

INDUSTRIAL DECARBONIZATION: THE ROLE OF MATERIAL EFFICIENCY STRATEGIES

Burcu HIÇYILMAZ - Sedat ALATAŞ
Etem KARAKAYA

ABSTRACT

Mitigating industrial emissions is highly critical to achieving the net-zero emissions target. However, the fact that this sector is a part of a carbon-intensive production process makes it difficult to reduce emissions resulting from material production and use. The purpose of this study is to emphasize the importance of material efficiency for industrial decarbonization and to discuss the strategies that can be implemented in this direction. To this end, this study first discusses why the industrial sector is considered a “hard-to-abate” sector, industrial mitigation options, and the critical role of material efficiency from the mitigation policy perspective. Secondly, this paper discusses the material efficiency strategies and in which stages of product life cycle these strategies can be implemented. All these discussions are based on the findings obtained from the studies in the literature and the reports published by international leading institutions and organizations. The findings show that there is a great potential for industrial decarbonization, and efficient use of materials can significantly contribute to the sustainability and circular economy in the process from the design stage to the end of its life. Moreover, it is found that the design and use stages have the highest emission reduction potential. Unlike the other studies in the literature, with paying special attention to the industry sector, this study discusses material efficiency, material efficiency strategies, and the stages in which these strategies can be implemented. In this regard, this study is believed to significantly contribute to the literature.

Keywords: Industrial Decarbonization, Material Efficiency, Material Efficiency Strategies, Circular Economy

Arş. Gör. Dr. Nazilli İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü
Mail: burcu.yilmaz@adu.edu.tr

 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3501-2012>

Arş. Gör. Dr. Nazilli İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü
Mail: sedat.alatas@adu.edu.tr

 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-8746>

Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü
Mail: etem.karakaya@ogu.edu.tr

 ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0905-9116>

Makale Atf Bilgisi: Makale Atf Bilgisi: Hiçyılmaz B., Alataş S. ve Karakaya E. (2022).
“Sanayide Karbonsuzlaşma: Malzeme Etkinliği Stratejilerinin Rolü”.
Çevre, Şehir ve İklim Dergisi. Yıl: 1. Sayı: 2. ss. 81-118.

Makale Türü: Araştırma
Geliş Tarihi: 24.05.2022
Kabul Tarihi: 07.07.2022
Yayın Tarihi: 31.07.2022
Yayın Sezonu: Temmuz 2022

SANAYİDE KARBONSUZLAŞMA: MALZEME ETKİNLİĞİ STRATEJİLERİNİN ROLÜ¹

Burcu HIÇYILMAZ - Sedat ALATAŞ
Etem KARAKAYA

ÖZ

Sanayi emisyonlarının azaltımı net sıfır emisyon hedefinin başarılması için kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, bu sektörün karbon yoğun bir üretim sürecinin parçası olması, malzeme üretimi ve kullanımı sonucu ortaya çıkan emisyon azaltımını zorlaştırmaktadır. Bu çalışmanın amacı, sanayide karbonsuzlaşma için malzeme etkinliğinin öneme vurgu yapmak ve bu yönde uygulanabilecek stratejileri tartışmaktır. Bu yüzden, ilk olarak, sanayi sektörünün neden “azaltım yapılması zor” sektör olduğunu, sanayi sektörü azaltım seçeneklerini ve malzeme etkinliğinin azaltım politikası bağlamındaki kritik rolünü ele almaktadır. İkinci olarak, malzeme etkinliğini sağlayacak stratejileri ve bu stratejilerin hangi ürün yaşam döngüsü aşamalarında gerçekleştirilebileceğini tartışmaktadır. Tüm bu tartışmalar, literatürdeki çalışmalardan elde edilen bulgulara ve önemli kurum ve kuruluşların yayınladığı raporlara dayanmaktadır. Bulgular, sanayide karbonsuzlaşma için büyük bir potansiyel olduğunu ve ürünün tasarım aşamasından kullanım ömrü sonuna kadar geçirdiği süreçte, malzemenin etkin kullanımının sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi açısından önemli katkılar sunabileceğini göstermektedir. Dahası, emisyon azaltım potansiyeli en yüksek olan aşamaların, tasarım ve kullanım aşamaları olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, diğer çalışmalardan farklı olarak, malzeme etkinliği konusunu sanayi sektörü özelinde tartışmakta, ve malzeme etkinliğini sağlayacak stratejileri ve bu stratejilerin gerçekleştirilebileceği aşamaları tartışmaktadır. Bu bağlamda, literatüre önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sanayide Karbonsuzlaşma, Malzeme Etkinliği, Malzeme Etkinliği Stratejileri, Döngüsel Ekonomi

1 Bu çalışma “Malzeme Talebi ve Malzeme Verimliliğinin Sürdürülebilirlik Açısından Analizi: Ülkeler Arası Karşılaştırmalı bir Analiz ve Türkiye için Değerlendirmeler” başlıklı 221K082 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.

Giriş

2015 yılının sonunda Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) 21. Taraflar Konferansı'nda (COP21) 195 ülkenin onayıyla kabul edilen Paris Anlaşması'nın uzun vadeli temel hedefi, küresel ortalama sıcaklık artışını sanayileşme öncesi döneme göre 2°C derecenin altında tutmak ve mümkünse 1,5°C derece ile sınırlandırmaktır (Birleşmiş Milletler [UN], 2015). Söz konusu bu uzun vadeli hedefin başarılması, büyük ölçüde, fosil yakıt kullanımına bağlı olarak atmosfere salınan sera gazlarının, özellikle de toplam sera gazları içinde en büyük paya sahip karbondioksit (CO₂) emisyonlarının azaltılmasına yönelik küresel ölçekte acil önlemlerin alınmasına bağlıdır. Eğer bu hedefler başarılamazsa, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporunda belirtildiği üzere, küresel ortalama sıcaklık artışının toplumlar ve doğa üzerindeki olumsuz etkileri giderek artacak (IPCC, 2018-2022a). Bu yüzden, ülkelerin daha iddialı iklim taahhütlerinde bulunması ve bu amaca yönelik olan iklim politikalarını uygulamaya geçirmesi, 1,5°C hedefinin başarılması noktasında en çok tartışılan konuların başında gelmektedir (COP26, 2021).

İklim değişikliği ile mücadelenin merkezinde yer alan en önemli konulardan biri şüphesiz sektörel emisyonlar, özellikle de sanayi sektörü kaynaklı emisyonların azaltımıdır. Bunun en önemli sebebi toplam karbon emisyonlarının yaklaşık olarak %40'ının sanayi sektörü kaynaklı olması ve bu yüksek oranın sanayi sektörünü sektörlere göre emisyon miktarı sıralamasında birinci sıraya yerleştirmesidir (Uluslararası Enerji Ajansı [IEA], 2021a). Bu yüzden, sanayi sektörü temelli iklim stratejilerinin iklim değişikliği ile mücadele kapsamında oldukça önemli olduğu, net-sıfır emisyon hedefinin, sanayi sektörü kaynaklı emisyonları dikkate almadıkça başarısızlıkla sonuçlanacağı öngörülmektedir (Material Economics [ME], 2019; IEA, 2021b).

Bununla birlikte, sanayi sektörü kaynaklı emisyonların azaltımının bazı yönleriyle diğer sektörlerden farklı olması, sanayi sektörünün "azaltım yapılması zor (hard-to-abate)" sektör olarak nitelendirilmesine sebep olmakta (Ahman ve Nilsson, 2015; Loftus vd., 2015; Wesseling vd., 2017; Bataille vd., 2018; Bataille, 2020, IEA, 2020b) ve azaltım bağlamında diğer sektörlerin gerisinde bırakmaktadır (Allwood vd., 2011; Allwood vd., 2013; Denis-Ryan vd., 2016; Aidt vd., 2017; Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü [OECD]/IEA, 2017; Davis vd., 2018; Bataille vd., 2018; ME, 2019; Bataille, 2020; Alataş vd., 2021a-b; Karakaya vd., 2021). Sanayi sektörünü "azaltım yapılması zor" yapan ve diğer sektörlerin gerisinde bırakan birçok farklı neden bulunmaktadır: karbon kaçağı riski, maliyet baskısı ve ekonomik-teknik bağımlılıklar vb. Ne var ki, genel bir değerlendirme ile, bu nedenlerin temel olarak sanayi sektörünün üretim yapısıyla ilintili olduğu ileri sürülebilir. Daha açık bir ifadeyle, sanayi sektörü kaynaklı emisyonların önemli bir kısmından demir ve çelik, çimento

ve kimyasallar-petrokimya gibi sanayi alt sektörleri sorumludur. Söz konusu bu alt sektörlerin (i) enerji yoğun bir üretim sürecinin parçası olması ve bu enerji ihtiyacını çoğunlukla fosil yakıttan karşılaması, (ii) üretim aşamasında gerçekleşen kimyasal sürecin sebep olduğu proses emisyonların varlığı, sanayi sektörü temelli azaltımı zorlaştırmaktadır (Baumert vd., 2005; Allwood vd., 2010; ME, 2019; Davis vd., 2018; Bataille vd., 2018; Bataille, 2020; IEA, 2020b; Feldmann ve Kennedy, 2021; Fransen vd., 2021).

Sanayi sektörünü emisyon yoğun yapan faktörler, aynı zamanda, sanayi sektörü emisyon azaltım seçeneklerinin belirlenmesi noktasında da oldukça önemlidir. Bu bağlamda, son dönemlerde yürütülen akademik çalışmalar (Alwood vd., 2011; Aidt vd., 2017; Bataille, 2020; Alataş vd., 2021a; Karakaya vd., 2021) ve uluslararası kuruluşların hazırlamış olduğu raporlar (ME, 2019; IEA, 2020b; International Resource Panel [IRP], 2020; IEA, 2021b-2021c), sanayi sektöründe uzun vadeli sıfır emisyon hedefine ulaşılması konusunda, kaynakların, özellikle de malzemenin etkin kullanımına vurgu yapmaktadır.

Malzeme etkinliği, temel olarak, aynı düzeyde çıktı için daha az miktarda malzeme kullanılmasını ifade etmektedir. Bu malzemeler ise, çoğunlukla, sanayi sektörü tarafından üretilen emisyon yoğun çimento, metaller, plastik, ve ahşap gibi ürünler olduğu için, malzeme etkinliği stratejilerinin bu sektörden kaynaklı emisyonların azaltımında kritik rol oynayacağı düşünülmektedir (IPCC, 2022b). IRP (2020) raporuna göre, malzemeye olan talep son yıllarda önemli derecede artmıştır. Örneğin, 2019 yılı itibariyle tüketilen yurtiçi malzeme miktarı, 1970 yılı değerinin yaklaşık olarak 3 katından fazladır. Daha önemlisi, malzeme talebindeki söz konusu bu ciddi artışın emisyonları ilave olarak %43 artırabileceği öngörülmektedir. Bu yüzden, şu ana kadar çoğunlukla göz ardı edilen ve sanayi emisyonlarının Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'dan (GSYH) ayrışmasına (decoupling) fazla katkıda bulunamayan malzemenin etkin kullanımının, azaltım için gelecekte büyük bir potansiyel ortaya koyacağı öngörülmektedir (ME, 2019; IEA, 2020b; IRP, 2020; IEA, 2021b-2021c, IPCC, 2022b).

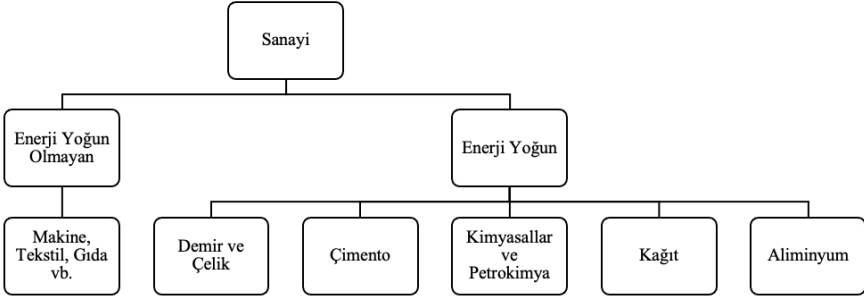
Bu çalışmanın temel amacı sanayide karbonsuzlaşma için malzeme etkinliğinin önemini ve bu yönde uygulanabilecek stratejileri tartışmaktır. Bu amaçla, ilk olarak sanayi sektörünün neden "azaltım yapılması zor" sektör olduğunu konu edinip, sanayi sektörü azaltım seçeneklerini ve malzeme etkinliğinin kritik rolünü ele almaktadır. İkinci olarak, malzeme etkinliğini sağlayacak stratejileri ve bu stratejilerin hangi ürün yaşam döngülerinde gerçekleştirilebileceğini tartışmaktadır. Elde edilen bulgular, sanayide karbonsuzlaşma için devasa bir dönüşüme ihtiyaç duyulduğunu, ürünün tasarım aşamasından tüketim aşamasına kadar giden süreçinde malzemenin etkin kullanımının sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi açısından oldukça önemli olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın izleyen ikinci bölümü sanayi sektörü kaynaklı emisyonların mevcut durumunu, azaltımını zorlaştıran faktörleri, azaltım seçeneklerini ve malzeme etkinliğinin azaltım politikası bağlamındaki önemini ve potansiyelini tartışmaktadır. Üçüncü bölüm, ürün yaşam aşamalarının kapsamını ve her aşamaya uygun olan malzeme stratejilerinin neler olduğunu ele alırken, dördüncü bölüm elde edilen sonuçları değerlendirmektedir.

