

TÜRKİYE CUMHURİYETİ

ANKARA ÜNİVERSİTESİ

SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ İŞLETME ANABİLİM DALI

**VADELİ KARBON KONTRAT FİYATLARININ ANALİZİ VE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

OZAN NADİRGİL

ANKARA, 2024

TÜRKİYE CUMHURİYETİ

ANKARA ÜNİVERSİTESİ

SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ İŞLETME ANABİLİM DALI

**VADELİ KARBON KONTRAT FİYATLARININ ANALİZİ VE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

OZAN NADİRGİL

TEZ DANIŞMANI:

Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ

ANKARA, 2024

TÜRKİYE CUMHURİYETİ

ANKARA ÜNİVERSİTESİ

SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ İŞLETME ANABİLİM DALI

**VADELİ KARBON KONTRAT FİYATLARININ ANALİZİ VE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ

Tez Jürisi Üyeleri

Adı ve Soyadı İmzası

Tez Savunma Tarihi: 09 Ocak 2024

T.C.

ANKARA ÜNİVERSİTESİ

Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Prof. Dr. Fazıl Gökgöz danışmanlığında hazırladığım “Vadeli Karbon Kontrat Fiyatlarının Analizi ve Değerlendirilmesi (Ankara, 2024)” adlı doktora tezimdeki bütün bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak toplanıp sunulduğunu, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

Tarih: 01.13.2024

Ozan Nadirgil

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	ii
TABLolar LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
KISALTMALAR	vi
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE EMİSYON TİCARETİ

1.1. İklim Değişikliği Kavramı ve Nedenleri	7
1.2. İklim Değişikliğinin Etkileri	10
1.3. Sera Gazı Emisyonlarının Bölgesel ve Sektörel Dağılımı	18
1.4. İklim Değişikliği ile İlgili Önemli Sözleşmeler ve Konferanslar	23

İKİNCİ BÖLÜM İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İLE MÜCADELE

2.1. İklim Politikası Araçları	31
2.1. Piyasa Tabanlı Olmayan Araçlar.....	32
2.2. Piyasa Tabanlı Araçlar	34
2.3. Emisyon Ticareti Sistemleri.....	38
2.4. Dünyada Emisyon Ticareti	45

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM AB ETS

3.1. AB ETS'nin Oluşumu	56
-------------------------------	----

3.2.	AB ETS'in Dönemleri	60
3.3.	AB ETS'in Sınırlamaları ve Çözüm Önerileri.....	77
3.4.	AB ETS Karbon Fiyat Mekanizması	81
3.5.	AB ETS Piyasa İstikrar Mekanizması (EU ETS MSM)	84

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM KARBON FİYATINI BELİRLEYEN FAKTÖRLERİN

ANALİZİ

4.1.	Uygulamanın Önemi, Amacı, Kapsamı ve Kısıtları	88
4.2.	Literatür İnceleme	93
4.3.	Veri Seti	96
4.3.	Araştırmanın Yöntemi	100
4.3.	Araştırmanın Birinci Kısım Bulguları	117
4.3.	Araştırmanın İkinci Kısım Bulguları	122
4.4.	Modellerin Karşılaştırılması.....	125

BEŞİNCİ BÖLÜM YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ KULLANARAK KARBON

FİYATI TAHMİN MODELLEMESİ

5.1.	Uygulamanın Önemi, Amacı, Kapsamı ve Kısıtları	128
5.2.	Literatür İnceleme	129
5.3.	Veri Seti	131
5.4.	Yöntem.....	131
5.4.	CEEMDAN Sonuçları	140

5.5.	Permutasyon Entropi Sonuçları	141
5.6.	Değişken Mod Ayırıştırması (VMD) Sonuçları.....	142
5.7.	Genetik Algoritma Optimizasyonu	143
5.8.	Değerlendirme Metrikleri	145
5.9.	Tekli Tahmin Modellerinin Karşılaştırılması.....	145
5.10.	CEEMDAN Uygulanan Modellerin Karşılaştırılması	146
5.11.	Çift Ayırıştırma Uygulanan Bütünleşik Modellerinin Karşılaştırılması ...	147
SONUÇLAR.....		149
KAYNAKLAR		156
EKLER.....		168
EK 1:	Değişkenlerin Lasso ve EN Grafikleri	168
EK 2:	Sektörlerin Lasso ve En Grafikleri	168
EK 3:	Tekli Modellerin Tahmin Performans Grafikleri.....	169
EK 4:	Tek Ayırıştırılmalı Modellerin Performansı	170
EK 5:	Çift Ayırıştırılmalı Modellerin Performans	171
ÖZET		172
ABSTRACT		173

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1 İklim Politikası Araçları	32
Tablo 2 Seçilen Değişkenler	98
Tablo 3 Seçilen Sektörler	99
Tablo 4 Değişkenlerin İstatistiksel Özellikleri	101
Tablo 5 Sektörel Endekslerin İstatistiksel Özellikleri	102
Tablo 6 Faktör Önem Puanları	119
Tablo 7 Sektörel Faktör Seçim Puanları.....	120
Tablo 8 Modellerin Performans Metrikleri.....	121
Tablo 9 RMSE'ye göre Sıralı En Önemli Faktörler	122
Tablo 10 Granger Testi Sonuçları	123
Tablo 11 Faktör Önem Puanları	125
Tablo 12 Modellerin Karşılaştırması	126
Tablo 13 MAPE Değerlerine Göre En Önemli Sektörler.....	127
Tablo 15 Tekli Modellerin Performansı.....	145
Tablo 16 Modellerin CEEMDAN ile Performansı.....	147
Tablo17 Çift Mod Ayırıştırılmalı Hibrit Modellerin Performansı	148

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1 Enerji Üretimi ve Endüstri Kaynaklı Sera Gazı Salınımı 1900-2022	19
Şekil 2 2015-2022 Yılları Arası Yakıt Kaynaklı Emisyon Değerleri.....	20
Şekil 3 2019-2023 Yılları Arası Küresel Toplam Emisyonun Sektörel Dağılımı. 21	
Şekil 4 AB Ülkeleri Emisyon Değişimi 2019-2021	22
Şekil 5 AB Sektörlere Göre Sera Gazı Salımı ve GYİH	23
Şekil 6 Emisyon Ticareti	41
Şekil 7 Karbon Ticareti	83
Şekil 8 EUA Tarihsel Fiyatı	100
Şekil 9 Yöntem Çerçevesi	103
Şekil 10 GRU Hücre Yapısı.....	134
Şekil 11 Genetik Algoritma Şeması.....	136
Şekil 12 Tek Ayrıştırırmalı Model Diyagramı	138
Şekil 13 Çift Ayrıştırırmalı Hibrit Model Diyagramı	139
Şekil 14 IMF Diyagramları	140

KISALTMALAR

AB	Avrupa Birliği
AEA	Avrupa Ekonomik Alanı
ANN	Yapay Sinir Ağları
ARCH	Otoregresif Koşullu Değişen Varyans
ARD	Ortalama Mutlak Göreceli Sapma
ARIMA	Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama
BM	Birleşmiş Milletler
CDM	Temiz Kalkınma Mekanizması
CEEMD	Tamamlayıcı Bütünleşik Deneysel Mod Ayrışımı
CEEMDAN	Uyarlanabilir Gürültüyle Tam Bütünleşik Deneysel Mod Ayrışımı
CO₂	Karbondiyoksit
CO-IMF	İşbirlikçi İçsel Mod Fonksiyonu
COP	Taraflar Konferansı
CSS	Karbon Yakalama Ve Depolama
DMÖ	Dünya Meteoroloji Örgütü
DT	Karar Ağaçları
EEL	Enerji Verimliliği Etiketleri
EEMD	Bütünleşik Deneysel Mod Ayrışımı
EMD	Ampirik Mod Ayrıştırması
EN	Elastik Net
ET	Ekstra Ağaçlar
ET	Ulusal Emisyon Ticareti
ETS	Emisyon Ticaret Sistemi
EU ETS	Ab Emisyon Ticareti Sistemi
EUA	AB Emisyon İzin Sertifikası
GA	Genetik Algoritma
GARCH	Genelleştirilmiş Otoregresif Koşullu Değişen Varyans
GHG	Sera Gazları
GRU	Geçitli Tekrarlayan Birim Sinir Ağı
GSYİH	Gayrisafi Milli Hasıla
ICE	Intercontinental Exchange
IMF	İçsel Mod Fonksiyonu
IPCC	İklim Değişikliği Üzerine Bilimsel Danışma Paneli
JI	Ortak Uygulama
KET	Kaliforniya Emisyon Ticareti Sistemi
K-ETS	Güney Kore Emisyon Ticareti Sistemi
KNN	K-En Yakın Komşu
LSSVM	Optimize Edilmiş En Küçük Kareler Destek Vektör Makinesi
LSTM	Uzun Kısa Vadeli Hafıza
MAE	Ortalama Mutlak Hata
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata
MAXE	Maksimum Hata
MLP	Çok Katmanlı Algılayıcı
MSM	Piyasa İstikrar Mekanizması

MSR	Piyasa İstikrar Rezervi
NAP	Ulusal İzin Programı
NEEF	Ulusal Enerji Verimliliği Fonu
PE	Permütasyon Entropisi
PSO	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
PTA	Piyasa Tabanlı Araçlar
RBF	Radyal Temel Fonksiyonu
REC	Yenilenebilir Enerji Sertifikaları
RF	Rastlantısal Orman
RGGI	Bölgesel Yeşil Ev Gazı İnisiyatifi
RMSE	Ortalama Hatanın Karekökü
RNN	Tekrarlayan Sinir Ağları
SHAP	Shapley
SVM	Destek Vektör Makinası
UNFCCC	İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
VAR	Vektör Oto Regresyon
VMD	Değişken Mod Ayırıştırma
WCI	Batı İklim İttifakı
WPD	Dalgacık Paket Ayırıştırması

GİRİŞ

Modern çağın en önemli, karmaşık ve çözümü en zor sorunlarından biri olan iklim değişikliği atmosferdeki sera gazlarının artması nedeniyle dünya genelinde ortalama sıcaklıkların artması, deniz seviyelerinin yükselmesi, beklenmedik doğa olaylarının gerçekleşmesi ve iklim desenlerindeki kalıcı değişiklikler olarak tanımlanabilir. Sera gazları (GHG), insan faaliyetleri ve doğal süreçler sonucu atmosfere salınmaktadır ve bu gazlar, güneş ışınlarını yeryüzüne ileten ve yeryüzünden yayılan ısıyı tutan bir örtü görevi görmektedir. Dolayısı ile sera gazı seviyelerinin artması atmosferdeki sıcaklığın da artmasına neden olmaktadır.

İklim değişikliğinin etkileri hayatın her alanında hissedildiği gibi, işletmeler de iklim değişikliğinin direk ve dolaylı etkilerini giderek artan şekilde hissetmektedir. Bu bağlamda işletmelerin iklim değişikliğinin olumlu ya da olumsuz etkilerine maruz kalma dereceleri, işletmenin coğrafi konumu, içinde bulunduğu sektör ve yapmış olduğu faaliyetlere bağlı olarak değişmektedir. İklim değişikliği, işletmeler için fırsatlar ve tehditler sunmaktadır. İşletmeler de bu tehdit ve fırsatlara uyum sağlamak ve sürdürülebilirliklerini artırmak için özel stratejiler geliştirmelidir.

İklim değişikliği ile ilgili ilk uluslararası görüşmeler ve anlaşmalar, 1970'lerin sonlarına doğru ortaya çıktı. 1988 yılında Birleşmiş Milletler (BM), Dünya Meteoroloji Örgütü (DMÖ) ile ortaklaşa iklim değişikliği konusundaki bilimsel çalışmaları koordine etmek amacıyla, İklim Değişikliği Üzerine Bilimsel Danışma Panelini (IPCC) kurdu. Akabinde, İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC), 1992 yılında Birleşmiş Milletler (BM)

tarafından onaylanarak, iklim değişikliği ile m¼cadele alanında ilk k¼resel anlaşma oldu. UNFCCC'yi takiben 11 Aralık 1997 tarihinde kabul edilen Kyoto Protokol¼ ile gelişmiş taraf¼lkelerin insan kaynaklı CO2 eşdeğer sera gazı salınımlarını, 2008-2012 d¼neminde, 1990'daki seviyelerinin en az %5 altına indirmesine ve 2013-2020 yılları arasındaki ikinci d¼nemde ise 1990 seviyesinin %18 altına indirmeyi taahh¼t etmişlerdir.

2015 yılında kabul edilen Paris Anlaşması sonucu neredeyse t¼m d¼nya¼lkelerinin katılımı ile gelişmekte olan¼lkelere mevcut kapasitelerine g¼re azaltım yapmaları i¼in hedefler verilmiş ve geliřmiř¼lkelerden de daha fazla azaltım yapmaları, 2050 sonrası i¼in ise sıfır emisyon (carbon neutral) konumuna gelmeleri taahh¼d¼ alınmıştır.

Bu gelişmeler s¼rerken, AB Emisyon Ticareti Sistemi (EU Emissions Trading System, EU ETS) ser¼veni 2000 yılında, diğer mevcut programları tamamlamaya ve Kyoto Protokol¼ tarafından belirlenen hedeflere ulaşmaya odaklanacak bir emisyon ticaret planı kurulması hakkında bir yeşil belgenin yayınlanmasıyla başladı. AB Komisyonu, 2003 yılında, 2003/87/ EC sayılı Emisyon Ticareti Direktifi ile izinlerin %95'inin ücretsiz olarak tahsis edileceği ve 2005'ten 2007'ye kadar s¼recek ilk faz sisteminin özelliklerini ortaya koydu. 2008'den 2012'ye kadar uzanan ve emisyon izinlerin %90'ının ücretsiz tahsis edildiği ikinci faz ise tam uygulama d¼nemi olarak adlandırıldı.

AB ETS Programı Avrupa Birliğini Kyoto hedeflerine ulaştırması beklenen uluslararası alanda uygulanan ilk emisyon ticareti sistemidir. AB ETS,¼st sınırın sistemdeki bir katılımcı tarafından salınabilecek toplam sera gazı miktarını ifade ettięi¼st sınır ve ticaret temelinde ¼alıřmaktadır. Bu sistemde bir firma emisyon¼st

sınırını aşarsa, piyasa tasfiye fiyatını ödeyerek daha az emisyon salımı yapan diğer firmalardan ek izin, AB emisyon izin sertifikası (EUA) almalıdır. Teorik olarak, EUA'nın birim fiyatının belirleyen faktörler arasında, politik hedefler ve etkileşimler, dinamik teknoloji maliyetleri, piyasa yapısı ve politikalarla ilgili dış etkenler ve ek olarak arz ve talep arasındaki serbest piyasa faktörleri yer alır. AB ETS düzenlemeye dahil firmaların emisyon haklarını alıp satabilecekleri yüksek emisyon hacmine sahip endüstrileri kapsamaktadır.

2022'de küresel enerjiyle ilgili CO₂ emisyonları 36,8 milyar tonun (Gt) üzerinde yeni bir zirveye ulaştı ve Avrupa Birliği (AB) ise aynı yıl yaklaşık 2,73 Gt CO₂ emisyonu üretti. Sektörlere konjonktürel olarak bakıldığında, 2022'nin son çeyreğinde, imalat ve hane halkı kaynaklı emisyon dışında, elektrik, gaz tedariki ve tarım sektörleri AB'de en fazla sera gazı emisyonu yayan ekonomik sektörler olmuştur. Bu sektörleri ulaşım ve depolama sektörleri izledi.

2023 yılı itibari ile AB ETS mekanizması, Avrupa Ekonomik Alanı (AEA) genelinde enerji yoğun endüstrilerde (elektrik, ısı ve buhar üretimi, petrol rafinerileri, demir ve çelik üretiminde kok fırınları, maden endüstrileri ile kâğıt hamuru ve kâğıt fabrikaları) yaklaşık AB'nin sera gazı emisyonlarının %45'ini ve 28 AB ülkesine ilaveten Norveç, İzlanda ve Lihtenştayn'da faaliyet gösteren yaklaşık 13.500 işletmeyi kapsamaktadır.

AB ETS'nin ilk iki fazında yaşanan istikrarsız ve kısmen başarısız sürecin ardından 3. fazının ikinci yarısından itibaren karbon fiyatının ciddi anlamda yükselmesi ve AB emisyon hedeflerinin katı bir şekilde sıkılaştırılması nedeniyle, karbon fiyatının doğru bir şekilde tahmin edilmesinin önemi, yatırımcılar ve emisyon yayan tesislerin karlılıkları ve stratejileri için hayati hale gelmiştir. Ayrıca, emisyon

piyasalarının ve bu piyasalardaki ürünlerin konvansiyonel piyasa ürünleri ile düşük korelasyonu, bu ürünleri emisyon yayan şirketler dışındaki kurumsal ve bireysel yatırımcılar için cazip hale getirmiştir ve bu piyasaların işlem hacmi, yatırımcıların ilgi ve talepleri ile orantılı olarak giderek artmaktadır. Bu hedef doğrultusunda, hassas karbon fiyatı tahmin modelleri oluşturulması için doğru ve etkili fiyat etkenlerini ve doğru yöntemleri seçmek çok önemlidir.

