir dışı metallerde [111],
- Kâğıt sektöründe [112].

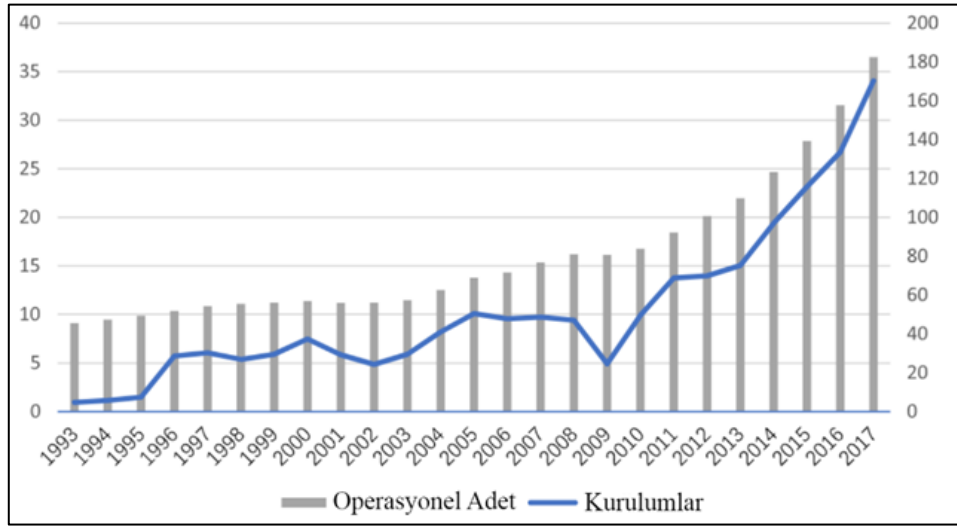
Bu alanlara ek olarak VZA yöntemi endüstriyel enerji verimliliği analizinde de yaygın olarak uygulanmaktadır [113-120]. VZA yöntemi özellikle ulusal, bölgesel ve sektörel düzeylerde endüstriyel enerji verimliliğini analiz etmek için tercih edilen analiz yöntemlerindedir. Bu yöntem ile enerji verimliliği değerlendirilmekle birlikte, aynı zamanda verimsiz KVB için de uygun düzenlemelerin yapılabilmesine imkân sağlanmaktadır [121]. Günümüzde farklı endüstrilerin enerji tüketimini değerlendirmek için kullanılan bir diğer metot ise Enerji verimliliği ölçümleridir (EEM'ler). Ayrıca veri toplama tekniği, endüstriyel cihazların enerji tüketiminin izlenmesinde yeni ortaya çıkan bir alandır [122].

Sanayide enerji verimliliğini iyileştirme tedbirleri genel olarak:

- Isı yalıtımı,
- Atık ısı geri kazanımı,
- Mekanik tesisatın yenilenmesi (Fırın, kazan, buhar ve kurutma sistemleri, fan ve pompa, basınçlı hava sistemleri)
- Aydınlatma,
- Isıtma-soğutma-havalandırma,
- Elektrik sistemleri (elektrikli cihaz ve motorlar),
- Ve otomasyonu kapsamaktadır.

2.1. Sanayide Robotlaşma (Robotization in Industry)

Uluslararası Robotik Federasyonu (IFR) tarafından, otomatik olarak kontrol edilerek yeniden programlanabilen ve çok amaçlı bir makine olarak tanımlanan endüstriyel robotlar, gelişen yapay zekâ (AI) ile imalat sanayinde dijital dönüşümün sembolü olarak aktarılmaktadır [123, 124]. Endüstriyel robotlar, dördüncü sanayi devrimiyle birlikte yeniden şekillenen imalat sektörünün en önemli bileşenlerinden biri olarak görülmektedir [125].



Şekil 5. Sol eksen kurulum sayısını, sağ eksen ise operasyonel adeti yansıtmaktadır (10.000 adet) (The left axis represents the number of installations, while the right axis reflects the operational count (10.000 units))

Şekil 5'te görülebileceği gibi [125], son yıllarda dünya genelindeki imalat sanayinde endüstriyel robotların kurulum ve işletme sayısında belirgin bir artış yaşanmaktadır. Bu artışa paralel olarak robotların endüstride yol açtığı etki ve potansiyel değişimlerle ilgili akademik çalışmalar da önem kazanmaktadır. Bu çalışmalara örnek olarak;

- Ekonomik sonuçlara ilişkin [126–128],
- Üretkenlik değişimi bakımından [129, 130],
- İşgücü ve ücretler alanında [131, 132],
- Teknolojideki gelişmelerle ilgili [133, 134] değerlendirilebilir.

Geçtiğimiz yıllar içerisinde pek çok araştırmacı, robotların sanayide kullanımının yaygınlaşmasının ekonomik değişkenler üzerinde yaratacağı etkileri vurguladılar. Bu konu hakkında referans kabul edilen çalışmalardan birinde Keynes [135], otomasyon teknolojisinin yayılmasının "teknolojik işsizliğe" yol açacağını öngörmüştür. Acemoğlu ve Restrepo ise çalışmalarında [132], bu durumun büyük iş kayıplarına yol açarak ücretlerde düşüslere

neden olabileceğini aktarmaktadır. Çok sayıda araştırmada [136–139] öne çıkan bir diğer nokta ise, yaşanacak endüstriyel dönüşümden en çok düşük ve orta vasıflı işlerde çalışan insanların etkilenen olmasıdır. Robotların endüstride yaygınlaşmasının bir diğer muhtemel sonucu ise, artacak verimlilikle birlikte ürün fiyatlarının düşeceği beklentisidir. Düşen fiyatlara bağlı olarak talepte yaşanacak artış, firmaları üretim ölçeklerini genişletmeye teşvik ederek yeni iş alanları da yaratabileceği öngörülmektedir [140]. Sürecin bu şekilde ilerlemesi durumunda, önceki aşamalarda yaşanacak iş kayıplarının yıkıcı etkileri hafifletilebilir.

Bu konuların yanı sıra, üretimde artan robotlaşma oranının fabrikaların elektrik tüketimine yaptığı etkiler bir diğer güncel çalışma alanıdır. Örnek olarak aynı sektörde faaliyet gösteren firmalar arasında yapılan çalışmalarda, üretim proseslerinde robotların kullanıldığı fabrikaların daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu ve süreç içerisinde

elektrik tüketimlerinde artış yaşandığı tespit edilmiştir [141]. Firmaların elektrik tüketimlerinde yaşanan bu artışın ortalama %8 seviyesinde olduğu aktarılmaktadır [142]. Buna karşın yapılan birçok araştırmada ise, artan elektrik tüketimine kıyasla üretim miktarında yaşanan yükselişin toplam verimi yukarı çekecek seviyede olduğu vurgulanmaktadır [143, 144].

2.2. Kazan, Fırın, Elektrik Motorları, Pompa ve Fanlar (Boiler, Furnace, Electric Motors, Pumps and Fans)

İçten yanmalı motorlar, kazanlar, fırınlar, pompalar, elektrik motorları, basınçlı hava ve soğutma sistemlerine gibi konularda enerji verimliliği yönetimini araştırmak üzere çalışmalar yapan çok sayıda araştırmacı bulunmaktadır [145]. Kazanlarda verimliliği etkileyen başlıca faktörler şu şekilde sıralanabilir [146]:

- Eksik yanma
- Aşırı hava
- Baca gazında su buharı nedeniyle ısı kaybı
- Baca gazı sıcaklığı
- Yakıt tipi
- Brülörler
- Kazan yükü
- Kazan yüzeyinden ısı kayıpları
- Isıtma yüzeyinin kirlenmesi

Kazanların verimli çalışmasında dikkat edilmesi gereken önemli noktalar baca gazı sıcaklığı ve atık ısı geri kazanımının sağlanmasıdır. Bacadan çıkan atık gazlar genellikle üretilen buharın sıcaklığından 40°C ila 80°C daha yüksek bir sıcaklıkta bacadan tahliye edilir. Atık ısının bir kısmının geri kazanılması kazan verimliliğini artıracak ve yakıt tasarrufu sağlayacaktır. Isı geri kazanımı, kazan besleme suyunun ön ısıtılması için bir ekonomizer veya yanma havasının ön ısıtılması kullanılarak gerçekleştirilebilir [147].

Kazanların verimli çalışması için baca gazı sıcaklığının belirli bir düzeyde tutulması önemlidir. Temiz yüzeylerde baca gazı sıcaklığı istenilen sıcaklığın 30 °C üzerinde ise kombinin temizlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde kazan veriminde %1 ila %2 civarında bir düşüş yaşanmaktadır [146]. Akaryakıtla çalışan bir kazanın temizliğini sağlamanın en iyi yöntemi, brülör ayarlarının doğru yapılmasıdır. Ayarlama bir duman test cihazı kullanılarak yapılabilir. Bacadan koyu siyah duman çıkması halinde sistem içerisinde kurum oluştuğu anlaşılacaktır.

Fırınların verimini etkileyen başlıca faktörler şu şekilde sıralanabilir [146]:

- Eksik yanma
- Yakıt türü ve hava/yakıt oranı
- Baca gazı sıcaklığı
- Reküperatörler
- Yalıtım kayıpları
- Malzeme ve soğutma suyu kayıpları

Endüstriyel tesislerdeki en önemli kaynaklardan biri olan basınçlı hava, tesislerin en fazla yatırım yaptığı proseslerin başında gelmektedir. Birçok sanayi tesisinde kompresörler en fazla enerji tüketen cihazlar arasında yer alırken, kurutucu ve diğer destekleyici ekipmanlarla birlikte sistemin yıllık işletme maliyetleri toplam yıllık ödenen elektrik faturasının %70'ine ulaşabilmektedir [148].

Basınçlı hava sistemlerinde meydana gelen arızalar, birçok firma için üretim duraksamalarına neden olmaktadır. Sektörel analizler, basınçlı hava sistemlerindeki enerji kaybının temel nedeninin hava kaçakları olduğunu ortaya koymaktadır. Hava sızıntıları nedeniyle oluşan basınç kaybını engellemek için kompresörün daha uzun süre çalıştırılması gerekmektedir. Yapılan çeşitli çalışmalar, üretilen basınçlı havanın yaklaşık %25'inin sızıntılar nedeniyle kaybolduğunu göstermektedir [149].

Elektrik motorları başta pompa, fan ve kompresör olmak üzere birçok endüstriyel cihaz ve ekipmanda farklı tip ve kapasitelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sektördeki elektrik motorlarının enerji tüketim dağılım oranlarına bakıldığında, yaklaşık %20'sinin pompalarda, %17'sinin hava kompresörlerinde, %11'inin soğutma kompresörlerinde, %4'ünün konveyörlerde ve geri kalan kısmın ise diğer uygulama alanlarında kullanıldığı aktarılmaktadır. Günümüzde kullanılan elektrik motorlarının %90'ı asenkron motorlardır, bu nedenle endüstride düşük motor kaybına sahip yüksek verimli motorların kullanılması önemlidir [150]. Motor kayıp ve verim tahminlerine yönelik literatür çalışmaları mevcuttur [151, 152].

Elektrik motorlarında enerji kayıpları dört kategoride ele alınmaktadır [146]:

- Güç kayıpları
- Histerezis Kayıpları
- Sürtünme ve salınım kayıpları
- Yanlış yük kayıpları

Pompalarda verimliliğin artırılması ve enerji tasarrufunun sağlanması üzerine literatürdeki çalışmalar ağırlıklı olarak frekans dönüştürücü uygulamalarını kapsamaktadır [153–158]. VSD değişken hızlı sürücü (frekans dönüştürücü) veya yumuşak yol verici (soft starter) kullanımı, yüksek verimli motorların tercih edilmesi ve gereğinden fazla kapasiteye sahip pompalarda enerji verimliliğini artırmak için pompa çarklarının tornalanarak küçültülmesine yönelik araştırmalar, pompalarda uygulanan başlıca verimlilik artırıcı projeler arasında yer almaktadır [159].

Fanlarda tüketiminin azaltılması üzerine yapılan literatür çalışmaları genellikle tasarım iyileştirmelerini içermekte olup, özellikle aksiyal fanların aerodinamik, mekanik, elektriksel, yapısal ve operasyonel faktörlerinin fan performansına ve minimum güç tüketimine etkisi yoğun bir şekilde araştırılmıştır [160–163]. Akhan'ın çalışmasına göre [159], değişken debili fan ve pompa sistemlerinde debi ayarı devri değiştirilerek %60'a varan enerji tasarrufu sağlanabileceği aktarılmaktadır.

3. ENDÜSTRİYEL ALT SEKTÖRLER (INDUSTRIAL SUBSECTORS)

Sanayide enerji maliyetleri toplam üretim maliyetlerinin %20 ile %50 arasında değişmektedir. Demirçelik sektörü %22'lik payla enerji tüketiminde ilk sıraya sahipken, onu %19 ile çimento, cam, seramik ve tuğla sanayi takip etmektedir. Küresel istatistiklere ek olarak, sanayi sektörlerinin elektrik tüketim oranları ülkeler bazında farklılık gösterebilir. Örnek olarak kâğıt hamuru ve kâğıt sanayi dünya çapında enerjinin en yoğun kullandığı beşinci sektör olurken, İsveç'teki kâğıt sektörü ülkenin tüm sanayi tüketiminin yarısını teşkil etmektedir [164]. Belirtilen alt sektörlerin enerji tüketimleri yüksek olduğu gibi, enerji verimliliği potansiyelleri de yüksektir ve yapılacak yatırımlar bu yönde önemli fırsatlar sunmaktadır [165].

3.1. Demirçelik Sanayi (Iron and Steel Industry)

Demirçelik sanayiindeki enerji tüketimine bakıldığında, en yüksek payın %50-60 ile yüksek fırınlara ait olduğu görülmektedir. Yüksek fırın prosesi, demir içeren malzemelerdeki demir oksidi azaltarak sıcak cevher oluşturma işlemidir. Yüksek fırınlar genellikle çok büyük tesisler olup entegre çelik fabrikalarının ana ünitesi konumundadır

[166]. Yüksek fırınlar ile ilgili enerji verimliliği çalışmaları üç ana kısımda incelenmektedir:

- Fırın baca gazlarından ısı geri kazanımıyla sağlanabilecek tasarruf,
- Yüksek fırın iyileştirme projeleriyle elde edilebilecek tasarruf,
- Proses odaklı tasarruf potansiyelleri.

Demirçelik sanayi, enerji ve karbon yoğun üretim süreçlerine dayandığından sektördeki sera gazı emisyonlarını azaltmak için üç ana seçenek akla gelmektedir [167, 168]:

- Enerji verimliliğinin artırılması,
- Karbon yakalama teknolojilerinin uygulanması,
- Geri dönüşüme dayalı döngüsel üretim payının artması.

Sektörde kullanılan tav fırınları hem yakıt tüketimleri hem de çevreye salınan atık gazlarından kaynaklanan kirlilik sebebiyle işletmelerde mümkün olduğunca verimli çalışması gereken sistemlerdir. Tav fırınlarının ısı verimi genellikle %35-45 aralığındadır ve sistem içindeki verim kaybı çoğunlukla egzoz gazlarından kaynaklanmaktadır. Ortaya çıkan kaybın nedeni, tav fırınlarının görevleri gereği çok yüksek sıcaklıklarda çalışması ve bu sırada brülörlerdeki yanma neticesinde sistemden dışarıya atılan gazın yüksek sıcaklıkta olmasıdır. Sıcaklığı 650 °C civarında olan baca gazlarının enerjisi, çeşitli ekonomizer ve eşanjör uygulamaları ile ortam ısıtmasında, ön ısıtmada, kızgın su ve buhar ihtiyacının karşılanmasında ya da sıcak su üretiminde kullanılabilir. Yüzey kayıplarını azaltmak içinse, fırının iç yüzey yalıtımını artırarak fırın yüzeyinden kaynaklanan radyasyon ve konveksiyon kayıpları önenebilir [169].

3.2. Çimento Sanayi (Cement Industry)

Çimento sanayi CO₂ salınımı yüksek, enerji yoğun bir sektör olmakla birlikte, artan kentleşme oranlarına bağlı olarak ihtiyaç duyulan alt ve üst yapıların temel malzeme tedarikçisi konumundadır [170–172]. Küresel çimento üretimi, 4,28 milyar ton kapasiteyle toplam enerji tüketiminin %3'ünü ve toplam CO₂ salınımının ise %7'sini oluşturmaktadır [173, 174]. Bu üretimin yarısından fazlasını tek başına Çin üstlenmektedir [175].

Çimento, TS EN 197-1 standardına göre su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle çeşitli tepkimelere giren ve

bunun sonucunda sertleşen bir hamur (pasta) oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş, hidrolik bağlayıcıdır. Çimento sektörü ülkemizin en eski sektörlerinden biri olup enerji tüketiminde demirçelik sanayinin ardından ikinci sırada yer almaktadır [148]. Çimento üretim maliyetinin yaklaşık %60-70'i enerji kökenli harcamalardan kaynaklanırken [176], üretim aşamaları kısaca şu şekilde sıralanabilir:

- Hammadde çıkarma
- Öğütme
- Klinker üretimi
- Çimento öğütme
- Paketleme

Çimento sektöründe, her 1 ton çimento üretimi için 0,6t ile 1t arasında CO₂ salınımı gerçekleşmektedir. Bu emisyonun %60'ı kalsinasyon prosesinden kaynaklanırken, kalan %40'ı fırınlarda oluşan ısıdan gelmektedir [177]. Leeson ve arkadaşları [177], kalsinasyon prosesindeki emisyonların genel üretim miktarı düşürülmeden azaltılamayacağına dikkat çekmektedir. Buna sebep olarak, meydana gelen kimyasal sürecin kireçtaşının klinker ve CO₂'e ayrışmasının doğal bir sonucu olarak ortaya çıkması gösterilmektedir [177, 178]. Bu soruna çözüm olarak Tomatis ve arkadaşları [179] kalsinasyon sürecinde güneş enerjisi kullanımının olası etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, termal enerjinin ortaya çıkan sera gazlarını %48 oranında azaltabildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, bu oran karbon yakalama teknolojisinin sisteme eklenmesiyle %63-81 seviyesine yükselmektedir. Ek olarak, çeşitli araştırmacılar atık ısı geri kazanım sistemi ile klinker üretimi sırasında ortaya çıkan ısının verimli bir şekilde kullanılmasının sağlanabileceğini belirtmektedir [180, 181].

Yıldız ve arkadaşları [148] araştırmalarında bir çimento fabrikasının yardımcı operasyonlarındaki enerji tüketimi incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre verimliliği artırmak amacıyla:

- Döner fırın soğutma atık gazı kullanılarak reküperatör sistemi kurulabilir. Bu yolla elde edilecek sıcak buhardan, ısınma ve sıcak su için kazan beslemesinde tüketilen likit doğal gaz miktarının düşürülmesinde faydalanılabilir.
- Kompresör hattının ısı eşanjörleri düzenli olarak temizlenmelidir, böylece aşırı ısınma nedeniyle ortaya çıkan devreden çıkma sorunu ortadan kalkabilir.

- Basınçlı hava tanklarının, tanklarda biriken sudan sistemin etkilenmesini önlemek amacıyla otomatik drenaj sistemi eklenerek basınç hatlarında oluşacak korozyon en aza indirilebilir.

Farklı bir çalışmada [182], değişken hızlı sürücülerin (VSD) çimento endüstrisindeki motorlara uygulanmasının küresel ölçekte yaklaşık 1.865.925 MWh tasarruf sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, VSD'ler kullanılarak düşük voltajlı motor hızlarının %60 oranında azaltılmasıyla yılda yaklaşık 2.122.675 ton CO₂ emisyonunun önüne geçilebileceği belirtilmektedir.

3.3. Gıda Sanayi (Food Industry)

Avrupa Birliği'nde gıda endüstrisinin son zamanlarda en fazla enerji tüketen sektörlerden biri haline geldiği belirtilirken, bunun kısmen artan üretim hacimleriyle birlikte gıda güvenliği standartlarının zorunlu kıldığı soğuk zincir sistemi sebebiyle yükselen enerji tüketiminden kaynaklandığı vurgulanmaktadır [183–186]. Literatürde gıda sanayinde yapılan enerji verimliliği uygulamalarına sıkça rastlanmaktadır [187]. Jagtap ve arkadaşları [188], içecek doldurma pompalarında yapılan revizyon ve soğutma tesisini nemlendirme tesisine dönüştürme gibi işletmeler için geri ödeme süresi 3 yıldan kısa olan uygulamaları önermektedir. Rüşen ve Çevik'in [189] Karaman'daki bir gıda işletmesine ait gofret üretim hattının enerji verimliliğini değerlendirdiği çalışmada, kazan sistemlerinde brülör değişimi ile kazan veriminin %5,2 artacağı belirtilmektedir.

Bir diğer çalışmada ise Kıyılmaz ve arkadaşları [190], dondurma üretimi yapan büyük ölçekli bir gıda tesisinde yapılan denetimlerde enerji kayıplarının özellikle buhar ve kondens hatlarında, basınçlı hava dağıtımında ve transformatörlerde yoğunlaştığını göstermektedir. Bu durum Kaya'nın [191] benzer özelliklere sahip tesisleri içeren çalışmasında vardığı sonuçları doğrular niteliktedir. Çalışmada [190]:

- 620.155 kWh değerinde 800 ton buhar kaçağının olduğu tespit edilirken alınacak basit önlemler ile yıllık 54 TEP buhar kaçağının önlenilebileceği aktarılmaktadır.

3.4. Otomotiv Sanayi (Automotive Industry)

Sanayide yer alan sektörlerden bir diğeri olan otomotiv sektörü de enerjinin yoğun tüketildiği alanlardan biridir. Otomotiv işletmelerinde yapılan enerji verimliliği uygulamaları ile ilgili öne çıkan bazı çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

- Akbaş ve arkadaşlarının [192] yaptığı çalışmada, seçilen işletmede kullanılan pompa ve fanların daha verimliliyle değiştirilmesi ve halihazırda kullanılan kompresörlerin basınçlarının düşürülmesi gibi uygulamaların sonuçları belirtilmiştir.
- Rivera ve arkadaşları [193], araç boyama ünitesindeki proses ve tekniklerde yapılacak geliştirmelerle elde edilebilecek enerji kazanımlarını aktarmaktadır.
- Kılıç ve arkadaşlarının [194] araştırmasında, bir otomobil montaj tesisinin enerji tüketimi incelenmiş ve enerjinin yoğun olarak kullanıldığı imalat süreci için çeşitli iyileştirmeler önerilmiştir.
- Uylukçuoğlu [195] tarafından yapılan çalışmada, önerilen uygulamaların ısı enerjisinden 427.212 m³, elektrik enerjisinden ise 8.124.198 kWh tasarruf sağlayabileceği hesaplanmıştır.

4. ENERJİ YÖNETİM VE DENETİMİ (ENERGY MANAGEMENT AND AUDIT)

Enerji yönetimi, rekabetçi konumu güçlendirmek ve karlılığı en üst düzeye çıkarmak için enerjinin akılcı ve etkili bir şekilde kullanılmasıdır [196]. Bu hedefe ulaşmak için, enerji tüketen süreçler ve prosedürler için üretim birimi başına enerji gereksiniminin azaltılması veya aynı üretim biriminin daha düşük enerji maliyetleriyle işletilmesi gerekmektedir.

Endüstriyel işletmelerde enerji verimliliğinin artırılması amacıyla pek çok faaliyet yürütülmektedir. Planlanan faaliyetler özetle;

- Enerji yöneticilerinin şirketlerinin bulunduğu ülkelerin yasal düzenlemelerine uygun çalışması,
- Enerji Yönetim Sistemi ISO 50001 kapsamında yürütülmesi,
- Enerji etütleri ve araştırma sonuçlarına dayalı olarak yapılan iyileştirme ve yenileme yatırımları,
- Gönüllülük esasına dayalı düzenlemeler ve teşvikler yoluyla verimliliği artırmaya yönelik projeler,

- Enerji verimliliği danışmanlık şirketleri veya özel danışmanlıklarla yapılan çalışmalar,
- Teknoloji yatırımlarıyla sağlanan enerji tasarrufu,
- Pinch analiziyle elde edilen enerji tasarrufları şeklinde ifade edilebilir.

Pinch analizi, süreç veya süreç sistemindeki kaynakların mantıksal ve sistematik bir çerçevede mümkün olan en iyi şekilde tespit edilmesine olanak sağlayan bir araçtır. Pinch yöntemi petrokimya endüstrisinde ortaya çıkmakla birlikte, şu anda kimya endüstrisindeki (ör. kâğıt, gıda ve kimya) çeşitli sorunları çözmek için kullanılmaktadır. Pinch analizinin ilk uygulamaları endüstride enerji tasarrufunu sağlamaya yönelik olmakla birlikte, günümüzde atık ve emisyonların azaltılması, darboğazların belirlenip ortadan kaldırılması, güvenliğin ve süreç esnekliğinin artırılması, enerjinin en aza indirilmesi gibi sorunların çözümünde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Pinch analizi sonuçlarına göre, enerji maliyetlerinde %15-40 oranında düşüş, kapasite darboğazının kaldırılmasında %5-15 oranında artış ve yeni tasarımlarda toplam maliyetlerin %5-10 oranında azalma sağlanabilmektedir [197].

İşletmelerde enerji yönetiminin var olabilmesi için bazı temel bileşenlerin mevcut olması gerektiği aktarılmaktadır [198]:

- Firma üst yönetim taahhüdünün yapılması,
- Enerji yönetim sistemi ve program amaçlarının açıkça tanımlanması,
- Organizasyon yapısının, tanım ve sorumluluklarının belirlenmesi,
- Mevcut kaynakların (insan ve mali) sağlanması,
- Ölçme ve izleme süreçlerinin sağlanması,
- İlerlemenin düzenli olarak gözden geçirilmesi.

Enerji yönetimi, temelde enerji tüketimini optimize etme sürecidir ve doğası gereği multidisipliner bir yaklaşım gerektirir. Bu yaklaşım, mimarlık, mühendislik, işletme, finans ve diğer ilgili becerilerin bir bütünlük içinde ele alınmasını gerektirir. Bu farklı disiplinlerin bir araya gelmesi, enerji yönetimi hedeflerinin başarılması ve enerji verimliliğinin artırılması için gereklidir [199–202].

Enerji yönetimi kavramı ilk olarak 1970 enerji krizinin ardından ortaya çıkarken, çeşitli endüstriyel alanlarda üretim süreçlerinin denetlenerek enerji verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır [203]. Enerji yönetimi ve özellikle enerji verimliliği, tüm faaliyet sektörlerinde Sürdürülebilir Kalkınma

Hedeflerine (SDGs) yönelik değişimin ana unsuru kabul edilmektedir [204]. Thollander ve Palm [205], "Enerji yönetimi, bir şirketin enerji üzerinde stratejik olarak çalıştığı prosedür olarak tanımlanırken, enerji yönetim sistemi bu prosedürleri uygulamak için bir araçtır" şeklinde belirtmektedir.

Enerji Verimliliği Direktifi, üye devletlerin endüstrilerinin enerji denetimlerinden geçmesini teşvik etmek için enerji verimliliği programları geliştirmelerini özendirilmektedir [206]. Enerji denetimlerinin, enerji verimliliği önlemlerine [207] yapılan yatırımları hızlandırmak ve uygulamak için yararlı bir araç olduğu ve böylece şirketlerin daha verimli olmasına ve CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunmasına yardımcı olduğu gösterilmiştir. KOBİ'ler için gönüllü enerji denetimi politika programları, en yaygın kullanılan politikalardan biridir [208]. Yıllık toplam enerji tüketimleri 500 TEP ve üzeri olan ticaret ve sanayi odası, ticaret veya sanayi odasına bağlı olarak faaliyet gösteren ve her türlü mal üretimi yapan işletmeler VAP (Verimlilik Artırıcı Proje) desteklerinden yararlanmak için başvuruda bulunabilmektedir. Bir diğer zorunlu politika yaklaşımı ise AB üye devletlerinde, KOBİ olmayan şirketlerin her dört yılda bir bağımsız ve uygun maliyetli bir şekilde enerji denetimleri gerçekleştirmelerine yönelik mevzuattır [209].