1. Sanayi Sektörü, Azaltım Seçenekleri Ve Malzeme Etkinliği

a. Sanayi Emisyonları

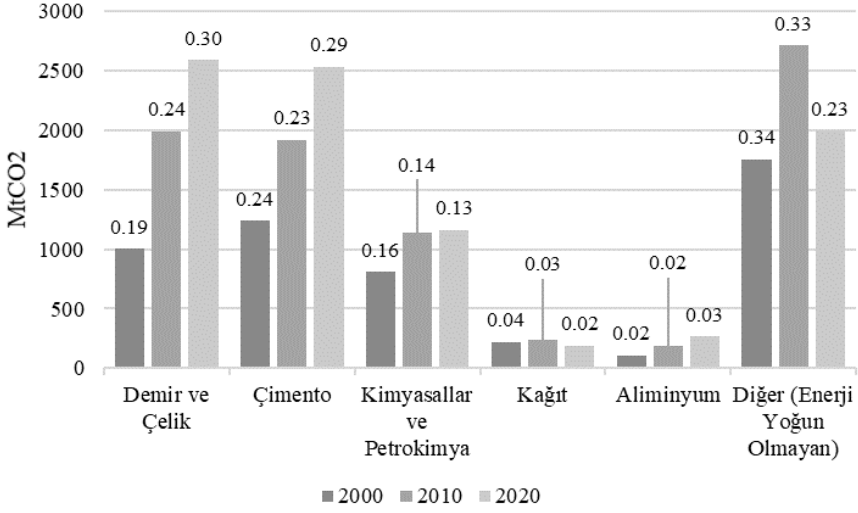
Sanayi sektörü iki temel alt sektörden oluşmaktadır: enerji yoğun alt sektörler ve enerji yoğun olmayan alt sektörler. Bu durum Şekil 1’de gösterilmektedir. Enerji yoğun olmayan alt sektörler makine, tekstil ve deri, gıda ve tütün gibi alt sektörleri kapsarken, enerji yoğun sektörler demir ve çelik, çimento (metalik olmayan mineraller), kimyasallar ve petrokimya, kağıt ve alüminyum (demir dışı metaller) gibi alt sektörlerden oluşmaktadır.



Şekil 1. Sanayi Alt Sektörleri

Kaynak: IEA (2021b)

Sanayi sektörü enerji tüketimi, 2010 ile 2019 arasında yılda ortalama %1 artmıştır ve 2020 yılı itibarıyla toplam küresel nihai enerji kullanımının %38’inden tek başına sorumludur. Söz konusu bu yüksek enerji ihtiyacının fosil yakıt payı yıllar itibarıyla azalmış olsa da, 2020 yılında hala %65’in üstündedir. Son on yılda enerji tüketimindeki bu büyüme, büyük ölçüde sanayi sektörünün enerji yoğun alt sektörlerinde (özellikle demir-çelik, çimento ve kimyasallar-petrokimya) devam eden uzun vadeli ve artan üretim eğilimi tarafından belirlenmektedir.



Şekil 2: Sanayi Alt Sektörlerinin Doğrudan CO2 Emisyonları (2000, 2010 ve 2020)

Kaynak: IEA (2021c)

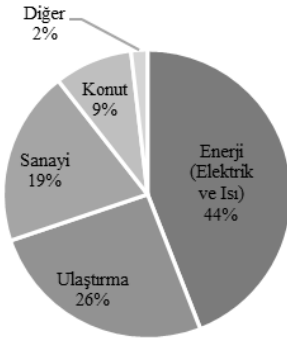
Şekil 2 sanayi alt sektörleri (demir ve çelik, çimento, kimyasallar ve petrokimya, kağıt ve alüminyum vd.) doğrudan CO2 emisyonlarını ve bu emisyonların sanayi sektörü kaynaklı emisyonlar içindeki payını 2000, 2010 ve 2020 dönemleri için göstermektedir. Görüldüğü üzere, demir-çelik ve çimento sanayi alt sektörleri toplam sanayi emisyonları içinde önemli bir paya sahiptir ve bu pay yıllar itibariyle giderek artmaktadır. Örneğin, bu iki enerji yoğun alt sektörün sanayi emisyonları içindeki toplam payı 2000 yılında %44 iken, 2010 yılında %48, 2020 yılında %59'a yükselmiştir. Söz konusu bu iki sektöre kimyasallar ve petrokimya dahil edildiğinde, bu üç sektör toplam sanayi sektörü emisyonlarının 2020 yılı itibariyle neredeyse üçte ikisinden sorumlu hale gelmektedir. Daha önemlisi, hükümetler tarafından verilen tüm iklim taahhütleri (Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkılar [NDCs] ve uzun vadeli net sıfır hedefleri de dahil olmak üzere) tam ve zamanında karşılanmış olsa bile, duyurulmuş taahhütler senaryosu projeksiyonuna göre, sanayi sektörü kaynaklı emisyonlar artmaya devam edecek ve 2030 yılına gelindiğinde toplamda 10000 metrik ton karbondioksit eşdeğeri (MtCO₂)'e yaklaşacaktır (IEA, 2021c).

b. "Azaltım Yapılması Zor" Sanayi Sektörü

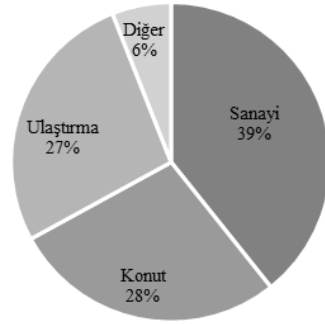
IEA raporuna göre, enerji (elektrik ve ısı) ve ulaştırma sektörü kaynaklı emisyonlar 2019 yılı toplam karbon emisyonlarının yaklaşık üçte ikisini oluşturmaktadır. Toplam CO2 emisyonlarının geriye kalan üçte birlik kısmından ise, sanayi ve konut sektörleri birlikte sorumludur. Bu durum, Şekil 3' ün (a)

panelinde gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, enerji sektörü ortalama %45'e yakın bir oran ile 2019 yılı itibariyle küresel CO2 emisyonları içinde en büyük paya sahip sektör konumundadır. Bu sektörü ortalama %20'lik paylarla ulaştırma ve sanayi sektörleri takip etmektedir. Bununla birlikte, eğer elektrik ve ısı kaynaklı (enerji sektörü) emisyonlar diğer nihai sektörler tahsis edilirse, Şekil 3'ün (b) panelinde gösterildiği üzere, sanayi sektörü emisyonları toplam karbon emisyonlarının yaklaşık olarak %40'ından tek başına sorumlu hale gelmekte ve sektörler göre emisyon miktarında ilk sırada yer almaktadır (IEA, 2021a).

(a) Enerji (Elektrik ve Isı) Ayrı Tutulduğunda



(b) Enerji (Elektrik ve Isı) Diğer Sektörlere Tahsis Edildiğinde



Şekil 3: Sektörlere Göre Küresel CO2 Emisyonları (2019)

Kaynak: IEA (2021a)

Şekil 3 aracılığıyla ortaya konan bu gözlem iki sonuç ortaya koymaktadır. İlk olarak, ülkelerin azaltım politikası olarak neden daha çoğunlukla enerji verimliliği iyileştirmeleri ve yenilenebilir enerji gibi hedeflere öncelik verdiğini açıklamaktadır (Şekil a) (Allwood vd., 2011; Allwood vd., 2013; Aidt vd., 2017; Alataş vd., 2021a-b; Karakaya vd., 2021). İkincisi, sanayi sektörünün de enerji yoğun olmasından dolayı (Şekil b), düşük karbonlu ekonomiye geçiş noktasında kritik rol üstlenip, net sıfır emisyon hedefine önemli katkılar sunabileceğini; bu bağlamda, sanayi sektörü kaynaklı emisyonları dikkate almayan ve çoğunlukla veya sadece enerji, ulaştırma ve konut sektörü temelli azaltım politikalarını öncelikleyen stratejilerin derin karbonsuzlaşma yolunda başarısızlıkla sonuçlanacağını göstermektedir (Denis-Ryan vd., 2016; OECD/IEA, 2017; Davis vd., 2018; Bataille vd., 2018; ME, 2019; Bataille, 2020).

Sanayi emisyonlarının hem geçmişten günümüze devam eden gelişimi, hem de geleceğe yönelik projeksiyonları da busektörün derin karbonsuzlaşma bağlamında neden önemli olduğunu net şekilde ortaya koymaktadır. Örneğin, IEA'ya göre,

sanayi sektörü doğrudan emisyonları 2000 yılında yaklaşık olarak 5000 MtCO₂ iken, bu değer 2020 yılında 8000 MtCO₂'nin çok üstüne çıkmıştır. Daha önemlisi, 2040 ve 2070 yılları için yapılan sürdürülebilir kalkınma senaryosu projeksiyonuna göre, 2070 yılına kadar enerji sektörü kaynaklı emisyonlarının sıfıra düşeceği öngörülmüşken, aynı öngörü sanayi sektörü kaynaklı emisyonlar için yapılamamaktadır (OECD/IEA, 2017; IEA, 2020b; IEA, 2021c). Bu bağlamda, sanayi sektörü için bütüncül bir iklim ve sanayi stratejisi geliştirmenin iklim değişikliği ile mücadele noktasında oldukça önemli olduğu açık şekilde ortadadır.

Peki, sanayi kaynaklı emisyonlar niye günümüze kadar artmıştır ve gelecekte de hala artışı beklenmektedir? Çünkü, enerji yoğun bu sektör bazı özellikleri sebebiyle diğer sektörlerden farklılaşmakta ve bu yönüyle "azaltım yapılması zor" sektör olarak nitelendirilmektedir. Ticarete açık yapısının neden olduğu uluslararası rekabetçilik baskısı, maliyet duyarlılığı ve karbon kaçağı (carbon leakage) riski, uzun dönemli yatırım sonucu ortaya çıkan teknik ve ekonomik bağımlılıklar ve terkedilen varlıklar (stranded assets) problemi, tedarik zincirinin birçok aşamasında kullanılan çok sayıda ve çeşitlilikte mal ve hizmet üretimi ile yakından ilgili olması bu özelliklerden bazılarıdır (Ahman ve Nilsson, 2015; Loftus vd., 2015; Wesseling vd., 2017; Bataille vd., 2018; Bataille, 2020, IEA, 2020b).

