

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA, KARBON AYAK
İZİNİN SINIRLANDIRILMASI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kerem KURNAZ

NİSAN 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA, KARBON AYAK
İZİNİN SINIRLANDIRILMASI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Kerem KURNAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 / 02 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 15 / 03 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin HÜSEM

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında, Karbon Ayak İzinin Sınırlandırılması ve Sürdürülebilirlik” başlıklı bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışması sürecinde yardıma ihtiyaç duyduğum her an desteğini esirgemeyen, kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle ufkumu genişleterek çalışmalarına destek veren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Metin HÜSEM’e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, tez sürecinde yaşadığım zorluklarda motivasyonumu yükselten ve devam etmemi sağlayan, aldığım kararlarda bana destek olan ve elimi hiç bırakmayan başta sevgili eşim Ceyda KURNAZ’a ve aileme teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasında derlenen bilgilerin bundan sonra yapılacak olan akademik çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Kerem KURNAZ
Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında, Karbon Ayak İzinin Sınırlandırılması ve Sürdürülebilirlik” başlıklı çalışmamı danışmanın Prof. Dr. Metin HÜSEM’in sorumluluğunda yaptığımı, tezi oluştururken düzenlediğim verileri kendim topladığımı, tezi hazırlarken yararlandığım kaynakları da kaynakçada eksiksiz olarak göstererek araştırmamı etik kurallara uyarak hazırladığımı ve aksi ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 15/03/2024

Kerem KURNAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	2
1.3. Sürdürülebilirlik ve Karbon Ayak İzi.....	3
1.4. Sürdürülebilirlik Kavramı.....	3
1.5. Sürdürülebilir Çevre	4
1.6. Sürdürülebilir Kalkınma Kavramı.....	6
1.6.1. Ülkelerin Kalkınma Planlarında Sürdürülebilirliğin Yeri	6
1.6.2. Türkiye'nin Sürdürülebilir Kalkınma Planları.....	10
1.7. Sürdürülebilir Yapı Tasarımı ve Malzemeleri	13
1.8. Küresel Isınma ve Sera Gazı Etkisi.....	16
1.8.1. Sera Gazları.....	17
1.9. GHG Emisyonu ve Karbon Ayak İzi	20
1.9.1. Dünyada GHG Emisyonu ve Karbon Ayak İzi.....	22
1.9.2. Türkiye'de GHG Emisyonu	27
1.9.3. İnşaat Sektöründe GHG Emisyonu	33
1.10. GHG Emisyonunu Sınırlandırmak İçin Yapılan Çalışmalar	38
1.10.1. İnşaat Sektöründe GHG Sınırlandırma Çalışmaları	44
1.11. Yeşil Bina Sistemleri ve Sertifika Standartları	47
1.12. Yeşil Bina Kavramı.....	48
1.12.1. Yeşil Binaların Faydaları	48
1.12.2. Yeşil Bina Kapsamında Kentleşme	50
1.12.3. Dünyada ve Türkiye'de Yeşil Bina Uygulamaları	54
1.13. Yeşil Bina Sertifika Sistemleri.....	55
1.13.1. LEED.....	57
1.13.2. BREEAM.....	63

1.13.3. DGNB.....	70
1.13.4. CASSBEE.....	75
1.13.5. Green Star	77
2. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA KARBON AYAK İZİNİN SINIRLANDIRILMASI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	81
2.1. Alternatif Klinker Teknolojisi.....	81
2.2. Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Yöntemi (CCUS)	85
2.3. Tamamlayıcı Çimentolu Malzemeler (SCM)	87
2.4. Geri Döşürülmüş Agregaların ve Atık Mazlemelerin İnşaat Uygulamalarında Kullanımı	89
2.4.1. Atık Cam Malzemelerinin İnşaat Uygulamalarında Kullanımı	91
2.4.2. Atık Kauçuk Malzemelerin İnşaat Uygulamalarında Kullanımı	97
2.4.3. Atık Plastik Malzemelerin İnşaat Uygulamalarında Kullanımı	102
2.4.4. Elektronik Atıkların İnşaat Uygulamalarında Kullanımı	110
2.5. Sürdürülebilir Beton Uygulamaları	111
3. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA KARBON AYAK İZİNİN SINIRLANDIRILMASI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALARIN İRDELENMESİ	115
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	120
5. KAYNAKLAR	122
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA, KARBON AYAK İZİNİN SINIRLANDIRILMASI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Kerem KURNAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Metin HÜSEM
2024, 136 Sayfa

Dünyada ve Türkiye’de sanayi ve inşaat faaliyetlerinin artması sera gazlarının atmosferde yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Küresel ısınma ve beraberinde iklim değişikliğinin sonuçları yeryüzündeki canlı yaşamını tehdit etmektedir. Endüstriyel sektörlerin enerji taleplerinin artarak devam etmesi doğal kaynakların hızla tükenmesini de beraberinde getirerek, gelecek nesillerin yaşam standartlarını doğrudan etkilemektedir. Yaşanan çevresel sorunları yeni uygulamalarla önlemek amacıyla ortaya atılan kavram sürdürülebilirlik kavramı olmuştur.

Bu tez kapsamında inşaat sektöründe karbon ayak izinin sınırlandırılmasına yönelik çalışmalar ve yaşamın her alanına etki eden sürdürülebilirlik kavramının öncelikle, çevre kirliliği ve doğal kaynak kullanımında inşaat sektörünün oynadığı rol değerlendirilmiştir. Son 20 yılda, inşaat mühendisliği uygulamalarında karbon ayak izinin sınırlandırılması ve atıkların farklı şekillerde yeniden kullanılması üzerinde yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir. Bu sentez çalışması ışığında, inşaat mühendisliği uygulamalarında karbon ayak izinin sınırlandırılması ve sürdürülebilir olmasına yönelik yapılması gereken çalışmalar irdelenerek bazı sonuçlara varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Karbon ayak izi, Sürdürülebilirlik, Yeşil bina sertifika sistemleri, Sürdürülebilir beton uygulamaları, Geri dönüşüm

M. Sc. Thesis

SUMMARY

LIMITING CARBON FOOTPRINT AND SUSTAINABILITY IN CIVIL ENGINEERING PRACTICES

Kerem KURNAZ

Karadeniz Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Metin HÜSEM
2024, 136 Pages

The increase in industrial and construction activities in the world and in Turkey causes greenhouse gases to concentrate in the atmosphere. Global warming and the consequences of climate change threaten the living life on earth. The increasing energy demands of the industrial sectors bring along the rapid depletion of natural resources and directly affect the living standards of future generations. In order to prevent environmental problems with new practices, the concept of sustainability has been introduced.

Within the scope of this thesis, studies on expanding the carbon footprint in the construction sector and the role of sustainability affecting the living space, primarily in environmental protection and natural resource use, are evaluated. In the last 20 years, studies on civil engineering practices, limiting the carbon footprint and reusing waste with different durability have been evaluated. The studies that need to be done to expand this synthesis study, to limit the carbon footprint of civil engineering applications and to make them sustainable have been examined and reached in some chapters.

Key Words: Carbon footprint, Sustainability, Green building certification systems, Sustainable concrete applications, Recycle

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Hava Kirliliği Nedeniyle Ölüm Oranı (Our World in Data)	5
Şekil 2. Türkiye'nin Çimento Kullanımı (Sanayi ve Kalkınma Bakanlığı, 2022)	16
Şekil 3. Küresel Sera Gazı Emisyonu (1990-2023) (UNEP, 2023).....	18
Şekil 4. Fosil Yakıtların Karbondioksit Salınım Miktarları (Gt) (GCP, 2022)	19
Şekil 5. Küresel Karbondioksit Salınımının Sektörlere Göre Dağılımı (IEA, 2022)	21
Şekil 6. Bölgelerin GHG Emisyon Miktarı (Our World in Data, 2023)	23
Şekil 7. Sektörlerin Küresel GHG Emisyonu (Our World in Data, 2023).....	24
Şekil 8. Küresel Karbondioksit Emisyonu (Our World in Bank, 2024)	25
Şekil 9. Fosil Yakıtların CO ₂ Salınımı Miktarları (Carbon Brief, 2023)	26
Şekil 10. Türkiye'nin Yıllık Toplam Sera Gazı Emisyonu (TÜİK, 2023).....	28
Şekil 11. Sera Gazlarının Çeşitlerine Göre Yıllık Toplam Miktarları (TÜİK, 2023).....	29
Şekil 12. Türkiye'nin Sektörlere Göre Sera Gazı Salınım Miktarı (TÜİK, 2023)	30
Şekil 13. Türkiye'nin Fosil Yakıt CO ₂ Salınımı (Our World in Data, 2023)	31
Şekil 14. Dünyanın Yıllık Çimento Kullanım Miktarları (Statista, 2024)	34
Şekil 15. Ülkelerin Çimento Kaynaklı CO ₂ Salınım Miktarı (Carbon Brief, 2023).....	35
Şekil 16. Türkiye'de Enerji Tüketimi (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2021)	36
Şekil 17. Ham Çelik Üretim Miktarları (World Steel Association, 2023).....	37
Şekil 18. Çelik Üretim Yöntemi (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2021)	38
Şekil 19. Avrupa Birliği Yıllık Çevre Vergisi (Eurostat, 2024)	40
Şekil 20. Türkiye'nin Çevresel Vergi Miktarları (OECD, 2023)	42
Şekil 21. Türkiye'nin Çevre Koruma Harcamaları (TÜİK, 2023)	43
Şekil 22. Konulara Göre Çevre Koruma Harcamaları (%) (TÜİK, 2023)	43
Şekil 23. Avrupa Birliği Ekonomik Aktiviteye Göre Atık Oranları (Statista , 2023)	46
Şekil 24. Dünyanın Kentsel-Kırsal Nüfusu (Our World in Data, 2023).....	51
Şekil 25. Türkiye'nin Kentsel-Kırsal Nüfusu (Our World in Data, 2023).....	52
Şekil 26. Dünyanın İnşa Alanı (Milyon Hektar) (Our World in Data, 2019)	53
Şekil 27. LEED Sertifika Kategorileri Puan Dağılımı	58
Şekil 28. LEED Sertifikalı Proje Sayısı (2017-2021) (USGBC, 2022).....	60
Şekil 29. Yapılara Göre LEED Sertifika Dağılımı (2017-2021) (USGBC, 2022).....	61
Şekil 30. Türkiye'nin LEED Sertifika Dağılımı (USGBC, 2024).....	62

Şekil 31. Derecelendirmeye Göre LEED Dağılımı (USGBC, 2024)	63
Şekil 32. BREEAM Sertifika Değerlendirmesi Puan Dağılımı.....	64
Şekil 33. BREEAM Enerji Kategorisi Puan Dağılımı	65
Şekil 34. BREEAM Sağlık ve Konfor Kategorisi Puan Dağılımı	66
Şekil 35. BREEAM Sertifika Sayıları (The Digest of BREEAM, 2019)	68
Şekil 36. Birleşik Krallık Sertifika Dağılımı (The Digest of BREEAM, 2019).....	69
Şekil 37. BREEAM Puan Ortalaması (The Digest of BREEAM, 2019)	70
Şekil 38. DGNB Değerlendirme Yüzdeleri (DGNB System, 2020)	71
Şekil 39. Ekolojik Kalite Değerlendirme Dağılımı (DGNB System, 2020)	72
Şekil 40. Ekonomik Kalite Değerlendirme Dağılımları (DGNB System, 2020)	73
Şekil 41. Sosyokültürel Kalite Değerlendirme Dağılımları (DGNB System, 2020).....	74
Şekil 42. Yıllık DGNB Sertifika Sayısı (DGNB System, 2020)	75
Şekil 43. CASBEE Değerlendirme Puanları	77
Şekil 44. Green Star Değerlendirme Puan Dağılımı	78
Şekil 45. Avusturalya Green Star Sertifika Sayısı (GBCA, 2024)	80
Şekil 46. Farklı Klinkerlerin Enerji taleplerinin Karşılaştırılması.....	83
Şekil 47. Betonun CO ₂ Salınımı (kg/m ³)	89
Şekil 48. 2021 Yılı Cam İthalat ve İhracat Değeri	92
Şekil 49. AB Üyesi Ülkelerinin Cam Üretim Dağılımı (2021)	92
Şekil 50. Karışımların Basınç Dayanımları (MPa)	94
Şekil 51. Beton Karışımların Slump Değerleri.....	95
Şekil 52. Beton Karışımlarının Basınç Dayanımı (MPa).....	96
Şekil 53. Yıllık Küresel Kauçuk Üretimi (Jaganmohan, 2024).....	98
Şekil 54. Beton Karışımların Maksimum Yükleme Değerleri	99
Şekil 55. Numunelerin Basınç Dayanım Değişimleri.....	101
Şekil 56. Küresel Plastik Üretim Miktarı (Ritchie, Samborska, & Roser, 2023).....	103
Şekil 57. Betonun Karışımların Basınç Dayanımları (MPa)	104
Şekil 58. Beton Karışımların Bükülme Mukavemeti (MPa)	105

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Sürdürülebilirlik Kavramının Tarihsel Gelişimi.....	9
Tablo 2. Türkiye'nin Çevre Kanunları (CMBS, 2023).....	11
Tablo 3. Türkiye'nin Taraf Olduğu Antlaşmalar (T.C. Dışişleri Bakanlığı, 2023).....	13
Tablo 4. Ülkelerin Beton Üretim Miktarları (ERMCO, 2019).....	14
Tablo 5. Ülkelerin Çimento Üretim Miktarı (Sanayi ve Kalkınma Bakanlığı, 2022)	15
Tablo 6. Ülkelerinin Yıllık CO ₂ Salınımı (Our World in Data, 2023)	32
Tablo 7. LEED Sertifikasına Sahip İlk 10 Ülke (USGBC, 2023)	59
Tablo 8. BREEAM Sertifika Sınıfları ve Puan Aralığı.....	66
Tablo 9. CASBEE Sertifika Sınırları	76
Tablo 10. Green Star Sertifika Sınıfları	78
Tablo 11. Test Edilen Betonun Karışım Oranları.....	88
Tablo 12. Deneyde Kullanılan Betonun Karışım Yüzdeleri	95
Tablo 13. Çalışmada Kullanılan Betonun Karışım Miktarları	100
Tablo 14. Beş Karışımın Çeşitli Test Sonuçları	106

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A.B.D	: Amerika Birleşik Devletleri
AR-GE	: Araştırma ve Geliştirme
BEE	: Yapı Çevre Verimliliği (Built Environment Efficiency)
BEP-TR	: Bina Enerji Performansı
BREEAM	: Bina Araştırma Kuruluşunun Çevresel Değerlendirme Yöntemi (The Building Research Establishment's Environmental Assessment Method)
CASBEE	: Yapılı Çevre Verimliliği İçin Kapsamlı Değerlendirme Sistemi (Comprehensive Assessment System For Built Environment Efficiency)
CCSC	: Karbonatlanabilir Kalsiyum Silikat Çimento (Carbonatable Calcium Silicate Cement)
CCUS	: Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (Carbon Capture, Utilization and Storage)
CFCs	: Kloroflorokarbon
CO ₂	: Karbondioksit
COP	: Taraflar Konferansı (Conference of Parties)
CH ₄	: Metan Gazı
ÇEDBİK	: Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği
DA	: Doğal Agregası
DAB	: Doğal Agregalı Beton
DGNB	: Deutsche Gesellschaft Für Nachhaltiges Bauen
EKB	: Enerji Kimlik Belgesi
ERMCO	: Avrupa Hazır Beton Birliği (European Ready Mixed Concrete Association)
G20	: Group of 20
GBCA	: Avustralya Yeşil Bina Konseyi (Green Building Council of Australia)
GDA	: Geri Dönüştürülmüş Agregası
GDAB	: Geri Dönüştürülmüş Agregalı Beton
HCFCs	: Hidrokloroflorokarbon
HFCs	: Hidroflorokarbon
HPC	: Yüksek Performanslı Beton (High Performance Concrete)
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)

IPCC	: Uluslararası İklim Değişikliği Paneli (International Panel on Climate Change)
JGBC	: Japonya Yeşil Bina Konseyi (Japan Green Building Council)
LC ³	: Kireçtaşı Kalsine Kil Çimentosu (Limestone Calcined Clay Cement)
LCA	: Yaşam Döngüsü Değerlendirilmesi (Life Cycle Assessment)
LEED	: Enerji ve Çevre Tasarımında Liderlik (Leadership in Energy and Environmental Design)
MHC	: Orta Sıcaklıktaki Çimento (Medium Heat Cement)
MOMC	: Magnezyum Silikatlı Magnezyum Oksit
MOMS	: Magnezyum Karbonatlı Magnezyum Oksit
N ₂ O	: Nitröz Oksit
O ₃	: Ozon
OSPC	: Yağlı Şist Portland Çimentosu (Oil Sist Portland Cement)
RBPC	: Reaktif Belit Bakımından Zengin Portland Çimentosu (Reaktif Rich-Belite Portland Cement)
RGS	: Geri Dönüştürülmüş Cam Kumu (Recycled Glass Sand)
SCM	: Tamamlayıcı Çimentolu Madde (Supplementary Cementitious Materials)
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UHPC	: Çok Yüksek Performanslı Beton (Ultra High Performance Concrete)
UNEP	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı (United Nations Environment Programme)
UNFCCC	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (United Nations Framework Convention on Climate Change)
USGBC	: Amerika Birleşik Devletleri Yeşil Bina Konseyi (United States Green Building Council)
YES-TR	: Ulusal Yeşil Bina ve Yeşil Yerleşme Sertifika Sistemi
WCED	: Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu (World Commission on Environment and Development)
WGBC	: Dünya Yeşil Bina Konseyi (World Green Building Council)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnşaat mühendisliği tarih boyunca insan hayatının içinde olan ve insanların ihtiyaçları doğrultusunda sürekli gelişen bir bilimdir. Yıllar boyunca hızla artan nüfus artışına cevap verebilmek için inşa edilen yapıların sayısı da devamlı artmıştır. Yaşanan nüfus artışının beraberinde getirdiği üretim ihtiyacı ve bu ihtiyacı karşılamak için artan sanayi hareketliliği iklim değişikliğinin başlıca sebeplerindendir. Bu hareketliliğin en çok hissedildiği sektörlerden biri de inşaat sektörüdür. Bu yapılaşma için gerekli olan kaynakların kullanımı da günümüze kadar olan süreçte iklim değişikliği, küresel ısınma, doğal kaynakların tüketilmesi ve karbon ayak izinin artmasına sebep olmuştur. İnşaat sektörünün gelişiminin doğal kaynakları hızla tüketmesinin önüne geçebilmek için sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir inşaat kavramı son yıllarda giderek önem kazanmıştır.

Uluslararası Enerji Ajansının (IEA) “2050’de Sıfır Emisyon: Küresel Enerji Sektörü için Yol Haritası” raporu doğrultusunda hedefe ulaşmak, Ufuk 2020 Programı Yeşil Mutabakat (Green Deal) Çağrısı kapsamında 2050 yılında Avrupa Kıtasını ilk sıfır emisyonlu kıta yapma amacı ve Paris Antlaşması çerçevesinde hem gelişmiş ülkelere hem de gelişmekte olan ülkelere getirilen yükümlülükler çalışmanın temelini oluşturmaktadır.

İnşaat sektörü, çevresel etkileri bakımından doğal kaynakların en hızlı tüketilmesine sebep olan sektörlerin başında geldiği yadsınamaz bir gerçektir. İnşaat yapılarında kullanılan temel malzemelerden betonun üretimi için çimento malzemesinin üretilmesinde açığa çıkan karbon salınımının hava kirliliğine etkileri yüksek olmaktadır. Betonun bir diğer bileşeni olan suyun kullanılması doğrudan doğal kaynakların tüketilmesine sebep olmaktadır. Betonun hacminin yaklaşık %20’sini oluşturan su insan hayatının en önemli kaynaklarından. Açığa çıkan sera gazlarının ısıttığı gezegenimizde artan atmosfer sıcaklığı şiddetli kuraklıkları da beraberinde getirdiği günümüzde beton üretimi için harcanan su miktarı daha da önemli hale gelmektedir.

İnşaat sektörünün sürdürülebilir hale getirilmesi için hem malzeme hem de yapım aşamasında enerji kullanımının sınırlandırılmasına yönelik çalışmalar küresel ısınma ile mücadelede günümüz şartlarında gereklilik haline gelmektedir. Ülkeler inşaat sektörünün sera gazı etkilerini azaltmak için politikalar geliştirerek ortak antlaşmalar ve protokoller

imzalamışlardır. Bu antlaşmalarda ülkeler kendi standartlarını gözeterek yapabilecekleri karbon sınırlama miktarlarını kısa ve uzun vadede belirtmişlerdir. İnşaat faaliyetlerinin sürdürülebilirlik kapsamında kabul gören çalışmaları yeşil bina uygulamaları ve sertifikasyon sistemleridir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

İnşaat mühendisliği uygulamalarında gerekli olan kaynakların kullanımı iklim değişikliği, küresel ısınma, doğal kaynakların tüketilmesi ve karbon ayak izinin artmasına sebep olmaktadır. İnşaat sektörünün gelişiminin doğal kaynakları hızla tüketmesinin önüne geçebilmek için sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir inşaat kavramı son yıllarda giderek önem kazanmıştır. Bu çalışmada inşaat mühendisliği uygulamalarında, karbon ayak izinin sınırlandırılması ve sürdürülebilirlik üzerinde son 20 yılda yapılan araştırmalar irdelenerek bir sentez çalışmasının yapılması amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde öncelikle sürdürülebilirlik ve karbon ayak izi kavramları üzerinde durulmuştur. Çalışmanın ikinci bölümünde inşaat mühendisliği uygulamalarında karbon ayak izini sınırlandırma amacıyla yapılan bilimsel çalışmalar, yeni teknolojiler ve yenilikçi malzemeler incelenerek karbon ayak izinin sınırlandırılması ve sürdürülebilirliğin inşaat mühendisliği uygulamalarına katkıları değerlendirilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, sürdürülebilirlik kapsamında inşaat mühendisliği uygulamalarında hangi alanlarda çalışma yapıldığı ve bu alanların pratik uygulamalarda kullanımlarının uygunluğu değerlendirilerek geliştirilebilir alanlara dair öneriler oluşturulmuştur. İnşaat mühendisliğinin hangi alanlarında karbondioksit açığa çıktığını ve çevresel etkilerin hangi uygulamalar sonucunda açığa çıktığı tespit edilerek üzerine çalışılması gerekli alanlar belirlenmiştir. Son 20 yılda bu alanlar üzerine hangi çalışmaların yapıldığı ve yöntemlerin deneysel sonuçlarla pratik uygulamalara paralelliği değerlendirilmiştir. Öne çıkan teknolojilerin nasıl yaygınlaşabileceği ve çalışmaların uzun vadede ne gibi sonuçlar verebileceği de çalışmada irdelenen konular arasındadır.

Çalışmanın son bölümünde inşaat mühendisliği uygulamalarında karbon ayak izinin sınırlandırılması, atık malzemelerin inşaat mühendisliği uygulamalarında değerlendirilmesi ve sürdürülebilirliği üzerinde yapılan araştırmalar irdelenerek bazı sonuçlara varılmıştır. Karbon ayak izinin sınırlandırılması ve sürdürülebilirlik için bundan sonra yapılması gereken araştırmalara yönelik bazı öneride bulunulmuştur.

1.3. Sürdürülebilirlik ve Karbon Ayak İzi

Sürdürülebilirlik ve karbon ayak izi birbirine bağlı olarak değişen iki kavramdır. Sürdürülebilir bir çevre oluşturuldukça açığa çıkan karbon miktarında azalma görülecektir. Daha ekolojik bir ortamda yaşamak ve çevresel sorunları ortadan kaldırmak amacıyla ülkelerin kalkınma planlarında sürdürülebilirlik ve karbon ayak izi kavramları özellikle ikinci dünya savaşından sonra yer bulmuştur. Çevre kirliliğinin artmasıyla önemi giderek artan sürdürülebilirlik kavramı ülkelerin ortak çalışmaları ile mücadele edebileceği bir sorundur. Bu amaçla sürdürülebilirlik toplum, çevre ve ekonomik çerçevede bir bütün olarak ele alınmalı ve işlenmelidir.

1.4. Sürdürülebilirlik Kavramı

Sürdürülebilirlik kavramı günümüzde sıkça kullanmaya başladığımız kavramların başında gelmektedir. Genel hatlarıyla insanların çevreye zarar vermeden doğal kaynakların dönüşümlü kullanılması olarak tanımlanabilir. Sürdürülebilir kalkınmanın temeli Carl Lowitz ile beraber 1713 yılına kadar dayanmaktadır. 19. Yüzyılın başlarında İngiliz Thomas Malthus'un araştırmaları doğal kaynakların nüfus artışı karşısında tükeneyeceği ve zamanla yetersiz kalacağı düşüncesini doğurmuştur. 1989 yılında Alfred Russell Wallace yaptığı çalışmada yenilenemeyen kaynaklardan petrol, doğal gaz ve kömürün sınırsızca kullanılmaya başlanması ve ormanların hızla tahrip edilmesinin gelecek nesiller için tehlike arz edeceğini belirtmiştir (Gedik, 2020). 1760 yılında başlayan Sanayi Devrimi ile üretim miktarı ve hızı artmıştır. Bu üretimi karşılamak için doğal kaynaklar sınırsızmış gibi tüketilmeye başlanılmıştır. Böylece çevrenin kirlenmesi ve dengenin bozulması küresel bir hal almıştır (Akdoğan, 2023).

20. Yüzyılın ikinci çeyreğinden sonra önem kazanmaya başlayan sürdürülebilirlik kavramı üzerine yapılan konferanslarla birlikte günümüzde dünya nüfusunun büyük çoğunluğuna ulaşmıştır. Sürdürülebilirlikte ana hedef gelecek nesillere temiz ve yaşanılabilir bir doğa bırakmaktır. Sürdürülebilirlik kavramı yenilenemez ve çevreyi kirlüten enerji kaynaklarının kullanılması yerine yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmanın önemli olduğuna vurgu yapmaktadır.

Yaşadığımızın doğanın kirlenmesinde en önemli faktörlerden birisi insanoğludur. Dünya nüfusunda yaşanan hızlı artış doğal kaynakların tüketilmesinde önemli rol

oynamaktadır. 5 milyara 1987 yılında ulaşan dünya nüfusu nüfus projeksiyonlarına 10 milyara 2058 yılında ulaşacaktır (UNFPA, 2022). Artışın bu kadar hızlı gerçekleşiyor olması da kaynakların verimli kullanılmasının önemini göstermektedir. Yaşanan nüfus artışı beraberinde kentsel nüfusu da arttırmıştır. Birleşmiş Milletler Dünya Kentleşme Raporu'nda 1950 yılında kentsel nüfus 751 milyon, 2018 yılında ise bu rakam 4 milyardan fazla olarak karımıza çıkmaktadır. 2050 yılına gelindiğinde ise bu rakamın 6,7 milyar olması beklenmektedir (Cömertler & Cömertler, 2021). Kentsel nüfus artışı beraberinde yapılaşmayı gerektirmiş ve inşaat imalatlarının artmasına sebep olmuştur.

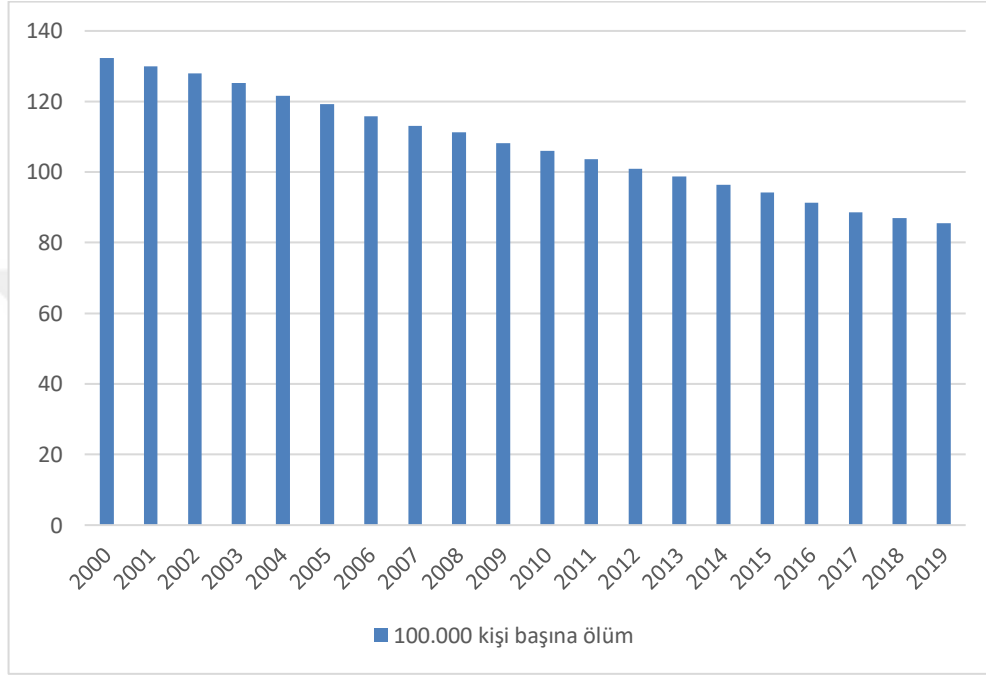
Geçmişten günümüze ekonomi, toplum ve çevre üçgeninde karşımıza çıkan sürdürülebilirlik kavramı bu üç ana bileşenin birlikte işleyişini hedeflemektedir. Gün geçtikçe değeri artan sürdürülebilirlik kavramı sağlıklı bir çevrede yaşamının önemine vurgu yapmaktadır. Sürdürülebilirliğin sağlanması için sadece toplumsal hareketler yeterli olmayıp devletlerin de kalkınma planlarında birbirleri ile ortaklaşa hareket etmesi gerekmektedir. Sürdürülebilirlik zerinde yaşadığımız bu gezegende herkese ayrı ayrı sorumluluklar yükleyerek ancak birlikte hareket edildiğinde sonucuna ulaşılacak bir olgudur.

1.5. Sürdürülebilir Çevre

Çevre, birbiri ile sürekli etkileşim halinde olan su, hava ve toprağın etkileşimleri sonucunda canlıların yaşadığı ortamın genel adıdır. Ekosistem ise insan ve diğer canlıların etkileşimleri ile sürdürülebilir koşulların oluşmasının tanımı olarak nitelendirilmektedir. Çevre bütün canlıların ortak yaşam alanı olup kirlenmesi bütün canlı yaşamını etkilemektedir (Haftacı & Kamuran, 2007). Doğal çevre de bulunan kaynaklar yenilenebilir ve yenilenemez olarak ikiye ayırmak mümkündür. Dengeli biçimde kullanılmadığında yenilenebilir kaynaklarının da sınırlarının olması çevresel kirlilikleri ve düzensizliği de beraberinde getirmektedir.

Sürdürülebilirlik kavramının en genel konularından bir tanesi de sürdürülebilir çevre kavramıdır. Doğal çevrenin korunarak gelecek nesillere aktarılması fikri sürdürülebilirliğin ana amaçları arasında yer almaktadır. Çevre ve hava kirliliğinin sebeplerinin başında sanayileşme ve buna bağlı kentleşmenin artması gelmektedir. Doğal yaşamdan uzaklaştıkça aradaki denge bozulmaktadır. Hızla değişen toplum ihtiyaçları çevre için sorunlara yol açmaktadır (Kılıç S. , 2006). İnsanoğlu var olduğundan beri doğa ile etkileşim halindedir.

Avcı-toplayıcı toplum döneminde doğayı anlamaya ve uyumlu yaşamaya çalışan insan neolitik çağ ile doğaüstünde hâkimiyet kurmaya başlamıştır. Sanayi devriminin yaşanması ile insanlığı artık doğal kaynakların sömürülmeye başlandığı ve ekosisteme geri dönüşümü olamayacak zararların verildiği görülmektedir (Ergün & Çobanoğlu, 2012).



Şekil 1. Hava Kirliliği Nedeniyle Ölüm Oranı (Our World in Data)

Hava kirliliği sebebiyle dünya çapında 100.000 kişiden 132'si 2000 yılında hava kirliliği sebebiyle hayatını kaybetmiştir. Sürdürülebilirlik kavramı önem kazandıkça ve küresel ısınma ile mücadele konusunda ülkelerin yaptığı çalışmaların artması bu oranları yıllar içerisinde düşürmüştür. 2019 yılında 85 kişi hava kirliliğinden hayatını kaybetmesi ülkelerin temiz ve yaşanılabilir çevre için yürüttükleri politikaların sağladığı yararı göstermektedir. Sürdürülebilir çevre için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ve karbon salınımlarının azaltılması da bu oranların düşmesine katkı sağlamaktadır.

1.6. Sürdürülebilir Kalkınma Kavramı

Sürdürülebilir kalkınma kavramı, ekonomik olarak büyüme, teknolojik gelişmeleri takip etme ve sanayileşmenin gerçekleşmesi sırasında çevreyi ve doğal kaynakları koruyarak gelecek nesillere güvenli bir şekilde ulaştırmaktır. Gün geçtikçe küreselleşen dünyamızda yaşanan gelişmelerin sonuçları da bölgesel değil gezegenimizin tamamını ilgilendirmektedir. Küreselleşme kavramı ülkelerin siyasi, ekonomik, teknolojik ve toplumsal olarak birbirleri ile iletişimi demektir. Etkileşim arttıkça ülkelerde zamanla birbirlerine bağımlı hale gelmektedir. Zincirin halkaları gibi bağlı olan ülkeler günümüzde tek bir sistem haline gelmektedir. İkinci dünya savaşı sonrası savaşın yıkıcı etkilerinden kurtulmak için başlayan kalkınma hareketleri beraberinde çevresel sorunları da getirmiştir (Kaypak, 2011).

1968 yılında kurulan Roma Kulübü ekonomik ve çevresel sorunların toplum hayatını etkilemesinden dolayı çözüm üretmek adına rapor yayımlamışlardır. Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'ne hazırlatılan rapor ekonomik kalkınma ve çevre kavramlarının ilişkisini inceleyen ilk belgelerdendir. Rapora göre sanayileşme ve nüfus artışı sürekli olarak artarsa 150 yıl sonra yaşanabilir çevre koşulları ciddi anlamda zor olacağına dikkat çekilmiştir (Can, 2017). Roma Kulübü çalışmalarının 1970 yıllarının başında yeteri etkiyi göstermediği ve çevre sorunlarının çözümünde yetersiz kaldığı görülmektedir. Büyümeye dur veya sıfır büyüme fikirlerinin benimsendiği çalışmaların küresel ekonomide karşılık bulamamaktadır. Böylece Roma Kulübü gelişmeyi durdurmak yerine ekonomik gelişmeler ile çevreyi bir arada yürütebilecek model olan sürdürülebilir kalkınma kavramını ön plana çıkarmaktadır. Doğal kaynakların sadece günlük kullananların değil gelecek nesillerinde hakkı olduğu düşüncesi sürdürülebilir kalkınmanın temelini oluşturmuştu (Şahinöz, 2019).

Günümüzde sürdürülebilir kalkınmanın olması için toplumların birlikte hareket etmesi ve ülkelerin ortak kalkınma planları yapması fikri benimsenmektedir. Son yıllarda bir araya gelerek düzenlenen konferanslar ve imzalanan anlaşmalar sürdürülebilir kalkınma temellerini oluşturup ve geleceğe daha güvenli adımlar atılmasının da temelini oluşturmaktadır.

1.6.1. Ülkelerin Kalkınma Planlarında Sürdürülebilirliğin Yeri

Sürdürülebilirliğin sağlanması için toplumun bireysel hareketleri, tavır ve tutumları önemli olsa da ülkelerin bu konuda göstereceği hassasiyet toplu sürdürülebilirliğin

sağlanması için gereklidir. Ülkeler öncelikle sürdürülebilirlik kavramını gündemlerine alıp önemsemeli alacakları kararlar ile toplumu eğitmeli ve bilinçlendirmelidir. Sürdürülebilir kalkınma kavramın ekonomik, sosyal ve çevresel konular olarak üç ana başlık altında incelenmelidir. Bu üç kavramı birbirinden ayıramayacağımız gibi aralarında denge oluşturmadan da sürdürülebilirlik sağlamak mümkün olamamaktadır. Sürdürülebilirliğin önündeki engelleri çevresel, ekonomik ve sosyal kavramların bir bütünü gibi yaklaştığımızda sorunların çözümü de etkili olmaktadır (Seydioğulları, 2013).

İlk kez çevreyi koruma ve doğal kaynakların tüketilmesi konusunun küresel boyutta ele alınması 5-16 Haziran 1972 tarihinde Stockholm’de gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler İnsan Çevresi Konferansında gündeme gelmiştir. Konferans sonrasında Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) kurulmuştur. Ekim 1987 yılında Dünya Ekonomik Kalkınma Komisyonu (WCED) tarafından yayımlanan “Brundtland Raporu” ile toplumu, ekonomiyi ve çevreyi birlikte etkileyen sürdürülebilir kalkınma kavramının temelleri atılmıştır. Sürdürülebilirlik kavramının uygulanmaya başlamasının adımları da 1992 yılında Rio’da gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) ile olmuştur (T.C. Dışişleri Bakanlığı, 2023).

Brundtland Raporu sonrasında sürdürülebilirliğin çevre, toplum ve ekonomi alanlarında bütün olarak incelenmesi önem kazanmıştır. Rapora göre sürdürülebilirliğin sağlanması için ekonomik gerçekler gözetilmeli, ana hedef çevreyi koruma olmalı ve toplumsal ayrılıklar olmadan yoksul ülkelere de eşit yaklaşımla kaynaklarının orantısız kullanılması engellenmelidir (Şen, Kaya, & Alpaslan, 2018). Sürdürülebilirlik kavramının gelişimini etkileyen Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı’nın düzenlenme amacı gelecek nesillerin karşılaştığı sorunların başında gelen karbon salınımının artması, hava kirliliği, sera gazı etkisi ve buna bağlı iklim değişikliğinin olası etkilerini ülkelerin de katılımıyla ortak bir hareket ile engellenebileceği düşüncesidir. Katılımcıları arasında Türkiye’nin de bulunduğu konferansta sürdürülebilirliğin gelişimi için beş ana başlık belirlenmiştir. Bunlar Gündem21, Rio Deklarasyonu, İklim Değişikliği Sözleşmesi, Biyolojik Çeşitlilik Sözleşmesi ve Ormanların Korunması ve Geliştirilmesine İlişkin Prensipler Listesidir (Alada, Gürpınar, & Budak, 2012).

1992 Rio Konferansı sonrasında imzalanan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi atmosferdeki sera gazı miktarının artması ve iklim değişikliğinin en önemli sebeplerinden olan insan faktörünün getirdiği tehlikeleri sınırlamayı ve durdurmayı

hedeflemiştir. Ülkemiz Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne 24 Mayıs 2004 tarihinde 189. taraf olarak katılmıştır (İklim Değişikliği Başkanlığı, 2023).

Rio Konferansı sonucunda oluşturulan Gündem21 eylem planı 21. yüzyılın çevresel, ekonomik ve toplumsal alanlarda hükümetlerin iklim değişikliğinin önüne geçmek için yapılması gerekenlerin genel çerçevesi belirlenmiştir (Ozmehmet, 2008). Gündem21 sadece çevrenin korunması konusuna değil aynı zamanda toplumların fırsat eşitliği, hastalıklarla mücadele ve yaşam şartlarının iyileştirmesi konularına da değinilmiştir. Yaşanabilir bir çevre için de hükümetlerin, iktisadi kuruluşların ve yerel yönetimlerin birlikte hareket etmesi gerektiğinin önemi vurgulanmıştır (Emrealp, 1998).

İklim değişikliğinin önüne geçebilmek için karbon salınımının azaltılması gerektiğini vurgulayan bir diğer çalışma da 1997 yılında yapılan Kyoto Protokolü'dür. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında 169 ülkenin imzaladığı bu protokol 2005 yılında ancak yürürlüğe girebilmiştir. Günümüzde de iklim değişikliği ile mücadelede en önemli eylem planları bu protokolün belirlediği başlıklar altında yürütülmektedir (Özcan, 2020). Temel amacı sera gazı salınımını düşürmek olan protokolün taraflarından olmayan en önemli devlet Amerika Birleşik Devletleri'dir. Karbon salınımını azaltmak için uygulaması gereken prosedürlerin üretim maliyetlerini arttıracaklarını bunu sonucunda olası ekonomik sorunları öne sürerek Kyoto Protokolü'nü imzalamamıştır (Tamer, 2009). Kyoto Protokolü'nün ana hedeflerinden birisi sera gazı salınım miktarlarını 1990 yılındaki seviyele indirmektir. Bazı ülkelere öncelikle artım için çeşitli ayrıcalıklar sağlanmıştır. Bu ülkelerden biri olan Avustralya %8 oranında salınımı arttırabilecektir. Avrupa Birliğinin salınımı azaltma oranı %8 olarak belirlenirken Amerika Birleşik Devletleri'nde bu oran %7 olarak belirlenmiştir (Türkeş, 2006). Kyoto Protokolü'nün kapsadığı dönemler iki aşama olarak belirlenmiştir. Bunlardan birincisi 2008-2012 dönemidir. 1990 yılını referans alarak sera gazının salınımları sınırlandırılması kararlaştırılmıştır. 2013-2020 dönemlerini kapsayan ikinci dönemde ise ilk dönemde sorumluluklarını tamamlayan Rusya Federasyonu, Japonya, Avusturalya ve Kanada ikinci dönemde yükümlülük altına girmeyeceklerini belirtmişlerdir (Kaya H. , 2020). İklim değişikliği ile mücadelede mihenk taşlarından olan Kyoto Protokolü günümüzde de geçerliliğini koruyan en önemli antlaşmalardandır.

Sürdürülebilir kalkınmanın önemli konferanslarından biri de 2002 yılında gerçekleştirilen Johannesburg Konferansı'dır. Rio konferansından 10 yıl sonra düzenlemesi nedeniyle Rio+10 Konferansı olarak da adlandırılır. Konferansın gerçekleştirilme nedeni

Rio'dan sonra geçen 10 yıllık dönemin değerlendirilmesini yapmak ve konferansın varsa eksik yönlerini düzenlemektir (Dal & Akçay, 2021). Konferansa sadece devletler değil yerel kuruluşlar, özel sektör temsilcileri ve sivil toplum kuruluşları gibi toplumun birçok kesiminden temsilciler de katılmıştır. Konferansta yenilenebilir temiz enerji kaynaklarının kullanılmasının desteklenmesi konusunda ortak hareket etme fikrini benimsemişlerdir (Kaya & Nurcan, 2021).

Rio Konferansı'ndan 20 yıl sonra 2012 tarihinde düzenlenen Rio+20 Yeryüzü Zirvesi'nin de sürdürülebilir kalkınmada önemli rolü vardır. Rio da yapılan konferansta geçmişte yapılan sözleşmeler gözden geçirilmiş, nüfus artışının getirdiği yeni problemler değerlendirilmiş, ekonomik ve çevresel sorunlar irdelenmiştir. Hem Rio+10 hem de Rio+20 konferansları sürdürülebilir kalkınma planlarının kararlılığını göstermektedir (Karabıçak & Özdemir, 2015).

Kyoto Protokolü 2020 yılına kadar olan süreçleri kapsayacak olmasından Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin tarafları ile 2020 yılı sonrası iklim değişikliği ile mücadele etmek için 2015 yılında Paris Antlaşması kabul edilmiştir. Diğer konferansların ve protokollerin aksine çok daha hızlı kabul görmüş olan bu antlaşma yıllar boyu sürdürülebilir kalkınma da geline nokta göstermektedir. Sürecin hızlı işlemesinin bir nedeni de Amerika Birleşik Devletleri'nin antlaşmaya taraf olmasıdır. Antlaşmanın ana hedefi küresel ısınmayı 2 derecenin altında tutmaktır (Kaya H. , 2020). Atmosfere en çok karbon salınımı yapan Çin Halk Cumhuriyeti Paris Antlaşması öncesi Birleşmiş Milletler' e sunduğu raporda karbon salınımını 2030 yılına kadar arttıracığını, sonrasında ciddi oranda düşüreceğini beyan etmiştir. Türkiye sera gazlı salınımını 2030 yılına kadar %21 azaltacağını belirtmiştir (Öztürk & Öztürk, 2019).

Tablo 1. Sürdürülebilirlik Kavramının Tarihsel Gelişimi

Yıl	Yapılan Çalışmalar
1972	Birleşmiş Milletler İnsan Çevresi Konferansı
1987	Brundtland Raporu
1992	Rio Konferansı
1997	Kyoto Protokolü
2012	Rio+20 Yeryüzü Zirvesi
2015	Paris Antlaşması

Tablo 2.1’de sürdürülebilirlik adı altında yapılan ve etkileri geniş çapta olan çalışmalar kronolojik olarak gösterilmektedir. Geçmişten günümüze birçok farklı şehirde ve farklı kuruluşlar tarafında yapılan çalışmalarla toplum, çevre ve ekonomik sürdürülebilirlik sağlanmaya çalışılmaktadır. İklim değişikliği günümüzün en önemli sorunlarından bir tanesi olmakla beraber gelecek kuşaklara yaşanabilir bir çevre bırakmak için ülkelerin kalkınma planlarında yıllardır yer bulan sera gazı etkilerini azaltma ve küresel ısınmanın önüne geçme planları her zaman dünya gündeminde önemini korumalıdır.

1.6.2. Türkiye’nin Sürdürülebilir Kalkınma Planları

Dünya üzerindeki her ülke gibi Türkiye’de çevresel sorunlara tarihinde yer veren ülkelerden biridir. Cumhuriyet tarihi göz önüne alındığında çevre ile ilgili ilk düzenleme 1930 yılında çıkarılan Belediye Kanunu’na kadar dayanmaktadır. Aynı yıl 1598 sayılı Umumi Hıfzıssıhha Kanunu insanların çevreye verebileceği zararlar ve çevrenin temiz kullanılması üzerinde durulmaktadır. Zamanla artan nüfus ve üretim arzı orman alanların tahribatını da hızlandırmıştır. Orman tahribatının önüne geçmek için 1956 yılında 6831 sayılı Orman Kanunu anayasaya eklenmiştir. Türkiye üç tarafı denizlerle çevrili bir ülke olmasına rağmen su kaynaklarını ve su ürünlerini kapsayacak ancak 1971 yılında yürürlüğe girmiştir. 1380 sayılı Su Ürünleri Kanunu ile su kaynaklarının ve su ürünlerinin denetimi arttırılmıştır. 1983 yılında ise kültürel varlıkları ve tarihi alanları korumak için 2863 sayılı Kültür Varlıklarını Koruma Kanunu uygulanmaya başlanmıştır (Şengün, 2015).

Türkiye’de 1980’li yılların başına kadar çevre ile ilgili mevzuatlar genel anlamda bağlayıcı olmamaktadır. 1983 yılında 2872 sayılı Çevre Kanunu’nun yürürlüğe girmesi ile çevre mevzuatı konularında bir ortak çatı belirlenmiştir. Sürdürülebilirlik kapsamında çevreyi korumak bütün kurum ve kuruluşların sorumluluğunda olduğu belirtilmiştir. Kanunda çevrenin temizliği, atık dönüşümü ve gelişmenin yeşil olarak ilerlemesi ön planda tutulmaktadır. Çevre ile ilgili 1983 yılında çıkarılan diğer bir kanun da Milli Parklar Kanunu’dur. Böylece ekolojik dengede önemli rol oynayan ormanlık alanlar ve tahrip edilmemiş habitatların da korunması amaçlanmıştır (Çelikyay, 2021). Türkiye’de çevre ile ilgili kanunların tarihsel gelişimi Tablo 2.2 de gösterilmiştir.

Tablo 2. Türkiye'nin Çevre Kanunları (CMBS, 2023)

Yıl	Sayı	Kanun
1956	6831	Orman Kanunu
1971	1380	Su Ürünleri Kanunu
1983	2863	Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu
1983	2872	Çevre Kanunu
1983	2873	Milli Parklar Kanunu
1983	2960	Boğaziçi Kanunu
1985	3194	İmar Kanunu
1985	3213	Maden Kanunu
1990	3621	Kıyı Kanunu
2003	4915	Kara Avcılığı Kanunu
2005	5403	Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu
2007	5627	Enerji Verimliliği Kanunu
2020	7261	Türkiye Çevre Ajansının Kurulması İle Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun

Dünyanın diğer ülkeleri gibi Türkiye’de küresel ısınmadan ve iklim değişikliğinden etkilenmektedir. Türkiye bulunduğu konum açısından küresel ısınmanın etkilerinin fazla olacağı riskli gruplar içerisinde. Sera gazı etkilerinin artması sadece çevresel değil sosyo-ekonomik sıkıntılar da getirecektir. Türkiye’de yaşanacak çevresel sorunların başında sıcak ve kurak günlerin sayılarında artış gelmektedir. Çölleşmenin ve erozyonun artmasına sebep olacak olan kuraklık tarım sektöründe gerilemeye neden olacaktır. Akdeniz iklim kuşağında bulunan Türkiye’de ayrıca şiddetli sıcaklığa bağlı orman yangını sayıları ve daha geniş

alanlarda görülme olasılığı da artacaktır. İçme suyu kaynaklarının da azalacağı varsayıldığında içme suyuna ulaşmanın ortaya çıkaracağı zorluklar sosyal çevreyi de etkileyecektir. Kentsel nüfusun giderek arttığı ülkemizde kentsel ısı adası etkisiyle büyük kentlerde sıcaklık değerleri artacağından soğutma için kullanılacak enerji miktarında artış görülecektir. Sıcak havalarla birlikte enfeksiyonlar ve sağlık sorunlarının gözükme sıklığı da artması beraberinde ekonomik yükümlülükler sebev olacaktır (Kılıç C. , 2009).

Türkiye ilk kez iklim değışikliği ile mücadelede 1973-1977 yıllarını kapsayan Üçüncü Beş Yıllık Kalkınma Planı'nda yer vermiştir. Beşinci Kalkınma Planı'nda ise sürekli olarak tüketilen doğal kaynakların gelecek nesillere daha faydalı biçimde bırakılması gerektiği vurgulanmıştır. Sürdürülebilir kalkınma kavramının kullanılmaya başlandığı Altıncı Beş Yıllık Kalkınma Planı sürdürülebilirlik konusuna yeni bakış getirmektedir. Çevre sorunlarının sadece doğayı değil sosyal ve ekonomik düzeni de bozacağı belirtilerek gerekli politikalarla ele alınması Yedinci (1996-2000) ve Sekizinci (2001-2005) Beş Yıllık Kalkınma Planlarında değerlendirilmektedir (Ada, 2015).

Üçüncü Beş Yıllık Kalkınma Planı resmi bir belge olarak çevre sorunlarının dile getirildiği ilk belgedir. Planda ekonomik kalkınmanın önemi vurgulanıp çevresel sorunların kalkınmanın önünde olmaması gerektiğine dikkat çekilmiştir. Bu nedenle 1972 Stockholm Bildirgesi'ndeki sürdürülebilirlik kavramına paralellik göstermiştir. 1985-1989 yıllarını kapsayan Beşinci Beş Yıllık Kalkınma Planı sürdürülebilir kalkınmanın ülke gündeminde yavaş yavaş oluşmaya başladığının göstergesidir. Çevre kirliliğinin, erozyonun, doğal kaynakların hızla tüketilmesinin ve gelecek nesillere ekolojik dengenin bozulmadığı bir çevre bırakılması gerektiği fikirleri planın üzerinde durduğu konulardır. Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1996-2000) hali hazırda kullanılan çevre yönetmeliklerinin yeterli olmadığı ve 1992 Rio Konferansı ve Gündem21'in Türkiye tarafından benimsenmiştir. Konferans sonrası küresel olarak etkisini arttıran sürdürülebilir kalkınma kavramı Türkiye'yi de etkilediğinin göstergesidir (Ergün & Çobanoğlu, 2012).

Türkiye küresel ısınmanın etkilerini azaltmak için sadece ulusal çapta kalkınma planları yerine dünya çapında yapılan konferanslara ve antlaşmalara da katılmıştır. Bunun sebebi, küresel mücadele olmadan tek taraflı olarak iklim değışikliğinin etkilerini azaltmaya çalışmanın gerekli etkiyi göstermeyecek olmasıdır. Türkiye iklim değışikliği ile ilgili küresel çapta birçok konferansa katılmıştır. Bu konferansların sonucunda imzalanan antlaşmalara ve protokollere de taraf olmuştur.

Tablo 3. Türkiye'nin Taraf Olduğu Antlaşmalar (T.C. Dışişleri Bakanlığı, 2023)

Adı	Yeri	Tarihi	Türkiye Taraf Olma Tarihi
Ramsar Sözleşmeleri	Ramsar	1971	1994
Viyana Sözleşmesi	Viyana	1987	1991
BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi	Rio de Janeiro	1992	2004
Barselona Sözleşmesi	Barselona	1995	2002
Kyoto Protokolü	Kyoto	1997	2009
Paris Antlaşması	Paris	2015	2016

Türkiye tablodaki antlaşmaların haricinde iklim değişikliği ve doğal kaynakların korunmasına yönelik başka antlaşmalara da taraf olmaktadır. Küresel çapta yapılan konferanslara da katılan ülkemiz sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda diğer ülkelerle iş birliği içinde çalışmalarını sürdürmektedir.

1.7. Sürdürülebilir Yapı Tasarımı ve Malzemeleri

Yapıların inşa edilmesinde en büyük sebeplerden bir tanesi yapıyı gelecek nesillerin de kullanımına kazandırmaktır. İnşası tamamlanan yapıların uzun ömürlü olması hem yapıldığı dönem için ihtiyacı karşılamış olmasına hem de kullanıldığı bölgedeki talebe devamlı olarak cevap verebileceğinin bir göstergesidir. Bu bağlamda sürdürülebilir yapı, yapıyı oluşturan malzemelerin içeriklerinde zaman geçtikçe deforme olmadan, uzun yıllar boyunca yapının özelliklerini koruması ve gelecek nesillere de aynı şekilde hizmet etmesi anlamına gelmektedir (Tufan & Özel, 2018). Yapıların sürdürülebilirliğe hizmet etmesi için çevre ve toplum ile bütünleşmesi gerekmektedir. Tasarım yapılırken yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı arttırılmalı, çevreye zarar vermeyen, inşa edildiği çevrenin olanaklarını nitelikli değerlendiren ve toplumun rahatını ve sağlığını gözeten yapılar inşa edilmelidir (Gökşen, Güner, & Koçhan, 2017).

İnşaat malzemelerinin üretimi ve kullanılması sürecinde ciddi miktarda karbondioksit (CO₂) açığa çıkmaktadır. Yapı tasarımında en çok kullanılan malzemelerin başında beton gelmektedir. Çimento, su, agrega ve bazı kimyasal katkı maddelerin bir araya gelerek

oluşturduğu beton en temel yapı malzemesidir. İçerisinde bulunan çimentonun üretimi esnasında açığa çıkan karbondioksit doğaya zarar verip ve sera gazı etkisine sebep olmaktadır. Nüfus artışının ortaya çıkardığı yapılaşma ihtiyacını karşılamak için yıllar içerisinde ülkelerin ürettikleri beton miktarlarında genellikle artışlar gerçekleşmiştir. Avrupa Hazır Beton Birliğinin (ERMCO) verilerine göre 2009 yılında Türkiye’de 66,4 milyon m^3 olan beton üretimi 2019 yılında 80 milyon m^3 olmuştur. Avrupa Birliği’ne bakıldığında ise 2009 yılında 286,5 milyon m^3 iken bu miktar 2019 yılında 358,8 milyon m^3 olmuştur.

