



**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
HAVACILIK YÖNETİMİ ANABİLİM DALI**

**HAVACILIK EMİSYONLARININ AZALTILMASINDA AB
EMİSYON TİCARETİ SİSTEMİNİN ROLÜ: EKONOMETRİK BİR
ANALİZ**

**Hazırlayan
Tuğba AKBIYIK**

**Danışman
Doç. Dr. Tunahan AVCI**

Yüksek Lisans Tezi

Haziran 2025, KAYSERİ

Tuğba AKBIYIK

HAVACILIK YÖNETİMİ

Yüksek Lisans Tezi

2025

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
HAVACILIK YÖNETİMİ ANABİLİM DALI**

**HAVACILIK EMİSYONLARININ AZALTILMASINDA AB
EMİSYON TİCARETİ SİSTEMİNİN ROLÜ:
EKONOMETRİK BİR ANALİZ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Tuğba AKBIYIK**

**Danışman
Doç. Dr. Tunahan AVCI**

Haziran 2025, KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Tuğba AKBIYIK





T.C.

ERCIYES ÜNİVERSİTESİ

Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürlüğü

Anabilim Dalı : Havacılık Yönetimi
Program Adı : Yüksek Lisans
Tez Başlığı :Havacılık Emisyonlarının Azaltılmasında AB Emisyon
Ticareti Sisteminin Rolü: Ekonometrik Bir Analiz

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmasının a) Giriş, b) Ana bölümler ve c) Sonuç kısımlarından oluşan (Kapak, Ön söz, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) toplam 97 sayfalık kısmına ilişkin 20/06/2025 tarihinde **Turnitin** intihal programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre tezin benzerlik oranı: % 8' dir.

Filtrelemeye **alıntılar dahil** edilmiştir. Filtrelemede **yedi (7) kelimedenden daha az** örtüşme içeren metin kısımları hariç tutulmuştur.

Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez İntihal Raporu Uygulama Esaslarını inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmasının herhangi bir intihal içermediğini, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim. 20/06/2025

Danışman

Doç. Dr. Tunahan AVCI

Öğrenci

Tuğba AKBIYIK

KILAVUZA UYGUNLUK

“Havacılık Emisyonlarının Azaltılmasında AB Emisyon Ticareti Sisteminin Rolü: Ekonometrik Bir Analiz” başlıklı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesine uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Tuğba AKBIYIK

Danışman

Tunahan AVCI

Havacılık Yönetimi ABD Başkanı

Doç. Dr. Tunahan AVCI

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Doç. Dr. Tunahan AVCI danışmanlığında **Tuğba AKBIYIK** tarafından hazırlanan “**Havacılık Emisyonlarının Azaltılmasında AB Emisyon Ticareti Sisteminin Rolü: Ekonometrik Bir Analiz**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü **Havacılık Yönetimi** Anabilim Dalı’nda **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

20/06/2025

JÜRİ:

Danışman : **Doç. Dr. Tunahan AVCI**

Üye : **Prof. Dr. Alper ASLAN**

Üye : **Prof. Dr. Oğuz ÖCAL**

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulu'nun /.... /..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... /..... /

Prof. Dr. Atabey KILIÇ
Enstitü Müdürü

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanma sürecinde bilgi birikimi, akademik rehberliği ve kıymetli yönlendirmeleriyle bana yol gösteren, her daim desteğini hissettiren saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Tunahan Avcı'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez savunmamda yer alarak yapıcı görüş ve değerlendirmeleriyle çalışmamın akademik niteliğine katkı sunan saygıdeğer jüri üyelerim Prof. Dr. Alper Aslan ve Prof. Dr. Oğuz Öcal'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi varlıklarıyla yanımda olan, özellikle bu sürecin her anında sabır, anlayış ve sevgiyle beni destekleyen kıymetli ailem; babam Cemalettin Akbıyık'a ve annem Fatma Akbıyık'a gönülden şükranlarımı sunuyorum.

Çalışma sürecinde yalnızca akademik katkılarıyla değil, aynı zamanda moral desteği, özverili yaklaşımı ve yol arkadaşlığıyla bu süreci benim için anlamlı ve sürdürülebilir kılan değerli meslektaşım Arş. Gör. İhsan Emrecan Şahin'e derin bir minnet borçluyum. Katkıları, bu çalışmanın şekillenmesinde özel bir yer edinmiştir.

Tez sürecimin en sessiz fakat en sadık yol arkadaşı olan sevgili köpeğim Zeus'a da içten teşekkür ederim. Varlığıyla huzur veren, yorgunluklarımı hafifleten ve sabrı öğreten Zeus, bu sürecin görünmeyen fakat hissedilen destekçisi olmuştur.

Bu çalışmanın, ilgili alana mütevazı da olsa bir katkı sağlamasını ve ilerleyen dönemlerde yapılacak araştırmalara yol gösterici olmasını temenni ediyorum.

Tuğba AKBIYIK, Mersin, 2025

HAVACILIK EMİSYONLARININ AZALTILMASINDA AB EMİSYON TİCARETİ SİSTEMİNİN ROLÜ: EKONOMETRİK BİR ANALİZ

Tuğba AKBIYIK

**Erciyes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2025
Danışman: Doç. Dr. Tunahan AVCI**

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, 1995–2021 dönemine ait 23 Avrupa ülkesinin verilerini kullanarak Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi’nin (AB ETS), havacılık sektöründen kaynaklanan karbondioksit (CO₂) emisyonları üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Çevre kalitesini temsilen bağımlı değişkenler olarak iç hat havacılık kaynaklı CO₂ emisyonu, uluslararası havacılıktan kaynaklı CO₂ emisyonu ve toplam havacılık sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonu ele alınmıştır. Bağımsız değişkenler olarak ülkede kayıtlı hava taşıyıcılarının yurt içi kalkışları, yurt dışı kalkışları, havacılık sektörüne ait enerji kullanımı, gayrisafi yurt içi hasıla (GSYİH) ve toplam nüfus dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, iç hatlar, dış hatlar ve toplam emisyonları temsil eden üç ayrı panel veri modeli oluşturulmuştur. Analiz sürecinde, ilk olarak değişkenlerin durağanlığı panel birim kök testleriyle test edilmiş; ardından Pedroni eşbütünleşme testiyle uzun dönemli ilişkiler değerlendirilmiştir. Uzun dönem katsayıları Pooled Mean Group (PMG) ve Mean Group (MG) tahminleyicileriyle tahmin edilmiş; değişkenler arası yönlü ilişkiler Dumitrescu-Hurlin panel Granger nedensellik testi ile analiz edilmiştir. Bulgular, AB ETS’nin iç hat emisyonlarını azaltmada anlamlı bir etkiye sahip olduğunu, uluslararası uçuşlar üzerindeki etkisinin ise sınırlı düzeyde kaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca havacılık sektörü enerji kullanımı, uçuş faaliyetleri, GSYİH ve nüfusun emisyonlar üzerinde pozitif ve anlamlı etkileri tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, havacılık sektöründe piyasa temelli çevresel politika araçlarının etkinliğine ve sürdürülebilir havacılık stratejilerinin gerekliliğine işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: AB ETS, Havacılık CO₂ Emisyonları, Enerji Kullanımı, Panel Veri, Sürdürülebilirlik

THE ROLE OF THE EU EMISSION TRADING SYSTEM IN REDUCING AVIATION EMISSIONS: AN ECONOMETRIC ANALYSIS

Tuğba AKBIYIK

Erciyes University, Graduate School of Social Sciences

Master Thesis, June 2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tunahan AVCI

ABSTRACT

This study aims to analyze the impact of the European Union Emissions Trading System (EU ETS) on carbon dioxide (CO₂) emissions originating from the aviation sector by using data from 23 European countries over the period 1995–2021. The dependent variables representing environmental quality are defined as CO₂ emissions from domestic aviation, CO₂ emissions from international aviation, and total CO₂ emissions from the aviation sector. The independent variables include the number of domestic and international departures by air carriers registered in the country, aviation sector energy use, gross domestic product (GDP), and total population. Accordingly, three separate panel data models were constructed to capture domestic, international, and total aviation emissions. In the analytical framework, panel unit root tests were first applied to examine the stationarity of the variables. Subsequently, Pedroni cointegration tests were employed to investigate long-run relationships among them. Long-run coefficients were estimated using the Pooled Mean Group (PMG) and Mean Group (MG) estimators, and causal relationships were tested through the Dumitrescu-Hurlin panel Granger causality approach. The findings indicate that the EU ETS has a statistically significant negative effect on domestic aviation CO₂ emissions, whereas its impact on international flight emissions remains limited. Moreover, aviation energy consumption, flight activity, GDP, and population were found to have positive and significant effects on emission levels. The results suggest that market-based environmental policy instruments are effective in mitigating aviation-related carbon emissions and support the need for sustainable aviation strategies.

Keywords: EU ETS, Aviation CO₂ Emissions, Energy Use, Panel Data, Sustainability

İÇİNDEKİLER

HAVACILIK EMİSYONLARININ AZALTILMASINDA AB EMİSYON TİCARETİ SİSTEMİNİN ROLÜ: EKONOMETRİK BİR ANALİZ	
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
TEZ ÖZGÜNLÜK SAYFASI.....	ii
KILAVUZA UYGUNLUK	iii
KABUL VE ONAY TUTANAĞI	iv
ÖN SÖZ	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
GİRİŞ.....	1

BİRİNCİ BÖLÜM

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE KÜRESEL ISINMA

1.1. İklim değışikliğı ve küresel ısınma nedir.....	3
1.2. İklim Değışikliğı ve Küresel Isınmaya Neden Olan Faktörler	5
1.2.1. Fosil Yakıtların Yakılması.....	6
1.2.2. Ormansızlaşma	7
1.2.3. Endüstriyel Süreçler.....	8
1.2.4. Tarım ve İklim Değışikliğı.....	9
1.3. Küresel Isınmanın Azaltılması ve Politika Önlemleri	11
1.3.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları	12

1.3.2. Enerji Verimliliği Önlemleri	13
1.3.3. Karbon Yakalama ve Depolama	14
1.3.4. Azaltımda Teknolojik Yenilikler	16

İKİNCİ BÖLÜM

KÜRESEL ISINMA KONUSUNDA ÖNEMLİ ADIMLAR

2.1. Kyoto Protokolü Öncesi Gelişmeler	19
2.1.1. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi	20
2.1.2. Kyoto Protokolü	21
2.1.3. Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi (AB ETS)	23
2.1.3.1. Üst sınır ve ticaret sistemi	26
2.1.3.2. Ticaret dönemi	26
2.1.3.3. Ödenekler (Allowances)	27
2.1.4. AB ETS'den Uluslararası Havacılık Karbon Dengeleme ve Azaltım Şemasına (CORSIA) Geçiş	28

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

HAVACILIK EMİSYONLARININ AZALTILMASINDA AB EMİSYON TİCARETİ SİSTEMİNİN ROLÜ: EKONOMETRİK BİR ANALİZ

3.1. Literatür Taraması	34
3.1.1. Havacılık Sektöründe Karbon Emisyonlarının Dinamikleri	35
3.1.2. Enerji Kullanımı, Ekonomik Büyüme ve Nüfusun Karbon Emisyonları Üzerindeki Etkisi	40
3.1.3. AB Emisyon Ticaret Sistemi (AB ETS) ve Karbon Azaltım Politikalarının Etkileri	45
3.2. Araştırmanın Amacı ve Önemi	53

3.3. Araştırmanın Sınırlılıkları.....	55
3.4. Araştırmanın Yöntem ve Modelleri.....	56
3.4.1. Pesaran-Yamagata Homojenlik Testi	56
3.4.2. Yatay Kesit Bağımlılığı Testi.....	57
3.4.3. Panel Birim Kök Testleri (Pesaran CIPS ve CADF)	58
3.4.4. Westerlund Panel Eşbütünleşme Testi.....	59
3.4.5. Havuzlanmış Ortalama Grup (PMG) ve Ortalama Grup (MG) Katsayı Tahmini.....	60
3.4.6. Dumitrescu & Hurlin Granger Nedensellik Testi	62
3.5. Model.....	63
3.6. Araştırmanın Veri Toplama Aracı ve Verileri.....	65
3.7. Araştırmanın Kapsamı	66
3.8. Araştırmanın Bulguları	66
3.8.1. Tanımlayıcı İstatistikler	67
3.8.2. Pesaran-Yamagata Homojenlik Testi	68
3.8.3. Yatay Kesit Bağımlılığı Testi	69
3.8.4. Panel Birim Kök Testleri (Pesaran CIPS ve CADF)	70
3.8.5. Westerlund Panel Eşbütünleşme Testi.....	71
3.8.6. Havuzlanmış Ortalama Grup (PMG) Katsayı Tahmini.....	74
3.8.7. Dumitrescu & Hurlin Granger Nedensellik Testi.....	84
SONUÇ	91
KAYNAKÇA.....	98

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

AB ETS	: Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi
AB ETS	: Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi
AEA	: Avrupa Ekonomik Alanı
AİB	: Avrupa İklim Borsası
BM	: Birleşmiş Milletler
BM İDÇS	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
CADF	: Cross-sectionally Augmented Dickey-Fuller
CCS	: Karbon Yakalama ve Depolama
CD	: Cross-Section Dependence Testi
CH₄	: Metan
CIPS	: Cross-sectionally Augmented Im-Pesaran-Shin
CO₂	: Karbondioksit
CORSIA	: Uluslararası Havacılık Karbon Dengeleme ve Azaltım Planı
ECM	: Hata düzeltme modeli
EKC	: Çevresel Kuznets Eğrisi
EV	: Araç Elektrifikasyonu
GHGs	: Sera Gazları
GSYİH:	: Gayrisafi Yurtiçi Hasıla
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IPCC	: Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli
MG	: Mean Group Katsayı Testi
N₂O	: Azot oksit
NO_x	: Nitrojen oksitler
PMG	: Pooled Mean Group Katsayı Testi
SAF	: Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı
SO₂	: Sülfür dioksit
TKM	: Temiz Kalkınma Mekanizması

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1: Sera Gazlarının CO ₂ Eşdeğerleri ve Yıllık Isıtma Potansiyelleri.....	24
Tablo 2.2. Yol haritasında önerilen altı seçenek (Mai, 2021).....	31
Tablo 3.1: Değişkenler Listesi ve Kaynakları	65
Tablo 3.2: Tanımlayıcı İstatistikler	67
Tablo 3.3: Pesaran-Yamagata homojenlik testi sonuçları	68
Tablo 3.4: Yatay kesit bağımsızlık testinin sonuçları.....	69
Tablo 3.5: CIPS ve CADF panel birim kök testi sonuçları	71
Tablo 3.6: Eşbütünleşme için Westerlund testi	72
Tablo 3.7: Eşbütünleşme için Westerlund testi	72
Tablo 3.8: Model 1 PMG tahmin sonuçları.....	75
Tablo 3.9: Model 2 PMG tahmin sonuçları.....	78
Tablo 3.10: Model 3 PMG tahmin sonuçları.....	81
Tablo 3.11: Model 1 Dumitrescu Hurlin Panel Nedensellik Testi	85
Tablo 3.12: Model 2 Dumitrescu Hurlin Panel Nedensellik Testi	87
Tablo 3.13: Model 3 Dumitrescu Hurlin Panel Nedensellik Testi	89

ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 1.1:** 1880-2024 yılları arasındaki küresel yüzey sıcaklığı artışı 5
- Şekil 1.2:** 1880-2023 yılları arasındaki fosil yakıt ve sanayi kaynaklı karbon salınımı 7
- Şekil 1.3:** Küresel havacılıktan kaynaklı emisyonları azaltma önlemlerinin katkısı 12



GİRİŞ

Küresel ısınma ve iklim değışikliği, günümüzün en ciddi çevresel sorunları arasında yer almakta ve bu sorunların temelinde insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının artışı yatmaktadır. Sanayi devriminden bu yana özellikle fosil yakıtların yoğun kullanımı sonucunda artan karbondioksit (CO₂) ve diğer sera gazları, atmosferde birikerek küresel sıcaklıkların yükselmesine ve iklimsel dengenin bozulmasına neden olmuştur. Bu durum, başta Birleşmiş Milletler olmak üzere birçok uluslararası kuruluşun gündemine girmiş, karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik çeşitli politika ve stratejilerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Özellikle karbon yoğun sektörlerde bu stratejilerin etkili biçimde uygulanması, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kritik rol oynamaktadır. Havacılık sektörü, taşıdığı stratejik ve ekonomik öneme rağmen sera gazı emisyonları açısından dikkat çeken bir sektördür. Küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %3'ü doğrudan sivil havacılıktan kaynaklanmaktadır ve bu oran sürekli artış eğilimindedir. Havacılık faaliyetlerinin uluslararası niteliği, emisyonların izlenmesi ve düzenlenmesini daha karmaşık hale getirmektedir. Özellikle Avrupa Birliği, bu soruna çözüm bulmak amacıyla Emisyon Ticareti Sistemi (ETS) kapsamında havacılık sektörünü düzenleme altına almıştır. 2012 yılında AB ETS kapsamına dahil edilen havacılık sektörü, bu tarihten itibaren karbon piyasasında aktif olarak yer almakta ve belirlenen sınır dahilinde emisyon izinleriyle faaliyet göstermektedir.

Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi (AB ETS), piyasa temelli bir çevre politikası aracı olarak, emisyon sınırları belirlemekte ve bu sınırlar dahilinde emisyon izinlerinin alınıp satılmasına olanak sağlamaktadır. Bu sistemin temel amacı, emisyonları ekonomik olarak etkin bir şekilde azaltmak, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak ve teknolojik yenilikleri teşvik etmektir. Havacılık sektörü açısından bu sistem, çevresel sorumluluğun yanı sıra maliyet ve rekabet açısından da önemli sonuçlar doğurmaktadır. Ancak sistemin

etkinliği, havayolu şirketlerinin stratejik kararları, karbon piyasasının dinamikleri ve politik istikrar gibi birçok faktöre bağlıdır.

Bu alışma, AB ETS'nin havacılık sektöründeki karbon emisyonlarını azaltmadaki etkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, 23 Avrupa ülkesine ait 1995–2021 dönemi verileri kullanılarak, havacılık kaynaklı CO₂ emisyonları ile ETS uygulaması arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmada iç hat, dış hat ve toplam emisyonlara ilişkin üç ayrı model kurulmuş; sistemin sektörel düzeydeki çevresel etkileri bütüncül bir bakışla ele alınmıştır.

Ekonometrik analizlerde, PMG (Pooled Mean Group) ve MG (Mean Group) tahminleyicileri ile panel veri tabanlı uzun dönem ilişkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, değerkenler arasındaki yönlü ilişkilerin belirlenebilmesi amacıyla Dumitrescu ve Hurlin panel Granger nedensellik testi uygulanmıştır. Emisyonları etkileyen temel faktörler arasında uçuş sıklığı, enerji tüketimi, nüfus, GSYİH ve ETS uygulaması yer almaktadır.

Bu alışma literatüre; AB ETS'nin havacılık sektörü özelinde uzun dönemli etkilerini inceleyen az sayıdaki çalışmadan biri olması, karbon emisyonlarını açıklayıcı faktörlerin çok boyutlu yapısını PMG-MG karşılaştırmasıyla analiz etmesi ve Granger nedensellik testiyle nedensel yönü ortaya koyması bakımından üç temel yönde katkı sunmaktadır.

Tez dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, iklim değerikliği ve küresel ısınmanın temel nedenlerini, atmosferdeki sera gazı birikiminin çevresel etkilerini ve bu sürece katkıda bulunan insan faaliyetlerini teorik ervede ele almaktadır. İkinci bölümde, iklim değerikliğiyle mücadele kapsamında uluslararası düzeyde atılan adımlar; Kyoto Protokolü, Birleşmiş Milletler İklım Değerikliği erve Sözleşmesi ve AB ETS gibi önemli girişimler detaylı şekilde açıklanmıştır. nc bölüm, çalışmanın asıl uygulama kısmını oluşturmakta olup, havacılık emisyonlarının azaltılmasında AB ETS'nin rolünü ekonometrik olarak analiz etmekte ve literatür taraması, veri seti, modelleme ve analiz bulgularına yer vermektedir. Dördüncü ve son bölümde ise ulaşılan sonuçlar değerlendirilmiş, bulgular ışığında çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacak politika nerileri sunulmuştur.

BİRİNCİ BÖLÜM

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE KÜRESEL ISINMA

1.1. İklim Değişikliği ve Küresel Isınma Nedir

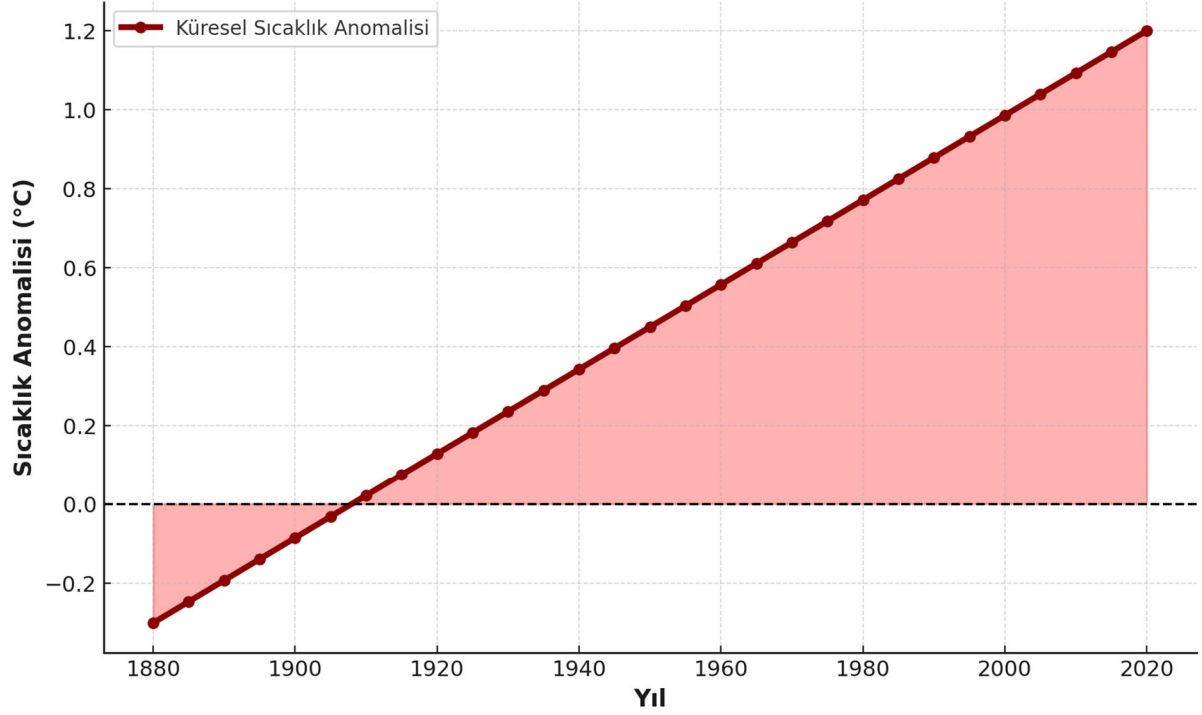
Atmosferde karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot oksit (N₂O) gibi sera gazlarının (GHGs) birikmesi, küresel ısınma olarak adlandırılan, Dünya'nın ortalama yüzey sıcaklığındaki sürekli artışın başlıca nedenidir. Bu gazlar, Dünya yüzeyinden yayılan ısıyı hapsedmektedir ve yaşamın sürdürülmesi için gerekli ve doğal bir süreç olarak bu gazların uzaya kaçmasını engellemektedir. Fosil yakıtların yakılması, endüstriyel faaliyetler ve arazi kullanımındaki değişiklikler gibi antropojenik faaliyetler sera etkisini şiddetlendirerek doğal değişkenliği aşan bir ısınma eğilimine neden olmaktadır (Tian vd., 2016, s. 225–228; Reichle, 2020, s. 209–251; Montzka vd., 2011, s. 43–50). Artan bu sera etkisi, yalnızca küresel ısınmayı değil, aynı zamanda hava durumundaki, deniz seviyesindeki ve ekosistemlerdeki daha geniş değişiklikleri de kapsayan iklim değişikliğiyle yakından bağlantılıdır (Pachauri ve Meyer, 2014, s. 87). İnsan kaynaklı sera gazı emisyonlarının yarattığı ışımsal etki dengesizliği, uzun vadeli iklim değişikliğinde baskın bir faktördür ve Dünya'nın enerji dengesini değiştirmektedir (Myhre vd., 2013, s. 664-667). Ormansızlaşma ve tarımsal genişleme de dahil olmak üzere arazi kullanımı değişiklikleri, CO₂ emisyonlarına önemli ölçüde etkide bulunarak endüstriyel emisyonların etkisini daha da artırmaktadır (Canadell ve Schulze, 2014, s. 4). Bu etkilerin anlaşılması, iklim değişikliğinin ortaya çıkardığı çevresel, ekonomik ve sosyal kaygıların üstesinden gelmek için önemlidir (NASA, 2024).

Küresel ısınma ile doğrudan bağlantılı olan iklim değişikliği; yağış miktar ve yoğunluğunun değişmesi, deniz seviyesinin yükselmesi, buzulların erimesi, fırtına ve kuraklıkların artması gibi aşırı hava olaylarını içeren geniş çaplı bir dizi değişikliği ifade etmektedir (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2018, s. 4-6). Son

yüzyılda kaydedilen büyük iklim değışikliklerinin başlıca katalizörü olan insan faaliyetleri ile bu değışiklikler giderek daha belirgin hale gelmiştir. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), insan kaynaklı küresel ısınmanın halihazırda sanayi öncesi dönemindeki seviyenin yaklaşık 1,1°C üzerine çıktığını ve mevcut eğilimlerin devam etmesi halinde önümüzdeki yıllarda 1,5°C'yi aşacağını öngörmektedir (IPCC, 2018, s. 5-7).

Dünya'nın iklimi, tarihsel olarak yörünge dinamiklerindeki değışimler, güneş radyasyonundaki dalgalanmalar ve volkanik faaliyetler gibi doğal süreçlerden etkilenmiş ve bunlar binlerce yıl boyunca iklimsel değışimlere neden olmuştur (IPCC, 2007, s. 96). Bununla birlikte, Sanayi Devrimi'nden bu yana kaydedilen hızlanmış iklim değışiklikleri, insan faaliyetlerinin iklim sistemi üzerindeki önemli ve büyük etkisini açıkça göstermektedir (IPCC, 2023, s. 42). Antropojenik iklim değışikliğinin hızı ve büyüklüğü, doğal değışkenliğin sınırlarını aşarak ekosistemler, kültürel gelenekler ve küresel ekonomi üzerinde önemli ve kapsamlı sonuçlara yol açmaktadır. Bu değışikliklerin temel göstergeleri, Kuzey Kutbu'ndaki deniz buzunun sürekli olarak azalması, okyanus ısınmasına bağlı olarak mercan ağarmasının sıklığının ve yoğunluğunun artması ve aşırı sıcak hava dalgalarının artarak yaygınlaşmasıdır (IPCC, 2022, s. 45-50). Bu faktörler sadece doğal felaketlerin sıklığını ve şiddetini artırmakla kalmayıp aynı zamanda uyum kapasitesinin kısıtlı olduğu ve kaynaklara erişimin sınırlı olduğu bölgelerde önceden var olan sosyal ve ekonomik kırılganlıkları da arttırmaktadır (IMF, 2019, s. 7-21). Şekil 1.1'de küresel yüzey sıcaklığının zaman içerisindeki değışimi gösterilmiştir.

Şekil 1.1: 1880-2024 yılları arasındaki küresel yüzey sıcaklığı artışı



Kaynak: (NASA, 2024)

Şekil 1.1’de görüldüğü üzere küresel yüzey sıcaklığı 1910’lara kadar herhangi bir anomali göstermezken bu dönemden itibaren sıfırın üzerinde düzenli olarak artmaya başlamıştır. Günümüze gelindiğinde ise söz konusu sıcaklık artışının yıllık 1.2°C ’ye ulaştığı görülmektedir. Bu sıcaklık artışının ve iklim değişikliğinin çok yönlü zorluklarının ele alınması bütüncül ve disiplinler arası bir yaklaşım gerektirmektedir. Etkili stratejiler, insan toplumları ve ekolojik sistemler üzerindeki hem acil hem de uzun vadeli etkileri azaltmak için kapsamlı, çok disiplinli araştırmalara dayanan etkili azaltım ve uyum önlemlerinin geliştirilmesini gerektirmektedir (IPCC, 2023, s. 25).

1.2. İklim Değişikliği ve Küresel Isınmaya Neden Olan Faktörler

İklim değişikliği, öncelikle sera gazı konsantrasyonlarındaki artıştan kaynaklanan bölgesel ve küresel iklim sistemlerindeki önemli değişiklikleri içermektedir. Geçtiğimiz yüzyılda fosil yakıtların yakılması, ormansızlaşma ve sanayileşme gibi insan faaliyetleri sera etkisini artırarak Dünya’nın yüzey sıcaklığının önemli bir miktarda ısınmasına neden olmuştur. Güneş radyasyonundaki dalgalanmalar ve volkanik faaliyetler gibi faktörler iklim değişkenliğinin doğal tetikleyicileriyken, insan kaynaklı değişiklikler bu etkileri

yoğunlaştırarak ekosistemler, ekonomiler ve toplumlar üzerinde geniş kapsamlı olumsuz etkiler yaratan temel bir faktördür (Stern vd., 2014, s. 774).

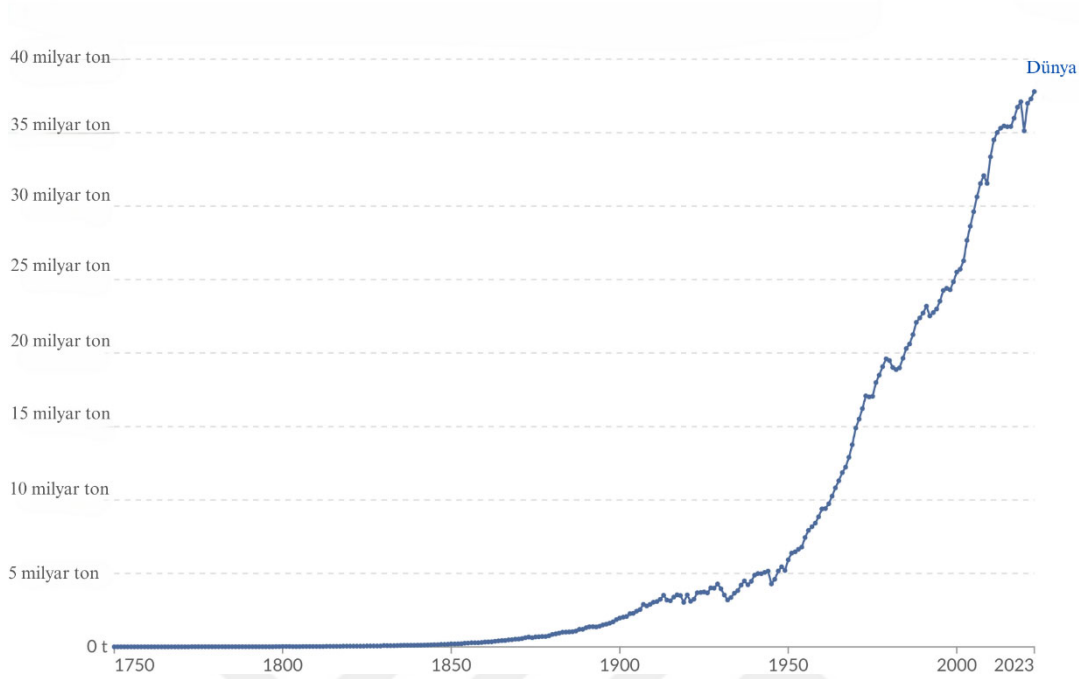
1.2.1. Fosil Yakıtların Yakılması

Fosil yakıtların yanması, dünya çapındaki CO₂ emisyonlarının birincil kaynağını oluşturmaktadır. Kömür, petrol ve doğal gaz dahil olmak üzere fosil yakıtlar, önemli çevresel maliyetlerine rağmen yüzyıldan fazla süredir ekonomik ve endüstriyel ilerlemeyi beslemiştir. Bu yakıtların yakılması, milyonlarca yıldır yeraltında gömülü olan karbonu serbest bırakarak atmosferik CO₂ konsantrasyonlarını önemli ölçüde artırmaktadır. Yanmanın birincil yan ürünü olan CO₂'nin Dünya atmosferinde ısıyı tutarak sera etkisinin şiddetlenmesine yol açtığı ileri sürülmektedir. Bu durumun etkileri özellikle enerji ihtiyacının yüksek olduğu sanayileşmiş ve hızla gelişmekte olan ülkelerde sıklıkla vurgulanmaktadır (Soeder, 2020, s. 155-161).

Önemli bir diğer sera gazı olan metan (CH₄), doğal gazın çıkarılması, taşınması ve kullanımı sırasında salınmaktadır. Doğal gaz sıklıkla kömür veya petrolün yerine daha çevre dostu bir alternatif olarak tanıtılsa da metan emisyonları önemli bir engel teşkil etmektedir (Howarth, 2015, s. 47- 48). Metan, yüzyıllık bir süreçte CO₂'nin yaklaşık 28 katı kadar küresel ısınma potansiyeline sahiptir ve bu da küçük sızıntıları bile önemli ölçüde etkili hale getirmektedir (Jackson vd., 2020, s. 1).

Uluslararası Enerji Ajansı, enerji ile ilgili faaliyetlerin dörtte üçünden fazlasında açığa çıkan yakıt yanması ve endüstriyel süreçlerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının toplam sektör emisyonlarının yaklaşık %89'unu oluşturduğunu belirtmektedir (IEA, 2021, s. 11). Şekil 1.2'de fosil yakıt ve karbon salınımının zamanla değişimi gösterilmiştir.

Şekil 1.2: 1880-2023 yılları arasındaki fosil yakıt ve sanayi kaynaklı karbon salınımı



Kaynak: (Global Carbon Project, 2024)

Şekil 1.2'ye göre sanayi kaynaklı CO₂ salınımı geçmişten bugüne sürekli artış göstermiştir. Bu durumun tersine çevrilmesi için emisyonları önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahip rüzgâr, güneş ve hidroelektrik dahil olmak üzere yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik sistemli bir geçiş gerekmektedir. Bu sayede fosil yakıt bağımlılığını azaltmanın mümkün olduğu değerlendirilmektedir (Pachauri ve Meyer, 2014, s. 87).

1.2.2. Ormansızlaşma

Ormanlar, fotosentez yoluyla CO₂'yi tutarak küresel karbon döngüsünün düzenlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Ancak ormansızlaşma bu dengeyi bozarak karbon emme kapasitesinde kayba ve depolanan karbonun atmosfere salınmasına yol açmaktadır. Ormansızlaşma, özellikle Amazon yağmur ormanları gibi hayati bir karbon yutağı görevi gören ancak ağaç kesimi, tarım ve madencilik faaliyetleri nedeniyle artan tehditlerle karşı karşıya olan tropikal bölgelerde ciddi boyutlara ulaşmıştır. Tropikal ormansızlaşma tek başına küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %12'sine neden olmaktadır. Emisyonların ötesinde, ormansızlaşma biyoçeşitlilik, su dengesi ve toprak

stabilitesi için ormanlara bağımlı olan ekosistemlerin dengesini bozarak olumsuz çevresel etkileri artırmaktadır (Lawrence ve Vandecar 2015, s. 27-33). Ormansızlaşma, karbon döngüsünü bozarak ve Dünya'nın yüzey yansımaları değiştirilerek küresel ve bölgesel iklim sistemlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Düşük albedolarıyla dikkat çeken ormanlık alanlar, önemli miktarda güneş enerjisini emmektedir. Buna bağlı olarak, ormansızlaştırılmış bölgelerin albedosu artmakta ve daha fazla güneş ışığını yansıtarak bölgesel yüzey soğumasına neden olmaktadır (Davin ve Noblet-Ducoudre 2010, s. 98-102). Tropikal bölgelerde ormansızlaşmanın yağış miktarını önemli ölçüde azalttığı ve sıcaklıkları artırdığı, kurak koşulları daha da kötüleştirdiği ve biyolojik çeşitliliği tehdit ettiği vurgulanmaktadır (Prevedello vd., 2019 s. 11-13).

Ormansızlaşmadan kaynaklanan albedo değişikliklerinin küresel çapta sonuçları vardır. Değiştirilmiş radyatif baskı atmosferik ve okyanus sistemleriyle etkileşime girerek iklim değişikliğini şiddetlendirmektedir. Geniş çaplı ormansızlaştırmanın, özellikle orman buharlaşmasının bölgesel hidrolojik döngüleri sürdürmek için çok önemli olduğu Amazon gibi bölgelerde yağış modellerini değiştirdiği ve yüzey sıcaklıklarını yükselttiği gösterilmiştir (Dickinson ve Kennedy, 1992, s. 1949-1950). Ayrıca artan albedo ve azalan evapotranspirasyonun karşılıklı etkileşimi atmosferik enerji dinamiklerini bozduğundan dolayı ormansızlaşmanın belirli enlemlerde bölgesel soğumaya rağmen net bir küresel ısınma etkisine yol açtığını göstermektedir (Bala vd., 2007, s. 8-10).

1.2.3. Endüstriyel Süreçler

Endüstriyel faaliyetler sera gazı emisyonlarına önemli ölçüde neden olmakta ve dünya genelindeki toplam emisyonların yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır. Bu emisyonlar, üretimin doğrudan enerji taleplerinden ve üretim süreçlerine özgü kimyasal değişikliklerden kaynaklanmaktadır (Talaie vd., 2020, s. 8-10).

İmalat ve inşaat sektörleri, özellikle beton, çelik ve alüminyum gibi malzemelerin enerji yoğun üretimi nedeniyle küresel sera gazı emisyonlarına önemli katkıda bulunmaktadır. İnşaat sektörü, özellikle beton ve çelik üretimi nedeniyle dünya çapındaki sera gazı emisyonlarının %39'undan fazlasını oluşturmaktadır (Crawford, 2022 s. 1- 2). Çin'de yapılan bir vaka çalışması, bina inşaatı sırasında emisyonların %82-87'sinin beton ve güçlendirilmiş çelik gibi malzemelerden kaynaklı sera gazı emisyonlarından

kaynaklandığını göstermiştir (Yan vd., 2010, s. 955). Söz konusu emisyonların azaltılması, düşük karbonlu alternatiflerin benimsenmesi, enerji verimliliğinin artırılması, karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin uygulanması dahil olmak üzere yeni stratejiler gerektirmektedir. Çimento ve çelik gibi enerji yoğun endüstrilerin karbondan arındırılması net sıfır emisyona ulaşmak için önemlidir. Bu çözümler, politika desteği ile birlikte, endüstriyel faaliyetlerin önemli çevresel etkilerini hafifletebilir (Bataille, 2023)

Endüstriyel faaliyetler iklim değişikliğine sadece sera gazlarının emisyonu yoluyla değil, aynı zamanda karmaşık iklimsel etkileri olan aerosol ve ince partikül maddeler aracılığıyla da neden olmaktadır. Aerosoller, bileşimlerine ve atmosferik sistemlerle etkileşimlerine bağlı olarak iklim üzerinde hem soğutma hem de ısıtma etkileri gösterebilmektedir. (Boucher, 2015, s. 22-23). Aerosoller ayrıca bulut oluşumunu ve özelliklerini de etkilemektedir. Bu etkileşim daha fazla ve daha küçük damlacıklara sahip bulutlar üreterek yansıtmayı artırır ve bir soğutma (negatif radyatif zorlama) etkisi yaratmaktadır. Bu süreç, sera gazlarının neden olduğu ısınmayı kısmen dengelemektedir. Fakat aerosol dağılımındaki ve bulut yapısındaki bölgesel değişkenlik göz önüne alındığında, bu soğutma etkisinin ölçeği oldukça belirsizdir (Fan vd., 2016, s. 4222-4224). Aerosoller, soğutma etkilerine rağmen, iklim değişikliğini azaltma çabalarını zorlaştırmaktadır. Endüstriyel kaynaklardan kaynaklanan aerosoller küresel atmosferik dolaşımı bozarak yağış düzenini etkilemekte ve aşırı hava olaylarının sıklığını arttırmaktadır (Boucher, 2015, s. 21-23; Wang vd., 2022, s. 184).