Yukarıda bir kısmı sayılan faktörler arasından sanayi emisyonlarının azaltımını zorlaştıran en temel belirleyiciyi bulmak şüphesiz çok zordur. Bununla birlikte, bu nedenlerin temel olarak sanayi sektörünün üretim yapısıyla ilintili olduğu da açık şekilde ortadadır. Bu yüzden, sanayi sektörünü azaltım yapılması zor yapan asıl faktörün, Şekil 2 aracılığıyla da gösterildiği üzere, bu sektörü oluşturan alt sektörlerin genellikle enerji yoğun bir üretim sürecinin parçası olması ve enerji ihtiyacının önemli bir kısmını fosil yakıttan karşılaması olduğu ileri sürülebilir (Allwood vd., 2010; ME, 2019; Davis vd., 2018; Bataille vd., 2018; Bataille, 2020). Daha açık bir ifadeyle, sanayi sektörü, özellikle enerji sektöründen farklı olarak, kullanılan malzemenin çıkartılması ve işlenmesi için yüksek ısıya dayalı teknolojiye ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla, enerji sektörü için alternatif olarak değerlendirilebilecek rüzgar, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının, sanayi sektöründe kullanımı kısıtlıdır. Bu bağlamda, sanayide kullanılan fosil yakıtların alternatifi şu an için hem ekonomik değildir hem de mevcut değildir. Örneğin, çimento (ve demir-çelik) üretimini emisyon yoğun hale getiren temel neden, fosil yakıt yakılması ile edilen yüksek ısıyı gerektirmesi ve proses emisyonuna sebep olan kimyasal reaksiyonları içermesidir. Çimento üretiminin çeşitli noktalarında emisyon ortaya çıkmaktadır. Çimentonun en önemli bileşeni klinkerdir ve kireçtaşı ile diğer bazı minerallerin ısıtılmasıyla elde edilmektedir. Çimento üretim sürecinde fırında gerçekleştirilen kimyasal süreçler (kalsinasyon) proses emisyonuna neden olurken, fosil yakıt yakılması ile enerji kaynaklı doğrudan emisyonlar ve tüketilen elektrikten kaynaklı dolaylı emisyonlar ortaya çıkmaktadır. Çimento emisyonlarının genellikle yaklaşık yarısı kimyasal süreçten

(proses emisyon), yüzde 40'ı doğrudan fosil yakıt yanmasından, geri kalanı ise elektrik satın alımlarından ve ulaşımdan kaynaklanmaktadır (Baumert vd., 2005; Feldmann ve Kennedy, 2021; Fransen vd., 2021).

c. Sanayide Azaltım Seçenekleri

Emisyona neden olan faktörler tüm sektörler için aynı değildir ve sektörler arası büyük farklılık göstermektedir. Dolayısıyla, emisyon azaltımı için uygulanacak sektörel stratejilerin ne kadar başarılı olacağı, söz konusu bu farklılıkların ne kadar dikkate alınmış olduğuyula yakından ilgilidir. IPCC'nin yakın zamanda yayınlanan raporu, söz konusu bu farklılıklara vurgu yaparak, tüm sektörlerde mevcut olan birçok seçeneğin, net emisyonları 2030 yılına kadar azaltmak için önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir. Net sıfır emisyon hedefine potansiyel katkısı bağlamında, enerji sektörü için rüzgar ve güneş enerjisi; ulaştırma sektörü için toplu taşıma, etkin akaryakıt kullanımı ve elektrikli hafif araçlar; konut sektörü için etkin aydınlatma ekipmanları gibi seçeneklere vurgu yapılırken, sanayi sektörü için enerji etkinliği, malzeme etkinliği ve ikamesi, yakıt değişimi (elektrik, hidrojen vb.), karbon yakalama ve yararlanma (CCU) ve depolama (CCS) teknolojileri, ve CO2 harici emisyonların azaltımı gibi seçenekler ön plana çıkmaktadır (IPCC, 2022b).

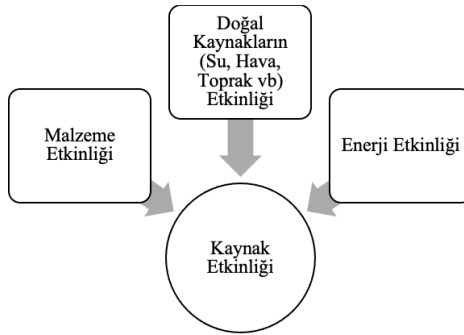
Sanayi sektörü özelinde yukarıda tartışılan politika ve teknolojilerin tümü sanayi emisyonlarının azaltımına belirli ölçüde katkı sağlayabilir (IPCC, 2022b). Fakat bu katkının potansiyel büyüklüğü, ne kadar sürede etkisini göstereceği ve ne kadar maliyetle gerçekleşeceği de son derece önemlidir. Örneğin, CCU ve CCS teknolojileri küresel iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir iklim politikası aracı olarak kabul edilmektedir; fakat azaltım beklentilerini karşılama bağlamındaki küresel potansiyeli hala tartışmalıdır (Katelhön vd., 2019). Nitekim, hem birkaç pilot uygulamanın dışında geniş ölçekte başarılı şekilde uygulanamamış (Akerboom vd., 2021), hem de ekonomik olarak maliyetlidir (Wennersten vd., 2015; Mac Dowell vd., 2017). Benzer şekilde, yeşil hidrojen teknolojisi de fosil yakıttan uzaklaşmak için önemli olanaklar sunmaktadır; fakat kendi zorluklarını da beraberinde getirmektedir (van Renssen, 2020).

Sanayide karbonsuzlaşma için tartışılan teknolojik çözümler hem maliyetli hem de henüz geniş ölçekte uygulama aşamasında değil iken, kaynak etkinliğinin artırılması hem uzun süredir uygulanmakta hem de maliyet avantajı sunmaktadır. Örneğin, enerjinin verimli kullanımının artırılması, uzun süredir sanayi sektörü emisyon azaltımının merkezinde yer almaktadır. Hatta, ülkelerin bu bağlamda belirli ölçüde başarılı olduğu da ileri sürülebilir. Bununla birlikte, yakın zamanda yayınlanan IEA raporu, ülkelerin enerji etkinliği performansının küresel iklim ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır. Buna göre, küresel ölçekte, enerjinin etkin kullanımındaki gelişmeler 2015'ten bu yana azalmaktadır (IEA, 2020a).

Sanayi sektörü kaynaklı emisyonların temel belirleyicisi, yukarıdaki bölümde tartışıldığı üzere, belirli alt sektörlerde gerçekleşen fosil yakıt yakımı veya kimyasal süreçler sonucu ortaya çıkan doğrudan veya proses emisyonlardır (Baumert vd., 2005; Fransen vd., 2021). Bu yüzden, sanayi sektörünü emisyon yoğun yapan ve “azaltım yapılması zor” olarak nitelendirilmesine sebep olan faktörler, sanayi sektörü emisyon azaltım seçeneklerinin belirlenmesi noktasında da oldukça önemli hale gelmektedir. Buradan hareketle, son dönemlerde yürütülen akademik çalışmalar (Alwood vd., 2011; Aidt vd., 2017; Bataille, 2020; Alataş vd., 2021b; Karakaya vd., 2021) ve uluslararası kuruluşların hazırlanmış olduğu raporlar (ME, 2019; IEA, 2020b; IRP, 2020; IEA, 2021b-2021c) sanayi sektöründe uzun vadeli sıfır emisyon hedefine ulaşılması konusunda, kaynakların, özellikle de malzemenin etkin kullanımına vurgu yapmaktadır.

d. Malzeme Etkinliği

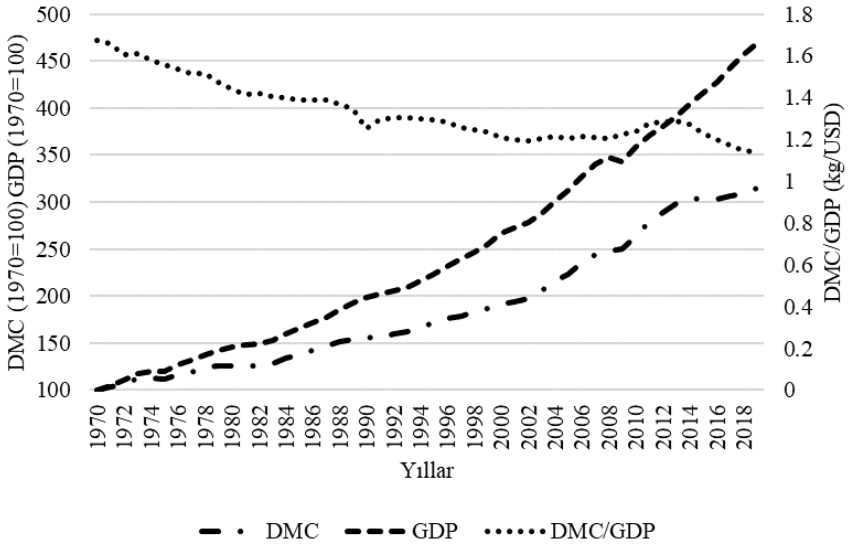
Malzeme etkinliği, Şekil 4’te de gösterildiği üzere, enerji ve diğer tüm doğal kaynakların etkin kullanımını da içeren kaynak etkinliğinin önemli bileşenlerinden biridir ve en basit tanımıyla, aynı düzeyde çıktı için daha az miktarda malzeme kullanılmasını ifade etmektedir. Fakat literatürde alternatif tanımlamalar da mevcuttur. Örneğin, Worell vd., (1995: 216)’a göre, malzeme etkinliği, bir ürünün orijinal işlevlerinden ve amacından ödün vermeden hammaddelerin kullanılabilirliğini artırmaktır. Daha geniş bir tanımlama ile, ürün bileşiminde yer alan bazı emisyon yoğun malzemelerin daha az emisyon yoğun malzemeler ile ikame edilmesi, ya da doğrudan daha az malzeme kullanılması aracılığıyla söz konusu ürünün aynı amaçlar ile aynı işlevleri sağlayabilmesidir.



Şekil 4: Kaynakların Etkin Kullanımı: Enerji, Malzeme ve Doğal Kaynaklar

Kaynak: IRP (2020) ve Deckert (2016) kullanılarak yazarlar tarafından hazırlanmıştır.

Şekil 5'te küresel yurtiçi malzeme tüketimi (DMC) ve küresel GSYİH (GDP) (sol eksen) ve malzeme yoğunluğu (DMC/GDP) (sağ eksen) 1970-2019 dönemi için gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, 2019 yılı itibariyle tüketilen malzeme miktarı, 1970 yılı değerinden yaklaşık olarak 3 kat fazladır. Söz konusu bu malzeme tüketimi artışının, eğer uygun politikalarla müdahale edilmezse, ekonomiler geliştikçe ve daha fazla mal üretip tüketmeyi sürdürdükçe, artmaya devam edeceği açık şekilde ortadadır. Çünkü, benzer bir eğilim küresel GSYİH için de gözlemlenmektedir.



Şekil 5: Küresel Yurtiçi Malzeme Tüketimi (DMC), Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GDP) ve Malzeme Yoğunluğu (DMC/GDP)

Kaynak: IRP (2020) ve Dünya Bankası (WB) (2022) kullanılarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

IRP (2020) raporuna göre, malzemelerin üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları 1995'ten bu yana 2 kattan fazla artmıştır. Böylece, 1995-2015 döneminde küresel sera gazı emisyonlarında malzeme üretiminin payı %15'ten %23'e yükselmiştir. Bu yüzden, malzemenin etkin kullanımı, sanayide emisyonların azaltımı için giderek daha önemli bir strateji olarak görülmekte, bu yönde uygulanacak stratejilerin refahtan ödün vermeden enerji yoğun malzemelere olan talebi azaltacağından, kaynak etkinliği ve döngüsel ekonomiye önemli katkılar sunacağı düşünülmektedir. Literatürde malzemenin ne kadar etkin kullanıldığı değerlendirmek için en çok tercih edilen göstergelerden biri malzeme kullanımının GSYH içindeki payıdır (malzeme yoğunluğu) (Zhang vd., 2018). Şekil 5'in sağ panelinde açık şekilde görüldüğü

üzere, küresel malzeme yoğunluğu 1970-2019 dönemi için azalmaktadır. Diğer bir ifadeyle, GSYH başına düşen malzeme tüketimi 1970 yılından bu yana düşmektedir. Bununla birlikte, azaltım politikası olarak şu ana kadar çoğunlukla göz ardı edildiği için, sanayi emisyonlarının ekonomik büyümeden ayrışmasına katkısı düşük seviyelerde kalmaktadır (IPCC, 2022b).

2. Malzeme Verimliliğini Sağlayacak Stratejiler

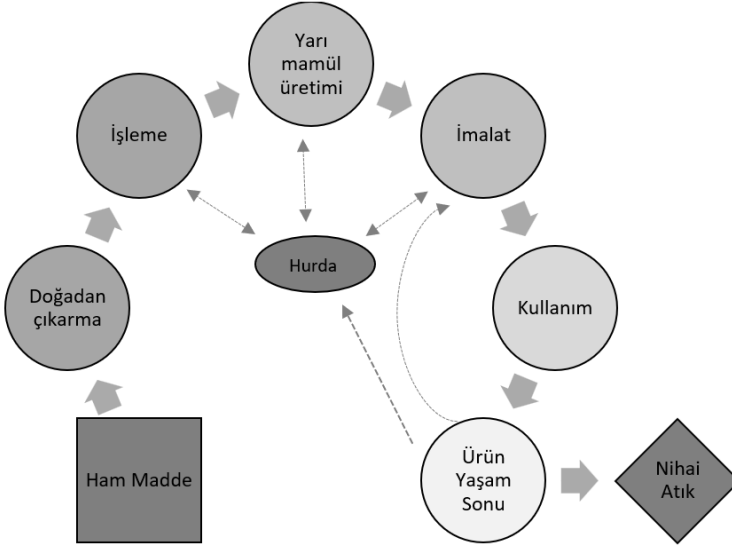
Ürün ve hizmetlere yönelik artan talep, çeşitli sanayi sektörlerinde bu ürün ve hizmetlerin sunulabilmesi için gerekli olan malzeme ve ham madde talebinin de artması anlamına gelmektedir. Sanayi faaliyetlerden kaynaklanan atıklar ve malzemeler üretim sürecinde yeniden kullanılmadığı ve geri dönüştürülmediği için de, artan malzeme talebi hep doğadan çıkarma ile karşılanmaktadır. Dolayısıyla malzemelere, ham maddelere, ürünlere yönelik artan talep aynı zamanda sera gazı salımı ve kaynak tüketimi gibi çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir.

