

T.C.
ADİYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

CAM TEMPERLEME VE ALÜMİNYUM PROFİL
ÜRETİM SÜREÇLERİNİN KARBON AYAK İZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞULE POLAT

DANIŞMAN
PROF. DR. YAVUZ DEMİRCİ

ADİYAMAN, 2025

ÖZET

CAM TEMPERLEME VE ALÜMİNYUM PROFİL ÜRETİM SÜREÇLERİNİN KARBON AYAK İZİ

Şule POLAT

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Adıyaman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temmuz/2025, Sayfa:90

Danışman: Prof. Dr. Yavuz DEMİRCİ

Sanayi Devrimi'nden itibaren doğal kaynaklara olan talep artış göstermiş ve bu durum, günümüzün en büyük çevresel sorunlarından biri olan iklim değişikliğini tetiklemiştir. Kaynakların dikkatsiz kullanımı ve çevre koruma önlemlerinin yetersizliği, küresel ölçekte sera gazı emisyonlarının artmasına neden olmuştur. Bu bağlamda, cam ve alüminyum üretim süreçleri, çevresel etkileri açısından dikkatle ele alınması gereken önemli alanlardır. Cam temperleme süreci, camın mekanik dayanıklılığını ve termal direncini artırmaya yönelik uygulanan bir işlem olup, yüksek enerji tüketimi nedeniyle önemli ölçüde karbon ayak izi yaratmaktadır. Bu süreçte kullanılan teknolojiler ve üretim parametreleri, emisyon seviyelerini doğrudan etkilemektedir. Alüminyumun eritme ve şekillendirme gibi yüksek sıcaklık gerektiren işlemleri, enerji tüketimini ve buna bağlı olarak karbon emisyonlarını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu süreçlerde kullanılan enerji kaynaklarının türü ve miktarı, doğrudan ve dolaylı sera gazı emisyonlarını belirleyen temel unsurlardır. Bu çalışma, nicel bir araştırma yaklaşımıyla, envanter temelli bir sera gazı (SGE) hesaplama yöntemi kullanılarak yürütülmüştür. Hesaplamalar; ISO 14064-1:2018 standardı, SGE Protokolü, IPCC 2006 Rehberleri ve DEFRA 2023 emisyon faktörleri gibi uluslararası kabul görmüş metodolojilere dayandırılmıştır. Tesisin faaliyetleri; doğrudan emisyonları (Kapsam 1 - 86,26 tCO₂e), dolaylı enerji emisyonlarını (Kapsam 2 - 108,86 tCO₂e) ve diğer dolaylı emisyonları (Kapsam 3 - 238,74 tCO₂e) kapsayacak şekilde bütüncül bir yaklaşımla analiz edilmiştir. Veriler ışığında, cam ve alüminyum üretim süreçlerinin toplam karbon ayak izi üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve emisyonların azaltılmasına yönelik stratejiler geliştirilmiştir. Bu stratejiler, enerji verimliliği artırımı, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve üretim süreçlerinin optimize edilmesini içermektedir. Bu çalışma, cam ve alüminyum üretim tesislerinde çevresel sürdürülebilirliği artırmayı hedefleyen kapsamlı bir değerlendirme sunmakta ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik uygulanabilir çözümler önermektedir.

Anahtar Kelimeler: Cam temperleme; Alüminyum profil; Sera gazları; Karbon ayak izi; Sürdürülebilirlik.

ABSTRACT

CARBON FOOTPRINT OF GLAZING TEMPERING AND ALUMINIUM PROFILE PRODUCTION PROCESSES

Şule POLAT

Department of Environmental Engineering

Adıyaman University, Graduate Education Institute, July/2025, Page:90

Supervisor: Prof. Dr. Yavuz DEMİRCİ

Since the Industrial Revolution, the demand for natural resources has increased and this situation has triggered climate change, one of the most critical environmental problems of today. Careless use of resources and inadequate environmental protection measures have led to an increase in greenhouse gas emissions on a global scale. In this context, glass and aluminum production processes are important areas that need to be carefully considered in terms of their environmental impacts. The glass tempering process is a process applied to increase the mechanical strength and thermal resistance of glass and creates a significant carbon footprint due to high energy consumption. The technologies and production parameters used in this process directly affect the emission levels. High-temperature processes such as melting and forming of aluminium significantly increase energy consumption and consequently carbon emissions. The type and amount of energy resources used in these processes are the main factors determining direct and indirect greenhouse gas emissions. The calculations are based on internationally accepted methodologies such as the ISO 14064-1:2018 standard, the GHG Protocol, the IPCC 2006 Guidelines and the DEFRA 2023 emission factors. The plant's activities were analyzed with a holistic approach, covering direct emissions (Scope 1 - 86.26 tCO₂e), indirect energy emissions (Scope 2 - 108.86 tCO₂e) and other indirect emissions (Scope 3 - 238.74 tCO₂e). In the light of the data, the impacts of glass and aluminium production processes on the total carbon footprint were analysed and strategies were developed to reduce emissions. These strategies include energy efficiency improvement, use of renewable energy sources and optimisation of production processes. This study presents a comprehensive assessment aimed at improving environmental sustainability in glass and aluminium production facilities and proposes feasible solutions to reduce greenhouse gas emissions.

Keywords: Glazing tempering; Aluminium profile; Greenhouse gases; Carbon footprint; Sustainability.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında katkı sağlayan herkese içtenlikle teşekkür etmek isterim.

İlk olarak, değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Yavuz DEMİRCİ'ye, ayrıca, değerli akademik kadro ve tez sürecim boyunca her türlü desteğini esirgemeyen tüm öğretim üyelerine, araştırma sürecinde bana rehberlik eden Çevre Yük. Müh. Cerrah DEMİRCİ ve arkadaşlarıma, aileme ve beni her zaman destekleyen sevdiklerime teşekkür ederim.

Son olarak, bu tezin yazılmasında bana katkı sağlayan ve destek olan herkese, isimlerini burada anmasam da teşekkür ederim.

Şule POLAT
....../....../2025

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Adıyaman Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

(İmza)

Şule POLAT

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kapsam Bazlı Sera Gazı Emisyon Parametreleri.....	2
1.2. Literatür Özeti	4
2. CAM TEMPERLEME VE ALÜMİNYUM PROFİL ÜRETİMİNDE	
ÇEVRESEL ETKİLER VE KARBON AYAK İZİ	8
2.1. Camın Özellikleri ve Temperleme Süreci.....	8
2.1.1. Cam temperleme teknolojisi	11
2.1.2. Cam temperleme proses aşamaları	12
2.1.3. Cam temperleme sürecinde karbon ayak izi	16
2.1.4. Temperli cam üretiminde karbon ayak izi kaynakları ve azaltım	
uygulamaları.....	17
2.2. Alüminyum Genel Özellikleri ve Alüminyum Profil.....	22
2.2.1. Alüminyum profil üretim süreci ve prosesleri	26
2.2.2. Alüminyum profil üretiminde karbon ayak izi	29
2.3. Karbon Ayak İzi ve Sera Gaz Emisyonları	30
2.3.1. Sera gazları ve iklim değişikliği	32
2.3.2. Karbon ayak izi hesaplama yöntemleri	33
2.4. Cam Temperleme ve Alüminyum Profil Üretiminde Karbon Ayak İzi	
Hesaplaması.....	35
2.4.1. Cam temperleme süreci hesaplama.....	35

2.4.2. Alüminyum profil üretim süreci hesaplama.....	37
2.4.3. Tesisteki sera gaz emisyonlarının değerlendirilmesi	38
2.4.4. Birim üretim başına sera gaz emisyonları	42
2.5. Sürdürülebilirlik ve Sera Gazı Emisyon Azaltma Yöntemleri.....	44
3. YÖNTEM	49
4. BULGULAR.....	51
4.1. Araştırma Dönemi	51
4.2. Çalışmanın Arka Planı ve Amacı	51
4.3. Toplam Sera Gazı Emisyonları	52
4.3.1. Kapsam bazında emisyon dağılımı.....	52
4.3.2. Kapsam 1: Doğrudan emisyonlar	52
4.3.3. Kapsam 2: Dolaylı enerji emisyonları.....	63
4.3.4. Kapsam 3: Diğer dolaylı emisyonlar	67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	80
5.1. Sonuçlar	80
5.2. Öneriler.....	83
5.2.1. Enerji verimliliğini artırmaya yönelik teknolojik yatırımlar	83
5.2.2. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı.....	83
5.2.3. Hammadde ve girdi lojistiğinde karbon azaltımı	84
5.2.4. Döngüsel ekonomi uygulamaları	84
5.2.5. Çalışan eğitimi ve karbon farkındalığı programları	84
5.2.6. Sürekli izleme, raporlama ve sertifikasyon süreçleri	85
5.2.7. Sektörel iş birlikleri ve kamu politikaları.....	85
KAYNAKÇA.....	86
ÖZ GEÇMİŞ	

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Kapsam bazlı sera gazı emisyon parametreleri	2
Tablo 2.1. Temperli cam üretiminde karbon ayak izi kaynakları ve azaltım uygulamaları	17
Tablo 2.2. Alüminyum ve diğer metallerin özelliklerinin karşılaştırılması.....	25
Tablo 2.3. GHG emisyon hesaplama denkleminde kullanılan semboller.....	35
Tablo 4.1. Taşıtlardan kullanılan yakıt çeşidine göre emisyonlar	53
Tablo 4.2. Doğalgaz giderleri	54
Tablo 4.3. Doğalgaz tüketimi ve emisyon değerleri (2024)	55
Tablo 4.4. Kullanılan soğutucu gazlar ve küresel ısınma potansiyeli (GWP).....	58
Tablo 4.5. Klima türleri	59
Tablo 4.6. Klima gaz türleri.....	59
Tablo 4.7. Yangın söndürme tüpü gazları.....	61
Tablo 4.8. KAPSAM 1 emisyonları.....	62
Tablo 4.9. Aylık elektrik üretim ve tüketim değerleri tablosu.....	63
Tablo 4.10. Şebekeden elektrik alımı	63
Tablo 4.11. Elektrik ekipman kaynaklı sera gazı emisyonları.....	65
Tablo 4.12. KAPSAM 2 emisyonları.....	65
Tablo 4.13. Taşımacılık kaynaklı emisyonlar.....	68
Tablo 4.14. Girdi malzemelerinin sera gazı emisyonları	69
Tablo 4.15. Atık emisyon faktörleri.....	70
Tablo 4.16. Atık sera gazı emisyonları	70
Tablo 4.17. Atık türlerine göre taşıma kaynaklı sera gazı emisyonları	71
Tablo 4.18. KM bazlı servis araçlarından kaynaklı sera gazı emisyonları	72
Tablo 4.19. Yakıt bazlı servis araçlarından kaynaklı sera gazı emisyonları.....	73
Tablo 4.20. Servis araçlarından kaynaklı sera gazı emisyonları.....	74
Tablo 4.21. Otel konaklama emisyon faktörleri	75
Tablo 4.22. İş seyahatlerinden kaynaklanan detaylı emisyonlar	75
Tablo 4.23. Kapsam bazlı sera gazı emisyonları	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Cam temperleme fırını	13
Şekil 2.2. Termal kamera ile alınan temperleme fırını ısı kaybı	14
Şekil 2.3. Yüzdürme işlemi	17
Şekil 2.4. Dönen çelik silindir ile camın kontrol edilmesi	20
Şekil 2.5. Farklı kesitlerdeki alüminyum profiller	26
Şekil 2.6. Alüminyum biyet üretiminin üretim süreci aşamaları	27
Şekil 2.7. Ekstrüzyon presi görseli	27
Şekil 2.8. Emisyon kapsamı	31

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AB	: Avrupa Birliği
BMİDÇS	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
EPA	: Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı
IPCC	: Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli
GWP	: Global Warming Potential
GHG	: Green House Gas
LCA	: Life Cycle Assesment
CO _{2e}	: Karbondioksit eşdeğeri
SGE	: Sera gazları
CO ₂	: Karbondioksit
CH ₄	: Metan
N ₂ O	: Diazot monoksit
HAD	: Hayat Döngüsü Değerlendirmesi
KAYD	: Karbon Ayak İzi Değerlendirmesi
SiO ₂	: Silisyum dioksit
Na ₂ CO ₃	: Sodyum karbonat
CaCO ₃	: Kalsiyum karbonat

1. GİRİŞ

Sanayi Devrimi ile birlikte ortaya çıkan teknolojik gelişmeler, gerek gelişmiş gerekse gelişmekte olan ülkelerde toplumların refah düzeyinin artmasına ve küresel ölçekte daha bütünleşik bir yapının oluşmasına zemin hazırlamıştır. Bu süreç, aynı zamanda uluslararası düzeyde rekabeti de yoğunlaştırmıştır. Özellikle gelişmiş ülkeler, sanayi ve teknoloji alanındaki üretim kapasitelerini artırarak uluslararası piyasalarda hemen her sektörde etkinlik göstermiş ve ekonomik açıdan baskın konuma yükselmiştir. Bununla birlikte, üretimin sınırsız kaynak döngüsüne dayandığı yönündeki yanlış varsayım, doğal kaynakların yoğun kullanımına bağlı olarak ekolojik sistemin bozulmasına yol açmakta ve yeryüzünü biyolojik varlıklar açısından giderek daha elverişsiz bir yaşam alanına dönüştürmektedir. Son yıllarda endüstriyel süreçlerin çevresel etkileri hem akademik literatürde hem de profesyonel tartışmalarda büyük bir inceleme konusu haline gelmiştir. Bu bağlamda, üretim faaliyetlerinden kaynaklanan karbon ayak izi, küresel iklim değişikliğine doğrudan katkı sağlayan temel unsurlardan biri olarak öne çıkmaktadır.

Karbon ayak izi, karbondioksit eşdeğerleri (CO_2e) cinsinden ifade edilen toplam sera gazı (SGE) emisyonlarının ölçüsü olarak tanımlanmaktadır (Wiedmann & Minx, 2008). Karbon ayak izi çalışmalarında, sera gazı emisyonlarının hesaplanması, atmosferde milyonda parça (ppm) birimiyle ölçülen karbondioksit eşdeğerlerine dayandırılmaktadır. Bu yaklaşım, farklı sera gazlarının küresel ısınmaya katkı düzeylerini karşılaştırılabilir kılmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu bağlamda, standardizasyon süreci, her bir sera gazının karbondioksite (CO_2) kıyasla atmosferde ısı tutma kapasitesini yansıtan küresel ısınma potansiyellerinin (Global Warming Potentials, GWP) dikkate alınması esasına dayanmaktadır. Böylece, farklı gazların iklim sistemi üzerindeki etkileri ortak bir ölçüt üzerinden değerlendirilebilmekte ve çevresel etki analizleri daha tutarlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Metan (CH_4) ve diazot monoksit (N_2O) gibi yüksek küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahip gazlar, emisyon birimi başına küresel ısınma üzerinde orantısız derecede yüksek etkilere sahiptir. Bununla birlikte, karbondioksit (CO_2), diğer sera gazlarına kıyasla çok daha yüksek emisyon hacimlerine ulaşması nedeniyle küresel ısınmaya temel katkıyı sunmaya devam etmektedir (Yapıcıoğlu, 2018). Özellikle cam temperleme ve alüminyum profil üretimi gibi büyük ölçüde enerji yoğun süreçlere ve yüksek düzeyde kaynak tüketimine dayanan sektörler, bu bağlamda büyük bir öneme sahiptir. Bu endüstriler yalnızca fosil yakıt temelli enerjinin yoğun kullanımını gerektirmekle kalmamakta, aynı zamanda hammadde çıkarımı, işlenmesi ve taşınması sırasında da kayda değer miktarlarda

sera gazı emisyonu üretmektedir. Söz konusu çevresel etkilerin sistematik biçimde değerlendirilmesi amacıyla, ürünlerin veya süreçlerin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel yüklerini analiz eden yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment, LCA) metodolojik çerçevesi kullanılmaktadır (ISO 14040, 2006). Bu yaklaşım, yalnızca doğrudan emisyonları değil aynı zamanda dolaylı emisyonları da kapsayarak, karbon ayak izinin bütüncül bir biçimde anlaşılmasına olanak tanımaktadır. Böylelikle, endüstriyel süreçlerin iklim değişikliği üzerindeki etkileri daha kapsamlı ve bilimsel temellere dayalı olarak değerlendirilebilmektedir.

Bu noktada, karbon ayak izini oluşturan parametreler kapsam bazlı olarak sınıflandırılmakta ve farklı faaliyet verilerine dayalı olarak hesaplanmaktadır. Tablo 1.1’de, çalışmada kullanılan emisyon kapsamlarını ve ilgili faaliyet verilerini özetlemektedir:

1.1. Kapsam Bazlı Sera Gazı Emisyon Parametreleri

Tablo 1.1. Kapsam bazlı sera gazı emisyon parametreleri (**Kaynak:** Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Kapsam	Kategori	Alt Kategori / Örnek	Açıklama	Kullanılan FV (Faaliyet Verisi)
1 – Kapsam 1	Sabit Yakma	Isıtma amaçlı doğalgaz kullanımı	Doğalgaz tüketimi, yoğunluk, NKD	Doğalgaz tüketimi (m ³), yoğunluk, NKD
	Mobil Yakma	Araçlarda dizel, benzin, LPG kullanımı	Yakıt tüketimi (ton), NKD, EF	Yakıt tüketimi (ton), NKD, EF
	Endüstriyel Süreçler	Cam kesimi vb.	Emisyon oluşmadığı için dahil edilmez	–
	Antropojenik Sızıntılar	Klima gazı sızıntısı (R410A, R32)	Cihaz sayısı, gaz miktarı, sızıntı oranı, KIP	Cihaz sayısı, gaz miktarı, sızıntı oranı, KIP
	Arazi Kullanımı	Tesis arazisi imarlı, değişiklik yok	Emisyon oluşmadığı için dahil edilmez	–
2 – Kapsam 2	İthal Elektrik	Şebekeden alınan elektrik	Elektrik tüketimi (kWh), EF	Elektrik tüketimi (kWh), EF
3 – Kapsam 3	Girdi ve Sermaye Malları Taşımacılığı	Cam, PVC, vida, alüminyum vb. girdiler	Taşınan malzeme, mesafe, araç tipi, EF	Taşınan malzeme (ton), mesafe (km), taşıma aracı, EF
	Atık Taşımacılığı	PVC, Alüminyum, Demir, Karton vb. atıklar	Atık miktarı, mesafe, araç tipi, EF	Atık miktarı (kg), mesafe (km), taşıma aracı, EF
	Personel Ulaşımı	Servis araçları ile ulaşım	Aylık km, araç modeli, EF	Aylık km, araç modeli, EF

Bu sınıflandırma, karbon ayak izinin yalnızca üretim süreçlerinden kaynaklanan doğrudan emisyonlarla sınırlı olmadığını, aynı zamanda tedarik zinciri, lojistik, atık yönetimi ve personel ulaşımı gibi dolaylı unsurları da içerdiğini göstermektedir. Böylece, endüstriyel faaliyetlerin iklim üzerindeki etkileri yalnızca enerji tüketimi ekseninde değil, bütünsel bir yaşam döngüsü perspektifinde ele alınabilmektedir. Bu yaklaşım, cam temperleme ve alüminyum profil üretimi gibi enerji yoğun sektörlerde emisyon azaltım stratejilerinin geliştirilmesine, kaynak verimliliğinin artırılmasına ve sürdürülebilir üretim politikalarının oluşturulmasına yönelik güçlü bir analitik zemin sağlamaktadır. Bu çerçevede, cam temperleme ve alüminyum profil üretimi özelinde yürütülen bu çalışmanın temel amacı, enerji tüketimi, hammadde kullanımı, taşımacılık, atık yönetimi ve personel ulaşımı gibi çok boyutlu süreçlerin sera gazı emisyonlarına katkısını ayrıntılı biçimde ortaya koymaktır. Çalışmada kullanılan kapsam bazlı yaklaşım, yalnızca işletme içerisindeki doğrudan emisyonları değil, aynı zamanda dolaylı emisyonları da dikkate alarak karbon ayak izinin daha kapsamlı ve gerçekçi bir şekilde hesaplanmasına imkân tanımaktadır. Böylelikle, endüstriyel süreçlerin çevresel etkileri hem üretim ölçeğinde hem de yaşam döngüsü perspektifinde bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmektedir. Bu bağlamda araştırma, üç temel katkı sağlamayı hedeflemektedir. İlk olarak, karbon ayak izi hesaplamaları yoluyla cam temperleme ve alüminyum profil üretim süreçlerinde öne çıkan emisyon kaynakları belirlenmektedir. İkinci olarak, elde edilen bulgular, mevcut üretim yapısının çevresel sürdürülebilirlik açısından güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koymaktadır. Son olarak ise, çalışma endüstriyel aktörlere, politika yapıcılara ve araştırmacılara yönelik olarak, emisyonların azaltılması için uygulanabilir stratejilerin geliştirilmesine yönelik öneriler sunmaktadır. Dolayısıyla bu tez yalnızca belirli üretim süreçlerinin karbon ayak izi profilini ortaya koymayı değil, aynı zamanda sürdürülebilir üretim pratiklerinin geliştirilmesi adına bilimsel temelli bir değerlendirme çerçevesi sunmayı amaçlamaktadır. Böylece, küresel ölçekte iklim değişikliğiyle mücadele hedeflerine uyum sağlanmasına katkı sunulurken, yerel düzeyde de sanayi kuruluşlarının çevresel sorumluluklarını yerine getirmelerine yönelik yol gösterici bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Bu araştırmanın temel amacı, cam temperleme ve alüminyum profil üretim süreçlerinin karbon ayak izini sistematik bir biçimde hesaplamak ve bu faaliyetlerle ilişkili çevresel etkilerin ayrıntılı bir biçimde anlaşılmasını sağlamaktır. Çalışmada, söz konusu üretim süreçlerinde kullanılan enerji ve hammadde girdileri incelenerek, sera gazı emisyonlarına katkıda bulunan başlıca faktörler belirlenmektedir. Bununla birlikte,

araştırma yalnızca mevcut emisyonların niceliksel analizini yapmakla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda bu emisyonların azaltılmasına yönelik stratejik çözüm önerileri geliştirmeyi de hedeflemektedir. Böylece, elde edilen bulguların küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu biçimde iklim değişikliğiyle mücadeleye ve çevresel bozulmanın azaltılmasına katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

1.2. Literatür Özeti

Cam, silis kumu, soda külü ve kireçtaşı gibi hammaddelerin harmanlanması ve karıştırılmasının ardından ergitme fırınlarında 1500°C'yi aşan sıcaklıklarda eritilmesiyle üretilmektedir. Cam temperleme işlemi, camın mekanik mukavemetini ve termal direncini arttırmak için önemli bir endüstriyel tekniktir. Son çalışmalar, verimliliği artırmak, enerji tüketimini azaltmak ve parametreleri optimize etmek için bu sürecin çeşitli yönlerini araştırmıştır.

Cirillo ve Isopi (2009), cam temperleme işlemi sırasında ısı transfer katsayısının sayısal olarak değerlendirilmesi üzerine bir araştırma yürütmüştür. Araştırmalarında, ısı transfer katsayısını hesaplayabilen bir matematiksel model geliştirmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonlarından faydalanmışlardır. Çalışmada hava jeti boyutları ve proses değişkenleri de dahil olmak üzere çeşitli parametreler analiz edilmiştir. Özellikle, 640°C düz plaka sıcaklığı, 4 mm ve 8 mm jet çapları, 110 m/s ve 140 m/s hava nozülü çıkış hızları ve 40 mm ve 60 mm jet aralıkları incelenmiştir. Nozüllerin yüksekliği 20 mm ve 60 mm olarak ayarlanmıştır. Bulgular, temperleme işlemi sırasında verimli ısı transferi elde etmek için hava jetlerinin optimum konfigürasyonuna ilişkin değerli bilgiler sağlamaktadır.

Sözbir ve Yao (2004), ani soğutma sırasında kullanılan yüksek hızlı hava jetlerine su buharı ekleyerek cam temperleme sürecinde basınçlı hava ve enerji tüketimini azaltmaya odaklanmıştır. Çalışmaları, su buharı ilavesinin, 2 mm kalınlığındaki cam plakaların temperlenmesi için hava basıncı gereksinimlerinde yaklaşık %29, 3 mm ve 4 mm kalınlığındaki plakalar için ise yaklaşık %50 oranında bir azalmaya yol açtığını göstermiştir. Bu sonuçlar, su buharının sisteme entegre edilmesinin basınçlı hava tüketimini önemli ölçüde azaltarak daha ince ve daha uygun maliyetli temperli cam üretimine olanak sağlayabileceğini göstermektedir.

Schmitz vd. (2011) bu enerji yoğun sürecin sera gazı emisyonlarına önemli ölçüde arttırdığını ve sektörün enerji tasarrufu önlemlerini benimsemesini zorunlu kıldığını vurgulamaktadır. Cam üretimi için gerekli olan yüksek sıcaklıklar önemli ölçüde enerji tüketimine yol açarak sektörle ilgili çevresel zorlukları daha da artırmaktadır.

Cam atıklarının geri kazanılması ve yeniden kullanılması olmak üzere döngüsel ekonomi uygulamalarının benimsenmesi yoluyla bu etkilerin hafifletilmesi potansiyelini vurgulamaktadır. Bu yaklaşım yalnızca çevresel hasarı azaltmakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik büyümeye de katkıda bulunur (Lin vd., 2018).

Cam üretiminde döngüsel ekonomi modeli, hammaddeye olan talebi azaltmak amacıyla atık camın yeniden kullanımına odaklanmaktadır. Biyolojik olarak parçalanmayan bir malzeme olan cam, düzenli depolama sahalarına atıldığında ciddi çevresel sorunlar ortaya çıkarmaktadır (Allwood, 2014). Bununla birlikte, cam tamamen geri dönüştürülebilir nitelikte olup, kaliteden ödün verilmeden çeşitli cam ürünlerine veya hammaddelere dönüştürülebilmektedir. Geri dönüştürülmüş camın kullanımı, geri dönüşüm için gereken yanma sıcaklığının, silisyum dioksit gibi hammaddelerden yeni cam üretimine kıyasla önemli ölçüde düşük olması nedeniyle, cam üretimi ile ilişkili karbon emisyonlarını anlamlı biçimde azaltmaktadır. Geri dönüşüm sürecinde enerji talebindeki azalma, karbondioksit emisyonlarının minimize edilmesinde ve iklim değişikliğiyle mücadeledeki rolünü açıkça vurgulamaktadır (Allwood, 2014). Cam üretiminde geri dönüşümün üretim süreçlerine entegre edilmesi, bakır hammaddelere olan bağımlılığı azaltmakta, enerji tüketimini düşürmekte ve karbon emisyonlarını hafifletmektedir. Bu uygulamalar, çevresel bütünlükten ödün vermeksizin ekonomik büyümenin sağlanmasını güvence altına alarak, sürdürülebilir endüstriyel modellere geçiş yönündeki küresel çabalarla uyum göstermektedir. Ekonomi prensiplerinin cam üretimine entegre edilmesi, endüstrinin kaynak verimliliğini ve sürdürülebilirliğini teşvik ederken, çevresel zorlukların ele alınması potansiyelinin altını çizmektedir. Bu dönüşüm, cam üretiminin ekolojik ayak izini azaltmak ve daha yeşil bir geleceği teşvik etmek açısından büyük önem taşımaktadır.

Cam üretimiyle ilişkili önemli çevresel sorunlardan biri, kullanım sonrası ortaya çıkan cam atıklarının yönetimidir. Ingrao vd. (2021), küresel ölçekte üretilen cam ambalajın önemli bir hacme ulaştığını ve bunun sonucunda bertaraf sürecinde ciddi zorluklar ortaya çıktığını vurgulayarak, gelişmiş geri dönüşüm ve yeniden kullanım uygulamalarına olan ihtiyacın altını çizmektedir. Cam atıklar uygun şekilde yönetilmediğinde, artan çöp sahası kullanımı ve doğal kaynakların tükenmesi gibi çevresel bozulmalara katkı sağlamaktadır.

Sürdürülebilir cam üretimine geçiş, karbon emisyonlarını azaltmayı amaçlayan enerji verimli teknolojilerin, örneğin gelişmiş fırın tasarımları ve alternatif enerji kaynaklarının kullanımının benimsenmesini içermektedir. Bunun yanı sıra, tüketici bilincinin artırılması ve geri dönüşümü teşvik eden politikaların uygulanması, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Araştırmalar ayrıca, gelişmiş atık yönetim sistemlerinin entegrasyonunun, cam malzemelerin geri kazanımını ve yeniden kullanımını önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir.

Cam geri dönüşümünün döngüsel ekonomi çerçevesine dahil edilmesine yönelik çabalar, literatürde geniş bir biçimde tartışılmaktadır. Döngüsel ekonomi yaklaşımı, yeniden kullanım ve geri dönüşüm aracılığıyla kaynak kullanım verimliliğini maksimize etmeyi ve atıkları minimize etmeyi hedeflemektedir. Bu bağlamda, cam geri dönüşümü, yeni cam üretimine kıyasla işlenmemiş hammadde talebinin azalması ve enerji tüketiminin düşürülmesi gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Nodeh vd. (2022), cam üretimi ve atıklarının yol açtığı çevresel sorunları ele almak amacıyla, sürdürülebilir kalkınma ile uyumlu ekolojik stratejileri savunmaktadır.

Guan vd., (2013), Çin'deki iç mekân klima endüstrisinde bakır yerine alüminyum kullanımının karbon ayak izine olan etkilerini incelemiştir. Bakırın sınırlı bir kaynak olması ve fiyatının yüksek olması nedeniyle, alüminyumun daha ucuz bir alternatif olarak kullanılmasına yönelik bir eğilim gelişmiştir. Ancak alüminyum üretimi, yüksek sera gazı emisyonlarına neden olmakta, bu da maliyet avantajlarına rağmen çevresel etkileri artırmaktadır. Araştırmada, 2000-2009 yılları arasında iç mekân klima üretiminde kullanılan bakır ve alüminyumun karbon ayak izi yaşam döngüsü değerlendirmesi (KAYD) yöntemi ile hesaplanmıştır. Sonuçlar, bu dönemde bakır ve alüminyum üretim teknolojilerindeki iyileşmelerin karbon ayak izinde azalma sağladığını, ancak alüminyumun yüksek karbon emisyonları nedeniyle bakıra tam bir alternatif olamayacağını ortaya koymuştur. Araştırma ayrıca, alüminyumun üretim maliyetlerinde sağladığı düşüşün karbon emisyon maliyetlerindeki artışla dengelendiğini, dolayısıyla bakır ve alüminyum kullanımında dikkatli bir dengeleme yapılması gerektiğini belirtmektedir. Çalışmada, sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik enerji verimliliği artırma stratejileri ve yeni teknolojilerin geliştirilmesi önerilmiştir. Özellikle, alüminyum üretiminde kullanılan enerjinin daha verimli hale getirilmesi ve karbon ayak izinin azaltılması gerektiği vurgulanmaktadır (Guan vd., 2013).

Liu vd., (2020), alüminyum indirgeme hücrelerinden çıkan harcanmış pot kaplamalarının (Spent Pot Lining- SPL) çevreye zararlı maddeler içerdiğini belirterek, bu maddelerin çevresel etkilerini incelemiştir. Alüminyum indirgeme sürecinde kullanılan bu kaplamalar, yüksek miktarda çözünür florür ve az miktarda toksik siyanür içerir. Çalışma, 2396 gün çalışan bir alüminyum indirgeme hücresindeki florür ve siyanür dağılımını analiz etmiş, bu zararlı maddelerin izini sürmüş ve bu maddelerin korozyon mekanizmasını incelemiştir. Florürlerin, genellikle katot karbon bloğu ve bu bloğun altında yer alan kuru bariyer tabakasında yoğunlaştığı bulunmuş, siyanür ise hücrenin merkezinde düşük, yan duvarlarda ise daha yüksek konsantrasyonlarda tespit edilmiştir. Araştırma ayrıca, siyanür konsantrasyonunun hücreye giren hava miktarı ile pozitif korelasyon gösterdiğini ortaya koymuştur. Çalışmada, zararlı maddelerin hücre içindeki dağılımının, hücre tasarımı, ömrü ve işlem parametreleri gibi faktörlere bağlı olarak değiştiği vurgulanmıştır. Bu zararlı maddelerin çevresel etkilerinin azaltılması için yeşil işlem ve kaynak geri kazanımına yönelik öneriler sunulmuştur (Liu vd., 2020)

Haarberg (2024) çalışmasında, alüminyumun elektrolitik olarak kazanımı üzerine odaklanılmış ve bu süreçteki karbon ayak izinin nasıl azaltılabileceği tartışılmıştır. Alüminyum üretimi geleneksel olarak Hall-Héroult süreci ile yapılmakta olup, bu süreçte alümina, eritilmiş bir florür elektrolitinde çözülmekte ve saf alüminyum ile CO₂ gazı elde edilmektedir. Bu süreçte karbon anotlar kullanılmakta olup, doğrudan CO₂ ve perflorokarbon (PFC) gazları salınımına neden olmaktadır. Çalışmada, karbon ayak izini azaltmak için yeni yaklaşımlar incelenmiş ve inert anotların kullanılması ile CO₂ emisyonlarının tamamen ortadan kaldırılabilmesi önerilmiştir. Ayrıca, elektroliz sırasında doğrudan alüminyum alaşımlarının üretilmesi gibi yöntemlerin de karbon ayak izini önemli ölçüde azaltılabileceği belirtilmiştir. Çalışma, karbon ayak izinin azaltılmasında yenilikçi elektroliz süreçlerinin potansiyelini ortaya koymaktadır (Haarberg, 2024).