İklim değişikliğiyle etkili bir şekilde mücadele etmek için hem sera gazı emisyonlarını hem de aerosol etkilerini ele alan entegre stratejiler geliştirmek çok önemlidir. Bu stratejiler, endüstriyel süreçlerin karbonsuzlaştırılmasını, enerji verimliliğinin artırılmasını ve aerosol azaltımının iklim azaltım çabalarıyla dengelenmesini gerektirmektedir. Yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir soğutma teknolojilerini içeren şehir planlaması da kentsel ısı adalarının ve endüstriyel emisyonların birleşik etkilerinin azaltılmasına yardımcı olabilir.

1.2.4. Tarım ve İklim Değişikliği

Tarım, her ikisi de güçlü sera gazları olan CH₄ ve N₂O salınımı yoluyla iklim değişikliğini etkilemektedir. Bu emisyonlar hayvanların tarımsal faaliyetlerde kullanımı, piring

yetiştiriciliği, gübre kullanımı ve geleneksel atık yönetimi gibi çeşitli tarımsal faaliyetlerden kaynaklanmaktadır. Tarımsal emisyonların kökenlerini, süreçlerini ve azaltım seçeneklerini anlamak, sektörün küresel ısınmaya genel katkısını azaltmak için gereklidir. Tarım alanları ve çayırlar üzerindeki faaliyetlerden kaynaklı sera gazlarının kaynakları ve yutakları arasındaki dengenin kapsamlı bir şekilde anlaşılması, ekonomik açıdan uygulanabilir ve çevresel açıdan sürdürülebilir stratejilerin geliştirilmesi için kritik öneme sahiptir. Birçok çalışma yüzyılın sonuna kadar küresel sıcaklığın yaklaşık 2-3°C artacağını ve bunun da coğrafi konuma bağlı olarak yerel iklim modellerinde değişikliklere yol açacağını öngörmektedir. Dünya atmosferinde daha fazla değişiklik olmasını önlemek için tarım sektörüne yönelik pratik uygulamalarla sürdürülebilir çözümleri kapsayan güvenceler oluşturmak zorunludur (Yaduvanshi vd., 2021, s.1 ; Rounce vd., 2023).

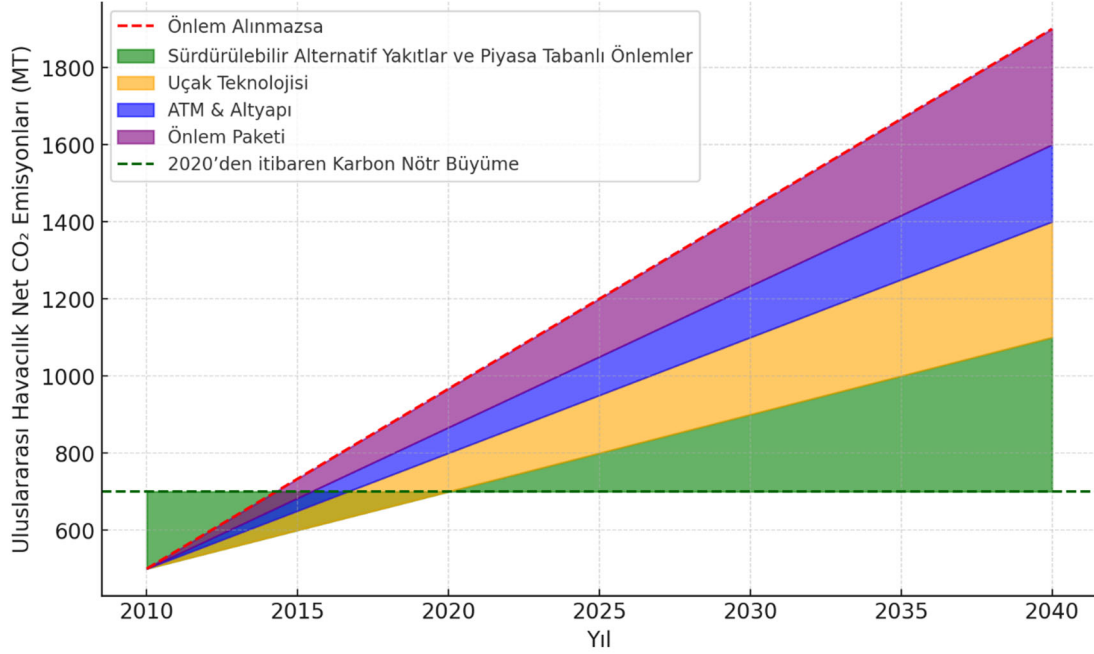
CH₄ emisyonları büyük ölçüde hayvancılıktan, özellikle de sığır, koyun ve keçi gibi geviş getiren hayvanlardan kaynaklanmaktadır. Bu hayvanlar sindirim sırasında enterik fermentasyon olarak adlandırılan bir süreçle metan üretmektedirler. Enterik fermentasyon sırasında, hayvanların sindirim sistemlerindeki mikroplar metan üretir ve bu da geğirme yoluyla çevreye salınır (Smith vd., 2008, s. 793-794). Sığırlar, baskın çiftlik hayvanları olarak, enterik metan emisyonlarının en önemli kaynağıdır. Dünya genelinde hayvanlar tarımsal metan emisyonlarının %40'ından fazlasına neden olmaktadır (Smith vd., 2008, s. 807). Enterik fermentasyonun yanı sıra gübre yönetimi de önemli bir metan emisyonu kaynağıdır. Gübre, çamur çukurları veya lagünler gibi anaerobik koşullar altında depolandığında veya işlendiğinde, ayrışma süreci sırasında metan üretilir. Büyük ölçekli hayvancılık işletmeleri genellikle bu depolama yöntemlerini kullanarak sera gazı emisyonlarına katkıda bulunmaktadır. Ancak anaerobik çürütme gibi gelişmiş gübre yönetimi uygulamaları, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılmak üzere metanı yakalayıp bu emisyonları azaltabilir. Çalışmalar, gübreden kaynaklanan metan emisyonlarının önemli bir kısmının depolama sırasında meydana geldiğini, ancak bunun depolama yöntemlerine ve çevresel koşullara bağlı olarak değiştiğini göstermiştir (Amon vd., 2006, s.155-159). Ayrıca anaerobik çürütme yalnızca metan emisyonlarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda organik maddenin biyolojik dönüşümü yoluyla biyoenerji de sağlar (De Gioannis vd., 2017, s.599-600).

N₂O emisyonları da toplam tarımsal sera gazı emisyonlarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu emisyonlar, azot bazlı gübrelerin ortaya çıkması ve kullanılması ve hayvan otlatma gibi uygulamalardan kaynaklanmaktadır. Sentetik ve organik gübrelerin kullanımı, ısınma potansiyeli açısından karbondioksitten önemli ölçüde daha güçlü bir gaz olan nitroz oksit üreten mikrobiyal süreçlere yol açmaktadır. Ek olarak tarım makineleri, araçlar ve elektrik için fosil yakıtların yakılmasıyla CO₂ emisyonları ortaya çıkmaktadır. Ormansızlaşma veya otlakların tarım arazisine dönüştürülmesi gibi arazinin tarımsal amaçlarla dönüştürülmesi de atmosfere önemli miktarda CO₂ salmaktadır (Suhardono vd., 2024, s. 8- 10). Tarıma atfedilebilecek toplam emisyonları değerlendirirken, arazi kullanım değişikliği ve ilişkili faktörlerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının genellikle tarım uygulamalarından kaynaklanan doğrudan emisyonları aştığı görülmektedir. Dolayısıyla, karbondioksit tarım alanında salınan yaygın ve etkili sera gazıdır ve sera gazlarının genel emisyon seviyelerini önemli ölçüde etkilemektedir (Golasa vd., 2021 s. 15). Tarım, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %14'ünü oluşturmaktadır. Tarımsal emisyonların %24'ü enterik fermentasyon ve gübre yönetiminden, %50'si toprak ve arazi yönetiminden, %26'sı ise arazi kullanım değişikliklerinden kaynaklanmaktadır (Eisen ve Brown, 2022 s. 2).

1.3. Küresel Isınmanın Azaltılması ve Politika Önlemleri

İklim değişikliği, planlı ve çok yönlü eylemler gerektiren önemli bir küresel sorun teşkil etmektedir. Bu sorunun olumsuz etkilerinin azaltılması için yürütülen faaliyetlere sürdürülebilirlik girişimlerinin ve emisyon azaltma eylemlerinin dahil edilmesi, küresel ısınmanın etkilerinin hafifletilmesi ve kapsamlı sosyoekonomik yansımalarının üstesinden gelinmesi için atılacak adımların eklenmesi gerekmektedir. Özellikle de hızlı nüfus artışının yaşandığı kentsel bölgeler, iklim değişikliğinin negatif etkilerine karşı savunmasız durumdadır. Bu konunun yeterince ele alınabilmesi için, kapsamlı ve uyumlu bir stratejiyi teşvik etmek üzere hem ulusal hem de yerel düzeyde yasama çalışmaları yapılmalıdır. Sera gazı azaltımına öncelik verilmesi, emisyonların azalması için çeşitli politika seçeneklerinin incelenmesi hayati öneme sahiptir (Sovacool vd., 2021, s. 37-41). Emisyon azaltımı için kilit sektörlerden olan havacılığın küresel boyutta CO₂ emisyonlarının azaltılması için alınan önlemlerin katkı seviyesi Şekil 1.4'te gösterilmiştir.

Şekil 1.3: Küresel havacılıktan kaynaklı emisyonları azaltma önlemlerinin katkısı



Kaynak: (ICAO,2015)

Şekil 1.4'te de görüldüğü üzere alınan her önlem havacılıktan kaynaklı emisyonları azaltmaktadır. Bunlar arasında en büyük azaltım sağlayan önlem sürdürülebilir alternatif yakıtlar ve piyasa tabanlı önlemlerdir. Ancak arzu edilen seviyeye ulaşmak için tüm önlemlerin bütüncül şekilde uygulanması gerekmektedir.

1.3.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları, sera gazı emisyonlarının başlıca nedeni olan fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak küresel ısınmanın hafifletilmesinde büyük önem taşımaktadır. Güneş, rüzgar, hidroelektrik ve jeotermal enerji gibi teknolojiler, geleneksel kömür, petrol ve doğal gaz enerji üretiminin aksine, minimum CO₂ emisyonu ile veya hiç karbondioksit emisyonu olmadan elektrik üretmektedir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli, yenilenebilir enerjiye geçişin küresel emisyonları önemli ölçüde azaltabileceğini ve küresel sıcaklıklardaki artışı potansiyel olarak kritik 1,5°C sınırının altında tutabileceğini ileri sürmektedir (IPCC, 2018, s. 131). 2021 yılında rüzgâr ve güneş enerjisi, dünya genelindeki enerji üretiminin %10'unu oluşturmaktadır ve iklim hedeflerine ulaşılabilmesi için bu kaynakların büyümeye devam etmesi büyük önem taşımaktadır (IEA, 2021, s. 22-23). Yenilenebilir enerji kaynakları, yüksek emisyonlu

enerji kaynaklarının yerini alarak genel karbon ayak izini azaltmakta ve iklim değişikliğinin ilerlemesini hafifletmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, emisyonları azaltmanın yanı sıra hava kalitesini ve halk sağlığını da iyileştirmektedir. Sülfür dioksit (SO₂), nitrojen oksitler (NO_x) ve partikül madde gibi zararlı kirleticiler yayan fosil yakıt yakmanın aksine, yenilenebilir enerji kaynakları bu emisyonlardan yoksun temiz enerji üretmektedir. Bu da solunum rahatsızlıkları ve kardiyovasküler rahatsızlıklar da dahil olmak üzere sağlıkla ilgili sorunların azalmasını sağlamaktadır (Markandya ve Wilkinson, 2007, s. 979). Ek olarak yenilenebilir enerji teknolojileri, enerji arzını çeşitlendirerek ve sınırlı ve jeopolitik açıdan istikrarsız fosil yakıt stoklarına olan bağımlılığı azaltarak enerji güvenliğini ve dayanıklılığını artırmaktadır. Yenilenebilir enerji sistemleri giderek daha ekonomik ve verimli hale gelmekte, böylece temiz enerjiye küresel geçişi hızlandırmakta ve uzun vadeli iklim değişikliğini azaltma çabalarını desteklemektedir (Jacobson vd., 2015).

Yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımlar ekonomik büyümeyi ve istihdam yaratmayı teşvik etmektedir. Yenilenebilir enerji sektörü 2022 yılında dünya çapında 12 milyondan fazla kişiye istihdam sağlayarak yeşil ekonominin gelişimine katkı sağlamaktadır (IRENA ve ILO, 2022, s. 10). Ülkeler, fosil yakıt kaynaklı enerjiyi yenilenebilir kaynaklarla ikame ederek, sürdürülebilir büyümeyi teşvik ederken sera gazı emisyonlarında önemli düşüşler elde edebilirler. Bu değişim, küresel sıcaklık artışlarını 2°C'nin altında tutmayı ve dahası 1,5°C'lik sınır altına indirmeyi amaçlayan Paris Anlaşması'nın hedeflerine ulaşmak için çok önemlidir (UNFCCC, 2015).

1.3.2. Enerji Verimliliği Önlemleri

Enerji verimliliği enerji tüketimini azalttığı, verimliliği artırdığı ve sanayi, ulaşım ve konut sektörlerinde enerji giderlerini düşürdüğü için azaltım yöntemlerinin önemli bir unsurudur (Hassett ve Metcalf, 1993, s. 712). Verimlilik yöntemleri, enerji kullanımını azaltarak küresel ısınmanın etkilerini hafifletmektedir (Ürge-Vorsatz ve Novikova, 2008, s. 645; Sugiyama vd., 2014, s. 402-403). Enerji verimliliği, mal üretmek ve hizmet sunmak için gereken enerji girdisinin azaltılmasını hedefler ve bu da çeşitli sektörlerin karbon ayak izini doğrudan düşürmektedir (John vd., 2013, s. 447). Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli, enerji verimliliğindeki iyileştirmelerin emisyonların azaltılması

ve küresel sıcaklık artışının sınırlandırılması için gerekli olduğunu vurgulamıştır (IPCC, 2007, s. 138).

Enerji verimliliğine yapılan yatırımlar sadece hane halkı, işletmeler ve endüstriler için ekonomik fayda sağlamakla kalmaz, aynı zamanda küresel ısınmaya yol açan emisyonları da önemli ölçüde azaltır (Wolfram, Shelef, ve Gertler, ve 2012, s. 134). Örneğin, konutlarda ilave yalıtım uygulanması ve enerji tasarruflu cihazların benimsenmesi gibi önlemler, hane halkı karbon emisyonlarında azalmaya yol açmaktadır (Ürge-Vorsatz ve Herrero, 2012, s. 89).

Şirketlerde, konutlarda ve ulaşımda enerji verimli teknoloji ve uygulamaların benimsenmesi enerji talebini önemli ölçüde azaltabilmekte ve böylece enerji üretimi ve tüketiminden kaynaklanan emisyonları azaltabilmektedir (Ürge-Vorsatz ve Novikova, 2008, s. 645). Gelişmiş yalıtım, sofistike ısıtma ve soğutma sistemleri ve verimli cihazlar da dahil olmak üzere bina sektöründeki enerji verimliliğindeki iyileştirmeler, enerji tüketimini %30'a kadar azaltabilir (Ürge-Vorsatz vd., 2015, s. 96-97). Elektrik üretiminin küresel CO₂ emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturduğu göz önüne alındığında, etkili ölçekte azaltımlar elde etmek için enerji sektöründe enerji verimliliğini artırmak zorunludur. Enerji verimli teknolojilerin güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilmesi, karbon ayak izlerini daha da azaltabilmekte ve çevresel sürdürülebilirliği ilerletmektedir. Bu ikili yaklaşım sadece fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmakla kalmaz, aynı zamanda daha temiz, daha esnek bir enerji sistemine geçişi de desteklemektedir (Azizi vd., 2024).

Sonuç olarak, enerji verimliliği küresel ısınmanın azaltılması için çok önemli bir yaklaşımdır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli tarafından vurgulandığı üzere, enerji verimliliği politikalarının kapsamlı iklim stratejilerine dahil edilmesi, uzun vadeli sürdürülebilirliğin sağlanması ve küresel ısınmanın etkilerinin hafifletilmesi için elzemdir (IPCC, 2007, s. 148).

1.3.3. Karbon Yakalama ve Depolama

Karbon Yakalama ve Depolama (CCS), fosil yakıtlı enerji santralleri ve endüstriyel tesisler de dahil olmak üzere önemli kaynaklardan gelen CO₂ emisyonlarını tutarak ve

atmosferik salınımlarını önlemek için yeraltında depolayarak küresel ısınmayı hafifletmek için tasarlanmış önemli bir teknolojik çözümdür. CCS; yakalama, transfer ve depolama olmak üzere üç ana aşamadan oluşmaktadır. Yakalama aşamasında CO₂, genellikle yanma sonrası, yanma öncesi veya oksijen-yakıt yakma teknolojileri kullanılarak yanma veya endüstriyel işlemler sırasında oluşan diğer gazlardan izole edilmektedir (IPCC, 2005, s. 3-8). CO₂, yakalandıktan sonra borular, gemiler veya kamyonlar aracılığıyla belirli depolama yerlerine taşınmakta ve burada kalıcı olarak tutulması için derin jeolojik oluşumlara enjekte edilmektedir. Bu oluşumlar genellikle tükenmiş petrol ve gaz rezervuarlarını, tuzlu akiferleri ve çıkarılamayan kömür yataklarını içermektedir. Uygun jeolojik depolama yerlerinin belirlenmesi, CO₂'nin güvenli ve kalıcı bir şekilde hapsedilmesi, böylece atmosferik salınımının önlenmesi ve iklim değişikliğinin azaltılması girişimlerine yardımcı olunması için gerekli olmaktadır (Rasool, vd., 2023).

Etkili bir şekilde CO₂ depolaması, jeolojik oluşumların yapısal bütünlüğüne ve CO₂ bulutunu zaman içinde gözlemlemek ve muhafazayı doğrulamak için sağlam izleme sistemlerine bağlıdır. CCS teknolojileri, çeşitli jeolojik alternatifler kullanarak yüksek emisyonlu sektörlerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunabilmekte ve uzun vadeli iklim hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olabilmektedir (Ajayi vd., 2019).

CCS teknolojisinin uygulanması, çimento, çelik ve kimyasal üretim gibi karbonsuzlaştırılması zor olan endüstrilerden kaynaklanan emisyonların azaltılması için önemlidir. Çimento üretimi küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %6,5'ini oluştururken, çelik üretimi yaklaşık %7'sini sağlamaktadır (Cramer, 2019, s. 2-3). Bu sektörlerde CCS uygulanması, CO₂ emisyonlarını kaynağında yakalayıp ve yeraltında güvenli bir şekilde tutarak karbon ayak izini önemli ölçüde azaltabilmektedir (Leeson vd., 2017). Araştırmalar, 2050 yılına kadar çimento endüstrisinden kaynaklanan emisyonların üçte birinden fazlasının CCS kullanılarak azaltılması gerektiğini ve bunun için yaklaşık 1,4 gigaton CO₂ depolama kapasitesine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir (Plaza vd., 2020, s. 3-4). CCS'nin bu sektörlerdeki etkinliği, CCS uygulamasının ekonomik fizibiliteyi korurken emisyonları önemli ölçüde azaltılabileceğini gösteren tekno-ekonomik değerlendirmelerle iyi bir şekilde ortaya konmuştur (Garcia ve Berghout, 2019).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli, CCS uygulamasının kapsamlı bir şekilde uygulanmasının küresel CO₂ emisyonlarının azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunabileceğini belirtmektedir. Sıcaklık artışını minimum aşım ile veya hiç aşım olmadan 1,5°C ile sınırlamayı amaçlayan senaryolarda, CCS'nin gerekli emisyon azaltımlarının sağlanmasında kritik bir rol oynayacağı öngörülmektedir (IPCC, 2018, s. 130-132). Bu durum, uluslararası iklim hedeflerine ulaşmak ve küresel ısınmayı etkin bir şekilde azaltmak için CCS'nin bütüncül iklim stratejilerine dahil edilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

1.3.4. Azaltımda Teknolojik Yenilikler

Teknolojik ilerlemeler, çeşitli sektörlerde sera gazı emisyonlarını azaltarak ve sürdürülebilirliği geliştirerek küresel ısınmanın hafifletilmesinde çok önemlidir. Enerji sektöründe, güneş ve rüzgar enerjisi de dahil olmak üzere yenilenebilir enerji teknolojilerindeki yenilikler fosil yakıtlara olan bağımlılığı önemli ölçüde azaltmıştır. Yüksek verimli fotovoltaik sistemler sadece elektrik üretmekle kalmayıp aynı zamanda alt bant aralığı radyasyonunu yansıtmakta ve ek kızılötesi radyasyon yayarak artan sera gazlarının neden olduğu Dünya'nın ışımsal dengesizliğini azaltmaya yardımcı olmaktadır (Honsberg vd., 2022). Benzer şekilde, batarya depolama teknolojilerindeki ilerleme, kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştıran ve şebeke istikrarını artıran uygun maliyetli, sıfır emisyonlu enerji depolamayı mümkün kılmıştır (Ürge-Vorsatz vd., 2020, s. 249).

Sanayi sektörü, çelik ve çimento üretimi gibi geleneksel olarak karbondan arındırılması zor süreçlerden kaynaklanan emisyonları azaltmayı amaçlayan önemli teknolojik gelişmeler yaşamıştır. Kayda değer yeniliklerden biri, önemli ölçüde daha düşük karbon emisyonlu çelik üretimi için umut verici bir yaklaşım olarak ortaya çıkan demir cevherinin hidrojen bazlı doğrudan indirgenmesidir (WEF, 2024). Ek olarak, süperkritik su gazlaştırma gibi teknolojiler, kömür ve biyokütlenin hidrojen enerjisine verimli bir şekilde dönüştürülmesini kolaylaştırarak karbon ayak izlerini en aza indirirken optimum kaynak kullanımını sağlamaktadır (Guo vd., 2022, s. 12-13). Bu tür gelişmeler, tarihsel olarak karbonsuzlaştırılması zor olan endüstriyel süreçlerden kaynaklanan emisyonların azaltılması için gereklidir.

Ulaşım alanındaki gelişmeler, emisyonların azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Araçların elektrifikasyonu (EV) ve batarya verimliliğindeki gelişmeler, EV'leri giderek daha erişilebilir hale getirmiştir ve en büyük katkıda bulunan sektörlerden birinin sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir (Xie vd., 2024, s. 910). Ayrıca, 5G ve nesnelerin interneti (IoT) sensörleri gibi iletişim teknolojileri filo yönetimini ve yakıt verimliliğini artırmakta, dolayısıyla emisyonları önemli ölçüde azaltmaktadır (Avalos, 2024). Sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen biyoyakıtlar, yüksek enerji yoğunluklu yakıtlara bağımlı olan havacılık ve denizcilik sektörleri için daha yeşil seçenekler sunarak uygulanabilir bir alternatifi temsil etmektedir.

Yeşil binalar, iklim azaltımı için önemli bir teknoloji ilerleme alanına işaret etmektedir. Bu yapılar, emisyonları en aza indirmek ve genel sürdürülebilirliği iyileştirmek için enerji verimliliği, su tasarrufu ve sürdürülebilir malzeme ilkelerini entegre etmektedir. Pasif güneş ısıtması, üstün yalıtım ve enerji tasarruflu ekipman gibi özellikler bir binanın enerji ihtiyacını azaltmaktadır (Ürge-Vorsatz vd., 2020, s. 236-245). LEED ve BREEAM gibi sertifika programları çevre dostu bina uygulamalarının hayata geçirilmesini teşvik ederken, kentsel planlama çabaları da sürdürülebilir kentsel ekosistemler oluşturmak için çatı bahçeleri ve yağmur suyu toplama sistemleri gibi yeşil altyapıları bir araya getirmektedir (Climate Change Adaptation and Green Building, 2022, s. 222).

İklim mühendisliği, küresel ısınmayı azaltmak için çeşitli stratejiler sunmaktadır. İki temel yöntem -güneş radyasyonu yönetimi (SRM) ve karbondioksit giderimi (CDR)- Dünya'nın iklim sistemlerini doğrudan manipüle etmeyi amaçlamaktadır (Heutel vd., 2015, s. 100-102). Stratosferik aerosol enjeksiyonu gibi SRM yöntemleri, Dünya yüzeyine ulaşan güneş radyasyonunu azaltırken, CDR hava yakalama ve yeniden ağaçlandırma yoluyla atmosferden CO₂'yi aktif olarak çıkarır (Vaughan ve Lenton, 2011, s. 750-764). Bununla birlikte, SRM'nin hava durumu modellerini ve biyoçeşitliliği değiştirebileceği göz önüne alındığında, bu teknolojilerin çevresel ve etik sonuçları açısından değerlendirilmesi zorunludur (Bala, 2011, s. 1419). İklim mühendisliğinde risk yönetimi için güçlü yönetim çerçeveleri ve uluslararası iş birliği gereklidir. Gelişmekte olan ülkelerin bu çözümleri adil şekilde uygulayabilmesi için sürdürülebilir finansman mekanizmaları sağlanmalıdır (Reynolds, 2011, s. 127).

Sonuç olarak, yenilenebilir enerji, sürdürülebilir mimari, endüstriyel ilerlemeler ve ulaşım iyileştirmelerini kapsayan çeşitli sektörlerdeki teknolojik gelişmeler, küresel ısınmayla mücadelede çok önemlidir. İklım mühendisliği tamamlayıcı alternatifler sunmakla birlikte tehlikeleri hafifletmek için titiz bir kontrol gerektirmektedir. Destekleyici mevzuat, dünya çapında işbirliği ve sürekli araştırma yoluyla bu atılımlar sürdürülebilir ve dirençli bir geleceği teşvik edebilir.



İKİNCİ BÖLÜM

KÜRESEL ISINMA KONUSUNDA ÖNEMLİ ADIMLAR

Bu bölümde küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda uluslararası boyutta atılan adımlardan başlıcaları ele alınacaktır. Kyoto Protokolü öncesi gelişmeler, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Kyoto Protokolü'nün kapsamı ve gereklilikleri ve Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi bu bölümde açıklanmaktadır.

2.1. Kyoto Protokolü Öncesi Gelişmeler

Sanayi devrimi sonrasında yoğunlaşan endüstriyel faaliyetler, bu devrimi yaşayan ülkelerdeki ekonomik birikimin ve istihdamın artması, sosyokültürel gelişmelerin yaşanması ve genel refah seviyesinin yükselmesi açısından kaynak teşkil eden ana faktör olmuştur. Ancak bu faaliyetlerin negatif dışsallığı olarak ortaya çıkan çevresel etkiler günümüze kadar geçen sürede iklim ve biyoçeşitliliğe zarar vermiş ve dolayısıyla canlı hayatına önemli tehditler yaratmıştır. Zamanla bu etkilerin şiddeti arttıkça ülkeler yaşanan olumsuz maliyetleri azaltmak amacıyla birtakım adımlar atma gereği duymuştur (Altınışık ve Peker, 2011, s. 67). Piyasa temelli çevresel düzenlemeler veya çözümler (Olçum, 2012, s. 6) olarak ifade edilen bu adımlardan en bilinenleri Coase Yaklaşımı, Kaldor-Hicks Yaklaşımı ve Scitovsky Yaklaşımıdır (Özdan, 2014). Bu yaklaşımların temel amacı bir çevre politikasından elde edilen marjinal fayda ile marjinal maliyeti eşitlemektir. Böylece negatif dışsallığın yarattığı mağduriyeti azaltmak veya ortadan kaldırmak hedeflenmektedir (Baumol ve Oates, 1988, s. 20-21).

Coase Yaklaşımına göre dışsallıklar zamanla bir piyasa oluşturacak ve bu piyasa dışardan müdahaleye gerek duyulmadan dengeye oturacaktır. Ayrıca bir ekonomik faaliyet

sonucunda ortaya çıkan üründen zarar gören taraf, bu faaliyetten fayda sağlayan taraftan tazminat isteme hakkına sahip olacaktır (Coase, 2013).

Kaldor-Hicks Yaklaşımında ise dışsal maliyete neden olan bir işletmenin bu maliyete katlananlara, yani zarar görenlere tazmin edici bir fayda sağlaması gerekmektedir. Bu fayda, negatif dışsallık yaratarak ürün veya hizmet üreten tarafın bu faaliyetlerinden elde ettiği değerin dengeli bir şekilde zarar görenlerle paylaşılması yoluyla ortaya çıkmalıdır (Eroğlu, 2004, s. 146-147).

Scitovsky Yaklaşımı ise dışsallığın sadece bir işletmenin yararlandığı üretim faktörleri sonucunda elde ettiği çıktıdan değil, diğer işletmelerin de yararlandığı üretim faktörleri ve elde ettiği çıktı miktarından kaynaklandığını ifade etmektedir. Buna göre bir ekonomik birimin üretim veya tüketim faaliyetleri neticesinde diğer ekonomik birimlerin bu faaliyetlerini sınırlaması gerekmektedir ve bu denge pazarlık yoluyla belirlenmektedir (Kargı ve Yüksel, 2010, s. 185; Özdan, 2014, s. 21).

Bu kapsamda değerlendirildiğinde Kyoto Protokolü öncesinde çevresel olumsuz etkileri önlemeye yönelik atılan adımlardan ilki (daha öncesinde bazı adımlar atılmış olsa da) Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesidir.

2.1.1. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BM İDÇS), 1992 yılının Haziran ayında, Rio de Janeiro’da düzenlenen BM Çevre ve Kalkınma Konferansı kapsamında imzalanmıştır. Bu sözleşmenin amacı; atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarının, iklim sistemine insan kaynaklı tehlikeli müdahaleleri önleyecek bir seviyede sabitlenmesidir. Böyle bir seviyeye, ekosistemlerin iklim değişikliğine doğal olarak uyum sağlamasına, gıda üretiminin tehdit edilmemesine ve ekonomik kalkınmanın sürdürülebilir bir şekilde ilerlemesine imkan verecek bir zaman dilimi içinde ulaşılmalıdır. Bu sözleşme 1994 yılında onaylanmış ve bir dizi görüşmenin ardından 1997 yılında imzalanan Kyoto Protokolüne giden yolu açmıştır (Noble ve Scholes, 2001, s. 7).

Bu sözleşmeyi imzalayan taraflar iklim değişimini ve bunun olumsuz etkilerini insanlığın ortak sorunu olarak kabul etmiştir. Bu sözleşme kapsam ve koşulları, geçmişte çevreyle

ilgili yapılan aşağıdaki konferans ve imzalanan sözleşmeleri temel alarak belirlenmiştir (BM İDÇS, 1992).

- Birleşmiş Milletler İnsan Çevresi Konferansı'nın 16 Haziran 1972 tarihinde Stockholm'de kabul edilen Deklarasyonu,
- Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansına ilişkin 22 Aralık 1989 tarih ve 44/228 sayılı Genel Kurul kararı ile insanlığın bugünkü ve gelecek nesilleri için küresel iklimin korunmasına ilişkin 6 Aralık 1988 tarih ve 43/53, 22 Aralık 1989 tarih ve 44/207, 21 Aralık 1990 tarih ve 45/212 ve 19 Aralık 1991 tarih ve 46/169 sayılı kararların hükümleri,
- Deniz seviyesindeki yükselmenin adalar ve kıyı bölgeleri üzerindeki olası olumsuz etkilerine ilişkin 22 Aralık 1989 tarihli ve 44/206 sayılı Genel Kurul kararının hükümleri,
- 1985 tarihli Ozon Tabakasının Korunmasına ilişkin Viyana Sözleşmesi ve 29 Haziran 1990 tarihinde düzeltilmiş ve değiştirilmiş şekliyle 1987 tarihli Ozon Tabakasını İncelten Maddelere ilişkin Montreal Protokolü.

2.1.2.Kyoto Protokolü

Kyoto Protokolü 11 Aralık 1997 tarihinde kabul edilmiş ancak çeşitli müzakereler sonucunda 16 Şubat 2005 tarihinde onaylanmıştır. Günümüze kadar 192 ülke bu protokolü onaylamıştır. BM İDÇS'nin ilke ve hükümlerine dayanan Kyoto Protokolü ek (annex) temelli yapıyı devam ettirmektedir. Protokol “ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluk ve ilgili kabiliyetler” ilkesi altında gelişmiş ülkelere daha ağır bir sorumluluk yüklemektedir. Bunun nedeni sanayileşmiş ülkelerin atmosferdeki sera gazı emisyon seviyelerinden ve çevresel etkilerden büyük ölçüde sorumlu olmalarıdır. Protokole taraf olan ülkeler sera gazı emisyonlarını birinci taahhüt dönemi olan 2008-2012 yılları arasında 1990 yılı seviyelerinin en az %5 altına düşürmeyi taahhüt etmiş sayılmaktadır (UN, 1997). Daha sonra Doha’da yapılan görüşmelerde ise ikinci taahhüt dönemi 2013-2020 yılları arasındaki süreyi kapsamaması ve salınım seviyelerinin 1990 yılı seviyesinin %18 altına indirilmesi kararlaştırılmıştır (Cary ve Stephens, 2024, s. 1-2). Bu noktada

Kyoto protokolü, sera gazı salımına ilişkin bağlayıcı hükümleri olan ilk belge olması nedeniyle önem taşımaktadır (Ott, 1998, s. 19).

Kyoto Protokolü, emisyon izinlerinin ticaretine dayalı esnek bir piyasa mekanizması önermesi açısından önemli bir role sahiptir. Protokol, ülkelerin hedeflerini öncelikle ulusal önlemler yoluyla karşılaması gerektiğini belirtmektedir. Bununla birlikte Protokol, ülkelere bir piyasa temelli mekanizma ve iki proje temelli mekanizma yoluyla hedeflerine ulaşmaları için bazı araçlar da sunmaktadır (UN, 2025):

- Uluslararası Emisyon Ticareti
- Temiz Kalkınma Mekanizması (CDM, Türkçe olarak TKM)
- Ortak uygulama (JI, Türkçe olarak OU)

Bu mekanizmalar ideal olarak sera gazı azaltımının en uygun maliyetli olduğu yerde, örneğin gelişmekte olan ülkelerde başlamasını teşvik etmektedir (Büyüklgaz, 2010, s. 38). Aynı zamanda sıçrama yapmayı, yani daha yeni, daha temiz altyapı ve sistemler için daha eski, daha kirli teknolojilerin kullanımını bırakma olasılığını, uzun vadeli faydalarla birlikte daha ekonomik hale getirmektedir.

Uluslararası Emisyon Ticareti, Kyoto protokolünün piyasa temelli mekanizmasıdır. Protokolün 17. maddesinde düzenlenen bu mekanizmaya göre sera gazı emisyonunu belirlenen hedeften daha fazla azaltan ülkeler bu fazladan indirimi diğer taraf ülkelere satabilmektedir (Ott, 1998, s. 41).

Temiz Kalkınma Mekanizmasının (TKM) detayları protokolün 12. maddesinde açıklanmıştır. Buna göre protokolün Ek-B listesindeki herhangi bir Ek-I ülkesi, Ek-I dışı herhangi bir ülke ile iş birliği yaparak o ülkede emisyon azaltıcı yatırımlar yapabilecek ve böylece emisyon azaltım kredisi kazanabilecektir. Bu sayede Ek-I ülkesi kendisi için belirlenen emisyon azaltım hedefinden bu krediyi düşebilecektir. TKM, Ek-I listesindeki yatırımcı ülkeye daha az maliyetle emisyon azaltım olanağı sağlaması ve yatırım alan ülkeye de yeni çevresel teknolojilerin ve dış yatırımın ulaşmasına imkan sağlaması gibi avantajlara sahiptir (UNDP, 2006, s. 26-27).

1991 yılında İDÇS görüşmelerinde taraf olan gelişmiş ülkeler sera gazı salınımlarının atmosferde karıştığını, bu nedenle dünyanın herhangi bir bölgesinde yapılacak emisyon azaltıcı projenin küresel boyutta yararlı olacağını belirtmiştir. Bu noktada protokolün 6. maddesinde açıklanan ortak uygulama (OU), emisyon azaltma hedefi belirlemiş bir ülkenin, bu hedefi belirlemiş olan diğer bir ülkede yapacağı emisyon azaltıcı projeler üzerinden de emisyon azaltma kredisi alabilmesine olanak tanımaktadır. Bu krediler de ilgili ülkenin toplam hedefinden düşülebilmektedir (Türkeş vd., 2000).

Kyoto Protokolü, ülkelerin emisyon azaltımında endüstrileri detaylı ele almamakla birlikte bazı çerçeveler çizmektedir. Havacılık açısından emisyonlara değinme şekli ise aşağıda gösterildiği haliyle 2. maddenin 2. fıkrası üzerinden olmaktadır (UN, 1997): “Ek I’de yer alan Taraflar, sırasıyla Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü ve Uluslararası Denizcilik Örgütü aracılığıyla çalışarak, havacılık ve denizcilik yakıtlarından kaynaklanan Montreal Protokolü tarafından kontrol edilmeyen sera gazı emisyonlarının sınırlandırılmasını veya azaltılmasını takip edeceklerdir.”

Açıkça görüldüğü üzere havacılık yakıtlarından kaynaklı sera gazı emisyonları, çevresel düzenlemelerin işaret ettiği ve uluslararası yetkili kuruluşlara sorumluluk yüklediği temel konular arasındadır.

2.1.3.Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi (AB ETS)

AB ETS’nin temelleri Kyoto Protokolü ile belirlenen esneklik mekanizmalarına dayanmaktadır. Kyoto Protokolü sürecinde ABD’nin sera gazı emisyonlarını azaltmak için piyasa temelli bir sistem önerisine AB üyesi ülkeler başta olumlu bakmasa da devam eden süreçte bazı pazarlıklar sonucunda esneklik mekanizmaları altında bu öneriyi kabul etmişlerdir. Bu mekanizmalardan biri olan uluslararası emisyon ticaretine AB üye ülkelerini hazırlamak için AB Komisyonu’nun 2000 yılında çıkardığı Yeşil Makale (Green Paper) ile AB ETS’nin temelleri atılmıştır (Bekkhuis ve Hecke, 2008, s. 117-118). Yeşil makalede uluslararası emisyon ticareti “Emisyon ticareti ilk olarak çevrenin korunması için bir araç, ikinci olarak da rekabetçiliği en az zedeleyecek politika araçlarından biridir.” şeklinde açıklanmıştır (CEU, 2000). Kyoto Protokolü’nde AB’nin 2012 yılına kadarki emisyon azaltım hedefi 1990 yılındaki seviyenin %8 altına düşürmek şeklinde belirlenmiştir. Bu seviyeye en az maliyetle ulaşmak için AB Komisyonu,

2003/87/EC sayılı ve 13 Ekim 2003 tarihli Direktif ile 1 Ocak 2005 tarihinde Emisyon Ticaret Programı'nı başlatmıştır (Pamukçu, 2007, s. 18).