Bu araştırmanın öncül amacı, iklim değişikliğinin sonuçları, nedenleri ve çözüm önerileri hakkında bilgi vermek, AB ETS özelinde emisyon ticaret sistemlerinin amacını, kapsamını ve işleyişini açıklamak, bu kapsamda karbon fiyatının bu sistemlerin ve iklim politikalarının başarısı için ne denli önemli olduğunu ortaya koymaktır.

İkincil ve temel amaç, karbon fiyatının kompleks yapısal özellikleri nedeni ile hibrit yapay zeka uygulamaları kullanarak hassas, etkili ve orijinal karbon fiyatı tahmin modelleri geliştirmek ve bu amaç doğrultusunda öncelikle karbon fiyatını etkileyen faktörlerin yine yapay zeka uygulamaları kullanarak geniş ve kapsamlı analizini yapmak ve karbon fiyatı tahmininde kullanılacak doğru ve etkili faktörleri belirlemektir.

Bu amaçlar doğrultusunda çalışmanın birinci bölümünde, iklim değişikliği kavramı, bilimi, nedenleri, iklim değişikliğinin etkileri, sera gazı emisyonlarının küresel ve AB özelinde sektörel ve bölgesel dağılımı ve son yıllarda gösterdiği değişim, iklim değişikliği ile ilgili yapılan önemli sözleşmeler ve konferansların tarihsel gelişimi konuları hakkında kapsamlı bilgi verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde iklim değişikliği ile mücadele başlığı altında piyasa temelli ve piyasa temelli olmayan iklim politikası araçlarının türleri, tanımları, özellikleri, kullanım alanlarının yanı sıra emisyon ticaret sistemlerinin geçmişi, türleri, dünyadaki emisyon ticareti sistemleri incelenmiştir.

3. bölüm AB ETS'nin oluşumu ve tarihi ile başlamış sonrasında AB ETS'nin dönemsel özellikleri ve farklılıkları 4 faz başlığı altında incelenmiştir. Akabinde, AB ETS'nin sınırlamaları ve çözüm önerileri tartışılmış, AB ETS karbon fiyat mekanizmasının çalışma prensipleri anlatılmış ve bu kısım AB ETS piyasa istikrar mekanizmasının oluşumu ve gelişimi ile son bulmuştur.

Çalışmanın 4. ve 5. bölümleri uygulama kısımları olup, 4. Bölümünün ilk kısmında daha önce yapılmış çalışmaların ışığında enerji, endeks ve finans başlıkları altında coğrafi olarak çeşitlendirilerek seçilen 28 değişkenin, geliştirilen 13 denetimli makine öğrenimi (Supervised Machine Learning, DML) modelle Avrupa karbon fiyatı volatilitesi üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu modellerin karbon fiyatı tahminindeki hassasiyet ve uygunluk performansları 6 farklı parametre ile karşılaştırılmıştır.

4. bölümün ikinci kısmında, 1. kısımda geliştirilen 13 model ve Granger VAR nedensellik testi kullanılarak AB ETS kapsamında faaliyet gösteren 13 emisyon yayan sektör ve yenilenebilir enerji sektörü dahil toplam 14 sektörün, sektörel ortalama endeks getirilerinin Avrupa karbon fiyatı ile olan çift taraflı ilişkisi araştırılmıştır.

Çalışmanın son bölümü olan 5. kısımda 4. bölümde incelenen 28 değişken arasından karbon fiyatı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu tespit edilen vadeli kömür fiyatı, S&P 500 endeksi, Birleşik Krallık 10 yıllık tahvil getirisi ve NIKKEI

endeksi ile ikinci kısımda karbon fiyatı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu tespit edilen kimya, yenilenebilir enerji ve hayvancılık sektörlerinin endeks getiri verileri girdi olarak alınarak, tekli ve çiftli veri ayrıştırma teknikleri sonrasında (data decomposition), 4 farklı yapay sinir ağı modeli (ANN) ile karbon fiyatı tahmini için 12 yeni DML modeli oluşturulmuştur. Son aşamada ise oluşturulan ANN modellerinin kritik öneme sahip uygulama parametreleri en iyi sonuca ulaşmak adına genetik algoritma ile optimize edilmiş ve optimize edilmiş yeni 12 model daha çalışmaya eklenmiştir. Sonuç olarak farklı veri ayrıştırma, ANN yapısı ve optimizasyon seçenekleri ile oluşturulan 24 tekli ve çoklu modelin tahmin kesinliği ve model uygunluk performansları birinci kısımda da kullanılan 4 farklı metrik ile karşılaştırılmıştır.

BİRİNCİ BÖLÜM İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE EMİSYON TİCARETİ

1.1. İklim Değişikliği Kavramı ve Nedenleri

20. yüzyılda sera gazı salımının artması ile birlikte, küresel ortalama yüzey sıcaklığı yaklaşık 0,74°C arttı ve deniz seviyesi de yaklaşık olarak 17 cm yükseldi. Bu yüzyılın sonuna kadar ortalama yıllık küresel sıcaklığın 2,5-5,5°C artacağı tahmin ediliyor. Bu değişiklikler, insan faaliyetlerinin ve doğal süreçlerin etkileşimi sonucu ortaya çıkmaktadır. Dünya genelinde mevsimsel ortalama sıcaklıkların ciddi oranda artması, deniz seviyelerinin yükselmesi ve ekstrem hava olaylarının sıklaşması gibi belirgin çevresel değişiklikler iklim değişikliğinin ciddi boyutlarda olduğunu ve sorunun küresel olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir ki iklim değişikliği, ekosistemlere, insan sağlığına, sosyal hayata, ekonomiye, tarıma, su kaynaklarına ve daha birçok sektöre ciddi etkileri olan karmaşık küresel bir temadır.

İklim değişikliği, atmosferdeki sera gazlarının artması nedeniyle dünya genelinde ortalama sıcaklıkların artması ve iklim desenlerindeki değişiklikler olarak tanımlanabilir. Sera gazları, insan faaliyetleri ve doğal süreçler sonucu atmosfere salınmaktadır ve bu gazlar güneş ışınlarını yeryüzüne ileten ve yeryüzünden yayılan ısıyı tutan bir örtü görevi görmektedir. Dolayısı ile sera gazı seviyelerinin artması atmosferdeki sıcaklığın da artmasına neden olmaktadır.

İklim değişikliği bilimi, gözlem verileri, bilgisayar modelleri, iklim tarihi analizleri ve daha fazlasını içeren disiplinler arası bir yaklaşımla yürütülmektedir. Burada, atmosfer ve okyanus sistemlerini anlamak için karmaşık fiziksel ve kimyasal süreçler incelenir. Ayrıca, insan faaliyetlerinin sera gazı emisyonlarına etkisi de dikkate alınır. İklim değişikliği bilimi, temelde aşağıdaki alanları kapsar;

Atmosfer Bilimi: Atmosferdeki gazlar arası etkileşimleri ve sera gazlarının konsantrasyonlarının artmasının iklim üzerindeki etkilerini inceler. İklim modelleri kullanarak atmosferdeki sıcaklık, yağış, rüzgar ve diğer hava koşullarının nasıl değiştiğini analiz eder.

Okyanus Bilimi: Okyanusların termal kapasitesi ve sirkülasyonu gibi faktörler, iklim değişikliğinin etkilerini anlamak için önemlidir. Deniz seviyelerinin yükselmesi, okyanus asitlenmesi ve deniz akıntılarındaki değişiklikler gibi konuları inceler.

Biyolojik ve Ekolojik Araştırmalar: İklim değişikliği, bitki ve hayvan türleri üzerinde ciddi etkilere yol açabilir. Bu nedenle biyolojik ve ekolojik çalışmalar, iklim değişikliğinin ekosistemlere olan etkilerini anlamayı amaçlar.

Hidroloji ve Su Kaynakları: İklim değişikliği, su döngüsü üzerinde etkilere yol açarak su kaynaklarını etkileyebilir. Kuraklık, sel ve su krizleri gibi konuları araştırır.

Toprak Bilimi ve Yeryüzü Süreçleri: İklim değişikliğinin toprak erozyonu, toprak nem içeriği ve bitki büyümesi üzerindeki etkilerini inceler.

Paleoklimatoloji: Geçmiş iklim koşullarının analizi ve iklim değişikliğinin tarihsel perspektifini sağlar.

İklim Modelleri ve Veri Analizi: İklim değişikliği biliminde kullanılan karmaşık matematiksel modeller ve istatistiksel analizler, mevcut koşulların değerlendirilmesi ve gelecekteki senaryoların oluşturulmasına yardımcı olur.

İklim değişikliğinin temel sebebi dünya genelindeki atmosferin kimyasal bileşiminin ve enerji dengesinin insan faaliyetleri ve doğal süreçler sonucu bozulmasıdır. Bu nedenler aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

Sera Gazı Emisyonları: Fosil yakıtların (kömür, petrol, doğalgaz) yakılması, endüstriyel faaliyetler ve araç trafiği gibi insan faaliyetleri sonucu atmosfere büyük miktarda karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot oksitler (NO_x) gibi sera gazları salınır. Bu gazlar atmosferdeki ısıyı yakalanmasına ve gezegenin sıcaklığının artmasına yol açar.

Enerji Üretimi ve Tüketimi: Fosil yakıtlar kullanılarak gerçekleştirilen enerji üretimi, ciddi miktarlarda sera gazı emisyonuna yol açar. Temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı azaltılmış sera gazı emisyonlarına katkı sağlayabilir.

Endüstriyel Süreçler: Endüstriyel üretim süreçleri, enerji kullanımı ve kimyasal reaksiyonlar da sera gazlarının salınımına neden olabilir. Özellikle enerji yoğun sektörlerdeki faaliyetler iklim değişikliğini hızlandırabilir.

Tarım ve Hayvancılık Uygulamaları: Tarım, metan gazı ve azot oksitler gibi sera gazlarının atmosfere salınmasına yol açabilir. Özellikle hayvancılık büyük bir metan gazı kaynağıdır. Ayrıca, gübre kullanımı da azot oksitlerin salınımına neden olabilir.

Ormansızlaşma ve Arazi Kullanımı Değişiklikleri: Orman alanlarının kesilmesi veya tahrip edilmesi, toprak erozyonu ve arazi kullanımındaki değişiklikler iklim üzerinde etkili olabilir. Ormanlar, atmosferdeki CO₂'nin emilmesine yardımcı olur ve doğal bir karbon deposu görevi görür.

Bu nedenlere daha yakından baktığımızda iklim değişikliğinin temel nedenin insan kaynaklı aktiviteler olduğu anlaşılmaktadır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi de iklim değişikliğini, “karşılaştırılabilir bir zaman periyodunda gözlenen doğal iklim değişikliğine ek olarak, doğrudan ya da dolaylı olarak küresel atmosferin bileşimini bozan, insan etkinlikleri sonucunda iklimde oluşan değişiklik”

olarak tanımlamaktadır (UNFCCC, 1992). Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli de küresel sera gazı emisyonlarındaki artışın iklim değişikliğine neden olduğunu belirtmekte ve bu artıştaki insan etkisine dikkat çekmektedir (IPCC, 2007; IPCC, 2013). Ayrıca, IPCC'ni yayınladığı 5. değerlendirme raporunda toplam insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının %40'ının son 40 yıl içerisinde meydana geldiğini ve bu durumun endüstriyel süreçler ve fosil yakıt tüketimleri nedeniyle oluştuğunun altı çizilmektedir (IPCC, 2014b).

1.2. İklim Değişikliğinin Etkileri

İklim değişikliği çevre ekosistemler başta olmak üzere insan yaşamına ait her alana ciddi anlamda etki etmektedir. İklim değişikliğinin çevresel etkileri aşağıdaki başlıklarda incelenebilir,

Ekosistemler:

Bio-çeşitlilik Kaybı: İklim değişikliği, habitatlar ve iklim koşulları değişikçe türlerin yaşam alanlarını etkiler. Bu da bazı türlerin göç etmesine veya yok olmasına neden olabilir.

Deniz Ekosistemleri: Okyanusların asitlenmesi, mercan resiflerinin zarar görmesi, deniz yaşamının etkilenmesi ve balıkçılığın olumsuz etkilenmesi gibi deniz ekosistemleri üzerinde ciddi sonuçlar doğurur.

Ormanlar ve Orman Yangınları: Artan sıcaklık ve kuraklık orman yangınlarının sıklığını ve yoğunluğunu artırabilir. Bu da orman alanlarının azalmasına ve ekosistem dengesinin bozulmasına yol açar.

Su Kaynakları ve Tarım:

Su Kıtılığı: Kuraklık ve su kaynaklarının azalması, tarım üretimini olumsuz etkiler ve su kaynaklarına olan talebi artır. Orman alanların azalması ile yağış miktarlarında yaşanacak düşüşler susuzluk sorunun tırmandırarak su temalı savaşlara dahi yol açabilir.

Verimlilik Kaybı: İklim değışikliği, bitki büyümesi, hasat miktarları ve kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratarak gıda üretim hacmini ve gıda güvenliğini tehlikeye atabilir.

Deniz Seviyeleri ve Kıyı Alanları:

Kıyı Erozyonu ve Taşkınlar: Deniz seviyelerinin yükselmesi, kıyı bölgelerinde erozyona neden olabilir ve taşkın riskini artırabilir bu durum kıyı bölgelerden iç kesimlere göçü tetikleyebileceğı gibi kıyı turizmi ve balıkçılık gibi sektörleri olumsuz etkileyebilir.

Tuzluluk ve Tatlı Su Kaynakları: Deniz seviyelerinin yükselmesi, tatlı su kaynaklarını tuzlu su ile kirlitebilir. Bu durum su kıtlığını sorunun ciddi boyutlara tırmandırabilir.

İklim değışikliğinin sosyokültürel anlamda da hayatın her alanını etkilemektedir. Bu etkiler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

Göç:

Çevresel Mültecilik: Sıcaklık artışı, su kıtlığı, deniz seviyelerinin yükselmesi ve doğal afetler gibi etkiler, insanların evlerini terk etmelerine ve yurtdışı veya içi göç etmelerine neden olabilir. Bu da sosyal gerilimlere, çatışmalara ve yerinden edilmelere yol açabilir.

Kırsal Göç: İklim değışikliğı, tarım alanlarının kuruması veya verimsizleşmesi, balıkçılık faaliyetlerinin azalması gibi nedenlerle kırsal bölgelerde yaşayan insanların şehirlere göç etmelerine neden olabilir. Bu düzensiz ve devasa göç dalgaları ciddi toplumsal kargaşa ve belirsizliklere yol açabilir.

Sağlık ve Sosyal Refah:

Sağlık Sorunları: Artan sıcaklık, sıcak hava dalgalarını artırarak sağlık sorunlarına yol açabilir. Bulaşıcı hastalıkların yayılma riski de artabilir.

Toplumsal Eşitsizlikler: İklim değışikliğı, toplumun daha zayıf kesimlerini daha fazla etkileyebilir. Düşük gelirli veya dezavantajlı gruplar maddi imkansızlıklar nedeni ile çevresel değışikliklere karşı daha savunmasızdırlar dolayısı ile iklim değışikliğı sınıf farklılıklarını daha da derinleştirebilir

. İklim değışikliğı ekonomik anlamda birçok sektörü ve ülkeyi etkileyen karmaşık ve geniş kapsamlı sonuçlar doğurur. İklim değışikliğı, üretim, ticaret, istihdam ve gelir dağılımı gibi ekonomik göstergeleri etkileyerek hem mikroekonomik düzeyde bireyleri hem de makroekonomik düzeyde ülkeleri etkiler. Bu etkiler aşağıdaki sektörel başlıklarda incelenebilir:

Enerji ve Altyapı:

Enerji Üretimi ve Temini: Sıcak hava dalgaları, enerji talebinin artmasına ve enerji üretiminde sorunlara neden olabilir. Su kaynaklarının azalması hidroelektrik enerji üretiminde azalmaya ve enerji üretimi için daha fazla fosil yakıt kullanımına ve dolayısı ile iklim değışikliğinin hızlanmasına yol açabilir.

Altyapı Hasarları: Aşırı hava olayları (kasırgalar, seller), enerji altyapısını, ulaşım sistemlerini ve iletişim ağlarını etkileyerek enerji üretimini azaltabilir.

Tarım ve Gıda Üretimi:

Verim Kaybı: Kuraklık, aşırı sıcaklar ve aşırı hava olayları, tarım üretimini olumsuz etkileyerek verim kaybına yol açar. Dolayısı ile gıda üretimindeki düşüşler, gıda fiyatlarının artmasına ve enflasyonun yükselmesine neden olur ve iklim değişikliği, tarım ürünlerinin tedarik zincirlerinde de kesintilere neden olabilir.

Hayvancılık: iklim değişikliği tarımsal gayrisafi milli hasılanın (GSYİH) yaklaşık %50'sini oluşturan hayvancılık sektörü üzerinde de meraların verimsizleşmesi ve kalitesizleşmesine bağlı olarak verimlilik düşüşlerinin meydana gelmesine neden olmaktadır (Havlík v.d., 2015).