Tablo 4. Ülkelerin Beton Üretim Miktarları (ERMCO, 2019)

Ülkeler	Beton Üretim Miktarları (Milyon m^3)										
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Türkiye	75	90	100	104	115	121	123	129	135	117	80
Avrupa Birliği	544,9	521,1	429,8	373,2	338	346	345,5	347,2	354,2	320	358,8
Almanya	69,4	71,3	80,9	67,9	67,2	77,4	77,4	77,4	79,2	82,6	81,3
Fransa	55	54	59	55	54	51	48	49,5	52	53,5	54
İtalya	86	68,5	65,2	58,7	46,6	40	35	32	33	33	34
İngiltere	30,8	28,5	30,5	28	28,2	37	39	39	37	-	44
İspanya	170	170	60	40	32	31	32,5	32,5	32,5	22,2	27,5
A.B.D	378	378	270	310	330	330	365	370	378	365	375

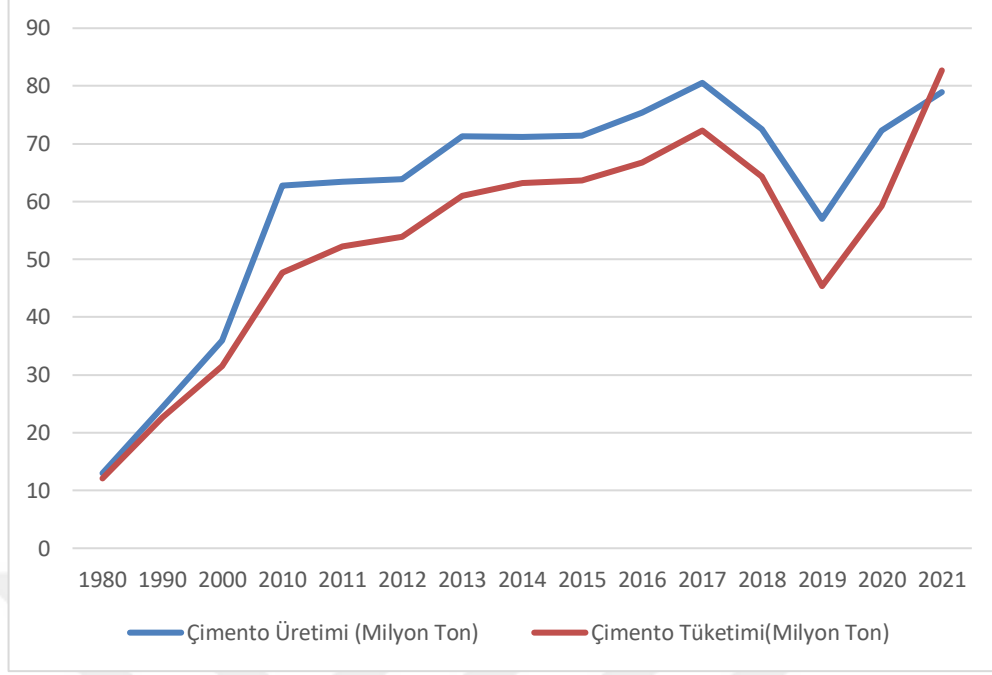
Beton üretiminin artması içinde olan çimento, agrega ve suyun kullanımının da artması demektir. Ortalama olarak %15’i su olan betonun su kullanımıyla birlikte küresel ısınma sonucu yaşanan kuraklığa etkileri de yadsınamaz bir gerçektir.

Betonun bir diğer bileşeni olan çimento kullanımı da açığa çıkardığı karbondioksit ile birlikte sera gazı etkisinin oluşmasına sebep olur. 2021 yılında tahmini olarak küresel çapta 4.4 milyar ton çimento üretimi gerçekleşmiştir.. Çin 2500 milyon tonluk çimento üretimi ile listenin başında bulunurken, Türkiye 78,9 milyon ton çimento üretimi ile 5. sırada bulunmaktadır (Sanayi ve Kalkınma Bakanlığı, 2022).

Tablo 5. Ülkelerin Çimento Üretim Miktarı (Sanayi ve Kalkınma Bakanlığı, 2022)

Ülkeler	2021 Yılı Çimento Üretim Miktarı (Milyon Ton)
Çin	2.500
Hindistan	330
Avrupa Birliği	171,5
Vietnam	100
A.B.D	92
Türkiye	78
Endonezya	66
Brezilya	65
İran	62
Rusya	56
Suudi Arabistan	55
Japonya	52
Meksika	50
Güney Kore	48
Mısır	40

Türkiye de üretilen ve tüketilen çimento miktarlarına baktığımızda yıllara göre sürekli olarak artan bir tablo gözükmemektedir. Bu artışla birlikte açığa çıkardığımız karbondioksit miktarı da yıllara göre artarak sera gazlarının etkilerinin artmasına sebep olmaktadır. Ortalama olarak 1 ton çimento üretildiğinde 700-760 kg arasında karbondioksit gazı açığa çıkmaktadır (Aliusta & Yılmaz, 2020).



Şekil 2. Türkiye'nin Çimento Kullanımı (Sanayi ve Kalkınma Bakanlığı, 2022)

Veriler incelendiğinde 2019-2020 yılları arasında yaşanan pandeminin etkileri ile çimento üretim ve tüketimindeki azalış dikkat çekmektedir. Bu yıllar haricinde çimento üretimi ve tüketimi sürekli olarak artmıştır. Nüfusun artmasıyla da son yıllarda en çok tüketim miktarına ulaşmıştır.

1.8. Küresel Isınma ve Sera Gazı Etkisi

İklimin tanımı, geniş bir coğrafyada uzun yıllar etkili olan hava şartları olarak nitelendirilir. Sera gazlarının artması bölgede yaşanan sıcaklık ve yağış değerlerinde yıllarca ölçülerek oluşturulan istatistik bilgilerinin değişmesine sebep olmaktadır. Dünyaya gelen güneş ışınlarının sera gazları tarafında hapsedilmesiyle dünyanın ortalama sıcaklığının sürekli olarak artmasına neden olmaktadır (Kuşkaya & Gençoğlu, 2017).

İnsanoğlunun günümüzde karşılaştığı sorunların başında küresel ısınma gelmektedir. Küresel ısınma, atmosferdeki sera gazlarının artmasına bağlı olarak dünyanın ortalama sıcaklığının yükselmesidir. İnsan hareketliliğinin küresel ısınmanın artmasına olan etkisi bilimsel çalışmalarla belirlenmiştir. Enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan fosil yakıtlar küresel ısınmanın başlıca sebebinin olarak görülmektedir. Fosil yakıtların kullanılması sonucu açığa çıkan sera gazlarının atmosferdeki yoğunluğu arttıkça küresel ısınma ve buna bağlı iklim değişikliği hareketleri de hızlanarak devam edecektir (Üreden & Özden, 2018).

Küresel ısınmanın en önemli sebeplerinden olan sera gazı etkisi iklim değişikliği ve çevre sorunlarının azaltılması amaçlanarak yapılan konferanslarda en önemli konuların başında gelmektedir. Sera gazlarının salınımının azaltılması için sebeplerinin ve gazları oluşturan içeriklerinin detaylı şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

1.8.1. Sera Gazları

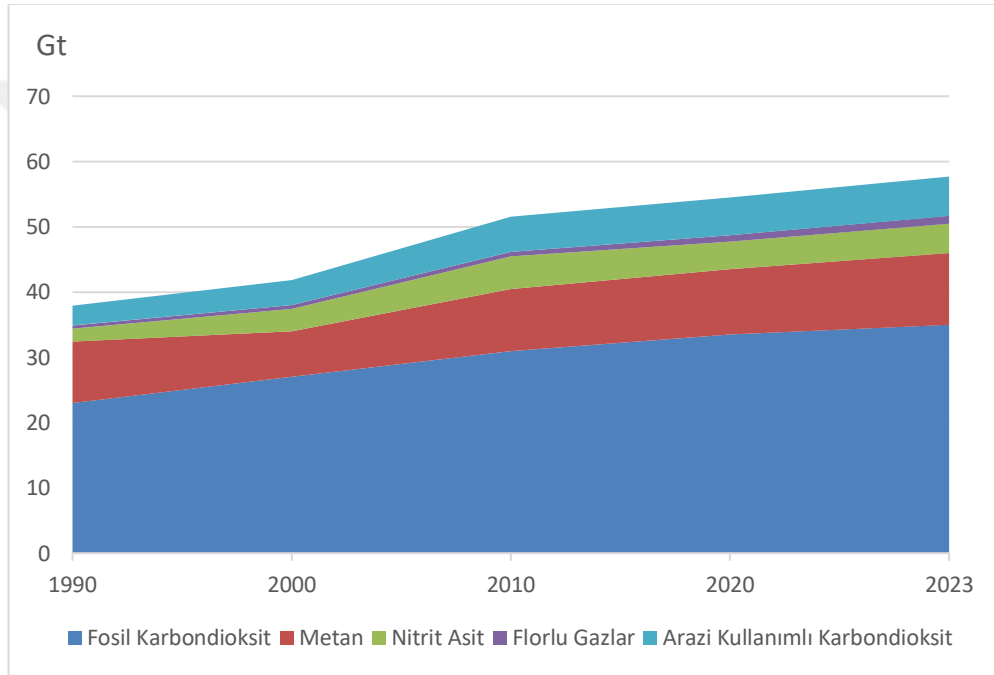
Yıllar boyu artan nüfus artışı enerjiye olan ihtiyacı günden güne arttırmaktadır. Enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan gazların başında fosil yakıtlar gelmektedir. Petrol ve doğal gazın aşırı kullanımıyla açığa çıkan gazlar atmosferin dengesini değiştirmektedir. Sera gazları güneşten gelen ışınların tutulmasını sağlayan ve aslında yeryüzünü ısıtarak canlı yaşamına uygun hale getirmektedir. Yapılan araştırmalarda atmosferde sera gazları olmasaydı yeryüzü sıcaklığı günümüz koşullarından 30°C daha soğuk olacağını ön görmektedirler. Ancak insan faaliyetleri ile birlikte artan sera gazı miktarı atmosferin fiziksel ve kimyasal yapısını değiştirerek ısınma miktarını arttırmış ve iklim değişikliğini tetikleyerek canlı yaşamını tehdit etmektedir. Atmosferdeki sera etkisinin ana bileşeni %75'lik oranı ile okyanusların buharlaşması sonucu oluşan su buharıdır. Atmosferin doğal yapısında karbondioksit gazı bulunmasına rağmen miktarının değişmesi de ısı dengesini bozmaktadır (Apaydın, 2002).

Atmosferi meydana getiren gazların başında Azot (%78,08), Oksijen (%20,95) ve Argon (%0,93) gelmektedir. Bu gazların yanında karbondioksit atmosferde %0,03 oranında bulunur. Bu gazlar arasında atmosferdeki ısıyı tutma özelliği en çok olan gaz karbondioksittir. Sera gazlarının bir kısmı atmosferde doğal olarak oluşurken bir kısmı da insan hareketliliğinden dolayı açığa çıkmaktadır. Başlıca atmosferde doğal oluşan sera gazlarını sıralayacak olursak;

- Su Buharı(H_2O)
- Ozon(O_3)
- Karbondioksit(CO_2)
- Nitrit Oksit (N_2O)
- Metan(CH_4)

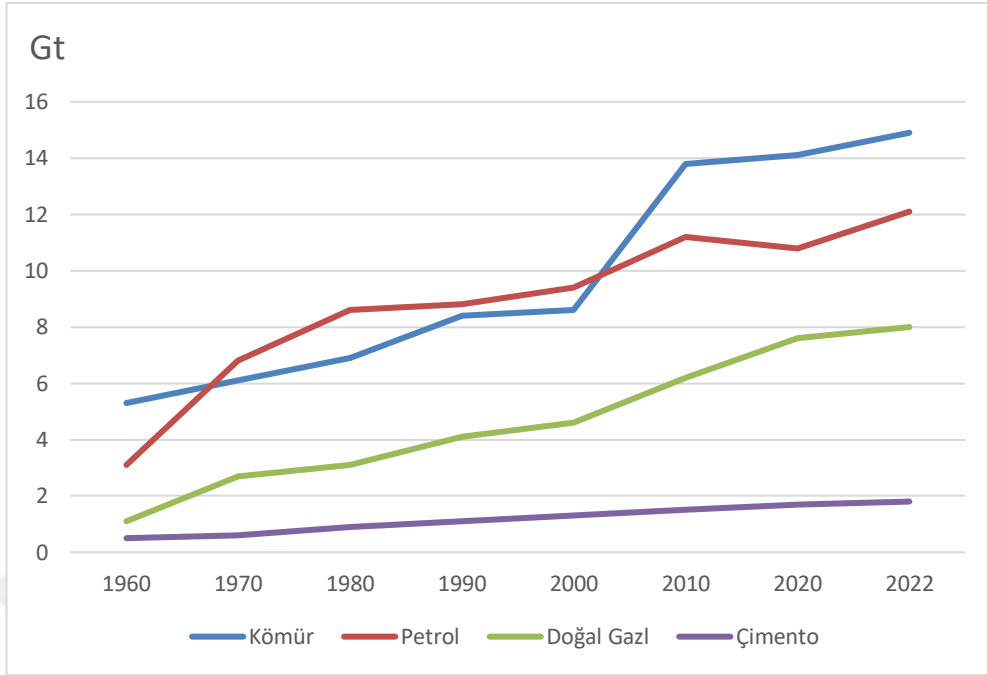
gazları atmosferdeki sera gazlarının büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. İnsan hareketliliğinin açığa çıkardığı gazlar ise kloroflorokarbon (CFCs), hidrokloroflorokarbon (HCFCs) ve hidroflorokarbon (HFCs) gibi genel adlarıyla halokarbonlardır (Güler, 2018).

Sera gazları arasında karbondioksit ısınma etkisi olarak küresel ısınmayı tetikleyen gazların başında gelmektedir. İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan yani antropojenik sera etkisinin yaklaşık %50-60'ını karbondioksit gazı oluşturmaktadır. Sanayi devrimi sonrası artış hızı yükselen karbondioksit gazı özellikle petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtların kullanımı ile açığa çıkmaktadır (Aksay, Ketenoglu, & Kurt, 2005).



Şekil 3. Küresel Sera Gazı Emisyonu (1990-2023) (UNEP, 2023)

Küresel sera gazları salınımı 1990'lı yıllardan günümüze kadar genellikle artan bir eğri seyir etmektedir. Sera gazları arasında salınım miktarı en çok olan gaz karbondioksit gazıdır. Karbondioksit salınımını büyük çoğunluğunu fosil yakıtlardan oluşmaktadır. Kömür, petrol, doğal gaz ve çimento fosil yakıtlar arasında karbondioksit salınımı en yüksek olan yakıtları oluşturmaktadır.



Şekil 4. Fosil Yakıtların Karbondioksit Salınım Miktarları (Gt) (GCP, 2022)

Fosil kaynaklar arasında kömür karbondioksit salınımının en yüksek olduğu yakıt konumundadır. Küresel çapta karbondioksit salınımının toplam değeri yıllar boyunca artış eğiliminde olmaktadır. Sadece 2020 yılında pandeminin etkileri ile birlikte özellikle kömür ve petrolden dolayı oluşan karbondioksit salınımı miktarı 2010 yılındaki seviyelere gerilediği görülmektedir. Doğal gaz ve çimento kaynaklı karbondioksit salınımının miktarında önemli bir değişiklik yaşanmamıştır. Kömür, petrol ve doğal gaz sektör bazında kullanım alanları daha geniş olduğunda çimentoya oranlar karbondioksit salınımları daha fazladır. Çimento ise genel anlamda inşaat sektörünün bir ürünü olarak karbondioksit salınımında inşaat sektörünün önemini bir kez daha göstermektedir.

Kloroflorokarbon (CFC) gazları genellikle deodorant, sprey, klima ve buzdolabı gazlarında bulunan bir gazdır. Bir kloroflorokarbon molekülü bir karbondioksit molekülüne oranla güneş ışınlarını atmosferde çok daha fazla miktarda absorbe etmektedir. Kloroflorokarbonlar durağan yapıya sahip olduklarından atmosferde var olma süreleri de fazladır. Montreal Protokolü ile kullanımları azaltılmaya çalışılsa da küresel çapta konu ile ilgili nitelikli bir başarı elde edilememiştir. Metan gazı da tıpkı kloroflorokarbonlar gibi karbondioksit oranla atmosferde ısı tutma oranı daha yüksektir. Rengi ve kokusu olmayan metan gazı daha çok tarımsal faaliyetler ve hayvan atıkları sonucunda oluşan gazdır (Aksay, Ketenoğlu, & Kurt, 2005).

Atmosferdeki sera gazlarının günden güne artması ve önceki yıllarda açığa çıkan gazların atmosferdeki ömürlerini tamamlamamış olmasında dolayı sera etkisine bağlı yeryüzü sıcaklığı armaya devam etmektedir. Sürdürülebilirlik kapsamında sera gazlarının oluşması sınırlandırılmalıdır.

1.9. GHG Emisyonu ve Karbon Ayak İzi

Ekolojik ayak izi, insanların faaliyetleri ve hareketliliği sonucunda kaynakların tüketilmesi ve buna bağlı açığa çıkan atıkların oluşturduğu kirlilik olarak tanımlanmaktadır. Ekolojik ayak izi birden fazla olgunun genel adıdır. Ekolojik ayak izini başlıklara ayıracak olursak bunlar karbon ayak izi, orman ayak izi, tarım arazisi ayak izi ve yapılandırılmış alan ayak izidir. Küresel ısınma üzerinde etkisi en fazla olan karbon ayak izi insanların baştan sona her alanda ve her sektörde açığa çıkardığı karbondioksit gazının ölçüsüdür (Özsoy, 2015).

Ekolojik ayak izinin en önemli bileşenlerinden olan karbon ayak izinin genel bir tanımı tam anlamıyla bulunamamaktadır. Genel çerçevede insanın yaşam döngüsü süresince hareketliliğinden açığa çıkan gaz olarak nitelendirilmektedir. Karbon ayak izi ile ilgili 1992 yılında imzalanan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), 1998 tarihli Kyoto Protokolü ve 2015 Paris Antlaşması karbon salınımındaki artışın canlı yaşantısını tehdit ettiğini belirten ve bu konuda harekete geçilmesini belirten en küresel çaptaki önemli antlaşmalardır. Karbon ayak izinin incelenmesini iki kategori olarak incelediğimizde birinci kategoride karşımıza;

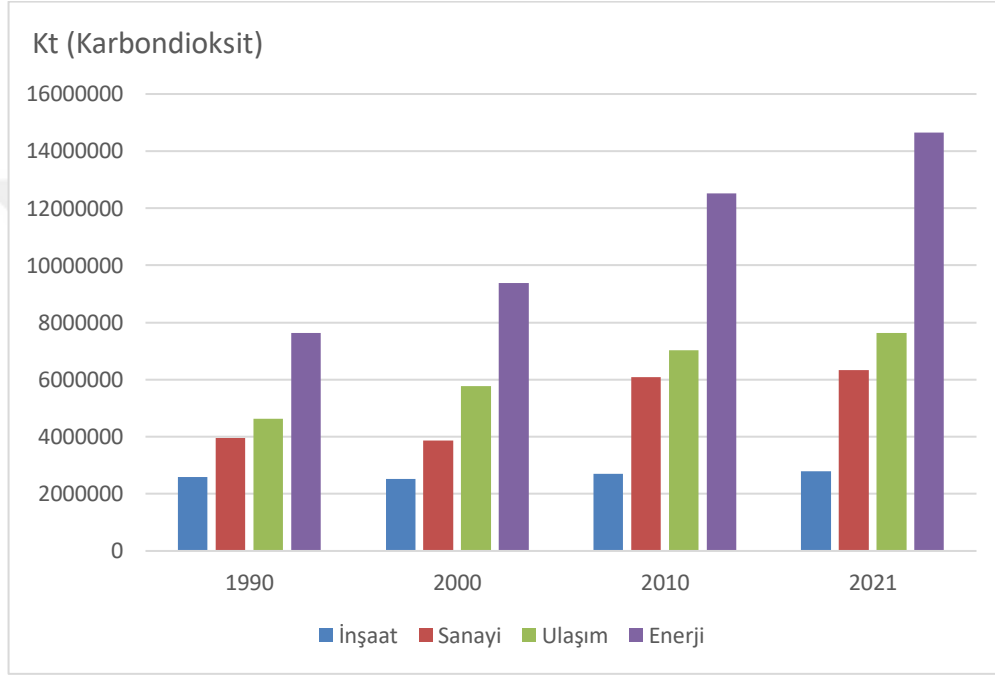
- Ulaşım
- Enerji
- Lojistik
- Sanayi
- İnşaat
- Tarım
- Sağlık
- Kamu

başlıkları altında sektör bazlı ayırarak incelenmektedir. İkinci kategoride ise bireysel ve bölgesel olarak ifade edebileceğimiz;

- Bireysel tüketim

- Ürün
- Şehirler
- Ülkeler
- İşletmeler

konuları olarak karbon ayak izini inceleyebiliriz. Karbon ayak izinin genelini enerji sektörü, sanayi sektörü, ulaşım sektörü ve inşaat sektörü oluşturmaktadır (Turgut & Budak, 2022).



Şekil 5. Küresel Karbondioksit Salınımının Sektörlere Göre Dağılımı (IEA, 2022)

Enerji sektörü elektrik üretimine ve ısınmaya bağımlı olan dünyamızın karbondioksit salınımının en önemli sektörüdür. Nüfus artışının getirdiği talepler doğrultusunda sürekli büyüyen enerji sektörü en çok karbondioksit salınımı gerçekleştiren sektördür. Elektrik üretimi ve ısıtma ihtiyacı için kullanılan kömür, doğal gaz ve petrolün başını çektiği fosil yakıtlar enerji sektöründeki karbondioksit salınımı miktarının fazla olmasının temel sebebini oluşturmaktadır.

İnşaat sektörü bu sektörler arasında en az karbondioksit salınımını oluşturmaya rağmen sektör odaklı düşünüldüğünde en tekil sektör olup karbondioksit salınımı ve sera etkisi oluşturma konusunda yüksek oranda kirliliğe sebep olmaktadır. İnşaat faaliyetleri sonucunda oluşan karbondioksit salınımının önüne geçmek için geri dönüşüm malzemeler,

enerji tasarruf planları ve yeşil binalar gibi uygulamalarla sektörün açığa çıkardığı karbondioksit miktarının azaltılması hedeflenmektedir.

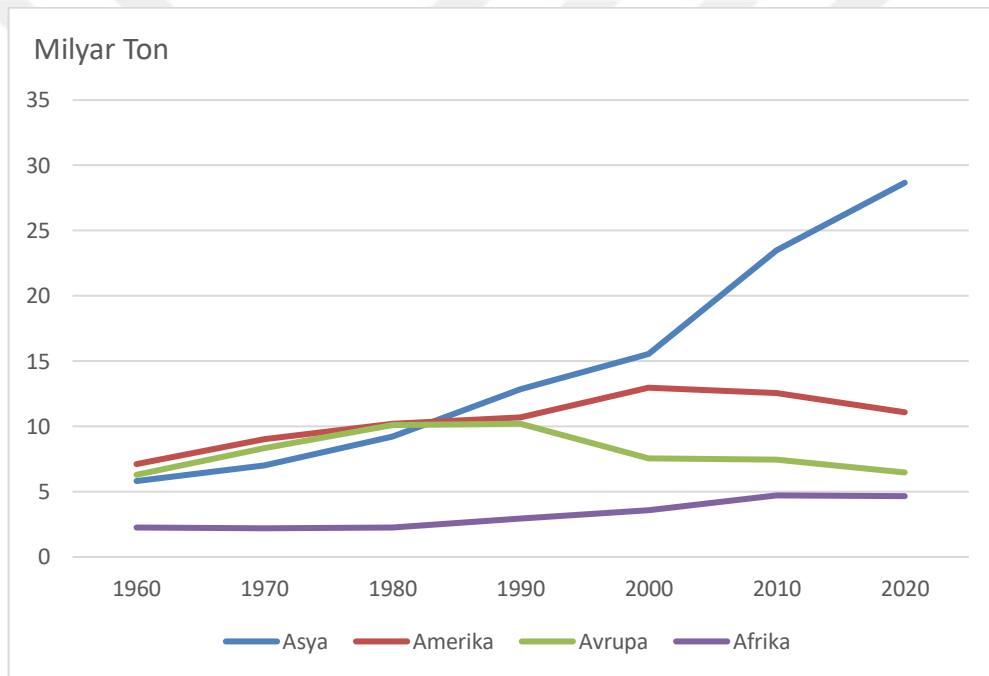
Teknolojik gelişmelerle birlikte küreselleşen dünyamızda ülkelerin birbirleri ile olan ticari ilişki ağları sürekli olarak genişlemektedir. Bir bölgede üretilen mallara olan talep günümüzde küresel çapta olmasında dolayı diğer bölgelere taşınması gereksinimi ulaşım ağlarının ve ulaşım araçlarının sayısında artışa neden olmuştur. Ulaşım araçları artışının getirdiği hareketlilik benzin, mazot ve diğer araç yakıtlarının kullanımını arttırmış olup karbondioksit salınımı da geçmişten günümüze yükseliş eğilimi olmasına sebep olmaktadır. Son yıllarda elektrikli araçların sayısında yaşanan artış ulaşım kaynaklı karbondioksit salınımının azaltılması için yapılan en önemli çalışmaların başında gelmektedir.

Sanayi sektörünün karbon salınımına olan katkısı özellikle sanayi devrimi sonrası sürekli olarak artış eğilimi göstermiştir. Ekonomik ve toplumsal faaliyetlerinin artması çevresel sorunları da beraberinde getirmiştir. Karbondioksit salınımlarını tetikleyen en önemli sektörlerin başında gelen sanayi sektörü gelecek yıllarda nüfus artışının devam etmesi öngörüldüğünden gerekli talebi karşılamak için gelişmeye devam edecek ve karbondioksit salınımı ilerleyen yıllarda artış eğiliminde olacağı ön görülmektedir.

1.9.1. Dünyada GHG Emisyonu ve Karbon Ayak İzi

Dünyada karbon salınımı sanayi devriminden sonra çevresel sorunlar yaratacak seviyeye çıkmaktadır. Sanayi devriminin getirdiği üretim miktarındaki artış, teknolojik gelişmelerin hızlanması ve ülkelerin ekonomik anlamda birbirleri ile yarışması yenilenemez enerji kaynaklarına olan talebin artmasına sebep olmuştur. Üretim arzının artması dünyanın doğal kaynaklarının hızla tüketilmesi gelecek nesiller için tehlike arz etmektedir. İkinci Dünya Savaşı sonrası savaşın ekonomik ve toplumsal zararlarını gidermek isteyen gelişmiş ülkeler birbirleri ile ekonomi ve sanayi alanlarında büyüme yarışına başlamışlardır. Büyüme hedeflerine ulaşmak isteyen gelişmiş ülkeler bu dönemde ortaya çıkardıkları çevresel sorunları göz ardı etmişlerdir. Sanayi faaliyetlerinin doğal kaynakları hızla tüketmesi bu büyümenin sürdürülebilir olmadığı düşüncesini de beraberinde getirmiştir. 1990'lı yıllardan itibaren yapılan çevresel konularla ilgili konferanslar da dünyada sürdürülebilirlik kavramının önem kazanmaya başladığının göstergesidir. Karbon salınımını sınırlandırmak için başta gelişmiş ülkeler olmak üzere bazı gelişmekte olan ülkeler ürettikleri mal ve hizmetler karşılığında çeşitli vergilendirme sistemleri geliştirmektedir (Akyol & Gül, 2022).

Sanayileşmenin arttırdığı çevresel sorunların önüne geçmek için atılan küresel çapta ilk adım Rio Konferansı'dır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (UNFCCC) imzalandığı konferans sera gazlarının etkisini azaltmayı hedeflemektedir. Sözleşmenin hedeflerinin uygulanmasını denetlemek için her yıl Taraflar Konferansı (COP) düzenlenmektedir. Bu konferansların en önemlilerinden bir tanesi genel kabul gören ve 1997 yılında birçok ülke tarafından imzalanan 3. Taraflar Konferansı'dır. Anlaşmanın yürürlüğe girmesi dünyanın toplam karbondioksit salınımının %55'ine neden olan 55 ülke tarafından imzalanması gerekmektedir. Protokol 2004 yılında Rusya Federasyonu'nun sözleşmeyi imzalaması ile 2005 yılında yürürlüğe girmiştir (Çömert, Bilget, & Çabuk, 2012).

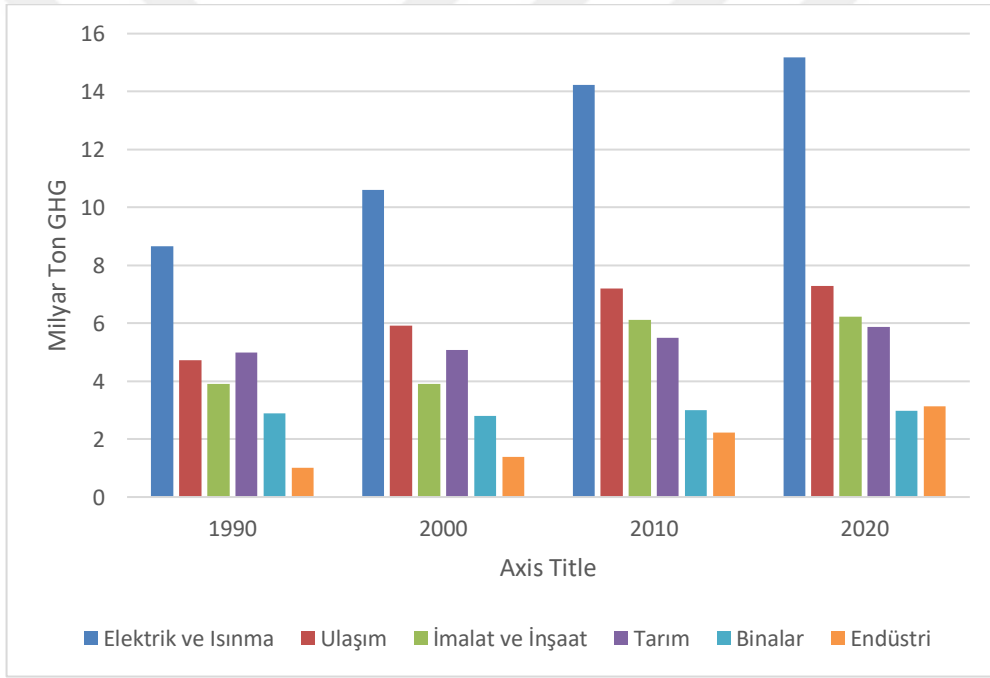


Şekil 6. Bölgelerin GHG Emisyon Miktarı (Our World in Data, 2023)

Asya, Amerika, Avrupa ve Afrika bölgelerinin yıllık toplam sera gazı salınımları incelendiğinde 1960'lı yıllardan 1990'lı yıllara kadar sera gazı salınımlar sürekli olarak artmıştır. 1987 yılında yayınlanan Brundtland Raporu ile Avrupa genelinde sürdürülebilirlik kavramı ön plana çıkmaya başlamıştır. Brundtland Raporu sanayileşmenin getirdiği çevresel sorunları dile getirerek sera gazlarının azaltılması gerektiğine dikkat çekmiştir. 1997 yılında Kyoto Protokolü'nün imzalanması ve 2005 Paris Antlaşması Avrupa ve Amerika'daki sera gazlarının salınımlarının azalış eğilimlerine geçmesine sebep olmuştur. Asya bölgesinde ise

diğer bölgelerin aksine nüfus artışı ile birlikte 2000’li yıllardan sonra sera gazı salınımı hızla artış göstermiştir.

Dünyanın sera gazı salınımı sektörler ayırarak incelediğimizde özellikle fosil yakıtları tüketilerek elde edilen elektrik ve ısıtma ihtiyacı bu alanda en yüksek salınımın yapıldığı alanlardır. Ulaşım sektörü ise sera gazı salınımı miktarında ikinci sırada gelmektedir. Ulaşım araçlarından çıkan gazlar hava kirliliğine ve çeşitli sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Sera gazlarının salınımında bir diğer etkili olan sektör ise imalat ve inşaat sektörüdür. Özellikle çelik ve beton üretimi sırasında açığa çıkan karbondioksit gazı sera gazı etkisini göstermektedir. Bunun yanı sıra inşaat malzemelerinin taşınmaları ve yerinde imalatları sırasında açığa çıkan gazlar sera gazı etkisini tetiklemektedir.

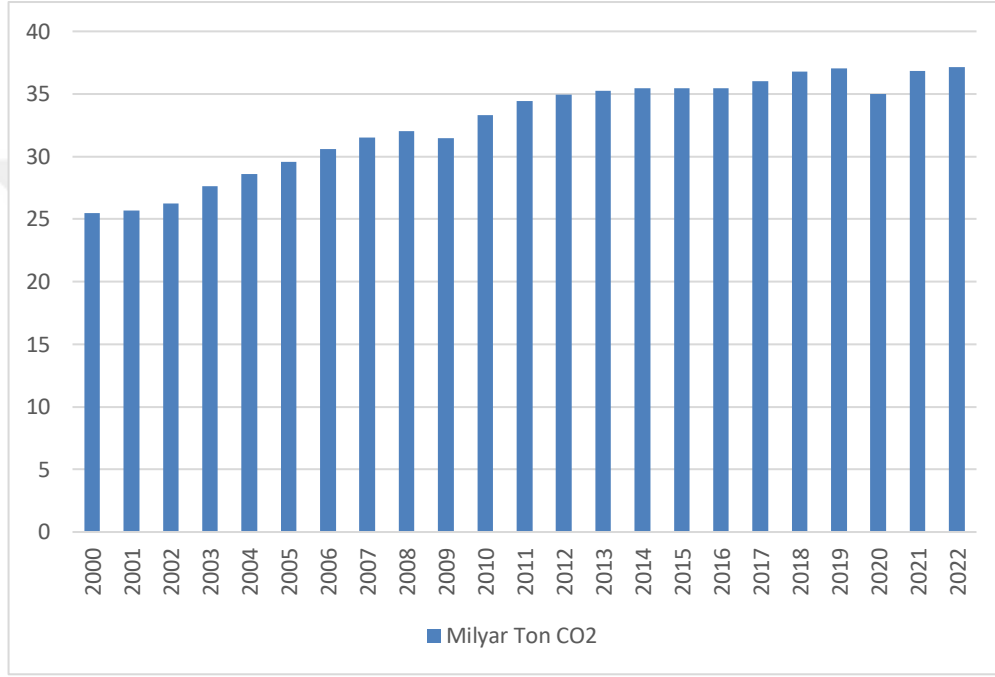


Şekil 7. Sektörlerin Küresel GHG Emisyonu (Our World in Data, 2023)

İmalat ve inşaat sektörünün son 20 yıllık dönemde sera gazı emisyonlarında artan miktarları dikkat çekmektedir. Özellikle kırsal kesimlerden kente olan göçler kentleşmeyi artırarak yeni inşaatların yapılmasına sebebiyet vermektedir. Nüfus yoğunluğu yükselen kentlerde trafik sorunlarının oluşması trafikte geçirilen süreyi de arttırarak karbondioksit salınımının miktarının yükselmesine neden olmaktadır. Trafik sorununu çözmek için yeni ulaşım yollarının yapılması da yine inşaatlardan kaynaklı sera gazlarının artmasına neden olarak birbirini tetikleyen bir zincir halini almaktadır. İnşaat sektöründe sadece imalat

sırasında değil yapılar kullanım aşamasında da karbondioksit salınımına devam edebilmektedir. Özellikle konutların ısıtma, elektrik ve atık malzemelerinden açığa çıkan gazlar sera gazı etkisini oluşturmaktadır.

Sera gazlarının arasında salınımı en fazla olan karbondioksit gazı iklim değişikliğini en çok tetikleyen gazların başında gelmektedir. Dünyanın tamamında karbondioksit salınımı miktarı diğer sera gazlarından fazladır.

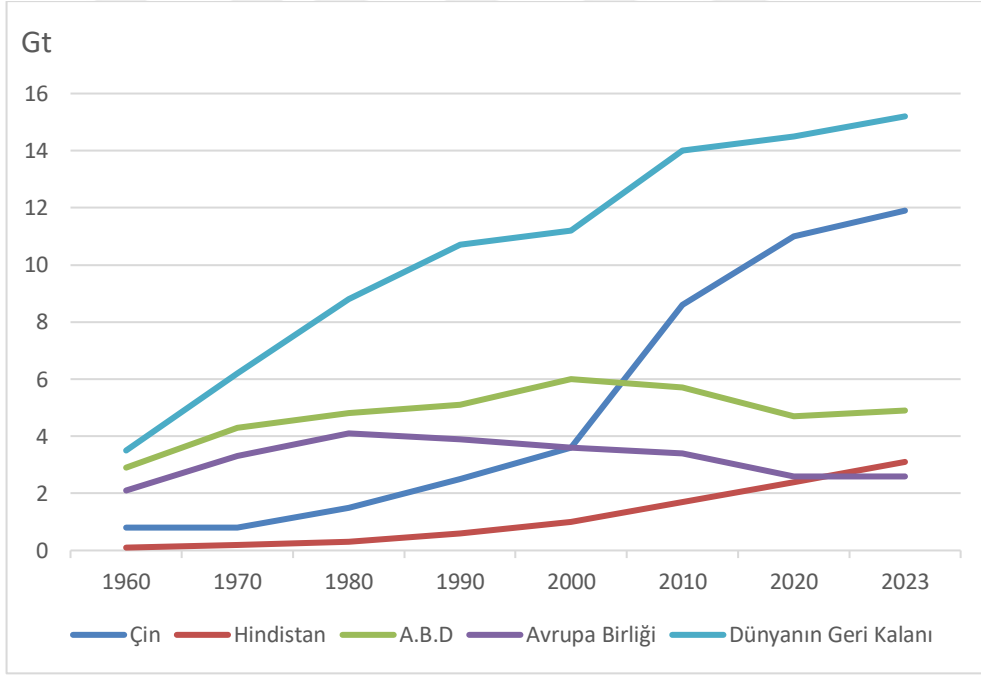


Şekil 8. Küresel Karbondioksit Emisyonu (Our World in Bank, 2024)

Küresel ısınmayı en çok tetikleyen ve atmosfere salınımı en fazla olan karbondioksit gazı 2000’li yıllardan itibaren 2009 ve 2020 yılları haricinde artış eğilimi göstermektedir. 2009 yılında yaşanan azalmanın sebebi küresel ekonomik krizdir. Dünyada yaşanan bu ekonomik kriz sanayi sektörünün yavaşlamasına ve üretimin azalmasına neden olmuştur. Azalan üretim, fosil yakıtlarının da azalmasını beraberinde getirerek karbondioksit salınımının 2009 yılı içerisinde düşüşüne sebep olmuştur. Küresel ekonomik krizin etkilerinin geçmesiyle beraber izleyen yıllarda karbondioksit salınımı artış eğilimine devam etmiştir. 2020 yılına gelindiğinde geçmiş yıla göre karbondioksit salınım miktarında azalma gözlemlenmiştir. Bu azalışın nedeni dünyada yaşanan pandeminin etkisidir. Özellikle sanayi sektörünün küresel ekonomik krizde olduğu gibi yavaşlaması karbondioksit salınımının azalmasında etkili rol oynamıştır. Salgın döneminde sanayi sektörünün yanı sıra ulaşım

sektörünün de sektöre uğraması özellikle ulaşım araçlarından kaynaklı karbondioksit salınımının azalmasına neden olmuştur. Salgının yarattığı etkiler ortadan kalkmasıyla karbondioksit salınım miktarı yeniden artışa geçmiştir. Özellikle gelişmiş ülkelerin sürekli olarak büyüme ve kalkınma hedeflerini yakalamaya çalışmaları, ihracata dayalı üretim sektörünün gelişmesi, nüfusa artışı ile beraber tüketimin artması gibi nedenler ülkelerin açığa çıkardığı karbondioksit miktarının artmasının temel sebeplerinden bazılarını oluşturmaktadır.

Karbondioksit salınımının dünya üzerindeki en büyük payını sanayisi gelişmiş ülkeler veya nüfus miktarı fazla olan ülkeler oluşturmaktadır. Ekonomik büyüme ve gelişmeyi ön plana alan ve gelişmiş sanayiye sahip ülkeler kullandıkları fosil yakıtlarla birlikte dünyanın karbondioksit salınımının yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır.



Şekil 9. Fosil Yakıtların CO₂ Salınımı Miktarları (Carbon Brief, 2023)

1960'lı yıllardan sonra artarak devam eden fosil yakıtlardan kaynaklı karbondioksit salınımı sürdürülebilirlik kavramının 1980'li yıllardan itibaren dünya gündemine yerleşmesiyle birlikte ilk olarak Avrupa Birliği'ne üye olan ülkelerde karbondioksit salınımı sınırlandırılmaya başlamaktadır. Avrupa Birliği'ni 2000'li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri izleyerek yıllık karbondioksit salınımını sınırlandırmayı başardığı gözlemlenmektedir. Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri'nin aksine Çin 1960

yılından beri artan karbondioksit salınım miktarını 2000’li yıllardan sonra artan nüfusu ve gelişen sanayisi ile birlikte daha da arttırarak devam ettirmektedir. 2023 yılında 11,9 Gt karbondioksit salınımı yapan Çin bu alanda en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Hindistan ise özellikle 2000’li yıllardan sonra karbondioksit salınımında artan nüfusu ile birlikte önemli rol oynamaktadır.

1.9.2. Türkiye’de GHG Emisyonu

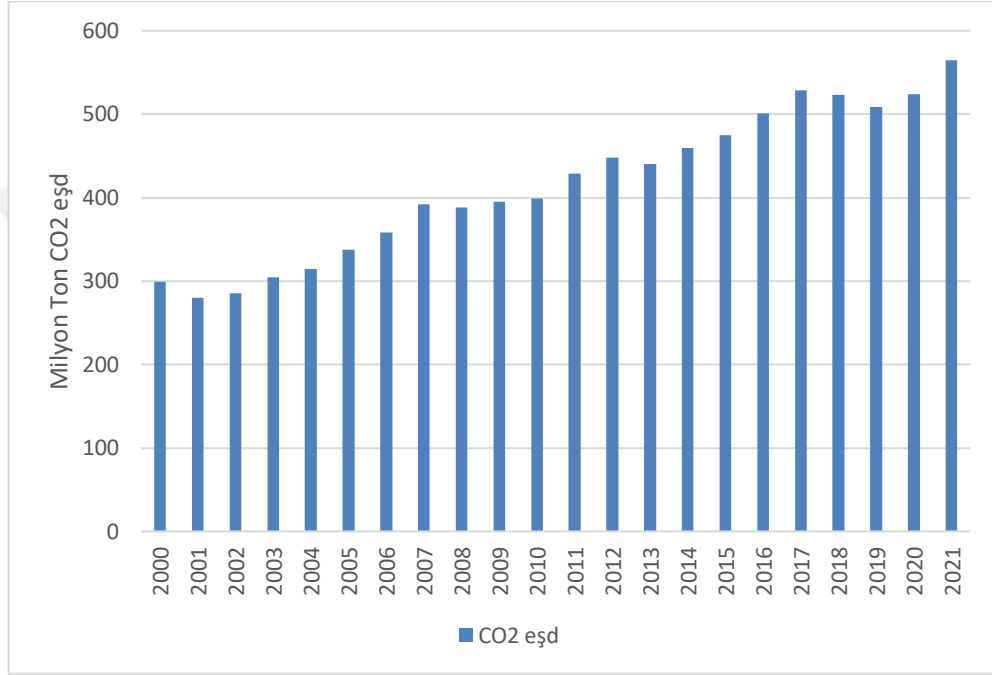
Dünyada olduğu gibi ülkemizde de sera gazı emisyonları artan nüfus, kentleşme, enerji talebinin artması ve ulaşım sektörünün gelişmesi gibi nedenlerden dolayı artmaktadır. Artan sera gazları küresel ısınmanın etkilerinin ülkemizde de hissedilmesine neden olmaktadır. Farklı iklim özelliklerini bir arada bulunduran ülkemiz küresel ısınmadan çeşitli şekillerde etkilenmektedir. Güneydoğu, Doğu Anadolu, Akdeniz, Ege bölgesi gibi yağış miktarının nispeten az ve sıcaklıkların yüksek olduğu bölgelerde küresel ısınma ile beraber ciddi kuraklık ve çölleşmenin yaşanması beklenmektedir. Su kaynaklarının azalması özellikle canlı yaşamının zorlaşmasına sebep olmaktadır. Küresel ısınmanın sadece kuraklık ve sıcaklık etkileri olmayıp aşırı yağışlara da neden olması yüksek engebeli bölgelerimizde yaşanan heyelan olaylarının da sayısını arttıracaktır. Bütün bu hava hadiselerinden ormanlarımız da olumsuz etkilenecek ve orman alanlarımızda azalmaya başlayacaktır. Böylece atmosferde tutulan sera gazlarının etkisi de artacaktır (Akın, 2006).

Türkiye küresel ısınmanın etkilerini azaltmak için dünyada yaşanan gelişmeleri takip etmeye çalışmaktadır. 1992 yılında düzenlenen Rio Konferansı sonrası Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında sera gazlarının sınırlandırılması sorumlulukları yüklenen EK-I listesine eklenmiştir. Ancak bir OECD (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü) üyesi olan Türkiye gelişmekte olan ülkelere karşı da ekonomik ve teknolojik yönlerden sorunlu tutularak EK-II listesine de eklenmiştir. İtirazlar sonucunda 2001 yılında EK-II gelişmiş ülkelerin bulunduğu listeden çıkarılmıştır. Bu dönemlerde yükümlülükleri tam olarak belirlenemeyen Türkiye küresel ısınmayla mücadele kapsamında ulusal bir bilinç oluşturmakta zorlanmıştır (Mercan & Karakaya, 2013).

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi’ne 2004 yılında taraf olan Türkiye, 2009 yılında ise Kyoto Protokolü’nü imzalamıştır. Kyoto Protokolünde Ek-B ülkeleri içerisinde bulunmayan Türkiye karbon emisyon miktarını düşürme zorunluluğu yoktur. Ancak karbon salınımını azaltmak için 2012 yılı özelinde gönüllü yapılan karbon

projeleri ile yıllık 11.845.505 ton karbondioksit gazı salınımında azalma hedeflenmiştir. Kyoto Protokolü'ne taraf olmasından dolayı Türkiye'nin karbon konusunda yapacağı projeler ve uygulamalar küresel çapta önem arz etmektedir (Binboğa, 2014).

Türkiye'de de dünyanın diğer ülkeleri gibi nüfusu artması, teknolojinin gelişmesi ve sanayi hareketliliğinin artmasından kaynaklı sera gazlarının salınımında yıllar içerisinde artış gözlemlenmektedir.

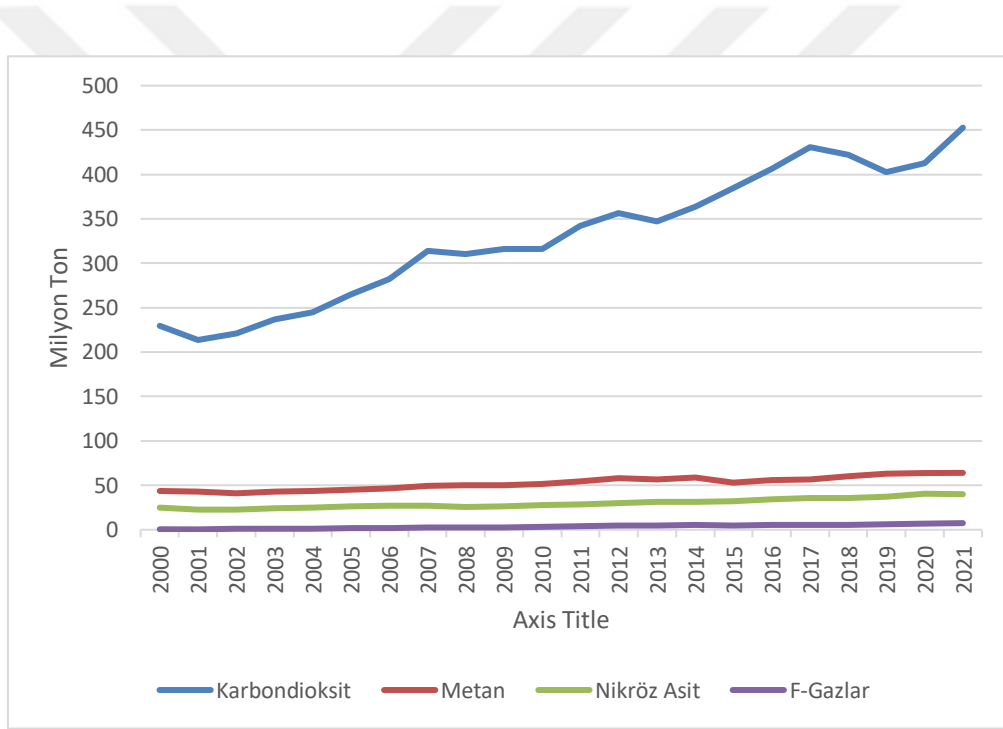


Şekil 10. Türkiye'nin Yıllık Toplam Sera Gazı Emisyonu (TÜİK, 2023)

Şekil 2.10. de görüldüğü gibi Türkiye'nin yıllık sera gazı emisyonu genellikle artış eğiliminde seyretmektedir. 2021 yılında toplam sera gazı emisyonu bir önceki yıla oranla %7,7 artarak 564,4 milyon ton olmuştur (TÜİK, 2023). Türkiye'nin sera gazı emisyonu miktarı hem ulusal hem de uluslar arasın sebeplerden dolayı bazı yıllarda dalgalanmalar yaşamıştır. 2000'li yılların başlarında sera gazı emisyonlarında yıllık düzeyde ölçülen değerlerin önceki yıllara göre daha düşük çıkması 2000 ve 2001 yıllarında yaşanan ekonomik krizlerle alakalıdır. Ekonomik sıkıntılar yaşayan Türkiye'de bu dönemde sanayi hareketliliğinin azalması ve üretimde yaşanan dalgalanmalar sonucunda yıllık sera gazı emisyonları önceki yıllara göre azalmış veya çok fazla artmayarak önceki yılki seviyesini korumuştur. Türkiye'nin kendi içerisinde yaşadığı bu krizin etkilerini azalmasıyla birlikte devam eden yıllarda sera gazı emisyonlarının artış trendi devam etmiştir. 2008 yılında ise

yaşanan Küresel Ekonomik Kriz A.B.D merkezli başlayıp birçok ülke gibi Türkiye’yi de dolar kurunda yaşanan ani değişimlerle etkilemiştir. Bu dönemde ülkeler arası ithalat ve ihracatın yavaşlaması ile birlikte sera gazı emisyon miktarlarında durağanlık gözlemlenmiştir. Sera gazı emisyonlarının artış eğiliminin değişmesindeki bir diğer küresel sıkıntı ise 2019 yılından sonra etkili olan küresel salgındır. Özellikle sokağa çıkma yasaklarının yaşandığı bu dönemde hem sanayi kaynaklı hem de ulaşım kaynaklı sera gazı emisyon miktarındaki artış eğilimi değişmiştir.

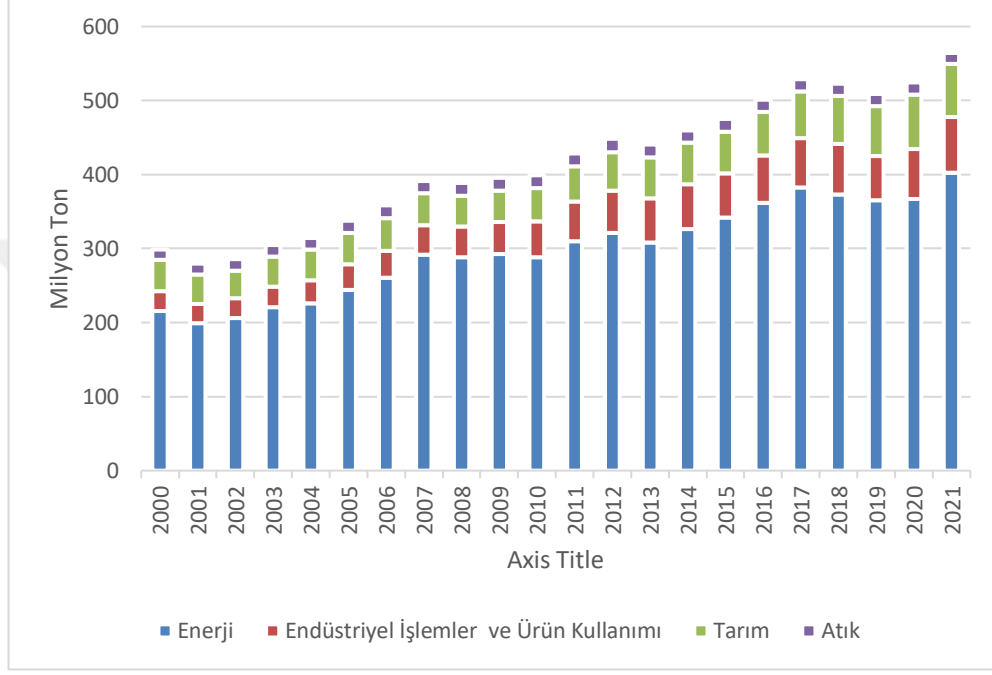
Sera gazlar içerisinde birçok farklı gaz bulunmasına rağmen içerisinde en çok karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), Nitröz Asit (N₂O) ve F-gazlardır. Bu gazlar arasında da salınımı en fazla olan gaz karbondioksit gazıdır.



Şekil 11. Sera Gazlarının Çeşitlerine Göre Yıllık Toplam Miktarları (TÜİK, 2023)

2000 yılında karbondioksit, metan, nitröz asit ve F-gazların toplamı 298,9 milyon tondur. Sadece karbondioksit miktarı 229,9 milyon ton ile toplam gazların yaklaşık %77'sini oluşturmaktadır. 2021 yılında bu dört gazın toplam miktarı 564,4 milyon ton iken karbondioksit gazı 452,7 milyon tonluk miktarı ile toplam gazların %80'ini oluşturmaktadır. Her zaman sera gazı emisyonun da en büyük paya sahip olan karbondioksit gazı yıllar içerisinde sera gazları arasındaki payını da arttırarak devam ettirmiştir.