Yeoh (2008), başlarda hakkında eleştiriler ve şüpheler olan AB ETS'nin zamanla karbon finansman piyasası bakımından sınırlılıklarına rağmen olumlu yönde ilerlediğini ifade etmiştir. AB ETS, ABD'nin 1980'de atmosfere saldığı 16 milyon ton sülfür dioksitin seviyesini 1990'larda 11 milyon tona indirmesini sağlayan Asit Yağmuru Programından temelini almıştır. Ancak ETS, 25 üye ülkeyi kapsamına alması açısından bu programdan çok daha kapsamlı ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu kapsamda bakıldığında AB ETS'nin temel felsefesi kendisine tahsis edilen miktardan daha fazla sera gazı salınımı yapan ülkelerin cezalandırılması (2005-2007 yılları arasında belirlenen seviyeyi aşan her ton başına 40 avro, sonrasında 100 avro), daha az salınım yapan ülkelerin ise ödüllendirilmesidir. Ayrıca bu tür bir ticaret ülkelerin çevre dostu teknoloji benimseyerek endüstrilerinde kullanması adına güçlü bir teşvik yaratmaktadır (Yeoh, 2008, s. 189-192). AB ETS'nin oluşturduğu karbon piyasası altı sera gazının karbon dioksitin bir metrik ton eşitine çevrilmesi üzerinden kredilendirilmektedir (Yeoh, 2008, s. 191). Tablo 2.1.'de bu dönüşüm oranları gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Sera Gazlarının CO₂ Eşdeğerleri ve Yıllık Isıtma Potansiyelleri

Gazlar	CO ₂ Eşdeğeri (CO ₂ e)	Küresel Isıtma Potansiyeli (100 Yıl)
1 Ton Karbondioksit (CO ₂)	1 Ton CO ₂ e	1
1 Ton Metan (CH ₄)	23 Ton CO ₂ e	21
1 Ton Diazot Monoksit (N ₂ O)	296 Ton CO ₂ e	310
1 Ton Hidroflorokarbon (HFCs)	120-12.000 Ton CO ₂ e	150-11.700
1 Ton Perflorokarbon (PFCs)	6.500-9.200 Ton CO ₂ e	6.500-9.200
1 Ton Kükürt Hekzaflorür (SF ₆)	22.000 Ton CO ₂ e	23.900

Kaynak: Vasser (2009)

AB ETS sayesinde AB, Kyoto yükümlülüklerini, böyle bir ticaret sistemi olmadan sera gazı salınım seviyesini düşürmek için karşılaması gereken 6.8 milyar avrodan fazla yıllık maliyet yerine, 2.9 ila 3.7 milyar avroluk bir maliyetle karşılayabilmektedir. Esasen altı

temel ilkeye dayanmaktadır (Yeoh, 2008, s. 192). Bu maliyetin AB'nin toplam GSYİH'sinin %0.1'den daha azına denk geldiği belirtilmektedir (EC, 2008, s. 5).

AB ETS'nin gelişim aşamaları şu şekildedir (EC, 2008, s. 6):

- Coğrafi olarak, AB'nin 27 Üye Devlete genişlemesiyle kapsamı büyümüştür ve 2008'in başından itibaren komşu ülkeler İzlanda, Lihtenştayn ve Norveç de sisteme katılmıştır.
- Uluslararası emisyon ticareti piyasasını daha da genişletmek için AB ETS, dünyanın farklı ülkelerindeki sera gazları için uyumlu zorunlu üst sınır ve ticaret sistemleriyle (cap-and-trade systems) bağlantılı olarak çalışmaktadır.
- AB ETS kapsamına başlangıçta enerji ve üretim endüstrilerinde faaliyet gösteren yaklaşık 11000 yoğun enerji tüketen kuruluş dahil edilmiştir. 2012'den itibaren havayolu işletmeleri ve Avrupa'da bulunan havaalanları da sisteme dahil edilmiştir.
- İlk üç yıllık yaparak öğrenme (learning by doing) sürecinin ardından 2008-2012 yılları arasındaki süreci kapsayan ikinci dönemde emisyon ödeneğinin tavan sınırı daraltılmış ve böylece Kyoto protokolünün hedeflerine ulaşmak için önemli ilerlemeler sağlanmıştır.
- 2013 yılında, AB ETS'nin işleyişini güçlendirecek, genişletecek ve iyileştirecek bir yenileme yürürlüğe girmiştir. Böylece daha sonraki yıllarda, verilen taahhütlerin yerine getirilmesi için gerekli adımlar atılmıştır.

Güncel olarak AB ETS'nin kapsadığı gaz türleri ve bu gazların salınımına neden olan sektörler şunlardır:

Karbon dioksit (CO₂) - Petrol rafinerileri de dahil olmak üzere enerji yoğun sanayi sektörleri çelik işleri ve demir, alüminyum, metal üretimi, çimento, kireç, cam, seramik, kağıt hamuru, kağıt, karton, asitler ve dökme organik kimyasallar, sivil havacılık

Azot oksit (N₂O) - Nitrik, adipik ve gliksilik asitler ve gliksal üretimi,

Perflorokarbonlar (PFC'ler) – Alüminyum üretimi

Zamanla Kyoto Protokolü'nden bağımsız bir nitelik kazanan AB ETS'nin bazı temel ilkeleri ve unsurları bulunmaktadır. Bunlar alt başlıklarla açıklanmıştır.

2.1.3.1.Üst sınır ve ticaret sistemi

AB ETS'nin temelinde oluşturulmuş bir piyasada üst sınırı belirlenmiş emisyon izinlerinin (sera gazı salınım hakkı) ödeneklerin alınıp satılması yoluyla takas edilebilmesi yaklaşımı yatmaktadır. Bu izinler/ödenekler emisyon ticareti piyasasının para birimi olarak değerlendirilmektedir. Sisteme dahil olan işletmelerin sera gazı salınım miktarları için izne sahip olmaları ve bu izin ile belirlenen sınırın altında sera gazı salınımı yapmaları gerekmektedir. Üst sınır ile yaratılan kısıt emisyon kaynağı, piyasada alıcı ve satıcılar arasındaki alışveriş sayesinde fiyatlanmaktadır. Emisyonlarını izinlerin piyasa fiyatından daha düşük bir fiyata azaltabilen emisyon hakkı sahibi işletmeler, salınım hakkı satın almak yerine emisyonlarını azaltmaya teşvik edilmektedir. Bu işletmeler böylece ellerinde kalan fazla salınım hakkını piyasada diğer işletmelere satabilmektedir. Sera gazı salınımını azaltma maliyeti piyasadaki izinlerin fiyatından daha yüksek olan ve izin verilenden fazla emisyonu neden olan işletmeler ise piyasadan ihtiyaç duydukları izinleri satın almaktadır. Buradaki temel amaç piyasada bulunan izin miktarını (arzı) kısırarak fiyatını yükseltmek ve işletmelerin emisyon azaltımına gitmelerini teşvik etmektir (Bekkhuis ve Hecke, 2008, s. 119).

İşletmelere düşen sera gazı salınım izin miktarı ise Avrupa Komisyonu tarafından Ulusal Dağıtım Planları kapsamında belirlenmektedir. Bu sınırın altında veya üstünde kalan işletmeler söz konusu piyasada işlem yapmaktadır. AB ETS'de kurumsallaşmış bir piyasa yerine tüm işlemlerin ulusal siciller ve AB Komisyonu tarafından kontrol edilen Topluluk Bağımsız Ticaret Sicili (Community Independent Transaction Log) aracılığıyla izlendiği bir piyasa oluşturulmuştur (Güldoğan, 2010).

2.1.3.2.Ticaret dönemi

AB ETS, 2005-2007 yılları arasındaki süreci kapsayan ilk ticaret dönem, 2008-2012 yılları arasındaki süreci kapsayan ikinci dönem, 2013-2020 yılları arasındaki üçüncü dönem ve günümüzü de kapsayan 2021-2030 yılları arasındaki dördüncü dönem olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır. Birinci dönem pilot uygulama dönemi olup

çoğunlukla enerji işletmeleri ve yoğun enerji kullanan üretim sektörlerini sisteme dahil etmiştir. İkinci dönem Kyoto Protokolü'ndeki taahhüt dönemine karşılık gelmekte ve sisteme dahil olan ülke ve şirket kapsamını genişletmiştir. Birinci ve ikinci dönemde ödenekler üye ülkelere Ulusal Dağıtım Planları kapsamında ücretsiz (grandfathering) olarak tahsis edilmiştir. Bu durum söz konusu uygulamadan yararlanan sektörlerle uyum maliyetlerini tüketici fiyatlarına yansıtabilmesi gibi bir avantaj nedeniyle “talih kuşu karı” olarak yansımıştır (Madaleno vd. 2024).

Üçüncü dönemde ulusal sınırlar AB çatısında tek bir emisyon sınırı olarak değiştirilmiş ve 2005 yılı seviyelerine göre emisyonlarda %21 civarında bir azalma hedeflenmiştir. Bunun için üst sınırı %1,74 oranında düşürmek planlanmıştır. Bu dönemde daha önceki dağıtım modeli olan ücretsiz (grandfathering) dağıtım, açık artırma usulü dağıtım modeline çevrilmiştir. Dördüncü dönemde ise 2030'a kadar sera gazı salınımlarında 2005 yılı seviyelerine göre %43'lük bir düşüşe ulaşabilmek için üst sınırın yıllık %2,2 oranında azaltılması amaçlanmaktadır. 1990 yılı seviyelerinin ise en az %55 daha azına ulaşmak hedeflenmektedir. Nihai amaç ise 2050 yılında net sıfır emisyonu sağlamak ve 2050 sonrasında da negatif emisyon yaratmaktır (EC, 2021; Madaleno vd. 2024).

Oluşturulan direktifler sayesinde 2005 yılı Ocak ayından itibaren devreye giren AB ETS programının likiditesi başlangıçtan 2006 yılına kadar sürekli artmıştır. Bu süreçte piyasaya dahil olan banka, hedge fon, mali aracı ve diğer emtia ticareti yapan işletme sayısı giderek artmıştır. Ayrıca Avrupa İklim Borsası (AİB-European Climate Exchange) haricinde farklı borsalarda da karbon ticareti yapmak mümkün olmuştur. AİB'nin değerlendirmesine göre toplam ticaret hacmi 2005 yılında 7.2 milyar avro iken (362 milyon ton) 2006 yılında 9-10 milyar avroya yükselmiştir (Yeoh, 2008, s. 193-195).

2.1.3.3.Ödenekler (Allowances)

Ödenekler AB ETS'nin temel para birimleridir. İklimle ilgili kavramsal karşılığı AB Ödenekleri olup ayrıca kotalar, tahsisatlar veya izinler olarak da ifade edilmektedir. Bir ödenek, sahibi olan işletmeye bir ton karbon dioksit eşdeğerinde sera gazı salınımı yapma hakkı veya izni vermektedir. Bu miktar, bir AB Ödeneğinin Kyoto Protokolünde belirlenen proje temelli mekanizmalardaki kredilerle aynı değere sahip olduğunu göstermektedir. Sahip olunan ödenekler sadece belirlenen dönemler içerisinde geçerlidir

(Bekkhuss ve Hecke, 2008, s. 120). İzinler açık artırmalarda satılabilmekte ve ticareti yapılabilmektedir. Üst sınır azaldıkça, AB karbon piyasasına tahsisat arzı da azalır. İşletmeler emisyonlarını yıllık olarak izlemeli ve raporlamalı ve yıllık emisyonlarını tam olarak karşılayacak miktarda tahsisat teslim etmelidir. Bu gerekliliklerin yerine getirilmemesi halinde ağır para cezaları uygulanmaktadır. Ayrıca işletmeler bazı tahsisatları ücretsiz olarak alabilmektedir. Havacılık sektörünün ücretsiz tahsisat miktarı %82'dir. Bunun yanı sıra sistem işletmelere gerektiğinde kendi aralarında tahsisat ticareti yapabilme olanağı da sunmaktadır. Eğer bir tesis ya da işletici emisyonlarını azaltırsa, işletme elindeki diğer ödenekleri satabilmekte veya gelecekte kullanmak üzere saklayabilmektedir (EC, 2016). Tahsisatların fiyatı, sağlam bir dizi gözetim kuralına tabi olan AB karbon piyasası tarafından belirlenir. Azalan AB ETS üst sınırı, şirketleri piyasadaki tahsisatların uzun vadeli kıtlığı konusunda bilgilendirirken, bunların piyasa değerine sahip olmasını sağlar. Karbon fiyatı da şirketlerin emisyonlarını uygun maliyetli bir şekilde azaltmaları için bir teşvik sağlar. Bu fiyat aynı zamanda tahsisatların satışından elde edilen geliri de belirler.

2.1.4.AB ETS'den Uluslararası Havacılık Karbon Dengeleme ve Azaltım Şemasına (CORSIA) Geçiş

Küreselleşen havayolu taşımacılığı sektörün doğrudan ekonomik katkısı yanı sıra turizm başta olmak üzere diğer birçok endüstrinin de ekonomik katkısının artmasını desteklemektedir. 2019 yılında küresel çapta yaklaşık 39 milyon uçuş yapılmıştır. Bu sayı son 15 yıldaki uçuş sayısının üçte ikisinden daha fazlasına denk gelmektedir. Ayrıca yine bu dönemde taşınan yolcu sayısı %200'den fazla artış göstermiştir. Hava kargo taşımacılığında ise artış oranı %50 seviyesinde gerçekleşmiştir. 2019 yılında Avrupa'da 1.2 milyardan fazla yolcu 9.3 milyon uçuşla bölgedeki 500 havalimanı arasında taşınmıştır. Avrupa içerisinde bu kıtadan kalkan uçaklar toplam sera gazı emisyonlarının %5,2'sinin ana nedeni olmuştur. Bu oran ulaştırma sektörü emisyonlarının %18,3'üne denk gelmektedir. COVID-19 dönemi bu olumsuz etkileri belirli bir süre azaltsa da pandemi etkisinin geçmesi sonrasında ticari havacılık emisyonları tekrar yükselmeye devam etmiştir. 1940-2019 yılları arasındaki küresel CO₂ emisyonlarının yarısına yakını 2000 yılı sonrasında salınmıştır (Bauen vd., 2022; EASA, 2022).

Havayolu taşımacılığının söz konusu etkisini azaltmak amacıyla Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (USHÖ-ICAO) 2016 yılında tüm ülkelerin katılımına açık olarak, uluslararası havayolu taşımacılığından kaynaklı CO₂ eşiti olarak ölçülen emisyonları kapsayacak şekilde piyasa temelli bir program benimsemiştir. Uluslararası Havacılık Karbon Dengeleme ve Azaltım Şe(CORSIA olarak kullanılacak) olarak bilinen bu program dünya çapında tek bir endüstri özelinde CO₂ emisyonlarının azaltılması amacıyla oluşturulan ilk programdır (Zhang vd., 2021). Bu programa, 2018 yılı gelir-ton kilometrelerinin (RTK olarak ifade edilecek) bireysel payı toplam RTK'ların yüzde 0,5'inden fazla olan veya en yüksek RTK miktarından en düşük RTK miktarına kadar Devletler listesindeki kümülatif payı toplam RTK'ların yüzde 90'ına ulaşan tüm Devletleri kapsamaktadır. CORSIA, teknolojik iyileştirmeler, operasyonel iyileştirmeler ve sürdürülebilir havacılık yakıtları kullanılarak azaltılamayan CO₂ emisyonlarının miktarını karbon piyasasından alınan emisyon birimleriyle dengeleyerek 2010 yılından itibaren atılan önlem adımlarının diğer unsurlarını tamamlamaktadır (ICAO, 2019). CORSIA, AB ETS işleyişine benzer bir şekilde çalışmakta olup havayollarının 2019 yılı emisyon seviyelerini aşan emisyon salınımlarını dengelemelerini şart koşmaktadır. Bu dengeleme ya krediler yoluyla ya da CORSIA koşullarına uygun sayılan yakıtların kullanımı yoluyla sağlanabilmektedir (Bauen vd., 2022). Bu yakıtlar sürdürülebilir havacılık yakıtlarını (SAF) ve daha düşük karbon havacılık yakıtlarını kapsamaktadır. SAF, sürdürülebilirlik kriterlerini karşılayan yenilenebilir veya atık türevli havacılık yakıtları olarak tanımlanır. Daha düşük karbon havacılık yakıtları ise Ek 16, 4. Ciltte “Bu Cilt kapsamındaki CORSIA Sürdürülebilirlik Kriterlerini karşılayan fosil bazlı bir havacılık yakıtı” olarak tanımlanmaktadır. Bu yakıtlar sürdürülebilir havacılık yakıtı sayılmayıp ICAO’nun benimsediği temel seviye emisyon yaşam döngüsü değerlerine kıyasla en az %10 oranında daha az sera gazı emisyonu azaltımı sağlamalıdır (ICAO, 2022). CORSIA eşik olarak belirlediği emisyon yaşam döngüsü değerleri ve havayollarının salınım döngüsünü değerlendirmek için küresel çapta kullanıma uygun bir hesaplama yöntemi getirmiştir. Ayrıca sürdürülebilirlik kriterlerinin uygulanması için bir sürdürülebilirlik sertifikalandırma şeması oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yönteme göre varsayılan yaşam döngüsü değeri, varsayılan çekirdek yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) değeri ve dolaylı arazi kullanım değişikliği değerinin toplamıdır (Bauen vd., 2022).

CORSIA'nın uygulanma süreci 2021-2023 yılları arasındaki gönüllü katılım sağlanabilen pilot aşama ile başlamıştır. Bunun ardından 2024-2026 yılları arasındaki gönüllü katılım sağlanan ilk aşama ve 2027-2035 yılları arasındaki katılımın zorunlu olduğu ikinci aşama gelmektedir. 2019 yılının ortasına kadar 80 ülke CORSIA'ya katılım için gönüllü olmuştur. Bu ülkelerin ticari havacılığı, uluslararası hava trafiğinin %75'inden fazlasını oluşturmaktadır (ICAO, 2020).

AB Komisyonu'nun 2008 yılında çıkardığı Direktif 2008/101/EC ile AB ETS'nin 2012 yılından itibaren Avrupa Ekonomik Alanına (AEA) gelen veya bu alandan giden tüm uçuşları da kapsayacak şekilde havacılık sektörüne genişletilmesi kararına AB dışı ülkelerin ve havayollarının çoğu tarafından eleştiriyle yaklaşmıştır. ICAO'nun kapsamı içerisine giren tüm ülkeleri de küresel bir emisyon ticaret sistemine dahil edebilmek ve söz konusu eleştirileri gidermek amacıyla 2012 yılı Kasım ayında AB dışı havayollarının AB ETS'ye dahil edilmemesine yönelik karar alınmıştır. CORSIA'nın kurulmasıyla, 2017 yılı Şubat ayında, AB ETS'nin sadece AEA içi uçuşlarla sınırlandırılan kapsamı 2023 yılı sonuna kadar uzatılmıştır. Bu süreç sonunda 2024 yılı başında devreye girmesi gereken bu koşullar 3 Temmuz 2020 tarihinde AB Komisyonu'nun hazırladığı Yol Haritası (Başlangıç Etki Değerlendirmesi) ile altı seçenekli bir hal almıştır (Mai, 2021). Bu yol haritası Tablo 2.2.'de gösterilmektedir. Tablonun kapsamı diğer piyasa temelli mekanizma olan CORSIA'nın da dahil edilmesiyle genişletilmiştir.

Tablo 2.2. Yol haritasında önerilen altı seçenek (Mai, 2021)

Düzenleme Kapsamı		
Politika Seçeneği	AB ETS	CORSIA
Birinci seçenek: AB ETS'nin tam yasal kapsamı	AB/EFTA havalimanlarından kalkan veya AB/EFTA havalimanlarına varan AB içi olmayan ve AB/Avrupa Serbest Ticaret Birliği (EFTA) içi uçuşlar	
İkinci seçenek: Sadece AB içi ve EFTA bölgesi		AB/ EFTA içi uluslararası uçuşlar, AB/ EFTA havaalanlarından (AB'nin en dış bölgeleri dahil) ve üçüncü ülkelerden kalkan ve bu havaalanlarına varan uçuşlar dahil tüm uluslararası uçuşlar AB/EFTA dışı uçuşlar, yani AB/EFTA havaalanlarından (AB'nin en dış bölgeleri dahil) ve üçüncü ülkelerden kalkan ve bu havaalanlarına varan uçuşları kapsar
Üçüncü seçenek: Sadece CORSIA	Sadece AB/EFTA içi uçuşlarla sınırlı	Uluslararası AB/EFTA içi uçuşlar ve AB/EFTA ülkeleri (AB'nin en dış bölgeleri dahil) ile üçüncü ülkeler arasındaki uçuşlar: 2020 emisyonlarının üzerinde (iç hat uçuşları dahil)
Dördüncü seçenek: ETS-CORSIA Net ayırım (Clean-cut)	Seçenek 2'deki gibi AB/EFTA içi uçuşlar	Uluslararası AB/EFTA içi ve AB/EFTA ülkeleri arasındaki uçuşlar (AB'nin en dış bölgeleri dahil), üçüncü ülkeler tarafından verilen operatör lisansları ile (iç hat uçuşları kapsam dışı)
Beşinci seçenek: ETS-CORSIA karışımı	Uluslararası AB/EFTA içi uçuşlar: Her operatörün 2020 emisyonlarına kadar	
Altıncı seçenek: Uçak işleticisi lisansına göre ETS-CORSIA karışımı	AB üye ülkeleri tarafından verilen operatör lisanslarına sahip AB/EFTA içi uluslararası uçuşlar	

AB ETS'nin birinci seçeneği olan tam yasal kapsam koşullarının uygulamaya geçmesi çevresel açıdan en yüksek etkinliği sağlamaktadır. Bu seçeneğin uygulanması ile uluslararası havacılık emisyonlarının %30'dan fazlasının azaltılması mümkündür. Ayrıca Avrupa Yeşil Anlaşma kapsamında AB, 2050 yılına kadar taşımacılıktan kaynaklı emisyonları %90'a kadar çekmeyi planlamaktadır. Bu sürecin ilk adımı ise emisyonların 2030 yılına kadar 1990 yılı seviyesinin en az %55'ine kadar azaltmaktır (EC, 2020a). Mai (2021), bu seçenekte CORSIA'nın uygulanmamasının AB'nin dengeleme politikalarıyla uyuşmadığını ifade etmektedir. Ayrıca CORSIA'nın izleme, raporlama ve doğrulama koşullarının; şeffaflık, dengeleme birimlerinin uygunluğu, çift sayımdan kaçınılması, kayıt altına alınması ve sicil ile yönetim uygunluk sisteminin kurulması başlıklarında geliştirilmesi gerektiği belirtilmektedir (EC, 2017).

Tablodaki diğer seçenekleri de ele alacak şekilde AB ETS ve CORSIA arasında bir karşılaştırma yapıldığında şunlar söylenebilir (EC, 2017):

- Hem küresel CORSIA hem de AB ETS, sera gazı emisyonlarını ele alan piyasa temelli tedbirlerdir. Ancak aralarında bazı farklar bulunmaktadır. İlk fark olan tedbirin niteliği açısından AB ETS, toplam sera gazı emisyonlarının azaltılması amacıyla bu emisyonlara bir sınır getiren yasal olarak bağlayıcı bir üst sınır ve ticaret sistemidir. CORSIA ise havacılık sektöründen kaynaklanan emisyonların, uluslararası emisyon azaltma kredileriyle telafi edilmesi koşuluyla CNG 2020 eşiğinin üzerinde artmaya devam etmesine izin veren bir karbon dengeleme programıdır.
- Diğer fark ise, emisyon azaltımları veya sınırlamaları açısından ulaşılması gereken seviyedir. CORSIA kapsamındaki CNG2020 hedefinin aksine (çeşitli esneklikler ve muafiyetler nedeniyle yalnızca %80 oranında karşılanacaktır), havacılık faaliyetleri için AB ETS'deki üst sınır, havacılıktan kaynaklanan 2004-2006 ortalama emisyonlarının %95'i olarak belirlenmiştir ve 2021'den itibaren yıllık %2,2 oranında azalması beklenmektedir. Bu, belirli bir coğrafi kapsamda elde edilen sera gazı emisyon azaltımlarını karşılaştırırken CORSIA'nın AB ETS'den daha az iddialı olduğunu göstermektedir.
- Üçüncü olarak, CORSIA uluslararası denkleştirme yaklaşımını benimsemiştir. Uluslararası denkleştirmelerin kalitesinin kontrol edilmesi daha zor olmakla birlikte, eklenebilirlik ve muhasebe kurallarının uygulanabilirliği açısından da problem

yaratma potansiyeli taşımaktadır. Buna ek olarak, AB'nin BM İDÇS kapsamındaki 2030 iklim hedefinin, uluslararası krediler kullanılmadan, yurtiçi azaltım çabalarıyla karşılanması gerektiği de hatırlatılmalıdır.

- Son olarak, bu iki sistemin coğrafi kapsamı farklıdır. CORSIA, küresel olarak uluslararası uçuşlara uygulanırken (bazı ülkelere giden ve gelen rotalar muaf tutulsa da), AB ETS iç havacılık emisyonları da dahil olmak üzere AEA ile ilgili uçuşlara uygulanmaktadır.

Bir diğer fark Pratama (2024) tarafından ifade edilmiştir. Yazara göre CORSIA'nın sadece CO₂ emisyonlarına odaklanan tasarımını CO₂ haricindeki emisyonlara yönelik olarak geliştirmesi gerekmektedir. Avrupa Komisyonu'nun, CORSIA'nın etkinliğini gözden geçirmek için son tarih belirlemesi, CO₂ haricindeki emisyonların izlenmesi, raporlanması ve doğrulanması konusunda AB'nin öncülüğüne işaret etmekte ve AB ETS'nin kapsamının CORSIA'dan daha geniş olduğunu göstermektedir.

AB ETS'nin tam yasal kapsamının Çin gibi ülkelere Avrupalı uçak üreticilerine verilen siparişlerin iptaline veya ertelenmesine neden olması, Avrupa havacılık endüstrisinden ETS'nin tam kapsamının durdurulmasına yönelik çağrılar yapılmasına neden olmuştur (Mai, 2021). Tablo 1'de görüldüğü üzere alternatif çözümlerin devreye sokulması sonucunda gelinecek noktada ise mevcut AB ETS mevzuatı, AB Komisyonu'na gözetim görevini yüklemektedir. AB Komisyonu, küresel boyutta piyasa temelli bir mekanizmanın AB ETS'nin emisyon azaltım hedefleriyle uyumlu olmasını dikkatle izlemektedir (EC, 2017). AB, CORSIA'nın uygulanması için ICAO tarafından atılan adımların izlenmesi, raporlanması ve doğrulanması amacıyla yasal olarak bağlayıcı olan hükümleri kabul eden ilk yargı mercileri arasındadır (EC, 2020b).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

HAVACILIK EMİSYONLARININ AZALTILMASINDA AB EMİSYON TİCARETİ SİSTEMİNİN ROLÜ: EKONOMETRİK BİR ANALİZ

3.1. Literatür Taraması

Küresel ölçekte sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik politika girişimleri ve akademik araştırmalar giderek artmaktadır. İklim değişikliği ile mücadelede sektörler arası emisyon azaltım stratejileri büyük önem taşıırken, yüksek enerji tüketimi ve hızla artan hava trafiği hacmi nedeniyle havacılık sektörü, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir konumda yer almaktadır. Havacılık sektörünün karbon yoğun yapısı, sektörün emisyon azaltım politikalarına entegrasyonunu zorunlu hale getirmekte ve bu kapsamda piyasa temelli mekanizmalar, düzenleyici politikalar ve teknolojik yenilikler öne çıkmaktadır. Literatürde, havacılık sektöründeki karbon emisyonlarını belirleyen faktörler, enerji tüketimi ve ekonomik büyümenin çevresel etkileri ile AB ETS'nin karbon azaltımı üzerindeki rolü kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. Özellikle ekonometrik modelleme teknikleri ve ampirik analizler aracılığıyla yürütülen çalışmalar, karbon emisyonlarını etkileyen temel değişkenleri belirlemeye ve bu değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisini ortaya koymaya odaklanmaktadır. Bu bağlamda, mevcut literatür üç temel ekseninde incelenmektedir; havacılık sektöründe karbon emisyonlarının dinamikleri, enerji kullanımı, ekonomik büyüme ve nüfusun karbon emisyonları üzerindeki etkisi ve AB ETS'nin karbon azaltım politikalarının etkileri.

3.1.1. Havacılık Sektöründe Karbon Emisyonlarının Dinamikleri

Olsthoorn (2001), 1950-2050 döneminde uluslararası havacılıktan kaynaklanan CO₂ emisyonlarının zaman serisi analiziyle incelemiştir. Çalışmada, havacılık emisyonlarını bunker jet yakıt satışları, dünya ham petrol fiyatları ve küresel gayrisafi yurt içi hasıla (GSYİH) arasında anlamlı bir ilişki olduğu bulgulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, CO₂ emisyonlarının farklı senaryolar altında 2050 yılına kadar 3 ila 6 kat artabileceğini belirtilmiştir.

Morrell (2009) kısa ve orta mesafeli yolculuklar için daha büyük uçakların kullanılması yoluyla Avrupa havacılığında CO₂ emisyonlarının azaltılmasının fizibilitesini incelemiştir. Çalışmada, daha büyük uçakların kullanımı ve farklı operasyon şekilleri yoluyla daha fazla yakıt verimliliği sağlama potansiyeli incelenmiştir. Çalışmanın bulgularında, yakıt verimliliğinin uçak büyüklüğü ile ilişkili olduğu ve kısa/orta mesafeli uçakların uzun mesafeli uçaklara kıyasla daha fazla fayda sağladığı tespit edilmiştir. Buna ilaveten uçak boyutunun artırılmasının yakıt verimliliğini yıllık %1 kadar artırabileceğini ortaya konmuştur.

Grote vd. (2014), uçaklardan kaynaklanan CO₂ emisyonlarının azaltılması için sivil havacılık endüstrisinin uygulayabileceği önlemlerle ilgili bir literatür incelemesi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada politika ve teknoloji odaklı olarak sınıflandırılan azaltım stratejileri değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulgularına göre, yakıt maliyetinin düşürülmesi gibi piyasa odaklı çözümlerin emisyonların azaltılması için sınırlı teşvikler sağlayabileceği ancak güçlü bir küresel düzenleyici çerçevenin önemli azaltımlar elde etmek için kritik olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yazarlar, güçlü uluslararası anlaşmalar olmadan hava trafiğindeki büyümenin emisyon azaltma önlemlerinin etkisini büyük olasılıkla aşacağını vurgulamışlardır.

Zou vd. (2014), 15 büyük ABD havayolu şirketi arasında yakıt verimliliği eğilimlerini, yakıt tüketimi ve uçuş operasyonlarına ilişkin oran tabanlı, deterministik ve stokastik sınır yaklaşımlarıyla analiz etmişlerdir. Çalışmada, uçak tasarımındaki gelişmeler, işletme metodolojileri ve yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar gibi yakıt ekonomisini etkileyen kritik faktörler incelenmiştir. Zamansal değişimler değerlendirilerek sektördeki verimlilik iyileştirmelerinin oranı hesaplanmış ve bulgular, yakıt verimliliğinde istikrarlı

bir ilerleme olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, bu ilerlemelerin artan hava trafiği talebiyle büyük ölçüde dengelendiği tespit edilmiştir. Bu durum, net emisyon azaltımlarının sağlanabilmesi için düzenleyici desteğin kritik bir gerekli olduğunu vurgulamaktadır.

Brugnoli vd. (2015), 1975-2013 yılları arasında Avrupa'da daha düşük CO₂ emisyonlu uçakların tescilini etkileyen ekonomik faktörleri incelemişlerdir. Çalışmada, sıradan en küçük kareler (OLS) yöntemi kullanılarak zamansal eğilimlerin, benzin maliyetlerinin, çevresel düzenlemelerin ve piyasa dinamiklerinin yakıt verimliliği ve CO₂ emisyonları üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bulgular, havayollarının yakıt verimliliği talebi ve uçak üretimindeki rekabetin teknolojik ilerlemenin başlıca katalizörleri olduğunu ve CO₂ emisyonlarında yıllık %1,34'lük bir düşüşe yol açtığını göstermektedir. Bununla birlikte, Kyoto Protokolü gibi çevresel politika adımlarının kısa vadeli etkilerinin sınırlı kaldığı, ancak uzun vadede piyasa baskılarının ve yakıt maliyetlerindeki artışın daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Schäfer vd. (2016), ABD'deki dar gövdeli yolcu uçaklarından kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmaya yönelik 21 maliyet etkin stratejinin etkinliğini incelemişlerdir. Çalışmada, ABD dar gövdeli uçak filosu örnek alınarak filo kompozisyonu ve CO₂ emisyonlarını modellemek için teknik-ekonomik bir analiz uygulanmış, teknoloji iyileştirmeleri, biyokütle bazlı biyoyakıtlar, hava trafik yönetimi ve havayolu operasyonel stratejileri değerlendirilmiştir. Filo kompozisyon modeli kullanılarak, 2012-2050 yılları arasında filonun dönüşümü ve bu dönüşümün emisyonlar üzerindeki etkisi simüle edilmiştir. Bulgular, uçak yakıt verimliliğinin yıllık %2 oranında artırılabilceğini ve bu iyileştirmelerin çoğunun petrol fiyatlarının 50-100 USD arasında olması durumunda sıfır marjinal maliyetle uygulanabileceğini göstermektedir. Ayrıca biyoyakıtların benimsenmesi ve yeni nesil uçakların kullanımıyla 2050 yılına kadar toplam emisyonların önemli ölçüde azaltılabileceği belirlenmiştir.

Peeters vd. (2016) havacılık sektöründeki sürdürülebilirlik söylemlerinin ve teknoloji odaklı çözümlerin iklim politikalarındaki ilerlemeleri nasıl geciktirdiğini incelemişlerdir. Çalışmada, emisyon azaltımı için geçmişte önerilen teknolojilerin medya söylemlerindeki yükselişini ve unutuluşunu analiz etmek amacıyla iki aşamalı bir yöntem kullanılmıştır. İlk olarak, Delphi yöntemiyle 1994-2013 arasında önerilen 20 teknoloji belirlenmiş,

ardından bu teknolojiler gazete ve makalelerdeki izleriyle incelenmiştir. Bulgular, bu teknolojilerin çoğunun başlangıçta umut vaat eden çözümler olarak sunulmasına rağmen, teknik zorluklar, yüksek maliyetler ve lojistik engeller nedeniyle uygulanamadığını göstermektedir. Medyada ve endüstri raporlarında öne çıkan bu "teknoloji mitleri", iklim politikalarında gerçekçi adımlar atılmasını geciktirmiş ve sürdürülebilir havacılık konusunda yanıltıcı bir iyimserlik yaratmıştır. Çalışma, bu tür mitlerin iklim politikalarının etkinliği üzerindeki olumsuz etkilerine dikkat çekerek, politikacıların ve sektör liderlerinin gerçekçi, kanıta dayalı çözümler geliştirmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Hassan ve Nosheen (2018), Pakistan'da 1990-2017 dönmleri arasında hava taşımacılığının karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot oksit (N₂O) emisyonları üzerindeki etkisini 1990-2017 döneminde ARDL (Autoregressive Distributed Lag) sınır testi ve Granger Nedensellik Testi yöntemlerini kullanarak incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, hava taşımacılığının CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonlarıyla pozitif ve anlamlı bir ilişkiye sahip olduğu bulunmuştur; kargo taşımacılığındaki %1'lik artış CO₂ emisyonlarını %0,77, CH₄ emisyonlarını %0,38 ve N₂O emisyonlarını %0,20 artırmaktadır. Ayrıca kısa vadede yolcu taşımacılığının emisyonları artırdığı tespit edilmiştir. Granger nedensellik testi sonuçlarına göre, hava taşımacılığının emisyon artışına sebep olduğunu doğrulamıştır. Bununla birlikte, enerji talebi ve nüfus yoğunluğunun da emisyonları artırdığı, ancak FDI ve ticaret hacminin belirgin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

Terrenoire vd. (2019), havacılık sektöründen kaynaklanan karbondioksit (CO₂) emisyonlarının gelecekteki iklim üzerindeki etkilerini değerlendirmek için OSCAR kompakt iklim modeliyle farklı senaryoları analiz etmişlerdir. 1940-2050 dönemi için, iki ana emisyon azaltım stratejisi (RCP2.6 ve RCP6.0) bağlamında, havacılık emisyonlarının sıcaklık artışı ve radyatif zorlama üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın bulgularına göre, 2050 yılına kadar havacılık kaynaklı ısıtmanın, toplam antropojenik ısıtmanın %1.4 ila %2.0'ını oluşturacağını ortaya koymuşlardır.

Hájek vd. (2019), AB ülkesi olan İsveç, Finlandiya, Danimarka, İrlanda ve Slovenya'nın enerji sektörlerindeki karbon vergisinin çevresel etkinliğini incelemişlerdir. Çalışmada, çoklu panel regresyon yöntemi kullanılarak karbon vergisi, sera gazı emisyonları ve diğer

çevresel politika araçlarının sinerjik etkileri analiz edilmiştir. Bulgular, karbon vergisinin enerji sektöründe sera gazı emisyonlarını azalttığını ve bu etkinin fosil yakıt tüketiminin azaltılmasıyla daha da güçlendiğini göstermektedir. Buna ilaveten karbon vergisinin artırılmasının kişi başına düşen yıllık emisyonları 11,58 kg azaltabileceği belirtmekte ve uzun süreli karbon vergisi uygulamalarının, emisyon ticaret sistemine kıyasla daha etkili olduğunu vurgulamaktadır.

Rotaris vd. (2020), İtalyan hava yolculuğu yapan bireylerin karbon emisyonlarını azaltma ya da dengeleme projelerine bağış yapma isteklerini incelemiştir. Çalışmada, son üç yıl içinde en az bir kez uçakla seyahat etmiş 1228 İtalyan bireyle anket yapılarak veri toplanmıştır. Çalışmada, bağış miktarı, proje türü ve etkisinin, bireylerin cinsiyeti, eğitim düzeyi, çevre bilinci ve seyahat alışkanlıklarına göre değişip değişmediğini analiz etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, yolcuların CO₂ tonu başına 12 ila 38 Avro ve her uçuş için 14 ila 66 Avro arasında ödeme yapmaya hazır olduğunu ve katılımcılar özellikle orman koruma ve yeniden ağaçlandırma projelerine öncelik verdiği ve uçak teknolojisi ya da alternatif yakıt geliştirme projelerine nazaran bu tür projeleri daha çok desteklediği tespit edilmiştir.

Lo vd. (2020), 1997-2011 döneminde bir panel veri seti kullanarak ve ekonometrik bir model oluşturarak İtalya'nın Lombardiya bölgesinde hava taşımacılığında kaynaklanan CO₂ emisyonlarını etkileyen faktörleri analiz etmişlerdir. Çalışmada, uçuş rotası, uçak boyutu, teknik ilerleme, yakıt fiyatı ve düşük maliyetli havayolu şirketlerinin etkisi gibi faktörlerin toplam emisyonlar ve koltuk başına kilometre başına düşen emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bulgulara göre, daha büyük uçakların toplam emisyonları artırsa da emisyon verimliliğini (koltuk kilometre başına emisyon) iyileştirdiğini; uzun mesafeli uçuşların toplam emisyonları yükseltirken birim başına emisyonu azalttığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte yıllık teknik ilerlemenin emisyon verimliliğini %0,06 oranında artırdığı tespit etmişlerdir.