Düzenli olarak gerçekleştirilen denetimlerin, enerji verimliliğinin yanı sıra çalışma koşullarının iyileştirilmesi yoluyla çalışanların iş verimini de artırdığı gözlemlenmiştir [210, 211]. Bu bağlamda Worrel ve arkadaşları [212] yaptıkları araştırmada, sanayide uygulanan verimlilik önlemlerinin genel üretkenliği önemli ölçüde artırdığı sonucuna varmıştır. Bu çalışmaya ek olarak Pye ve McKane [213], yapılan iyileştirmeler sonucunda enerji dışı kazançların genellikle öngörülenin çok üzerinde gerçekleştiğini aktarmaktadır. Genel olarak araştırmacılar, enerji tasarrufunu ana hedef olarak görmekten ziyade elde edilecek toplam faydanın bir parçası olarak değerlendirilmesi gerektiğini öne sürmektedir.

Enerji denetimi üzerine yapılan çalışmalar sonucunda [214]:

- Enerji denetimlerinin daha uzun ekipman ömrü sağladığı,
- Artan ekipman ömrünün bakım masraflarını düşürdüğü,

- Makine arızaları kaynaklı üretim kaybını en aza indirdiği,
- İyileşen çalışma ortamının iş verimini artırdığı tespit edilmiştir.

Zuberi ve arkadaşlarının [215] yassı demir, tel ve levha imalatı yapan küçük ölçekli bir tesiste gerçekleştirdikleri enerji denetimlerinde:

- Termal (soğutulmuş su depolama tankı ve boruları) ve elektrik (armatürler) altyapısındaki iyileştirmeler [216] ile yaklaşık %23 enerji tasarrufu sağlanabileceği,
- Buna karşılık yapılacak yatırımın 4 ay gibi kısa bir sürede kendisini geri ödeyeceği tespit edilmiştir.

Bir diğer çalışmada ise Bosu ve arkadaşlarının [217], Mısır'da yer alan Almasrya Dökme Kalıplama Bileşikleri (BMC) tesisinin enerji verimliliğini incelediği belirtilmektedir. Tesis genel olarak enerji talebini şebekeden karşılamakla birlikte, 2022'de faaliyete aldığı 220 kWp'lık PV sistem ile (Şekil 6) tüketiminin 1/3'ü kadar üretim yapar hale gelmiştir.



Şekil 6. Fabrikada yer alan çatı üstü PV sisteminin görüntüsü (Image of the rooftop PV system in the factory)

Araştırmacılar yapılan inceleme sonucunda çeşitli tespit ve önerilerde bulunmuşlardır [217]:

- Enerji denetimi sırasında karşılaşılan en büyük zorluk, durum tespiti ve verim önerileri için ilk adım olarak görülebilecek makine ve binaların enerji verilerini içeren etiketlerdeki eksikliklerdir. Denetim işleminin daha detaylı ve kesin sonuçlara ulaşabilmesi için ilk olarak işletmelerdeki veri etiketlerinin tamamlanması gerekmektedir.
- PV sisteminin kullanılmayan çatı alanı üzerine genişletilmesi ile yıllık 677 MWh üretim kapasitesine ulaşılabilir, bu da yaklaşık olarak fabrikanın yıllık elektrik tüketiminin %51'ne denk gelmektedir. Yapılacak yatırımın geri ödeme süresinin 3 yıl olacağı ön görülürken, ayrıca yıllık 293 ton CO₂ emisyonunun önüne geçilebilecektir.

- Var olan motor sistemlerine değişken hızlı sürücülerin (VSD's) takılması ile yıllık elektrik tüketiminde %4,11 tasarruf sağlanacaktır. Yatırımın geri ödeme süresi 21 ay olurken, CO₂ emisyonunda yıllık 21 tonluk düşüş beklenmektedir.
- Kalıpların alt ve üst yüzeylerine termal levhalar eklenerek hava boşluklu olarak tasarlanması, yıllık yaklaşık 320.000 kWh enerji tasarrufu sağlarken 138 ton CO₂ salınımı engellenebilecektir.
- Tıkanmış, kirli ve eski fanların bakımının doğru yapılması ile %9 enerji tasarrufu sağlanabilir.
- Fan hızlarını düzenlemek için iki merkezi ayarlanabilir hız sürücüsünün (ASD) kurulması ile yıllık yaklaşık 121.461 kWh enerji tasarrufu sağlarken, 53 ton CO₂ azaltımı mümkündür. Sistemin geri ödeme süresinin 8 ay olacağı hesaplanmaktadır.
- İki vidalı kompresörlerde tespit edilen fazla basıncının düşürülmesi ile yaklaşık 9.407 kWh/yıl tasarruf yakalanabilir. Ek olarak yıllık 6,4 ton CO₂ azaltımı öngörülmektedir.
- Atölyede tespit edilen aşırı aydınlatma, gereksiz lambaların söndürülüp gün ışığından daha fazla faydalanılarak bertaraf edilebilir. Bu eylem yaklaşık 23.000 kWh/yıl enerji tasarrufu sağlarken, CO₂ salınımı yıllık 14 ton azaltılabilir.
- Dört fosil yakıt bazlı forkliftin elektrikli forkliftlerle değiştirilmesi ile yıllık 27,6 ton CO₂ emisyonun önüne geçilebilir. Yatırımın tahmin edilen geri ödeme süresi 67 ay olmaktadır.

Martin ve arkadaşlarının çalışmalarına göre [218], yönetim uygulamaları ile üretkenlik arasında pozitif bir korelasyon bulunmaktadır. Yöneticiler ile çalışanlar arasındaki uyum arttıkça çalışan verimliliği de artmaktadır. Bu nedenle bir organizasyon yapısı planlanırken, yönetim kademesinin ön görülen iş tanımına uygun, mesleki yeterliliklerinin yanı sıra sosyal becerilere de sahip doğru kişilerden oluşmasına dikkat edilmesi gerekmektedir [219, 220].

Japonya'daki endüstriyel elektrik tüketimini etkileyen faktörleri araştıran Otsuka [221], çalışmada çeşitli politika önerilerine de yer vermektedir:

- Yerel iklim koşulları ile elektrik tüketimi arasında pozitif korelasyon bulunmaktadır. Yaz aylarının uzun sürdüğü bölgelerde artan klima kullanımı nedeniyle iklimlendirme amaçlı elektrik tüketiminin maliyeti daha yüksek olup,

firmalar maliyet tasarrufu sağlayıcı davranmaya teşvik edilmelidir.

- İşletme büyüklüğü ile enerji verimliliği arasında negatif korelasyon tespit edilmiştir. Çalışan sayısı arttıkça gerekli çalışma alanıyla birlikte elektronik cihaz ihtiyacı da artmaktadır. Artan ofis sayısı, tüketilen elektriğin çalışanlar tarafından eşit paylaşım imkanını azaltması israfa neden olabilmektedir. Bu nedenle büyük işletmelerde enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik politikalara ihtiyaç duyulmaktadır.
- Müessese yoğunluğunun elektrik tüketimi verimliliğini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. İşletmelerin organize sanayi bölgeleri (OSB) gibi alanlarda mekânsal olarak yoğunlaşması, yığılma ekonomileri yoluyla üretkenliği artırmaktadır.

Sonuç olarak birçok araştırmaya göre [222–224] ISO 14001 ve ISO 50001 gibi çevre yönetim sistemlerinin firmalar tarafından benimsenmesi, enerji verimliliğini artırmaya yönelik önemli bir adım olurken, aynı zamanda çalışanların iş motivasyonunu artırıcı çeşitli sosyal faydalar da sağladığı tespit edilmiştir. ISO 50001: Enerji Yönetim Sistemi ve araçları ile yıllık enerji maliyetlerinin %5 ile %20 arasında düşebileceği rapor edilmektedir [81]. Töre ve Eltaş'ta araştırmalarında benzer verim artış oranlarına ulaşmış olup [147], sanayide geniş çaplı bir verim artışının yakalanabilmesi için ISO 50001'in yaygınlaşması gerektiğini ve hatta mümkünse sanayide yasal zorunluluk olarak uygulanmasını aktarmaktadır.

5. ATIK ISI (WASTE HEAT)

Sanayideki enerji verimliliğini artırmaya yönelik güncel çalışmalardan birisi de atık ısının geri kazanımıdır (WHR) [225–228]. Endüstriyel süreçler yan ürün olarak ısı üretirken, genellikle bu ısıdan yeterince faydalanılmamaktadır. Isıtma proseslerinin %50'ye varan oranlarda atık ısıya yol açtığı tahmin edilmektedir [229]. Bu sebeple sanayi sektöründe, endüstriyel atık ısı geri kazanım teknolojisi de dahil olmak üzere çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır [230, 231]. WHR sistemlerini kullanmanın başlıca faydaları aşağıda verilmiştir [232]:

- Fosil yakıtlara olan ihtiyacın azaltılması,
- Sektörel bazda enerji yoğunluğunun düşürülmesi,

- Düşen enerji maliyetlerine bağlı olarak artan kâr marjı,
- Enerji fiyatlarında yaşanacak dalgalanmalara karşı korunma,
- CO₂ emisyonlarının azaltılarak karbon ticareti için fırsat yaratılması.

Isıtmaya ek olarak üretim safhalarında da ciddi miktarda atık ısının ortaya çıktığı bilinirken bu oranın [226, 228];

- Birleşik Krallık'taki sanayi üretiminde ortalama %17,
- ABD'de yaklaşık %20,
- Avrupa Birliğinde ise %15 olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan araştırmalar ve incelenen uygulamalar neticesinde ölçek ve koşullara bağlı olarak WHR'den yararlanılabilecek farklı kullanım alanları tespit edilmiştir:

- Isı üretimi [233],
- Soğutma [234, 235],
- Güç üretimi [236, 237],
- Yakıtlar [238, 239].

Ayrıca, özellikle organize sanayi bölgeleri gibi bütünleşik üretim alanlarında, ısıtma/soğutma hatları üzerinden ihtiyaç fazlası atık ısının diğer üreticilerin kullanımı için aktarılabileceği belirtilmektedir [240, 241].

5.1. Atık Isı Kazanları (Waste Heat Boilers)

Atık ısının geri kazanımı, endüstriyel kazanlarda enerji verimliliğini artırmanın etkili bir yoludur. Bu amaçla, yoğunlaşma kazanlarda, soğuk kaynak ile baca gazı arasındaki sıcaklık farkını artırmayı hedefleyen atık ısı sistemleri önerilmektedir [242]. Bu yaklaşıma göre baca gazı atık ısısının geri kazanımı, enerji verimliliğini artırmak, fosil yakıt tüketimini ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için etkilidir [243, 244].

Çeşitli yöntemler ile elde edilen atık ısı sıcaklık değerlerine göre:

- Yüksek ve orta sıcaklıktaki atık ısı (≥ 70 °C),
- Düşük sıcaklıktaki atık ısı (40–70 °C) olarak iki ana kategoride değerlendirilmektedir.

Kimya, metalurji, kâğıt, tekstil ve inşaat endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan düşük sıcaklıktaki (40–70 °C) atık ısı, üretilen toplam atık ısının yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır [245].

Orta-düşük sıcaklıktaki atık ısının geri kazanılmasına yönelik en yaygın uygulamalar sırasıyla baca gazlarını soğutup, kazan besleme suyunu veya hava/hava-yakıt karışımını ısıtan ısı eşanjörlerini içermektedir [246, 247]. Yan ve arkadaşları [248], mevcut ısıtma kurulumlarına faz değiştirici malzeme (PCM) eklemenin atık ısı geri kazanım sistemi üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, ortalama enerji verimliliğinin %40 oranında arttığını bildirmektedir.

5.2. Sanayiden Örnek Vaka İncelemeleri (Case Studies from Industry)

Remeli [249], termoelektrik ısı borusu jeneratörü kullanarak ısı geri kazanımı ve enerji üretimi için pasif bir ısı değişim sistemi geliştirmiştir. Sistemin eş zamanlı olarak atık ısıyı geri kazanma ve hiçbir yardımcı enerji kullanmadan tamamen pasif bir şekilde elektrik üretme potansiyeline sahip olduğu kanıtlanmıştır.

Jouhara [250], çelik endüstrisi için düz ısı borulu ısı eşanjörü ve ısı geri kazanım sisteminin tasarımı ve üretimi üzerinde çalışmaktadır. Araştırma sonucunda, düz ısı borulu ısı değiştiricinin endüstriyel uygulamalarda atık ısının geri kazanımı için yenilikçi ve yüksek verimli bir teknoloji olduğu sonucuna varılmıştır.

Oğulata ve Doba [251] yaptıkları çalışmada, atık ısı geri kazanım sistemlerindeki yüksek verimliliği nedeniyle çapraz akışlı plakalı ısı değiştiriciyi araştırmışlardır. Sistemdeki sıcaklık, hava hızı ve basınç kayıplarını ölçerek araştırmalarında sistemin etkinliğini değerlendirmişlerdir.

Farshi çalışmasında [252], kademeli sıkıştırma absorpsiyonlu ısı pompası adı verilen yeni bir ısı pompası tasarlayarak bunu diğer ısı pompalarıyla (sıkıştırma, absorpsiyon ve hibrit sıkıştırma-absorpsiyon) karşılaştırmıştır. Araştırmada, dört farklı ısı pompasının verim oranlarının karşılaştırılması amacıyla enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır.

Gibbs çalışmasında [253], kazana ekonomizer takılması sonucunda elde edilecek yakıt tasarruf miktarını araştırmıştır. Yapılan testler, ekonomizerin takılmasıyla %6 ila %16 arasında yakıt tasarrufu sağlandığını göstermektedir.

Butcher ve Litzke [254], kömürle çalışan kazanlarda kullanılan yoğunlaşma ekonomizerlerin etkinliğini ve emisyon kontrolünde baca gazlarının

potansiyel kullanımını inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmaları kapsamında bu tip kazanlara entegre hava ve su soğutmalı ekonomizörler üzerinde ısı transferi hesaplamaları yaparak çeşitli testler gerçekleştirmişlerdir.

He [255], kömürlü enerji santrallerinde atık ısı geri kazanımı için düşük basınçlı bir ekonomizör tasarlayarak sistemin termodinamik analizini gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, düşük basınçlı ekonomizör kullanımının egzoz gazı ısısını etkili bir şekilde geri kazanabileceğini ve bu sayede su tüketiminin azaltılabileceğini belirtmektedir.

Willems [256], endüstriyel kazanlar için gelişmiş sistem kontrolleri ve enerji tasarrufu yöntemlerini inceleyerek, kazanlarda enerji tasarrufu sağlamak için kullanılacak yöntemleri ele almıştır.

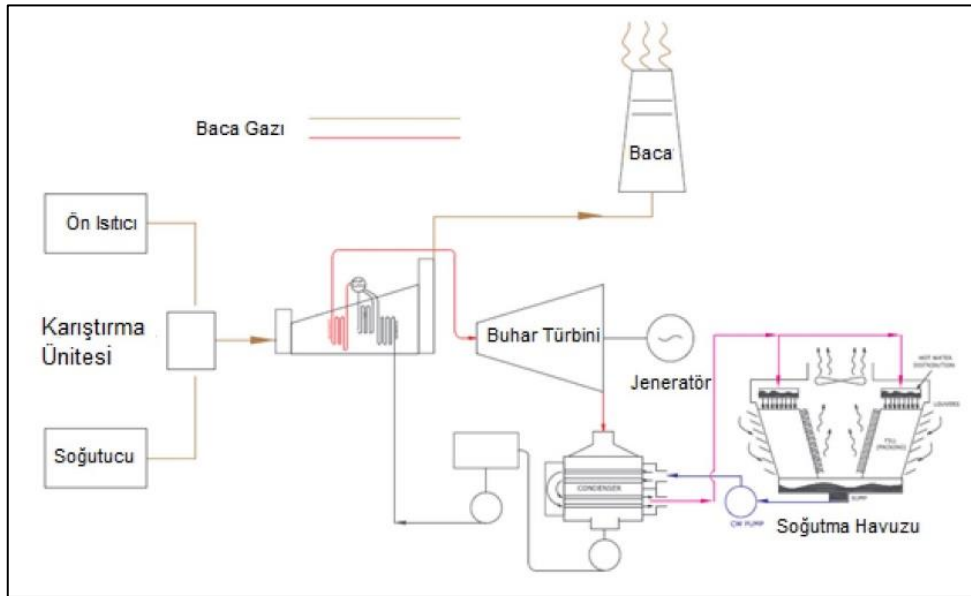
Wang'ın [257] çalışmasında, endüstriyel buhar kazanlarından atık ısı ve suyun geri kazanılması için geliştirilen membran kondenser teknolojisi incelenmiştir. Bu teknoloji ile egzoz buharı miktarının %40 azaldığı ve bu sayede genel verimliliğin %5 arttığı belirtilmektedir.

Peris [258], seramik endüstrisindeki düşük dereceli atık ısının geri kazanılmasında organik Rankine döngüsünün deneysel bir uygulamasını test etmiştir. Araştırmanın amacı, organik Rankine çevriminin performansını gerçek endüstriyel koşullar altında doğrulamak ve uygulamanın maliyet etkinliğini

değerlendirmektir. Isı geri kazanım modeli, laboratuvar testleri ve endüstriyel uygulamalardan elde edilen organik Rankine çevrimi performans verilerine dayanılarak geliştirilmiştir. Sistemin bir mali yıl boyunca elektrik üretimini simüle eden modelde 115 MWh'nin üzerinde enerji üretimi sağlanmıştır. Ramirez ve arkadaşları ise [259], bir çelik fabrikasına uyguladıkları farklı bir model ile 1,8 MW nominal güç çıkışı ve %21,7 net verimlilik elde etmişlerdir.

Çelik endüstrisindeki cüruf soğutma sürecinde atık ısıyı geri kazanmak için kullanılan ısı borulu ısı eşanjörünü inceleyen pek çok araştırma bulunmaktadır [260–262]. Araştırmaların sonuçları, atık ısının geri kazanılmasının enerji ve ekonomik verimliliği artırabileceğini ve CO₂ emisyonlarını azaltılabileceğini göstermektedir.

Naeimi ve arkadaşları [263] yaptıkları çalışmada, enerji israfının büyük kısmının ön ısıtıcı bölgesinde meydana geldiğini belirtmektedir. Şekil 7'de görülebileceği üzere ön ısıtıcıdan çıkan egzoz gazları karıştırma odasından çıkan sıcak hava ile karşılaşmaktadır. Sıcak gazlar ile su arasındaki ısı transferi suyu buhara dönüştürmektedir. Daha sonra buhar türbinine gönderilir ve burada güç üretmek için kullanılır. Isı geri kazanım sistemi ile tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %30'nun geri kazanıldığı hesaplanmıştır. Ayrıca ısı geri kazanımı sayesinde ısıtma veriminin %32,32 arttığı aktarılmaktadır [263].



Şekil 7. Atık ısı geri kazanımı (Waste heat recovery) [263]

6. KOJENERASYON & TRİJENERASYON (COGENERATION & TRIGENERATION)

Kojenerasyon sistemleri, endüstrideki verimliliğe katkıda bulunan yardımcı bileşenlerin başında yer almaktadır. Bu sistemler, ısı ve elektriğin birlikte üretildiği yapılar olduğu için kojenerasyon olarak adlandırılmaktadır (Şekil 8). Isı ve elektrik enerjisinin aynı yerde üretilebilmesi, artan verimlilik ve düşen üretim maliyetleri gibi önemli avantajlar sağlar. Normal şartlarda sadece elektrik üreten bir gaz türbin veya motorunun elektrik dönüşüm verimliliği %30-40 seviyelerindeyken,

kojenerasyon sistemlerinde ısı üretimi ile desteklenen sistemin verimi %80-90'lara kadar çıkmaktadır [264, 265]. Benzer şekilde, termik santrallerin ortalama elektrik üretim verimi %36 iken, ısı verimi %80 seviyesindedir. Elektrik ve ısının ayrı ayrı üretilmesi durumunda ortalama verim %58 seviyesine düşerken, elektrik ve ısının birlikte üretildiği kojenerasyon uygulamalarında verim %85 dolaylarına çıkmaktadır [148]. Kurulumları yapılan tesislerin yüksek verimleri sayesinde ilk yatırım maliyetlerini 1,5-3 yıl gibi bir sürede karşıladığı gözlemlenmiştir [265].



Şekil 8. Kojenerasyon enerji üretim sistemi (Cogeneration energy production system)

Tablo 1. Kojenerasyon uygulamaları (Cogeneration applications)

Endüstriyel Uygulamalar	Konut/Ticari ve Bölgesel Uygulamalar
Tekstil ve çelik endüstrisi	Okullar, Üniversiteler
Gıda Üretimi yapılan tesisler	Hastaneler
Biyokütle kullanılan tesisler	Oteller ve alışveriş merkezleri
Rafineriler	Çok katlı konutlar, büyük siteler
Çimento, seramik vb. fabrikaları	Büyük marketler ve is merkezleri
Kimyasal işletmeler	Özel büyük spor kompleksleri
Kağıt ve selüloz işleme tesisleri	Toplu yerleşim birimleri
Gübre tesisleri	Seralar
Katı ve sıvı atık arıtma tesisleri	

Endüstriyel kojenerasyon yapıları yıl boyunca ısı ve elektriğe talebin yüksek olduğu tesislerde kullanılırken, bu tesisler genel olarak iki grup altında toplanmaktadır (Tablo 1):

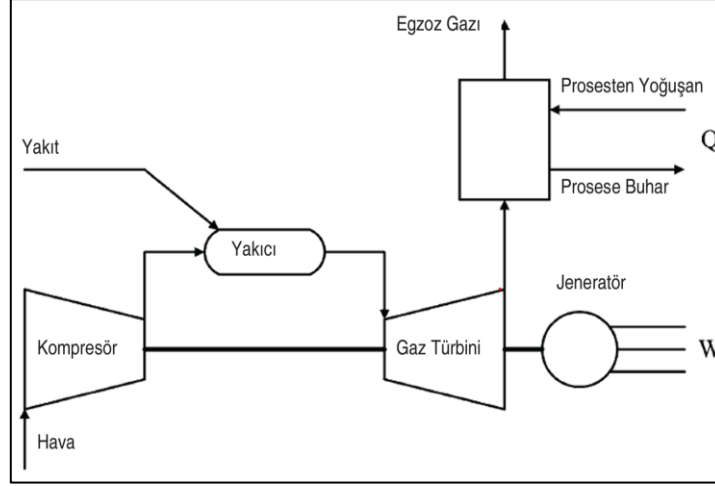
- Yüksek sıcaklıkta termal enerjiye ihtiyaç duyan tesisler (rafineriler, gübre fabrikaları, çelik, çimento, seramik ve cam endüstrileri),
- Düşük sıcaklıkta termal enerjiye ihtiyaç duyan tesisler (kâğıt fabrikaları, tekstil fabrikaları, yiyecek ve içecek fabrikaları).

Endüstriyel kojenerasyon tesislerinde (Şekil 9), proses atıklarından veya prosesin kendisinden termal enerji üretmek mümkündür. Örneğin, kâğıt

fabrikalarında kâğıt yapımı sırasında ortaya çıkan büyük miktardaki atık malzeme (ağaç kabuğu, ıskartalar, kâğıt hamuruna uygun olmayan ağaç parçaları) yardımcı yakıt olarak kullanılabilir veya çelik üretimi sırasında açığa çıkan sıcak gazlar buhar üretim sürecine katkıda bulunabilir. Bu yöntemler, proses atıklarının değerlendirilmesi ve enerji geri kazanımı açısından önemli bir strateji oluştururken, aynı zamanda enerji tüketimini azaltarak çevresel etkileri de azaltmaya yardımcı olur. Bu şekilde endüstriyel işletmeler, atık malzemeleri ve yan ürünleri yeniden kullanarak enerji maliyetlerini düşürebilir ve sürdürülebilir bir üretim sürecine katkıda bulunabilir.

Sanayide ihtiyaç duyulan ısı ağırlıklı olarak buhar formundadır. Bu nedenle, gaz türbini çevriminin çıkışındaki egzoz gazlarının ısısından buhar elde edilerek enerji üretiminde kullanılan kombine çevrimli kojenerasyon sistemleri endüstriyel tesislerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

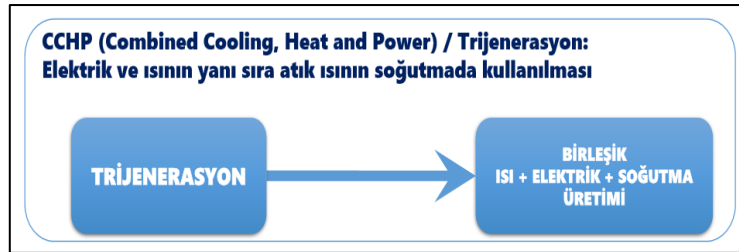
Endüstriyel kojenerasyon tesislerinin yılda 8.000 saat ve üzerinde sürekli çalışabilmesi, yüksek ısı potansiyeline sahip gelişmiş ülkelerde kojenerasyonun uygulanabilir bir seçenek haline gelmesini sağlamaktadır [264].



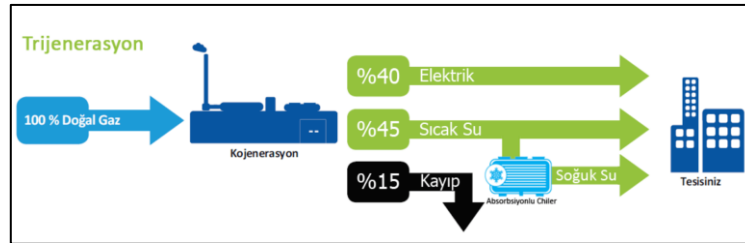
Şekil 9. Endüstriyel kojenerasyon (Industrial cogeneration)

Trijenerasyon sistemi ise, ısı üretimi sağlayan kojenerasyon sisteminin ek bir soğutma özelliği eklenmiş versiyonudur (Şekil 10). Trijenerasyon sistemi şebekeye yalnızca elektrik ve ısı enerjisi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda soğutma hattına soğuk su takviyesi de yapmaktadır. Trijenerasyon

sistemi, soğutma için gerekli olan soğuk suyu absorpsiyonlu chiller aracılığıyla sağlar (Şekil 11). Absorpsiyonlu chiller ünitesi, lityum bromür gibi bir soğurucu madde içerir ve motor tarafından gönderilen sıcak suyu absorbe ederek şebekeyi 12-7°C sıcaklıkta tutar [264].



Şekil 10. Trijenerasyon enerji üretim sistemi (Trigeneration energy production system)



Şekil 11. Trijenerasyon sistem şeması (Trigeneration system diagram) [266]

7. KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA (CARBON CAPTURE AND STORAGE)

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkilerini azaltma amacıyla belirlenen 2030'a kadar 2°C hedefinin yanı sıra, ülkeler için bir diğer ortak hedef

de 2050 yılına kadar karbon nötr olmaktır. Bu hedefe ulaşmak için çeşitli sektörel inovasyonların kullanılması gerekmektedir [267, 268]. Sanayi alanında bu hedefe ulaşmak için geliştirilen teknolojik alternatiflerden biri karbon yakalama ve depolama (CCS) yöntemidir [177, 269–271].