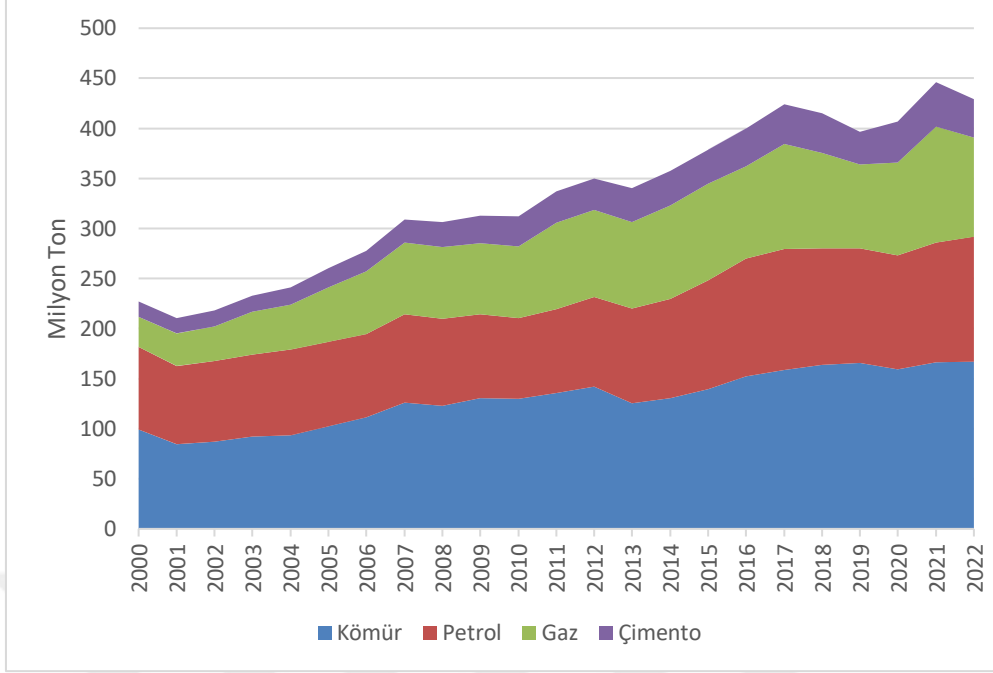
Sera gazı emisyonlarının sektörlere göre dağılımında dünyanın diğer ülkelerinde olduğu gibi enerji sektörü en büyük paya sahip sektördür. Türkiye’de enerji arzının büyük çoğunluğunu fosil yakıtların kullanılması ile sağlamaktadır. Türkiye jeopolitik konum olarak yenilenebilir enerji kaynakları yönünden şanslı olmasına rağmen yeterli altyapı ve teknolojiye sahip olmadığında enerji talebinin %85,6’sını ithal etmektedir (Erdoğan, 2020).



Şekil 12. Türkiye’nin Sektörlere Göre Sera Gazı Salınım Miktarı (TÜİK, 2023)

2021 yılı itibariyle açığa çıkan toplam sera gazı miktarı 564,4 milyon tonun %71,3’ü enerji sektöründen oluşmaktadır. Bu oran 2000 yılında bu oran %72,2’dir. Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı kaynaklı sera gazı emisyonu %13,3, tarım kaynaklı %12,8 ve atık kaynaklı %2,6’dır.

Sera gazlarının içerisinde karbondioksit salınımı ayrı olarak değerlendirilmelidir. Atmosferde diğer sera gazlarına oranla en çok bulunan karbondioksit gazı küresel ısınma üzerine en etkili gazdır.



Şekil 13. Türkiye'nin Fosil Yakıt CO₂ Salınımı (Our World in Data, 2023)

Grafikten de görüldüğü gibi karbondioksit salınımının en çok olduğu fosil yakıt kömürdür. 2022 yılında toplam 429,08 milyon ton olan karbondioksit salınımının %38,9'u kömür kaynaklıdır. Petrol kaynaklı karbondioksit salınımı %29,1 olurken, %23,1 oranında gazlardan ve %8,9 oranında çimentodan kaynaklanmaktadır. Çimento diğer fosil yakıtların aksine birden çok sektöre değil özellikle inşaat sektörü ile ilişkisi olmasından dolayı dikkat edilmesi gereken bir malzemedir.

Türkiye sanayi yönünden gelişmiş ülkeler ile kıyaslandığında karbondioksit salınımı çok yüksek değildir. G20 ülkelerinden biri olan Türkiye karbondioksit salınım miktarı açısından 2022 yılında 13. Sırada bulunmaktadır. Karbondioksit salınımında birinci sırada olan ülke nüfus miktarı fazla, gelişmiş sanayiye ve yüksek üretim kapasitesine sahip Çin gelmektedir. 2022 yılında G20 ülkelerinin toplam karbondioksit salınımı 29,62 milyar ton olarak ölçülmüştür. Bu toplam karbondioksit salınımının %38,4'ü Çin tarafından üretilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Çin'den sonra karbondioksit salınımında ikinci sırada yer almaktadır. 2022 yılında Amerika Birleşik Devletleri toplam karbondioksit salınımının %20,6'sından sorumludur. Bu iki ülke 2022 yılında G20 ülkelerinin ürettiği toplam karbondioksit miktarının %59'unu oluşturarak çevreye verilen zararın büyük bir kısmını oluşturmaktadır.

Tablo 6. Ülkelerinin Yıllık CO₂ Salınımı (Our World in Data, 2023)

Milyon Ton	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022
Çin	2480	3360	3650	5880	8620	9870	10910	11400
A.B.D	5900	6250	6970	7170	6690	6430	5680	6120
Hindistan	578	760	977	1190	1680	2230	2420	2830
Rusya	2540	1620	1480	1560	1630	1640	1630	1650
Japonya	1160	1240	1260	1290	1210	1220	1040	1050
Endonezya	155	222	281	347	445	539	605	728
Almanya	1050	939	898	865	831	798	647	665
Suudi Arabistan	208	268	302	402	524	678	610	662
Güney Kore	250	383	439	498	594	634	597	601
Kanada	458	491	567	574	570	570	522	547
Meksika	317	331	391	463	479	479	442	511
Brezilya	218	268	340	364	440	529	444	483
Türkiye	151	181	229	264	384	384	412	435
Güney Afrika	312	361	378	416	446	446	434	404
Avustralya	278	305	350	386	401	401	396	392
İtalya	438	449	470	502	361	361	303	338
İngiltere	601	566	569	570	422	422	326	318
Fransa	393	386	406	416	331	331	281	297
Arjantin	112	125	142	161	185	191	166	192

Sanayi hareketliliğinin fazla, üretim kapasitesinin yüksek ve teknolojik gelişmişliğe sahip ülkeler karbondioksit salınımında üst sıralarda yer almaktadır. Hindistan ve Endonezya özelinde ise karbondioksit salınımının en önemli sebebi sanayi ve imalat sektörü olmayıp, nüfusun fazlalığı ve ulaşım araçlarından kaynaklı karbondioksit salınımıdır.

Türkiye 1990 yılında G20 ülkelerinin toplam karbondioksit salınımının %1'ini oluştururken bu oran 2022 yılında %1,46'ya yükselmektedir. 2005 yılından sonra artan sanayi hareketliliği, nüfus artışına bağlı enerji arzı ve ulaşım araçlarının sayısında yaşanan artış Türkiye'deki karbondioksit salınımının artmasına sebep olmuştur. Karbondioksit

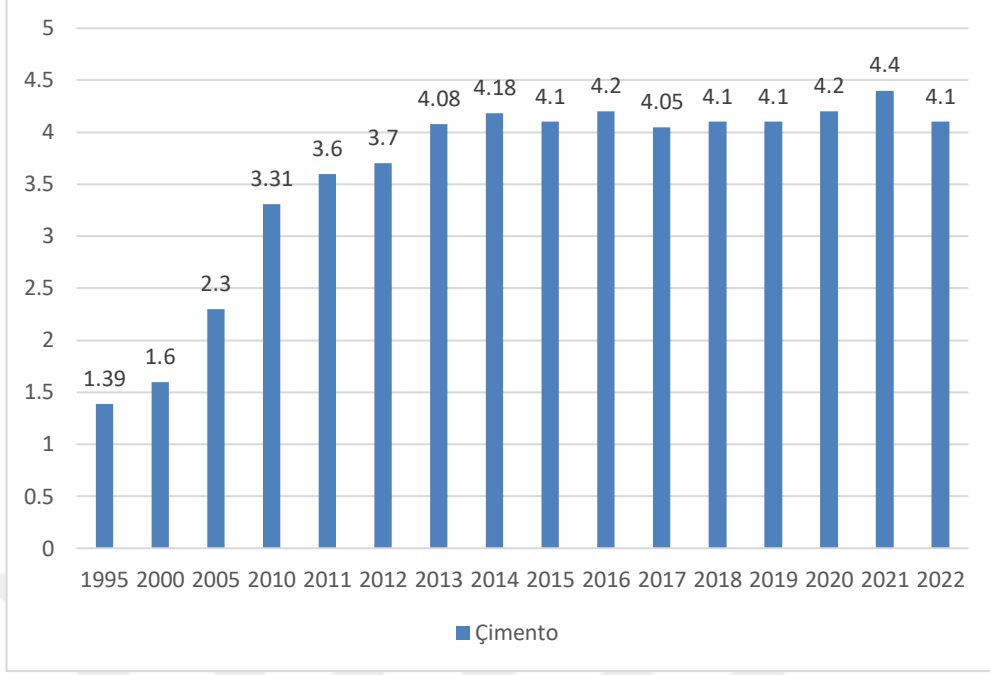
salınımının azaltılması konusuna Türkiye kalkınma planlarında yer vererek çevresel etkileri azaltmaya çalışmaktadır.

1.9.3. İnşaat Sektöründe GHG Emisyonu

İnşaat ve imalat sanayisi gelişmiş ülkelerde özellikler karbondioksit emisyonunun ve enerji kullanımının en yoğun olduğu sektörlerin başında gelmektedir. İnşaat sektöründe kullanılan en yaygın malzeme beton, içerisindeki çimento bileşeni ile dünyanın toplam karbon emisyonunun %8'ini oluşturmaktadır. Günümüzde ülkelerin tek başına mücadele etmesinin yeterli olmadığı küresel ısınma ile mücadele etmek için konferanslar ve antlaşmalar düzenlenmektedir (Şahin, 2023).

Küresel ısınma ile mücadelede genel hedef sanayi sektörlerinin karbondioksit emisyonlarının 2050 yılına gelindiğinde sıfıra düşürmeyi hedeflemektedir. Sıfır karbondioksit salınımına ulaşmak için çimento sektörünün de dâhil olduğu bulunduğu enerji kullanım talebi yüksek olan sektörlerde teknolojik yenilenmeler yaşanmalıdır. Bu gelişmelere ek olarak ülkelerin politikalarında köklü değişiklikler yapılmalıdır (Kızıltan & Doğan, 2021).

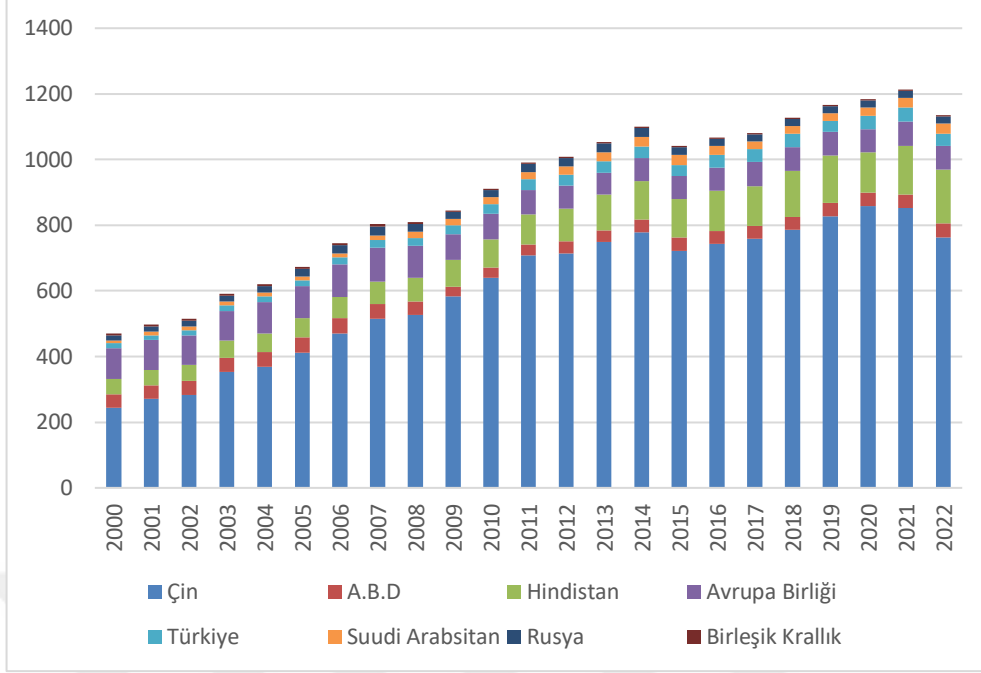
Çimento, hammadde olarak kalker ve kilden oluşan bu malzemelerin alçıtaşı ile karıştırılıp su ilave edildiğinde priz süresini uzatmaktadır. Çimento, bağlayıcı özellikteki maddelerin su ile tepkimesi sonucu priz alarak sert yüzeyler haline gelmesini ve belli bir dayanım kazanmasını sağlayan maddedir. 27 alt gruba ayrılan çimento, Cem-I, Cem-II, Cem-III, Cem-IV ve Cem-V adlarında beş temel gruba ayrılmaktadır. Çimentonun beton yapılar oluşturmalarının ilk örneklerine 1852 yılında rastlanmaktadır. 1878 yılında dünyada üretimi ve satışı yapılmaya başlayan modern çimento Türkiye de 1912 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Bu tarihlerden itibaren kullanımı sürekli yaygınlaşan çimento hem Türkiye de hem dünyada geniş bir Pazar elde etmektedir (Bektaş & Güleç, 2021).



Şekil 14. Dünyanın Yıllık Çimento Kullanım Miktarları (Statista, 2024)

Ülkeler arasındaki modern şehirler, yenilikçi yapılar ve gelişmiş sanayi yapıları yapma rekabeti çimento sektörünün de sürekli olarak gelişmesine imkân sağlamaktadır. Dünyada kullanılan çimento miktarının 1995 yılındaki değeri 1,39 milyar ton iken bu rakam 2022 yılında %194 oranında artış göstererek 4,1 milyar ton olmuştur. Yıllara göre dalgalanmalar yaşansa bile 2013 yılından beri yıllık çimento üretimi 4 milyar tonun altına düşmemesi sürekli olarak talep gördüğünün bir göstergesidir.

Kentleşme oranının gün geçtikçe arttığı ve nüfus artışı sonucu insanların temel ihtiyaçlarının karşılanması için inşaat yapılarının yapılması gerekmektedir. Kentleşmenin getirdiği yapı ihtiyacını karşılamak için kullanılan malzemelerin başında beton üretimi gelmektedir. Beton üretimindeki artış çimento talebindeki artışı beraberinde getirerek ve karbondioksit salınımının artmasına neden olmaktadır. 21. Yüzyılın ortalarında çimento sektörü üzerine yapılan tahminlerde sektörün %12-%23 arasında büyümesi tahmin edilmektedir (Bektaş & Güleç, 2021).



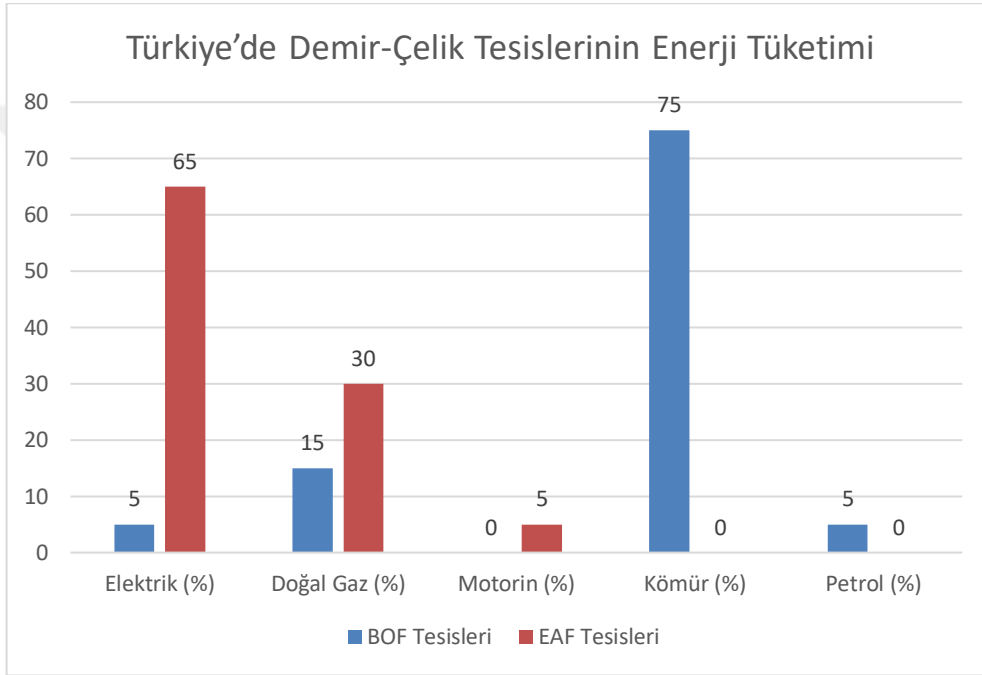
Şekil 15. Ülkelerin Çimento Kaynaklı CO₂ Salınım Miktarı (Carbon Brief, 2023)

Yapılar sadece imalat aşamalarında değil kullanım süreçlerinde de elektrik ihtiyaçlarından dolayı karbondioksit salınımı yaratmaya devam etmektedir. Konutların ısınma, soğuma ve aydınlanma ihtiyaçları elektrik kullanımı arttırmaktadır. Yaşam döngüsü için temel ihtiyaç olan konutların, karbondioksit salınımlarının sınırlandırılması küresel ısınma ile mücadelede önem arz etmektedir. Paris Antlaşmasında belirtilen yapıların karbon salınımlarında iyileştirmeler olmaz ise, 2040 yılına gelindiğinde dünyada 1,5°C'lik ısı artışı gerçekleşecektir. Isı artışının engellenebilmesi için inşaat, nakliye, malzeme üretimi, ısınma ve aydınlatma aşamalarında yaşanan karbon salınımlarını azaltmak amacıyla yapılarda yeşil enerji verimliliği, malzeme üretimi ve imalat aşamalarında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasının artması gerekmektedir (Köksal, 2020).

İnşaat sektöründe yoğun olarak kullanılan bir diğer malzeme olan çelik; dayanıklılık, şekillendirilebilirlik, çekme dayanımının yüksek olması ve ısı iletkenliğinin iyi olmasında dolayı yapılarda çokça tercih edilmektedir. Çelik üretimi için gerekli olan enerji arzının önemli bir kısmı fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Fosil yakıtların çelik malzeme üretiminde kullanılması inşaat sektöründen kaynaklı karbondioksit salınım miktarını arttırmaktadır.

Dünyada üretilen işlenmemiş çelik malzemenin %57'si Çin merkezli üretilmekte olup bu alanda dünyanın çelik üretim miktarında listenin başında bulunmaktadır. Türkiye, çelik

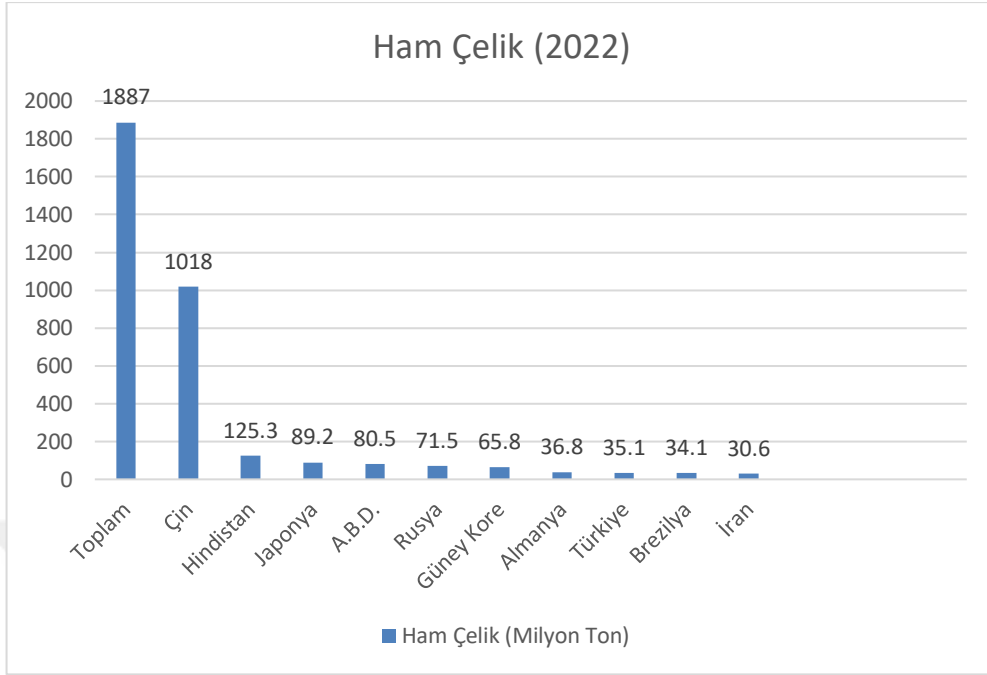
üretim miktarları göz önüne alındığında 2020 yılı verilerine göre dünyada 7. sırada yer bulmaktadır. İki şekilde çeliş üretimi yapan Türkiye, bu üretimin büyük çoğunluğunu Bazik Oksijen Fırınlı cevherden üretim yapan tesislerde üretmektedir. Bir diğer üretim şekli ise Elektrik Ark Fırınlı olup bu üretimin hammaddesi olarak hurdalar kullanılmaktadır. Atmosfere verilen sera gazı miktarları karşılaştırıldığında Elektrik Ark Fırınlı üretimin salınım miktarı Bazik Oksijen Fırınlı üretime göre %80 oranında daha azdır (Uçak & Villi, 2021).



Şekil 16. Türkiye’de Enerji Tüketimi (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2021)

Elektrik Ark Fırınlı tesislerde ham çelik üretimi için gerekli enerji arzının %95’i elektrik ve doğal gaz kaynaklı gerçekleşmektedir. Hurda dönüşümleri kullanılarak üretim gerçekleştirilen bu tesisler hem daha az karbondioksit salınımı yapmakta hem de atıkların geri dönüştürülmesini sağlamaktadır. Bazik Oksijen Fırınlı Tesisler de ise enerji talebi %80 oranında karbondioksit salınımlarının yoğun olduğu kömür ve petrol yakıtlarından kaynaklanmaktadır. Sürdürülebilirlik açısından Elektrik Ark Fırınlı tesislerin yaygınlaştırılması daha yeşil bir üretime geçilmesine olanak sağlayacaktır.

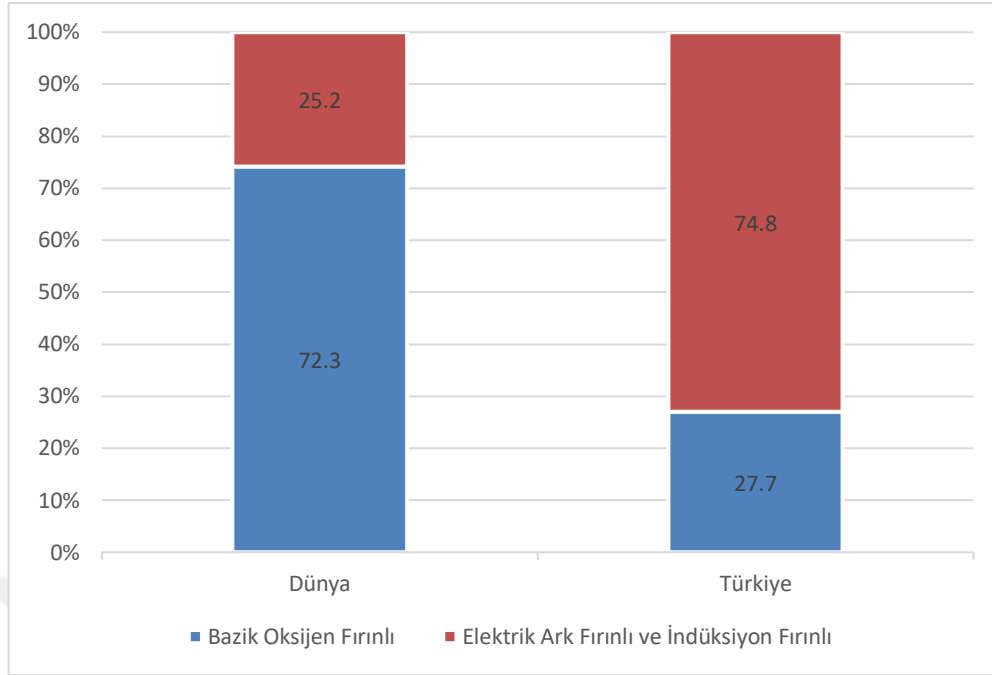
Dünyanın çelik üretim miktarlarına bakıldığında üst sıralarda gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler bulunmaktadır. Yapı sektörlerinin hızla geliştiği bu ülkelerde inşaat sektöründen kaynaklı karbondioksit salınımı da artarak devam etmektedir.



Şekil 17. Ham Çelik Üretim Miktarları (World Steel Association, 2023)

2022 yılında ham çelik üretim miktarlarına bakıldığında dünyada toplam 1885 milyon ton ham çelik üretilmiştir. Bu üretimin %54'ü Çin tarafından yapılmaktadır. Nüfus miktarının yarattığı talebi karşılamak için çimento üretiminde de ilk sırada olan Çin, hızla gelişen kentlerinde çelik yapılara da yoğunluk vererek betonarme yapılara oranla daha kısa sürede imalatı tamamlanabilen çelik yapıları da sıkça kullanmaktadır. Ham çelik üretiminde dünyada 2022 yılı verilerinde Türkiye 8. sırada yer almaktadır. Gelişmekte olan ülkeler arasında bulunan Türkiye'de inşaat sektörünün pazar payının artması ham çeliğe olan talebi de arttırmaktadır. 2022 yılında bir ton çelik üretiminde Bazık Oksijen Fırınlı ve Elektrik Ark Fırınlı tesislerde ortalama 1,91 ton karbondioksit salınımı gerçekleşmiştir. Bu miktar Bazık Oksijen Fırınlı tesislerde bir ton ham çelik üretimi 2,33 ton karbondioksit, Elektrik Ark Fırınlı tesislerde ise 1 ton çelik üretiminde 0,68 ton karbondioksit açığa çıkmaktadır.

Türkiye'de 2021 yılı itibarıyla 3 adet Bazık Oksijen Fırınlı, 26 adet Elektrik Ark Fırınlı ve 11 adet İndüksiyon Ocaklı tesis bulunmaktadır. Toplamda 40 adet çelik üretim tesisi bulunan Türkiye'de dünyanın toplam çelik üretim yönteminin aksine Elektrik Ark Fırınlı ve İndüksiyon Fırınlı tesislerden üretilen çelik miktarı daha fazladır.



Şekil 18. Çelik Üretim Yöntemi (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2021)

Türkiye’de Elektrik Ark Fırını ve İndüksiyon Fırını tesislerin üretim kapasitelerinin fazla olması Türkiye’de çelik sektöründen kaynaklı karbondioksit salınımının diğer ülkelere oranla hem daha az olmasına hem de karbon salınımından dolayı ödenmesi gereken maliyetleri düşüreceğinden daha sürdürülebilir bir pazarın oluşmasına olanak sağlamaktadır.

İnşaat sektörü nüfus artışının devam etmesiyle birlikte dünya ekonomisindeki pazar payını yıllar içerisinde arttırmaya devam edecektir. Kentleşme oranında yaşanan artış konut yapılarının sayılarının artmasına ve sadece yapı malzemelerinin üretimi ve imalatı süreçlerinde değil yapının kullanıldığı dönemde de karbondioksit salınımı devam etmektedir. Kentlerin daha temiz ve sürdürülebilir bir çevrede kurulabilmesi için son yıllarda özellikle yeşil bina kavramı gündeme gelmektedir.

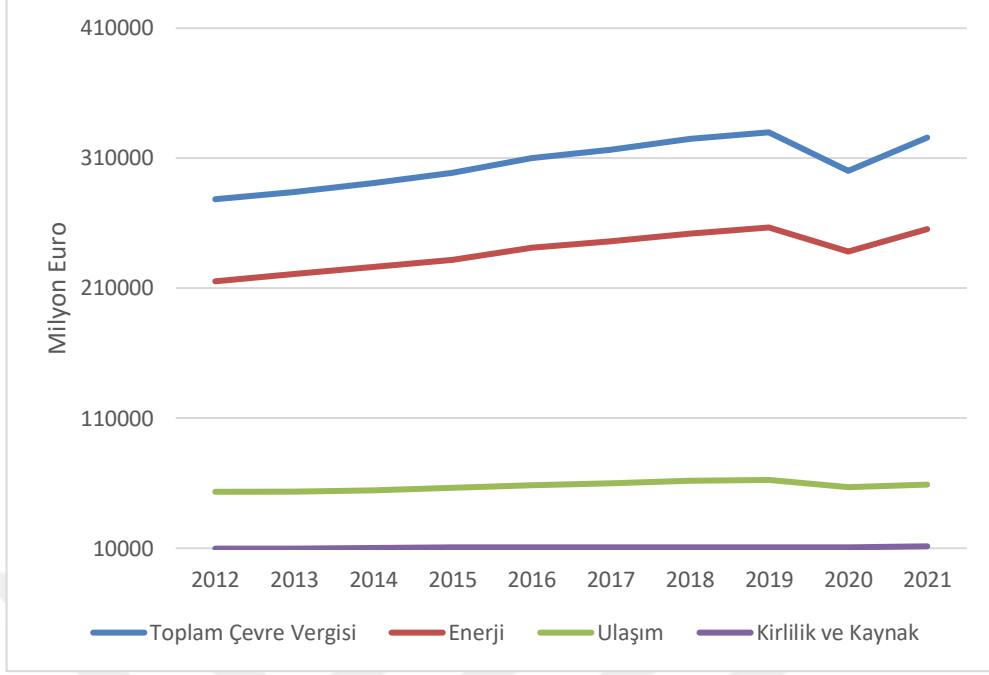
1.10. GHG Emisyonunu Sınırlandırmak İçin Yapılan Çalışmalar

Dünyada yaşanan hava kirliliği, su kirliliği ve çevresel sorunlar ülkelerin kendi başlarına çözemeyeceği küresel düzeyde sorunlardır. Bu amaçla Avrupa Birliği’ne üye ülkeler Avrupa Komisyonu’nun görüşleri doğrultusunda Avrupa İklim Kanunu’nu karbon salınım miktarlarını azaltacak şekilde güncellemeyi hedeflemektedir. İklim değişikliği, enerji tüketimi, ulaştırma, sanayi sektörü ve vergilendirme çalışmaları gibi karbon salınımının yüksek olduğu alanlarda Avrupa Yeşil Mutabakatında hedef, 2030 yılına

gelindiğinde 1990 yıllarındaki karbon salınım miktarının %55 daha azına, 2050 yılında ise karbon emisyonlarının tamamen sınırlandırmaktır. Avrupa Yeşil Mutabakatının sınırda karbon düzenlenmesi uygulamasındaki amacı Avrupa Birliği kapsamındaki ülkelerle yapılacak olan ticarete ülkeye gelen malların karbon ayak izlerine göre vergilendirilmesidir. Bu sayede yenilenebilir enerji kaynakları ile üretim yapan sektörlerin ve yeni teknolojilerin pazar paylarının artırılması düşünülmektedir. Sınırda karbon düzenlemesi 1 Ocak 2023 tarihinde yürürlüğe girerek 2026 yılına kadar geçiş dönemi yaşanması ve sonrasında tam anlamıyla sektörlerle uyumlu bir şekilde uygulanması hedeflenmektedir (Gültekin, 2022).

İklim değişikliği ile mücadele ve karbon salınımlarının sınırlandırılmasına ilişkin en büyük adımlardan bir tanesi Paris Antlaşmasıdır. Paris Antlaşması 195 gelişmiş, gelişmekte olan ve az gelişmiş ülkenin Birleşmiş Milletler garantörlüğünde ülkeler farklı sorumluluklar yükleyen ve ülkelerin kabul ettiği iklim değişikliği ile mücadelede birleştirici bir antlaşmadır. İklim değişikliği ile mücadelede önemli adımlardan biri olan Kyoto Protokolü ile karşılaştırıldığında, sadece gelişmiş ülkelerin kabul ettiği Kyoto Protokolü'ne göre çok daha bağlayıcı bir antlaşmadır. Dünyanın karbon salınımı en yüksek olan Çin'in Kyoto Protokolü'nde herhangi bir yükümlülüğü yoktur. Kyoto Protokolü'ne dünyanın toplam sera gazı salınımının %14'üne sahip ülkeler yükümlülük almıştır. Paris Antlaşması ile bu oran toplam sera gazı salınımının yaklaşık %96'sından sorumlu olan 196 ülkenin taraf olduğu ve 187 ülkeye sera gazı emisyonlarını azaltma sorumluluğu vermektedir (Karakaya, 2016).

İklim değişikliği ile mücadelede ülkelerin uyguladığı en yaygın yaptırımlardan biri çevre vergileridir. Çevre vergileri ile hem sera gazlarının salınımlarının azaltılması hedeflenip hem de bu vergiler ile sağlık, eğitim, sosyal çalışmalar ve kamu giderleri gibi önemli alanların finansmanını sağlamaktır. Avrupa Birliği'nde çevresel vergiler dört başlık altında düzenlenmektedir. Enerji vergileri, kirlilik vergileri, taşıma vergileri ve kaynak vergileridir. Enerji ve ulaşım sektörlerinden alınan vergiler toplam vergilerin büyük bir çoğunluğunu oluşturmaktadır. 2018 yılına bakıldığında Avrupa Birliği'nde enerji kaynaklı vergiler toplam vergi gelirlerinin %77,7'sini oluşturmaktadır (Işıl & Çiftçi, 2021).



Şekil 19. Avrupa Birliği Yıllık Çevre Vergisi (Eurostat, 2024)

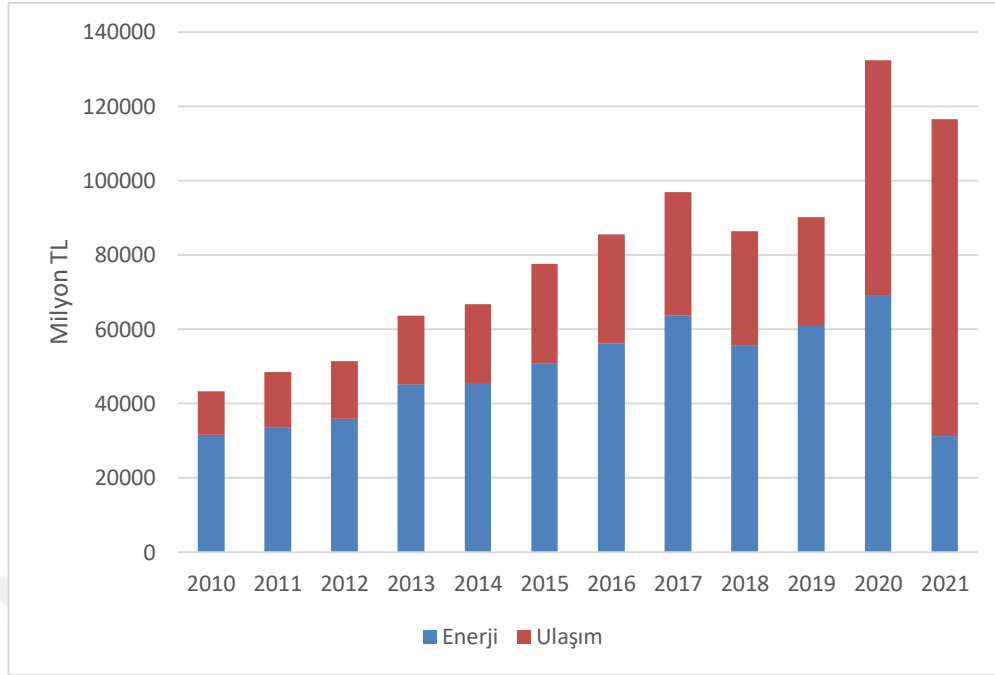
2021 yılında Avrupa Birliği'nde 325.837,48 milyon Euro çevre vergisi elde edilmiştir. Bu vergilerin %78,35 i enerji talebinden, %18,13'ü ulaşım sektöründen ve %3,52'si de çevre kirliliği ve kaynakların kullanılmasından oluşmaktadır. Bu vergilerin önemli sektörler ve kamu harcamalarına aktarılmasıyla hem sürdürülebilir bir ekonomi hem de daha temiz bir çevrede yaşamak amaçlanmaktadır.

Çevre kirliliği ve çevresel sorunlar Türkiye'nin gündemine Avrupa Birliği ile aynı yıllarda girmiş olsa da 2000'li yıllara kadar yapılan kalkınma planlarında yeterince yer bulamamıştır. Yedinci ve sekizinci kalkınma planı ile Avrupa Birliği ve diğer uluslarında kabul ettiği daha genel kabul gören standartların kabulü ve çevresel politikaların bu doğrultuda yenilenmesi kararlaştırılmıştır. Ulusal Çevre Stratejisi ve Eylem Programı Türkiye'de çevre politikalarının günümüz çerçevesinin oluşmasında önemli yer tutmaktadır. Bu programın ana hedefleri çevre kirliliğini azaltmak, yenilenebilir kaynakların kullanım alanlarını yaygınlaştırılması ve çevreyi korurken ekonomik sürdürülebilirliği sağlamaktır (Çokgezen, 2007).

Türkiye'de ilk kez çevre kirliliğinin önlenmesi için direkt olarak çevre konulu vergi 1993 yılında Belediye Gelirleri Kanunu kapsamında Çevre Temizlik Vergisi uygulamasıdır. Bu uygulamadaki amaç ürünlerin tezi-kirli olarak ayrışmasını sağlayarak daha yaşanabilir temiz bir çevre elde etmektir. Türkiye'nin son iki beş yıllık kalkınma planları incelendiğinde,

10. Beş Yıllık Kalkınma Planı'nın çevresel sorunlara dikkat çekerken sürdürülebilir ekonomiyi de beraber ilerletebilmek adına “Yeşil Büyüme” kavramını gündeme getirmiştir. Böylece üretimin daha temiz enerjilerle yapılması ve teknolojik yenilemelerle AR-GE çalışmalarının yaygınlaştırılması hedeflenmiştir. 11. Beş Yıllık Kalkınma Planı çevre konularında yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek doğal kaynakların korunması politikasını ön plana taşımıştır. İklim değişikliği ile mücadele edecek güncel politikalar üretilmesini ve bu politikalarla hem toplumun duyarlılığını arttırmak hem de bütün sektörlerle birlikte çalışmasını sağlayabilmek amaçlanmıştır. Türkiye’de uygulanan başlıca çevre vergileri; Çevre Temizlik Vergisi, Katı Atık Vergisi, Ulaştırma Vergisi, Motorlu Taşıtlar Vergisi ve Plastik Poşet Vergisi’dir. Çevre Temizlik Vergisi kullanılan sudan ortaya çıkan atıklara kadar belediyenin hizmet sağladığı binaların kullanım amaçları fark etmeksizin aldığı verginin genel adıdır. Katı Atık Vergisi özellikle kirli su sera gazı emisyonları ve gürültü kirliliği konularından alınan vergileridir. Bu vergi ile çevresel atıkların azaltılması ve atıkların dönüşümleri hedeflenmektedir. Ulaştırma Vergisi ile özellikle yol ve köprülerden geçişlerde alınan vergidir. Ulaşımda toplu taşıma kullanılmasını yaygınlaştırarak oluşacak karbondioksit salınımlarını sınırlamak istenilmektedir. Motorlu Taşıtlar Vergisi’ne bakıldığında ulaşım vergisi ile hemen hemen aynı kapsamdadır. Taşıtlardan alınan karbondioksit salınım oranları göre ayrı ayrı vergilendirme oranı ile vergi alınmasıdır. Plastik Poşet Vergisi ise doğada varlığını uzun süre koruyan ve ayrıştırılması güç olan plastik kullanımını sınırlandırmak için plastik ürünler üzerinden alınan vergilendirmedir (Çelik & Sofracı, 2022).

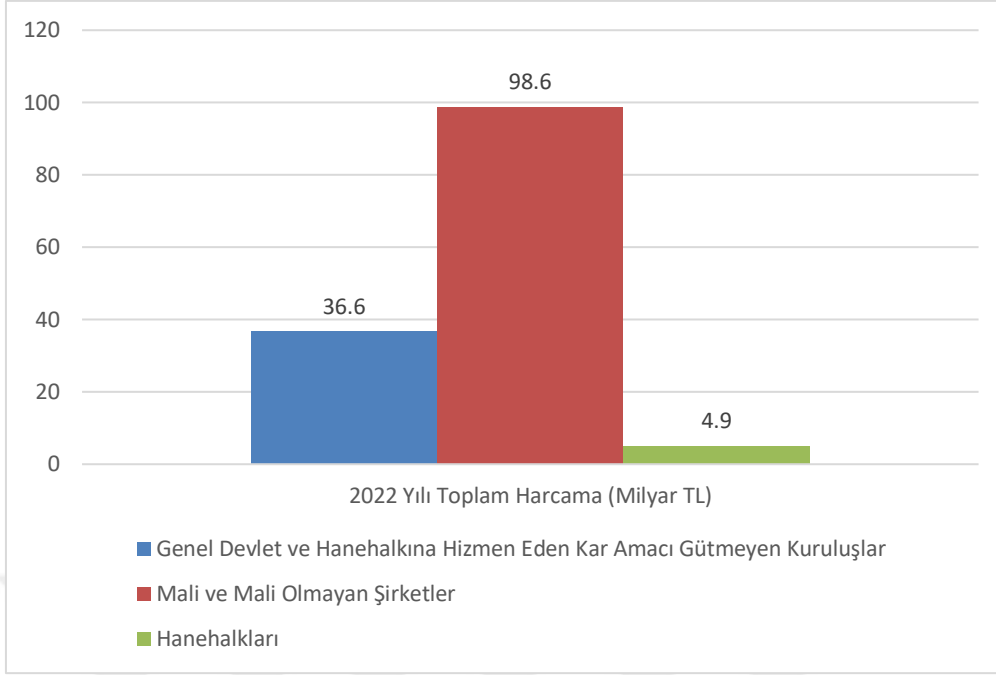
Türkiye’nin çevresel vergilerinin arasında en büyük pay Avrupa Birliği’nde olduğu gibi enerji kaynaklıdır. Enerji arzı ilgilendirdiği sektörlerin fazlalığından dolayı en çok sera gazı salınımı gerçekleştiren sektör olduğu gibi çevresel vergilendirilmenin de en yoğun olduğu alandır.



Şekil 20. Türkiye'nin Çevresel Vergi Miktarları (OECD, 2023)

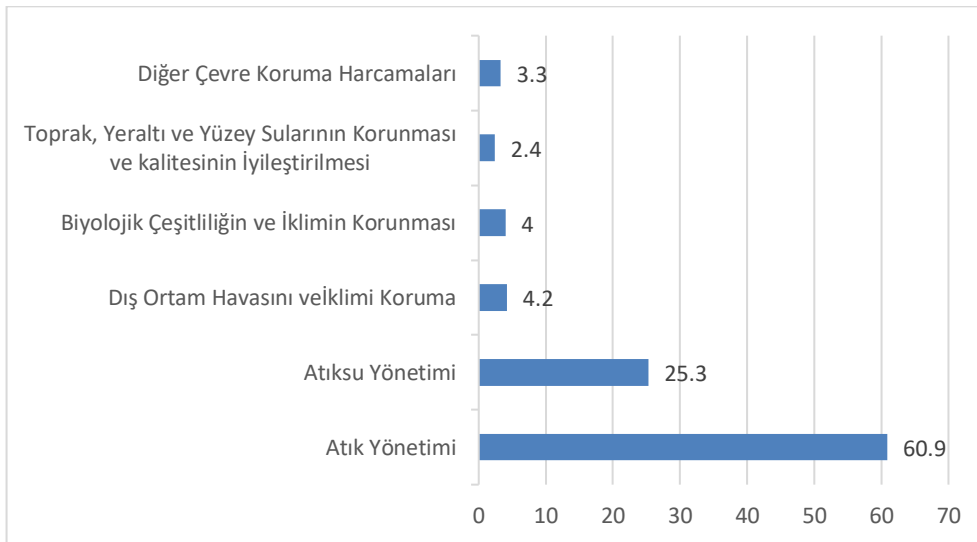
Enerji kaynaklı çevre vergileri 2020 yılına kadar ulaşım kaynaklı çevresel vergilerden neredeyse iki kat daha fazla vergi getirmektedir. 2020 ve 2021 yılında Türkiye'de yok ve köprülerin sayısı ve buna bağlı alınan vergilerin artmasında dolayı ulaşım kaynaklı vergilerde ciddi oranda artış gözlemlenmektedir. 2010 yılında toplam çevresel vergilerin %26,7'sini oluştururken bu oran 2021 yılında %73,1'e yükselmiştir.

Türkiye'de çevre kirliliğinin önüne geçmek için sadece vergilerle değil kamu sektöründe yapılan harcamalar, mali ve mali olmayan şirketler ve hane halkları da yer almaktadır. 2022 yılında yapılan toplam çevre koruma harcamalarına 140,3 milyar TL harcanmıştır. Çevre koruma harcamalarında en büyük pay %70,3 ile mali ve mali olmayan şirketlerindir. Genel devlet ve hane halkına hizmet eden kar amacı olmayan kuruluşlar %26,1 ve hane halkları %3,6 oranında pay sahibidir.



Şekil 21. Türkiye'nin Çevre Koruma Harcamaları (TÜİK, 2023)

Çevre harcamalarını konularına göre ayırdığımızda en büyük pay %60,9 ile atık yönetimi hizmetlerindir. Atık yönetimi hizmetlerini %25,3'lük oranı ile atık su yönetimi hizmetleri takip etmektedir. Bu iki hizmet alanı toplam hizmetlerdeki payın yaklaşık %86'sını oluşturmaktadır. Geri kalan hizmetlerin dağılımına bakıldığında dış ortam havasını ve iklimi koruma %4,2, biyolojik çeşitliliğin ve peyzajın korunması %4, toprak, yeraltı ve yüzey sularının korunması %2,4 ve diğer çevre koruma harcamaları %3,3 olarak oluşmaktadır.



Şekil 22. Konulara Göre Çevre Koruma Harcamaları (%) (TÜİK, 2023)

Küresel ısınma ve beraberinde getirdiği iklim değişikliği ile mücadelede ülkelerin başvurdukları en temel yöntemlerden birisi çevresel vergilerdir. Özetle çevresel vergiler daha temiz bir çevrede yaşamak için çevreyi kirleten ürünlerin azaltılmasını amaçlamaktadır. Çevresel vergilerdeki amaç sadece sera gazı sınırlaması ya da kirlilik oranlarını azaltmak değil ekonomik büyümenin sürdürülebilirliğini sağlamak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasını yaygınlaştırmak ve güncel teknolojik gelişmelerle birlikte temiz enerji elde etmek olarak sıralamak mümkündür.

1.10.1. İnşaat Sektöründe GHG Sınırlandırma Çalışmaları

İnşaat sektörü sera gazlarının oluşmasına doğrudan ve dolaylı olarak sebep olmaktadır. İnşaatların yapım aşamalarında açığa çıkan sera gazları doğrudan, sanayi sektörünün birçok alanında kullanılmasıyla dolaylı yoldan sera gazı salınımı gerçekleştirmektedir. İnşaat faaliyetlerinin çevreye verdiği en büyük zararlar hammadde tüketimi, enerji harcamaları ve su tüketimlerinden kaynaklıdır. İmalat aşamasında olduğu gibi kullanım aşamasında da ısınma için enerji tüketimi, elektrik tüketimi ve su kullanımı devam etmektedir. Yapıların inşa edileceği doğal alanların tahribatı ve sonrasında ortaya çıkan atıklar da inşaat sektöründen kaynaklı diğer çevresel zararlardır. İnşaat sektöründen kaynaklı çevresel etkilerin azaltılması gerektiği konusu Paris Antlaşması'nda küresel ölçekte de gündeme gelmiştir. Bu bağlamda Türkiye 2015 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Sekreteriyasına sera gazlarının sınırlandırılmasında inşaat sektörünü de içinde barındıran politikalar iletmışlerdir. Bu politikalar; binaların enerji sistemlerinin geliştirilmesi, enerji tüketimlerinin kontrol altına alınması ve yeşil binalar ile binaların enerji arzlarının azaltılmasıdır (Eştürk & Tormuş, 2022).

Çimento sektörünün karbondioksit salınımında en büyük rol klinker maddesinin üretilmesi aşamasında gerçekleşmektedir. Klinker üretimindeki karbondioksit salınımının sınırlandırılması da sürdürülebilirlik açısından önem arz etmektedir. Klinkerin yerine en sık kullanılan malzemeler uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufudur. Klinker yerine kullanılan bu malzemeler çimento üretimindeki enerji arzından kaynaklanan karbondioksit salınımlarını %40, tepkime esnasında açığa çıkan karbondioksit salınım miktarını da %50 oranında azaltabileceği tahmin edilmektedir. İnşaat sektörünün karbon salınımlarını sınırlamak için üzerinde durduğu konulardan birisi de düşük karbon oranlı çimento üretimidir. Dayanım özellikleri günümüz portland çimentosunun özellikleri ile paralellik

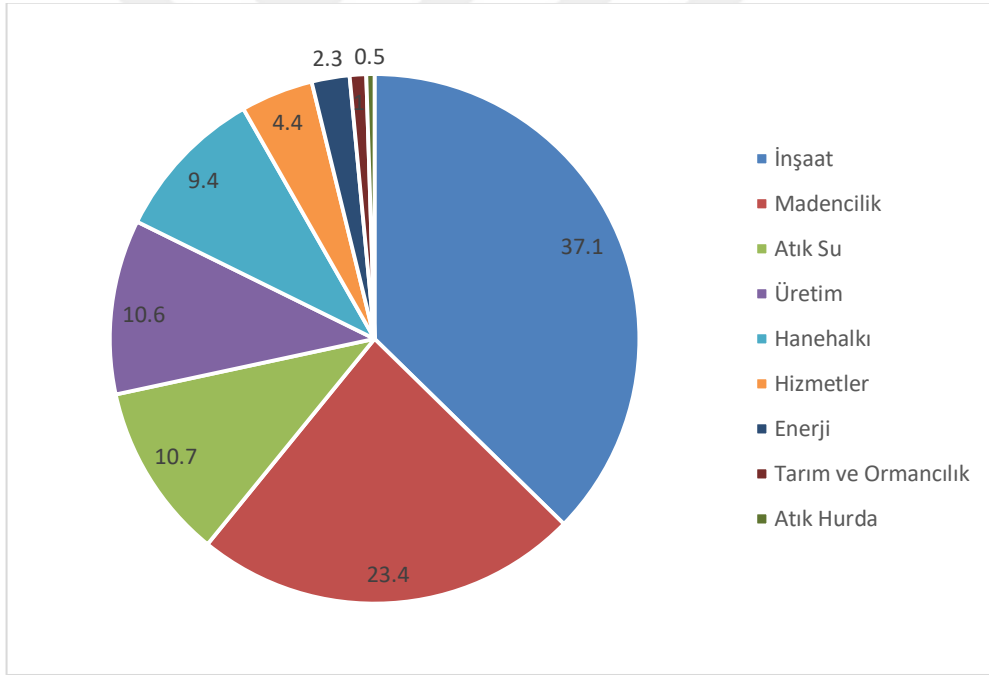
göstermesine rağmen uygulanabilirliği ve uzun dönemdeki davranışları hakkında detaylı bilgi bulunmamaktadır. Çimento üretimi gibi enerji ihtiyacına duyan sektörlerden kaynaklı sera gazlarının sınırlandırılmasında bir diğer çalışma da karbon yakalama ve depolama teknolojisidir. Çimentonun üretilmesi esnasında gerekli olan fosil yakıtların yakılması sonucunda açığa çıkan karbondioksiti sıvılaştırıp yer altına depolanması amaçlanmaktadır. Bu sistem ile 2050 yılında %56 oranında karbondioksit salınımının azaltılacağı öngörülmüştür (Rende, Akalın, Ercan, & Hilmioglu, 2013).

Günümüz şartlarında en temel yapı malzemelerinden olan beton çevre kirliliğine sebep vermesinden dolayı sürdürülebilirliğinin artırılması gerekmektedir. Betonun daha sürdürülebilir olması için katkılı çimento kullanımı, karışım suyu için geri dönüşümü sağlanan su kullanılması ve atık betonların geri dönüştürülmesi beton kaynaklı karbondioksit salınımları azaltacaktır. Sürdürülebilir betonun üretiminde kullanılması değerlendirilen maddeler ise; atık plastik malzemeler, cam atıkları, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve şehrsel kaynaklı katı atık külleri bu maddelerin bazılarıdır. Betonun çevresel zararlarının azaltılmasında bir diğer çalışma da karışım suyuna eklenen geri dönüştürülmüş sudur. Yağ toplayıcılar sayesinde geri dönüşümü sağlanan su betonun karışım suyunda %10-15 oranında kullanılabilmektedir (Yılmaz, 2011).

Beton üretiminde bir diğer bileşen olan agrega da çevresel zararlara sebep olmaktadır. Betonun ağırlık olarak yaklaşık %45'i agrega oluşturmaktadır. 2022 yılında Türkiye'de 254,1 milyon ton beton üretimi gerçekleştirilmiştir (TÜİK, 2023). Agrega ağırlığı %45 olarak 114,4 milyon ton olarak hesaplanabilmektedir. Agreganın birim hacim ağırlığı $2,7 \text{ ton/m}^3$ olarak alındığında Türkiye'de 2022 yılında beton üretiminde kullanılan agreganın hacmi 42,4 milyon m^3 olmaktadır. Bu miktar Türkiye'de 2022 yılında yaklaşık 110 milyon m^3 'lük doğal taş rezervinin çıkarılıp işlendiğini göstermektedir. Hem kapladığı hacim hem de tükettiği doğal kaynak rezervlerine bakıldığında agreganın çevreye verdiği zarar azımsanmayacak derecededir. Agrega rezervlerinin sınırlı olmasından dolayı sürdürülebilir agrega çalışmaları önem kazanmaktadır. Sürdürülebilir agrega için en önemli yöntemlerden bir tanesi inşaatların yıkıntıları sonrası oluşan moloz ve atıkların geri dönüştürülerek kullanılmasıdır. İnşaat yıkıntı atıkları şehirlerin kentsel dönüşümü sonucunda oluşan yıkıntılar, yeni yerleşim yerleri kurulurken açığa çıkan yıkıntılar ve beton üretim ve prefabrik yapıların üretilmesi esnasında açığa çıkan atıklar çevreye en çok zarar veren atık türleridir. Bu atıkların geri dönüştürülmesinde duvar molozlarından elde edilen, beton yıkıntıdan elde edilen ve doğal agregadan geri dönüştürülerek yeni imalatlarda kullanılmak

için agrega oluşturulmaktadır. Geri dönüştürülen agregalar özellikle dolgu malzemesi, yol inşaatlarında temel malzemesi, park sahalarının düzenlenmesinde ve hidrolik yapılarında dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu sayede agrega üretiminden açığı çıkacak karbondioksit salınımları ve doğal kaynakların tüketilmesi sınırlandırılmaktadır (Yavan & Bozbey, 2023).

Dünyadaki atık yönetimi ve atıkların sınırlandırılması kapsamında yapılan çalışmaların en önemlilerinden bir tanesi Avrupa Birliği'nin yürüttüğü Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında yapılan düzenlemelerdir. Sıfır atık yönetim sistemini benimseyen Avrupa Birliği 2018 yılında atık yönetiminde yenilemeler yapmıştır. Kentsel atıkların geri dönüştürülmesi hedefleri 2025 yılı için %55, 2030 yılı için %60 ve 2035 yılı için %65 olarak belirlenmiştir. Bu geri dönüşümün sağlanması için inşaat sektörünün açığa çıkardığı atıkların kontrol edilmesi büyük önem arz etmektedir (Aybike & Arıkan, 2022).