Tarım Dışı Üretim ve Sanayi:

Hammaddelerin temini (tarım ürünleri, mineraller, enerji) iklim değişikliğinden etkilenebilir, tedarik zincirlerinde kesintiler yaşanabilir ve bu durum üretimi sekteye uğratabilir ve maliyetleri artırabilir.

Ulaşım ve Taşımacılık:

Taşımacılık sektörünün altyapısı özellikle şiddetli yağışlar, fırtınalar ve deniz seviyesinin yükselmesi başta olmak üzere, iklim etkilerine karşı son derece hassas olan bir sektördür. Aşırı hava olayları ulaşım altyapısını ve hizmetlerini olumsuz etkileyebilir ve enerji talebinin artması da taşımacılık maliyetlerini yükseltebilir.

Turizm ve Rekreasyon:

Turizm sektörü dünyanın en hızlı büyüyen endüstrilerinden biri olmasına rağmen, çevre ve iklim ile çok yakın bir ilişkiye sahiptir. Çevre ve iklim koşullarındaki çok küçük değişimlerin bile bu sektör üzerinde muazzam etkilere neden olmasından

dolayı iklim değışikliği ve onun etkilerine karşı da son derece hassastır (Fang v.d., 2018).

Tatil destinasyonu seçimi üzerinde en belirleyici faktörlerden biri de iklim koşullarıdır. Kar yağışı, biyolojik çeşitlilik, ekstrem olaylar ve afetler, su seviyeleri ve suyun kalitesi gibi turizm için kritik önem taşıyan çevre kaynakları ve koşulları üzerinde iklim değışikliğinin ve etkilerinin önemi yadsınamaz (Perch-Nielsen, 2010).

İnşaat ve Mülkiyet:

Artan hava olayları, altyapı hasarlarına (yüksek rüzgarlar, seller) ve mülkiyet değeriinde düşüşe neden olabilir. Erozyon ve deniz seviyelerinin yükselmesi ise kıyı altyapısını etkileyebilir.

Finans ve Sigortacılık:

Sigorta ve reasürans şirketleri için aşırı hava ve iklim olaylarının yarattığı hasarların her geçen gün hızlı bir artış göstermesi önemli bir risk oluşturmaya başlamıştır. Aşırı hava ve iklim olayları yılda ortalama 35.000 insanın can kaybına ve önemli ekonomik zararlara da neden olmaktadır. Daha sık veya daha şiddetli aşırı hava ve iklim olayları ve bu tür felaketler hakkındaki artan belirsizlik, afet bölgelerinde yüksek sigorta primlerinin oluşmasına, sigorta ödemelerinin hacminin artmasına, bu durum ise sigorta şirketlerinin bu ağır tazminatları ödemede güçlük çekmelerine hatta iflas etmelerine neden olabilecektir.

Finansal konjonktürde, İklim değışikliği, enerji fiyatlarındaki dalgalanmaları artırarak finansal piyasalarda belirsizlik yaratabilir, fosil yakıtlara dayalı varlıklar, düşük karbonlu geleceğe geçiş nedeniyle değeri kaybedebilir, iklim değışikliği ile ilgili riskler, finansal kurumların risk profillerini etkileyebilir ve sermaye gereksinimlerini

artırabilir ve iklim değışikliğı, bazı sektörlerin kredi riskini artırarak kredi tahsilatlarını ve geri ödemeleri etkileyebilir.

Gün geçtikçe, tüm ekonomik sektörler iklim değışikliğınden direk ve dolaylı olarak daha fazla etkilenmektedir. Ancak bu etkilerin ülkeler, endüstriler ve işletmeler tarafından hissedilme şekli ve derecesi farklılık göstermektedir. Bu kapsamda işletmelerin iklim değışikliğınin olumlu ya da olumsuz etkilerine maruz kalma dereceleri, işletmenin coğrafi konumu, içinde bulunduğu sektör ve yapmış olduğu faaliyetlere bağılı olarak değışmekte bu durum bazı işletmeler için risk bazıları için ise fırsat yaratan koşulların oluşmasına neden olmaktadır (Agrawala v.d., 2011).

İklim değışikliğı, işletmeler için hem fırsatlar hem de tehditler sunabilir. İşletmeler, bu değışikliklere uyum sağlamak ve sürdürülebilirliğı artırmak için özel stratejiler geliştirmelidir. İklim değışikliğınin işletmeler için oluşturduğu bazı fırsatlar ve tehditler aşağıdaki gibi gruplanabilir,

Fırsatlar:

Yeşil Teknoloji ve Yenilenebilir Enerji Sektörü: Enerji talebinin arttığı bir dönemde, yenilenebilir enerji üretimi ve enerji verimliliğı çözümleri sunan işletmeler büyüyebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmak, işletmelerin hem maliyetlerini düşürmesine hem de sürdürülebilirlik imajını güçlendirmesine yardımcı olabilir.

Sürdürülebilir Ürün ve Hizmetler: İklim dostu ürün ve hizmetlere olan talebin artması ile işletmeler, çevre dostu ürünler geliştirerek ve sürdürülebilirlik odaklı piyasa stratejileri kullanarak yeni müşteri segmentlerine ulaşabilir.

Dönüşüm ve Uyum Danışmanlığı: İşletmeler, iklim değişikliği ile mücadele ve uyum stratejileri konusunda danışmanlık hizmetleri sunarak gelirlerini artırabilir.

Tarım ve Gıda İnnovasyonu: İklim değişikliğinin olumsuz etkileri yeni bitki türleri, sulama teknolojileri ve sürdürülebilir tarım uygulamalarına yönelik talebi artırabilir.

Yatırım ve Finansman: Yeşil yatırımlar, sürdürülebilir projeler ve çevresel projeler için finansman sağlama konusunda büyüyen bir alan olabilir.

Tehditler:

Doğal Afetler ve Altyapı Hasarları: İşletmeler, aşırı hava olayları, sel, kasırga gibi doğal afetlerden kaynaklanan altyapı hasarları ve kesintilerle karşılaşabilir.

Tedarik Zinciri Kesintileri: İklim değişikliği, ham madde temininde veya üretim zincirlerinde kesintilere neden olabilir. Bu, işletmelerin üretim süreçlerini ve tedarik zincirlerini bozabilir.

Artan Enerji ve İşletme Maliyetleri: Enerji talebi arttıkça ve enerji tedariki zorlaştıkça, işletmelerin enerji maliyetleri yükselir. Bu durum üretimde ve ulaşımda aksamalara neden olabilir.

Düzenlemeler ve Yasal Yükümlülükler: Artan iklim değişikliği farkındalığı, çevresel düzenlemeleri ve uyum gereksinimlerini artırabilir. İşletmeler, daha sıkı düzenlemelere uymak zorunda kalabilirler.

İmaj Riski: Çevre dostu olmayan uygulamalar veya sürdürülemez iş modelleri, işletmelerin itibarını zedeleyebilir ve müşteri sadakatini etkileyebilir.

Piyasa Kaymaları: İklim değışikliğı, talebi ve tüketici tercihlerini etkileyerek bazı piyasaları daraltabilir veya genişletebilir. Bu, işletmelerin rekabetçiliklerini etkileyebilir.

Sigorta Maliyetleri: Artan doğal afetler, sigorta primlerini yükseltebilir ve işletmelerin sigorta maliyetlerini artırabilir.

Toplum ve politika yapıcılar arasında iklim değışikliğı konusundaki farkındalığın giderek artmasıyla birlikte, iklim değışikliğinin etkilerini hafifletmeye yönelik, Kyoto Protokolü, Avrupa Birliğı Emisyon Üst Sınırı ve Ticaret düzenlemeleri, Birleşmiş Milletler İklim Değışikliğı Çerçeve Sözleşmesi, Kaliforniya Küresel Isınma Çözümleri Yasası, Kanada Düzenleyici Çerçevesi, Karbon Emisyonu Yönetmelikleri, Karbon Vergileri veya Emisyon Azaltma Yönetmelikleri gibi ulusal ve uluslararası boyutta iklim düzenlemelerinin sayısı ve sıklığı artmaktadır.

Burada özellikle düzenleyici risk ve fırsatlar, işletmelerin emisyon kredilerinin satışı, emisyonlar üzerindeki yasal sınırlamalara uyma maliyetleri veya mal ve hizmet talebine ilişkin önerilen veya yürürlükte olan yerel ve ulusal düzenlemelere ilişkin düzenleyici değışikliklerden kaynaklanan etkileri ifade etmektedir. Ancak düzenlemelerin işletmeler için risk veya fırsat olarak ele alınması, sektörün özelliklerine bağılı olarak değışebilmektedir. Örneğin, konvansiyonel enerji, madencilik, üretim, taşımacılık, metaller ve tarım sektörleri açısından düzenlemeler genellikle risk olarak görülebilmesine karşın, yenilenebilir enerji ve dekarbonizasyon teknolojileri alanında işletmelerin ortaya çıkması ve finansal şirketlerin düzenlemelerden etkilenen müşterilerine inovatif ürünler ve emisyon ticareti veya finansman dengeleme projelerini kolaylaştırma konusunda hizmet vermeleri bir fırsat olarak görülebilir (Kolk ve Pinkse, 2004).

1.3. Sera Gazı Emisyonlarının Bölgesel ve Sektörel Dağılımı

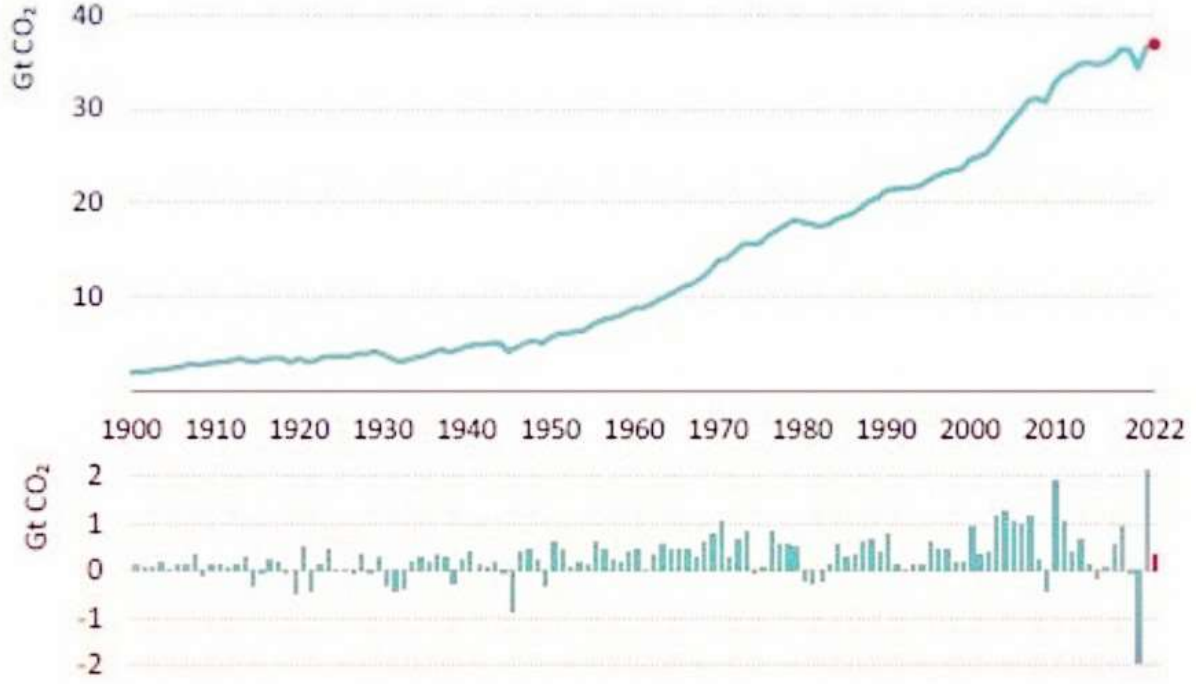
Küresel Emisyon Dağılımı

İklim değişikliğinin afetsel sonuçları önlenmek isteniyorsa, iklim değişikliğinin en büyük nedeni olan küresel sera gazı emisyonlarının hızla azaltılması gerekmektedir. Durumu rakamlarla ifade edersek, küresel olarak her yıl yaklaşık 50 milyar ton (CO₂ eşdeğeri) sera gazı salınmaktadır ve 2022'de enerjiyle ilgili küresel emisyon seviyesi %0,9 veya 321 Mt artarak 36,8 Gt'nin üzerinde yeni bir zirveye ulaşmıştır. Ancak bu büyüme, Covid-19 salgınının neden olduğu ekonomik daralma ve emisyon seviyelerinde görülen olağanüstü dalgalanmaların ardından, 2021'deki %6'lık toparlanmadan çok daha yavaştır. Enerji üretiminden kaynaklanan emisyonlar 423 Mt artarken, endüstriyel süreçlerden kaynaklanan emisyonlar 102 Mt azalmıştır.

2022 yılında emisyonlardaki en büyük sektörel artış, emisyonları %1,8 artan elektrik ve ısı üretiminden geldi. Özellikle kömür kullanımı ile elektrik ve ısı üretiminden kaynaklanan emisyonlar Asya ülkelerinin liderliğinde 224 Mt artış gösterdi. Yenilenebilir enerjideki güçlü genişleme, kömür enerjisi emisyonlarındaki toparlanmayı sınırladı ve 2022 yılında yenilenebilir enerji kaynakları elektrik üretimindeki büyümenin %90'ını karşıladı.

Enerjiyle ilgili emisyonlardaki iki yıllık olağandışı salınımı 2022 yılındaki artış takip etti. Covid-19 salgını enerji talebini azalttığı için 2020'de emisyonlar %5'ten fazla küçülmüştü ve 2021'de emisyonlar, ekonomik teşvik ve aşılarda yaygınlaşmasıyla paralel olarak %6'dan fazla artarak salgın öncesi seviyelerin üzerine çıktı. Ek olarak 2022 yılında enerji kullanımının emisyon yoğunluğunda gerçekleşen iyileştirmeler, son on yılın (2012-2021) yıllık ortalamasından biraz daha düşük kaldı. CO₂

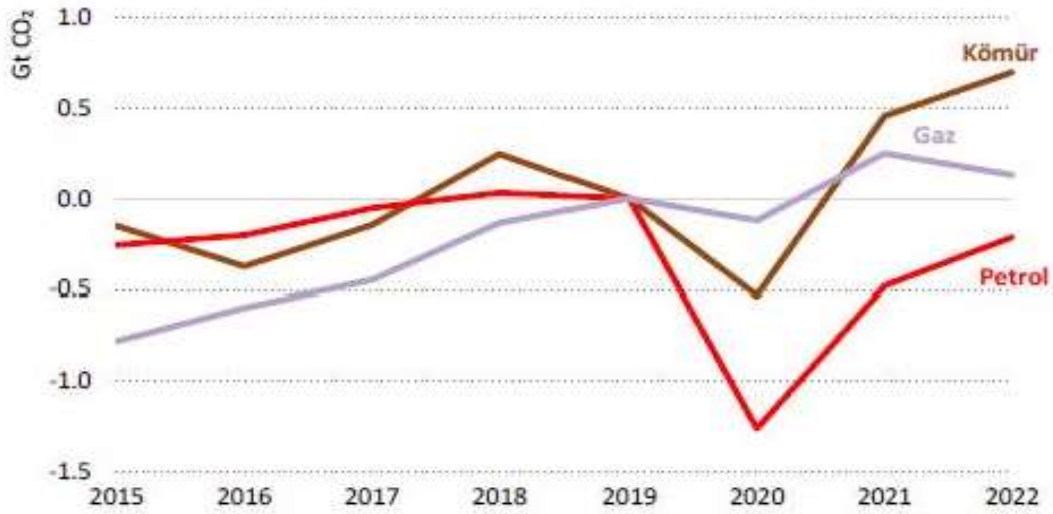
emisyonları, Kuzey Amerika ve Asya'da (Çin Halk Cumhuriyeti hariç) artarak Avrupa ve Çin'deki azalmaları geride bıraktı. Küresel düzeyde de, elektrik ve ulaşımdan kaynaklanan CO₂ emisyonları sırasıyla 261 Mt ve 254 Mt artarak sanayi ve binalardan kaynaklanan azalmaları fazlasıyla dengeledi (IEA, 2020). 1900-2022 yılları arası enerji üretimi ve endüstri kaynaklı sera gazı salınımı miktarları şekil 1'de



gösterilmektedir.

Şekil 1 Enerji Üretimi ve Endüstri Kaynaklı Sera Gazı Salınımı 1900-2022

Rusya'nın Ukrayna'yı işgali ve ardından gelen yaygın ticaret kesintileri nedeniyle zaten kısıtlı olan gaz arzı daha da kötüleştiğinden, doğal gazdan kaynaklanan emisyonlar 2022'de %1,6 azaldı. Bu durumda etkisi ile 2022 yılında emisyon salımı özellikle Avrupa'da belirgin bir şekilde düştü ve en güçlü düşüşler yılın son aylarında gerçekleşti. Diğer yanda, kömür emisyonları 243 Mt artarak tüm zamanların en yüksek seviyesi olan 15,5 Gt'ye ulaştı. 2015-2022 yılları arası yakıt kaynaklı emisyon değerleri (2019 yılı baz alınarak) şekil 2'de gösterilmiştir.