Yaşam döngüleri boyunca malzemeler, etkin bir şekilde yönetilmemektedir. Ürün tasarımı ve imalatı sırasındaki yetkin altyapı ve planlama ile birlikte ürünün kullanım aşaması ve kullanım ömrü sonu uygulamaları malzeme etkinliğinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu yüzden, üretim süreci aşamalarına malzeme etkinliği anlayışının adapte edilmesi kaynakların korunmasına önemli katkıda bulunacaktır. Malzeme etkinliğinin yaşam döngüleri boyunca sağlanabilmesi önemlidir ve bunun yolu doğru aşamalarda uygun malzeme etkinliği stratejilerinin uygulanması ile mümkün olabilir (Ho vd., 2019: 1-2; Allwood vd., 2011).

Malzeme etkinliği stratejileri, aynı veya daha yüksek performansı sağlayan malların tedarikinde, malzeme ihtiyacının azaltılmasını sağlamaya yönelik önlem, plan ve uygulamalardır. Yani malzeme etkinliği iyileştirmeleri aracılığıyla aynı işlevin daha az malzeme ile sağlanabilmesidir. Malzeme etkinliği stratejileri, yalnızca, emisyon açısından yoğun yeni malzemelere olan ihtiyacı azaltmakla kalmaz; etkili bir iklim eylemi için temiz enerji stratejileri ile malzeme etkinliği stratejilerini kombine ederek aynı zamanda enerji kullanımını da azaltabilir (IRP, 2020a: 11). Bu sayede, hem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlar, hem de maliyet düşürücü etkisi ile rekabet gücünü artırır. Malzeme etkinliği stratejilerine, ürünlerin daha küçük, hafif, uzun ömürlü tasarlanması, malzeme ikamesi potansiyelinin değerlendirilmesi, malzeme kayıplarının azaltılması, aşırı malzeme tedarikinin önüne geçilmesi, ürün tamiri, ürünlerin daha yoğun kullanımı, birçok yeniden kullanılabilirlik yönteminin uygulanması, geri dönüşümün sağlanması gibi örnekler verilebilir.

Literatürde yer alan çalışmalarda, malzeme etkinliği sağlama amacıyla düşük emisyonlu malzeme kullanımından geri dönüşüme kadar, birçok malzeme etkinliği stratejisi bulunmaktadır. Bu çalışmalar (i) spesifik bir ürüne (bina, araba vb.) ya da bir sektöre yönelik geliştirilen stratejileri içeren çalışmalar (Hertwich vd., 2019; Ho vd., 2019; Pauliuk vd., 2021; Ho vd., 2021; Wolfram vd., 2021) ve (ii) malzemenin tedarik zinciri süreçleri de dahil olacak şekilde ürün yaşam döngüsü aşamalarına yönelik olarak geliştirilen stratejileri daha kapsamlı ele alan çalışmalar (Allwood vd., 2011; Lifset ve Eckelman, 2013; IRP, 2020a; IEA, 2019; Marrone ve Montella, 2021) olarak iki grup altında toplanabilir. Malzeme etkinliği stratejilerinin anlaşılabilmesi için, öncelikle ürün yaşam döngüsünde yer alan aşamaların anlaşılması gerekmektedir. Ardından ise, uygulanabilecek stratejileri aşamalara göre kapsamlı bir biçimde sunan IRP (2020a) ve IEA (2019) çalışmalarının detaylı bir şekilde incelenmesinde fayda vardır.

Ürün yaşam döngüsü değerlendirmesi, tüm yaşam döngüsü boyunca kullanılan enerji, malzeme ve atıkların belirlenmesi yoluyla, ürün, süreç veya faaliyetle ilişkili çevresel yüklerin değerlendirilmesini yapan sistematik bir yaklaşımdır (Ding, 2014: 10). Tıpkı canlı bir organizma gibi, ürünlerin de bir yaşam döngüleri vardır ve ürün yaşamı da genellikle aşamalara ayrılarak incelenir. Malzemenin ürün yaşam döngüsü malzemenin doğadan çıkarımından nihai atık hale gelmesine kadar geçen tüm aşamaları kapsamaktadır. Aşama sayıları çeşitli yaklaşımlara göre minimum dört ve maksimum dokuz aşama arasında değişebilir (Qureshi vd., 2014: 226). IRP (2020a: 26) raporuna göre temel olarak altı aşamadan bahsetmek mümkündür: Doğadan temel malzemeyi çıkarma, işleme, yarı mamulün üretimi, imalat, kullanım, ürün yaşamının sonu. Şekil 6'dan da görülebildiği üzere, yaşam döngüsü ham maddenin doğadan çıkarılması ile başlamaktadır. İlk aşamadan elde edilen ham maddenin işlenmesi ve yarı mamulün üretiminde kullanılabilir hale getirilmesi ikinci aşamayı oluşturmaktadır. Bu aşamadan elde edilen malzemeler üçüncü aşamada mamul malın üretiminde kullanılan ve tek başına nihai tüketime konu olmayan yarı mamulün üretiminde kullanılmaktadır. Dördüncü aşamada ise, bu yarı mamuller alınarak nihai tüketim ya da yatırım amaçlı üretilen mamul malın imalatında kullanılmaktadır. Dördüncü aşamada mamul mal ortaya çıktıktan sonra bu mal beşinci aşamada kullanılmaktadır. Altıncı ve son aşamada ise, ürün yaşamının sonu gelmekte ve atık haline dönüşmektedir. İşleme-üretim aşamaları olan ikinci, üçüncü, dördüncü aşamalar ve nihai atığın ortaya çıktığı altıncı aşamalar sonucunda, kullanılmayacak ve bozulmuş malzeme denebilecek hurda ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6: Ürün Yaşamının Aşamaları

Kaynak: IRP (2020a: 26) kullanılarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Aşama tanımlaması açısından bir diğer örnek ise, IEA (2019) tarafından yapılmıştır. IEA (2019: 8) daha yoğun bir tanımlama yaparak benzer aşamaları değer zinciri üzerinden dört basamağa ayırmıştır: Tasarım aşaması, üretim aşaması, kullanım aşaması ve ürün yaşamının sonu aşaması. Asiedu ve Gu (1998: 885) çalışmasına göre de, IEA (2019) ile benzer şekilde, standart bir ürün için genellikle basitçe dört aşamadan bahsetmek mümkündür: Tasarım, üretim, kullanım ve kullanım ömrü sonu. Alt bölümde, bu dört aşamanın neleri kapsadığı, her aşamaya uygun olan malzeme stratejilerinin neler olduğu ve bu malzeme stratejilerinin anlamları IRP (2020a), IEA (2019) ve literatürdeki çeşitli çalışmalardan faydalanılarak detaylandırılacaktır.

a. Tasarım Aşaması ve Stratejiler

Tasarım aşaması, esasen ürünün ya da hizmetin fiziksel ya da uygulama olarak tasarlandığı aşama olarak anlaşılabilir, sadece bununla kalmayan karmaşık bir aşamadır. Literatürde, kapsamının üzerine birçok farklı tanımlama yapılmaktadır. Bu farklılıklar mühendislik alanı, ürün türü, yazarın bakış açısı ve deneyim gibi unsurlardan kaynaklanabilmektedir (Qureshi vd., 2014: 225). Tasarım aşamasının kapsamını, Howard vd., (2008) bir ihtiyaç belirleme, görev analizi, kavramsal tasarım, düzenleme tasarımı, ayrıntılı tasarım ve uygulama

olarak basitçe tanımlamıştır. Eisenbart vd., (2011) ise aynı kapsamı, kullanım ve kapanış olarak ifade ettiği iki element ile genişletmiştir. Gericke ve Blessing (2012) ise, literatürdeki çeşitli tanımlamaları toparlayarak genelleştirilmiş tanımlamaya ulaşmıştır. Buna göre, çoğu tasarım aşaması temel aşamalar olan analiz, kavramsal tasarım, düzenleme tasarımı ve ayrıntılı tasarımı kapsamaktadır. Hizmet tasarımı, yazılım tasarımı, sistem mühendisliği gibi modellerde ihtiyaç belirleme aşaması; sistem mühendisliği, bina tasarımı, yazılım tasarımı, hizmet tasarımı, mekatronik gibi modellerde gerçekleştirilmeye odaklanılması açısından uygulama aşaması; sistem mühendisliği modellerinin çoğunda ve bina tasarımı/mimarisi, yazılım tasarımı, hizmet tasarımı gibi bireysel modellerde ürün bakımı veya gözden geçirmeye odaklanıldığı için kullanım aşaması; sistem mühendisliğinde ise, ayrıca kapanış aşaması ilave edilmektedir (Gericke ve Blessing, 2012: 176). Özetle, ürün fikrinin ilk tanımından başlamak üzere kavramsal çözümlerin geliştirilmesi, kavramsal çözümlerin detaylandırılması ve çözümün iyileştirilmesi ve sonuçlandırılması gibi tüm aşamalar ürünün tasarımı ve geliştirilmesi olarak ifade edilebilir (Qureshi vd., 2014: 227). Dolayısıyla, aslında ürün ya da faaliyet için hangi malzemelere, ne kadar ve ne için ihtiyaç duyulacağının ön kararının verildiği aşama da burasıdır denilebilir. Örneğin, tasarım aşaması sonucunda alınan kararlar doğrultusunda, daha büyük ya da kompleks tasarımlar daha malzeme yoğun ürünleri ortaya çıkarırken, küçük ya da basit tasarımlar daha az malzeme yoğun ürünleri ortaya çıkaracaktır. Dolayısıyla tasarım aşaması, kendisini takip eden diğer üç aşamayı da temelden etkileyen önemli bir aşamadır.

Tasarım aşaması stratejileri, bir ürün veya binanın aynı işlevselliği sağlarken ürünün yaşam döngüsü boyunca emisyonların en aza indirilebilmesi için malzemelerin en etkin nasıl kullanılabileceğine dikkat çekmektedir. Tasarım aşaması emisyon azaltımının yanı sıra, bir ürünün ömrünü en üst düzeye çıkarmak, ömrünün sonunda yeniden kullanımını sağlamak ve geri dönüşümünü kolaylaştırmak gibi unsurları da dikkate almalıdır. Bir ürünü tasarlarlarken, daha az miktarlarda malzeme kullanarak aynı fonksiyonelliğin sağlanmasını ifade eden hafifletme stratejileri ve optimize edilmiş dizayn stratejileri, uzun ömürlü tasarımlar ve yeniden kullanılabilirliği sağlayan stratejiler bu aşama için geliştirilmiş stratejilerdir. Bunun yanı sıra, ürünün daha hafif ve küçük dizayn edilmesi de malzeme kullanımını azaltacak stratejiler arasında yer almaktadır. Ayrıca, daha az emisyon yoğun malzemelerin tercih edilmesi için malzeme ikamesi opsiyonlarının, ürünün üretiminde hangi malzemelerin kullanılacağını tasarlandığı bu aşamada düşünülmesi de önerilen stratejilerden biridir. Binaların iç duvarlarının değiştirilebilir olmasını sağlayan daha esnek bina tasarımları binaların ömrünün uzatılmasına; araba üretiminde çelik yerine alüminyum, evlerde çimento ve çelik yerine ahşap kullanılması da malzeme ikamesi stratejisine birer örnek olarak verilebilir.