Gössling ve Humpe (2020), COVID-19 öncesi dönemde havacılık talebinin ölçeğini, dağılımını ve büyüme eğilimlerini değerlendirerek havacılık sektörünün iklim değişikliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, havacılık endüstrisi raporları, uluslararası kuruluşların sağladığı veriler ve ulusal seyahat anketleri kullanılarak ulusal, bölgesel ve küresel düzeydeki havacılık faaliyetleri analiz edilmiştir. Bulgulara göre,

dünya nüfusunun yalnızca %11'inin hava yolculuğu yaptığı, uluslararası uçuşlara katılım oranının ise %4'ü geçmediği belirlenmiştir. En sık uçan %1'lik kesimin, yolcu hava taşımacılığından kaynaklanan emisyonların %50'sinden fazlasını oluşturduğu ve bu bireylerin yıllık CO₂ emisyonlarının 7.500 tona kadar çıkabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması gibi uluslararası iklim politikalarının yalnızca uluslararası ticari uçuşlardan kaynaklanan CO₂ emisyonlarını hedef aldığı, ancak NO_x veya contrail gibi CO₂ dışı etkileri kapsamadığı vurgulanmıştır.

Sharma vd. (2021), CORSIA uygulamasının uluslararası havacılık sektöründe karbon emisyonlarının azaltılması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, ABD'nin önde gelen üç tam hizmet taşıyıcısını (American Airlines, Delta Airlines ve United Airlines) kapsayan 2003-2019 yılları arasındaki aylık verileri ve 612 gözlemlili sabit etkili bir panel veri regresyon modelini uygulayarak yakıt giderleri, uçuş mesafesi, uçak boyutları, kalkış sıklığı ve gelir yolcu mili (RPM) gibi değişkenleri inceleyerek bunların karbon emisyonları üzerindeki etkisini gözlemlemişlerdir. Çalışmanın bulguları, toplam yakıt giderlerinin ve uçak boyutlarının yüksek emisyonlara neden olduğu, ancak artan yakıt fiyatlarının ve daha sık kalkışların emisyon azaltımını kolaylaştırdığını göstermektedir. Ayrıca CORSIA'nın uygulanması durumunda, alternatif biyoyakıtların benimsenmesi ve daha yakıt verimli filoların kullanılmasıyla emisyonların azaltılabileceği, ancak tam karbon nötrlüğün elde edilmesi için ek politikaların gerektiği belirtilmiştir.

Binsuwadan (2024), 1990-2020 dönemi arasında İkinci Nesil ARDL modeli ile Körfez İşbirliği Konseyi (GCC) ülkelerinde hava taşımacılığı, enerji tüketimi ve ekonomik büyümenin CO₂ emisyonları üzerindeki asimetrik etkilerini analiz etmektedir. Sonuçlar, hava taşımacılığı, enerji tüketimi ve ekonomik büyümenin CO₂ emisyonlarını artırdığını ve kirlilik seviyelerini yükselttiğini göstermektedir. Bununla birlikte, GCC ülkeleri arasında çevresel bozulma seviyelerinin farklılık gösterdiği belirlenmiş, bu nedenle çevre politikalarının ulaştırma emisyon eğilimlerini dikkate alması gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmada, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu ulaşım politikalarının geliştirilmesi gerektiğini öne sürerek, düşük karbonlu yakıtlar, yenilenebilir enerji yatırımları ve hava taşımacılığında emisyon azaltıcı teknolojilerin teşvik edilmesini önermektedir.

3.1.2. Enerji Kullanımı, Ekonomik Büyüme ve Nüfusun Karbon Emisyonları Üzerindeki Etkisi

Soytaş vd. (2007), ABD’de 1960-2004 döneminde enerji tüketimi, ekonomik büyüme ve karbon emisyonları arasındaki nedensellik ilişkisini incelemişlerdir. Çalışmada, Toda-Yamamoto (TY) nedensellik testi ve genelleştirilmiş hata varyansı ayrıştırılmaları uygulanmıştır. Çalışmanın bulguları, ekonomik büyümenin uzun vadede CO₂ emisyonlarını doğrudan etkilemediğini, ancak enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını artırdığını göstermektedir. Ayrıca, sonuçlar Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) hipotezini desteklememekte ve yalnızca ekonomik büyümenin çevresel sorunları çözmeye yetmeyeceğini ortaya koymaktadır. Granger nedensellik testleri, ABD’nin karbon emisyonlarını azaltmak için ekonomik büyümeden ödün vermesine gerek olmadığını, bunun yerine enerji tüketiminin azaltılması veya daha temiz enerji kaynaklarına geçilmesi gerektiğini öne sürmektedir.

Öztürk vd. (2010), 51 düşük ve orta gelirli ülkede 1971-2005 dönemi için enerji tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Çalışmada, Pedroni (1999) panel eşbütünleşme analizi ve panel nedensellik testleri kullanılmış, ülkeler düşük gelirli, orta gelirli ve üst-orta gelirli olarak üç gruba ayrılarak enerji tüketimi ile GSYİH arasındaki nedenselliğin yönü ele alınmıştır. Çalışmanın bulgularına göre, enerji tüketimi ve ekonomik büyümenin tüm gelir kategorilerinde eşbütünleşik olduğu belirlenmiş; düşük gelirli ülkelerde ekonomik büyümenin enerji tüketimini etkilediği, orta gelirli ülkelerde ise enerji tüketimi ile GSYH arasında çift yönlü nedensellik olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, tahmin edilen eşbütünleşme katsayısı, değişkenler arasındaki ilişkinin güçlü olmadığını göstermekte ve enerji tüketiminin ekonomik büyüme üzerinde baskın bir rol oynamadığını ortaya koymaktadır.

Pao ve Tsai (2010), BRIC ülkelerinde (Brezilya, Rusya, Hindistan ve Çin) karbon emisyonları, enerji tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki dinamik nedensel ilişkileri incelemişlerdir. Analizde hata düzeltme modellemesi (ECM) ve panel eşbütünleşme teknikleri kullanılarak 1971-2005 (Rusya için 1990-2005) dönemine ait panel verileri değerlendirilmiştir. Bulgular, zaman içinde enerji tüketiminin karbon emisyonlarını pozitif ve önemli ölçüde etkilediğini, ancak ekonomik genişlemenin Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) teorisiyle uyumlu olarak ters U şeklinde bir yörünge sergilediğini

göstermektedir. Ayrıca, enerji tüketimi ve emisyonlar arasında çift yönlü güçlü bir nedensellik ilişkisi olduğu, uzun vadede enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasında da çift yönlü nedensellik bulunduğu belirlenmiştir. Çalışma, BRIC ülkelerinde emisyonları azaltırken ekonomik büyümeyi olumsuz etkilememek için enerji arzına yönelik yatırımların artırılması, enerji verimliliğinin geliştirilmesi ve enerji tasarrufu politikalarının uygulanması gerektiğini önermektedir.

Narayan vd. (2010), 1980-2004 yılları arasında 43 gelişmekte olan ülkede karbon emisyonları ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi inceleyerek Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) hipotezini test etmişlerdir. Çalışmada panel eşbütünleşme analizi ve uzun dönem gelir esneklikleri kullanılmış, uzun dönem gelir esnekliğinin kısa dönem esnekliğinden daha az olduğu durumlarda ekonomik büyümenin karbon emisyonlarını azalttığı tespit edilmiştir. Bulgular, örneklemin %35'ini oluşturan 15 ülkede (Ürdün, Irak, Kuveyt, Yemen, Katar, BAE, Arjantin, Meksika, Venezuela, Cezayir, Kenya, Nijerya, Kongo, Gana, Güney Afrika) karbon emisyonlarının uzun vadede azaldığını göstermektedir. Ayrıca, Orta Doğu ve Güney Asya ülkelerinde uzun dönem gelir esnekliğinin kısa dönem esnekliğinden daha düşük olduğu ve emisyonların zaman içinde azaldığı belirlenmiştir.

Park ve Lee (2011), 1990-2005 yılları arasında Güney Kore'deki 16 büyükşehir bölgesine ait yıllık panel verilerini kullanarak sabit ve rastgele etkiler modelleri ile rastgele katsayı modelini uygulayarak ekonomik büyüme ve hava kirliliği arasındaki ilişkiyi ve Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) hipotezini test etmişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre, kükürt dioksit (SO_2) ve azot dioksit (NO_2) için belirgin bir EKC şeklinin olmadığı, her bölgenin kendine özgü bir eğrisi olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, karbon monoksit (CO) için genel olarak U şeklinde bir EKC tespit edilmiş ve enerji tüketiminin hava kirliliğini en güçlü şekilde etkileyen değişken olduğu bulunmuştur.

Tuğcu vd. (2012), G7 ülkelerinde 1980-2009 dönemi için yenilenebilir ve yenilenemez enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki uzun vadeli ve nedensel ilişkileri incelemek amacıyla Genişletilmiş Cobb-Douglas üretim fonksiyonunu, ARDL eşbütünleşme analizini ve Hatemi-J (2012) nedensellik testini uygulamışlardır. Bulgular, hem yenilenebilir hem de yenilenemez enerji tüketiminin ekonomik büyüme için gerekli olduğunu ve genişletilmiş üretim fonksiyonunun bu ilişkiyi daha iyi açıkladığını göstermektedir. Geleneksel üretim fonksiyonunda tüm ülkeler arasında çift yönlü

nedensellik tespit edilirken, genişletilmiş modelde sonuçların ülkeye göre değiştiği belirlenmiştir.

Shahbaz ve Lean (2012), Pakistan'da 1972-2009 dönemi için elektrik tüketimi, sermaye ve işgücü arasındaki ilişkiyi Cobb-Douglas üretim fonksiyonu çerçevesinde analiz etmiş ve elektrik tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki nedenselliği ARDL sınır testiyle incelemişlerdir. Çalışmada, elektrik tüketimi ile ekonomik büyüme arasında çift yönlü bir nedensellik ilişkisi olduğu tespit edilmiş ve sermaye ile işgücünün ekonomik büyüme üzerinde pozitif ve anlamlı etkileri olduğu belirlenmiştir. Bulgular, elektrik tasarrufu politikalarının büyüme olumsuz etkileyebileceğini, bu nedenle Pakistan'ın sadece üretimi artırmak yerine alternatif enerji kaynaklarına yönelmesi ve yenilenebilir enerji yatırımlarını artırması gerektiğini göstermektedir.

Omri (2013), MENA (Orta Doğu ve Kuzey Afrika) ülkelerinde CO₂ emisyonları, enerji tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Çalışmada, 1990-2011 dönemi için 14 MENA ülkesine ait panel veri seti kullanılarak eşzamanlı denklemler modeli uygulanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasında çift yönlü bir nedensellik olduğu belirlenirken, enerji tüketiminin tek yönlü olarak CO₂ emisyonlarını artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ekonomik büyüme ve CO₂ emisyonları arasında çift yönlü bir nedensel ilişki olduğu ortaya konmuştur.

Özcan (2013), 1990-2008 dönemi için 12 Orta Doğu ülkesine ait verileri kullanarak panel veri analiz yöntemleriyle karbon emisyonları, enerji tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bulgular, Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) hipotezine ters düşen U şeklinde bir eğri olduğunu göstermektedir. Ek olarak, kısa vadede ekonomik büyümeden enerji tüketimine doğru tek yönlü bir nedensellik tespit edilirken, uzun vadede hem enerji tüketiminden hem de ekonomik büyümeden karbon emisyonlarına doğru tek yönlü bir nedensellik bulunmuştur.

Al-Mulali vd. (2015), 23 Avrupa ülkesinde ekonomik büyüme, kentleşme, ticari serbestleşme, finansal gelişme ve yenilenebilir enerji üretiminin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, 1990-2013 yılları arasındaki panel veriler kullanılarak Pedroni eşbütünleşme testi, tam modifiye en küçük kareler (FMOLS) tahmini ve VECM Granger nedensellik testi uygulanmıştır. Sonuçlar, ekonomik büyüme,

kentleşme ve finansal gelişimin uzun vadede CO₂ emisyonlarını artırdığını, ticaret açıklığının ise azalttığını göstermektedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji üretiminin kaynak bazında ayrıştırılarak incelenmesi sonucunda, biyokütle ve atıklardan elde edilen enerji, hidroelektrik ve nükleer enerji üretiminin CO₂ emisyonlarını azalttığı, ancak güneş ve rüzgar enerjisinin etkisinin önemsiz olduğu belirlenmiştir.

Wang vd. (2016), 1990-2012 dönemi için Çin’de ekonomik büyüme, enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları arasındaki uzun vadeli ve nedensel ilişkileri incelemek amacıyla eşbütünleşme testi, vektör hata düzeltme modeli (VECM), etki-tepki analizi ve Granger nedensellik testini uygulamışlardır. Çalışmanın bulgularına göre, ekonomik büyüme ile enerji tüketimi arasında çift yönlü bir nedensellik ilişkisi olduğu belirlenirken, enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını tek yönlü olarak artırdığı tespit edilmiştir. Ek olarak, dışsal şoklara verilen tepkilerin CO₂ emisyonları üzerinde sınırlı bir etkisinin olduğu ortaya koyulmuştur.

Doğan ve Aslan (2017), Avrupa Birliği ve aday ülkelerde CO₂ emisyonları, enerji tüketimi, ekonomik büyüme ve turizm arasındaki ilişkileri incelemiştir. 1995-2011 dönemi panel verileri kullanılarak CADF ve CIPS birim kök testleri, LM Bootstrap Panel Eşbütünleşme Testi, FMOLS, DOLS ve MG tahmincileri uygulanmıştır. Bulgular, enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını artırırken, ekonomik büyüme ve turizmin emisyonları azalttığını göstermektedir. Emirmahmutoglu-Kose Panel Granger Nedensellik Testi, turizmden CO₂ emisyonlarına tek yönlü, enerji tüketimi ve ekonomik büyüme ile CO₂ emisyonları arasında ise çift yönlü nedensellik olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma, yenilenebilir enerji kullanımını teşvik eden politikalar geliştirilmesini önermektedir.

Ssali vd. (2018), 1990-2014 yılları arasında Sahra Altı Afrika ülkelerinde ekonomik büyüme, enerji kullanımı ve nüfus artışının karbon emisyonları üzerindeki etkisini incelemiştir. Kenya, Nijerya, Botsvana, Benin, Togo ve Mauritius’a ait veriler kullanılarak Birim Kök Testi, Eşbütünleşme Testi, Vektör Hata Düzeltme Modeli (VECM) ve Tam Modifiye En Küçük Kareler (FMOLS) tahmin yöntemi uygulanmıştır. Bulgular, enerji kullanımı ve nüfus artışının CO₂ emisyonlarını artırdığını, ancak uzun vadede enerji kullanımının ekonomik çıktıyı da artırdığını göstermektedir. Çalışma, yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılması, nüfus artışının düzenlenmesi ve fosil yakıt kullanımına yönelik politikaların geliştirilmesi gerektiğini önermektedir.

Acheampong (2018), 1990-2014 dönemi için 116 ülkede ekonomik büyüme, CO₂ emisyonları ve enerji tüketimi arasındaki nedensellik ilişkisini incelemek amacıyla Panel Vektör Otoregresyon (PVAR) ve Sistem Genelleştirilmiş Momentler Yöntemi (System-GMM) yöntemleri kullanılmıştır. Bulgulara göre, küresel düzeyde ekonomik büyümenin enerji tüketimini doğrudan etkilemediğini, ancak CO₂ emisyonlarının ekonomik büyümeyi artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte Küresel Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) hipotezini desteklemekte ve ekonomik büyümenin başlangıçta emisyonları artırmasına rağmen uzun vadede çevresel iyileşmelere yol açtığını göstermektedir.

Destek vd. (2019), bu çalışmada 11 yeni sanayileşmiş ülkede (Güney Kore, Singapur, Brezilya, Çin, Türkiye vb.) ekonomik büyüme, enerji tüketimi, finansal gelişme ve ekolojik ayak izi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. 1977-2013 dönemi için Genişletilmiş Ortalama Grup (AMG) Tahmincisi ve Heterojen Panel Nedensellik Yöntemi uygulamışlardır. Sonuçlar, ekonomik büyüme ile ekolojik ayak izi arasında ters U şeklinde bir ilişki olduğunu ve çift yönlü nedenselliğin bulunduğunu göstermektedir. Ayrıca, ekonomik büyümeden enerji tüketimine tek yönlü bir nedensellik tespit edilmiştir..

Mensah vd. (2019), Afrika'daki ekonomik büyüme, fosil yakıt tüketimi, CO₂ emisyonları ve petrol fiyatları arasındaki ilişkiyi incelemektedir. 1990-2015 dönemine ait 22 Afrika ülkesinin panel verileri kullanılarak Pooled Mean Group (PMG) panel ARDL yöntemi uygulanmıştır. Bulgular, fosil yakıt tüketimi ile ekonomik büyüme ve karbon emisyonları arasında çift yönlü nedensellik olduğunu, petrol fiyatlarının ise ekonomik büyüme, enerji tüketimi ve karbon emisyonlarını tek yönlü olarak etkilediğini göstermektedir. Çalışma, Afrika ülkelerinin enerji politikalarını sürdürülebilir büyüme ile uyumlu hale getirmesi gerektiğini önermektedir.

Odugbesan ve Rjoub (2020), MINT ülkelerinde (Meksika, Endonezya, Nijerya ve Türkiye) ekonomik büyüme, CO₂ emisyonları, enerji tüketimi ve kentleşme arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. 1993-2017 dönemi için Otokorelasyon Gecikme Sınır Testi (ARDL) yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, Nijerya ve Endonezya'da enerji tüketiminden ekonomik büyümeye tek yönlü, Meksika ve Türkiye'de ise çift yönlü nedensellik olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, tüm MINT ülkelerinde ekonomik büyüme, enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarının uzun vadede kentleşmeyi etkilediği belirlenmiştir.

Çalışma, MINT ülkelerinin yeşil sanayiye teşvik eden ve sürdürülebilir enerji politikaları geliştirmesi gerektiğini önermektedir.

Salari vd. (2021), ABD’de 1997-2016 döneminde CO₂ emisyonları, enerji tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Sabit ve dinamik panel veri modelleri kullanılarak toplam, yenilenebilir, yenilenemez, sanayi ve konut enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarına etkisi analiz edilmiştir. Çalışma, yenilenebilir enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını azalttığını, ancak diğer enerji türlerinin emisyonları artırdığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, CO₂ emisyonları ile ekonomik büyüme arasında ters U şeklinde bir ilişki bulunarak Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) hipotezini desteklediği belirlenmiştir.

Sheikh ve Hassan (2023), 29 OECD ülkesinde 1995-2019 yılları arasında ekonomik büyüme, enerji kullanımı ve Ar-Ge harcamalarının karbon emisyonları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada Panel birim kök testleri (LLC, IPS, ADF-Fisher, PP-Fisher), Pedroni ve Kao eşbütünleşme testleri, Tam Modifiye En Küçük Kareler (FMOLS), Augmented Mean Group (AMG) tahmincisi ve Westerlund eşbütünleşme testi kullanılmıştır. Çalışma bulgularına göre, ekonomik büyümenin karbon emisyonlarını azalttığı, enerji kullanımının ise emisyonları artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, çalışma OECD ülkelerinde düşük karbonlu büyüme için enerji verimliliğinin artırılması ve Ar-Ge harcamalarının çevresel sürdürülebilirliği destekleyecek şekilde yönlendirilmesi gerektiğini önermektedir.

3.1.3. AB Emisyon Ticaret Sistemi (AB ETS) ve Karbon Azaltım Politikalarının Etkileri

Mendes ve Santos (2008), Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi’ne havacılık sektörünün dahil edilmesinin emisyonlar ve sektör üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, 1992-2006 yılları arasındaki veriler kullanılarak karbon emisyonları, ticaret politikaları ve ekonomik etkiler analiz edilmiştir. Çalışma bulgularına göre, havacılık sektörünün toplam antropojenik radyatif zorlamanın %3,5’inden sorumlu olduğu ve bu sektöre yönelik ekonomik düzenlemelerin (karbon vergisi, emisyon ticareti vb.) talep üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, arz yönlü azaltım önlemlerinin yüksek maliyetler nedeniyle teşvik edilmediği, bu yüzden havacılık

sektörünün genel bir emisyon ticaret sistemine dahil edilmek yerine kendi özel ticaret sistemine tabi tutulmasının daha etkili bir çözüm olabileceği vurgulanmaktadır.

Anger (2010), AB ETS'nin havacılık sektörüne dahil edilmesinin sektöre, karbon emisyonlarına ve AB ekonomisine etkilerini incelemiştir. Çalışmada, 1970-2004 döneminde Enerji-Çevre-Ekonomi Modeli (E3ME) ile simülasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bulgular, havacılık sektörünün AB ETS'ye dahil edilmesinin karbon emisyonlarını 2020 yılına kadar %7,4'e kadar azaltabileceğini, ancak bu azalmanın büyük ölçüde arz yönlü tepkilerden kaynaklandığını göstermektedir. Farklı karbon fiyat senaryoları altında, AB ekonomisinin genel büyümesi üzerinde önemli bir olumsuz etki gözlenmemiştir. Ancak, düşük karbon fiyatlarında hükümet harcamalarının artması sonucu genel karbon emisyonlarında artış görülebileceği belirtilmiştir. Çalışma, havacılık sektöründe fiyat sinyallerinin davranış değişikliklerini ve uzun vadede teknolojik yenilikleri teşvik edebileceğini vurgulamaktadır.

Anger ve Köhler (2010), AB ETS'nin havacılık sektörüne dahil edilmesinin çevresel ve ekonomik etkilerini değerlendiren çalışmaları incelemişlerdir. Çalışmada, 2005-2009 yılları arasında yayımlanan etki değerlendirme modelleri analiz edilerek bu modellerin eksiklikleri ve sonuçlarının güvenilirliği tartışılmıştır. Bulgular, havacılık sektörünün AB ETS'ye dahil edilmesinin karbon emisyonlarını en fazla %3,8 oranında azaltabileceğini ve AB GSYİH'si üzerindeki maksimum etkinin -%0,002 olacağını göstermektedir. Ek olarak, modellerin genellikle basitleştirildiği, bazı önemli değişkenlerin göz ardı edildiği ve farklı varsayımlara dayalı modellerin birbirine bağlanmasının sonuçların güvenilirliğini azalttığı tespit edilmiştir. Çalışma, havacılık sektörünün AB ETS'ye dahil edilmesinin genel olarak düşük bir etkiye sahip olacağını, ancak belirli operasyonel ve teknolojik değişiklikleri teşvik edebileceğini belirtmektedir.

Clo (2010), AB ETS'nin yeni tahsis kurallarını ve karbon sızıntısı (Carbon Leakage) risk değerlendirme yöntemlerinin tutarsızlıklarını incelemektedir. Çalışmada, 2005-2009 yılları arasındaki veriler kullanılarak farklı tahsis mekanizmaları (grandfathering ve açık artırma) ve karbon sızıntısı risk değerlendirme yöntemleri analiz edilmiştir. Bulgular, grandfathering yönteminin üçüncü aşamada da baskın tahsis kuralı olmaya devam edeceğini ve açık artırma sisteminin rekabeti bozucu etkiler yaratabileceğini göstermekte ve karbon sızıntısı risk değerlendirme yöntemlerinin politik olarak yönlendirilmiş

olduğunu ve ekonomik temellerden ziyade siyasi uzlaşmalara dayandığını tespit etmektedir. Ek olarak yeni ETS Direktifi'nin tahsis mekanizmalarının şeffaflığını artırmak yerine rekabet bozulmalarını daha da kötüleştirebileceği vurgulamaktadır.

Zhang ve Wei (2010), 2005-2009 yılları arasında yayımlanan ampirik çalışmaları derleyerek AB ETS'nin işleyiş mekanizmasını, tahsis ve fiyatlandırma sistemlerini ve sistemin enerji sektörü ile sanayi dallarına ekonomik etkilerini analiz etmişlerdir. Çalışmanın bulguları, karbon tahsis mekanizmalarının piyasa dinamikleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını, ancak karbon fiyatlarının enerji yatırımları üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, AB ETS'nin sanayi sektörleri üzerindeki rekabetçiliğe olan etkisinin zayıf olduğu, ancak sistemin gelecekte genişletilmesiyle bu etkinin artabileceği belirtilmiştir. Çalışma, karbon piyasasının etkinliğinin artırılması için daha sıkı emisyon hedefleri ve uzun vadeli politikaların gerekliliğini vurgulamaktadır.

Vespermann ve Wald (2011), AB ETS'nin havacılık sektörü üzerindeki ekonomik ve ekolojik etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, 2012-2020 yıllarını kapsayan bir simülasyon modeli kullanılarak havacılık sektöründeki finansal yükler, rekabet dinamikleri ve emisyon azaltım etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, AB ETS'nin havacılık sektörü üzerindeki mali yükünün düşük olacağını ve rekabet bozulmalarına yol açmayacağını, ancak havacılık sektöründeki doğrudan emisyon azaltımlarının sınırlı kalacağını göstermektedir. Ayrıca sistemin havacılık emisyonlarını azaltmada yeterince etkili olmadığı, ancak diğer sektörlerde emisyon azalımı sağlayabileceği ifade edilmiştir. Çalışma, daha sıkı bir tasarım olmaksızın sistemin uzun vadede sınırlı çevresel fayda sağlayacağını vurgulamaktadır.

Scheelhaase vd. (2012), 2012-2020 dönemine yönelik bir simülasyon modeli kullanarak havacılık sektörünün AB ETS'ye dahil edilmesinin havayolu işletmelerinin finansal yükleri, bilet fiyatları ve rekabet dinamikleri üzerindeki maliyet etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, havayolu şirketlerinin 2020 itibarıyla emisyon tahsisatlarının %50'sinden fazlasını satın almak zorunda kalacağı ve karbon fiyatlarının sektöre milyarlarca avroluk ek maliyet getireceği belirlenmiştir. Ayrıca ICAO tarafından önerilen muafiyet maddesinin havayolu rekabetinde bozulmalara neden olabileceği tespit edilmiş ve AB ETS'nin havacılık sektörü için önemli maliyet artışlarına yol açabileceği, ancak

karbon emisyonlarını azaltma konusundaki etkinliğinin sınırlı kalabileceği vurgulanmıştır.

Anger-Kraavi ve Köhler (2013), havacılık sektörünün AB ETS'ye dahil edilmesinin ekonomik ve çevresel etkilerini incelemiştir. Çalışmada, AB ETS'nin havacılık sektörü üzerindeki olası ekonomik etkilerini inceleyen çalışmalar gözden geçirilmiş ve E3ME makroekonometrik modeli kullanılarak bir etki analizi yapılmıştır. Bulgular, havacılık sektörünün AB ETS'ye dahil edilmesinin Avrupa Birliği GSYİH'si üzerindeki etkisinin %0.1'den, sektörün ekonomik çıktıları üzerindeki etkisinin ise %1'den az olacağını ortaya koymuştur. Bunun yanında rekabet bozulmalarının sınırlı kalacağı belirtilirken, havacılık sektörünün uzun vadede sera gazı emisyonlarını azaltmak için daha az karbon yoğun teknolojilere yatırım yapmasının teşvik edilebileceği vurgulanmıştır.

Blanc ve Winchester (2013), AB ETS'nin havacılık sektörüne getirdiği ek maliyetlerin Karayipler'e olan hava yolu yolcu trafiği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, AB ETS'nin havayolu bilet fiyatlarına etkisi değerlendirilmiş ve bu fiyat değişimlerinin 26 Karayip ülkesine yapılan turist ziyaretlerini nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, AB ETS'nin Avrupa-Karayipler arasındaki gidiş-dönüş bilet fiyatlarını dolaylı uçuşlar için ortalama 17\$, doğrudan uçuşlar için ise 21\$ artıracığını ortaya koymuştur. Bu fiyat artışlarının AB'den Karayipler'e yapılan turist seyahatlerini %1.4 ile %2 arasında azaltacağı ve toplam turist girişlerini %0.4'ten daha az düşüreceği tespit edilmiştir. Aynı zamanda AB ETS'nin turist akışları üzerinde sınırlı bir etkisi olacağını ve bu etkinin İngiltere'nin Yolcu Vergisi (APD) ile Avrupa'daki ekonomik krizden daha düşük seviyede olacağını vurgulamaktadır.

Löfgren vd. (2014), AB ETS'nin İsveç sanayi sektöründeki firmaların karbon azaltıcı yatırımları üzerindeki etkisini, 2002-2008 yıllarına ait firma düzeyinde veriler kullanarak fark-öncesi ve fark-sonrası (difference-in-difference) yöntemiyle büyük ve küçük ölçekli yatırımları analiz ederek incelemiştir. Ayrıca rastgele etkiler logit modelleri kullanılarak yatırım kararlarını belirleyen faktörler değerlendirilmiş ve ekonometrik modelleme ile farklı değişkenlerin etkisi test edilmiştir. Bulgular, AB ETS'nin firmaların karbon azaltıcı teknolojiye yatırım yapma kararları üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığını, ancak firma büyüklüğü, fosil yakıt kullanımı ve geçmişte yapılan çevresel yatırımların yatırım kararlarında belirleyici olduğunu göstermektedir ve AB

ETS'nin etkinliğini artırmak için reform edilmesi gerektiğini ve karbon piyasasındaki belirsizliklerin giderilmesinin firmaları uzun vadeli düşük karbonlu teknolojilere yönlendirebileceğini vurgulamaktadır.

Brink vd. (2016), AB ETS'ye yönelik farklı reform seçeneklerini değerlendirerek karbon fiyatlandırma mekanizmalarının etkinliğini analiz etmişlerdir. Çalışmada, çok ülke ve çok sektör içeren Dinamik Hesaplanabilir Genel Denge (CGE) modeli kullanılarak farklı reform senaryolarının karbon fiyatları, emisyon düzeyleri ve ekonomik uyum maliyetleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bulgular, karbon fiyat tabanı ve değişken karbon vergisi gibi fiyat odaklı reformların, emisyon azaltımını erken yıllarda artırırken, sonraki yıllarda emisyon artışına neden olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte yeni AB üyesi ülkelerin daha yüksek karbon fiyatlarından diğer üye devletlere kıyasla daha fazla etkilendiği ve izin fiyatlarının düşmesi durumunda net izin satıcılarının zarar görebileceği tespit edilmiştir.

Pustelnik (2016), havacılık sektörünün AB ETS'ye dahil edilmesi sürecini ve bu sürece karşı uluslararası direnişi incelemektedir. Çalışmada, çok düzeyli yönetim (multi-level governance), politika ağ analizi (policy network analysis) ve yorumsal politika analizi (interpretive policy analysis) yaklaşımları kullanılarak karar alma süreçleri değerlendirilmiştir. Çalışma, 2013 yılında Washington, DC'de ve 2014 yılında Brüksel'de gerçekleştirilen yarı yapılandırılmış mülakatlar, politika belgeleri ve medya içerik analizleri çalışmanın temel verilerini oluşturmaktadır. Çalışma bulgularına göre, AB'nin çevresel liderlik çabalarının uluslararası dirençle karşılaştığını, bu durumun AB'nin uluslararası ilişkilerini olumsuz etkilediğini ve AB içinde karar alma süreçlerinde tutarsızlıklara yol açtığını ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra havacılık sektörünün güçlü lobi faaliyetleri sayesinde hem AB'de hem de ABD'de ulusal ve uluslararası politika yapımını etkileyebildiği tespit edilmiştir.

Cui vd. (2017), AB ETS'nin Avrupa havayolu şirketlerinin kirlilik azaltım maliyetleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, 2012-2014 yıllarına ait 12 Avrupa havayolu şirketinin ampirik verileri kullanılarak Ağ Çevresel Üretim Fonksiyonu (Network Environmental Production Function) yöntemi uygulanmıştır. Analizde, havayolu şirketlerinin AB ETS'ye dahil olduğu ve olmadığı senaryolar arasında kirlilik azaltım maliyetlerindeki değişim değerlendirilmiştir. Bulgular, Ryanair'in en yüksek

kirlilik azaltım maliyetine sahip olduğunu, Lufthansa ve Norwegian'ın ise sıfır maliyetle çalıştığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, İngiltere'nin AB'den ayrılması (Brexit) durumunda İngiltere merkezli havayolu şirketlerinin kirlilik azaltım maliyetleri üzerinde doğrudan bir etkisinin olmayacağı tespit edilmiştir. Çalışmada genel olarak, AB ETS'nin havayolu şirketlerinin kirlilik azaltım maliyetleri üzerinde sınırlı bir etkisi olduğu ve daha kapsamlı önlemlerin gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Markham vd. (2018), Avustralya'nın "Temiz Enerji Geleceği" (Clean Energy Future - CEF) politikası kapsamında uygulanan karbon fiyatlandırmasının iç hat hava yolculuğu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, 2012-2014 yılları arasındaki veriler kullanılarak zaman serisi regresyon analizi uygulanmış ve karbon fiyatının iç hat yolcu kilometreleri (RPK) üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bağımlı değişken olarak kişi başına düşen iç hat RPK kullanılmış, bağımsız değişkenler arasında ise yakıt maliyetleri (Cushing Crude Oil Future fiyatları), işçilik maliyetleri, kişi başına düşen reel GSYİH ve havayolu kapasitesi yer almıştır. Bulgular, ton başına 23-24,15 Avustralya Doları seviyesinde uygulanan karbon fiyatının iç hat hava yolculuğu talebinde istatistiksel olarak anlamlı bir azalmaya yol açmadığını göstermektedir. Çalışma, havacılık sektöründe karbon fiyatlandırmasının etkili olabilmesi için daha yüksek fiyatlandırma seviyeleri veya tamamlayıcı düzenlemeler gerektiğini vurgulamaktadır.

Scheelhaase vd. (2018), AB ETS ve ICAO tarafından geliştirilen CORSIA Programının arasındaki farkları, çevresel etkileri ve rekabet dinamiklerini incelemişlerdir. Çalışmada, DLR tarafından geliştirilen 4D-Race emisyon hesaplama aracı ve uçuş bazlı bir model kullanılarak 2017-2039 dönemi için küresel yolcu trafiği ve CO₂ emisyonlarının tahmini yapılmıştır. Bunun yanı sıra , CORSIA ve AB ETS'nin mevcut ve gelecekteki politikaları çevresel etkinlik ve piyasa rekabeti açısından karşılaştırılmıştır. Bulgular, AB ETS'nin "Tam Kapsam" (Full Scope) yaklaşımının kısa ve orta vadede CORSIA'dan daha fazla emisyon azaltımı sağlayacağını, ancak uzun vadede CORSIA'nın daha etkili olabileceğini göstermektedir. Çalışma, AB ETS'nin kapsamının genişletilmesi ve CORSIA ile entegre edilerek karbon azaltım hedeflerinin daha etkili hale getirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Efthymiou ve Papatheodorou (2019), AB ETS'nin havacılık sektöründeki uygulanabilirliğini ve politika etkinliğini inlemişlerdir. Çalışmada, Delphi yöntemi

kullanılarak havayolu şirketleri, IATA, Hava Seyrüsefer Hizmet Sağlayıcıları, Sivil Havacılık Otoriteleri ve hükümet temsilcilerinden oluşan 31 uzmandan veri toplanmışlardır. Araştırma iki turdan oluşmuş, ilk tur 2014-2015, ikinci tur ise 2015-2016 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Bulgular, AB ETS'nin etkinliğinin tahsis yöntemleri, diğer emisyon ticaret sistemleriyle bağlantılar ve çevresel politikalarla entegrasyon gibi faktörlerden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Çalışma, izleme, raporlama ve doğrulama süreçlerinin basitleştirilmesi, tahsisat ve ceza politikalarında şeffaflığın artırılması ve emisyon tahsis piyasasında denge sağlanması gerektiğini önermektedir.

Abrell vd. (2019), AB ETS'nin asgari karbon fiyatı uygulamasının maliyet etkinliği ve emisyon azaltımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, çok ülke ve çok sektör içeren Sayısal Genel Denge (CGE) modeli kullanılarak, farklı asgari fiyat senaryolarının refah, karbon fiyatları ve emisyon azaltım maliyetleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, ton başına 50-70 ABD Doları arasında değişen asgari karbon fiyatlarının, AB iklim politikalarının toplam maliyetini %20-30 oranında azaltabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, asgari fiyat uygulamasının, ETS kapsamındaki ve dışındaki sektörler arasındaki marjinal azaltım maliyetlerini dengeleyerek verimliliği artırabileceği tespit edilmiştir.

Flachsland vd. (2020), AB ETS'nin asgari karbon fiyatı uygulanmasının piyasa istikrarı, politika güvenilirliği ve emisyon azaltımı üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada, küresel karbon fiyatlandırma sistemlerine ilişkin akademik ve politika literatürü kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve 2016-2019 yılları arasında politika yapıcılar, sanayi temsilcileri ve akademisyenlerle gerçekleştirilen çalıştaylar aracılığıyla uzman görüşleri toplanmıştır. Bulgular, AB ETS'nin düşük karbon fiyatları nedeniyle etkinliğinin zaman zaman azaldığını ve piyasa güvenilirliği açısından asgari bir fiyat tabanının uygulanmasının faydalı olabileceğini göstermektedir. Çalışma, asgari fiyat mekanizmasının piyasa istikrarını artıracak, uzun vadeli yatırım sinyallerini güçlendireceğini ve gelecekteki piyasa şoklarına karşı sistemin daha dirençli hale getirilmesine yardımcı olacağını vurgulamaktadır.

Heiaas (2021), AB ETS'nin havacılık sektöründeki karbon emisyonlarını azaltmadaki etkinliğini incelemektedir. Çalışmada, 2012-2018 yıllarına ait jet yakıt tüketimi verileri kullanılarak Genel Sentetik Kontrol (GSC) modeli uygulanmış ve AB ETS'nin emisyon

azaltımı üzerindeki etkisi, 30 AB ETS'ye tabi ülkenin 15 kontrol ülkesiyle karşılaştırıldığı bir analizle tahmin edilmiştir. Çalışma bulgularına göre , AB ETS'nin havacılık sektöründe emisyonları azaltmadığını, aksine jet yakıt tüketiminin %10 oranında arttığını göstermektedir. Ancak veri kısıtlamaları nedeniyle bu sonucun doğrudan AB ETS'ye atfedilemeyeceği ve havacılık sektöründeki karbon fiyatlandırmasının etkinliği konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir.

Oesingmann (2022), AB ETS'nin hava yolu yolcu talebi üzerindeki etkisini, uçak bilet vergileriyle karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Çalışmada, 2002-2018 yıllarını kapsayan Eurostat verileri kullanılarak yerçekimi modeli (gravity model) ve Poisson yalancı-en yüksek olasılık tahmini (PPML) yöntemi uygulanmıştır. Çalışma AB içindeki hava yolu yolcu akışlarını değerlendirerek AB ETS'nin talep üzerindeki etkisini belirlemeye odaklanmaktadır. Bulgular, AB ETS'nin Avrupa Ekonomik Alanı (EEA) içindeki hava yolu yolcu talebi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmadığını, ancak Avusturya ve Almanya'da uygulanan uçuş vergilerinin talebi önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Çalışma, havacılık sektöründe emisyonları azaltmak için bilet vergilerinden ziyade doğrudan karbon fiyatlandırma mekanizmalarının tercih edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Bolat vd. (2023), AB ETS'nin makroekonomik karbon geri tepme (carbon rebound) etkisinin varlığını ve büyüklüğünü incelemişlerdir. Çalışmada, 2005-2019 yılları arasında 26 Avrupa ülkesine ait veriler kullanılarak panel veri analizleri uygulanmış, karbon tahsisleri ile emisyonlar arasındaki ilişki Granger nedensellik testiyle incelenmiş ve Ortak İlişkilendirilmiş Etkiler (CCE) ile Etkileşimli Sabit Etkiler (IFE) modelleri kullanılarak tahsis edilen karbon izinlerinin emisyonlar üzerindeki uzun vadeli etkileri analiz edilmiştir. Bulgular, AB ETS kapsamında tahsis edilen emisyon izinleri ile karbon emisyonları arasında çift yönlü bir nedensellik bulunduğunu ve bu ilişkinin makroekonomik karbon geri tepme etkisine yol açtığını göstermektedir. Ek olarak, enerji yoğunluğunun doğrudan ve dolaylı olarak emisyonları artırdığı ve ETS'nin ekonomik büyüme ile karbon emisyonlarını tam olarak ayırtıramadığı tespit edilmiştir.