Karbon yakalama kısaca, endüstriyel ve termik santral bacalarından salınan veya atmosferde bulunan CO₂'in doğrudan hava yakalama (DAC) teknolojisiyle teknolojisiyle toplanarak ayrıştırılması işlemidir [272, 273]. Bu süreçten sonra toplanan CO₂ depolanabilir veya tekrar gerekli alanlarda hammadde olarak kullanılabilir [274, 275]. Yakalanıp depolanan CO₂'ten daha sonra mavi hidrojen üretiminde faydalanılabilmektedir.

Endüstriyel bacalardaki yakalama teknolojileri [276, 277]:

- Yanma sonrası,
- Ön yakma,
- Oksi-yakıt yanması,
- Kimyasal döngü yanması olarak sınıflandırılabilir.

Karbon yakalamanın kullanılması, demirçelik, çimento ve cam gibi yüksek karbon yoğunluğuna sahip endüstrilerde CO₂ emisyonlarının önemli ölçüde azaltılmasına yardımcı olmaktadır [16, 268, 278–281]. IEA tarafından hazırlanan ve çimento, çelik sektörleri ile birlikte petrol rafinelerini de kapsayan 2055 emisyon tahminlerine göre, AB'deki imalat sektöründe, 2016 yılına kıyasla sabit bir büyüme oranı varsayımıyla %25 artış beklenmektedir [282]. Bu sektörlere ek olarak, halihazırda fosil yakıtlarla çalışan termik santrallere de karbon yakalama entegre edilebilmektedir [283].

Böylece enerji üretiminde karbon yakalamanın yaygınlaşması sağlarken, aynı zamanda enerji sektörünün neden olduğu CO₂ salınımı azaltılarak sektörde yaşanan yeşil dönüşüm hızlandırılabilir [281].

Cachola ve arkadaşlarının görüşüne göre [284], endüstriyel fırınlarda hidrojenin kullanılması, karbon yakalama gereksinimini azaltabilir. Dolayısıyla, karbon yakalama ile hidrojenin birlikte kullanımının araştırıldığı çalışmaların büyük önem taşıdığı ifade edilmektedir.

7.1. CO₂ Taşımacılığı (CO₂ Transport)

Avrupa'da karasal CO₂ depolamaya karşı var olan güçlü muhalefet nedeniyle, yalnızca açık denize kıyısı olan dört ülkenin (Hollanda, Kanada, Norveç, ABD, İngiltere) CCS tesisi bulunmaktadır [285]. CO₂ taşımaya uygun limanlar için aday ülkelerin liman konumları, Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 12. Avrupa için olası CO₂ ithalat/ihracat limanları (Potential CO₂ import/export ports for Europe)

Ortak CO₂ taşıma ve depolama altyapısına yatırım yapmak, ölçek ekonomilerinden faydalanarak birim maliyetleri azaltabilir ve yeni tesislerin kurulmasını daha çekici hale getirebilir. Kurulması planlanan yeni merkezlerin sonrasında başka yatırımları da teşvik edeceği düşünülmektedir. Bu nedenle zaman içinde gelişen ve komşu ülkeleri birbirine bağlayan bir boru hattı ağı, CO₂'nin kıyıya taşınması için en ideal yol olarak önerilmektedir.

Açık deniz CO₂ taşımacılığı için iki yöntem öne çıkmaktadır:

- Açık deniz boru hatları,
- Gemi taşımacılığı.

Açık deniz boru hatları, kısa ve orta mesafelerde yüksek kapasite taşımacılığı için uygunken, uzun mesafelerde gemi taşımacılığı düşük yatırım maliyeti ve esnek planlama olanağı ile en ekonomik çözüm olarak değerlendirilmektedir [286, 287].

Dünya çapındaki karbon yakalama ve depolama tesislerine bakıldığında zaman, 2023'ün ikinci çeyreği itibarıyla 41'i faal durumda (49 Mtpa CO₂), 26'sı inşaat halinde (32 Mtpa CO₂) ve 325'i geliştirme aşamasında (280 Mtpa CO₂) olmak üzere toplamda 392 CCS tesisi bulunduğu belirlenmiştir [288]. 2050 yılına kadar sıfır emisyon hedefine ulaşma çabaları göz önüne alındığında, faal olan projelerin sayısının hala nispeten düşük olduğu görülmektedir [283]. Yapılan araştırmalara göre, küresel ısınmayı 1,5°C'de sınırlamak için atmosferdeki 10 milyar ton CO₂'in yakalanması gerektiği hesaplanmıştır. Bu değer faaliyette bulunan tesislere ek olarak yaklaşık 2.000 karbon tesisinin daha işletmeye sokulması gerektiği anlamına gelmektedir [281, 289]. Karbon yakalama potansiyeli en yüksek ülkeler olarak, CO₂ üretim oranları dikkate alındığında Çin ve Amerika Birleşik Devletleri öne çıkmaktadır [284].

7.2. Alt Sektörler (Industrial Subsectors)

Karbon yakalama teknolojisinin uygulanmasına uygun ana sektörler örnek olarak demirçelik, çimento, enerji üretim santralleri, kimya endüstrisi, petrol rafineleri ve kâğıt üretim tesisleri gösterilebilir [284].

Demirçelik sektöründeki en büyük karbon yakalama potansiyeli, büyük üretim kapasiteleri nedeniyle entegre tesislerde bulunmaktadır. Özellikle tesislerde bulunan yüksek fırınların neden olduğu CO₂ salınımının %65'inin tutulabileceği hesaplanırken, bunu sırasıyla kok (%27) ve sinterleme (%6) tesisleri takip etmektedir [177].

Çimento endüstrisinde karbon yakalama teknolojisinin kullanımıyla ilgili tahmini sektörel verimlilik yaklaşık %85 seviyelerindedir. Bu oran, geleneksel mono etanolamin (MEA) karışımlarının yaklaşık iki katına eşittir [177]. Cormos ve meslektaşlarının [290] farklı karbon azaltma yöntemlerini karşılaştırdıkları vaka çalışmalarında ise, karbon yakalama teknolojisinin uygulandığı bir çimento fabrikasında verimlilik %90'a ulaşmaktadır. Uygulama sonucunda fabrikanın CO₂ emisyonlarında %92'lik bir azalma gözlemlenmiştir.

Hanak ve ekibinin [291] araştırmasına göre, kimyasal döngü teknolojisine dayalı karbon yakalama yöntemi diğer geleneksel yöntemlere kıyasla CO₂ emisyonlarını azaltma konusunda çeşitli tekno-ekonomik avantajlar sunmaktadır. Kömürle çalışan termik santrallerde karbon yakalama teknolojilerinin kullanımını inceledikleri araştırmada:

- Kimyasal döngü bazlı karbon yakalama teknolojisinin (%5-8),
- Oksi-yakıt yakma teknolojisinin (%8-12),
- Amin bazlı yanma sonrası tutulum metodunun ise (%9,5-12,5) verim kaybına neden olduğu ortaya çıkmıştır.

Kimya endüstrisi bir diğer enerji ve karbon yoğun sektör olarak karşımıza çıkmaktadır [292], öyle ki endüstri sanayinin toplam enerji tüketiminin %5,8'nden sorumludur [267]. Karbon yakalama çevresel bir çözüm olarak öne çıkmakta olup, kimya endüstrisinde kullanılmasıyla sera gazı emisyonlarında %15'lik bir azalmanın mümkün olduğu belirtilmektedir [293].

Karbon yakalamadan faydalanılabilecek diğer bir işletme olarak petrol rafineleri incelendiğinde ise, amin bazlı yanma sonrası karbon tutulum metodunun %65'lik CO₂ yakalama oranı ile tesislerde kurulması en muhtemel karbon yakalama teknolojisi olduğu belirtilmektedir [177].

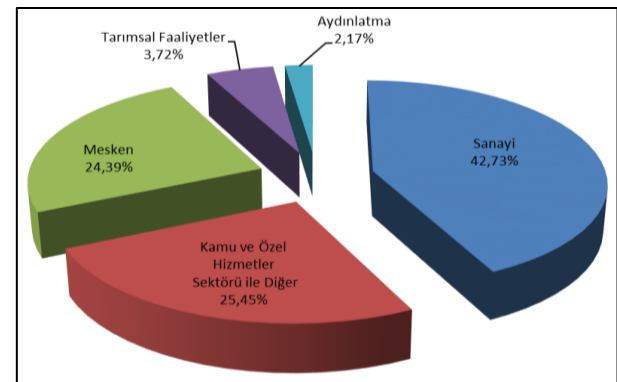
8. TÜRKİYE ÖRNEĞİ (THE CASE OF TURKEY)

Enerji talebindeki artışlar, enerji politikalarının odaklanma noktasını enerjinin verimli kullanımına çevirmiştir [294]. Bu nedenle, enerji verimliliğinin artırılması ve ithalata olan bağımlılığın azaltılması için etkin politikalara öncelik verilmesi son derece önemlidir. Sanayi sektörlerinin temiz enerji teknolojilerine yönelik çabaları desteklenmeli ve teşvik edilmelidir [295].

8.1. Elektrik Tüketimi (Electricity Consumption)

Türkiye'nin Ulusal Enerji Planına göre, elektrik tüketiminin 2000'den 2020'ye kadar yıllık ortalama %4,4 artışla 128 TWh'den 306,1 TWh'e yükseldiği belirtilmektedir. 2035 yılına kadar ise ortalama %3,5 artışla tüketimin 510,5 TWh'e ulaşması öngörülmektedir. Projeksiyonlara göre süreç boyunca sanayi sektörünün tüketiminde ortalama %3,7 artış beklenirken, bu oranın hane halkında %2,3 olacağı hesaplanmaktadır [296].

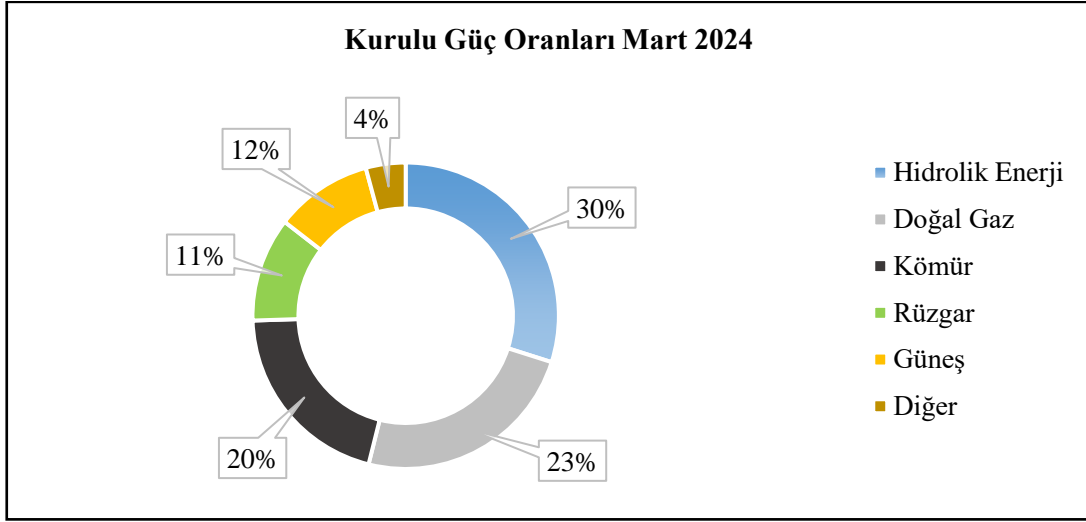
Türkiye genelinde faturalanan elektrik tüketimi incelendiğinde, 2022 yılında 253 TWh olarak gerçekleştiği belirlenmiştir [297]. Şekil 13'te gösterilen dağılıma bakıldığında, tüketilen toplam elektriğin yaklaşık %43'ünün sanayide üretimi desteklemek için ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma gibi gereksinimler için kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 13. 2022 yılı faturalanan tüketimin tüketici türüne göre dağılımı (%) (Consumer type distribution of invoiced consumption in 2022) [297]

Kurulu güç miktarı 2024 Mart sonu itibarıyla 107.959 MW'a ulaşırken, kaynaklara göre dağılımı Şekil 14'te gösterilmektedir. Elektrik tüketimine

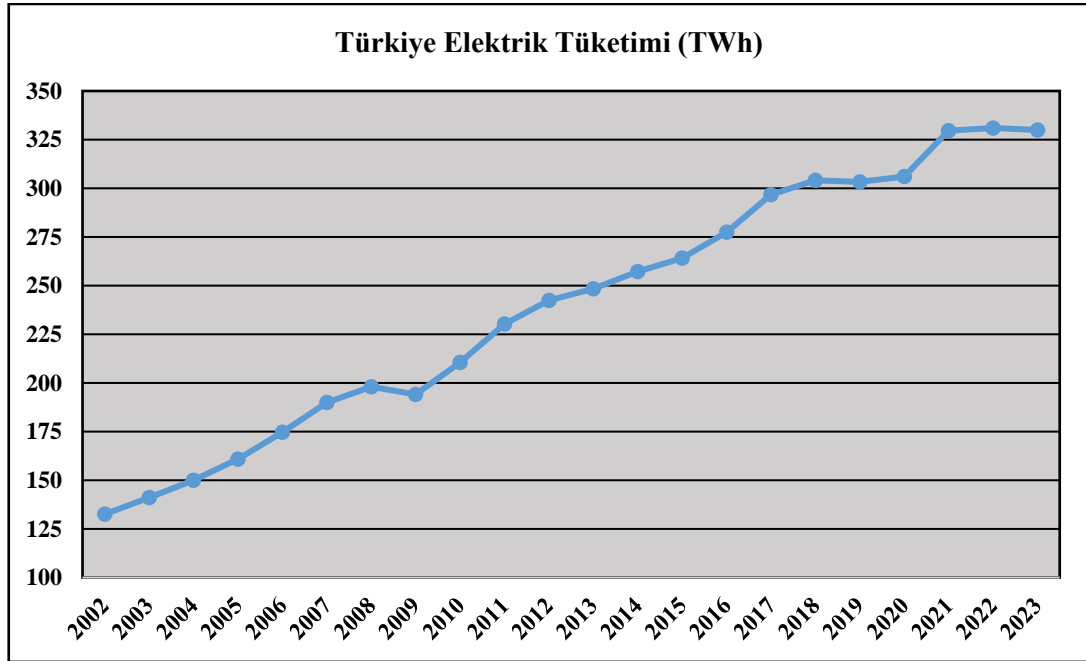
bakıldığı zaman ise, 2023 yılında bir önceki yıla göre %0,2 oranında azalarak 330,3 TWh olarak gerçekleştiği saptanmıştır [298].



Şekil 14. Mart 2024 itibarıyla kurulu güç oranları (%) (Installed capacity rates as of March 2024) [298]

Türkiye'nin elektrik tüketiminin 2002-2023 yılları arasındaki değişimi incelendiğinde (Şekil 15), 2008 yılındaki küresel ekonomik kriz ile 2019 yılındaki

COVID-19 pandemi süreci haricinde genel bir artış eğilimi gösterdiği görülmektedir.



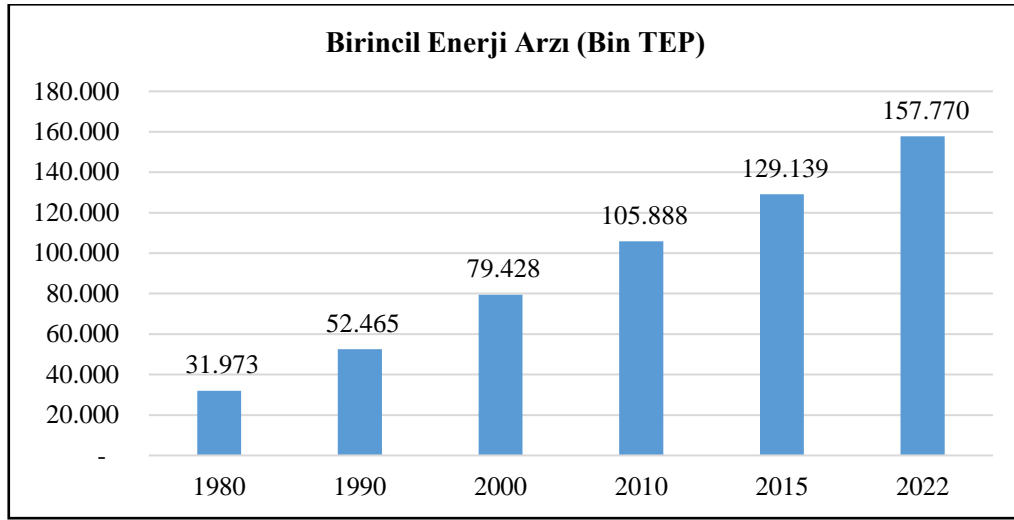
Şekil 15. 2002-2023 yılları arasında Türkiye elektrik tüketiminin değişimi (Change in Türkiye's electricity consumption between 2002-2023)

8.2. Enerji Görünümü ve Enerji Verimliliği

Kavramı (Energy Outlook and Energy Efficiency Concept)

Şekil 16'da görüldüğü üzere Türkiye'nin 1980 yılında 31,9 milyon TEP olan birincil enerji arzı, 2022 yılında 157,8 milyon TEP'e ulaşmıştır [299].

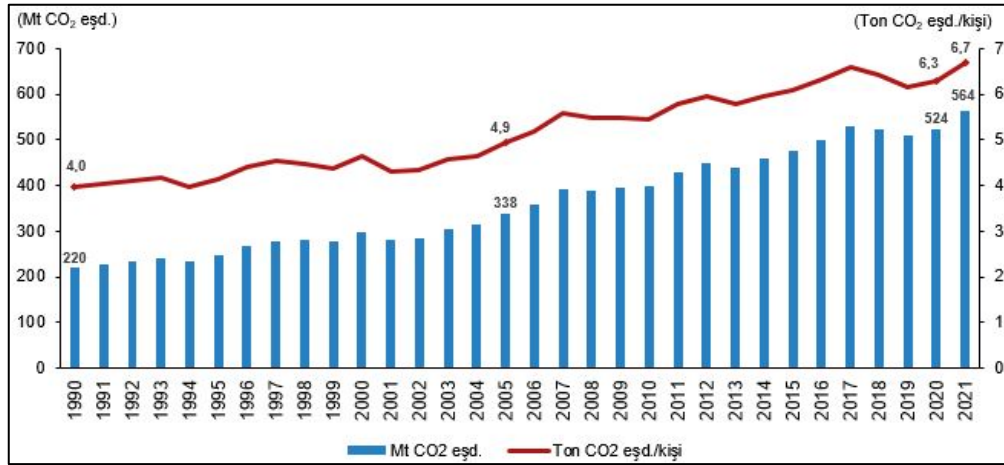
Türkiye'nin enerji talebi üzerine yapılan bir çalışmada ise 2040 yılı için enerji talep tahmininin 220,8 milyon TEP olarak hesaplandığı belirtilmektedir [300]. Bu veriler ışığında, Türkiye'nin enerji talebinin zaman içinde daha da artacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 16. Türkiye'nin yıllar içerisindeki enerji arzı (Turkey's energy supply over the years)

Sera gazı emisyon miktarının 1990-2021 yılları arasındaki değişim istatistiklerine göre (Şekil 17), 2021 yılı toplam sera gazı emisyonu bir önceki yıla göre %7,7 artarak 564,4 milyon ton (Mt) CO₂ eşdeğeri olarak hesaplandığı belirtilmektedir [301].

1990 yılındaki kişi başı toplam sera gazı emisyonu 4 ton CO₂ olurken, 2021 yılında bu değer 6,7 ton CO₂ seviyesine çıktığı görülmektedir.



Şekil 17. Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu, 1990-2021 (Total and per capita greenhouse gas emissions, 1990-2021) [301]

Enerji verimliliği ile ilgili bir diğer önemli çalışma, Amerika Enerji Verimli Ekonomi Konseyi'nin (ACEEE) 2022 yılı raporudur. 2022 yılı Uluslararası Enerji Verimliliği Puan Tablosu (The 2022 International Energy Efficiency Scorecard)

adlı raporda Türkiye dahil 25 ülkenin uyguladıkları enerji verimliliği politikalarına göre karşılaştırma yapılmıştır. Sanayi kategorisinde aldıkları toplam puanlara göre ülkeler Tablo 2'de sıralanmaktadır [302].

Tablo 2. 2022 Uluslararası Enerji Verimliliği Puan Durumu Sanayi (International energy efficiency standings)

Sıralama	Ülkeler	Puan	Sıralama	Ülkeler	Puan
1	Japonya	21	13	Hindistan	12,5
2	İngiltere	20,5	15	Amerika	12
3	Almanya	19,5	16	Rusya	10
4	İtalya	18,5	17	Çin	9,5
5	Fransa	18	18	Brezilya	9
6	İspanya	16	18	Kanada	9

Sıralama	Ülkeler	Puan	Sıralama	Ülkeler	Puan
6	Tayvan	16	20	Mısır	8
8	Endonezya	15	21	Polonya	7,5
8	Güney Kore	15	22	Avustralya	6
8	Hollanda	15	23	Suudi Arabistan	5,5
11	Türkiye	13,5	24	Birleşik Arap Emirlikleri	3
11	Meksika	13,5	25	Güney Afrika	1
13	Tayland	12,5			

ACEEE raporuna göre, Türkiye'de endüstriyel enerji yoğunluğunun yüksek seyretmesine rağmen, sanayi sektöründe enerji verimliliğine yönelik cazip teşvikler bulunmaktadır. Raporda belirtildiğine göre, sanayicilerin enerji yoğunluklarını üç yıllık süreçte ortalama %10 oranında azaltma taahhüdünde bulunmaları durumunda, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün takip eden yıl enerji maliyetlerinin %20'sini sübvansedeceği ifade edilmektedir. Son olarak, raporda Türkiye'nin enerji verimliliğini artırmak için büyük endüstriyel tesislerde enerji yöneticilerinin istihdam edilmesine yönelik talimatların uygulanmasından, ISO 50001 sertifikalı tesislerin sayısının artırılmasından ve endüstriyel Ar-Ge yatırımlarının artırılmasından bahsedilerek, bu adımların ulusal enerji yoğunluğunun azaltılmasına katkı sağlayabileceği vurgulanmaktadır [302].

Türkiye'deki sanayi sektöründe enerji tasarrufu potansiyelinin en az %20 olduğu ve bu tasarrufun yaklaşık %50'sinin küçük yatırımlarla ve iki yıldan az geri dönüş süreleriyle elde edilebileceği tespit edilmiştir. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün yaptığı çalışmalara göre, Türkiye'nin toplam birincil enerji talebi içerisinde %15 tasarruf potansiyeli bulunmaktadır [303].

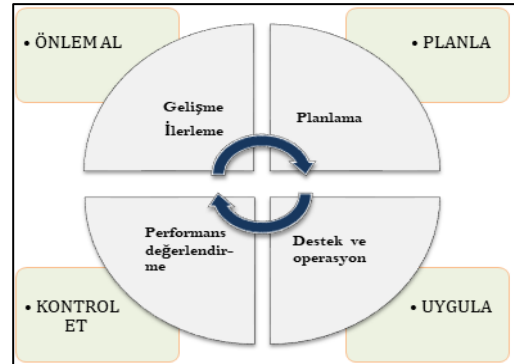
8.3. Enerji Verimliliği Politikaları (Energy Efficiency Policies)

Sanayide enerji verimliliğine yönelik sürdürülebilir bir yaklaşımın benimsenmesi önemlidir. Bu yaklaşım, enerji politikalarının incelenmesi, atanan enerji yöneticisi tarafından 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ve Enerji Verimliliği Strateji Belgesi dahil olmak üzere mevcut mevzuata uygunluğun denetlenmesi, ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi ve Enerji Denetimlerinin gerçekleştirilerek işlemlerin doğrulanması gibi adımları içermektedir [197].

ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi (EnYS) Standardı, enerjinin verimli kullanılmasıyla enerji

israfının önlenmesi, ekonomi üzerindeki enerji yükünün azaltılması ve çevresel etkilerin minimize edilmesine yönelik usul ve esasları düzenlemektedir [304]. 2022 yılında dünya genelinde verilen ISO 50001 sertifikalarının sayısı yaklaşık %30 artarak 28.000'e yükselmiştir [33].

ISO 50001 EnYS modeli Şekil 18'de sunulan şekilde planla, uygula, kontrol et, önlem al (P-U-K-Ö döngüsü) olarak özetlenebilir. Bu döngü, kuruluşların günlük rutin uygulamalarıyla birlikte enerji yönetimini içeren sürekli iyileştirme çerçevesine dayanır [190].



Şekil 18. ISO 50001 EnYS modeli için PUKÖ döngüsü (PDCA cycle for ISO 50001 EnYS model) [190]

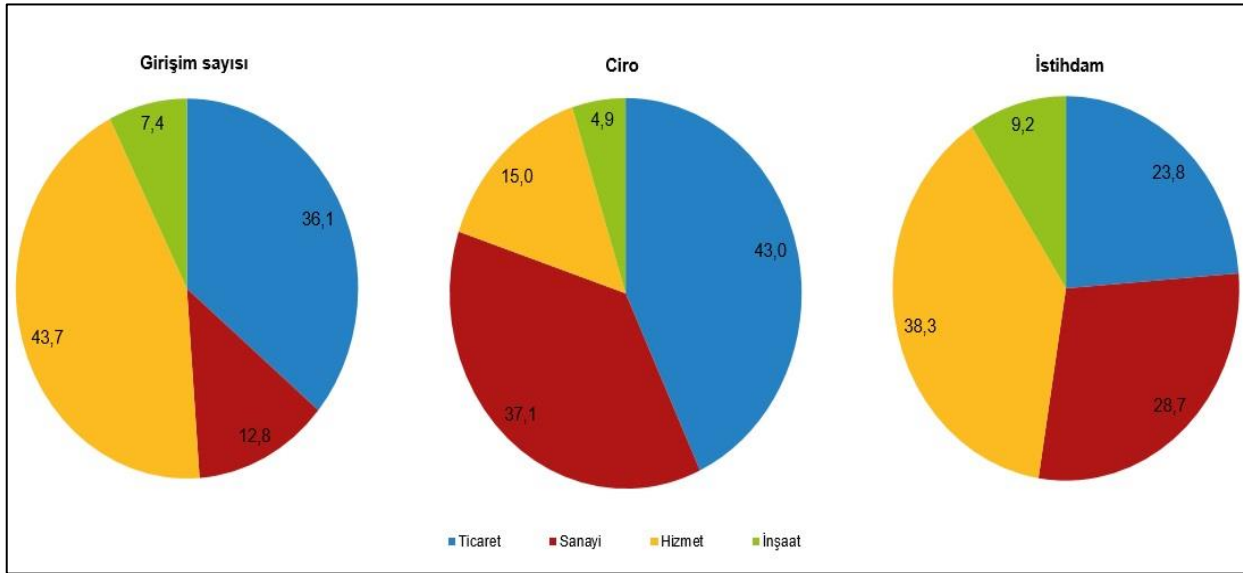
Planlama, enerji yönetimi programının en kritik unsurudur ve iki temel işlevi vardır. İlk olarak, iyi bir planlama ile firmalar enerji arzı noktasında yaşanabilecek sorunlardan korunabilir. Sonrasında, enerji yönetimi programı yıl boyunca devamlı vurgulanarak programın etkin ve işletilebilir kalması sağlanır. Planlama sürecinde elde edilen eylem planları ve diğer çıktılar, uygulama ve işletim aşamasında kullanılır. Tüm çalışanlar, enerji kullanımının önemine dair farkındalıklarının artırılması, eğitime katılım ve yetenekleriyle bağlantılı deneyime sahip olmaları için desteklenmelidir. Süreç boyunca firma içerisinde enerji performansını etkileyen faaliyetlerin temel özelliklerinin düzenli olarak takip edilmesi, ölçülmesi ve analiz edilmesi gerekmektedir.