Nihayetinde, tüketiciye ulaşacak malın ilk basamağı olarak tasarım aşaması çok önemlidir. Ürünün, az ya da fazla malzeme yoğun olması ürünün tasarımına bağlıdır. Bu minvalde tasarımcının sürdürülebilirliği önemsemesi ve bu bilinçte olması, daha az emisyonu açan malzemeleri tercih etmesi, malzeme yoğunluğu düşük ürünler tasarlaması hem tasarım aşamasında hem de tasarım aşamasından sonra gelecek diğer aşamalarda malzeme etkinliğinin sağlanması açısından çok önemlidir.

b. Üretim Aşaması ve Stratejiler

İkinci aşama olan üretim aşaması, imalat veya yapım aşamalarının tümünü kapsamaktadır. Yani malzeme üretimi ve mamul mal üretiminin çeşitli aşamalarından meydana gelmektedir. Örneğin bir arabanın üretiminde kullanılan çeliği ele alalım. Öncelikle ham madde olarak doğadan çıkarılıp işlenmekte ve yarı mamul mala (çelik boru, levha, çubuk vs.) dönüştürülmektedir. Bu yarı mamul mal daha sonra kesilip şekil verilerek mamul malın üretiminde kullanılmak üzere uyarlanmaktadır (arabadaki çelik gövde gibi).

Bu aşama, üretim faaliyetlerinin, tasarım aşaması dışında yer alan tüm aşamalarını kapsamaktadır. Üretim aşaması, malzemenin çıkarılması, işlenmesi, dönüştürülmesi ve nihai malın üretiminde kullanılması şeklinde farklı basamaklara ve geniş bir kapsama sahip olması sebebiyle, farklı basamaklarda uygulanabilecek stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aşamada uygulanabilecek stratejilerden biri üretim iyileştirmeleridir. Üretim iyileştirmesi, malzemenin yarı mamul haline getirilmesi ve nihai malın üretimine katıldığı süreçte hurdanın azaltılması anlamına gelmektedir. Örneğin, malzemenin kırılmış, moloz kısmının azaltılması gibi. Malzeme çıkarma, işleme ve dönüştürme süreçlerinin hepsinde hurda ortaya çıkması sebebiyle, hurdanın azaltılması, tüm basamakları ilgilendiren ve israfı da önleyen önemli bir stratejidir. Üretim aşamasında önerilen çoğu strateji, malzemelerin ya da ürünlerin üretim sürecinde meydana gelen malzeme kayıplarının azaltılması ve aşırı malzeme kullanımının önüne geçilmesine yöneliktir. Buna göre, malzeme kayıpları hem metal hem de metal dışı malzemelerde meydana gelebilmektedir. Metalik malzemelerde, yeniden eritme ve yeniden şekillendirme; beton ve çimento gibi metal dışı malzemelerin ise, ürünün üretimi için gerekli olan miktarı aşan tedarik miktarlarını azaltma, fazla tedarik edilen malzemelerin diğer kullanımlara yönlendirilmesi ve daha iyi depolama ve saklama yöntemlerinin geliştirilmesi örnek stratejilerdir.

c. Kullanım Aşaması ve Stratejiler

Kullanım aşaması, üretilmiş malın nihai kullanımını ve tüketimini ifade eden bir aşamadır. Dolayısıyla, bu aşamada artık çalışmaya konu olan, malzeme ve çeşitli girdilerle yapılan üretim değil, üretilmiş malın tüketimidir. Genel

anlamıyla, kullanım aşaması stratejileri ürünün nihai tüketiciye ulaşmasından sonra daha uzun kullanılabilir olmasını hedeflemektedir. Yeni ham madde çıkarımını ve yeni malzeme üretimini azaltacak şekilde malzemenin ya da ürünün ömrünün uzatılması, ürün tamiri (repair), üretilmiş ya da üretilecek olan ürünlerin daha yoğun kullanımının ve paylaşımının sağlanması bu stratejileri ifade etmektedir. Tamir, örneğin bir bisikletin freni bozulduğunda, yeniden bisiklet alınması yerine, freninin tamir ettirilmesidir. Bu yöntemle yeni bir bisikletin üretilmesi için gerekli olan malzemelerden tasarruf etmeyi sağlayacaktır. Daha yoğun kullanım, üretilmiş ürünlerin daha çok kişi tarafından kullanılabilmesi anlamına gelmektedir. Örneğin, araba havuzu oluşturularak arabaların paylaşımlı ve daha yoğun kullanılmasının sağlanması bu stratejilerden biridir. IRP (2020b) raporuna göre, en fazla malzeme etkinliği ve sera gazı emisyonu azaltım potansiyeli olan stratejilerden biri kullanım aşaması stratejilerinden yoğun kullanımdır. Bu stratejilerin yanı sıra, tüketicilerin ikinci el mallara yönlendirilmesi (second hand) ve ürünün bir başka tüketim amacına uygun hale getirerek (repurposing) tüketilmeye devam edilebilir kılınması kullanım ömrü sonu gelmeden uygulanabilecek olan yeniden kullanım (reuse) stratejileri içerisinde yer almaktadır. Sıfır araba yerine ikinci el tercih edilmesi; çelik varillerin ya da plastik bidonların hayvan sulama/besleme teknesi haline getirilmesi ya da kompostlama kutusu olarak kullanılması bu stratejilere verilebilecek bazı bilindik örneklerdir. Ancak bu stratejiler hem ön tedarik hazırlığını hem de tüketici deneyimini etkileyecek ve tüketici tercihlerinde değişime neden olabilecek stratejilerdir. Dolayısıyla, bu stratejiler doğrudan tüketicinin seçimine ve ihtiyacına bağlı olarak işlerlik kazanabilir. Kullanım aşamasında, bu sebeple, asıl odaklanılması gereken strateji, tüketicilerde sürdürülebilirlik bilinci oluşturmaktır. Bu sayede daha az emisyonu neden olan ürünleri tercih edecek olan tüketici daha küçük tasarlanmış, daha az emisyon ve malzeme yoğun ama aynı fonksiyonlara sahip ürünlere yönelebilecektir.

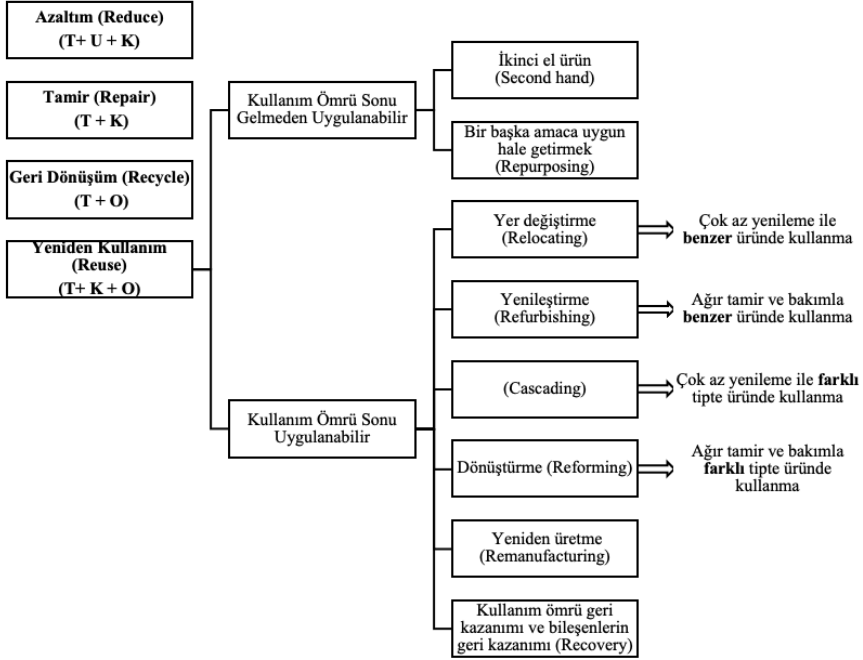
d. Kullanım Ömrü Sonu ve Stratejiler

Kullanım aşaması sonrasını ve ürünün yaşam sonunu, kullanım ömrünün sonuna gelinen bu aşama temsil etmektedir. Bu aşama, kullanım ömrü sona ermiş olan ürünün içerdiği malzemelerin, ham madde ihtiyacını azaltabilecek olması sebebiyle malzeme etkinliği açısından oldukça önemlidir. Dolayısıyla malzeme etkinliğinin sağlanmasında ürünün yaşam sonu stratejilerinin oynadığı rol, sadece kullanım ömrü dolduktan sonrasını ilgilendirmemektedir. Ömrü biten ürünlerden elde edilebilecek malzemelerin üretim aşaması ve kullanım aşamasına yeniden kazandırılabilir olabileceği sebebiyle, bu iki aşamayı da ilgilendirmektedir.

İncelenen raporlar kapsamında toplam yedi adet kullanım ömrü sonu stratejisi tespit edilmiştir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir: (i) bileşenlerin aynı türde başka üründe aynı amaç için çok az yenileme ile kullanılması anlamına gelen yer değiştirme (relocating) stratejisi; (ii) yine aynı durumda bileşenin ağır tamir ve bakımdan geçtikten sonra tekrar benzer bir üründe kullanılması (refurbishing) stratejisi; (iii) bileşenin çok az yenileme ile farklı tipte bir malın üretiminde kullanılması (cascading) stratejisi; (iv) bileşenin ağır tamir ve bakım ile farklı tipte bir malın üretiminde kullanılması (re-forming) stratejileri; (v) bir ürünün sıfırdan üretilen spesifikasyonlarına göre yeniden yapılandırılmasını ifade eden yeniden üretim (remanufacturing) stratejisi; (vi) malzemeler için kullanım ömrü geri kazanımı (end-of-life recovery) ya da bileşenlerin geri kazanımı (recovery) stratejileri; (vii) malzemelerin dönüştürülerek yeniden kullanılmasını ifade eden geri dönüşüm (recycling) stratejisi. Bunlardan geri dönüşüm stratejisi hariç diğerleri yeniden kullanım (reuse) stratejilerinin çeşitlerini oluşturmaktadır. Yeniden kullanım, çeşitli malzemelerden üretilmiş parçaların hafif ya da ağır tamir ve bakım ile, parçanın tekrar üretilmesine; dolayısıyla hem yeni malzeme talebine ihtiyaç duyulmaması hem de parçanın üretilmesi ile tekrar emisyonu sebep olunmayışı gibi sebeplerle geri dönüşüme göre öncelikli stratejidir. Örneğin, binalardaki profil demirlerinin yeniden farklı bir binada kullanılacak olması demir talebini azaltması ve demirin ham madde olarak çıkarılmasından demirin profil olarak üretilmesine kadar potansiyel olarak açığa çıkabilecek emisyonu önlemesi nedeniyle önemlidir. Yeniden kullanılamayan malzemeler ise, geri dönüşüm stratejileri ile ekonomiye kazandırılabilir. Özellikle kullanım ve kullanım ömrü sonu aşamalarındaki birçok stratejiyi kapsayan ve literatürde genellikle 4R (reduce, repair, recycle, reuse) stratejileri olarak bilinen stratejiler, Şekil 7'de özetlenmiştir. Bu şema, stratejilerin hangi aşamalara uygun olduğunun gösterilmesi, yeniden kullanım stratejilerinin yazarlar tarafından gruplandırılması, birbirleri ile sıkça karıştırılan yukarıda listelenmiş stratejilerin netleştirilmesi açısından oldukça önemlidir. Sürdürülebilir bir bilinç ile ürünlerin tasarım aşamalarında 4R stratejilerine uygun halde tasarlanmaları altı çizilmesi gereken ilk noktadır. Dolayısıyla çoğu 4R stratejileri tasarım aşamasından öngörülebilir malzeme kullanımı sağlaması açısından önemlidir. Bunun haricinde, azaltım (reduce) stratejileri üretim ve kullanım aşamaları; tamir (repair) stratejisi kullanım aşaması; geri dönüşüm (recycle) kullanım ömrü sonu stratejileri; yeniden kullanım (reuse) stratejileri kullanım ve kullanım ömrü sonu stratejileri için oldukça uygun stratejiler olarak tespit edilmiştir.

Bir ürünün yaşam sonunun bu stratejilere uygunluk göstermesi aslında ürünün ön tasarım aşamasının konusudur. Dolayısıyla ürünün yaşam sonu, ürünün tasarım aşamasından planlanmaya başlanılarak oluşturulmalıdır (Gehin vd., 2008). Tasarım aşamasında da vurgulandığı üzere, ürünün ömrünün sonunda yeniden kullanımını sağlamak ve geri dönüşümünü kolaylaştırmak

gibi unsurlar dikkate alınarak çevre için tasarımlar (design for environment) geliştirilmelidir. Bu durum, kullanım ömrü sonu stratejilerinin uygulanabilirliğini de kolaylaştırmaktadır.



Şekil 7: 4R Stratejileri Şeması¹

Not: T, U, K ve O kısaltmaları sırasıyla tasarım, üretim, kullanım ve kullanım ömrü sonu aşamalarına ait stratejileri ifade etmek için kullanılmıştır.