Zhang ve Wang (2024), AB ETS havacılık emisyonları üzerindeki azaltım etkisini ve bu etkinin mekanizmalarını incelemişlerdir. Çalışmada, 2000-2019 yıllarına ait 60 ülkeyi kapsayan panel veri seti kullanılarak Fark-öncesi ve Fark-sonrası (Difference-in-

Differences - DiD) modeli uygulanmış ve AB ETS'nin havacılık emisyonları üzerindeki nedensel etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca aracı değişken modeli (mediation effect model) ile emisyon azaltım mekanizması değerlendirilmiş ve ülkeler arası farklılıkları belirlemek için heterojenlik analizi yapılmıştır. Bulgular, AB ETS'nin sadece iç hat uçuşları kapsamı nedeniyle uluslararası havacılık emisyonları üzerinde herhangi bir etkisinin bulunmadığını, ancak iç hat emisyonlarını azalttığını göstermektedir. Bunun yanında, bu azaltımın uçuş talebini düşürmekten ziyade düşük karbonlu teknolojik dönüşümleri teşvik ederek gerçekleştiği tespit edilmiş ve bölgesel havacılık taşımacılığı yoğun olan, dışa açıklık seviyesi yüksek olan veya Batı Avrupa'da yer alan ülkelerde emisyon azaltımının daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

3.2. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Küresel iklim değişikliği, günümüzün en kritik çevresel sorunlarından biri olarak sürdürülebilir kalkınma politikalarının merkezinde yer almaktadır. Artan sanayileşme, ekonomik büyüme ve uluslararası ticaret hacmi, karbon emisyonlarını yükselterek küresel ısınma sürecini hızlandırmaktadır. Bu bağlamda, karbon emisyonlarını azaltmak ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla geliştirilen piyasa temelli mekanizmalar, politika yapıcılar açısından önemli bir araç haline gelmiştir. AB ETS, karbon fiyatlandırmasına dayalı en kapsamlı düzenlemelerden biri olup, enerji, sanayi ve havacılık sektörlerinde emisyon azaltımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır.

Havacılık sektörü, yüksek enerji tüketimi ve hızla artan hava trafiği hacmi nedeniyle küresel karbon emisyonlarının önemli kaynaklarından biri olarak öne çıkmaktadır. Uluslararası hava taşımacılığının hızla büyümesi, sektörde uygulanan düzenleyici mekanizmaların etkinliğini sorgulanır hale getirmiştir. Bu nedenle, sektörde karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik politika ve düzenlemelerin etkinliği, sürdürülebilir kalkınma açısından kritik bir konu haline gelmiştir. 2012 yılında AB ETS kapsamında havacılık sektörünün de düzenlemeye dahil edilmesi, bu alandaki piyasa temelli çözümlerin etkisini inceleme gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Her ne kadar AB ETS, karbon emisyonlarını azaltma hedefi doğrultusunda havacılık sektörünü de kapsayacak şekilde genişletilmiş olsa da, mevcut literatürde bu düzenlemenin sektördeki emisyon azaltım etkilerini ayrıntılı olarak inceleyen çalışmalar sınırlıdır. Çoğu araştırma, belirli havayolları ya da uçuş rotalarına odaklanmakta olup, ulusal ve uluslararası düzeyde

kapsamlı ve bütüncül bir analiz sunmamaktadır. Ayrıca AB ETS'nin havacılık sektöründe etkin bir karbon azaltımı sağlayıp sağlamadığı konusu hala netlik kazanmamış olup, mevcut çalışmalar daha çok sistemin ekonomik maliyetleri ve havacılık sektörüne getirdiği yükler üzerine yoğunlaşmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, AB ETS'nin havacılık sektöründeki karbon emisyonlarını azaltmadaki etkinliğini ekonometrik yöntemler kullanarak analiz etmektir. Çalışma, 1995-2021 yılları arasında 23 Avrupa ülkesine ait panel veriler kullanarak, emisyon ticaret sisteminin havacılık sektörü üzerindeki uzun dönemli etkilerini değerlendirmeyi hedeflemektedir. Ekonometrik analiz yöntemi olarak Panel Veri Eşbütünleşme Modeli (Pooled Mean Group - PMG) kullanılmış ve AB ETS'nin yürürlüğe girmesinin öncesi ve sonrası dönemlerini karşılaştırmak amacıyla bir dummy değişken modeli oluşturulmuş ve sistemin uygulanmaya başlandığı dönemin öncesini ve sonrasını ayırt ederek emisyon azaltımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Havacılık emisyonlarını belirleyen faktörler üç farklı model çerçevesinde ele alınmış; iç hat uçuşlarından, uluslararası uçuşlardan ve toplam havacılık faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu yöntem sayesinde, AB ETS'nin hangi uçuş türlerinde daha etkili olduğu analiz edilerek, düzenleyici mekanizmaların başarısına dair kapsamlı bulgular elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışma, havacılık sektöründe karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik piyasa temelli mekanizmaların etkinliğini değerlendiren kapsamlı bir analiz sunarak literatüre iki temel açıdan katkı sağlamaktadır.

Öncelikle, mevcut literatürde AB ETS'nin havacılık sektöründeki etkilerini ayrıntılı olarak ele alan makro düzeyde çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Çoğu araştırma, belirli havayolu şirketleri veya uçuş rotalarına odaklanarak mikro düzeyde analizler gerçekleştirmiştir. Ancak havacılık sektörünün ulusal ve uluslararası düzeyde geniş bir karbon emisyon profiline sahip olması, makro ölçekte bütüncül değerlendirmeleri gerektirmektedir. Bu çalışma, havacılık sektöründe karbon fiyatlandırma mekanizmalarının uzun vadeli etkilerini ülke bazında inceleyerek, AB ETS'nin geniş kapsamlı uygulamalarının etkinliği konusunda literatürdeki bilgi boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır.

İkinci olarak, havacılık sektöründe karbon emisyonlarını belirleyen temel faktörler uzun dönemli bir perspektifle analiz edilerek, politika yapıcılar için veri temelli çıkarımlar

sunulmaktadır. AB ETS'nin farklı ülkeler, uçuş tipleri (iç hat ve uluslararası) ve coğrafi konumlar üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Mevcut çalışmalar genellikle AB ETS'nin ekonomik maliyetlerine ve havayolu şirketleri üzerindeki finansal yüklerine odaklanırken, bu araştırma doğrudan emisyon azaltımına yönelik somut etkileri ölçerek yeni bir bakış açısı kazandırmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, havacılık sektöründe piyasa temelli emisyon azaltım mekanizmalarının etkinliğini anlamaya yönelik kapsamlı bir analiz sunarak, AB ETS'nin gerçekten emisyon azaltımı sağlayıp sağlamadığını nesnel veriler ışığında değerlendirmektedir. Elde edilen bulgular, yalnızca Avrupa Birliği'nde değil, küresel ölçekte uygulanacak karbon fiyatlandırma mekanizmalarının tasarımına katkı sunabilecek ve havacılık sektöründe sürdürülebilir emisyon azaltımına yönelik daha etkili politikaların oluşturulmasına rehberlik edebilecektir.

3.3. Araştırmanın Sınırlılıkları

Bu çalışma, AB ETS'nin havacılık sektöründeki karbon emisyonlarını azaltmadaki etkisini analiz etmeyi amaçlamakla birlikte bazı sınırlılıklar içermektedir. Araştırmada, belirli yıllara ait veriler Dünya Bankası ve Eurostat veri tabanlarından alınarak kullanılmıştır. 1995-2021 yıllarını kapsayan bu veriler, çalışmanın sınırlılıklarından birini oluşturmaktadır. Analizde, 23 Avrupa ülkesi ele alınmış olup, veri eksiklikleri nedeniyle AB'nin tamamı değerlendirme kapsamına alınamamıştır. Bununla birlikte ekonometrik yöntem olarak PMG ve dummy değişken modeli kullanılmış, ancak alternatif ekonometrik yaklaşımların eksikliği modelleme sonuçlarının karşılaştırılmasını kısıtlamıştır. Çalışmada havacılık emisyonlarını etkileyen faktörler ele alınmakla birlikte, teknolojik gelişmeler, havayolu şirketlerinin yeşil dönüşüm stratejileri ve yenilenebilir enerjiye geçiş gibi ekolojik unsurlar detaylı olarak incelenmemiştir. Bu sınırlılıklar doğrultusunda, gelecekteki çalışmaların daha geniş veri setleri ve farklı metodolojik yaklaşımlar ile AB ETS'nin havacılık sektörü üzerindeki etkilerini daha kapsamlı bir şekilde değerlendirmesi önerilmektedir.

3.4. Araştırmanın Yöntem ve Modelleri

Araştırmada öncelikle değişkenlerin durağanlık seviyelerini belirlemek amacıyla Pesaran-Yamagata Homojenlik Testi uygulanarak paneldeki regresyon katsayılarının homojen olup olmadığı test edilmiştir. Daha sonra, değişkenler arasındaki yatay kesit bağımlılığını belirlemek amacıyla Cross-Section Dependence Testi (Pesaran, 2004) uygulanmış ve değişkenlerin birbirleriyle ilişkili olup olmadığı incelenmiştir. Değişkenlerin durağanlık özelliklerini belirlemek için Pesaran (CIPS) ve Cross-Sectionally Augmented Dickey-Fuller (CADF) panel birim kök testleri kullanılmıştır. Birim kök testlerinin sonuçlarına göre değişkenlerin seviyesinde veya farkında durağan olup olmadığı tespit edilmiştir. Değişkenlerin uzun dönemli ilişkisini belirlemek amacıyla Westerlund Panel Eşbütünleşme Testi uygulanmış ve eşbütünleşme ilişkisinin varlığı incelenmiştir. Uzun ve kısa dönem dinamiklerini tahmin edebilmek için Pooled Mean Group (PMG) ve Mean Group (MG) regresyon modelleri kullanılmış olup, en uygun tahmin yönteminin belirlenmesi için Hausman testi uygulanmıştır. Son olarak, değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisini belirlemek amacıyla Dumitrescu & Hurlin (2012) Granger nedensellik testi uygulanarak bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki yönlü etkileri analiz edilmiştir.

3.4.1. Pesaran-Yamagata Homojenlik Testi

Panel veri analizlerinde regresyon katsayılarının tüm kesitler boyunca homojen olup olmadığını belirlemek, modelin doğru tahmin edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, Pesaran ve Yamagata (2008) tarafından geliştirilen homojenlik testi, panel veri setlerinde katsayıların sabit mi yoksa değişken mi olduğunu belirlemek amacıyla geliştirilmiştir. Özellikle geniş panel veri setlerinde, geleneksel homojen katsayı varsayımı çoğu durumda gerçekçi olmayabilmektedir. Ülkeler, sektörler veya firmalar arasındaki yapısal farklılıklar göz önüne alındığında, heterojen katsayılara izin verilmesi daha uygun bir yaklaşım sunmaktadır (Ditzen ve Bersvendsen, 2019). Bu nedenle, özellikle PMG ve MG gibi heterojen panel tahmin yöntemlerini kullanmadan önce, regresyon katsayılarının homojen olup olmadığının belirlenmesi gerekmektedir. Eğer homojenlik hipotezi reddedilirse, panel veri modellerinde heterojen katsayıları içeren yöntemlerin tercih edilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda yapılan bazı çalışmalar,

heterojenlik testi uygulamalarının panel veri modellerinde daha güvenilir tahminler sağladığını göstermektedir (Gündüz, 2017; Bonhomme ve Manresa, 2015).

$$y_{it} = \alpha_i + \beta_i x_{it} + \epsilon_{it} \quad (1)$$

Burada y_{it} bağımlı değişken, x_{it} bağımsız değişken, α_i bireysel etkiler β_i kestirilen katsayı (tüm kesitler için aynı olup olmadığı test edilir), ϵ_{it} hata terimi ifade etmektedir. Aşağıda Pesaran-Yamagata Homojenlik Testi'ne ait hipotezler verilmiştir.

$H_0: \beta_i = \beta$ (Tüm kesitler için katsayılar aynıdır - homojenlik)

$H_1: \beta_i \neq \beta$ (En az bir kesitte katsayı farklıdır - heterojenlik)

Pesaran-Yamagata testi şu istatistik ile hesaplanır:

$$\Delta = \frac{N}{2} (\tilde{Z} - \bar{Z}) \quad (2)$$

Burada N paneldeki toplam kesit sayısıdır, $\tilde{Z}$ ve $\bar{Z}$ ise katsayıların varyans tahmincileridir.

3.4.2. Yatay Kesit Bağımlılığı Testi

Panel veri analizlerinde, kesitler arasında bağımlılığın varlığı, model tahminlerinin doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Yatay kesit bağımlılığı, kesit birimleri arasında ortak ekonomik şoklar veya yapısal benzerliklerden kaynaklanan korelasyonları ifade etmekte olup, ihmal edilmesi model tahminlerinde yanlışlık ve tutarsızlığa yol açabilmektedir (Pesaran, 2004). Kesitler arasındaki bağımlılığı tespit etmek amacıyla Pesaran (2004) tarafından geliştirilen Cross-Section Dependence (CD) testi, hata terimleri arasındaki ortalama korelasyonu ölçerek kesit bağımsızlığını sınamaktadır. Bu test, özellikle geniş ölçekli makroekonomik ve finansal panel veri setlerinde güvenilir sonuçlar sunmakta ve ampirik çalışmalarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Hsiao, Pesaran ve Pick, 2007). Ayrıca literatürde Breusch ve Pagan (1980) tarafından önerilen Lagrange Çarpmanı (LM) testi gibi alternatif yöntemler de kesit bağımlılığının belirlenmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Ancak uygun modelleme tekniklerinin seçilmemesi durumunda, standart hata tahminleri hatalı hesaplanabilir ve ekonometrik analizlerin

güvenilirliği azalabilir. Bu nedenle, panel veri analizlerinde kesit bağımlılığının tespit edilmesi ve uygun yöntemlerin uygulanması, doğru ve geçerli tahminler elde edilmesi açısından kritik bir adımdır (Breusch ve Pagan, 1980; Pesaran, 2004).

$$CD = \frac{\sqrt{2T}}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \widehat{\rho}_{ij} \quad (3)$$

Burada T zaman periyodu sayısı, N kesit sayısı, $\widehat{\rho}_{ij}$ ise tahmin edilen korelasyon katkısıdır. Aşağıda Pesaran Yaty Kesit Bağımlılığı (CD) Testi'ne ait hipotezler verilmiştir.

$H_0: \rho_{ij} = 0$ (Kesitler bağımsızdır)

$H_1: \rho_{ij} \neq 0$ (Kesitler bağımlıdır)

3.4.3. Panel Birim Kök Testleri (Pesaran CIPS ve CADF)

Birim kök testleri, panel veri setindeki değişkenlerin durağan olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılan önemli istatistiksel yöntemlerdir. Ekonometrik analizlerde durağanlığın sağlanması, model tahminlerinin güvenilirliği açısından önem taşımaktadır; zira durağan olmayan değişkenlerle gerçekleştirilen regresyon analizleri, yanıltıcı ve sahte sonuçlar üretebilmektedir (Granger ve Newbold, 1974; Nelson ve Plosser, 1982). Panel birim kök testleri, her bir kesit biriminin durağan olup olmadığını değerlendirirken, aynı zamanda çapraz kesit bağımlılığını dikkate alarak daha sağlam istatistiksel çıkarımlar yapılmasını mümkün kılmaktadır (Levin, Lin ve Chu, 2002; Im, Pesaran ve Shin, 2003).

Bu çalışmada, panel veri setindeki değişkenlerin durağanlık özellikleri, Pesaran (2007) tarafından geliştirilen Cross-sectionally Augmented Im-Pesaran-Shin (CIPS) testi ve Cross-sectionally Augmented Dickey-Fuller (CADF) testi uygulanmıştır. Bu testler, geleneksel birim kök testlerinin kesitler arası korelasyon varlığında geçersiz hale gelmesini önlemek amacıyla kesit ortalamalarını modele dahil etmektedir. Böylece, panel veri analizlerinde durağanlık testlerinin güvenilirliği artırılmakta ve kesitler arası bağımlılıktan kaynaklanabilecek hatalar minimize edilmektedir (Maddala ve Wu, 1999; Choi, 2001; Pesaran, 2007). Pesaran'ın (2007) geliştirdiği CIPS testi, bireysel CADF test

istatistiklerinin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Test istatistiği aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$CIPS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{iT} \quad (4)$$

Burada N paneldeki toplam kesit sayısını, t_{iT} ise her kesit için hesaplanan bireysel CADF test istatistiğini ifade etmektedir. Geleneksel IPS (Im, Pesaran, and Shin) testinden farklı olarak CIPS testi, kesit bağımlılığını hesaba katmak amacıyla bireysel Dickey-Fuller (ADF) testlerine kesit ortalamasını dahil etmektedir.

CIPS testinin hesaplanmasında kullanılan CADF modeli, kesitler arası bağımlılığı gidermek amacıyla kesit ortalamalarını içerecek şekilde yeniden düzenlenmiştir. Bu model aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\Delta y_{it} = \alpha_i + \gamma_i y_{it-1} + \sum_{j=1}^p \theta_{ij} \Delta y_{it-j} + \phi_i \overline{y_{t-1}} + \sum_{j=0}^p \psi_{ij} \Delta \overline{y_{t-j}} + \epsilon_{it} \quad (5)$$

Burada y_{it} kesit i 'de t dönemindeki bağımlı değişkeni temsil etmekte olup, α_i sabit terim, ise γ_i birim kök olup olmadığını belirleyen katsayıdır. θ_{ij} gecikmeli fark terimlerinin katsayılarını, $\overline{y_{t-1}}$ ise tüm kesitlerin ortalaması alınarak hesaplanan gecikmeli bağımlı değişken terimini göstermektedir. ψ_{ij} kesit ortalamalarının farklarını içeren katsayıları, ϵ_{it} ise hata terimini ifade etmektedir. CADF testinde, γ_i katsayısının anlamlı olup olmadığı, birim kök varlığını test etmek için kritik bir göstergedir. Aşağıda Pesaran CIPS ve CADF testlerine ait hipotezler verilmiştir:

$H_0: \gamma_i = 0, \forall i$ (Tüm kesitlerde birim kök vardır, yani değişken durağan değildir.)

$H_1: \gamma_i < 0$, en az bir i için (En az bir kesitte durağanlık vardır.)

3.4.4. Westerlund Panel Eşbütünleşme Testi

Eşbütünleşme testleri, bir panel veri setindeki değişkenler arasında uzun dönemli bir ilişkinin varlığını tespit etmek amacıyla kullanılan istatistiksel yöntemlerdir. Eğer iki veya daha fazla değişken durağan değilse ancak uzun vadede ortak bir denge ilişkisi içinde hareket ediyorsa, bu değişkenler arasında eşbütünleşme ilişkisinin mevcut olduğu kabul edilir (Pedroni, 1999). Eşbütünleşme analizleri, ekonometrik modellerde uzun

dönem denge ilişkilerinin belirlenmesi açısından kritik bir rol oynamakta olup, değişkenler arasında sahte regresyon problemini önlemeye yardımcı olmaktadır (Johansen, 1991).

Bu çalışmada, panel veri setinde bir eşbütünleşme ilişkisinin varlığını test etmek amacıyla Westerlund Panel Eşbütünleşme Testi uygulanmıştır. Westerlund testi yatay kesit birimleri arasındaki heterojenliği hesaba katmakta ve geleneksel Engle-Granger yöntemi yerine hata düzeltme modeli (ECM) tabanlı bir yaklaşım kullanmaktadır (Westerlund, 2007). Bu yöntem, kısa dönem dinamiklerini ve hata düzeltme mekanizmasını doğrudan modele dahil ederek daha güçlü ve güvenilir sonuçlar üretmeyi amaçlamaktadır.

$$\Delta y_{it} = \alpha_i + \lambda_i(y_{it-1} - \beta X_{it}) + \sum_{j=1}^p \theta_{ij} \Delta X_{it-j} + \epsilon_{it} \quad (6)$$

Burada y_{it} kesit i 'de t dönemindeki bağımlı değişkeni, X_{it} kesit i 'de t dönemindeki bağımsız değişkenleri içeren vektör, α_i sabit terimi temsil etmektedir. λ_i hata düzeltme katsayısı olup, eşbütünleşme ilişkisini belirleyen temel parametre, β uzun dönem katsayılarını, θ_{ij} kısa dönem dinamiklerini temsil eden katsayılarını, ϵ_{it} ise hata terimidir. Aşağıda Westerlund Panel Eşbütünleşme Testi'ne ait hipotezler verilmiştir:

$H_0: \lambda_i = 0, \forall i$ (Tüm kesitlerde eşbütünleşme yoktur.)

$H_1: \lambda_i < 0$, en az bir i için (En az bir kesitte eşbütünleşme vardır.)

3.4.5. Havuzlanmış Ortalama Grup (PMG) ve Ortalama Grup (MG) Katsayı Tahmini

Eşbütünleşme ilişkisinin varlığı tespit edildikten sonra, değişkenler arasındaki kısa ve uzun dönem katsayılarını tahmin etmek için Havuzlanmış Ortalama Grup (PMG) ve Ortalama Grup (MG) regresyon modelleri uygulanmıştır. Bu modeller, panel veri analizlerinde dinamik yapıyı ve kesit birimleri arasındaki heterojenliği dikkate alarak güvenilir tahminler sunmaktadır (Pesaran, Shin ve Smith, 1999; Blackburne ve Frank, 2007).

PMG ve MG tahmincileri dinamik panel modellerinde heterojen eğim katsayılarını tahmin etmek için yaygın uygulanan yöntemlerdir (Pesaran, Shin ve Smith, 1999). MG

modeli, tüm eğim katsayılarının panel birimleri arasında değişmesine izin vererek tam heterojenliği dikkate almaktadır. Buna karşılık, PMG modeli uzun dönemli ilişkilerin tüm yatay kesitlerde aynı olduğunu varsayarken, kısa dönem katsayılarının ve hata varyanslarının farklı olmasına izin vermektedir (Pesaran vd., 1999). PMG ve MG modellerinin temel aldığı Panel ARDL modeli, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$y_{it} = \alpha_i + \sum_{k=1}^p \beta_k y_{it-k} + \sum_{k=1}^p \gamma_k X_{it-k} + \epsilon_{it} \quad (7)$$

Burada y_{it} kesit i 'deki t dönemindeki bağımlı değişken, X_{it} kesit i 'deki t dönemindeki bağımsız değişkenleri içeren vektör, α_i kesit bazında değişebilen sabit terimi, β_k bağımlı değişkenin gecikmeli değerlerinin katsayılarını ifade etmektedir. γ_k ise bağımsız değişkenlerin gecikmeli değerlerinin katsayılarını (ARDL modeli içinde gecikmeli bağımsız değişkenlerin etkisi), ϵ_{it} hata terimi ifade etmektedir.

Bu model, uzun dönem ilişkisini ve kısa dönem dinamiklerini aynı anda modelleyebilmektedir. Modelde uzun dönem ilişkisinin var olup olmadığı hata düzeltme mekanizması ile de test edilebilmektedir. Bu modelin uzun dönem formülasyonu, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki uzun dönem ilişkisinin (eşbütünleşmenin) olup olmadığını test etmek için yeniden yazılmaktadır.

$$y_{it} = \phi_i y_{it-1} + \sum_{k=1}^p \beta_k X_{it-k} + \epsilon_{it} \quad (8)$$

Burada: ϕ_i uzun dönem katsayısını belirleyen hata düzeltme katsayılarını, β_k ise uzun dönem katsayılarını ifade etmektedir.

- Eğer $\phi_i < 0$ ise, sistem uzun dönemde dengeye geri döner ve eşbütünleşme vardır.
- Eğer $\phi_i = 0$ ise, hata düzeltme mekanizması çalışmaz ve eşbütünleşme yoktur.

Bu iki model arasında seçim yapmak için Hausman testi yapılmaktadır. Hausman testi (1978), hangisinin daha etkin ve tutarlı olduğunu belirlemek için iki ekonometrik tahminciyi karşılaştıran temel bir spesifikasyon testidir. Panel veri analizinde, PMG ve MG tahmincilerini karşılaştırmak için sıklıkla kullanılmaktadır (Hausman, 1978; Baltagi, 2008) Hausman testinde sıfır hipotezi (H_0), PMG modelinin daha etkin bir tahminleyici

olduğu yönündedir, alternatif hipotez (H_1) ise MG modelinin tercih edilmesi gerektiğini öne sürmektedir (Pesaran, Shin ve Smith, 1999). Test istatistiği ki-kare (χ^2) dağılımını takip etmekte olup, p-değeri 0.05'ten küçükse, MG modeli tercih edilmektedir (Cameron ve Trivedi, 2005). Hausman testi Hausman testi, iki model arasındaki katsayı farklarını kullanarak hesaplanır:

$$H = (\widehat{\beta}_{PMG} - \widehat{\beta}_{MG})' [Var(\widehat{\beta}_{PMG}) - Var(\widehat{\beta}_{MG})]^{-1} (\widehat{\beta}_{PMG} - \widehat{\beta}_{MG}) \quad (9)$$

Burada $\widehat{\beta}_{PMG}$ PMG modelinden elde edilen uzun dönem katsayısı, $\widehat{\beta}_{MG}$ MG modelinden elde edilen uzun dönem katsayısı, $Var(\widehat{\beta}_{MG})$ ve $Var(\widehat{\beta}_{PMG})$ ise PMG ve MG modellerinin katsayı tahmin varyanslarıdır. Aşağıda Hausman testine ait hipotezler verilmiştir:

$H_0: \widehat{\beta}_{PMG} = \widehat{\beta}_{MG}$ (Uzun dönem katsayıları homojendir, PMG modeli uygundur.)

$H_1: \widehat{\beta}_{PMG} \neq \widehat{\beta}_{MG}$ (Uzun dönem katsayıları heterojendir, MG modeli tercih edilmelidir.)

3.4.6. Dumitrescu & Hurlin Granger Nedensellik Testi

Granger'ın geleneksel Granger nedensellik testi (1969), iki zaman serisi değişkeni arasındaki nedensel ilişkiyi belirlemek için kullanılan temel ekonometrik yöntemlerden biridir. Bu test, geçmiş dönemdeki bir değişkenin değerlerinin, diğer değişkenin gelecekteki değerlerini tahmin etme gücünü ölçerek Granger nedenselliği kavramını ortaya koymaktadır. Ancak geleneksel Granger testi yalnızca bireysel zaman serileri için uygulanabilir ve panel veri setlerindeki kesitler (cross-sections) arasındaki heterojenliği dikkate almamaktadır (Granger, 1969; Baltagi, 2008). Bu kısıtı aşmak amacıyla, Dumitrescu ve Hurlin (2012) tarafından geliştirilen Granger nedensellik testi, heterojen panellerde değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisini analiz etmek için genişletilmiş bir çerçeve sunmaktadır. DH testi, panel veri setlerinde hem bireysel hem de grup düzeyinde nedenselliği değerlendirirken, farklı kesit birimleri arasında değişkenler arasındaki nedenselliğin farklı yönlerde olabileceğini dikkate almaktadır (Dumitrescu ve Hurlin, 2012). Bu nedenle, geleneksel Granger nedensellik testine kıyasla panel veri bağlamında daha esnek ve güvenilir sonuçlar sağlamaktadır (Hsiao, 2014). Dumitrescu ve Hurlin'in (2012) önerdiği heterojen panel Granger nedensellik modeli aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$y_{it} = \alpha_i + \sum_{k=1}^p \beta_{ik} y_{it-k} + \sum_{k=1}^p \gamma_{ik} X_{it-k} + \epsilon_{it} \quad (10)$$

Burada y_{it} kesit i 'deki t dönemindeki bağımlı değişken, X_{it} kesit i 'deki t dönemindeki bağımsız değişkenleri içeren vektör, α_i kesit bazında değişebilen sabit terimi, β_{ik} bağımlı değişkenin gecikmeli değerlerinin katsayılarını ifade etmektedir. γ_{ik} ise bağımsız değişkenlerin gecikmeli değerlerinin katsayılarını, ϵ_{it} hata terimi ifade etmektedir. Dumitrescu & Hurlin (2012) tarafından önerilen panel Granger nedensellik testi istatistiği, kesitler arasında heterojenliğe izin verir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\overline{W_N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i \quad (11)$$

Burada W_i her kesit hesaplanan Granger nedensellik testi istatistiği, N kesit sayısı, $\overline{W_N}$ kesitlerin ortalama Granger istatistiğidir. Dumitrescu ve Hurlin Granger nedensellik testinde aşağıdaki hipotezler test edilir:

$H_0: \gamma_{i1} = \gamma_{i2} = \dots \gamma_{ip} = 0, \quad \forall i = 1, \dots, N$ (Tüm kesitlerde bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerinde herhangi bir nedensellik etkisi olmadığını ifade etmektedir.)

$H_1: \gamma_{i1} \neq 0$ en az bir i için, (En az bir kesitte bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerinde nedensel bir etkisinin olduğunu ifade etmektedir.)

3.5. Model

Bu çalışma, Avrupa Emisyon Ticareti Sistemi'nin havacılık sektörü üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla tasarlanmıştır. Havacılık sektörü, küresel karbon emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturmakta olup, ETS gibi düzenleyici politikaların bu emisyonlar üzerindeki etkisini anlamak kritik bir önem taşımaktadır. Bu kapsamda, ETS'nin iç hat, dış hat ve toplam havacılık kaynaklı karbon emisyonları üzerindeki etkisini analiz etmek için üç farklı ekonometrik model oluşturulmuştur.

Model-1: Yurtiçi Havacılık $CO_2 = f(\text{Hava taşımacılığı kalkışları, Enerji Kullanımı, Gayri Safi Yurtiçi Hasıla, Toplam Nüfus, ETS kukla})$

$$DOMCO2_{i,t} = f(ATT_{i,t}, ENG_{i,t}, GDP_{i,t}, POP_{i,t}, ETS_{i,t})$$

Model-2: Uluslararası Havacılık CO₂ = f (Hava taşımacılığı kalkışları, Enerji Kullanımı, Gayri Safi Yurtiçi Hasıla, Toplam Nüfus, ETS kukla)

$$INT_{i,t} = f(ATT_{i,t}, ENG_{i,t}, GDP_{i,t}, POP_{i,t}, ETS_{i,t})$$

Model-3: Toplam Havacılık CO₂ = f (Hava taşımacılığı kalkışları, Enerji Kullanımı, Gayri Safi Yurtiçi Hasıla, Toplam Nüfus, ETS kukla)

$$TOT_{i,t} = f(ATT_{i,t}, ENG_{i,t}, GDP_{i,t}, POP_{i,t}, ETS_{i,t})$$

İlk model, iç hat havacılık CO₂ emisyonlarını açıklamaya yöneliktir. Matematiksel formülasyonu şu şekildedir:

$$\ln(DOMCO_{i,t}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(ATT_{i,t}) + \beta_2 \ln(ENG_{i,t}) + \beta_3 \ln(GDP_{i,t}) + \beta_4 \ln(POP_{i,t}) + \beta_5 ETS_{i,t} + \epsilon_{i,t}$$

İkinci model, uluslararası havacılık CO₂ emisyonlarını açıklamaktadır Model denklemi şu şekildedir:

$$\ln(INT_{i,t}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(ATT_{i,t}) + \beta_2 \ln(ENG_{i,t}) + \beta_3 \ln(GDP_{i,t}) + \beta_4 \ln(POP_{i,t}) + \beta_5 ETS_{i,t} + \epsilon_{i,t}$$

Üçüncü model hem iç hem de uluslararası uçuşları kapsayan toplam havacılık CO₂ emisyonlarını (iç hat uçuşları + uluslararası uçuşları CO₂) açıklamak için oluşturulmuştur.

Modelin matematiksel ifadesi şu şekildedir:

$$\ln(TOT_{i,t}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(ATT_{i,t}) + \beta_2 \ln(ENG_{i,t}) + \beta_3 \ln(GDP_{i,t}) + \beta_4 \ln(POP_{i,t}) + \beta_5 ETS_{i,t} + \epsilon_{i,t}$$

Ekonometrik modelde kullanılan değişkenler şu şekilde tanımlanmaktadır: $\ln DOMCO_2$, iç hat havacılık kaynaklı CO₂ emisyonlarının doğal logaritmasını; $\ln INT$ uluslararası havacılık kaynaklı CO₂ emisyonlarının doğal logaritmasını; $\ln TOT$, toplam havacılık sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarının doğal logaritmasını temsil etmektedir. Bağımsız değişkenler arasında yer alan $\ln ATT$, hava taşımacılığı uçuş sayılarının doğal logaritmasını; $\ln ENG$ havacılık sektörü enerji kullanımının doğal logaritmasını; $\ln GDP$ gayrisafi yurt içi hasılanın doğal logaritmasını ve $\ln POP$, kontrol değişkeni olan toplam nüfusun doğal logaritmasını ifade etmektedir. ETS değişkeni, AB ETS'yi gösteren

dummy değişken olup, 1 değeri ETS kapsamında olan dönemleri, 0 değeri ise ETS'nin uygulanmadığı dönemleri ifade etmektedir. t , 1996-2021 yıllarını kapsayan zaman serisini temsil etmektedir. β_k ($k = 1,2,3,4,5$), uçuş sayısı, enerji kullanımı, GSYİH, nüfus ve ETS dummy değişkeninin CO₂ emisyonları üzerindeki katsayılarını göstermektedir. Son olarak, $\epsilon_{i,t}$ hata terimi ve modeldeki gecikme sayısını temsil etmektedir.

3.6. Araştırmanın Veri Toplama Aracı ve Verileri

Bu çalışmada bağımlı değişkenler, iç hat havacılık CO₂ emisyonları (DOMCO), uluslararası havacılık CO₂ emisyonları (INTCO) ve toplam havacılık CO₂ emisyonları (TOTALCO) olarak belirlenmiş ve bağımsız değişkenlerin etkileri bu değişkenler üzerinde incelenmiştir. Bağımsız değişkenler ise hava taşımacılığı uçuş sayısı (ATT), havacılık sektörü enerji kullanımı (ENG), gayrisafi yurt içi hasıla (GDP), kontrol değişkeni olarak toplam nüfus (POP) ve AB ETS dummy değişkeni olarak belirlenmiş ve bu veriler kullanılmıştır. Veriler Dünya Bankası (2024) ve Eurostat (2024) kaynaklarından alınmıştır. Bu çalışmada 23 Avrupa ülkesi için 1996-2021 dönemine ait veriler kullanılmıştır. Değişen varyansı azaltmak ve değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi daha iyi analiz edebilmek amacıyla tüm değişkenler doğal logaritmaları ile modele dahil edilmiştir.

Tablo 3.1: Değişkenler Listesi ve Kaynakları

Değişkenler	Dönem	Kısaltma	Kaynak
İç hat havacılık kaynaklı CO ₂ (Milyon ton)	1996-2021	DOM CO ₂	Eurostat
Uluslararası havacılıktan kaynaklı CO ₂ (Milyon ton)	1996-2021	INTCO ₂	Eurostat
Toplam havacılık sektöründen kaynaklanan CO ₂ (Milyon ton)	1996-2021	TOTCO ₂	Eurostat
Ülkede kayıtlı hava taşıyıcılarının yurt içi kalkışları ve yurt dışı kalkışları	1996-2021	ATT	WDI
Havacılık sektörü enerji kullanımı (Milyon ton)	1996-2021	ENG	Eurostat
Gayri Safi Yurt İçi Hasılat (Sabit US\$ 2015)	1996-2021	GDP	WDI
Toplam Nüfus (Bin kişi)	1996-2021	POP	WDI

Tablo 3.1’de verilen değişkenlerden DOMCO₂, iç hat havacılık kaynaklı CO₂ emisyonlarını; INTCO₂, uluslararası havacılık kaynaklı CO₂ emisyonlarını; TOTALCO₂, toplam havacılık sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarını ifade etmektedir. ATT, hava taşımacılığı uçuş sayısını; ENG, havacılık sektörü enerji kullanımını; GDP, sabit 2015 Amerikan doları cinsinden gayrisafi yurt içi hasılayı; POP, toplam nüfusu ifade etmektedir.

3.7. Araştırmanın Kapsamı

Bu araştırma, 23 Avrupa ülkesinin yıllık bazda havacılık sektörü CO₂ emisyonları, hava taşımacılığı uçuş sayısı, havacılık sektörü enerji kullanımı, gayrisafi yurt içi hasıla, toplam nüfus ve Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) değişkenleri arasındaki ilişkinin incelenmesini kapsamaktadır. 23 Avrupa ülkesinin 1995-2021 yılları arasındaki iç hat havacılık CO₂ emisyonları (DOMCO), uluslararası havacılık CO₂ emisyonları (INTCO) ve toplam havacılık CO₂ emisyonları (TOTALCO) alışmanın bağımlı değişkenleri olarak belirlenmiştir. Bağımsız değişkenler ise hava taşımacılığı uçuş sayısı (ATT), havacılık sektörü enerji kullanımı (ENG) ve gayrisafi yurt içi hasıla (GDP), kontrol değişkeni is toplam nüfustur (POP). AB ETS ise dummy değişken olarak belirlenmiştir.

3.8. Araştırmanın Bulguları

Bu çalışmada, havacılık sektörü CO₂ emisyonları ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi ve nedenselliği analiz etmek amacıyla çeşitli ekonometrik testler uygulanmıştır. Çalışmanın bu bölümünde sırasıyla tanımlayıcı istatistikler, Pesaran (2004) Cross-Section Dependence (CD) testi, Pesaran-Yamagata eğim homojenlik testi, CIPS ve CADF panel birim kök testleri, Pedroni ve Westerlund panel eşbütünleşme testleri, PMG (Pooled Mean Group) uzun dönem katsayı tahmini ve Dumitrescu & Hurlin Granger nedensellik testi sonuçları sunulmaktadır. Bu testler, havacılık emisyonları ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek, uzun dönem denge ilişkisini incelemek ve değişkenler arasındaki nedensellik yönünü tespit etmek amacıyla uygulanmıştır.

3.8.1. Tanımlayıcı İstatistikler

Analize başlamadan önce, değişkenlere ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 3.2’de sunulmuştur. Bu tablo, veri setinin temel istatistiksel özelliklerini ortaya koyarak analiz öncesinde genel bir bakış sağlamaktadır. Tablodaki değerler, logaritmik dönüşüm uygulanmadan verilmiş olup değişkenlerin ham haliyle istatistiksel dağılımını göstermektedir.