Önlem al aşamasına gelindiğinde ise, firma yönetimleri enerji yönetimini güvence altına almak amacıyla düzenli aralıklarla gözden geçirmelidir. Bu gözden geçirme, uygunluk, yeterlilik ve etkinlik açısından gerçekleştirilmelidir.

T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)'nın 2012 yılında yayınladığı Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliğinin Tebliği'ne göre; enerji verimliliği %80'in üzerinde olan durumlarda, güç sınırı olmadan lisanssız kojenerasyon tesislerinin kurulmasına izin verilmektedir. Bu tebliğe göre, mikro ölçekli kojenerasyon uygulamaları evlere kadar yaygınlaştırılabilecek ve böylece bireyler kendi elektriğini üretme imkânına sahip olacaktır [6].

8.4. Sanayi Sektörüne Genel Bakış (Industry Overview)

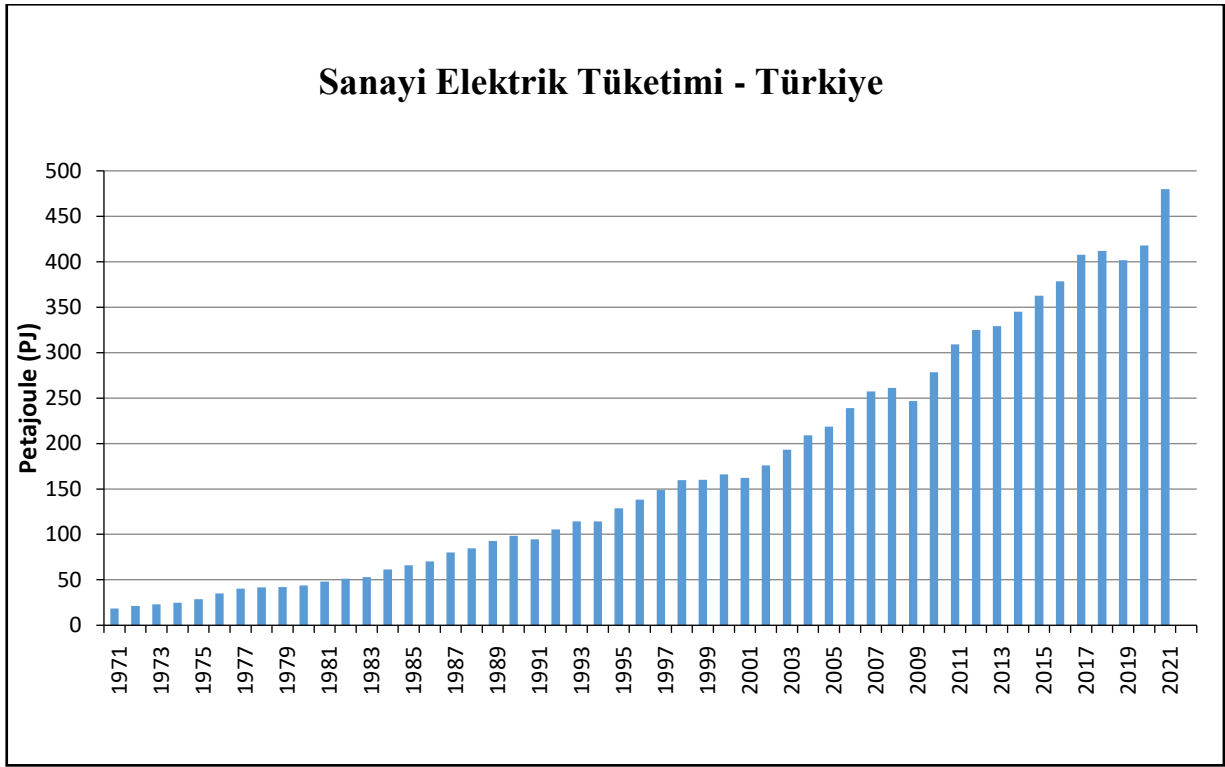
Türkiye'nin 2023 yılındaki nüfusu 85 milyon 372 bin 377 kişi olarak kaydedilirken [305], Sektör Bilançoları İstatistikleri idari kayıtlarında bilanço esasına göre defter tutan 983 bin 182 girişim tespit edilmiştir [306]. Faal girişimlerin %43,7'si hizmet sektöründe yer alırken, onu %36,1 ile ticaret sektörü takip etmektedir. İstihdam verilerine göre 2022 yılında hizmet sektörü toplam istihdamın %38,3'ünü oluştururken, ikinci sırada %28,7 ile sanayi sektörü gelmektedir [307]. Sanayi sektörü var olan işletmelerin %12,8'ni oluşturmasına rağmen, toplam cironun %37,1'ni üretmektedir (Şekil 19). Bu durum katma değerli üretimin önemini ortaya koyan verilerden birisidir. Buna ek olarak sanayi, inşaat ve ticaret-hizmet sektörlerinin toplamında ücretli çalışan sayısı Aralık 2023 tarihinde %1,7 artarak 15 milyon 57 bin 373 kişi olmuştur [308].



Şekil 19. 2022'deki girişim sayısı, istihdam ve cironun sektörlere göre oransal dağılımı (%) (The proportional distribution of the number of enterprises, employment, and revenue by sector in 2022) [307]

Türkiye'deki sanayi sektörünün 1971-2021 arasındaki elektrik tüketiminin değişimi incelendiğinde (Şekil 20), ekonomik krizler ve pandemi süreci dışında gözlenen düzenli artışın, Türkiye'nin genel elektrik tüketimi (Şekil 15) ile paralellik gösterdiği görülmektedir. Tüketim artışının sekteye uğradığı başlıca kriz yılları:

- 1990 Körfez Krizi,
- Nisan 1994 krizi,
- 2001 krizi,
- 2008 küresel ekonomik krizi,
- 2019 COVID-19 pandemisi.



Şekil 20. Sanayinin 1971-2021 arası elektrik tüketimi (Industrial electricity consumption from 1971-2021) [309]

8.5. Türkiye’de Ticari Açıklık ve Büyümenin Enerji Tüketimine Olan Etkisi (The Impact of Trade Openness and Economic Growth on Energy Consumption in Turkey)

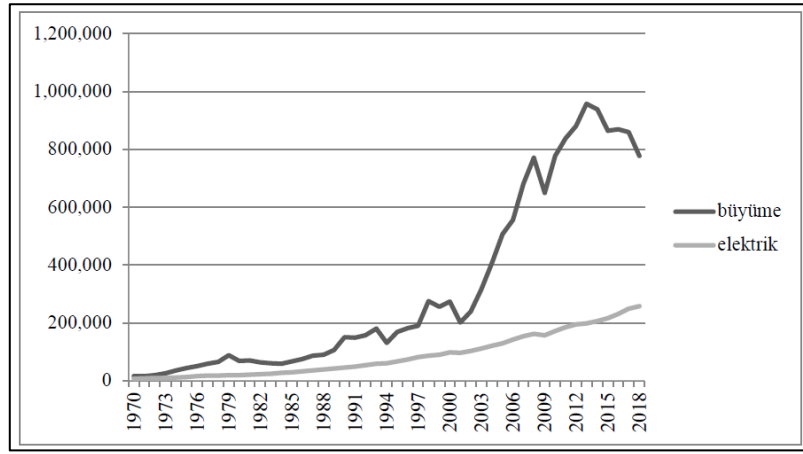
Ekonomik büyüme genellikle, Reel Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) artışına bağlı olarak ölçülmektedir [310]. Dışa açıklığın ve serbest ticaretin güçlü olduğu ülkelerin daha hızlı büyüyeceği inancı iktisat literatüründe birçok çalışmaya konu olmuştur. Özellikle 1990’lı yıllarda artan bir ivme kazanan bu liberalizasyon olgusunun, Güneydoğu Asya ülkeleri üzerindeki etkisi diğer ekonomilerin de dikkatini çekmeyi başarmıştır [311]. Ancak üretim sürecinin başlatılması, devam ettirilmesi ve ticaretin yapılabilmesi için enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır [312, 313].

Temelleri Solow [314] ve Swan [315] tarafından çeşitli çalışmalarda atılan büyüme modelinde, teknolojik ilerlemenin büyüme doğrudan tetikleyici etkisinin olduğu ileri sürülmektedir. Bu modelde dışsal olarak yerini alan teknolojik düzey daha sonra Romer’in [316] İçsel Büyüme Modelleri ile güncellenerek içsel olarak kabul edilmiştir. Bu

teori, günümüzdeki ekonomik verilerinin çoğu tarafından da desteklenmektedir. Günümüz dünyasında nüfus artışı, teknolojik gelişmeler ve değişen tüketici alışkanlıkları gibi pek çok nedenden ötürü enerji talebinin giderek artması beklenmektedir.

Literatürde enerji tüketimi ile büyüme arasındaki olası ilişkinin kapsamlı olarak araştırıldığı görülmektedir. Paul ve Bhattacharya [317] Hindistan’ın enerji ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkisini inceleyerek, enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasında iki yönlü bir nedensel ilişkinin varlığını ortaya koymuştur. Diğer pek çok araştırmacı da bu sonuçları desteklemiş ve Türkiye ile diğer farklı ülkeler özelinde yaptıkları araştırmalarda aynı korelasyonu tespit etmişlerdir [318–336].

Türkiye’nin enerji talebi, 1980’lerde serbest piyasaya açılmasının ardından artış göstermiştir [337]. Şekil 21’de Türkiye’nin 1970-2018 yılları arasında elektrik tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki pozitif korelasyon görülebilmektedir [338].



Şekil 21. Türkiye’de 1970-2018 yılları arası ekonomik büyüme ve elektrik tüketimi (Economic growth and electricity consumption in Turkey between 1970-2018) [338]

Türkiye'nin kendi iç dinamikleri nedeniyle 1980 ve 1994 yapısal krizlerin yanı sıra, dünya çapında yaşanan 2001 ve 2008 ekonomik kriz yıllarında da ekonomik büyüme ciddi bir düşüş göstermiştir. Şekil 21'deki büyüme oranları buna işaret etmektedir.

8.6. Enerji Verimliliği: Örnek Çalışmalar (Energy Efficiency: Case Studies)

Caffal'ın araştırması [339], Enerji Yönetim Sistemi uygulamalarıyla sanayinin toplam enerji tüketiminde %40'a kadar tasarruf yaşanabileceğini göstermektedir. Bu çalışmaya ek olarak, enerji denetimleri ve gönüllü anlaşmalar gibi enerji yönetiminin farklı unsurlarının uygulanmasının çeşitli kuruluşlarda enerji tasarrufuna yol açtığını gösteren farklı araştırmalar da bulunmaktadır [340–342]. Yapılan çalışmalar [59], enerji yönetiminin doğru bir şekilde uygulanmasının Türk sanayisinin enerji yoğunluğunu düşürerek dünya ile rekabet gücünü artıracak ve Türkiye’de giderek artan enerji talebini frenleyeceğini göstermektedir.

Enerji yönetiminin uygulanmasına ilişkin bir araştırmada, dünya genelindeki kuruluşların yalnızca %3-14’ünün enerji yönetimi uyguladığı görülürken, bu oran İsveç’te %25-40, Türkiye’de ise %22 düzeyindedir [343]. Enerji yönetimi çalışmalarıyla elde edilen verilere dayanarak, enerji verimliliği iyileştirmelerinin herhangi bir özel programa bağlı olmaksızın %5 ile %15 arasında geri dönüş ve iyileştirmeler sağlayabileceği öngörülmektedir [344].

Ateş ve Durakbaşa çalışmasında [59], Türk sanayisinin toplam enerji tüketiminin %68’ini oluşturan çimento, kağıt ve kağıt hamuru,

demirçelik, seramik ve tekstil gibi sektörlerde enerji yönetimi kullanımını araştırarak enerji verimliliğini analiz etmişlerdir.

Yıldız ve arkadaşlarının [148] çeşitli sanayi sektörlerini ele aldıkları araştırmaları neticesinde, sanayi tesislerinin %95’inde %5-40 arasında enerji tasarrufunun mümkün olduğu tespit edilmiştir. Daha da çarpıcı olanı, sanayi tesis ve işletmelerde çok az veya hiç yatırım yapılmadan gerçekleştirilecek önlemlerin uygulanmasıyla minimum %10 enerji tasarrufu sağlanabilmesidir. Bu oran enerji tüketimine ve enerji tasarrufuna verilmesi gereken önemi ortaya koymaktadır.

Türkiye’nin tekstil ihracatı, 2021 yılında bir önceki yıla göre %31,0 oranında artarak 16,2 milyar dolar seviyesine yükselirken, dünya pazarından aldığı pay %4,2 ile 4’üncü sıraya yükselmiştir [345]. Tekstil sanayisi, enerji yoğun sektörlerden biri olarak değerlendirilmekte olup, sektördeki toplam maliyetlerin %10’dan fazlasını enerji tüketimi oluşturmaktadır [346]. Bu durum enerji maliyetlerini düşürmeye yönelik çok sayıda araştırmanın yürütülmesine yol açmıştır. Örneğin Gelir’in tez çalışmasında [347], bir tekstil fabrikasının terbiye bölümünde yer alan ramöz makinelerinde atık ısı geri kazanımının sağlanabilirliği ile ilgili araştırma yapmıştır. Termodinamik analizi yapılan ramöz makinasına atık ısı geri kazanımı için bir eşanjör tasarlanmış ve sistemin yakıt tüketim değerleri karşılaştırılmıştır. Benzer bir çalışmayı yürüten Tunç ve arkadaşları [348], İstanbul’da bulunan farklı bir fabrikaya uygulanacak atık ısı yatırımının enerji maliyetini yaklaşık %11 azaltarak, sistemin kendisini 2 ile 4 yıl arasında geri ödeyeceğini belirtmektedir.

Tekstil sektöründeki bir diğer işlem olan boyama sırasında oluşan atık ısının geri kazanılma potansiyelini araştıran Can [349], gövde ve borulu sudan suya ısı eşanjörü ile atık ısı geri kazanım sisteminin verimli çalışma koşullarını optimize etmek için enerji temelli bir yaklaşım kullanmıştır. Sistem performansını etkileyen parametreler arasında girişteki atık su sıcaklığı, kütleles akış hızı, soğutma suyunun giriş basıncı ve referans durum koşulları bulunmaktadır. Koçlu [350] ise, boyama işleminden sonra ortaya çıkan yüksek yoğunluk ve sıcaklıktaki sıvıların plakalı eşanjör kullanılarak geri kazanımını ve sistem performans analizini incelemiştir. Sistem kurulduktan sonra 1 kg pamuğun boyanmasında kullanılan doğalgaz miktarında aylık ortalama %28,36 azalma yaşandığı aktarılmaktadır.

Bursa'da faaliyet gösteren orta ölçekli bir havlu üretim tesisinin enerji verimliliği potansiyelini araştıran Değirmen ve Şanlı [346], gerçekleştirdikleri incelemeler neticesinde yapılacak yatırımı 3 yıldan kısa bir sürede karşılayabilecek 7 alan tespit ettiklerini belirtmektedir. Bu alanlar sırasıyla jet makinelerine yalıtım yapılması, buhar kazanı su seviyesinin otomatik kontrolü, kondens dönüşlerinin toplanması, kondenslerde seviye kontrol sistemi uygulaması, kazan besisi suyu şartlandırma sisteminin kurulması, kompresör emiş havasının düzenlenmesi ile ring hattı ve tesisat revizyonudur. Aktarılan iyileştirmeler neticesinde elde edilecek kazanımlar Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3. Enerji verimliliği çalışmaları ve kazanımlar (Energy efficiency efforts and achievements)

Uygulanan Enerji Verimliliği Çalışmaları	Enerji Tasarrufu (Nm ³ /yıl)	Maddi Tasarruf (TL/yıl)	Önlenen Emisyon (ton CO ₂ /yıl)	Ödeme Süresi (yıl)
Jet makineleri izolasyonu	16.980	28.866	30,6	0,88
Kazan su seviyesi otomatik kontrolü	18.828	32.000	33,8	2,5
Kondens dönüşlerinin toplanması	103.284	175.583	186	2,7
Kondenslerde seviye kontrol sistemi uygulaması	11.310	19.227	20,4	0,14
Kazan temizlenmesi ve kazan besisi suyu şartlandırma	42.000	71.400	75	1,7
Kompresör emiş havasının düzenlenmesi	5.927	3.141	2,7	0,5
Ring hattı ve tesisat revizyonu	11.340	6.010	2,8	3,3

Tablo 3'te gözlemlendiği üzere, geri ödeme süresi en kısa olan iyileştirme kondenslerde seviye kontrol sistemi uygulamasıdır. CO₂ emisyonlarını önleyerek sağlanacak çevresel fayda açısından ise en avantajlı uygulama kondens dönüşlerinin toplanarak atık ısıdan faydalanılmasıdır.

Kaşka [351], çelik endüstrisindeki tav fırınlarında geri kazanılan atık ısının organik Rankine çevrimi ile kullanımının performansını incelemiştir. Çalışma, evaporatör ve kondenser basınçları, evaporatör çıkışındaki aşırı ısı, kondenserin aşırı soğutulması ve evaporatördeki ısı değişiminin sıkışma noktasındaki sıcaklık farkı gibi çeşitli

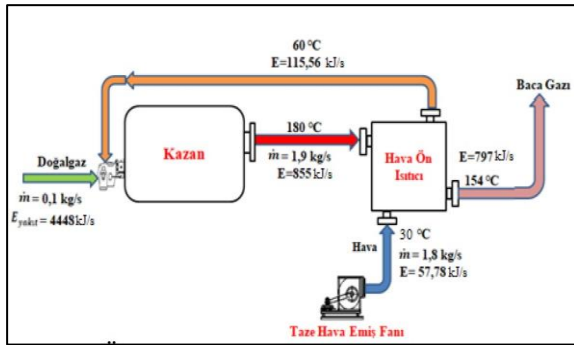
çalışma parametrelerinin analizini içermiştir. Bu parametrelerin incelenmesi, tesisin işleyişi ve termal çevrim süreci hakkında önemli bilgiler sunmuştur.

Çimento fabrikalarında WHR sisteminin enerji verimliliği üzerine olan etkisini araştıran Tütüncü ve Özgener [352], 1955 yılında kurulan seçili tesisin ekserji verimini %55,69 olarak hesaplamışlardır. Yıllık klinker üretim kapasitesinin 1.000.000 ton/yıl olduğu tesisteki üretim hatlarında yer alan döner fırınlardan çıkan atık ısının geri kazanılarak kullanılması hedeflenmiştir. Hazırlanan projede, karışık basınç kabullü yoğunlaşma türbin-jeneratör

ünitesine sahip toplam 5,5 MW'lık iki atık ısı geri kazanım kazanı inşa edilerek Nisan 2012'de devreye alınmıştır. Türbin setinin yıllık tasarım elektrik üretimi 42.240 MWh iken, çimento tesisine sağlanan yıllık elektrik ortalama 35.000 MWh'tir. Yapılan hesaplamalara göre, sadece WHR sistemi ile tesisin elde ettiği yıllık kazanç yaklaşık 7 milyon dolar olarak belirlenmiştir.

Eyidoğan [353], bir endüstriyel tesisin sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ile çalışan haddehane tavlama fırını üzerinde enerji verimliliği çalışmaları yürütmüştür. Fırının verimliliğini ve tasarruf potansiyelini hesaplamak için çeşitli ölçümler yapmış ve ölçüm sonuçlarına dayanarak enerji-kütle denklemleri oluşturmuştur. Tav fırını üzerinde gerçekleştirilen araştırma sonucunda, potansiyel enerji tasarruf noktalarının yüksek hava fazlalık katsayısı ile çalıştırılması ve reküperatörün ısı transfer alanının yetersiz olması olduğu tespit edilmiştir. Bu noktalarda yapılacak iyileştirmelerle yıllık 150.910\$ tasarruf sağlanırken aynı zamanda 678.500 kg CO₂ emisyonunun da önlenebileceği belirtilmektedir.

Eyriboyun [354], Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali'nin kondenser soğutma suyundan elde edilen atık ısının yerleşim yerlerinin ısıtılmasında kullanımını incelemiştir. Araştırma, kullanılacak olan ısı pompası sistemi ile kondenser soğutma suyundaki atık ısının geri kazanılarak yaşam alanlarının ısıtılmasının hedeflendiğini göstermektedir.



Şekil 22. Ön ısıtıcı şematik yerleşimi (Schematic layout of the preheater) [355]

Tokgöz ve Özgün [356], bir sanayi kuruluşuna ait 2 adet kızgın sulu alev borulu kazan üzerinde enerji verimliliği çalışmaları yapmıştır. Bu çalışma kapsamında, enerji, ısı transferi ve ekonomik analize yönelik çeşitli hesaplamalar gerçekleştirilirken, kazan çıkışından çıkan baca gazı sıcaklığının 180 °C olduğu belirlenmiştir. Kazandan

çıkan bu sıcak gazın geri kazanılması için ön ısıtıcı tasarlanmıştır (Şekil 22). Çalışmalarının sonucunda:

- Ön ısıtıcının ilk yatırım maliyeti 62.671 TL, tamir ve bakım maliyeti 25.000 TL, işletme maliyeti ise 40.000 TL olarak hesaplanmıştır.
- Sistemin ekonomik ömrünün 15 yıl, geri ödeme süresinin ise 7 ay olacağı öngörülmektedir.
- Ayrıca ön ısıtıcı kullanılarak ısıtılan kazan yanma havası sayesinde kazan veriminin artarak CO₂ salınımının düşeceği tahmin edilmektedir.

Akhan [357], ETKB Enerji Verimliliği Laboratuvarında gerçekleştirdiği deneylerle sanayide enerji verimliliği analiz çalışmaları yürütmüş ve verimliliği artırmaya yönelik örnek uygulamaların olası etkilerini ortaya koymayı amaçlamıştır. Çalışmada ele alınan başlıca konular kazan ve fırınlarda ısı geri kazanımı, ısı yalıtımı ve HVAC sistemlerindeki verimliliği artırıcı çalışmalardır. Yakma fırını test ünitesi Şekil 23'te gösterilmektedir.



Şekil 23. Yakma fırını test ünitesi (Combustion furnace test unit) [357]

Yapılan testlerin sonucunda [357]:

- Yakma fırınında reküperatör kullanıldığında 1,2 m³/h yakıt tasarrufu sağlanmakta, %38,2 ısı geri kazanımı ve %15,79 yakıt tasarrufu elde edilmektedir.
- Reküperatör kullanımıyla kazan ısı verimi %12,08 artmakta ve bacadan 4804 kJ/t PS enerji geri kazanılmaktadır.
- HVAC sistemlerinde reküperatör ile %47, ısı eşanjörü ile ise %51 ısı geri kazanımı sağlanmıştır.
- Kazan odasına yapılan yalıtım ile soğutma kaynaklı enerji tüketiminde %30,4 tasarruf oranı yakalanmıştır.

Türkiye'nin otomotiv ihracatı, 2022 yılında bir önceki yıla göre %1,18 oranında artarak 16,4 milyar dolar seviyesine yükselirken, üretim kapasitesi bakımından dünyada 13'üncü sırada yer almaktadır [358]. Bu alandaki verimliliği yükselterek tüketim değerlerini düşürmeyi hedefleyen birçok araştırmadan birini yürüten Sipahi [359], bir otomotiv firması için verimlilik artırıcı çalışmalar gerçekleştirerek uygulamaların sonuçlarını paylaşmıştır:

- Kütleme fırınlarında bulunan egzoz bacalarından salınan ısıyı yeniden kullanarak fırın içerisindeki havaya ön ısıtma uygulanması sonucunda 177.824 m³/yıl doğalgaz tasarrufu sağlanmıştır.
- Brülör gruplarında ön ısıtma yaparak 37.440 m³/yıl doğalgaz tasarrufu elde edilmiştir.
- Flaş buhar geri kazanım sistemi ile 83.089 m³/yıl doğalgaz tasarrufu sağlanmıştır.
- Soğutma ünitelerinde yapılan set değeri yükseltme çalışması sonucunda 505.440 kWh/yıl elektrik tasarrufu sağlanmıştır.
- Tesise ısı pompası kurularak 108.000 kWh/yıl elektrik ve 252.195 Sm³/yıl doğalgaz tasarrufu sağlanmıştır.
- Yapılan çalışmalar neticesinde toplam 1.436 ton CO₂ emisyonunun doğaya salınmasının engellenebileceği görülmüştür.

Otomotiv sektörü üzerine yapılan bir diğer çalışmada Ediz [360], belirli bir otomobil fabrikasının enerji verimliliğini artırmaya yönelik 10 farklı uygulamanın tasarruf potansiyellerini karşılaştırmıştır. En yüksek verim artışı sağlayan 4 iyileştirme ile:

- Verimsiz kompresörlerin verimliliği ile değiştirilmesi sonucunda 1.475.473 kWh,
- İşletmenin çatısına yerleştirilecek güneş panelleri ile 1.389.772 kWh,
- Kompresörlere atık ısı geri kazanım uygulamasının eklenmesiyle 1.186.517 kWh,
- Basınçlı hava kaçaklarının giderimi ile 375.622 kWh tasarruf sağlanacağı sonucuna varılmıştır.

Göçer ve arkadaşları [361], otomotiv sektöründe kullanılan basınçlı hava sistemleri üzerine bir

araştırma yürütmüştür. Bu araştırmada, şebeke hava hattı bulunan fabrikalar için şebeke basıncından daha yüksek basınç gerektiren cihazlarda basınç yükseltici kullanımının verimliliği üzerinde durulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda, 12 bar yüksek basınç gerektiren cihazlarda ek kompresör kullanmak yerine basınç yükseltici kullanılmasının elektrik tüketiminde %100 tasarruf sağladığı belirlenmiştir. Kompresörlerin sistemdeki basıncı artırmak için elektrik enerjisine ihtiyaç duyduğu, ancak basınç yükselticilerin aynı işlemi mekanik olarak gerçekleştirmesi nedeniyle bu tasarrufun sağlandığı vurgulanmıştır. Basınçlı hava sistemine sahip bir başka tesiste gerçekleştirilen enerji verimliliği çalışması neticesinde Sapmaz ve Kaya [362], çeşitli önerilerde bulunmuştur. Araştırmacılar atık ısı geri kazanımı, sızıntıların tamiri, kompresör hava giriş sıcaklığının düşürülmesi, kompresör çıkış basıncının düşürülmesi ve daha yüksek verime sahip motorların kullanımı gibi önlemlerle yıllık 7.781.689 kWh enerji tasarrufu sağlanabileceğini aktarmıştır. Bunun yanı sıra, toplam 1.714,8 ton CO₂ emisyonunun önüne geçilebileceği belirtilmiştir.

Değirmen ve arkadaşlarının [363] gıda ve otomotiv sektörlerinde faaliyet gösteren 2 farklı fabrikada yürüttükleri çalışmanın amacı, yapılabilecek enerji verimliliği uygulamalarını değerlendirmek ve bu uygulamalarla sağlanacak enerji tasarrufunu (Nm³/yıl) ve önlenecek karbon emisyon miktarını (ton CO₂/yıl) belirlemektir. Araştırmacılar, her iki tesiste de gerçekleştirilebilecek ortak iyileştirmeleri; sıcak hatlara izolasyon uygulaması, basınçlı hava kaçaklarının giderilmesi, basınçlı hava sistemi basıncının 1 bar düşürülmesi, kompresör emiş havasının düzenlenmesi, selenoid vana uygulaması ve flash buhar uygulaması olarak sıralamaktadır. Bunların yanı sıra gıda işletmesi özelinde 2 ve otomotivde 1 adet tekil enerji tasarruf çalışması önerisinde bulunulmuştur. Gıda ve otomotiv işletmelerinde gerçekleştirilmesi önerilen enerji verimliliği uygulamalarıyla sağlanacak çevresel faydalar ve bu uygulamaların maliyetleri Tablo 4'te özetlenmektedir.