2. CAM TEMPERLEME VE ALÜMİNYUM PROFİL ÜRETİMİNDE ÇEVRESEL ETKİLER VE KARBON AYAK İZİ

Cam temperleme ve alüminyum profil üretim süreçleri birçok endüstriyel uygulamanın ayrılmaz bir parçası olmakla birlikte sera gazı (SGE) emisyonları nedeniyle çevresel kaygı taşımaktadır. Bu bölümde teknolojik yönlerini, operasyonel aşamalarını ve çevresel etkilerini vurgulayarak bu süreçlerin kapsamlı bir araştırması yapılacaktır. Ayrıca bu bölümde karbon ayak izi ve sera gazı emisyonları kavramları üzerinde durulacak, bunların ölçüm metodolojileri ve bu üretim süreçleriyle ilgisi ele alınacaktır. Çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve sürdürülebilir üretim uygulamalarına yönelik stratejilerin geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar ele alınacaktır. Bu araştırmada özellikle cam temperleme ve alüminyum profil üretim süreçlerinin ele alınmasının birkaç nedeni bulunmaktadır. Öncelikle her iki üretim süreci de inşaat, otomotiv, beyaz eşya ve enerji gibi farklı sektörlerde yoğun olarak kullanılmakta olup endüstriyel uygulamalarda stratejik bir konuma sahiptir. İkinci olarak, cam temperleme yüksek sıcaklıkta ısı işlem gerektiren enerji yoğun bir süreç iken, alüminyum profil üretimi de ergitme, ekstrüzyon ve yüzey işlemleri gibi aşamalar nedeniyle hem elektrik hem de fosil yakıt kaynaklı enerji tüketimine dayanmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle her iki süreç de doğrudan ve dolaylı sera gazı (SGE) emisyonlarının önemli kaynakları arasında değerlendirilmektedir. Dolayısıyla, bu süreçlerin karbon ayak izi açısından incelenmesi, enerji verimliliği ve sürdürülebilir üretim stratejilerinin geliştirilmesi bakımından büyük bir önem taşımaktadır. Ayrıca, literatürde bu iki sürece ilişkin kapsamlı karşılaştırmalı çalışmalara yeterince yer verilmemiş olması, araştırmanın özgün değerini artırmaktadır.

2.1. Camın Özellikleri ve Temperleme Süreci

Çeşitli endüstrilerde önemli bir malzeme olan cam, esas olarak doğal hammaddelerin birleşiminden elde edilir. Üretimi, silisyum dioksitin (SiO_2) alkali ve alkali toprak metal oksitleri ve diğer metal oksitlerle füzyonunu ve ardından hızlı bir soğutmayı içerir. Bu işlem, benzersiz özelliklere sahip akışkan bir malzeme ile sonuçlanır. Temel hammaddeleri arasında, soda (Na_2CO_3) ve kireç taşı (CaCO_3) ile tamamlanan SiO_2 en önemlisi olarak öne çıkar. Cam üretiminin kökenleri tarihsel belirsizliklerle örtülüdür; ancak, camın ilk olarak yaklaşık 4000 yıl önce üretildiğine yaygın olarak inanılmaktadır. En eski cam kalıntıları da dahil olmak üzere arkeolojik kanıtlar, erken cam üretiminin merkezi olarak ağırlıklı olarak

eski Mısır'ı işaret etmektedir (Kocabağ, 2002). Camın mekanik mukavemeti, genel kütlesinden ziyade öncelikle yüzey özelliklerinden etkilenir. Yüzey özellikleri, malzemenin performansını ve işlevselliğini belirlemede çok önemli bir rol oynar. Bunlar arasında aşınma direnci, sürtünme katsayısı ve güçlendirme işlemlerinden geçme kabiliyeti yer alır. Ayrıca, yüzey enerjisi sıvılar tarafından ıslatılabilirliği, yapışma özelliklerini ve sol-jel reaksiyonlarını etkilemektedir. Yüzeyden etkilenen diğer önemli hususlar arasında deformasyon davranışı, ışık yansımaları, kimyasal ve elektriksel direnç yer almaktadır (Akçakaya, 1992). Cam yüzey özellikleri ile daha geniş uygulamaları arasındaki karmaşık ilişki, bilimsel ve endüstriyel bağlamlardaki önemini vurgular. Örneğin, yüzeyin kimyasal ve mekanik bozulmaya direnme yeteneği zorlu ortamlarda dayanıklılığı garanti eder. Benzer şekilde, yansıtıcı özellikleri ve aşınmaya karşı direnci onu optik uygulamalarda vazgeçilmez kılmaktadır. Sol-jel işlemleri gibi yüzey mühendisliği tekniklerindeki ilerlemeler, camın işlevsel yeteneklerini daha da genişleterek belirli teknolojik talepleri karşılamak için özel özelliklere olanak sağlamıştır.

Temperleme işlemi, camın mekanik mukavemetini artırmak için kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu işlem, camın nihai özellikleri için gerekli olan cam içindeki artık gerilim dağılımını önemli ölçüde değiştiren kontrollü bir ısıtma ve soğutma dizisini içerir. Temperleme sırasında cam önce yumuşama noktası sıcaklığına kadar ısıtılır, ardından hızla soğutulur. Bu hızlı soğutma, camın yüzeyi ve iç katmanları arasında diferansiyel bir soğutma hızı başlatarak önemli sıcaklık gradyanlarına yol açmaktadır. Bu homojen olmayan soğumanın bir sonucu olarak, yüzey katmanları iç katmanlara kıyasla daha hızlı soğuma ve daha fazla büzülme maruz kalmaktadır. Bu tutarsızlık farklı gerilim profillerinin oluşmasına böylelikle gerilim dağılımları temperli camın genel mukavemetine ve dayanıklılığına katkıda bulunarak mekanik darbelere karşı daha dirençli olmasını sağlamaktadır (Türkbaş,2006). Camın doğası gereği kristal bir yapıya sahip olmaması ve homojen olduğunda ve dış gerilimden arındırıldığında optik olarak izotropik olması da dikkat çekicidir. Bu özellik, tutarlı optik özellikler gerektiren uygulamalarda kullanımını daha da arttırmaktadır (Türkbaş, 2006).

Temperleme süreci, Adams ve Williamson tarafından geliştirilen ve özellikle soğutma aşamasında meydana gelen gerilme dağılımını inceleyen model de dahil olmak üzere çeşitli modeller aracılığıyla kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu modele göre, camdaki artık gerilmelerin dağılımı Denklem 2.1'de belirtildiği gibi matematiksel olarak belirlenebilir (Boley, 1960). Bu formül, malzemenin elastik özellikleri ve termal genleşme katsayısı

dikkate alınarak, referans sıcaklık ile gerçek sıcaklık arasındaki farkın gerilme değerine dönüşümünü ifade etmektedir.

$$\sigma(x) = \frac{E\alpha}{1-\nu} [\tilde{T}(x) - T(x)] \quad (2.1)$$

Simge	Açıklama	Birim
$\sigma(x)$ \sigma(x)	xx konumundaki termal gerilme	Pa
EE	Malzemenin elastik modülü (Young modülü)	Pa
α \alpha	Lineer termal genleşme katsayısı	1/°C
ν \nu	Poisson oranı	-
$\tilde{T}(x)$ \tilde{T}(x)	Referans sıcaklık dağılımı (stresiz sıcaklık)	°C
$T(x)$ T(x)	Gerçek sıcaklık dağılımı	°C

Artan gerilme oluşumunu etkileyen temel faktörlerden biri, soğutma sırasında malzeme içerisinde ortaya çıkan sıcaklık farklarıdır. Özellikle kalınlığı azaltılmış camlarda, bu sıcaklık farklılıkları minimum düzeyde gerçekleşme eğilimindedir; bu durum, artık gerilmelerin büyüklüğünde kayda değer bir azalmanın meydana gelmesine yol açmaktadır. Ayrıca, söz konusu etki, termal gradyanlar altında iç gerilme gelişimine daha düşük duyarlılık gösteren ve düşük termal genleşme katsayısına sahip cam türlerinde daha belirgin bir biçimde gözlemlenmektedir. Gerilme davranışının bu şekilde kavranması, özellikle belirli gerilme profilleri ve mekanik dayanıklılık gereksinimlerini karşılayan uygulamalarda, temperleme işleminin optimize edilmesi ve istenen mekanik özelliklerin sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Temperli cam, mekanik dayanıklılığını ve mukavemetini artıran kontrollü bir ısıtma süreci ve ardından hızlı soğutma adımlarını içeren bir üretim yöntemiyle elde edilmektedir. Bu işlem sırasında cam plakalar, malzemenin içsel atomik gerilmelerini dengelemesine olanak tanıyan yaklaşık 700 °C'ye kadar ısıtılmaktadır. Isıtma aşamasını takiben cam, ya hava ile soğutma ya da suya/yağa daldırma yoluyla hızlı bir şekilde soğutulmaktadır. Bu hızlı soğutma süreci, camın yapısında önemli mikroyapısal değişikliklere yol açmaktadır. Yüzey katmanları daha hızlı büzüşmekte ve katılaşırken, iç katmanlar görece yüksek sıcaklıkta kalarak yüzey büzüşmesine kademeli bir şekilde uyum sağlamaktadır. İç katman soğudukça, yüzeyde basınç gerilmeleri oluşurken, iç tabakalarda çekme gerilmeleri gelişmektedir (Toydemir, 1990). Bu gerilim dağılımı, temperli camın üstün mekanik ve termal özelliklerinin temelini oluşturmaktadır. İndüklenen yüzey basınç gerilmeleri sayesinde temperli cam, termal şoklara karşı olağanüstü bir direnç göstermekte;

kırılmadan 300 °C'ye kadar ani sıcaklık değişimlerini tolere edebilmektedir. Buna karşılık, temperlenmemiş cam genellikle yalnızca 30-50 °C'lik termal şoklar altında başarısız olmaktadır (Pulker, 1984). Bu fark, temperleme işleminin camın dayanıklılığını artırmadaki önemli rolünü vurgulamaktadır. Mekanik testler, temperli camın dayanım avantajlarını somut bir biçimde göstermektedir; örneğin, çelik bir topun düşürülmesi deneyinde, temperlenmiş 6 mm kalınlığındaki cam, 2 m yükseklikten bırakılan 500 g ağırlığındaki çelik topun etkisine dayanabilmektedir. Oysa temperlenmemiş cam, yalnızca 30-40 cm yükseklikten düşen bir bilye etkisi altında kırılmaktadır. Buna ek olarak, temperli cam, standart camla kıyaslandığında yaklaşık yedi kat artırılmış darbe direnci ve beş kat artan eğilme mukavemeti ile belirgin bir mekanik performans iyileşmesi göstermektedir. Bu üstünlük, cam levhaların her iki yüzeyinin eşit şekilde ısıtıldığı fırın sistemlerinde yatay olarak taşınması ve ardından hızlı soğutma uygulamasıyla elde edilen benzersiz gerilim dağılımından kaynaklanmaktadır. Bu süreç sayesinde, camın kırılması için herhangi bir çatlak veya kusurun yüzey boyunca malzemenin tamamına nüfuz etmesi gerekmekte; bu koşul sağlandığında, çatlak malzeme boyunca hızla yayılmakta ve cam küçük, bezelye büyüklüğünde parçalara ayrılmaktadır. Bu kırılma davranışı, ciddi yaralanma riskini azaltmakta ve temperli camı, hem mekanik hem de güvenlik açısından üstün kılmaktadır.

2.1.1. Cam temperleme teknolojisi

Temperleme işlemi, cam malzemeye mekanik dayanıklılık, darbe ve termal şok direnci kazandırmak amacıyla uygulanan bir ısıtma işlemidir. Bu süreç, camın tavlama sıcaklığının üzerinde kontrollü bir biçimde ısıtılmasını ve ardından hızlı soğutulmasını içerir. Bu kontrollü ısıtma işlemi sonucunda, cam yüzeyinde kalıcı basınç gerilmeleri oluşur; bu gerilmeler, malzemenin mukavemetini artıran temel etkenler arasında yer almaktadır (Eşsiz, 2004). Temperleme sonrası camın yüzeyinde ortaya çıkan basınç gerilmeleri, malzemenin yük taşıma kapasitesinin yükselmesine doğrudan katkı sağlar. Araştırmalar, temperleme uygulanan camın, standart tavlama camla kıyaslandığında dayanıklılığının yaklaşık dört ila beş kat arttığını göstermektedir (Sev ve Özgen, 2004). Bu artış, temperli camın yüksek dayanıklılık ve mekanik yük gerektiren uygulamalarda öncelikli olarak tercih edilmesini açıklamaktadır. Temperli camın güvenlik özellikleri de mekanik avantajları kadar önemlidir. Normal cam kırıldığında büyük ve keskin parçalar oluştururken, temperli cam kırıldığında kenarsız, küçük ve yuvarlak parçacıklara ayrılır. Bu durum, olası kazalarda ciddi yaralanma riskini önemli ölçüde azaltmaktadır (Büyükyıldız, 2007). Bununla birlikte, temperlenmiş

camın delme, kesme veya benzeri ikincil işlemlere tabi tutulmasının mümkün olmadığı vurgulanmalıdır; çünkü bu tür işlemler, camın yüzey gerilme dağılımını bozarak mekanik özelliklerini zayıflatabilir (Kantürer, 2009). Dolayısıyla temperleme, yalnızca camın dayanıklılığını artırmakla kalmaz, aynı zamanda güvenlik performansını da iyileştirir. Temperli cam, üstün mekanik ve güvenlik özellikleri sayesinde otomotiv, mimari, havacılık ve denizcilik gibi çeşitli endüstrilerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Camın kalite düzeyi, temperleme sürecinin hassas bir biçimde yürütülmesine bağlıdır. Bu işlem genellikle cam yüzeyinden etkin ısı transferini sağlamak için yönlendirilmiş hava jetleri kullanılarak gerçekleştirilir (Lee ve Viskanta, 1998; Monnoyer ve Lochegnies, 2008). Hızlı soğutma aşaması, cam içinde kalıcı gerilimlerin oluşmasını sağlar ve bu gerilimler, malzemenin mekanik performansı için önemli bir rol oynar. Ancak gerilimlerin düzensiz dağılımı, temperleme lekeleri, parlama ve istenmeyen yüzey kusurları gibi sorunlara yol açabilir. Bu tür kusurlar yalnızca estetik kayıplara neden olmakla kalmaz, aynı zamanda belirli uygulamalarda camın işlevselliğini de olumsuz etkileyebilir (Shutov ve Sukhanov, 1997). Dolayısıyla temperleme sürecinin her aşamasının dikkatle kontrol edilmesi, düzensiz gerilim dağılımını ve buna bağlı kusurları en aza indirerek camın genel kalitesini ve güvenilirliğini artırır. Sonuç olarak, temperli cam üretimi, mukavemet, güvenlik ve optik özellikler arasında optimum dengeyi sağlamak için yüksek hassasiyetle yürütülen bir üretim sürecine dayanmaktadır. Süregelen araştırmalar ve teknolojik gelişmeler, temperleme yöntemlerini daha da optimize ederek, farklı uygulamalar için yüksek kaliteli ve güvenli cam üretimini mümkün kılmayı hedeflemektedir.

2.1.2. Cam temperleme proses aşamaları

Temperli cam üretim süreci, camın mekanik mukavemetini ve güvenlik özelliklerini artırmak amacıyla tasarlanmış ısıtma ve soğutma aşamalarını içermektedir. Süreç, cam levhaların yumuşama noktasına yakın bir sıcaklığa, genellikle 620-700 °C aralığına, ısıtıldığı aşamayla başlar. Bu aşamada, sonraki soğutma sırasında dengeli bir gerilim dağılımı sağlamak için termal homojenlik büyük önem taşır. Isıtma aşamasını, genellikle hava veya su ile gerçekleştirilen hızlı bir soğutma takip eder. Bu ani soğuma, camın dış yüzeylerinde basınç gerilmeleri oluştururken, iç çekirdekte telafi edici çekme gerilmelerinin gelişmesini sağlar (Türkbaş ve Ataer, 2007). Yüzeyde oluşan basınç gerilmeleri, temperli camın mukavemetini, işlenmemiş camla kıyaslandığında yaklaşık beş kat artırır ve bu gerilim dağılımları, camın güvenlik performansına da katkıda bulunur. Temperli cam kırıldığında,

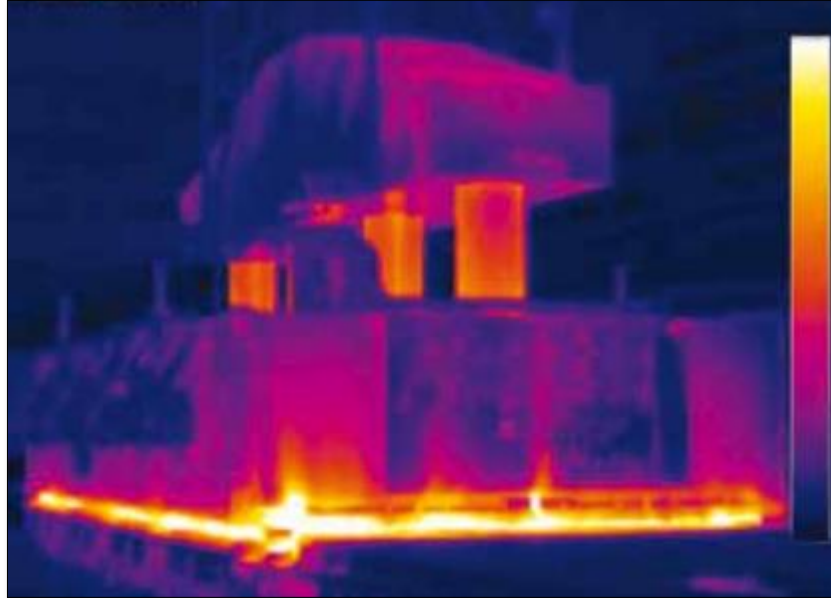
parçacıklar küçük ve kütsüz şekilde ayrılarak yaralanma riskini azaltır. Bununla birlikte, bu artan dayanıklılık ve güvenlik bazı sınırlamalarla birlikte gelir; temperleme işleminden sonra kumlama dışında kesme, delme veya ek yüzey işlemleri uygulanamaz. Temperleme süreci sırasında ortaya çıkabilecek görsel kusurlar, örneğin temperleme izleri, yalnızca belirli aydınlatma koşullarında fark edilebilir ve hassas ısı rejimleriyle minimize edilir; bu izler endüstriyel standartlar dahilinde tolere edilebilir kabul edilir. Ayrıca, eğrilik ve dönme gibi hafif bozulmalar sürecin doğal bir sonucu olarak ortaya çıkar ve belirlenmiş tolerans sınırları içinde gerçekleşir (Türkbaş ve Ataer, 2007). Sürecin diğer bir zorluğu, önemli miktarda yakıt tüketimi ve fırın verimsizliklerinden kaynaklanan yüksek işletme maliyetleridir. Ancak, atık enerji geri kazanımı gibi uygulamalar, fırın verimliliğini artırarak ve genel enerji tüketimini azaltarak bu maliyetleri düşürmeye yardımcı olabilir (US Department of Energy, 2008). Dayanıklı ve güvenli cam üretiminde temel adımlardan biri olan temperleme, cam levhaların kontrollü koşullar altında özel fırınlara beslenmesiyle başlar. Cam levhalar, bir konveyör sistemi aracılığıyla fırına taşınır ve ortam sıcaklığında girerek kademeli bir şekilde yaklaşık 620-700 °C'ye kadar ısıtılır. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, tipik olarak 720 °C civarında tutulan fırın, stratejik olarak yerleştirilmiş brülörler ve homojenizasyon fanları sayesinde homojen bir ısıtma sağlar. Bu fanlar, ısıнын cam yüzeyine eşit dağılımında hayati bir rol oynar ve sonraki hızlı soğutma aşamasında eşit gerilim dağılımının elde edilmesi için temel bir faktör oluşturur.



Şekil 2.1. Cam temperleme fırını (Kaynak: Tütünoğlu vd., 2012)

Cam levhalar istenilen sıcaklığa ulaştığında fırından çıkar ve yüksek hızlı hava kullanılarak hızlı bir şekilde soğutulur. Bu ani soğutma aşaması, cam yüzeyinde basınç gerilmelerine neden olur ve çekirdeğinde telafi edici çekme gerilmeleri oluşur ve bu da temperli camın gelişmiş mukavemet ve güvenlik özellikleriyle sonuçlanır. Fırın sistemi, çalışmasını ve verimliliğini optimize etmek için gelişmiş bileşenlerle donatılmıştır (Tütünoğlu vd.,2012). Isıtma sırasında oluşan sıcak gazlar, dört stratejik noktada bulunan bir baca sistemi aracılığıyla boşaltılır ve bir başlık bacası bu gazları toplar ve dışarı atar. Ek olarak, homojenizasyon fanlarının yatakları su bazlı bir sistem kullanılarak soğutulur. Bu sudan gelen ısı daha sonra harici bir soğutma kulesi aracılığıyla atmosfere boşaltılır ve fırın sisteminin sürekli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar.

Temperli cam üretim süreci, camın bir konveyör aracılığıyla fırına yüklenmesiyle başlayıp fırın çıkışında hızlı soğutmayla tamamlanan hassas bir termal yönetim içerir. Bununla birlikte, termal kamera görüntülemesiyle kanıtlandığı üzere, fırın yüzeyinden önemli miktarda Şekil 2.2'de gösterildiği gibi ısı kaybı gözükmemektedir. Fırının çeşitli yerlerinden çekilen bu görüntüler, 450°C'ye kadar ulaşan yüzey sıcaklıklarını ortaya koymakta ve belirli noktalarda önemli miktarda ısı sızıntısı olduğunu göstermektedir (Tütünoğlu vd.,2012).



Şekil 2.2. Termal kamera ile alınan temperleme fırını ısı kaybı (Kaynak: Tütünoğlu vd.,2012)

En yüksek yüzey sıcaklıklarını sergileyen alanlar, fırından çevredeki atmosferik havaya en yoğun ısı sızıntısının olduğu yerlere karşılık gelir. Bu sızıntılar sadece enerji verimsizliğine yol açmakla kalmaz, aynı zamanda optimum temperleme sonuçları için gereken termal homojenliği de tehlikeye atar. Fırın yüzeyinden ısı kaybı, yakıt tüketiminin artmasını gerektirerek işletme maliyetlerini ve çevresel etkiyi artırır (Tütünoğlu vd.,2012). Isı sızıntılarının giderilmesi, fırın verimliliğini artırmak, enerji harcamalarını azaltmak ve temperli cam üretimi sırasında tutarlı ürün kalitesini korumak için çok önemlidir. Şekil 2.2'de de gözüktüğü üzere ısı kaçağı, temperli cam üretiminde kullanılan fırınların verimliliğini azaltan önemli bir faktördür. Yüzey ve sızıntı kayıpları bu verimsizliklere önemli ölçüde katkıda bulunur ve enerji geri kazanımını artırmak ve fırın performansını optimize etmek için önlemler alınmasını gerektirir. Etkili bir yaklaşım, yanma havasını önceden ısıtmak için baca gazlarından gelen ısıнын kullanılmasını ve böylece enerji kullanımının iyileştirilmesini içerir (US Department of Energy, 2008). Isı eşanjörlerinin sisteme entegre edilmesiyle, baca gazlarından gelen enerji yanma havasını ısıtmak için yeniden yönlendirilebilir ve bu hava daha sonra brülörlü bölümlere verilir. Bu yöntem genel termal verimliliği artırır ancak sisteme karmaşıklık katar ve geri kazanılabilir ısı miktarını sınırlar. Alternatif bir çözüm ise, endüstriyel fırınlarda etkili bir şekilde uygulanan reküperatör brülörlerinin kullanılmasıdır. Bu brülörler, egzoz gazlarından ısıyı geri kazanacak ve yeniden kullanacak mekanizmalar içermekte, enerji israfını azaltmakta ve işletme maliyetlerini düşürmektedir (Charles, 2003). Ayrıca camın fırına girmeden önce ön ısıtmaya tabi tutulması, ilk ısıtma aşamasında gereken termal enerjiyi azaltarak verimliliği daha da artırabilir. Bu stratejilerin uygulanması, enerji tasarrufu ve operasyonel verimlilik gibi ikili zorlukları ele alarak temperli cam üretim sürecinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunurken yüksek ürün kalitesini de korur. Bu sorunu hafifletmek için fırın yüzey sıcaklıklarını ve ısı kaybı mekanizmalarını ele almak çok önemlidir. Etkili bir yaklaşım, özellikle yalıtımın zayıf olduğu alanlarda yalıtımı iyileştirmektir. Tambur yatakları ve açıklıkları olan bölümlerde yalıtımın güçlendirilmesi çok önemlidir, çünkü bu alanlar özellikle ısı kaçışına eğilimlidir. Ayrıca, bu bölümlerden gelen radyasyon, ısı kaybını daha da azaltmak için korumalı kanallara yönlendirilebilir. Tambur yatakları gibi soğutma gerektiren bölümlerde enerji geri kazanım sistemleri uygulanabilir. Soğutma için kullanılan havanın kullanılması ve enerjisinin fırına geri yönlendirilmesiyle termal verimlilik artırılabilir. Bir diğer önemli faktör de fırında kullanılan fazla hava oranıdır. Fazla hava,

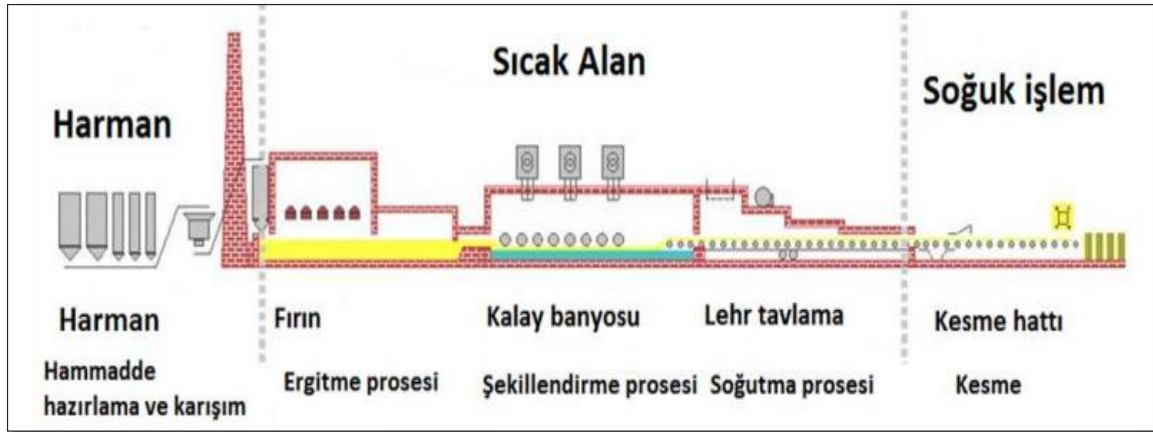
istenen proses sıcaklığını ve yanma verimliliğini korumak için gerekli olsa da bu parametrenin optimize edilmesi enerji israfını daha da azaltabilir (Incopera vd., 2002).

Alternatif fırın tasarımlarını değerlendirmek, enerji verimliliğini artırmak için bir başka yoldur. Örneğin elektrikli temperleme fırınları cam temperleme prosesi için daha verimli bir çözüm sağlayabilir. Ayrıca, fırının nominal ve operasyonel kapasitelerinin optimize edilmesi daha iyi enerji kullanımı elde edilmesine yardımcı olabilir. Doğrudan fırın kullanımı için enerji geri kazanımının ekonomik olarak mümkün olmadığı kanıtlanırsa, diğer pratik uygulamalar atık ısıyı kullanmaya devam edebilir. Örneğin, baca gazı ısı, tesis içinde ısıtma veya mutfak işlemleri gibi yardımcı işlemlere hizmet edebilecek sıcak su üretimi için yeniden kullanılabilir (Çengel ve Boles,1994). Yaz aylarında bu atık ısı, absorpsiyonlu soğutma cihazlarına da güç sağlayarak klima sistemlerinin enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilir. Bu stratejileri uygulayarak, temperli cam üretim tesisleri yüksek operasyonel standartları korurken daha fazla enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik elde edebilir. Bu yöntemler yalnızca işletme maliyetlerini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda daha geniş enerji tasarrufu ve çevresel sorumluluk hedefleriyle de uyumludur.

2.1.3. Cam temperleme sürecinde karbon ayak izi

Temperli cam üretimi, öncelikle üretim sırasında gereken yüksek sıcaklıklar nedeniyle enerji gerektiren bir süreçtir. Temperli cam, silika, soda külü, kireç taşı ve feldspat gibi hammaddelerin eritilmesiyle başlayan bir dizi aşamadan geçerek üretilir. Bu malzemeler belirli oranlarda (tipik olarak %72 silika, %13 soda külü, %12 kireç taşı ve küçük katkı maddeleri) bir araya getirilir ve yaklaşık 1510°C'de bir fırında eritilir.

Hammaddelerin homojen bir şekilde eritilmesi ve homojenleştirilmesi için yüksek termal girdiler gerektiğinden, bu eritme işlemi önemli ölçüde enerji tüketir. Eritildikten sonra cam, şekillendirilmesini ve daha sonraki işlemlerini kolaylaştırmak için kademeli olarak yaklaşık 1100°C'ye soğutulur. Temperleme, camın yaklaşık 620°C'ye kadar yeniden ısıtıldığı ve ardından yüksek basınçlı hava jetleri kullanılarak hızla soğutulduğu ek enerji yoğun prosedürleri içerir. Bu hızlı soğutma cam yüzeyinde bir basınç gerilimi tabakası oluşturarak camın mukavemetini ve termal ve mekanik gerilimlere karşı direncini artırır. Cam yapımındaki yuzdürme işleminin şematik bir tasviri Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Pilkington tarafından bulunan, cam üreticilerinin çoğunluğuna lisanslı olan bu yöntemi oluşturmuştur (SNE Research, 2013).



Şekil 2.3. Yüzdürme işlemi (Kaynak: SNE Research, 2014)

Bu süreçlerde ortaya çıkan çevresel yükün azaltılabilmesi için çeşitli uygulamalar gündeme gelmektedir. Bunlar arasında fırınlarda enerji verimliliğini artıracak izolasyon tekniklerinin kullanılması, atık ısının geri kazanımı, elektrik enerjisinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması ve düşük karbon içerikli hammaddelerin tercih edilmesi yer almaktadır. Ayrıca üretim hattında proses optimizasyonu ve otomasyon sistemleri aracılığıyla enerji kullanımının minimize edilmesi de önemli azaltım stratejileri arasında değerlendirilmektedir. Aşağıda karbon ayak izi oluşturan prosesler ve azaltım uygulamaları özetlenecektir.

2.1.4. Temperli cam üretiminde karbon ayak izi kaynakları ve azaltım uygulamaları

Tablo 2.1. Temperli cam üretiminde karbon ayak izi kaynakları ve azaltım uygulamaları (Kaynak: Worrel ve Reuter, 2012)

Karbon Ayak İzi Kaynağı	Açıklama	Azaltım Yöntemleri
Hammadde eritme ($\approx 1510^{\circ}\text{C}$)	Silika, soda külü, kireç taşı ve feldspatın yüksek sıcaklıkta eritilmesi; yüksek termal enerji tüketimi	Fırın yalıtımının iyileştirilmesi, atık ısı geri kazanımı, elektrik ihtiyacının yenilenebilir kaynaklardan sağlanması
Soğutma ($\approx 1100^{\circ}\text{C}$)	Eritilen camın kontrollü soğutulması; enerji tüketimi devam eder	Proses optimizasyonu, ısı kaybını azaltacak teknolojilerin uygulanması
Temperleme ($\approx 620^{\circ}\text{C}$, hızlı soğutma)	Camın yeniden ısıtılması ve yüksek basınçlı hava jetleriyle soğutulması; elektrik ve yakıt tüketimi	Enerji verimli fan ve kompresör sistemlerinin kullanılması, otomasyon ile enerji kullanımının azaltılması
Genel üretim süreci	Süreç boyunca doğrudan ve dolaylı sera gazı (GHG) emisyonları	Düşük karbon içerikli hammaddelerin kullanımı, yenilikçi enerji yönetim sistemleri, üretim hattında dijital izleme ve kontrol sistemleri

Temperli cam üretiminde, uygunluklarını sağlamak için fiziksel ve kimyasal analizlerden geçirilen hammaddelerin hazırlanmasıyla başlar. Onaylandıktan sonra bu malzemeler harmanlanır ve bir bunker aracılığıyla fırına beslenir. Fırın, istenen kaliteye ulaşmak için büyük bir faktör olan erimiş camın homojenliğini sağlamak için boyun bölgesinde karıştırıcılarla donatılmıştır (Koyuncu vd., 2015). Cam karışımının eritilmesi için gereken enerji bir yakma sistemi tarafından sağlanır. Fırın portlarının her iki yanında bulunan doğal gaz brülörleri, rejeneratörlerden gelen yanma havasıyla karışan yakıtı püskürtür. Bu hava-yakıt karışımı, 1550°C ila 1600°C arasında değişen sıcaklıklar üreten bir alev oluşturarak hammaddelerin tamamen erimesini sağlamaktadır. Etkili yanma ve sıcaklık kontrolü, cam kalitesi ve enerji verimliliği için gerekli olan fırın içinde istenen termal ortamı korumak için büyük öneme sahiptir (Koyuncu vd., 2015). Tablo 2.1'e bakıldığında sonraki temperleme aşamasında cam yaklaşık 620°C'ye kadar yeniden ısıtılmakta ve ardından yüksek basınçlı hava akımları kullanılarak hızla soğutulmaktadır. Bu işlem sırasında camın dış yüzeyi iç kısımlara göre daha hızlı soğuduğundan, dış tabakada basınç gerilmeleri, iç tabakada ise çekme gerilmeleri oluşur. Oluşan bu gerilme dağılımı camın mekanik mukavemetini önemli ölçüde artırmakta, darbelere ve ani sıcaklık değişimlerine karşı direncini geliştirmektedir. Bu nedenle temperli cam, otomotiv camları, mimari yapılar ve güvenlik camı uygulamaları gibi yüksek dayanıklılık gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Worrell & Reuter, 2014). Bununla birlikte, yeniden ısıtma ve hızlı soğutma aşamaları temperli cam üretiminin genel enerji yoğunluğuna katkıda bulunmaktadır. Bu işlemler sırasında enerji tüketimini en aza indirmek için gelişmiş fırın tasarımları, optimize edilmiş brülör teknolojisi ve verimli termal yönetim sistemleri gerekir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ve ısı geri kazanım teknolojilerinin kullanılması gibi sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesi, temperli cam üretiminin karbon ayak izinin azaltılması için önemli etkenlerden biridir (Koyuncu vd., 2015).