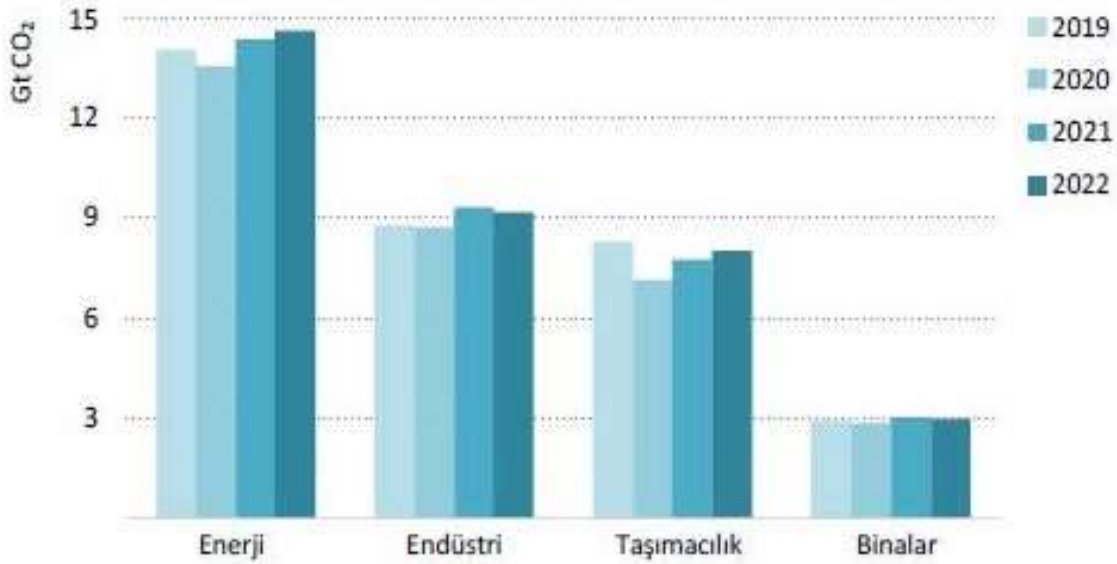


Şekil 2 2015-2022 Yılları Arası Yakıt Kaynaklı Emisyon Değerleri

Sektörel perspektifte, son yıllarda emisyonlardaki en büyük sektörel artış elektrik ve ısı üretiminden kaynaklandı. 2022'de elektrik ve ısı sektörü emisyonları %1,8 (veya 261 Mt) artarak tüm zamanların en yüksek seviyesi olan 14,6 Gt'ye ulaştı. Birçok bölgede gazdan kömüre geçiş, bu büyümenin ana itici gücü oldu ki kömürden elektrik üretiminden kaynaklanan CO₂, Asya'nın gelişmekte olan piyasaları ve gelişmekte olan ekonomilerindeki artışların öncülüğünde %2,1 arttı. Küresel elektrik talebi %2,7 arttı ve elektrik üretiminin genel karbon yoğunluğu %2,0 azalarak 2021'de kırılan dokuz yıllık trendi sürdürdü.

2022 yılında, karbon yoğunluğunda devam eden düşüşün temel kaynağı yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik talebindeki küresel büyümenin %90'ını karşılamasından kaynaklandı. Solar PV ve rüzgar üretiminin her biri yaklaşık 275 TWh artarak enerji sektörü emisyonlarında yaklaşık 465 Mt salınımın önlenmesine yardımcı oldu. 2022'de birçok ülke ciddi kuraklıklar kaydetmesine rağmen, küresel hidroelektrik üretimi, birçok bölgede su kıtlığı nedeniyle düşük olan 2021'deki

seviyelere göre 52 TWh arttı. Şekil 3, 2019-2023 yılları arası küresel toplam sera gazı salınımının sektörel dağılımını göstermektedir.



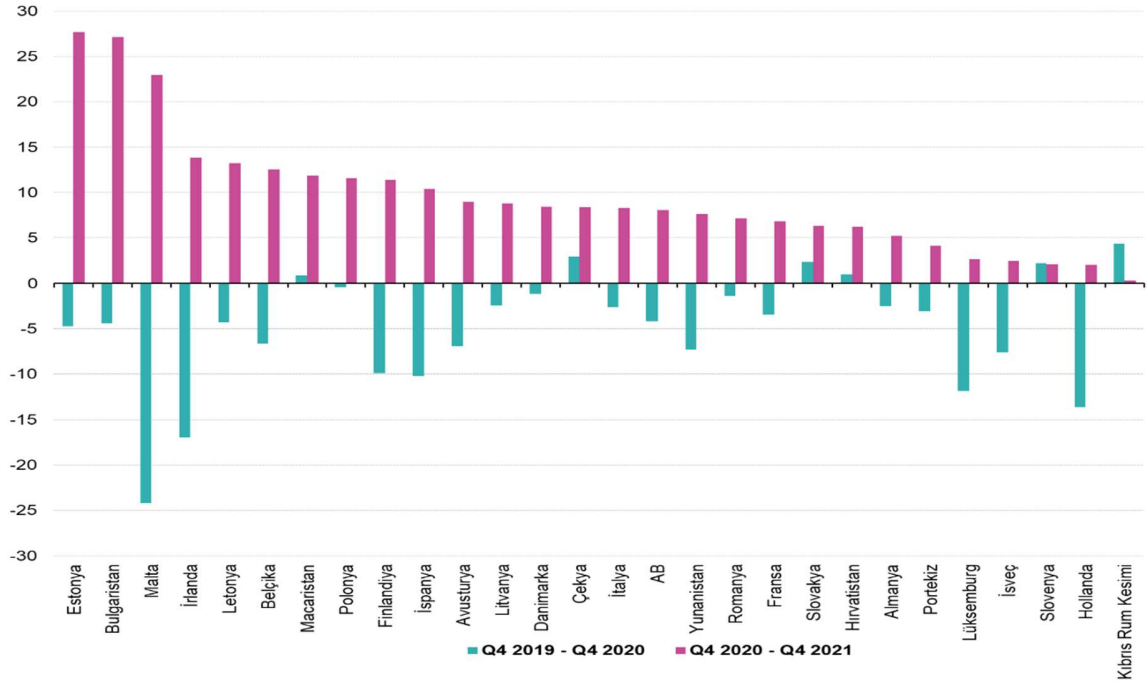
Şekil 3 2019-2023 Yılları Arası Küresel Toplam Emisyonun Sektörel Dağılımı

AB Emisyon Dağılımı

2022'nin son çeyreğinde, AB ekonomisi sera gazı emisyonları, 2021'in aynı çeyreğine (978 milyon ton CO2 eşdeğeri) kıyasla %4 düşüşle toplam 938 milyon ton CO2 eşdeğerine ulaştı. Bu düşüşe, 2022'nin dördüncü çeyreğinde AB'nin gayri safi yurtiçi hasılasında (GSYİH) 2021'in aynı çeyreğine göre %1,5'lik artışla birlikte bir miktar ekonomik toparlanma eşlik etti.

2022'nin dördüncü çeyreğindeki ülkeler bazında emisyonlar, İrlanda (%+12,3), Letonya (%+6,8), Malta (%+6,4) ve Danimarka (%+1,9) hariç, 2021'in aynı çeyreğine kıyasla tüm AB ülkelerinde azaldı.

AB ülkeleri bazında sera gazı salımının değişimi
(Bir önceki yılın aynı çeyreğine göre % değişim)

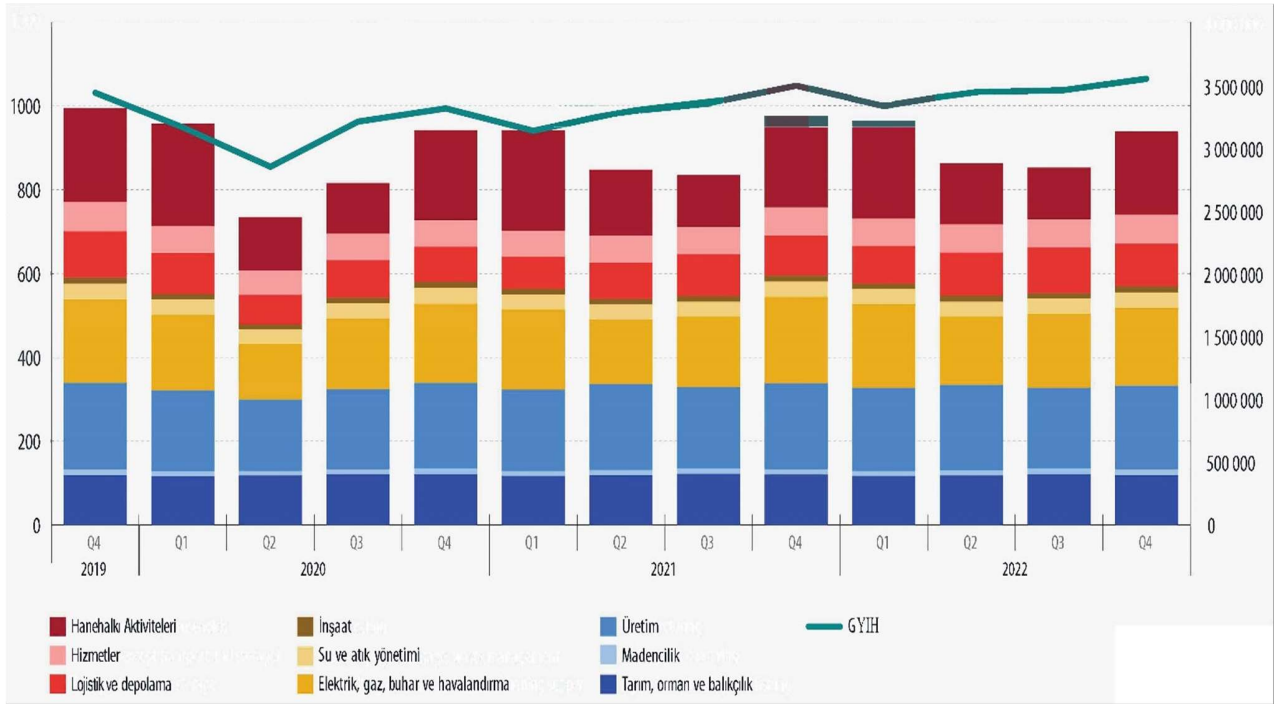


Şekil 4 AB Ülkeleri Emisyon Değişimi 2019-2021 (Kaynak: Eurostat)

Sera gazı emisyonlarını azaltan AB ülkeleri arasında en büyük düşüşler Slovenya (%-15,9), Hollanda (%-9,9) ve Slovakya'da (%-6,9) kaydedildi. Şekil 4, AB üyesi ülkeler bazında 2019-2020 ve 2020-2021 son çeyreklerindeki sera gazı salım miktarındaki değişiklikleri göstermektedir.

2022'nin son çeyreğinde, AB'de en fazla sera gazı emisyonundan sorumlu olan ekonomik sektörler imalat ve hane halkı kaynaklı emisyon (her biri %21), elektrik, gaz tedariki (%20) ve tarım (%13) oldu. Bu sektörleri ulaşım ve depolama sektörü (%11) izledi.

Bu veriler, 2021'in dördüncü çeyreğine göre 2022'nin son çeyreğinde, su temini, kanalizasyon ve atık yönetimi ve inşaat sektörlerinde % 0,3, elektrik, gaz, buhar ve iklimlendirme sektörlerinde ise yaklaşık % 9,7 oranlarında emisyonların azaldığını gösteriyor. Söz konusu süreçte emisyonların arttığı 3 sektör ulaşım ve depolama



Şekil 5 AB Sektörlere Göre Sera Gazı Salımı ve GYİH (Kaynak: Eurostat)

(+%7,0), hizmetler (nakliye ve depolama hariç) (+%1,6) ve madencilik (+%1,0) oldu.

Şekil 5, 2019 yılının son çeyreğinden 2022'nin son çeyreğine kadar AB üyesi 27 ülkede sera gazı emisyonunun sektörel dağılımı ve gayri safi yurtiçi hasılanın değişimini göstermektedir.

1.4. İklim Değişikliği ile İlgili Önemli Sözleşmeler ve Konferanslar

İklim değişikliği kavramı ilk kez 19. yüzyılda bilim dünyasına girdi ve 19. yüzyılın sonlarına doğru, bazı bilim insanları, sanayi devrimiyle artan fosil yakıt kullanımının atmosferdeki karbondioksit seviyelerini artırabileceği ve bunun da ortalama sıcaklıkları yükseltebileceği konusunda uyarılarda bulundu. 20 yüzyılda, bilimsel araştırmalar iklim değişikliği teorisini destekledi ve 20. yüzyılın sonlarına doğru sera gazlarının artan emisyonları ve küresel sıcaklık artışı konusundaki endişeler daha fazla dikkat çekmeye başladı.

İklim Değişikliği Bilimsel Danışma Paneli (IPCC)

İklim değişikliği ile ilgili ilk uluslararası görüşmeler ve anlaşmalar, 1970'lerin sonlarına doğru ortaya çıktı. 1988 yılında Birleşmiş Milletler (BM), Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ile ortaklaşa iklim değişikliği konusundaki bilimsel çalışmaları koordine etmek amacıyla, IPCC olarak bilinen "İklim Değişikliği Üzerine Bilimsel Danışma Panelini kurdu. IPCC'nin amacı, iklim değişikliği konusundaki bilimsel bulguları, etkileri ve muhtemel uyum stratejilerini dünya liderlerine, politika yapıcılara ve kamuya sunarak etkili kararlar alınmasına yardımcı olmaktır.

IPCC, dünya genelindeki binlerce bilim insanının katkılarıyla iklim değişikliği hakkındaki en güncel bilimsel bulguları derler ve değerlendirir. Panel, özel raporlar ve değerlendirmeler hazırlar. Bunlar, politika yapıcılar, hükümetler ve diğer ilgili paydaşlar için iklim değişikliği hakkında kapsamlı ve güvenilir bir bilgi kaynağı sunar.

IPCC raporları, iklim değişikliği politikalarının ve stratejilerinin belirlenmesinde ve uygulanmasında ciddi öneme sahiptir. Bilimsel olarak dayanaklı, tarafsız ve güvenilir bir kaynak olarak kabul edilen IPCC raporları, hükümetler, uluslararası kuruluşlar ve sivil toplum kuruluşları tarafından sıkça başvurulmuş rehberlerdir.

İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC)

İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC), 1992 yılında Birleşmiş Milletler (BM) tarafından iklim değişikliği ile mücadeleyi düzenlemek amacı ile uluslararası alanda kabul edilmiştir. UNFCCC, iklim değişikliğinin insan aktiviteleri ile ilişkilendirilmesini ve küresel ısınmanın etkilerini hafifletmeyi amaçlayan bir çerçeve sunmaktadır.

UNFCCC'nin temel amacı, "insan sağlığı ve çevre üzerinde iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmak, azaltım ve adaptasyon konularında iş birliğini teşvik etmek ve sera gazı emisyonlarının düzenlenmesine dair etkili ve uygun stratejileri belirlemektir." Bu çerçevede sözleşmenin nihai amacı küresel sıcaklık artışını 2°C'nin altında tutmaktır. UNFCCC'nin temel ilkeleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

Ortak Ancak Farklılaştırılmış Sorumluluk ve Yetenek: UNFCCC, ülkelerin farklı ekonomik ve kalkınma düzeylerine göre sorumluluklarını belirler.

İklim Değişikliğinin Tutarlı Bir Şekilde Ele Alınması: UNFCCC, iklim değişikliği ile mücadelede sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin desteklenmesini vurgular.

İlerleme İlkesi: Sözleşme, tarafların düzenli olarak ilerlemeyi değerlendireceğini ve gerektiğinde hedefleri güncelleyebileceğini belirtir.

UNFCCC, Taraflar Konferansı (COP) ve COP'a bağlı olan bir dizi yürütme organı tarafından yönetilir. COP, UNFCCC'nin en yüksek karar organıdır ve tüm ülkelerin temsilcilerini bir araya getirir.

Kyoto Protokolü

Kyoto Protokolü, Kyoto Japonya'da düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (1997) kapsamında 3. Taraflar Konferansı'nda (COP 3) kabul edilmiştir. Ancak ABD'nin bir süre sonra protokolden çekilmesi nedeniyle, protokol uzunca bir süre etkili işlev kazanamamıştır. Ancak Rusya'nın 18 Kasım 2004'te protokole dahil olmasının ardından gerekli koşulların sağlanması ile 16 Şubat 2005'te protokol resmen yürürlüğe girmiştir.