Tablo 4. Enerji verimliliği uygulamalarının çevresel etkileri ve maliyetleri (Environmental impacts and costs of energy efficiency practices)

Basınçlı hava kaçaklarının giderilmesinin etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Gıda	33	1.143	0,3
Otomotiv	152,3	1.763	0,07

Basınçlı hava sisteminin 1 bar düşürülmesinin etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Gıda	13,2	-	-
Otomotiv	25,3	0	Hemen
Kompresör emiş havasının düzenlenmesinin etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Gıda	7,56	-	-
Otomotiv	7,2	2.350	1,97
Selenoid vana uygulamasının etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Gıda	3,8	1.486	3,2
Otomotiv	7,2	2.248	1,9
Flash buhar uygulamasının etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Gıda	48	5.733	0,67
Vana ve armatür yalıtımının etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Gıda	15	1.857	0,7
Sıcak hatlara izolasyon uygulamasının etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Otomotiv	130,5	3.525	0,26

Tablodan anlaşılacağı üzere gıda sektöründe en yüksek çevresel fayda (48 ton CO₂/yıl) flash buhar uygulamasında görülürken, iyileştirmenin yıllık enerji tasarrufunun 22 TEP olduğu aktarılmaktadır [363]. Otomotiv işletmesine gelindiğinde ise, çevresel fayda açısından en yararlı yatırım (152 ton CO₂/yıl) ile basınçlı hava kaçaklarının giderilmesi olurken, enerji tasarrufu verimliliği açısından sıcak hatlara izolasyon uygulaması (60 TEP/yıl) en avantajlı uygulama olarak tespit edilmiştir.

Farklı bir gıda tesisinde araştırma yürüten Ruşen [364], Karaman'da faaliyet gösteren bir hazır gıda fabrikasının üretim hattında kullanılan elektrik motorlarından verimleri düşük olanların değiştirilmesi durumunda sağlanacak tasarruf miktarıyla birlikte CO₂ miktarındaki azalma ve uygulamanın geri ödeme sürelerini hesaplamıştır. Çalışmada belirtilen uygulama ile tesisin elektrik maliyetinde 31.500 € düşüş yaşanırken, artan verimle birlikte CO₂ emisyonunda %12,15 azalma tespit edilmiştir. Yatırımın 1,5 yıldan kısa sürede kendisini geri ödemesi beklenmektedir.

Günümüzde LED lambalı armatürlerin geliştirilmesiyle, konvansiyonel aydınlatma çözümlerine kıyasla daha düşük güçlerde daha yüksek ışık akısı değerleri sağlanabilmektedir. Bu

durum, mekanlarda bulunan floresan lambaların LED lambalarla değiştirilmesini gündeme getirmiştir [365]. Perdahçı [366] çalışmada, bir metal işleme tesisinde kullanılan konvansiyonel armatürlerle gerçekleştirilen aydınlatmanın var olan aydınlık seviyesini koruyarak LED lambalı armatürlerle değiştirilmesini bilgisayar programı üzerinden simüle ederek enerji analizini gerçekleştirmiştir. Tesisteki 234W'lık 48 floresan armatürün 90W'lık LED olanlarla değiştirilmesi durumunda 830.040Wh enerji tasarrufu sağlanacağı aktarılırken, bu miktarın yıllık aydınlatmada %61,5'lik bir verim artışına denk geldiği ifade edilmiştir.

Yıldız ve Akgül çalışmalarında [367], Akdeniz Bölgesinden 4 farklı yer seçerek kıyı alanlarında bulunan küçük ve orta ölçekli işletmeler için gerekli enerjinin deniz yüzeyine kurulacak rüzgâr santralleri ve yüzer GES'ler ile karşılanmasına yönelik karşılaştırmalar yapmışlardır. Araştırmacılar, Türkiye'nin yüksek güneş enerjisi potansiyeli nedeniyle güneş enerjisinin önemini giderek arttığını belirtmişler ve global alandaki sektörel eğilim olan su üstü açık deniz güneş santrallerinin ülkemizde de kurulmaya başlayacağını öngörmektedirler.

Buna ek olarak Yıldız çalışmasında [368], sistemin yüksek güneş potansiyeline sahip olup yeterli rüzgâr yoğunluğuna sahip olmayan kıyı şeritleri için uygulanabilir bir çözüm olduğunu belirtmektedir. Yapılan analizler neticesinde:

- Anamur, Antalya, Finike ve Mersin bölgelerinin tamamında, açık deniz güneş kurulumlarının rüzgâr santrallerine kıyasla daha yüksek verim sağladığı tespit edilmiştir.
- 5 MW'lık tasarım projeksiyonuna göre 8.354 (MWh/yıl) ile en yüksek üretim Mersin'de gerçekleşirken, onu 8.209 (MWh/yıl) ile Antalya, 8.124 (MWh/yıl) ile Finike ve 8.064 (MWh/yıl) ile Anamur takip etmektedir.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Endüstri 4.0'ın etkisiyle yeniden şekillenen imalat sektöründe, robotların önemi hızla artmaktadır. Rekabette geri kalmak istemeyen üreticilerin artan ilgisiyle birlikte robotların üretimde iş gücünün yerini almaya başlaması üzerine pek çok sektörel araştırma yapılmıştır [136–140]. Yaşanacak endüstriyel dönüşümün en çok düşük ve orta vasıflı işlerde çalışan insanları etkileyeceği belirtilirken, Acemoğlu ve Restrepo [132] bu durumun büyük iş kayıplarına yol açarak ücretleri düşüreceğini ön görmektedir. Buna karşılık, robotlaşmanın doğuracağı verimlilik artışının ürün fiyatlarını aşağı çekerek talebi tetikleyebileceğini belirten Acemoğlu [131], artan talebin firmaları üretim ölçeklerini genişletmeye teşvik ederek yeni iş alanları yaratılmasının mümkün olduğunu paylaşmaktadır.

Enerji yönetimi enerji tüketimini optimize etme süreci olarak özetlenebilirken, Enerji Yönetim Sistemi ISO 50001 bu kapsamda geliştirilmiştir. ISO 50001: Enerji Yönetim Sistemi ve araçları ile yıllık enerji maliyetlerinin %5 ile %20 arasında düşebileceği rapor edilmektedir [81, 147]. Pek çok araştırmacı, sanayide geniş çaplı bir verim artışının yakalanabilmesi için ISO 50001'in yaygınlaşması gerektiğini ve bu amaç doğrultusunda mümkünse sanayide yasal zorunluluk olarak uygulanmasının önemini vurgulamaktadır. Bu doğrultuda çalışmada bulunan Yıldız ve arkadaşları [148], tesis ve işletmelerde çok az veya hiç yatırım yapmadan alınacak önlemlerle minimum %10 tasarruf oranının elde edilebileceğini belirtmektedir. Çalışmanın devamında, yapılacak yatırımlar sonucunda Türkiye'deki sanayi tesislerinin

%95'inde %40'a varan enerji tasarrufunun mümkün olduğu ifade edilmektedir.

Enerji denetimlerinin [207], enerji verimliliği kapsamında yapılan yatırımların belirli bir takvim içerisinde ilerlemesine katkı sağladığı belirtilmektedir. Enerji denetimi sırasında karşılaşılan en büyük zorluk olarak, durum tespiti ve verim önerileri için ilk adım olarak görülebilecek makine ve binaların enerji verilerini içeren etiketlerdeki eksiklik gösterilmektedir. Denetim işleminin daha detaylı ve kesin sonuçlara ulaşabilmesi için ilk olarak işletmelerdeki veri etiketlerinin tamamlanması gerekmektedir. Enerji denetimi üzerine yapılan çalışmalar sonucunda [214]:

- Enerji denetimlerinin daha uzun ekipman ömrü sağladığı,
- Artan ekipman ömrünün bakım masraflarını düşürdüğü,
- Makine arızaları kaynaklı üretim kaybını en aza indirdiği,
- İyileşen çalışma ortamının iş verimini artırdığı tespit edilmiştir.

Birçok araştırmacının uzlaştığı üzere [222–224], ISO 14001 ve ISO 50001 gibi çevre yönetim sistemlerinin firmalar tarafından benimsenmesi, enerji verimliliğini artırmaya yönelik önemli bir adım olurken, aynı zamanda çalışanların iş motivasyonunu artırıcı çeşitli sosyal faydalar da sağladığı tespit edilmiştir [218]. Yöneticiler ve çalışanlar arasındaki uyum arttıkça çalışan verimliliği de yükselmektedir. Bu sebeple bir organizasyon yapısı planlanırken, yönetim kademesinin ön görülen iş tanımına uygun, mesleki yeterliliğinin yanı sıra sosyal becerileri de yüksek doğru kişilerden oluşmasına dikkat edilmesi gerekmektedir [219, 220].

Enerji verimliliğini artırmaya yönelik sanayideki güncel çalışmalar incelendiğinde, atık ısının geri kazanımı (WHR) [225–228], kojenerasyon [264, 265] ve karbon yakalama teknolojisinin [177, 269–271] öne çıktığı görülmektedir. Atık ısı geri kazanımı hakkında yapılan çalışmalarda [229, 263], endüstriyel süreçlerin yan ürün olarak %50'ye varan oranda atık ısı ürettiği aktarılırken, atık ısı geri kazanım sistemiyle ısıtma veriminin %32,32 arttığı ve tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %30'unun geri kazanılabildiği hesaplanmıştır. Örneğin, 1955 yılında devreye alınan 1.000.000 ton/yıl kapasiteli bir çimento fabrikasına WHR sisteminin entegrasyonu

üzerinde çalışan Tütüncü ve Özgener [352], kurulan türbin setinin sisteme yıllık 35.000 MWh katkı sağlayarak enerji maliyetini 7 milyon dolar düşürdüğünü belirlemiştir.

Akhan [357] tarafından ETKB'nın enerji laboratuvarında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda:

- Kazan odasının yalıtımı ile enerji tüketiminde %30,4 tasarruf,
- Yakma fırınında reküperatör kullanımı ile %38,2 ısı geri kazanımı ve %15,79 tasarruf,
- HVAC sistemlerinde reküperatör kullanımı ile %47, ısı eşanjörü ile ise %51 ısı geri kazanımı,
- Kazanlarda reküperatör kullanımıyla birlikte %12,08 ısı verim artışı sağlanmaktadır.

Kojenerasyon sistemlerinin mevcut yapıya entegrasyonu ile ilgili yapılan araştırmalar [264, 265], gaz türbinlerinin elektrik dönüşüm verimliliğinin %30-40'tan %80-90'lara çıktığını ortaya koymuştur. İşletmeye alınan tesislerde yapılan denetimlerde verim artışı gözlemlenmiş ve yapılan yatırımın kendini 1,5-3 yıl gibi kısa bir sürede amorti ettiği tespit edilmiştir. Günümüzde, sanayinin iklim değişikliğine uyum için gereken temiz üretim programlarının dışında tutulması düşünülemez. Firmalara temiz üretim teknolojileri uygulamalarının maliyetlerini artırmayacağı, aksine ekonomik açıdan kısa vadeli geri dönüş sağlayacağı vurgulanarak, sanayi genelinde farkındalığın artırılması önemlidir.

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkilerini en aza indirmek için belirlenen 2030'a kadar 2°C hedefine ek olarak, ülkeler için bir diğer ortak amaç da 2050'ye kadar karbon nötr hale gelmektir. Bu hedef doğrultusunda geliştirilen karbon yakalama teknolojisi, demirçelik gibi karbon yoğun sektörlerde CO₂ salınımını %65 azaltabileceği hesaplanmaktadır [177]. Ancak, karbon yakalama teknolojisinin geliştirme ve uygulama maliyeti oldukça yüksektir ve bu da yaygın kullanımını zorlaştıran başlıca faktör olarak öne çıkmaktadır [284]. Karbon vergisi, emisyon üst sınırı ve ticareti gibi karbon fiyatlandırma mekanizmalarının uygulanmasıyla, şirketlerin bu teknolojilere yatırım yapmaları için mali teşvik sağlanabileceği düşünülmektedir. Ek olarak yakın gelecekte doğal gazla birlikte yenilenebilir enerji fiyatlarının düşmesi [369], ağır sanayide kömür kullanımının oranını azaltarak tüketicileri temiz enerji kullanımına teşvik edeceği öngörülmektedir [370].

Bu çalışmaların yanı sıra, sanayi tesislerinde yer alan kazanlar, fırınlar, elektrik motorları, pompalar ve fanlar gibi ekipmanlarla ilgili verimliliği artırmaya yönelik çeşitli araştırmalar da yürütülmektedir. Örneğin, bir tekstil atölyesindeki boyama işleminden kaynaklanan yüksek sıcaklıktaki sıvıların geri kazanımını inceleyen Koçlu [350], plakalı eşanjör kullanımıyla sistemin kurulmasından sonra 1 kg pamuğun boyanması için kullanılan doğalgaz miktarında aylık ortalama %28,36 azalma olduğunu belirtmektedir.

Sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ile çalışan haddehane tavlama fırınına sahip bir diğer tesiste araştırmada bulunan Eyidoğan [353], genel verimi %52,76 olan fırının yüksek hava fazlalık katsayısı ile çalıştırılması ve reküperatörün ısı transfer alanında yapılacak iyileştirmelerle yıllık 150.910\$ tasarruf sağlanırken aynı zamanda 678.500 kg CO₂ emisyonunun da önlenebileceği belirtilmektedir.

Tokgöz ve Özgün [356], bir sanayi kuruluşuna ait 2 adet kızgın su alev borulu kazan üzerinde enerji verimliliği çalışmaları yapmışlardır. Kazandan çıkan sıcak gazın geri kazanılması için bir ön ısıtıcı sistem tasarlayan araştırmacılar, artan üretim verimi sonucunda yatırımın kendisini 7 ay gibi çok kısa bir sürede geri ödeyeceğini hesaplamıştır. Kazanlarla ilgili başka bir araştırmada ise Rüşen ve Çevik [189], Karaman'daki bir gıda işletmesine ait gofret üretim hattının enerji verimliliğini değerlendirmiş ve brülör değişimi ile kazan veriminde %5,2 artış sağlanacağını belirtmiştir.

Türkiye ekonomisi için önemli bir yer tutan tekstil sanayinde [345] üretim verimliliğini artırmaya yönelik birçok araştırma yapılmaktadır. Örnek olarak Tunç ve arkadaşları [348], İstanbul'da yer alan bir fabrikaya uygulanacak atık ısı yatırımının enerji maliyetini yaklaşık %11 azaltarak, düşen maliyetin etkisiyle sistemin kendisini 2 ile 4 yıl arasında geri ödeyeceğini belirtmektedir. Bir diğer örnekte Koçlu [350], boyama işleminden sonra ortaya çıkan yüksek yoğunluk ve sıcaklıktaki sıvıların plakalı eşanjör kullanılarak geri kazanımını incelemiş ve sistem kurulduktan sonra 1 kg pamuğun boyanması için kullanılan doğalgazın %28,36 azaldığını göstermiştir. Farklı bir çalışmada ise Değirmen ve Şanlı [346], Bursa'da faaliyet gösteren bir tesisinin enerji verimliliği potansiyelini araştırarak, yapılacak yatırımı 3 yıldan kısa bir sürede karşılayabilecek 7 alan tespit etmişlerdir. Bu alanlar içerisinde geri ödeme süresi en kısa olan iyileştirme kondenslerde seviye kontrol sistemi

uygulanması iken (0,14 yıl), CO₂ emisyonunun önlenerek sağlanacak çevresel fayda bakımından en avantajlı uygulama kondens dönüşlerinin toplanarak atık ısısından (186 ton CO₂/yıl) faydalanılmasıdır.

Türkiye'nin 2023 yılındaki toplam ihracat miktarının %6,4'ünü oluşturan [371] otomotiv sanayide üretim verimliliğini artırmak üzerine yürütülen birçok araştırma bulunmaktadır. Örnek olarak bir otomotiv firması için verimlilik artırıcı çalışmalar gerçekleştiren Sipahi'nin [365] bulunduğu sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Kütleme fırınlarında bulunan egzoz bacalarından salınan ısıyı yeniden kullanarak fırın içerisindeki havaya ön ısıtma uygulanması sonucunda 177.824 m³/yıl doğalgaz tasarrufu,
- Brülör gruplarında ön ısıtma yaparak 37.440 m³/yıl doğalgaz tasarrufu,
- Flaş buhar geri kazanım sistemi ile 83.089 m³/yıl doğalgaz tasarrufu,
- Soğutma ünitelerinde yapılan set değeri yükseltme çalışması sonucunda 505.440 kWh/yıl elektrik tasarrufu,
- Tesise ısı pompası kurularak 108.000 kWh/yıl elektrik ve 252.195 m³/yıl doğalgaz tasarrufu sağlanmıştır.
- Yapılan çalışmalar neticesinde toplam 1.436 ton CO₂ emisyonunun doğaya salınmasının engellenebileceği görülmüştür.

Bir diğer çalışmada Ediz [360], seçtiği otomobil fabrikasında yürüttüğü çalışmalara göre en yüksek verim artışı sağlayan 4 iyileştirmeyi şu şekilde sıralamaktadır:

- Verimsiz kompresörlerin verimliliği ile değiştirilmesi sonucunda 1.475.473 kWh,
- İşletmenin çatısına yerleştirilecek güneş panelleri ile 1.389.772 kWh,
- Kompresörlere atık ısı geri kazanım uygulamasının eklenmesiyle 1.186.517 kWh,
- Basınçlı hava kaçaklarının giderimi ile 375.622 kWh tasarruf sağlanmaktadır.

Otomotiv sektörü üzerine yapılan farklı bir çalışmada Göçer ve arkadaşları [361], şebeke basıncından daha yüksek basınç gerektiren cihazlarda basınç artışı için elektrik kullanan ek kompresör yerine mekanik şekilde çalışan basınç yükseltici kullanılmasının elektrik tüketiminde %100 tasarruf sağladığını tespit etmiştir. Basınçlı hava sistemine sahip bir başka tesiste yapılan incelemelerde ise Sapmaz ve Kaya [362], yapılacak

iyileştirmelerle yıllık 7.781.689 kWh enerji tasarrufu sağlanacağını aktarırken, buna ek olarak toplam 1.714,8 ton CO₂ emisyonunun önüne geçileceğini belirtmektedir.

Otomotiv ve gıda sektörlerinde faaliyet gösteren iki fabrikada çalışmalar yürüten Değirmen ve arkadaşları [363], detayları Tablo 4'te verilen inceleme sonucunda gıda sektörü için en yüksek çevresel faydanın (48 ton CO₂/yıl) flash buhar uygulamasında olduğunu tespit ederken, bu alanda otomotiv işletmesi için en verimli yatırım (152 ton CO₂/yıl) basınçlı hava kaçaklarının giderilmesi olduğunu belirlemiştir. Bir hazır gıda fabrikasının üretim hattında incelemelerde bulunan Ruşen [364] ise, elektrik motorlarından verimleri düşük olanların değiştirilmesi durumunda tesisin elektrik maliyetinde 31.500 € düşüş yaşanacağını aktarmaktadır. Artan verimle birlikte CO₂ emisyonunda %12,15 düşüş gözlenirken, yatırımın kendisini 1,5 yıldan kısa sürede geri ödemesi beklenmektedir.

Kıyılmaz ve arkadaşlarının [190], dondurma üretimi yapan bir gıda tesisinde gerçekleştirdiği denetimlerde, enerji kayıplarının özellikle buhar ve kondens hatlarında, basınçlı hava dağıtımında ve transformatörlerde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Bu durum Kaya'nın [191] benzer özelliklere sahip tesisleri incelediği çalışmasında vardığı sonuçları doğrular niteliktedir. Çalışmada 620.155 kWh değerinde 800 ton buhar kaçığının olduğu paylaşılrken, alınacak basit önlemler ile yıllık 54 TEP buhar kaçığının önüne geçilebileceği aktarılmaktadır.

Bu çalışmalara ek olarak, bir metal işleme tesisindeki konvansiyonel armatürlerin LED lambalı olanlarla değiştirilmesini bilgisayar programı üzerinden simüle eden Perdahçı [366], tesisteki 48 floresan armatürün LED olanlarla değiştirilmesi sonucunda 830.040Wh enerji tasarrufu sağlanacağını aktarmaktadır. Ayrıca, bu miktarın yıllık aydınlatmada %61,5'lik bir verim artışı anlamına geldiğini belirtmektedir.

Sanayide enerji maliyetleri genellikle toplam üretim maliyetlerinin %20 ila %50 arasında değişmektedir. Türkiye'deki sanayi sektörünün enerji tasarruf potansiyelinin en az %20 olduğu tespit edilmiş olup, bunun yaklaşık %50'sinin küçük yatırım miktarları ile iki yıldan az sürede kendini amorti ederek gerçekleştirilebileceği belirlenmiştir. Enerji yönetimi çözümlerinin İsveç'teki sanayi kuruluşlarının

%40'ında uygulandığı görülürken, bu oranın Türkiye'de %22 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir [343]. İki ülke arasındaki bu uygulama yaygınlığı farkı, enerji yönetimi alanında yaşanabilecek yüksek gelişim potansiyelini ortaya koymaktadır. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün çalışmalarına göre, sanayi sektöründe atılacak doğru adımlar ile Türkiye'nin toplam birincil enerji talebinin %15 düşürülebileceği hesaplanmıştır [303]. Kaya ve Öztürk'ün çalışmasındaki bulgular da bu değeri destekler niteliktedir [344].

Sonuç olarak, iklim değişikliğinin etkileriyle ilgili ulusal ve uluslararası düzeyde yapılan çalışmalar göz önüne alındığında, Türkiye'nin Akdeniz bölgesinde bulunması ve bu bölgenin çevresel değişikliklerden önemli ölçüde etkilenmesi dikkate değerdir. Bu nedenle, Türk siyaset yapıcılarının ve özel sektör temsilcilerinin, iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir şekilde hareket etmeleri ve uygun politikaları geliştirmeleri kritik öneme sahiptir. Türkiye'nin iklim değişikliğiyle mücadelede kararlı ve etkili bir şekilde hareket etmesi hem çevresel sürdürülebilirliği sağlamak hem de ekonomik ve endüstriyel kalkınmayı desteklemek açısından büyük önem taşımaktadır.

Siyaset yapıcıların, iklim değişikliğiyle mücadele konusunda güçlü politika ve düzenlemeleri desteklemeleri, yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmaları ve sera gazı emisyonlarını azaltıcı tedbirler alması gerekmektedir. Özel sektör ise, çevresel sürdürülebilirlik ilkelerini benimseyerek üretim süreçlerini optimize etmeli, enerji verimliliğini artırmalı ve çevre dostu teknolojilere yatırım yapmalıdır. Sürdürülebilir enerji kullanımı, çevresel koruma ve adaptasyon stratejileri gibi konularda kararlılıkla hareket etmek, Türk sanayisinin geleceği açısından hayati öneme sahiptir.

Dünya genelinde 2000 yılından itibaren yükselen enerji verimliliğinin temel kaynağı, kişi başına düşen GSYİH'deki artışla paralel olarak yaygınlaşan yenilenebilir enerji kullanımınıdır. Hizmete yönelik endüstriyel dönüşüm, ticari ve finansal dışa açıklık dünya genelinde endüstriyel enerji verimliliğini artıran faktörlerin başında gelmektedir [372, 373]. Bu konu hakkındaki önerileri özetlemek gerekirse;

- Kişi başına düşen GSYİH'deki büyüme, enerji verimliliğinin geliştirilmesinde temel bir faktördür. Enerji tasarrufu sağlamak için

ekonomik kalkınmayı kısıtlamak gerçekçi değildir. Aksine, politika yapıcılar ekonominin sürdürülebilir bir geleceğe doğru büyümesini desteklemek için mevcut politika araçlarını uygun şekilde kullanmalıdır.

- Sanayi sektöründeki büyüme her zaman enerji verimliliğinin düşmesi anlamına gelmemektedir. Her ülkenin endüstriyel yapısı, uluslararası endüstriyel uzmanlaşma eğiliminin bir sonucu olarak şekillenmektedir. Endüstriyel uzmanlaşma dengesi göz önüne alındığında, politika yapıcıların geçmiş dönemlerle karşılaştırmalar yaparak sanayi sektöründeki enerji verimliliğinin geliştirilmesini destekleyici adımlar atmaya devam etmeleri gerekmektedir.
- Endüstriyel dönüşüm sürecinde iş gücünün yeniden eğitilmesi ve yeni teknolojilere uyum sağlaması için politikalar geliştirilmelidir. Bu, iş kayıplarının önlenmesine ve yeni iş alanlarının oluşturulmasına yardımcı olacaktır.
- Enerji verimliliğini artırmak için gerekli yasal düzenlemelerin güçlendirilmesi ve uygulanabilirliklerinin sağlanması önemlidir. Örneğin, enerji performans standartlarının belirlenmesi ve bu standartlara uyumun zorunlu hale getirilmesi gerekebilir.
- Sanayi tesislerinde enerji verimliliğini artırmak için çalışanlara yönelik bilinçlendirme ve eğitim programları düzenlenmelidir. Bu programlar, enerji tasarrufu sağlayacak pratik yöntemlerin yanı sıra ISO 50001 gibi standartların gereklilikleri hakkında bilgi vermelidir.
- Enerji verimliliğini artırmaya yönelik yatırımları teşvik etmek için ekonomik destek mekanizmaları oluşturulmalıdır. Örneğin, enerji verimliliği yatırımlarını gerçekleştiren işletmelere vergi indirimleri veya finansal teşvikler sağlanabilir.
- Sürekli olarak gelişen enerji verimliliği teknolojilerini izlemek ve uygulamak önemlidir. Yenilikçi çözümlerle, enerji tüketimini azaltmak ve verimliliği artırmak mümkündür.