Dört aşama için de özetlenen malzeme etkinliği stratejilerinin hepsi bir arada, bir ürünün ilgili üretim aşamalarında kullanılamayabilir. Dolayısıyla literatürde spesifik bir ürüne (bina, araba vb.) ya da bir malzemeye (çimento, çelik, plastikler vb.) yönelik ele alınan sektörel stratejiler bulunmaktadır. Hangi sektörlerde hangi stratejilerin öne çıktığı Tablo 1’de özetlenmiştir. Bu tabloda ayrıca kaynaklar tarafından önerilen stratejilerin hangi aşamaya uygun oldukları yazarlar tarafından değerlendirilerek son sütunda gösterilmiştir.

¹ Detaylı bilgi için bk. King vd., (2006), Mohanty, (2011), Goyal vd., (2018), Vermeulen vd., (2019), Morseletto (2020).

Tablo 1: Literatürde Yer Alan Sektörel Stratejiler ve Stratejilere Uygun Aşamalar

Kaynak	Örneklem	Sektör	Strateji	Aşama
Garvey vd., (2022)	Birleşik Krallık	Demir ve çelik	Çelik talebinin azaltılması (spesifik bir strateji vurgulanmamıştır)	-
Allwood vd., (2019)	Birleşik Krallık	Çelik	Molozdan kaçınmak Aşırı tasarımı önlemek Daha küçük ürünler üretmek Daha uzun ömürlü ürün	Ü T T T
Dunant vd., (2019)	Birleşik Krallık	Çelik	Çelik kirişlerin inşaatta yeniden kullanılması İnşaatta optimal hafif kirişler Daha küçük otomobillerin seçilmesi Yüksek mukavemetli çelik otomobil gövdeleri	T K T

Habert vd., (2020)	Literatür Tarama	Çimento	Orta vadeli: Atık yakıtların çimento fabrikalarında kullanılması	Ü
			Çimento bileşenlerinin alternatif malzemelerle ikame edilmesi (kil, inc kireçtaşı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.)	T
			Uygun kum ve çakıl oranlarını hesaplayan uygun karışım tasarımlarının uygulanması	T
			Yerinde karıştırmanın yerine sanayileşmiş beton üretimini teşvik etmek	Ü
			Çimentonun %60 kadarını dolgu maddeleriyle birleştirmek	T
			Daha iyi tasarım ve saha yönetimi uygulamaları	T+U
			Betonun kalıptan çıkarılmasından önceki kür süresinin uzunluğu gibi inşaat aşamasında alınan kararların uygunluğu	Ü
			Beton mukavemetini, inşaat demiri içeriğini ve klinker içeriğini modüle eden optimizasyon stratejilerinin birleştirilmesi	T
			Yeni yapıların ömrünün uzatılması	T
			Uzun vadeli: Yerel olanaklar çerçevesinde alternatif çimento bileşimleri	T
Kullanım ömrünü tamamlayan betonun yeni beton üretiminde kullanılması üzere küçük parçalara ayrılması ve karbonatlaşmanın arttırılması	Ö			
Mühendislerin karbonatlaşmayı benimsemeleri ve tasarım gereği karbonatlaşmaya izin vermeleri	T			

Sanayide Karbonsuzlaşma:
Malzeme Etkinliği Stratejilerinin Rolü

Axelson vd., (2021)	AB	Çelik	Ürün ömrünü artıran veya yeniden kullanıma olanak tanıyan veya yüksek mukavemetli hafif çelik üretimi sağlayan tasarım değişiklikleri Birincil üretim ihtiyacının azaltılması Kullanım ömrü sonunda sökülebilirlik İyileştirilmiş hurda işleme Geri dönüşüm Artan endüstriyel simbiyoz Çelik hurdasına dayalı elektrik ark fırınlı (EAF) çelik üretimine geçiş Düşük karbonlu ürünlere pazar yaratılması ve yaygınlaştırılması	T T T O O Ü Ü -
Wolfram vd., (2021)	Küresel	Binek Araçlar	Malzeme ikamesi Geri dönüşüm Yeniden üretim Araç boyutunda küçülme Daha yoğun kullanım Tüketici tercihlerinin etkin araçlara yönelmesi	T O O T K K

Horton ve Allwood (2017)	Euro-Car-Body konferansındaki 46 araç	Otomotiv (metal sac üretimi)	Parça tasarımının iyileştirilmesi	T
			Parça yerleştirme iyileştirilmesi	U
			Yerleştirme seçeneklerini artırma	T
Scott vd., (2019)	Birleşik Krallık	Giyim ve Tekstil	Tedarik zinciri israflarını azaltmak	U
		Yiyecek ve İçecek	Önlenebilir gıda israfını azaltmak	K
		Paketli ürünler	Ambalajın ağırlığını azaltmak	T
		Taşıtlar	Çelik, Alüminyum ve ek ağırlıkların azaltılması	T
			Metal kesme teknikleri ile verim iyileştirme	U
			Çelik imalat verimi iyileştirme	U
			Atılacak (iskarta) çelik ürünleri yeniden kullanma	O
		Elektronikler, cihazlar ve makineler	Çeliğin azaltılması	T
			Çelik imalat verimi iyileştirme	U
			Atılacak çelik ürünlerin endüstriyel ekipmanlarda yeniden kullanımı	O
İnşaat	Malzeme girdilerini azaltmak için tasarım optimizasyonu	T		
	Malzeme ikamesi	T		
	Malzeme yeniden kullanımı	O		

Sanayide Karbonsuzlaşma:
Malzeme Etkinliği Stratejilerinin Rolü

Pauliuk ve Heeren (2021)	Almanya	Binek taşıtlar, konut binaları ve konut dışı binalar	Binaların daha yoğun kullanımı	K
			Araçların paylaşımlı kullanımı (car-sharing)	K
			Yolculuk paylaşımı (ridesharing)	K
			Hafif tasarım ve küçülme	T
			Uzun süreli kullanım	K
			Ürünün yaşam sonu geri kazanımları	O
			Üretim iyileştirmeleri	U
			İmalata yönlendirilen hurda kütlesi	U
			Yeniden kullanma	O
			Malzeme ikamesi	T
Pauliuk vd., (2021)	Küresel	Konut binaları	Ahşap yapı kullanımı ve azaltılmış taban alanı	T
			Binaların daha yoğun kullanımı	K
		Taşıtlar	Yolculuk paylaşımı	K
			Araç paylaşımı	K
		Konut ve Taşıtlar için ortak	Üretimde yüksek verim	U
			Hurda geri kazanımında yüksek verim	O
			Üretim hurdasının yeniden kullanımı	O
			Daha iyi tasarım/küçültme	T
			Malzeme ikamesi	T
			Geri dönüşüm	O
Ürün ömrünün uzatılması	T			
Daha uzun kullanım	K			

Yang vd., (2020)	Çin	Rüzgar gücü	Daha büyük rüzgar enerjisi dönüştürücüleri tasarlamak ve üretmek için teknolojik yeniliklerin teşviki Rüzgar enerjisi sektöründen gelecek atıkları işlemek ve bunun için arıtma kapasitesini önceden oluşturmak	T+U T+O
Hertwich vd., (2019)	Literatür Tarama	Binalar	Binaların daha yoğun kullanımı Ürün ömrünün uzatılması Hafif tasarım Malzeme ikamesi Yeniden kullanım Geri dönüşüm	K T T T O O
		Taşıtlar	Daha yoğun kullanım (araç ve yolculuk paylaşımı) Ürün ömrünün uzatılması Hafif tasarım ve doğru boyutlandırma Yeniden üretim ve yeniden kullanma Geri dönüşüm	K T T O O
		Elektronikler	Daha yoğun kullanım Ürün ömrünün uzatılması Geri dönüşüm	K T O

Ho vd., (2019)	Malezya	Elektrik ve elektronik ürünleri	Tasarım aşaması stratejileri: Daha az bileşenle üretmek, kolay geri kazanım için tasarım, daha uzun ömür için tasarım, çoklu işlevli tasarım	T
			Malzeme temini: Malzeme ikamesi, önceden üretilmiş parça satın alma	T
			Üretim aşaması stratejileri: Hassas jig ve fiyestür uygulanması (Minimum malzeme temas noktası gereksinimi), Malzeme israfı içeren üretim adımlarının azaltılması, verim iyileştirme	U
			Ürün dağıtım stratejileri: Yeşil paketleme, geri dönüştürülebilir-yeniden kullanılabilir-uzun ömürlü kullanımı olan paketleme, kritik olmayan bileşenler için toplu paketleme	T

Not: T, U, K ve O kısaltmaları sırasıyla tasarım, üretim, kullanım ve kullanım ömrü sonu aşamalarına ait stratejileri ifade etmek için kullanılmıştır.

Çeşitli ürünler için literatürde önerilen çeşitli stratejiler ve bu stratejilerin hangi aşamada uygulandıklarının kısa özeti olan Tablo 1'den önemli çıkarımlar yapılabilmektedir. Birinci olarak, ürün ayırımına gidilmeden toplam için bakıldığında, malzeme etkinliği için uygulanacak stratejilerin çoğunluğunun tasarım aşaması stratejileri olduğu görülmektedir. Ancak bu noktada IRP (2020b)'nin, en fazla azaltımın kullanım aşaması stratejileri ile sağlanabileceği çıkarımına değinmekte ve bulguları bu kapsamda değerlendirmekte fayda vardır. Üretim ve tüketim faaliyetleri ekonominin iki önemli tarafını temsil etmekte ve dört aşama içerisinde en yüksek malzeme etkinliği potansiyelini taşıyan aşamalar olarak tespit edilen tasarım ve kullanım aşamaları da bu iki önemli tarafın bu alandaki davranışlarına bağlı işlerlik potansiyeli taşımaktadır. Bu kapsamda hem tasarımcıların hem de tüketicilerin sürdürülebilirlik kapsamında

bilinçlendirilmesinin stratejiler içerisindeki önemini altı çizilmelidir. İkinci olarak, ürün özelinde (sektörel düzeyde) öne çıkan aşamaların da farklılaştığı söylenebilir. Ancak bütün ürünlerde (giyim ve tekstil, yiyecek ve içecek hariç) tasarım aşaması stratejilerinin birinci sırada yer aldığı görülmektedir. Çelik ve çimento için ikinci sırada üretim aşaması stratejileri yer alırken; özellikle araçlar ve binalar için kullanım aşaması ve kullanım ömrü sonu stratejileri öncelikli olarak görülmektedir. Üçüncü olarak, bu araştırmaların daha çok gelişmiş ülkeler için yapıldığı, gelişmekte olan ülkelere yetersiz düzeyde odaklanıldığı görülmektedir. Halbuki IPCC (2022), IRP (2020b) ve IEA (2019) malzeme etkinliği kaynaklı en fazla azaltım potansiyelinin Çin ve Hindistan gibi gelişmekte olan ülkelerde olduğunu söylemektedir. Dolayısıyla, hem bilimsel çalışma hem de uygulama açısından gelişmekte olan ülkelere yönelik daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Dördüncü ve son olarak ise, gelişmiş ülkelerde malzeme etkinliği için ilk sırada tasarım aşaması stratejilerinin, ikinci sırada ise kullanım aşaması stratejilerinin malzeme etkinliğinin sağlanabilmesi açısından öne çıktığı görülmektedir.

Hangi stratejinin emisyon azaltımına daha çok katkı sağladığı, dolayısıyla da hangi stratejinin daha etkin olduğu ve olası rebound etkileri bu çalışmanın konusu değildir. Ancak elde edilen sonuçlar doğrultusunda, sanayi sektörünün karbonsuzlaşma süreci için öncelikli stratejilerin tasarım aşaması düzeyinde belirlenmesinin önerildiği açıktır. Demir, Çelik, alüminyum, çimento gibi ürünleri içeren alt sanayi sektörleri için bu malzemelere olan talebin dolayısıyla birincil üretim ihtiyacının azaltılması için aşırı (gereksiz) tasarımlardan kaçınılması, daha küçük ürünler tasarlanması, üretimde kullanılacak bu malzemelerin daha düşük emisyonlu olan ikamesinin tasarımda göz önünde bulundurulması, yeniden kullanıma ve geri dönüşüme olanak sağlayan tasarımlar yapılması, kullanım ömrü sonunda sökülebilir tasarımlar yapılması malzeme etkinliğine önemli katkılarda bulunacaktır. Üretim aşamasında öne çıkan stratejiler ise, hurdadan kaçınmak, israfların azaltılması, üretim adımlarının israfı önleyecek şekilde azaltılması, üretimde verim iyileştirmeleri, malzeme kesme tekniklerinde verim iyileştirmeleri, parça yerleştirme iyileştirmeleri, üretim esnasında alınan kararların iyileştirilmesi ve endüstriler arası simbiyozun artışının sağlanmasıdır. Kullanım ömrü sonu aşamasında ise, yeniden üretim, yeniden kullanım, geri dönüşüm, hurda işleme, ürün yaşam sonu geri kazanımları vurgulanmaktadır. Sektöre yönelik üretim stratejilerinin yanı sıra talep taraflı stratejiler de tüketicilerin elindedir ve karbonsuzlaşma açısından önemlidir. Bu kullanım aşaması stratejileri üretilmiş sanayi ürünlerinin daha yoğun kullanımını, paylaşımlı kullanımını, daha uzun süreli kullanımını vurgulamanın yanı sıra, tercihlerin daha verimli ürünlere yönelmesi, aynı işlevi sağlayan daha küçük ürünlerin tercih edilmesi, ikinci el ürüne yönelme ve malı yeni bir amaca uygun hale getirme tercihlerinin de üzerinde durmaktadır.