Temperli cam üretiminde, özellikle hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda erimiş cama dönüştürüldüğü eritme aşamasında oldukça enerji yoğunudur. Enerji kullanımını optimize etmek için modern fırınlarda, yanma işlemi sırasında ısı enerjisinin önemli bir kısmını geri kazanan ve yeniden kullanan rejeneratör sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistem, fırının bir tarafındaki brülörlerin diğer tarafa geçmeden önce yaklaşık 20 dakika boyunca çalıştığı bir ters çevirme döngüsüyle çalışır (Akkaya ve Uzar, 2012). Bu değişim, sıcak yanma gazları tarafından ısıtılan rejeneratörlerin depoladıkları ısıyı gelen yanma havasına aktarmalarını ve sıcaklığını ortam seviyelerinden yaklaşık 1000°C-1100°C'ye yükseltmelerini sağlar

(Koyuncu vd., 2015). Rejeneratörlerin kullanımı, yanma havasını önceden ısıtarak fırının enerji talebini önemli ölçüde azaltır ve böylece genel termal verimliliği artırır. Eritme işlemi sırasında oluşan atık gazlar rejeneratörlerden geçer ve serbest bırakılmadan önce ya bir bacadan dışarı atılır ya da entegre bir atık ısı geri kazanım sisteminde işlenir. Bu ek geri kazanım sistemi, ikincil süreçler için artık ısıyı kullanarak enerji kullanımını daha da optimize eder ve böylece üretim sürecinin karbon ayak izini azaltmaktadır (Feve, 2014). Fırın boyunca yerleştirilen sıcaklık ve basınç sensörleri, optimum eritme koşullarını korumak için operasyonel parametreleri sürekli olarak izler. Bu ölçümler merkezi bir kontrol sistemine iletilerek hassas ayarlamalar yapılmasını ve cam kalitesi korunurken tutarlı enerji kullanımı sağlanmasını mümkün kılmaktadır. Eritme aşamasının ardından erimiş cam, şekillendirme ve ardından temperleme için banyo alanına aktarılmadan önce fırın boyun bölgesinde dinlendirilir. Bu enerji verimliliği önlemlerine rağmen, temperli cam üretim süreci, yüksek sıcaklık gereksinimleri ve yeniden ısıtma ve hızlı soğutma gibi sonraki aşamalar nedeniyle enerji yoğun olmaya devam etmektedir. Fırın teknolojisi, ısı geri kazanım sistemleri ve yenilenebilir enerji entegrasyonundaki ilerlemeler, bu sürecin enerji tüketimini ve çevresel etkisini daha da azaltmak için gereklidir.

Temperli cam üretiminde bir diğer aşama olan şekillendirme süreci, termal talepler ve hassas çevresel kontrollere duyulan ihtiyaç nedeniyle önemli miktarda enerji girdisi gerektiren önemli bir aşamadır. Yaklaşık 1000°C-1100°C'ye kadar ısıtılan erimiş cam, erimiş cam ve kalay arasındaki özgül ağırlık farkı nedeniyle yüzdüğü bir kalay banyosuna aktarılır. Kalay, 232°C'de eridiği ve 2270°C gibi yüksek bir kaynama noktasına sahip olduğu için bu işlem için uygun bir ortamdır ve cam şekillendirme için stabil ve düzgün bir yüzey sağlar. Kalayın erimiş halini korumak ve banyo atmosferini kontrol etmek önemli ölçüde enerji kullanımını gerektirir. Kalayın oksidasyonunu önlemek için atmosfer hidrojenle karıştırılmış nitrojenle zenginleştirilir ve bu da sürekli izleme ve düzenleme gerektirir. Bu kontrollü ortam, camda yüzey kusurlarına yol açabilecek kalay oksit oluşumunu en aza indirir (Koyuncu vd., 2015). Azot-hidrojen karışımı ve ilgili ekipman, şekillendirme sürecinin enerji tüketimini daha da artırmaktadır.

Cam 60 metre uzunluğundaki banyo boyunca hareket ederken, kısmen katılaşmak için kademeli olarak soğumaya maruz kalır. Cam banyodan çıktığında yaklaşık 600°C sıcaklığa ulaşarak erimiş halden yarı katı hale geçer (Thermal Tempering of Glass, 2013). Bu kontrollü soğutma işlemi enerji yoğunudur ve tutarlı soğutma hızları ve cam kalitesi sağlamak için hassas termal yönetim gerektirir. Cam daha sonra silindirler kullanılarak kalay

banyosundan kaldırılır ve seramik bir silindir yatağı üzerinde tavlama lehrine aktarılır (Thermal Tempering of Glass, 2013). Bazı yüzdürme hatlarında, cam yüzeyinde silindir temasından kaynaklanabilecek mikro çizikleri ve hasarları azaltmak amacıyla üretim atmosferine SO₂ gazı enjekte edilmektedir. SO₂ kullanımı yüzey kalitesini iyileştirse de prosesin kontrolünü zorlaştıran ek operasyonel karmaşıklık, ilave gaz tüketimi ve dolayısıyla daha yüksek enerji gereksinimi ortaya çıkarmaktadır. Bu şekillendirme aşaması, temperli cam üretiminde toplam enerji tüketiminin kayda değer bir bölümünü oluşturmakta ve çevresel etkilerin belirginleşmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, enerji verimliliğini artırmaya yönelik uygulamalar büyük öneme sahiptir. Özellikle fırın operasyonlarının optimize edilmesi, banyo atmosferi koşullarının hassas şekilde kontrol edilmesi, gaz kullanımının en aza indirgenmesi ve soğutma sistemlerinin verimli hale getirilmesi hem üretim maliyetlerinin düşürülmesine hem de karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Chen,2025).

Temperli camın şekillendirme süreci, cam şeridin kalay banyosundan çıktıktan sonra tavlama lehrine girer ve kontrollü soğutma yoluyla mekanik mukavemeti sağlar. Bu aşama, Şekil 2.4'de gösterildiği gibi camın dönen çelik silindirler üzerinden çekildiği ve önceden tanımlanmış bir sıcaklık profiline tabi tutulduğu bir soğutma tüneline girer.



Şekil 2.4. Döner çelik silindir ile camın kontrol edilmesi (Kaynak: Glass for Europe, 2014)

Bu işlem sırasında enerji tüketimi, hassas sıcaklık düzenlemesi elde etmek için tünelin belirlenmiş bölümlerinde çalışan elektrikli ısıtma ve hava soğutma sistemlerinin birlikte kullanılmasından kaynaklanmaktadır (GLS-BREF,2013). Elektrikli ısıtma sistemleri, camın yapısal bütünlüğünü tehlikeye atabilecek gerilim konsantrasyonlarını önlemek için önemli olan düzgün termal dağılımı sağlar. Aynı anda, fanlar hava soğutması sağlayarak istenen termal gradyanı korurken kademeli sıcaklık düşüşünü mümkün kılar. Cam şeridini tünelden taşımak için gerekli olan motorlu çelik silindirler, genel enerji talebini artırır. Bu birbirine bağlı sistemleri optimize etmek, temperli camın kalitesini korurken enerji tüketimini en aza indirmenin anahtarıdır.

Temperli cam üretimindeki son işlem ise, ürün kalitesini sağlamak için hassas termal ve mekanik kontrole ihtiyaç duyulması nedeniyle enerji gerektiren bir süreçtir. Soğutma tünelinin ardından, cam şerit yüzey gerilimini ortadan kaldırmak ve yüzeyleri temizlemek için yumuşak suyla yıkanır. Bu işlem, görünüşte basit olsa da su sirkülasyonu ve ısıtma için enerji gerektirir. Bu aşamada kullanılan su, genel enerji talebine katkıda bulunarak optimum bir sıcaklıkta tutulmalıdır. Yıkama işleminin ardından cam, kurutma aşamasına alınır. Bu aşamada, cam yüzeyine sıcak hava uygulanır; söz konusu sıcak hava, ısı değiştirici (heat exchanger) sistemi tarafından üretilir. Isı değiştirici, bir akışkan (örneğin buhar veya sıcak su) aracılığıyla termal enerjiyi havaya aktararak cam yüzeyine eşit ve kontrollü bir sıcak hava sağlar. Bu yöntem, camın yüzeyinin verimli ve homojen şekilde kurutulmasını mümkün kılar. Ancak, bu sistemin çalışması sürekli enerji girişine bağlıdır ve ısı üretimi ile dağıtımı sürecinde karbon ayak izine önemli bir katkı sağlar. Kurutma aşamasının ardından camın yüzey kalitesini incelemek amacıyla manuel veya otomatik gözlem sistemleri kullanılır. Özellikle otomatik sistemler, görüntüleme, analiz ve kusur işaretleme işlemleri sırasında enerji tüketir ve böylelikle üretim sürecinin toplam çevresel etkisine katkıda bulunur. Kusurlu plakalar daha sonra kırılır ve bertaraf işlemi için mekanik enerji talepleri eklenir. Kalite kontrol testi, numunelerin periyodik olarak özel ekipman kullanılarak analiz edilmesiyle enerji gerektiren bir diğer aşamadır. Cam şerit daha sonra müşteri özelliklerine göre enine ve boyuna kesilir ve elektrik enerjisiyle çalışan hassas kesme makineleri gerekir. Son olarak, paketleme sırasında cam plakalar arasına kâğıt veya toz gibi ayırma malzemeleri uygulanır; bu işlem enerji tüketimi açısından küçük olsa da kümülatif enerji gereksinimlerine eklenir. Yüksek sıcaklıklara ve hassas kontrollü sistemlere dayanan temperli cam üretim süreci oldukça enerji gerektiren bir üretimdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş önemli çevresel ve operasyonel avantajlar sunmaktadır. Güneş, rüzgar veya biyokütle gibi

yenilenebilir enerji, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak sera gazı emisyonlarını düşürebilir ve sektörün karbon ayak izini hafifletebilir. Üreticiler, yenilenebilir enerjiyi eritme, tavlama ve kurutma gibi yoğun güç gerektiren aşamalara entegre ederek, ürün kalitesinden ödün vermeden daha sürdürülebilir operasyonlar gerçekleştirebilirler.

Karbon ayak izini daha da azaltmak için etkili bir yöntem, atık ısı geri kazanım sistemlerinin uygulanmasıdır. Bu sistemler, fırın ve soğutma tüneli gibi yüksek sıcaklık proseslerinden kalan ısıyı yakalar ve yanma havasının ön ısıtılması veya kurutma prosesleri için buhar üretilmesi gibi ikincil uygulamalar için yeniden kullanır. Bu yaklaşım enerji israfını en aza indirerek genel enerji tüketimini ve ilgili emisyonları azaltır. Yenilenebilir enerjinin atık ısı geri kazanımı ile birleştirilmesi bileşik faydalar sağlayabilir. Yenilenebilir enerji karbon emisyonlarını kaynağında dengelerken, atık ısı geri kazanımı üretim sürecindeki enerji verimliliğini artırır. Bu stratejiler yalnızca çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda enerji harcamalarını düşürerek zaman içinde işletme maliyetlerini de azaltır. Sonuç olarak, temperli cam endüstrisinin küresel iklim hedeflerine ve enerji verimliliği standartlarına uyumunu sağlamak için bu tür önlemlerin benimsenmesi şarttır.

2.2. Alüminyum Genel Özellikleri ve Alüminyum Profil

Alüminyum ve alaşımlarının çeşitli endüstrilerdeki artan önemi, çevre mühendisliği perspektiflerinden önemli bir ilgi uyandırmıştır. Alüminyumun hafifliği, yüksek mukavemeti ve korozyon direnci, onu inşaat, ulaşım ve havacılık gibi sektörlerde hayati bir malzeme haline getirir. Ancak, üretiminin, kullanımının ve geri dönüşümünün çevresel etkileri, sürdürülebilir kalkınma için önemli odak alanlarıdır. Alüminyum üretimi, 1821'de Güney Fransa'da M. Pierre Berthier tarafından keşfedilen boksit cevherinin çıkarılmasıyla başlamıştır. Cevher, Bayer işlemiyle rafine edilir ve ardından Hall-Héroult işlemi kullanılarak elektrolitik indirgeme yapılır. Bu aşamalar enerji yoğun olup önemli miktarda elektrik tüketir ve özellikle karbondioksit olmak üzere sera gazları salar. Sonuç olarak, enerji açısından verimli teknolojilerin benimsenmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, çevresel etkileri azaltmak için temel stratejilerdir (Altınışoğlu,1995). Alüminyum alaşımlarının geri dönüştürülmesi, ikincil alüminyum üretiminin birincil üretim için gereken enerjinin yalnızca yaklaşık %5'ini gerektirmesi nedeniyle önemli bir çevresel fayda sağlar. Önemli bir özellik kaybı olmadan alüminyum alaşımlarının yüksek geri dönüştürülebilirliği, enerji tüketimini, kaynak çıkarımını ve atık üretimini azaltarak dairesel ekonomi çerçevesini

destekler. Geri dönüşüm tesislerindeki gelişmiş sıralama ve işleme teknolojileri, alüminyum geri kazanımının verimliliğini ve çevresel performansını daha da artırır.

1886'da Fransa'da Paul T. Héroult ve ABD'de Charles Martin Hall'in eş zamanlı gelişmeleriyle kurulan modern alüminyum endüstrisi, malzeme bilimlerinde ve endüstriyel uygulamalarda devrim yaratılmıştır. Hafiflikleri, korozyona dayanıklılıkları ve geri dönüştürülebilirlikleri nedeniyle alüminyum alaşımları o zamandan beri ulaşım, inşaat ve paketlenme gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Yun vd., 2000). Ancak, üretimlerinin, kullanımlarının ve bertarafalarının çevresel etkileri, çevre mühendisliği perspektifinden dikkatli bir şekilde değerlendirilmeyi gerektirir.

Alüminyumun birincil üretimi iki ana süreci içerir. Bunlardan ilki bayer süreci diğeri ise Hall-Héroult sürecidir. K.J. Bayer tarafından 1887 ile 1892 yılları arasında patenti alınan Bayer süreci, boksit cevherinden alümina (Al_2O_3) çıkarır. Daha sonra, Hall-Héroult süreci, erimiş kriyolitte çözünen alüminayı elektrolitik olarak indirgeyerek alüminyum üretilmiştir. Her iki süreç de enerji yoğun olup sera gazı emisyonlarına önemli ölçüde etkilemektedir. Bir ton birincil alüminyum üretimi, genellikle fosil yakıt kaynaklarından elde edilen yaklaşık 14.000-16.000 kWh elektrik gerektirir ve bu da endüstrinin karbon ayak izini daha da büyötmektedir. Ayrıca, Bayer sürecinin bir yan ürünü olan ve toksik ağır metaller içeren ve bertaraf sorunlarına yol açan kırmızı çamurun üretilmesinden de çevresel zorluklar ortaya çıkar. Çevre mühendisliğindeki çabalar, kırmızı çamuru inşaat malzemelerine dönüştürmeye veya atığı en aza indirmek için değerli elementleri çıkarmaya odaklanmıştır. Kırmızı çamur, yüksek oranda silika, alümina, demir oksit ve kalsiyum içerdiğinden, tuğla, seramik ve beton gibi yapı malzemelerine katkı sağlamak için kullanılabilir; örneğin, kırmızı çamur içeren tuğlalar mekanik dayanıklılık ve ısıya karşı direnç açısından geliştirilmiş özellikler göstermektedir (Raj vd., 2024). Ayrıca, yol altyapısı uygulamalarında, kırmızı çamurun temel dolgu malzemesi olarak kullanılması, yapı performansını artırırken atık miktarını azaltmaktadır (Soğancı vd., 2024). Bunun yanı sıra, kırmızı çamur, alüminyum, demir, titanyum ve nadir toprak elementleri gibi değerli metalleri içerdiğinden, bu elementlerin geri kazanımı için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir; özellikle asidik ve alkali çözücülerle yapılan leaching işlemleri, bu değerli elementlerin seçici olarak çıkarılmasını mümkün kılmaktadır (Pan vd., 2023; Zinoveev vd., 2021). Söz konusu geri kazanım süreçleri, enerji yoğun olabilmekle birlikte, çevre dostu ve sürdürülebilir yöntemlerin geliştirilmesiyle çevresel etkilerin en aza indirilmesi hedeflenmektedir (Li vd., 2025). Bu bağlamda, kırmızı çamurun hem inşaat malzemesi olarak değerlendirilmesi hem de değerli elementlerin geri kazanımı,

evre muhendisliğinde surdrlebilir atık yönetimi ve kaynak verimliliğini sağlama açısından önemli çabalar olarak öne çıkmaktadır (Tan vd., 2024).

Alüminyumun yaygın kullanımı, onu inşaat, ulaşım ve havacılık gibi çeşitli endüstriler için uygun hale getiren fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin benzersiz birleşimine atfedilebilir. Alüminyumun hafif yapısı, özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde ulaşım sektöründe önemli bir rol oynamaktadır. Uçak ve otomotiv üreticileri, alüminyumunu genel araç ağırlığını azaltma, böylece yakıt verimliliğini artırma ve emisyonları azaltma yeteneği nedeniyle değerlendirir. Malzemenin korozyon direnci ve yüksek mukavemet-ağırlık oranı, onu köprüler, boru hatları ve kaplama sistemleri dahil olmak üzere denizcilik ve inşaat uygulamaları için de uygun hale getirir. Alüminyum, yaklaşık 2,7 g/cm³ özgül ağırlığıyla hafif yapısıyla ne çıkmaktadır. Alüminyum alaşımları, hafiflikleri nedeniyle ulaşım sektörü gibi ağırlığın önemli olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Yüksek elektriksel ve termal iletkenlikleri, malzemeyi elektrik ve ısı transferi uygulamalarında vazgeçilmez kılmaktadır. Ayrıca, alüminyumun yüzeyinde oluşan koruyucu oksit tabakası, korozyon direncini artırarak zorlu evre koşullarında güvenli kullanımını sağlamaktadır (Okumuş, 2003)

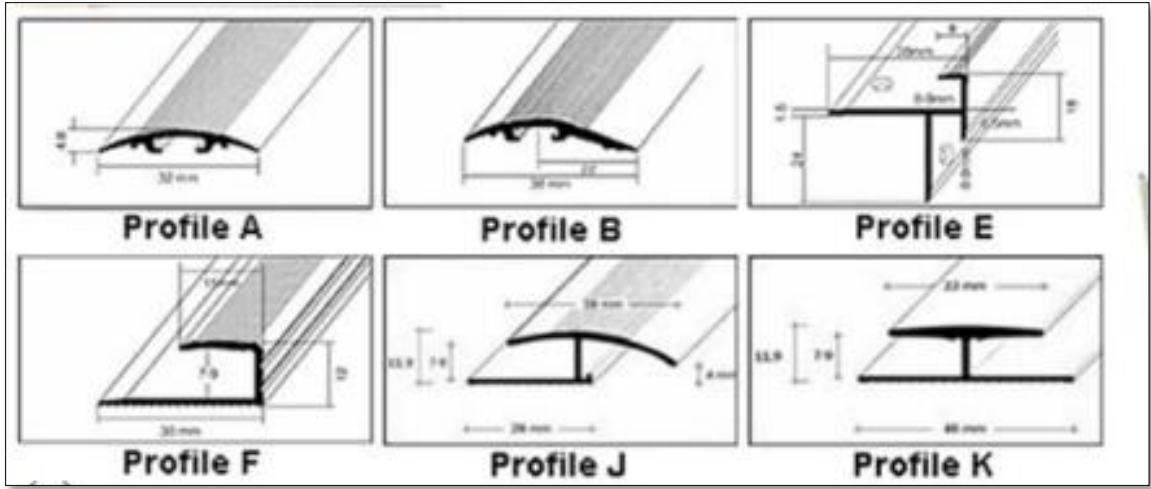
Mekanik zelliklerine bakıldığında ise alüminyum saf haliyle orta sertlik gösterir ve Brinell sertlik sayısı (BHN) 19-20'dir. Ancak alaşımlama ve ısıl işlem yoluyla bu sertlik 120 BHN'ye kadar ulaşabilir ve uygulama aralığını büyük ölçüde genişletebilir. Alüminyumun en önemli mekanik özelliklerinden biri, alaşımlama ve işleme yöntemlerine bağlı olarak değişebilen çekme dayanımıdır. Saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 90 MPa iken, ısıl işlem ve yaşlandırma (aging) uygulanmış alaşımlarda çökelme sertleşmesi etkisiyle bu değer 650 MPa'ya kadar ulaşabilmektedir. Bu artış, söz konusu alaşımları yüksek performanslı mühendislik uygulamaları için uygun hale getirmektedir (Davis, 2001). Alüminyumun elastikiyet modülü, çeliğin yaklaşık üçte biri kadardır ve stres altındaki davranışını önemli ölçüde etkiler. Bu zellik daha fazla esnekliğe izin verirken, deformasyonun endişe verici olabileceği yapısal uygulamalarda dikkatli bir değerlendirme gerektirir. Örneğin, tasarımlarda elik yerine alüminyum kullanıldığında, mühendisler gerilmeye üç kat artış hesaba katmalıdır (Delikanlı, 1992). Manganez (Mn), magnezyum (Mg), silisyum (Si), bakır (Cu), inko (Zn) ve titanyum (Ti) gibi alaşım elementlerinin eklenmesi alüminyumun özelliklerini önemli ölçüde artırır. Bu alaşımlar, istenen mukavemeti, tokluğu ve diğer mekanik özellikleri elde etmek için uyarlanabilir. Isıl işlemler bu özellikleri daha da iyileştirerek alüminyumun çeşitli mühendislik uygulamalarında elik

gibi daha ağır malzemelerle rekabet etmesini sağlar. Tablo 2.2'de alüminyumun diğer metallerle olan kıyaslama özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 2.2. *Alüminyum ve diğer metallerin özelliklerinin karşılaştırılması (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)*

Özellik	Al	Fe	Cu	Zn	Mg
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,7	7,87	Ağu.94	7,1	Oca.74
Isıl İletkenlik (cal/mc °C)	0,52	0,19	0,92	0,27	0,37
Isıl Genleşme (mm/mm °C). 10 ⁻⁶	24	11,9	16,7	33	25,7
Ergime Sıcaklığı (°C)	660	1585	1083	420	651
Uzama (%)	43	48	50		
Sertlik (BHN)	19	70	25		

Alüminyum, diğer metallerle karşılaştırıldığında benzersiz avantajlar sunmaktadır. Korozyon direnci çeliğe kıyasla daha yüksektir ve hafif yapısı, hem çelik hem de bakır ile karşılaştırıldığında önemli bir avantaj sağlar. Elastik modülü çelikten düşük olsa da, alaşımlama ve işleme yöntemleri sayesinde bu durum performans açısından telafi edilebilmektedir. Alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri, gelişmiş alaşımlama ve işleme yetenekleriyle birleştiğinde, onu modern endüstride temel bir malzeme hâline getirmektedir. Alaşım geliştirme ve işleme tekniklerindeki ilerlemeler, alüminyumun uygulanabilirliğini artırarak çeşitli mühendislik disiplinlerinde sürdürülebilir ve çok yönlü bir malzeme seçeneği olmasını sağlamaktadır. Alüminyum profiller ise belirli bir kesit yapısına sahip olup, uzunluklarının genişliklerinden belirgin şekilde daha fazla olduğu malzemelerdir. Farklı kesitlere sahip alüminyum profillerin örnekleri Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



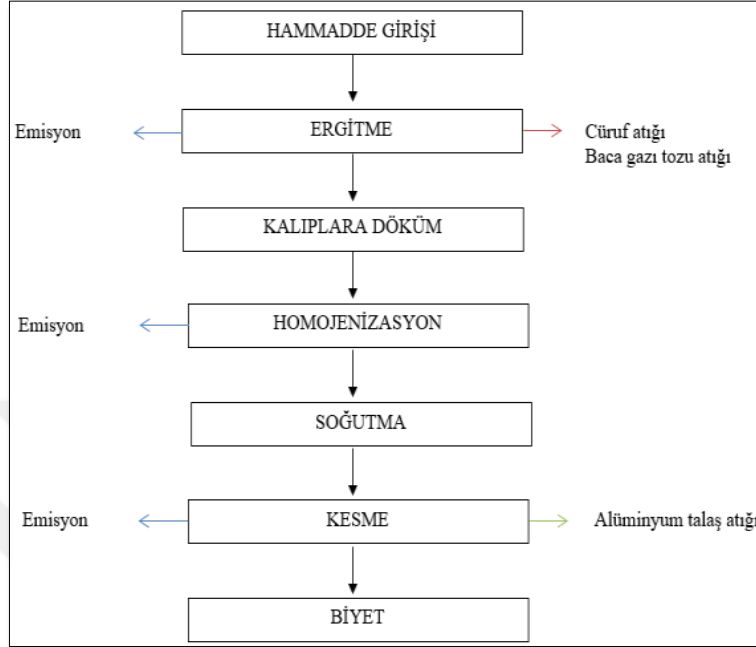
Şekil 2.5. Farklı kesitlerdeki alüminyum profiller (Kaynak: Aluminum Extrusion Technology, 2000)

2.2.1. Alüminyum profil üretim süreci ve prosesleri

Alüminyum profil üretimi, çoğu uygulama için mukavemeti yetersiz olan saf alüminyumun mekanik özelliklerini geliştirmek için silikon, magnezyum ve bakır gibi elementlerle alaşımlandırıldığı önemli bir endüstriyel süreçtir (Demirci, 2003). Alaşımlama işlemi, alüminyuma gelişmiş mukavemet, dayanıklılık ve çok yönlülük sağlayarak onu inşaat, otomotiv ve havacılık endüstrilerindeki çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir (Ardell, 1985).

Alüminyum profil üretiminde kullanılan temel bir yöntem, alüminyum kütüklerin kesit alanını azaltan bir metal şekillendirme işlemi olan ekstrüzyondur. Bu süreçte, biyet olarak da bilinen silindirik döküm külçeler, sünekliği artırmak için önceden ısıtılır ve ardından varil adı verilen bir kaba yerleştirilir. Alüminyum biyet üretimi, alüminyum hurda ve külçelerin bir eritme fırınında eritilmesiyle oluşan önemli bir ara ürün olan alüminyum kütüklerin hazırlanmasıyla başlar. Eritme işlemi sırasında yüksek sıcaklıklar alüminyum metalinin yüzeyinin bozulmasına ve cüruf atığının oluşmasına neden olabilir. Sürecin bir yan ürünü olan bu cüruf, erimiş alüminyumun kalitesini sağlamak için ayrıştırılır (Aşır, 2024). Eritme işlemi tamamlandıktan sonra, erimiş alüminyum döküm kalıplarına dökülerek kütükler oluşturulur. Bu kütükler daha sonra yapılarını katılaştırmak için su ile soğutulur. Katılaştıran kütükler daha sonra, iç gerilimleri azaltmak ve malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek için bir tavlama fırınında gerçekleştirilen bir ısıl işlem olan tavlamaya tabi tutulur (Aşır,2024). Tavlama işleminden sonra kütükler, herhangi bir yapısal kusuru önlemek için kademeli olarak soğumaya bırakılır. Son aşamada kütükler gerekli boyutlarda

kesilerek biyet üretim süreci tamamlanır. Şekil 2.6'da alüminyum biyet üretim prosesi şematize edilmektedir (Aşır, 2024).



Şekil 2.6. Alüminyum biyet üretiminin üretim süreci aşamaları (Kaynak: Aşır, 2024)

Biyet üretiminden sonra süreç döküm ve tavlama yoluyla hazırlanan ve yüksek basınç kuvvetlerine maruz bırakılan alüminyum kütüklerle başlar. Bu basınç, kütüğü özel olarak tasarlanmış bir kalıp veya kalıptan geçirerek prestan çıkarken alüminyuma istenen profil şeklini verir Şekil 2.7’de ekstrüzyon presi gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Ekstrüzyon presi görseli (Kaynak: Url-1)

Ekstrüzyon işlemi (plastik şekillendirme), üretilen profillerde hassas boyutlar ve homojenlik elde etmenin ayrılmaz bir parçasıdır. Ekstrüzyonun başarısı, külçe bölümü ile profilin kesit alanı arasındaki uyumluluğa bağlıdır. Bu bölümler arasındaki daha küçük tutarsızlıklar, süreci kolaylaştırır, malzeme ve enerji tüketimini azaltır. Bu ilke, alüminyum profil üretiminde kalıp tasarımı ve pres seçimi gibi teknik parametrelerin optimize edilmesinin önemini vurgular (Extrusion of Aluminum Alloys, 1999). Kuvveti ve namlu çapı ile tanımlanan pres seçimi, verimlilik için büyük öneme sahiptir. Küçük ve ince kesitli profiller için, küçük boyutlu külçeler ve uygun şekilde ölçeklendirilmiş presler gereklidir. Bu araçlar enerji kaybını en aza indirir ve kaynakların optimum şekilde kullanılmasını sağlar. Tersine, büyük kesitli profillerin üretimi daha büyük kalıplar, külçeler ve presler gerektirir. Büyük presler ve külçeler kullanarak küçük profiller üretmeye çalışmak, artan zaman ve enerji tüketimi dahil olmak üzere verimsizliklere neden olur ve üretkenliği düşürür. Ayrıca, küçük kütüklere sahip küçük presler, fiziksel ve teknik sınırlamaları nedeniyle genellikle büyük profillerin üretimi için uygun değildir. Bununla birlikte ekstrüzyon sırasında alüminyum kütükler 420°C ila 470°C arasında değişen sıcaklıklara ısıtılırken, kalıplar tutarlılığı korumak için yaklaşık 450°C'ye ısıtılır. Alüminyum profil prestan çıkarken sıcaklığı 500°C'yi aşar ve yapısını stabilize etmek için hızlı soğutma gerekir (Bourget vd., 2009). Bunu takiben soğuk germe uygulanır ve profiller gerekli uzunluklarda kesilmektedir (Karamış ve Halıcı, 2007). Bu adımlar profillerin istenen şekil ve boyutlara ulaşması için büyük bir öneme sahiptir. Isıl işlemler gibi ekstrüzyon sonrası işlemler, profillerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin uyarlanması için çok önemlidir. Belirli sipariş gereksinimlerine göre gerçekleştirilen ısıl işlemler, nihai ürünün mukavemetini, sünekliğini ve korozyon direncini artırır. Ekstrüzyon sırasında meydana gelen plastik deformasyon, malzemenin deformasyon direnci, kütük kama sıcaklığı ve uzunluğu, ekstrüzyon hızı, ekstrüzyon oranı ve takım sıcaklıkları gibi faktörlerden etkilenen önemli bir sıcaklık artışı oluşturur. Bu parametrelerin doğru yönetimi, enerji kullanımını optimize ederken ve atıkları azaltırken tutarlı ürün kalitesi sağlar (Tekkaya vd., 2009).

Termal, mekanik ve kimyasal işlemler dahil olmak üzere ekstrüzyon öncesi ve sonrası işlemler, profilleri daha da rafine ederek endüstriyel standartları ve spesifikasyonları karşılamalarını sağlar (Aydın vd., 2009). Bu ayarlamalar alüminyum profilleri, hassas mekanik özelliklerin gerekli olduğu inşaat, otomotiv ve havacılık endüstrileri de dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir. Termal ve mekanik faktörlerin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesiyle birlikte ekstrüzyon süreci, yüksek kaliteli alüminyum profiller

üretmek için gereken ileri mühendisliği örneklemektedir. Bu alanlardaki sürekli araştırmalar ve teknolojik gelişmeler, alüminyum profil üretiminde verimliliğin ve sürdürülebilirliğin artırılmasına katkıda bulunmaktadır.

2.2.2. Alüminyum profil üretiminde karbon ayak izi

Alüminyum profil üretimi, çevresel kaynakları önemli ölçüde etkileyen ve kirliliğe neden olan bir süreçtir. Boksitin çıkarılmasından nihai ürüne kadar, alüminyum üretiminin çeşitli aşamaları çevreye zararlı kalıntılar bırakılmaktadır. Temel kirleticiler arasında florür bileşikleri, sülfür dioksit, hidrojen sülfür ve polisiklik aromatik hidrokarbonlar bulunur ve bunlar öncelikle hava kalitesini etkiler. Alüminyumun karbon ayak izinin izlenmesi, üretim yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin anlaşılması açısından büyük bir önem taşımaktadır (Li vd., 2016). Çin'de yapılan bir araştırma, alüminyum üretiminin farklı aşamalarındaki değişen kirlilik katkılarını vurgulamaktadır. Boksit madenciliği toplam kirliliğin %1,4'ünü, alümina üretimi %8'ini ve elektrolitik alüminyum ise %90,6'sını oluşturmaktadır. Çevresel etkideki bu üstel artış, rafine etme ve eritme süreçleriyle ilişkili enerji yoğunluğu ve emisyonların altını çizmektedir (Zhang vd., 2016).