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

AB	Avrupa Birliği
ACEEE	Amerika Enerji Verimli Ekonomi Konseyi
AI	Yapay zekâ
APS	Açıklanan Taahhütler Senaryosu
ASD	Ayarlanabilir hız sürücüsü
BMC	Dökme Kalıplama Bileşikleri
BWM	En iyi-en kötü yöntemi

CCR	Charnes, Cooper ve Rhodes
CCS	Karbon yakalama ve depolama
DAC	Doğrudan hava yakalama
EEM's	Enerji verimliliği ölçümleri
EnYS	Enerji Yönetim Sistemi
GSYİH	Gayri safi yurtiçi hasıla
HVAC	Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IFR	Uluslararası Robotik Federasyonu
IoT	Nesnelerin interneti
KVB	Karar verme birimleri
LNG	Sıvılaştırılmış doğal gaz
MCDM	Çok kriterli karar verme sistemi
MEA	Geleneksel mono etanolamin
NZE	Net Sıfır Emisyon
PCM	Faz değiştirici malzeme
SDGs	Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri
STEPS	Açıklanan Politikalar Senaryosu
TEP	Ton eşdeğer petrol
VAP	Verimlilik Artırıcı Proje
VSD	Değişken hızlı sürücüler
VZA	Veri zarflama analizi
WHR	Atık ısının geri kazanımı

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Cemre YILDIZ: Araştırmaları yapmış, sonuçları derleyerek makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the research, compiled the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Apergis, N., & Payne, J. E. (2009). Energy consumption and economic growth in Central America: Evidence from a panel cointegration and error correction model. *Energy Economics*, 31(2), 211–216. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2008.09.002>
- [2] Mishra, V., Smyth, R., & Sharma, S. (2009). The energy-GDP nexus: Evidence from a panel of Pacific Island countries. *Resource and Energy Economics*, 31(3), 210–220. <https://doi.org/10.1016/J.RESENEECO.2009.04.002>
- [3] Liu, T. Y., & Lee, C. C. (2020). Convergence of the world's energy use. *Resource and Energy Economics*, 62, 101199. <https://doi.org/10.1016/J.RESENEECO.2020.101199>
- [4] Lee, C. C., Wang, C. W., Ho, S. J., & Wu, T. P. (2021). The impact of natural disaster on energy consumption: International evidence. *Energy Economics*, 97, 105021. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2020.105021>
- [5] Flavin, C., & Lenssen, N. (1994). Reshaping the electric power industry. *Energy Policy*, 22(12), 1029–1044. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(94\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0301-4215(94)90017-5)
- [6] Doğan, H., & Yıllankırkan, N. (2015). Türkiye'nin Enerji Verimliliği Potansiyeli ve Projeksiyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3(1), 375–384. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc/issue/7466/98302>
- [7] Hardcastle, A., & Waterman-Hoey, S. (2009). *Energy Efficiency Industry Trends and Workforce Development in Washington State*. <https://pubs.extension.wsu.edu/energy-efficiency-industry-trends-and-workforce-development-in-washington-state>
- [8] IEA. (2022). *World Energy Outlook 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [9] AEO. (2018). *Annual Energy Outlook 2018 with projections to 2050*. Washington, DC. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>
- [10] Lee, C. C., Lee, C. C., & Li, Y. Y. (2021). Oil price shocks, geopolitical risks, and green bond market dynamics. *The North American Journal of Economics and Finance*, 55, 101309. <https://doi.org/10.1016/J.NAJEF.2020.101309>
- [11] Schmidt, T. S., & Sewerin, S. (2019). Measuring the temporal dynamics of policy mixes – An empirical analysis of renewable energy policy mixes' balance and design features in nine countries. *Research Policy*,

- 48(10), 103557.
<https://doi.org/10.1016/J.RESPOL.2018.03.012>
- [12] Wang, Z., & Feng, C. (2015). A performance evaluation of the energy, environmental, and economic efficiency and productivity in China: An application of global data envelopment analysis. *Applied Energy*, 147, 617–626. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.01.108>
- [13] Ghoneem, M. Y. M. (2016). Planning for Climate Change, Why does it Matter? (From Phenomenon to Integrative Action Plan). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 216, 675–688. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2015.12.060>
- [14] Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research* 29(28), 42539–42559. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-19718-6>
- [15] Jones, M. W., Peters, G. P., Gasser, T., Andrew, R. M., Schwingshackl, C., Gütschow, J., ... Le Quéré, C. (2023). National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. *Scientific Data*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/S41597-023-02041-1>
- [16] IEA. (2023). *Energy Technology Perspectives 2023*. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
- [17] IEA. (2013). *Energy Efficiency Market Trends and Medium-Term Prospects*. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264206052-EN>
- [18] EC. (2015). *COM(2015) 80 final - A Framework Strategy for a Resilient Energy Union with a Forward-Looking Climate Change Policy*. Brussels. http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:1bd46c90-bdd4-11e4-bbe1-01aa75ed71a1.0001.03/DOC_1&format=PDF
- [19] Ang, B. W. (2006). Monitoring changes in economy-wide energy efficiency: From energy–GDP ratio to composite efficiency index. *Energy Policy*, 34(5), 574–582. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2005.11.011>
- [20] Hu, J. L., & Lin, C. H. (2008). Disaggregated energy consumption and GDP in Taiwan: A threshold co-integration analysis. *Energy Economics*, 30(5), 2342–2358. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2007.11.007>
- [21] Huang, B. N., Hwang, M. J., & Yang, C. W. (2008). Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: A dynamic panel data approach. *Ecological Economics*, 67(1), 41–54. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2007.11.006>
- [22] Li, R., Wang, Q., Liu, Y., & Jiang, R. (2021). Per-capita carbon emissions in 147 countries: The effect of economic, energy, social, and trade structural changes. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1149–1164. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.02.031>
- [23] Wang, Q., Yang, T., & Li, R. (2023). Does income inequality reshape the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis? A nonlinear panel data analysis. *Environmental Research*, 216, 114575. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.114575>
- [24] Mielnik, O., & Goldemberg, J. (2002). Foreign direct investment and decoupling between energy and gross domestic product in developing countries. *Energy Policy*, 30(2), 87–89. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00080-5)
- [25] Duro, J. A., Alcántara, V., & Padilla, E. (2010). International inequality in energy intensity levels and the role of production composition and energy efficiency: An analysis of OECD countries. *Ecological Economics*, 69(12), 2468–2474. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2010.07.022>
- [26] Sineviciene, L., Sotnyk, I., & Kubatko, O. (2017). Determinants of energy efficiency and energy consumption of Eastern Europe post-communist economies. *Energy & Environment*, 28(8), 870–884. <https://doi.org/10.1177/0958305X17734386>
- [27] Chang, C. P., Wen, J., Zheng, M., Dong, M., & Hao, Y. (2018). Is higher government efficiency conducive to improving energy use efficiency? Evidence from OECD countries. *Economic Modelling*, 72, 65–77. <https://doi.org/10.1016/J.ECONMOD.2018.01.006>
- [28] Su, Y. W. (2018). Electricity demand in industrial and service sectors in Taiwan. *Energy Efficiency*, 11(6), 1541–1557. <https://doi.org/10.1007/S12053-018-9615-Y/METRICS>
- [29] Newell, R. G., Jaffe, A. B., & Stavins, R. N. (1999). The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change. *Quarterly Journal of Economics*, 114(3), 941–975. <https://doi.org/10.1162/003355399556188>

- [30] Shi, G. M., Bi, J., & Wang, J. N. (2010). Chinese regional industrial energy efficiency evaluation based on a DEA model of fixing non-energy inputs. *Energy Policy*, 38(10), 6172–6179. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2010.06.003>
- [31] Wu, H., Hao, Y., Ren, S., Yang, X., & Xie, G. (2021). Does internet development improve green total factor energy efficiency? Evidence from China. *Energy Policy*, 153, 112247. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112247>
- [32] Han, J., Miao, J., Shi, Y., & Miao, Z. (2021). Can the semi-urbanization of population promote or inhibit the improvement of energy efficiency in China? *Sustainable Production and Consumption*, 26, 921–932. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.01.008>
- [33] IEA. (2023). *Energy Efficiency 2023*. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
- [34] IEA. (2023). *Industry*. <https://www.iea.org/energy-system/industry>
- [35] UNEP. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction*. <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- [36] Thiel, G. P., & Stark, A. K. (2021). To decarbonize industry, we must decarbonize heat. *Joule*, 5(3), 531–550. <https://doi.org/10.1016/J.JOULE.2020.12.007>
- [37] Rissman, J., Bataille, C., Masanet, E., Aden, N., Morrow, W. R., Zhou, N., ... Helseth, J. (2020). Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, 266, 114848. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114848>
- [38] Napp, T. A., Gambhir, A., Hills, T. P., Florin, N., & Fennell, P. S. (2014). A review of the technologies, economics and policy instruments for decarbonising energy-intensive manufacturing industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 616–640. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.10.036>
- [39] CEFIC. (2023). *2023 Facts and Figures of the European Chemical Industry*. <https://cefic.org/a-pillar-of-the-european-economy/facts-and-figures-of-the-european-chemical-industry/>
- [40] BP. (2023). *Energy Outlook 2023*. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>
- [41] Maghrabi, A. M., Song, J., & Markides, C. N. (2023). How can industrial heat decarbonisation be accelerated through energy efficiency? *Applied Thermal Engineering*, 233, 121092. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALEN.2023.121092>
- [42] Energy Efficiency Movement. (2022). *The Energy Efficiency Playbook*. https://www.energyefficiencymovement.com/insights/playbook/?utm_source=foleon&utm_medium=referral&utm_campaign=industrial_efficiency_2023
- [43] Weis, B., Leprettre, B., Patra, M., Hanigovszki, N., Holm, P., Schuman, T., ... Anderson, K. (2021). Increasing the Energy Savings of Motor Applications: The Extended Product Approach, 37–52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69799-0_4
- [44] Jiao, J., Chen, C., & Bai, Y. (2020). Is green technology vertical spillovers more significant in mitigating carbon intensity? Evidence from Chinese industries. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120354. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120354>
- [45] Kushnir, D., Hansen, T., Vogl, V., & Åhman, M. (2020). Adopting hydrogen direct reduction for the Swedish steel industry: A technological innovation system (TIS) study. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118185. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118185>
- [46] Wang, Q., & Wang, S. (2020). Why does China's carbon intensity decline and India's carbon intensity rise? a decomposition analysis on the sectors. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121569. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121569>
- [47] Worrell, E., & Boyd, G. (2022). Bottom-up estimates of deep decarbonization of U.S. manufacturing in 2050. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129758. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129758>
- [48] Roy, S., Tran, T. A., & Natarajan, K. (2023). Recent Advancement of IoT Devices in Pollution Control and Health Applications. *Recent Advancement of IoT Devices in Pollution Control and Health Applications*, 1–208. <https://doi.org/10.1016/C2021-0-03490-8>
- [49] Malinauskaite, J., Jouhara, H., Ahmad, L., Milani, M., Montorsi, L., & Venturelli, M. (2019). Energy Efficiency in Industry: EU and national policies in Italy and the UK. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.130>
- [50] Prognos. (2012). *Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050*.

- <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>
- [51] Cagno, E., Worrell, E., Trianni, A., & Pugliese, G. (2013). A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *19*, 290–308. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.11.007>
- [52] Worrell, E., Bernstein, L., Roy, J., Price, L., & Harnisch, J. (2009). Industrial energy efficiency and climate change mitigation. *Energy Efficiency*, *2*(2), 109–123. <https://doi.org/10.1007/S12053-008-9032-8/TABLES/2>
- [53] Hossain, S. R., Ahmed, I., Azad, F. S., & Monjurul Hasan, A. S. M. (2020). Empirical investigation of energy management practices in cement industries of Bangladesh. *Energy*, *212*, 118741. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.118741>
- [54] Zhang, S., Worrell, E., & Crijns-Graus, W. (2015). Evaluating co-benefits of energy efficiency and air pollution abatement in China's cement industry. *Applied Energy*, *147*, 192–213. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.02.081>
- [55] Tesema, G., & Worrell, E. (2015). Energy efficiency improvement potentials for the cement industry in Ethiopia. *Energy*, *93*, 2042–2052. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.10.057>
- [56] Thollander, P., & Ottosson, M. (2010). Energy management practices in Swedish energy-intensive industries. *Journal of Cleaner Production*, *18*(12), 1125–1133. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2010.04.011>
- [57] Andersson, E., & Thollander, P. (2019). Key performance indicators for energy management in the Swedish pulp and paper industry. *Energy Strategy Reviews*, *24*, 229–235. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2019.03.004>
- [58] Hasanbeigi, A., Menke, C., & Therdyothin, A. (2011). Technical and cost assessment of energy efficiency improvement and greenhouse gas emission reduction potentials in Thai cement industry. *Energy Efficiency*, *4*(1), 93–113. <https://doi.org/10.1007/S12053-010-9079-1/METRICS>
- [59] Ates, S. A., & Durakbasa, N. M. (2012). Evaluation of corporate energy management practices of energy intensive industries in Turkey. *Energy*, *45*(1), 81–91. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2012.03.032>
- [60] Xu, B., & Lin, B. (2019). Can expanding natural gas consumption reduce China's CO2 emissions? *Energy Economics*, *81*, 393–407. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.04.012>
- [61] Su, B., & Ang, B. W. (2020). Demand contributors and driving factors of Singapore's aggregate carbon intensities. *Energy Policy*, *146*, 111817. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2020.111817>
- [62] Han, Y., Zhang, F., Huang, L., Peng, K., & Wang, X. (2021). Does industrial upgrading promote eco-efficiency? —A panel space estimation based on Chinese evidence. *Energy Policy*, *154*, 112286. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112286>
- [63] Ofosu-Adarkwa, J., Xie, N., & Javed, S. A. (2020). Forecasting CO2 emissions of China's cement industry using a hybrid Verhulst-GM(1,N) model and emissions' technical conversion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *130*, 109945. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109945>
- [64] Jin, G., Shi, X., Zhang, L., & Hu, S. (2020). Measuring the SCCs of different Chinese regions under future scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *130*, 109949. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109949>
- [65] Xu, B., & Lin, B. (2021). Investigating spatial variability of CO2 emissions in heavy industry: Evidence from a geographically weighted regression model. *Energy Policy*, *149*, 112011. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2020.112011>
- [66] Lin, B., & Xu, B. (2020). Effective ways to reduce CO2 emissions from China's heavy industry? Evidence from semiparametric regression models. *Energy Economics*, *92*, 104974. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.104974>
- [67] Xiong, S., Ma, X., & Ji, J. (2019). The impact of industrial structure efficiency on provincial industrial energy efficiency in China. *Journal of Cleaner Production*, *215*, 952–962. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.095>
- [68] Schaltegger, S., & Sturm, A. (1990). Ökologische Rationalität: Ansatzpunkte zur Ausgestaltung von ökologieorientierten Managementinstrumenten. *Die Unternehmung*, *44*(4), 273–290. <https://www.jstor.org/stable/24180467>
- [69] Zhang, F., & Huang, K. (2017). The role of government in industrial energy conservation in China: Lessons from the iron and steel industry. *Energy for Sustainable Development*, *39*, 101–

114.
<https://doi.org/10.1016/J.ESD.2017.05.003>
- [70] Liao, N., & He, Y. (2018). Exploring the effects of influencing factors on energy efficiency in industrial sector using cluster analysis and panel regression model. *Energy*, 158, 782–795. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.06.049>
- [71] Agovino, M., Bartoletto, S., & Garofalo, A. (2019). Modelling the relationship between energy intensity and GDP for European countries: An historical perspective (1800–2000). *Energy Economics*, 82, 114–134. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.02.017>
- [72] Jimenez, R., & Mercado, J. (2014). Energy intensity: A decomposition and counterfactual exercise for Latin American countries. *Energy Economics*, 42, 161–171. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.12.015>
- [73] Wurlod, J. D., & Noailly, J. (2018). The impact of green innovation on energy intensity: An empirical analysis for 14 industrial sectors in OECD countries. *Energy Economics*, 71, 47–61. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.12.012>
- [74] Farajzadeh, Z., & Nematollahi, M. A. (2018). Energy intensity and its components in Iran: Determinants and trends. *Energy Economics*, 73, 161–177. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.05.021>
- [75] Pan, X., Uddin, M. K., Han, C., & Pan, X. (2019). Dynamics of financial development, trade openness, technological innovation and energy intensity: Evidence from Bangladesh. *Energy*, 171, 456–464. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.12.200>
- [76] Rafiq, S., Salim, R., & Nielsen, I. (2016). Urbanization, openness, emissions, and energy intensity: A study of increasingly urbanized emerging economies. *Energy Economics*, 56, 20–28. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.02.007>
- [77] Tajudeen, I. A. (2021). The underlying drivers of economy-wide energy efficiency and asymmetric energy price responses. *Energy Economics*, 98, 105222. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.105222>
- [78] Karimu, A., Brännlund, R., Lundgren, T., & Söderholm, P. (2017). Energy intensity and convergence in Swedish industry: A combined econometric and decomposition analysis. *Energy Economics*, 62, 347–356. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.07.017>
- [79] YILDIZ, C. (2024). Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 12(1), 176–213. <https://doi.org/10.29109/GUJSC.1293759>
- [80] Kaynak, S. (2005). Enerjinin Verimli Kullanımına Yaklaşımlar Küreselleşmenin Enerji Değişim Programı ve Enerji Politikaları. In *TMMOB TÜRKİYE V. ENERJİ SEMPOZYUMU*. Ankara: Elektrik Mühendisleri Odası. https://www.emo.org.tr/etkinlikler/enerji/etkinlik_metin.php?etkinlikkod=3&metin_kod=42
- [81] Uzun, A., & Değirmen, M. (2018). Endüstriyel İşletmelerde Enerji Verimliliği ve Enerji Yönetimi. *Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 4(2), 83–97. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ead/issue/48247/610769>
- [82] IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [83] IEA. (2022). *CO2 Emissions in 2022*. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- [84] Guo, H., Davidson, M. R., Chen, Q., Zhang, D., Jiang, N., Xia, Q., ... Zhang, X. (2020). Power market reform in China: Motivations, progress, and recommendations. *Energy Policy*, 145, 111717. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.111717>
- [85] Guang, F., Wen, L., & Sharp, B. (2022). Energy efficiency improvements and industry transition: An analysis of China's electricity consumption. *Energy*, 244, 122625. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.122625>
- [86] Lü, Y. L., Geng, J., & He, G. Z. (2015). Industrial transformation and green production to reduce environmental emissions: Taking cement industry as a case. *Advances in Climate Change Research*, 6(3–4), 202–209. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.10.002>
- [87] Allcott, H., & Greenstone, M. (2012). Is There an Energy Efficiency Gap? *Journal of Economic Perspectives*, 26(1), 3–28. <https://doi.org/10.1257/JEP.26.1.3>
- [88] Gillingham, K., Keyes, A., & Palmer, K. (2018). Advances in Evaluating Energy Efficiency Policies and Programs. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100517-023028>, 10, 511–532. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-RESOURCE-100517-023028>
- [89] Malinauskaite, J., Jouhara, H., Egilegor, B., Al-Mansour, F., Ahmad, L., & Pusnik, M. (2020). Energy efficiency in the industrial sector in the EU, Slovenia, and Spain. *Energy*, 208, 118398.

- <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.118398>
- [90] Ural, T., Akgün, M., Ertürk, M., Sıtkı Koçman Üniversitesi, M., Fakültesi, T., Sistemleri Mühendisliği, E., ... Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, S. (2020). Türkiye’de Doğalgazın Tüketildiği Mahallerde Kullanılan Havalandırma Menfezlerin Optimizasyonu. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(2), 157–168. <https://doi.org/10.29132/IJPAS.814457>
- [91] Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377–390. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)
- [92] Herring, H. (2006). Energy efficiency—a critical view. *Energy*, 31(1), 10–20. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2004.04.055>
- [93] Zhou, P., & Ang, B. W. (2008). Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance. *Energy Policy*, 36(8), 2911–2916. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2008.03.041>
- [94] Kaufman, N., & Palmer, K. L. (2012). Energy efficiency program evaluations: Opportunities for learning and inputs to incentive mechanisms. *Energy Efficiency*, 5(2), 243–268. <https://doi.org/10.1007/S12053-011-9130-X/TABLES/10>
- [95] Heutel, G. (2019). Prospect theory and energy efficiency. *Journal of Environmental Economics and Management*, 96, 236–254. <https://doi.org/10.1016/J.JEEM.2019.06.005>
- [96] Musbah, H., Ali, G., Aly, H. H., & Little, T. A. (2022). Energy management using multi-criteria decision making and machine learning classification algorithms for intelligent system. *Electric Power Systems Research*, 203, 107645. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2021.107645>
- [97] Liu, P., Zhu, B., & Wang, P. (2021). A weighting model based on best–worst method and its application for environmental performance evaluation. *Applied Soft Computing*, 103, 107168. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2021.107168>
- [98] Okursoy, A., & Tezsürücü, D. (2015). Veri Zarflama Analizi ile Göreli Etkinliklerin Karşılaştırılması: Türkiye’deki İllerin Kültürel Göstergelerine İlişkin Bir Uygulama. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 21(2), 1–18. <https://doi.org/10.18657/YECBU.92031>
- [99] Beltrán-Estève, M., & Picazo-Tadeo, A. J. (2017). Assessing environmental performance in the European Union: Eco-innovation versus catching-up. *Energy Policy*, 104, 240–252. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2017.01.054>
- [100] Chen, X., Liu, Z., & Zhu, Q. (2018). Performance evaluation of China’s high-tech innovation process: Analysis based on the innovation value chain. *Technovation*, 74–75, 42–53. <https://doi.org/10.1016/J.TECHNOVATION.2018.02.009>
- [101] Koltai, T., Lozano, S., Uzonyi-Kecskés, J., & Moreno, P. (2017). Evaluation of the results of a production simulation game using a dynamic DEA approach. *Computers & Industrial Engineering*, 105, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2016.12.048>
- [102] Zhou, X., Luo, R., An, Q., Wang, S., & Lev, B. (2019). Water resource environmental carrying capacity-based reward and penalty mechanism: A DEA benchmarking approach. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1294–1306. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.004>
- [103] Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429–444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- [104] Asghar, S., Sasaki, N., Jourdain, D., & Tsusaka, T. W. (2018). Levels of Technical, Allocative, and Groundwater Use Efficiency and the Factors Affecting the Allocative Efficiency of Wheat Farmers in Pakistan. *Sustainability 2018, Vol. 10, Page 1619*, 10(5), 1619. <https://doi.org/10.3390/SU10051619>
- [105] Singh, G., Singh, P., Sodhi, G. P. S., & Tiwari, D. (2021). Energy auditing and data envelopment analysis (DEA) based optimization for increased energy use efficiency in wheat cultivation (*Triticum aestivum* L.) in north-western India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101453. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101453>
- [106] Michali, M., Emrouznejad, A., Dehnohalaji, A., & Clegg, B. (2021). Noise-pollution efficiency analysis of European railways: A network DEA model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 98, 102980. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102980>
- [107] Izadikhah, M., Azadi, M., Toloo, M., & Hussain, F. K. (2021). Sustainably resilient supply chains evaluation in public transport: A fuzzy chance-constrained two-stage DEA approach. *Applied Soft Computing*, 113, 107879. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2021.107879>

- [108] Fukuyama, H., Matousek, R., & Tzeremes, N. G. (2020). A Nerlovian cost inefficiency two-stage DEA model for modeling banks' production process: Evidence from the Turkish banking system. *Omega*, 95, 102198. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2020.102198>
- [109] Henriques, I. C., Sobreiro, V. A., Kimura, H., & Mariano, E. B. (2020). Two-stage DEA in banks: Terminological controversies and future directions. *Expert Systems with Applications*, 161, 113632. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2020.113632>
- [110] Wu, H., Lv, K., Liang, L., & Hu, H. (2017). Measuring performance of sustainable manufacturing with recyclable wastes: A case from China's iron and steel industry. *Omega*, 66, 38–47. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2016.01.009>
- [111] Chen, X., & Lin, B. (2020). Assessment of eco-efficiency change considering energy and environment: A study of China's non-ferrous metals industry. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123388. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123388>
- [112] Yu, C., Shi, L., Wang, Y., Chang, Y., & Cheng, B. (2016). The eco-efficiency of pulp and paper industry in China: an assessment based on slacks-based measure and Malmquist–Luenberger index. *Journal of Cleaner Production*, 127, 511–521. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.03.153>
- [113] Feng, C., Huang, J. B., Wang, M., & Song, Y. (2018). Energy efficiency in China's iron and steel industry: Evidence and policy implications. *Journal of Cleaner Production*, 177, 837–845. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.231>
- [114] He, Y., Liao, N., & Zhou, Y. (2018). Analysis on provincial industrial energy efficiency and its influencing factors in China based on DEA-RS-FANN. *Energy*, 142, 79–89. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.10.011>
- [115] Lin, B., & Zhang, G. (2017). Energy efficiency of Chinese service sector and its regional differences. *Journal of Cleaner Production*, 168, 614–625. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.09.020>
- [116] Lin, B., & Zhao, H. (2016). Technology gap and regional energy efficiency in China's textile industry: A non-parametric meta-frontier approach. *Journal of Cleaner Production*, 137, 21–28. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.07.055>
- [117] Zhu, Q., Li, X., Li, F., & Zhou, D. (2020). The potential for energy saving and carbon emission reduction in China's regional industrial sectors. *Science of The Total Environment*, 716, 135009. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135009>
- [118] Lin, B., & Xu, M. (2018). Regional differences on CO2 emission efficiency in metallurgical industry of China. *Energy Policy*, 120, 302–311. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.05.050>
- [119] Hahn, G. J., Brandenburg, M., & Becker, J. (2021). Valuing supply chain performance within and across manufacturing industries: A DEA-based approach. *International Journal of Production Economics*, 240, 108203. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2021.108203>
- [120] Zhou, X., Chen, H., Chai, J., Wang, S., & Lev, B. (2020). Performance evaluation and prediction of the integrated circuit industry in China: A hybrid method. *Socio-Economic Planning Sciences*, 69, 100712. <https://doi.org/10.1016/J.SEPS.2019.05.003>
- [121] Chen, H., Qi, S., & Tan, X. (2022). The improvement pathway for industrial energy efficiency under sustainability perspective. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101949. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.101949>
- [122] Henning, S., Hasselbring, W., Burmester, H., Möbius, A., & Wojcieszak, M. (2021). Goals and measures for analyzing power consumption data in manufacturing enterprises. *Journal of Data, Information and Management*, 3(1), 65–82. <https://doi.org/10.1007/S42488-021-00043-5/FIGURES/7>
- [123] Graetz, G., & Michaels, G. (2018). Robots at Work. *The Review of Economics and Statistics*, 100(5), 753–768. https://doi.org/10.1162/REST_A_00754
- [124] Kumaresan, N., & Miyazaki, K. (1999). An integrated network approach to systems of innovation—the case of robotics in Japan. *Research Policy*, 28(6), 563–585. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(98\)00128-0](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(98)00128-0)
- [125] Sherwani, F., Asad, M. M., & Ibrahim, B. S. K. K. (2020). Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0). *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies, ICETST 2020*.