16 Eylül 1987'de Montreal'de imzalanan Montreal anlaşması ve 09 Mayıs 1992 tarihinde New York'ta Birleşmiş Milletlerin tertiplediği UNFCCC toplantısı, Kyoto

protokolünün temelini teşkil etmektedir. Kyoto Protokolünün 3. maddesinde, gelişmiş taraf ülkelerin insan kaynaklı CO₂ eşdeğer sera gazı salımlarını, 2008-2012 döneminde, 1990'daki seviyenin en az %5 altına indirmesine karar verilmiştir ve taraf ülkeler (2013-2020 yılları arasındaki ikinci dönemde ise sera gazı emisyon indirimini 1990 seviyesinin %18 altına indirmeyi taahhüt etmişlerdir.¹

Kyoto Protokolü'nde kararlaştırılan hedefler, BM'nin 180 üyesinin 16-17 Haziran 2001 tarihinde Bonn'da yaptıkları toplantıda kabul edilmiştir ve aynı yıl içinde ABD Protokolden çekildiğini bildirmiştir. Protokol, ülkelerin sera gazı emisyonlarını azaltmalarını sağlayan aşağıdaki üç ana mekanizmayı içerir:

Temiz Kalkınma Mekanizması (CDM), endüstrileşmemiş ülkelerde sürdürülebilir kalkınma projelerini finanse etmek ve emisyon azaltma kredileri elde etmek amacıyla tasarlanmıştır.

Ortak Uygulama (JI), endüstrileşmiş ülkeler arasında sera gazı azaltma projelerini desteklemek için tasarlanmıştır.

Ulusal Emisyon Ticareti (ET), endüstrileşmiş ülkeler arasında sera gazı emisyon kotalarının ticaretini düzenler.

Protokolün Ortak Yürütme (JI) ve Temiz Gelişim Mekanizmaları (CDM) tarafından Karbondioksit (CO₂), Nitroz Oksit (N₂O), Metan (CH₄), Hidroflorokarbonlar (HFC_s), Perflorokarbonlar (PFC_s) ve Sülfür Hexaflorid (SF₆) gazları ve bileşenleri emisyon kapsamına alınmıştır. Bu bileşenlerin sera gazları içindeki etkilerini tam olarak

¹ United Nations, "Kyoto Protocol to the United Nations Framework"

hesaplayabilmek için her birinin sera gazları üzerinde etkili olan karbondioksit cinsinden tanımlanmasına karar verilmiştir. Çevirme işlemi için Küresel Isıtma Potansiyeli ölçeği kullanılmıştır ve gazların karbondioksit eşdeğerleri çıkartılmıştır. Kyoto Protokolü başlangıçta enerji, ulaşım, endüstri, tarım ve atıklar olmak üzere beş sektörü öne çıkarmıştır.

Kopenhag İklim Konferansı

Kopenhag İklim Konferansı, 7-18 Aralık 2009 tarihlerinde 192 ülkenin temsilcileri, sivil toplum kuruluşları, hükümet yetkilileri ve bilim insanları katılımı ile Kopenhag'da gerçekleştirilmiştir.

Konferansın temel amacı, Kyoto Protokolü'nün sona erdiği 2012 sonrası dönemde iklim değişikliği ile mücadele için yeni bir küresel anlaşmaya ulaşmaktır ve katılımcılar, küresel sıcaklık artışını 2°C'nin altında tutma hedefi doğrultusunda sera gazı emisyonlarının azaltılması konusunda taahhütlerin belirlenmesini bekliyordu.

Ancak, Kopenhag Konferansı, birçok ülkenin farklı çıkarları, emisyon azaltım taahhütleri ve finansman konusundaki anlaşmazlıkları nedeniyle sonuçsuz kaldı. Konferansta birçok ülke, iklim değişikliği ile mücadeledeki taahhütlerini belirtmekten kaçındı veya istenen düzeyde taahhütler sunmadı. Konferansın sonucu, "Kopenhag Anlaşması" olarak adlandırılan gönüllü bir belgeye dönüştü. Ancak, bu belge yasal olarak bağlayıcı değildi ve iklim değişikliği ile etkili mücadele konusunda yetersiz olarak görüldü.

Paris Anlaşması

Paris Anlaşması, iklim değişikliği ile mücadelede uluslararası bir çerçeve sağlayan ve 2015 yılında Fransa'nın başkenti Paris'te düzenlenen Birleşmiş Milletler

İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) 21. Taraflar Konferansı'nda (COP 21) kabul edilen tarihi bir anlaşmadır. Anlaşmanın temel amacı küresel sera gazı emisyonlarını sınırlamak ve küresel sıcaklık artışını kontrol altına almaktır.

Paris Anlaşması, 196 ülkenin katılımı ile 12 Aralık 2015 tarihinde COP 21 toplantısında kabul edilmiş ve 4 Kasım 2016 tarihinde resmi olarak yürürlüğe girmiştir.

Paris Anlaşması'nın spesifik hedefi, küresel ısınmayı 2°C'nin altında tutmak, mümkünse 1.5°C'ye kadar sınırlamaktır. Anlaşma, sera gazı emisyonlarının net sıfıra indirilmesini ve emisyon ile emilim arasındaki dengeyi sağlayarak küresel sıcaklık artışını kontrol altına almayı destekler.

Bu anlaşma, Kyoto'dan farklı olarak neredeyse tüm dünya ülkelerinin katılımını ve emisyon azaltımı konusunda tüm tarafların yükümlülük almasını sağlamıştır. Protokolde gelişmekte olan ülkelere mevcut kapasitelerine göre azaltım yapmaları için hedefler verilmiştir ve gelişmiş ülkelere de daha fazla azaltım yapmaları, 2050 sonrası için ise sıfır emisyon (carbon neutral) konumuna gelmeleri taahhüdü alınmıştır.

Paris Anlaşması, gelişmekte olan ülkelerin iklim değişikliği ile mücadelede finansman ve teknoloji transferi konusunda desteklenmesini taahhüt etmektedir. Gelişmiş ülkeler, finansman sağlama ve teknoloji transferi konusunda daha fazla çaba harcamayı taahhüt etmişlerdir.

Anlaşma, ayrıca iklim değişikliği ile uyum stratejilerini güçlendirmeyi ve zarar gören ülkelere yardım etmeyi amaçlar. Bu doğrultuda, zarar azaltma ve kaynak sağlama konularında özel bir mekanizma oluşturulmuştur.

Paris Anlaşması, iklim değışikliğı ile mücadelede uluslararası önemli bir adımdır. Ülkeler, kendi ulusal taahhütlerini belirleyerek ve uygulayarak küresel emisyonları azaltmaya yönelik kararlılık göstermektedir. Anlaşma, uluslararası topluluğun iklim değışikliğı ile mücadelesinde daha güçlü bir iş birliği ve liderlik sergileme gerekliliğini vurgulamıştır. Ayrıca, Paris Anlaşması, dünya genelindeki sivil toplum, şirketler ve hükümetler arasında iklim değışikliğı konusundaki farkındalığı artırmış ve sürdürülebilirlik çabalarını desteklemiştir.

Çin ve Hindistan gibi gelişen ekonomiler bu anlaşmaya beklentilerden fazla önem vermişlerdir. Özellikle Çin, zorunlu olmadığı halde mutabakatın yürürlüğe gireceğı 2020 yılına kadar 3.1 milyar dolarlık gönüllü yardım yapacağını açıklamıştır.

Türkiye ise Paris İklim Zirvesinin öncesinde BM İklim Sekretaryasına, iklim değışikliğı ile mücadele kapsamında Ulusal Azaltım Katkı Beyanı (INDC) Planı'nı gönüllü olarak sunmuştur. Bu beyanla, 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını, olağan seyir olan referans senaryodan %21 daha az artırmayı hedef olarak benimsediğini belirtmiştir.

Birleşmiş Milletler İklim Değışikliğı Konferansı (COP 26)

Birleşmiş Milletler İklim Değışikliğı Konferansı (COP 26), İskoçya'da 31 Ekim - 12 Kasım 2021 tarihleri arasında küresel iklim değışikliğı ile mücadele uygulamalarını değerlendirmek üzere düzenlenmiştir. COP 26, Paris Anlaşması'nın hedeflerinin güçlendirilmesi, sera gazı emisyonlarının azaltılması, sürdürülebilir enerjiye geçiş ve uyum çabalarının ele alınması gibi konulara odaklanmıştır.

COP 26'nın temel amacı, ülkelerin Paris Anlaşması hedeflerini güçlendirmelerini teşvik etmek ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için daha katı taahhütler

sunmalarını sağlamaktı. Konferans gelişmekte olan ülkelerin iklim değişikliği ile mücadele çabaları için finansman ve destek sağlanması hedeflemiştir. Konferansta aşağıdaki ana konular ele alınmıştır;

Fosil Yakıt Azaltımı: fosil yakıtların kullanımını azaltma ve sürdürülebilir enerjiye geçiş konuları ele alındı. Hükümetler, enerji üretimini yeşil enerjiye dönüştürme taahhütlerini güçlendirmeyi tartıştı.

Finansman ve Destek: Gelişmekte olan ülkelerin iklim değişikliği ile uyum sağlamaları için finansman ve teknoloji transferi sağlanmasının önemi vurgulandı. Varlık fonları, yeşil yatırımlar ve finansman mekanizmaları tartışıldı.

Uyum ve Zarar Azaltma: İklım değişikliğinin etkileriyle başa çıkmak ve zarar azaltma stratejileri üzerine tartışmalar yapıldı. Uyum ve zarar azaltma mekanizmalarının geliştirilmesi hedeflendi.

Orman ve Bio-eşitlilik: Ormanların korunması ve bio-çeşitliliğin sürdürülmesi ile iklim değişikliği ile mücadelede konusu ele alındı.

COP 26 sonucunda 1.5°C hedefini koruma ve 2030'a kadar sera gazı emisyonlarını azaltma taahhütlerini güçlendirme çağrısı yapıldı ve Glasgow İklım Anlaşması, uluslararası liderlerin ve katılımcıların imzaladığı bir belge olarak COP 26'nın sonunda kabul edildi. Bu anlaşma, iklim değişikliği ile mücadelede daha sıkı taahhütler ve daha fazla iş birliği gerektiğini vurguladı.

İKİNCİ BÖLÜM İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İLE MÜCADELE

2.1. İklim Politikası Araçları

İklim değışikliğı ile mücadelede kullanılan politika araçları, piyasa tabanlı ve piyasaya tabanlı olmayan doğrudan müdahale araçları olarak sınıflandırılabilir. Tablo 1, söz konusu dolaylı ve doğrudan politika araçlarını sunmaktadır. Piyasaya dayalı araçlar piyasa aktörlerinin davranışlarını etkileyen dolaylı düzenleyici araçlardır. Piyasaya tabanlı olmayan araçlar ise belirli yükümlölüklerin dayatılması yoluyla veya davranışı değıştirmek için doğrudan parasal olmayan teşvikler yükleyerek çalışır. Her iki enstrüman türünün de belirli özellikleri ve dolayısıyla belirli avantajları ve dezavantajları vardır. Tamamlayıcı özellikleri nedeniyle, politika araçlarının çeşitlendirilerek kullanılması, araçların çevresel ve ekonomik motivasyonlarını etkili bir şekilde birleştirerek toplam etkinliğı artırabilir. Uygulanacak optimum politika tasarımı, farklı türlerin özelliklerini dikkate almalı ve ilgili bağlamda yerine getirilmesi amaçlanan işleve uygun olarak en uygun politika bileşenini seçmelidir. Politika araçlarının teorik potansiyelinden yararlanmanın, politika tasarımındaki ve uygulanmasındaki nihai ayrıntılara bağılı olduğu düşünölürse, çeşitli politika araçlarının eşzamanlı uygulanması sinerjik ama aynı zamanda çelişkili etkilere sahip olabilir. Uygulamada iklim politikaları, toplam maliyetin en aza indirilmesi (statik verimlilik) hedefi ile değeriendirilir ve seçilir. Ancak, pratik fizibiliteyi etkileyen üç ana kriter, çevresel etkinlik, maliyet etkinliğı ve toplum üzerindeki ek etkiler de değeriendirmeye dahil edilerek daha geniş ve etkin bir değeriendirme çerçevesi oluşturulabilir. (Görlach, 2013)

Piyasa Tabanlı Araçlar	Piyasa Tabanlı Olmayan Araçlar
Çevresel Vergiler	Komuta ve Kontrol Düzenlemeleri
Emisyon Ticareti Sistemleri	Raporlama Yükümlülükleri
Yükümlülük Uygulamaları	Yeşil Teknoloji Destekleri
Depozit İade	Yeşil Finansmanın Önündeki Engellerin Kaldırılması
Ters Teşvikler	Gönüllü Yaklaşımlar

Tablo 1 İklim Politikası Araçları

2.1. Piyasa Tabanlı Olmayan Araçlar

Komuta ve kontrol düzenleme araçları standartlar belirleyerek doğrudan düzenleyici müdahaleyi empoze etme amacı ile emisyon standartları, süreç/ekipman spesifikasyonları, girdi/çıktı/boşaltma limitleri, bilgi açıklama gereklilikleri ve denetimlerini kullanır. Komuta ve kontrol araçlarının uygulanmasına örnek olarak belirli ürün ve uygulamaların yasaklanması veya çerçeve, performans ve teknoloji standartlarının oluşturulması verilebilir.

Komuta ve kontrol düzenleme araçları firmaların yenilik yapması için doğrudan bir teşvik sağlamadığı için eleştirilmektedir. Ancak, politikacılar önemli bir sorunla karşı karşıya kaldıklarında ve piyasaya tabanlı bir aracı desteklemek için çok

az bilgiye sahip olduklarında, bu araçlardan bir başlangıç noktası olarak faydalanabilirler.²

Raporlama yükümlülükleri genellikle gelecekteki mevzuatın temelini oluşturan veya diğer araçların bir parçasını oluşturan, herhangi bir piyasaya bağlı olmayan araçlardır. Devlet kurumlarına sunulan bilgi düzeyini artırmayı amaçlar. Örneğin bu uygulamalar çevresel kirlilik emisyonlarının ölçülmesi için toplumsal farkındalığı artırmaya hizmet edebilir. Sera gazı emisyonlarına ilişkin raporlama kurallarını belirleyen İzleme Mekanizması Yönetmeliği (MMR) de bu uygulamalara örnek olarak verilebilir.

Yeşil teknoloji destekleri, temiz teknolojilerin benimsenmesinin teşvik edilmesine veya temiz teknolojiler üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin artırılmasına yönelik araçlardır. Bu araçlar değişen derecelerde piyasa unsurlarını içermesine rağmen, genellikle güçlü düzenleyici müdahale içerirler ve belirgin teknoloji özelliklerine sahiptirler. Karbon yakalama ve depolama (CCS) ve yenilenebilir enerji demonstrasyon projelerini finanse eden NER 300 programları bu tür desteklere örnektir. (Görlach, 2013).

Yeşil finansmanın önündeki engellerin kaldırılması, denklemin talep tarafında bulunan ve çevre dostu ürün ve uygulamaların kullanımını destekleyen önlemlerdir. Bu destekler, vergi indirimleri, sermaye indirimleri, doğrudan ödemeler veya sübvansiyonlu krediler yoluyla verilebilir. Bu enstrümanlar ekonomik teşvikler içermektedir ancak enerji ürünü fiyatlarını veya sera gazı emisyonlarını kendi başına

² www.climatepolicyinfohub.eu

etkilemek yerine oldukça spesifik teknoloji uygulamalarını teşvik etmedikleri için piyasaya tabanlı olmayan araçlar olarak sınıflandırılmışlardır.

Gönüllü Yaklaşımlar ise çevresel kapsamda toplumsal aktörlerin eylemlerini kültürel çevreyi değiştirerek etkilemeyi amaçlamaktadır. Dolayısıyla bu araçlar aktörleri, bilgilendirme, bilinçlendirme ve ahlaki standartlar belirleme yoluyla dolaylı olarak etkiler. Ürün etiketleme, gönüllü anlaşmalar, ödül programları örnek olarak verilebilir.

2.2. Piyasa Tabanlı Araçlar

Piyasa Tabanlı Araçlar (PTA), ekonomik teşvikler vasıtası ile toplumsal aktörlerin davranışlarını dolaylı etkileyen düzenleyici araçlardır. Daha detaylı bir ifade ile PTA'lar kirleticileri teşvik etmek için piyasaları, fiyatları ve diğer ekonomik değişkenleri kullanarak olumsuz çevresel dışsallıkların etkilerini azaltmayı amaçlar.

PTA'lar, kamu otoritelerinin belirli bir performansı veya kullanılacak teknolojileri zorunlu kıldığı durumlarda, gönüllü anlaşmalar ve komuta-kontrol düzenlemeleri gibi diğer politika araçlarından farklıdır. Bununla birlikte, PTA'ların uygulanması, genellikle piyasanın başarısız olması durumunda meydana gelebilecek bozulmaları düzelten düzenlemeler gerektirir. PTA'lar, ekonomi veya bölge genelinde, ekonomik sektörler genelinde veya çevresel ortam (örn. su, hava) yoluyla sistematik bir şekilde uygulanabilir.