Tablo 3.2: Tanımlayıcı İstatistikler

İstatistikler	DOMCO ₂	INTCO ₂	TOTCO ₂	ATT	ENG	GDP	POP
Ortalama	.6051711	3.927433	4.532604	180467.8	1275.214	5.14e+11	18075.29
Minimum	.0001	.02596	.02753	306	9.947	4.84e+09	378.404
Maksimum	5.63116	30.06235	32.05628	1154472	9824.945	3.60e+12	83166.71
Standart sapma	1.23574	5.864359	6.852279	243363.8	1908.071	8.05e+11	22513.65
Skewness	2.246776	2.091956	1.945937	1.915637	2.121551	2.117486	1.578523
Kurtosis	7.042648	6.97712	5.90562	5.974776	7.133186	6.564157	4.282922
Gözlem sayısı	598	598	598	598	598	598	598

Tablo 3.2’de sunulan tanımlayıcı istatistikler, araştırmada kullanılan değişkenlerin dağılımı hakkında genel bilgiler vermektedir. Ortalama değerler, değişkenlerin genel eğilimini gösterirken, minimum ve maksimum değerler, veri setindeki en düşük ve en yüksek gözlem noktalarını temsil etmektedir. DOMCO₂, INTCO₂ ve TOTCO₂ değişkenleri sırasıyla iç hat, uluslararası ve toplam havacılık kaynaklı CO₂ emisyonlarını göstermekte olup, ortalama değerleri 0.605, 3.927 ve 4.532 olarak hesaplanmıştır. ATT ve ENG değişkenleri de geniş bir aralıkta değişim göstermekte olup, bu değişkenlerin maksimum değerleri sırasıyla 1,154,472 ve 9,824.945 olarak belirlenmiştir. Standart sapma değerleri, değişkenlerin dağılımındaki oynaklığı yansıtmaktadır. CO₂ emisyon değişkenlerinde (DOMCO₂, INTCO₂, TOTCO₂) yüksek standart sapma değerleri, ülkeler arasında önemli farklılıklar olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde, ATT ve ENG değişkenleri de yüksek standart sapmaya sahiptir, bu da ülkeler arasında hava taşımacılığı faaliyetlerinin büyük farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Çarpıklık (Skewness) değerleri, değişkenlerin simetrik olup olmadığını gösterirken, basıklık (Kurtosis) değerleri, dağılımın sivrililiğini ölçmektedir. DOMCO₂, INTCO₂ ve TOTCO₂ değişkenleri pozitif çarpıklık göstermekte olup, bu değişkenlerde sağ kuyruklu

(pozitif asimetrik) bir dağılım olduğu anlaşılmaktadır. Kurtosis değerleri ise 5'in üzerinde olup, değişkenlerin normal dağılımdan daha sivri ve uç değerler içeren bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir. Son olarak, 598 gözlem sayısı, veri setinin sağlam bir analiz yapmaya uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Bu istatistikler, değişkenlerin yapısını ve dağılımını değerlendirerek, uygulanacak ekonometrik analizlerin uygunluğunu test etmek için kritik bir öneme sahiptir.

3.8.2. Pesaran-Yamagata Homojenlik Testi

Panel veri analizlerinde, ülkeler arasında katsayıların homojen olup olmadığını test etmek, model seçiminde kritik bir öneme sahiptir. Δ ve Δ adj istatistikleri kullanılarak gerçekleştirilen bu test, panel veri setlerinde ülkeler arası yapısal farklılıkları göz önünde bulundurarak daha doğru model tahmini yapılmasını sağlamaktadır. Eğer homojenlik hipotezi reddedilirse, ülkeler arasında değişkenler üzerindeki etkilerin farklılık gösterdiği ve heterojen modellerin kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Tablo 3.3: Pesaran-Yamagata homojenlik testi sonuçları

Modeller	Test	İstatistik değeri	Olasılık değeri
M1	Δ	18.342***	0.000
	Δ adj	21.456***	0.000
M2	Δ	9.815***	0.000
	Δ adj	11.481***	0.000
M3	Δ	11.400***	0.000
	Δ adj	13.336***	0.000

*** %1 düzeyinde istatistiksel anlamlılığı göstermektedir.

Tablo 3.3'te sunulan Pesaran-Yamagata eğim homojenlik testi sonuçları, havacılık sektörü CO₂ emisyonlarını belirleyen değişkenlerin ülkeler arasında farklı tepkiler verdiğini göstermektedir. Elde edilen bulgulara göre, tüm modellerde Δ ve Δ adj istatistik değerleri oldukça yüksek bulunmuş ve olasılık değerleri 0.000 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, katsayıların homojen olduğu yönündeki sıfır hipotezinin (H_0) %1 anlamlılık düzeyinde reddedildiğini ve değişkenlerin ülkeler arasında farklı katsayılara sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Model bazında detaylı inceleme yapıldığında, M1 modeli için Δ (18.342*) ve Δ adj (21.456*) istatistik değerleri, değişkenlerin eğim katsayılarının ülkeler arasında önemli ölçüde farklılık gösterdiğini işaret etmektedir. Benzer şekilde, M2 modeli için Δ (9.815*) ve Δ adj (11.481*) değerleri, katsayıların homojen olmadığını doğrulamaktadır. M3 modelinde de Δ (11.400*) ve Δ adj (13.336*) istatistik değerleri yine %1 anlamlılık düzeyinde heterojenliği desteklemektedir. Bu sonuçlar, havacılık sektörü emisyonlarını belirleyen değişkenlerin farklı ülkelerde farklı etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, panel veri analizinde homojen katsayı varsayımına dayalı yöntemler yerine, ülkeler arası heterojenliği dikkate alan modellerin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bulgular, havacılık sektörü ve çevresel politikaların ülkeler arası farklılıklarının dikkate alınması gerektiğini ve tek tip politika önerilerinin her ülke için aynı etkiyi yaratmayabileceğini göstermektedir.

3.8.3. Yatay Kesit Bağımlılığı Testi

Pesaran (2004) tarafından geliştirilen Yatay Kesit Bağımlılığı (CD) testi, hata terimleri arasında ülkeler arası bağımlılık olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Tablo 3.4'te sunulan sonuçlar, çalışmada yer alan havacılık sektörü CO₂ emisyonları ve bağımsız değişkenler arasında güçlü bir yatay kesit bağımlılığı bulunduğunu göstermektedir.

Tablo 3.4: Yatay kesit bağımsızlık testinin sonuçları

	DOMCO 2	INTCO2	TOTCO 2	ATT	ENG	GDP	POP
CD- testi değeri	24.341** *	50.857** *	51.31***	36.239** *	48.495** *	68.546** *	2.969** *
Olasılı k değeri	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003

*** %1 düzeyinde istatistiksel anlamlılığı göstermektedir.

Elde edilen CD-testi değerleri oldukça yüksek olup, tüm değişkenlerde 0.000 olasılık değeri ile %1 anlamlılık düzeyinde yatay kesit bağımlılığı tespit edilmiştir. DOMCO₂, INTCO₂ ve TOTALCO₂ değişkenleri için sırasıyla 24.341, 50.857 ve 51.31 CD-testi değerleri hesaplanmış ve bu değerler, emisyon düzeylerinin ülkeler arasında yüksek bağımlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, bir ülkedeki CO₂ emisyonlarının,

diğer ülkelerin emisyon seviyeleri ile bağlantılı olduğunu ve ortak çevresel faktörlerden etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Bağımsız değişkenler açısından da benzer bir yapı gözlemlenmektedir. ATT için 36.239, ENG için 48.495 ve GDP için 68.546 değerleri hesaplanmış olup, bu değişkenlerin ülkeler arasında güçlü bir yatay kesit bağımlılığı gösterdiği tespit edilmiştir. POP değişkeni için ise CD-testi değeri 2.969 olup, p-değeri 0.003 olarak bulunmuş ve bu değişkenin de %1 anlamlılık düzeyinde yatay kesit bağımlılığı içerdiği anlaşılmıştır.

Bu bulgular, havacılık sektörü ve ekonomik faktörler arasındaki ilişkiyi değerlendirirken yatay kesit bağımlılığını dikkate alan modellerin kullanılması gerektiğini göstermektedir. Yatay kesit bağımlılığı, ülkeler arasında ortak şokların, küresel ekonomik dinamiklerin ve sektörler arası entegrasyonun etkili olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, yatay kesit bağımsızlığı varsayımına dayalı geleneksel panel tahmin yöntemleri yerine, yatay kesit bağımlılığını dikkate alan birim kök ve eşbütünleşme testleri ile tahmin yöntemlerinin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

3.8.4. Panel Birim Kök Testleri (Pesaran CIPS ve CADF)

Panel veri analizlerinde, değişkenlerin durağan olup olmadığını belirlemek, model tahminlerinin güvenilirliği açısından önemlidir. Pesaran (2007) tarafından geliştirilen Cross-Sectionally Augmented IPS (CIPS) ve Cross-Sectionally Augmented Dickey-Fuller (CADF) panel birim kök testleri, değişkenlerin durağanlık seviyelerini belirlemek için kullanılan yöntemlerdir. Bu testler, geleneksel birim kök testlerine kıyasla yatay kesit bağımlılığını dikkate alarak daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Çalışmada kullanılan CIPS ve CADF testleri, tüm değişkenlerin seviyede durağan olup olmadığını ve birinci farkları alındığında durağan hale gelip gelmediğini test etmek için uygulanmıştır.

Tablo 3.5: CIPS ve CADF panel birim kök testi sonuçları

Değişkenler	CIPS		CADF	
	I(0)	I(1)	I (0)	I(1)
DOMCO ₂	-1.964	-4.979***	- 1.579	-3.493***
INTCO ₂	-2.578***	-4.049***	- 2.512***	-3.163***
TOTCO ₂	-2.436***	-4.154***	- 2.354***	-2.836***
ATT	-2.017	-5.034***	-2.002	-3.996***
ENG	-2.307**	-4.572***	-2.528***	-3.456***
GDP	-2.279**	-3.680***	- 1.865	-3.598***
POP	-1.851	-2.396***	-1.022	-2.275***

***, ** ve * sırasıyla %1, %5 ve %10 seviyelerinde durağanlığı göstermektedir.

Tablo 3.5'te sunulan CIPS ve CADF panel birim kök test sonuçları, değişkenlerin seviyede (I(0)) ve birinci farkları alındığında (I(1)) durağan olup olmadığını test etmek amacıyla incelenmiştir. Bulgular, bazı değişkenlerin seviyede durağan olduğunu, bazılarının ise durağan hale gelebilmesi için birinci farklarının alınması gerektiğini göstermektedir.

INTCO₂, TOTCO₂, ve ENG değişkenleri seviyede durağan bulunmuş olup, bu değişkenler için hesaplanan CIPS ve CADF test istatistikleri %1 anlamlılık seviyesinde anlamlı bulunmuştur. Öte yandan, DOMCO₂, ATT, GDP ve POP değişkenleri seviyede durağan bulunmamıştır. Bu değişkenler için hesaplanan CIPS ve CADF test istatistikleri kritik değerlerin üzerinde olup, birim kök içerdiğini göstermektedir. Ancak birinci farkları alındığında tüm değişkenler için test istatistikleri anlamlı hale gelmiş ve %1 anlamlılık düzeyinde durağan oldukları belirlenmiştir.

Bu bulgular doğrultusunda, havacılık sektörü ve CO₂ emisyonları arasındaki uzun dönem ilişkilerini değerlendirebilmek için panel eşbütünleşme testlerinin (Pedroni ve Westerlund testleri gibi) uygulanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca PMG yöntemi gibi uzun dönem katsayı tahmin yöntemlerinin kullanılması, değişkenler arasındaki uzun dönem dengesinin daha sağlıklı bir şekilde belirlenmesini sağlayacaktır.

3.8.5. Westerlund Panel Eşbütünleşme Testi

Ekonometrik analizlerde, değişkenler arasındaki uzun dönemli ilişkinin tespit edilmesi, model tahminlerinin güvenilirliği açısından öneme sahiptir. Westerlund panel eşbütünleşme testi, değişkenlerin uzun dönemde birlikte hareket edip etmediğini

belirlemek için kullanılan güçlü bir yöntem olup, yatay kesit bağımlılığını dikkate alarak geleneksel eşbütünleşme testlerine kıyasla daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Bu çalışmada uygulanan Westerlund testi, hem varyans oranı istatistikleri hem de panel ve grup düzeyindeki eşbütünleşme istatistikleri ile değişkenler arasındaki uzun dönem ilişkisini incelemektedir.

Tablo 3.6: Eşbütünleşme için Westerlund testi

		İstatistik değeri	Olasılık değeri
M1	Varyans oranı	-1.8035	0.0357**
M2	Varyans oranı	-2.3990	0.0082***
M3	Varyans oranı	-2.7644	0.0029***

***, ** ve * sırasıyla %1, %5 ve %10 seviyelerinde anlamlılığı göstermektedir.

Bulgular incelendiğinde, Tablo 3.6’da sunulan Westerlund test sonuçları, tüm modellerde uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin varlığını desteklemektedir. M1 modeli için varyans oranı istatistik değeri -1.8035 olup, olasılık değeri 0.0357’dir. Bu bulgu, %5 anlamlılık seviyesinde eşbütünleşmenin varlığını göstermektedir. M2 modeli için varyans oranı istatistik değeri -2.3990 olup, olasılık değeri 0.0082’dir. Bu değer, %1 anlamlılık seviyesinde eşbütünleşme ilişkisinin güçlü bir şekilde var olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, M3 modeli için varyans oranı istatistik değeri -2.7644 olup, olasılık değeri 0.0029 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgu da %1 anlamlılık seviyesinde değişkenler arasında uzun dönemli bir denge ilişkisinin varlığını doğrulamaktadır.

Tablo 3.7: Eşbütünleşme için Westerlund testi

			İstatistik değeri	Gt	Ga	Pt	Pa
			Değer	- 2.434	-5.639	-13.691	-6.745
M1	Sağlam	Olasılık	Değer	0.000***	0.670	0.000***	0.190
			Değer	-3.124	-7.016	-11.765	-7.788
M2	Sağlam	Olasılık	Değer	0.000***	0.090*	0.010**	0.040**
			Değer	-2.671	-7.869	-13.347	-9.767
M3	Sağlam	Olasılık	Değer	0.000***	0.010**	0.010**	0.010**

Not: Gt ve Ga istatistikleri grup düzeyinde eşbütünleşmeyi test ederken, Pt ve Pa istatistikleri panel genelinde eşbütünleşme ilişkisinin varlığını değerlendirmektedir.

Bulgular incelendiğinde, ilk Tablo 3.6’da sunulan Westerlund test sonuçları, tüm modellerde uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin varlığını desteklemektedir. M1

modeli için varyans oranı istatistik değeri -1.8035 olup, olasılık değeri 0.0357 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgu, Model-1’de bağımsız değişkenler ile yurtiçi havacılık CO₂ emisyonları arasında %5 anlamlılık seviyesinde eşbütünleşme ilişkisinin var olduğunu göstermektedir. Bu durum, yurtiçi havacılık emisyonlarının uzun dönemde hava taşımacılığı faaliyetleri, enerji kullanımı, ekonomik büyüklük ve nüfus faktörlerinden etkilendiğini doğrulamaktadır.

Model-2 için elde edilen varyans oranı istatistik değeri -2.3990 olup, olasılık değeri 0.0082’dir. Bu sonuç, uluslararası havacılık kaynaklı CO₂ emisyonları ile bağımsız değişkenler arasında %1 anlamlılık seviyesinde uzun dönemli bir denge ilişkisinin varlığını göstermektedir. Bu bulgu, uluslararası havacılık sektöründeki karbon emisyonlarının uzun vadede hava taşımacılığı kalkış sayıları, enerji tüketimi ve ekonomik büyüme gibi faktörlerle birlikte hareket ettiğini ortaya koymaktadır.

Model-3 için elde edilen varyans oranı istatistik değeri -2.7644 olup, olasılık değeri 0.0029’dur. Bu değer, toplam havacılık sektörünün CO₂ emisyonları ile bağımsız değişkenler arasında %1 anlamlılık seviyesinde güçlü bir eşbütünleşme ilişkisinin bulunduğunu göstermektedir. Bu sonuç, hem yurtiçi hem de uluslararası havacılık faaliyetlerinin ortak belirleyiciler tarafından uzun vadede sistematik bir şekilde etkilendiğini desteklemektedir. Elde edilen bulgular, tüm modellerde değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin bulunduğunu göstermektedir. Özellikle M2 ve M3 modellerinde eşbütünleşme daha güçlü gözlemlenirken, M1 modelinde panel genelinde uzun dönemli bir ilişki bulunmasına rağmen grup bazında eşbütünleşmenin daha zayıf olduğu görülmektedir. Bu durum, havacılık sektörü ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişkinin uzun vadede birlikte hareket ettiğini ve değişkenlerin uzun dönemde dengede kaldığını göstermektedir.

Tablo 3.7’de sunulan daha ayrıntılı Westerlund test sonuçları, değişkenler arasında uzun dönemli denge ilişkisini detaylandırmaktadır. M1 modeli için Gt (-2.434) ve Pt (-13.691) istatistikleri %1 anlamlılık seviyesinde anlamlı bulunmuş olup, model genelinde uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin varlığını desteklemektedir. Ancak Ga (-5.639) ve Pa (-6.745) istatistikleri anlamlı bulunmamış olup, bu durum eşbütünleşme ilişkisinin grup bazında daha zayıf olabileceğini göstermektedir.

M2 modeli için Gt istatistik değeri -3.124 olup, olasılık değeri 0.000'dır ve bu bulgu %1 anlamlılık seviyesinde eşbütünleşme ilişkisini doğrulamaktadır. Ga istatistiği (-7.016) için olasılık değeri 0.090 olup, %10 anlamlılık seviyesinde eşbütünleşmeyi desteklemektedir. Pt istatistik değeri (-11.765) %5 anlamlılık seviyesinde anlamlı bulunmuş ve değişkenler arasında uzun dönemli bir denge ilişkisini göstermektedir. Pa istatistiği (-7.788) ise %5 anlamlılık seviyesinde anlamlı bulunmuş olup, model genelinde eşbütünleşme ilişkisini desteklemektedir.

M3 modeli için elde edilen tüm istatistikler anlamlı olup, değişkenler arasında güçlü bir eşbütünleşme ilişkisinin bulunduğunu göstermektedir. Gt (-2.671), Ga (-7.869), Pt (-13.347) ve Pa (-9.767) istatistiklerinin tamamı %1 anlamlılık seviyesinde anlamlı bulunmuştur. Bu sonuçlar, hem panel genelinde hem de grup bazında değişkenler arasında uzun dönemli bir denge ilişkisi bulunduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, tüm modellerde değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin bulunduğunu göstermektedir. Özellikle M2 ve M3 modellerinde eşbütünleşme daha güçlü gözlemlenirken, M1 modelinde panel genelinde uzun dönemli bir ilişki bulunmasına rağmen grup bazında eşbütünleşmenin daha zayıf olduğu görülmektedir. Bu durum, havacılık sektörü ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişkinin uzun vadede birlikte hareket ettiğini ve değişkenlerin uzun dönemde dengede kaldığını göstermektedir.

Bu bulgular doğrultusunda, havacılık sektörü ve CO₂ emisyonları arasındaki uzun dönem ilişkisini daha detaylı inceleyebilmek için uzun dönem tahmin yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir. PMG gibi uzun dönem katsayı tahmin yöntemlerinin kullanılması, değişkenler arasındaki uzun dönem dengesinin daha sağlıklı bir şekilde belirlenmesini sağlayacaktır. Elde edilen Westerlund eşbütünleşme testi sonuçları, model tahminlerinin uzun vadeli politika analizleri için güvenilir bir temel oluşturduğunu göstermektedir.

3.8.6. Havuzlanmış Ortalama Grup (PMG) Katsayı Tahmini

Panel veri analizlerinde, değişkenler arasındaki kısa ve uzun dönem ilişkilerini belirlemek amacıyla kullanılan tahmin yöntemleri büyük önem taşımaktadır. PMG yöntemi, kısa dönem katsayılarının ülkeler arasında heterojen olmasına izin verirken, uzun dönem katsayılarının homojen olduğu varsayımına dayanan bir tahmin yöntemidir (Pesaran, Shin

ve Smith, 1999). Bu yöntem, özellikle uzun dönem ilişkilerin ekonometrik açıdan daha sağlıklı bir şekilde belirlenmesini sağlayarak politika önerileri açısından güvenilir sonuçlar üretmektedir (Blackburne ve Frank, 2007). PMG modeli, kısa ve uzun dönem tahminlerini ayrı ayrı hesaplaması nedeniyle hem kısa vadeli şokların etkisini hem de uzun dönem dengesine dönüş hızını değerlendirmeye olanak tanır (Banerjee vd.1998). Model 1’de, PMG tahmin yöntemi kullanılarak yurtiçi havacılık CO₂ emisyonları (DOMCO₂) üzerindeki belirleyici faktörler Tablo 3.8.’de sunulmuştur.

Tablo 3.8: Model 1 PMG tahmin sonuçları

Bağımlı değişken (DOMCO ₂)	Katsayı	Olasılık değeri
Uzun Dönem Sonuçları		
ATT	-.03681	0.497
ENG	.50677	0.000***
GDP	-1.2764	0.000***
POP	.32580	0.096*
ETS	-.02350	0.412
Kısa Dönem Sonuçları		
ec	.26241	0.000***
ATT	.11479	0.072*
ENG	.25563	0.007***
GDP	.86068	0.034**
POP	-9.4701	0.052*
ETS	-.04619	0.456
C	-5.8313	0.000***
Hausman testi (pmg, mg)	9.35	
Olasılık değeri	0.0959	

***, ** ve * sırasıyla %1, %5 ve %10 seviyelerinde anlamlılığı göstermektedir.

Uzun dönem tahmin sonuçları incelendiğinde, ENG değişkenindeki %1’lik artışın DOMCO₂ miktarını %0.50 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, havacılık sektörünün enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları arasındaki doğrudan ilişkiyi ortaya koymakta ve sektörün yüksek karbon yoğunluğu nedeniyle enerji kullanımındaki artışın emisyon seviyelerini yükselttiğini göstermektedir. Lo vd. (2020) çalışması da benzer şekilde, teknik ilerlemelerin hava taşımacılığındaki emisyon verimliliğini artırmasına rağmen, sektördeki genişleme ve artan uçuş sayısı nedeniyle toplam emisyonların azalmadığını, aksine yükselmeye devam ettiğini ortaya koymaktadır. Ancak, Dray vd. (2010), ETS sisteminin uygulanmasının enerji verimliliğini artırmasına rağmen, havacılık talebindeki artış nedeniyle toplam emisyonların beklenenden daha düşük oranda azaldığını vurgulamaktadır. Bu durum, enerji tüketimi ve emisyonlar arasındaki ilişkinin yalnızca teknik ilerlemelerle kontrol altına alınamayacağını, sektörün

genişlemesiyle birlikte ek önlemlerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Öte yandan, GDP değişkenindeki %1’lik artışın uzun vadede DOMCO₂’yi %1.27 oranında azalttığı belirlenmiştir. Bu bulgu, ekonomik büyümenin karbon emisyonları üzerindeki etkisinin doğrusal olmayabileceğini göstermektedir. Özellikle, ekonomik genişlemenin çevresel düzenlemeleri teşvik etmesi ve düşük karbonlu teknolojilere yönelimi artırması, emisyonları azaltıcı bir mekanizma olarak işlev görebilmektedir. Bu durum, ekonomik büyümenin çevreci politikalar, yenilikçi teknolojiler ve enerji verimliliği aracılığıyla havacılık sektöründeki emisyonları azaltıcı bir mekanizma olarak işlev görebileceğini göstermektedir. Winchester (2019) çalışması da piyasa bazlı karbon düzenlemelerinin zamanla havacılık sektöründe enerji verimliliğini artırarak ve sürdürülebilir politikaları teşvik ederek emisyon azaltımına katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, piyasa temelli mekanizmaların uzun vadede sektörün karbon ayak izini azaltma potansiyeline sahip olduğunu desteklemektedir. POP değişkeninin uzun vadede pozitif bir etkiye sahip olduğu ve nüfustaki %1’lik artışın DOMCO₂’yi %0.32 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, nüfus artışının havacılık sektörüne olan talebi artırarak emisyon seviyelerini yükselttiğini ve sektörün genişlemesiyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, Terrenoire vd. (2019) çalışması, nüfus artışı ve havacılık sektöründeki büyümenin uzun vadede emisyonları artıran temel faktörlerden biri olduğunu ve bu durumun iklim değişikliği üzerindeki etkilerini güçlendirdiğini ortaya koymaktadır.

Model 1 sonuçları ise ATT değişkeninin uzun dönemde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Bu bulgu, hava taşımacılığında kalkış sayılarının tek başına emisyon seviyelerini belirleyen bir faktör olmadığını, emisyonların daha çok yakıt tüketimi, filo yapısı, teknolojik dönüşüm ve enerji verimliliği gibi makro düzeydeki faktörlere bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, ETS değişkeninin de uzun vadede negatif bir etkiye sahip olduğu, ancak bu etkinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, karbon piyasası düzenlemelerinin havacılık sektöründe emisyon azaltımı sağlama potansiyeline sahip olsa da, etkisinin belirginleşebilmesi için daha uzun bir zaman dilimine ve tamamlayıcı politikalara ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Kısa dönem tahmin sonuçları değerlendirildiğinde, hata düzeltme katsayısı (ec) 0.26241 olup, seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu katsayı, modelin kısa vadeli şoklara hızlı tepki verdiğini ve sistemin uzun dönem dengesine geri dönüş hızının %26.2 olduğunu göstermektedir. Kısa dönemde, ENG'deki %1'lik artışın DOMCO₂'yi %0.25 artırdığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, enerji kullanımındaki artışın CO₂ emisyonları üzerinde hem kısa hem de uzun dönemde güçlü bir etkisi olduğunu doğrulamaktadır. GDP değişkenindeki %1'lik artışın kısa vadede DOMCO₂'yi %0.86 artırdığı belirlenmiştir. Bu bağlamda, kısa vadede ekonomik büyümenin havacılık faaliyetlerini artırarak emisyonları yükselttiğini, ancak uzun vadede çevreci politikalar ve teknolojik ilerlemeler sayesinde bu etkinin tersine döndüğünü göstermektedir. POP değişkeninin kısa dönemde negatif bir etkisi olduğu belirlenmiş olup, nüfustaki %1'lik artışın kısa vadede DOMCO₂'yi %9.47 azalttığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, nüfus artışının kısa vadede sektörel ve ekonomik yapıdaki değişimlere bağlı olarak emisyonları azaltıcı bir etkisi olabileceğini, ancak uzun vadede havacılık faaliyetlerine olan talebin artışıyla birlikte bu etkinin pozitif yönde hareket ettiğini göstermektedir. ATT değişkenindeki %1'lik artışın kısa vadede DOMCO₂'yi %0.11 artırdığı bulunmuştur. Bu çerçevede, hava taşımacılığı faaliyetlerinin kısa vadede CO₂ emisyonlarını artırabileceğini ancak uzun dönemde etkisinin kaybolduğunu göstermektedir. Son olarak, ETS'nin kısa vadede DOMCO₂ üzerinde negatif bir etkisi olduğu belirlenmiş olsa da, bu etkinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı tespit edilmiştir.

Hausman testi sonuçlarına göre, PMG modeli ile MG modeli karşılaştırılmış ve Hausman test istatistiği 9.35 olarak hesaplanmıştır. Olasılık değeri 0.0959 olup, PMG modelinin tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir. PMG yöntemi, kısa dönem katsayılarının ülkeler arasında değişmesine izin verirken, uzun dönem katsayılarını homojen kabul etmektedir. Genel olarak Model 1'in PMG tahmin sonuçları, ENG hem kısa hem de uzun vadede CO₂ emisyonlarını artırdığını, GDP ise kısa vadede emisyonları artırırken uzun vadede azaltıcı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. POP kısa vadede emisyonları azaltıcı, ancak uzun vadede artırıcı bir faktör olduğu belirlenmiştir. ATT kısa vadede emisyonları artırıcı bir etki gösterirken, uzun dönemde anlamlı bir etkisi olmadığı görülmektedir. ETS değişkeninin ise ne kısa ne de uzun vadede istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 3.9: Model 2 PMG tahmin sonuçları

Bağımlı değişken (INTCO ₂)	Katsayı	Olasılık değeri
Uzun Dönem Sonuçları		
ATT	-.00358	0.540
ENG	.96772	0.000***
GDP	.09688	0.000***
POP	-.07141	0.010***
ETS	.00505	0.077*
Kısa Dönem Sonuçları		
ec	.44814	0.000***
ATT	.04906	0.060*
ENG	.91161	0.000***
GDP	.18070	0.019**
POP	.45622	0.335
ETS	.00309	0.528
C	3.3291	0.000***
Hausman testi (pmg, mg)	1.19	
Olasılık değeri	0.9069	

***, ** ve * sırasıyla %1, %5 ve %10 seviyelerinde anlamlılığı göstermektedir.

Model 2’de, PMG tahmin yöntemi kullanılarak uluslararası havacılık CO₂ emisyonlarının (INTCO₂) belirleyicileri Tablo 3.9’da sunulmuştur. Uzun dönem tahmin sonuçlarına göre, ENG değişkeninde yaşanan %1’lik artışın, INTCO₂ emisyonlarını %0.97 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, havacılık sektörünün yüksek yakıt tüketimi bağımlılığı nedeniyle emisyon seviyelerinin büyük ölçüde enerji kullanımına bağlı olduğunu göstermektedir. Özellikle fosil yakıt ağırlıklı enerji tüketimi, havacılık sektörünün karbon yoğun yapısını korumasına neden olmakta ve bu durum, sürdürülebilirlik açısından kritik bir sorun teşkil etmektedir. Lee vd. (2001) ve Gössling ve Humpe (2020) çalışmaları da benzer şekilde, sektördeki enerji verimliliği politikalarının emisyon azaltımında belirleyici bir rol oynayabileceğini ve sektörde kapsamlı bir dönüşüm yaratma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. GDP INTCO₂ üzerindeki etkisi pozitif olup, %1’lik bir artışın emisyonları %0.09 oranında artırdığı görülmektedir. Bu bağlamda, uluslararası ticaret hacminin genişlemesi ve ekonomik faaliyetlerin artmasıyla birlikte, hava taşımacılığına olan talebin yükseldiğini ve bunun emisyon seviyelerini artıran bir unsur olduğunu göstermektedir. Ancak katsayının düşük olması, ekonomik büyümenin emisyonlar üzerindeki etkisinin görece sınırlı kaldığını düşündürmektedir.

POP uzun dönemde negatif bir katsayıya sahiptir ve nüfus artışının uluslararası havacılık kaynaklı CO₂ emisyonlarını azaltıcı yönde etkileyebileceğini göstermektedir. ATT değişkeninin uzun dönemde ise CO₂ emisyonları üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, hava taşımacılığı kalkış sayılarının doğrudan emisyon seviyelerini belirleyen bir faktör olmadığını, havacılık faaliyetlerinin çevresel etkisinin uçuş mesafesi, uçak tipi ve yakıt verimliliği gibi daha geniş kapsamlı değişkenler tarafından şekillendiğini göstermektedir. ETS değişkeni pozitif bir katsayıya sahip olup, %10 anlamlılık seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu bulgu, ETS'nin uluslararası havacılık sektöründe emisyon azaltımı konusunda yeterince etkili olmadığını ve mevcut düzenlemelerin sektörün karbon salımını sınırlamada yetersiz kaldığını düşündürmektedir. Bu durum, ETS'nin etkinliğinin artırılması için daha sıkı düzenlemelerin ve kapsamlı politika çerçevelerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Nitekim, Meltzer (2012) çalışması da AB ETS'nin havacılık sektörüne uygulanmasının başlangıç aşamasında belirgin bir emisyon azaltımı sağlamadığını, ancak uluslararası karbon düzenlemelerinin gelişmesi ve sektörün bu sisteme adaptasyonu ile etkinliğinin zamanla artabileceğini tartışmaktadır. Bu bağlamda, ETS'nin uzun vadede etkili bir karbon azaltım aracı haline gelebilmesi için daha geniş ölçekli uluslararası iş birlikleri ve sektör özelinde tasarlanmış teşvik mekanizmaları ile desteklenmesi gerektiği söylenebilir.

Kısa dönem tahmin sonuçları değerlendirildiğinde, hata düzeltme katsayısının (ec) 0.44814 olduğu ve istatistiksel olarak anlamlı bulunduğu belirlenmiştir. Bu katsayı, modelin kısa vadeli dalgalanmalara karşı hızlı bir şekilde dengeye dönüş eğiliminde olduğunu ve sistemin her dönemde %44.8 oranında uzun dönem dengesine geri döndüğünü göstermektedir. Bu sonuç, uluslararası havacılık emisyonlarının kısa vadede dalgalanmalara açık olmakla birlikte, uzun dönemde belirli yapısal dinamikler doğrultusunda dengeye ulaşma eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır. Kısa vadede ATT değişkenindeki %1'lik artışın INTCO₂'yi %0.05 oranında yükselttiği görülmektedir. Bu bulgu, hava taşımacılığı faaliyetlerinin kısa vadede CO₂ emisyonlarını artırdığını ancak uzun dönemde bu etkinin istatistiksel olarak anlamlı hale gelmediğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, hava taşımacılığı faaliyetleri doğrudan emisyonları artırmakta, ancak uzun vadede filo dönüşümü, yakıt verimliliği ve operasyonel stratejiler sayesinde bu etkinin azalabileceği görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar, ATT

değişkeninin doğrudan bir emisyon belirleyicisi olmadığını, emisyon seviyelerinin daha çok uçak türü, uçuş mesafesi ve yakıt verimliliği gibi faktörlerden etkilendiğini ortaya koymaktadır. Loo ve Banister (2016), ulaşım faaliyetlerinin ekonomik büyüme ile doğrudan ilişkili olduğunu vurgulamakla birlikte, havacılık kaynaklı emisyonların taşımacılığın genel büyüklüğünden ziyade kullanılan uçak türü, yakıt tipi ve uçuş mesafesi gibi faktörlere bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Peeters vd. (2016) çalışması da havacılık sektöründeki teknolojik gelişmelere rağmen emisyon seviyelerinde belirgin bir azalma yaşanmadığını ve emisyonların büyük ölçüde uçak verimliliği, operasyonel düzenlemeler ve uçuş mesafesi gibi değişkenler tarafından belirlendiğini göstermektedir. Bu bulgular, havacılık sektöründe emisyon azaltımı için sadece uçuş sayısının değil, teknolojik dönüşüm, filo modernizasyonu ve operasyonel verimlilik gibi faktörlerin öncelikli olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

ENG değişkeninin kısa vadede de güçlü bir etkisi olduğu belirlenmiş olup, %1’lik bir artışın $INTCO_2$ ’yi %0.91 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, sektörün yakıt tüketimi açısından yoğun bir yapıya sahip olduğunu ve kısa vadeli değişimlerin bile CO_2 emisyonlarını doğrudan etkilediğini göstermektedir. GDP değişkenindeki %1’lik artışın kısa vadede $INTCO_2$ ’yi %0.18 oranında artırdığı görülmektedir. Bu ampirik sonuç ekonomik büyümenin kısa vadede uluslararası hava taşımacılığı faaliyetlerini artırarak emisyonları yükselttiğini, ancak uzun vadede bu etkinin daha sınırlı hale geldiğini göstermektedir. POP değişkeninin kısa vadede anlamlı bir etkisi olmadığı belirlenmiştir ve bu da nüfus artışının uluslararası hava taşımacılığı üzerinde doğrudan belirleyici olmadığını göstermektedir. ETS’nin kısa vadede $INTCO_2$ üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı bulunmuştur bu da ETS politikalarının kısa vadeli emisyon azaltımına yönelik etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Genel olarak Model 2’nin PMG tahmin sonuçları, uluslararası havacılık sektöründe ENG, CO_2 emisyonlarını belirleyen en güçlü değişken olduğunu ortaya koymaktadır. GDP hem kısa hem de uzun vadede emisyonları artıran bir etkiye sahipken, POP uzun dönemde negatif yönlü bir etkisi olduğu belirlenmiştir. ATT değişkeni uzun vadede anlamlı bir etkiye sahip olmamakla birlikte, kısa vadede emisyonları artırıcı bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. ETS’nin uluslararası havacılık sektöründe etkisiz kalması, karbon

piyasalarının sektörde etkin bir mekanizma olarak işleyebilmesi için daha sıkı düzenlemeler gerektirdiğini göstermektedir.

Tablo 3.10: Model 3 PMG tahmin sonuçları

Bağımlı değişken (TOTCO ₂)	Katsayı	Olasılık değeri
Uzun Dönem Sonuçları		
ATT	.01187	0.016**
ENG	.94812	0.000***
GDP	.04389	0.002***
POP	.00004	0.999
ETS	-.00926	0.000***
Kısa Dönem Sonuçları		
ec	.44253	0.000***
ATT	.06942	0.007***
ENG	.86646	0.000***
GDP	.14531	0.028**
POP	-.03989	0.945
ETS	-.01010	0.327
C	2.9484	0.000***
Hausman testi (pmg, mg)	1.55	
Olasılık değeri	0.0959	

***, ** ve * sırasıyla %1, %5 ve %10 seviyelerinde anlamlılığı göstermektedir.

Model 3’de, PMG tahmin yöntemi kullanılarak havacılık sektörünün toplam CO₂ emisyonları (TOTCO₂) üzerindeki belirleyicileri Tablo 3.10’da sunulmuştur. Uzun dönem bulgularına göre, ATT’deki %1’lik artışın TOTCO₂’yi %0.01 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, hava taşımacılığı faaliyetlerinin uzun vadede emisyon seviyeleri üzerinde artış yönlü bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak katsayının düşük olması, hava trafiğindeki artışın CO₂ emisyonları üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığını ve diğer faktörlerle dengelendiğini göstermektedir. ENG, emisyonlar üzerindeki en güçlü belirleyici değişken olarak tespit edilmiş olup, ENG’deki %1’lik bir artışın TOTCO₂’yi %0.95 oranında artırdığı belirlenmiştir. Bu bulgu, havacılık sektörünün yüksek karbon yoğunluğu nedeniyle enerji tüketimindeki artışın doğrudan emisyon seviyelerini yükselttiğini ve bu durumun sürdürülebilirlik açısından önemli bir sorun teşkil ettiğini ortaya koymaktadır. Zhang (2024) çalışması da bu doğrultuda, havacılık emisyonlarının azaltılabilmesi için düşük karbon teknolojilerine yönelimin kaçınılmaz bir gereklilik olduğunu vurgulamaktadır. Benzer şekilde, Gössling vd. (2020), hava taşımacılığının mevcut büyüme eğiliminin küresel iklim hedefleriyle çeliştiğini ve sektörün sürdürülebilir bir yapıya kavuşabilmesi için acil olarak kapsamlı çözümler

uygulanması gerektiğini belirtmektedir. Öte yandan, GDP CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi karmaşık bir yapıya sahiptir. Havacılık sektöründe ekonomik genişleme, hava taşımacılığı talebini artırarak emisyon seviyelerini yükseltebilirken, uzun vadede sürdürülebilir teknolojilere yapılan yatırımları teşvik ederek karbon yoğunluğunu azaltıcı bir rol de oynayabilmektedir.