- <https://doi.org/10.1109/ICETST49965.2020.9080724>
- [126] Aghion, P., Jones, B. F., Jones, C. I., Agrawal, A., Ahmadpoor, M., Auclert, A., ... Jones, C. (2017). Artificial Intelligence and Economic Growth. <https://doi.org/10.3386/W23928>
- [127] Berg, A., Buffie, E. F., & Zanna, L. F. (2018). Should we fear the robot revolution? (The correct answer is yes). *Journal of Monetary Economics*, 97, 117–148. <https://doi.org/10.1016/J.JMONECO.2018.05.014>
- [128] Zeira, J. (1998). Workers, Machines, and Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 113(4), 1091–1117. <https://doi.org/10.1162/003355398555847>
- [129] Kromann, L., Malchow-Møller, N., Skaksen, J. R., & Sørensen, A. (2020). Automation and productivity—a cross-country, cross-industry comparison. *Industrial and Corporate Change*, 29(2), 265–287. <https://doi.org/10.1093/ICC/DTZ039>
- [130] Ballestar, M. T., Díaz-Chao, Á., Sainz, J., & Torrent-Sellens, J. (2020). Knowledge, robots and productivity in SMEs: Explaining the second digital wave. *Journal of Business Research*, 108, 119–131. <https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2019.11.017>
- [131] Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2018). Low-Skill and High-Skill Automation. <https://doi.org/10.1086/697242>, 12(2), 204–232. <https://doi.org/10.1086/697242>
- [132] Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2020). Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets. <https://doi.org/10.1086/705716>, 128(6), 2188–2244. <https://doi.org/10.1086/705716>
- [133] Yun, J. H. J., Won, D. K., Jeong, E. S., Park, K. B., Yang, J. H., & Park, J. Y. (2016). The relationship between technology, business model, and market in autonomous car and intelligent robot industries. *Technological Forecasting and Social Change*, 103, 142–155. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2015.11.016>
- [134] Jung, J. H., & Lim, D. G. (2020). Industrial robots, employment growth, and labor cost: A simultaneous equation analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 159, 120202. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2020.12.020>
- [135] Keynes, J. M. (2010). Economic Possibilities for Our Grandchildren. *Essays in Persuasion*, 321–332. https://doi.org/10.1007/978-1-349-59072-8_25
- [136] Goos, M., Manning, A., & Salomons, A. (2014). Explaining Job Polarization: Routine-Biased Technological Change and Offshoring. *American Economic Review*, 104(8), 2509–26. <https://doi.org/10.1257/AER.104.8.2509>
- [137] Michaels, G., Natraj, A., & Van Reenen, J. V. (2014). Has ICT Polarized Skill Demand? Evidence from Eleven Countries over Twenty-Five Years. *The Review of Economics and Statistics*, 96(1), 60–77. https://doi.org/10.1162/REST_A_00366
- [138] Autor, D. H., & Dorn, D. (2013). The Growth of Low-Skill Service Jobs and the Polarization of the US Labor Market. *American Economic Review*, 103(5), 1553–97. <https://doi.org/10.1257/AER.103.5.1553>
- [139] Herrendorf, B., Rogerson, R., & Valentinyi, Á. (2013). Two Perspectives on Preferences and Structural Transformation. *American Economic Review*, 103(7), 2752–89. <https://doi.org/10.1257/AER.103.7.2752>
- [140] Wang, E. Z., Lee, C. C., & Li, Y. (2022). Assessing the impact of industrial robots on manufacturing energy intensity in 38 countries. *Energy Economics*, 105, 105748. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2021.105748>
- [141] Meike, D., & Ribickis, L. (2011). Energy efficient use of robotics in the automobile industry. *IEEE 15th International Conference on Advanced Robotics: New Boundaries for Robotics*, ICAR 2011, 507–511. <https://doi.org/10.1109/ICAR.2011.6088567>
- [142] Paryanto, Brossog, M., Bornschlegl, M., & Franke, J. (2015). Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5–8), 1315–1328. <https://doi.org/10.1007/S00170-014-6737-Z/METRICS>
- [143] Gadaleta, M., Pellicciari, M., & Berselli, G. (2019). Optimization of the energy consumption of industrial robots for automatic code generation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 452–464. <https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2018.12.020>
- [144] Scalera, L., Boscariol, P., Carabin, G., Vidoni, R., & Gasparetto, A. (2020). Enhancing Energy Efficiency of a 4-DOF Parallel Robot Through Task-Related Analysis. *Machines* 2020, Vol. 8, Page 10, 8(1), 10. <https://doi.org/10.3390/MACHINES8010010>
- [145] Kaya, D., Çanka Kılıç, F., & Öztürk, H. H. (2021). Energy Management and Energy Efficiency in Industry. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-25995-2>

- [146] Çanka Kılıç, F. (2017). Endüstriyel Kazanlarda Enerji Verimliliği ve Emisyon Azalımı Fırsatları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(2), 147–158. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc/issue/49772/638531>
- [147] Yıldız Töre, G., & Elitaş, G. (2022). Industrial Energy Efficiency Technologies and Management Applications in Turkey. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(2), 55–72. <https://doi.org/10.55581/EJEAS.1217357>
- [148] Yıldız, A., Akgül, S., & Güvercin, S. (2018). Enerji Verimliliği ve Sanayideki Uygulamaları. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7(1), 16–22. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/duzceitbd/issue/37903/362117>
- [149] Terrell, R. E. (2012). Improving Compressed Air System Efficiency—Know What You Really Need. <http://dx.doi.org/10.1080/01998595.1999.10530444>, 96(1), 7–15. <https://doi.org/10.1080/01998595.1999.10530444>
- [150] Rusen, S. E., Topcu, M. A., Celtek, S. A., Celep, G. K., & Rusen, A. (2018). Investigation of energy saving potentials of a food factory by energy audit. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 7(1), 848–860. <https://www.journaleras.com/index.php/jeras/article/view/116>
- [151] Sousa Santos, V., Cabello Eras, J. J., Sagastume Gutierrez, A., & Cabello Ulloa, M. J. (2019). Assessment of the energy efficiency estimation methods on induction motors considering real-time monitoring. *Measurement*, 136, 237–247. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2018.12.080>
- [152] Chuang, H. C., Li, G. De, & Lee, C. T. (2019). The efficiency improvement of AC induction motor with constant frequency technology. *Energy*, 174, 805–813. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.03.019>
- [153] Ahmed, A. A., Moharam, B. A., & Rashad, E. E. (2022). Improving energy efficiency and economics of motor-pump-system using electric variable-speed drives for automatic transition of working points. *Computers & Electrical Engineering*, 97, 107607. <https://doi.org/10.1016/J.COMPELECENG.2021.107607>
- [154] John, N., Mohandas, R., Rajappan, S. C., & Shakthi, S. (2013). Energy Saving Mechanism Using Variable Frequency Drives.
- [155] Bakman, I., Gevorkov, L., & Vodovozov, V. (2014). Predictive control of a variable-speed multi-pump motor drive. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1409–1414. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864820>
- [156] Bakman, I., & Gevorkov, L. (2015). Speed control strategy selection for multi-pump systems. *2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2015*. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2015.7343174>
- [157] Vodovozov, V., Lehtla, T., Bakman, I., Raud, Z., & Gevorkov, L. (2016). Energy-efficient predictive control of centrifugal multi-pump stations. *10th International Conference - 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability, PQ 2016, Proceedings*, 233–238. <https://doi.org/10.1109/PQ.2016.7724119>
- [158] Vodovozov, V., & Raud, Z. (2017). Predictive control of multi-pump stations with variable-speed drives. *IET Electric Power Applications*, 11(5), 911–917. <https://doi.org/10.1049/IET-EPA.2016.0361>
- [159] Akhan, H. (2022). Sanayide enerji yönetimi: Pompa ve fan sistemlerinde verimlilik artırıcı uygulamalar. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 11–23. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tujes/issue/70957/1039319>
- [160] Sen, P. K. (1997). Reducing power consumption for axial flow mine ventilation fans. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 45(9–10), 301–303. <https://www.informaticsjournals.com/index.php/jmmf/issue/archive/5>
- [161] De Souza, E. (2015). Improving the energy efficiency of mine fan assemblages. *Applied Thermal Engineering*, 90, 1092–1097. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALEN.2015.04.048>
- [162] Panigrahi, D. C., & Mishra, D. P. (2014). CFD Simulations for the Selection of an Appropriate Blade Profile for Improving Energy Efficiency in Axial Flow Mine Ventilation Fans. *Journal of Sustainable Mining*, 13(1), 15–21. <https://doi.org/10.7424/JSM140104>
- [163] Okochi, G. S., & Yao, Y. (2016). A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV)

- air-conditioning systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 784–817. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.328>
- [164] Andersson, E., & Thollander, P. (2019). Key performance indicators for energy management in the Swedish pulp and paper industry. *Energy Strategy Reviews*, 24, 229–235. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2019.03.004>
- [165] Dünya Bankası. (2011). *Türkiye’de Enerji Tasarrufu Potansiyelini Kullanmak*. <https://documents1.worldbank.org/curated/pt/521081468318313907/pdf/522100Energy0S0entia0Energy0Turkey.pdf>
- [166] Kaya, D. (2019). Demir Çelik Sektöründe Enerji Verimliliği. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 201–204. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/bufbd/issue/50962/650393>
- [167] Chisalita, D. A., Petrescu, L., Cobden, P., van Dijk, H. A. J. (Eric), Cormos, A. M., & Cormos, C. C. (2019). Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO₂ capture and storage using the LCA methodology. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1015–1025. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.256>
- [168] Luh, S., Budinis, S., Giarola, S., Schmidt, T. J., & Hawkes, A. (2020). Long-term development of the industrial sector – Case study about electrification, fuel switching, and CCS in the USA. *Computers & Chemical Engineering*, 133, 106602. <https://doi.org/10.1016/J.COMPCHEMENG.2019.106602>
- [169] Ünlü, O. (2009). Sanayide Enerji Tasarrufu Çalışmalarının Önemi ve Buhar Sistemleri İle İlgili Uygulama Örnekleri. *TMMOB Makina Mühendisleri Odası*. <https://mmo.org.tr/tesisat-muhendisligi-111/makale/sanayide-enerji-tasarrufu-calismalarinin-onemi-ve-buhar-sistemleri>
- [170] Amran, M., Makul, N., Fediuk, R., Lee, Y. H., Vatin, N. I., Lee, Y. Y., & Mohammed, K. (2022). Global carbon recoverability experiences from the cement industry. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01439. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01439>
- [171] Belaïd, F. (2022). How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 15, 200084. <https://doi.org/10.1016/J.RCRADV.2022.200084>
- [172] Miller, S. A., Habert, G., Myers, R. J., & Harvey, J. T. (2021). Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies. *One Earth*, 4(10), 1398–1411. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2021.09.011>
- [173] Cao, Z., Myers, R. J., Lupton, R. C., Duan, H., Sacchi, R., Zhou, N., ... Liu, G. (2020). The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle. *Nature Communications* 2020 11:1, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17583-w>
- [174] Van Ruijven, B. J., Van Vuuren, D. P., Boskaljon, W., Neelis, M. L., Saygin, D., & Patel, M. K. (2016). Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 112, 15–36. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2016.04.016>
- [175] National Bureau of Statistics. (2021). *China Environment Statistics Yearbook*. China Statistics Press. Beijing. <http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2021/indexeh.htm>
- [176] Tavman, İ. (2016). Türkiye’nin Elektrik Üretimi ve Tüketimi, Çimento Sanayinde Enerji Geri Kazanımı. In *Enerji Stratejileri: İzmir Sempozyumu*. Buca: Dokuz Eylül University. https://www.researchgate.net/publication/303033772_Turkiye_nin_Elektrik_Uretimi_ve_Tuketimi_-_Cimento_Sanayinde_Enerji_Geri_Kazanimi
- [177] Leeson, D., Mac Dowell, N., Shah, N., Petit, C., & Fennell, P. S. (2017). A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 61, 71–84. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2017.03.020>
- [178] Psarras, P. C., Comello, S., Bains, P., Charoensawadpong, P., Reichelstein, S., & Wilcox, J. (2017). Carbon Capture and Utilization in the Industrial Sector. *Environmental Science and Technology*, 51(19), 11440–11449. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.7B01723/SUPPL_FILE/ES7B01723_SI_006.XLSX
- [179] Tomatis, M., Jeswani, H. K., Stamford, L., & Azapagic, A. (2020). Assessing the environmental sustainability of an emerging energy technology: Solar thermal calcination for cement production. *Science of The Total*

- Environment*, 742, 140510.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140510>
- [180] Bundela, P. S., & Chawla, V. (2010). Sustainable Development through Waste Heat Recovery. *American Journal of Environmental Sciences*, 6(1), 83–89.
<https://doi.org/10.3844/AJESSP.2010.83.89>
- [181] Wang, J., Dai, Y., & Gao, L. (2009). Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry. *Applied Energy*, 86(6), 941–948.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2008.09.001>
- [182] Thirugnanasambandam, M., Hasanuzzaman, M., Saidur, R., Ali, M. B., Rajakarunakaran, S., Devaraj, D., & Rahim, N. A. (2011). Analysis of electrical motors load factors and energy savings in an Indian cement industry. *Energy*, 36(7), 4307–4314.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2011.04.011>
- [183] Polat, B., Seval Bayram, N., Polat, A., Üniversitesi, M., Meslek Yüksekokulu, T., Teknolojisi Programı, İ., ... Mühendisliği Bölümü, İ. (2017). Güneydoğu Anadolu Bölgesi için İnşaat Sektöründeki İş Güvenliği Koşullarının İncelenmesi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 3(2), 68–78.
<https://doi.org/10.29132/IJPAS.341909>
- [184] Mezinska, I., & Strode, S. (2015). Emerging Horizons of Environmental Management in Food Sector Companies. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 213, 527–532.
<https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2015.11.445>
- [185] Corsini, A., Bonacina, F., Feudo, S., Lucchetta, F., & Marchegiani, A. (2016). Multivariate KPI for Energy Management of Cooling Systems in Food Industry. *Energy Procedia*, 101, 297–304.
<https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2016.11.038>
- [186] Jovanović, B., Filipović, J., & Bakić, V. (2017). Energy management system implementation in Serbian manufacturing – Plan-Do-Check-Act cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1144–1156.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.06.140>
- [187] Pradella, A. M., de Freitas Rocha Loures, E., da Costa, S. E. G., & de Lima, E. P. (2019). Energy Efficiency in the Food Industry: A Systematic Literature Review. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62(specialissue), e19190002.
<https://doi.org/10.1590/1516-8955-ABBT-2019-0002>
- [188] Jagtap, S., Rahimifard, S., & Duong, L. N. K. (2022). Real-time data collection to improve energy efficiency: A case study of food manufacturer. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(8), e14338.
<https://doi.org/10.1111/JFPP.14338>
- [189] Rüßen, S. E., & Çevik, M. S. (2020). Bir Gıda Fabrikasında Enerji Verimliliğinin İyileştirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(3), 539–552.
<https://doi.org/10.19113/SDUFENBED.498966>
- [190] Bahattin Kıyılmaz, M., Keçebaş, A., Ertürk, M., Sıtkı Koçman Üniversitesi, M., Bilimleri Enstitüsü, F., Sistemleri Mühendisliği, E., ... Mühendisliği Bölümü, M. (2021). Sanayide Enerji Yönetimi Sistemi için Bir Gıda Tesisinin Enerji Verimliliğinin İyileştirilmesi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 7(1), 51–62.
<https://doi.org/10.29132/IJPAS.815077>
- [191] Kaya, M. (2012). *Sanayide Enerji Verimliliği Potansiyeli ve Basınçlı Hava Sistemlerinde Verimlilik*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
<https://polen.itu.edu.tr/items/e19c0c7e-1a95-40f2-a756-5dc65acbe9>
- [192] AKBAŞ, B., KAYA, D., & EYİDOĞAN, M. (2018). Bir Otomobil Montaj Fabrikasının Enerji Tüketim Analizi ve Enerji Tasarrufu Potansiyelinin Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(691), 85–100.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/48796/621082>
- [193] Rivera, J. L., & Reyes-Carrillo, T. (2014). A Framework for Environmental and Energy Analysis of the Automobile Painting Process. *Procedia CIRP*, 15, 171–175.
<https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2014.06.022>
- [194] Çanka Kiliç, F., Eyidoğan, M., & Sapmaz, S. (2018). Bir otomobil montaj işletmesinde enerji verimliliği artırıcı çözümlerin irdelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1), 149–162.
<https://doi.org/10.29109/HTTP-GUJSC-GAZI-EDU-TR.331104>
- [195] Uylukçuoğlu, Ö. E. (2017). *Otomativ Sanayinde Enerji Verimliliği Ve Enerji Tasarruf Olanaklarının Belirlenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
<http://hdl.handle.net/11527/12789>
- [196] Capehart, B. L. (Barney L.), Turner, W. C., & Kennedy, W. J. (2016). *Guide to Energy Management*. The Fairmont Press, Inc.

- <https://www.routledge.com/Guide-to-Energy-Management-Eighth-Edition/Capehart-PhD-CEM-Turner-PhD-PE-CEM-Kennedy-PhD-PE/p/book/9781498759335>
- [197] Uzun, A., & Değirmen, M. (2018). Endüstriyel İşletmelerde Enerji Verimliliği ve Enerji Yönetimi. *Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 4(2), 83–97. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ead/issue/48247/610769>
- [198] Prashanth, M. S., Eshwar, R., Patel, V. K., Selvaraj, J., Rohit, R., Rahul, R., & Menon, G. K. (2014). A multi faceted approach to energy conservation in foundries. *Procedia Engineering*, 97, 1815–1824. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.335>
- [199] Lee, S. K., Teng, M. C., Fan, K. S., Yang, K. H., & Horng, R. S. (2011). Application of an energy management system in combination with FMCS to high energy consuming IT industries of Taiwan. *Energy Conversion and Management*, 52(8–9), 3060–3070. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2010.12.031>
- [200] Moya, D., Torres, R., & Stegen, S. (2016). Analysis of the Ecuadorian energy audit practices: A review of energy efficiency promotion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 289–296. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.04.052>
- [201] Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 667–679. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2010.11.011>
- [202] Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., & Thollander, P. (2016). Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3692–3708. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.06.060>
- [203] McLaughlin, E., Choi, J. K., & Kissock, K. (2022). Techno-Economic Impact Assessments of Energy Efficiency Improvements in the Industrial Combustion Systems. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 144(8). <https://doi.org/10.1115/1.4053137/1128944>
- [204] Cagno, E., Franzò, S., Storoni, E., & Trianni, A. (2022). A characterisation framework of energy services offered by energy service companies. *Applied Energy*, 324, 119674. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119674>
- [205] Thollander, P., & Palm, J. (2015). Industrial Energy Management Decision Making for Improved Energy Efficiency—Strategic System Perspectives and Situated Action in Combination. *Energies* 2015, Vol. 8, Pages 5694-5703, 8(6), 5694–5703. <https://doi.org/10.3390/EN8065694>
- [206] Bertoldi P, Diluiso F, Castellazzi L, N., L., & T., S. (2018). Energy Consumption and Energy Efficiency Trends in the EU-28 2000-2015. European Commission, JRC Science for Policy Report. https://ec.europa.eu/jrc%0Ahttps://ec.europa.eu/jrc%0Ahttp://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC110326/efficiency_trends_2017_final_lr.pdf
- [207] Andrei, M., Thollander, P., Pierre, I., Gindroz, B., & Rohdin, P. (2021). Decarbonization of industry: Guidelines towards a harmonized energy efficiency policy program impact evaluation methodology. *Energy Reports*, 7, 1385–1395. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.02.067>
- [208] Backlund, S., & Thollander, P. (2015). Impact after three years of the Swedish energy audit program. *Energy*, 82, 54–60. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.12.068>
- [209] Andersson, E., Arfwidsson, O., Bergstrand, V., & Thollander, P. (2017). A study of the comparability of energy audit program evaluations. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2133–2139. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.11.070>
- [210] Abdel-Hadi, A., Salem, A. R., Abbas, A. I., Qandil, M., & Amano, R. S. (2021). Study of energy saving analysis for different industries. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 143(5). <https://doi.org/10.1115/1.4048249/1086572>
- [211] Kluczek, A., & Olszewski, P. (2017). Energy audits in industrial processes. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3437–3453. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.123>
- [212] Worrell, E., Laitner, J. A., Ruth, M., & Finman, H. (2003). Productivity benefits of industrial energy efficiency measures. *Energy*, 28(11), 1081–1098. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00091-4)
- [213] Pye, M., & McKane, A. (2000). Making a stronger case for industrial energy efficiency by

- quantifying non-energy benefits. *Resources, Conservation and Recycling*, 28(3–4), 171–183. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(99\)00042-7](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(99)00042-7)
- [214] Nehler, T., & Rasmussen, J. (2016). How do firms consider non-energy benefits? Empirical findings on energy-efficiency investments in Swedish industry. *Journal of Cleaner Production*, 113, 472–482. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.11.070>
- [215] Zuberi, M. J. S., Tijdink, A., & Patel, M. K. (2017). Techno-economic analysis of energy efficiency improvement in electric motor driven systems in Swiss industry. *Applied Energy*, 205, 85–104. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.07.121>
- [216] Kapp, S., Choi, J. K., & Kissock, K. (2022). Toward energy-efficient industrial thermal systems for regional manufacturing facilities. *Energy Reports*, 8, 1377–1387. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.12.060>
- [217] Bosu, I., Mahmoud, H., & Hassan, H. (2023). Energy audit and management of an industrial site based on energy efficiency, economic, and environmental analysis. *Applied Energy*, 333, 120619. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.12.0619>
- [218] Martin, R., Muûls, M., De Preux, L. B., & Wagner, U. J. (2012). Anatomy of a paradox: Management practices, organizational structure and energy efficiency. *Journal of Environmental Economics and Management*, 63(2), 208–223. <https://doi.org/10.1016/J.JEEM.2011.08.003>
- [219] Tiller, S. R. (2011). Organizational Structure and Management Systems. *Leadership and Management in Engineering*, 12(1), 20–23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000160](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000160)
- [220] Sola, A. V. H., & Mota, C. M. M. (2020). Influencing factors on energy management in industries. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119263. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119263>
- [221] Otsuka, A. (2023). Industrial electricity consumption efficiency and energy policy in Japan. *Utilities Policy*, 81, 101519. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2023.101519>
- [222] Neves, F. de O., Salgado, E. G., & Beijo, L. A. (2017). Analysis of the Environmental Management System based on ISO 14001 on the American continent. *Journal of environmental management*, 199, 251–262. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.05.049>
- [223] Marimon, F., & Casadesús, M. (2017). Reasons to Adopt ISO 50001 Energy Management System. *Sustainability 2017*, Vol. 9, Page 1740, 9(10), 1740. <https://doi.org/10.3390/SU9101740>
- [224] Ferland, K., Brown, J., Meffert, B., Hake, D., Krawczyk, M., Mazza, M., & Waz, P. (2009). *Results from the Texas Pilot Project on Manufacturing Plant Energy Efficiency Certification*. https://www.ecee.org/library/conference_proceedings/ACEEE_industry/2009/Panel_3/3.59/
- [225] Zhou, X., Zhang, H., Rong, Y., Song, J., Fang, S., Xu, Z., ... Markides, C. N. (2022). Comparative study for air compression heat recovery based on organic Rankine cycle (ORC) in cryogenic air separation units. *Energy*, 255, 124514. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.124514>
- [226] Song, J., Li, X., Wang, K., & Markides, C. N. (2020). Parametric optimisation of a combined supercritical CO₂ (S-CO₂) cycle and organic Rankine cycle (ORC) system for internal combustion engine (ICE) waste-heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 218, 112999. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112999>
- [227] Markides, C. N. (2013). The role of pumped and waste heat technologies in a high-efficiency sustainable energy future for the UK. *Applied Thermal Engineering*, 53(2), 197–209. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALEN.2012.02.037>
- [228] Gangar, N., Macchietto, S., & Markides, C. N. (2020). Recovery and Utilization of Low-Grade Waste Heat in the Oil-Refining Industry Using Heat Engines and Heat Pumps: An International Technoeconomic Comparison. *Energies 2020*, Vol. 13, Page 2560, 13(10), 2560. <https://doi.org/10.3390/EN13102560>
- [229] European Commission. (2016). *EU Strategy on Heating and Cooling*. <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/package-energy-efficiency/file-eu-strategy-on-heating-and-cooling>
- [230] Jouhara, H., & Olabi, A. G. (2018). Editorial: Industrial waste heat recovery. *Energy*, 160, 1–2. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.07.013>
- [231] Jouhara, H., Chauhan, A., Nannou, T., Almahmoud, S., Delpech, B., & Wrobel, L. C.

- (2017). Heat pipe based systems - Advances and applications. *Energy*, 128, 729–754. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.04.028>
- [232] Cura, Ö., & Ögüt, E. (2022). Bir İşletmeye Ait Yardımcı Tesislerin Enerji Tüketimi ve Verimliliğinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(4), 1910–1925. <https://doi.org/10.29130/DUBITED.878810>
- [233] Fitó, J., Hodencq, S., Ramousse, J., Wurtz, F., Stutz, B., Debray, F., & Vincent, B. (2020). Energy- and exergy-based optimal designs of a low-temperature industrial waste heat recovery system in district heating. *Energy Conversion and Management*, 211, 112753. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112753>
- [234] Maouris, G., Sarabia Escriva, E. J., Acha, S., Shah, N., & Markides, C. N. (2020). CO2 refrigeration system heat recovery and thermal storage modelling for space heating provision in supermarkets: An integrated approach. *Applied Energy*, 264, 114722. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114722>
- [235] Liang, Y., Yu, Z., & Li, W. (2019). A Waste Heat-Driven Cooling System Based on Combined Organic Rankine and Vapour Compression Refrigeration Cycles. *Applied Sciences 2019, Vol. 9, Page 4242*, 9(20), 4242. <https://doi.org/10.3390/APP9204242>
- [236] Lecompte, S., Oyewunmi, O. A., Markides, C. N., Lazova, M., Kaya, A., Van Den Broek, M., & De Paepe, M. (2017). Case Study of an Organic Rankine Cycle (ORC) for Waste Heat Recovery from an Electric Arc Furnace (EAF). *Energies 2017, Vol. 10, Page 649*, 10(5), 649. <https://doi.org/10.3390/EN10050649>
- [237] Fatigati, F., Vittorini, D., Wang, Y., Song, J., Markides, C. N., & Cipollone, R. (2020). Design and Operational Control Strategy for Optimum Off-Design Performance of an ORC Plant for Low-Grade Waste Heat Recovery. *Energies 2020, Vol. 13, Page 5846*, 13(21), 5846. <https://doi.org/10.3390/EN13215846>
- [238] Ishaq, H., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2018). New trigeneration system integrated with desalination and industrial waste heat recovery for hydrogen production. *Applied Thermal Engineering*, 142, 767–778. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALEN.2018.07.019>
- [239] Wang, F., Wang, L., Zhang, H., Xia, L., Miao, H., & Yuan, J. (2021). Design and optimization of hydrogen production by solid oxide electrolyzer with marine engine waste heat recovery and ORC cycle. *Energy Conversion and Management*, 229, 113775. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.113775>
- [240] Bühler, F., Petrović, S., Holm, F. M., Karlsson, K., & Elmegaard, B. (2018). Spatiotemporal and economic analysis of industrial excess heat as a resource for district heating. *Energy*, 151, 715–728. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.03.059>
- [241] Pettersson, K., Axelsson, E., Eriksson, L., Svensson, E., Berntsson, T., & Harvey, S. (2020). Holistic methodological framework for assessing the benefits of delivering industrial excess heat to a district heating network. *International Journal of Energy Research*, 44(4), 2634–2651. <https://doi.org/10.1002/ER.5005>
- [242] Rastegarpour, S., Mariotti, A., Ferrarini, L., & Aminyavari, M. (2023). Energy efficiency improvement for industrial boilers through a flue-gas condensing heat recovery system with nonlinear MPC approach. *Applied Thermal Engineering*, 229, 120554. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALEN.2023.120554>
- [243] Johnson, I., Choate, W. T., & Davidson, A. (2008). Waste Heat Recovery. Technology and Opportunities in U.S. Industry. <https://doi.org/10.2172/1218716>
- [244] Firth, A., Zhang, B., & Yang, A. (2019). Quantification of global waste heat and its environmental effects. *Applied Energy*, 235, 1314–1334. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.10.102>
- [245] Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568–1579. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.192>
- [246] Jouhara, H., Khordeghah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 268–289. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2018.04.017>
- [247] Christodoulides, P., Agathokleous, R., Aresti, L., Kalogirou, S. A., Tassou, S. A., & Florides, G. A. (2022). Waste Heat Recovery Technologies Revisited with Emphasis on New Solutions, Including Heat Pipes, and Case Studies. *Energies 2022, Vol. 15, Page 384*, 15(1), 384. <https://doi.org/10.3390/EN15010384>
- [248] Yan, S. R., Fazilati, M. A., Samani, N., Ghasemi, H., Toghraie, D., Nguyen, Q., &