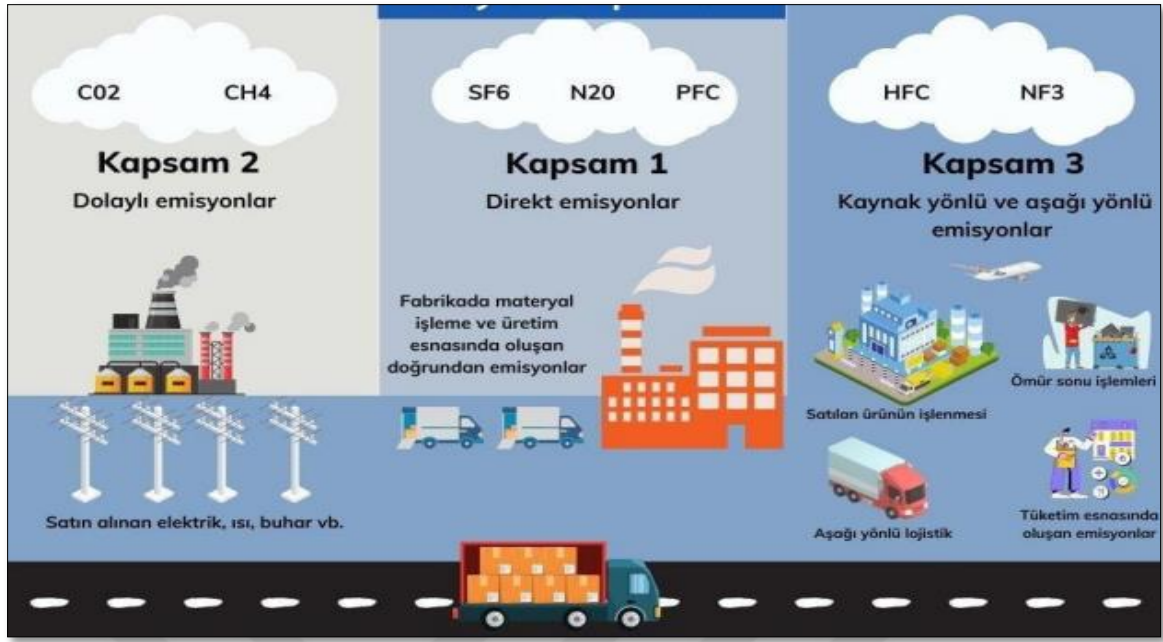
Alüminyum profil üretiminin karbon ayak izi, kütükleri ve kalıpları ısıtmak için yüksek enerji girdilerinin gerekli olduğu ekstrüzyon sırasında daha da artmaktadır. Isıl işlemler gibi ekstrüzyon sonrası süreçler de genel emisyonlara katkıda bulunur. Bu aşamalar, çevresel etkilerini azaltmak için verimli enerji yönetimi ve sürdürülebilir uygulamaların hayata geçirilmesini gerektirir. Kullanım ömrünü tamamlamış alüminyum ürünlerin geri dönüştürülmesi, fosil yakıt kullanımının ve küresel ısınmanın yaklaşık %94 oranında azaltılmasına yardımcı olabilir (Zhang vd., 2016). Ulaşım, katı atık bertarafı, doğal gaz ve elektrik, birincil ve ikincil alüminyum üretim süreçlerindeki başlıca tüketim kalemleridir. Alüminyum üretimi için kömürden alternatif enerji kaynaklarına geçişin üretimle ilgili çok sayıda masrafı ve olumsuz etkiyi ortadan kaldıracağı, üretimin çevresel etkisini azaltacağı ve atıkların yeniden kullanım olasılığını artıracığı iddia edilmektedir (Çakanyıldırım ve Gürü,2021). Alüminyum üretim süreçlerinin çevresel etkilerini ölçmek için kapsamlı bir değerlendirme yapılması gerekmektedir. Karbon ayak izini azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarını benimsemek, üretim yöntemlerini optimize etmek ve geri dönüştürülmüş alüminyum kullanmak hayati stratejilerdir. Geliştirilmiş atık yönetimi ve emisyon kontrol teknolojileri de büyük bir rol oynayabilir. Endüstrilerde alüminyum profillere olan talep

arttıkça, endüstriyel gereklilikler ile çevresel yönetim arasında denge kurmak için sürdürülebilir uygulamalar zorunlu hale gelmektedir.

2.3. Karbon Ayak İzi ve Sera Gaz Emisyonları

Karbondioksit eşdeğeri (CO₂e) cinsinden ifade edilen toplam sera gazı (SGE) emisyonları olarak tanımlanan karbon ayak izi, bir işletmenin veya sürecin çevresel etkisinin kapsamlı bir ölçüsünü sağlar (Ayan, 2019). Endüstriyel tesisler için, birim üretim başına sera gazı emisyonlarının hesaplanması, operasyonel verimliliğin değerlendirilmesi, sürdürülebilirliğin iyileştirilmesi ve çevresel uyumluluk gerekliliklerinin karşılanması için çok önemlidir. Birim üretim başına sera gazı emisyonlarının hesaplanması, tesisin faaliyetleriyle ilişkili toplam emisyonların ölçülmesiyle başlar. Bu emisyonlar iki ana bileşene ayrılır. Bunlar; doğrudan ve dolaylı emisyonlardır. Genellikle doğrudan karbon ayak izi olarak adlandırılan doğrudan emisyonlar, üretim süreçleri sırasında fosil yakıtların yanmasından kaynaklanır (Üreden, 2019). Örneğin, makine ve endüstriyel fırınlarda kullanılan doğal gaz veya kömürden kaynaklanan emisyonlar bu kategoriye dahildir. Dolaylı emisyonlar ise ürünlerin tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan karbon ayak izini kapsar. Buna hammadde çıkarma, nakliye, üretim için enerji kullanımı ve ürünün nihai olarak bertaraf edilmesinden kaynaklanan emisyonlar dahildir.

Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından tanımlanan Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) kavramı bu yaklaşımın temelini oluşturmaktadır. Küresel Isınma Potansiyeli, sera gazlarının etkisini, ısı tutma kapasitelerini ve atmosferik ömürlerini, GWP'si 1 olan karbondioksit (CO₂) göre karşılaştırarak ölçer (Balta, 2020). Örneğin metan (CH₄), atmosferde CO₂'den daha kısa bir süre, yaklaşık 10 yıl kalır. Bununla birlikte, ısı tutma kapasitesi önemli ölçüde daha yüksektir ve CO₂'nin 21 katı bir GWP ile sonuçlanır. Metan, azot oksit (N₂O) ve diğer gazların emisyonlarını CO₂e değerlerine dönüştürerek, çevresel etkilerinin kapsamlı bir değerlendirmesi yapılabilir. Doğruluk ve kapsamlılığı sağlamak için, emisyon kaynakları uluslararası standartlar tarafından tanımlanan üç kapsama göre kategorize edilmelidir. Bu kapsamlar Şekil 2.8'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Emisyon kapsamları (Kaynak: Yeşil Büyüme, 2023)

Bu kapsamlar, bir tesis içindeki doğrudan ve dolaylı faaliyetlerle ilişkili emisyonların sistematik olarak tanımlanmasına ve ölçülmesine olanak tanır (Balta, 2020). Kapsam 1, işletmenin sahip olduğu veya kontrol ettiği kaynaklardan kaynaklanan doğrudan emisyonları kapsar. Bunlar, kazan ve fırınlardaki sabit yanma, araçlardan kaynaklanan mobil yanma, soğutucu akışkan sızıntıları ve yangın tüplerinden kaynaklanan kaçak emisyonları içerir. Bu emisyonlar doğrudan tesisin operasyonel faaliyetlerine atfedilebilir ve genellikle işletme tarafından en fazla kontrol edilebilen emisyonlardır (Balta, 2020). Kapsam 2, satın alınan elektrik, buhar veya ısı enerjisi tüketimiyle ilişkili dolaylı emisyonları içerir. Bu emisyonlar tesis dışında gerçekleşir ancak enerji tedarikinin bir sonucudur. Enerji tüketimi genellikle sera gazı emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunduğundan, üretim sürecinin genel karbon ayak izini değerlendirmenin ayrılmaz bir parçasıdır (Balta, 2020). Kapsam 3'te ise, hammadde nakliyesi, atık bertarafı ve ürün dağıtımı gibi tesisin doğrudan kontrolü dışındaki faaliyetlerden kaynaklanan diğer dolaylı emisyonları ifade eder. Bu emisyonların raporlanması genellikle gönüllülük esasına dayanır ancak tüm üretim yaşam döngüsünün çevresel etkisine dair daha kapsamlı bir resim sunar (Balta, 2020). Birim üretim başına sera gazı emisyonlarını hesaplamak için Kapsam 1, 2 ve 3'ten gelen toplam emisyonlar toplanır ve toplam üretim çıktısına bölünür. Bu metrik, tesislerin emisyon yoğunluklarını değerlendirmelerini, iyileştirme alanlarını belirlemelerini ve enerji verimliliği önlemleri

veya yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi hedeflenen azaltma stratejilerini benimsemelerini sağlar.

2.3.1. Sera gazları ve iklim değışikliğı

Sera etkisi, atmosferdeki ısıyı tutarak Dünya'nın iklim sistemini düzenleyen temel bir doğal süreçtir. Ancak, başta endüstriyel faaliyetler olmak üzere insan kaynaklı faaliyetler, karbondioksit (CO₂) ve diğer sera gazlarının (SGE'ler) artan konsantrasyonları nedeniyle sera etkisini önemli ölçüde artırmıştır. Bu gazlar uzun dalga radyasyonunu emerek ve yeniden yayarak ısıнын uzaya kaçmasını engeller ve Dünya sisteminde bir enerji dengesizliğine neden olur (Türkeş, 2000). Endüstriler sera gazı emisyonlarında önemli bir rol oynadığından, üretim birimi başına emisyonların hesaplanması iklim değışikliğinin ele alınması açısından büyük bir önem taşımaktadır. Sera gazı emisyonları, farklı gazların ısı tutma özelliklerini ve atmosferik ömürlerini hesaba katan karbondioksit eşdeğeri (CO₂e) cinsinden ölçülür. Örneğın CO₂, moleküler titreşimleri nedeniyle uzun dalga radyasyonunu emerek enerjiyi ısıya dönüştürür ve atmosferik ısınmaya katkıda bulunur (Ramathan ve Feng, 2009).

Birim üretim başına sera gazı emisyonlarının hesaplanması, tesislerin çevresel performanslarını izlemelerini ve emisyon yoğunluğunu azaltmak için stratejiler uygulamalarını sağlar. Bu metrik, AB Emisyon Ticaret Sistemi gibi çevre düzenlemelerine uyumu destekler ve uluslararası iklim anlaşmalarına uyumu teşvik eder. Ayrıca, çevresel etkiler hakkında şeffaf veriler sağlayarak kurumsal sürdürülebilirlik raporlamasını geliştirir (Karl ve Trenbeth, 2003). Sanayi devriminden bu yana, fosil yakıtların yaygın kullanımı, ormansızlaşma ve arazi kullanımındaki değışiklikler, özellikle karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot oksit (N₂O) olmak üzere sera gazlarının atmosferik konsantrasyonunu önemli ölçüde artırmıştır. Bu gazlar, Dünya atmosferinde daha fazla ısı hapsederek doğal sera etkisini yoğunlaştırmakta ve küresel enerji dengesinin bozulmasına yol açmaktadır. Küresel ısınma olarak bilinen bu olgu, modern çağın en acil çevresel sorunlarından birini temsil etmektedir.

Tüm sera gazları arasında CO₂, önemli ısı tutma kapasitesi, uzun atmosferik ömrü ve emisyon hacmi nedeniyle en belirgin olanıdır. Türkeş (2000) tarafından vurgulandığı gibi, atmosferdeki CO₂'nin kalıcılığı ve birikimi onu iklim değışikliğine birincil katkıda bulunan faktör haline getirir. Artan konsantrasyonu, devam eden iklim bozulmalarının temel bir göstergesi olarak hizmet eden yükselen küresel sıcaklıklarla doğrudan bağlantılıdır. Sera

gazı emisyonlarının iklim değışikliği üzerindeki etkileri sıcaklık artışlarının ötesine uzanır. Yükselen küresel sıcaklıklar, kıyı bölgelerini ve alçak adaları tehdit eden yükselen deniz seviyelerine yol açarak kutuplardaki buzulların ve buzulların erimesine katkıda bulunur. Ayrıca, kasırgalar, sıcak hava dalgaları ve seller gibi aşırı hava olaylarının sıklığında ve yoğunluğunda bir artışla hava modellerinde değışimler belirgindir. Bu fenomenler yalnızca ekosistemler için değil, aynı zamanda insan yerleşimleri, tarım ve su kaynakları için de yıkıcıdır. Ayrıca, kısmen NO₂ ve CO₂ gibi hava kirleticileri tarafından yönlendirilen troposferik ozon konsantrasyonlarındaki artış sera etkisini daha da kötüleştirir (Doğan ve Tüzer, 2011). SGE emisyonları ile atmosfer kimyası arasındaki etkileşim, iklim değışkenliğini artırır, doğal sınırları aşar ve insan kaynaklı iklim değışikliğini güçlendirir.

Sonuç olarak, antropojenik faaliyetler nedeniyle SGE emisyonlarının yoğunlaşması Dünya'nın iklim sistemini önemli ölçüde değışirmiştir. Bu sorunun ele alınması, emisyonları azaltmak, karbon sekestrasyonlarını artırmak ve dünya çapındaki ekosistemler ve toplumlar üzerindeki olumsuz etkileri azaltmak için sürdürülebilir enerji sistemlerine geçiş yapmak için küresel çabalar gerektirir.

2.3.2. Karbon ayak izi hesaplama yöntemleri

Sera gazı (SGE) emisyonları, 21. yüzyılın en acil çevresel sorunlarından biri olarak ortaya çıkan küresel iklim değışikliğinin başlıca etkenleridir. Karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot oksit (N₂O) dahil olmak üzere sera gazları, ısıyı Dünya atmosferinde hapsederek doğal sera etkisini yoğunlaştırır. Bu da küresel enerji dengesinde bozulmalara ve iklim sisteminde önemli değışikliklere yol açmaktadır.

Sera gazlarının iklim değışikliğine olan etkisi, Birleşmiş Milletler İklim Değışikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC) kapsamında 1997 yılında kabul edilen ve 2005 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolü gibi çok sayıda uluslararası anlaşmada vurgulanmıştır (UNFCCC, 1998).

Yasal olarak bağlayıcı olan bu anlaşma, katılımcı ülkeler için sera gazı azaltım hedeflerini zorunlu kılarak iklim değışikliğiyle mücadeleye yönelik küresel çabada büyük bir dönüm noktası olmuştur. Protokol, insan kaynaklı emisyonlara odaklanarak, iklim değışikliğine katkıda bulunan insan kaynaklı faktörlerin ele alınmasının gerekliliğini vurgulamaktadır. Kyoto Protokolü'nü diğer küresel çevre anlaşmalarından ayıran en önemli özelliklerden biridir. Türkiye, 26 Ağustos 2009 tarihinde Kyoto Protokolü'nü onaylamıştır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değışikliği Bakanlığı, 2023).

Sera gazları arasında CO₂, yaygınlığı ve uzun atmosferik ömrü nedeniyle en önemli katkı sağlayıcıdır. Öncelikle fosil yakıtların yanması, ormansızlaşma ve endüstriyel faaliyetler yoluyla salınır. Metan ve azot oksit, daha küçük miktarlarda bulunmalarına rağmen, çok daha yüksek küresel ısınma potansiyellerine sahiptir ve bu da azaltılmalarını eşit derecede önemli kılmaktadır. Bu gazların kümülatif etkisi, artan küresel sıcaklıklar, eriyen buzullar ve yükselen deniz seviyelerinde kendini göstermektedir. Bu değişiklikler biyoçeşitlilik, gıda güvenliği ve insan yerleşimleri için ciddi riskler oluşturmaktadır.

Uluslararası protokollere ek olarak, sera gazı emisyonlarını ölçmek ve yönetmek için çeşitli metodolojiler ve standartlar geliştirilmiştir. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) ulusal envanterler için kılavuzlar sağlarken, ISO 14064, Sera Gazı Protokolü ve PAS 2050 gibi çerçeveler kuruluşların emisyonlarını hesaplamalarını ve raporlamalarını desteklemektedir. Doğru raporlama, kuruluşların yasal gerekliliklere uyum sağlamasına ve iklim üzerindeki etkilerini azaltmak için stratejiler benimsemesine olanak tanır. Sera gazı emisyonlarının ele alınmamasının ekonomik ve ekolojik sonuçları vardır. Emisyonlarını ölçmeyi ve azaltmayı ihmal eden kuruluşlar, uluslararası piyasalarda cezalar veya kısıtlamalarla karşılaşabilir. Ayrıca, sera gazlarının kontrolsüz salınımı iklim değişikliğini şiddetlendirerek daha sık ve şiddetli aşırı hava olaylarına, habitat tahribatına ve sosyoekonomik zorluklara yol açmaktadır.

Sera Gazı Protokolü Kurumsal Muhasebe ve Raporlama Standardı ve Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından sağlanan metodolojiler önemli referanslar olarak hizmet vermektedir. IPCC, sera gazı emisyonlarını hesaplamak için her biri karmaşıklık ve veri hassasiyeti bakımından farklılık gösteren üç kademe belirler. Şekil 2.8’de gösterildiği gibi Kapsam 1, IPCC tarafından sağlanan varsayılan emisyon faktörlerini kullanan en temel yaklaşımdır. Bu faktörler genellikle emisyon kaynaklarına ilişkin belirli veriler sınırlı olduğunda uygulanır. Kapsam 1 basitlik ve uygulama kolaylığı sunarken, genelleştirilmiş varsayımlara ve ortalama değerlere dayanması nedeniyle en az doğruluğu sağlar. Denklem 2.2’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Emisyon SGE} = \text{Yakıt Tüketimi (TJ)} \times \text{Emisyon Faktörü (Kg SGE/TJ)} \quad (2.2)$$

Tablo 2.3. SGE emisyon hesaplama denkleminde kullanılan semboller (**Kaynak:** Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Sembol	Açıklama	Birim
EmisyonSGE_{SGE}SGE	Hesaplanan toplam sera gazı emisyonu	kg CO ₂ eşdeğeri (kg CO ₂ e)
Yakıt Tüketimi	Süreç veya sistemde kullanılan enerji miktarı	Terajoule (TJ)
Emisyon Faktörü	Kullanılan yakıtın birim enerji başına saldığı SGE miktarı	kg GHG / TJ

Kapsam 2 ise aksine, genellikle ülkeye veya bölgeye özgü emisyon faktörlerini içeren daha belirli verileri kullanır. Bu yöntem, yerelleştirilmiş bilgileri dahil ederek hesaplamaların doğruluğunu artırır ve böylece gerçek emisyonları daha iyi temsil eden sonuçlar vermektedir. Ayrıntılı enerji kullanımı ve tüketim verilerine erişimi olan kuruluşlar genellikle karmaşıklık ve hassasiyeti etkili bir şekilde dengelediği için Kapsam 2 tercih edilmektedir. Denklem 2.3'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{EmisyonSGE} = \text{Yakıt Tüketimi (TJ)} \times \text{Emisyon Faktörü (kg SGE/TJ)} \quad (2.3)$$

Kapsam 3'e bakıldığında, doğrudan ölçümler ve yüksek çözünürlüklü veri toplamayı içeren en ayrıntılı ve doğru yöntemdir. Bu kademe, genellikle sürekli izleme sistemlerinden veya yaşam döngüsü değerlendirmelerinden gelen emisyon verilerini içeren kapsamlı kayıtlar ve gelişmiş analitik teknikler gerektirir. Kapsam 3 yaklaşımı, karbon ayak izi hesaplamalarında yüksek doğruluk arayan ve uyumluluk veya stratejik çevre yönetimi için hassas emisyon verileri raporlaması gereken kuruluşlar için idealdir.

2.4. Cam Temperleme ve Alüminyum Profil Üretiminde Karbon Ayak İzi Hesaplaması

2.4.1. Cam temperleme süreci hesaplama

Cam temperleme, özellikle mimari, otomotiv ve elektronik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan bir cam işleme yöntemidir. Cam, kontrollü bir ısı işlem ve ani soğutma ile dayanıklılığı artırılır. Ancak bu süreç enerji yoğun bir işlem olup çevresel etkileri, özellikle karbon ayak izi üzerindeki etkisi, güncel bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışma,

cam temperleme sürecindeki karbon ayak izinin nasıl hesaplanabileceğini ele almakta ve ilgili hesaplama metodolojilerini akademik bir çerçevede içerisinde sunmaktadır. Karbon ayak izi, bir faaliyet veya sürecin doğrudan veya dolaylı olarak sebep olduğu toplam sera gazı (SGE) emisyonunun CO₂ eşdeğeri (CO₂-eq) olarak ifade edilmesidir (Wiedmann & Minx, 2008). Karbon ayak izi, genellikle üretim süreçlerinin çevresel etkilerini değerlendirme, azaltma stratejileri geliştirme ve sürdürülebilirlik hedeflerini destekleme açısından büyük bir gösterge olarak kullanılır. Cam temperleme, genellikle şu temel aşamalardan oluşur:

- 1. Isıtma:** Cam, genellikle 600-650 °C arasında bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu aşama, enerji yoğun şekilde çalışan elektrikli veya doğal gaz ile çalışan fırınları kapsar.
- 2. Hızlı Soğutma:** Isıtılmış cam, basınçlı hava ile hızlı bir şekilde soğutularak yüzey gerilimi oluşturulur ve camın dayanıklılığı artırılır.
- 3. Son Kontrol ve Paketleme:** Temperlenmiş camlar, kalite kontrol testlerinden geçirilir ve sevkiyat için hazırlanır.

Bu aşamalardan her biri, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarına katkıda bulunur.

Karbon ayak izinin hesaplanması, cam temperleme sürecinin her aşamasında enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarını belirlemeyi gerektirir. Bu hesaplama genellikle üç temel aşamada gerçekleştirilir:

1. Veri Toplama:

- Fırınlarda kullanılan enerji kaynağının tipi (elektrik, doğal gaz vb.) ve miktarı.
- Hızlı soğutma için kullanılan hava basıncını oluşturmak için gereken enerji.
- İşletme şartları (sıcaklık, süre vb.).
- Üretim hacmi ve cam tipleri.

- 2. Emisyon Faktörlerinin Kullanılması:** Her bir enerji kaynağı için belirlenmiş emisyon faktörleri (kg CO₂-eq/kWh) kullanılarak toplam emisyon hesaplanır. Bu faktörler, özellikle IPCC'nin rehber dokümanlarında belirtilen standartlara dayandırılabilir (IPCC, 2006).

Sonuçların Analizi: Toplam emisyonlar, üretilen cam miktarına bölünerek birim başına düşen karbon ayak izi hesaplanabilir. Bu analiz, farklı enerji kaynaklarının kullanımı veya üretim yöntemleri arasında karşılaştırmalar yapılmasına olanak tanır.

Cam temperleme sürecindeki karbon ayak izi, sürecin enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarına doğrudan bağlıdır. Bu hesaplamalar, üretim süreçlerinin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik stratejilerin geliştirilmesi için temel oluşturur. Daha verimli teknolojilerin benimsenmesi, yenilenebilir enerji kullanımı ve operasyonel iyileştirmeler gibi yöntemlerle

karbon ayak izini azaltmak mümkün olabilir. Bu çalışma, cam temperleme sürecinde çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamak isteyen üreticilere bir rehber niteliği taşımaktadır.

2.4.2. Alüminyum profil üretim süreci hesaplama

Alüminyum profil üretiminin çevresel etkilerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, ekolojik ayak izinin belirlenmesi ve azaltılması için büyük bir öneme sahiptir. Alüminyum profil üretiminde karbon ayak izinin hesaplanması, üretim sürecinin her aşamasında sera gazı (SGE) emisyonlarının kapsamlı bir değerlendirmesini içerir. Bu değerlendirme yalnızca üretimden kaynaklanan doğrudan emisyonları ölçmekle kalmaz, aynı zamanda enerji kullanımı ve yukarı akış süreçlerinden kaynaklanan dolaylı emisyonları da dikkate alır. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) sistematik ve standart bir yaklaşım sağlamaktadır (Çakanyıldırım ve Gürü, 2021). Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), üretim süreçleri ve sistemleriyle ilişkili çevresel etkileri analiz etmek için etkili bir metodoloji olarak ortaya çıkmıştır. LCA, hammadde çıkarımından nihai ürüne kadar tüm çevresel etkileri değerlendirmek için yapılandırılmış bir çerçeve sağlar (Norgate ve Haque, 2010). LCA süreci dört zorunlu aşamadan oluşmaktadır.

İlk aşama, çalışmanın sınırlarını ve hedeflerini belirleyen değerlendirmenin amacının ve kapsamının tanımlanmasını içerir. Bu temel adım, değerlendirmenin belirli çevresel kaygılara odaklanmasını ve bunlarla ilgili olmasını sağlar. Bu, hammadde çıkarma ve işlemeden (boksit madenciliği ve alümina rafinasyonu) eritme, ekstrüzyon ve son işlemeye kadar alüminyum profillerin üretim döngüsündeki tüm süreçlerin tanımlanmasını içerir. Nakliye ve geri dönüşüm gibi yukarı ve aşağı yönlü faaliyetlerin dahil edilip edilmeyeceğinin belirlenmesi, kapsamlı sınırların oluşturulması için esastır.

Yaşam döngüsü envanteri olarak bilinen ikinci aşama, üretimin tüm aşamalarında kaynak kullanımı, enerji tüketimi, emisyonlar ve atık üretimi ile ilgili verilerin sistematik olarak toplanmasını içerir. Alüminyum profil üretimi için bu aşama boksit çıkarma, alümina rafinasyonu, eritme, ekstrüzyon ve son işlem süreçleri girdilerini kapsamaktadır (Farjana vd.,2019). Kütük eritme ve ekstrüzyon gibi süreçler için yüksek enerji talebi de karbon ayak izini önemli ölçüde etkiler. Gerekli sıcaklıkları korumak için gerekli olan ısı üretimi, emisyonları daha da kötüleştirmektedir.

Envanter verilerinin toplanmasının ardından, üçüncü aşama yaşam döngüsü etki değerlendirmesidir. İşlenmiş alüminyum için sera gazı emisyonlarının, üretilen malzemenin kilogramı başına 17,5 kg CO₂ eşdeğeri olduğu tahmin edilmektedir; bu, gelişmiş yüksek

mukavemetli çelik gibi alternatiflerden önemli ölçüde daha yüksektir (He vd.,2020). Bu hesaplamalar, genellikle bölgenin enerji karışımına bağlı olan elektrik üretiminden kaynaklanan emisyonları dikkate almaktadır. Bu aşama, sera gazı emisyonları, enerji yoğunluğu ve hava veya su kirliliği dahil olmak üzere envanter verileriyle ilişkili çevresel etkilerini ölçmektedir. Küresel ısınma potansiyeli (GWP), asitleşme potansiyeli ve kaynak tükenme göstergeleri gibi ölçütler kullanılmaktadır (Norgate ve Haque, 2010).

Dördüncü aşama ise, etki analizinin sonuçları karar verme sürecini bilgilendirmek için yorumlanır. Bu adım, emisyonların azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve atıkların en aza indirilmesi için koşullarının belirlenmesini içerir. Örneğin, yenilenebilir enerji kaynaklarının uygulanması ve alüminyumun geri dönüştürülmesi, alüminyum profil üretiminin çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltmaktadır.

2.4.3. Tesisteki sera gaz emisyonlarının değerlendirilmesi

Sera gazı (SGE) emisyon hesaplamaları, çevresel etkilerinin değerlendirilmesinde ve azaltılmasında önemli bir rol oynar. Doğruluk ve uluslararası standartlara uyum sağlamak için yapılandırılmış bir metodoloji benimsenmelidir. Bu süreç, yönetim sisteminin veri gereksinimlerinin belirlenmesi ve uygun hesaplama metodolojilerinin seçilmesiyle başlar. SGE emisyonlarının hesaplanmasındaki ilk adım, emisyonlara katkıda bulunan kaynak türlerinin belirlenmesidir. Endüstriyel üretim süreçlerinde birincil odak noktası olan doğrudan emisyonlar, genellikle iki ayrı türe ayrılır. Bunlardan biri sabit yanma ve kaçak emisyonlardır. Sabit yanma, döküm fırınları gibi sabit tesislerde yakıtların yanmasından kaynaklanan emisyonları ifade ederken, kaçak emisyonlar, klima sistemlerinden veya makine ekipmanlarından kaynaklanan proses sızıntılar olabilmektedir. Kaynak türleri sınıflandırıldıktan sonra, değerlendirme kapsamındaki belirli ekipman ve süreçleri tanımlamak önemlidir. Alüminyum profil üretiminde, buna genellikle klimalar, döküm fırınları ve makine ekipmanları dahildir. Bu bileşenlerin belirlenmesi, üretim sistemindeki tüm potansiyel emisyon kaynaklarının kapsamlı bir analizini sağlar. SGE emisyonlarının hesaplanması genellikle aşağıdaki gibi genel bir denklem (Denklem 2.4) kullanılarak hesaplanmaktadır (Aşır,2024).

$$\text{Emisyonlar} = \text{Faaliyet Verisi (FV)} \times \text{Emisyon Faktörü (EF)} \quad (2.4)$$

Doğal gazdan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının miktarının belirlenebilmesi için önce doğal gaz faaliyet verilerinin hesaplanması gerekir. Denklem 2.5, o yıl tüketilen doğal gaz miktarına ve doğal gaz tedarikçisinden alınan yoğunluk faktörüne dayanan Doğal Gaz Faaliyet Verilerini (FV) elde etmek için kullanılır.

$$FV(\text{doğalgaz}) = \text{Yıllık tüketilen doğalgaz hacmi (sm}^3\text{)} \times \text{Yoğunluk faktörü} \left(\frac{\text{kg}}{\text{sm}^3} \right) \quad (2.5)$$

CO₂ emisyonlarını belirlemek için, Denklem 2.5'de hesaplanan faaliyet verileri, enerji birimini ortadan kaldırmak için Denklem 2.6'da gösterildiği gibi tesisin doğal gaz emisyon faktörünün doğal gazın net kalorifik değeriyle çarpılmasıyla elde edilir.

$$CO_2 = FV(\text{doğalgaz}) \times CO_2 \text{ Emisyon faktörü} \times \text{Doğalgaz net kalorifik değeri} \quad (2.6)$$

CO₂'nin küresel ısınma potansiyeli, doğal gaz CO₂'nin ton CO₂e cinsinden sera gazı emisyonunu belirlemek için kullanılır. "1" ile çarpıldığında küresel ısınma potansiyelinin karşılık gelen değeri elde edilir. Doğalgazın CH₄'ün sera gazı emisyonlarını belirlemek için Denklem 2.7'deki gibi CH₄ emisyon faktörü ve net kalorifik değeri kullanılarak hesaplama yapılmaktadır.

$$CO_2 = FV(\text{doğalgaz}) \times CH_4 \text{ Emisyon faktörü} \times \text{Doğalgaz net kalorifik değeri} \quad (2.7)$$

Aynı metodoloji kullanılarak, genel tabloda yer alan CH₄ gazının küresel ısınma potansiyeli (27.9 değeri) kullanılarak doğal gaz CH₄ gazının ton CO₂e cinsinden sera gazı emisyonları belirlenmektedir. Aynı yöntem ile Denklem 2.8'deki gibi N₂O'ya ait sera gaz emisyonları hesaplanmaktadır. Bulunan değer ile N₂O'ya ait emisyon faktörü ile çarpılarak ton CO₂e cinsinden sera gazı emisyonunu belirlenir.

$$CO_2 = FV(\text{doğalgaz}) \times N_2O \text{ Emisyon faktörü} \times \text{Doğalgaz net kalorifik değeri} \quad (2.8)$$

Doğal gaz tüketiminden kaynaklanan toplam sera gazı emisyonlarını hesaplamak için yukarıda gösterildiği gibi CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonları ayrı ayrı hesaplanır ve toplanır. Her sera gazı, kendine özgü küresel ısınma potansiyeli (GWP) nedeniyle genel emisyonlara farklı şekilde katkıda bulunur. Hesaplama metodolojisi, tüketilen doğal gazın hacmi veya

enerji içeriği gibi aktivite verilerinin önceliklendirilmesini ve her gaz için belirli emisyon faktörlerinin uygulanmasını içerir. CO₂ emisyonları için, doğal gazın karbon içeriği birincil faktördür. Doğal gazın tam yanması, doğal gazın ana bileşeni olan metanın (CH₄) kimyasal bileşimine bağlı olarak öngörülebilir miktarda CO₂ açığa çıkarır. CH₄ ve N₂O emisyonları, daha küçük miktarlarda salınmalarına rağmen, önemli ölçüde daha yüksek GWP'lere sahiptir ve bu nedenle ihmal edilemez. CH₄ emisyonları eksik yanma nedeniyle meydana gelebilirken, N₂O emisyonları havadaki nitrojeni içeren yüksek sıcaklık reaksiyonlarından kaynaklanır.

Elektrik tüketiminden kaynaklı sera gaz emisyonlarının hesaplanması için Denklem 2.9 kullanılmaktadır.

$$EtCO_2 = \text{Elektrik tüketimi(kWh)} \times EF \times KIP \quad (2.9)$$

Denklem 2.9'da emisyon faktörünü (EF), küresel ısınma potansiyelini (KIP) ile temsil etmektedir. Doğalgaz tüketiminden kaynaklı sera gaz emisyon hesabında olduğu gibi aynı yöntem ile CO₂, CH₄ ve N₂O hesaplanır. Hesaplandıktan sonra bu gazların toplamı elektrik tüketiminden kaynaklı sera gaz emisyon hesabını vermektedir.