Yeni çevre ve iklim politikası araçlarının kullanımı Britanya'dan başlayarak 1990'lardan itibaren önemli ölçüde yaygınlaşmıştır ancak David Lloyd George'un 1909'da bakanlığı sırasında uygulamaya soktuğu yakıt vergisi dünyadaki ilk piyasaya dayalı çevre politikası aracı olarak varsayılabilir (Alan, 1995).

Piyasa tabanlı araçların yüksek bir dağıtım etkisi vardır ve fiyatlandırma araçları statik maliyet etkinliği açısından daha iyi performans gösterir.

Ancak bu araçlar tek başlarına uygulandıklarında, istenen değişiklikleri gerçekleştirmek için çok yüksek fiyat seviyeleri gerektirebilir. Ayrıca, yatırımcılar piyasa tabanlı araçlarla verilecek fiyat sinyallerine her zaman beklenen şekilde yanıt vermezler veya reaksiyon vermede gecikebilirler. Sonuç olarak, tüm faktörler göz önüne alındığında, bu tür araçların tek başına yeni teknolojilerin yayılımı için yeterli teşvik sağlamaması olasıdır. Bu enstrümanlar ayrıca sınırlı bölgesel emisyonlarla başa çıkmada uygun olmayabilir, çünkü ticaret alanı daraldıkça etkileri de oldukça sınırlı olacaktır.

Sonuç olarak, piyasaya tabanlı iklim politikası araçları uygun biçimde uygulandıklarında, maliyet etkinlik açısından daha uygun bir şekilde işlev görebilir. Ancak bu enstrümanlar kendilerine özgü özellikleri nedeniyle zaman tutarsızlığı, işlem maliyetleri, bilgi asimetrisi ve teşviklerin bölünmesi gibi piyasa hataları tehlikeleriyle karşı karşıyadırlar. Bu sebepler nedeni ile, bu araçların başarı oranını artırmak için komuta ve kontrol araçları ve yeşil teknoloji desteği gibi diğer araçlarla birlikte kullanılması daha etkin olacaktır.

Karbon vergilerine ilk örnek çevre kirliliği ile mücadele kapsamında 1991'de İsveç'te uygulandı. Bundan yaklaşık 20 yıl sonra Hindistan (2010) ve Şili (2014) hükümetleri İsveç'i takip etti.

Çevresel vergilendirme fikri ilk olarak Arthur Cecil Pigou tarafından ortaya atılmıştır. Pigou, "Refah Ekonomisi" adlı kitabında, piyasa verimsizlikleriyle ilgili çok tartışılan dışsallıklar sorununa bir çözüm getirerek, ekonomik faaliyetlerin insanlar

zerindeki evre kirliliği gibi olumsuz yan etkilerini azaltmak için bir vergi fikrini ortaya atmıştır. Buna göre evre vergileri, ideal olarak bu mal veya hizmetin üretimi ve/veya tüketiminden kaynaklanan çevresel dışsallıkları yansıtması için mal veya hizmetin fiyatına doğrudan eklenmektedir.

Maliyetlerdeki bu artış genellikle vergi yoluyla son tüketiciye yansıtılır, böylece kirliliğin olumsuz etkisi tüketicilere ve endüstriye mümkün olduğunca az zarar verecek şekilde azaltılabilir ve toplumsal refah en üst düzeye çıkarılır.

Karbon vergisi, dışsallığı içselleştirir ve ödeme sisteminin kolay ve öngörülebilir bir şekilde yönetilmesini sağlar. Vergiler, emisyon izinlere göre daha düşük uyum maliyetlerine sahiptir ve sonuç olarak daha esnektir. Ancak karbon vergisi sonucu, elde edilen gerçek emisyon azaltım miktarı, kirleticilerin marjinal azaltma maliyetlerinin bilinmemesi nedeniyle önceden tam olarak kestirilemez.

Diğer taraftan, evre vergileri ekonomideki girdi faktörlerinin görece değerlerini etkiler. Örneğin enerji fiyatlarının yükselmesi ile elde edilecek gelirler, işçilik gibi diğer alanlarda vergi indirimlerine harcanırsa, bu etki katlanarak artar. Bu nedenle vergi, ifte temettü üretme, yani evre sorunlarıyla mücadele etme ve diğer alanlarda vergilendirmeyi azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak, etkin bir evre vergisinin bir diğer temel özelliği, vergi tabanını aşındırmasıdır (Guerin, 2003).

Bununla birlikte, talebin düşük fiyat esnekliği nedeniyle vergiler, hedef miktarlarda azalma sağlamada emisyon izinlerine göre daha az etkilidir. Sunulan diğer alternatif politikaların aksine, vergi kirletici davranışlarını değiştirmeyebilir. Daha yüksek karbon vergilerinin düşük gelirli ailelere daha ağır bir yük getirme riski de dikkate

alınmalıdır. Daha da kötüsü, daha az kirliliğin daha az getiri demek olduğu düşünülürse, vergi ile hedefleri arasında çelişkiler olabilir.

Ayrıca, karbon vergilerinin küresel ısınmayla ulusal düzeyde mücadele etmek için bir politika aracı olarak kullanılması durumunda, önlemlerin sınır ötesi etkinliğinin garantisi yoktur ve çevresel bütünlük belirsizdir. Bu bağlamda, vergileri Avrupa düzeyinde bir iklim politikası aracı olarak kullanmanın ana dezavantajı, üye devletler arasında vergilerin uygulamaya konması ve ayrıntılı bir politika tasarımıdır (vergi oranları ve vergi matrahları gibi). AB genelinde bu konularda tam bir fikir birliğine varılması çok zor olacağı için, karbon vergilendirmesinin Avrupa düzeyinde düşük uygulanabilirliği olan bir politika aracı olduğu söylenebilir.

AB'deki en yaygın çevre vergileri, enerji tüketim ve araçlara uygulanan ek vergileridir. AB, ısınma, yakıt veya elektrik olarak kullanılan enerji ürünleri için enerji vergilendirmesinde asgari vergi oranlarını belirlemektedir, ancak birçok üye devlet muafiyetler veya indirimler de uygulamaktadır. Ayrıca, bu asgari vergi oranları, yakıtların karbon içeriğine değil, esas olarak ağırlık veya hacme dayalıdır.³

Ters Teşvikler, çevreye zararlı faaliyetler ve ürünler için sübvansiyonların kaldırılmasını ifade eder. Buna örnek olarak, fosil yakıtların çıkarılması veya üretimi için verilen sübvansiyonların, enerji vergilerinden muafiyetlerin kaldırılması verilebilir. Örneğin, 2012'de AB üye devletleri tarafından kömürden elektrik üretimine (taşkömürü ve linyit) sağlanan yatırım destekleri ve vergi muafiyetlerini içeren toplam destek miktarı yaklaşık 10 milyar Avroya ulaştı, bu da bu yatırımların karlılığını,

³ Eurostat

özellikle yatırım hibeleri, muafiyetler şeklinde artırdı.⁴ Bu teşviklerin azaltılması ve ortadan kaldırılması ters teşviklere birer örnektir.

Yükümlülük uygulamaları, ilgili tarafları ortaya çıkan ek maliyetler yoluyla dış maliyetleri içselleştirmeye iten yükümlülük araçlarıdır. **Depozito iade sistemleri** ise, atıkların uygunsuz şekilde bertaraf edilmesi için tüketicilerden bir ön ödeme talep eder ve atığın doğru toplama noktasına geri gönderilmesi karşılığında depozit iade edilir.

2.3. Emisyon Ticareti Sistemleri

Coase (1960), Dales (1968) ve Montgomery (1972) dahil olmak üzere birçok yazar, çevresel kirliliğin azaltımı için özel piyasalar yaratmak adına teorik argümanlar önerdiler. Bu erken teorik çalışmalara dayanarak ABD Çevre Koruma Ajansı, bu yeni tür politika aracını kullanan dünyadaki ilk devlet kurumu oldu ve hava kirliliğine neden olan belirli gazlar için piyasalar yaratmaya dayalı çeşitli programlar tasarladı. Amerika Birleşik Devletleri Asit Yağmuru, Bölgesel Temiz Hava Teşvik Piyasası ve NOX programları, kükürt dioksit ve nitrojen oksitleri azaltım mekanizmaları olarak emisyon ticaret planlarını içeriyordu. Bu programlar, diğer azaltma mekanizmalarından daha uygun maliyetli olmakla birlikte, istenen emisyon azaltımlarına ulaşmada başarılı olmuşlardır.

Dales emisyon ticaretini, bir alıcının emisyon azaltımına yönelik olarak taahhüt ettiği hedefleri yerine getirmede kullanacağı ve yapacağı indirim hakkını ifade eden “krediler” karşılığında, karşı tarafa ödeme yapması sonucu ortaya çıkan sözleşmeler olarak tanımlanmıştır. Emisyon ticareti, ülkelerin ve firmaların emisyon azaltımı

⁴ www.climatepolicyinfohub.eu

faaliyetleri sonucu, azaltılan her bir tona eşdeğer emisyon için “emisyon izni” veya “emisyon kredisi” olarak isimlendirilen hakların ticaretidir (Lecocq ve Capoor, 2005).

Emisyon ticaretinin doğuşundaki temel amaç, çevre kirliliğini önlemeye yönelik olarak atılan adımlarda, taahhütlerini yerine getiremeyen taraflar için devreye giren yaptırım uygulama yöntemi olan komuta-kontrol yönteminin eksik yönlerini piyasa mekanizması içerisinde bertaraf etmektir.

Emisyon ticareti, emisyon vergisinin muadili olarak kabul edilebilir. Vergilere benzer olarak emisyon ticaret sistemleri de ekonomik teşvikler üreterek toplumsal aktörlerin davranışlarını değiştirmeyi ve kirliliği azaltmayı hedefler. Ancak, belirli bir mal veya hizmetin fiyatına eklenen sabit bir tutar yerine, emisyon üst sınırı ve ticaret (cap and trade) sisteminde başlangıç noktası, politika yapıcılar tarafından belirlenen zararlı bir maddenin fiziksel emisyon miktarına ilişkin üst sınırdır. Düzenleyici otorite belirlediği maksimum sınırlara göre kirletici tarafların her birimine belirli miktarlarda emisyon izinleri verir. Emisyon izinleri piyasada düzenlemeye tabi firmalar arasında arz ve talep dengesi ile serbest piyasa koşullarında belirlenen izin fiyatı ile ihtiyaçlarına göre bunları alıp satabilir. Bu durumda talep firmaların gerçek emisyon salımı ile verilen emisyon kotası arasındaki fark, arz ise otorite tarafından yayınlanan emisyon ödeneklerinin tamamıdır. Düzenleyici, bunları kimin teslim etmeyi taahhüt ettiğini tanımlamalıdır.⁵

Başka bir ifade ile, emisyon ticareti sistemi kotaya dayalı bir yaklaşıma dayanır. Kanun yapıcı otorite tarafından belirli bir sektör veya endüstri için emisyon kotaları tahsis edilir. Bu kotalar, genellikle belirli bir dönemde (örneğin yıllık) emisyonların ne

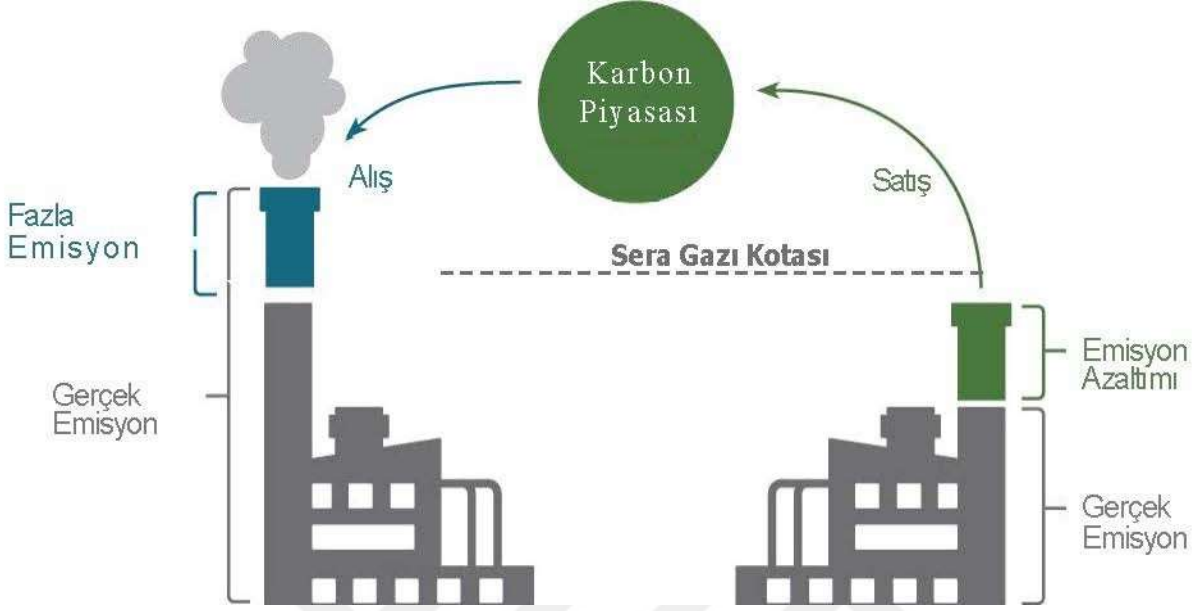
⁵ (tutor2u, 2017)

kadar azaltılması gerektiğini belirler. Emisyon kotaları, emisyon ticareti yoluyla ticarete konu olan "emisyon kredileri" veya "emisyon izinleri" olarak adlandırılan birimlere bölünebilir. Bu krediler veya izinler, belirli miktarda sera gazı emisyonunu temsil eder. Sektördeki katılımcılar, sahip oldukları emisyon kredilerini veya izinleri alım satım yaparak elde edebilirler. Böylelikle, bir emisyon ticareti piyasası oluşturulmuş olur. Bu piyasada, emisyonlarını daha fazla azaltan veya ihtiyacından az emisyon izni alan katılımcılar, fazla emisyon izinlerini serbest piyasa koşullarında satabilirler. 2 firma arasındaki emisyon izni ticareti şekil 6'da tasvir edilmiştir.

Emisyon ticareti, emisyon azaltımını ekonomik ve verimli bir şekilde teşvik edebilir ve katılımcılar kendi maliyetlerini düşürmek için fazla emisyon izinleri satarak gelir elde edebilir. Bu yöntem piyasa tabanlı bir yaklaşım olduğundan, emisyon azaltımını teşvik etmek için piyasa mekanizmaları kullanır.

Ancak emisyon ticaret sistemi tasarımı ve uygulaması karmaşık olabilir. Bu nedenle kotaların ve izinlerin adil bir şekilde dağıtılması ve takip edilmesi önemlidir. Yasadışı emisyonlar, emisyon ölçümlerinde ve ticaretinde sahtekarlık gibi sorunlar yaşanabilir. Bu nedenle sıkı denetim ve düzenlemeler gereklidir.

Emisyon üst sınır ve ticaret sistemleri emisyonları sınırlandırdığı için teoride vergilerden daha güvenilirdir. Ancak, uygulamada durum vergilerden çok daha



Şekil 6 Emisyon Ticareti (Üst sınır ticaret sistemi)

karmaşık hale gelebilir ve etkileri beklendiği kadar hızlı gelişmeyebilir. Resesyon durumunda ekonomik aktivite ve dolayısıyla emisyonlar azalacaktır ve tahsis talebinin azalması da tahsis fiyatlarını aşağı çekecektir. Bu durumda emisyon üst sınırına ulaşmak için başka bir eylem gerekmediğinden, düşük tahsis fiyatı, düşük karbon teknolojilerine yatırım için ve kilitleme etkisi (lock-in effect) oluşturabilecek ve emisyonların azaltımı için bir teşvik unsuru olamayacaktır. Bu durum, emisyon ticaret sisteminin (ETS) teorik maliyet etkinliğini tehdit ederek gelecekteki emisyon azaltımlarını daha pahalı hale getirebilir.

Üst sınır ve ticaret (cap and trade) sistemi dışında, temel ve kredi (baseline and credit) ve karbon denkleştirme (carbon offsetting) diğer emisyon ticareti türleridir.

Temel ve kredi sisteminde, düzenleyici otorite emisyon izinlerini katılımcıların salınım azaltıcı projeleri onaylandıktan sonra kendilerine vermektedir. Projelerin

onaylanması ile birlikte düzenleyici otorite katılımcılar için, normal seyir halindeyken ulaşılabilecek salınım seviyesi olarak ifade edilebilen temeli belirlemektedir. Bu şekilde başlayan taahhüt dönemi sonunda, ilgili otorite tarafından temel tutar ile kaynaktan yapılan toplam salınım miktarı karşılaştırılmaktadır. Dönem sonunda, gerçekleşen emisyonu temelden düşük olan katılımcılar aradaki fark kadar kredi elde etmekte ve bunları serbestçe satabilmektedir. Gerçekleşen emisyonu temelden fazla olan katılımcılar ise, dönem başında belirlenen taahhütlerine ulaşabilmek için aradaki fazlalıkla eşdeğer karbon kredisi satın almaktadırlar (Tunahan, 2010; Haities, 2002).