- Karimipour, A. (2020). Energy efficiency optimization of the waste heat recovery system with embedded phase change materials in greenhouses: A thermo-economic-environmental study. *Journal of Energy Storage*, 30, 101445. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101445>
- [249] Remeli, M. F., Tan, L., Date, A., Singh, B., & Akbarzadeh, A. (2015). Simultaneous power generation and heat recovery using a heat pipe assisted thermoelectric generator system. *Energy Conversion and Management*, 91, 110–119. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.12.001>
- [250] Jouhara, H., Almahmoud, S., Chauhan, A., Delpech, B., Bianchi, G., Tassou, S. A., ... Arribas, J. J. (2017). Experimental and theoretical investigation of a flat heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in the steel industry. *Energy*, 141, 1928–1939. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.10.142>
- [251] Oğulata, R. T., Doba, F., & Yilmaz, T. (1999). Second-law and experimental analysis of a cross-flow heat exchanger. *HEAT TRANSFER ENGINEERING*, 20(2), 20–27. <https://doi.org/10.1080/014576399271547>
- [252] Farshi, L. G., Khalili, S., & Mosaffa, A. H. (2018). Thermodynamic analysis of a cascaded compression – Absorption heat pump and comparison with three classes of conventional heat pumps for the waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 128, 282–296. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.09.032>
- [253] Gibbs, B. M. (1987). Boiler fuel savings by heat recovery and reduced standby losses. *Heat Recovery Systems and CHP*, 7(2), 151–157. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(87\)90079-2](https://doi.org/10.1016/0890-4332(87)90079-2)
- [254] Butcher, T. A., & Litzke, W. (1994). Condensing economizers for small coal-fired boilers and furnaces. <https://doi.org/10.2172/296650>
- [255] Wang, C., He, B., Yan, L., Pei, X., & Chen, S. (2014). Thermodynamic analysis of a low-pressure economizer based waste heat recovery system for a coal-fired power plant. *Energy*, 65, 80–90. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.11.084>
- [256] Willems, D. (2018). Advanced System Controls and Energy Savings for Industrial Boilers. *ASME 2006 Citrus Engineering Conference, CEC 2006*, 11–22. <https://doi.org/10.1115/CEC2006-5202>
- [257] Wang, D., Bao, A., Kunc, W., & Liss, W. (2012). Coal power plant flue gas waste heat and water recovery. *Applied Energy*, 91(1), 341–348. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.10.003>
- [258] Peris, B., Navarro-Esbri, J., Molés, F., & Mota-Babiloni, A. (2015). Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry. *Energy*, 85, 534–542. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.03.065>
- [259] Ramirez, M., Epelde, M., De Arteché, M. G., Panizza, A., Hammerschmid, A., Baresi, M., & Monti, N. (2017). Performance evaluation of an ORC unit integrated to a waste heat recovery system in a steel mill. *Energy Procedia*, 129, 535–542. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.09.183>
- [260] Cao, S. J., Kong, X. R., Deng, Y., Zhang, W., Yang, L., & Ye, Z. P. (2017). Investigation on thermal performance of steel heat exchanger for ground source heat pump systems using full-scale experiments and numerical simulations. *Applied Thermal Engineering*, 115, 91–98. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.12.098>
- [261] Jouhara, H., Almahmoud, S., Chauhan, A., Delpech, B., Nannou, T., Tassou, S. A., ... Arribas, J. J. (2017). Experimental investigation on a flat heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in steel industry. *Energy Procedia*, 123, 329–334. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.07.262>
- [262] Qin, S., & Chang, S. (2017). Modeling, thermodynamic and techno-economic analysis of coke production process with waste heat recovery. *Energy*, 141, 435–450. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.09.105>
- [263] Naeimi, A., Bidi, M., Ahmadi, M. H., Kumar, R., Sadeghzadeh, M., & Alhuyi Nazari, M. (2019). Design and exergy analysis of waste heat recovery system and gas engine for power generation in Tehran cement factory. *Thermal Science and Engineering Progress*, 9, 299–307. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2018.12.007>
- [264] Rüstem Çalapkulu, S. (2020). Kojenerasyon Sistemleri ve Trijenerasyon Sistemleri. *Mühendis ve Makine*, 5. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/14_9.pdf
- [265] Öztürk, H., & Kaya, D. (2012). *Biyoyakıt Üretimi ve Kullanımı*. Ankara: TMMOB

- Makina Mühendisleri Odası.
<https://kitap.mmo.org.tr/biyoyakit-uretimi-ve-kullanimi>
- [266] Elektrikport. (2015, April 28). Kojenerasyon Sistemi. 2023, <https://www.elektrikport.com/universite/kojen-erasyon-sistemi/4286#ad-image-0>
- [267] Ritchie, H. (2020). *Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?* <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>
- [268] Turgut, O., Bjerketvedt, V. S., Tomasgard, A., & Roussanaly, S. (2021). An integrated analysis of carbon capture and storage strategies for power and industry in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129427. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129427>
- [269] IC Change. (2014). *Mitigation of climate change.* [kneamazon.net. https://kneamazon.net/Documents/Publication/s/Virtual-Library/Impacto/157.pdf](https://kneamazon.net/Documents/Publication/s/Virtual-Library/Impacto/157.pdf)
- [270] Knopf, B., Chen, Y. H. H., De Cian, E., Förster, H., Kanudia, A., Karkatsouli, I., ... Van Vuuren, D. P. (2013). Beyond 2020-Strategies and Costs for Transforming The European Energy System. *Climate Change Economics*, 4(supp01). <https://doi.org/10.1142/S2010007813400010>
- [271] Vangkilde-Pedersen, T., Anthonsen, K. L., Smith, N., Kirk, K., neele, F., van der Meer, B., ... Peter Christensen, N. (2009). Assessing European capacity for geological storage of carbon dioxide—the EU GeoCapacity project. *Energy Procedia*, 1(1), 2663–2670. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2009.02.034>
- [272] Mirza, N., & Kearns, D. . (2022). *State Of The Art: Ccs Technologies 2022*. Global CSS Institute.
- [273] Mostafa, M., Antonicelli, C., Varela, C., Barletta, D., & Zondervan, E. (2022). Capturing CO2 from the atmosphere: Design and analysis of a large-scale DAC facility. *Carbon Capture Science & Technology*, 4, 100060. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2022.100060>
- [274] Arning, K., Offermann-van Heek, J., Linzenich, A., Kaetelhoeven, A., Sternberg, A., Bardow, A., & Ziefle, M. (2019). Same or different? Insights on public perception and acceptance of carbon capture and storage or utilization in Germany. *Energy Policy*, 125, 235–249. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.10.039>
- [275] Ahmed, M., Bashar, I., Alam, S. T., Wasi, A. I., Jerin, I., Khatun, S., & Rahman, M. (2021). An overview of Asian cement industry: Environmental impacts, research methodologies and mitigation measures. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 1018–1039. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.07.024>
- [276] Fennell, P. S., Davis, S. J., & Mohammed, A. (2021). Decarbonizing cement production. *Joule*, 5(6), 1305–1311. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.011>
- [277] Tapia, J. F. D., Lee, J. Y., Ooi, R. E. H., Foo, D. C. Y., & Tan, R. R. (2018). A review of optimization and decision-making models for the planning of CO2 capture, utilization and storage (CCUS) systems. *Sustainable Production and Consumption*, 13, 1–15. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2017.10.001>
- [278] Anthony, E. J., & Clough, P. T. (2019). Post-Combustion Carbon Capture and Storage in Industry. *Energy, Environment, and Sustainability*, 39–53. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3296-8_4/COVER
- [279] Bataille, C., Åhman, M., Neuhoff, K., Nilsson, L. J., Fishedick, M., Lechtenböhmer, S., ... Rahbar, S. (2018). A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. *Journal of Cleaner Production*, 187, 960–973. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.107>
- [280] Roussanaly, S., Berghout, N., Fout, T., Garcia, M., Gardarsdottir, S., Nazir, S. M., ... Rubin, E. S. (2021). Towards improved cost evaluation of Carbon Capture and Storage from industry. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 106, 103263. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2021.103263>
- [281] Anika, O. C., Nnabuife, S. G., Bello, A., Okoroafor, E. R., Kuang, B., & Villa, R. (2022). Prospects of low and zero-carbon renewable fuels in 1.5-degree net zero emission actualisation by 2050: A critical review. *Carbon Capture Science & Technology*, 5, 100072. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2022.100072>
- [282] IEA. (2020). *Global Energy Review 2020*. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>
- [283] IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- [284] Cachola, C. da S., Ciotta, M., Azevedo dos Santos, A., & Peyerl, D. (2023). Deploying of the carbon capture technologies for CO2 emission mitigation in the industrial sectors. *Carbon Capture Science &*

- Technology*, 7, 100102. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2023.100102>
- [285] Gough, C., & Mander, S. (2019). Beyond Social Acceptability: Applying Lessons from CCS Social Science to Support Deployment of BECCS. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 6(4), 116–123. <https://doi.org/10.1007/S40518-019-00137-0/METRICS>
- [286] Roussanaly, S., Jakobsen, J. P., Hognes, E. H., & Brunsvold, A. L. (2013). Benchmarking of CO2 transport technologies: Part I—Onshore pipeline and shipping between two onshore areas. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19, 584–594. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2013.05.031>
- [287] Roussanaly, S., Brunsvold, A. L., & Hognes, E. S. (2014). Benchmarking of CO2 transport technologies: Part II – Offshore pipeline and shipping to an offshore site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 28, 283–299. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2014.06.019>
- [288] Global CCS Institute. (2023). *Global Status of CCS 2023*. <https://status23.globalccsinstitute.com/>
- [289] Shaw, R., & Mukherjee, S. (2022). The development of carbon capture and storage (CCS) in India: A critical review. *Carbon Capture Science & Technology*, 2, 100036. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2022.100036>
- [290] Cormos, A. M., Dragan, S., Petrescu, L., Chisalita, D. A., Szima, S., Sandu, V. C., & Cormos, C. C. (2019). Reducing Carbon Footprint of Energy-Intensive Applications by CO₂ Capture Technologies: An Integrated Technical and Environmental Assessment. *Chemical Engineering Transactions*, 76, 1033–1038. <https://doi.org/10.3303/CET1976173>
- [291] Hanak, D. P., Erans, M., Nabavi, S. A., Jeremias, M., Romeo, L. M., & Manovic, V. (2018). Technical and economic feasibility evaluation of calcium looping with no CO₂ recirculation. *Chemical Engineering Journal*, 335, 763–773. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2017.11.022>
- [292] Alshammari, Y. M. (2021). Scenario analysis for energy transition in the chemical industry: An industrial case study in Saudi Arabia. *Energy Policy*, 150, 112128. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2020.112128>
- [293] Griffin, P. W., Hammond, G. P., & Norman, J. B. (2018). Industrial energy use and carbon emissions reduction in the chemicals sector: A UK perspective. *Applied Energy*, 227, 587–602. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.08.010>
- [294] Koşaroğlu, Ş. M., & Şengönül, A. (2018). Elektrik Tüketimi ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki: BRICS Ülkeleri İçin Bir Uygulama. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 19(2), 431–447. <http://esjournal.cumhuriyet.edu.tr/tr/pub/cumui/bf/issue/40744/455123>
- [295] Ergül, M., & Soylu, Ö. B. (2022). Türkiye’de Ticari Açıklık Ve Sanayide Enerji Tüketimi İlişkisi. *Dicle Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 12(24), 34–48. <https://doi.org/10.53092/DUIIBFD.1125920>
- [296] EİGM. (2022). *Türkiye Ulusal Enerji Planı*. https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EİGM/tr/Raporlar/TUEP/Türkiye_Ulusal_Enerji_Planı.pdf
- [297] EPDK. (2023). *2022 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu*. <https://epdk.gov.tr/detay/icerik/3-0-0-102/yillik-rapor-elektrik-piyasasi-gelisim-raporlari>
- [298] ETKB. (2023, March 16). Elektrik . T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2023, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>
- [299] ETKB. (2022). *2021 Ulusal Enerji Denge Tablosu - Orijinal Birimler / Bin TEP*. <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>
- [300] IICEC. (2020). *Turkey Energy Outlook 2020*. <https://iicec.sabanciuniv.edu/tr/teo>
- [301] TÜİK. (2023). *Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2021*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672>
- [302] Subramanian, S., Bastian, H., Hoffmeister, A., Jennings, B., Tolentino, C., Vaidyanathan, S., & Nadel, S. (2022). *2022 International Energy Efficiency Scorecard*. Washington. <https://www.aceee.org/research-report/i2201>
- [303] TMMOB Makina Mühendisleri Odası. (2012). *Dünya’da ve Türkiye’de Enerji Verimliliği*. <https://www.mmo.org.tr/kitaplar/dunyada-ve-turkiyede-enerji-verimlilik-0>
- [304] ETKB. (2022). *Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2022 Gelişim Raporu*. <https://enerji.gov.tr/evced-enerji-verimlilik-uevep>
- [305] TÜİK. (2024). *Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2023*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-SonucLari-2023-49684>
- [306] TÜİK. (2023). *Sektör Bilançoları, 2022*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sektor-Bilancolari-2022-49677>
- [307] TÜİK. (2023). *Yıllık Sanayi ve Hizmet İstatistikleri, 2022*.

- <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Yillik-Sanayi-ve-Hizmet-Istatistikleri-2022-49569>
- [308] TÜİK. (2024). *Ücretli Çalışan İstatistikleri, Aralık 2023*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Paid-Employee-Statistics-December-2023-49368>
- [309] IEA. (2023). *World Energy Statistics and Balances*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>
- [310] Köse, Z. (2016). Türkiye Ekonomisinde 2003-2014 Döneminde Ekonomik Büyüme İşsizlik ve Enflasyon İlişkisi. *Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 54–71. <http://tursbad.hku.edu.tr/tr/pub/tursbad/issue/31330/341770>
- [311] Greenaway, D., Morgan, W., & Wright, P. (1997). Trade liberalization and growth in developing countries: Some new evidence. *World Development*, 25(11), 1885–1892. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(97\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(97)00072-7)
- [312] Sadorsky, P. (2012). Energy consumption, output and trade in South America. *Energy Economics*, 34(2), 476–488. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2011.12.008>
- [313] Aydın, M. (2018). Enerji Tüketimi İle Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki: Düşük ve Orta Gelirli Ülkeler Örneği. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 36(1), 1–15. <https://doi.org/10.17065/HUNIIBF.411122>
- [314] Solow, R. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65–94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- [315] Swan, T. W. (1956). Economic Growth and Capital Accumulation. *Economic Record*, 32(2), 334–361. <https://doi.org/10.1111/J.1475-4932.1956.TB00434.X>
- [316] Romer, P. (1986). Increasing Returns and Long-run Growth. *Journal of Political Economy*, 94(5), 1002–37. <https://doi.org/10.1086/261420>
- [317] Paul, S., & Bhattacharya, R. N. (2004). Causality between energy consumption and economic growth in India: a note on conflicting results. *Energy Economics*, 26(6), 977–983. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2004.07.002>
- [318] Akinlo, A. E. (2008). Energy consumption and economic growth: Evidence from 11 Sub-Saharan African countries. *Energy Economics*, 30(5), 2391–2400. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2008.01.008>
- [319] Wolde-Rufael, Y. (2009). Energy consumption and economic growth: The experience of African countries revisited. *Energy Economics*, 31(2), 217–224. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2008.11.005>
- [320] Wang, S. S., Zhou, D. Q., Zhou, P., & Wang, Q. W. (2011). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in China: A panel data analysis. *Energy Policy*, 39(9), 4870–4875. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2011.06.032>
- [321] Belke, A., Dobnik, F., & Dreger, C. (2011). Energy consumption and economic growth: New insights into the cointegration relationship. *Energy Economics*, 33(5), 782–789. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2011.02.005>
- [322] Kraft, J., & Kraft, A. (1978). On the Relationship Between Energy and GNP. *The Journal of Energy and Development*, 3(2), 401–403.
- [323] Yu, E. S. H., & Choi, J.-Y. (1985). Causal relationship between energy and GNP. *The Journal of Energy and Development*, 10(2), 249–272. <https://www.jstor.org/stable/24807818>
- [324] Masih, A. M. M., & Masih, R. (1996). Energy consumption, real income and temporal causality: results from a multi-country study based on cointegration and error-correction modelling techniques. *Energy Economics*, 18(3), 165–183. [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(96\)00009-6](https://doi.org/10.1016/0140-9883(96)00009-6)
- [325] Mehrara, M. (2007). Energy consumption and economic growth: The case of oil exporting countries. *Energy Policy*, 35(5), 2939–2945. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2006.10.018>
- [326] Karadaş, H. A., Koşaroğlu, Ş. M., & Salihoğlu, E. (2017). Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 18(1), 129–141. <http://esjournal.cumhuriyet.edu.tr/tr/pub/cumuiibf/issue/32216/357734>
- [327] Altınar, A. (2019). MINT Ülkelerinde Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Panel Nedensellik Analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 10(2), 369–378. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gumus/issue/47286/454031>
- [328] Terzi, H. (1998). Türkiye’de Elektrik Tüketimi Ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Sektörel Bir Karşılaştırma. *İktisat İşletme ve Finans*, 13(144), 62–71. <https://doi.org/10.3848/İIF.1998.144.4020>
- [329] Mucuk, M., & Uysal, D. (2009). Türkiye ekonomisinde enerji tüketimi ve ekonomik büyüme. *Maliye Dergisi*, 0(157), 105–115. <http://search/yayin/detay/97762>

- [330] Başar, S., Tosun, B., & Bartık, A. (2020). Türkiye’de Büyüme ve Sektörel Bazda Elektrik Tüketimi Arasındaki İlişki. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 34(3), 1089–1109. <https://doi.org/10.16951/ATAUNIIIIBD.724638>
- [331] Öznur, A., & Özet, Ü. *. (2016). Türkiye’de Ticari Açıklık, Finansal Açıklık ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişkiler: Sınır Testi Yaklaşımı. *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9(1), 255–272. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/niguiibfd/issue/19761/211636>
- [332] İlter, Ş., & Burtan Doğan, B. (2018). Ticari ve Finansal Dışa Açıklık Oranı İle Ekonomik Büyüme Arasındaki Nedensellik İlişkisi: Türkiye Örneği. *Dicle Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(15), 89–115. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/duiibfd/issue/37998/438742>
- [333] Güngör, B. (2022). Türkiye’de Ticari Açıklık ve Doğrudan Yabancı Yatırım İlişkisi. *Artuklu Kaime Uluslararası İktisadi ve İdari Araştırmalar Dergisi*, 1–15. <https://doi.org/10.55119/ARTUKLU.1056193>
- [334] Korkmaz, Ö. (2018). Enerji Tüketimi İle Finansal Açıklık, Ticari Açıklık Ve Finansal Gelişme Arasındaki İlişkinin Karşılaştırmalı Analizi: Türkiye ve İtalya Örneği. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 83–100. <https://doi.org/10.18092/ULIKIDINCE.441281>
- [335] Özyıldız, T., & Diner, , Eda. (2022). Finansal Dışa Açıklık Ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki: Gelişmekte Olan Ülkeler İçin Bir Panel Veri Analizi. *EKEV Akademi Dergisi*, (90), 441–458. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sosekev/issue/71356/1147208>
- [336] Saçık, S. Y. (2009). Büyümenin Bir Kaynağı Olarak Ticari Dışa Açıklık. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 9(17), 525–548. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/susead/issue/28418/302603>
- [337] Özata, E. (2015). Türkiye’de Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişkilerin Ekonometrik İncelemesi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (26), 8/65577. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dpusbe/issue/4768/65577>
- [338] Barut, M. E., & Çelik, E. (2021). Türkiye’de Sanayide Tüketilen Elektrik Enerjisi İle Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki: Granger Nedensellik Analizi. *Nicel Bilimler Dergisi*, 3(1), 43–58. <https://doi.org/10.51541/NICEL.900484>
- [339] Caffal, C. (1995). *Learning from experiences with energy management in industry*. (S. Hodgson, Ed.). Sittard: Centre for Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET analyses series, ISSN 0925-0085; no.17).
- [340] Larsen, A., & Jensen, M. (1999). Evaluations of energy audits and the regulator. *Energy Policy*, 27(9), 557–564. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(99\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(99)00033-6)
- [341] Bertoldi, P., & Rezessy, S. (2007). Voluntary Agreements for Energy Efficiency: Review and Results of European Experiences. <http://dx.doi.org/10.1260/095830507780157258>, 18(1), 37–73. <https://doi.org/10.1260/095830507780157258>
- [342] Bjørner, T. B., & Jensen, H. H. (2002). Energy taxes, voluntary agreements and investment subsidies—a micro-panel analysis of the effect on Danish industrial companies’ energy demand. *Resource and Energy Economics*, 24(3), 229–249. [https://doi.org/10.1016/S0928-7655\(01\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0928-7655(01)00049-5)
- [343] Christoffersen, L. B., Larsen, A., & Togeby, M. (2006). Empirical analysis of energy management in Danish industry. *Journal of Cleaner Production*, 14(5), 516–526. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2005.03.017>
- [344] Kaya, D., & Öztürk, H. H. (2014). *Sanayide Enerji Yönetimi ve Enerji Verimliliği: Uygulamalı Örneklerle. Unversytet şlaşki. Kocaeli: Umuttepe Yayınevi.* <https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- [345] T.C. Ticaret Bakanlığı İhracat Genel Müdürlüğü. (2022). *Tekstil ve Hammaddeleri Raporu 2022.* <https://ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/Tekstil%20ve%20Hammaddeleri%20Raporu%202022.pdf>
- [346] Değirmen, D., & Eker Şanlı, G. (2022). BİR TEKSTİL İŞLETMESİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE EMİSYON AZALTIM OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI: HAVLU ÜRETİM TESİSİ. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(1), 71–88. <https://doi.org/10.17482/UUMFD.1022661>
- [347] Gelir, B. Ç. (2017). *Tekstil Sektöründe Kullanılan Ramöz Makinelerinde Isı Geri Kazanımı ile Enerji Tasarrufu.* Namık Kemal Üniversitesi.

- <http://acikerisim.nku.edu.tr/xmlui/handle/20.500.11776/2424>
- [348] Tunc, M., Kaplan, K., Sisbot, S., & Camdali, U. (2016). Energy management and optimization: Case study of a textile plant in Istanbul, Turkey. *World Journal of Engineering*, 13(4), 348–355. <https://doi.org/10.1108/WJE-08-2016-046/FULL/XML>
- [349] Pulat, E., Etemoglu, A. B., & Can, M. (2009). Waste-heat recovery potential in Turkish textile industry: Case study for city of Bursa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(3), 663–672. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2007.10.002>
- [350] Koçlu, A. (2011). Tekstil endüstrisinde plakalı ısı değiştiricilerle atık ısı geri kazanım sistemi ve performansının değerlendirilmesi. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/688933>
- [351] Kaşka, Ö. (2014). Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry. *Energy Conversion and Management*, 77, 108–117. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2013.09.026>
- [352] TÜTÜNCÜ, G., & ÖZGENER, Ö. (2016). ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE ATIK ISI GERİ KAZANIM SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK İNCELEMESİ. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 18(53), 205–223. <https://doi.org/10.21205/deufmd.20165318382>
- [353] Eyidoğan, M., Kaya, D., Dursun, Ş., & Taylan, O. (2014). Endüstriyel Tav Fırınlarında Enerji Tasarrufu ve Emisyon Azaltım Fırsatları. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4), 735–743. <https://doi.org/10.17341/GUMMFD.76579>
- [354] İbrahim TOPAL, H., Kopaç, M., & Mustafa EYRİBOYUN, ve. (2017). Çatalağzı Termik Elektrik Santrali ile Bölgesel Isıtma Yapılabilirliğinin Enerji Analizi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 37(1), 139–146. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/isisbted/issue/33976/376112>
- [355] Isı, A., Kazanım, G., Yönelik, S., Araştırması, L., Örnek, S., İncelemesi, V., ... Özgün, Ö. (2019). Atık Isı Geri Kazanım Sistemlerine Yönelik Literatür Araştırması ve Sanayiden Örnek Vaka İncelemesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 57–72. <https://doi.org/10.21605/CUKUROVAUMMF.D.608955>
- [356] Tokgöz, N., & Özgün, Ö. (2019). Atık Isı Geri Kazanım Sistemlerine Yönelik Literatür Araştırması ve Sanayiden Örnek Vaka İncelemesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 57–72. <https://doi.org/10.21605/CUKUROVAUMMF.D.608955>
- [357] Akhan, H. (2023). Energy Management Practices for Improving Energy Efficiency in Industries: Furnace, Steam Boiler, HVAC, and Cooling Systems. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(1), 195–210. <https://doi.org/10.21605/CUKUROVAUMFD.1273782>
- [358] T.C. Ticaret Bakanlığı İhracat Genel Müdürlüğü. (2022). *Otomotiv Sektör Raporu 2022*. <https://ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/OTOMOTIV%20SEKTÖR%20RAPORU.pdf>
- [359] SİPAHİ, B. (2019). *Otomotiv sanayinde potansiyel enerji verimliliği projeleri*. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=sEsf_Ef8v6QhfewgfYilXg&no=RpCvuO52LGsXsIs2novr-g
- [360] Ediz, S. B. (2023, July 26). *Otomotiv yan sanayisinde parça üretim faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonları, karbon ayak izi hesaplamaları ve enerji verimliliği uygulama önerileri*. Uludağ Üniversitesi, Bursa. <http://hdl.handle.net/11452/33953>
- [361] Arif Göçer, D., & Yiğit, Ö. (2020). Hava Kompresörü Verimliliğine Basınç Yükseltici Kullanımının Etkisinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 136–141. <https://doi.org/10.31590/EJOSAT.801905>
- [362] SAPMAZ, S., & KAYA, D. (2017). Basınçlı Hava Sistemlerinde Enerji Verimliliği ve Emisyon Azaltım Fırsatlarının İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 58(689), 23–36. <https://dergipark.org.tr/en/pub/muhendismakin/a/issue/48819/621632>
- [363] DEĞİRMEN, D., HASDEMİR, I., & ŞANLI, G. E. (2023). OTOMOTİV VE GIDA SEKTÖRLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE KARBON EMİSYONUNUN AZALTIMI İLE İLGİLİ BİR ÇALIŞMA. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 28(3), 937–956. <https://doi.org/10.17482/UUMFD.1340246>
- [364] Ener Ruşen, S. (2019). Elektrik Motorlarının Verimlilik ve CO2 Emisyon Analizi; Bir Gıda Fabrikası Örneği. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (17), 564–569. <https://doi.org/10.31590/EJOSAT.622573>

- [365] Dubnička, R., Lipnický, L., Barčík, M., & Gašparovský, D. (2016). Comprehensive view of LED products in luminaires. *Proceedings of International Conference DEMISEE 2016: Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering*, 66–70. <https://doi.org/10.1109/DEMISEE.2016.7530467>
- [366] PERDAHÇI, C. (2018). Metal İşleme Tesis Aydınlatmasında Led Lamba Ve Floresan Lamba Karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(3), 105–113. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/fumbd/issue/39229/461985>
- [367] YILDIZ, C., & AKGÜL, A. (2023). Türkiye'nin Akdeniz kıyılarında açık deniz güneş ve rüzgâr enerjisi üretiminin verim bazlı karşılaştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 122–136. <https://doi.org/10.25092/BAUNFBED.1149532>
- [368] YILDIZ, C. (2020, September). *Offshore Solar Plants: A Design Study*. Graduate School of Natural and Applied Sciences, İSTANBUL. https://www.researchgate.net/publication/361536147_Offshore_Solar_Plants_A_Design_Study
- [369] Alshammari, Y. M. (2021). Scenario analysis for energy transition in the chemical industry: An industrial case study in Saudi Arabia. *Energy Policy*, 150, 112128. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2020.112128>
- [370] An, Y., Zhou, D., Yu, J., Shi, X., & Wang, Q. (2021). Carbon emission reduction characteristics for China's manufacturing firms: Implications for formulating carbon policies. *Journal of Environmental Management*, 284, 112055. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112055>
- [371] TÜİK. (2024). *Dış Ticaret İstatistikleri, Aralık 2023*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Dis-Ticaret-Istatistikleri-Aralik-2023-49630>
- [372] Su, Y. W. (2023). The drivers and barriers of energy efficiency. *Energy Policy*, 178, 113598. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2023.113598>
- [373] Saçık, S. Y. (2009). Büyümenin Bir Kaynağı Olarak Ticari Dışa Açıklık. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 9(17), 525–548. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/susead/issue/28418/302603>