Ulaşımdan kaynaklı sera gaz emisyon hesabında Denklem 2.10'daki formülle hesaplanmaktadır.

$$EtCO_2 = \text{Yakıt tüketimi (L)} \times \text{Yoğunluk} \left(\frac{\text{kg}}{\text{L}} \right) \times \text{Dönüşüm faktörü} \times EF \times KIP \times OKY \quad (2.10)$$

Denklem 2.10'da OKY karbonun yanma sırasındaki oksitlenme yüzdeliğini temsil etmektedir. Tesisin kamyon ve kamyonetleri yakıt kullanmaktadır ve miktar bu araçların kullandığı dizel yakıt türüne göre hesaplanmaktadır. Kullanılan dizel miktarının ve yoğunluğunun tespit edilmesi gerekmektedir. Doğalgaz ve elektrik tüketiminden kaynaklı sera gaz emisyon hesaplamalarında olduğu gibi CO₂, CH₄ ve N₂O hesaplanır ve bunların toplamı ulaşımından kaynaklı sera gaz emisyonunu göstermektedir.

Bir tesisten kaynaklanan sera gazı (SGE) emisyonlarının değerlendirilmesi, çevresel etkisini anlamak ve etkili azaltma stratejileri geliştirmek için önemlidir. Bu değerlendirmede ele alınan birincil sera gazları CO₂, CH₄ ve N₂O'dur. Bu gazlar, üç önemli kaynaktan gelen emisyonlarına göre analiz edilir. Bunlar elektrik tüketimi, doğal gaz kullanımı ve ulaşım faaliyetlerinden kaynaklı olmaktadır. CO₂ emisyonları, elektrik üretimi ve doğal gaz tüketimi

için fosil yakıtların yakılması nedeniyle SGE emisyonlarının en büyük payını oluşturur. Bu işlem, yakıtın karbon içeriğine ve yanma verimliliğine orantılı olarak CO₂ salar. CH₄ emisyonları, miktar olarak daha küçük olsa da CO₂'ye kıyasla önemli ölçüde daha yüksek bir küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahiptir. CH₄ emisyonları genellikle eksik yanma süreçlerinden ve doğal gaz sistemlerindeki sızıntılardan kaynaklanır. Benzer şekilde, yüksek bir GWP'ye sahip olan N₂O emisyonları, endüstriyel ve ulaşım faaliyetlerinde yüksek sıcaklıkta yanma ile ilişkilidir. Tesisten kaynaklanan toplam sera gazı emisyonları, enerji tüketimi ve yakıt kullanımı gibi faaliyet verilerinin sayısallaştırılması ve her bir gaz ve kaynağa özgü uygun emisyon faktörlerinin uygulanmasıyla hesaplanır. Ardından CO₂, CH₄ ve N₂O'nun toplam emisyonlara yüzde katkıları belirlenir. Bu döküm, her bir gazın göreceli etkisinin ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlar. Tesisler bu emisyonları analiz ederek başlıca emisyon kaynaklarını belirleyebilir, iyileştirme alanlarına öncelik verebilir ve çevresel ayak izlerini azaltmak için hedeflenen stratejileri uygulayarak daha sürdürülebilir operasyonlara geçişi teşvik edebilir.

Sera gazı (SGE) emisyonlarının hesaplanması, iklim değişikliği azaltma çabalarının büyük bir bileşenidir. Emisyonların doğru bir şekilde izlenmesini, raporlanmasını ve doğrulanmasını sağlamak için küresel olarak çeşitli metodolojiler ve standartlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar, kuruluşların ve hükümetlerin çevresel etkilerini değerlendirmeleri ve uluslararası iklim hedefleriyle uyumlu hale gelmeleri için yapılandırılmış bir çerçeve sağlamaktadır.

Gönüllü hesaplama yöntemleri arasında, Doğrulanmış Karbon Standardı (VCS) ve Altın Standart gibi programlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çerçeveler, kuruluşların emisyonlarını ölçmelerini, doğrulamalarını ve telafi etmelerini sağlayarak karbon yönetimi uygulamalarında şeffaflığı ve hesap verebilirliği teşvik eder. Gönüllü olsa da bu programlar özellikle sürdürülebilirliğe olan bağlılıklarını göstermeye çalışan sektörlerde proaktif SGE yönetimini teşvik etmede etkilidir. Gönüllü mekanizmaların aksine, düzenleyici direktifler politika hedeflerini desteklemek için sera gazı emisyonlarının izlenmesini zorunlu kılar. Örneğin, AB Emisyon Ticareti Sistemi (AB ETS) kapsamında uygulanan Avrupa Birliği'nin 2003/87/EC direktifi, tesislerin karbon ticaretini kolaylaştırmak ve azaltma hedeflerine uyumu sağlamak için emisyonları sistematik olarak izlemesini ve raporlamasını gerektirir (Karakoç, 2022). Benzer şekilde, Türkiye'de 2014 yılında yayınlanan Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesine Dair Yönetmelik, tesislerin emisyonlarını ve ilgili faaliyet verilerini yıllık olarak izlemesini ve raporlamasını zorunlu kılar (Sera Gazı Emisyonlarının

İzlenmesine Dair Yönetmelik, 2014). Bu düzenleyici çerçeveler, ulusal ve uluslararası iklim hedeflerine ulaşmada standartlaştırılmış emisyon takibinin önemini vurgulamaktadır.

Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) de sera gazı hesaplamalarını desteklemek için yaygın olarak tanınan standartlar geliştirmiştir. ISO 14064 standardı, sera gazı emisyonlarını ve azaltımlarını izlemek, raporlamak ve doğrulamak için yönergeler sağlar. Üç bileşenden oluşur: ilki, kuruluş düzeyinde emisyon miktarlamasına odaklanır; ikinci bölüm proje düzeyindeki emisyonları ve giderimleri ele alır; üçüncüsü ise GHG envanterlerinin doğrulanması ve onaylanması için gereklilikleri belirtir (Dindar, 2021). Bu standartlar, emisyon muhasebesine uyumlu bir yaklaşım sunarak kuruluşlar arasında tutarlılığı ve karşılaştırılabilirliği artırır. Sonuç olarak, SGE emisyonlarının doğru hesaplanması etkili iklim eylemi için elzemdir. İster gönüllü programlar ister düzenleyici uyumluluk veya uluslararası standartlara uyum yoluyla olsun, sağlam metodolojiler paydaşların emisyonlarını değerlendirmelerini, yönetmelerini ve azaltmalarını sağlar. Bu çabalar iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması için temeldir.

2.4.4. Birim üretim başına sera gaz emisyonları

Hesaplamaların yapıldığı tesisteki yıllık üretim hacminin tonu belirlendikten sonra alınan tesis verilerine göre, tCO₂eq/yıl cinsinden ifade edilmesi gereken toplam sera gazı emisyonlarını hesaplamak için kullanılmalıdır. Tesisin birim üretim başına yıllık sera gazı emisyon değerini Denklem 2.11 kullanılarak bulunmaktadır.

$$\text{Birim üretim başına sera gaz emisyonu} = \frac{(\text{tCO}_2\text{eq/yıl})}{\text{ton üretimi(ton/yıl)}} \quad (2.11)$$

Birim üretim başına sera gazı (SGE) emisyonlarının hesaplanması, bir tesisin faaliyetlerinin çevresel verimliliğini değerlendirmek için büyük bir ölçüttür. Bu yöntem, üretim süreçlerinin çevresel performansını değerlendirmek ve karşılaştırmak için standartlaştırılmış bir araç sağlayarak verimsizliklerin ve iyileştirme alanlarının belirlenmesini kolaylaştırır. Süreç, tesis tarafından üretilen toplam sera gazı emisyonlarının belirlenmesiyle başlar. Buna elektrik tüketimi, doğal gaz kullanımı, ulaşım faaliyetleri ve diğer ilgili kaynaklardan kaynaklanan emisyonlar dahildir. Her kaynak, faaliyet verileri ve uygun emisyon faktörleri kullanılarak hesaplanan karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot oksit (N₂O) emisyonlarına katkıda bulunur. Faaliyet verileri tüketilen enerji veya kullanılan yakıt miktarını yansıtırken, emisyon faktörleri ilgili kaynakların karbon içeriği ve yanma

özelliklerinden türetilir. Toplam sera gazı emisyonları hesaplandıktan sonra, bu değer, birim üretim başına emisyonları elde etmek için tesisin üretim çıktısına göre normalleştirilir. Örneğin, alüminyum profil üretiminde, toplam emisyonlar aynı değerlendirme döneminde üretilen alüminyum profillerin toplam ağırlığına veya hacmine bölünür. Bu yaklaşım, emisyon yoğunluğunun, üretim tonu başına kilogram CO₂ eşdeğeri gibi ölçülebilir bir birim olarak ifade edilmesini sağlar. Birim üretim başına emisyonların değerlendirilmesi, tesisin operasyonlarının çevresel etkisine ilişkin önemli bilgileri sunmaktadır. Yönetim, bu değerleri farklı üretim dönemleri veya tesisler arasında karşılaştırarak performansı kıyaslayabilir ve emisyon yoğunluğunu azaltmak için hedefli önlemler uygulayabilir. Bu tür önlemlere örnek olarak enerji verimliliğinin optimize edilmesi, daha temiz üretim teknolojilerinin benimsenmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması verilebilir.

Birim üretim başına sera gazı (SGE) emisyonlarının hesaplanması, endüstriyel tesislerin çevresel verimliliğini değerlendirmek için temel bir araç olarak hizmet eder. Üretim süreçleri ve bunlarla ilişkili emisyonlar arasındaki ilişkiyi anlamak için nicel bir temel sağlayarak işletmelerin karbon ayak izlerini azaltmak ve sürdürülebilirliği iyileştirmek için stratejiler geliştirmelerine olanak tanır. ISO 14064 serisi standartlar (ISO 14064-1, ISO 14064-2 ve ISO 14064-3), sera gazı yönetim sistemlerinin kurulması ve emisyonların hesaplanmasına yönelik metodolojilerin ana hatlarını çizmektedir (Altuğ ve Özkan,2015). Bu standartlar, sera gazı ölçümünde doğruluk ve güvenilirliği sağlamak için sistematik veri toplama, titiz analiz ve istatistiksel yöntemlerin kullanılmasının önemini vurgulamaktadır (Altuğ ve Özkan, 2020). Süreç, tipik olarak yakıt yanmasından kaynaklanan doğrudan emisyonları ve elektrik kullanımından kaynaklanan dolaylı emisyonları içeren emisyon kaynaklarının belirlenmesi ve sayısallaştırılmasıyla başlar. Karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot oksit (N₂O) emisyonları ayrı ayrı hesaplanır ve küresel ısınma potansiyellerine göre CO₂ eşdeğerleri gibi ortak bir birime dönüştürülür. Sera gazı izleme sistemlerinin ISO 9001 (kalite yönetimi), ISO 14001 (çevre yönetimi) ve ISO 50001 (enerji yönetimi) gibi diğer yönetim standartlarıyla entegre edilmesi veri toplama, analiz ve denetimlerde verimliliği artırabilir (Bildik, 2014). Bu entegre yaklaşım sadece operasyonları kolaylaştırmakla kalmaz, aynı zamanda ister gönüllü ister zorunlu olsun, yasal gerekliliklere uyumu da destekler.

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) tarafından ana hatları çizilen iklim değişikliğine karşı küresel tepki, iklim sistemine tehlikeli insan kaynaklı müdahaleyi önlemek için sera gazı (SGE) emisyonlarının azaltılması gerekliliğini

vurgulamaktadır. Bu hedefle uyumlu olarak, üretim birimi başına sera gazı emisyonlarının hesaplanması, sürdürülebilir kalkınma için çabalayan endüstriyel tesisler için çok önemli bir ölçüt haline gelmiştir. Bu metodoloji, sera gazı konsantrasyonlarını ekosistemlerin iklim değişikliğine doğal olarak uyum sağlamasını, gıda güvenliğini sağlamasını ve sürdürülebilir ekonomik kalkınmayı teşvik etmesini sağlayacak seviyelerde tutmayı vurgulayan UNFCCC ilkeleriyle uyumludur. Üretim birimi başına emisyonları hesaplayarak, tesisler çevresel performanslarını izleyebilir, azaltma hedefleri belirleyebilir ve operasyonel iyileştirmeler için fırsatları belirleyebilir. Dahası, emisyon hesaplamalarını daha geniş sürdürülebilirlik girişimlerine entegre etmek, küresel iklim taahhütleriyle uyumu sağlar. Tesisler enerji açısından verimli teknolojileri benimseyebilir, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçebilir ve emisyon yoğunluklarını düşürmek için süreç optimizasyon stratejileri uygulayabilir. Bu eylemler yalnızca UNFCCC gibi uluslararası çerçevelere uyumu desteklemekle kalmamakla, aynı zamanda işletmelerin sürdürülebilir ekonomik büyümeyi korurken iklim değişikliğini azaltmaya yönelik küresel çabalara katkıda bulunmalarını da sağlar.

Sonuç olarak, birim üretim başına sera gazı emisyonlarının hesaplanması, endüstriyel uygulamaların sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu hale getirilmesi için hayati önem taşımaktadır. İşletmeler, uluslararası standartlardan yararlanarak ve yönetim sistemlerini entegre ederek çevresel performanslarını artırabilir ve iklim değişikliğini azaltmaya yönelik küresel çabalara anlamlı bir şekilde katkıda bulunabilirler.

2.5. Sürdürülebilirlik ve Sera Gazı Emisyon Azaltma Yöntemleri

Brundtland Komisyonu (1987) tarafından tanımlandığı şekliyle sürdürülebilirlik, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama kabiliyetini tehlikeye atmadan mevcut ihtiyaçları karşılamayı amaçlayan bir kalkınma paradigmasıdır. Bu çerçevede, sürdürülebilir üretim büyük bir bileşen olarak ortaya çıkmaktadır. Laurent vd. (2010) sürdürülebilir üretimin çevresel zararı en aza indirdiğini, ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu, kaynak tüketimini azalttığını ve işçiler ve toplum için güvenliği sağladığını vurgulamaktadır. Bu yaklaşımın anahtarı üç boyutun entegrasyonudur: sosyal, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik (Hendricks, 2019). Bu boyutlar birbiriyle bağlantılıdır ve sera gazı (GHG) emisyonlarının ele alınmasında önemli etkilere sahiptir. Özellikle sürdürülebilirliğin çevresel boyutu, kaynak kullanımını optimize ederek ve kirliliği en aza indirerek ekosistemler üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılmasını vurgulamaktadır (Keeble, 1988). Bu, iklim değişikliğinin önemli bir itici gücü olan sera gazı emisyonlarının azaltılmasıyla

doğrudan ilgilidir. Enerji tasarruflu teknolojileri benimseyerek, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yaparak ve döngüsel ekonomi ilkelerini uygulayarak endüstriler karbon ayak izlerini önemli ölçüde azaltabilirler. Ayrıca, emisyonların azaltılması bir şirketin itibarını ve güvenilirliğini artırarak uzun vadeli kârlılığı teşvik edebilir (Fisher vd., 2021)

Ekonomik bir perspektiften bakıldığında, sürdürülebilirlik uygulamaları genellikle finansal faydalar sağlamaktadır. Bazı kuruluşlar çevresel önlemleri maliyet yoğun olarak algılasa da kanıtlar sürdürülebilirliğe yapılan yatırımların operasyonel verimliliği artırarak ve israfı azaltarak kârlılığı artırabileceğini göstermektedir (Camilleri, 2017). Örneğin, düşük karbonlu teknolojilerin ve enerji verimli süreçlerin benimsenmesi enerji maliyetlerini azaltırken aynı zamanda düzenleyici standartlara uyulmasını, potansiyel cezalardan kaçınılmasını ve finansal teşviklere erişilmesini sağlar. Sürdürülebilirliğin sosyal boyutu, sera gazı emisyonlarının ele alınmasının önemini daha da pekiştirmektedir. Emisyonları azaltma taahhüdü kurumsal sorumluluğu gösterir, paydaşlar arasında güven ve eşitliği teşvik eder. Ayrıca, genellikle sera gazı yoğun faaliyetlerle ilişkili olan hava kirliliğini azaltarak sağlık sonuçlarının iyileştirilmesine katkıda bulunur.

Sürdürülebilirlik, insan kaynaklı çevresel zorlukların azaltılmasında önemli bir odak noktası haline gelmiştir ve yeşil üretim, sera gazı (SGE) emisyonlarını ele almak için önemli bir strateji olarak ortaya çıkmaktadır. Yeşil üretim, sıfıra yakın atık ve kirliliği vurgulayarak ve verimli uygulamaların yanı sıra düşük etkili girdiler kullanarak çevresel etkileri en aza indirmek için tasarlanmış üretim süreçlerini ifade etmektedir (Abualfaraa vd., 2020). Bu kapsamlı yaklaşım, nihai ürünün ötesine geçerek tedarik zinciri ve lojistik de dahil olmak üzere iş operasyonlarının her aşamasını hedeflemektedir. Bu tür uygulamalar yalnızca endüstrilerin çevresel ayak izini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kaynak kullanımını optimize ederek ve atıkları en aza indirerek kârlılığı da artırır. Yeşil üretimin temel unsurlarından biri, enerji verimli süreçler ve yenilenebilir enerji kaynaklarının benimsenmesi yoluyla sera gazı emisyonlarının azaltılmasıdır. Çevre dostu ürünler tasarlayarak ve enerji tüketimini, atık üretimini ve tehlikeli madde kullanımını en aza indiren yöntemler kullanarak endüstriler karbon ayak izlerini önemli ölçüde azaltabilir (Abualfaraa vd., 2020). Ayrıca, bu yöntemler daha az kaynak kullanımına öncelik vererek iklim değişikliğiyle mücadele için sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumludur. Gelişmiş ülkelerde, üretimin çevresel etkileri konusunda artan farkındalık, üretim sırasında hammadde ve enerji tüketiminin neden olduğu çevresel zararı hesaba katan kapsamlı değerlendirmelerin benimsenmesine yol açmıştır. Bu değişim hem insanlık hem de çevre üzerinde olumlu etki

gösteren ürünlere yönelik artan tüketici talebiyle desteklenmektedir (2017 Yeşil Rapor, 2022). Tüketicilerin sürdürülebilir ilkelerle tasarlanmış ürünleri giderek daha fazla tercih etmesi, endüstrileri yeşil uygulamaları üretim sistemlerine entegre etmeye itmektir.

Yeşil üretime geçiş özellikle metal imalatı gibi sektörlerde öne çıkmıştır. Tangüler vd. (2015), iklim değişikliğini ele alan uluslararası anlaşmalar, artan kamu bilinci ve yükselen hammadde maliyetleri de dahil olmak üzere bu değişimi tetikleyen çeşitli faktörleri tanımlamaktadır. Bu katalizörler, endüstrileri sürdürülebilir sistemleri benimsemeye, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmaya ve üretim ve tedarik zinciri süreçleri boyunca sera gazı emisyonlarını düşürmeye teşvik etmiştir. Yeşil üretim sadece sera gazı emisyonlarının azaltılmasını desteklemekle kalmaz, aynı zamanda çevresel, ekonomik ve sosyal hususları entegre ederek sürdürülebilirliğin daha geniş hedeflerine de katkıda bulunur. Bu bütüncül yaklaşım, endüstrilerin rekabet gücünü korurken ve tüketici beklentilerini karşılarken acil çevresel zorlukları ele almalarını sağlar. Bu nedenle yeşil üretim, iklim değişikliğini azaltmaya ve daha sürdürülebilir bir geleceğe geçişe yönelik küresel çabada hayati bir stratejiyi temsil etmektedir.

Sera gazı (SGE) emisyonları, çevre ve ekonomi üzerindeki etkilerini azaltmak için yenilikçi politika önlemleri gerektiren büyük bir küresel sorun haline gelmiştir. Avrupa Birliği (AB), Avrupa Yeşil Anlaşması'nın hedefleriyle uyumlu, dönüm noktası niteliğinde bir politika olan Sınır Karbon Ayarlama Mekanizması'nı uygulamaya koyarak bu yönde önemli bir adım atmıştır. Temmuz 2021'de kabul edilen bu mekanizma, AB'nin sera gazı emisyonlarını 2030 yılına kadar %55 oranında azaltma taahhüdünü desteklemektedir (Rossetto, 2023). Bu mekanizma, yüksek emisyon seviyelerinden sorumlu sektörleri doğrudan hedef alarak ithal ürünlere karbon bazlı vergilendirme getirmektedir. Bu mekanizma, enerji yoğun endüstrilerde sürdürülebilir kaynak kullanımını teşvik ederken emisyonları azaltmayı amaçladığından küresel sürdürülebilirlik çabalarında önemli bir gelişmeye işaret etmektedir. İthalatı karbon içeriğine göre vergilendirerek ihracatçı ülkelerin daha çevreci üretim uygulamalarını benimsemeleri için teşvik yaratmaktadır. Ayrıca, AB üye ülkelerinin, şirketlerin üretimlerini “karbon kaçağı” olarak bilinen gevşek çevre standartlarına sahip bölgelere taşımalarını engelleyerek rekabet güçlerini korumalarını sağlar. Bu düzenleme sadece çevresel hesap verebilirliği teşvik etmekle kalmayıp aynı zamanda küresel pazarlarda adil rekabeti de desteklemektedir.

2023 ve 2026 yılları arasında raporlama ve veri toplama odaklı bir hazırlık dönemi yürütülecektir. Bunu takiben, yönetmelik 2026-2034 yılları arasında alüminyum, çimento,

elektrik, gübre ve demir-çelik gibi belirli sektörlerle kademeli olarak uygulanacaktır (Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, 2023). Bu aşamalı yaklaşım, ihracatçı ülkelere üretim süreçlerini AB standartlarıyla uyumlu hale getirmeleri ve sürdürülebilirliği uygulamalarına dahil etmeleri için zaman sağlamaktadır. Bu kapsamda AB ülkeleriyle ticari ilişkileri sürdürmek için ihracatçı ülkeler, ürünlerinin yaşam döngüsü boyunca ekolojik ayak izini dikkate almalıdır. Bu gereklilik, endüstrileri kaynak kullanımını optimize etmeye, atıkları azaltmaya ve tedarik zincirlerindeki emisyonları en aza indirmeye zorlamaktadır. Çevresel etkileri kapsamlı bir şekilde ele alarak sadece sürdürülebilirliği teşvik etmekle kalmıyor, aynı zamanda üretim süreçlerinde şeffaflığını da arttırmaktadır. (Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, 2023). Yönetmeliğin uluslararası ticaret üzerinde çeşitli etkileri bulunmaktadır. 2022'de AB'nin en büyük ve üçüncü en büyük alüminyum tedarikçileri olan Norveç ve İzlanda, AB çevre standartlarına uyumları nedeniyle bu mekanizmadan muafır ve bu ülkelere gelen alüminyum akışlarında minimum kesinti sağlamaktadır. Buna karşılık, Rusya, Türkiye, Çin, Birleşik Arap Emirlikleri ve Hindistan gibi büyük tedarikçiler sınırda düzenleme mekanizmasının gerekliliklerini yerine getirmede önemli zorluklarla karşılaşacaktır. Bu ülkeler, sürdürülebilir uygulamaları benimseyerek politikaya uyum sağlamalı ve potansiyel olarak endüstriyel stratejilerini yeniden şekillendirmelidir (Taylor, 2023).

İmalat sanayi, küresel sürdürülebilirlik çabalarında, özellikle de sera gazı (GHG) emisyonlarının azaltılmasında çok önemli bir rol oynamaktadır (Ahmad vd., 2019).

Sürdürülebilirlik ve yeşil üretim kavramları, özellikle enerji yoğun sektörler olan metal döküm ve cam üretiminde giderek daha yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Bu sektörlerde, atıkların yeniden kullanımı, geri dönüşüm, enerji verimliliği önlemleri ve çevre dostu proseslerin entegre edilmesi, operasyonel verimliliği korurken ekolojik ayak izinin azaltılmasını hedeflemektedir (Hutchins vd., 2023). Çevresel sürdürülebilirlik, sera gazı emisyonları, katı atık, su kirliliği ve hava kirliliğini kapsayan çok boyutlu bir kavramdır. Bunlar arasında sera gazı emisyonları, küresel ısınma ve iklim değişikliğine önemli katkıları nedeniyle büyük bir faktördür. Çevresel performanslarını değerlendirmek ve iyileştirmek için üreticiler, kendi özel faaliyetlerine göre uyarlanmış sürdürülebilirlik göstergelerine güvenmektedir. Genellikle önde gelen kuruluşlar ve araştırmacılar tarafından geliştirilen bu göstergeler, üretim süreçlerinin çevresel etkilerini izlemek ve azaltmak için yapılandırılmış metodolojiler sağlar (Ahmad vd., 2019).

Uygun sürdürülebilirlik göstergelerinin seçimi büyük ölçüde sanayi sektörünün türüne bağlıdır. Örneğin, Veleva ve Ellenbecker (2001) imalat sektörü için hem temel hem de tamamlayıcı göstergeler sunarken, Azapagic (2004) madencilik sektörüne özgü sürdürülebilirlik göstergelerine odaklanmıştır. Krajnc ve Glavic (2003) sürdürülebilir üretim için standartlaştırılmış bir dizi endeks önermiş ve çeşitli endüstriyel faaliyetlere uygulanabilir kapsamlı bir çerçeve sunmuştur. Joung vd. (2013) sürdürülebilirlik göstergelerini çeşitli boyutlarda kategorize ederek üreticilerin sürdürülebilirlik için hedeflenen stratejileri benimsemelerini sağlamıştır. Garbie (2014), sürdürülebilir üretimin ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarından göstergeleri entegre eden bir sürdürülebilirlik değerlendirme endeksi geliştirerek bu çabaları daha da geliştirmiştir. Sera gazı emisyonlarının azaltılması bağlamında, bu göstergeler üreticilere enerji kullanımını optimize etme, yenilenebilir enerji kaynaklarını benimseme ve düşük karbonlu teknolojileri uygulama konusunda yol gösterir. İşletmeler karbon ayak izlerini sistematik olarak değerlendirerek, enerji yoğun üretim aşamaları veya verimsiz kaynak kullanımı gibi iyileştirmeye açık kilit alanları belirleyebilirler. Ayrıca, dökümhaneler ve cam üretim tesislerindeki geri dönüşüm ve atık azaltma uygulamaları, işlenmemiş malzemelere olan talebi ve bunların çıkarılması ve işlenmesi için gereken enerjiyi azaltarak emisyonların düşürülmesine doğrudan katkıda bulunur (Abay, 2023).

Genel olarak, üretimde sürdürülebilirlik çevresel, ekonomik ve sosyal faktörleri dengeleyen bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir. Sera gazı emisyonları, temel bir endişe kaynağı olarak, sağlam sürdürülebilirlik göstergeleri tarafından yönlendirilen hedefli stratejiler gerektirmektedir. Bu uygulamaların endüstriyel sistemlere entegrasyonu yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda operasyonel verimliliği artırır ve endüstrileri küresel iklim hedefleriyle uyumlu hale getirir. İmalat sektörleri, kapsamlı sürdürülebilirlik çerçevelerini benimseyerek düşük karbonlu bir geleceğe önemli ölçüde katkıda bulunabilir ve uzun vadeli ekonomik uygulanabilirlik sağlayabilir.

3. YÖNTEM

Bu çalışma, cam temperleme ve alüminyum profil üretimi gerçekleştiren bir üretim tesisinin 2024 yılına ait sera gazı (SGE) emisyonlarının sistematik biçimde hesaplanmasına odaklanmaktadır. Araştırma, nicel araştırma yaklaşımı çerçevesinde tasarlanmış olup, envanter temelli sera gazı hesaplama yöntemleri esas alınmıştır. Bu kapsamda, ilgili tesisin enerji tüketimi, üretim süreçleri ve lojistik faaliyetlerinden kaynaklanan doğrudan ve dolaylı emisyonlar sistematik olarak analiz edilmiştir. Cam temperleme süreci, cam levhaların kesim, temizleme, ısıtılma ve hızlı soğutma aşamalarını içermektedir. Camın yaklaşık 620°C'ye kadar ısıtılması ve ardından yüksek basınçlı hava jetleri ile ani soğutulması, cam yüzeyinde basınç gerilmeleri oluşturarak mekanik dayanıklılığı artırmaktadır. Bu işlem yüksek enerji girdisi gerektirmekte olup, cam üretiminden kaynaklanan karbon ayak izinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Ayrıca, üretimde kullanılan hammaddelerin temini ve taşınması gibi dolaylı süreçler de toplam emisyonlara kayda değer katkı sağlamaktadır. Alüminyum profil üretiminde ise hammadde hazırlığı, eritme, ekstrüzyon, soğutma ve yüzey işlemleri ana aşamaları kapsamaktadır. Özellikle eritme ve ekstrüzyon aşamaları yüksek enerji tüketimi gerektirmekte olup, birincil alüminyum yerine geri dönüştürülmüş alüminyum kullanımı karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu nedenle, tesislerde geri dönüşüm oranları ve enerji verimliliği önlemleri, çevresel performans açısından önemlidir. Çalışmada verilerin toplanması ve hesaplamaların yapılmasında ISO 14064-1:2018 standardı, SGE Protokolü, IPCC 2006 Rehberleri ve DEFRA 2023 emisyon faktörleri temel alınmıştır. Bu standart ve kılavuzlar, sera gazı emisyonlarının Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3 olmak üzere kategorilere ayrılarak hesaplanmasına olanak tanımaktadır. Kapsam 1, tesis içinde gerçekleşen doğrudan emisyonları (örneğin doğalgaz ve araç yakıtı kullanımı) kapsarken, Kapsam 2 elektrik ve ısı enerjisi tüketiminden kaynaklanan dolaylı emisyonları içermektedir. Kapsam 3 ise hammaddelerin üretimi, taşınması ve atık yönetimi gibi diğer dolaylı emisyonları kapsamaktadır. Emisyonların hesaplanmasında enerji tüketimi ve faaliyet verileri, tesisin 01 Ocak 2024 – 31 Aralık 2024 tarihleri arasındaki rapor ve kayıtlarından elde edilmiştir. Eksik veriler gerektiğinde, güvenilir tahmin yöntemleri ve literatür bazlı emisyon faktörleri kullanılarak tamamlanmıştır. Cam temperleme ve alüminyum profil üretim süreçlerinden kaynaklanan emisyonlar, üretim hattı bazında incelenmiş ve her bir sürecin karbon ayak izi üzerindeki payı belirlenmiştir. Cam üretiminde yüksek sıcaklık fırınlarının enerji tüketimi, temperleme sırasında kullanılan yüksek basınçlı hava sistemleri ve yüzdürme hatlarında kullanılan SO₂

gazı gibi operasyonel girdiler emisyon hesaplamalarına dahil edilmiştir. Alüminyum üretiminde ise eritme fırınları, ekstrüzyon kalıpları ve soğutma ünitelerinin enerji tüketimi, kullanılan alaşımların geri dönüşüm oranları ve yüzey işlemleri dikkate alınmıştır. Ayrıca, üretimde kullanılan elektrik enerjisinin kaynağına bağlı olarak dolaylı emisyonlar da hesaplamalara dahil edilmiştir. Bu süreçte kullanılan enerji verileri, tesisin üretim kapasitesi, saatlik tüketim raporları ve teknik çizimlerle doğrulanmıştır. Toplanan veriler, her bir emisyon kaynağı için uygun emisyon faktörleri ile çarpılarak toplam karbon ayak izi belirlenmiştir. Hesaplamalar sırasında IPCC'nin sektörel emisyon faktörleri ve DEFRA'nın güncel verileri kullanılarak, doğrudan ve dolaylı emisyonlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Toplanan verilerin ön değerlendirmesi ve süreç bazlı ayrıştırılması ile hem cam temperleme hem de alüminyum profil üretim hattında enerji tüketimi ve emisyon kaynaklarının detaylı bir envanteri oluşturulmuştur. Her bir üretim aşamasının karbon ayak izi üzerindeki göreceli katkısı analiz edilmiş, ayrıca doğrudan ve dolaylı emisyonlar arasındaki dağılım belirlenmiştir. Bu kapsamlı veri analizi, üretim sürecindeki önemli enerji yoğun noktaların ve potansiyel azaltım fırsatlarının belirlenmesine olanak sağlamıştır. Sonuç olarak, bu yöntemsel yaklaşım ile tesisin karbon ayak izi detaylı olarak ortaya konmuş, üretim süreçlerinin ve enerji kaynaklarının çevresel etkileri nicel olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamlı analiz, tesisin sürdürülebilirlik performansını değerlendirmek ve ilerleyen dönemlerde enerji verimliliği ile sera gazı azaltım stratejileri geliştirmek için sağlam bir temel sunmaktadır. Böylece hem cam temperleme hem de alüminyum profil üretim süreçlerinin karbon ayak izi üzerindeki etkileri sistematik bir biçimde ortaya konulmuş ve çevresel performansın izlenmesine yönelik metodolojik bir çerçeve sağlanmıştır.

4. BULGULAR

Bu bölümde, değerlendirilen döneme ait sera gazı emisyonlarının belirlenmesi, hesaplanması ve raporlanması süreçlerinden elde edilen temel bulgular sunulmuştur. Bu bulgular, uluslararası standartlar ve rehberler doğrultusunda yapılan kapsamlı analizlerin sonuçlarını yansıtmaktadır. Bu çalışma bir üretim tesisinin 2024 yılına ait sera gazı (SGE) emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve yönetimi amacıyla hazırlanmıştır. Sunulan veriler, uluslararası kabul görmüş standartlara ve ulusal düzenlemelere uygun olarak hesaplanmıştır.