Yurtiçi havacılık modelinde GDP'deki %1'lik artışın emisyonları azalttığı belirlenmişken (-1.27), uluslararası (0.09) ve toplam havacılık (0.04) modellerinde ekonomik büyümenin emisyonları artırdığı görülmüştür. Bu bulgu, ekonomik büyümenin uzun dönemde sürdürülebilir politikalar ve yenilikçi teknolojilerin benimsenmesi sayesinde yurtiçi havacılıkta emisyon azaltıcı bir etki yaratabileceğini göstermektedir. Ekonomik büyümenin uzun vadede sürdürülebilir politikalar ve yenilikçi teknolojilerin benimsenmesi sayesinde yurtiçi havacılık sektöründe emisyon azaltıcı bir etki yaratabileceği görülmektedir. Bu değerlendirme, Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) hipotezi ile uyumlu olup, ekonomik büyümenin başlangıçta çevresel bozulmayı artırmasına rağmen, belirli bir gelir seviyesinden sonra çevresel iyileşmeye katkı sağlayabileceğini öne süren Grossman ve Krueger (1995) ile enerji tüketimi ve karbon emisyonları arasındaki ilişkiyi inceleyen Shahbaz vd. (2015) ve Apergis ve Payne (2009) çalışmalarının bulgularıyla desteklenmektedir. Bununla birlikte, uluslararası havacılık faaliyetlerinde ekonomik büyümenin CO₂ emisyonlarını artırıcı bir etkisi olduğu, bu durumun ise küresel ticaret hacmindeki genişleme, uluslararası hava taşımacılığı talebinin artışı ve sektördeki operasyonel genişlemeyle doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, havacılık sektöründe sürdürülebilir emisyon azaltım stratejilerinin etkinliği, yalnızca ekonomik büyümeye değil, aynı zamanda uygulanan politika çerçevelerine, enerji verimliliği yatırımlarına ve uluslararası iş birliğine bağlı olarak şekillenmektedir.

POP değişkeninin kısa ve uzun dönemde CO₂ emisyonları üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bu bulgu, nüfus değişkeninin kısa vadede toplam havacılık sektörüne doğrudan bir etki yaratmadığını göstermektedir. Bu durum, nüfus artışının uluslararası hava taşımacılığı üzerinde doğrudan bir etkisinin olmayabileceğini ve daha çok bölgesel taşımacılık tercihlerine bağlı olabileceğini göstermektedir. Liddle ve Lung (2013) çalışması da bu bulguyu destekleyerek, ulaşım sektöründe enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkinin ülkeler arasında heterojenlik gösterdiğini ve

sosyo-ekonomik farklılıkların ulaştırma politikalarına etkisinin belirleyici olabileceğini ortaya koymaktadır.

Kısa vadede ATT değişkenindeki %1'lik artışın TOTCO₂'yi %0.06 oranında artırdığı belirlenmiştir. Bu sonuç, hava taşımacılığı faaliyetlerinin kısa vadede CO₂ emisyonlarını artırdığını, ancak uzun dönemde etkisinin görece düşük kaldığını göstermektedir. ENG değişkeninin kısa vadede de güçlü bir etkisi olduğu belirlenmiş olup, %1'lik bir artışın TOTCO₂'yi %0.86 oranında artırdığı bulunmuştur. Bu bulgu, enerji tüketiminin hem kısa hem de uzun vadede havacılık sektörü CO₂ emisyonlarını belirleyen en güçlü faktör olduğunu göstermektedir. Kısa dönem tahmin sonuçları değerlendirildiğinde, hata düzeltme katsayısının (ec) 0.44253 olduğu istatistiksel olarak anlamlı bulunduğu belirlenmiştir. Bu katsayı, sistemin kısa vadeli şoklara karşı hızlı bir dengeye dönüş eğiliminde olduğunu ve modelin uzun dönem dengesine geri dönüş hızının %44.2 olduğunu göstermektedir.

AB ETS'nin etkisi, özellikle toplam havacılık modelinde negatif yönlü ve istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu bulgu, ETS'nin toplam havacılık emisyonlarını azaltıcı bir etkisi olduğunu, ancak uluslararası havacılıkta anlamlı bir etkisinin olmamasının, karbon ticaret sistemlerinin havacılık sektöründe tam anlamıyla etkili çalışmadığını gösterdiğini ortaya koymaktadır. Zhang ve Wang (2024) çalışması da benzer şekilde, ETS'nin yalnızca yurtiçi havacılık emisyonlarını azaltmada etkili olduğunu, ancak uluslararası uçuşlar üzerinde belirgin bir etkisinin bulunmadığını göstermektedir. Öte yandan, Scheelhaase vd. (2010) çalışması, havayolu şirketlerinin karbon maliyetlerini operasyonel maliyetlerine yansıtarak ETS'nin etkisini nötralize edebildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, ETS'nin havacılık sektörüne entegrasyonunda bazı yapısal sorunların bulunduğunu ve sistemin uluslararası taşımacılık faaliyetlerinde istenilen emisyon azaltım sonuçlarını sağlayamayabileceğini göstermektedir. Uluslararası uçuşların çoğunlukla farklı düzenleyici çerçevelere tabi olması ve küresel karbon piyasalarındaki koordinasyon eksikliği, ETS'nin etkinliğini sınırlayan temel faktörler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, ETS'nin uluslararası havacılıkta daha etkili olabilmesi için küresel düzeyde uyumlaştırılmış politika mekanizmalarına ve daha sıkı düzenleyici çerçevelere ihtiyaç duyulduğu söylenebilir.

Bu bulgular, havacılık sektöründe karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik politikaların enerji tüketimi odaklı olması gerektiğini ve ETS gibi piyasa temelli mekanizmaların etkinliğinin artırılması gerektiğini göstermektedir. Özellikle enerji verimliliği artırıcı uygulamaların yaygınlaştırılması, karbon emisyonlarını azaltmada önemli bir rol oynayabilir. Çalışma, AB ETS'nin etkinliği konusunda farklı perspektifler sunmakta ve çalışmamızdaki bulguların büyük ölçüde literatürle uyumlu olduğunu göstermektedir. Özellikle ETS'nin havacılık sektöründe tam anlamıyla etkili olabilmesi için kapsamının genişletilmesi gerektiği ve enerji verimliliği politikalarının daha fazla ön plana çıkması gerektiği yönündeki öneriler, mevcut çalışmamızın sonuçlarıyla örtüşmektedir. Bu bağlamda, politika yapıcıların ETS'nin kapsamını genişletmesi ve enerji tüketimini azaltacak teknolojik yeniliklere teşvik sağlaması, havacılık emisyonlarının daha etkili şekilde azaltılmasına yardımcı olabilir.

3.8.7. Dumitrescu & Hurlin Granger Nedensellik Testi

Dumitrescu ve Hurlin (2012) Panel Nedensellik Testi, panel veri setlerinde değişkenler arasındaki nedensel ilişkileri belirlemek için kullanılan güçlü bir yöntemdir. Bu test, geleneksel Granger nedensellik testinden farklı olarak panel yapıyı dikkate alarak ülkeler veya birimler arasındaki heterojenliği göz önünde bulundurmaktadır. Bu bağlamda, test sonuçları değişkenler arasındaki tek yönlü, çift yönlü veya nedensel ilişkinin olmadığını ortaya koymaktadır. Çalışmamızda, Model 1 kapsamında yurtiçi havacılık CO₂ emisyonları (DOMCO₂) ile hava taşımacılığı kalkış sayıları (ATT), havacılık sektörü enerji tüketimi (ENG), gayri safi yurtiçi hasıla (GDP), toplam nüfus (POP) ve Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) değişkenleri arasındaki nedensellik ilişkisi Tablo 3.11'de sunulmuştur.

Tablo 3.11: Model 1 Dumitrescu Hurlin Panel Nedensellik Testi

Değişkenler	Tek yönlü / Çift yönlü / Nedensel ilişki yok	w-istatistiği	Z-istatistiği	P-değeri
DOMCO ₂ → ATT	Çift yönlü	5.1418	14.0454	0.0000***
ATT → DOMCO ₂		2.6503	5.5965	0.0000***
DOMCO ₂ → ENG	Çift yönlü	4.7729	12.7945	0.0000 ***
ENG → DOMCO ₂		2.7419	1.7789	0.0753*
DOMCO ₂ → POP	Çift yönlü	3.7035	9.1680	0.0000 ***
POP → DOMCO ₂		5.8727	16.5240	0.0000 ***
DOMCO ₂ → GDP	Çift yönlü	3.7092	9.1875	0.0000***
GDP → DOMCO ₂		2.1503	3.9009	0.0001***
DOMCO ₂ → ETS	Çift yönlü	3.0110	6.8196	0.0000***
ETS → DOMCO ₂		2.6718	5.6693	0.0000***

***, ** ve * sırasıyla %1, %5 ve %10 seviyelerinde anlamlılığı göstermektedir.

ATT ile DOMCO₂ arasındaki çift yönlü nedensellik ilişkisi hava taşımacılığı faaliyetlerinin CO₂ emisyonlarını artırdığını, ancak aynı zamanda emisyon seviyelerindeki değişimlerin de hava taşımacılığı sektörüne yönelik düzenlemeleri ve talebi etkileyebileceğini göstermektedir. Hava taşımacılığının CO₂ emisyonlarına önemli bir katkı sağladığını belirten Junior vd. (2024) çalışması bu görüşü desteklemektedir. Benzer şekilde, Hamdan vd. (2019) hava trafiği yönetiminin emisyon azaltımında kritik bir rol oynayabileceğini öne sürmektedir. Ancak sıkı emisyon düzenlemelerinin hava taşımacılığı talebini düşürerek ekonomik etkiler yaratabileceğini belirten Scheelhaase vd. (2021) çalışması, bu ilişkinin daha karmaşık olabileceğine işaret etmektedir. ENG ile DOMCO₂ arasındaki nedensellik ilişkisi, CO₂ emisyonlarındaki artışın havacılık sektörünün enerji tüketimini doğrudan artırdığını göstermektedir. Ancak enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisinin nispeten zayıf olduğu belirlenmiştir, bu da enerji verimliliği sağlayan teknolojik gelişmelerin ve sürdürülebilir yakıt kullanımının emisyonlar üzerindeki etkisini sınırlayabileceğini düşündürmektedir. Guo vd. (2023) çalışması, emisyonları azaltmanın en etkili yolunun daha verimli yakıt teknolojilerine geçiş olduğunu belirtirken, enerji tüketiminin mutlak emisyon seviyelerine olan etkisinin zamanla azaldığını ortaya koymaktadır. Ancak bu çalışma, enerji talebinin ekonomik büyüme ve hava taşımacılığı faaliyetleriyle birlikte artabileceğini yeterince dikkate almamaktadır; dolayısıyla, sektörün enerji verimliliği girişimlerinin emisyonları azaltmada tek başına yeterli olup olmayacağı hala tartışmalıdır. POP ile DOMCO₂ arasındaki çift yönlü nedensellik ilişkisi nüfus artışının hava taşımacılığına olan talebi artırarak CO₂ emisyonlarını yükselttiğini, aynı zamanda emisyon seviyelerindeki

değişimlerin de kentleşme ve nüfus hareketleri üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Luo vd. (2017) çalışması, şehirleşme ve nüfus artışının ulaştırma sektörü emisyonlarını artırdığını doğrulamaktadır.

GDP ile DOMCO₂ arasındaki çift yönlü nedensellik ilişkisi, ekonomik büyümenin hava taşımacılığı faaliyetlerini artırarak CO₂ emisyonlarını yükselttiğini, ancak artan emisyon seviyelerinin çevresel düzenlemeler ve politikalar aracılığıyla ekonomik büyüme üzerinde de etkili olabileceğini göstermektedir. Georgatzi vd. (2020) çalışması da ekonomik büyüme ile CO₂ emisyonları arasında güçlü bir bağ olduğunu ortaya koymakta ve sıkı çevresel politikaların ekonomik büyümeyi yavaşlatabileceğini vurgulamaktadır. Ancak, Kırıkkaleli (2020) çalışması, gelişmiş ülkelerde ekonomik büyümenin belirli bir seviyeden sonra emisyonları azaltabileceğini öne sürerek, bu ilişkinin zamanla değişkenlik gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, ekonomik gelişimin farklı aşamalarında çevresel düzenlemelerin ve sürdürülebilirlik politikalarının etkisinin değişebileceğini göstermektedir.

Öte yandan, ETS ile DOMCO₂ arasındaki çift yönlü nedensellik ilişkisi, AB ETS'nin CO₂ emisyonlarını azaltmada etkili olduğunu, ancak aynı zamanda havacılık sektöründeki emisyon değişimlerinin de ETS politikalarının şekillenmesinde belirleyici bir rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır. Scheelhaase vd. (2021) çalışması ise, ETS kapsamında uygulanan karbon fiyatlarının hava taşımacılığı maliyetlerini artırarak sektöre ekonomik açıdan zarar verebileceğini öne sürmektedir. Bu bulgular, ETS'nin etkinliğinin artırılabilmesi için daha şeffaf raporlama mekanizmaları, küresel düzeyde uyumlu düzenlemeler ve havacılık sektörü için dengeli bir maliyet yapısı oluşturulması gerektiğini göstermektedir.

Genel olarak, tüm değişkenler arasında çift yönlü nedensellik bulunması, CO₂ emisyonlarının yalnızca bağımsız değişkenler tarafından belirlenmediğini, aynı zamanda emisyon seviyelerindeki değişimlerin de bu değişkenler üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, havacılık sektöründe alınacak çevresel önlemlerin ve karbon azaltım stratejilerinin, hava taşımacılığı faaliyetleri, ekonomik büyüme ve enerji tüketimi ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 3.12: Model 2 Dumitrescu Hurlin Panel Nedensellik Testi

Değişkenler	Tek yönlü / Çift yönlü/ Nedensel ilişki yok	w-istatistiği	Z-istatistiği	P-değeri
INTCO ₂ → ATT	Çift yönlü	2.6248	5.5101	0.0000***
ATT → INTCO ₂		2.5654	5.3084	0.0000***
INTCO ₂ ≠ ENG	Nedensel ilişki yok	1.5028	-1.1923	0.2332
ENG ≠ INTCO ₂		1.9557	-0.1063	0.9153
INTCO ₂ → POP	Çift yönlü	1.5559	1.8852	0.0594*
POP → INTCO ₂		8.5839	25.7182	0.0000***
INTCO ₂ ≠ GDP	Tek yönlü	1.2108	0.7148	0.4747
GDP → INTCO ₂		3.5581	8.6749	0.0000***
INTCO ₂ ≠ ETS	Tek yönlü	1.5365	-1.1115	0.2664
ETS → INTCO ₂		1.3098	-1.6550	0.0979*

***, ** ve * sırasıyla %1, %5 ve %10 seviyelerinde anlamlılığı göstermektedir.

Çalışmamız kapsamında geliştirilen Model 2 doğrultusunda, uluslararası havacılık kaynaklı CO₂ emisyonları arasındaki nedensellik ilişkisine dair bulgular Tablo 3.12’de sunulmuştur. ATT ile INTCO₂ arasındaki çift yönlü nedensellik ilişkisinin tespit edilmesi, uluslararası hava taşımacılığı faaliyetlerindeki artışın CO₂ emisyonlarını yükselttiğini, aynı zamanda emisyon seviyelerindeki değişimlerin de hava taşımacılığı sektörüne yönelik politikalar ve operasyonel düzenlemeler üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Jovanovic ve Vracarevic (2016) çalışması da benzer şekilde, havacılık sektöründeki hızlı büyümenin sürdürülebilirlik hedefleriyle çelişebileceğini vurgulayarak, sektörün emisyon azaltımını sağlayacak politikaların geliştirilmesi gerektiğini belirtmektedir. Bununla birlikte, Kito vd. (2020) çalışması, emisyon seviyelerinin mutlak olarak artmasının kaçınılmaz olmadığını öne sürerek, havacılık sektöründeki emisyon azaltımının büyük ölçüde yeni teknolojilere ve daha verimli uçaklara yapılan yatırımlara bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, havacılık sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşabilmek için sadece talep yönetimi değil, aynı zamanda teknolojik dönüşüm ve operasyonel iyileştirmelerin de kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

ENG ile INTCO₂ arasında anlamlı bir nedensellik ilişkisinin bulunmaması, uluslararası havacılık faaliyetlerinde enerji tüketiminin doğrudan belirleyici bir faktör olmayabileceğini göstermektedir. Bu durum, yakıt verimliliği politikaları, farklı ülkelerdeki havayolu firmalarının yakıt kullanım stratejileri ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanımının etkili olabileceğini düşündürmektedir. Tarr vd. (2022) çalışması da benzer şekilde, bazı ülkelerde uluslararası uçuşların yakıt tüketiminin

artmasına rağmen karbon yoğunluğunun düşebileceğini ortaya koyarak, enerji tüketimi ile emisyon seviyeleri arasındaki ilişkinin doğrudan ve sabit olmadığını göstermektedir.

Öte yandan, POP ile INTCO_2 arasında çift yönlü bir nedensellik ilişkisi tespit edilmiştir. Bu bulgu, nüfus artışının uluslararası hava taşımacılığı faaliyetlerini artırarak CO_2 emisyonlarını yükselttiğini, aynı zamanda uluslararası emisyon seviyelerindeki değişimlerin nüfus hareketliliği ve göç dinamikleri üzerinde etkili olabileceğini ortaya koymaktadır. Ben Jebli ve Hadhri (2018) çalışması da uluslararası turizmin hava taşımacılığı üzerindeki etkisini vurgulayarak, bu sürecin CO_2 emisyonlarını artıran temel mekanizmalardan biri olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, Lo vd. (2020) çalışması, düşük maliyetli havayolu şirketlerinin yolcu başına düşen emisyonları azaltabildiğini ve bu durumun nüfus hareketliliğinin çevresel etkilerini sınırlayabileceğini ileri sürmektedir. Bu bulgular, küreselleşme ve artan uluslararası hava taşımacılığı talebinin çevresel etkilerle doğrudan bağlantılı olduğunu, ancak havayolu şirketlerinin operasyonel stratejilerinin bu ilişkinin gücünü belirleyebileceğini göstermektedir.

Son olarak, GDP ile INTCO_2 arasında tek yönlü bir nedensellik ilişkisi bulunmuş olup, ekonomik büyümenin uluslararası hava taşımacılığı faaliyetlerini artırarak CO_2 emisyonlarını yükselttiği, ancak CO_2 emisyonlarındaki değişimin ekonomik büyüme üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, havacılık sektörünün ekonomik büyüme ile doğrudan bağlantılı olduğunu ve uluslararası ticaret ile turizmin emisyonları artıran önemli faktörler arasında yer aldığını ortaya koymaktadır. Bu çerçevede, hava taşımacılığı politikalarının yalnızca çevresel etkileri değil, aynı zamanda ekonomik büyüme üzerindeki potansiyel sonuçları da dikkate alarak tasarlanması gerektiği söylenebilir. ETS ile INTCO_2 arasında tek yönlü bir nedensellik ilişkisi bulunmuş, ancak bu ilişki istatistiksel olarak zayıf kalmıştır ve AB ETS'nin uluslararası havacılık CO_2 emisyonlarını doğrudan azaltmada yeterince etkili olmadığını göstermektedir. Bu durum, ETS'nin kapsamının genellikle Avrupa içi uçuşlarla sınırlı olması ve küresel havacılık sektörünü tam olarak kapsayamamasından kaynaklanabilir. Scheelhaase vd. (2018) çalışması, ETS'nin kapsamının uluslararası uçuşları yeterince içermemesi nedeniyle etkisinin sınırlı kaldığını belirtmektedir.

Tablo 3.13: Model 3 Dumitrescu Hurlin Panel Nedensellik Testi

Değişkenler	Tek yönlü / Çift yönlü/ Nedensel ilişki yok	w-istatistiği	Z-istatistiği	P-değeri
TOTCO ₂ → ATT	Çift yönlü	2.8773	6.3661	0.0000***
ATT → TOTCO ₂		2.8108	6.1407	0.0000***
TOTCO ₂ ≠ ENG	Nedensel ilişki yok	0.6602	1.1060	0.2491
ENG ≠ TOTCO ₂		-1.1524	0.3596	0.7191
TOTCO ₂ → POP	Çift yönlü	3.9808	4.7498	0.0000***
POP → TOTCO ₂		14.7580	30.5927	0.0000 ***
TOTCO ₂ ≠ GDP	Tek yönlü	1.2211	0.7499	0.4533
GDP → TOTCO ₂		5.9341	9.4336	0.0000***
TOTCO ₂ ≠ ETS	Tek yönlü	1.1518	0.5148	0.6067
ETS → TOTCO ₂		1.3481	-1.5632	0.0908*

***, ** ve * sırasıyla %1, %5 ve %10 seviyelerinde anlamlılığı göstermektedir.

Havacılık sektörü, küresel karbon emisyonları açısından önemli bir rol oynarken, bu sektördeki faaliyetlerin emisyonlar üzerindeki etkisi çok yönlü bir yapıya sahiptir. Model 3 doğrultusunda, toplam havacılık kaynaklı CO₂ emisyonları arasındaki nedensellik ilişkisine dair bulgular Tablo 3.13'te sunulmuştur. Yapılan nedensellik testi , ATT ve POP ile TOTCO₂ arasında çift yönlü bir nedensellik ilişkisi bulunduğunu göstermektedir. Bu bulgu, hava taşımacılığı faaliyetleri ve nüfusun CO₂ emisyonlarını doğrudan artırdığını, aynı zamanda emisyon seviyelerindeki değişimlerin hava taşımacılığı politikalarını ve nüfus hareketlerini etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Hava taşımacılığı faaliyetlerinin CO₂ emisyonları üzerindeki belirleyici etkisini vurgulayan Saleem vd. (2018) çalışması, ulaşım sektörünün çevresel etkilerinin sürdürülebilir politikalarla ele alınması gerektiğini belirtmektedir. Benzer şekilde, Regmi ve Rehman (2021) çalışması, nüfus artışının uzun vadede CO₂ emisyonları üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve bunun ekonomik büyüme ile birleştiğinde çevresel sürdürülebilirlik açısından risk oluşturabileceğini göstermektedir.

GDP ile TOTCO₂ arasındaki ilişki incelendiğinde, tek yönlü bir nedensellik olduğu ve ekonomik büyümenin havacılık faaliyetlerini ve dolayısıyla CO₂ emisyonlarını artırdığı tespit edilmiştir. Ekonomik büyümenin CO₂ emisyonlarını artıran temel bir faktör olduğunu belirten Stamatiou ve Dritsakakis (2019) çalışması, ekonomik kalkınmanın çevresel sürdürülebilirlik açısından dikkatli yönetilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, Teame ve Habte (2020) çalışması, ekonomik büyümenin belirli bir seviyeden sonra CO₂ emisyonlarını dengeleyebileceğini öne süren EKC hipotezini desteklemektedir.

AB ETS ile TOTCO₂ arasındaki nedensellik ilişkisinin tek yönlü ve istatistiksel olarak zayıf bulunması, ETS'nin küresel havacılık emisyonlarını azaltmada sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Scheelhaase vd. (2018) çalışması da benzer şekilde, mevcut ETS düzenlemelerinin uluslararası havacılık emisyonlarını tam anlamıyla kontrol altına almakta yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır. Bu bulgu, ETS'nin etkinliğinin artırılabilmesi için daha kapsamlı küresel karbon dengeleme mekanizmalarına ve havacılık sektörü özelinde daha sıkı düzenlemelere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Bunun yanı sıra, ENG ile TOTCO₂ arasında anlamlı bir nedensellik ilişkisinin bulunmaması, enerji tüketiminin emisyon seviyelerini doğrudan belirleyen bir faktör olmayabileceğini ortaya koymaktadır. Bu durum, havacılık sektöründe uygulanan enerji verimliliği politikalarının ve alternatif yakıt kullanımının emisyon değişimlerini kontrol altında tutmada etkili olabileceğini göstermektedir. Osobajo vd. (2020) çalışması da enerji tüketiminin emisyonlara etkisinin sektörler arasında farklılık gösterebileceğini ve havacılık sektöründe bu ilişkinin görece zayıf olabileceğini belirtmektedir.

Genel olarak, hava taşımacılığı faaliyetleri, nüfus artışı ve ekonomik büyüme, toplam havacılık CO₂ emisyonları üzerinde belirleyici faktörler olarak öne çıkmaktadır. Bulgular, ETS'nin küresel havacılık emisyonlarını kontrol altına alma konusunda sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ve havacılık sektöründe sürdürülebilir ulaşım politikalarının kapsamının genişletilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

SONUÇ

Küresel ısınma, son yıllarda çevresel sürdürülebilirlik açısından en büyük tehditlerden biri haline gelmiş olup, ekosistemler ve insan yaşamı üzerinde ciddi etkiler yaratmaktadır. Sanayileşme, enerji tüketimi ve ulaşım faaliyetlerinin artması ,atmosfere salınan sera gazı miktarını arttırarak küresel sıcaklıkların yükselmesine neden olmaktadır. Karbon emisyonlarının hızlı artışı, iklim değişikliğinin etkilerinin daha da şiddetlendirerek, aşırı hava olayları, deniz seviyesinin yükselmesi ve ekosistem tahribatı gibi çevresel problemlere yol açmaktadır. Bu durum, karbon emisyonlarının kontrol altına almayı amaçlayan çeşitli uluslararası politika mekanizmalarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Havacılık sektörü, karbon salınımının önemli kaynaklarından biri olup, özellikle yüksek yakıt tüketimine dayalı faaliyetleri nedeniyle küresel emisyon seviyelerine kayda değer bir katkıda bulunmaktadır. Havayolu taşımacılığı, diğer ulaşım modlarına kıyasla daha yüksek karbon yoğunluğuna sahip olup, özellikle uzun mesafeli uçuşlar bu etkiyi daha da arttırmaktadır. Hava trafiğindeki sürekli artış, sektörün çevresel etkilerinin azaltmaya yönelik politikaların gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu kapsamda, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik en önemli politika araçlarından biri, Avrupa Birliği tarafından uygulanan Emisyon Ticaret Sistemi (ETS)'dir. ETS, piyasa temelli bir mekanizma olarak karbon fiyatlandırma yoluyla şirketlerin karbon sakınımlarını azaltmalarını teşvik etmektedir. Ancak sistemin uygulanması çeşitli sınırlılıklar içermekte olup, özellikle yalnızca Avrupa Birliği içindeki uçuşları kapsamaması (EEA), uluslararası havacılık emisyonlarının önemli bir bölümünü sistemin dışında bırakmaktadır. Bu durum, karbon kaçağı riskini arttırarak , bazı havayolu şirketlerinin düzenlemelerin daha gevşek olduğu bölgelere yönelmesine neden olabilmektedir. ETS kapsamında uygulanan karbon fiyatlandırmalarının düşük seviyede olması, havayolu

şirketlerinin emisyon azaltıcı yatırımlar yapma motivasyonlarını da sınırlamaktadır. Bu bağlamda ETS'nin küresel çapta etkinliğinin arttırılması ve daha kapsayıcı bir sistem haline getirilmesi gerekmektedir.

Uluslararası havacılık emisyonlarının kontrol altına alınması amacıyla ICAO tarafından geliştirilen CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) sistemi, havayolu şirketlerinin karbon dengeleme projelerine yatırım yapmalarını teşvik eden bir mekanizma olarak öne çıkmaktadır. Fakat CORSIA'nın ETS ile entegrasyonu ve uzun vadeli etkinliği konusundaki tartışmalar devam etmektedir. Küresel ölçekte havacılık emisyonlarının etkin bir şekilde azaltılabilmesi için ETS ve CORSIA gibi mekanizmaların daha bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir.

ETS'nin küresel havacılık politikaları üzerindeki etkisi, sistemin kapsamının genişletilmesine bağlıdır. ETS'nin uluslararası uçuşları kapsayacak şekilde düzenlenmesi, karbon kaçağını önleyerek sistemin etkinliğini arttırabilir. Bununla birlikte, sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF) ve düşük emisyonlu uçak teknolojilerine geçişin hızlandırılması gibi ek teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi gerekmektedir. ETS'nin sadece karbon fiyatlandırmasına dayalı bir sistem olması, uzun vadeli karbon azaltım hedeflerine ulaşılması açısından yetersiz olabilir. Bu nedenle ETS'nin yenilikçi çözümler ve küresel havacılık politikaları ile entegre edilmesi, havacılık sektöründe karbon emisyonlarının azaltılması için daha etkili bir çerçeve sunacaktır.

Bu çalışma, AB ETS'nin havacılık sektöründeki karbon emisyonlarını azaltma konusundaki etkinliğini ekonometrik yöntemler kullanarak incelemiştir. Bu doğrultuda, 1995-2021 yılları arasında 23 Avrupa ülkesine ait panel veriler kullanılarak, ETS'nin havacılık sektörü üzerindeki uzun dönemli etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada, havacılık sektöründe karbon emisyonlarını belirleyen faktörler ayrıntılı şekilde incelenmiş ve farklı modelleme yöntemleri kullanılarak değişkenler arasındaki uzun ve kısa dönem ilişkileri analiz edilmiştir. Üç farklı model kapsamında yürütülen analizler, yurtiçi havacılık emisyonları, uluslararası havacılık emisyonları ve toplam havacılık emisyonlarının belirleyicilerini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, hava taşımacılığı kalkış sayısı, enerji kullanımı, gayrisafi yurtiçi , toplam nüfus ve ve AB ETS'nin yürürlüğe girmesinin öncesi ve sonrası dönemlerini karşılaştırmak amacıyla bir dummy değişken ele alınarak panel veri analizi yöntemleri ile değerlendirilmiştir.

PMG tahmin yöntemi kullanılarak yapılan analizler, uzun dönemde enerji tüketiminin havacılık kaynaklı CO₂ emisyonlarının en güçlü belirleyicisi olduğunu ortaya koymaktadır. Modellerin tamamında, enerji tüketimindeki artışın, emisyon seviyelerini istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde yükselttiği görülmüştür. Özellikle uluslararası havacılık faaliyetlerinde enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisinin daha büyük olduğu, toplam havacılık modelinde ise benzer bir eğilimin gözlemlendiği belirlenmiştir. Bu durum, havacılık sektörünün yüksek karbon yoğunluklu yakıtlara olan bağımlılığının devam ettiğini ve enerji verimliliği politikalarının kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. GDP ise modele bağlı olarak farklı etkiler göstermektedir. Yurtiçi havacılık modelinde (DOMCO₂), ekonomik büyümenin karbon emisyonlarını azaltıcı bir etkisi olduğu gözlemlenirken, uluslararası (INTCO₂) ve toplam havacılık (TOTCO₂) modellerinde ise ekonomik büyümenin emisyonları artırıcı etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, ekonomik kalkınmanın belirli bir seviyeye ulaştığında çevresel sürdürülebilirlik politikalarının devreye sokulmasıyla karbon emisyonlarının azaltılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, uluslararası ticaret hacmindeki genişleme ve küresel hava taşımacılığı faaliyetlerindeki artış, havacılık sektörü kaynaklı karbon salımının süregelen bir eğilim içinde artmasına neden olmaktadır. ATT, kısa dönemde havacılık emisyonları üzerinde belirgin bir etkiye sahipken, uzun dönemde bu etkinin azaldığı gözlemlenmiştir. ATT'nin kısa vadede karbon emisyonları üzerindeki güçlü etkisi, uçuş sayısındaki artışın doğrudan karbon salımına yol açtığını göstermektedir. Ancak uzun vadede filo dönüşümü, yakıt verimliliği politikaları ve karbon azaltım stratejileri gibi faktörlerin etkisiyle ATT'nin emisyonlar üzerindeki etkisinin zayıfladığı belirlenmiştir. Bu bulgu, havacılık sektöründe karbon azaltımına yönelik uygulamaların uzun vadede etkin sonuçlar doğurabileceği göstermektedir.

Kontrol değişkeni olarak ele alınan POP ile CO₂ emisyonları arasındaki ilişki, model bazında farklılık göstermektedir. Yurtiçi havacılık modelinde nüfus artışının emisyonları artırdığı görülürken, uluslararası havacılık modelinde nüfus artışının emisyonlar üzerinde negatif bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, büyük nüfuslu ülkelerde iç hat uçuşlarının daha yoğun şekilde tercih edildiğini, ancak uluslararası uçuşların genellikle belirli bir gelir seviyesine ulaşmış bireyler tarafından daha fazla kullanıldığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, nüfus artışı ile havacılık kaynaklı emisyonlar arasındaki ilişkinin ülkelerin demografik ve ekonomik yapısına bağlı olarak değiştiği söylenebilir.

Çalışma kapsamında değerlendirilen AB ETS, havacılık sektöründeki karbon emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip olduğu görülmekle birlikte, etkinliği model bazında farklılık göstermektedir. Toplam havacılık modeli kapsamında ETS'nin CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunurken, yurtiçi ve uluslararası havacılık emisyonları üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, ETS'nin yalnızca belirli uçuşları kapsamaması ve küresel ölçekte havacılık sektörünü tam anlamıyla düzenleyememesi ile açıklanabilir. ETS'nin etkinliğini artırabilmek adına sistemin kapsamının genişletilerek uluslararası uçuşları da içerecek şekilde düzenlenmesi gerekmektedir.

Çalışmada gerçekleştirilen nedensellik analizleri, havacılık emisyonlarının yalnızca bağımsız değişkenler tarafından belirlenmediğini, aynı zamanda emisyon seviyelerindeki değişimlerin de bu değişkenler üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle ATT ile CO₂ emisyonları arasında çift yönlü bir nedensellik ilişkisi bulunduğu belirlenmiştir. Bu durum, hava taşımacılığı faaliyetlerinin CO₂ emisyonlarını artırmasının yanı sıra, emisyon seviyelerindeki değişimlerin de hava taşımacılığı politikaları ve talep üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, GDP ve POP ile CO₂ emisyonları arasında çift yönlü bir nedensellik ilişkisi olduğu tespit edilmiş olup, havacılık sektöründeki karbon emisyonlarının ekonomik ve demografik faktörlerle doğrudan bağlantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Genel olarak, çalışmada kullanılan üç model, havacılık sektöründeki karbon emisyonlarının belirleyicilerini kapsamlı bir şekilde inceleyerek, farklı değişkenlerin uzun ve kısa dönem etkilerini ortaya koymaktadır. Enerji tüketimi, hava taşımacılığı faaliyetleri ve ekonomik büyüme, emisyon seviyeleri üzerinde belirleyici faktörler olarak öne çıkmaktadır. Ancak ETS'nin havacılık sektöründeki karbon salınımını azaltma konusunda sınırlı bir etkisinin olduğu görülmüştür. Bu bulgu, karbon fiyatlandırma politikalarının ve ETS'nin kapsamının yeniden gözden geçirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, havacılık sektöründeki karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik daha sürdürülebilir politikaların uygulanması gerekmektedir. Karbon emisyonlarının etkin bir şekilde azaltılabilmesi için ETS'nin uluslararası uçuşları da kapsayacak şekilde genişletilmesi, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) teşvik edilmesi, enerji

verimliliğini arttıran teknolojilere yatırım yapılması ve havacılık sektöründe çevresel sürdürülebilirliği teşvik eden bütüncül politikaların hayata geçirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Havacılık sektörünün karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik daha etkili bir çerçeve oluşturulabilmesi için kapsamlı ve çok yönlü mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda, öncelikli olarak enerji verimliliğini arttıran ve düşük karbonlu teknolojilere geçişi hızlandıran stratejiler uygulanmalıdır. Havayolu şirketlerinin daha düşük yakıt tüketen ve düşük emisyon üreten uçak modellerine geçiş yapmalarını teşvik edecek mekanizmalar geliştirilmelidir. Özellikle yeni nesil uçak motorları, aerodinamik tasarım iyileştirmeleri ve hafif malzeme kullanımı gibi teknolojik yeniliklerin desteklenmesi, sektörün karbon ayak izini önemli ölçüde azaltacaktır. Ayrıca, elektrikli ve hidrojen yakıtlı uçak teknolojilerinin geliştirilmesi için Ar-Ge yatırımları artırılmalı, bu süreçte devletler ve uluslararası kuruluşlar tarafından sağlanan finansal teşvikler genişletilmelidir. Bunun yanı sıra, havacılık sektörünün fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmak amacıyla sürdürülebilir havacılık yakıtlarının (SAF) kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. Yenilebilir enerji kaynaklarından üretilen biyoyakıtlar ve sentetik yakıtlar, sektörün karbon salınımını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Bu doğrultuda, SAF üretimi teşvik edilmeli, biyoyakıt üreticilerine sağlanan finansal destekler artırılmalı ve havayolu şirketlerinin sürdürülebilir yakıt kullanımına geçişini hızlandıracak yasal düzenlemeler getirilmelidir. Ek olarak havaalanlarında SAF altyapısının geliştirilmesi için teşvik mekanizmaları oluşturulmalı ve biyoyakıt kullanımının operasyonel maliyetler üzerindeki etkisini azaltacak politikalar hayata geçirilmelidir.

Havacılık sektöründeki karbon emisyonlarını kontrol altına almayı hedefleyen AB ETS gibi piyasa temelli mekanizmaların kapsamı genişletilmeli ve karbon fiyatlandırma mekanizmalarının etkinliği artırılmalıdır. ETS, karbon fiyatlandırma yoluyla havayolu şirketlerinin emisyonlarını azaltmalarını teşvik eden önemli bir politika aracı olmakla birlikte, mevcut haliyle yalnızca Avrupa içi uçuşları kapsamı nedeniyle uluslararası uçuşları yeterince kontrol edememektedir. Bu nedenle, ETS'nin küresel ölçekte daha kapsayıcı hale getirilmesi ve uluslararası uçuşları da içerecek şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, ETS kapsamında uygulanan karbon fiyatlarının düşük

seviyede olması, havayolu şirketlerinin emisyon azaltıcı yatırımlar yapmalarını teşvik etmemektedir. Bu bağlamda, karbon fiyatlandırma mekanizmalarının daha sıkı düzenlemelere tabi tutulması, karbon kredilerinin fiyatlandırılması konusunda daha katı limitlerin belirlenmesi ve karbon kaçağına yol açabilecek düzenlemelerin önüne geçilmesi gerekmektedir. ETS'nin ICAO (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) gibi küresel karbon düzenlemeleriyle daha entegre hale getirilmesi de sistemin etkinliğini artıracaktır.

Karbon emisyonlarının azaltılması açısından kısa mesafeli uçuşlara alternatif ulaşım modellerinin güçlendirilmesi de önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Özellikle 500 kilometre altındaki uçuşlar, havacılık sektöründeki karbon salınımının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu uçuşların yerine yüksek hızlı tren hatları, şehirlerarası otobüs taşımacılığı ve diğer düşük karbonlu ulaşım modellerinin geliştirilmesi teşvik edilmelidir. Avrupa'nın bazı ülkelerinde belirli kısa mesafeli uçuşların yasaklanarak yerine yüksek hızlı tren hatlarının teşvik edilmesi gibi uygulamalar, diğer bölgelerde de yaygınlaştırılmalı ve karbon salınımını azaltma stratejileri kapsamında değerlendirilmelidir.

Son olarak, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik politikaların etkinliğini artırmak için yolcu farkındalığının artırılması ve karbon dengeleme programlarının teşvik edilmesi gerekmektedir. Yolcuların bireysel karbon ayak izlerini azaltmalarını sağlamak için uçuş bazlı karbon hesaplama sistemleri yaygınlaştırılmalı ve sürdürülebilir seyahat seçenekleri sunulmalıdır. Havacılık sektörünün çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşabilmesi için karbon fiyatlandırma mekanizmalarının sıkılaştırılması, düşük emisyonlu teknolojilere yatırımın artırılması ve küresel iş birliklerinin güçlendirilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, daha kapsamlı ve çok boyutlu bir politika çerçevesi benimsenerek havacılık sektörünün karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik uzun vadeli çözümler oluşturulmalıdır.

Genel olarak, havacılık sektöründe karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik politikalar çok boyutlu ve bütüncül bir yaklaşım çerçevesinde ele alınmalıdır. Düşük karbon teknolojilerinin yaygınlaştırılması, sürdürülebilir yakıt kullanımının teşvik edilmesi, ETS'nin kapsamının genişletilmesi, alternatif ulaşım modellerinin desteklenmesi ve karbon farkındalığının artırılması, havacılık sektöründe uzun vadeli sürdürülebilirlik

hedeflerine ulaşılmasını sağlayacak temel politika öncelikleri olarak öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda, uluslararası iş birliklerinin artırılması ve karbon düzenlemelerinin küresel ölçekte daha etkin hale getirilmesi gerekmektedir.