Yukarıda anlatılanlardan da görülebileceği gibi 2050 net sıfır hedefleri için malzeme etkinliği stratejileri ve döngüsel bir ekonomik modele dönüşüm oldukça kompleks ve zor bir süreçtir. Böyle bir dönüşüm, birçok paydaş ile her seviyede yoğun bir etkileşim ve iş birliğini gerektirir ve bu sürecin başarılabilmesi için uygun politika ve araçların geliştirilmesine ihtiyaç duyar. Henüz yeni gelişme gösterse de, araştırmacılar ve politika yapımcılar döngüsel ekonomi ve malzeme etkinliğini hedefleyen bir dizi ekonomik ve mali politika araçları geliştirmeye başlamışlardır. Ürün yaşam döngüsünü esas alarak, farklı aşamalar için vergi sisteminde birtakım değişikliklerin ve teşvik sistemlerinin etkili olacağı söylenmektedir (Vence ve Perez, 2021; Milios, 2021). Örneğin, İsveç'te 2017 yılında uygulamaya konulan bir vergi değişikliği ile, bisiklet, ayakkabı ve bazı tekstil ürünleri tamirinde KDV oranları düşürülmüş, bunun yanında bu sektörlerde tamircilik yapanların işgücü prim ödeme oranları azaltılmıştır. Bu politika ile vatandaşların daha uzun süreli ilgili ürünleri kullanıp, daha az malzeme tüketimi ve emisyon azaltımı amaçlanmıştır. Milios (2021) bu teşvik uygulamaları sayesinde İsveç'te bazı sektörlerde tamir işlerinin önemli bir şekilde arttığını ve malzeme etkinliğinde ilerleme sağlandığı ve döngüsel ekonomiye geçişin nispeten sağlandığını belirtmektedir. Bu tür benzer politikaların başka sektörlerde ve ülkelerde uygulanmasının sürdürülebilirlik açısından başarılı sonuçlar doğuracağını öngörebiliriz.

Sonuç ve Değerlendirme

Şimdiye kadar geçerli ve sürdürülemez olan doğrusal ekonomi (linear economy) modeli, sürekli kaynak çıkarmaya dayanan ve doğal sermayeyi tüketen bir al-yap-at modeline dayanmaktadır. Bu tür uygulamalar, iklim değişikliği, biyolojik çeşitlilik kaybı ve kirlilik gibi küresel sorunları ciddi şekilde kötüleştirmektedir. Daha önemlisi, eğer böyle devam ederse ve uygun politikalarla müdahale edilmezse, kaynak kullanımının 2050 yılına kadar iki katından fazla olacağı tahmin edilmektedir. (IRP, 2019).

Yaşanabilir iklimin korunması için 2050 yılına kadar emisyonların net sıfır olması gerekmektedir. Paris Anlaşması ve EGD birçok ülkenin iklim değişikliği eylem patikasını belirlemesinde yol gösterici niteliktedir. Bu doğrultuda, öncelikle Paris Anlaşması ve onu takip eden EGD, bugüne kadar hem uluslararası rekabete konu olması hem de emisyonların azaltılması zor sektör olması sebebiyle çok fazla üzerine düşülmemiş olan; ancak toplam sera gazı emisyonlarının üçte birine sahip olan sanayi sektörü emisyonlarına dikkat çekmektedir. Sanayi sektöründeki emisyonlar azaltılmadan, alınan hedeflerin de başarılamayacağı açıktır. Dolayısıyla, dünyanın artık sanayiye odaklanması gerekmektedir. Bu bağlamda, EGD kapsamında sanayide karbonsuzlaşma hedef olarak gösterilmiş ve AB ülkeleriyle ticaret yapan tüm ülkeleri bağlayıcı olacak CBAM'ı getirmiştir.

Birçok farklı aşamada kullanılabilir olan malzeme etkinliği stratejilerinin temel amacı ham madde, malzeme ve ürün talebinin azaltılmasıdır. Bunun altında yatan sebepler ise, taleplerin azaltılması yolu ile malzeme üretimi ve kullanımı kaynaklı ortaya çıkan emisyonların ve enerji kullanımının azaltılmasıdır. Burada ele alınan malzeme etkinliği stratejilerinin, CBAM, yeşil ve dögüsel bir ekonomi, sürdürülebilir akıllı ulaşım ve iklim değışikliği ile mücadele gibi elementleri üzerinde, dolayısıyla da net sıfır emisyon taahhütü veren ülkelerin dönüşümlerinde, önemli destekleyici unsurlardan olacağı açıktır.

Son IPCC Değerlendirme Raporunda, sanayide karbonsuzlaşma için enerji verimliliğinde ilerlemenin önemli oluğu vurgulanmakla beraber, malzeme talep azaltımı, malzeme etkinliği ve dögüsel ekonomik çözümlerin temel üretimin azaltılması ve etkin kullanımın sürdürülebilirlik açısından oldukça önemli olacağı belirtilmektedir (IPCC, 2022). Malzeme etkinliği aynı zamanda çözüm stratejilerinden olan dögüsel ekonomi, enerji verimliliği, temiz enerji ikamesini sağlayan teknolojilere dönüşüm gibi yöntemlerle etkileşim içerisinde olup, bu çözüm önerilerinin başarılı bir şekilde uygulanmasına da katkı sağlamaktadır. Malzemelerin ve kaynakların değerinin ekonomide mümkün olduğu kadar uzun süre muhafaza edildiği ve atık oluşumunun en aza indirildiği (European Commission [EC], 2015: 2) dögüsel ekonomi modeli, yukarıda ele alınan sanayide uygulanabilecek olan ham madde ihtiyacının azaltılması, hurdanın ekonomiye geri kazandırılması, yeniden kullanım uygulamalarının ürünü baştan üretmeye gerek kalmadan ekonomiye kazandırması, geri dönüşüm gibi potansiyellere sahip olan malzeme etkinliği stratejileri ile örtüşen hedefler taşımaktadır. Azaltma, yeniden kullanma, geri dönüşüm ve tamirden oluşan 4R stratejileri ile malzemelerin ekonomide mümkün olduğu kadar uzun süre muhafaza edilmesi, atık oluşumunun en aza indirilmesi sayesinde yeşil ve dögüsel bir ekonomi ortamında iklim değışikliği ile sanayi kapsamında mücadele mümkün hale gelebilmektedir (IPCC, 2022). Yukarıda bahsedildiği gibi, ürün tasarımı, imalatı, kullanımı ve bertarafı süreçlerinde, malzeme etkinliği ve dögüsel ekonomi kurallarını bir bütünlük olarak ele alıp, sinerji yaratacak şekilde uygulandığında sanayide karbonsuzlaşma için en etkin sonuçlar alınabilir.

Malzeme etkinliği ve dögüsel ekonomiye geçiş ile sanayide karbonsozlaşmayı sağlamak için sistemsal ve yapısal devasa bir dönüşüme ihtiyaç vardır. Bu anlamda, böyle bir dönüşümün sağlanabilmesi için hem üretim hem de tüketim kalıplarını değıştirme noktasında politika yapıcılara ve sivil toplum kuruluşlarına büyük görevler düşmektedir. Hükümetler seviyesinde, ülkenin dögüsel ekonomi ve malzeme stratejilerini en etkin kullanacak şekilde mali ve ekonomik araçlarını yeniden dizayn etmesi gerekmektedir. Bu politika araçlarını kurgularken, ürünün tasarım üretim aşamalarından, tüketim

aşamasına kadar sürdürülebilirliği teşvik edecek şekilde ayrı ayrı düşünülüp geliştirmesi gerekir. Diğer çok önemli bir konu ise, bu konularda kamuoyunda ciddi bir farkındalık yaratılmalı ve sivil toplum, medya ile birlikte birbiriyle çelişmeyen uzun soluklu kampanya, eğitimler düzenlenmelidir.

Kaynakça

Acar, S., Aşıcı, A. ve Yeldan, E. (2021). *Potential Effects of the EU's Carbon Border Adjustment Mechanism on the Turkish Economy. Environment, Development and Sustainability*. Basım Aşamasında.

Ahman, M. ve Nillsson, L. (2015). "Decarbonizing Industry in the EU: Climate, Trade and Industrial Policy Strategies". *Decarbonization in the European Union*, Editör: Dupont, C. ve Oberthür, S., Palgrave Macmillan, Londra.

Aidt, T., Jia, L. ve Low, H. (2017). "Are Prices Enough? The Economics of Material Demand Reduction". *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 375(20160370).

Akerboom, S., Waldmann, S., Mukherjee, A., Agaton, C., Sanders, M. ve Kramer, G.J. (2021). "Different This Time? The Prospects of CCS in the Netherlands in the 2020". *Frontiers in Energy Research*, 9, 644796.

Alataş, S., Karakaya, E., ve Hiçyılmaz, B. (2021a). "What Does Input Substitution Tell Us in Helping Decarbonization and Dematerialization? Industry Level Analysis for South Korea". *Sustainable Production and Consumption*, 27: 411-424.

Alataş, S., Karakaya, E. ve Sarı, E. (2021b). "The Potential of Material Productivity alongside Energy Productivity in Climate Mitigation: Evidence from Convergence Tests in the EU28". *Resources, Conservation & Recycling*, 167, 105322.

Allwood, J. M., Ashby, M. F., Gutowski, T. G., ve Worrell, E. (2011). "Material efficiency: A White Paper". *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3): 362-381.

Allwood, J.M., Ashby, M.F., Gutowski, T.G. ve Worrell, E. (2013). "Material Efficiency: Providing Material Services with Less Material Production". *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 371(20120496).

Allwood, J.M., Cullen, J.M. ve Milford, R.L. (2010). "Options for Achieving a 50% Cut in Industrial Carbon Emissions by 2050". *Environmental Science and Technology*, 44(6).

Allwood, J., Dunant, C., Lupton, R., ve Cabrera Serrenho, A. (2019). "Steel Arising: Opportunities for the UK in a transforming global steel industry". *Apollo – University of Cambridge Repository*, from <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/294350> (Erişim Tarihi:18.04.2022).

Asiedu, Y., ve Gu, P. (1998). "Product Life Cycle Cost Analysis: State of the Art Review". *International Journal of Production Research*, 36(4): 883-908.

Axelson, M., Oberthür, S., ve Nilsson, L. J. (2021). "Emission Reduction Strategies in the EU Steel Industry: Implications for Business Model Innovation". *Journal of Industrial Ecology*, 25(2): 390-402.

Bataille, C. (2020). "Physical and Policy Pathways to Net-zero Emissions Industry". *WIREs Climate Change*, 11, 633.

Bataille, C., Åhman, M., Neuhoff, K., Nilsson, L.J., Fishedick, M., Lechtenbohmer, S., Solano-Rodriguez, B., Denis-Ryan, A., Stiebert, S., Waisman, H., Sartor, O. ve Rahbar, O. (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.

Baumert, K., Herzog, T. ve Pershing, J. (2005). *Navigating the Numbers: Greenhouse Gas Data and International Climate Policy*. WRI Publications, Washington.

Cavlak, H. (2021). "Etkinlik, Etkililik, Verimlilik, Kârlılık, Performans: Kavramsal Bir Çerçeve ve Karşılaştırma". *Journal of Research in Business*, 6(1): 99-126.

COP26 (UN Climate Change Conference) (2021). *COP26 The Glasgow Climate Pact*, <https://ukcop26.org/>, (Erişim tarihi: 18.04.2022).