4.1. Araştırma Dönemi

Çalışma, 01 Ocak 2024 – 31 Aralık 2024 tarihleri arasındaki sera gazı emisyon verilerini kapsamaktadır. Değerlendirme, üretim faaliyetlerinin gerçekleştirildiği tek bir merkez üretim tesisi temel alınarak yapılmıştır. Raporlama, ISO 14064-1:2018 standardı, SGE Protokolü, IPCC 2006 Rehberleri ve DEFRA 2023 veri setleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

4.2. Çalışmanın Arka Planı ve Amacı

İklim değişikliğiyle mücadelede, kurumsal düzeyde sera gazı emisyonlarının şeffaf ve bilimsel temellere dayalı olarak izlenmesi ve raporlanması büyük bir adımdır. Bu çalışma, bir üretim tesisinin çevresel performansını değerlendirmek, sürdürülebilirlik taahhütlerini güçlendirmek ve gelecekteki karbon azaltım stratejilerine bilimsel bir zemin oluşturmak amacıyla hazırlanmıştır. Özellikle, bir üretim tesisinin Malatya'da faaliyet gösteren merkezi üretim tesisi için 2024 yılı sera gazı emisyonları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Tesis, başta PVC profil üretimi olmak üzere cam ve cephe sistemleri alanında faaliyet göstermekte olup, ürün gamı çeşitli bariyerli sistem profilleri ve PVC pencere-kapı sistemlerini içermektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, tesisin üretim süreçleri, enerji tüketimi ve lojistik faaliyetlerinden kaynaklanan doğrudan (Kapsam 1) ve dolaylı (Kapsam 2 ve Kapsam 3) sera gazı emisyonlarını sistematik bir şekilde hesaplamak ve raporlamaktır. Ölçüm sonuçları, doğalgaz ve güneş enerjisi (GES) sisteminden elde edilen veriler üzerinden hesaplanmış, gerekli durumlarda tahmini değerlerle desteklenmiştir. Bu envanter çalışması, kuruluşun

yıllık çevresel performansını izlemekle kalmayıp, paydaşlar nezdinde şeffaflık sağlamayı ve çevresel iyileştirme faaliyetlerine rehberlik etmeyi hedeflemektedir.

4.3. Toplam Sera Gazı Emisyonları

Analizler sonucunda, incelenen tesisin toplam sera gazı emisyonu 417,86 ton CO₂ eşdeğeri (tCO₂e) olarak hesaplanmıştır. Bu değer, tesisin 2024 yılı faaliyetlerinden kaynaklanan toplam çevresel etkisini göstermektedir.

4.3.1. Kapsam bazında emisyon dağılımı

Sera gazı emisyonları, ISO 14064-1 standardına uygun olarak Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3 kategorilerinde değerlendirilmiştir:

4.3.2. Kapsam 1: Doğrudan emisyonlar

Kapsam 1 emisyonları, tesisin sahip olduğu veya kontrol ettiği kaynaklardan kaynaklanan doğrudan sera gazı emisyonlarını içermektedir. Bu kapsamda, taşıtlardan kaynaklanan yakıt tüketimi, sabit tesislerdeki doğalgaz kullanımı, iklimlendirme sistemlerindeki soğutucu gaz kaçakları ve yangın söndürme tüpü gazları incelenmiştir.

Taşıt Kullanımının Emisyonlara Etkisi

Bu bölümde, 2024 yılı Ocak–Kasım ayları arasındaki akaryakıt tüketim verileri kullanılarak, tesise ait araçların ve saha içi ekipmanların yakıt tüketimine bağlı doğrudan sera gazı emisyonları (Kapsam 1) hesaplanmıştır. Hesaplamalar, hem karayolu (on-road) araçlarının hem de saha içi (off-road) forklift ve jeneratör gibi ekipmanların yakıt tüketimlerini içermektedir.

Emisyonlar, IPCC 2006 Guidelines – Tier 1 yöntemine göre belirlenmiştir. Bu yöntem kapsamında, her araç için aylık yakıt tüketimi (litre cinsinden) girilerek yıllık toplam tüketim hesaplanmıştır. Ardından, her aracın yakıt türü (Dizel, Benzinli-LPG vb.) bilgisi ile birlikte, IPCC ve TÜBİTAK–Çevre Bakanlığı tarafından önerilen Türkiye’ye özgü emisyon faktörleri (EF) ve yakıtın net kalorifik değeri (NKD) kullanılarak toplam sera gazı emisyonu belirlenmiştir.

Kullanılan Temel Parametreler ve Formüller:

- **FV (Fuel Volume):** Tüketilen yakıt miktarı (ton)

- **NKD (Net Kalorifik Değer):** Yakıtın enerji içerik değeri (TJ/Gg)
- **EF (Emisyon Faktörleri):** CO₂, CH₄, N₂O için (t/TJ)
- **GWP (Küresel Isınma Potansiyeli)**
 - CH₄ için: 27,9
 - N₂O için: 273
- **FV (TJ):** Tüketilen yakıtın toplam enerji karşılığı (Terajoule)
FV (TJ)=FV (t)×1000NKD
- **SGE (tCO₂e):** Her bir gaz için ayrı ayrı hesaplanır ve toplanarak toplam CO₂ eşdeğeri emisyon bulunur.
 - **SGE CO₂ (tCO₂e) = FV (TJ)×EF CO₂**
 - **SGE CH₄ (tCO₂e) = FV (TJ)×EF CH₄×GWP CH₄**
 - **SGE N₂O (tCO₂e) = FV (TJ)×EF N₂O×GWP N₂O**

Tablo 4.1. Taşıtlardan kullanılan yakıt çeşidine göre emisyonlar (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

SGE Kaynağı	FV (t)	NKD (TJ/Gg)	FV (TJ)	EF CO ₂	EF CH ₄	EF N ₂ O	SGE CO ₂	SGE CH ₄	SGE N ₂ O	Toplam SGE
Benzin (on-road)	3,17	44,3	0,14	69,3	0,025	0,008	9,72	0,1	0,31	10,13
Motorin (on-road)	12,23	43	0,53	74,1	0,0039	0,0039	38,96	0,06	0,56	39,57
Benzin (off-road)	0,02	44,3	0	69,3	0,13	0,0004	0,07	0	0	0,07
Motorin (off-road)	3,25	43	0,14	74,1	0,00415	0,0286	10,35	0,02	1,09	11,45

61,23 t CO₂e

2024 yılı için mobil yakmadan kaynaklı toplam sera gazı emisyonu 61,24 ton CO₂ eşdeğeri (tCO₂e) olarak hesaplanmıştır. Bu toplam emisyonun büyük bir kısmı, karayolu araçlarındaki motorin tüketiminden kaynaklanmaktadır.

Doğalgaz Tüketiminden Kaynaklanan Emisyonlar

Bu bölümde, 2024 yılı içerisinde firmanın sabit tesislerinde tüketilen doğalgazdan kaynaklanan doğrudan sera gazı (SGE) emisyonları (Kapsam 1) hesaplanmıştır (Tablo 4.1). Tesis, 2024 yılı için sadece ısıtma amacıyla doğalgaz kullanmıştır.

Kapsam ve Yöntem

Hesaplamalar, firmanın 2024 yılı boyunca gerçekleştirdiği doğalgaz tüketimi üzerinden yapılmıştır. Net doğalgaz fatura tutarları esas alınarak, sanayi tarifesine göre doğalgaz tüketimi (m³) tahmini gerçekleştirilmiştir (Tablo 4.2). Bu tüketim değerleri, IPCC-TÜBİTAK – AKSA DOĞALGAZ DAĞITIM A.Ş. tarafından belirlenen tüketim tarifesine uyumlu emisyon faktörleri kullanılarak sera gazı emisyonlarına dönüştürülmüştür.

Tablo 4.2. Doğalgaz giderleri (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Ay	Net Fatura Tutarı	KDV	Toplam Tutar
Ocak	806,85	161,37	968,22
Şubat	944,4	188,88	1133,28
Mart	1158,43	231,686	1390,116
Nisan	559,13	111,826	670,956
Mayıs	0	0	0
Haziran	0	0	0
Temmuz	0	0	0
Ağustos	4242,73	848,546	5091,276
Eylül	1132,21	226,442	1358,652
Ekim	1193,28	238,656	1431,936
Kasım	1212,46	242,492	1454,952
Aralık	0	0	0
Genel Toplam			13.499,39

Kullanılan Parametreler ve Formüller:

- Toplam Net Fatura (KDV hariç): 11.249,49 TL
- Doğalgazın Birim Fiyatı: Yaklaşık 5,00 TL/m³ (2024 piyasa ortalaması; bölgesel olarak değişebilir)
- Doğalgaz Yoğunluğu: 0,000717 ton/m³
- Net Kalorifik Değer (NKD): 48 TJ/Gg (IPCC 2006 yönergeleri)
- Emisyon Faktörleri (EF):

- CO₂ için: 56,1 tCO₂/TJ
- CH₄ için: 0,001 tCH₄/TJ
- N₂O için: 0,0001 tN₂O/TJ
- Küresel Isınma Potansiyeli (GWP):
 - CH₄ için: 27,9
 - N₂O için: 273

Hesaplama Formülleri:

- **Doğalgaz Tüketimi (m³):** Toplam Net Fatura/Birim Fiyat
- **FV (t) (Doğalgaz miktarı ton cinsinden):** Tüketim (m³)×Yoğunluk
- **FV (TJ) (Doğalgazın toplam enerji karşılığı):** FV (t)×NKD/1000 (Gg'den Tg'ye dönüşüm için)
- **SGE CO₂ (tCO₂e):** FV (TJ)×EF CO₂
- **SGE CH₄ (tCO₂e):** FV (TJ)×EF CH₄×GWP CH₄
- **SGE N₂O (tCO₂e):** FV (TJ)×EF N₂O×GWP N₂O

Tablo 4.3, 2024 yılı boyunca aylık bazda doğalgaz tüketimini ve buna karşılık gelen sera gazı emisyonlarını göstermektedir:

Tablo 4.3. Doğalgaz tüketimi ve emisyon değerleri (2024) (**Kaynak:** Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Ay	Net Tutar (TL)	Birim Fiyat (TL/m ³)	Tüketim (m ³)	Emisyon (kg CO ₂ e)	Açıklama
Ocak	806,85	8,0000	100,86	194,65	Ocak ayında net fatura tutarı 806,85 TL olup, tahmini birim fiyat 8,0000 TL/m ³ tür. Buna göre 100,86 m ³ doğalgaz tüketimi ve 1,93 kg CO ₂ e/m ³ emisyon faktörüyle 194,65 kg CO ₂ e emisyon hesaplanmıştır.
Şubat	944,40	8,0000	118,05	227,84	Şubat ayında net fatura tutarı 944,40 TL olup, tahmini birim fiyat 8,0000 TL/m ³ tür. Buna göre 118,05 m ³ doğalgaz tüketimi ve 1,93 kg CO ₂ e/m ³ emisyon faktörüyle 227,84 kg CO ₂ e emisyon hesaplanmıştır.
Mart	1.158,43	8,0000	144,80	279,47	Mart ayında net fatura tutarı 1.158,43 TL olup, tahmini birim fiyat 8,0000 TL/m ³ tür. Buna göre 144,80 m ³ doğalgaz tüketimi ve 1,93 kg CO ₂ e/m ³ emisyon faktörüyle 279,47 kg CO ₂ e emisyon hesaplanmıştır.

Tablo 4.3. (Devam) Doğalgaz tüketimi ve emisyon değerleri (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Nisan	559,13	8,0000	69,89	134,89	Nisan ayında net fatura tutarı 559,13 TL olup, tahmini birim fiyat 8,0000 TL/m ³ tür. Buna göre 69,89 m ³ doğalgaz tüketimi ve 1,93 kg CO ₂ e/m ³ emisyon faktörüyle 134,89 kg CO ₂ e emisyon hesaplanmıştır.
Mayıs	0,00	8,0000	0,00	0,00	Mayıs ayında doğalgaz için fatura kaydı bulunmamaktadır. Dolayısıyla tüketim ve emisyon sıfırdır.
Haziran	0,00	17,5478	0,00	0,00	Haziran ayında doğalgaz için fatura kaydı bulunmamaktadır. Bu nedenle doğalgaz tüketimi ve emisyon değeri sıfırdır.
Temmuz	0,00	17,5478	0,00	0,00	Temmuz ayında da herhangi bir doğalgaz faturası bulunmamaktadır. Dolayısıyla tüketim ve emisyon yoktur.
Ağustos	4.242,73	17,5478	241,84	466,74	Ağustos ayında net fatura tutarı 4.242,73 TL'dir. Sanayi tarifesinden Kademe 1 birim fiyatı 17,5478 TL/m ³ kullanıldığında yaklaşık 241,84 m ³ doğalgaz tüketildiği hesaplanmıştır. Bu miktar 1,93 kg CO ₂ e/m ³ emisyon faktörüyle çarpıldığında toplamda 466,74 kg CO ₂ e emisyon oluşturur.
Eylül	1.132,21	17,5478	64,53	124,56	Eylül ayında net fatura tutarı 1.132,21 TL'dir. Bu fatura tutarıyla yaklaşık 64,53 m ³ doğalgaz tüketilmiş olup, toplam emisyon 124,56 kg CO ₂ e olarak hesaplanmıştır.
Ekim	0,00	17,5478	0,00	0,00	Ekim ayında doğalgaz tüketimi kaydedilmemiştir. Emisyon değeri sıfırdır.
Kasım	0,00	17,5478	0,00	0,00	Kasım ayında da doğalgaz faturası bulunmadığı için tüketim ve emisyon sıfırdır.
Aralık	0,00	17,5478	0,00	0,00	Aralık ayında da herhangi bir doğalgaz kullanımına rastlanmamıştır. Emisyon değeri oluşmamıştır.
YILLIK TOPLAM	8.843,55	-	695,97	1.343,15	(Yukarıdaki aylık bazdaki verilerin toplamıdır.)

Sabit Yakmadan Kaynaklı Genel Sera Gazı Emisyonları (Kategori 3.1 – Doğalgaz)

2024 yılı için tesiste ısıtma amacıyla tüketilen doğalgazdan kaynaklanan toplam sera gazı emisyonları, IPCC 2006 yönergelerine uygun olarak hem aylık tüketim verileri hem de genel yakma emisyon faktörleri kullanılarak iki farklı yaklaşımla değerlendirilmiştir.

1. Yaklaşım: Fatura Tabanlı Aylık Hesaplama

Tablo 4.3'e göre, 2024 yılı Ocak-Aralık döneminde tüketilen doğalgazdan kaynaklanan toplam emisyon 1.343,15 kg CO₂e olarak hesaplanmıştır. Bu da 1,34 ton CO₂e'ye eşittir. Bu hesaplama, doğrudan aylık tüketim verileri ve sabit emisyon faktörü (1,93 kg CO₂e/m³) üzerinden yapılmıştır.

2. Yaklaşım: Enerji Değeri Tabanlı Hesaplama (IPCC Tier 1)

Bu yaklaşımda, doğalgazın enerji içeriği ve her bir sera gazı için ayrı emisyon faktörleri kullanılmıştır.

- Toplam Net Fatura (KDV hariç): 11.249,49 TL
- Doğalgazın Birim Fiyatı: 5 TL/m³
- Yıllık Toplam Doğalgaz Tüketimi (tahmini):
 $11.249,49 \text{ TL} / 5,00 \text{ TL/m}^3 = 2.249,90 \text{ m}^3$
- **Doğalgaz Miktarı (ton):** $2.249,90 \text{ m}^3 \times 0,000717 \text{ ton/m}^3 = 1,612 \text{ ton}$
- **Toplam Enerji Karşılığı (TJ):** $1,612 \text{ ton} \times (48 \text{ TJ/Gg} / 1000) = 0,0774 \text{ TJ}$

Bu enerji değerine karşılık gelen emisyon faktörleri ve Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) değerleri kullanılarak yapılan hesaplamalar şunlardır:

- Karbondioksit (CO₂) kaynaklı emisyon: $0,0774 \text{ TJ} \times 56,1 \text{ tCO}_2/\text{TJ} = 4,34 \text{ tCO}_2\text{e}$
- Metan (CH₄) kaynaklı emisyon: $0,0774 \text{ TJ} \times 0,001 \text{ tCH}_4/\text{TJ} \times 27,9 = 0,0022 \text{ tCO}_2\text{e}$
- Diazot monoksit (N₂O) kaynaklı emisyon:
 $0,0774 \text{ TJ} \times 0,0001 \text{ tN}_2\text{O}/\text{TJ} \times 273 = 0,0021 \text{ tCO}_2\text{e}$

Toplam Sonuç

Sabit tesislerdeki doğalgaz kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonu, iki farklı hesaplama yaklaşımıyla ortaya konmuştur:

- Aylık Fatura Tabanlı Hesaplama Sonucu: 1,34 ton CO₂e
- Enerji Değeri Tabanlı (IPCC Tier 1) Hesaplama Sonucu: 4,346 ton CO₂e

Raporda daha önceki bölümde belirtilen 1,69 ton CO₂e değeri, büyük olasılıkla aylık bazdaki tüketimlerin toplamı olan 1.343,15 kg CO₂e (yani 1,34 ton CO₂e) ile, yuvarlama

veya kullanılan emisyon faktörünün farklı bir versiyonundan gelmektedir. Ancak, enerji değeri tabanlı (IPCC Tier 1) hesaplama, 4,346 ton CO₂e ile daha ayrıntılı bir yaklaşımdır.

Bu bulgular, firmanın 2024 yılı doğalgaz kullanımından kaynaklanan toplam Kapsam 1 emisyonunun yaklaşık 1,34 ile 4,35 ton CO₂e arasında olduğunu göstermektedir.

Soğutucu Gaz Kullanımının Emisyon Profili

KAPSAM 1. 3. İklimlendirme Sistemlerindeki Soğutucu Gaz Kaçakları

Klimalar ve soğutma sistemlerinde kullanılan florlu gazlar (özellikle HFC'ler), kaçak veya bakım işlemleri nedeniyle atmosfere karıştığında doğrudan sera gazı emisyonu oluştururlar. Bu bölümde, tesisteki iklimlendirme sistemlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları hesaplanmıştır.

Hesaplamalar, IPCC Tier 1 metodolojisine uygun olarak, her bir klima cihazının soğutucu gaz tipi, şarj miktarı ve adedi bilgileri dikkate alınarak yapılmıştır (Tablo 4.4.). IPCC Tier 1 metodolojisine göre, bu tür sistemlerde yıllık ortalama sızıntı oranı %10 olarak kabul edilmektedir.

Tablo 4.4. Kullanılan soğutucu gazlar ve küresel ısınma potansiyeli (GWP) (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Gaz Tipi	GWP (100 yıl)	Açıklama
R32	675 / 771*	Orta etkili HFC
R410A (FR 10)	2.088	Yüksek etkili HFC

Hesaplama Formülü:

Yıllık Emisyon (kg CO₂e)=Adet×Gaz Miktarı (kg)×GWP×Sızıntı Oranı (%10)

Uygulama ve Detaylı Hesaplamalar

Tablo 4.5. Klima türleri (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

ADET	MARKA	MODEL	BULUNDUĞU YER	GAZ TİPİ	GAZ KG	BTU
1	REGAL	R32 A + + DUVAR TİPİ	LABORATUVAR ODASI	R 32	0,5	7000
1	ALTUS	ALK 1270	PLANLAMA ODASI	R 32	0,75	12000
1	mitsubishi electric	VRF SİSTEMİ	GENEL MÜDÜR ODASI	FR 10	4,44	24000
1	mitsubishi electric	VRF SİSTEMİ	YÖNETİM KURULU ODASI	FR 10	4,44	48000
1	mitsubishi electric	VRF SİSTEMİ	FİNANS ODASI	FR 10	4,44	48000
1	mitsubishi electric	VRF SİSTEMİ	SATIŞ PAZARLAMA ODASI	FR 10	4,44	48000
1	mitsubishi electric	VRF SİSTEMİ	MUHASEBE ODASI	FR 10	4,44	48000
1	mitsubishi electric	VRF SİSTEMİ	DIŞ TİCARET ODASI	FR 10	4,44	48000
1	mitsubishi electric	VRF SİSTEMİ	PERAKENDE ODASI	FR 10	4,44	48000
1	mitsubishi electric	VRF SİSTEMİ	FABRİKA MÜDÜRÜ ODASI	FR 10	4,44	48000
1	mitsubishi electric	VRF SİSTEMİ	HOL (KORİDOR)	FR 10	4,44	48000

Tablo 4.6. Klima gaz türleri (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Gaz Türü	Gaz Kapasitesi (kg)	Sızıntı Oranı (%)	FV(kg)	KIP (kg CO ₂ e/kg)	Toplam SGE (tCO ₂ e)
R410A	320,00	10	32,00	2.088	66,82
R32	1,25	10	0,125	771	0,096
Toplam	-	-	-	-	66.92

Tesiste, 2024 yılı itibarıyla toplam 11 adet klima sistemi bulunmaktadır (Tablo 4.5).

1. R32 Gazlı Klimalar İçin Hesaplamalar:

- Belirtilen Adet: 2
- Belirtilen Miktar: 0.5 kg ve 0.75 kg (toplam 1.25 kg)
- Belirtilen GWP Değerleri: 675 ve 771 (IPCC AR5'e göre)

Hesaplama A (GWP = 675 ile):

- Emisyon= $(0.5 \text{ kg} \times 675 + 0.75 \text{ kg} \times 675) \times 0.10 = 84,38 \text{ kg CO}_2\text{e}$

Hesaplama B (GWP = 771 ile):

- Yıllık Sızıntı= $1.25 \text{ kg} \times 0.10 = 0.125 \text{ kg}$
- Emisyon= $0.125 \text{ kg} \times 771 = 96,375 \text{ kg CO}_2\text{e} = 0,096 \text{ tCO}_2\text{e}$

2. R410A (FR 10) Gazlı VRF Sistemleri İçin Hesaplamalar:

- **Belirtilen Adet ve Miktar Senaryo 1:** 7 adet, her biri 4.44 kg (toplam 31.08 kg)
- **Belirtilen Adet ve Miktar Senaryo 2:** 8 adet, her biri yaklaşık 40 kg (toplam 320 kg)
- **Belirtilen GWP Değeri:** 2088

Hesaplama C (7 Adet, 4.44 kg/adet ile):

- Emisyon= $31.08 \text{ kg} \times 2088 \times 0.10 = 6.488,90 \text{ kg CO}_2\text{e}$

Hesaplama D (8 Adet, 40 kg/adet ile):

- Toplam R410A Miktarı (ton)= $320 \text{ kg} / 1000 = 0.32 \text{ ton}$
- Yıllık Sızıntı= $0.32 \text{ ton} \times 0.10 = 0.032 \text{ ton R410A}$
- Emisyon= $0.032 \text{ ton} \times 2088 = 66,82 \text{ tCO}_2\text{e}$

Sonuç ve Toplam Emisyon Hesapları

Tesisteki klima sistemlerinden kaynaklanan toplam yıllık doğrudan emisyon, kullanılan veri setlerine göre farklılık göstermektedir. Aşağıda belirtilen ana toplamalar, yukarıdaki detaylı hesaplamaların özetidir (Tablo 4.6):

- R32 kaynaklı emisyon (GWP 675 ile): 84,38 kg CO₂e
- R410A (FR 10) kaynaklı emisyon (7 adet, 4.44 kg/adet ile): 6.488,90 kg CO₂e
- **Toplam Klima Emisyonu:**
 $84,38 \text{ kg CO}_2\text{e} + 6.488,90 \text{ kg CO}_2\text{e} = 6.573,28 \text{ kg CO}_2\text{e} = 6,57 \text{ ton CO}_2\text{e}$

Yangın Söndürme Sistemleri ve Endüstriyel Süreçlerin Emisyonlara Katkısı

KAPSAM 1. 4. Yangın Söndürme Tüpü Gazları

Tablo 4.7. Yangın söndürme tüpü gazları (**Kaynak:** Yazar tarafından oluşturulmuştur)

ADET	KG	MUHTEVİYATI	MARKA	SON KULLANMA TARİHİ
18	6	KURU TOZLU	KARBOSAN	2028
7	5	KARBONDİOKSİT CO ₂	KARBOSAN	2028
1	5	KARBONDİOKSİT CO ₂	KARBOSAN	2026
8	6	KURU TOZLU	KARBOSAN	2025
5	6	KURU TOZLU	KARBOSAN	2026
5	6	KURU TOZLU	DRY POWDER	2025

Emisyon Durumu

Tablo 4.7’de yangın söndürme tüplerinin neden olduğu sera gazı emisyonları değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda:

- **Kuru tozlu tüpler:** Sera gazı içermediği için emisyonu herhangi bir katkısı bulunmamaktadır.
- **Karbondiyoksit (CO₂) tüpleri:** Bu tüplerdeki CO₂, Uluslararası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) yönergelerine göre, biyogenik kaynaklı ya da endüstriyel olarak geri dönüştürülmüş kabul edildiği için doğrudan sera gazı (GHG) olarak sayılmaz.

Sonuç: Yangın söndürme tüplerinden sera gazı emisyonu oluşmaz.

Endüstriyel Üretim Süreçlerinin Emisyonları

Emisyon Durumu

Tesisteki cam kesimi, temperleme, yıkama ve paketleme gibi endüstriyel işlemler incelenmiştir. Bu tür süreçler, doğrudan sera gazı salınımı üreten kimyasal reaksiyonlar içermemektedir.

Sonuç: Endüstriyel süreçlerden kaynaklanan doğrudan sera gazı emisyonu bulunmamaktadır.

Arazi Kullanımı ve Değişimlerinin Emisyonlara Etkisi

IPCC 2006 Kılavuzu’na göre, arazi kullanımı ve arazi kullanım değişikliği kaynaklı sera gazı emisyonları; ormanlık alanların, meraların veya tarım arazilerinin sanayi, yerleşim ya da başka amaçlarla dönüştürülmesi sonucunda oluşmaktadır. Bu tür dönüşümler sırasında toprak karbonunun atmosfere salımı, biyokütle kaybı ve karbon yutaklarının azalması dikkate alınmaktadır.

Tesisin bulunduğu alan, uzun süredir sanayi bölgesi olarak kullanılan imarlı bir parsel olup, 2024 yılı içerisinde arazi kullanımında herhangi bir değişiklik gerçekleştirilmemiştir.

Ayrıca karbon yutak kapasitesini artıracak ağaçlandırma ya da yeşil altyapı projeleri de uygulanmamıştır.

Bu nedenle, Kategori 1.6 kapsamında herhangi bir sera gazı emisyonu oluşmamış olup hesaplama yapılmamıştır.

Kapsam 1 Doğrudan Emisyonların Genel Değerlendirmesi

Tablo 4.8’de 2024 yılına ait sera gazı emisyonu hesaplamaları, tesisin faaliyetlerinden kaynaklanan doğrudan (Kapsam 1) emisyonları detaylandırmıştır. Hesaplamalar, mobil yakma (araç ve saha içi ekipman yakıt tüketimi), sabit tesislerdeki doğalgaz kullanımı, yangın söndürme tüpleri ve iklimlendirme sistemlerindeki soğutucu gaz kaçaklarını kapsamaktadır.

Yapılan detaylı analizler sonucunda, 2024 yılı için **tesis**in toplam Kapsam 1 sera gazı emisyonu aşağıdaki gibi tespit edilmiştir:

KAPSAM 1 – Toplam Emisyon Hesabı

Tablo 4.8. KAPSAM 1 emisyonları (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Alt Başlık	Emisyon (kg CO ₂ e)	Emisyon (ton CO ₂ e)
YAKIT (araç yakıtları)	77.959,00 kg	77,96 ton
DOĞALGAZ FATURASI	1.692,61 kg	1,69 ton
YANGIN SÖNDÜRME TÜPÜ (CO ₂)	40,00 kg	0,04 ton
KLİMA (soğutucu gaz kaçakları)	6.573,28 kg	6,57 ton
TOPLAM	86.264,89 kg	86,26 ton

2024 yılında tesisin doğrudan sera gazı emisyonlarının büyük bir kısmı, yakıt tüketiminden (araç yakıtları) kaynaklanmaktadır. Bu kategori, toplam emisyonun yaklaşık %90'ını oluşturarak mobil kaynaklı emisyonların azaltılmasına yönelik önemli bir potansiyel sunmaktadır. Doğalgaz kullanımından kaynaklanan emisyonlar toplamda daha küçük bir paya sahipken, klima sistemlerindeki soğutucu gaz kaçakları da belirli bir oranda katkıda bulunmaktadır. Bu veriler, tesisin sera gazı yönetim stratejilerini belirlemede temel bir başlangıç noktası sunmaktadır.

4.3.3. Kapsam 2: Dolaylı enerji emisyonları

Elektrik Tüketiminin Emisyonlara Katkısı

Tablo 4.9’da 2024 yılı faaliyetleri kapsamında, incelenen firmanın elektrik enerjisi ihtiyacı tamamen şirket bünyesinde kurulu olan güneş enerjisi santralinden (GES) karşılanmıştır. Tesis, şebekeye bağlı olmakla birlikte, yıl boyunca dışarıdan elektrik satın alınmamış; tüm tüketim, yerinde yenilenebilir enerji üretimiyle sağlanmıştır.

Tablo 4.9. Aylık elektrik üretim ve tüketim değerleri tablosu (**Kaynak:** Yazar tarafından oluşturulmuştur)

GES		
Ay	Üretim	Tüketim
Ocak	-	52.276
Şubat	-	36.950
Mart	81.560	32.696
Nisan	264.821	40.483
Mayıs	263.430	77.689
Haziran	332.200	86.988
Temmuz	325.620	64.349
Ağustos	314.160	83.367
Eylül	244.050	74.318
Ekim	194.020	93.820
Kasım	83.710	112.375
Aralık	-	-
	2.103.571	755.311

Teknik Değerlendirme ve Hesaplamalar:

- Toplam Elektrik Tüketimi (tesiste kullanılan): 898.656 kWh
- Toplam GES Üretimi: 2.162.701 kWh
- Net Şebekeden Elektrik Alımı: 0 kWh
- Uygulanan Emisyon Faktörü (Türkiye ortalaması): 0,42 kg CO₂e / kWh

Bu durumda, GES üretimi tüketimi tam olarak karşıladığı ve şebekeden herhangi bir elektrik çekişi olmadığı için **Net Kapsam 2 Emisyonu 0 kg CO₂e** olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.10. Şebekeden elektrik alımı (**Kaynak:** Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Kaynak Adı	FV (kWh/yıl)	EF (kg CO ₂ e/kWh)	Toplam SGE (tCO ₂ e)
Elektrik (şebeke)	0	0,371	0,00
Toplam Scope 2 SGE	–	–	0,00 tCO₂e

Ek Bilgi – Kaçınılan Emisyonlar

GES üretimi yalnızca tesis ihtiyacını karşılamakla kalmamış, aynı zamanda şirketin şebekeye olan bağımlılığını da ortadan kaldırmıştır. Şayet bu enerji şebekeden alınsaydı, aşağıdaki miktarda emisyon oluşacaktı (Tablo 4.10):

- **Kaçınılan Emisyon Hesabı:**

$$2.162.701 \text{ kWh} \times 0,42 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} = 908.334 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Bu da yaklaşık 908,33 ton CO₂e etmektedir.

Bu değer, SGE Protokolü'ne göre **location-based** hesaplamada gösterilmez; ancak yeşil enerji kullanım performansı, karbon azaltımı veya “yeşil üretim kabiliyeti” kapsamında ayrı olarak emisyon azaltımı göstergesi şeklinde raporlanabilir. İncelenen firma, 2024 yılı boyunca elektrik ihtiyacının tamamını kendi GES sistemi ile karşılamış olup, Kapsam 2 kapsamında doğrudan emisyon üretmemiştir. Buna ek olarak, yaklaşık 908 ton CO₂e emisyonun oluşumu önlenmiştir. Bu durum, firmanın karbon ayak izini azaltmadaki aktif yenilenebilir enerji politikasını açıkça ortaya koymaktadır.

Kategori 2 sera gazı emisyonu (SGE) hesaplamaları: İthal elektrik tüketiminden Kaynaklı SGE hesaplamaları

İncelenen tesisin 2024 yılı boyunca elektrik ihtiyacının tamamı, çatı tipi güneş enerjisi sistemi (GES) tarafından karşılanmıştır. Tesisin toplam elektrik tüketimi 2024 yılı için 755.311 kWh olarak ölçülmüş; aynı dönemde GES üretimi ise 2.103.571 kWh olarak kaydedilmiştir.

Bu durumda, tüketimin tamamı GES üzerinden sağlanmış ve GES üretimi, tüketimden 1.348.260 kWh daha fazla gerçekleşmiştir. Bu fazla enerji, lisanssız üretim yönetmeliği kapsamında dağıtım sistemine verilmiş, yani şebekeye aktarılmıştır.

SGE Protocol ve ISO 14064 standardına göre, tesis içinde yenilenebilir kaynaklarla üretilip aynı anda tüketilen elektrik enerjisi "karbon nötr" kabul edilmektedir. Dolayısıyla bu durumda ithal elektrik tüketimi gerçekleşmemiştir.

Elektrikli Ekipman (Kompresör Tüketimi)

Elektrikli Ekipman Kullanımının Emisyon Profili

Veri Kaynağı: Kullanıcının sağladığı tahmini yıllık tüketim verileri

Kapsam: ISO 14064-1 ve SGE Protocol – Kapsam 2: Satın alınan elektrikten kaynaklanan dolaylı emisyonlar

Kapsam ve Yöntem: Bu hesaplama, firmanın üretim süreçlerinde kullandığı iki kompresörün tahmini yıllık enerji tüketim değerlerine dayanarak yapılmıştır. Çalışma süresi, yük ortalaması ve güç değerleri kullanılarak yıllık kWh tüketimi hesaplanmış ve Türkiye şebekesi ortalama emisyon faktörü (0,42 kg CO₂e/kWh) ile çarpılarak sera gazı emisyonu hesaplanmıştır (Tablo 4.11).