Şekil 23. Avrupa Birliği Ekonomik Aktiviteye Göre Atık Oranları (Statista, 2023)

İnşaat kaynaklı atıklar 2020 yılında Avrupa Birliğinde toplam atıkların %37.1'ini oluşturarak en büyü paya sahip olmuştur. İkinci sırada %23,4'lük oranıyla gelen madencilik sektörü de inşaat sektörü ile bağlantılı çalışmasıyla oluşan çevresel atıkların neredeyse yarısının temelinde inşaat faaliyetleri gelmektedir. Avrupa Yeşil Mutabakatı bu anlamda

sıfır atık yönetimini benimsemesiyle özellikle inşaat kaynaklı atıkların geri dönüşümlerini sağlayarak malzemelerin üretim ve yapıların imalat aşamalarında açığa çıkacak sera gazı etkisi yapan gazların miktarlarını azaltmayı hedeflemektedir.

Dünyanın genelinde kentsel kaynaklı atıkların özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerden kaynaklandığı gözlemlenmektedir. 2018 yılında Amerika Birleşik Devletleri 265,2 milyon ton kentsel atık ile bu alanda ilk sırada yer almaktadır. 2017 yılında 215,2 milyon tonluk kentsel atık üreten Çin nüfusunun da beraberinde getirdiği yapılaşmadan dolayı bu alanda ilk sıralarda yer almaktadır. Türkiye ise 2020 yılında 34,6 milyon ton kentsel atık üreterek diğer dünya ülkelerine kıyasla listelerde ön sıralarda kendine yer bulmaktadır (Statista, 2023).

İnşaat sektörü sürekli gelişen ve gelişmeye de devam edecek sektörlerin başında gelmesinden dolayı çevre sorunları ile mücadele eden dünyamızda sürdürülebilir bir yapıya dönüştürülmesi gerekmektedir. Malzeme üretim aşamaları, yapı alanının çevreye verdiği zararlar, malzemelerin taşınması, imalat aşaması ve yapıların kullanılması evrelerinin her birinde sera gazı salınımı ve atık madde oluşturmaktadır. Günümüzde inşaat faaliyetlerinin sürdürülebilirliğinin arttırılması için yapılan en kapsamlı çalışmalar yeşil bina kavramı altında toplanmaktadır.

1.11. Yeşil Bina Sistemleri ve Sertifika Standartları

İnşaat faaliyetlerinin sürdürülebilir hale gelmesi için imalatında daha az enerji harcaması, geri dönüşümlü malzemelerden oluşturulması ve yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması üzerinde çalışılan en önemli konu başlıklarındandır. Sürdürülebilirlik kapsamında yapı ömrü boyunca da kullanacağı ısınma, elektrik ve su ihtiyaçlarını da yeni teknolojik gelişmelerle minimum seviyelere indirme hedefleri ön planda tutulmaktadır. Yapıların doğayla uyumlu ve çevresel zararları azaltarak uygulanması çalışmalarının genel kabul gören adı “Yeşil Bina” kavramıdır. Yeşil bina kavramı ile birlikte inşaat yapıları sürdürülebilir hale getirilmektedir.

İnşaat yapıları çok çeşitli olmasından dolayı her bir imalat ve her yapının veya sistemin kullanılmasında ortaya çıkacak çevresel zararlar da farklılık göstermektedir. Genel bir standart belirlemek ve bu standartları inşaat yapılarına ayrı ayrı uygulamak için geliştirilen sertifikalar bulunmaktadır. Farklı ülkelerin geliştirdikleri bu sertifikasyon

sistemleri yıllar içerisinde birbirlerinden etkilenecek ve birbirlerinin eksik yönlerini gidermeye çalışarak geliştirilmektedir. Yapıları kategorilerine ve işlevlerine göre belli standartlar çerçevesinde inceleyen bu sertifikalar inşaat sektörünü doğanın karşısında olmaksızın doğanın bir parçası haline getirerek gelecek nesillere daha yaşanılabilir bir çevre bırakmayı hedeflemektedir.

1.12. Yeşil Bina Kavramı

Küresel ısınma ve beraberinde getirdiği iklim değişikliğini insan faaliyetlerinin bulunduğu bütün sektörlerin çalışmaları etkilemektedir. Bu faaliyetleri sürdürülebilir hale getirme fikri ortaya çıktığı ilk günden beri bütün sektörleri etkilediği gibi inşaat sektörünü de etkilemeye ve dönüştürmeye çalışmaktadır. Sürdürülebilirlik kavramının inşaat mühendisliğine kazandırdığı en geniş kapsamlı kavram “Yeşil Bina” kavramıdır. Yeşil bina kavramı genel çerçevede, yapıldığı çevre ile temiz etkileşimi olan, doğal kaynakların tüketme konusunda hassas ve ekonomik sürdürülebilirliği de sağlayan yapıların oluşturulmasıdır (Kömürlü & Özdemir, 2023). Başka bir tanımlama ile yeşil bina kavramı, doğal kaynakların sürdürülebilir şekilde tüketilmesi ve canlı yaşamını etkilemeyerek yapılaşmayı sağlamaktır (Arat & Kaçar, 2020).

Yeşil bina kavramı aynı zamanda çevre dostu binalar anlamında da kullanılmaktadır. Yapının her aşamada çevreye ve gelecek kuşaklara sorumlu olan verimli sistemlerin üretilmesinin genel adıdır. Yapının üretilmesi, kullanılması, malzeme standartları, bakımı, onarımı ve ömrünü tamamladığında geri dönüşümüne kadar her evresinin düşünülmesidir. Kullanıl süresince çevreye ve insan sağlığına zarar vermeyen ergonomik yapıların oluşturulması yine yeşil bina kavramı altında oluşturulan standartlara örnek gösterilmektedir (Özaydın & Baz, 2021).

1.12.1. Yeşil Binaların Faydaları

Yeşil bina kavramının hedeflerinin başında inşaat sektörü kaynaklı enerji, su, doğal kaynakların tüketilmesi ve yapı malzemelerinin geri dönüşümlerinin sağlanması gelmektedir. Karbondioksit salınımının ana sebepleri olan bu etmenler canlılar için yaşanabilir çevrenin korunmasını tehdit etmektedir. İnşaat sektöründe yeşil bina kavramının yaygınlaşması sürdürülebilir çevre için gerekli olup toplum ve ekonomi üzerine olan olumlu etkileri ile de geniş bir alanı kapsamaktadır.

Yeşil binaların gelişiminden önce kullanılan en yaygın yöntem geleneksel yapım teknikleridir. Geleneksel yapılarda enerji tüketimi %70, orman alanlarının %25'ini tahrip ettiği ve su kaynaklarının %17'sininin tüketilmesine sebep olmaktadır. Bu tüketim oranları ile de karbondioksit salınımına %33 oranında etki etmektedir. Geleneksel yapılarda geri dönüşüm oranı da yaklaşık %5 olarak hesaplanmaktadır ki bu değerler sürdürülebilir bir yapının oluşmasını engellemektedir. Geleneksel yönteme kıyasla yeşil binalarda özellikle enerji ve su tasarrufu sağlaması bakımından karbondioksit salınımı ve kuraklık ile mücadele etme hususunda önemli getiriler elde edilmektedir. Ortalama olarak yeşil binalar geleneksel yapılara göre %50 oranında suyu ve %30 oranında enerjiyi daha az tüketmektedir. Yeşil binalar ayrıca geleneksel yapılara göre daha düşük bakım ve işletim maliyeti ile ekonomik sürdürülebilirliğe de katkı sağlamaktadır (Bayat & Küçükali, 2021).

Kentleşmenin hızla devam ettiği dünyada nüfusun barınma talebini karşılamak için yapım faaliyetleri sürekli olarak artmaktadır. 2018 yılı sera gazı ölçümlerine bakıldığında %39'unun inşaat faaliyetleri ile bağlantılı olduğu ve özellikle çimento, çelik ve cam gibi yapım işlerinin temel malzemelerinin emisyonların %11'ini oluşturduğu tespit edilmiştir. Yapı malzemeleri için de dünyadaki hammadde rezervlerinin %40'ının geri dönüşümsüz olarak tüketildiği bilinmektedir. Yeşil binalar ise bu olumsuz etkilerin zararlarını minimuma indirmek için yapım aşamasından kullanım ömrünün sonuna ve geri dönüştürülmesine kadar çevresel faydayı gözetten bir sistem içerisinde geliştirilmektedir. Belirli standartlar üretilerek gözetilen bu sistem ülkelerin genel kabul gören sertifikasyon sistemlerinin oluşmasına zemin hazırlamıştır. Bu sertifikasyon sistemi sayesinde gelecek nesillere sürdürülebilir ve sağlıklı bir çevre bırakmak hedeflenmektedir (Gökçen & Perker, 2022).

Sürdürülebilirlik kavramı çevre, ekonomi ve toplum üçgeninde şekillendirildiği gibi yeşil bina kavramı da bu üç değişkenin birlikte değerlendirilerek ele alınmaktadır. Bulunduğu bölgenin iklim koşullarına göre verimliliğinin oluşturulduğu ve sosyal çevrenin talepleri ile geliştirilen yeşil binalar yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak atık yönetimini de minimum düzeyde tutmaktadır. Su kullanımını azaltması ve havanın kalitesini arttırması da diğer çevresel faydalarıdır. Yapıların iç mekân kalitesi sağlık kalitesini yükselterek yaşam kalitesinin yükselmesini sağlamaktadır. Geleneksel yapı tekniklerine oranla yeşil binalar yaklaşık %28 oranında daha verimli yapı sistemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapının kullanım ömrü boyunca bakım ve işletme maliyetleri geleneksel yapılara göre daha avantajlı olmaları da ekonomik sürdürülebilirliği sağlamaktadır.

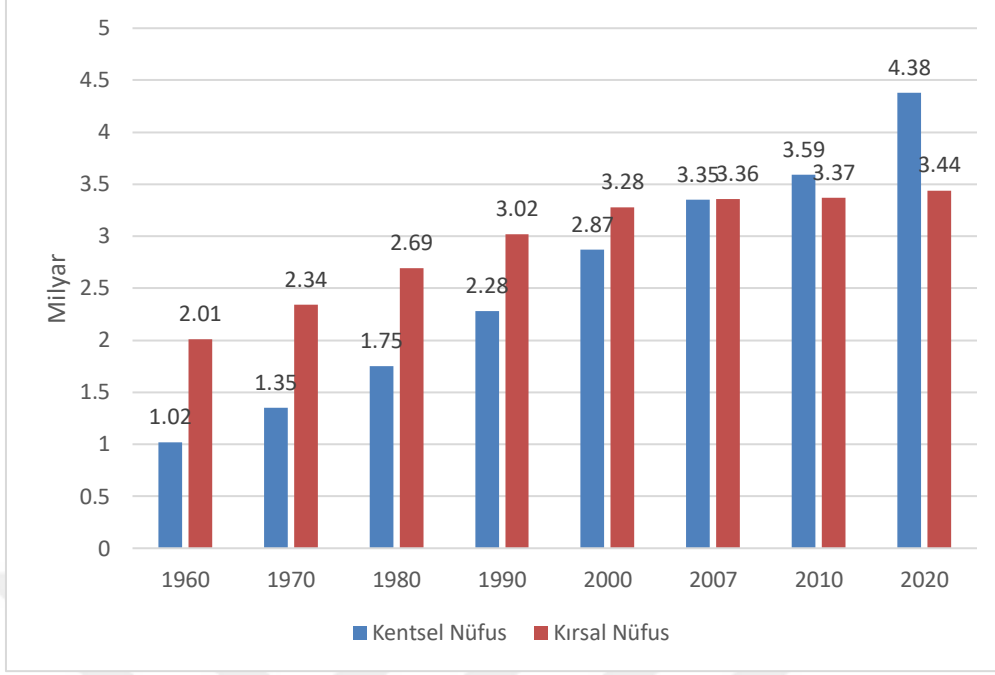
Ülkelerin ekonomik giderlerine sağladıkları katkı ile ekonomik kalkınma faaliyetlerini de destekler konumdadır (Kardemir & Dağ, 2021).

Yeşil binaların beraberinde getirdiği faydalardan iç ortam kalitesinin artması insan sağlığı açısından çok önemli olmaktadır. İnsanlar zamanlarının %90'ını geçirdiği binalar içerisindeki kirletici maddelerden dolayı daha sağlıklı ortama evrilmek zorundadır. Yeşil binaların sayılarının artması çevre sorunlarının önüne geçmesini sağlamakla beraber insan sağlığını ve konforunu da arttırmaktadır (Güzelkokar & Gelişen, 2019).

Yeşil yapıların faydaları arasında ekonomik fayda olan bakım işletme maliyetleri gösterilebilmektedir. Yapıların maliyetleri ilk yatırım, kullanım maliyeti ve geri dönüşüm maliyeti olarak üç aşamada değerlendirmek mümkündür. İlk yatırım maliyeti yapının arsa maliyeti, proje giderleri ve imalat maliyetleri ana giderleri oluşturmaktadır. Kullanım maliyeti ise elektrik, ısıtma, atık su, bakım ve onarım maliyetleri gibi giderleri kapsamaktadır. Kullanım ömrünü tamamlayan yapıların yıkılması, hafriyatın kaldırılması ve geri dönüşümde kullanılacak malzemelerin ayrılması maliyetleri de genel olarak geri dönüşüm maliyetinin giderleri arasında gösterilmektedir. İlk yatırım maliyetleri geleneksel yapılara göre daha fazla olsa bile yapıların kullanımları sırasında bakım ve işletme maliyetlerinde elde edilecek maliyet tasarrufu yeşil binaların en güçlü yanlarından biridir (Güzelkokar & Gelişen, 2019).

1.12.2. Yeşil Bina Kapsamında Kentleşme

Nüfus artışının etkilerinin en yoğun olarak görüldüğü ve insanların yaşam şekillerini değiştiren etmen kırsal alandan kentlere yaşanan göçler olmaktadır. Yaşanan bu göçlerin ekonomik, sağlık, eğitim, modern yaşam amacı ve gelişmiş altyapı hizmetlerine olan talepler gibi farklı alanlarda birçok sebepleri bulunmaktadır. Göç hareketliliğinin sebepleri farklı olsa da ortaya çıkan sorun kentleşme sorunu olarak tek bir başlıkta incelenebilmektedir. Artan kentsel nüfus barınma için konut ihtiyacını, ulaşım için yeni yolların yapılmasını ve altyapı hizmetlerinin genişletilmesi gibi çeşitli alanlarda inşaat faaliyetlerini de beraberinde getirmektedir.



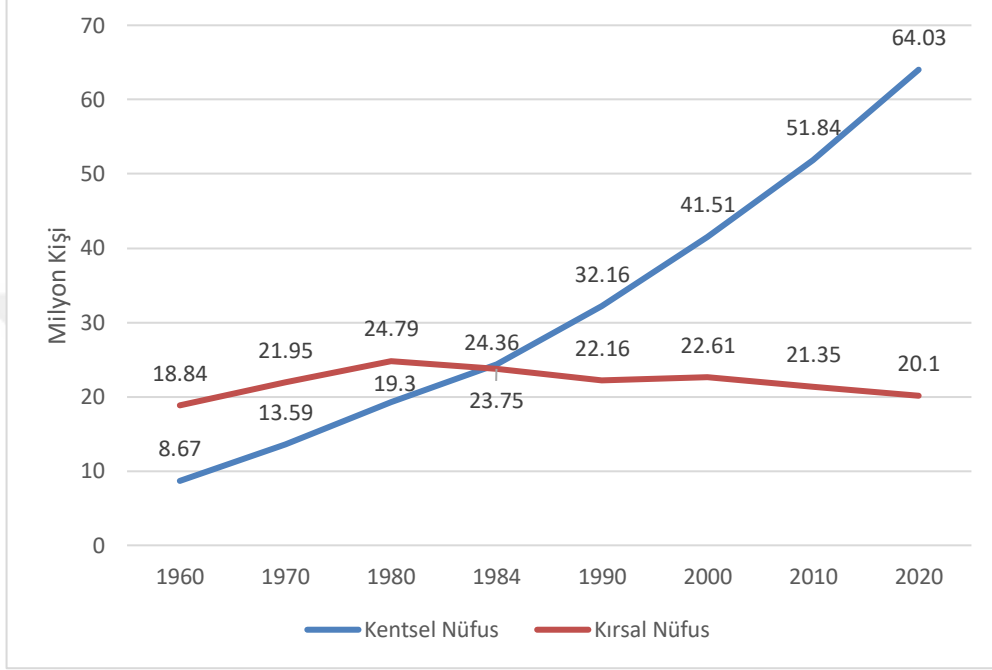
Şekil 24. Dünyanın Kentsel-Kırsal Nüfusu (Our World in Data, 2023)

Dünyanın kentsel-kırsal nüfus hareketliliği incelendiğinde 1960'lı yıllarda kırsal nüfus toplam nüfusun yaklaşık %66'sını oluşturmaktaydı. Bu oran yıllar içerisinde azalma eğilimi göstermiştir. Kente olan göç hareketliliği ile kentsel nüfus miktarı ile kırsal nüfus miktarı 2007 yılında neredeyse eşit seviyeye gelmiştir. Bu dönemden sonra da kente göç artarak devam etmiş ve 2020 yılına gelindiğinde kentsel nüfus dünyanın toplam nüfusunun %56'sını oluşturarak 1960 yılındaki tablonun tersi bir durum oluşmuştur.

2025 yılında ise kentsel nüfusun %70'i aşacağı tahmin edilmektedir ve bu kentleşme hareketleri planlı bir şekilde yapılmadığında ciddi çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Özellikle binaların ısıtma ve elektrik gibi ihtiyaçları fosil yakıtlar kullanılarak karşılanmakta ve karbondioksit gazlarının açığa çıkmasına sebep olmaktadır. Kentleşmenin yoğunlaşması ve düzensizliği gelecek nesilleri de tehdit etmeye başlamasıyla inşaat sektöründe yeşil bina kavramının ön plana çıkmasını beraberinde getirmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir araştırmaya göre yeşil binalar geleneksel yapılara göre enerji tüketiminde %24-50 arasında, karbondioksit salınımlarında %33-39 oranında, su tüketiminde %40 ve sürdürülebilirliğin sağlanmasında önemli rol oynayan atık yönetimi ve geri dönüşümde %70 daha etkili olduğu belirlenmiştir (Öztopçu & Salman, 2019).

Kentsel nüfusun artmasının getirdiği çevresel sorunlar dünyada olduğu kadar Türkiye'de de belirgin olarak gözlemlenmektedir. Türkiye'de nüfus belli bölgelerde

yoğunlaşmaktadır. Geniş alanlara yayılmayan nüfus kentlerin çarpık inşa edilmesine sebebiyet vererek düzensizliğe neden olmaktadır. Konut artışında yaşanan yoğunlukla beraber karbondioksit salınımlarını da arttırarak Türkiye'nin de yeşil bina projelerini uygulamasını zorunlu hale getirmektedir.

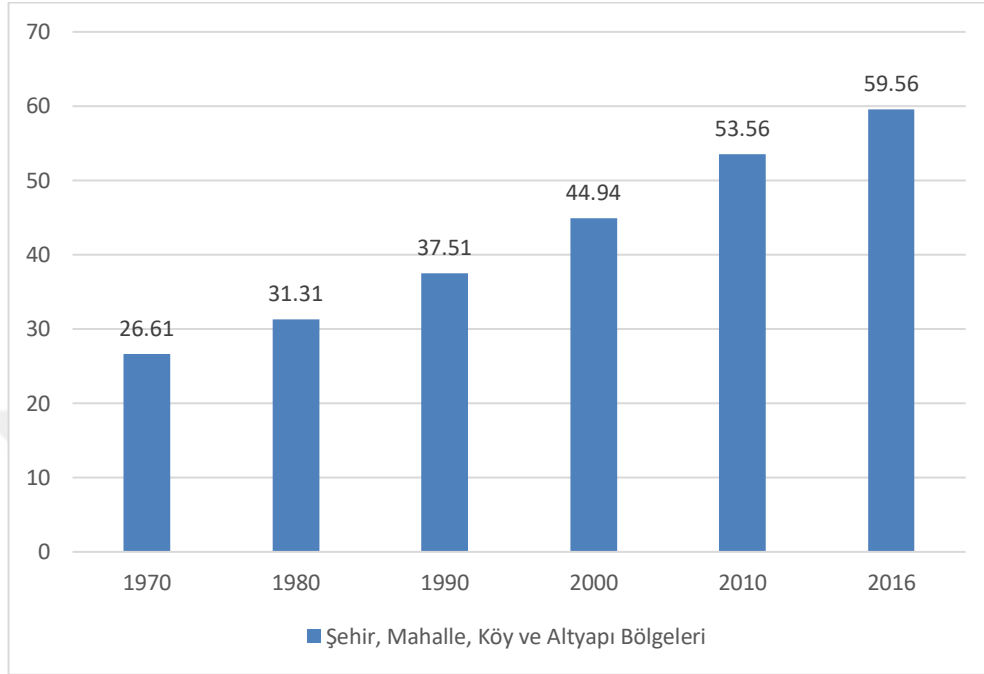


Şekil 25. Türkiye'nin Kentsel-Kırsal Nüfusu (Our World in Data, 2023)

Dünyada kentsel nüfus kırsal nüfusa oranla fazla olduğu ilk yıl 2007 olurken Türkiye'de 1984 yılında kentsel nüfus kırsal nüfusu geçmiştir. 2020 yılına gelinde ise toplam nüfusun %76'sı kentte yaşamaktadır. Bu oran Türkiye'nin sürdürülebilir bir kentsel yaşama olan ihtiyacının açık bir göstergesi konumundadır. Türkiye bu kapsamda 8 Kasım 2019'da Ulusal Yeşil Sertifika Sistemi (Yes-TR) yazılımının altyapı çalışmalarına başlamıştır (ÇŞB, 2020).

Yeşil binaların yaygınlaşması için Türkiye'de ilki 2012 yılında düzenlenen Yeşil Binalar Zirvesi yaşanabilir kentler oluşturmak için gereklilik haline geldiğini belirtmektedir. Kentsel dönüşümün önemi vurgulanan zirvede eski binaların yıkılması ve dönüştürülmesi elverişli olanlarında kullanılabilir hale getirilmesi konuları üzerinde durulmuştur. Yeşil binaların maliyetlerinin geleneksel yapım maliyetlerine yaklaştığı hatta uzun vadede yeşil binaların ekonomik faydalarının daha avantajlı olduğu belirtilmiştir. Yeşil konut

sertifikasının da tasalarla destekleneler sürdürülebilir yapıların yaygınlaşmasının gerekliliğine dikkat çekilmiştir (Erdede, Erdede, & Bektaş, 2014).



Şekil 26. Dünyanın İnşa Alanı (Milyon Hektar) (Our World in Data, 2019)

Dünyanın inşaat yapılarından etkilenen alanları yıllar içerisinde artarak devam etmektedir. Kentleşmenin etkileri yapı alanlarının tahribatıyla da gerçekleşerek doğal arazilerin tahribatına yol açmaktadır. Yapılar inşa edildiğinde arazisini kullanım ömrü boyunca tahribatına yol açacağından doğal alanların korunarak arazi seçimleri yapılmalıdır. Kentsel sürdürülebilirlik için önem arz eden konuların başında alan tasarrufu, doğal çevrenin korunması, planlı kentleşme, su kaynakları korunmalı ve geri dönüşüme dikkat edilmelidir. Kentleşme oranı ve arazi kullanımı sürekli artarken kentlerin daha yeşil ve sürdürülebilir hale getirilmesindeki fikirlerden biri “yeşil çatı” kavramıdır. 1950’li yıllardan sonra gelişen çatı teknolojisi ile çatılarda yeşil alan kullanımı ortaya çıkmaktadır. Avrupa’da ve Amerika Birleşik Devletleri’nde yeşil çatı uygulamaları artmaktadır. Almanya da yeşil çatıların geliştirilmesi için yönetmelikler ile teşvik edilmektedir. Asya kıtasında ise Japonya yeşil çatı uygulamalarında öncü rol oynayan ülke konumundadır (Aras, 2019).

Yeşil çatı sistemleri yeşil binaların kriterler üzerinden değerlendirildiği sertifikasyon sistemlerinde de önemli kıstaslar arasında yer almaktadır. Yapıların tahrip ettiği doğal

arsaların yapı bittikten sonra yeşillendirilerek ekosisteme katkı sağlamaya çalıştırılması inşaat sektöründe sürdürülebilirliğin sağlanmasına katkı sağlamaktadır.

1.12.3. Dünyada ve Türkiye’de Yeşil Bina Uygulamaları

Yeşil binaların faydaları yıllar geçtikçe daha iyi analiz edilmektedir. Sürdürülebilir yapı ve toplum inşa etme amacıyla öncelikle gelişmiş ülkeler yeşil binaları yaygınlaştırmıştır. İngiltere’de sürdürülebilir tasarımın en gözde örneklerinden olan Lighthouse; su ihtiyacını yağmur suyundan, havalandırma sistemi için rüzgâr, enerji ihtiyacı içinde yan duvarlarda ve çatıda konumlandırılan güneş panelleri sayesinde kendi kendine yetmektedir. Güneş panelleri ile çevrili olan yapıda %60 oranında da ısı yalıtımı sağlanmaktadır. Sürdürülebilir yapılara bir örnek de Amerika Birleşik Devletleri’nde bulunan Phipps Sera ve Botanik Bahçeleri hem bina hem de saha kompleksidir. Sıfır enerji tüketimi amacıyla üretilen tesis güneş panelleri, rüzgâr türbinleri ve jeotermal kuyuları ile yenilenebilir enerji üreterek kendi enerji ihtiyacını karşılamaktadır. Tesis alanındaki atık suyu ve yağmur sularını da geri dönüşümünü kendisi yaparak belediyenin atık su dönüşümlerindeki yükünü de azaltmaktadır. Dünyanın en yeşil tesislerinden biri olan Phipps Sera ve Botanik Bahçeleri sürdürülebilir yapılaşma konusunda örnek yapı özelliği göstermektedir. Türkiye’den yeşil binalara verilebilecek örneklerin başında Siemens Gebze Tesisi gelmektedir. Yapım aşamasında karbondioksit salınımlarını azaltma amacıyla ulaşım olanakları gelişmiş, arazi seçimi uygun ve fosil yakıt kullanımlarının azaltılmasına dikkat edilmiştir. İnşası sırasında kullanılan malzemelerin %35’i dönüştürülmüş olması ve %40 yerel üretim malzemeleri kullanılarak ulaşım kaynaklı emisyonların azaltılması hedeflenmiştir. Bina kullanım aşamasında %50’ye varan su ve yaklaşık %30 oranında enerji tasarrufu sağlanması hedeflenmiştir. İç mekân hava kalitesi ve konforun artması amacıyla düşük emisyonlu malzemeler kullanılması da tesisin insan sağlığı için uygun bir ortam oluşturmaktadır. Türkiye’de LEED altın sertifikasına aday olan ilk tesis olma özelliği ile de yeşil binaların sayılarının artarak yaygınlaşmasının da önünü açmıştır (Pamuk & Kuruoğlu, 2016).

Dünyada yeşil bina uygulamalarının aktif olarak uygulandığı yapı alanlarından birisi de hastane kompleksleridir. 24 saat hizmet veren hastanelerde su ve enerji tüketimi yüksek olmaktadır. Atık üretim miktarları diğer yapılara oranla yüksek olan hastanelerin sürdürülebilir hale getirilmesi gerekmektedir. En yaygın olarak Amerika Birleşik

Devletleri’nde görülen yeşil hastaneler dünyanın diğer ülkelerinde de uygulama imkânları bulunmaktadır. Everett Kliniği, Seattle Çocuk Hastanesi, Providence Newberg Tıp Merkezi, Shriner’s Çocuk Hastanesi Teksas Dell Çocuk Tıp Merkezi ve Olive Branch Methodist Hastanesi yeşil bina uygulamaları arasında öne çıkmaktadır. Öncelikli hedef su ve enerji tüketimi olan bu hastanelerde iç mekânın sağlıklı ve havalandırma kalitesinin yüksek olması da göz önünde bulundurulmaktadır. İngiltere’de yapılan Edge Lane Hastanesi ise 2013 yılında ülkenin diğer hastanelerine kıyasla en sürdürülebilir yapıya sahip olan hastane konumundadır. Isı kaybını önleyerek enerji talebini azaltan yapıda yüksek kalitede yalıtım malzemesi kullanılarak karbondioksit salınımları azaltılmıştır. Çevreye sağladığı faydalardan dolayı da BREEAM sertifikasına sahip olan bina yeşil hastaneler arasında örnek yapılarıdır. Norveç’te Akershus Üniversite Hastanesi 1961 yılında kurulan hastane 2000 yılında The Building Better Healthcare Awards’ı kazanarak sürdürülebilir tasarım alanında yenilikçi yönlerini ispatlamıştır. Hastane ısıma ihtiyacının %85’ini ve toplam enerji talebinin %40’ından fazlasını jeotermal kaynaklardan karşılayarak karbondioksit salınımlarını sınırlamaktadır. Türkiye de ise yeşil hastane yapılarının oluşması 2012 yılında Sağlık Bakanlığı’nın yayımladığı “Mevcut ve Yeni Yapılacak Sağlık Tesislerinde Uygulanması Gereken Asgari Teknik Standartlar Genelgesi” ile 200 yatak ve daha fazla kapasiteye sahip hastanelerde LEED sertifikası şartı getirilerek yaygınlaştırılmaya çalışılmaktadır. İstanbul Florence Nightingale Hastanesi Türkiye’nin ilk yeşil hastanesi olmuştur. Medistate Kavacık Hastanesi ve Vehbi Koç Vakfı Amerikan Hastanesi Türkiye’deki diğer yeşil hastanelerdir. Vehbi Koç Vakfı Amerikan Hastanesi LEED Platin Sertifikasını almak için tasarımlarını geliştirmeye çalıştırarak yeşil hastane kapsamında üst düzey sürdürülebilir yeşil bina olmayı hedeflemektedir (Beytaş & Aydın, 2022).

1.13. Yeşil Bina Sertifika Sistemleri

Yeşil binaların öneminin artmasıyla gelişmiş ülkeler başta olmak üzere belli bir standart belirlemek için çeşitli değerlendirme kriterlerini ortaya çıkartmıştır. Yeşil bina kavramı binaların sağlıklı, geri dönüştürebilir ve çevreye duyarlı olmasının yanı sıra yapılacak bölgenin arazi ve iklim koşullarına göre şekillendirilmesini esas almaktadır. Yapıların uygulama bölgeleri arasındaki çeşitlilik de ülkelerin kendi sertifikasyon sistemlerini oluşturulmasını beraberinde getirmiştir.

Yeşil bina kapsamında geliştirilen ilk sertifika sistemi 1990 yılında İngiltere’de oluşturulan BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) sertifikasyon sistemidir. İngiltere’nin çalışmalarından etkilenen ilk ülke Amerika Birleşik Devletleri, 1998 yılında LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) sertifikasını Amerika Yeşil Binalar Konseyi’nin (U.S. Green Building Council) çalışmalarıyla oluşturmuştur. Geliştirilen sertifikalarla birlikte önemini giderek arttıran yeşil binalarla ilgili çalışmalar 2000’li yıllardan itibaren dünya çapında ülkeler tarafından sertifika sistemlerinin oluşturulmasını da beraberinde getirmiştir. Japonya da devlet tarafından oluşturulan CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency) 2001 yılında, 2003 yılında Avusturalya’da Yeşil Bina Konseyi tarafından Greenstar, 2007 yılında ise Almanya’da DGNB sertifikasyon sistemleri oluşturulmuştur (Savaş & Kömürlü, 2022).

Ülkelerin geliştirdikleri sertifika sistemlerinden en yaygın olarak kullanılan ve kabul gören sertifikalar LEED ve BREEAM sertifikasyon sistemleridir. Bu sertifikasyon sistemlerinde en önemli kriterlerin başında binaların enerji performansları gelmektedir. Binaların ısıtılması, soğutulması ve havalandırılması aşamaları karbondioksit salınımlarının en yoğun olduğu aşamalar olduğundan sürdürülebilirlik için bina enerji performanslarının yüksek olması önem arz etmektedir (Erten & Yılmaz, 2011).

Türkiye’de yeşil bina sertifika sisteminin geliştirilmesinde öncü olan kurum 2007 yılında akademisyenlerden ve sivil toplum kuruluşlarında görev yapan gönüllü kişiler tarafından kurulan ÇEDBİK (Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği) gelmektedir. Çalışmalarını geliştirerek WGBC (Dünya Yeşil Binalar Konseyi) tarafından 2012 yılında Tam Konsey Statüsü elde etmiştir. Kurumun geliştirdiği sertifika B.E.S.T-Konut Sertifikası sağlıklı yaşanabilir çevre ve sürdürülebilir ekonomi üretmektir.

Dünyada olduğu gibi Türkiye’de de sürdürülebilir yapıların hedefleri doğrultusunda üzerinde konuların başında binaların enerji kaynakları ile olan ilişkisi ve enerji kullanımı gelmektedir. Bu kapsamda 2008 yılında “Binalarda Enerji Performans Yönetmeliği” yayımlanmıştır. 2011 yılında yönetmelik geliştirilerek binaların enerji sınıflarına göre ayrılarak değerlendirilmesini amaçlayan Enerji Kimlik Belgesi (EKB) uygulamasına başlanmıştır. Uygulamanın hayata geçirilmesinde ise BEP-TR yazılımı kullanılarak binaların sınıflandırılması gerçekleştirilmektedir (Kardemir & Dağ, 2021).

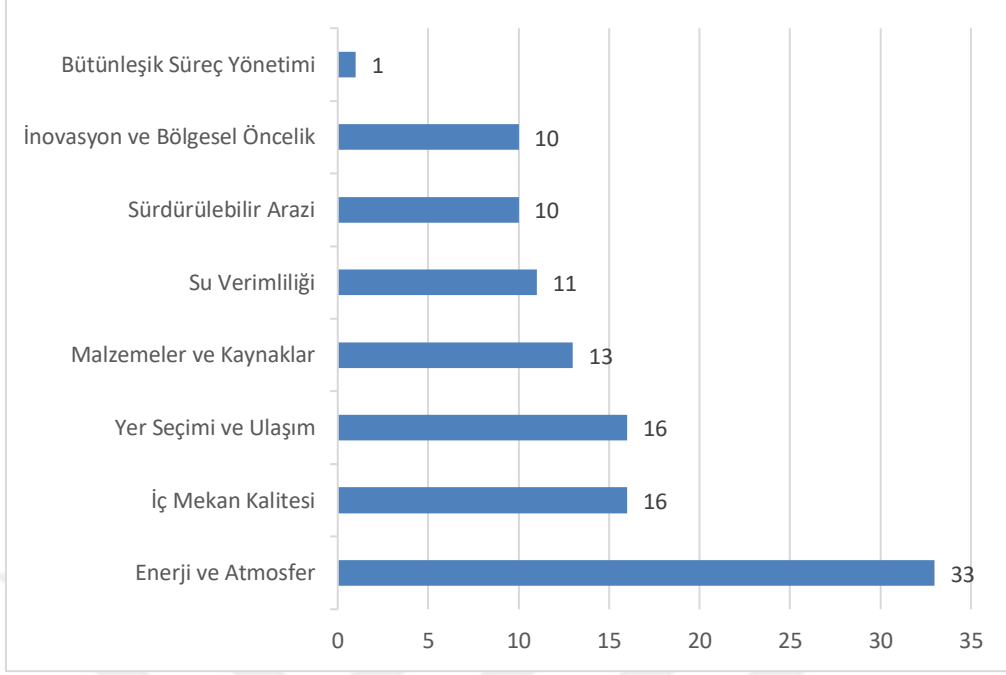
1.13.1. LEED

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) Amerika Birleşik Devletleri'nde 1998 yılında ABD Yeşil Bina Konseyi (USGBC) tarafından geliştirilmiştir. İnşaat sektörünün getirdiği çevresel sorunları sınırlandırmak için geliştirilen sertifika sistemi yapıların yaşam döngüsü boyunca projelendirilmesini esas almaktadır (Orhan & Kaya, 2016).

1998 yılından günümüze kadar sürekli gelişerek yenilenen LEED sertifika sistemi ilk oluşturduğuna kıyasla daha kapsayıcı hale gelmiştir. LEED sistemi yapıları tiplerine göre ayırmaksızın ortan bir başlık altında incelemektedir. Binaların bütün aşamaları için geçerliliği bulunan sistemde iç mekânın kalitesi de sertifika değerlendirme kapsamına girmektedir. LEED sertifikasının en çok kullandığı LEED-BD+C (Building Design & Construction) sertifikası 8 katlı yapılara kadar verilmektedir. Sadece binalara değil şehirlere ve yerleşim yerlerine de verilen LEED-Cities and Communities (Şehirler ve Yerleşim Birimleri) sertifikası da bulunmaktadır (Ak, 2022).

LEED sertifika değerlendirme aşamasında yeni tasarım fikirleri, arazi seçimi, enerji sınırlandırma, su verimliliği, ulaşım imkânları ve iç konfor kalitesi gibi alanlarda derecelendirilmektedir. Sertifika alım sürecinde ilk olarak USGBC'ye üye başvurusu yapılmaktadır. Sonrasında konsey inşaat ve tasarım ilkeleri ile ilgili bilgilendirme talep ederek projenin detaylarını öğrenmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda konsey projeyi değerlendirerek sertifikanın düzeyini belirleme evresine geçmektedir (Kardemir & Dağ, 2021).

LEED sertifikası oluşturulurken toplam 110 puan üzerinden değerlendirilme alınmaktadır. 8 kategori halinde değerlendirme sonucunda 4 adet sertifika sınıfı üzerinden yapılar LEED sertifikası almaktadır. Bunlar LEED Certified (Yalın) (40-49), LEED Silver (Gümüş) (50-59), LEED Gold (Altın) (60-79) ve LEED Platinum (Platin) (80-110), sertifikalarıdır.



Şekil 27. LEED Sertifika Kategorileri Puan Dağılımı

LEED sertifikasyon sisteminde enerji ve atmosfer, iç mekân kalitesi ve yer seçimi ve ulaşım değerlendirmede en büyük rolü oynamaktadır. Toplamda 65 puanı oluşturan bu kategoriler karbondioksit salınımının sınırlandırılmasında önemli rol oynamaktadır.

Enerji ve atmosfer kategorisinin değerlendirilirken dikkat edilen konuların başında karbondioksit salınımını sınırlamak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmak ve yapının ısı izolasyonunu yüksek kalitede yaparak ısı kaybını önlemektir. Sürdürülebilir arazi değerlendirilmesinde yapının inşası sırasında çevre ile uyumlu çalışması ve kirliliğin önlenmesi esas alınmaktadır. Arazinin ulaşım imkânları çeşitlendirilerek karbondioksit salınımının azaltılması ve arazinin içerisinde yağmur suları tutularak atık su miktarının sınırlandırılması üzerinde durulmaktadır. Suyun verimli kullanılmasını da beraberinde getiren bu uygulama su verimliliği kategorisinin de temelini oluşturmaktadır. Yapının atık sularla şebeke suyunu kirletmesinin önüne geçilmek istenmektedir. Malzeme ve kaynak konusu yapının sürdürülebilirliğine fayda sağlayarak değerlendirilmesinde doğal kaynakların dikkatli kullanılması ve malzemelerin yaşam döngüsünün gözetilerek geri dönüşümü yapılan malzemelerin kullanılmasına ağırlık vermektedir (Kömürlü & Özdemir, 2023).

LEED sertifikası verilirken değerlendirilen iç mekân kalitesi insan sağlığını ve konforunu gözeterek değerlendirmeye alınmaktadır. İç mekânlarda havanın kalitesi, doğal ışık ile aydınlatma sağlanması ve düşük emisyonlu malzemelerin kullanılması

gerekmektedir. İnovasyon ve bölgesel öncelik kategorisinde amaçlar yenilikçi teknolojilerle tasarımda ilerlemek ve yapının inşa edileceği bölgenin coğrafi şartları gözetilerek tasarımının yapılmasıdır (Savaş & Kömürlü, 2022).

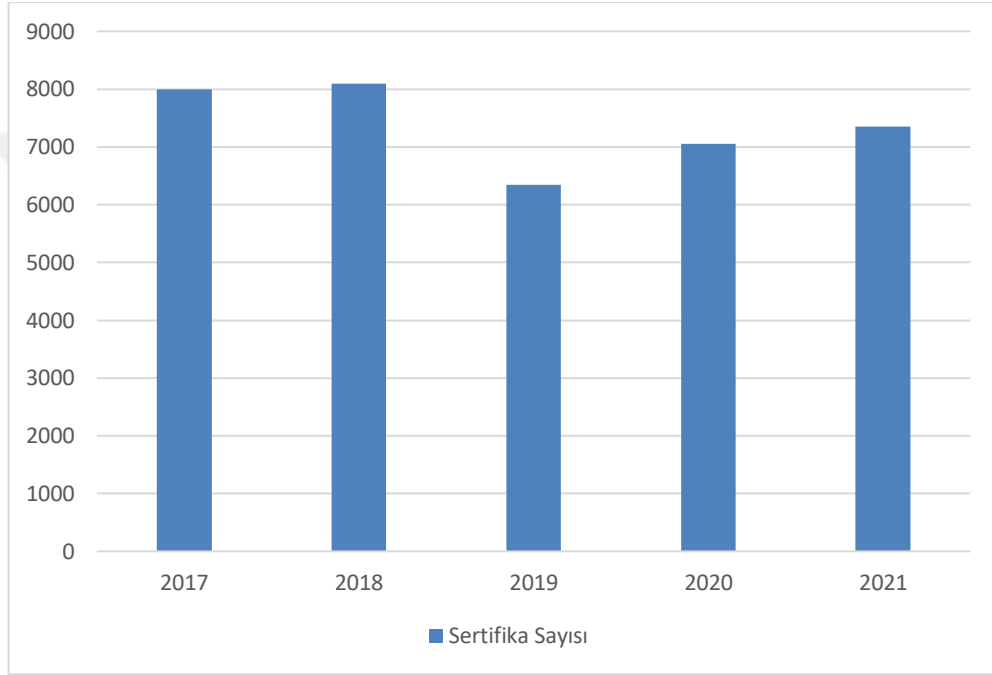
LEED sertifikası Amerika Birleşik Devletleri tarafından oluşturulmasına rağmen yıllar içerisinde küresel çapta yaygınlaştığı görülmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nden sonra en çok LEED sertifikalı alana sahip olan ülke karbondioksit salınımlarının da büyük çoğunluğuna sahip olan Çin'dir. Endüstriyel faaliyetlerinden ve yüksek nüfusundan dolayı doğal çevrede sürdürülebilirliği sağlamak adına yeşil binaların yapımına önem vermiştir. 2022 yılı içerisinde Çin toplam 1.121 LEED sertifikalı projeye ve 16 milyon m^2 'den fazla sertifikalı alana sahiptir. Dünyanın karbondioksit salınımının yüksek olduğu bir diğer ülke Hindistan, sürdürülebilir yapıları yaygınlaştırarak 323 proje ve 10 milyon m^2 'den fazla sertifikalı alanla listenin ikinci sırasında yer almaktadır (USGBC, 2023).

Tablo 7. LEED Sertifikasına Sahip İlk 10 Ülke (USGBC, 2023)

Sıra	Ülke	Proje Sayısı	Kapladığı Alan (Milyon m^2)
1	Çin	1.121	16.754.839,89
2	Hindistan	323	10.471.771,39
3	Kanada	248	5.341.924,69
4	Brezilya	108	2.402.836,88
5	İsveç	52	2.268.616,83
6	Güney Kore	83	2.189.124,09
7	Meksika	92	1.711.985,28
8	İspanya	99	1.565.575,47
9	İtalya	96	1.344.229,37
10	Filipinler	24	1.064.327,40

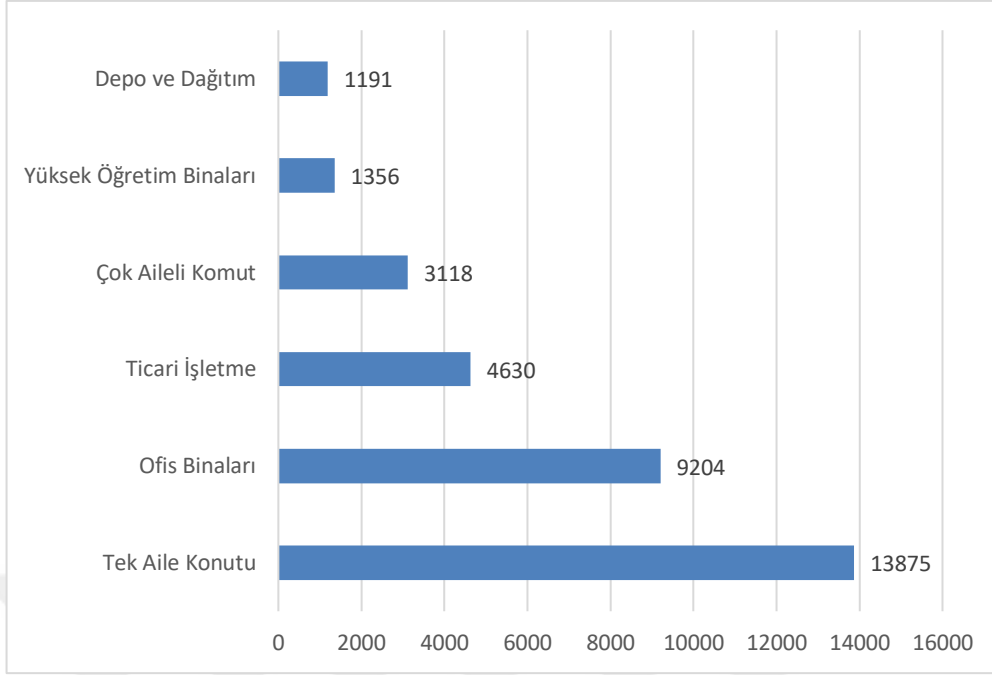
Amerika Birleşik Devletleri'nin dâhil edilmediği liste LEED sertifikasının yaygınlaştığı göstermek için düzenlenmiştir. 2022 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde 47 milyon m^2 'den alan LEED sertifikasına sahip olarak bu alanda öncü ülke konumundadır.

2017-2021 yılları arasına bakıldığında LEED sertifikasının devamlılığı hedeflenen sürdürülebilirlik yapısı gibi yıldan yıla sayısında artış ile karşımıza çıkmaktadır. USGBC'nin 2022 yılı verilerine göre dünya çapında 2017-2021 yılları arasında 36.835'ten fazla proje LEED sertifikasına sahip olmuştur. Bu beş yıllık sürede LEED sertifikasının kapsadığı alan 4,63 milyar m^2 brüt alana denk gelmektedir. 2022 yılının da ilk üçeyreğinde de 5.000'den fazla proje LEED sertifikası olarak yeşil sürdürülebilir binaların sayısındaki artış devam etmiştir (USGBC, 2022).



Şekil 28. LEED Sertifikalı Proje Sayısı (2017-2021) (USGBC, 2022)

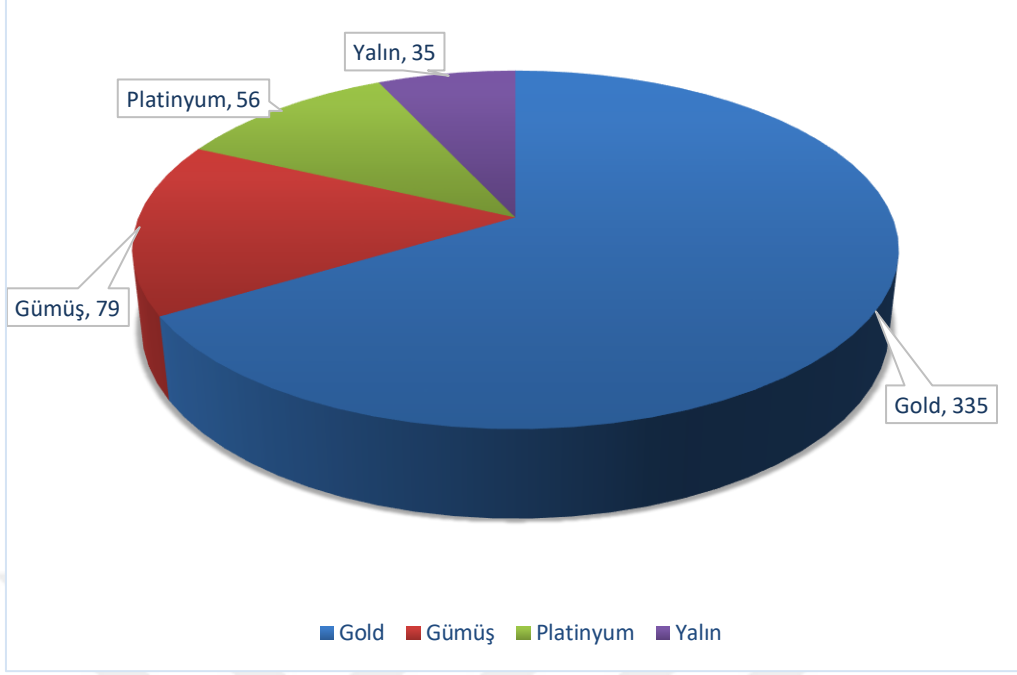
LEED sertifikalı projeler yapılarına göre çeşitlilik göstermektedir. Geniş bir uygulama alanı bulunan LEED sertifika sisteminin en büyük artılarından birisi de kapsayıcı olmasıdır. Ancak bu yapı çeşitlerinden ilk altı sırayı oluşturan bina türleri sertifika alan yapılar arasında sayı olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 29. Yapılara Göre LEED Sertifika Dağılımı (2017-2021) (USGBC, 2022)

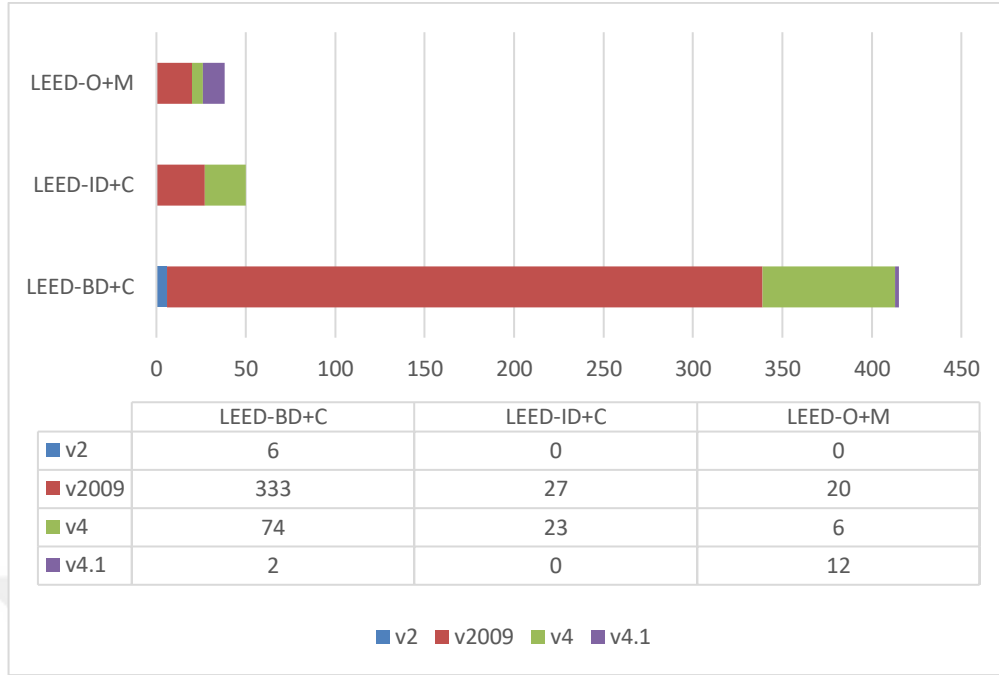
Türkiye inşaat faaliyetlerinin yüksek olduğu ve karbondioksit salınımı inşaat sektörü özelinde yüksek olan ülkelerdendir. Gelişmekte olan ülke statüsünde bulunan Türkiye’de sanayi sektörü ve ulaşım da doğrudan ve dolaylı olarak inşaat sektörüne bağlıdır. Bütün bu sektörlerin hareketliliği iklim değişikliğini tetikleyen gazların salınımlarına olanak vermektedir. Sürdürülebilirliğin sağlanması için yeşil bina kavramı da Türkiye’de gelişmek zorunda olan kavramlardan birisidir.

2023 yılı USGBC verilerine göre Türkiye’de 505 LEED sertifikalı proje bulunmaktadır. Böylece Türkiye’de 11 milyon m^2 brüt alan LEED sertifikasına sahiptir. Bu sertifikalar arasında en yaygın görülen sertifika çeşidi 335 projeyi kapsayan LEED Gold sertifikasıdır. Toplam sertifikaların %66’sını oluşturan Gold sertifikası toplamda da yaklaşık 9,5 milyon m^2 ’lik alanı temsil etmektedir. Gold sertifikasını 79 sertifikalı proje ile LEED Silver sertifikası izlemektedir. Silver sertifikasının Türkiye’de kapladığı alan yaklaşık 1,2 milyon m^2 olmaktadır.



Şekil 30. Türkiye'nin LEED Sertifika Dağılımı (USGBC, 2024)

LEED sertifikası verilirken binaların farklı özelliklerine göre verilmektedir. LEED-BD+C (Building Desing+Construction) (Bina Tasarım ve İnşaatı), LEED-ID+C (Interior Desing+Construction) (İç Mekân Tasarımı ve İnşaatı) ve LEED-O+M (Operations+Maintenance) (Mevcut Bina İşletmesi ve Bakımı) Türkiye'de kullanılan LEED Sertifika değerlendirme sistemleridir. Bu değerlendirilmelerin içerisinde LEED sertifikalarının versiyonları da değişmektedir. Oluşturulduğu günden bugüne v2, v2009, v4 ve v4.1 versiyonları ile güncellemelerle kendini geliştiren LEED sistemi ilk çıktığı haline kıyasla değerlendirebildiği bina türü ve kriterlerinde kapsayıcılığını arttırdığı gözlemlenmektedir. Türkiye'nin LEED Sertifikalı projeleri değerlendirildiğinde en çok sertifikanın verildiği kategori LEED-BD+C kategorisidir. Türkiye'deki 505 LEED sertifikasının 415 tanesi verilirken Bina Tasarım ve İnşaatına göre verilmiştir. LEED-ID+C (İç Mekân Tasarımı ve İnşaatı) 52 adet sertifika ve kalan 38 sertifika LEED-O+M (Mevcut Bina İşletmesi ve Bakımı) üzerinden verilmiştir.



Şekil 31. Derecelendirmeye Göre LEED Dağılımı (USGBC, 2024)

Sertifika versiyonlarının dağılımında büyük çoğunluğu v2009 versiyonu oluşturmaktadır. 380 sertifika v2009 sertifika versiyonundan alınmıştır. Türkiye’de yeşil binaların geliştiği döneme denk gelmesi ve uzun yıllar kullanımda olması sertifika sayısının fazlalığının sebeplerindendir.