Gelecek çalışmalar, havacılık sektöründe karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik politika araçlarının etkinliğini daha kapsamlı bir çerçevede ele almalıdır. Özellikle AB ETS'nin uluslararası uçuşları kapsayacak şekilde genişletilmesinin etkileri ve bu sistemin ICAO tarafından geliştirilen CORSIA mekanizması ile entegrasyonu üzerine ileri düzey ekonometrik analizler gerçekleştirilmelidir. Sürdürülebilir havacılık yakıtlarının kullanımının karbon emisyonları ve operasyonel maliyetler üzerindeki etkileri detaylandırılmalı, düşük karbonlu uçak teknolojilerine geçişi teşvik eden finansal ve düzenleyici mekanizmaların etkinliği değerlendirilmelidir. Ayrıca, kısa mesafeli uçuşlara alternatif olarak yüksek hızlı tren gibi düşük karbonlu ulaşım seçeneklerinin çevresel ve ekonomik boyutları analiz edilmeli, havayolu yolcularının karbon emisyonlarına yönelik farkındalığını artırmayı hedefleyen politika araçlarının etkinliği üzerine deneysel ve ampirik çalışmalar yapılmalıdır. Son olarak, farklı karbon fiyatlandırma mekanizmalarının uzun vadeli etkilerini değerlendiren yapısal modelleme ve simülasyon çalışmaları geliştirilerek, sektörün sürdürülebilir dönüşümüne katkı sağlayacak politika önerileri oluşturulmalıdır.

KAYNAKÇA

- Abrell, J., Rausch, S., & Yonezawa, H. (2019). Higher price, lower costs? Minimum prices in the EU emissions trading scheme. *Scandinavian Journal of Economics*, 121(2), 446-481. <https://doi.org/10.1111/sjoe.12279>
- Acheampong, A. O. (2018). Economic growth, CO₂ emissions, and energy consumption: What causes what and where? *Energy Economics*, 74, 677-692. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.07.022>
- Ajayi, T., Gomes, J. S., & Bera, A. (2019). A review of CO₂ storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring, and capacity estimation approaches. *Petroleum Science*, 16, 1028-1063.
- Al-Mulali, U., Öztürk, İ., & Lean, H. H. (2015). The influence of economic growth, urbanization, trade openness, financial development, and renewable energy on pollution in Europe. *Natural Hazards*, 79(1), 621-644. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1865-9>
- Altınışık, İ., & Peker, H. S. (2011). Negatif dışsallıkların içselleştirilmesi açısından karbon ticareti. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2(4).
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T., & Zechmeister-Boltenstern, S. (2006). Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(2-3), 153-162.
- Anger, A. (2010). Including aviation in the European emissions trading scheme: Impacts on the industry, CO₂ emissions and macroeconomic activity in the EU. *Journal of Air Transport Management*, 16(2), 100-105. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2009.10.009>
- Anger, A., & Köhler, J. (2010). Including aviation emissions in the EU ETS: Much ado about nothing? A review. *Transport Policy*, 17(1), 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2009.10.010>
- Anger-Kraavi, A., & Köhler, J. (2013). Aviation and the EU emissions trading system. *Sustainable Aviation Futures*, 4, 109-130. [https://doi.org/10.1108/S2044-9941\(2013\)0000004005](https://doi.org/10.1108/S2044-9941(2013)0000004005)
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2009). CO₂ emissions, energy usage, and output in Central America. *Energy Policy*, 37(8), 3282-3286.
- Avalos, A. (2024). How connectivity technologies can unlock sustainability value. *The Wall Street Journal*. <https://deloitte.wsj.com/cfo/how-connectivity-technologies-can-unlock-sustainability-value-8c2d2f84>
- Azizi, S., Radfar, R., Ghatari, A. R., & Nikoomaram, H. (2024). Assessing the impact of energy efficiency and renewable energy on CO₂ emissions reduction: Empirical evidence from the power industry. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-20.
- Bala, G. (2011). Counteracting climate change via solar radiation management. *Current Science*, 101(11), 1418-1421.

- Bala, G., Caldeira, K., Wickett, M., Phillips, T. J., Lobell, D. B., Delire, C., & Mirin, A. (2007). Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(16), 6550-6555
- Baltagi, B. H. (2008). *Econometric analysis of panel data* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Banerjee, A., Dolado, J., & Mestre, R. (1998). Error-correction mechanism tests for cointegration in a single-equation framework. *Journal of Time Series Analysis*, 19(3), 267-283.
- Bataille, C. (2023). Decarbonizing steel and cement. *Columbia Energy Exchange Podcast*. Center on Global Energy Policy, Columbia University. Retrieved from <https://www.energypolicy.columbia.edu/decarbonizing-steel-and-cement/>
- Bauen, A., Harris, A., Sim, C., Gudde, N.; Prussi, M., Scarlat, N. (2022). CORSIA Lower Carbon Aviation Fuels: An Assessment of the Greenhouse Gas Emission Reduction Potential. *Appl. Sci.*, 12, 11818. <https://doi.org/10.3390/app122211818>
- Baumol, W.J., & Oates, W.E., (1988). The theory of environmental policy. Cambridge University Press, Cambridge Cambridgeshire ; New York.
- Bekkhush, N. B., & Van Hecke, K. (2008). The European Union Emission Trading Scheme. *Studia Diplomatica*, 61(1), 115–147. <http://www.jstor.org/stable/44839044>
- Ben Jebli, M., & Hadhri, W. (2018). The dynamic causal links between CO₂ emissions from transport, real GDP, energy use, and international tourism. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 25(6), 568-577.
- Binsuwadan, J. (2024). Transport sector emissions and environmental sustainability: Empirical evidence from GCC economies. *Sustainability*, 16(23), 10760. <https://doi.org/10.3390/su162310760>
- Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BM İDÇS). (1992). https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf
- Blackburne III, E. F., & Frank, M. W. (2007). Estimation of nonstationary heterogeneous panels. *The Stata Journal*, 7(2), 197-208.
- Blanc, É., & Winchester, N. (2013). The impact of the EU emissions trading system on air passenger arrivals in the Caribbean. *Journal of Travel Research*, 52(3), 353-363. <https://doi.org/10.1177/0047287512465960>
- Bolat, C. K., Soytaş, U., Akinoglu, B., & Nazlioglu, S. (2023). Is there a macroeconomic carbon rebound effect in EU ETS? *Energy Economics*, 125, 106879. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106879>
- Bonhomme, S., & Manresa, E. (2015). Grouped patterns of heterogeneity in panel data. *Econometrica*, 83(3), 1147–1184.
- Boucher, O. (2015). *Atmospheric aerosols* (pp. 9-24). Springer Netherlands.
- Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1980). The Lagrange multiplier test and its applications to model specification in econometrics. *Review of Economic Studies*, 47(1), 239-253. <https://doi.org/10.2307/2297111>

- Brink, C., Vollebergh, H. R. J., & van der Werf, E. (2016). Carbon pricing in the EU: Evaluation of different EU ETS reform options. *Energy Policy*, 97, 603-617. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.07.023>
- Brugnoli, A., Button, K., Martini, G., & Scotti, D. (2015). Economic factors affecting the registration of lower CO₂ emitting aircraft in Europe. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 38, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.05.001>
- Büyüklgaz, U. (2010). *Avrupa Birliği emisyon ticaret sistemi ve ekonomik ve çevresel etkileri* (Master's thesis, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Cameron, A. C., & Trivedi, P. K. (2005). *Microeconometrics: Methods and applications*. Cambridge University Press.
- Canadell, J. G., & Schulze, E. D. (2014). Global carbon emissions and the contribution of land use. *Nature Climate Change*, 4(2), 3-6. <https://doi.org/10.1038/nclimate2131>
- Cary, M., & Stephens, H. M. (2024). Economic, environmental, and technical gains from the Kyoto Protocol: Evidence from cement manufacturing. *Resources Policy*, 91, 104926.
- CEU (2000), Green Paper on greenhouse gas emissions trading within the European Union, Commission of the European Communities, Brussels, 8 March.2000, COM (2000) 87 final <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/41ab9f93-b438-41a6-b330-bb0491f6f2fd/language-en> (Erişim tarihi: 05.02.2025)
- Choi, I. (2001). Unit root tests for panel data. *Journal of International Money and Finance*, 20(2), 249-272.
- Climate change adaptation and green building. (2022). *University of Eastern Finland*. <https://erepo.uef.fi/bitstream/handle/123456789/28680/1669036632406552010.pdf?sequence=2>
- Clo, S. (2010). Grandfathering, auctioning and carbon leakage: Assessing the inconsistencies of the new ETS directive. *Energy Policy*, 38(5), 2420-2430. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.035>
- Coase, R. H. (2013). The problem of social cost. *The journal of Law and Economics*, 56(4), 837-877.
- Cramer, N. J. (2019). *Mitigating carbon dioxide emissions in the cement industry through carbon capture and storage*.
- Crawford, R. H. (2022). Greenhouse gas emissions of global construction industries. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1218, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
- Cui, Q., Li, Y., & Wei, Y. M. (2017). Exploring the impacts of EU ETS on the pollution abatement costs of European airlines: An application of network environmental production function. *Transport Policy*, 60, 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.09.013>

- Davin, E. L., & de Noblet-Ducoudré, N. (2010). Climatic impact of global-scale deforestation: Radiative versus nonradiative processes. *Journal of Climate*, 23(1), 97–112.
- De Gioannis, G., Muntoni, A., Poletti, A., Pomi, R., & Spiga, D. (2017). Energy recovery from one-and two-stage anaerobic digestion of food waste. *Waste Management*, 68, 595–602.
- Destek, M. A., & Sarkodie, S. A. (2019). Investigation of environmental Kuznets curve for ecological footprint: The role of energy and financial development. *Science of the Total Environment*, 650, 2483–2489. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.017>
- Dickinson, R. E., & Kennedy, P. (1992). Impacts on regional climate of Amazon deforestation. *Geophysical Research Letters*, 19(19), 1947–1950.
- Ditzen, J., & Bersvendsen, T. (2019). XTHST: Stata module to test slope homogeneity in large panels. *Statistical Software Components*.
- Doğan, E., & Aslan, A. (2017). Exploring the relationship among CO₂ emissions, real GDP, energy consumption, and tourism in the EU and candidate countries: Evidence from panel models robust to heterogeneity and cross-sectional dependence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.111>
- Dray, L., Evans, A., Reynolds, T., & Schäfer, A. (2010). Mitigation of aviation emissions of carbon dioxide: Analysis for Europe. *Transportation Research Record*, 2177(1), 17–26.
- Dumitrescu, E. I., & Hurlin, C. (2012). Testing for Granger non-causality in heterogeneous panels. *Economic Modelling*, 29(4), 1450–1460.
- EASA. (2022). European Aviation Environmental Report; EASA: Cologne, Germany
- EC. (2008). EU action against climate change-The EU Emissions Trading Scheme https://www.ab.gov.tr/files/ardb/evt/1_avrupa_birligi/1_6_raporlar/1_3_diger/envi ronment/eu_emmissions_trading_scheme.pdf (Erişim tarihi: 05.02.2025)
- EC. (2016). The EU Emissions Trading System (EU ETS). https://climate.ec.europa.eu/document/download/5dee0b48-a38f-4d10-bf1a-14d0c1d6febd_en?filename=factsheet_ets_en.pdf (Erişim tarihi: 11.03.2025)
- EC. (2017). Impact assesstment - Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council -amending Directive 2003/87/EC establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community in view of the implementation of a single global market-based measure to international aviation emissions. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017SC0031> (Erişim tarihi: 10.03.2025)
- EC. (2020a). Factsheet - The Transport and Mobility Sector. <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/867229/Factsheet%20-%20The%20Transport%20and%20Mobility%20Sector.pdf> (Erişim tarihi: 10.03.2025)
- EC. (2020b). Inception Impact Assesstment – Revision of the EU Emission Trading System Directive 2003/87/EC concerning aviation.

https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12494-EU-emissions-trading-system-updated-rules-for-aviation_en (Erişim tarihi: 10.03.2025)

- EC. (2021). European Climate Law. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119> (Erişim tarihi: 07.02.2025)
- Efthymiou, M., & Papatheodorou, A. (2019). EU emissions trading scheme in aviation: Policy analysis and suggestions. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117734>
- Eisen, M. B., & Brown, P. O. (2022). Rapid global phaseout of animal agriculture has the potential to stabilize greenhouse gas levels for 30 years and offset 68 percent of CO₂ emissions this century. *PLoS Climate*, 1(2), e0000010.
- Eroğlu, N. (2004). John R. Hicks' in Refah Ekonomisine Katkıları. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 19(1), 137-153.
- Fan, J., Wang, Y., Rosenfeld, D., & Liu, X. (2016). Review of aerosol–cloud interactions: Mechanisms, significance, and challenges. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73(11), 4221–4252.
- Flachsland, C., Pahle, M., Burtraw, D., Edenhofer, O., Elkerbout, M., Fischer, C., Tietjen, O., & Zetterberg, L. (2020). How to avoid history repeating itself: The case for an EU emissions trading system (EU ETS) price floor revisited. *Climate Policy*, 20(1), 133–142. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1682494>
- Garcia, M., & Berghout, N. (2019). Toward a common method of cost-review for carbon capture technologies in the industrial sector: Cement and iron and steel plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 87, 142–158.
- Georgatzi, V. V., Stamboulis, Y., & Vetsikas, A. (2020). Examining the determinants of CO₂ emissions caused by the transport sector: Empirical evidence from 12 European countries. *Economic Analysis and Policy*, 65, 11–20.
- Global Carbon Budget (2024) – with major processing by Our World in Data. “Annual CO₂ emissions – GCB” [dataset]. Global Carbon Project, “Global Carbon Budget” [original data].
- Gołasa, P., Wysokiński, M., Bieńkowska-Gołasa, W., Gradziuk, P., Golonko, M., Gradziuk, B., & Gromada, A. (2021). Sources of greenhouse gas emissions in agriculture, with particular emphasis on emissions from energy used. *Energies*, 14(13), 3784.
- Gössling, S., & Humpe, A. (2020). The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change. *Global Environmental Change*, 65, 102194. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102194>
- Granger, C. W. J. (1969). Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica*, 37(3), 424–438.
- Granger, C. W. J., & Newbold, P. (1974). Spurious regressions in econometrics. *Journal of Econometrics*, 2(2), 111–120.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353–377.

- Grote, M., Williams, I., & Preston, J. (2014). Direct carbon dioxide emissions from civil aircraft. *Atmospheric Environment*, 95, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.042>
- Guo, L., Ou, Z., Liu, Y., Ge, Z., Jin, H., Ou, G., & Jing, W. (2022). Technological innovations on direct carbon mitigation by ordered energy conversion and full resource utilization. *Carbon Neutrality*, 1(1), 4.
- Guo, X., Ning, C., Shen, Y., Yao, C., Chen, D., & Cheng, S. (2023). Projection of the co-reduced emissions of CO₂ and air pollutants from civil aviation in China. *Sustainability*, 15(9), 7082.
- Güldoğan, E. (2010). Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sisteminin Ekonomik ve Yönetimsel Sorunları. II. *Türkiye*, 16-18.
- Gündüz, H. İ. (2017). Testing for slope homogeneity in dynamic panels using the wild bootstrap test. *Ekonometri ve İstatistik Dergisi*, 26(1), 53–59.
- Hájek, M., Zimmermannová, J., Helman, K., & Roženský, L. (2019). Analysis of carbon tax efficiency in energy industries of selected EU countries. *Energy Policy*, 134, 110955. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110955>
- Hamdan, S., Jouini, O., Cheaitou, A., Jemai, Z., Alsyuf, I., & Bettayeb, M. (2019). Optimal air traffic flow management with carbon emissions considerations. In *World Congress on Global Optimization* (pp. 1078–1088). Springer International Publishing.
- Hassan, S. A., & Nosheen, M. (2018). The impact of air transportation on carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions in Pakistan: Evidence from ARDL modelling approach. *International Journal of Innovation and Economic Development*, 3(6), 7–32.
- Hassett, K. A., & Metcalf, G. E. (1993). Energy conservation investment: Do consumers discount the future correctly? *Energy Policy*, 21(6), 710–716.
- Hausman, J. A. (1978). Specification tests in econometrics. *Econometrica*, 46(6), 1251–1271.
- Heiaas, A. M. (2021). The EU ETS and aviation: Evaluating the effectiveness of the EU Emission Trading System in reducing emissions from air travel. *Review of Business and Economics Studies*, 9(1), 84–120. <https://doi.org/10.26794/2308-944X-2021-9-1-84-120>
- Heutel, G., Moreno-Cruz, J., & Ricke, K. (2015). Climate engineering economics. *Sustainable Technology eJournal*. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-RESOURCE-100815-095440>
- Honsberg, C., Bowden, S. G., Sellers, I. R., King, R. R., & Goodnick, S. M. (2022). Photovoltaic surfaces to reverse global warming. *arXiv preprint arXiv:2202.06745*.
- Howarth, R. W. (2015). Methane emissions and climatic warming risk from hydraulic fracturing and shale gas development: Implications for policy. *Energy and Emission Control Technologies*, 3, 45–54.
- Hsiao, C. (2014). *Analysis of panel data* (3rd ed.). Cambridge University Press.

- Hsiao, C., Pesaran, M., & Pick, A. (2007). Diagnostic tests of cross-section independence for nonlinear panel data models. *CESifo Working Paper Series*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.982629>
- ICAO. (2019). 2019 Environmental Report – Destination Green. [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20\(1\).pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20(1).pdf) (Erişim tarihi: 10.03.2025)
- ICAO. (2020). 2019 environmental report. <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/envrep2019.aspx>. (Erişim tarihi: 04.03.2025)
- ICAO. (2022). CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%20005%20-%20Sustainability%20Criteria%20-%20November%202022.pdf (Erişim tarihi: 04.03.2025)
- Im, K. S., Pesaran, M. H., & Shin, Y. (2003). Testing for unit roots in heterogeneous panels. *Journal of Econometrics*, 115(1), 53–74.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2005). *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. Prepared by Working Group III (B. Metz, O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, & L. A. Meyer, Eds.). Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate change 2007: Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, & L. A. Meyer, Eds.). Cambridge University Press. Retrieved from www.cambridge.org/9780521880091
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, H. Lee, & J. Romero, Eds.). IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- International Civil Aviation Organization. (2015). Global emissions and technology trends of commercial aviation. ICAO Environmental Workshop, Warsaw.

https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/2015-Warsaw/5_1_Global-Emissions-Tecnology.pdf (Erişim tarihi: 10.03.2025)

- International Energy Agency (IEA). (2021). *Global energy review 2021: Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021*. IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>
- International Monetary Fund (IMF). (2019). *The economics of climate change*. Retrieved from <https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/2019/12/pdf/fd1219.pdf>
- International Renewable Energy Agency (IRENA) & International Labour Organization (ILO). (2022). *Renewable energy and jobs: Annual review 2022*. Abu Dhabi and Geneva.
- Jackson, R. B., Sauniois, M., Bousquet, P., Canadell, J. G., Poulter, B., Stavert, A. R., ... & Tsuruta, A. (2020). Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environmental Research Letters*, 15(7), 071002.
- Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Cameron, M. A., & Frew, B. A. (2015). Low-cost solution to the grid reliability problem with 100% penetration of intermittent wind, water, and solar for all purposes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(49), 15060–15065.
- Johansen, S. (1991). Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in Gaussian vector autoregressive models. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 59(6), 1551–1580.
- John, A., McDonnell, M. T., & Keller, H. M. (2013). Shifting demand: From the economic imperative of energy efficiency to business models that engage and empower consumers. In *Energy Efficiency* (pp. 445–470). Academic Press.
- Jovanovic, M., & Vracarevic, B. (2016). Challenges ahead: Mitigating air transport carbon emissions. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(5), 1975–1984.
- Junior, H. D. S. Q., de Souza Celestino, M. A., de Souza, C. F. F., Falcao, V. A., & de Castro Camioto, F. (2024). CO₂ emissions in air transport: A comparative study using data envelopment analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2678(5), 872–883.
- Kargı, V., & Yüksel, C. (2010). Çevresel dışsallıklarda kamu ekonomisi çözümleri. *Maliye Dergisi*, 159, 183-202.
- Kırıkkaleli, D. (2020). New insights into an old issue: Exploring the nexus between economic growth and CO₂ emissions in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(32), 40777–40786.
- Kito, M., Nagashima, F., Kagawa, S., & Nansai, K. (2020). Drivers of CO₂ emissions in international aviation: The case of Japan. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104036.
- Lawrence, D., & Vandecar, K. (2015). Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nature Climate Change*, 5(1), 27–36.
- Leeson, D., Mac Dowell, N., Shah, N., Petit, C., & Fennell, P. S. (2017). A techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS)

applied to the iron and steel, cement, oil refining, and pulp and paper industries, as well as other high-purity sources. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 61, 71–84.

- Levin, A., Lin, C. F., & Chu, C. S. J. (2002). Unit root tests in panel data: Asymptotic and finite-sample properties. *Journal of Econometrics*, 108(1), 1–24.
- Liddle, B., & Lung, S. (2013). The long-run causal relationship between transport energy consumption and GDP: Evidence from heterogeneous panel methods robust to cross-sectional dependence. *Economics Letters*, 121(3), 524–527.
- Lo, P. L., Martini, G., Porta, F., & Scotti, D. (2020). The determinants of CO₂ emissions of air transport passenger traffic: An analysis of Lombardy (Italy). *Transport Policy*, 91, 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.11.010>
- Loo, B. P., & Banister, D. (2016). Decoupling transport from economic growth: Extending the debate to include environmental and social externalities. *Journal of Transport Geography*, 57, 134–144.
- Löfgren, Å., Wråke, M., Hagberg, T., & Roth, S. (2014). Why the EU ETS needs reforming: An empirical analysis of the impact on company investments. *Climate Policy*, 14(5), 537–558. <https://doi.org/10.1080/14693062.2014.864800>
- Luo, X., Dong, L., Dou, Y., Li, Y., Liu, K., Ren, J., ... & Mai, X. (2017). Factor decomposition analysis and causal mechanism investigation on urban transport CO₂ emissions: Comparative study on Shanghai and Tokyo. *Energy Policy*, 107, 658–668.
- Madaleno, M., Robaina, M., Meireles, M., & Silva, P. (2024). EU ETS Impact on Companies Performance in Portugal: A Sector Analysis. İçinde, 2024 20th International Conference on the European Energy Market (EEM) (ss. 1-6). IEEE.
- Maddala, G. S., & Wu, S. (1999). A comparative study of unit root tests with panel data and a new simple test. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61(S1), 631–652.
- Mai, D. T. T. (2021). Revising the EU ETS and CORSIA in times of the COVID-19 pandemic: challenges for reducing global aviation emissions. *Climate Policy*, 21(10), 1357-1367.
- Markandya, A., & Wilkinson, P. (2007). Electricity generation and health. *The Lancet*, 370(9591), 979–990.
- Markham, F., Young, M., Reis, A., & Higham, J. (2018). Does carbon pricing reduce air travel? Evidence from the Australian ‘Clean Energy Future’ policy, July 2012 to June 2014. *Journal of Transport Geography*, 70, 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.06.008>
- Meltzer, J. P. (2012). Regulating CO₂ emissions from aviation in the EU. *American Society of International Law*.
- Mendes, L. M. Z., & Santos, G. (2008). Using economic instruments to address emissions from air transport in the European Union. *Environment and Planning A*, 40(1), 189–209. <https://doi.org/10.1068/a39255md>

- Mensah, I. A., Sun, M., Gao, C., Omari-Sasu, A. Y., Zhu, D., Ampimah, B. C., & Quarcoo, A. (2019). Analysis on the nexus of economic growth, fossil fuel energy consumption, CO₂ emissions, and oil price in Africa based on a PMG panel ARDL approach. *Journal of Cleaner Production*, 228, 161–174. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.281>
- Montzka, S., Dlugokencky, E., & Butler, J. (2011). Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature*, 476, 43–50.
- Morrell, P. (2009). The potential for European aviation CO₂ emissions reduction through the use of larger jet aircraft. *Journal of Air Transport Management*, 15(4), 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2008.09.021>
- Myhre, G., Shindell, D., & Bréon, F. M. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(14), 667–670. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50100>
- Narayan, P. K., & Narayan, S. (2010). Carbon dioxide emissions and economic growth: Panel data evidence from developing countries. *Energy Policy*, 38(12), 661–666. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.005>
- NASA. (2024). *Global climate change: Vital signs of the planet*. Retrieved from <https://climate.nasa.gov>
- Nelson, C. R., & Plosser, C. I. (1982). Trends and random walks in macroeconomic time series: Some evidence and implications. *Journal of Monetary Economics*, 10(2), 139–162.
- Noble, I., & Scholes, R. J. (2001). Sinks and the Kyoto protocol. *Climate policy*, 1(1), 5–25.
- Odugbesan, J. A., & Rjoub, H. (2020). Relationship among economic growth, energy consumption, CO₂ emission, and urbanization: Evidence from MINT countries. *SAGE Open*, 10(2), 1–15. <https://doi.org/10.1177/2158244020914648>
- Oesingmann, K. (2022). The effect of the European emissions trading system (EU ETS) on aviation demand: An empirical comparison with the impact of ticket taxes. *Energy Policy*, 160, 112657. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112657>
- Olçum, G. A. (2012). *Market-Based Environmental Regulation in the Post-Kyoto World: Analysis of Turkey's Action Plan in General Equilibrium Framework* (Doctoral dissertation, Bilkent Üniversitesi (Turkey)).
- Olsthoorn, X. (2001). Carbon dioxide emissions from international aviation: 1950–2050. *Journal of Air Transport Management*, 7(2), 87–93. [https://doi.org/10.1016/S0969-6997\(00\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0969-6997(00)00031-4)
- Omri, A. (2013). CO₂ emissions, energy consumption and economic growth nexus in MENA countries: Evidence from simultaneous equations models. *Energy Economics*, 40, 657–664. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.09.003>
- Osobajo, O. A., Otitoju, A., Otitoju, M. A., & Oke, A. (2020). The impact of energy consumption and economic growth on carbon dioxide emissions. *Sustainability*, 12(19), 7965.

- Ott, H. E. (1998). The Kyoto protocol: unfinished business. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 40(6), 16-20.
- Özcan, B. (2013). The nexus between carbon emissions, energy consumption, and economic growth in Middle East countries: A panel data analysis. *Energy Policy*, 62, 1138–1147. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.016>
- Özdan, S. (2014). Kyoto protokolü kapsamında emisyon ticareti, karbon borsaları ve Türkiye'ye yansımaları. *Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Bankacılık ve Sigortacılık Enstitüsü, İstanbul*.
- Öztürk, I., Aslan, A., & Kalyoncu, H. (2010). Energy consumption and economic growth relationship: Evidence from panel data for low and middle income countries. *Energy Policy*, 38(8), 4422–4428. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.071>
- Pachauri, R. K., & Meyer, L. (2014). Climate change 2014: Synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Pamukçu, K. (2007). Küresel emisyon ticareti sistemi için bir model: Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Programı. *İstanbul Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi*, (37), 17-42.
- Pao, H.-T., & Tsai, C.-M. (2010). CO₂ emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries. *Energy Policy*, 38(12), 7850–7860. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.08.045>
- Park, S., & Lee, Y. (2011). Regional model of EKC for air pollution: Evidence from the Republic of Korea. *Energy Policy*, 39(9), 5840–5849. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.028>
- Pedroni, P. (1999). Critical values for cointegration tests in heterogeneous panels with multiple regressors. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61(S1), 653–670.
- Peeters, P., Higham, J., Kutzner, D., Cohen, S., & Gössling, S. (2016). Are technology myths stalling aviation climate policy? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 44, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.02.004>
- Pesaran, M. H. (2004). General diagnostic tests for cross-section dependence in panels. *CESifo Working Paper, No. 1229*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.572504>
- Pesaran, M. H. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265–312.
- Pesaran, M. H., & Yamagata, T. (2008). Testing slope homogeneity in large panels. *Journal of Econometrics*, 142(1), 50–93. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2007.05.010>
- Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. P. (1999). Pooled mean group estimation of dynamic heterogeneous panels. *Journal of the American Statistical Association*, 94(446), 621–634.
- Plaza, M. G., Martínez, S., & Rubiera, F. (2020). CO₂ capture, use, and storage in the cement industry: State of the art and expectations. *Energies*, 13(21), 5692.
- Pratama, G. G. (2024). Enter the CORSIA First Phase: Aeroplane Operators Embark on Offsetting Their Emissions for the First Time, Development Trajectory, and What Lies Ahead for the Scheme. *Chinese Journal of Environmental Law*, 8(2), 271-283.

- Prevedello, J. A., Winck, G. R., Weber, M. M., Nichols, E., & Sinervo, B. (2019). Impacts of forestation and deforestation on local temperature across the globe. *PLoS One*, 14(3), e0213368.
- Pustelnik, P. (2016). European struggles and American resistance: Inclusion of aviation into the EU ETS [Doctoral thesis, Cardiff University].
- Rasool, M. H., Ahmad, M., & Ayoub, M. (2023). Selecting geological formations for CO₂ storage: A comparative rating system. *Sustainability*, 15(8), 6599.
- Regmi, K., & Rehman, A. (2021). Do carbon emissions impact Nepal's population growth, energy utilization, and economic progress? Evidence from long- and short-run analyses. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(39), 55465–55475.
- Reichle, D. (2020). *Anthropogenic alterations to the global carbon cycle and climate change*. Elsevier.
- Reynolds, J. (2011). The regulation of climate engineering. *Law, Innovation and Technology*, 3(1), 113–136.
- Rotaris, L., Giansoldati, M., & Scorrano, M. (2020). Are air travellers willing to pay for reducing or offsetting carbon emissions? Evidence from Italy. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 142, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.10.014>
- Rounce, D. R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., ... & McNabb, R. W. (2023). Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. *Science*, 379(6627), 78–83.
- Salari, M., Javid, R. J., & Noghanibehambari, H. (2021). The nexus between CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth in the U.S. *Economic Analysis and Policy*, 69, 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2020.12.007>
- Saleem, H., Jiandong, W., Zaman, K., Elashkar, E. E., & Shoukry, A. M. (2018). The impact of air-railways transportation, energy demand, bilateral aid flows, and population density on environmental degradation: Evidence from a panel of next-11 countries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 152–168.
- Schäfer, A., Evans, A., & Reynolds, T. (2016). Costs of mitigating CO₂ emissions from passenger aircraft. *Nature Climate Change*, 6, 412–417. <https://doi.org/10.1038/nclimate2865>
- Scheelhaase, J., Gelhausen, M., & Maertens, S. (2021). How would ambitious CO₂ prices affect air transport? *Transportation Research Procedia*, 52, 428–436.
- Scheelhaase, J., Grimme, W., & Schaefer, M. (2010). The inclusion of aviation into the EU emissions trading scheme—Impacts on competition between European and non-European network airlines. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(1), 14–25.
- Scheelhaase, J., Maertens, S., Grimme, W., & Jung, M. (2018). EU ETS versus CORSIA—A critical assessment of two approaches to limit air transport's CO₂ emissions by market-based measures. *Journal of Air Transport Management*, 67, 55–62.

- Scheelhaase, J., Schaefer, M., Grimme, W., & Maertens, S. (2012). Cost impacts of the inclusion of air transport into the European emissions trading scheme in the time period 2012–2020. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 12(4).
- Shahbaz, M., & Lean, H. H. (2012). The dynamics of electricity consumption and economic growth: A revisit study of their causality in Pakistan. *Energy*, 39, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.048>
- Shahbaz, M., Loganathan, N., Sbia, R., & Afza, T. (2015). The effect of urbanization, affluence and trade openness on energy consumption: A time series analysis in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 683–693.
- Sharma, A., Jakhar, S. K., & Choi, T. M. (2021). Would CORSIA implementation bring carbon-neutral growth in aviation? A case of US full-service carriers. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 97, 102839. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102839>
- Sheikh, A., & Hassan, O. I. (2023). Impact of economic growth, energy use and research and development expenditure on carbon emissions: An analysis of 29 OECD countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 13(1), 454–464. <https://doi.org/10.32479/ijee.13647>
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., ... & Smith, J. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 789–813.
- Soeder, D. J. (2020). Fossil fuels and climate change. In *Fracking and the environment* (pp. 155–185). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59121-2_9
- Sovacool, B. K., Griffiths, S., Kim, J., & Bazilian, M. (2021). Climate change and industrial F-gases: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems, and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110759. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110759>
- Soytaş, U., Sarı, R., & Ewing, B. T. (2007). Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States. *Ecological Economics*, 62(3–4), 482–489. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.009>
- Ssali, M. W., Du, J., Hongo, D. O., & Mensah, I. A. (2018). Impact of economic growth, energy use, and population growth on carbon emissions in Sub-Saharan Africa. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 7(5), 178–192. <https://doi.org/10.17265/2162-5263/2018.05.002>
- Stamatiou, P., & Dritsakis, N. (2019). Causality among CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth in Italy. *International Journal of Computational Economics and Econometrics*, 9(4), 268–286.
- Stern, D. I., & Kaufmann, R. K. (2014). Anthropogenic and natural causes of climate change. *Climatic Change*, 122(2), 257–269. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1007-x>

- Sugiyama, M., Akashi, O., Wada, K., Kanudia, A., Li, J., & Weyant, J. (2014). Energy efficiency potentials for global climate change mitigation. *Climatic Change*, 123, 397–411.
- Suhardono, S., Fitria, L., Suryawan, I. W. K., Septiariva, I. Y., Mulyana, R., Sari, M. M., ... & Prayogo, W. (2024). Human activities and forest fires in Indonesia: An analysis of the Bromo incident and implications for conservation tourism. *Trees, Forests and People*, 15, 100509.
- Sulik-Górecka, A., & Strojek-Filus, M. (n.d.). *Production engineering archives*.
- Talaei, A., Gemechu, E., & Kumar, A. (2020). Key factors affecting greenhouse gas emissions in the Canadian industrial sector: A decomposition analysis. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119026.
- Tarr, A. P., Smith, I. J., & Rodger, C. J. (2022). Carbon dioxide emissions from international air transport of people and freight: New Zealand as a case study. *Environmental Research Communications*, 4(7), 075012.
- Teame, G. T., & Habte, A. T. (2020). Economic growth and carbon dioxide emissions in East African countries: A pooled mean group approach. *International Journal of Business and Economics Research*, 9(4), 160–169.
- Terrenoire, E., Hauglustaine, D. A., Gasser, T., & Penanhoat, O. (2019). The contribution of carbon dioxide emissions from the aviation sector to future climate change. *Environmental Research Letters*, 14(8), 084019.
- Tian, H., Lu, C., Ciais, P., Michalak, A. M., Canadell, J. G., Saikawa, E., Huntzinger, D. N., et al. (2016). The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere. *Nature*, 531(7593), 225–228. <https://doi.org/10.1038/nature16946>
- Tuğcu, C. T., Öztürk, İ., & Aslan, A. (2012). Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth relationship revisited: Evidence from G7 countries. *Energy Economics*, 34(6), 1942–1950. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.08.021>
- Türkeş, M., Sümer, U. M., & Çetiner, G. Ç. (2000). Kyoto Protokolü Esneklik Mekanizmaları.
- UN. (1997). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change
- UN. (2025). What is the Kyoto Protocol? https://unfccc.int/kyoto_protocol (Erişim tarihi: 04.02.2025)
- UNDP. (2006). United Nations Development Programme, The Clean Development Mechanism: an Assessment of Progress, http://assets.mediaglobal.org/documents/UNDP_Environment_and_Energy_Group_Report_The_Clean_Development_Mechanism.pdf
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). The Paris Agreement. Retrieved from <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- Ürge-Vorsatz, D., & Herrero, S. T. (2012). Building synergies between climate change mitigation and energy poverty alleviation. *Energy Policy*, 49, 83–90.

- Ürge-Vorsatz, D., & Novikova, A. (2008). Potentials and costs of carbon dioxide mitigation in the world's buildings. *Energy Policy*, 36(2), 642–661.
- Ürge-Vorsatz, D., Cabeza, L. F., Serrano, S., Barreneche, C., & Petrichenko, K. (2015). Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 85–98.
- Ürge-Vorsatz, D., Khosla, R., Bernhardt, R., Chan, Y. C., Vérez, D., Hu, S., & Cabeza, L. F. (2020). Advances toward a net-zero global building sector. *Annual review of environment and resources*, 45(1), 227–269.
- Vasser, C. P. (2009). *The Kyoto Protocol: Economic assessments, implementation mechanisms and policy implications*, Nova Science Publishers, Inc.
- Vaughan, N. E., & Lenton, T. M. (2011). A review of climate geoengineering proposals. *Climatic Change*, 109(3), 745–790.
- Vespermann, J., & Wald, A. (2011). Much ado about nothing? An analysis of economic impacts and ecologic effects of the EU-emission trading scheme in the aviation industry. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(10), 1066–1076. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.005>
- Wang, S., Li, Q., Fang, C., & Zhou, C. (2016). The relationship between economic growth, energy consumption, and CO₂ emissions: Empirical evidence from China. *Science of the Total Environment*, 542, 360–371. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.027>
- Wang, Z., Xue, L., Liu, J., Ding, K., Lou, S., Ding, A., ... & Huang, X. (2022). Roles of atmospheric aerosols in extreme meteorological events: A systematic review. *Current Pollution Reports*, 8(2), 177–188.
- Westerlund, J. (2007). Testing for error correction in panel data. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 69(6), 709–748.
- Winchester, N. (2019). A win-win solution to abate aviation CO₂ emissions. *Journal of Air Transport Management*, 80, 101692.
- Wolfram, C., Shelef, O., & Gertler, P. (2012). How will energy demand develop in the developing world? *Journal of Economic Perspectives*, 26(1), 119–138.
- World Economic Forum. (2024, April). *Which technologies will enable a cleaner steel industry?* <https://www.weforum.org/stories/2024/04/technologies-cleaner-steel-industry/>
- Xie, L., Majumder, S., Huang, T., Zhang, Q., Chang, P., Hill, D. J., & Shahidehpour, M. (2024). The role of electric grid research in addressing climate change. *Nature Climate Change*, 14(9), 909–915.
- Yaduvanshi, A., Nkemelang, T., Bendapudi, R., & New, M. (2021). Temperature and rainfall extremes change under current and future global warming levels across Indian climate zones. *Weather and Climate Extremes*, 31, 100291.
- Yan, H., Shen, Q., Fan, L. C., Wang, Y., & Zhang, L. (2010). Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. *Building and Environment*, 45(4), 949–955.

- Yeoh, P. (2008). Is carbon finance the answer to climate control?. *International Journal of Law and Management*, 50(4), 189-206.
- Zhang, J., Zhang, S., Wu, R., Duan, M., Zhang, D., Wu, Y., & Hao, J. (2021). The new CORSIA baseline has limited motivation to promote the green recovery of global aviation. *Environmental Pollution*, 289, 117833.
- Zhang, Y. J., & Wei, Y. M. (2010). An overview of current research on EU ETS: Evidence from its operating mechanism and economic effect. *Applied Energy*, 87(6), 1804–1814. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.12.019>
- Zhang, Y., & Wang, K. (2024). Mitigation effect of the European Union Emission Trading System on aviation emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 130, 104186. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104186>
- Zou, B., Elke, M., Hansen, M., & Kafle, N. (2014). Evaluating air carrier fuel efficiency in the US airline industry. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 59, 306–330. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.12.003>