Karbon denkleştirme sistemi ise karbon salınımının azaltılmasına ek bir mekanizma olarak uygulanmakta ve dünyanın herhangi bir yerinde salınımı yapılan sera gazının başka bir yerden satın alınması veya atmosferde bu miktarda sera gazı hapsedilerek etkisinin giderilmesi temeline dayanmaktadır. Diğer bir ifade ile katılımcının, yaptığı fazla salınım karşılık gelen miktar kadar, başka bir yerde, karbon tasarrufu sağlayan projelere finansal destek sağlaması ya da bu projelerden karbon sertifikası satın alması yoluyla fazla salınımını bertaraf etmesidir.

Teorik olarak küresel anlamda ilk ETS, 1997 Kyoto İklim Değişikliği Protokolü sırasında kurulmuştur ancak ETS'ler bu ilk girişimden bu yana önemli değişimlere uğramıştır (Morgan, 2006). Zaman içinde modern ETS sistemleri gitgide daha fazla sektör içermeye, daha gelişmiş emisyon takibi sistemlerine ve daha agresif emisyon üst sınırlarına sahip olmaya başladılar. 2023 itibarıyla dünya genelinde, emisyonları fiyatlandıran farklı karbon piyasası türleri olan 32 ETS ve 36 karbon vergi sistemi dahil olmak üzere yaklaşık 70 karbon fiyatlandırma girişimi vardır (Dünya Bankası, 2022a).

Dünya genelinde ETS'ler bölgesel, ulusal veya uluslararası olmak üzere çok çeşitli yapılara sahiptir. ETS'lerde işlem gören kontratların fiyatlandırması, hangi sektörlerin kapsandığına, piyasanın ne kadar olgunlaştığına ve hangi dengeleyici mekanizmaların kullanıldığına (fiyat tabanları/tavanları veya istikrar rezervleri gibi) bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Örneğin, Çin hükümeti uzun yıllardır ETS'leri denemektedir ve ülkenin birçok bölgesinde pilot bölgesel ETS'ler mevcuttur. Çin hükümetinin kısa vadeli planı bu bölgesel ETS'leri merkezi bir sistemde birleştirmektir.

ETS ile kapsanan kuruluşlar ve sektörler emisyon azaltım oranlarında ciddi bir etkiye sahiptir. Bazı ETS'ler, yüksek emisyonu sahip kuruluşların çoğunun katılmasını gerektirir, ancak ABD ve Çin'deki bazı pilot ETS'ler spesifik endüstriler tarafından düzenlenir (imalat, enerji gibi). Yapısı ne olursa olsun, ETS'ler tahsis edilen izinlerin toplam miktarını kontrol ederek emisyonları azaltmayı ve aynı anda yapay olarak veya piyasa talebi yoluyla her bir iznin değerini artırmayı amaçlar. ETS'ler, arz ve talebin emisyon azaltım maliyetini (abatement) belirlemesine izin veren piyasaya bazlı yapılarından dolayı muhtemelen en uygun maliyetli emisyon azaltım yöntemidir çünkü piyasa temelli olmayan çevre politikaları genellikle büyük miktarda genel maliyetler içerir. Ancak, ETS'lerin maliyet etkin olmaları, bunların her zaman mutlaka en iyi çözüm oldukları anlamına da gelmez (Narassimhan v.d., 2018).

Sonuç olarak, ETS'lerin iklim krizini tek başına çözemeyecekleri aşikardır. Tüm sektörler için emisyonları azaltmak için kullanılan diğer politika araçlarıyla (karbon vergileri veya yenilenebilir teşvikler gibi) birlikte kullanılmalıdırlar.

Karbon piyasası çözümleri önemli emisyon azaltımları sağlayabilse de, nihayetinde iklim değişikliğini azaltma politikalarının en büyük hedefi olan sürdürülebilir kalkınmayı başarmak adına tek önemli faktör olmaktan uzaktır. Ancak, ETS'ler ile sağlanan emisyon azaltımları, yoksulluğun ortadan kaldırılması, temiz ve uygun fiyatlı enerji sağlanması, dünyadaki açlığın ortadan kaldırılması ve eşitsizliklerin azaltılması gibi sürdürülebilir kalkınma hedeflerine doğrudan katkı sağlamaktadır (Birleşmiş Milletler, 2022).

120 ülkenin Paris Anlaşmasını genişletmek için bir araya geldiği 2021 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı (COP26) sırasında, tüm ülkeler fosil yakıtlardan uzaklaşma geçişlerini hızlandırmayı, gelişmekte olan ülkelere geçişlerinde destek sağlamayı ve nihayet karbon piyasaları için normlar oluşturmayı kabul etti (Birleşmiş Milletler, 2021). Anlaşmanın karbon piyasaları bileşeni revize edilmiş Paris Anlaşmasının 6. Maddesinde detaylandırılmıştır ve ETS'ler ve karbon vergileri gibi karbon piyasası mekanizmalarına ilişkin kurallar içermektedir. 6. Madde ayrıca, gelişmekte olan ülkelerin kendi bölgesel programlarını daha düşük maliyetle deneyebilmeleri için pilot programların temelini hazırlamaktadır. 6. Maddede açıklanan ETS, aynı zamanda ülkelerin, tek bir merkezi tahsis doğrulama sistemi altında küresel bir emisyon ticareti şemasında birbirlerine izinleri transfer etmelerine olanak tanır. Yeni anlaşma, emisyon azaltımlarının en uygun maliyetli şekilde nasıl gerçekleştirilebileceğini öğrenmek için ETS pilot çalışmalarının konuşlandırılmasını da desteklemektedir (Dünya Bankası, 2022b). Sonuç olarak teoride, bu piyasaların tümü, Paris Anlaşması'na imza atan herhangi bir ülkenin emisyonları azaltmak için emisyon izinleri almasına veya satmasına olanak tanıyan küresel bir piyasa altında birleşebilir.

2.4. Dünyada Emisyon Ticareti

Kyoto Protokolünden itibaren başlayan süreçte zamanla daha fazla sayıda ülke ve bölge, sera gazı emisyonlarını azaltmak için emisyon ticareti sistemleri geliştirmekte ve uygulamaktadır. Uluslararası alanda müzakereler ile fikir birliğine varmanın zorlukları göz önüne alındığında, iklim değişikliği ile ilgili hamleler uluslararası düzeyden ulus devletlere ve bölgelere kaymaktadır. Yeni ticaret sistemlerinin tartışıldığı hızla gelişen ekonomilerde bu konuda özellikle güçlü bir dinamik görülmektedir. 2023 itibarıyla dünya genelinde emisyon fiyatlandırması sunan farklı karbon piyasası türleri olan 32 ETS ve 36 karbon vergi sistemi dahil olmak üzere yaklaşık 70 karbon fiyatlandırma girişimi vardır. Bu girişimlerin başlıcaları aşağıda detaylandırılmıştır.

Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Emisyon Ticareti Sistemleri

ABD’de ilk çevresel ticaret tasarısı deneyimi, 1970 ve 1980’lerde Temiz Hava Yasası (Clean Air Act) kapsamında kurşunlu benzini ve kloroflorokarbon salımını azaltıp bitirmeyi amaçlayan, emisyon ticareti deneyimleri ile gerçekleşmiştir. Genel anlamda ABD’deki ilk çevresel ticaret sistemleri temel ve kredi sistemleriydi. 1970 yılında Temiz Hava Yasası’ndaki değişiklik ışığında Ulusal Hava Kalitesi Standartları, sülfür oksit (SO₂) ve nitroz oksit (NO_x) ve karbonmonoksit (CO) kirleticileri için bazı standartlar geliştirmiştir.

1990 sonrası çevresel ticaret uygulamaları, çevre ile ilgili zorlayıcı komuta kontrol sistemlerinden üst sınır ve ticaret (cap and trade) programlarına doğru yönelmiştir. Bu süreçte, Temiz Hava Yasası ve Asit Yağmuru Ticareti Programı 1990 yılında

onaylanarak yasalaşmıştır daha sonra da 1992 yılında gerçekleştirilen Rio zirvesi sırasında bir iklim politikası olarak kabul edilmiştir (Vasser, 2009).

Amerika'da SO₂ ticaretinin ilk dönemi 1995-1999 yılları arasında, ikinci dönemi ise 2000 yılından sonra gerçekleşmiştir. Asit Yağmuru Programı'nın çevresel anlamda başarılı olması ve komuta kontrol programlarına göre maliyet avantajı üst sınır ve ticaret programlarının ABD genelinde yayılmasını hızlandırmıştır ve 1994 yılında nitrojen oksit (NO_T) ve sülfür oksit (SO₂) emisyonunu düşürmek için benzer programla başlatılmıştır (Parker, 2009).

Günümüzde, ABD'de federal düzeyde geniş kapsamlı bir emisyon ticaret sistemi bulunmamakla birlikte, bazı eyaletler ve bölgeler aşağıda detaylı bilgi verilen kendi emisyon ticaret programlarını oluşturmuşlardır.

Kaliforniya Emisyon Ticareti Sistemi (KET), 2012 yılında, Kaliforniya'daki büyük sera gazı emisyon kaynaklarını kontrol etmeyi ve eyaletin iklim hedeflerine ulaşmasını sağlamayı amaçlayarak, Kaliforniya Hava Kaynakları Kurulu tarafından başlatıldı. Sistem ABD'de en kapsamlı ve öncü emisyon ticaret sistemi olan Kaliforniya üst sınır ve ticaret sistemini uygulamaktadır. Bu sistem, eyaletin enerji üretimi, sanayi, ulaşım ve diğer sektörlerindeki sera gazı emisyonlarını azaltmayı amaçlamaktadır. Katılımcılar emisyon kotalarını almak veya satmak için organize bir piyasada işlem yaparlar ve sistem, serbest piyasa dinamiklerini kullanarak emisyon azaltma çabalarını teşvik etmeyi amaçlamaktadır.

Sistem dahilinde katılımcılara emisyon kotaları tahsis edilir. Eğer bir kuruluş, sahip olduğu emisyon kotalarını aşarsa, fazla emisyon haklarını satın alabilir veya

gelecekte kullanmak üzere saklayabilir. Aynı şekilde, hedeflerini aşmayan kuruluşlar fazla kotalarını satabilirler.

Kaliforniya Emisyon Ticareti Sistemi, diğer eyalet ve bölgeler için örnek bir model oluşturmuş ve emisyon ticareti programlarının etkinliğini göstermiştir. Eyalet düzeyindeki bu tür piyasa tabanlı yaklaşımlar ABD genelinde iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir araç olarak kabul edilmektedir.

Bölgesel Yeşil Ev Gazı İnisiyatifi (Regional Greenhouse Gas Initiative - RGGI), Amerika Birleşik Devletleri'nin Kuzeydoğu bölgesindeki on üç eyalet tarafından oluşturulan ve sera gazı emisyonlarını azaltmayı amaçlayan bir piyasa tabanlı iklim politikasıdır. Bu inisiyatif, enerji üretimi sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarını düşürmeyi ve sürdürülebilir enerji uygulamalarını teşvik etmeyi amaçlamaktadır.

RGGI, katılımcı eyaletlerin enerji üretimi sektöründe faaliyet gösteren büyük sera gazı emisyon kaynakları için bir emisyon ticaret sistemi oluşturmuştur. Katılımcı kuruluşlar emisyon kotaları alır ve bu kotaların belirli bir yüzdesini aşmamak için çaba gösterirler. Eğer bir kuruluş, emisyon kotalarını aşarsa fazla kotaları satabilir veya daha fazla emisyon kotası almak için başka kuruluşlardan kotalar satın alabilir.

RGGI, katılımcı eyaletlerin enerji üretimi sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarını belirli bir hedefe indirmeyi amaçlar. İlk dönemde (2009-2014) %10'luk bir azaltma hedefi belirlenmiştir, daha sonraki dönemde bu hedef daha da sıkılaştırılmış ve emisyon kotaları azaltılmıştır.

RGGI, emisyon kotalarının satışından elde edilen gelirleri kullanarak çeşitli iklim projelerine yatırım yapmaktadır. Bu projeler arasında enerji verimliliği, yenilenebilir

enerji, sera gazı emisyonlarını azaltma, sürdürülebilirlik ve hava kalitesi gibi alanlar yer almaktadır. Gelirler ayrıca enerji tüketici maliyetlerini dengelemek ve enerji faturalarını düşürmek amacıyla da kullanılmaktadır. RGGI, iklim değişikliği ile mücadelede ABD'de eyalet düzeyindeki iş birliğinin iyi bir örneğini temsil ederken, aynı zamanda enerji sektörünün dönüşümü ve sürdürülebilirlik konularında da öncü bir rol oynamaktadır.

Batı İklim İttifakı (Western Climate Initiative - WCI), Kuzey Amerika'da yer alan bazı Amerika Birleşik Devletleri eyaletleri ile Kanada eyaletlerinin, sera gazı emisyonlarını azaltma amacıyla bir araya geldiği bir işbirliği ve piyasa tabanlı iklim politikası inisiyatifidir. WCI, özellikle enerji üretimi sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarını kontrol etmeyi ve azaltmayı hedefler.

Batı İklim İttifakı (WCI), 2007 yılında Kaliforniya, Oregon, Washington eyaletleri ile Britanya Kolumbiyası, Manitoba, Quebec gibi Kanada eyaletleri tarafından oluşturulan bir iş birliği platformudur. Bu eyaletler, sera gazı emisyonlarını azaltma taahhüdü altında bir araya gelerek piyasa tabanlı bir yaklaşım benimsemiştir. WCI, katılımcı eyaletlerin enerji üretimi sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarını kontrol etmek için bir emisyon ticareti sistemi oluşturmuştur. Katılımcı kuruluşlar, emisyon kotaları alarak emisyonlarını bu kotaların altında tutmaya çalışırlar. Sistem, emisyon kotalarını alıp satmanın yanı sıra katılımcı eyaletler arasında kotaların ticaretini de içermektedir.

Batı İklim İttifakı, katılımcı eyaletlerin enerji üretimi sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarını belirli hedeflere indirgeme amacı güder. Bu hedefler genellikle belirli yıllar için emisyon azaltma yüzdeleri şeklinde belirlenir ve zaman içinde sıkılaştırılabilir.

Batı İklim İttifakı (WCI), Kuzey Amerika'da piyasa tabanlı emisyon ticareti programlarının oluşturulması ve uygulanmasının başarılı bir örneğini sunmaktadır. İş birliği, katılımcı eyaletlerin iklim değişikliği ile mücadeledeki taahhütlerini pekiştirmekte ve sürdürülebilir enerji uygulamalarını teşvik etmektedir.

Çin Emisyon Ticareti Sistemleri

Çin Emisyon Ticaret Sistemi'nin tarihsel gelişimi, ülkenin iklim değişikliği ile mücadele çabalarının bir parçası olarak zamanla değişmiştir. Çin, dünyanın en büyük ikinci ekonomisi ve en büyük sera gazı emisyon kaynaklarından birine sahip olduğundan, emisyonları azaltma ve sürdürülebilir kalkınma yoluyla ilerleme konuları büyük bir öneme sahiptir. Kyoto Protokolüne taraf olmasını takiben, Çin 2000'lerin başında iklim değişikliği konusunda farkındalık kazanmaya başlamıştır ve ülke, enerji verimliliğini artırma, temiz enerji kaynaklarını teşvik etme ve çevresel sürdürülebilirlik konularında ilk adımlarını atmaya başlamıştır.

Çin, 2010'ların başlarında bazı pilot emisyon ticaret projeleri ve denemeler başlatmıştır. Örneğin, Şanghay, Pekin ve diğer bazı bölgelerde yerel emisyon ticaret sistemleri oluşturulmuş, akabinde, 2017 yılında Çin hükümeti "Karbondiyoksit Emisyon Hakkı Yönetimi Geçici Tedbirleri" duyurulmuştur. 2017-2020 dönemi için emisyon ticareti pilot projeleri genişletilmiştir. Bu dönemde, enerji üretimi, çelik ve kimya gibi sektörlerde pilot emisyon ticareti sistemleri devreye alınmış ve bu deneyimler, Çin'in ulusal bir emisyon ticaret sistemi oluşturması için temel teşkil etmiştir.

2021 yılında, Çin resmi olarak kendi ulusal emisyon ticaret sistemini başlatmıştır. Bu sistem, dünyanın en büyük emisyon ticaret sistemi olarak kabul edilmektedir.

Başlangıçta enerji üretimi sektörünü kapsayan bu sisteme, ilerleyen dönemlerde diğer sektörlerin de dahil edilmesi planlanmaktadır. Çin Emisyon Ticaret Sistemi, belirli sektörlerde emisyon azaltma hedeflerine ulaşmayı amaçlar ve emisyon kotaları ticareti üzerine kurulmuştur.

Çin hükümeti 2060 yılına kadar karbon nötr bir ekonomiye ulaşmayı taahhüt etmiştir. Bu hedeflere ulaşmak için Çin Emisyon Ticaret Sistemi, ülkenin sera gazı emisyonlarını azaltma çabalarının temel bir aracı olarak önemli bir rol oynayacaktır.