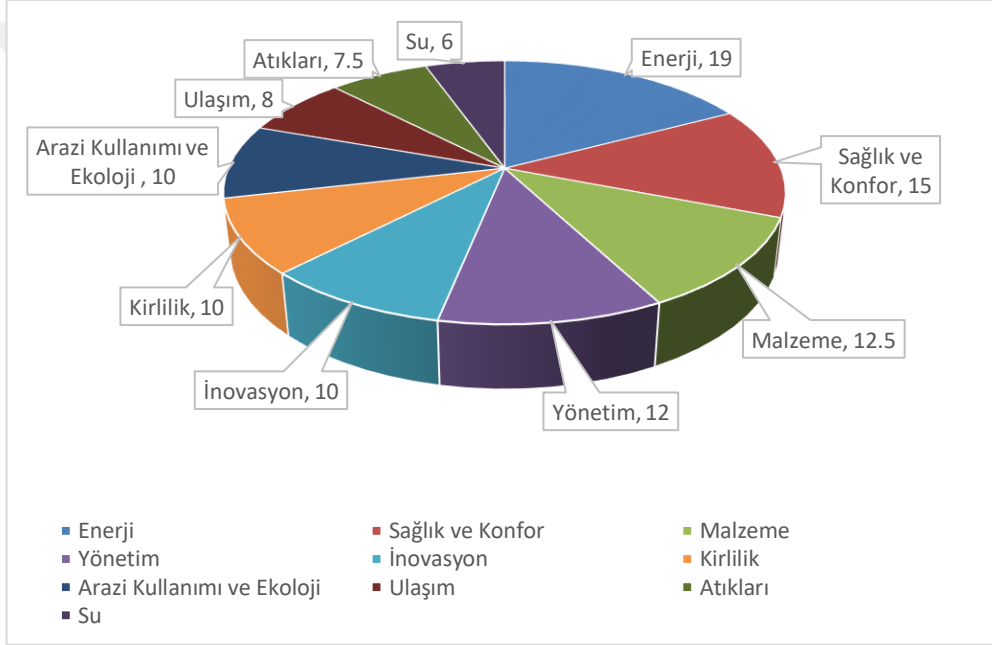
Türkiye’de LEED sertifikasının sektörlere göre dağılımı incelendiğinde 2023 yılı itibari ile kurumsal ve ticari binalar 385 sertifika ile en yoğun sertifikalı sektör olmaktadır. Sertifikalı yerel yönetim binaları 17, yükseköğretim kurumları 14 ve vakıf kuruluşları 9 sertifikalı yapıya sahip olarak bu alanda öncü sektörlerdir.

1.13.2. BREEAM

Sürdürülebilirlik kavramının ortaya çıkmasıyla bütün sektörler etkilendiği gibi inşaat sektörü de değişim yaşamaktadır. Yeşil bina uygulamaları ve inşaat sektörünün sürdürülebilirliğini değerlendiren ilk sertifikada 1990 yılında İngiltere’de Yapı Araştırma Kuruluşu (Building Research Establishment) tarafından yapılan çalışmalar doğrultusunda BREEAM (Building Research Establishment’s Environmental Assessment Method) sertifikası geliştirilmiştir. Sertifikanın ana amaçları yenilikçi tasarımlar elde ederek yapıların

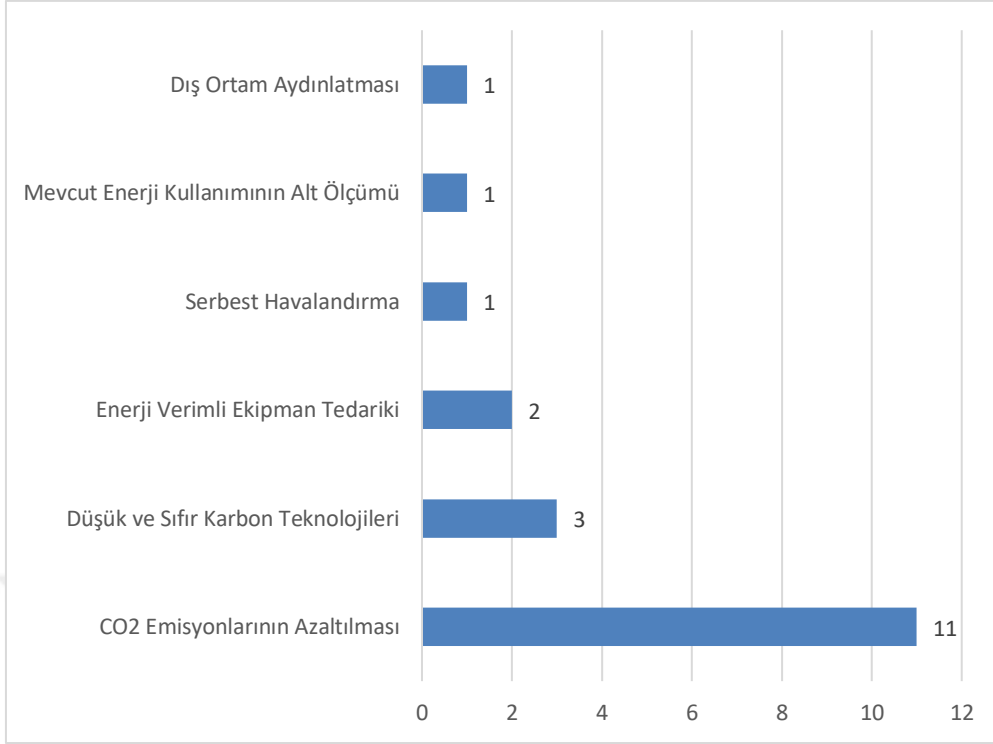
çevresel etkilerini azaltarak gelecek nesillere temiz bir şekilde aktarılmasını sağlamaktır (Koçak & Topay, 2022).

BREEAM sertifika sisteminin çevresel politikalar ve yönetmeliklerle güncellenerek yeniliklere uyum sağlaması kullanım alanının yayılmasının sebeplerindendir. BREEAM sisteminin hedefinin çevresel kalkınma olması da yeniliklere açık sürdürülebilir yapının oluşmasına katkı sağlamaktadır. Yapı kullanım amacına göre ve ülkelerin kullanım standartlarına göre çeşitli kategoriler oluşturması BREEAM sisteminin kullanımını kolaylaştırmaktadır. Toplamda 10 kategori üzerinde değerlendirilen BREEAM sisteminde en yüksek toplam puan LEED sistemindeki gibi 110 puandır (Ürük & İslamoğlu, 2019).



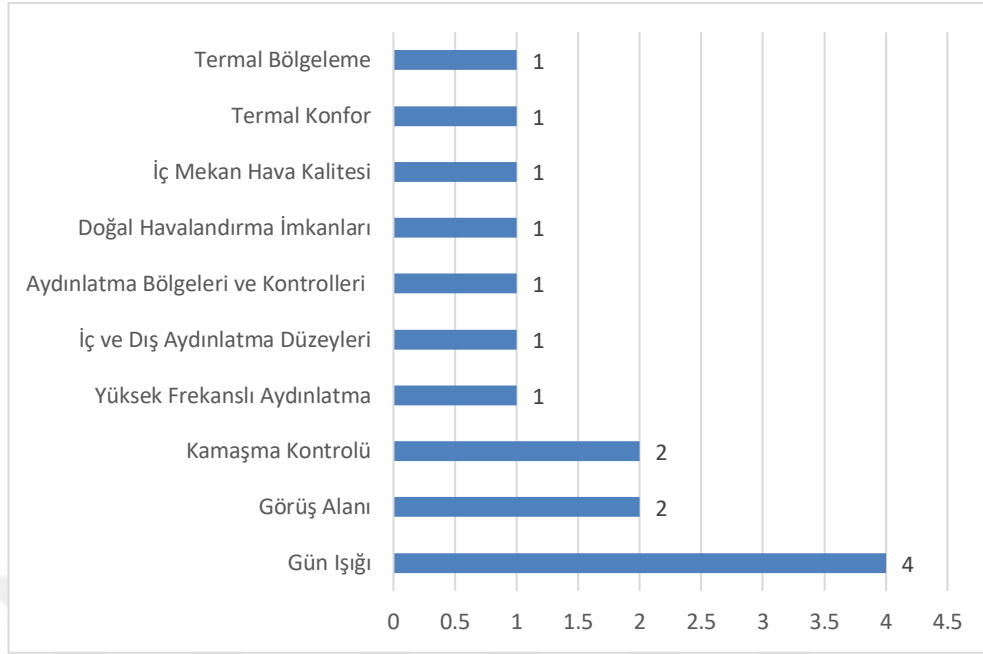
Şekil 32. BREEAM Sertifika Değerlendirmesi Puan Dağılımı

BREEAM sertifika sisteminde LEED sistemine benzer şekilde en büyük değerlendirme payı enerji kategorisindedir. Enerji faaliyetlerinin karbondioksit ve çeşitli sera gazlarının açığa çıkmasında etkin rol oynaması yapının sürdürülebilirliği değerlendirilirken de en önemli etmen olmasını beraberinde getirmektedir. Enerji kategorisindeki 19 puanın 11'i karbondioksit emisyonlarının azaltılmasına verilmektedir. Düşük karbon teknolojilerine de 3 puan veren sistem toplamda 14 puanı karbon malzemelerin azaltılmasına ayırmıştır.



Şekil 33. BREEAM Enerji Kategorisi Puan Dağılımı

Enerji kategorisinden sonra en önemli değerlendirme kategorisi iç mekânların sağlıklı ve konforlu olmasıdır. Bina içerisinde yaşamın kalitesini arttıran sistemlerin geliştirilmesi zamanının büyük çoğunluğu binalarda geçiren insanların hayat standartlarını arttırmaktadır. Gün ışığından faydalanma, doğal havalandırma ve iç mekân hava kalitesinin yüksek olması bu alanda alınan puanlarda etkinliği yüksek olmaktadır.



Şekil 34. BREEAM Sağlık ve Konfor Kategorisi Puan Dağılımı

BREEAM sertifikası almak için yapılan başvurularda yapıları sertifikaya uyumlu hale getirmek için tasarım öncesi BREEAM yetkilisi ile çalışması gerekmektedir. Beş farklı sertifika sınıfına sahip olan BREEAM sertifika sistemi yapılara üç yıllık süre ile verilmektedir. Üç yılı dolan yapılar tekrar değerlendirilmeye alınarak sertifikasını güncellemek zorundadır (Ürük & İslamoğlu, 2019).

Tablo 8. BREEAM Sertifika Sınıfları ve Puan Aralığı

BREEAM Sertifika Sınıfı	Puan Aralığı
Geçer	30-44
İyi	45-54
Çok İyi	55-69
Mükemmel	70-84
Seçkin	85-110

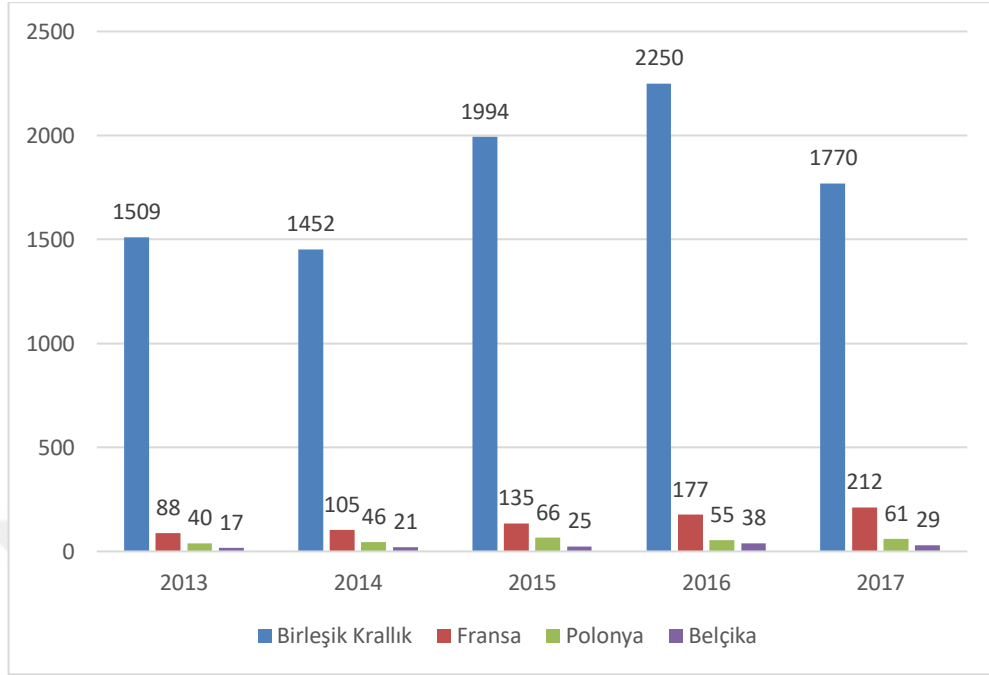
BREEAM sertifikasının ilk oluşturulduğu dönemde sertifika diğer ülkelere uyumlu çalışmamıştır. Ülkelere uyarlanarak güncel versiyonların çıkarılması BREEAM

sertifikasının dünya çapına yayılmasını kolaylaştırmaktadır. Güncellenen versiyonlara göre oluşturulan BREEAM sertifika isimleri;

- BREEAM Birleşmiş Krallık,
- BREEAM Amerika Birleşik Devletleri,
- BREEAM Hollanda,
- BREEAM İspanya,
- BREEAM Norveç,
- BREEAM İsveç,
- BREEAM Almanya,
- BREEAM Avusturya,
- BREEAM İsviçre,
- BREEAM diğer tüm ülkeler olarak karşımıza çıkmaktadır.

BREEAM sertifika sürecinde farklı bina tiplerine göre ayrı değerlendirme süreçleri işlemektedir. Bunlar; Communities (Toplu Yaşam Alanları), Infrastructure (Altyapı), New Construction (Yeni Yapı), In-Use (Kullanımda Olan Yapı) ve Refurbishment&Fit-Out (Yenileme) kategorileridir (Durak & Ayyıldız, 2022).

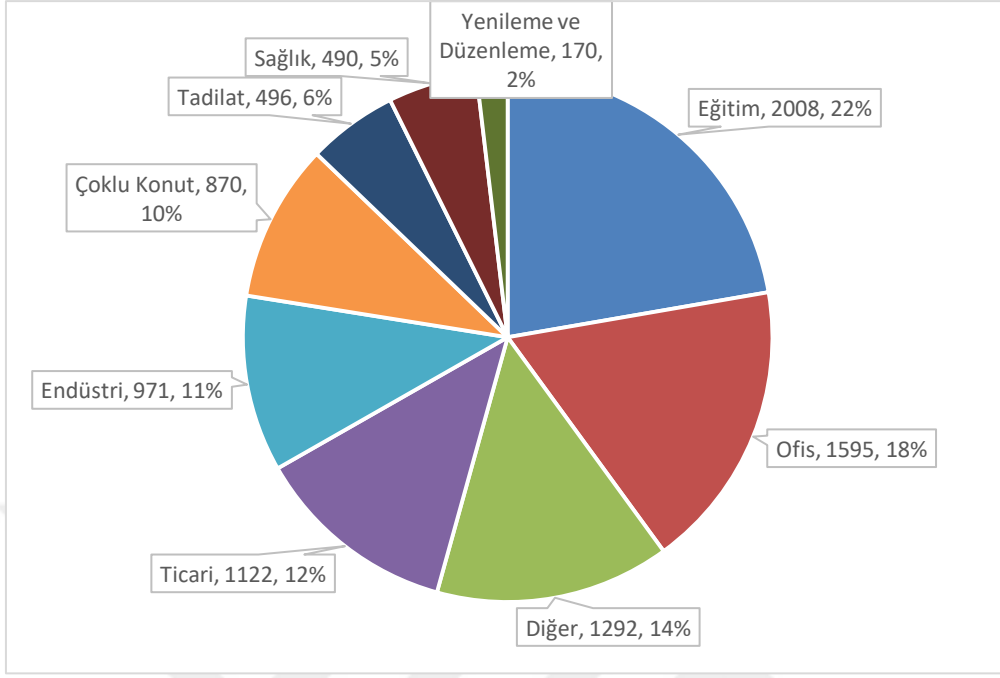
2013-2017 yılları arasındaki beş yıllık dönem incelendiğinde yaklaşık 10.800 projeye BREEAM sertifikası verilmiştir. Bu sertifikaların 9.000'den fazlası Birleşik Krallık içindeki projelere verilirken, yaklaşık 1.800 sertifika diğer dünya ülkelerine verilmiştir. 1990-2012 yılları arasında verilen BREEAM sertifikasının toplam %3,6'sı sertifikanın oluşturulduğu Birleşik Krallık dışındaki ülkelere verilmişken, 2013-2017 yılları arasında bu oran %16,5'e yükselmiştir. Bu yükseliş BREEAM sertifikasının küresel olarak yaygınlaştığının bir göstergesidir. 2013-2017 yılları arasında 14 ülkede ilk kez projelere BREEAM sertifikası verilmiştir. Bu ülkeler Azerbaycan, Ermenistan, Brezilya, Estonya, Irak, Kazakistan, Jersey, Monako, Suudi Arabistan, Güney Kore, Ukrayna, Birleşik Arap Emirlikleri ve Letonya'dır. Birleşik Krallık dışında 2013-2017 yılları arasında en çok BREEAM sertifikası alan ilk üç ülke Fransa, Polonya ve Belçika olmuştur (The Digest of BREEAM, 2019).



Şekil 35. BREEAM Sertifika Sayıları (The Digest of BREEAM, 2019)

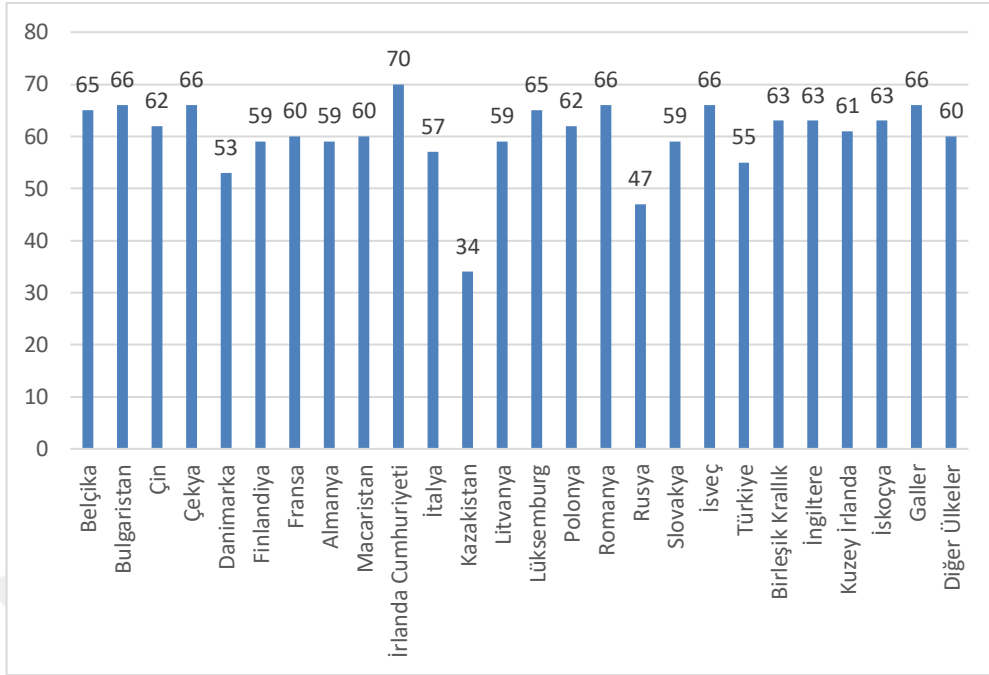
BREEAM sertifikasının Birleşik Krallık dışındaki en çok verildiği ülkelere bakıldığında sertifika sayıları arasındaki farkın yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Her ne kadar yıllar içerisinde diğer ülkelerin sertifika sayılarında artış eğilimi olsa da aradaki fark fazladır.

BREEAM sertifikasının çeşitli yapılara verilebiliyor olması çeşitliliği açısından artı yönleri arasındadır. Ofis, sağlık, eğitim ve konut gibi farklı kullanım amaçları olan yapıların değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Birleşik Krallık 'ta 2013-2017 yılları arasında en çok BREEAM sertifikası alan yapı türü eğitim binaları olmuştur. Okul çağındaki öğrencilerin zamanının büyük çoğunluğunu geçirdiği yapılarda iç mekân konforu ve hava kalitesi gibi insan sağlığını etkileyen değişkenlerin gözetilerek verilen sertifikaya sahip olması sürdürülebilirlik kapsamında önem arz etmektedir. En çok sertifika alan yapılardan ikinci sırada ofis binaları gelmektedir. Çalışan nüfusun zamanının önemli kısmını geçirdiği bu yapılarda enerji tüketimi, su tüketimi ve atık oluşturma bakımından yüksek kapasiteye sahip olmaktadır. Sertifikaların ofis yapılarında yaygın olması çevresel etkilerinin azaltılması açısından önem arz etmektedir.



Şekil 36. Birleşik Krallık Sertifika Dağılımı (The Digest of BREEAM, 2019)

2013-2017 yılları arasında göze çarpan diğer bir istatistik bilgisi de ülkelerin BREEAM sertifikası alırken hangi puan üzerinden aldıklarının ortalama olarak değerlendirilmesidir. 10 ve daha üzeri BREEAM sertifikasına sahip 25 ülke incelendiğinde 21 ülkenin çok iyi ile mükemmel sertifika sınıfı arasında konumlandığı gözlemlenmiştir. Ortalama puanı 34 olan Kazakistan ise geçer ve iyi sınıfları arasındaki tek ülke konumundadır. Ortalama puanı 55 olan Türkiye ortalaması çok iyi ile mükemmel sınıfına dâhil olan ülkeler arasında katılarak bu sertifika sınıfında dünya standartlarına yakın konumda kendisine yer bulmaktadır. En yüksek puan ortalamasına sahip İrlanda Cumhuriyeti hem bölgesel hem de yapım teknikleri açısından BREEAM sertifikasının oluşturulduğu İngiltere'ye olan yakınlığı ve benzerliği sebebiyle 25 ülke arasında puan ortalaması en yüksek ülke durumundadır. Bu 25 ülke dışında kalan ülkeler toplu olarak değerlendirildiğinde 60 puan ortalaması ile diğer ülkelerin standartlarını tutturması BREEAM sertifikasının işleyişinin küresel çapta anlaşılabilir olduğunun bir göstergesidir.



Şekil 37. BREEAM Puan Ortalaması (The Digest of BREEAM, 2019)

BREEAM sertifikası sürdürülebilir yapıların oluşturulması adına ilk sertifika olduğu için bu alanın önünü açmasıyla önemli bir yere sahiptir. Sürdürülebilir yeşil yapıların gerekliliğini vurgulayan ve bu konuda harekete geçen İngiliz kuruluş Yapı Araştırma Kuruluşu diğer ülkelere de bu konuda örnek olarak inşaat sektörünü daha yeşil hale getirmeyi amaçlamaktadır. Kendini sürekli geliştiren ve kapsayıcılığını arttırmaya devam eden BREEAM sertifikası LEED sertifikasından sonra dünyada en yaygın kullanılan yeşil bina sertifika sistemidir.

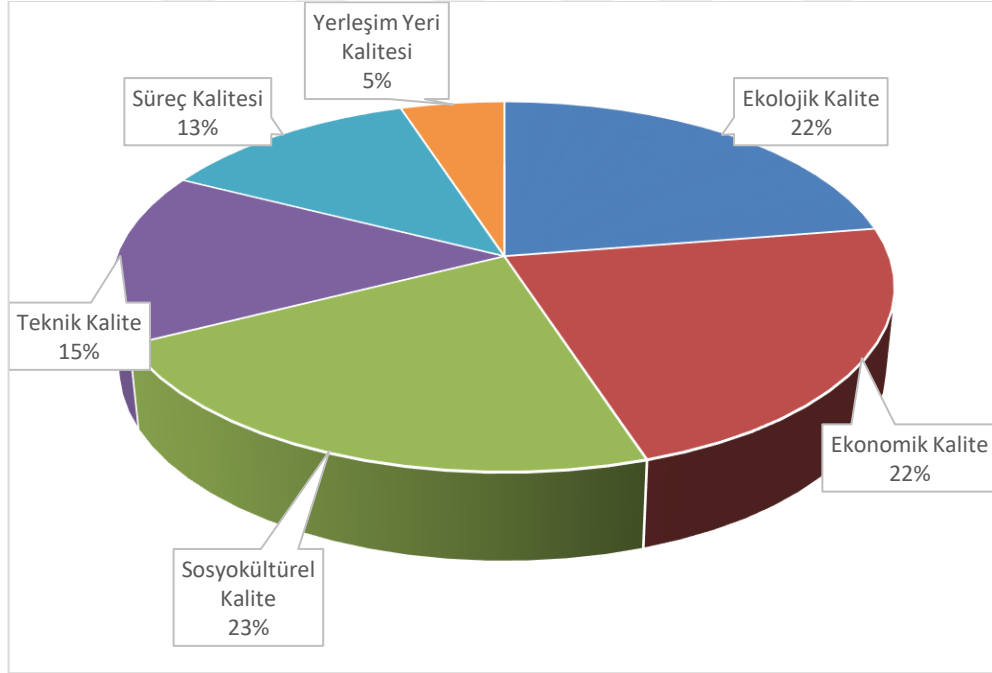
1.13.3. DGNB

DGNB (Deutsche Gesellschaft Für Nachhaltiges Bauen) sertifikası Almanya merkezli mevcut yapıları değerlendiren sertifika sistemidir. 2007 yılında kurulan ve 2008 yılında da Dünya Yeşil Bina Konseyi'ne üye olan Alman Sürdürülebilir Bina Konseyi'nin oluşturduğu DGNB sertifika sistemi ilk etapta ofis ve idare binaları üzerine geliştirilmiştir. 2010 yılında ise Almanya Sürdürülebilir Bina Konseyi'nin çalışmaları ile mevcut ve yeni yapıları, ticari işletme amaçlı yapıları ve eğitim kurumlarının binalarını da kapsayan, uluslararası sertifikalar arasında geçerliliğini kabul ettiren bir sertifika sistemi haline gelmiştir. DGNB sertifikasını ana amaçları sürdürülebilir malzemeler geliştirmek, yapıların işletme süreçlerini planlamak, doğal kaynakları verimli kullanan, insan sağlığı için sağlıklı

ve konforlu iç mekân sağlayan ve atık yönetimi ile çevre dostu bir altyapıya sahip yapılar üretmektir. Bina değerlendirilmesini yaparken de DGNB sisteminin pratik ve kolay çözümlerle sonuca gitmesi sertifikanın en güçlü yanlarını oluşturmaktadır. Yapıyı değerlendirilirken ele aldığı 6 kategori bulunmaktadır. Bunlar;

- Ekolojik Kalite
- Ekonomik Kalite
- Sosyokültürel Kalite
- Teknik Kalite
- Yerleşim Yeri Kalitesi
- Süreç Kalitesi başlıklarıdır.

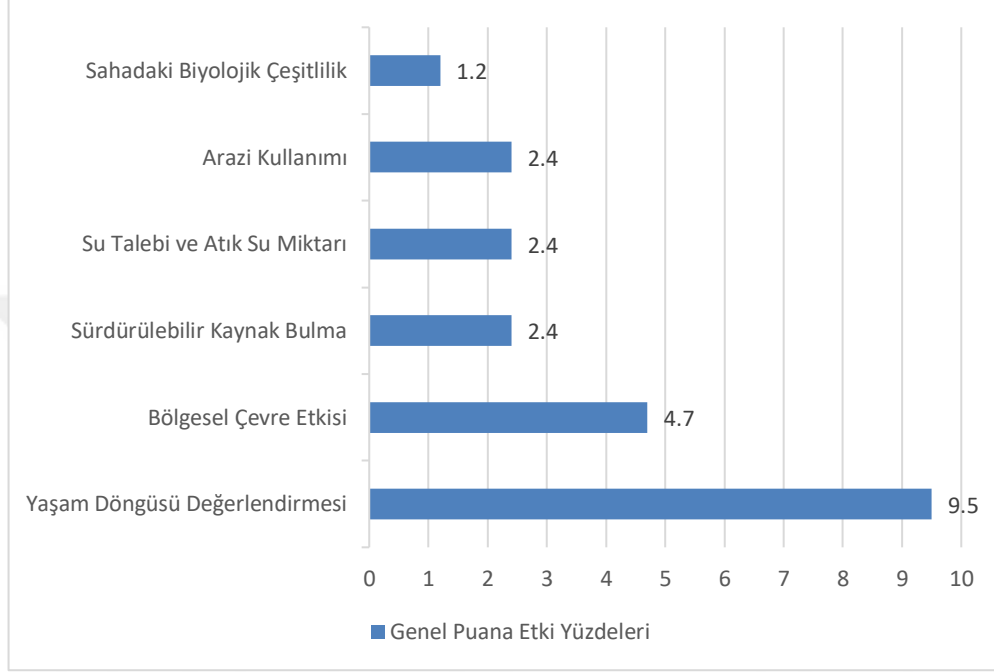
Sürdürülebilir yapılarda önem arz eden binanın yaşam döngüsü kavramı içerisindeki bütün kriterlere sahip olan DGNB sertifikası yapıları inşa aşamasından geri dönüşüm aşamasına kadar değerlendirmektedir (Anbarcı, Ömer, & Demir, 2012).



Şekil 38. DGNB Değerlendirme Yüzdeleri (DGNB System, 2020)

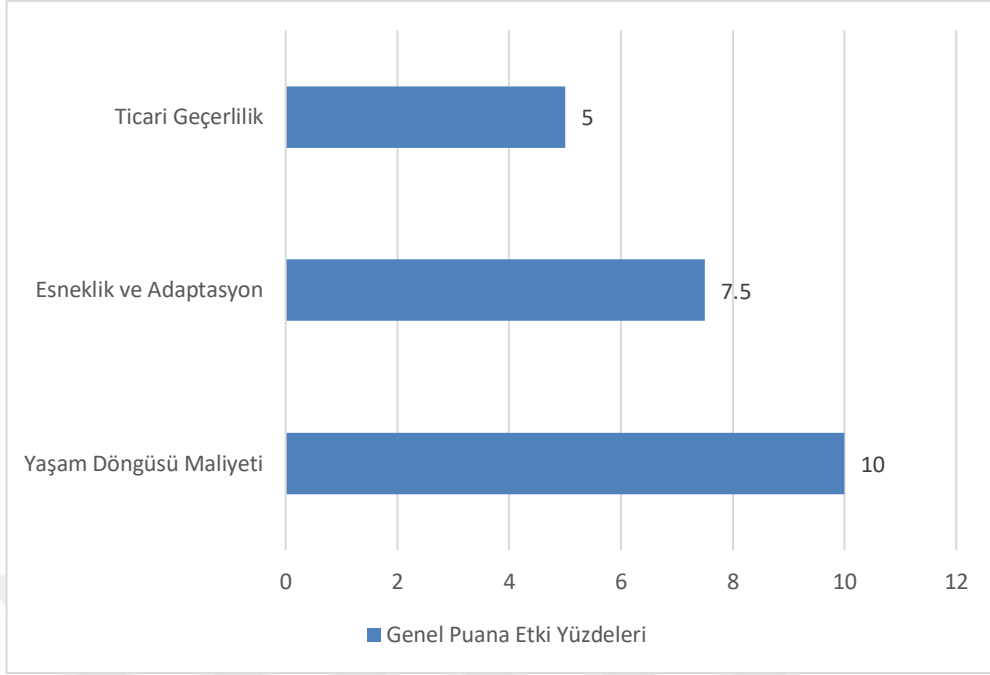
DGNB sertifikasının değerlendirme aşamasında yüzde dağılımlarına göre incelendiğinde ekolojik kalite, ekonomik kalite ve sosyokültürel kalite sınıfları %22,5 ile

değerlendirmede öne çıkan üç kategoridir. Bu kategorilerin alt başlıkları incelendiğinde çevre kalitesi değerlendirilirken binanın yaşam döngüsü, çevresel etkilerin ölçülmesi, su talebi ve tüketimi ve yenilenebilir kaynakların tüketimi alanlarında değerlendirme oluşturulmaktadır.



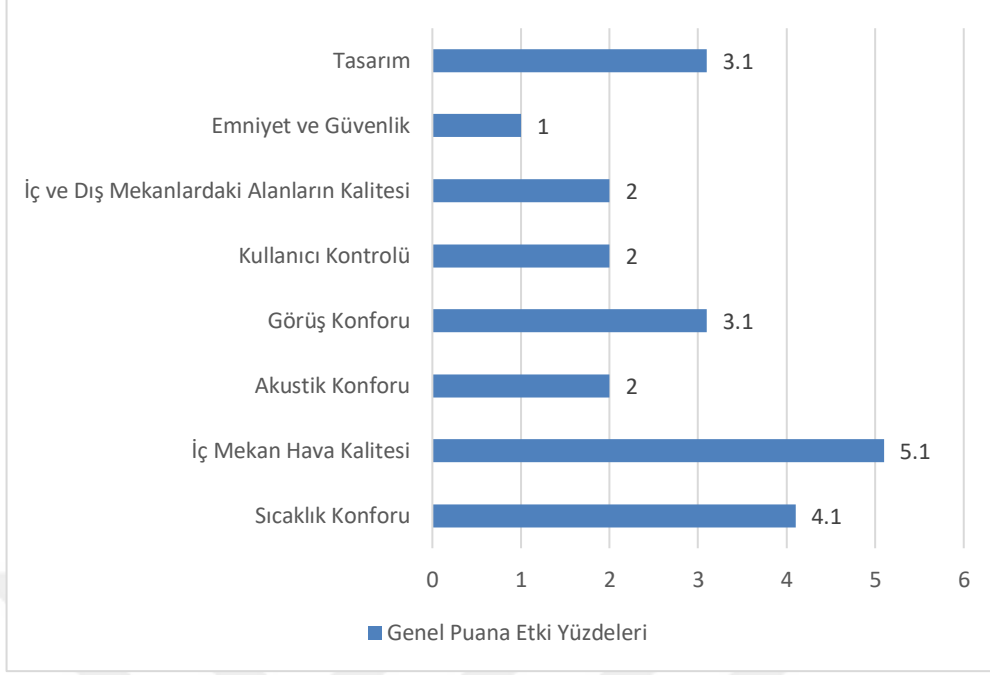
Şekil 39. Ekolojik Kalite Değerlendirme Dağılımı (DGNB System, 2020)

Sürdürülebilir yapıların en önemli kavramlarından olan yaşam döngüsü değerlendirilmesi toplam sertifika puanına etkisi %9,5 olmaktadır. Yeşil yapının ana kaynağını oluşturan bu kategori DGNB sertifikasının değerlendirilmesinde önemli ölçütlerden bir tanesidir. Ekonomik sürdürülebilirliğe önem veren sertifikada ekonomik kalite değerlendirilmesi yapılırken ömür boyu maliyet değerlendirilmesinin toplam puana etkisi de %10 oranında olmaktadır. Ekonomik kalkınmanın sağlanmasına destek olması gereken inşaat sektörünün DGNB sertifikasında yüksek etki oranıyla değerlendirilmesi sertifikanın ülkelerin ekonomik yapılarına sağlayacağı katkıları da arttırmaktadır.



Şekil 40. Ekonomik Kalite Değerlendirme Dağılımları (DGNB System, 2020)

LEED ve BREEAM sertifikalarında değinildiği gibi insanlar zamanının büyük çoğunluğunu yapıların içerisinde geçirmektedir. Bu nedenle sürdürülebilir yapıları da mekânların iç kaliteleri ve konforları insan sağlığı açısından önem arz etmektedir. DGNB sertifikası da bu alanın değerlendirilmesine toplamda %22,5'lik değerlendirme ağırlığı vermesinden dolayı yeşil bina gerekliliklerini bu alanda yerine getirmektedir. Bu değerlendirme kriterleri yapıların ısı konforu, iç mekân hava kalitesi, akustik konforu, görsel konfor, güvenlik ve tasarım gibi parametrelerdir. Bu başlıkların genel puana katkıları birbirine yakın olmasına rağmen iç mekân hava kalitesi aralarında %5.1'lik etki yüzdesi ile ilk sırada yer almaktadır. Yapı içerisindeki doğal iklimlendirme, havalandırma ve malzemelerin karbon oranlarının düşüklüğü ile sağlanan iç mekân hava kalitesi sağlık açısından en önemli değerlendirme sınıflarından bir tanesi olarak öne çıkmaktadır.

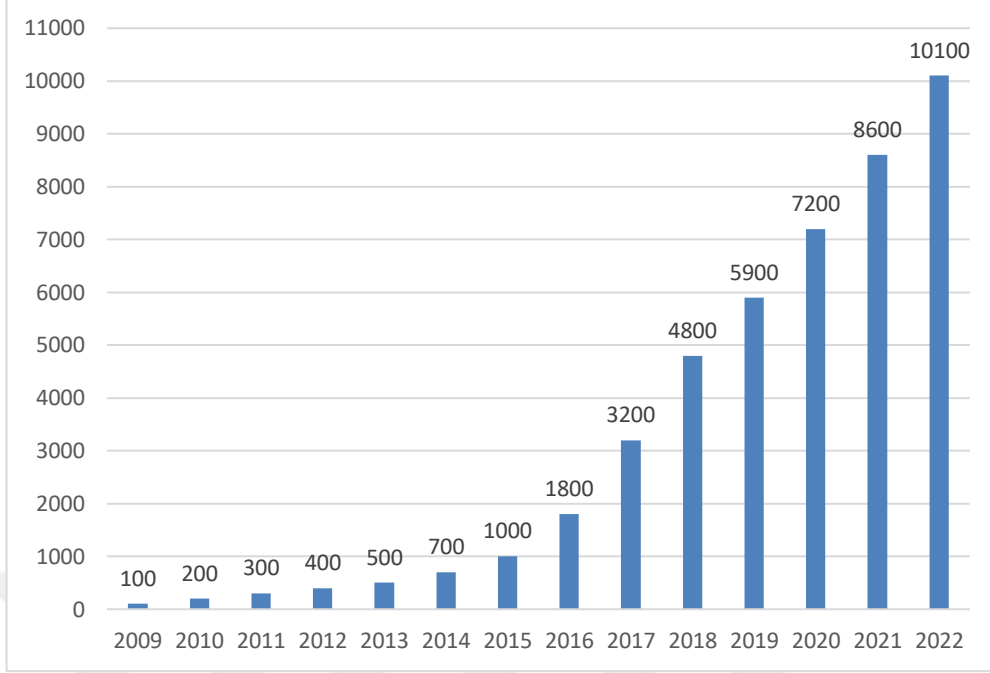


Şekil 41. Sosyokültürel Kalite Değerlendirme Dağılımları (DGNB System, 2020)

DGNB sertifika değerlendirme sürecinde grafiklerde verilen toplam puana etki yüzdeleri ofis, eğitim, konut, otel, alışveriş merkezi, ticari işletme ve depo gibi yapılarda ayrı ayrı değerlendirilmeye alınsa da yapılar arasında çok farklılık olmamasından dolayı toplam puana etki yüzdeleri değişimi çok az olmaktadır. Bu nedenle genel değerlendirmelerde dağılım yüzdeleri grafiklerdeki gibi kabul etmem mümkün olacaktır.

Değerlendirmeler sonucunda DGNB sertifika sınıfları %35-49 Bronz, %50-64 Gümüş, %65-79 Altın ve %80 üzeri Platin sertifika sınıfını temsil etmektedir. DGNB sertifikası Almanya’da yapılan yeni inşaatlarda %80’in üzerinde bir pazara sahiptir. Bu alanda Almanya da sertifika hizmeti verenler arasında lider durumdadır. Pratik değerlendirme olanaklarına sahip olan DGNB oluşturulduğu bölgenin sınırlarını aşarak bölgelerin sertifikalandırılmasında Avrupa’da da kullanımı yaygınlaşmaktadır. 2022 yılı itibari ile DGNB sertifikası 30’dan fazla ülkede 10.000’den fazla sayıda projeye verilmiştir.

DGNB sertifikası bütünsel uluslararası yaklaşımı ile ülkelerin iklimsel, hukuki ve kültürel özelliklerine kolayca adapte olabilmektedir. Yurt dışındaki ülkelerin önde gelen yerel kuruluşları ile iş birliği içerisinde çalışmaktadır. Danimarka, Avusturya, Hırvatistan, İsviçre ve İspanya’da DGNB sisteminin işleyişini sağlamak için sertifika konusunda ileri seviye eğitim görmüş ortakları bulunmaktadır (DGBN, 2023).



Şekil 42. Yıllık DGNB Sertifika Sayısı (DGNB System, 2020)

Sürdürülebilirlik kavramı ülkelerin gündemlerinde yer ettikçe yeşil binalar ve sertifika sistemlerinin kullanımında artış gözlemlenmektedir. 2015 yılına kadar artışı yavaş ilerleyen DGNB sertifika sistemi, Paris Antlaşması ile birlikte karbon salınımlarının azaltılmasının ülkelere getirdiği sorumluluklar çerçevesinde sayısını hızla arttırmaya başlamıştır. Ülkeler bu sorumluluklarını yerine getirme hedefiyle çevre kirliliğinden ve doğal kaynak tüketiminin fazla olduğu inşaat sektörünü yenileme çalışmalarına başlamasıyla 2022 yılı itibari ile 10.000’den fazla yapı DGNB sertifikasını elde etmiştir.

1.13.4. CASSBEE

CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency) (Yapılı Çevre Verimliliği için Kapsamlı Değerlendirme Sistemi) Japonya Sürdürülebilir Yapı Konsorsiyumu (Japan Sustainable Building Consortium) ve Japonya Yeşil Bina Konseyi (Japan Green Building Council) tarafından yapılan çalışmalarla 2001 yılında oluşturulan sertifika sistemidir. Binaların ve yapılı çevrenin çevre üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve buna göre derecelendirmek üzerine oluşturulmuştur. CASBEE sertifika sisteminin kategorileri enerji, hava kirliliği, kaynak ve malzeme kullanımı, aydınlatma, gürültü kirliliği, dayanıklılık, güvenilirlik ve iç mekânların hava kalitesi gibi diğer sertifikalara benzer konuları içermektedir. CASBEE sistemini diğer sertifika sistemlerinden

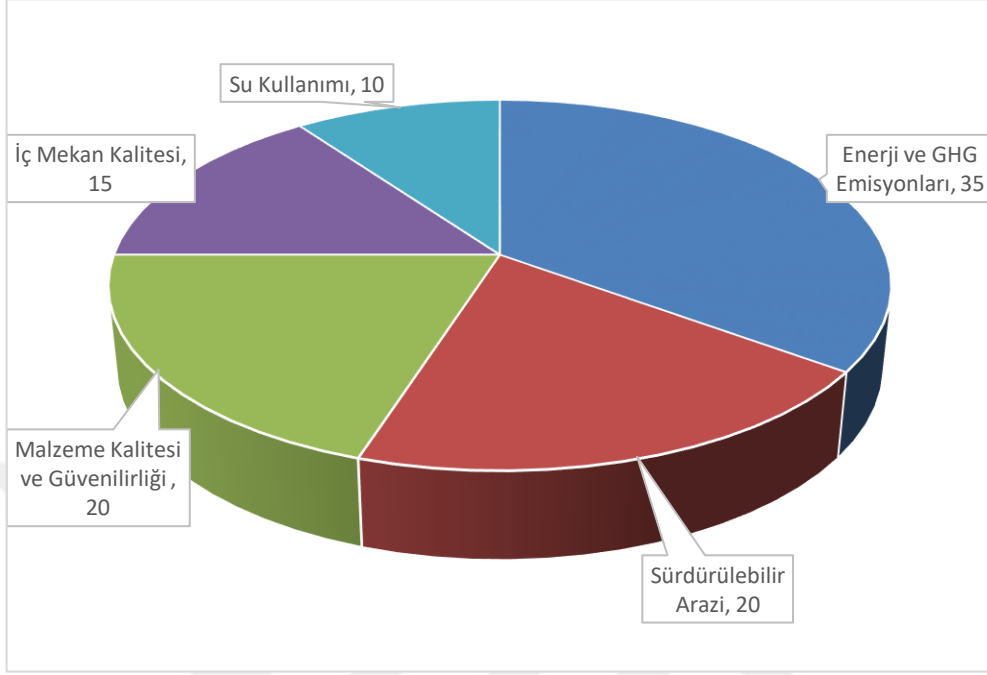
ayıran özelliği iki aşamalı değerlendirmeye sahip olmasıdır. Yapının kalitesi (Q) ve yapının çevresel yükleri (L) olarak iki kategoride ayrı ayrı değerlendirme yapılmaktadır. Kalite (Q) binanın çevresindeki arsayı, iç mekân kalitesini ve işletme kalitesini belirtmektedir. Çevresel yükler (L) kaynak, enerji, malzeme ve arsa dışı çevreyi ifade etmektedir. Yapının çevresel kalitesinin (Q) çevresel yüklere (L) bölünmesiyle binanın çevresel verimliliği (Building Environmental Efficiency) (BEE) hesaplanır. Bu hesaplamalardan sonra yapının çevresel etkinlik değeri grafik yardımıyla hesaplanmaktadır (Erdede & Bektaş, 2018).

Tablo 9. CASBEE Sertifika Sınırları

Sınıfı	Değerlendirme	BEE Değeri
S	Mükemmel	BEE=3,0 ve üzeri Q=50 ve üzeri
A	Çok İyi	BEE=1,5-3,0
B+	İyi	BEE=1,0-1,5
B-	Az Zayıf	BEE=0,5-1,0
C	Zayıf	BEE=0,5'ten az

CASBEE binaların sürdürülebilirliği kapsamında sertifikaların ortak konusu olan yaşam döngüsünü dört ayrı yapı durumu altında incelemektedir. Bunlar; mevcut binalar, yapılacak olan yeni binalar, tasarım aşaması ve yenileme çalışmalarıdır (Anbarcı, Ömer, & Demir, 2012).

Yapının kalitesi ve yapının çevresel yüklerinin değerlendirildiği sistem yoğunlukla Japonya merkezli kullanıldığı için küresel çapta diğer sistemlere entegre çalışması amacıyla CASBEE'nin dünya pazarı için ayrı bir puanlama sistemi de bulunmaktadır. CASBEE sistemi değerlendirilirken puan dağılımında en yüksek payı diğer sertifikalarda olduğu gibi enerji ve sera gazları etkileşimi oluşturmaktadır. Sürdürülebilir arazi ile malzeme dayanıklılığı ile güvenilirliği puanlamayı önemli ölçüde etkileyen diğer başlıkları oluşturmaktadır (CASBEE for Market Promotion, 2011).



Şekil 43. CASBEE Değerlendirme Puanları

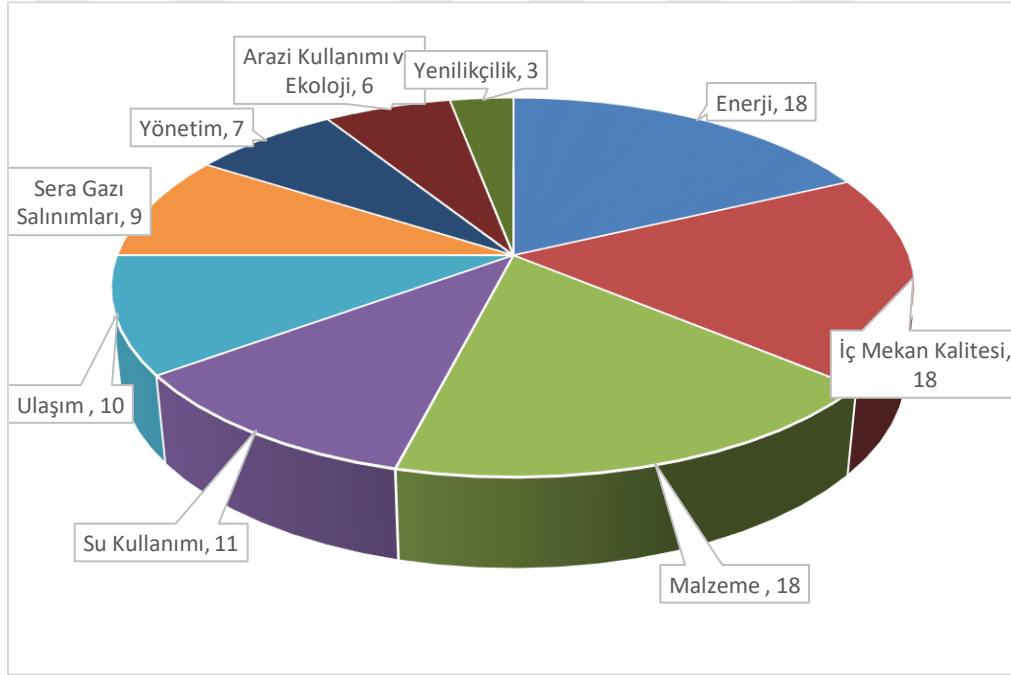
LEED, BREEAM ve DGNB sertifika sistemlerine kıyasla CASBEE sertifikasının yaygınlığı daha azdır. Japonya ve etrafındaki sosyokültürel yapıya göre oluşturulan sertifika yerel ve ulusal yönetimlerden destek almaktadır. CASBEE sistemini diğer sertifikalardan ayıran bir özelliği ise tek bir binanın değerlendirilmesinin yanında bir grup binanın, mahallenin ve hatta bölgenin değerlendirilmesine olanak sağlayacak şekilde geliştirilmiştir (Doan & Qin, 2023).

1.13.5. Green Star

Yeşil bina kapsamında Avusturalya sertifika sisteminde önce 2002 yılında sürdürülebilir yapı kavramını geliştirmek için Avustralya Yeşil Bina Konseyi'ni (Green Building Council Australia) (GBCA) kurmuştur. Konseyin çalışmaları sonucu 2003 yılında yapıların çevresel performanslarını değerlendirmek için Green Star sertifika sistemini oluşturmuşlardır. Green Star sertifikasının öncelikli amacı inşaat sektöründe sürdürülebilir yaklaşımın toplumsal bilincini arttırarak ortak bir anlayışla yeşil bina tasarımlarını yaygınlaştırmaktır. Green Star değerlendirme kategorileri diğer sertifikalara benzer olarak

enerji, karbon salınımları, iç mekân ve çevre kalitesi, arazi sürdürülebilirliği ve malzeme özellikleri gibi başlıklardan oluşmaktadır (Bertiz, ve diğerleri, 2019).

Green Star kullanım amaçlarına göre çeşitli yapıları da kapsayan esnek sertifika sistemidir. Okul, hastane, ofis, üniversite ve rezidans gibi yapıların Green Star sertifika sistemine göre değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. Bu yapıları dört ana başlık altında inceleyen Green Star sisteminde bunlar; tasarım ve inşa değerlendirilmesi, toplumsal ölçek değerlendirilmesi, yapı performansının belirlenmesi ve iç mekân kalitesinin değerlendirilmesidir. Kategoriler değerlendirildikten sonra bölgesel farklılıklara göre ağırlık katsayıları ile çarpılması Avusturalya’da bulunan çeşitli iklim bölgelerine göre değerlendirmede daha gerçekçi sonuçlar vermektedir (Erdede & Bektaş, 2018).



Şekil 44. Green Star Değerlendirme Puan Dağılımı

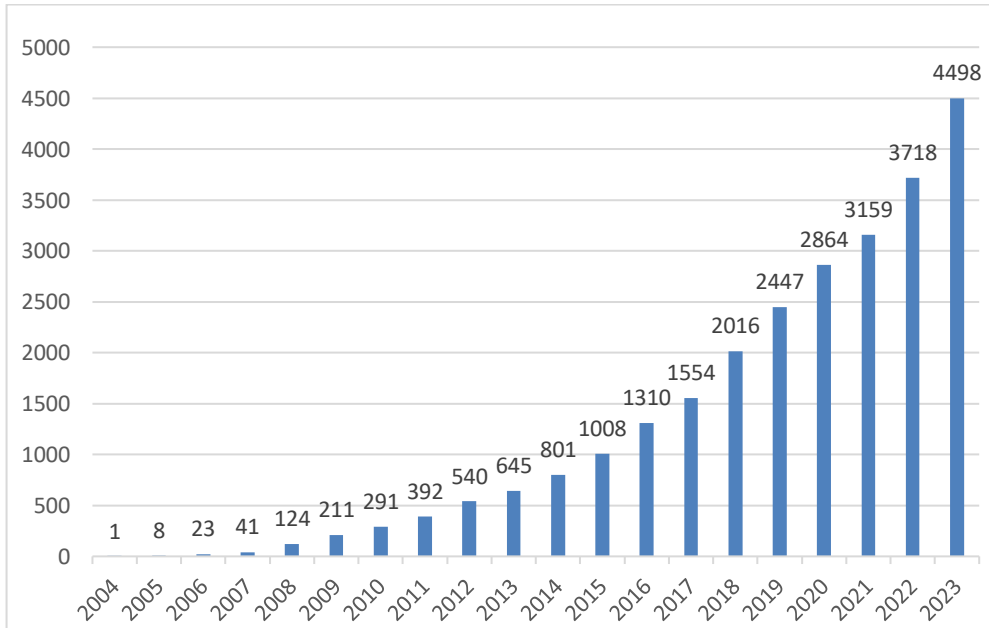
9 farklı kategoride değerlendirilen yapılar diğer sertifikalarda olduğu gibi Green Star sisteminde de enerji kategorisi en yüksek puanı oluşturmaktadır. Toplamda 100 puan üzerinden değerlendirme yapan sistemde yapılara 1 ile 6 arasında yıldız verilmektedir. Yapılar yeşil bina kategorisine girmek içinse en az 4 yıldız karşılığı olan puana ihtiyaç duymaktadır (Erdede & Bektaş, 2018).

Tablo 10. Green Star Sertifika Sınıfları

Sertifika Sınıfı	Sertifika Puanı	Yıldız Sayısı
Düşük	10-19	1
Ortalama	20-29	2
İyi	30-44	3
Çok İyi	44-59	4
Avusturalya'nın En İyisi	60-74	5
Dünyanın En İyisi	75-100	6

Avustralya da 2024 yılı itibari ile 4499 adet Green Star sertifikasına sahip proje bulunmaktadır. 26 milyon m^2 alan kaplayan bu projelerin 749 tanesini ofis binaları oluşturmaktadır. Sertifika sayılarının özellikle 2015 yılından itibaren gözlenen ciddi artışın sebebi Avusturalya devletinin politikalarını oluştururken kalkınma planları arasında sürdürülebilirlik kavramına verilen önemin artması ve uygulamaya geçebilmek adına devlet desteği ve toplumun sürdürülebilirlik konusunda bilinçlendirme çalışmalarıdır (Tavşan & Yolcu, 2023).

Sertifikalı projelerin haricinde Green Star sistemine kayıtlı bulunan 1743 proje bulunmaktadır. Bu da sertifikanın Avusturalya'da kabul görerek uygulama alanını genişlettiğinin ve yeni yapılan binalarda sertifika uygulamasının genel kabul gördüğünün bir göstergesidir.



Şekil 45. Avusturalya Green Star Sertifika Sayısı (GBCA, 2024)

Green Star sertifika sistemi Avusturalya da drdrlebilir inşaat sektörünün oluşmasında ve sürdürülebilir kalkınmanın sağlanmasına fayda sağlayan en önemli çalışmalardandır. İnşaat sektörünün sürekli olması ve karbon salınımlarından yüksek oranda sorumlu olması diğer ülkeler gibi Avusturalya'yı da bu alanda çalışmalar yapmaya yönlendirerek Green Star sertifika sisteminin oluşmasını zorunlu hale getirmiştir. Sertifikasyon sistemi yaygınlařtıķķa Avusturalya'da daha yaşanılabilir bir evre oluşumu ve temiz enerji kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte insan sağlığı açısından faydalı yapılar oluşturulmaya devam edecektir.



2. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA KARBON AYAK İZİNİN SINIRLANDIRILMASI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Çalışmanın bu bölümünde inşaat mühendisliği uygulamalarında son 20 yılda yapılan bilimsel çalışmaların ve yayınların değerlendirilmesi yapılmıştır. Özellikle inşaat malzemelerini sürdürülebilir hale getirmek için kullanılabilecek ve gelecek vaat eden malzemelerin inşaat imalatlarına uygunluğunun incelenmiştir. Akademik çalışmaların hangi alanlarda yoğunlaştığı, hangi teknolojilerin öne çıkarıldığı ve ağırlık verilmesi gereken alanlar irdelenmiştir. Bilimsel çalışmalar özellikle çimentonun yapısını değiştirilerek yeni formülasyonlarının üretilmesi, beton atıklarının geri dönüştürülmesi, cam ve plastik gibi atık malzemelerden agrega elde edilmesi gibi alanlarda yoğunlaşmaktadır. Ayrıca karbon yakalama, kullanma ve depolama yöntemi de çalışmalar arasında geleceğe yönelik uzun vadeli bir alan olarak tanımlanmaktadır.

2.1. Alternatif Klinker Teknolojisi

Alternatif klinker sisteminin amacı geleneksel portland çimentosunun talep ettiği kalsinasyon sıcaklığını düşürerek karbon salınımlarının önüne geçebilmektir. Alternatif klinker çalışmalarına örnek olarak;

- Bitümlü Şist Portland Klinkeri (OSPC)
- Reaktif Belit Bakımından Zengin Portland Klinkeri (RBPC)
- Magnezyum Silikatlardan ve Magnezyum Karbonatlardan Üretilen Magnezyum Oksitli Çimento Klinkeri (MOMS) (MOMC)
- Karbonatlanabilir Kalsiyum Silikat Çimentosu (CCSC)
- Kireçtaşı Kalsine Kil Çimentosu (LC³)

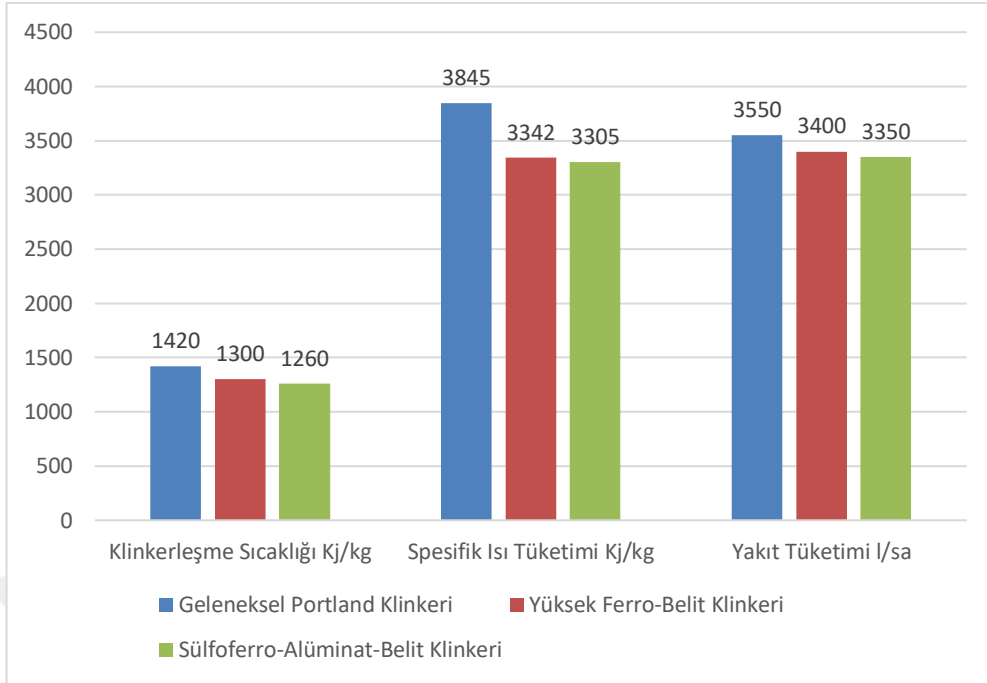
gibi çeşitli karışımlarla geleneksel portland çimentosunun yapısını değiştirerek üretilmesi esnasındaki enerji oranını azaltmaktadır. Bu sayede üretim kaynaklı karbondioksit salınımlarının seviyesinde de düşüş sağlanmaktadır.

Çimento üretiminde ek olarak kullanılan malzemelerden birisi de bitümlü şist malzemesidir. Ham petrol rezervinin yaklaşık 30 katı olarak düşünülen bitümlü şist malzemesi kaynak olarak kullanılabilecek seviyededir.

(Al-Otoom, 2006)'a göre, geleneksel portland klinkeri içerisinde %16 oranına kadar bitümlü şist külü ilave edilirse gerekli olacak kalsinasyon sıcaklığı geleneksel portland çimentosundaki 1450-1550°C yerine 1300 dereceye kadar düşebileceğini belirtmektedir. (Goncharov & Zhutovsky, 2022), yaptıkları çalışmada %76 oranında bitümlü şist kalkerli içeren laboratuvarda üretilen çimento geleneksel Portland çimentosu ile karşılaştırılmıştır. %76 bitümlü şist içeren çimento için 2 günlük basınç dayanımını 14,89 MPA ve 28 günlük basınç dayanımı da 48,27 MPA olarak hesaplamışlardır. Ayrıca %76 bitümlü şist çimentosunun priz süresinin de hesaplandığı çalışmada başlangıç priz süresi 200 dakika ve son prizlenme süresi 350 dakikadır. Bu değer geleneksel portland çimentosunun değerleri olan ilk prizlenme süresi 115 dakika ve son prizlenme süresi 250 dakikaya oranla daha yüksek olsa da standart değerleri sağlamıştır. Bitümlü şist çimentosunun ölçülen genleşme miktarını 0,5 mm olarak hesaplamış ve sınır parametresi olarak belirlenen 10 mm'den oldukça düşüktür. Genel standartları sağlaması ve daha düşük hidrasyon ısısına sahip olması nedeniyle bitümlü şist çimentosunun üretilmesinin de karbondioksit salınımlarını azaltacağını vurgulamışlardır.

Klinkerin yapısını değiştirmede uygulanan klinker uygulamalarında reaktif belit bakımından zengin portland klinkeri üretimidir. Kotsay ve Jaskulski (2019) yaptıkları çalışmada, geleneksel portland çimentosunun yapısındaki Alit (C_3S) oranının azaltılması esasına dayanan sistemde belit klinkerlerinin %20 daha enerji talep etmesi nedeniyle karbondioksit salınımını sınırlandıracağını öne sürmüşlerdir.

Popescu vd'nin (2003) yaptıkları çalışma ile belit bakımından zengin iki çimento türünü geleneksel portland klinkeri ile klinker ısıları, spesifik ısı tüketimi ve yakıt tüketim miktarları açısından karşılaştırmışlardır. Geleneksel portland klinkerine oranla belit açısından zengin klinkerin enerji tüketiminin ortalama 500-540 kJ/kg daha az olduğu sonucuna ulaşmışlardır.



Şekil 46. Farklı Klinkerlerin Enerji taleplerinin Karşılaştırılması

Reaktif belit bakımından zengin çimento, geleneksel portland çimentosuna kıyasla benzer sertleşme süresi sergiler, daha düşük su talebi ile doğal kaynak tüketiminde avantaj sağlar ve erken dayanım kazanma geleneksel çimento ile paralel ancak geç dayanım süresi daha uzun sürmektedir. Geleneksel çimentoya göre olumsuz tarafı ise her iki çimentoyu aynı incelikte öğütme işlemi için reaktif belit bakımından zengin çimento daha sert yapısı sebebiyle %5 daha fazla elektrik gücü gerektirmektedir. 28 günlük dayanımlarına benzer şekilde ulaşan bu iki çimento türü uzun dönem dayanımlarında geleneksel portland çimentosu daha yavaş ek dayanım kazanmaktadır. Artan sıcaklığın bu iki çimento üzerindeki etkileri incelendiğinde ise, geleneksel portland çimentosunda 60°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kürlenme, uzun vadeli dayanımlarda önemli düşüslere sebep olmaktadır. Ancak bu etki reaktif belit bakımından zengin çimentoda farklı işlemektedir. Bu özelliği de reaktif belit bakımından zengin çimentonun çok yüksek dayanımlı beton uygulamalarında kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

Reaktif belit bakımından zengin çimentonun ilk başarılı kullanımı Çin'de yapılan Three Georges Hidroelektrik Projesi'nde olmuştur. Uygulama sonrası RBPC betonunda yaşanan sıcaklık artışı orta sıcaklıktaki portland çimentosu (MHC) betonundan 5°C daha düşük olması termal çatlama riskini oldukça düşürmesiyle dikkat çekmiştir. Maliyet

açısından da MHC betonun gerektireceği soğutma katkılarını da gerektirmemesi açısından tasarruf sağlanmıştır (Gartner & Sui, 2018).

RBPC üretiminin CO₂ salınımlarının azaltacağı üzerine yapılan çalışmalardan ayrı olarak kullanılacak olan belitin daha sürdürülebilir malzemelerden nasıl oluşabileceği de araştırmalara konu olmaktadır. Süs kayası işleme çamuru (ORPS) ve kalsiyum karbonat çamurunun (CCS) belit klinkeri üretiminde kullanılması, kireçtaşı ve kil kullanımını düşüreceği gibi kalsinasyon ısısının da 1100°C derecede gerçekleşebileceğinden çevresel etkilerinin de azalacağını belirtilmektedir (Ribeiro, ve diğerleri, 2022)

Geliştirilen klinker teknolojilerinden bir tanesi de magnezyum silikatlardan türetilen magnezyum oksitlere (MOMS) veya magnezyum karbonatlardan türetilen magnezyum oksitlere (MOMC) dayanan çimentodur. Vlasopoulos ve Cheeseman yüksek CO₂ tutabilen magnezyum hidroksi-karbonat çimentosunun patentini 2009 yılında almışlardır. Ancak bu tarz bir çimentonun düşük karbondioksit salınlı bir çimento olarak kabul edilebilmesi için magnezyum oksitin (MgO) içeriğinde karbondioksit olmayan doğal magnezyum kaynaklarından üretilmesi gerekmektedir. Bu yüzden magnezyum silikat kayalarından üretilen MgO'nun nasıl daha az enerjili üretilmesine dair araştırmalar çeşitlendirilmelidir (Nehdi, Marani, & Zhang, 2024).

Bilimsel çalışmaların üzerinde durduğu bir diğer alternatif klinker teknolojisi de karbonatlanabilir kalsiyum silikat çimentosudur (CCSC). Kalsiyum silikatın karbonatlanarak sertleşmesi esasına dayanan sistemde kalsiyum silikat kaynaklarından üretilen çimento, belirli sıcaklık ve nem seviyesinde CO₂ ile kürlenerek hızla sertleşmesi sağlanmaktadır. CCSC sistemi ile beton üretmek için CO₂ kütleme odalarına sahip prekast tesisler gereklidir (Nehdi, Marani, & Zhang, 2024).

Miller ve Myers (2021), CCSC'nin geleneksel portland çimentosu ve harmanlanmış portland çimentosuna kıyasla kalsinasyon sıcaklığının oldukça düşük olduğunu ve buna bağlı karbondioksit salınımlarının da azaldığını belirtmektedir. Tamamıyla volastonitten oluşan çalışmalara ek olarak bazı çalışmalarda volastonitten ve sentetik volastonitten çimento üretiminde geleneksel portland çimentosundaki kireçtaşı yerine kullanılmasını araştırmışlardır.

Saxena vd'ye (2020) göre, ham çimento karışımına volastonit minerallerinin eklenmesi kireç içeriğinin azalmasına sebep olmaktadır. İçeriğinde %1 oranında volastonit bulunan klinkerin 1400°C sıcaklıkta yeterli kalsinasyon sıcaklığına ulaştığını belirtmektedir. Çalışmada kullanılan geleneksel ham çimentonun kalsinasyon sıcaklığı ise 1450°C olarak

bulunmuştur. Sadece %1 oranında kullanılan volastonitin 50°C'lik bir ısı düşüşü sağlaması sürdürülebilirlik adı altında yapılan çalışmalara umut verici niteliktedir. Klinkerin %1 oranında volastonit içermesi CO₂ emisyonlarında 1 ton klinker başına 0,013 ton daha az CO₂ açığa çıkmasını sağlamaktadır.

Alternatif klinker teknolojileri arasında uzun dönemde öne çıkarılan klinker formülasyonlarından bir tanesi de kireçtaşı kalsine kil çimentosu (LC³) kullanımıdır. Kilin yaklaşık 700-850°C'lik kalsinasyon sıcaklığının enerji talebini azaltması yöntemin kaynağını oluşturmaktadır. Kilin geleneksel döner fırınlarda, döner ocaklı fırınlarda ve seramik endüstrisinde sıkça kullanılan tünel veya mekik fırınlarında da kalsine edilebilmektedir. Bu fırınların hepsinin piyasada sıkça bulunması da kullanım kolaylığı açısından ve teknolojinin yaygınlaşması açısından önemlidir (Scrivener, Martirena, Bishnoi, & Maity, 2018).

Barriel vd'nin (2016) yaptıkları çalışmada, %50 klinker, %15 yanmamış kireçtaşı ve %30 kalsine kil ve %5 alçıtaşı içeriklerinden oluşan LC³ teknolojisinin hem enerji hem de maliyet açısından geleneksel çimento üretimine göre daha verimli olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca araştırmada LC³ kullanımının geleneksel çimentonun gerekli mekanik ve dayanıklılık performansını korurken %25-40 oranında karbondioksit salınımını azaltacağını belirtmişlerdir.

İlerleyen çalışmalar LC³ içeren betonun hizmet ömrü boyunca açığa çıkaracağı CO₂ miktarı geleneksel beton çimentosuna oranla daha az olduğu belirlenmiştir. Benzer dayanım özelliklerine sahip LC³ betonunun OPC betonuna oranla %16-30 oranında daha az karbondioksit salınımı gerçekleşmektedir (Pillai, ve diğerleri, 2019).

2.2. Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Yöntemi (CCUS)

Paris Antlaşması, Green Deal ve Uluslararası Enerji Ajansının (IEA) hedeflerinin başında 2050 yılına kadar karbon salınımlarını en aza indirmek ve hatta sıfırlamaktır. Küresel sıcaklık ortalamasındaki artışı 2°C'nin altında tutmak ve mümkünse 1,5°C seviyelerine indirmek de Paris Antlaşmasının amaçlarının başında gelmektedir. Uluslararası İklim Değişikliği Panelinin (IPCC) raporuna göre karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojisi uzun vadede karbon salınımlarını sınırlamada çözüm olabilecek teknolojilerin başında gelmektedir. Raporda CCUS teknolojisi endüstriyel ayırma, yanma sonrası ayırma, ön ayırma ve oksiyakıt olarak dört gruba ayrılmıştır. Farklı teknolojilerinde yıllık 2500 ton

ile 2 milyon ton karbondioksit yakalama kapasitesinin olabileceği belirtilmiştir (Nehdi, Marani, & Zhang, 2024). Bu teknolojilerden oksiyakıt teknolojisi de karbondioksit yakalanmasını kolaylaştırması yönüyle ön plana çıkarılmaktadır. Çimento fabrikalarının oksiyakıt ile entegre sistemler oluşturması iklim değişikliğini etkilerini %74-91 oranında azaltacağı tahmin edilmektedir (Cavalett, Watanabe, Fleiger, & Hoenig, 2022).

Jang ve Lee (2016), belitin ve karbonatlama kürünün çimento harcı içerisindeki fizyokimyasal özelliklerini incelemişlerdir. Belit içeriği arttıkça karbonatlama kürlenme işlemi sırasında CO_2 alımını arttırmıştır. Karbonatlaşmayla sertleşmiş yüksek belit içeriğine çimento harcının mekanik mukavemeti aynı süre boyunca kürlenene çimento harcına oranla önemli ölçüde iyileşmiştir. İçeriğinde ağırlıkça %16, %23, %35 ve %48 belite sahip beton numunelerin CO_2 alım kapasiteleri sırasıyla %13, %13,5, %15,7 ve %16,9 olmuştur. Böylelikle belitin karbon yakalama teknolojisinin kullanılması açısından fayda sağladığı kanıtlanmıştır.

Lu vd (2022) kürlenene çimento hamurunun karbonatlaşma sürecinde sıcaklığın etkilerini incelemişlerdir. Karbonatlama işlemi sıcaklık ve süreye bağlı değiştiğini belirterek kür sıcaklığının artması çimento hamurunun mekanik özelliklerinin de iyileşmesine sebebiyet vermiştir. 20°C ve 50° 'de kürlenene numuneler 5° 'de kürlenene numunelere oranla iki kat daha hızlı karbonatlaşma derinliğine ulaşmışlardır. Gelecek çalışmaların da daha sürdürülebilir beton oluşumuna katkı sağlayacak tamamlayıcı çimentolu malzemelerle özellikle daha düşük CO_2 konsantrasyonuyla kürlenene çimento malzemelerinin davranışı hakkında daha fazla bilgi edinilmesi gerektiği de çalışmada vurgulanmıştır.

Karbon yakalama, depolama ve kullanma teknolojileri karbondioksit emisyonlarını azaltma konusunda son derece önemli olmaktadır. Sanayinin belli alanlarında kullanılan karbon yakalama teknolojisi yeterli yaygınlaşma seviyesine ulaşmamıştır. Karbondioksit yakalama işleminde sektör taleplerinin karşılanabilmesi için yatırım maliyetlerini de azaltmak önem arz etmektedir. Oksijen üretme, kimyasal döngü ve karbonatlama döngüsü gibi gelecekteki ek teknolojilerle karbon yakalamada uzun vadede umut veren teknolojiler olarak görülmektedir. Tüm bu teknolojiler hala araştırılma aşamasında olduğundan enerji santrallerinde uygulanması için zamana ihtiyaç vardır (Markewitz, Kuckshinrichs, Bongartz, & Linssen, 2012).

2.3. Tamamlayıcı Çimentolu Malzemeler (SCM)

Tamamlayıcı çimentolu malzemelerin kullanım amacı geleneksel portland çimentosu yapmak için klinkerin içerisine eklenen malzemelerdir. En sık kullanılan malzemeler uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve doğal puzolanlardır. 2003 yılında çimento içeriğindeki klinker kullanımı dünya çapında ortalama %85'iken bu oran 2010 yılında %77 ye düşmektedir. Tamamlayıcı çimentolu malzemelerin kullanılmasıyla gelecek yıllarda bu oranın %71'e düşmesi beklenmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde tamamlayıcı çimentolu malzemeler genellikle klinkerle harmanlanmaktan ziyade betona eklenerek kullanılır ve %60 oranında tamamlayıcı çimentolu malzemelerin kullanımı gerçekleştirilmektedir. Tamamlayıcı çimentolu malzemeler betonun içerisinde yaklaşık %5-20 oranında kullanılmaktadır. Bu oranın artırılması betonun erken yaşlarında dayanımını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle konu ile ilgili araştırmalarda betonun performansı ile tamamlayıcı çimentolu malzeme oranının artırılması arasında dengenin nasıl sağlanabileceği ve bu oranın sürdürülebilirliğe etkilerinin neler olabileceği üzerine yoğunlaşmaktadır (C.G. & Siddique, 2015).

Tamamlayıcı çimentolu malzemelerin çimento sektöründe kullanılması yirmi yıldır araştırma alanı olmaktadır. Tamamlayıcı çimentolu malzemelerin kaynakları bölgesel olarak değişiklik göstermesi küresel çapta eşit kullanım imkânını sınırlamaktadır. Çeşitli ülkelerde kömürün yakıt olarak kullanılmasının azaltılması uçucu kül oranının azalmasına sebep olmaktadır. Tamamlayıcı çimentolu malzemelerin yaygınlaşabilmesi için uçucu kül ve cüruf yerine kullanılabilecek malzeme çeşitliliğinin artırılması gerekmektedir (Skibsted & Snellings, 2019).

Tamamlayıcı çimentolu malzemeler de kendi aralarında betona etki bakımından farklılık göstermektedir. Örneğin cüruf basınç dayanımı ve sürdürülebilirliğe katkıları açısından uçucu küle göre daha verimlidir. Yapılan kıyaslamada kg/m^3 başına basınç dayanımını cüruf 0,115 MPa arttırırken, uçucu külde bu değer 0,087 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan bir Pareto Analizinde geleneksel çimento klinkerinin içeriğinin %50'si cüruf olan çimento karışımı ile veya %30cüruf ve %20 uçucu kül içeren karışımlarla değiştirilmesinin çimentonun zararlı etkilerinde %80 oranında azalma sağlanacağını göstermektedir. Dünyanın genelinde üretilen 4,1 giga ton çimentonun üretiminin %50'sinin üretiminin tamamlayıcı çimentolu malzemeler ile değiştirilmesinde 2745 megatona kadar karbondioksit salınımı azaltılabilir. Sadece çevresel sürdürülebilirlik değil, bu değişimin 209

milyar ABD doları tasarruf da sağlayabileceği de hesaplanmıştır (Tushar, Bhuiyan, Zhang, Maqsood, & Tasmin, 2022).

Hosain vd'nin (2018) yaptıkları çalışmada geleneksel portland çimentosuna kıyasla tamamlayıcı çimentolu malzemelerin kullanılması küresel ısınma potansiyeline %20 ile %38 oranında katkı sağlayacağını belirtmektedirler. Ayrıca tamamlayıcı çimentolu malzemelerin kullanımının %10-28 oranında karbon salınımlarını direkt olarak azaltacağını söylemektedirler.

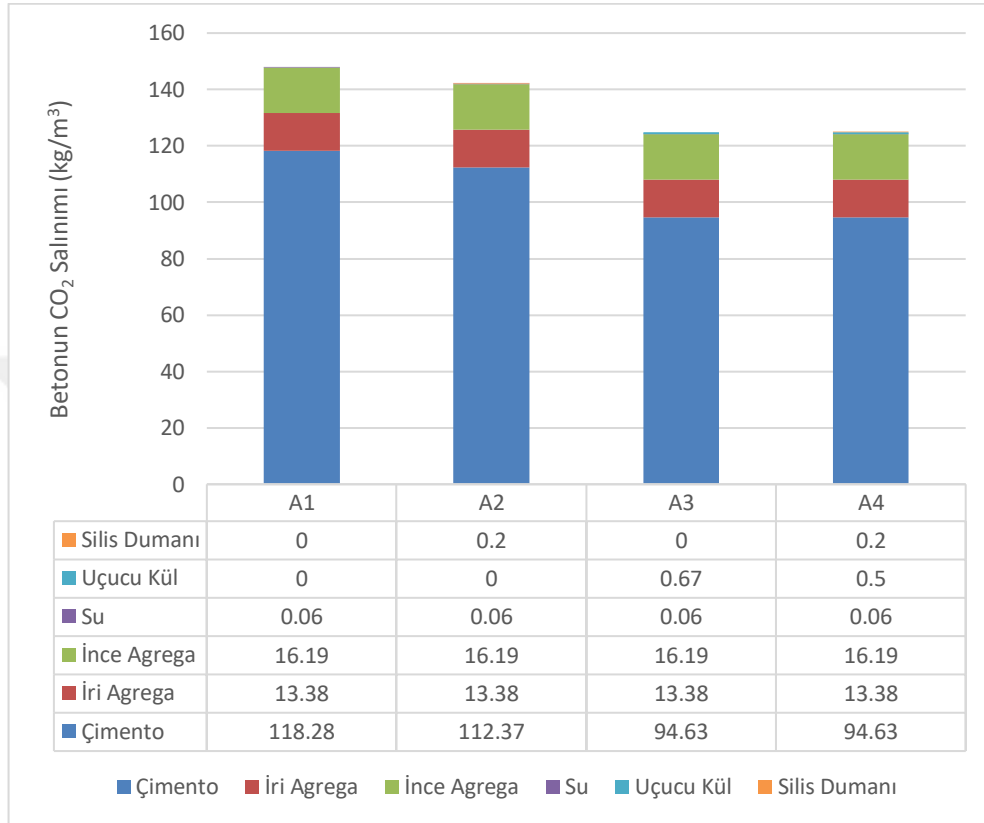
Zang vd'lerinin (2019) yaptıkları çalışmada, dört adet farklı miktarlarda tamamlayıcı çimentolu malzemeler içeren betonun mekanik özellikleri ve çevresel etkilerini değerlendirmişlerdir. Yaşam Döngüsü Değerlendirilmesi (LCA) kapsamında da bu dört farklı karışım betonunu incelemişlerdir.

Tablo 11. Test Edilen Betonun Karışım Oranları

İşlenmiş İçerikler (kg/m ³)	A1	A2	A3	A4
Çimento	380	361	304	304
İri Agrega	1229	1229	1229	1229
İnce Agrega	578	578	578	578
Su	190	190	190	190
Uçucu Kül	-	-	76 (%20)	57 (%15)
Silis Dumanı	-	19 (%5)	-	19 (%5)
Basınç Dayanımı (MPa)	23,90	25,45	15,76	19,67

Basınç dayanımları açısından SCM karıştırılmayan beton içeriğinde uçucu kül olan betonlara göre daha yüksektir. Sadece A2 betonunda içeriğindeki %5 silis dumanı sayesinde tamamlayıcı çimentolu malzemesiz betona göre basınç dayanımı daha iyi seviyededir. Betonlar karbondioksit salınımları açısından karşılaştırıldıklarında özellikle silis dumanı ve uçucu kül içeren betonların t/m³ başına açığa çıkardıkları karbondioksit salınımları daha az olmaktadır. Basınç dayanımı en yüksek olan A2 betonu karbondioksit salınımlarında ikinci sırada yer almaktadır. İçeriğindeki SCM miktarının azlığı, tamamlayıcı çimentolu malzeme içermeyen betona yakın değerlerde karbondioksit salınımına sebebiyet vermesini sağlamaktadır. Buradaki kritik nokta tamamlayıcı çimentolu malzemelerin kullanılması

sırasında betonun basınç dayanımını da dengeleyebilecek oranlar belirlemektir. A1, A2, A3 ve A4 betonlarının hacimsel karbondioksit salınımları sırayla 147.91, 142.02, 124.93 ve 124,78 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 47. Betonun CO₂ Salınımı (kg/m³)

2.4. Geri Döñtürölmüş Agregaların ve Atık Mazlemelerin İnşaat Uygulamalarında Kullanımı

Tezin birinci bölümünde de bahsedildiği gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında en çok kullanılan malzemelerin başında beton gelmektedir. Sürdürülebilirlik amacıyla yapılan çalışmalar çimento klinkerini oluşturmada yeni formölasyonlar üzerine yoğunlaştığı gibi yapısında bulundurduğu agreganın da çeşitli yöntemlerle elde edilmesi geleceğe yönelik yol gösteren bir çalışma alanıdır. Artan beton üretiminin beraberinde getirdiği bir diğör sorun da yapıların yıkıldıklarında geriye kalan beton atıklardır. Hizmet ömrünü tamamlayan yapılardan elde edilen atıklar geri dönüşümleri sağlanarak tekrardan inşaat uygulamalarının çeşitli alanlarında kullanılması malzemelerin yaşam döngüsü açısından önem arz etmektedir.

Dünyada yıllık kullanılan beton miktarının ortalama olarak 4,5 milyar ton olduğu düşünüldüğünde kişi başına düşen yıllık beton üretim miktarı da 0,7 ton olmaktadır. Kırmataş, doğal ve geri dönüştürülmüş olarak üç tip agrega geleneksel beton üretiminin temelini oluşturmaktadır. Betonun ağırlıkça %75'ini oluşturan agrega, yüksek oranda hammadde talebi doğrultusunda doğal kaynakların yenilenemez şekilde tüketilmesine sebebiyet vermektedir. Geri Dönüştürülmüş Agregası (Recycled Aggregate) (RA), yeniden kullanımda talep ettiği daha düşük enerji ile de karbondioksit salınımlarını da azaltma noktasında önemlidir. Geri Dönüştürülmüş Agregası sadece çevresel etki bakımından değil ekonomik sürdürülebilirlikte de Doğal Agregaya (Natural Aggregate) (NA) göre avantaj sağlamaktadır. 1m³ betonun üretim maliyetinin yaklaşık %14'ü agrega üretiminden kaynaklanmaktadır. Karışıma taş tozu da eklendiğinde maliyetin değeri %20 oranına denk gelmektedir ki bu oran, çimento maliyetinden (%40) sonra ikinci sırada gelmektedir. Mekanik özelliklerinde ise geri dönüştürülmüş agreganın yüzeyinin kullanımdan dolayı eski harç kalıntıları ve boşluklu yapısı sebebiyle doğal agregaya kıyasla su emme oranı yüksek, yoğunluğu ise daha azdır (Sefidehkan & Şimşek, 2018).

Betonun agrega üretiminde doğal kaynaklara olan talebini azaltmak amacıyla araştırılan yöntemlerden bir tanesi de atık malzemelerin yeniden kullanılmasıdır. Özellikle plastik, kauçuk, cam ve tarımsal atıkların tekrardan kullanılmasıyla atıkların hem çevreye verdikleri zararların önüne geçilmeye çalışılıp hem de betonun üretimindeki doğal kaynakların tüketilmesinin azaltılması hedeflenmektedir. 2000'li yıllardan itibaren artarak gelen beton üretim talebi 2010 yılı itibarıyla agregaya olan yıllık talebin 8-12 milyar ton olmasını da beraberinde getirmektedir. Agregası tüketimi yılda %5'lik bir artış gösterirken ekonomik anlamda da büyüyen bir pazar haline gelmektedir. Örneğin 2021 yılında 507,46 milyar ABD doları olan küresel agrega pazarının 2030 yılında 837,3 milyar ABD doları olacağı tahmin edilmektedir. Sürdürülebilirlik kavramının yaygınlık kazanması bu genişlemenin de sürdürülebilirlik kapsamında gerçekleşebilmesi için yeni yöntemlerin araştırılmasını ve uygulanmasını zorunlu hale getirmektedir. Özellikle yapıların servis ömürlerinin uzatılabilmesi ve enerji taleplerini azaltmak için atık malzemeler Yüksek Performanslı Betonda (High-Performance Concrete) (HPC) uygulanmaktadır (Sabbrojjaman, Liu, & Tafsirojjaman, 2024).

Taş ocaklarından çıkarılan agrega miktarı 2019 yılında 44 milyar tonu geçmektedir. Bu üretimin ilk sırasında yaklaşık 20 milyar ton agrega üreten Çin bulunmaktadır. Hindistan 6 milyar ton ile ikinci sırayı alırken Avrupa Birliği 3 milyar tonluk üretimle üçüncü sırada

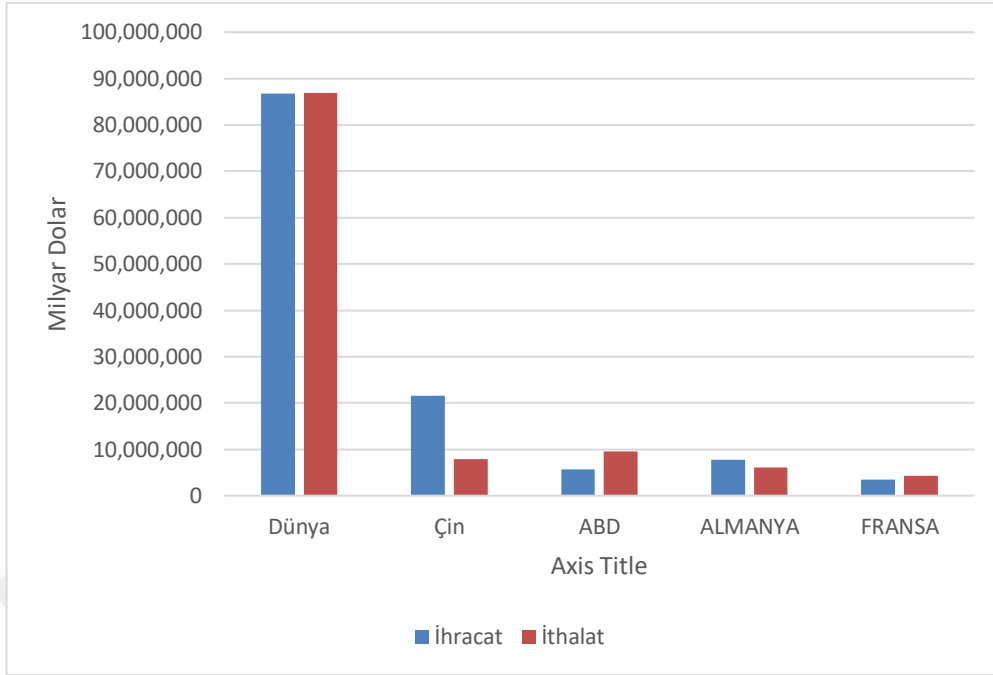
yer almaktadır. Bu ülkeleri ABD 2.4 milyar tonluk üretimle takip etmektedir (Premathilaka, Liyanapathirana, Leo, & Hu, 2024).

Sabau vd'nin (2021) yaptıkları çalışmada, Geri Dönüştürülmüş Agregalı Betonun (Recycled Aggregate Concrete) (RAC) ve Doğal Agregalı Betonun (Natural Aggregate Concrete) (NAC) çevresel etkilerini değerlendirmişlerdir. Birçok senaryoda Geri Dönüştürülmüş Agregalı Betonun uygulamalarının Doğal Agregalı Beton uygulamalarına oranla daha az karbon salınımı gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir. Geri Dönüştürülmüş Agregalı Betonun özellikle doğal kaynakların tüketilmesindeki baskıyı azaltarak Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment) (LAC) bakımından olumlu sonuçlar vermiştir. Ancak bu değerlendirmelerin sistemselsel olarak yapıldığını ve uygulama alanında aynı sonuçları vermesi için daha fazla Yaşam Döngüsü Değerlendirmesine ve çalışmaların çeşitlenmesine ihtiyaç duyulduğunu da söylemişlerdir.

2.4.1. Atık Cam Malzemelerinin İnşaat Uygulamalarında Kullanımı

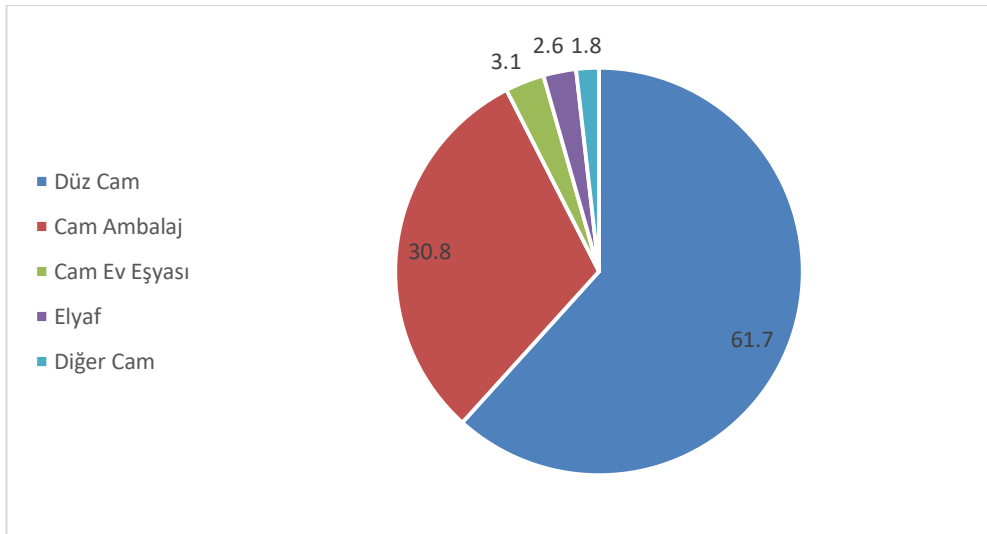
Cam günlük yaşamımızda çeşitli formlarda karşımıza çıkmaktadır. Vakum tüpü, şişe ve pencere camı gibi sürekli olarak kullanılan malzemedir. Cam atıklarının da her geçen gün artması geleneksel Portland çimentosu üretimine alternatif olarak kullanılmak istenmesine sebebiyet vermektedir. 100 mikron altında olan cam parçacıkları Portland çimentosu yerine ve 4,75 mm'den küçük parçacıklarının da ince agrega yerine kullanılması araştırılmaktadır. Cam atıkların bu seviyelerde kullanılması sera gazı emisyonlarında ortalama %19, enerji tüketiminde de %17'ye kadar azalma sağlayabileceği düşünülmektedir (Sabbrojjaman, Liu, & Tafsirojjaman, 2024). 1960'lı yıllardan itibaren geri dönüştürülmüş atık camların betonda agrega olarak kullanılması çalışmaları yapılmaktadır. Son yıllarda konu üzerine yapılan bilimsel çalışmaların yoğunlaştığı gözlenmektedir. Çalışmalar genellikle atık camların kaba agrega yerine değil ince agrega yerine kullanımı üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Cam sektörü 2021 yılı itibari ile ithalat kapasitesi olarak 86,84 milyar ABD doları seviyesine ulaşmıştır. Her yıl genişleyerek devam eden sistemde atık malzemelerinde çoğalması çevresel etki bakımından önlem alınması gerekir hale gelmiştir. Aynı şekilde dünya yıllık cam ihracatı ise 86,81 milyar ABD doları seviyesindedir. Cam sektöründeki en büyük paya sahip ülkeler Çin, ABD, Almanya ve Fransa gibi nüfusu fazla ya da sanayisi gelişmiş ülkelerden oluşmaktadır.



Şekil 48. 2021 Yılı Cam İthalat ve İhracat Değeri

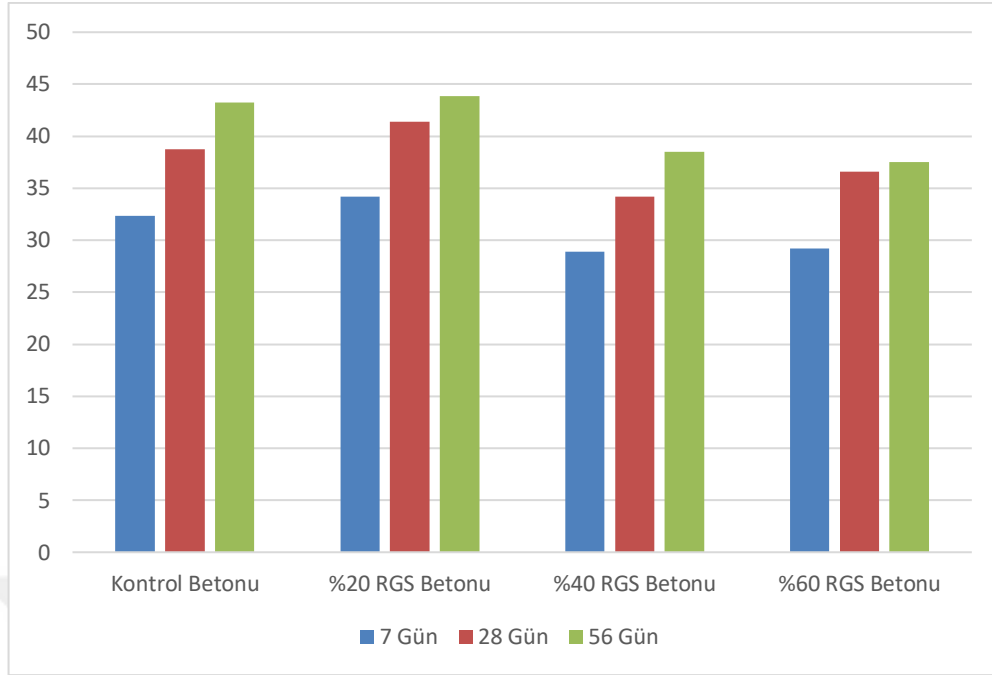
Cam sektörü birçok endüstriye hitap etmesinden dolayı üretim çeşitliliğini de beraberinde getirmektedir. İnşaat uygulamalarında özellikle fiberglas ürünlerin imalatı en büyük paya sahiptir. Isı ve elektrik yalıtımı, kompoze çatılar, duvarlar ve pencereler gibi imalat alanlarında kullanılmaktadır. Genel üretim çeşitliliğinde ise düz cam ve cam ambalaj kullanımı Avrupa Birliği ve İngiltere özelinde toplam üretim miktarının %92,5'ini oluşturmaktadır (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Cam Sektör Raporu , 2022).



Şekil 49. AB Üyesi Ülkelerinin Cam Üretim Dağılımı (2021)

Dünyada ortalama olarak her yıl 130 milyon ton cam atığı oluşurken bu atıkların yalnızca %21'inin geri dönüşümü sağlanmaktadır. Camın sınırsız olarak geri dönüştürülebilen malzeme olmasına rağmen geri dönüşüm oranının azlığı dikkat çekmektedir. Örneğin, plastik ve kâğıt geri dönüşümü sağlanırken içeriğindeki liflerin kısılması yapısını bozmaktadır. Ancak cam dönüştürüldüğünde böyle bir sorunla karşılaşılması verimli kullanımı açısından önem arz etmektedir.

Tamanna vd'nin (2020) yaptıkları çalışmada, içeriğinde %20, %40 ve %60 oranında geri dönüştürülmüş cam kumu (Recycled Glass Sand) (RGS) bulunan üç beton ve içeriğinde geri dönüştürülmüş cam kumu bulunmayan beton numuneleri karşılaştırılmıştır. Bu dört numuneye uygulanan slump deneyi sonucunda içeriğinde geri dönüştürülmüş cam kumu bulunan betonların işlenebilirliklerinde azalma gözlenmiştir. Aynı çalışmada bu dört betonun basınç dayanımları 7, 28 ve 56 gün olarak üç farklı zamana göre karşılaştırılmıştır. Kontrol betonunun 7 günlük dayanımı 32,33 MPa olarak bulunmuştur. İçeriğinde %20 geri dönüştürülmüş cam kumu bulunan betonda ise bu oran %5,8'lik artış ile 34,2 MPa olarak ölçülmüştür. İçeriğindeki RGS oranı %40 ve %60 olan betonlar ise kontrol betonuna oranla ilk 7 günde daha düşük basınç dayanımına sahip olmuşlardır. 28 günlük dayanımda ise bütün beton karışımlar 32 MPa'nın üzerine çıkmışlardır. Kontrol betonunun basınç dayanımı 28 gün sonunda 38,75 MPa değerine ulaşırken %20 geri dönüştürülmüş cam kumu içeren beton 41,40 MPa değerine ulaşarak bütün karışımların önündedir. 56 günlük basınç dayanımlarında ise kontrol betonu 43,22 MPa değerine ulaşmıştır. Bu değer 56 günlük süreçte %34 oranında bir artışa denk gelmektedir. Bu artış oranı %20 geri dönüştürülmüş cam kumu içeren betonda %35 olarak ölçülmüştür. Ancak cam kumu miktarının artması kontrol betonuna göre 56 günlük değerlerde azalmaların gerçekleşmesine sebep olmuştur. Ayrıca numuneler arasında eğilme ve çekme dayanımı testleri de uygulanmıştır. Kontrol betonu ile geri dönüştürülmüş cam kumu içeren betonlarda birbirine benzer değerler bulunmuştur. Hatta geri dönüştürülmüş cam kumu oranı arttıkça eğilme mukavemetinde küçük de olsa artış gözlenmesi cam kumunun açılal boyutu ve çimento ile arasında daha iyi kenetlenme oluşmasına bağlanmaktadır. Optimum olarak en iyi verilen %20 geri dönüştürülmüş cam kumu içeren betonda sağlanması da cam kumunun faydalı olmasına rağmen belli sınır değerler arasında daha iyi sonuçlar vermesini de göstermektedir.



Şekil 50. Karışımların Basınç Dayanımları (MPa)

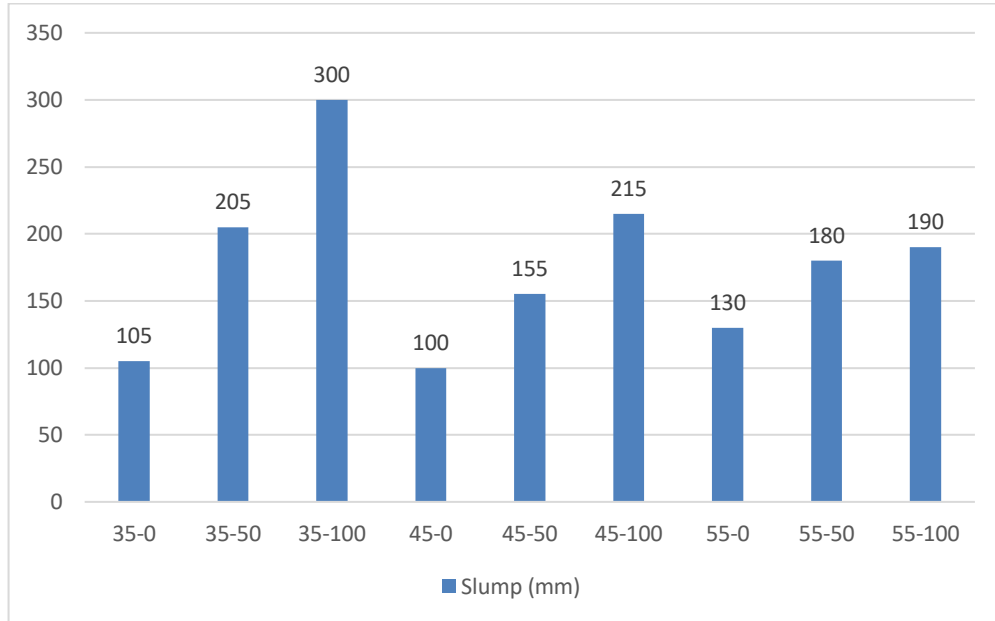
Bu deneyler haricinde doğal kum yerine geri dönüştürülmüş cam kumu kullanımı alkali-silika reaksiyonunu olumsuz yönde etkilememiş ve klorür dayanımı daha yüksek beton elde edilmiştir. Ancak RGS ikamesinin artması belli orana kadar işlenebilirliği çok etkilemese de %40'ın üzerine çıktıkça betonun kullanımı için katkı ilavesi gerektirmektedir. Çalışmanın sonucunda geri dönüştürülmüş cam kumu kullanımının betona uygunluğu tespit edilmiş olup çöp sahalarındaki camların dönüştürülerek çevresel etkilerinin azaltılması sürdürülebilir beton için gelecek vaat etmektedir.

Kim vd'nin (2018) yaptıkları çalışmada, atık cam için katot ışın tüpü atıkları parçalanarak klinker oluşumunda kullanmışlardır. 5 mm elekten geçen malzemeler çimento materyali olarak kullanılmıştır. Deneyde kullanılan çeşitli beton sınıfları su/çimento oranları ve ağır atık camın kullanım yüzdelere göre ayrılmıştır. Kullanılan camın yoğunluğu da $3,0 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür.

Tablo 12. Deneyde Kullanılan Betonun Karışım Yüzdeleri

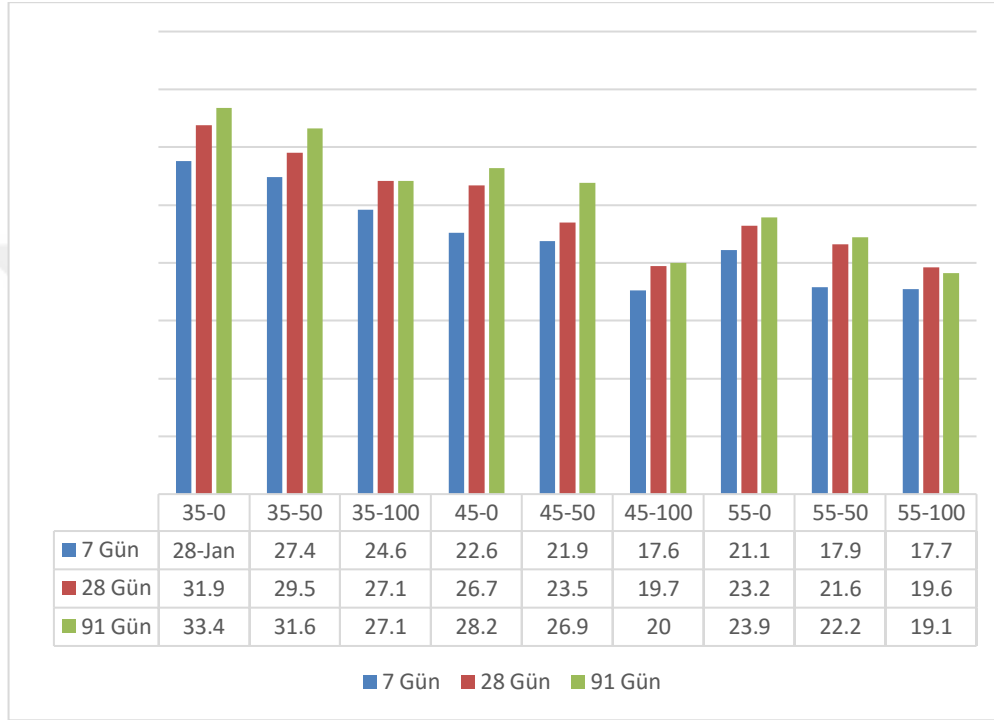
Karışım İsmi	Su/Çimento Oranı	Ağır Cam Atık Yüzdesi
35-0	35	0
35-50	35	50
35-100	35	100
45-0	45	0
45-50	45	50
45-100	45	100
55-0	55	0
55-50	55	50
55-100	55	100

Bu dokuz karışıma uygulanan slump deneylerinde su/çimento oranına bakılmaksızın atık cam oranının arttırılması çökme miktarının artışına sebep olmuştur. Çökmenin dengelenmesini sağlamak içinse su/çimento oranının artmasının fayda sağladığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Genel kabul olarak slump miktarının 180-220 mm arasında olması istenmektedir ve bu değerlere özellikle atık cam miktarı artırıldığında su/çimento oranının da arttırılmasıyla sağlanmıştır.



Şekil 51. Beton Karışımların Slump Değerleri

Basınç dayanımlarının da ayrıca karşılaştırıldığı çalışmada en uygun değeri 91 günlük dayanım değeri olarak 35-0 içeriğine sahip beton vermiştir. Atık cam oranının beton içerisinde artması basınç dayanımını azaltıcı etkide bulunmuştur. Bunun sebebi olarak da cam yüzeyinin pürüzsüzlüğü nedeniyle çimento hamurunda yaşanan aderansın az olması düşünülmektedir.



Şekil 52. Beton Karışımlarının Basınç Dayanımı (MPa)

Yapılan diğer deneylerle de atık cam oranının artması betonun geçirgenliğini azalttığı görülmüştür. Ayrıca cam atık içeriğinin klorür iyonlarına olan direncini de arttırarak beton ömrüne fayda sağladığı da çalışmada ulaşılan diğer sonuçlar arasındadır. Basınç dayanımı olarak da değerlendirildiğinde belli oranlar ayarlanarak güzel sonuçlar veren atık cam içeren betonların kullanılabilirliği ön plana çıkmaktadır. Bu sayede atık cam miktarında azalma sağlayarak çevreye faydalı döngülerin oluşmasında rol alabileceği düşüncesi çalışmada ön plana çıkarılmıştır.

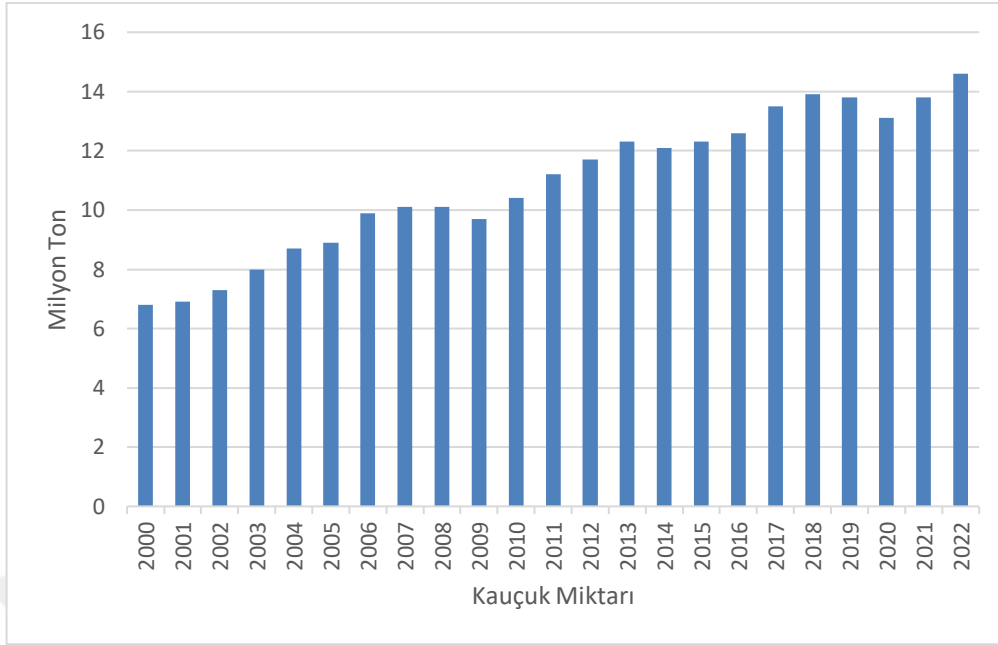
Ali vd'nin (2012) yaptıkları çalışma ile atık cam ile birlikte içeriğinde silis dumanı da içeren beton numuneleri üzerinde deneyler yapmışlardır. Farklı çimento içeriklerine (350, 400 ve 450 kg/m³), su/çimento oranı 0,4 ve ince agrega yerine içeriklerinde %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında atık cam içeren beton numuneleri karşılaştırılmıştır. Özellikle

slump değerlerinin yüksek olmasıyla kendiliğinden yerleşen betonların kullanımında atık cam içeren formüllerin kullanılabileceğini ön plana çıkarmışlardır. Diğer çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da içeriğindeki atık cam miktarının artması basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Bükülme dayanımı ve elastisite modülünde atık cam miktarının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Ayrıca yapısının pürüzsüzlüğü nedeniyle atık cam kullanımının artması aderans kaybına ve betonda çatlakların oluşmasına sebebiyet vermektedir.

Geri dönüştürülmüş atık cam ürünlerinin betonda ince agregaya yerine ikame ürün olarak kullanılması belli oranlarda sınırlı kalacak şekilde mümkün olmaktadır. Özellikle kullanılacak betonun talep ettiği klorür dayanımının fazla olması ve kendiliğinden yerleşen betona olan ihtiyacın talep edildiği alanlarda kullanımı uygun olacağı çalışmalar ile belirtilmiştir. Betonun yapısına katkı maddeleri de eklenerek atık camın kullanım miktarının da artması sağlanarak çevreye verdiği zararların azaltılması mümkün olacaktır.

2.4.2. Atık Kauçuk Malzemelerin İnşaat Uygulamalarında Kullanımı

Doğada uzun süre yok olmadan kalması nedeniyle kauçuk malzemeler doğal çevreye zarar veren malzemelerin başında gelmektedir. Kullanım alanının geniş olması ve nüfusun artmasıyla talebinin de düzenli olarak artması kauçuk malzemesinin geri dönüştürülerek kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Dünyada her yıl düzenli olarak doğal kauçuk malzemesi üretilmekte ve atık malzeme olarak da karşımıza çıkmaktadır.