Tablo 4.11. Elektrik ekipman kaynaklı sera gazı emisyonları (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Kompresör Modeli	Güç (kW)	Çalışma Süresi	Ortalama Yük	Tüketim (kWh/yıl)	Emisyon Faktörü	Emisyon (kg CO ₂ e)	Emisyon (ton CO ₂ e)
EKO 45D VST	45	4.000 saat	%70	126.000	0,42	52.920	52,92
LKV 37/7,5	37	4.000 saat	%90	133.200	0,42	55.944	55,94
TOPLAM	–	–	–	259.200	–	108.864	108,86

Toplam emisyon: 108.864 kg CO₂e (veya 108,86 ton CO₂e)

Kaynaklar:

- SGE Protocol – Kapsam 2 Guidance
- ISO 14064-1:2018
- **Türkiye Şebeke Emisyon Faktörü (TÜBİTAK, IPCC uyumlu): 0,42 kg CO₂e/kWh**

Kapsam 2 – Dolaylı Enerji Emisyonlar

Tablo 4.12’de incelenen firmanın 2024 yılına ait Kapsam 2 emisyon verileri, şirketin enerji yönetimi stratejisinin çevresel etkilerini nicel olarak ortaya koymaktadır. Analiz edilen bulgular, yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımın sera gazı emisyonları üzerindeki belirleyici rolünü vurgulamaktadır.

Tablo 4.12. KAPSAM 2 emisyonları (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Alt Başlık	Açıklama	Emisyon (kg CO ₂ e)	Emisyon (ton CO ₂ e)
Elektrik Tüketimi (Net Şebeke – GES sonrası)	GES üretimi tesis ihtiyacını tam karşıladığı için net tüketim sıfır kabul edildi	0	0
Kaçınılan Emisyon (GES üretimi)	Raporlamaya esas alınmaz, ek performans göstergesidir (2.162.701 kWh × 0,42)	908.334	908,33
Elektrikli Ekipman – Kompresörler	Kullanıcının sağladığı tahmini tüketim verilerine göre hesaplandı	108.864	108,86
TOPLAM (Raporlanan Kapsam 2 Emisyonu)	GES üretimi nedeniyle tüketim sıfır → sadece kompresör tüketimi raporlanır	108.864	108,86

- **Net Şebekeden Elektrik Tüketimi Emisyonu:** 2024 yılı boyunca tesisin elektrik ihtiyacının tamamı şirket bünyesindeki Güneş Enerjisi Santrali (GES) tarafından karşılandığından, şebekeden çekilen net elektrik miktarı sıfır olarak kaydedilmiştir. Bu durum, SGE Protokolü ve ISO 14064 standartları doğrultusunda, bu kaynaktan kaynaklanan Kapsam 2 emisyonlarının 0 kg CO₂e olduğunu göstermektedir.
- **Kaçınılan Emisyonlar:** GES'in toplam üretimi (2.162.701 kWh), tesisin elektrik ihtiyacını fazlasıyla karşılamıştır. Bu üretimden kaynaklanan potansiyel kaçınılan emisyon miktarı, 0,42 kg CO₂e/kWh emisyon faktörü kullanılarak 908.334 kg CO₂e (veya 908,33 ton CO₂e) olarak hesaplanmıştır. GHG Protokolü'ne göre raporlanan Kapsam 2 emisyonlarına dahil edilmese de, bu değer firmanın çevresel katkısını gösteren önemli bir performans göstergesidir.
- **Elektrikli Ekipman (Kompresör) Emisyonları:** Üretim süreçlerinde kullanılan kompresörlerin tahmini yıllık tüketimleri (259.200 kWh), 0,42 kg CO₂e/kWh emisyon faktörü ile çarpılarak 108.864 kg CO₂e (veya 108,86 ton CO₂e) olarak hesaplanmıştır. Bu emisyonlar, doğrudan operasyonel ekipman kullanımından kaynaklanan dolaylı emisyonları temsil etmektedir.
- **Toplam Raporlanan Kapsam 2 Emisyonu:** Şebekeden net elektrik alımı olmaması nedeniyle, raporlanan toplam Kapsam 2 emisyonu, kompresör tüketiminden kaynaklanan emisyonlarla sınırlı kalmış ve 108.864 kg CO₂e (108,86 ton CO₂e) olarak belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular, firmanın 2024 yılındaki Kapsam 2 emisyon yönetimi stratejisinin iki ana boyutta incelenmesini sağlamaktadır. İlk olarak, tesisin kendi GES sistemi aracılığıyla elektrik ihtiyacının tamamını karşılaması, şebekeden kaynaklanan Kapsam 2 emisyonlarını teorik olarak sıfırlamıştır. Bu başarı, firmanın yenilenebilir enerjiye yatırım yaparak karbon ayak izini azaltma konusundaki kararlılığının ve operasyonel bağımsızlığının somut bir göstergesidir. Şebekeden bağımsız enerji tedariki, geleneksel fosil yakıt bazlı elektrik üretiminden kaynaklanan dolaylı emisyonları doğrudan ortadan kaldırmaktadır. Bu durum, bir kurumun çevresel performansını değerlendirirken "önlenebilir emisyonlar" kavramının önemini de vurgulamaktadır; zira 908,33 ton CO₂e'lik kaçınılan emisyon, firmanın iklim değişikliğiyle mücadeleye sunduğu kayda değer katkıyı gözler önüne sermektedir. İkinci olarak, üretim proseslerinde kullanılan elektrikli kompresörlerin tüketiminden kaynaklanan 108,86 ton CO₂e emisyonunun raporlanması,

Kapsam 2 hesaplamalarının nüansını ortaya koymaktadır. Kendi yenilenebilir kaynaklarından sağlanan elektrikle çalışan bu ekipmanların emisyon faktörü üzerinden hesaplanması, lokasyon tabanlı bir yaklaşımın benimsendiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, tüketilen elektriğin (kaynağı ne olursa olsun) bölgesel şebeke emisyon yoğunluğu ile ilişkilendirilmesini gerektirir. Dolayısıyla, firmanın kendi elektriğini üretmesine rağmen, bu elektriğin kullanıldığı operasyonel süreçlerin çevresel etkisinin raporlanması, emisyon şeffaflığı ve uluslararası raporlama standartlarına uyum açısından büyük öneme sahiptir. Bu bulgu, firmanın operasyonel verimlilik ve enerji yönetimi stratejilerini sürekli geliştirmesi gerektiğini, zira iç tüketimden kaynaklanan emisyonların hala Kapsam 2'nin önemli bir bileşeni olduğunu işaret etmektedir.

4.3.4. Kapsam 3: Diğer dolaylı emisyonlar

Kapsam 3 emisyonları, bir kuruluşun değer zincirinde meydana gelen diğer tüm dolaylı emisyonları kapsar. Bu emisyonlar, Kapsam 1 ve Kapsam 2'ye dahil olmayan ve şirketin faaliyetlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkan, ancak şirketin doğrudan sahip olmadığı veya kontrol etmediği kaynaklardan meydana gelen emisyonlardır. Genellikle bir şirketin toplam emisyonlarının en büyük kısmını oluşturur ve en karmaşık olanıdır.

Tedarik Zinciri Taşımacılığının Emisyonlara Etkisi

Bu bölümde, incelenen firmanın 2024 yılına ait Kapsam 3.1 kategorisi altında yer alan, girdi malzemelerinin ve sermaye mallarının şirkete taşınması sırasında oluşan sera gazı emisyonları değerlendirilmiştir. Bu kategori, firmanın doğrudan kontrolü dışındaki, ancak değer zincirinde meydana gelen dolaylı emisyonları kapsar. Hesaplamalar, uluslararası kabul görmüş metodolojiler ve güncel emisyon faktörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm girdiler için taşıma faaliyetleri karayolu ile gerçekleştirilmiş olup, tedarik noktaları Türkiye'nin çeşitli şehirleridir.

Yıllık Toplam Emisyon Hesaplaması:

Taşımacılık kaynaklı emisyonlar, ürün bazında taşınan yıllık miktar (ton), ortalama taşıma mesafesi (km), taşıma aracı türü ve yıllık sefer sayıları dikkate alınarak belirlenmiştir. Araç türüne göre ortalama emisyon faktörleri aşağıdaki gibi kabul edilmiştir:

- **Kamyon:** 0,15 kg CO₂e/ton-km
- **Kamyonet:** 0,18 kg CO₂e/ton-km
- **Binek otomobil:** 0,20 kg CO₂e/ton-km

Tablo 4.13. Taşımacılık kaynaklı emisyonlar (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Taşınan Malzeme	Taşınan Miktar (ton)	Mesafe (km)	Araç Türü	Sefer Sayısı	Emisyon Faktörü (kg C ₂ H ₆ /ton-km)	Toplam SGE (tCO ₂ e)
Cam	300,0	450	Kamyon	10	0,15	202,50
PVC Profil	50,0	500	Kamyon	4	0,15	15,00
Vida Grubu	2,0	15	Kamyonet	10	0,18	0,05
PVC Aksesuar	3,0	15	Kamyonet	8	0,18	0,06
Alüminyum Profil	40,0	600	Kamyon	5	0,15	18,00
Alüminyum Conta	5,0	600	Kamyonet	3	0,18	1,62
Silikon, Butil, Nem Alıcı	3,0	450	Kamyon	2	0,15	0,41
Makine Yedek Parça	1,0	500	Kamyonet	1	0,18	0,09
Elektrik Malzemeleri	0,5	20	Binek Otomobil	5	0,20	0,01
Kırtasiye ve Ambalaj	0,2	20	Binek Otomobil	5	0,20	0,00

Bu kapsamlı hesaplamalar sonucunda, firmanın 2024 yılı girdi malzemeleri ve sermaye mallarının taşınmasına bağlı toplam sera gazı emisyonu: 238,74 ton CO₂ es, değeri (tCO₂e) olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.13). Bu değer, DEFRA (2023) veri tabanından alınan ve tüm taşıma araçlarının dizel yakıtlı olduğu varsayılan emisyon faktörlerine dayanmaktadır. Metodoloji, IPCC 2006 Rehberi'ne ve Türkiye taşımacılık sektörünün mevcut araç profiline uygun olarak belirlenmiştir.

Emisyon Faktörü (DEFRA 2023 + TÜBİTAK Uyumlu)

Araç Türü Emisyon Faktörü (kg CO₂e/km)

Kamyon 0,271

Hesaplama Formülü

Toplam Emisyon (kg CO₂e)=Mesafe (km)×0,271
Toplam Emisyon (kg CO₂e)=Mesafe (km)×0,271

Tablo 4.14. *Girdi malzemelerinin sera gazı emisyonları (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)*

Girdi Malzemesi	Tedarik Yeri	Tahmini Mesafe (km)	Taşıma Aracı	Emisyon (kg CO ₂ e)
Cam (Ana Mamül)	Mersin	540	Kamyon	$540 \times 0,271 = 146,34$
Emcepren / Poliüretan	Ankara	720	Kamyon	$720 \times 0,271 = 195,12$
Butil	Ankara	720	Kamyon	$720 \times 0,271 = 195,12$
Nem Alıcı	Eskişehir	870	Kamyon	$870 \times 0,271 = 235,77$

Toplam Kapsam 3.1 Emisyonu:

$$146,34 + 195,12 + 195,12 + 235,77 = 772,35 \text{ kg CO}_2\text{e} (= 0,77 \text{ ton CO}_2\text{e})$$

Tablo 4.14, girdi malzemelerinin birim sevkiyat bazında taşınmasından kaynaklanan toplam 0,77 ton CO₂e emisyonu, firmanın tedarik zinciri lojistiğinin çevresel etkisini nicel olarak ortaya koymaktadır. Bu sonuç, tedarikçi coğrafyasının ve taşıma modunun karbon ayak izi üzerindeki doğrudan etkisini vurgulamaktadır.

Atık Yönetiminin Emisyon Profili

Bu bölüm, incelenen firmanın faaliyetleri sonucunda oluşan katı atıkların bertaraf süreçlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını SGE Protokolü'nün Kapsam 3, Kategori 5 sınıflandırması altında değerlendirmektedir (Tablo 4.15). Emisyonlar, atık türüne ve uygulanan bertaraf yöntemine göre belirlenmiştir.

Kapsam ve Yöntem

Hesaplamalar, SGE Protokolü'ne uygun olarak, atıkların bertaraf yönteminin emisyonlar üzerindeki belirleyici etkisi dikkate alınarak yapılmıştır. Firmanın oluşturduğu atıkların ağırlıklı olarak geri dönüşüm yoluyla bertaraf edildiği varsayılmıştır. Bu varsayımın firma verileriyle doğrulanması gerekmektedir. Emisyon faktörleri olarak, DEFRA (UK Department for Environment, Food & Rural Affairs) 2023 yılına ait ortalama değerler kullanılmıştır.

Kullanılan Emisyon Faktörleri:

Tablo 4.15. *Atık emisyon faktörleri (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)*

Atık Türü	Bertaraf Türü	Emisyon Faktörü (kg CO ₂ e / kg)	Kaynak
PVC	Geri dönüşüm	0,015	DEFRA 2023
Alüminyum	Geri dönüşüm	0,020	DEFRA 2023
Cam	Geri dönüşüm	0,002	DEFRA 2023
Karton	Geri dönüşüm	0,008	DEFRA 2023

Hesaplama Formülü:

Toplam Emisyon (kg CO₂e)=Atık Miktarı (kg)×Emisyon Faktörü (kg CO₂e / kg)

Geri Dönüşüm Süreçlerinin Emisyonlara Katkısı

Tablo 4.16’da belirtilen atık türlerinin miktarları ve ilgili emisyon faktörleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sunulmuştur:

Tablo 4.16. *Atık sera gazı emisyonları (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)*

Atık Türü	Miktar (kg)	Emisyon Faktörü (kg CO ₂ e/kg)	Hesaplanan Emisyon (kg CO ₂ e)
PVC	2.200	0,015	33,0
Alüminyum	5.000	0,020	100,0
Cam	240.000	0,002	480,0
Karton	100	0,008	0,8
Toplam			613,8

Toplam Kapsam 3.5 Emisyonu (Atık Bertarafından): 613,8 kg CO₂e (veya 0,61 ton CO₂e)

Ürün ve Atık Nakliyesinin Emisyonlara Etkisi

Bu alt başlıkta, firmanın üretim faaliyetleri sonucunda oluşan atıkların bertaraf veya geri dönüşüm tesislerine taşınması sürecinde meydana gelen sera gazı emisyonları hesaplanmıştır. Ürünlerin müşterilere sevkiyatına ilişkin özel veri elde edilemediğinden, bu kısımda yalnızca atıkların taşınması değerlendirilmiştir.

Kapsam ve Yöntem

2024 yılı içerisinde oluşan atıklar PVC, alüminyum, demir, karton, ahşap ve naylon gibi çeşitli malzemelerden oluşmaktadır. Bu atıklar, tesis dışındaki bertaraf veya geri kazanım tesislerine karayolu aracılığıyla taşınmaktadır. Taşımalar kısa mesafeli olup, ortalama **10 km** olarak kabul edilmiştir. Tüm taşıma işlemleri, DEFRA (2023) veri tabanına göre kamyonet tipi dizel araçlar için ortalama emisyon faktörü olan **0,18 kg CO₂e/ton-km** kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Hesaplama Formülü:

Toplam SGE (tCO₂e)=Miktar (ton)×Mesafe (km)×Emisyon Faktörü (kg CO₂e/ton-km)

Atık Türlerine Göre Taşıma Emisyonları:

Tablo 4.17’de atık türlerine göre taşınan miktar, mesafe, araç tipi ve emisyon faktörleri dikkate alınarak hesaplanan sera gazı emisyonları sunulmuştur:

Tablo 4.17. Atık türlerine göre taşıma kaynaklı sera gazı emisyonları (**Kaynak:** Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Atık Cinsi	Miktar (kg)	Miktar (ton)	Mesafe (km)	Araç Türü	Emisyon Faktörü (kg CO ₂ e/ton-km)	Toplam SGE (tCO ₂ e)
PVC	2.200	2,2	10	Dizel Kamyonet	0,18	0,00396
Alüminyum	5.000	5,0	10	Dizel Kamyonet	0,18	0,00900
Cam	0	0,0	10	Dizel Kamyonet	0,18	0,00000
Karton	100	0,1	10	Dizel Kamyonet	0,18	0,00018
Demir	5.000	5,0	10	Dizel Kamyonet	0,18	0,00900
Ahşap	300	0,3	10	Dizel Kamyonet	0,18	0,00054
Naylon	50	0,05	10	Dizel Kamyonet	0,18	0,00009

Personel Ulaşımının Emisyon Profili

Bu bölümde, firmanın 2024 yılı boyunca personel taşımacılığı faaliyetlerinden kaynaklanan dolaylı sera gazı emisyonları, SGE Protokolü'nün **Kapsam 3, Kategori 6 (Çalışan İşe Gidiş-Gelişleri)** kapsamında değerlendirilmiştir.

Kapsam ve Yöntem

Firmanın Paşaköşkü ve Çevreyolu hatlarında kullandığı dizel yakıtlı servis araçları (Mercedes-Benz Sprinter 316 CDI, IVECO E29 14 FX KLM ve Otokar Sultan modelleri) bu kapsamda incelenmiştir. Emisyon hesaplamaları için iki farklı yaklaşım sunulmaktadır:

- 1. Mesafe Tabanlı Yaklaşım (DEFRA 2023):** Bu yaklaşımda, her bir aracın aylık toplam katettiği kilometre (gidiş + dönüş) baz alınmış ve DEFRA 2023 veri tabanına göre dizel minibüsler için önerilen 0,180 kg CO₂e/km emisyon faktörü kullanılmıştır. Bu, IPCC 2006 Kılavuzları ve DEFRA 2023 kılavuzlarında önerilen "faaliyet temelli" (activity-based) hesaplama yöntemine uygundur. Araçlara ait model, motor hacmi ve kilometre verileri doğrudan sahadan temin edilerek hesaplamalar özgünleştirilmiştir (Tablo 4.18).

Tablo 4.18. *KM bazlı servis araçlarından kaynaklı sera gazı emisyonları (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)*

	Hat	Araç Modeli	Ay	Vakit	Aylık Yapılan KM	Toplam SGE (tCO ₂ e)
1	Paşaköşkü	Sprinter 316 CDI	Ocak	Dizel	384	0.1591
2	Çevreyolu	IVECO E 29 14 FX	Ocak	Dizel	1092	0.1966
3	Paşaköşkü	Sprinter 316 CDI	Şubat	Dizel	850	0.153
4	Çevreyolu	IVECO E 29 14 FX	Şubat	Dizel	1050	0.189
5	Paşaköşkü	Sprinter 316 COI	Man	Dizel	384	0.1591
6	Çevreyolu	IVECO E 29 14 FX	Mart	Dizel	1092	0.1966
7	Paşaköşkü	Sprinter 316 COI	Nisan	Dizel	714	0.1235
8	Çevreyolu	IVECO E 29 14 FX	Nisan	Dizel	882	0.1588
9	Paşaköşkü	Sprinter İ16 COI	Mayıs	Dizel	884	0.1591
10	Çevreyolu	IVECO E 29 14 FX	Mayıs	Dizel	1092	0.1966
11	Paşaköşkü	Sprinter 316 CDI	Haziran	Dizel	680	0.1224

Tablo 4.18. (Devam) KM bazlı servis araçlarından kaynaklı sera gazı emisyonları (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

12	Çevreyolu	IVECO E 29 14 FX	Haziran	Dizel	840	0.1512
13	Paşaköşkü	Sprinter 316 CDI	Temmuz	Dizel	884	0.1591
14	Çevreyolu	IVECO E 29 14 FX	Temmuz	Dizel	1092	0.1966
15	Paşaköşkü	Sprinter 316 COI	Ağustos	Dizel	850	0.153
16	Çevreyolu	IVECO E 29 14 FX	Ağustos	Dizel	1050	0.189
17	Paşaköşkü	Sprinter 316 COI	Eylül	Dizel	884	0.1591
18	Çevreyolu	IVECO E 29 14 FX	Eylül	Dizel	1092	0.1966
19	Paşaköşkü	Sprinter 316 COI	Ekim	Dizel	884	0.1591
20	Çevreyolu	IVECO E 29 14 FX	Ekim	Dizel	1092	0.1966
21	Paşaköşkü	Sprinter 316 CDI	Kasım	Dizel	884	0.1591
22	Çevreyolu	IVECO E 29 14FX	Kasım	Dizel	1092	0.1966
23	Paşaköşkü	Sprinter 316 COI	Aralık	Dizel	884	0.1591
24	Çevreyolu	Otokar Sultan	Aralık	Dizel	1092	0.1966

2. Yakıt Tüketimi Tabanlı Yaklaşım (IPCC 2006 + DEFRA 2023): Bu yaklaşımda, araçların yakıt türü (dizel) ve Türkiye'deki dizel minibüs/otobüsler için varsayılan ortalama yakıt tüketimi (11 L / 100 km) ile IPCC 2006 Kılavuzları ve DEFRA 2023 veri tabanı uyumlu emisyon faktörü (2,68 kg CO₂e / litre) kullanılarak emisyonlar hesaplanmıştır (Tablo 4.19).

Tablo 4.19. Yakıt bazlı servis araçlarından kaynaklı sera gazı emisyonları (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Parametre	Değer	Kaynak / Açıklama
Yakıt türü	Dizel	Araç verilerinden (Mercedes-Benz, Iveco, Otokar) alınmıştır
Varsayılan yakıt tüketimi	11 L / 100 km	Türkiye'de dizel minibüs/otobüsler için ortalama değer (TÜBİTAK, DEFRA, IPCC 2006 referanslı)
Emisyon faktörü	2,68 kg CO ₂ e / litre	IPCC 2006 Guidelines + DEFRA 2023 veritabanı uyumlu
Emisyon formülü	$(\text{Km} \times 11 / 100) \times 2,68$	Yakıt tüketimi $\times$ emisyon faktörü

Tablo 4.20. Servis araçlarından kaynaklı sera gazı emisyonları (**Kaynak:** Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Ay	Toplam Yapılan Km	Yakıt Tüketimi (Litre)	Emisyon (kg CO ₂ e)	Emisyon (ton CO ₂ e)
Ocak	1.976	217,36	582,52	0,583
Şubat	1.900	209,00	560,12	0,560
Mart	1.976	217,36	582,52	0,583
Nisan	1.596	175,56	470,50	0,471
Mayıs	1.976	217,36	582,52	0,583
Haziran	1.520	167,20	447,06	0,447
Temmuz	1.976	217,36	582,52	0,583
Ağustos	1.976	217,36	582,52	0,583
Eylül	1.900	209,00	560,12	0,560
Ekim	1.976	217,36	582,52	0,583
Kasım	1.976	217,36	582,52	0,583
Aralık	1.976	217,36	582,52	0,583
TOPLAM	23.624	2.598,84	6.968,47	6,97

Hesaplama Formülleri

- **Mesafe Tabanlı:** SGE (ton CO₂e)= $\sum(\text{Yıllık km} \times 0,180 \text{ kg CO}_2\text{e/km}) \div 1000$
- **Yakıt Tüketimi Tabanlı:** Emisyon (kg CO₂e)=(Km $\times$ 11/100) $\times$ 2,68

İş Seyahatlerinin Karbon Ayak İzine Etkisi

Bu bölümde, firma çalışanlarının iş amaçlı gerçekleştirdikleri seyahatler sırasında ortaya çıkan sera gazı emisyonları, SGE Protokolü'nün **Kapsam 3, Kategori 7** kapsamında değerlendirilmiştir (Tablo 4.20). Bu kategori, uçak, tren, otobüs, özel araç gibi ulaşım türlerinin yanı sıra konaklama (otel) sırasındaki enerji kullanımından kaynaklanan dolaylı emisyonları da içerir.

Kapsam ve Yöntem

Hesaplamalar, şehirlerarası karayolu seyahatleri ve otel konaklamalarına odaklanmıştır. Her şehirlerarası seyahat için ortalama mesafe dikkate alınmış, konaklamalarda ise otel yıldız sayısına göre enerji tüketimi tahmini yapılmıştır.

Ulaşım Emisyonları (Karayolu)

Karayolu seyahatlerinden kaynaklanan emisyonlar, her şehirlerarası mesafe ile belirli bir emisyon faktörünün çarpılmasıyla hesaplanmıştır.

- **Emisyon Faktörü:** 0,158 kg CO₂e/km (otomobil/dizel, DEFRA 2023)

- **Mesafeler:** Türkiye Karayolları verileri veya Google Maps ortalamaları kullanılmıştır.

Konaklama Emisyonları

Tablo 4.21’de konaklama emisyonları, otelin yıldız sayısına göre konaklama başına varsayılan ortalama enerji tüketimi üzerinden belirlenmiştir.

Tablo 4.21. Otel konaklama emisyon faktörleri (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Yıldız Sayısı	Emisyon Faktörü (kg CO ₂ e/konaklama)	Kaynak
3 Yıldız	13	Hotel Carbon Measurement Initiative
4 Yıldız	20	HCME
5 Yıldız	33	HCME

Emisyon Tablosu

Tablo 4.22’de şehir bazında karayolu yolculukları ve otel konaklamalarından kaynaklanan detaylı emisyon değerlerini sunmaktadır:

Tablo 4.22. İş seyahatlerinden kaynaklanan detaylı emisyonlar (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Şehir	Tahmini Mesafe (km)	Yolculuk Emisyonu (kg CO ₂ e)	Konaklama Sayısı	Otel Yıldızı	Konaklama Emisyonu (kg CO ₂ e)
Malatya–Sivas	240	240×0,158=37,92	1	3 Yıldız	13
Sivas–Amasya	200	200×0,158=31,60	1	3 Yıldız	13
Amasya–Samsun	130	130×0,158=20,54	1	3 Yıldız	13
Samsun–Ordu	150	150×0,158=23,70	2	3 Yıldız	2×13=26

Toplam Emisyonlar (Kapsam 3.7)

Hesaplamalar sonucunda, 2024 yılına ait iş seyahatlerinden kaynaklanan toplam emisyonlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- **Toplam Ulaşım Emisyonu:** 37,92+31,60+20,54+23,70=113,76 kg CO₂e
- **Toplam Konaklama Emisyonu:** 13+13+13+26=65,00 kg CO₂e

Genel Toplam Kapsam 3.7 Emisyonu: 113,76+65,00=178,76 kg CO₂e

Bu değer, yaklaşık 0,18 ton CO₂e olarak raporlanmıştır.

Ziyaretçi ve Müşteri Ulaşımının Emisyonlara Katkısı

Ziyaretçilerin ve müşterilerin firmaya olan ulaşım faaliyetleri, dolaylı sera gazı emisyonlarına katkıda bulunsa da bu çalışmada söz konusu emisyonlar hesaplamalara dahil edilmemiştir. Bu durum, veri toplama kısıtlamaları veya belirlenen raporlama sınırları nedeniyle olabilir. Gelecekteki değerlendirmelerde, bu kategorinin de envantere dahil edilmesi, şirketin toplam karbon ayak izinin daha kapsamlı bir görünümünü sunacaktır.

Tedarik ve Saha Ziyaretleri

Bu bölümde, firma çalışanlarının Türkiye içinde gerçekleştirdikleri iş seyahatlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları analiz edilmiştir. Bu emisyonlar, SGE Protokolü'nün **Kapsam 3, Kategori 6 (İş Seyahatleri)** altında değerlendirilmektedir.

Kapsam ve Yöntem

Çalışanların 2024 yılındaki iş seyahatlerine ilişkin seyahat tarihleri, konaklama gün sayısı, ulaşılan şehirler ve otel bilgileri gibi veriler derlenmiştir. Bu kapsamda toplam 96 adet seyahat gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Tüm ulaşım şekli için uçak – kısa mesafe – ekonomi sınıfı varsayımı yapılmıştır.

Hesaplama Varsayımları:

- **Ulaşım Türü:** Uçak (Kısa Mesafe – Ekonomi Sınıfı)
- **Ortalama Tek Yön Uçuş Mesafesi:** 650 km
- **Gidiş–Dönüş Mesafesi:** 1.300 km
- **Seyahat Sayısı:** 96 adet
- **Emisyon Faktörü:** 0,15845 kg CO₂e/km (DEFRA 2023 – Short-haul, economy class)

Hesaplamalar ve Bulgular

İş seyahatlerinden kaynaklanan toplam emisyonlar aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır:

- **Toplam Uçuş Mesafesi:** Toplam Uc,us,
Mesafesi=Seyahat Sayısı×Ortalama Gidiş,-Doşnuş,s, Mesafesi Toplam Uc,us,
Mesafesi=96×1.300 km=124.800 km

- **Toplam Emisyon:** Toplam Emisyon (kg CO₂e)=Toplam Uç,us,
Mesafesi×Emisyon Fakto“ru”Toplam Emisyon (kg CO₂e)=124.800 km×0,15845
kg CO₂e/km=19.772 kg CO₂e

Bu değ er, yaklaşık 19,77 ton CO₂ es,degeri (tCO₂e) olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.23. Kapsam bazlı sera gazı emisyonları (Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Kategori	Alt Kategori	Açıklama	Kullanılan FV (Faaliyet Verisi)
1 – Kapsam 1	1.1 Sabit Yakma	Isıtma amaçlı doğalgaz kullanımı	Doğalgaz tüketimi (m ³), yoğunluk, NKD
	1.2 Mobil Yakma	Araçlarda kullanılan dizel, benzin, LPG (on-road / off-road)	Yakıt tüketimi (ton), NKD, EF
	1.3 Endüstriyel Süreçler	Cam kesimi vb. (kimyasal reaksiyon yok)	– (emisyon oluşmadığı için)
	1.4 Antropojenik Sızıntılar	Klima gazı sızıntısı (R410A ve R32)	Cihaz sayısı, gaz miktarı, sızıntı oranı, KIP
	1.5 Arazi Kullanımı ve Değişikliği	Tesis arazisi imarlı, değişiklik yok	– (emisyon oluşmadığı için)
2 – Kapsam 2	2.1 İthal Elektrik	Şebekeden alınan elektrik tüketimi	Elektrik tüketimi (kWh), EF
3 – Kapsam 3	3.1 Girdi Malzemeleri ve Sermaye Malları Taşımacılığı	Cam, PVC, vida, alüminyum vb. girdilerin kara yoluyla taşınması	Taşınan malzeme (ton), mesafe (km), taşıma aracı, EF
	3.2 Atık Taşımacılığı	PVC, Alüminyum, Demir, Karton, Ahşap, Naylon atıkların taşınması	Atık miktarı (kg), mesafe (km), taşıma aracı, EF
	3.3 Personel Ulaşımı	Servis araçlarıyla iş e gidiş-geliş	Aylık km, araç modeli, EF (minibüs, dizel)
	3.4 Ziyaretçi ve Müşteri Ulaşımı	Veri yok – kayıt alınmamış	– (kayıt olmadığı için hesaplanmamış)
	3.5 İş Seyahatleri	96 adet uçak seyahati (kısa mesafe, ekonomi sınıfı)	Seyahat sayısı, ortalama km, EF (uçak, kısa mesafe, ekonomi)

Analizler sonucunda, tesisin 2024 yılına ait toplam sera gazı emisyonu 417,86 ton CO₂ eşdeğ eri (tCO₂e) olarak belirlenmiştir. Bu toplam emisyonun kapsam bazında dağılımı ve öne çıkan bulgular aşağıda özetlenmiştir (Tablo 4.23):

Kapsam 1: Doğrudan Emisyonlar (86,26 ton CO₂e)

Kapsam 1 emisyonları, tesisin kendi kontrolündeki kaynaklardan kaynaklanmaktadır. Bu kapsamdaki en belirgin kaynaklar ve emisyon miktarları ş unlardır:

- Taşıtlardan Kaynaklı Yakıt Tüketimi (Mobil Yakma): 77,96 ton CO₂e ile Kapsam 1 emisyonlarının yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır. Bu durum, tesisin doğrudan

emisyollarındaki en büyük payın lojistik ve saha içi mobil ekipman kullanımlarından kaynaklandığını açıkça göstermektedir.

- Sabit Tesislerde Doğalgaz Kullanımı: Isıtma amacıyla tüketilen doğalgazdan kaynaklanan emisyonlar, farklı hesaplama yaklaşımlarına göre 1,34 ila 4,35 ton CO₂e arasında değişmekle birlikte, raporda 1,69 ton CO₂e olarak belirtilmiştir. Bu miktar, mobil yakmaya kıyasla daha düşük bir orana sahiptir.
- Klima ve Soğutucu Gaz Kaçakları: İklimlendirme sistemlerindeki R32 ve R410A gibi soğutucu gazların kaçakları sonucunda 6,57 ton CO₂e emisyon oluştığu hesaplanmıştır. Özellikle yüksek Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) değerine sahip R410A gazı bu kategori içinde önemli bir yer tutmaktadır.
- Yangın Söndürme Tüpleri ve Endüstriyel Süreçler: Yangın söndürme tüplerinden (kuru tozlu ve CO₂ tüpleri biyogenik kabul edildiği için) ve cam kesimi, temperleme gibi endüstriyel süreçlerden herhangi bir sera gazı emisyonu oluşturmadığı tespit edilmiştir.
- Arazi Kullanımı Değişikliği: Tesisin sanayi bölgesinde yer alması ve 2024 yılı içinde arazi kullanımında değişiklik veya karbon yutaklarını etkileyecek bir faaliyet olmaması nedeniyle bu kategoriden emisyon oluşturmamıştır.