Davis, S.J., Lewis, N.S., Shaner, M., Aggarwal, S., Arent, D., Azevedo, I. L. vd. (2018). "Net-zero Emissions Energy Systems". *Science*, 360(6396): 1-19.

Deckert, C. (2016). "Ecological Sustainability of Material Resources – Why Material Efficiency Just isn't Enough". *uwf*, 24: 325–335.

Denis-Ryan, A., Bataille, C. ve Jotzo, F. (2016). "Managing Carbon-intensive Materials in a Decarbonizing World without a Global Price on Carbo". *Climate Policy*, 16(1): 110-128.

Ding, G. K. (2014). "Life Cycle Assessment (LCA) of Sustainable Building Materials: An Overview". *Eco-efficient Construction and Building Materials*, 38-62.

Dunant, C. F., Skelton, A. C., Drewniok, M. P., Cullen, J. M., ve Allwood, J. M. (2019). "A Marginal Abatement Cost Curve for Material Efficiency Accounting for Uncertainty". *Resources, Conservation and Recycling*, 144: 39-47.

EC (European Commission), (2021). *Carbon Leakage*. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/free-allocation/carbon-leakage_en#ecl-inpage-1252, (Erişim tarihi: 18.04.2022).

Eisenbart, B., Gericke, K., ve Blessing, L. (2011). *A Framework for Comparing Design Modelling Approaches Across Disciplines*. In DS 68-2: "Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11)", *Impacting Society through Engineering Design, Vol. 2: Design Theory and Research Methodology*, Lyngby/Copenhagen, Denmark, 15.08.2011-19.08. 2011 (pp. 344-355).

European Commission (2015). *Closing the Loop-An EU Action Plan for the Circular Economy*. Brussels, 2.12.2015, COM (2015).

European Commission (2019). *The European Green Deal*. Brussels, 11.12.2019 COM(2019).

European Commission (2021). *CBAM Factsheet*. 14.07.2021, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_21_3666 (Erişim Tarihi: 08.04.2022).

Feldmann, J. ve Kennedy, K. (2021). *Toward a Tradable, Low-carbon Product Standard for Steel Policy Design Considerations for the United States*. WRI Working Paper.

Fransen, T., Lebling, K., Weyl, D. ve Kennedy, K. (2021). *Toward a Tradable, Low-carbon Cement Standard Policy Design Considerations for the United States*. WRI Working Paper.

Garvey, A., Norman, J. B., ve Barrett, J. (2022). "Technology and Material Efficiency Scenarios for Net Zero Emissions in the UK Steel Sector". *Journal of Cleaner Production*, 333, 130-216.

Gehin, A., Zwolinski, P., ve Brissaud, D. (2008). "A Tool to Implement Sustainable End-Of-Life Strategies in the Product Development Phase". *Journal of Cleaner Production*, 16(5): 566-576.

Gericke, K., ve Blessing, L. (2012). "An Analysis of Design Process Models Across Disciplines". In DS 70: *Proceedings of DESIGN 2012, The 12th International Design Conference*, Dubrovnik, Croatia.

Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., ve Scrivener, K. L. (2020). "Environmental Impacts and Decarbonization Strategies in the Cement and Concrete Industries". *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11): 559-573.

Hertwich, E. G., Ali, S., Ciacci, L., Fishman, T., Heeren, N., Masanet, E., ... ve Wolfram, P. (2019). "Material Efficiency Strategies to Reducing Greenhouse Gas Emissions Associated with Buildings, Vehicles, and Electronics—A Review". *Environmental Research Letters*, 14(4), 043004.

Ho, F. H., Abdul-Rashid, S. H., Raja Ghazilla, R. A., ve Woo, Y. L. (2019). "Resources Sustainability through Material Efficiency Strategies: An Insight Study of Electrical And Electronic Companies". *Resources*, 8(2), 117.

Ho, F. H., Abdul-Rashid, S. H., Raja Ghazilla, R. A., Sakundarini, N., Woo, Y. L., Ahmad, S., Ghazali, I., ve Abdul Haq, R. H. (2021). "What Key Drivers Are Needed to Implement Material Efficiency Strategies? An Analysis of the Electrical and Electronic Industry in Malaysia and Its Implications to Practitioners". *Sustainability*, 13(4), 2065.

Horton, P. M., ve Allwood, J. M. (2017). "Yield Improvement Opportunities for Manufacturing Automotive Sheet Metal Components". *Journal of Materials Processing Technology*, 249: 78-88.

Howard, T. J., Culley, S. J., ve Dekoninck, E. (2008). "Describing the Creative Design Process by the Integration of Engineering Design and Cognitive Psychology Literature". *Design Studies*, 29(2): 160-180.

IEA (International Energy Agency), (2019). *Material Efficiency in Clean Energy Transitions*. IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/material-efficiency-in-clean-energy-transitions>

IEA (International Energy Agency), (2020a). *Energy Efficiency 2020*. <https://doi.org/10.1787/dfd85134-en>, (Erişim tarihi:18.04.2022).

IEA (International Energy Agency), (2020b). *Energy Technology Perspectives 2020*. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>, (Erişim tarihi:18.04.2022).

IEA (International Energy Agency), (2021a). *Greenhouse Gas Emissions from Energy: Overview*. <https://www.iea.org/reports/greenhouse-gas-emissions-from-energy-overview>, (Erişim tarihi:18.04.2022).

IEA (International Energy Agency), (2021b). *World Energy Model Documentation*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-model>, (Erişim tarihi:18.04.2022).

IEA (International Energy Agency), (2021c). *Tracking Industry 2021*. <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2021>, (Erişim tarihi:18.04.2022).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2018). *Summary for Policymakers*. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>, (Erişim tarihi:18.04.2022).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2022a). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>, (Erişim tarihi:19.04.2022).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2022b). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>, (Erişim tarihi:19.04.2022).

IRP (2019). "Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want". *A Report of the International Resource Panel*. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya.

IRP (2020a). "Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future". Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N. *A report of the International Resource Panel*. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

IRP (2020b). *Resource Efficiency and Climate Change Full Report Launch at UNFCCC Race to Zero Dialogues*. (13 November 2020), <https://www.resourcepanel.org/news-events/resource-efficiency-and-climate-change-full-report-launch-unfccc-race-zero-dialogues> (Erişim Tarihi: 13.04.2022).

Karakaya, E., Sarı, E., ve Alataş, S. (2021). "What Drives Material Use in the EU? Evidence from Club Convergence and Decomposition Analysis on Domestic Material Consumption and Material Footprint". *Resources Policy*, 70, 101904.

atelhön, A., Meys, R., Deutz, S., Suh, S. ve Bardow, A. (2019). "Climate Change Mitigation Potential of Carbon Capture and Utilization in the Chemical Industry". *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 116(23).

King, A. M., Burgess, S. C., Ijomah, W., ve McMahan, C. A. (2006). "Reducing Waste: Repair, Recondition, Remanufacture or Recycle?". *Sustainable Development*, 14(4): 257-267.

Lai, Y. (2008). "Auctions or Grandfathering: The Political Economy of Tradable Emission Permits". *Public Choice*, 136: 181-200.

Lifset, R., ve Eckelman, M. (2013). "Material Efficiency in a Multi-Material World". *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1986), 20120002.

Loftus, P., Cohen, A., Long, J. ve Jenkins, J. (2015). "A Critical Review of Global Decarbonization Scenarios: What do They Tell us about Feasibility?". *WIREs Climate Change*, 6: 93–112.

MacDowell, N., Fennell, P.S., Shah, N. ve Maitland, G.C. (2017). "The Role of CO2 Capture and Utilization in Mitigating Climate Change". *Nature Climate Change*, 7: 243-249.

ME (Material Economics), (2019). *Industrial Transformation 2050*. <https://materialeconomics.com/publications/industrial-transformation-2050>, (Erişim tarihi:18.04.2022).

Milios, L. (2021). "Towards a Circular Economy Taxation Framework: Expectations and Challenges of Implementation". *Circular Economy and Sustainability*, 1(2): 477-498.

Mohanty, C. R. C. (2011). "Reduce, Reuse and Recycle (the 3Rs) and Resource Efficiency As the Basis for Sustainable Waste Management". *Proceedings of the Synergizing Resource Efficiency with Informal Sector towards Sustainable Waste Management*, New York, NY, USA, 9.

Montella, I., ve Marrone, P. (2021). "Material Efficiency Design Strategies for the Circular Transition". *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, 86-95.

Morseletto, P. (2020). "Targets for a Circular Economy. Resources", *Conservation and Recycling*, 153, 104553.

OECD (Organization for Economic Co-operation and Development)/IEA (International Energy Agency), (2017). *Renewable Energy for Industry from Green Energy to Green Materials and Fuels*. <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-for-industry>, (Erişim tarihi:18.04.2022).

Pauliuk, S., ve Heeren, N. (2021). "Material Efficiency and Its Contribution to Climate Change Mitigation in Germany: A Deep Decarbonization Scenario Analysis until 2060". *Journal of Industrial Ecology*, 25(2): 479-493.

Pauliuk, S., Heeren, N., Berrill, P., Fishman, T., Nistad, A., Tu, Q., ... ve Hertwich, E. G. (2021). "Global Scenarios of Resource and Emission Savings from Material Efficiency in Residential Buildings and Cars". *Nature communications*, 12(1): 1-10.

- Qureshi, A. J., Gericke, K., ve Blessing, L. (2014). "Stages in Product Lifecycle: Trans-Disciplinary Design Context". *Procedia CIRP*, 21: 224-229.
- Scott, K., Gieseckam, J., Barrett, J., ve Owen, A. (2019). "Bridging the Climate Mitigation Gap with Economy Wide Material Productivity". *Journal of Industrial Ecology*, 23(4): 918-931.
- Sickles, R. C., ve Zelenyuk, V. (2019). *Measurement of Productivity and Efficiency*. Cambridge University Press.
- UN (United Nations), (2015). *Paris Agreement*, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>, (Erişim tarihi:18.04.2022).
- Van Renssen, S. (2020). "The Hydrogen Solution?". *Nature Climate Change*, 10: 799-801.
- Vence, X., ve López Pérez, S. D. J. (2021). *Taxation for a Circular Economy: New Instruments, Reforms, and Architectural Changes in the Fiscal System*. *Sustainability*, 13(8), 4581.
- Vermeulen, W. J., Reike, D., ve Witjes, S. (2019). *Circular Economy 3.0; Solving Confusion Around New Conceptions of Circularity by Synthesising and Re-Organising The 3R's Concept into A 10R Hierarchy*. *Renewable Matter*, 27: 12-15.
- WB (World Bank), (2022). *World Bank Development Indicators*. <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=world-development-indicators>, (Erişim tarihi:18.04.2022).
- Wennersten, R., Sun, Q. ve Li, H. (2015). "The Future Potential for Carbon Capture and Storage in Climate Change Mitigation: An Overview from Perspectives of Technology, Economy and Risk". *Journal of Cleaner Production*, 103: 724-736.
- Wesseling, J.H., Lechtenböhmer, S., Ahman, M., Nilsson, L.J., Worrell, E. ve Coenen, L. (2017). "The Transition of Energy Intensive Processing Industries towards Deep Decarbonization: Characteristics and Implications for Future Research". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79: 1303-1313.
- Woerdman, E., Couwenberg, O. ve Nentjes, A. (2009). "Energy Prices and Emissions Trading: Windfall Profits from Grandfathering". *European Journal of Law and Economics*, 28: 185-202.

Wolfram, P., Tu, Q., Heeren, N., Pauliuk, S., ve Hertwich, E. G. (2021). "Material Efficiency and Climate Change Mitigation of Passenger Vehicles". *Journal of Industrial Ecology*, 25(2): 494-510.

Worrell, E., Faaij, A. P. C., Phylipsen, G. J. M., ve Blok, K. (1995). *An Approach for Analysing the Potential for Material Efficiency Improvement*. *Resources, Conservation and Recycling*, 13(3-4): 215-232.

Yang, J., Zhang, L., Chang, Y., Hao, Y., Liu, G., Yan, Q., ve Zhao, Y. (2020). *Understanding the Material Efficiency of the Wind Power Sector in China: A Spatial-Temporal Assessment*. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104668.

Yükçü, S., ve Atağan, G. (2009). "Etkinlik, Etkililik ve Verimlilik Kavramlarının Yarattığı Karışıklık". *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 23(4): 1-13.

Zhang, C., Chen, W., Ruth, M. (2018). *Measuring Material Efficiency: A Review of the Historical Evolution of Indicators, Methodologies and Findings*. *Resources, Conservation & Recycling*, 132: 79-92.