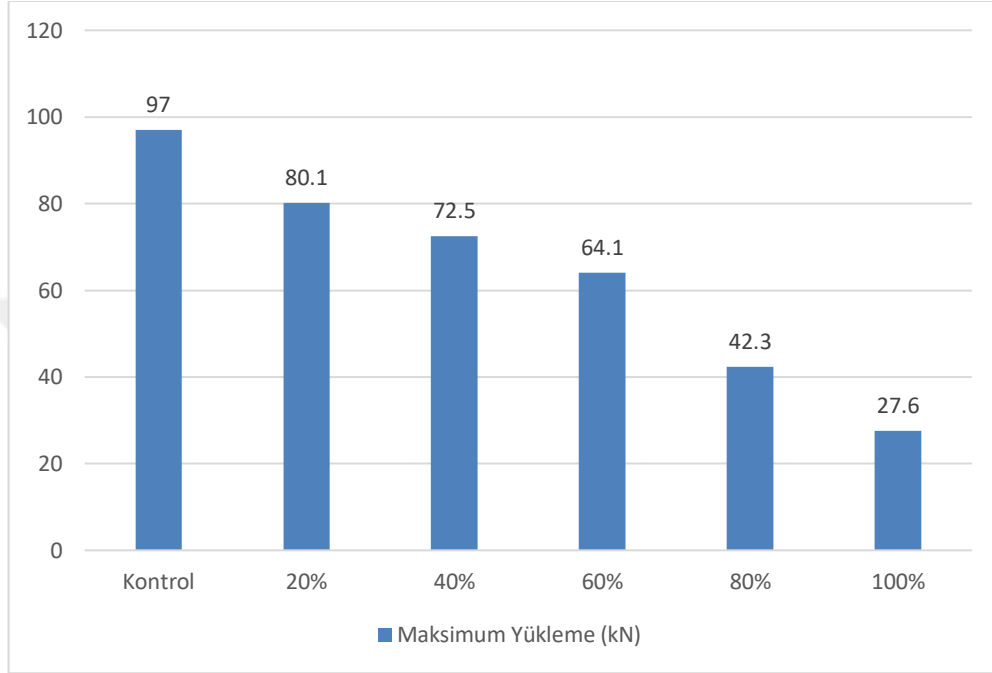


Şekil 53. Yıllık Küresel Kauçuk Üretimi (Jaganmohan, 2024)

Kauçuk üretimindeki bu artış sürdürülebilirlik çalışmalarının hız kazandığı inşaat uygulamalarının da dikkatini çekerek atık malzeme olarak çeşitli çalışmalarda ince ve iri agrega malzemesinin ikamesi olarak kullanımının uygunluğu incelenmiştir. Bu çalışmalardaki amaç hem beton üretiminde daha az doğal kaynak tüketilmesini sağlamak hem de atık kauçuk malzemesinin geri dönüşümünü sağlayarak yaşam döngüsü çerçevesinde çevresel etkilerini azaltmaktır.

Atahan ve Yücel (2012) ince ve iri kauçuk malzemeleri kullanılarak oluşturdukları beton numunelerinin mekanik özelliklerini karşılaştırarak kauçuk atığın beton üzerindeki etkilerini incelemiştir. Altı farklı karışım numunesinin bir tanesinin içerisine atık kauçuk malzemesi koyulmamış ve kontrol betonu olarak nitelendirilmiştir. Beton karışımında; 187,52 kg/m³ su, 379,29 kg/m³ çimento, 723,95 kg/m³ iri agrega ve 1334,89 kg/m³ ince agrega bulunmaktadır. Diğer değişkenler sabit tutularak ince ve iri agreganın kauçukla kullanımı %20, %40, %60, %80 ve %100 olacak şekilde 5 farklı beton karışımı oluşturulmuştur. Oluşturulan beton numunelerinin metreküp başına ağırlık oranı kauçuk miktarı arttıkça azalmıştır. Bu azalma yapılarda kullanım sonrası ortaya çıkacak ölü yükün daha az olmasına olanak sağlayarak görece daha hafif bir yapının oluşmasına katkı sağlayacaktır. Betonda kauçuk miktarı arttıkça elastisite modülü ve basınç dayanımında azalmalar gözlenmiştir. İçeriğinde %100 kauçuk bulunan betonun basınç dayanımı kontrol betonuna oranla %94 oranında daha az çıkmıştır. Kauçuk malzemesinin dayanımının az

olması bu düşüşün ana sebebini oluşturmaktadır ve bu düşüş özellikle betonun içeriğinde %60 oranında kauçuk agrega miktarı bulunduğundan sonra ciddi şekilde hissedilmektedir. Kauçuk miktarı arttıkça basınç dayanımının düşük olması yüklem kapasitelerinde de düşüşe neden olarak betonun gerekli standartları sağlamasını da zorlaştırmaktadır.



Şekil 54. Beton Karışımların Maksimum Yükleme Değerleri

Çalışmanın sonucunda basınç dayanımının kauçuk oranı ile azaldığı ve %60 kauçuktan sonra betonun istenilen mekanik özellikleri sağlayamadığı belirtilmiştir. Kauçuk miktarı artan betonun esnek yapısı dolayısıyla özellikle bariyer betonu olarak kullanılması ön plana çıkarılmıştır.

Batayneh vd'nin (2008) betonda kauçuk miktarının etkilerini değerlendirdiği çalışmada, Ürdün'de yerel bir endüstriyel birimden elde edilen araba ve kamyon lastik parçalarının kırıntıları kullanılmışlardır. Bu kırıntıların boyutları 4,75 mm ve 0,15 mm arasında olacak şekilde ayarlanmıştır. İçeriğine %20, %40, %60, %80 ve %100 olacak şekilde betonların üretiminde ince agrega yerine kullanılmıştır. Çalışma sonucunda malzemenin işlenebilirliği, karıştırılması ve sıkılaştırılmasında geleneksel betona göre paralellikler olduğu tespit edilmiştir. Ancak içeriğinde kauçuk bulunan betonların yapısal taşıyıcı elemanlarda kullanılmasının uygun olmayacağı ve gerekli basınç dayanımını karşılamadığı da değinilen önemli konudur. Taşıyıcı eleman yerine yüksek mukavemet

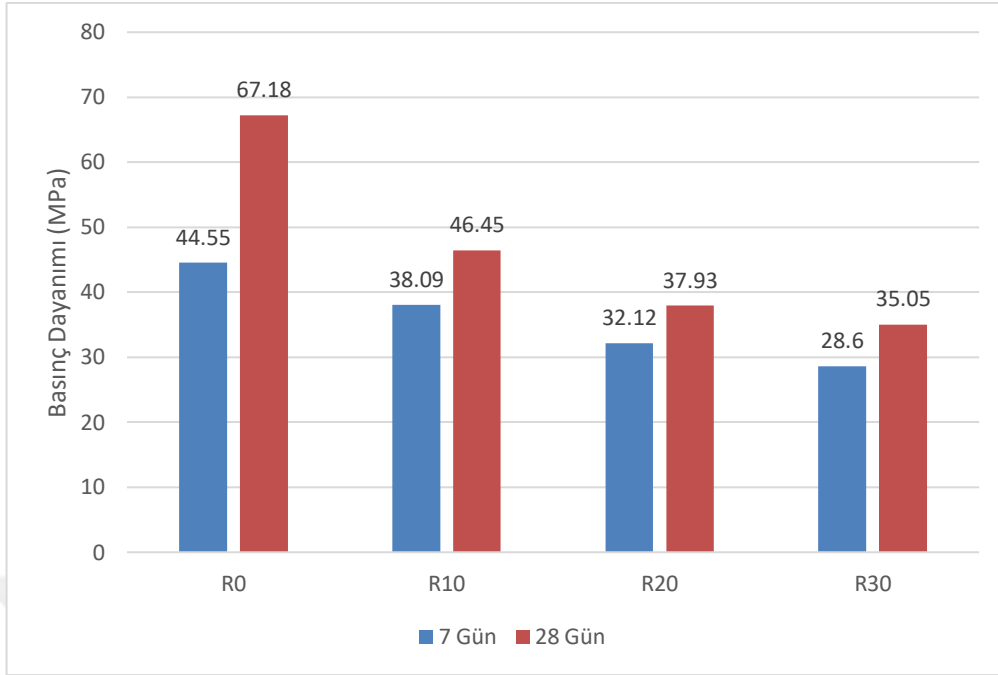
gerektiren bölme duvar uygulamalarında, yol bariyerlerinde ve kaldırım gibi uygulama alanlarında kullanımının daha uygun olacağı tavsiye edilmiştir.

Abdelmonem vd'nin (2019) yaptığı çalışmada diğer çalışmalara benzer yöntemler izlenmiştir. Ancak bu çalışmada beton üretimi için karışımların içine tamamlayıcı çimentolu malzemelerden olan silis dumanı da eklenmiştir. Kauçuk malzemesi ise sadece ince agreganın yerine ağ şeklinde ve boyutu 1-4 mm arasında olacak şekilde iki türde kullanılmıştır. R0, R10, R20 ve R30 olacak şekilde içeriklerindeki kauçuk oranını yüzde ifade eden dört karışımın mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 13. Çalışmada Kullanılan Betonun Karışım Miktarları

Karışım	R0	R10	R20	R30
Çimento	382,5	382,5	382,5	382,5
Silis Dumanı	67,5	67,5	67,5	67,5
Su	135	135	135	135
Kalın Agregası	1070	1070	1070	1070
İnce Agregası	820	738	656	574
Kauçuk Ağ	0	17,5	35	52,5
Kauçuk 1-4 mm	0	7,50	15	22,5
Süper Plastikleştirici	6,75	6,75	6,75	6,75

Beton karışımlarına uygulanan slump deneyi sonucunda çökme miktarları R0 ve R10 betonları için 235 mm ve 240 mm ile hemen hemen aynı çökme değerlerini vermişlerdir. Sonrasında R20 ve R30 için bu değerler 215 ve 220 mm olarak ölçülmüştür. Örnekler arasındaki farkın fazla olmaması, kauçuğun nispeten taze betonun işlenebilirliğini olumsuz etkilerini süper akışkanlaştırıcılar ile azaltmasına bağlanmıştır. Basınç dayanımlarının da ayrıca test edildiği çalışmada kauçuk oranı diğer çalışmalar gibi bu çalışmada da arttıkça betonun dayanımı üzerinde olumsuz etkiler göstermiştir. 7 günlük basınç dayanımında R0 betonuna oranla R30 betonunun dayanımı %35,80 oranında azalmıştır. Bu oran 28 günlük basınç dayanımı ölçümünde ise %47,83'lük değere ulaşmıştır.



Şekil 55. Numunelerin Basınç Dayanım Değişimleri

Kauçuk atığın betondaki olumsuz özelliklerine rağmen geri tepme testinde emilen darbe enerjisi kauçuk içeren betonlarda daha yüksek çıkmıştır. Geri tepmeden sonra kaydedilen yükseklik R0, R10, R20 ve R30 numunelerinde sırasıyla 19 cm, 15cm, 14cm ve 9 cm olarak ölçülmüştür. Enerjinin kauçuk malzeme tarafından emilmesi de betona esneklik kazandırmaktadır. Çalışma sonucunda özellikle içeriğinde %30 oranında kauçuk malzeme bulunan betonun köprü ve liman gibi darbe yüklemelerine duyarlı yapılarda kullanılabileceği belirtmiştir.

Kauçuğun beton uygulamalarında kullanımında çalışmalarda genellikle ortak sonuçlar bulunmuştur. Kauçuk betonun basınç dayanımını ve bükülme mukavemetini azalttığı ancak darbe emilimi arttırarak daha esnek beton üretimi sağlanabileceğini çalışmalarda belirtmiştir.

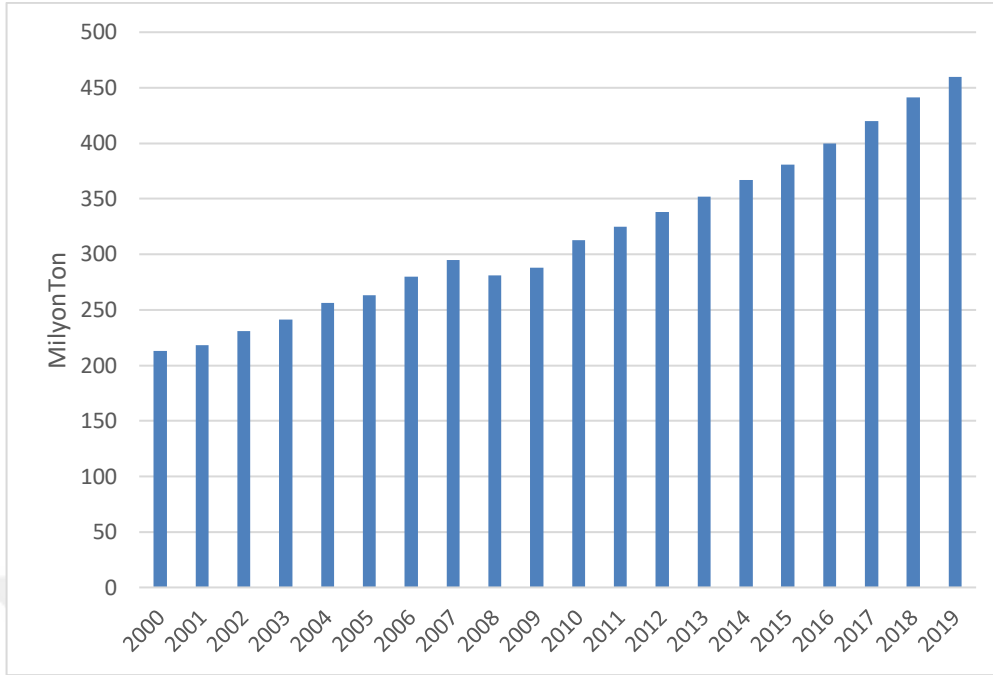
Gerges vd'nin (2018), kauçuğu ince agregalar olarak kullandıkları karışımlarda basınç dayanımının azaldığını ancak kauçuğun beton yapısında yüksek elastikiyet sağladığını belirtmişlerdir. Geleneksel betona kıyasla daha yüksek tokluk ve daha yüksek darbe direnci olduğunu çalışmalarında bulmuşlardır. Kauçuk betonun bu özelliklerinden dolayı yüksek dayanım gerektirmeyecek şekilde etkili kullanımının sağlanabileceğini çalışmalarında ortaya koymuşlardır.

Sofi'nin (2018) kauçuğun agrega olarak kullanıldığı bir çalışmada da iki gruba ayrılan numunelerde bir grupta iri agrega yerine kırılmış kauçuk, diğer grupta ise çimento yerine hurda lastik tozu kullanmıştır. Çalışmanın sonuçları da genel olarak basınç dayanımının düşüklüğüne dikkat çekmiş olsa da özellikle esnek ve su emme oranının geleneksel betona göre daha iyi olduğu belirtmiştir. Kullanım alanı olarak da darbeye olan direncinin yüksek olmasından dolayı kaldırımlarda, zeminlerde, beton otoyollarda, tüneller ve baraj dolu savakları gibi hidrolik yapılarda veya hizmet ömrü boyunca hareketli yüklere maruz kalan yüzeylere uygulanmasının uygun olacağı sonuçlarına varmıştır.

Atık kauçuğun inşaat mühendisliği uygulamalarında geri dönüştürülerek kullanılması üzerine yapılan çeşitli çalışmalar beton agregası olarak kullanımının sınırlı olabileceği üzerine yoğunlaşmaktadır. Ancak talebe göre üretilecek olan kauçuk malzemesi betonu çevresel geri dönüşüme ve atık yönetimine fayda sağlayacağı gibi inşaat uygulamalarının da sürdürülebilirliğe katkı vereceği bir çalışma alanı oluşturma konusunda geliştirilebilir alanlardan bir tanesi konumundadır.

2.4.3. Atık Plastik Malzemelerin İnşaat Uygulamalarında Kullanımı

Plastik malzemesi son yıllarda en çok üretilen malzemelerin başında gelmektedir. Performansı arttırmak ve maliyeti azaltmak için üretilebilecek en performanslı malzeme olarak görülen plastik 1860 yılında ilk kez üretilmiştir. Endüstriyel olarak gelişmesi 1920'li yıllardan itibaren olan plastik yıllar içerisinde üretimi artarak devam etmiştir. Kentleşme ve nüfus artışı plastik malzemesine olan talebin ana sebeplerindendir. Kâğıt, cam, gıda ve metal atıklarının yanında çevresel zararı ile öne çıkan malzeme son yıllarda plastik olmaktadır. Hem insan sağlığı hem de doğa yaşamı etkilemesi de plastik atıklarının geri dönüşümleri üzerine çalışma zorunluluğu oluşmaktadır (Pilapitiya & Ratnayake, 2024).



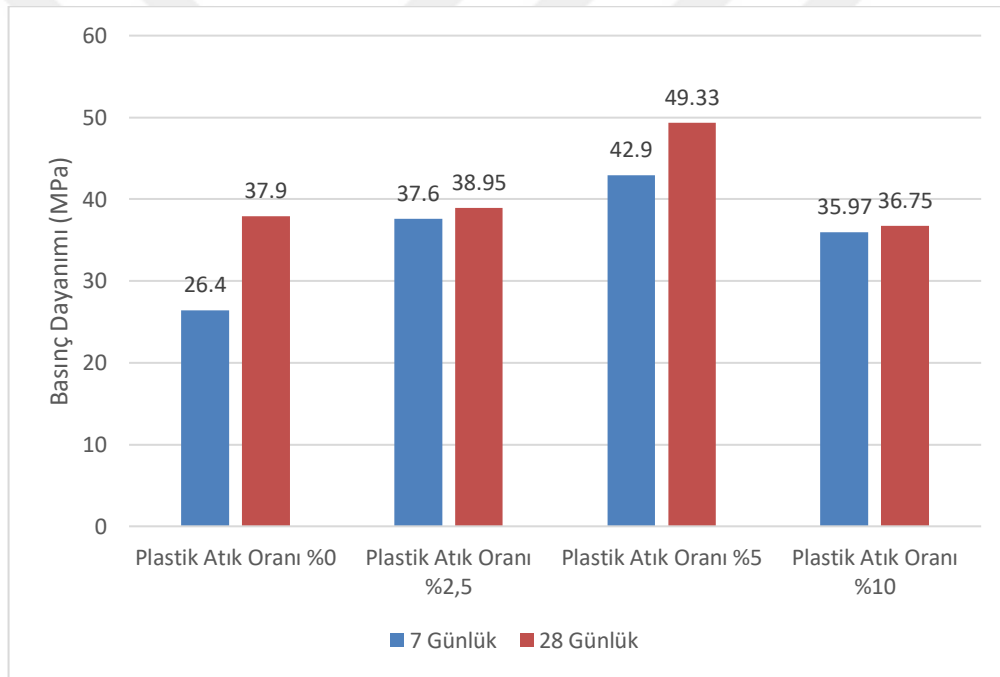
Şekil 56. Küresel Plastik Üretim Miktarı (Ritchie, Samborska, & Roser, 2023)

İnşaat sektörü gibi geniş alanlı bir endüstride plastik atıkların geri dönüştürülerek kullanılması ilgi çeken bir araştırma alanı olmuştur. Plastik atığın katma değerli, uygun maliyetli ve çevre dostu malzemelere dönüştürülerek hangi alanlarda kullanılabileceği de araştırmalara yön vermektedir. İnşaat mühendisliğinde bu alanlar beton agregası yerine, bitümlü karışımların ve asfaltın iyileştirilmesinde katkı maddesi olarak, toprak stabilizasyonu ve takviye malzemesi, tuğla, sıva, kaldırım, gibi yapı malzemelerin içeriklerinde ve ısı ve su yalıtımında kullanılabileceği çeşitli alanlar olmaktadır (Ahmed, 2023).

Hamada vd'ye (2024) göre, inşaat uygulamaları atık plastiklerin dönüştürülmesinde öncü olan sektörler arasında değerlendirilebilir. İnşaat sektörünün atık plastikleri dönüştürerek kullanması hem inşaat uygulamalarını sürdürülebilir yapı haline getirirken doğal çevrenin de daha sağlıklı bir ortam haline gelmesini sağlamaktadır. İnce ve iri agregalar olarak kullanılan plastiğin betonun üretim maliyetinin de düşmesine sebebiyet vererek ekonomik sürdürülebilirlik hedeflerine de ulaşmayı sağlamaktadır.

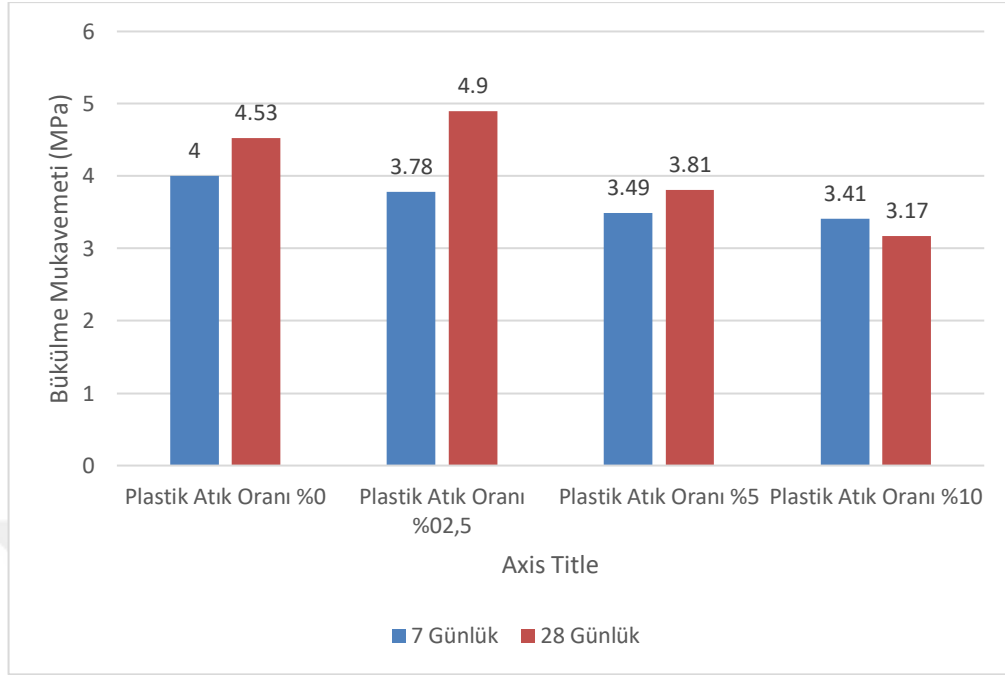
Adnan ve Dawood (2021) yaptıkları çalışmada, plastik atık kutuların beton karışımında kullanarak oluşan betonun mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada ayrıca atıkların betonarme kirişlerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisini de incelemişlerdir. Üç karışım içeriklerinde %2,5, %5 ve %10 oranında atık plastik içerirken

bir tanede kontrol betonu oluşturulmuştur. İçeriklerindeki çimento, su ve çakıl miktarları aynı olan bu betonlara slump deneyi uygulanmıştır. İçeriğinde atık plastik bulunmayan betonun slump değeri 200 mm çıkmıştır. İçeriğinde %2,5, %5 ve %10 atık plastik bulunan betonlarda slump değeri sırasıyla 190 mm, 180 mm ve 170 mm olarak ölçülmüştür. Bu değerler de betonun yüksek işlenebilirlik değerlerine uygun olduğu belirtilmiştir. Basınç dayanımının testinin de yapıldığı çalışmada 10 x 10 x 10 cm ebatlarında küp numune kullanılmıştır. Basınç deneyinde en iyi sonuçları içeriğinde %5 plastik atık içeren beton vermiştir. Plastik atığın kullanılması özellikle 7 günlük basınç dayanımının daha hızlı artmasını sağlamıştır. Süre uzayıp 28 günlük basınç dayanımında ise içeriğinde atık plastik olmayan betonun diğer beton karışımları ile arasındaki farkın da kapandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 57. Betonun Karışımların Basınç Dayanımları (MPa)

Çalışma 10 x 10 x 50 cm ölçülerindeki numunelerin bükülme mukavemetleri test edilmiştir. Bu testin sonucunda da bükülme mukavemetinde en iyi değeri %2,5 atık plastik içeren karışım vermiştir. %2,5'lük betonda, kontrol betonuna göre %8,16'lık artış gözlemlenmesine rağmen %5 ve %10'luk plastik içeren betonlarda sırasıyla %15,9 ve %30,02'lik azalış gözlemlenmiştir.



Şekil 58. Beton Karışımların Bükülme Mukavemeti (MPa)

Çalışmanın sonucunda plastik malzemenin betonda kullanılması kullanım oranlarına göre artırıcı veya azaltıcı etki oluşturmaktadır. Bu oranın beton karışımlarının içerisinde yüzde olarak belirli sınırlarda kullanılması daha iyi sonuçlar vermektedir. Plastik atık kullanılan beton ayrıca kontrol betonuna göre çok daha sünek bir beton elde edilmesine sebebiyet vermektedir.

Alqahtani vd'nin (2021) yaptıkları çalışmada, plastik atıkların yaşam döngüsü değerlendirmelerini yapmışlardır. Geri dönüştürülmüş plastik hafif agregaların maliyet analizleri yapılmıştır. Hafif plastik agregaların en sık kullanılan çeşidi de lineer düşük yoğunluklu polietilen malzemesi üzerinden çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu polietilen malzemesinin kullanılması miktar olarak betonda %7,23, çelikte ise %7,18 oranında tasarruf sağlamıştır. Binanın genel maliyetinde de %5,9 oranında tasarruf sağlanmaktadır. Plastik atığın kullanılıp en optimum sonuçları verdiği durum ise 4-5 m döşeme açıklığına sahip yapılarda olduğunu belirtmişlerdir. Niceliksel olarak plastik atık kullanımının beton uygulamasındaki uygulanabilirliğini ölçen çalışma ilerleyen araştırmalarla çevresel faydasının daha da artırılabilceğine dikkat çekilmiştir.

Daha hafif beton üretmek amacıyla 5 ayrı karışımı Castillo vd (2020) taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini incelemişlerdir. Karışımlarda kullanılan ince agreganın %80'inin

boyutları 2,36 mm ile 4,75 mm arasında kalan %20'lik kısım ise 1,18 mm ile 2,36 mm arasında seçilmiştir. Kalın agreganın ise %80 boyutları 13,2 mm-19 mm arasında seçilmiştir. Karışımların içeriklerindeki atık plastik miktarı, betonun ağırlıkça %4,7, %7,5, %9,6, %12,5 ve %15 oranlarındadır. Slump değerleri ölçülen beton karışımlarında plastik agrega miktarına yaşanan artış işlenebilirliği olumsuz etkilemiştir. Basınç dayanımlarında ise %7,5 plastik atık içerek beton dayanımında artış gözükse de genel olarak atık miktarı basınç dayanımını ve bükülme mukavemetini azaltıcı etki göstermiştir.

Tablo 14. Beş Karışımın Çeşitli Test Sonuçları

Plastik Atık Ağırlık Yüzdesi	Slump (mm)	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28 Günlük Bükülme Mukavemeti (MPa)
4,7	130	27,2	4,9
7,5	170	36,5	5,6
9,6	110	22,8	4,2
12,5	110	22,6	4,4
15	110	22,2	4,5

Dayanımının düşük kalması nedeniyle plastik atık içeren betonların taşıyıcı elemanlarda veya yüksek performanslı beton olarak kullanılmamasına çalışmada öne çıkarılmıştır. Ancak yaşam döngüsü analizinde ağırlığın %15'i plastik atıktan oluşan beton Yeni Zelanda'da üretilecek yıllık beton sadece %1'inde kullanılsaydı 19 milyon ton işlenmemiş agrega çıkarılmayacak ve 9 milyon ton plastiğin geri dönüştürüleceği sonucuna varılmıştır. Bu değerler de çevresel olarak katkısının çok yüksek olmasından dolayı plastik atıklı betonun dayanımını arttıracak çalışmaların çoğaltılması gerektiği üzerinde durulmuştur.

Khan vd'nin (2020) yaptıkları çalışmada, geleneksel portland çimentosunun ısıtılmış atık polietilen tereftalat (PET) ve silis dumanı ile değiştirilmesinin etkilerini incelemiştir. Deneysel sonuçlar diğer çalışmalarla benzer özellik göstermiştir. Basınç ve eğilme dayanımında geleneksel portland çimentolu betona göre azalma kaydedilmiştir. Atık polietilen tereftalat eklenmesi sonucunda çimento harcının mikro yapısında yoğunlaşma ve harcın iyileşmesine katkıda bulunan farklı fazların oluşmasına sebep olmuştur. Atık polietilen tereftalat kullanımı çimento harcının akışkanlığında azalmaya sebep olmuştur. Ancak hem atık polietilen tereftalat hem de silis dumanının %5 oranında eklenmesi kabul edilebilir bir akış değeri sağlamıştır. Basınç dayanımında ise portland çimentosuna oranla

azalma gözlenmiştir. Atık polietilen tereftalata kıyasla ısıtılmış atık polietilen tereftalat kullanımında ise kaybedilen mukavemetin bir kısmı geri alınmıştır. Eğilme mukavemetinde ise %14 olan kayıp %7'ye gerilemiş ve bu değer silis dumanı eklenmesiyle daha da azalmıştır. Çalışmada atık polietilen tereftalat ve silis dumanı içeren malzemelerin özellikle yarı esnek dış cephe kaplamalarında kullanılabileceğini belirterek sürdürülebilir inşaat çözümlerine katkı sağlayacağına değinmişlerdir.

Lazorenko vd'nin (2022) çalışmasında plastik atıklı jeopolimer harçların taze ve sertleşmiş hallerindeki mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında tamamlayıcı çimentolu madde olarak uçucu külü de kullanarak ortaya çıkan sonuçları değerlendirmişlerdir. Jeopolimer esaslı harçlarda plastik atıkların boyutları küçüldükçe akışkanlık ve mekanik özellikleri de iyileşmiştir. İşlenebilirlik ve eğilme mukavemetinin kontrol betonu olan geleneksel betona yakın olduğu ancak diğer çalışmalarda da sorun olan basınç dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Pet parçacıkları ile jeopolimer betonun arasındaki yapışmanın artırılması ile de basınç dayanımı sorununa çözüm olacağını düşünmüşlerdir. Çalışmada jeopolimer uçucu kül esaslı betonun atık plastiklerle birlikte kullanımının da uygun olacağı belirtilmiştir. Atık miktarını azaltacağı, endüstriyel malzemelerin dönüşünü sağlayacağı ve enerjiye olan talebin azalacağından dolayı da karbondioksit salınımlarını sınırlandırarak sürdürülebilir yapılar oluşturulmasının mümkün olduğu sonucuna varmışlardır.

Mohammadinia vd (2019) yaptıkları çalışmada hem atık plastik hem de atık camı birlikte kullanmışlardır. Betondaki iri agregaları %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında atık cam ve atık plastik ile değiştirmişlerdir. Araştırmanın sonucunda diğer çalışmalara paralel bulgular yani betonun içeriğinde atık malzemeler olduğunda özellikle basınç dayanımının düşmesinin en büyük sorun olduğuna değinmişlerdir. Özellikle de kaldırım imalatlarındaki betonun içeriğinin %50 oranına kadar atık cam veya atık plastik ile değiştirilmesinde sakınca olmayacağı da belirterek bu oranda bir kullanımın çevre sağlığına ve atık dönüşümüne etkisinin olumlu anlamda yüksek olacağı vurgulanmıştır.

He vd (2022), ıslak öğütülmüş plastik atığın beton üretimine etkilerini incelemişlerdir. Özellikle betonun ilk 12 saatlik sürede erken dayanımını, çimentolu betona kıyasla neredeyse 3 kat daha fazla olmasını sağlamasını tespit etmişlerdir. 3 ve 7 günlük dayanımı da yüksek olmasına rağmen 28 günlük dayanımları çimentolu betonla neredeyse aynı olmuştur. Öğütülmüş atık plastiğin miktarının artması betonun hidrasyon ısını arttırarak istenilen sonuçları verememiştir.

Atık plastik asfalt ve bitümlü karışımların içerisinde de kullanılarak yol uygulamalarının sürdürülebilir hale getirilmesi üzerine de çalışılmaktadır. Dünyanın küreselleşmesi ve bir ağ halinde birbirine bağlanması yol uygulamalarının da artmasını beraberinde getirmiştir. Bu yapıların yapılması sırasındaki açığa çıkan karbondioksit ve çevresel zararların önüne geçilmeye çalışılmaktadır.

Aldagari vd. (2022), yaptıkları çalışmayla atık polietilen tereftalat ve kırıntı kauçuğu bitkisel yağ ile birleştirerek bitümde kullanılmasının olası sonuçlarını değerlendirmişlerdir. İçeriğinde atık polietilen tereftalat olan bitümlerin kauçuk bitümlere oranla daha uyumlu çalıştığı gözlemlenmiştir. Ancak yorulma parametreleri dikkate alındığında ise kauçuk içeren bitümlerin daha dirençli olduğu belirtilmiştir. Saf bitümle karşılaştırıldığında ise hem kauçuk içerikli bitümün hem de plastik içerikli bitümün yaşlanmaya karşı daha dirençli olduğu sonucunu bulmuşlardır.

Almeida vd. (2020), düşük yoğunluklu polietilen atık plastiğin asfalt betonuna olan etkilerinin inceleyerek, atık içeren betona performans, sertlik, yorumla ve tekerlek izi direnci testleri uygulanmıştır. Uygulanan Marshall testi ile bitümün içerisinde ağırlıkça %6 oranında bulunan düşük yoğunluklu polietilen plastik atık en umut verici değerleri vermiştir. Atık plastik malzemenin eklenmesi asfalt betonunun hem sertliğini hem de tekerlek izi direncini arttırmıştır. Yorulma çatlaması direncini azaltan yaşlanma etkisi atık plastiklerle telafi edilebileceği de araştırmanın sonuçları arasında belirtilmiştir.

Heydari vd'nin (2021) yaptıkları çalışmada, atık plastiklerin kuru ve ıslak olarak iki yöntemle asfalt uygulamalarına olan etkilerini incelemişlerdir. Düşük yoğunluklu polietilenin hem kuru hem de ıslak olarak işlenmesi Marshall katsayısını stabilite değerini arttırdığını tespit etmişlerdir. Islak olarak işlenme ise kuru işlenmeye göre asfaltın daha sert olmasına sebebiyet verir. Atık plastiklerin asfalta eklenmesinin sonuçlarında literatürde uyumsuz sonuçların olmasına dikkat çeken çalışmada, sebep olarak da plastiğin hangi aşamada eklenmesinin farklı olması veya sıcaklık değerlerinin farklılıklarına bağlanmıştır. Yüksek sıcaklıkta oluşturulan karışımlarda plastiğin eriyeceği ve istenilen karışımların da oluşamayacağı çalışmada belirtilmiştir.

Skaikh vd'nin (2017), atık plastiğin özellikle bitüm karışımları için etkili bir bağlayıcılık sunduğunu belirtmişlerdir. Çatlak oluşumlarını engellemesi ve yağmur sularını daha az geçirgen olmasıyla da kullanıldıkları alanın hizmet ömrünün uzadığı sonucuna varmışlardır. Kaplama malzemesi olarak kullanımının uzun vadede hem çevresel hem de ekonomik fayda sağlayacağını da çalışmada ifade edilmektedir.

Atık plastiklerin inşaat mühendisliğinde kullanılabileceği bir diğer alan da zeminlerin stabilizasyonu ve güçlendirilmesidir. Kassa vd'nin (2020) yaptıkları çalışmada, üç farklı karışım oranında ve farklı boyutlarda atık plastik şeritler hazırlanıp genişleyen killi toprağa ilave etmişlerdir. Deney sonuçlarında zeminin kesme mukavemeti parametresinde önemli ölçüde iyileşme olduğunu kaydetmişlerdir. Ayrıca zeminin şişme ve kuruluğa bağlı çatlama oranlarında azalma meydana gelmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre atık plastik eklemek zeminde kayma direncini ve CBR değerlerini olumlu yönde etkilemiştir. Geleceğe dair iyi uygulamalar vaat eden çalışmada zeminlerin davranışlarının da inşaat mühendisliği özelinde daha çok test edilmesi gerektiğine dikkat çekilmiştir.

Atık plastikler ayrıca yalıtım malzemesi olarak da inşaat uygulamalarında sürdürülebilirlik kapsamında incelenmektedir. Barriguete vd'nin (2019) yaptıkları çalışmada, binalarda yaşanan nem sorunlarının çözümünde alternatif yol olarak plastik kablo atığı eklenen alçı bileşiklerinin suya dayanıklılık çerçevesinde performanslarını değerlendirmişlerdir. Atık plastik eklenen alçı karışımlarının su emme ve tutma kapasitesinde olumlu yönde gelişmelerin yaşandığını aktarmışlardır. Böylece güncel pazarda kullanılan alçıların yerine kullanılarak çevresel sorunlara da çare bulurken yapıların suya karşı dayanımlarının arttırılabileceğini belirtmişlerdir.

Atık plastik malzemesi inşaat alanında kullanımında en çeşitli uygulama alanı olan malzemelerden bir tanesidir. İri ve ince agrega yerine kullanımı, su ve ısı yalıtım malzemeleri içerisinde ve zemin stabilizasyonu haricinde sıva, tuğla, plastik fayans ve ahşap alternatifi gibi geleneksel yapı malzemeleri yerine de kullanımı çalışmalarla incelenmektedir (Ahmed, 2023).

Corinaldesi vd'nin (2015) yaptığı çalışmada, doğal kum ve kireçtaşı dolgusu gibi işlenmemiş ham maddelerin PET ve toz haline getirilmiş cam elyaf takviyeli plastik atıklarıyla değiştirilerek çeşitli sıva üretimlerini incelemişlerdir. Çeşitli oranlarda plastik atıkların alçı karışımlarına eklenmesiyle işlenebilir taze sıvalar elde edilmiştir. Atık plastik malzemesinin kullanılması ve hava sürükleyici katkı eklenmesiyle sıva ağırlığı %65 oranında azaltmıştır. Bu karışım ise iç mekân sıvalarında kullanıldığında ortamın nemini azalttığı ve buhar geçişine direnci arttırarak yalıtım seviyesini de yükselttiğini belirtmişlerdir. Uygulama alanı olarak da sülfatlara karşı direnci sayesinde eski yapıların restorasyonu için de kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Biswas ve Zhang (2021), atık plastiği stabilize edilmiş toprak ile birleştirerek tuğla üretiminde kullanmışlardır. Çalışma sonucunda içeriğinde %10 oranında yüksek yoğunluklu

plastik atık olan sıkıştırılmış toprağın yapısal olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Atık plastik içeren tuğlanın basınç dayanımı olarak standart tuğlaları yakalayabileceği inşaat uygulamalarına uygunluğunun göstergesidir. Ancak ısıya toleransının az olması ve yangın dayanımının düşüklüğünden dolayı mutfak ve baca benzeri yüksek ısıya maruz kalacak alanlarda kullanılması uygun olmamaktadır (Wendimu, Furgasa, & Hajji, 2021).

Behera vd (2018), hem plastik atıkları hem de cam atıkları birlikte kullanarak plastik bloklar ve plastik çatı kiremitleri örneklerinin inşaat mühendisliğine yapısal uygunluklarının test etmişlerdir. Plastik blok üretiminde en uygun sonucu veren karışımın içerik olarak %33 plastik, %11,2 ince cam, %11,2 ince kum ve %44,6 kaba cam içerdiğini belirtmişlerdir. Bu oranlardaki karışımın basınç dayanımı açısından daha uygun ve kullanılabilir olduğu bulunmuştur. Plastik kiremitler içinse %20-30 oranında plastik ve %46,67-53,33 oranında atık camın birleşimi daha dayanıklı kiremitlerin oluşmasını sağlamaktadır. Her iki malzemenin de inşaat uygulamalarında kullanılabilir olduğu sonucu sürdürülebilirlik açısından gelecek vaat etmektedir.

Salim vd'nin (2019), atık plastik elyaf ve cam tozunu kullanarak elde ettikleri kiriş elemanının geleneksel yapıya göre daha iyi eğilme ve çekme mukavemeti göstermesi, bu malzemelerin uygulama alanlarının çoğalması bakımından önem arz etmektedir.

Plastik atıklar çevresel etkileri bakımından incelenmesi ve inşaat mühendisliği gibi büyük sektörlerde atık dönüşümü yapılarak entegre edilmesi önemlidir. Doğada uzun süre kalabilen plastik malzemesinin dönüşümünün sağlanması, inşaat mühendisliği gibi imalat aşamasında yüksek hammadde ve doğal kaynak talebi olan bir disiplinin sürdürülebilir hale getirilmesinde çok etkin rol oynaması mümkün olacaktır. Yapılan çalışmalar uygulama alanında da test edilerek daha da kapsamlı hale gelmeli ve uygulamaların da alanlarının çeşitliliğinin artması için araştırma ve çalışmaların devam etmesi gerekmektedir.

2.4.4. Elektronik Atıkların İnşaat Uygulamalarında Kullanımı

Plastik malzemeler gibi elektronik aletlerde özellikle 2000'li yıllardan sonra hayatın her alanına girerek kullanılmaya başlanmıştır. Elektronik atık veya E-atık, atılan elektrikli veya elektronik cihazları ifade etmektedir. İçeriğinde kişisel bilgiler içeren elektronik cihazla geri dönüşüm konusunda da tedirginliğe yol açmaktadır. Elektronik atıkların uygunsuz imha edilmesi de çevreye zarar vermektedir. Bu nedenle uluslar arası kuruluşlar elektronik cihazların dönüşümlerini kontrollü şekilde sağlamayı amaçlamaktadırlar. Bu alanda inşaat

sektörü gene atıkların dönüşümünde öncü sektörlerden olmaktadır. İçeriğinde %0, %10 ve %12,5 elektronik atık içeren karışımların slump testlerine bakıldığında işlenebilirlik elektronik atıkların artmasıyla azalsa da %10 oranında elektronik atığın tolere edilebilir olduğu düşünülmektedir. Basınç dayanımı da slump testi gibi içeriğinde %10 e-atık olan betonda geleneksel beton ile aynı değerleri tutturabilmektedir. Ancak e-atık miktarı arttıkça basınç dayanımında azalma meydana gelmektedir. E-atıkların şekillerinin kötü ve yüzeylerinin pürüzsüz olmasından dolayı betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Needhidasan, Prabu, & Ramesh, 2020).

İçeriğinde kaba agrega yerine %5, %10, %15 ve %20 oranında E-atık olan beton karışımları karşılaştırıldığında hem basınç hem de süneklik değerlerinde atık oranı arttıkça azalmalar meydana gelmektedir. Ancak belli oranda kaldığı sürece değerlerin sabit olmasına neden olabilmektedir. Dayanımındaki azalmalar sebebiyle bu tarz betonların bölme duvar ve hafif çatı uygulamaları gibi mukavemetin birinci derece önemde olmadığı imalatlarda kullanılabileceği tahmin edilmektedir. E-atık malzemelerinin inşaat uygulamalarında kullanımı çevresel etkilerin azalmasına ve en sık kullanılan malzemelerin atık etkilerini de ortadan kaldırmaya yarayacaktır (Kumar & Baskar, 2014).

E-atıkların geri dönüşüm yüzdesi sadece %12,5 oranında olmaktadır. Laptop parçaları, baskılı devre kartları ve televizyon parçaları gibi atık malzemelerin geri dönüşümünün sağlanması önemlidir. İçeriğinde %0, %10, %20, %30 ve %40 oranında kum haline getirilmiş E-atık bulunan beton numuneleri mekanik özellikler bakımından değerlendirilmiştir. Özellikle içeriğinde %20 oranında E-atık kumu bulunan betonun geleneksel betona yakın özellikler içerdiği bulunmuştur. Eğilme ve yarıma mukavemetlerinde iyileşme görülen bu betonun özellikle darbe tehlikesinin bulunduğu ve doğrudan basınç yüklerine maruz kalan kaldırım, uçak pisti ve uçak park alanlarında kullanımı mümkün olacaktır. Klorür dayanıklılığı da geleneksel betona oranla fazla olan %20 E-atık kumlu betonun hizmet ömrünün de daha uzun olacağı düşünülmektedir (Mane, Nadgouda, & Joshi, 2021).

2.5. Sürdürülebilir Beton Uygulamaları

Karbondioksit salınımını ve betonun çevresel etkilerini azaltmak için geleneksel betonun içeriğinde çeşitli değişiklik yapılarak aynı dayanım ve performanslar elde edilmeye çalışılmıştır. Ancak bazı teknolojilerle beton malzemesinin çalışma mekanizması

değiştirilerek kullanım amacına paralel ve çevre dostu üretimi için bazı çalışmalar yapılmaktadır. Bu uygulamalardan bir tanesi olan geçirgen beton özellikle yapısındaki iri agrega miktarını arttırarak üretilen gözenekli betondur. Betonun içerisinde bırakılan boşluklar sayesinde örneğin kaldırımlarda kullanılarak su akışını kontrol ederek atık suların depolanmasına imkân vermektedir (Nilimaa, 2023).

Kuruppu vd (2019) geçirgen kaplama malzemelerinin kullanımının yapısal ve çevresel etkilerini incelemişlerdir. Özellikle yağmur sularının depolanmasına büyük fayda sağlayacağını belirtmişlerdir. Ancak maliyet analizinin bulunmaması uygulama imkânlarını sınırlamaktadır. Geçirgen betonun en uygun kullanım alanı yol ve kaldırım kaplamaları gibi görülmektedir. Mukavemet gereksinimi nispeten düşük olan bu yapılar geçirgen betonla suyun akışını kontrol ederek hizmet ömrünü uzatmaya fayda sağlayacaktır. Hidratasyon ısını düşürmesi ve enerjiye talebin azlığı da karbondioksit salınımlarını azaltmasıyla çevre dostu uygulamalar arasında kullanılabileceğini göstermektedir. Geçirgen betonun daha da sürdürülebilir yapıya evrilmesi içinde tamamlayıcı çimentolu malzemeler ve atık malzemelerle nasıl etkileşim halinde olacağı ve mekanik özelliklerinin ne derece değişeceği üzerine daha fazla araştırma ve maliyet değerlendirilmesi oluşturularak geçirgen betonun çevresel faydası da arttırılabilir (Singh, Sampath, & Biligiri, 2020).

Beton uygulamalarının bir çeşidi de ‘cool concrete’ (soğuk beton) uygulamasıdır. İçeriğine eklenen kaktı maddeleri ile üzerine gelen güneş ışıklarını yansıtarak kentsel ısı adası etkisini azaltıp daha soğuk bir yüzey sıcaklığına neden olur. Böylece sürdürülebilir kentler oluşturmak ve binaların soğutulması için harcanan enerjide azalmaya sebebiyet vereceğinden karbondioksit emisyonlarını da azaltmıştır. Soğuk beton uygulamalarını kaldırım, park alanları ve yollarda kullanılarak çevrenin hava kalitesini arttırmaya ve dış ortam sıcaklığının azalmasına sebep olarak ekosistemin ısınmasının önüne geçilebileceği düşünülmektedir (Nilimaa, 2023).

Sürdürülebilir beton uygulamalarına bir örnek de ultra yüksek performanslı beton (UHPC) uygulamasıdır. Amran vd’ye (2023) göre, içeriğinde yaklaşık %2 oranında çelik elyaf olan UHPC’nin malzeme fiyatlarında %30-40 arasında ve karbon emisyonlarında da yaklaşık %40 oranında düşüş gözlemlenmektedir. Betonun kesitlerinin daha ince olmasına imkân sağlaması çimentonun az kullanımı dolayısıyla da yine karbondioksit salınımlarını azaltmaktadır. UHPC kullanımında artış ve yaygınlaşma gözükse de özellikle yüksek başlangıç maliyeti ve tasarım zorlukları gelişmekte olan ülkelerde kullanımını

sınırlamaktadır. Maliyetleri azaltmak için de araştırmacılar üretilmiş kum ve uçucu kül malzemelerini UHPC içeriğine ekleyerek azaltmaya çalışmaktadırlar.

Hou vd (2021) UHPC'nin sürdürülebilirliğini arttırmak adına içeriğine kırmızı çamur ilave ederek taze ve sertleşmiş davranışlarını değerlendirmişlerdir. Kırmızı çamur hidratasyon süresini hızlandırması nedeniyle 7 günlük dayanıma olumlu etki etse de azalan işlenebilirlik özellikle karmaşık şekillere sahip yapılarda kullanımını zorlaştıracığı düşünülmüştür. Kırmızı çamurun sertleşme süresini ciddi oranda kısaltması hızlı onarın gerektiren projelere de bir alternatif çözüm olabilmektedir. Düşük enerji gereksinimi ve düşük radyasyon riski UHPC'yi çevreye duyarlı bir beton türü haline getirmektedir.

Betonun hizmet ömrünün daha uzun olması için araştırılan konulardan biri de self-healing concrete (Kendi Kendine İyileşen Beton) uygulamasıdır. Betonun kullanımı sırasında oluşacak olan çatlakların betonun dayanımına ve içeriğine zararlı maddeleri almasına sebebiyet vermesi hizmet ömrünü kısaltmaktadır. Self healing concrete uygulamalarıyla bu çatlakların olumsuz etkilerinin giderilmesi hedeflenmektedir. Gözenekli kalsiyum silikatların içeriğine bakteri sporları ekleyerek kendi kendini onarak betonun uygulama alanı test edilmiştir. Özellikle içeriğinde bakteri sporu bulunan betonun kaplama malzemesi olarak kullanılması yapının sürdürülebilirliğinde %12-50 oranında artış sağlayabilmektedir. Böylece yapıların karbon ayak izini %12 ve m³ başına yaklaşık 51 CO₂ eşdeğeri emisyonun önüne geçilebilmektedir (Justo-Reinoso, Arena, Reeksting, & Gebhard, 2023).

Sürdürülebilir betonu uygulamasının çevresel etkilerini daha da azaltmak için bakteri bazlı betonun bir de geri dönüştürülmüş agrega ile birleştirilerek kullanılması da araştırılmıştır. Bakteri taşıyıcı biyomineralizasyonla desteklenen geri dönüştürülmüş agreganın kalitesinde artış yaşanmaktadır. Sıradan geri dönüştürülmüş agregalı betona oranla bakteri bazlı geri dönüştürülmüş betonun 28 günlük basınç dayanımında %16,6 oranında artış ve kılcal su emme kapasitesinde %37,5 oranında azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca bakteri bazlı geri dönüştürülmüş agregalı betonda işlenebilirlik ve klorür direncinde de önemli miktarda iyileşmeler olduğu belirtilmektedir (Luo, Ji, Li, & Yang, 2024).

Bakteri bazlı betonun iyileştirilmesinde kullanılan bir diğer madde de halloysit kil nanotüpleridir. Maya yüklü bu kapsüller çimento ortamında dirençleri artırılarak daha dirençli hale getirilmiştir. Beton çatlaklarını iyileştirmede etkili olan bu yöntem çatlağın su geçirmezliğini %95 oranında fayda sağlayarak hizmet ömrünün de artmasına fayda sağlamıştır (Fahimizadeh, Pasbakhsh, Lee, Tan, & Yuan, 2024).

Teknolojik yenilik olarak beton uygulamalarında kullanılan en yenilikçi yöntemlerden biri 3D baskılı beton uygulamalarıdır. Bilgisayar kullanımı ve robotik yöntemler içermesi diğer sürdürülebilir beton uygulaması tekniklerinden ayrılmasına neden olmaktadır. Özellikle kullanımında imalat çeşitliliği ve kişiselleştirme seçenekleriyle gelecek vaat eden teknolojilerin en önemlisi konumundadır. 3D baskılı beton teknolojisinin işçilik maliyetlerini ve kalıp kullanımını azaltması verimliliği artırarak betonun ekonomik sürdürülebilirliğine de katkı sağlamaktadır (Nilimaa, 2023).

3D baskılı beton uygulamaları Portland çimentosu içerdiğinde karbon salınımlarına olan faydası istenilen seviyede olamamaktadır. Ancak Portland çimentosu yerine uçucu kül, silis dumanı ve cüruf gibi malzemelerin eklenmesi karbondioksit emisyonlarını azaltacaktır. Geleneksel portland çimentosu ile içeriğinde silis dumanı, uçucu kül, cüruf ve metakaolin içeren beton karşılaştırılmıştır. Bu içerikler çeşitli beton karışımlarına farklı yüzde olarak eklenmiştir. %50 uçucu kül-%10 silis dumanı, %40 uçucu kül-%20 metakaolin ve %60 cüruf içeren betonların 3D baskılı beton uygulamalarında kullanımının mümkün olabileceği belirtilmektedir. 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında %60 cüruf içeren beton ön plana çıkmaktadır. İçeriğinin değiştirilmesiyle de kullanım imkanı sunan 3D baskılı beton uygulamaları sürdürülebilir çevre dostu betonun en önemli temsilcilerinden olan bir teknolojik yeniliği temsil etmektedir (Colyn, Zijl, & Babafemi, 2024).

Kireçtaşı kalsine kil çimentosu sülfö-alüminat ve reaktif magnezyum oksit sistemleri de 3D betonun alternatif bağlayıcıları olarak incelenmektedir. Bu tarz bağlayıcıların kullanımı da uygun olan 3D betonun üretim tasarrufu, taşınma maliyetleri, uygulanabilirliğinin rahatlığı ve kullanım ömrünün dönüşümlü olması bu betonun çevre dostu olma yolundaki en büyük artılarını oluşturmaktadır (Bhattacharjee, Basavaraj, Rahul, & Santhanam, 2021).

3. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA KARBON AYAK İZİNİN SINIRLANDIRILMASI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALARIN İRDELENMESİ

Çevresel kirliliğin ve küresel ısınmanın artması doğrudan insan faaliyetleri ile bağlantılıdır. Bu tezde insanların ihtiyaçları doğrultusunda kullandıkları endüstriyel sektörlerin genel olarak çevre kirliliğine olan etkileri verilerle gösterilmiştir. Çevre kirliliği ve sera gazı etkilerinin inşaat mühendisliği özelinde hangi faaliyetlerle ne kadar etkilendiği oluşturulan veri tablolarında belirtilerek devletlerin kalkınma planlarında konu ile ilgili çalışmalar derlenmiştir. Küresel ısınma üzerine düzenlenen konferanslar ve uluslararası antlaşmalar çevre kirliliği sorununun sadece belli bir bölge halkını değil bütün dünyanın ortak bir sorun olarak gördükleri belirlenmiştir. Ülkeler gerek kalkınma planlarında karbon ayak izini sınırlandırma çalışmaları gerekse yürüttükleri politikalarla daha temiz bir çevre amaçlamaktadır. Sürdürülebilirliği sağlamada uygulama alanı en geniş ve nüfus artışı ile talebin artarak devam inşaat faaliyetlerini, daha yeşil hale getirme fikri ülkelerin küresel ısınma ile mücadelede ana başlıklarını oluşturmaktadır. Özellikle çimento üretimi kaynaklı karbondioksit salınımının küresel ısınma üzerinde etkili olduğu belirtilerek yeni üretim teknikleri değerlendirilmiştir. İnşaat faaliyetlerinin ortaya çıkardığı kirliliğin sebepleri belirlenerek konu ile ilgili çalışmalar açıklanmıştır.

Sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla ülkeler geliştirdikleri LEED, BREEAM, DGNB, CASBEE ve Green Star gibi sertifika sistemleri ile bu konuda somut adımlar atmışlardır. Sürdürülebilirlik kavramının öneminin ülkeler tarafından fark edilmeye başladığı 1987 Brundtland Raporu ve 1992 Rio Zirvesi yıllarında ilk yeşil bina sertifika sistemi olan BREEAM sertifikası da 1990 yılında İngiltere Yapı Araştırma Kuruluşu tarafından oluşturulması konuların paralelliği üzerine güzel bir örnek oluşturmaktadır. Sürdürülebilirlik kavramının önemli yapı taşlarından Kyoto Protokolü'nün 1997 yılında imzalanması ve 1998 yılında USGBC tarafından LEED sertifikasının oluşturulması yine inşaat mühendisliği uygulamalarında sürdürülebilirlik kavramının yakından takip edildiği gözlemlenmiştir. Sonrasında 2001 yılında CASBEE, 2003 yılında Green Star ve 2008 yılında da DGNB sertifikası ile yeşil bina sertifika sistemlerin yaygınlığı giderek artmıştır.