Kapsam 1 emisyonlarının toplamda 86,26 ton CO₂e olması, mobil kaynaklı emisyonların azaltılmasına yönelik stratejilerin önceliklendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Kapsam 2: Dolaylı Enerji Emisyonları (108,86 ton CO₂e)

Kapsam 2 emisyonları, tesisin satın aldığı elektrikten kaynaklanan dolaylı emisyonlardır. Bu kapsamdaki bulgular, tesisin enerji yönetimi yaklaşıımının çevresel etkisini net bir şekilde ortaya koymuştur:

- İthal Elektrik Tüketimi (şebekeden): Tesisin kendi bünyesindeki güneş enerjisi santrali (GES) sayesinde 2024 yılı boyunca şebekeden hiç elektrik çekmediği ve tüm ihtiyaını GES'ten karşıladığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, şebekeden kaynaklanan Kapsam 2 emisyonu 0 kg CO₂e olarak raporlanmıştır. Bu, yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımın karbon ayak izini doğrudan sıfırlamadaki başarısını göstermektedir.
- Kaçınılan Emisyonlar: GES'in toplam üretimi (2.162.701 kWh), tesis ihtiyaını fazlasıyla karşılamış ve yaklaşık 908,33 ton CO₂e emisyonun önüne geçmiştir. Bu

değer, GHG Protokolü'ne göre raporlanan Kapsam 2'ye dahil edilmese de, firmanın çevresel katkısının önemli bir göstergesidir.

- Elektrikli Ekipman (Kompresör) Tüketimi: Üretim süreçlerinde kullanılan kompresörlerin tahmini yıllık elektrik tüketiminden (259.200 kWh) kaynaklanan 108,86 ton CO₂e emisyon, Kapsam 2'nin önemli bir bileşenini oluşturmaktadır. Bu emisyonlar, tesisin kendi ürettiği elektrikle çalışsa bile, lokasyon tabanlı yaklaşımla bölgesel şebeke emisyon faktörü kullanılarak raporlanmıştır. Bu durum, operasyonel verimlilik ve enerji yönetimi stratejilerinin sürekli gelişiminin önemini vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, tesisin GES yatırımı sayesinde şebekeden kaynaklanan Kapsam 2 emisyonları sıfırlanmış, ancak kompresör gibi enerji yoğun ekipmanların tüketimi hala önemli bir Kapsam 2 yükü oluşturmaktadır.

Kapsam 3: Diğer Dolaylı Emisyonlar (238,74 ton CO₂e)

Kapsam 3 emisyonları, tesisin değer zincirindeki diğer dolaylı emisyonları kapsar. Bu çalışmada, girdi malzemeleri ve sermaye mallarının taşınmasından kaynaklanan emisyonlar değerlendirilmiştir:

- Girdi Malzemelerinin ve Sermaye Mallarının Taşınması: Tüm girdilerin karayolu ile taşınmasından kaynaklanan toplam 238,74 ton CO₂ eşdeğeri emisyon hesaplanmıştır. Bu değer, tesisin toplam karbon ayak izinin önemli bir bölümünü oluşturmakta ve tedarik zinciri emisyonlarının yönetimi için stratejik bir alan olduğunu göstermektedir.

Tez bulguları, incelenen üretim tesisinin sera gazı emisyonlarının büyük ölçüde Kapsam 3 (tedarik zinciri taşımacılığı) ve Kapsam 1 (mobil yakıt tüketimi) kaynaklarından geldiğini göstermektedir. Tesisin GES yatırımı sayesinde şebekeden kaynaklanan Kapsam 2 emisyonlarını sıfırlaması dikkat çekici bir başarıdır ve yenilenebilir enerji entegrasyonunun çevresel faydalarını somutlaştırmaktadır. Ancak, enerji yoğun kompresörlerin elektrik tüketiminden kaynaklanan Kapsam 2 emisyonları ile tedarik zincirindeki taşımacılıktan kaynaklanan Kapsam 3 emisyonları, gelecekteki azaltım stratejileri için odaklanılması gereken başlıca alanlardır. Bu envanter çalışması, tesisin çevresel performansını izlemek, paydaşlara şeffaflık sağlamak ve daha sürdürülebilir bir geleceğe yönelik karbon azaltım yol haritasını belirlemek adına bilimsel bir temel sunmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Sanayi Devrimi ile birlikte artan endüstriyel faaliyetler, doğal kaynak kullanımını hızlandırmış ve sera gazı (SGE) emisyonlarında önemli artışlara yol açmıştır (IPCC, 2021). Bu durum, günümüzde küresel ölçekte karşı karşıya kalınan en önemli çevresel sorunlardan biri olan iklim değişikliğinin başlıca nedenleri arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, yüksek enerji tüketimi ve karbon salımıyla karakterize edilen cam temperleme ve alüminyum profil üretim süreçleri, sürdürülebilir üretim anlayışı çerçevesinde dikkatle değerlendirilmesi gereken sektörler arasında öne çıkmaktadır.

Bu yüksek lisans çalışması, Malatya'da faaliyet gösteren bir üretim tesisinde 2024 yılına ait sera gazı emisyonlarının sistematik olarak izlenmesi, hesaplanması ve değerlendirilmesi yoluyla söz konusu endüstriyel süreçlerin karbon ayak izine etkisini kapsamlı biçimde analiz etmektedir. ISO 14064-1:2018 standardı, IPCC 2006 Rehberleri, SGE Protokolü ve DEFRA 2023 gibi uluslararası kabul görmüş metodolojiler referans alınarak yapılan emisyon hesaplamaları, hem doğrudan (Kapsam 1) hem de dolaylı (Kapsam 2 ve Kapsam 3) emisyon kaynaklarını bütüncül bir yaklaşımla ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, üretim tesisinin en yüksek karbon salımının Kapsam 3 (238,74 ton CO₂e) ve Kapsam 1 (86,26 ton CO₂e) kaynaklı olduğunu ortaya koymuştur. Kapsam 1 emisyonlarının büyük bir kısmı, taşıtlardan kaynaklanan yakıt tüketiminden meydana gelmektedir. Bu durum, tesisin lojistik faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonları azaltmak için alternatif yakıt teknolojileri, elektrikli araçlar ya da taşıma güzergâhlarının optimizasyonu gibi stratejilerin aciliyetini ortaya koymaktadır (Schmidt, Huenteler & Kittner, 2019).

Kapsam 2 emisyonları ise (108,86 ton CO₂e), firmanın kendi bünyesindeki güneş enerjisi santrali (GES) sayesinde şebekeden elektrik çekilmediği için sıfıra indirgenmiştir. Bu durum, yenilenebilir enerji kullanımının karbon ayak izini azaltmadaki doğrudan etkisini ortaya koymakta ve örnek bir uygulama teşkil etmektedir (IEA, 2022). Ancak yine de enerji yoğun proses ekipmanlarının (örneğin kompresörler) tükettiği elektrik üzerinden yapılan konum-temelli değerlendirme, 108,86 ton CO₂e dolaylı emisyonu işaret etmektedir. Bu bulgu, yalnızca enerji kaynağının değil, enerji tüketim verimliliğinin de sürdürülebilirlik açısından önemli olduğunu göstermektedir.

Cam temperleme süreci özelinde yapılan analiz, bu işlemin yüksek sıcaklık ve hızlı soğutma aşamaları nedeniyle ciddi düzeyde enerji tükettiğini ve buna bağlı olarak önemli

karbon salımına yol açtığını ortaya koymuştur. Literatürde, hava jetlerinin optimizasyonu, nozül geometrisinin iyileştirilmesi ve soğutma sistemlerine su buharı entegre edilmesi gibi yöntemlerin enerji verimliliğini %30–50 oranında artırabileceği belirtilmektedir (Chen, Zhang, Liu & Li, 2020; Zhang & Guo, 2021). Aynı şekilde, prosesin otomatik kontrol sistemleriyle dijitalleştirilmesi, enerji israfını azaltarak üretim sürecinde çevresel yükün düşürülmesini sağlayabilir.

Alüminyum profil üretim sürecinde ise eritme ve ekstrüzyon gibi yüksek sıcaklık gerektiren işlemler, enerji tüketiminin ve dolayısıyla karbon emisyonlarının temel kaynağıdır. Çalışma kapsamında incelenen üretim tesisinde, alüminyumun birincil üretim yerine hurdadan geri dönüşüm yoluyla temin edilmesinin, karbon ayak izinin önemli ölçüde düşürülmesi açısından stratejik bir rol oynayabileceği ortaya konmuştur. Literatüre göre, alüminyum geri dönüşümü, birincil üretime kıyasla yaklaşık %95 daha az enerji tüketmekte ve çevresel etkiyi radikal düzeyde azaltmaktadır (European Aluminium, 2021).

Bu bağlamda hem cam hem de alüminyum sektörlerinde enerji verimliliğinin artırılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, dijital kontrol sistemlerinin benimsenmesi ve geri dönüşüm odaklı üretim stratejilerinin hayata geçirilmesi, karbon ayak izinin azaltılmasında temel politika ve uygulama önerileri olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, emisyonların doğru şekilde ölçülmesi, izlenmesi ve raporlanması için ISO 14064 gibi standartlara uyum hem çevresel şeffaflık hem de kurumsal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak açısından vazgeçilmezdir (UNFCCC, 2020).

Sonuç olarak, bu çalışma cam temperleme ve alüminyum profil üretim süreçlerinin karbon ayak izi üzerindeki etkilerini ortaya koyarken, aynı zamanda bu etkilerin azaltılmasına yönelik uygulanabilir ve bilimsel temelli stratejiler geliştirmiştir. Çalışma bulguları, ilgili sektörlerde çevresel performansın artırılmasına katkı sunacak şekilde; politika yapıcılar, üretim yöneticileri ve çevre mühendisleri için değerli bir referans niteliğindedir. Tesis özelinde elde edilen veriler, yalnızca yerel düzeyde değil, benzer üretim yapısına sahip sanayi kuruluşlarında da karbon yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine rehberlik edebilecek niteliktedir.

Ayrıca, bu tez çalışmasında elde edilen bulgular yalnızca mevcut durumu ortaya koymakla kalmayıp, geleceğe yönelik stratejik adımların belirlenmesine de ışık tutmaktadır. Özellikle üretim süreçlerinin dijitalleşmesi, enerji tüketimi ve emisyon azaltımı açısından büyük potansiyele sahiptir. Endüstri 4.0 uygulamaları ile entegre edilmiş üretim hatları, süreçlerin gerçek zamanlı izlenmesini ve enerji optimizasyonunu mümkün kılarak karbon

ayak izinin düşürülmesine katkı sağlayabilir (IEA, 2022). Sensör tabanlı izleme sistemleri, otomatik kontrol teknolojileri ve yapay zeka destekli analizler sayesinde cam temperleme ve alüminyum ekstrüzyon hatlarında daha verimli ve sürdürülebilir üretim sağlanabilir.

Sektörel olarak değerlendirildiğinde, cam ve alüminyum gibi malzemeler inşaat, otomotiv, beyaz eşya, havacılık ve enerji altyapısı gibi pek çok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, bu malzemelerin üretim süreçlerinin sürdürülebilirliğe entegre edilmesi, yalnızca çevresel fayda sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda şirketlerin rekabet gücünü artırmakta da önemli rol oynamaktadır (UNFCCC, 2020). Uluslararası pazarlarda sürdürülebilirlik kriterleri giderek daha fazla önem kazandığından, çevre dostu üretim uygulamaları aynı zamanda bir pazarlama ve marka değeri unsuru hâline gelmektedir.

Karbon yönetimi konusunda geliştirilecek politika ve uygulamaların başarısı, şirketlerin sadece kendi tesisleriyle sınırlı kalmadan tedarik zinciri boyunca etkili sürdürülebilirlik politikaları geliştirmeleriyle mümkün olacaktır. Bu bağlamda, Kapsam 3 emisyonlarının yüksekliği, hammaddelerin temininden taşımaya kadar olan süreçlerde lojistik planlamasının yeniden yapılandırılmasını gerektirmektedir. Taşıma modellerinin gözden geçirilmesi, toplu taşımaya yönelim, taşıma mesafelerinin azaltılması ve yerel tedarikçilerle iş birliği yapılması gibi yöntemler emisyonları azaltmak için etkili stratejiler arasında yer almaktadır (Schmidt vd., 2019).

Bu tez kapsamında önerilen çözüm yolları, yalnızca emisyon azaltımına değil, aynı zamanda enerji maliyetlerinin düşürülmesine ve kurumsal çevresel risklerin azaltılmasına da katkı sunmaktadır. Ayrıca, çevreye duyarlı üretim anlayışı, paydaş güveninin artırılması ve yasal düzenlemelere uyum açısından da büyük önem taşımaktadır. Özellikle Avrupa Yeşil Mutabakatı (Green Deal) kapsamında karbon sınırlandırmaları ve ticaret düzenlemeleri gibi çevre odaklı yeni ekonomik modellerin ön plana çıktığı günümüzde, karbon ayak izini düşüren işletmelerin rekabet avantajı elde etme şansı daha yüksektir.

Sonuç olarak, cam temperleme ve alüminyum profil üretim süreçleri çevresel açıdan yüksek risk taşımaya rağmen, bu çalışmada önerilen enerji verimliliği stratejileri, yenilenebilir enerji yatırımları, geri dönüşüm uygulamaları ve süreç iyileştirmeleri sayesinde karbon ayak izi azaltılabilir. Bu kapsamlı yaklaşım hem çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmekte hem de sanayinin uzun vadeli ekonomik direncine katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışma yalnızca teknik bir analiz olmanın ötesinde, çevre ve ekonomi arasındaki dengeyi kurma çabasının somut bir örneği olarak değerlendirilebilir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmanın bulguları, cam temperleme ve alüminyum profil üretim süreçlerinin enerji tüketimi ve sera gazı salımı içerdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda, sektörde karbon ayak izini azaltmaya yönelik çok boyutlu stratejilerin benimsenmesi önemlidir. Aşağıda hem işletme düzeyinde hem de politika yapıcılar açısından uygulanabilir öneriler sunulmuştur:

5.2.1. Enerji verimliliğini artırmaya yönelik teknolojik yatırımlar

Cam temperleme ve alüminyum ekstrüzyon işlemleri enerji yoğun süreçlerdir. Bu süreçlerdeki enerji kullanımını azaltmak için enerji verimli makinelerin ve sistemlerin kullanımı teşvik edilmelidir. Özellikle temperleme fırınlarında hava akımı düzenlemeleri, ısı geri kazanım sistemleri ve akıllı sıcaklık kontrol algoritmaları kullanılarak %10'a varan enerji tasarrufu sağlanabileceği çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur (Chen vd., 2020).

Alüminyum üretiminde de proses optimizasyonu ve daha düşük sıcaklıklarda çalışan ekstrüzyon sistemleri ile enerji tüketimi azaltılabilir. Ayrıca, üretim hatlarında enerji izleme sistemleri kurularak enerji kullanım verileri anlık olarak takip edilmeli, böylece gereksiz tüketim tespit edilerek önleyici aksiyonlar alınmalıdır (Zhang & Guo, 2021).

5.2.2. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı

Üretim tesislerinin enerji ihtiyacını karşılamak için fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesi, karbon salımını ciddi ölçüde düşürebilir. Fotovoltaik paneller, rüzgâr türbinleri veya biyokütle sistemleri gibi yenilenebilir enerji yatırımları ile hem çevresel etki azaltılabilir hem de uzun vadede enerji maliyetleri düşürülebilir (IEA, 2022).

Yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması için kamu teşvikleri, yeşil sertifikalar ve karbon vergisi mekanizmalarının da aktif biçimde uygulanması önerilmektedir. Özellikle Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamındaki “karbon sınır ayarlaması mekanizması” gibi düzenlemelere hazırlık için bu tür yatırımlar önemlidir (European Aluminium, 2021).

5.2.3. Hammadde ve girdi lojistiğinde karbon azaltımı

Bu çalışmada Scope 3.1 kategorisinde değerlendirilen hammadde taşıma süreçlerinin de ciddi oranda karbon salımına neden olduğu görülmüştür. Bu nedenle, lojistik süreçlerin optimize edilmesi, tedarik zinciri planlamasında daha düşük emisyonlu ulaşım modlarının (örneğin demiryolu, denizyolu) tercih edilmesi önerilmektedir (IPCC, 2021).

Ayrıca, tedarikçilerle karbon yönetimi konusunda iş birliği yapılmalı, sürdürülebilirlik kriterlerini karşılayan tedarikçilerin seçilmesine öncelik verilmelidir. Tedarik zinciri boyunca karbon ayak izinin izlenmesi ve raporlanması için dijital sistemler entegre edilmelidir.

5.2.4. Döngüsel ekonomi uygulamaları

Alüminyum, geri dönüştürülebilirliği yüksek bir malzeme olduğundan, döngüsel ekonomi ilkelerine uygun olarak hurda alüminyumun üretim süreçlerinde daha fazla kullanımı desteklenmelidir. Geri dönüşüm, birincil üretime kıyasla %95 daha az enerji gerektirir ve karbon emisyonunu ciddi biçimde azaltır (UNFCCC, 2020).

Aynı şekilde, cam kırığı olarak adlandırılan “cullet” kullanım oranı artırılarak cam üretiminde de enerji tasarrufu sağlanabilir. Bu tür uygulamalar yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmayıp aynı zamanda ekonomik fayda da sağlamaktadır.

5.2.5. Çalışan eğitimi ve karbon farkındalığı programları

Karbon ayak izinin azaltılması sadece teknik süreçlerle değil, aynı zamanda insan kaynağının bu konuda bilinçlendirilmesiyle de mümkündür. Çalışanlara yönelik karbon yönetimi, enerji tasarrufu ve atık minimizasyonu gibi konularda düzenli eğitimler verilmesi önerilmektedir.

Ayrıca, işletme genelinde “yeşil davranış” kültürü oluşturulması için çalışanların öneri sistemiyle katkı sağlaması teşvik edilmelidir. Bu tür katılımcı mekanizmalar, karbon azaltımına yönelik yaratıcı çözümler üretmek açısından önemlidir (Schmidt, Huenteler & Kittner, 2019).

5.2.6. Sürekli izleme, raporlama ve sertifikasyon süreçleri

Karbon ayak izi yönetimi sürekli izleme ve güncelleme gerektiren bir süreçtir. ISO 14064 veya GHG Protocol gibi uluslararası standartlara uygun karbon hesaplama sistemleri işletmelere entegre edilmeli, her yıl emisyon raporları yayımlanmalıdır.

Ayrıca, işletmelerin çevresel performanslarını dış paydaşlara şeffaf biçimde sunmaları için çevresel ürün beyanları (EPD), karbon ayak izi sertifikaları ve sürdürülebilirlik raporları hazırlanmalıdır. Bu belgeler, marka imajını güçlendirmenin yanı sıra uluslararası pazarda rekabet avantajı da sağlayacaktır.

5.2.7. Sektörel iş birlikleri ve kamu politikaları

Cam ve alüminyum sektörlerinde faaliyet gösteren firmaların karbon yönetimi konusunda ortak hareket etmeleri, bilgi paylaşımını ve iyi uygulama örneklerini yaygınlaştıracaktır. Sektörel dernekler, yeşil üretim rehberleri ve pilot projeler aracılığıyla bu sürece liderlik etmelidir.

Ayrıca kamu kurumları tarafından verilecek karbon azaltım destekleri, enerji dönüşüm hibeleri ve vergi indirimleri de işletmelerin bu yöndeki dönüşümünü hızlandıracaktır.

KAYNAKÇA

- Abay, M. (2023). Yeşil Dökümhaneler, 2023 Yeşil Mühendisler. TUDOKSAD. <https://dokumhane.net/>, Erişim Tarihi: 01.09.2024
- Abualfaraa, W., Salonitis, K., Al-Ashaab, A., & Ala'raj, M. (2020). "Lean-green Manufacturing Practices and Their Link with Sustainability: A Critical Review. Sustainability", 12(3), 981. <https://doi.org/10.3390/su12030981>
- Akçakaya, R. (1992). Temel Cam Bilimi. Şişecam Teknik Bülteni, 173–204.
- Akkaya, G. ve Uzar, C. (2012). Karbona Dayalı Finansal Gelecek Sözleşmeleri ve Fiyat Gelişimi Üzerine Bir İnceleme. DPUJSS, 32(I).
- Altınoğlu, A. (1995). Alaşımlar Ders Notları. İ.T.Ü Kimya-Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Fakültesi, İstanbul.
- Altuğ, T. ve Özkan, F. (2015). "Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi, Doğrulanması ve Raporlanması". Verimlilik Dergisi, 2, 67–86.
- Aluminum Extrusion Technology. (2000). (Ed. P. K. Saha). ASM International, Ohio.
- Anonim Eser. (t.y.). "İmalat sektörleri için sürdürülebilirlik göstergeleri". Üretim Teknolojisi Yönetimi Dergisi, 30, 312–334.
- Ardell, A. J. (1985). Precipitation Hardening. Metallurgical Transactions, 2131–2165.
- Ayan, N. (2019). Muğla İlinde Yakıt Tüketimine Bağlı Karbon Ayak İzi Değişimi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Aydın, H., Şendeniz, M. ve Demirci, A. (2009). "Ekstrüzyon Öncesi ve Sonrası Uygulanan Isıl İşlemlerin AA 6063 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi". Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 14(2). <https://doi.org/10.17482/uujfe.37612>
- Azapagic, A. (2004). "Madencilik ve Mineral Endüstrisi için Sürdürülebilir Kalkınma Göstergeleri için Bir Çerçeve Geliştirilmesi". Temiz Üretim Dergisi, 12, 639–662.
- Balta, M. (2020). Endüstri Kaynaklı Karbon Ayak İzi Azaltımı ve Enerji Verimliliği. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Bildik, B. (2014). Kuruluş Seviyesinde Sera Gazı Emisyon ve Uzaklaştırmalarının Hesaplanması, Raporlanması ve Doğrulanması.
- Bourget, J.-P., Fafard, M., Shakeri, H. R., & Côté, T. (2009). "Optimization of Heat Treatment in Cold-drawn 6063 Aluminium Tubes". Journal of Materials Processing Technology, 209(11).
- Brundtland Commission. (1987). World Commission on Environment and Development. United Nations (UN).
- Büyükyıldız, A. (2007). "PLC Kullanılarak Cam Temperleme Fırınının Otomasyonu". Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2(13), 247–256.
- Camilleri, M. A. (2017). "Kurumsal Sürdürülebilirlik ve Sorumluluk: İş Dünyası, Toplum ve Çevre için Değer Yaratmak". Asya Sürdürülebilirlik ve Sosyal Sorumluluk Dergisi, 2, 59–74.

Charles, E. B. (2003). *Industrial Burners Handbook*. CRC Press.

Chen, H., Zhang, Y., Liu, Y., & Li, C. (2020). "Energy-saving Improvement in Tempered Glass Production Through Optimized Air Jet Configuration". *Journal of Cleaner Production*, 248, 119219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119219>

Chen, T., Liu, S., Zhang, Z., & Xu, S. (2025). The Effect of the SO₂ Gas Pipe Structure of the Lift-up Roller Area on the Dealkalization Efficiency of Float Glass. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 110541.

Cirillo, F., & Isopi, G. M. (2009). Glass Tempering Heat Transfer Coefficient Evaluation and Air Jets Parameter Optimization. *Applied Thermal Engineering*, 29, 1173–1179.

Çakanyıldırım, Ç. ve Gür, M. (2021). "Alüminyum Üretim Teknolojilerindeki Gelişmeler, Çevreye Etkisi ve Uygulama Alanları". *Politeknik Dergisi*, 24, 585–592. <https://doi.org/10.2339/politeknik.707885>

Çengel, A. Y. ve Boles, M. A. (1994). *Thermodynamics an Engineering Approach*. McGraw Hill.

Delikanlı, K. (1992). Soğuk haddelenmiş Teknik Alüminyumun Derin Çekilmesinde Tavlama Süresi ve Sıcaklığının Şekillendirme Kabiliyetine Etkileri. (Doktora Tezi). Konya: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Demirci, A. H. (2003). *Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi*. Alfa, İstanbul.

Dindar, G. (2021). Otomotiv Yan Sanayinde Karbon Ayak İzinin Hesaplanması – Bursa İli Örneği. (Yüksek Lisans Tezi). Bursa: Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.

Doğan, S. ve Tüzer, M. (2011). "Küresel İklim Değişikliği ve Potansiyel Etkileri". *C.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 12.

Eşsiz, Ö. (2004). Teknolojinin Cam Panellerine Getirdiği Yenilikler. In 1. Ulusal Çatı ve Cephe Kaplamalarında Çağdaş Malzeme ve Teknolojiler Sempozyumu (s. 73–82), İstanbul.

European Aluminium. (2021). Environmental profile report: Aluminium in 2020. <https://european-aluminium.eu/blog/environmental-profile-reports/>, Erişim Tarihi: 01.09.2024

Farjana, S. H., Huda, N., & Mahmud, M. A. P. (2019). Life Cycle Analysis of Copper-gold-lead-silver-zinc Beneficiation Process. *Science of the Total Environment*.

FEVE. (2014). The European Container Glass Federation. <http://www.feve.org>

Fisher, J., Arora, P., Chen, S., Rhee, S., Blaine, T., & Simangan, D. (2021). Entegre Sürdürülebilirliğe İlişkin Dört Öneri: Çevreyi ve Barışı Anlamak için Teorik Bir Çerçeveye Doğru ve Sürdürülebilirlik Bağı. *Sürdürülebilirlik Bilimi*, 16, 1125–1145.

Garbie, I. H. (2014). "İmalat İşletmelerinde Sürdürülebilir Kalkınma Endeksini Modellemek ve Değerlendirmek için Analitik Bir Teknik". *Uluslararası Üretim Araştırması Dergisi*, 52, 4876–4915.

Glass For Europe. (2014). Glass for Europe. <http://www.glassforeurope.com>

GLS-BREF. (2013). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB), European Commission's Joint Research Centre-Institute for Prospective Technological Studies. <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu>

- He, X., Kim, H. C., Wallington, T. J., Zhang, S., Shen, W., Kleine, R., Keoleian, G. A., Ma, R., Zheng, Y., Zhou, B., & Wu, Y. (2020). Cradle-to-gate Greenhouse Gas (GHG) Burdens for Aluminum and Steel Production and Cradle-to-grave GHG Benefits of Vehicle Lightweighting in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 152.
- Hendricks, C. (2019). Dökümhanelerde Muazzam Potansiyel - Çevresel, Ekonomik ve Sosyal Sürdürülebilirlik. GIFA, METEC, Thermprocess, Newcast, 1–5.
- Hutchins, M. J., Robinson, S. L., & Dornfeld, D. (2013). “Üretimde Yaşam Döngüsü Sosyal Etkilerini Anlamak: İşleme Dayalı Bir Yaklaşım”. *Journal of Manufacturing Systems*, 32, 536–542.
- IEA (International Energy Agency). (2022). World energy outlook 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Ingrao, C., Saja, C., & Primerano, P. (2021). “Application of Life Cycle Assessment to Chemical Recycling of Post-use Glass Containers on the Laboratory Scale Towards Circular Economy Implementation”. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127319.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). Sixth Assessment Report: Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- ISO 14040. (2006). Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. International Organization for Standardization.
- Joung, C. B., Carrell, J., Sarkar, P., & Feng, S. C. (2013). Sürdürülebilir Üretim için Göstergelerin Sınıflandırılması. *Ecological Indicators*, 24, 148–157.
- Kantürer, T. (2009). Otomobil Camı Üretiminde Enerji Yoğun Süreçlerin Optimizasyonu. (Doktora Tezi). Edirne: Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karamış, M. B. ve Halıcı, İ. (2007). The Effect of Homogenization and Recrystallization Heat Treatments on Low-grade Deformation Properties of AA 6063 Aluminium Alloy. *Materials Letters*, 61.
- Karl, T. R. (2003), Trenberth K. E., ‘Global Modern Climate Change’, *State of the Planet*
- Keeble, B.R. (1988). Brundtland raporu: 'Ortak geleceğimiz'. Tıp ve Savaş s.4, ss.17-25
- Kocabağ, D. (2002). Cam Kimyası, Özellikleri, Uygulaması, Birsen Yayınevi, İstanbul
- Krajnc, D., & Glavic, P. (2003). Sürdürülebilir üretimin göstergeleri. *Temiz Teknolojiler ve Çevre Politikası* s.5, ss.279-288.
- Laurent, A., Olsen, S.I. & Hauschild, M.Z. (2010). İmalat endüstrisi için çevresel performans göstergesi olarak karbon ayak izi. *CIRP Annals-Üretim Teknolojisi* s.59, ss.37-40.
- Lee, K.H. & Viskanta, R. (1998). “Quenching of Flat Glass by Impinging Air Jets”, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 33(1), 5-22, 1998.

- Monnoyer, F., & Locheignies, D. (2008). "Heat Transfer and Flow Characteristics of the Cooling System of an Industrial Glass Tempering Unit", *Applied Thermal Engineering*, 28 (17-18)
- Nodehi, M., & Mohamad Taghvaei, V. (2022). Sustainable concrete for circular economy: A review on use of waste glass. *Glass Struct. Eng.*, 7, 3–22
- Norgate, T. & Haque, N. (2010). "Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations", *J. Clean. Prod.*,
- Okumuş, E. (2003). Sürekli levha döküm tekniğiyle üretilmiş 1XXX, 3XXX ve 5XXX alaşımlı levhaların mikroyapı karakterizasyonu, (Yüksek Lisans Tezi), İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Pulker, H. K. (1984). *Coatings on Glass*, Elsevier Pres, Amsterdam
- Ramanathan, V., & Feng, Y. (2009). "Air Pollution, Greenhouse Gases and Climate Change: Global and Regional Perspectives", *Atmospheric Environment* 43 (2009) 37–50
- Rossetto, D. (2023). Karbon sınırı ayarlama mekanizması: Çelik geri dönüşümü için ne anlama geliyor? Mimarlık ve İnşaat Mühendisliği Okulu, Adelaide Üniversitesi, Bilim, Mühendislik ve Teknoloji Fakültesi, Avustralya.
- Schmidt, T. S., Huenteler, J., & Kittner, N. (2019). Innovation and the energy transition: Lessons from solar photovoltaics. *Energy Policy*, 129, 894–904. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.059>
- Schmitz, A., Kamiński, J., Scalet, B.M., & Soria, A. (2011) Energy consumption and CO2 emissions of the European glass industry. *Energy Policy*, 39, 142–155.
- Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2014). 29068 sayılı Resmî Gazete.
- Sev, A., Gür, V. ve Özgen, A. (2004). "Cephenin Vazgeçilmez Saydam Malzemesi Cam", 2. Ulusal Yapı Malzemeleri Kongresi, İstanbul, 75-86.
- Shutov, A.I. & Sukhanov, V.E. (1997). "A calculation procedure for the nonuniformity parameters air-jet tempered glass", *Glass and Ceramics*, 54(7-8), 237-239.
- SNE Research, (2013). www.sneresearch.com, (Erişim tarihi:12.12.2024)
- Sözbir, N. & Yao, S.C. (2004). "Experimental Investigation of Water Mist Cooling for Glass Tempering" *Atomization and Sprays*, 14, 191- 210.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (2023). Erişim Adresi: <https://www.csb.gov.tr/>
- T.C. Ticaret Bakanlığı (2023). Erişim Adresi: <https://ticaret.gov.tr>
- Tangüler, M., Gürsel, P. ve Meral C. (2015). "Türkiye’de Uçucu Küllü Betonlar İçin Yaşam Döngüsü Analizi
- Taylor, B. (2023). AB’de, geri dönüştürülmüş içerikli metali ödüllendirmek için karbon vergisi hazırlanıyor, Erişim Adresi: <https://www.recyclingtoday.com/news/aluminum-steel-europecarbon-border-tax-eaf-recycling/>
- Tekkaya, A.E., Schikorra, M., Becker, D., Biermann, D., Hammer, N. & Pantke, K. (2009). "Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips". *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (7),

Toydemir, N. (1990). Cam Yapı Malzemeleri, Sakarya Gazetecilik ve Matbaacılık Tic A.Ş., Eskişehir.

Türkbaş, S. ve Ataer, Ö.E. (2007). “Camın Temperlenmesinde Isıtma ve Soğutma Süreçlerinin Karışık Sınır Şartlarında Sayısal Modellenmesi”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 22, No:4, 727-738.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). (2020). Reporting and review under the Paris Agreement. <https://unfccc.int>

Url-1, <http://www.noktametal.com/extrusionpress.htm> (Erişim tarihi: 13.12.2024)

US Department of Energy (2008). https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf

Üreden, A. (2019). Sürdürülebilir Yaşam İçin Karbon Ayak İzi (Çankırı Karatekin Üniversitesi Örneği), (Yüksek Lisans Tezi), Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankırı, (2019)

Veleva, V., & Ellenbecker, M. (2001). Sürdürülebilir üretimin göstergeleri: çerçeve ve metodoloji. Temiz Üretim Dergisi s.9, ss.519-549.

Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). “A definition of carbon footprint”. In C. C. Pertsova (Ed.), Ecological Economics Research Trends (pp. 1-11). Nova Science Publishers.

Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). “A Definition of Carbon Footprint”. In Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology (pp. 1-11). Springer.

Yapıcıoğlu, P. (2018). Atıksu Arıtma Tesislerinin Sera Gazı Emisyonlarının Minimizasyonu. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.

Yun, M., Lokyer, S., & Hunt, J.D. (2000). Twin Roll Casting of Aluminum Alloys, Materials Science & Engineering A, Elsevier Science S.A., 116 -12

Zhang, X., & Guo, W. (2021). Optimizing cooling parameters in glass tempering: A pathway to reduce carbon footprint. Energy Reports, 7, 4201–4211. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.018>