Dünyada kabul gören yeşil bina sertifikalarının farklı farklı ülkelerde ve kıtalarda oluşturulması da konunun dünya çapında ele alındığının ayrı bir göstergesi konumundadır.

A.B.D. merkezli üretilen LEED sertifika sistemi diğer sertifikalara kıyasla küresel çapta yaygınlık konusunda ön plana çıkmaktadır. LEED sertifikasının kendini güncellemesi, kapsayıcılığı ve puan sisteminin net olması yaygınlaşmasında önemli rol oynamıştır. LEED sertifikasının sadece binalara değil mahalle ve bölge çapında da verilebilmesi sürdürülebilirliğinin kapsamının da genişlemesine katkı sağlamaktadır. BREEAM ve DGNB sertifikaları Avrupa’da yaygınlaşmış ve kıta sınırlarını çok aşamamıştır. CASBEE ve Green Star ise daha bölgesel olarak çalışmalarını sürdürmektedirler.

Araştırmada yeşil bina sertifika sistemlerinin ortaya çıkış amaçları aynı olsa da konunun küresel çapta ele alınması gerekliliği tek bir sertifika sistemine bağlı kalamadığını ve sistemlerin bölgesel ve yerel koşullar ele alınarak özelleştirilmeleri gerektiği gözlemlenmiştir. İklim şartları, coğrafi yapı ve ekonomik gelişmişlik dünyanın her bölgesinde aynı olmaması bazı sertifikaların ülkelere özel modellerinin geliştirmesine sebep olmuştur. BREEAM sertifikasının bazı ülkelere özel sertifika sistemi oluşturması bu kapsamda değerlidir.

Sertifikaların değerlendirme süreçlerinde en çok puanın verildiği enerji kaynaklı karbondioksit salınımlarını sınırlama kategorisi yeşil bina sistemlerinin ortak bir paydada bulunduğu bir göstergesidir. Diğer değerlendirme kriterleri olan iç mekân kalitesi, sürdürülebilir arazi ve malzeme ve kaynak kullanımı da sertifikaların değerlendirdiği diğer ortak alanları oluşturmaktadır. Yapıların yaşam döngülerinin genel olarak değerlendirildiği sertifika sistemleri yapım aşaması, kullanım ömrü ve yapı geri dönüşümünün değerlendirilmesini de bütün olarak yapmaktadırlar.

Bu bağlamda oluşturulan sertifika sistemleri inşaat sektörünün çevresel etkilerini azaltarak doğayla iç içe yaşamaya çalışan bir inşaat mühendisliği uygulama alanı açığa çıkarmaktadır. Modern şehirlerin kurulluğu günümüzde inşaat faaliyetlerinin yeşil çerçevede gerçekleştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Yeşil bina sertifikasyon sistemleri de oluşturuldukları günden itibaren hem çevreyi hem de inşaat mühendisliği uygulamalarının geleceğini korumaktadır.

Uygulama alanı olarak geliştirilmeye çalışılan teknolojiler inşaat mühendisliğinde karbon sınırlama ve sürdürülebilirlik üzerine bir bilincin oluştuğunu göstermektedir. İnşaat uygulamalarının azalmadığını ve gerekli kentsel ilerlemelerin sağlanabilmesi için inşaat mühendisliğine duyulan ihtiyaç sürdürülebilirlik adı altında gerçekleşmelidir. Yapılan çalışmaların özeti doğal kaynak kullanımını sınırlamak, enerjiye olan talebin azaltılmasıyla karbon salınımlarını düşürmek ve endüstriyel atıkların geri dönüşümü sağlamaktır.

Bu bölümde inşaat mühendisliği uygulamalarında karbon ayak izinin sınırlandırılmasına yönelik yapılan bilimsel çalışmalar incelenerek elde edilen bulgular, sürdürülebilirlik de dikkate alınarak, irdelenmiştir.

Karbon ayak izinin sınırlandırılmasına yönelik inşaat mühendisliği uygulamalarında bağlayıcı olarak kullanılan ve üretimlerinde büyük miktarda enerji gerektiren dolayısıyla da karbon salınımlarını arttıran çimento klinkeri yerine farklı malzemeler kullanarak yeni formülasyonlar üzerinde çalışmalar yoğunlaşmaktadır. Zira beton en sık kullanılan malzeme olması nedeniyle çevre dostu hale getirilmesi gerekmektedir. Kullanılan tamamlayıcı çimentolu malzemeler günümüzde de kullanılmakta olup yaygınlaşması için deneysel olarak farklı oranlarda kullanımının sonuçları araştırılmaktadır.

Yapılan araştırmalardan, alternatif klinker teknolojilerinin kullanımında ise kireçtaşı kalsine kil kullanımı kısa ve orta vadede karbon ayak izinin sınırlandırılması bakımından betonu daha sürdürülebilir hale getirdiği görülmüştür. Ancak yine de hammaddeye olan talebinden dolayı karbon salınımlarını ve enerji talebini azaltsa da doğal kaynakların kullanımını istenilen oralarda henüz azaltmamaktadır.

Karbon ayak izinin sınırlandırılması ve sürdürülebilirlik konularında, doğada uzun zaman kalabilen cam, kauçuk ve plastik gibi malzemelerin dönüştürülerek inşaat mühendisliği uygulamaları gibi yoğun üretim talebi olan sektörde kullanılmasını da bilimsel olarak da araştırıldığı görülmüştür. Bu anlamda sadece beton üretiminde değil çeşitli kaplama malzemeleri, ısı ve su yalıtımında kullanılması ve zeminlerin iyileştirmesi üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. Hem atıkların dönüşmesini sağlayan hem de inşaat uygulamalarında karbon salınımlarını azaltan bu yöntemlerin gelecekte kullanım alanları da çeşitlendirilerek daha geniş bir uygulama alanına ulaşması mümkün olacaktır.

Beton üretiminin artması inşaat yıkıntı atıklarının artmasını beraberinde getirmektedir. Hizmet ömrünü tamamlayan, kentsel dönüşüme uğrayan veya deprem, sel ve yangın gibi doğal afetlerle kullanılamaz hale gelen yapılardan tekrar inşaat uygulamalarında kullanılabilecek agregaların mekanik özelliklerinin irdelenmesi de çevreye faydalı olacak yeni yöntemleri beraberinde getirmektedir. Yapılan çalışmalar geri dönüştürülmüş atık malzemelerin kullanımının çeşitli alanlarda uygunluğu belirtse de kullanılacak agreganın demir, sıva ve tuğla gibi diğer malzemelerden arınmış olması gerektiğine dikkat çekmektedir. Bu malzemeler ile karışık olarak kullanılacak agregaların betonun aderansının azaltacağı düşünülmektedir.

Karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojisi ise hem inşaat mühendisliği uygulamalarında hem de diğer endüstriyel sektörlerde uygulanması nedeniyle gelecek vaat eden en önemli teknolojik yöntem konumundadır. Karbondioksit salınımını sınırlandırmak için çalışmalar yoğunlaşsa bile genel olarak hiçbir çalışma karbondioksit salınımlarını tam anlamıyla sıfırlayabilme başarısını henüz gösterememişlerdir. Karbondioksitin açığa çıkması bu kadar kesin gibi gözükürken açığa çıkan karbondioksiti yakalayıp yeniden kullanmayı hedefleyen bu teknoloji kendi içerisinde bir karbondioksitin geri dönüşümünü sağlamayı hedeflemektedir. Ancak hem çimento endüstrisi hem de diğer ağır sanayide kullanılan teknolojilerin değişmesi de maliyet ve zaman almaktadır. Uygulandığında ise özellikle 2050 yılına kadar karbon emisyonlarını sıfıra indirmek isteyen ülkelerde gerekli faydayı sağlayabileceği düşünülen teknolojilerin başında gelmektedir. Bunlar arasında oksitle yakma teknolojisi karbondioksit yakalamayı daha kolay hale getirdiğinden karbon yakalama teknolojisinin öne çıkan kollarından bir tanesi konumundadır. Maliyetinin ve yaşam döngüsü analizinin araştırılması gereken karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojisi üzerine çalışmalar yoğunlaşmalıdır.

Alternatif klinker teknolojileri kapsamında Gartner ve Sui (2018) reaktif belit malzemesinin oranını klinker içeriğinde arttırarak geleneksel portland çimentosunun üretimine kıyasla klinker tonu başına 32 kg daha az karbon salınımının gerçekleşeceğini belirttikleri çalışmaları inşaat mühendisliği uygulamalarında karbon ayak izinin sınırlandırılması adına umut vericidir.

Scrivener vd'nin (2018) kireçtaşı kalsine kil içerikli klinker üretim çalışmaları, kilin 700-850°C'lik kalsinasyon sıcaklığı nedeniyle enerji talebinin önemli ölçüde azalmasına ve böylece üretimde açığa çıkacak karbondioksit salınımların da düşmesine neden olacaktır. Kilin geleneksel döner fırınlarda, döner ocaklı fırınlarda ve seramik endüstrisinde sıkça kullanılan tünel veya mekik fırınlarında da kalsine edilebil olması yaygınlaşmasının da nispeten kolay olacağını göstererek karbondioksit salınımlarının sınırlandırılması konusunda öne çıkmaktadır.

Uzun vadede inşaat mühendisliği uygulamaları ve diğer endüstriyel sektörlerin karbon ayak izlerini sınırlandırmada gelecek vaat eden teknolojilerden öne çıkan karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojisidir. Cavalet vd'nin (2022) karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojileri kapsamında çimento üretiminde oksiyakıt kullanımının küresel iklim değişikliği etkilerini %74 ila %91 oranında azaltacağını belirtmeleri de inşaat mühendisliği uygulamalarının sürdürülebilirliği açısından net bir tablo ortaya koymaktadır.

Atıkların geri dönüşümünün inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımını araştıran çalışmalarda, beton malzemesinin içeriğine cam, kauçuk, plastik ve E-atık malzemeleri belli yüzdelere karıştırılarak koyulması da geri dönüşüm sağlanarak çevresel etkilerin azaltılmasında rol oynayabileceğini göstermektedir.

Kauçuğun beton uygulamalarında kullanımında çalışmalarda genellikle ortak sonuçlar bulunmuştur. Kauçuk betonun basınç dayanımını ve bükülme mukavemetini azalttığı ancak darbe emilimi arttırarak daha esnek beton üretimi sağlanabileceğini çalışmalarda belirtmiştir. Sofi'nin (2018) kauçuğun agrega olarak kullanıldığı bir çalışmada, kullanım alanı olarak da darbeye olan direncinin yüksek olmasından dolayı kaldırımlarda, zeminlerde, beton otoyollarda, tüneller ve baraj dolu savakları gibi hidrolik yapılarda veya hizmet ömrü boyunca hareketli yüklere maruz kalan yüzeylere uygulanmasının uygun olacağı sonuçları belirterek kauçuğun inşaat mühendisliği uygulamalarında ki farklı imalatlarına örnekler vermeleri kauçuğun inşaat uygulamalarında kullanımını değerli hale getirmektedir.

Atık malzemesi olarak en çok üretilen malzemedен biri de plastik malzemesidir. Plastiğin inşaat mühendisliği uygulamalarında yeniden kullanımı plastikten kaynaklı çevresel yükün azalmasına sebebiyet vermesi bakımından değerlidir. Almeida vd. (2020), düşük yoğunluklu polietilen atık plastiğin asfalt betonuna olan etkilerinin inceleyerek, atık içeren betona performans, sertlik, yorumla ve tekerlek izi direncini test ettikleri çalışmalarında atık plastik malzemenin eklenmesi asfalt betonunun hem sertliğini hem de tekerlek izi direncini arttırarak, yorulma çatlaması direncini azaltan yaşlanma etkisini atık plastiklerle telafi edilebileceği de belirtmişlerdir. Ulaşım ağlarının geliştiği ve yol imalatlarının yoğun olarak kullanıldığı inşaat mühendisliğinde plastik bu kullanım alanı karbon ayak izinin sınırlandırılmasını sağlayacaktır.

Khan vd'nin (2020) yaptıkları çalışmada, geleneksel portland çimentosunun ıslanmış atık polietilen tereftalat (PET) ve silis dumanı ile değiştirilmesinin etkilerini inceleyerek yarı esnek dış cephe kaplamalarında kullanılabileceğini belirterek sürdürülebilir inşaat çözümlerine katkı sağlayacağına değinmişlerdir.

İnşaat mühendisliği uygulamalarında karbon ayak izinin sınırlandırılma çalışmaları deneysel sonuçları da dikkate alınarak pratik uygulamalarla birleştirilmesi gerekmektedir. Araştırmaların farklı alanlarda ve farklı uygulamalarda ilerlemesi de karbon ayak izinin sınırlandırılması üzerinde olumlu etkiler gösterecektir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada inşaat mühendisliği uygulamalarında karbon ayak izinin sınırlandırılması ve sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla bir sentez çalışması yapılmıştır. Bu sentez çalışması ışığında, inşaat mühendisliği uygulamalarında karbon ayak izinin sınırlandırılması ve sürdürülebilirliğe yönelik elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

- Artan nüfusun ve üretimin sonucunda karbondioksit salınımları her yıl artarak devam etmektedir. Kontrol edilemeyen kentsel nüfus artışı beraberinde inşaat mühendisliği uygulamalarının da artmasına sebep olmaktadır. Malzeme üretimi, ulaşım, imalat ve hizmet ömrü süresince karbon ayak izine sebebiyet veren inşaat mühendisliği uygulamaları da çevresel sorunlara sebep olmaktadır.
- Yapıların imalat, inşaat ve hizmet ömrü boyunca karbon salınımlarını ve sürdürülebilirliğini değerlendiren yeşil bina sertifika sistemleri kentsel alanlardaki karbon ayak izinin sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır.
- Sertifikaların çeşitlendirilerek sadece yapılara değil, yapıların kuruldukları çevreyle beraber etkileşimleri de gözetilerek yeşil mahalleler ve yeşil şehirler kapsamında daha geniş değerlendirme alanı bulması inşaat mühendisliği uygulamalarının karbon ayak izini sınırlamada etkin rol oynayacaktır.
- İnşaat mühendisliği uygulamalarında karbondioksit salınımının en yoğun gerçekleştiği aşama çimento malzemesi klinkerinin üretimi esnasında yaşanmaktadır. Yüksek enerji talebiyle kömür, petrol ve doğal gaz gibi yakıtların kullanılması yüksek seviyede karbon ayak izine sebebiyet vermektedir.
- Araştırmalar incelendiğinde klinkerin enerji talebini azaltacak yeni malzemeler üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Reaktif belit, yağlı şist ve karbonatlanabilir kalsiyum silikat malzemelerinin beton üretiminde kullanılması betonun mekanik özelliklerinin istenilen düzeylerde olmasını sağlayarak, geleneksel portland çimentosu ile üretilen betona kıyasla karbon ayak izinin daha az olmasına sebebiyet vermektedir.

- Uçucu kül, silis dumanı ve cüruf gibi tamamlayıcı çimentolu malzemelerin kullanımı da klinker üretiminin enerji ihtiyacını azalması ve betonun yapısal özelliklerini bozmadan kullanılabilir seviyede tutmasıyla inşaat mühendisliği uygulamalarında karbon ayak izini sınırlandırılmasında etkili rol oynamaktadır.
- Nüfus artışının beraberinde getirdiği plastik, cam, kauçuk ve elektronik atıklar küresel çapta artarak çevresel sorunlara neden olmaktadır. Doğada uzun yıllar kalabilen bu malzemeler inşaat mühendisliği uygulamalarında çeşitli alanlarda geri dönüştürülerek kullanımı araştırılmaktadır. Yapılan araştırmalar bu atık malzemelerin bölme duvar, kaplama imalatları, asfalt, ısı ve su yapıtımı, kiremit üretimi gibi farklı kullanımlarının mümkün olduğunu belirtse de betonun basınç dayanımına olan azaltıcı etkilerinden dolayı taşıyıcı elemanlarda uygulanmasını sınırlamaktadır.
- En yoğun atık malzemesinin plastik olduğu günümüzde bu malzemenin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımının artması gerekmektedir. Sadece beton özelinde değil fayans, alçı, sıva, kaplama, yalıtım, pencere ve kapı imalatları gibi alanlarda daha sık kullanımı araştırılmalıdır.
- İnşaat uygulamaları her ne kadar karbondioksit salınımının sebeplerinden biri olsa da yapılan çalışmalar inşaat sektörünü daha yeşil ve daha çevre dostu uygulamalar haline getirebileceğini göstermektedir.
- Paris Antlaşması'nda belirtildiği gibi gelişmiş ülkelerin öncü olarak bu uygulamaların kullanımını genişletmeli ve geliştirmekte olan ülkelerle birlikte çalışıp gerekli destekleri hem ekonomik hem de teknolojik anlamda vermelidirler.
- Yüksek karbon salınımına neden olan çimento yerine başka bileşenli bağlayıcı üretmek için çalışmalar yapılmalıdır.
- Endüstriyel atıkların inşaat mühendisliği uygulamalarında farklı kullanımları ile ilgili çalışmalar karbon ayak izini sınırlandırmak için sürdürülmelidir.
- Karbon ayak izini sınırlandırmak için inşaat mühendisliği uygulamalarının her alanında yeşil bina sertifikası zorunlu hale getirilmelidir.

5. KAYNAKLAR

- Abdelmonem, A., El-Feky, M., Nasr, E.-S. A., & Kohail, M. (2019). Performance Of High Strength Concrete Containing Recycled Rubber. *Construction and Building Materials*, 227, 1-10.
- Ada, A. A. (2015). Kümeleme Analizi ile AB Ülkeleri ve Türkiye'nin Sürdürülebilir Kalkınma Açısından Değerlendirilmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*(29).
- Adnan, H. M., & Dawood, A. O. (2021). Recycling Of Plastic Box Waste İn The Concrete Mixture As A Percentage Of Fine Aggregate. *Construction and Building Materials*, 284, 1-13.
- Ahmed, N. (2023). Utilizing Plastic Waste in The Building and Construction Industry: A Pathway Towards The Circular Economy. *Construction and Building Materials*, 383, 1-17.
- Ak, E. (2022). BIM ile Bütünleşmenin LEED Sertifikasyon Sürecine Etkilerinin Enerji Kriteri Kapsamında İncelenmesi. *Yapı Bilgi Modelleme*, 3(2), 76-85.
- Akdoğan, L. (2023). Sürdürülebilir Tüketim: Kavramsal Bir Çalışma. *Oğuzhan Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(1), 43-53.
- Akın, G. (2006). Küresel Isınma, Nedenleri Ve Sonuçları. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 46(2), 29-43.
- Aksay, S. C., Ketenoğlu, O., & Kurt, L. (2005). Küresel Isınma ve İklim Değişikliği. *Selçuk Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*(25), 29-41.
- Akyol, H., & Gül, K. (2022). Yolsuzluklar, Ekonomik Büyüme Ve Çevre Vergileri İlişkisinin Gözden Geçirilmesi: Oecd Ülkeleri Örneği. *aradeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Dergisi*, 12(24), 267-293.
- Alada, A., Gürpınar, E., & Budak, S. (2012). Rio Konferansı Üzerine Düşünceler. *İstanbul Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi*(3-4-5), 93-108.
- Aldagari, S., Kabir, S. F., & Fini, E. H. (2022). A comparative study on efficacy of waste plastic and waste Rubber in bitumen. *Construction and Building Materials*, 325, 1-11.
- Ali, E., & Al-Tersawy, S. (2012). Recycled Glass As A Partial Replacement For Fine Aggregate İn Self Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 785-791.
- Aliusta, H., & Yılmaz, B. (2020). Karbon Maliyetlerinin Muhasebeleştirilmesi: Çimento Sektörü Uygulaması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 15(1), 267-294.

- Almeida, A., Capitão, S., Bandeira, R., Fonseca, M., & Picado-Santos, L. (2020). Performance of AC Mixtures Containing Flakes of LDPE Plastic Film Collected from Urban Waste considering ageing. *Construction and Building Materials*, 232, 1-11.
- Al-Otoom, A. Y. (2006). Utilization of Oil Shale in The Production of Portland Clinker. *Cement & Concrete Composites*, 28, 3-11.
- Alqahtani, F. K., Abotaleb, İ. S., & ElMenshawy, M. (2021). Life Cycle Cost Analysis of Lightweight Green Concrete Utilizing Recycled Plastic Agregates. *Journal of Building Engineering*, 40, 1-12.
- Amran, M., Murali, G., Makul, N., Tang, W., & Alluqmani, A. E. (2023). Sustainable Development of Eco-Friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC): Cost, Carbon Emission, and Structural Ductility. *Construction and Building Materials*, 398, 1-34.
- Anbarcı, M., Ömer, G., & Demir, İ. H. (2012). Uluslararası Yeşil Bina Sertifika Sistemleri ile Türkiye'deki Bina Enerji Verimliliği Uygulaması. *Engineering Sciences*, 7(1), 368-383.
- Apaydın, A. (2002). Sera Etkisi Yapan Gazlar ve Küresel Isınma. *Mavi Gezegen*, 24-29.
- Aras, B. B. (2019). Kentsel Sürdürülebilirlik Kapsamında Yeşil Çatı Uygulamaları. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 8(1), 469-504.
- Arat, Y., & Kaçar, A. (2020). Sürdürülebilir Binalara Yeşil Ergonomi Çerçevesinden Bir Bakış: Konya Gıda Ve Tarım Üniversitesi Kampüsü. *Ergonomi*, 3(1), 18-32.
- Atahan, A. O., & Yücel, A. Ö. (2012). Crumb Rubber İn Concrete: Static And Dynamic Evaluation. *Construction and Building Materials*, 36, 617-622.
- Aybike, M., & Arıkan, O. (2022). Avrupa Birliği (AB) ve Türkiye'de Döngüsel Ekonomi ve Sıfır Atık Yönetimi. *Çevre İklim Ve Sürdürülebilirlik*, 23(1), 69-78.
- Barriguete, A. V., Atanes-Sánchez, E., Río-Merino, M. d., & Piña-Ramírez, C. (2020). Analysis of The Improved Water-Resistant Properties of Plaster Compounds With The Addition of Plastic Waste. *Construction and Building Materials*, 230, 1-10.
- Batayneh, M. K., Marie, I., & Asi, İ. (2008). Promoting The Use of Crumb Rubber Concrete in Developing Countries. *Waste Management*, 28, 2171-2176.
- Bayat, F., & Küçükali, U. F. (2021). Sürdürülebilirlik Bağlamında Yeşil Binaların Ulusal ve Uluslararası Örnekler Üzerinden İncelenmesi. *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 16(64), 321-347.
- Behera, D., Damtew, Y., & Mola, A. (2018). Experimental Investigation On Recycling Of Plastic Wastes and Broken Glass in to Construction Material. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 6(1), 1658-1667.

- Bektaş, T., & Güleç, F. Ö. (2021). Çimento Sektöründeki İşletmelerin Finansal ve Finansal Olmayan Bilgilerine Yönelik Performans Değerlendirmesi. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 6(4), 756-779.
- Bertiz, Deniz, Ekşi, I., Tokmak, M., Özbey, D., Ak, M., & Güneş, A. (2019). Yeşil Altyapı Açısından Uluslararası ve Ulusal Yeşil Bina Sertifika Sistemlerinin Karşılaştırılması. *PEYZAJ - Eğitim, Bilim, Kültür ve Sanat Dergisi*(2), 31-39.
- Beytaş, V., & Aydın, G. (2022). Sağlık Kurumlarında Çevreye Duyarlı Politikalar: Yeşil Hastane Örnekleri. *Ekonomi Maliye İşletme Dergisi*, 5(2), 336-356.
- Bhattacharjee, S., Basavaraj, A. S., Rahul, A., & Santhanam, M. (2021). Sustainable Materials for 3D Concrete Printing. *Cement and Concrete Composites*, 122, 1-14.
- Binboğa, G. (2014). Uluslararası Karbon Ticareti Ve Türkiye. *Journal of Yasar University*, 9(34), 5732-5759.
- Biswas, W. K., & Zhang, X. (2021). Techno-Assessment of the Use of Recycled Plastic Waste in RE. *Sustainability*, 13, 1-20.
- C.G., J. M., & Siddique, R. (2015). Recent Advances In Understanding The Role Of Supplementary Cementitious Materials In Concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 71-80.
- Can, F. (2017). Sürdürülebilir Kalkınmanın Yeni Boyutları. *International Journal of Academic Value Studies*, 3(10), 138-146.
- Carbon Brief. (2023, 10 3). Carbon Brief: <https://www.carbonbrief.org/analysis-global-co2-emissions-from-fossil-fuels-hit-record-high-in-2022/> adresinden alındı
- Carbon Brief. (2023, 1 5). Analysis: Growth of Chinese fossil CO2 emissions drives new global record in 2023: <https://www.carbonbrief.org/analysis-growth-of-chinese-fossil-co2-emissions-drives-new-global-record-in-2023/> adresinden alındı
- (2011). *CASBEE for Market Promotion*. Japan Sustainable Building Consortium.
- Castillo, E. d., Almesfer, N., Saggi, O., & Ingham, J. M. (2020). Light-Weight Concrete With Artificial Aggregate Manufactured From Plastic Waste. *Construction and Building Materials*, 265, 1-10.
- Cavalett, O., Watanabe, M. D., Fleiger, K., & Hoenig, V. (2022). Lca And Negative Emission Potential Of Retrofitted Cement Plants Under Oxyfuel Conditions At High Biogenic Fuel Shares. *Scientific Reports*, 12, 1-14.
- CMBS. (2023, 11 24). *Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi*. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi: <https://www.mevzuat.gov.tr/> adresinden alındı
- Colyn, M., Zijl, G. v., & Babafemi, A. J. (2024). Fresh and Strength Properties of 3D Printable Concrete Mixtures Utilising a High Volume of Sustainable Alternative Binders. *Construction and Building Materials*, 419, 1-14.

- Corinaldesi, V., Donnini, J., & Nardinocchi, A. (2015). Lightweight Plasters Containing Plastic Waste For Sustainable And Energy-Efficient Building. *Construction and Building Materials*, 94, 337-345.
- Cömertler, S., & Cömertler, N. (2021). Akıllı Kentlerde Çevresel, Sosyal ve Ekonomik Sürdürülebilirlik, Kopenhag Örneği. *Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi*, 6(1), 317-333.
- Çelik, Y., & Sofracı, E. İ. (2022). Sürdürülebilir Kalkınma Politikası Aracı Olarak Çevre Vergileri: Türkiye ve Seçilmiş Ülkelerde Çevre Vergilerinin Değerlendirilmesi. *Bulletin of Economic Theory And Analysis*, 7(1), 1-31.
- Çelikyay, H. H. (2021). Türkiye’de Çevre Politikaları: Kalkınma Planları Üzerinden Bir İnceleme. *İktisadi İdari Ve Siyasal Araştırmalar Dergisi*, 6(15), 185-205.
- Çokgezen, J. (2007). Avrupa Birliği Çevre Politikası ve Türkiye. *Marmara Üniversitesi İİBF Dergisi*, 23(2), 91-115.
- Çömert, R., Bilget, Ö., & Çabuk, A. (2012). Kyoto Protokolüne İmza Atan G20 Ülkelerinin Yıllara Göre Karbon Salınımlarının(1990- 2012) Coğrafi Bilgi Sistemleri Yardımı İle Analizi. 883-891.
- ÇŞB. (2020, 1 23). 12 8, 2023 tarihinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı: <https://csb.gov.tr/yerli-yesil-sertifika-sistemi-yes-tr-ile-yesil-bina-sayisi-artacak-bakanlik-faaliyetleri-29700-adresinden-alindi>
- Dal, Ş., & Akçay, O. N. (2021). Fen Bilimleri Öğretmenlerinin Sürdürülebilir Kalkınma Farkındalıklarının Bazı Değişkenlere Göre Belirlenmesi. *Dicle Üniversitesi Ziya Gökalp Eğitim Fakültesi Dergisi*(40), 45-55.
- DGBN. (2023). 11 25, 2023 tarihinde Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen: <https://www.dgnb.de/en/dgnb/about-dgnb> adresinden alındı
- (2020). *DGNB System*. DGBN New Construction , Buildings Criteria Set.
- Doan, D. T., & Qin, L. (2023). Impacts of Green Rating Systems on The Economy And Society. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1-7.
- Durak, Ş., & Ayyıldız, S. (2022). Geleneksel Kırsal Konutların Ekolojik Açıdan Araştırılmasında Uluslararası Leed ve Breeam Değerlendirme Sistemlerinin Kullanılması: Yalova Örneği. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(1), 85-102.
- Emrealp, S. (1998). Yerel Gündem 21. *Öneri Dergisi*, 2(10), 27-28.
- Erdede, S. B., & Bektaş, S. (2018). Ulusal Bir Yeşil Bina Sertifika Sistemi İçin Arazi Yönetimi Kriter Önerisi. *International Symposium on Innovative Apprpches in Scientific Studies*(3), 182-187.

- Erdede, S. B., Erdede, B., & Bektaş, S. (2014). Kentsel Dönüşümde Yeşil Binaların Uygulanabilirliği. *UZAKTAN ALGILAMA-CBS SEMPOZYUMU*, (s. 14-17). İstanbul.
- Erdoğan, S. (2020). Enerji, Çevre ve Sera Gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler*, 10(1), 277-303.
- Ergün, T., & Çobanoğlu, N. (2012). Sürdürülebilir Kalkınma Ve Çevre Etiği. *Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 97-123.
- ERMCO. (2019). *Ready-Mixed Concrete Industry Statistics*. ERMCO.
- Erten, D., & Yılmaz, A. Z. (2011). LEED ve BREEAM Sertifikalarında Enerji Performans. *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 13-16.
- Eştürk, Ö., & Tormuş, N. B. (2022). Türkiye’de İklim Değişikliği ve İnşaat Sektörü: Paris İklim Antlaşması. *VI. Anadolu International Conference on Economics*, 1-18.
- Eurostat. (2024, 1 2). Eurostat: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_taxind2/default/table?lang=en&category=env.env_eta adresinden alındı
- Fahimizadeh, M., Pasbakhsh, P., Lee, S. M., Tan, J. B., & Yuan, P. (2024). Sustainable Biologically Self-Healing Concrete by Smart Natural Nanotube-Hydrogel System. *Developments in the Built Environment*, 18, 1-18.
- Gartner, E., & Sui, T. (2018). Alternative Cement Clinkers. *Cement and Concrete Research*, 114, 27-39.
- GBCA. (2024). *Green Star Project Directory*. 1 8, 2024 tarihinde Green Building Council Australia: <https://www.gbca.org.au/project-directory.asp> adresinden alındı
- GCP. (2022). *Global Carbon Budget*.
- Gedik, Y. (2020). Sosyal, Ekonomik ve Çevresel Boyutlarla Sürdürülebilirlik Ve Sürdürülebilir Kalkınma. *International Journal of Economics, Politics, Humanities & Social Sciences*, 3(3), 197-215.
- Gerges, N. N., Issa, C. A., & Fawaz, S. A. (2018). Rubber Concrete: Mechanical And Dynamical Properties. *Case Studies in Construction Materials*, 9, 1-13.
- Goncharov, A., & Zhutovsky, S. (2022). Eco-Friendly Belite Cement From Crude Calcareous Oil Shale With Low Calorific Value. *Cement and Concrete Research*, 159, 1-13.
- Gökçen, T., & Perker, S. (2022). Yeşil Bina Oluşturma Deneyimi Üzerine Fenomenolojik Bir Araştırma. *Mimarlık Ve Yaşam*, 7(2), 449-465.
- Gökşen, F., Güner, C., & Koçhan, A. (2017). Sürdürülebilir Kalkınma İçin Ekolojik Yapı Tasarım Kriterleri. *Akademia Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Dergisi*, 3(1), 92-107.

- Güler, Y. (2018). Sera Gazları, İklim Değişikliğinde Sera Gazı Emisyonlarının Rolü ve Emisyon Ticareti. *In 2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management*, 517-527.
- Gültekin, R. (2022). Avrupa Birliği Sınırdaki Karbon Düzenlemesi ve Türkiye Açısından Bir Değerlendirme. *Balkan ve Yakın Doğu Sosyal Bilimler Dergisi*(8), 203-213.
- Güzelkocar, O., & Gelışen, G. (2019). Mevcut Yapıların Sürdürülebilir Yeşil Binalara Dönüştürülmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2(2), 76-90.
- Haftacı, V., & Kamuran, S. (2007). Çevre Kirlenmesi ve Çevre Koruma Bağlamında Çevre Muhasebesinin Önemi. *Muhasebe Ve Finansman Dergisi*(33), 102-120.
- Hamada, H. M., Al-Attar, A., Farid, A., Beddu, S., Humada, A. M., Majdi, A., . . . Thomas, B. S. (2024). Enhancing Sustainability in Concrete Construction: A Comprehensive Review of Plastic Waste As an Aggregate Material. *Sustainable Materials and Technologies*, 40, 1-20.
- He, X., Li, W., Su, Y., Zheng, Z., Fu, J., Zeng, J., . . . Yan, J. (2022). Recycling of Plastic Waste Concrete to Prepare an Effective Additive for Early Strength and Late Permeability Improvement of Cement Paste. *Construction and Building Materials*, 347, 1-13.
- Heydari, S., Hajimohammadi, A., Javadi, N. H., & Khalili, N. (2021). The Use of Plastic Waste in Asphalt: A Critical Review on Asphalt Mix Design and Marshall Properties. *Construction and Building Materials*, 309, 1-13.
- Hossain, M. U., Poon, Sun, C., Dong, Y. H., & Xuan, D. (2018). Evaluation Of Environmental Impact Distribution Methods For Supplementary Cementitious Materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 597-608.
- Hou, D., Wu, D., Wang, X., Gao, S., Yu, R., Li, M., . . . Wang, Y. (2021). Sustainable Use of Red Mud in Ultra-High Performance Concrete (UHPC): Design and Performance Evaluation. *Cement and Concrete Composites*, 115, 1-15.
- IEA, I. E. (2022). *CO2 Emissions in 2022*. International Environmental Agency.
- İklim Değişikliği Başkanlığı. (2023, 12 16). İklim Değişikliği Başkanlığı: <https://iklim.gov.tr/bm-iklim-degisikligi-cerceve-sozlesmesi-i-33> adresinden alındı
- Işıl, Ş., & Çiftçi, E. T. (2021). İklim Değişikliği İle Mücadelede Türkiye İçin Karbon Vergisi Önerisi. *Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 16(2), 254-269.
- Jaganmohan, M. (2024, 02 22). Statista. 2024 tarihinde Statista Web Sitesi: <https://www.statista.com/statistics/275387/global-natural-rubber-production/> adresinden alındı
- Jang, J., & Lee, H. (2016). Microstructural Densification and CO2 Uptake Promoted by The Carbonation Curing of Belite-Rich Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, 82, 50-57.

- Justo-Reinoso, I., Arena, N., Reeksting, R., & Gebhard, S. (2023). Bacteria-Based Self-Healing Concrete: A Life Cycle Assessment Perspective. *Developments in the Built Environment*, 16, 1-14.
- Karabıçak, M., & Özdemir, B. M. (2015). Sürdürülebilir Kalkınmanın Kavramsal Temelleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 6(13), 44-49.
- Karakaya, E. (2016). Paris İklim Antlaşması: İçeriği ve Türkiye Üzerine Bir Değerlendirme. *Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 1-12.
- Kardemir, A., & Dağ, A. (2021). Sürdürülebilirlik Uygulaması Olarak Yeşil Bina ve LEED Sertifikasyonu Üzerine Türkiye’de İnşaat Sektöründe Bir Çalışma. *Akademia Doğa Ve İnsan Bilimleri Dergisi*, 7(1), 63-83.
- Kassa, R. B., Workie, T., Abdela, A., Fekade, M., Saleh, M., & Dejene, Y. (2020). Soil Stabilization Using Waste Plastic Materials. *Open Journal of Civil Engineering*, 10, 55-68.
- Kaya, F., & Nurcan, E. (2021). Kalkınmanın Çevre Sorunları Üzerine Etkisi: Sürdürülebilir Kalkınma Kavramına Bütüncül Bir Bakış. *Şehir Sağlığı Dergisi*, 2(2), 79-84.
- Kaya, H. (2020). Kyoto’dan Paris’e Küresel İklim Politikaları. *Meriç Uluslararası Sosyal ve Stratejik Araştırmalar Dergisi*, 4(10), 165-191.
- Kaypak, Ş. (2011). Küreselleşme Sürecinde Sürdürülebilir Bir Kalkınma İçin Sürdürülebilir Bir Çevre. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 13(20), 19-33.
- Khan, M. I., Sutanto, M. H., Napiyah, M. B., Khan, K., & Rafiq, W. (2021). Design Optimization And Statistical Modeling Of Cementitious Grout Containing Irradiated Plastic Waste And Silica Fume Using Response Surface Methodology. *Construction and Building Materials*, 271, 1-18.
- Kılıç, C. (2009). Küresel İklim Değişikliği Çerçevesinde Sürdürülebilir Kalkınma Çabaları Ve Türkiye. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 10(2), 19-41.
- Kılıç, S. (2006). Yeni Toplumsal Ve Ekonomik Arayışlar Sürecinde Sürdürülebilir Kalkınma. *Gazi Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(2), 81-101.
- Kim, I. S., Choi, S. Y., & Yang, E. I. (2018). Evaluation Of Durability Of Concrete Substituted Heavyweight Waste Glass As Fine Aggregate. *Construction and Building Materials*, 184, 269-277.
- Kızıltan, B., & Doğan, D. U. (2021). Çimento Sektöründe Karbon Ayak İzlerinin Raporlanması Amacıyla Bir Çerçeve Önerisi. *Çağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 18(1), 40-58.

- Koçak, A. İ., & Topay, M. (2022). Eko-Kentleşme İlkeleri Kapsamında “Leed, Breeam ve Yes_Tr” Değerlendirme Araçlarının Karşılaştırılması. *Ecological Perspective an International Academic Journal*, 52-66.
- Kotsay, G., & Jaskulski, R. (2019). Belite Cement As an Ecological Alternative to Portland Cement - A Review. *Materials Structures Technology*, 2(1), 70-76.
- Köksal, B. (2020). Yapı Malzemelerinin Gömülü Karbon Miktarına Etkisi. *Yapı Bilgi Modelleme Dergisi*, 5(1), 14-25.
- Kömürlü, R., & Özdemir, F. (2023). Yeşil Bina Üretiminde Leed Sertifikalı Yeşil Ofislerin Karşılaştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 264-278.
- Kumar, S., & Baskar, K. (2014). Preliminary Study on Concrete With Mixed Electronic Plastic Waste. *The International Reviewer*, 1(1), 1-4.
- Kuruppu, U., Rahman, A., & Rahman, M. A. (2019). Permeable Pavement As A Stormwater Best Management Practice: A Review And Discussion. *Environmental Earth Sciences*, 78-328.
- Kuşkaya, S., & Gençoğlu, P. (2017). Oecd Ülkelerinin 1995-2015 Yılları İtibariyle Sera Gazı Salınımları Açısından Karşılaştırılması: İstatistiksel Bir Analiz. *International Journal of Disciplines Economics & Administrative Sciences Studies*, 3(3), 177-188.
- Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., & Fini, E. H. (2022). Sustainable Construction Via Novel Geopolymer Composites Incorporating Waste Plastic Of Different Sizes And Shapes. *Construction and Building Materials*, 324, 1-9.
- Lu, B., Drissi, S., Liu, J., Hu, X., Song, B., & Shi, C. (2022). Effect of Temperature on CO2 Curing, Compressive Strength and Microstructure of Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, 157, 1-12.
- Luo, M., Ji, A., Li, X., & Yang, D. (2024). Performance Evaluation of Self-Healing Recycled Concrete Using Biomineralization Modified Recycled Aggregate as Bacterial Carrier. *Journal of Building Engineering*, 86, 1-12.
- Mane, K., Nadgouda, P., & Joshi, A. (2021). An experimental study on properties of concrete produced with M-sand and E-sand. *Materials Today: Proceedings*, 38, 2590-2595.
- Markewitz, P., Kuckshinrichs, W., Bongartz, R., & Linssen, J. (2012). Worldwide Innovations in The Development of Carbon Capture Technologies and The Utilization of CO2. *Energy & Environmental Science*, 5, 7281-7305.
- Mercan, M., & Karakaya, E. (2013). Sera Gazı Salımının Azaltımında Alternatif Politikaların Ekonomik Maliyetlerinin İncelenmesi: Türkiye İçin Genel Denge Analizi. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*(42), 123-159.
- Miller, S. A., & Myers, R. J. (2020). Environmental Impacts of Alternative Cement Binders. *Environmental Society Technologies*, 54(2), 677-686.

- Mohammadinia, A., Wong, Y. C., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2019). Strength Evaluation Of Utilizing Recycled Plastic Waste And Recycled Crushed Glass In Concrete Footpaths. *Construction and Building Materials*, 197, 489-496.
- Needhidasan, S., Prabu, S. J., & Ramesh, B. (2020). Experimental Study on Use of E-waste Plastics as Coarse Aggregate in Concrete With Manufactured Sand. *Materials Today: Proceedings*, 22, 715-721. Materials Today: Proceedings. adresinden alındı
- Nehdi, M. L., Marani, A., & Zhang, L. (2024). Is Net-Zero Feasible: Systematic Review of Cement And Concrete Decarbonization Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 1-22.
- Nilimaa, J. (2023). Smart Materials and Technologies For Sustainable Concrete Construction. *Developments in the Built Environment*, 15, 1-19.
- OECD. (2023, 10 26). *Organisation for Economic Co-Operation and Development*. Organisation for Economic Co-Operation and Development: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/data/environmental-policy/environmentally-related-tax-revenue_df563d69-en adresinden alındı
- Orhan, İ. H., & Kaya, L. G. (2016). LEED Belgeli Yeşil Binalar ve İç Mekan Kalitesinin İncelenmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(Özel 1), 18-28.
- Our World in Bank. (2024, 1 20). Our World in Bank: <https://ourworldindata.org/co2-emissions> adresinden alındı
- Our World in Data. (2019, 9). 11 21, 2023 tarihinde Our World in Data: <https://ourworldindata.org/land-use> adresinden alındı
- Our World in Data. (2023, 11 23). Our World in Data: <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions> adresinden alındı
- Our World in Data. (2023, 12 10). Our World in Data: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector> adresinden alındı
- Our World in Data. (2023, 12 25). Our World in Data: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions> adresinden alındı
- Our World in Data. (2023, 12 1). Our World in Data: <https://ourworldindata.org/co2-emissions> adresinden alındı
- Our World in Data. (2023, 12 10). Our World in Data: <https://ourworldindata.org/urbanization> adresinden alındı
- Ozmehmet, E. (2008). Dünyada ve Türkiye Sürdürülebilir Kalkınma Yaklaşımları. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 3(12), 1853-1876.
- Özaydın, E., & Baz, İ. (2021). Yeşil Bina Konseptinin Kentsel Dönüşüm Uygulamalarında Ele Alınması. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 3(2), 203-215.

- Özcan, A. B. (2020). Ortak Mülkiyet Çerçevesinde İklim Değişikliği Sorununun Çözümünde Kyoto Protokolü'nün Etkisi. *Akdeniz İİBF Dergisi*, 20(2), 169-184.
- Özsoy, E. C. (2015). Düşük Karbon Ekonomisi ve Türkiye'nin Karbon Ayak İzi. *Hak İş Uluslararası Emek Ve Toplum Dergisi*, 4(9), 198-215.
- Öztopçu, A., & Salman, A. (2019). Sürdürülebilir Kalkınmada Akıllı Kentler. *Karadeniz Uluslararası Bilimsel Dergi*, 41, 167-188.
- Öztürk, M., & Öztürk, A. (2019). BMİDÇS'den Paris Anlaşması'na: Birleşmiş Milletler'in İklim Değişikliğiyle Mücadele Çabaları. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 12(4), 527-541.
- Pamuk, R., & Kuruoğlu, M. (2016). İnşaat Sektöründe Sürdürülebilirlik ve Bina İnşaatlarında Evrensel Uygulama Örnekleri. *Beykent Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 161-177.
- Pilapitiya, P. N., & Ratnayake, A. S. (2024). The World Of Plastic Waste: A Review. *Cleaner Materials*, 11, 1-23.
- Pillai, R. G., Gettu, R., Santhanam, M., Rengaraju, S., Dhandapani, Y., Rathnarajan, S., & Basavaraj, A. S. (2019). Service Life And Life Cycle Assessment of Reinforced Concrete Systems with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 118, 111-119.
- Popescu, C. D., Muntean, M., & Sharp, J. (2003). Industrial Trial Production of Low Energy Belite Cement. *Cement & Concrete Composites*, 25, 689-693.
- Premathilaka, K., Liyanapathirana, D., Leo, C., & Hu, P. (2024). Application of Recycled Waste Glass to Replace Traditional Quarried Aggregates: A Comprehensive Review. *Journal of Building Engineering*, 86, 1-20.
- Rende, K., Akalın, N., Ercan, Ö., & Hilmioğlu, B. (2013). Çimento Üretiminden Kaynaklanan Sera Gazı emisyonlarının Azaltılması için Alternatif yöntemler. 5. *Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu*. Eskişehir.
- Ribeiro, F. R., Modolo, R. C., Kulakowski, M. P., Brehm, F. A., Moraes, C. A., Ferreira, V. M., & Mesquita, E. F. (2022). Production of Belite Based Clinker from Ornamental Stone Processing Sludge and Calcium Carbonate Sludge with Lower CO2 Emissions. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 15, 1-16.
- Ritchie, H., Samborska, V., & Roser, M. (2023). *Plastic Pollution*. 2024 tarihinde Our World in Data: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution> adresinden alındı
- Sabau, M., Bompá, D. V., & Silva, L. F. (2021). Comparative Carbon Emission Assessments Of Recycled And Natural Aggregate Concrete: Environmental Influence Of Cement Content. *Geoscience Frontiers*, 12, 1-10.
- Sabbrojjaman, M., Liu, Y., & Tafsirojjaman, T. (2024). A Comparative Review on The Utilisation of Recycled Waste Glass, Ceramic and Rubber as Fine Aggregate on High

- Performance Concrete: Mechanical and Durability Properties. *Developments in the Built Environment*, 17, 1-18.
- Salim, K., Houssam, A., Belaid, A., & Brahim, H. (2019). Reinforcement of Building Plaster by Waste Plastic and glass. *Procedia Structural Integrity*, 17, 170-176.
- Sanayi ve Kalkınma Bakanlığı, T. (2022). *Çimeto Sektör Raporu*. Sanayi Genel Müdürlüğü.
- Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, T. (2021). *Demir-Çelik Sektör Raporu*.
- Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, T. (2022). *Cam Sektör Raporu* . Ankara: Sanayi Genel Müdürlüğü.
- Sanchez, B. S., Favier, A., Domínguez, E. R., Machado, I. S., Heierli, U., Scrivener, K., . . . Habert, G. (2016). Assessing The Environmental And Economic Potential Of Limestone Calcined Clay Cement In Cuba. *Journal of Cleaner Production*, 124, 361-369.
- Savaş, H., & Kömürlü, R. (2022). Yeşil Bina Sertifika Sistemlerinden LEED Sertifikasının Endüstri Yapılarında İncelenmesi. *Mimarlık Ve Yaşam*, 7(3), 981-994.
- Saxena, S., Kumar, M., Chundawat, D., & Singh, N. (2020). Utilization of Wollastonite In Cement Manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 29, 733-737.
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018). Calcined Clay Limestone Cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, 114, 49-56.
- Sefidehkhani, H. P., & Şimşek, O. (2018). Farklı Oranlarda Geri Dönüşüm Agregası Kullanılarak Üretilen Betonun Bazı Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması. *Journal Of Polytechnica*, 21(1), 83-91.
- Seydioğulları, H. S. (2013). Sürdürülebilir Kalkınma için Yenilenebilir Enerji. *Planlama Dergisi*, 23(1), 19-25.
- Shaikh, A., Khan, N., Shah, F., Shukla, D., & Kale, G. (2017). Use of Plastic Waste in Road Construction. *International Journal of Advance Research and Development.*, 2(5), 14-19.
- Singh, A., Sampath, P. V., & Biligiri, K. P. (2020). A Review of Sustainable Pervious Concrete Systems: Emphasis on Clogging, Material Characterization, and Environmental Aspects. *Construction and Building Materials*, 261, 1-21.
- Skibsted, J., & Snellings, R. (2019). Reactivity Of Supplementary Cementitious Materials (Scms) In Cement Blends. *Cement and Concrete Research*, 124, 1-16.
- Sofi, A. (2018). Effect Of Waste Tyre Rubber On Mechanical And Durability Properties Of. *Ain Shams Engineering Journal*, 9, 2691-2700.
- Statista . (2023, 01). Distribution of total waste generation in the European Union. adresinden alındı

- Statista. (2023, 5). Generation of municipal waste worldwide as of 2021. adresinden alındı
- Statista. (2024, 1 4). Statista: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/> adresinden alındı
- Şahin, Y. S. (2023). Geleneksel Beton Yerine Kenevir Betonu Kullanılmasının Duvardan Isı Kaybına Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *Uluslararası İleri Doğa Bilimleri ve Mühendislik Araştırmaları Dergisi*(7), 49-53.
- Şahinöz, A. (2019). Sürdürülemez “Sürdürülebilir Kalkınma”. *Ufuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 8(15), 77-101.
- Şen, H., Kaya, A., & Alpaslan, B. (2018). Sürdürülebilirlik Üzerine Tarihsel ve Güncel Bir Perspektif. *Ekonomik Yaklaşım*, 29(107), 1-47.
- Şengün, H. (2015). Türkiye’de Çevre Yönetimi ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığının Uygulamaları. *Strategic Public Management Journal*(1), 109-130.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı. (2023, 12 14). T.C. Dışişleri Bakanlığı: <https://www.mfa.gov.tr/surdurulebilir-kalkinma.tr.mfa> adresinden alındı
- T.C. Dışişleri Bakanlığı. (2023). 12 6, 2023 tarihinde T.C. Dışişleri Bakanlığı: <https://www.mfa.gov.tr/ulkemizin-taraf-oldugu-baslica-cevre-anlasmalari.tr.mfa> adresinden alındı
- Tamanna, N., Tuladhar, R., & Sivakugan, N. (2020). Performance Of Recycled Waste Glass Sand As Partial Replacement Of Sand In Concrete. *Construction and Building Materials*, 239, 1-9.
- Tamer, Ö. (2009). Sera Gazı Küresel Isınma ve Kyoto Protokolü. *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 453(1), 42-46.
- Tavşan, F., & Yolcu, Z. (2023). Green Star Sertifika Sisteminde Sürdürülebilir Sağlık Yapılarının İncelenmesi. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 11(136), 38-64.
- (2019). *The Digest of BREEAM*. The Digest of BREEAM Assessment Statistics.
- Tufan, Z. M., & Özel, C. (2018). Sürdürülebilirlik Kavramı Ve Yapı Malzemeleri İçin Sürdürülebilirlik Kriterleri. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 1(2), 9-13.
- Turgut, A., & Budak, T. (2022). Lojistik ve Taşımacılığın Karbon Ayak İzi: Sistemik Bir Literatür İncelemesi. *Kent Akademisi Dergisi*, 15(2), 916-930.
- Tushar, Q., Bhuiyan, M. A., Zhang, G., Maqsood, T., & Tasmin, T. (2022). Application Of A Harmonized Life Cycle Assessment Method For Supplementary Cementitious Materials In Structural Concrete. *Construction and Building Materials*, 316, 1-17.
- TÜİK. (2023, 10 5). TÜİK: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672#:~:text=T%C3%9C%C4%B0K%20Kurumsal&text=Sera%20gaz%C4%B1>

%20envanteri%20sonu%C3%A7lar%C4%B1na%20g%C3%B6re,olarak%20hesaplan-
and%C4%B1. adresinden alındı

TÜİK. (2023, 6 23). 2023 tarihinde Türkiye İstatistik Kurumu: [https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Yillik-Sanayi-Urun-\(PRODCOM\)-Istatistikleri-2022-49370#:~:text=%C3%9Cıkemizde%202022%20y%C4%B1l%C4%B1nda%201%20milyon,bin%20272%20adet%20motosiklet%20%C3%BCretildi.](https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Yillik-Sanayi-Urun-(PRODCOM)-Istatistikleri-2022-49370#:~:text=%C3%9Cıkemizde%202022%20y%C4%B1l%C4%B1nda%201%20milyon,bin%20272%20adet%20motosiklet%20%C3%BCretildi.) adresinden alındı

TÜİK. (2023, 12 5). 2023 tarihinde Türkiye İstatistik Kurumu: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Environmental-Protection-Expenditure-Statistics-2022-49671> adresinden alındı

Türkeş, M. (2006). Küresel İklimin Geleceği ve Kyoto Protokolü. *Jeopolitik Dergisi*, 29, 99-107.

Uçak, S., & Villi, B. (2021). Avrupa Yeşil Mutabakatının Çelik Sektörüne Olası Etkileri. *Uygulamalı Ekonomi ve Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(2), 94-113.

UNEP, 2. (2023). *Emissions GaP rEPORT*. United Nations Environment Programme.

UNFPA. (2022). *World Population Prospects*. Department of Economic and Social Affairs.

USGBC. (2022, 10 12). 9 16, 2023 tarihinde US Green Building Council: <https://www.usgbc.org/articles/leed-data-trends-past-five-years> adresinden alındı

USGBC. (2023, 2 7). 10 6, 2023 tarihinde US Green Building Council: <https://www.usgbc.org/articles/top-10-countries-leed-demonstrate-green-building-truly-global-movement> adresinden alındı

USGBC. (2024, 1 15). US Green Building Council: <https://www.usgbc.org/resources/country-market-brief> adresinden alındı

Üreden, A., & Özden, S. (2018). Kurumsal Karbon Ayak İzi Nasıl Hesaplanır: Teorik Bir Çalışma. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 98-108.

Ürük, Z. F., & İslamoğlu, A. K. (2019). Breeam, Leed ve DGNB Yeşil Bina S ertifika s y on Sistemlerinin S tandart Bir Konutta Karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(15), 143-154.

Wendimu, T. B., Furgasa, B. N., & Hajji, B. M. (2021). Suitability and Utilization Study on Waste Plastic Brick as Alternative Construction Material. *Journal of Civil Construction and Environmental Engineering*, 6(1), 9-12.

World Steel Association. (2023, 12 6). World Steel Association: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2023/> adresinden alındı

Yavan, O., & Bozbey, İ. (2023). Sürdürülebilir İnşaat Sektörü İçin Geri Dönüşüm Beton Agregası. *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 9(1), 155-165.

- Yılmaz, Y. (2011). Beton Endüstrisinde Sürdürülebilir Üretim. *Türkiye Hazır Beton Birliği*, 145-154.
- Zhang, Y., Zhang, J., Luo, W., Wang, J., Shi, J., Zhuang, H., & Wang, Y. (2019). Effect Of Compressive Strength And Chloride Diffusion On Life Cycle Co2 Assessment Of Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials. *Journal of Cleaner Production*, 218, 450-458.



ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini Mimar Sinan İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2012 yılında Tevfik Serdar Anadolu Lisesinde tamamladı. 2013-2014 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2018 yılında bu bölümden mezun oldu. 2020-2021 öğretim döneminde Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2022 yılından itibaren T.C. Adalet Bakanlığı'nda inşaat mühendisi olarak görev yapmaktadır.