Avustralya Emisyon Ticaret Sistemi

Avustralya Emisyon Ticaret Sistemi, Avustralya'nın sera gazı emisyonlarını azaltma çabalarını desteklemek amacıyla oluşturulan bir piyasa tabanlı iklim politikasıdır. Sistem, Avustralya Çevre Bakanlığı tarafından 2012 yılında başlatıldı ve enerji üretimi ve endüstri sektörlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltmayı hedefliyordu. Sistem, belirli büyük emisyon kaynaklarını kapsamaktaydı. Katılımcı kuruluşlar, emisyon kotaları olarak belirlenen kotaları aşmamak için çaba gösteriyorlardı ve fazla kotaları olan kuruluşlar bu fazla kotaları satarak gelir elde ediyorlardı.

Ancak sistem, Avustralya'nın genel sera gazı emisyonlarını belirgin şekilde azaltma amacını gerçekleştirilemedi. 2014 yılında, Avustralya hükümeti sistemi kaldırmaya karar verdi ve yerine karbon fiyatlandırma yaklaşımını getirdi. Bu yaklaşım, enerji üreticilerine ve büyük endüstriyel kuruluşlara belirli bir birim başına emisyon maliyeti yükledi. Ancak, bu yaklaşım da 2014'ten sonra kaldırıldı. Avustralya, 2020'lerde değişen hükümetler ve iklim politikaları nedeniyle emisyon

azaltma yaklaşımını yeniden değerlendirdi. Bazı eyaletler ve bölgeler kendi iklim politikalarını geliştirdi ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelik teşvikler artırıldı.

Kanada Emisyon Ticareti Sistemi

Kanada, sera gazı emisyonlarını azaltma ve sürdürülebilir bir gelecek oluşturma amacıyla çeşitli emisyon ticareti ve karbon fiyatlandırma sistemleri geliştirmiştir. Kanada'nın farklı bölgeleri, emisyon ticareti veya karbon piyasası gibi piyasa tabanlı yaklaşımları benimsemiş veya kendi iklim politikalarını oluşturmuşlardır.

Kanada hükümeti, 2018 yılında federal bir karbon fiyatlandırma sistemi başlatmıştır. Bu sistem, sera gazı emisyonlarını azaltmayı amaçlamaktadır ve iki temel bileşen içerir: "Karbondiyoksit Eşdeğeri Fiyatlandırma" ve "Aynı Değerli Önlem Planı".

Karbondiyoksit eşdeğeri fiyatlandırma bileşenine göre Kanada'da bulunan eyaletler ve bölgeler, belirli bir eşik seviyesinin üzerindeki sera gazı emisyonlarını düşürmekte zorluk yaşarlarsa, federal hükümetin belirlediği bir karbon fiyatını ödemek zorundadırlar. Bu fiyat, yıllar içinde artarak emisyon azaltımını teşvik etmeyi amaçlar.

Aynı değerli önlem planı bileşenine göre ise eyaletler ve bölgeler, kendi emisyon azaltım planlarını oluşturabilir ve uygulayabilirler. Eğer federal hükümet, eyalet veya bölgenin planının yeterli olmadığına karar verirse, ek bir karbon fiyatı uygulanabilir.

Kanada Karbon Piyasası (Alberta ve Kubek): Alberta ve Kubek (Quebec), emisyon ticaretine dayalı karbon piyasası sistemleri oluşturmuşlardır. Her iki eyalet de enerji üretimi, sanayi ve ulaşım gibi sektörleri kapsayan emisyon ticareti programları yürütmektedir.

Alberta, enerji endüstrisinden kaynaklanan emisyonları azaltma hedefi doğrultusunda kendi emisyon ticareti sistemi oluşturmuştur. Katılımcılar, belirli emisyon kotalarını alır ve bunu aşarsa diğer katılımcılardan izin satın almak zorundadır.

Kubek, Kaliforniya ile birlikte Kaliforniya-Kanada Karbon Piyasası sistemi içinde yer almaktadır. Kubek'in üst sınır ticaret programı, enerji üretimi, sanayi ve ulaşım sektörlerinden kaynaklanan emisyonları kapsar.

Kanada'nın emisyon ticareti sistemleri, ülkenin iklim değişikliği ile mücadele stratejilerinin ve sürdürülebilirlik hedeflerinin bir parçasını oluşturmaktadır. Bu sistemler, sera gazı emisyonlarını azaltma çabalarını teşvik etmeyi amaçlar ve farklı bölgelerin kendi iklim politikalarını oluşturmalarına olanak tanır.

Japonya Emisyon Ticareti Sistemi

Japonya, sera gazı emisyonlarını azaltma çabalarını desteklemek ve sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmek amacıyla çeşitli emisyon ticareti ve karbon piyasası mekanizmaları üzerinde çalışmıştır. Ancak, Japonya'nın emisyon ticareti sistemleri diğer ülkelerin sistemlerine kıyasla daha kısıtlı veya gelişme aşamasındadır.

Japonya Karbon Piyasası (Tokyo Metropolü ve Saitama Eyaleti): Japonya'da, Tokyo Metropolü ve Saitama Eyaleti, 2010 yılında bir emisyon ticareti sistemi oluşturmuştur. Bu sistem, yerel düzeyde sera gazı emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir. Katılımcılar, emisyon kotalarını aşmamak için çaba gösterirler ve fazla emisyon kotası olanlar bu fazla kotaları satabilir.

Japonya Ulusal Karbon Piyasası: Japonya, 2020 yılında Paris Anlaşması hedeflerine ulaşmak için daha kapsamlı bir ulusal emisyon ticareti sistemi planlamıştır. Bu sistem, enerji üretimi ve endüstri sektörlerini kapsayacak şekilde tasarlanmıştır, ancak detaylar ve uygulama zamanlaması henüz kesinleşmemiştir.

Japonya, emisyon ticareti sistemlerinin yanı sıra uluslararası iş birliği ve projeler yoluyla da iklim değişikliği ile mücadele çabalarını sürdürmektedir. Japonya, özellikle gelişmekte olan ülkelerde sera gazı azaltım projelerine destek sağlamak amacıyla finansal kaynaklar tahsis etmektedir. Japonya ayrıca, enerji üretimi ve kullanımını dönüştürerek sera gazı emisyonlarını azaltmayı hedefleyen stratejik enerji planları ve politikalar geliştirmiştir. Bu çerçevede, yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım, enerji verimliliği artırma ve nükleer enerji konuları ele alınmaktadır.

Japonya'nın emisyon ticareti sistemleri ve diğer iklim politikaları, ülkenin Paris Anlaşması hedeflerine ulaşma çabalarını yansıtmaktadır. Ancak, diğer bazı ülkelerin emisyon ticareti sistemlerine kıyasla Japonya'nın sistemleri daha kısıtlı veya gelişme aşamasındadır.

Güney Kore Emisyon Ticareti Sistemi

Güney Kore, sera gazı emisyonlarını azaltma çabalarını desteklemek amacıyla emisyon ticareti sistemleri ve diğer piyasa tabanlı yaklaşımlar geliştirmiştir. Ülke, enerji üretimi, sanayi ve ulaşım gibi ana sektörlerde emisyonları azaltmayı hedeflemektedir.

Güney Kore Emisyon Ticareti Sistemi (K-ETS): Güney Kore, 2015 yılında Emisyon Ticareti Sistemi (Korean Emissions Trading Scheme - K-ETS) adlı bir ulusal emisyon ticareti sistemi başlatmıştır. Bu sistem, ülkenin enerji üretimi ve endüstri

sektörlerini kapsamaktadır. K-ETS, Güney Kore'nin Paris Anlaşması hedeflerine ulaşma çabalarını desteklemeyi amaçlamaktadır.

K-ETS, enerji üretimi ve sanayi sektörlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını kapsar. Büyük emisyon kaynaklarını içeren kuruluşlar (enerji şirketleri, sanayi tesisleri vb.), emisyon kotaları alırlar ve bu kotaların altında emisyon üretmeye çalışırlar. Eğer bir kuruluş emisyon kotalarını aşarsa, fazla emisyon hakları satın alabilir veya gelecekte kullanmak üzere saklayabilir. Aynı şekilde, hedeflerini aşmayan kuruluşlar fazla kotalarını satabilirler.

Güney Kore, emisyon ticareti sistemi dışında enerji verimliliğini artırma ve temiz enerji kaynaklarını teşvik etme amacıyla çeşitli politika ve projeleri hayata geçirmiştir. Bu tür teşvikler, emisyon azaltım çabalarını desteklemeyi hedefler.

Hindistan Emisyon Ticareti Sistemi

Hindistan, sera gazı emisyonlarını azaltma ve sürdürülebilir bir gelecek oluşturma amacıyla emisyon ticareti sistemleri ve diğer piyasa tabanlı yaklaşımlar geliştirmeye başlamıştır. Ancak, Hindistan'ın emisyon ticareti sistemleri diğer ülkelerin sistemlerine kıyasla daha kısıtlı ve henüz gelişme aşamasındadır.

Hindistan, iklim değişikliği ile mücadele çabalarını desteklemek amacıyla Performans Bazlı Finansman (Performance Linked Incentives, PLI) gibi yaklaşımları benimsemiştir. PLI, özellikle enerji verimliliği ve temiz enerji projelerine finansal teşvik sağlama amacı gütmektedir.

Ayrıca Hindistan, yenilenebilir enerji kaynaklarını teşvik etmek amacıyla Yenilenebilir Enerji Sertifikaları (Renewable Energy Certificates, REC) sistemi oluşturmuştur. Bu sistem, yenilenebilir enerji üreten kuruluşlara belirli bir sertifika

tahsis eder ve bu sertifikaların ticaretine olanak tanır. Kuruluşlar, yenilenebilir enerji üretimi yoluyla sera gazı emisyonlarını azalttıklarını kanıtlamış olurlar.

Bunlara ek olarak, Hindistan, enerji verimliliğini teşvik etmek amacıyla Enerji Verimliliği Etiketleri (Energy Efficiency Labeling - EEL) programını hayata geçirmiştir. Bu program, enerji verimliliği yüksek ürünleri tanımlamak ve tüketicilere bilgi sağlamak için kullanılır. Hindistan, enerji verimliliği projelerine finansal destek sağlamak amacıyla Ulusal Enerji Verimliliği Fonu da (National Energy Efficiency Fund-NEEF) oluşturmuştur. Bu fon, enerji verimliliğini artırmayı hedefleyen projelere yatırım yapmayı amaçlar.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM AVRUPA BİRLİĞİ EMİSYON TİCARET SİSTEMİ (AB ETS)

3.1. AB ETS'nin Oluşumu

AB Emisyon Ticareti Sistemi (EU Emissions Trading System, ETS) serüveni 2000 yılında, 1997 yılında yürürlüğe giren Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİÇDS) sonrası dönemde, diğer mevcut programları tamamlamaya ve Kyoto Protokolü tarafından belirlenen hedeflere ulaşmaya odaklanacak bir emisyon ticaret planı kurulması hakkında bir yeşil belgenin yayınlanmasıyla başladı. AB Komisyonu, 2003 yılında, 2003/87/ EC sayılı Emisyon Ticareti Direktifi ile izinlerin %95'inin ücretsiz olarak tahsis edileceği ve 2005'ten 2007'ye kadar sürecek ilk faz döneminin özelliklerini ortaya koydu. Bu ilk fazı 2008'den 2012'ye kadar uzanan ve izinlerin %90'ının ücretsiz tahsis edileceği tam uygulama dönemi takip etti (Ellerman, 2016).

ETS Programı Avrupa Birliğini Kyoto hedeflerine ulaştıracak en önemli program ve uluslararası alanda uygulanan ilk emisyon ticareti sistemidir. AB ETS, üst sınırın sistemdeki bir katılımcı tarafından salınabilecek toplam sera gazı miktarını ifade ettiği üst sınır ve ticaret temelinde çalışmaktadır. AB ETS, düzenlemeye tabi firmaların ücretsiz emisyon tahsislerini kullanabileceği veya satabileceği emisyon salınımı yüksek belirli sektörleri kapsar. Sistem dahilindeki sektörlerde faaliyet gösteren ancak emisyon sınırını aşan firmalar tasfiye fiyatını ödeyerek daha az emisyon salımı yapan diğer firmalardan ek emisyon izin sertifikası (European Union Allowance, EUA) almalıdır. EUA'nın birim fiyatı, teoride arz ve talep arasındaki serbest piyasa dengesine ek olarak, AB'nin politika hedefleri arasındaki karmaşık

etkileşimler, teknoloji maliyetleri ve piyasa kuralları gibi piyasa yapısı gibi faktörler tarafından belirlenir. (Blyth ve Bunn, 2011)

AB ETS, 2005'ten başlayarak dört faz döneminden geçmiştir. 2005'ten 2007'ye kadar olan ilk faz, mekanizmaların ve düzenlemelerin deneyimlenerek geliştirildiği pilot dönem olarak tanımlanmaktadır. Bu ilk aşama oldukça istikrarsızdı ve EUA fiyatı bu dönemde önemli ölçüde dalgalandı ve AB'nin emisyon azaltım hedeflerine ulaşmasını desteklemekte başarısız oldu. İkinci dönemde ücretsiz izinlerin azaltılması ve arz tarafını düzenlemek için bazı önemli yaptırımların uygulanması ile 2008'deki mali krizin ve 2011'deki AB borç krizinin ciddi sonuçlarına rağmen, AB ETS mekanizmaları ikinci faz döneminde (2007-2012) ilk aşamaya kıyasla daha istikrarlı bir şekilde çalıştı.

AB ETS'nin ilk iki aşamada yetersiz başarı gösterdiği göz önüne alındığında, III. faz dönemi, Avrupa Yeşil Mutabakatı (Green Deal) hedeflerine ulaşmak için emisyon kesintilerini hızlandırmaya yönelik birkaç önemli düzenlemenin uygulanmasıyla ilk iki aşamadan ayrılır. Bu politik çözümler, piyasa istikrar rezervi (MSR) oranını %24'e çıkardı ve MSR'de önceki yılın ihale hacmini aşan emisyon izinlerinin önemli ölçüde kaldırılmasını sağladı. Sonuçta, yeni düzenlemeler etkisini hemen gösterdi ve izin fiyatında önemli bir artışa neden oldu. IV. Faz'da ise AB Komisyonu, 2050 yılına kadar iklim nötrlüğü hedefine ulaşmak için MSR mekanizmasını güçlendirmek ve karbon kaçağı riskini azaltma amacıyla yeni bir dizi düzenlemeyi kabul ederek yasama gücünü güçlendirdi. IV. Aşamada, AB Komisyonu üretimlerini AB dışına taşıma konusunda en yüksek risk taşıyan sektörlerle odaklanarak ücretsiz tahsis sistemini bir on yıl daha uzatmaya karar verdi. Bu dönem için, üretimlerini AB dışına

taşıyan sektörlerin tahsislerinin %100'ünü ücretsiz olarak almaları konusunda anlaşmaya varıldı.

AB ETS'nin (2005-2007) ilk aşaması Avrupa'daki toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %46'sını yayan, enerji santralleri, çelik, çimento ve petrol endüstrileri dahil olmak üzere dört temel sektörü kapsayarak başladı. İkinci aşamada (2007-2012), uluslararası havacılıktan kaynaklanan emisyonlar da sisteme dahil edildi, ancak havacılık sektörünün emisyonlarının kapsamı 2012'de yalnızca Avrupa içi uçuşlarıyla sınırlandırıldı. AB ETS'nin üçüncü aşaması, iki yeni gazla (azot oksit ve perflorokarbonlar) sera gazı kapsamının genişletilmesi ve ısıtma, demir, alüminyum, metaller, kireç, cam, seramik, kağıt hamuru gibi daha fazla endüstrinin sisteme dahil edilmesiyle başladı.

Katılımcıların üst sınırları (cap), aynı sektördeki en az emisyonu sahip ilk %10'luk katılımcıların kıyaslama değerleri, endüstriyel karbon kaçağı riski ve her bir tesisin geçmiş faaliyet düzeyi kullanılarak hesaplanmaktadır. Başka bir deyişle, üst sınırlar büyük ölçüde bir tesisin endüstriyel özelliklerine ve geçmiş faaliyetlerine bağlıdır. Bu nedenle, bir endüstrisinin sera gazı emisyonu, üst sınır miktarının ve karbon tahsisi talebinin birincil belirleyicilerinden biridir.

AB ETS, 31 katılımcı ülkeyi, izinleriyle birlikte 4.001 mega ton CO₂ eşdeğeri (MtCO₂e) emisyonu ve toplam küresel sera gazı emisyonlarının yüzde üçünden biraz fazlasını kapsar (Dünya Bankası, 2022a). Bu yetki alanı aynı zamanda AB'nin toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık yüzde 40'ını kapsar ve büyüklüğüne dayalı bazı istisnalar dışında AB'deki çoğu enerji, üretim ve havacılık temelli kuruluşun katılımını içine alır. 2023 itibarıyla, AB ETS'de dolaşan yaklaşık 1,5 milyar izin vardır, ancak bu sayı piyasa koşullarına bağlı olarak dalgalanabilir (AB Komisyonu, 2021b).

AB ETS'nin 2005 yılında uygulamaya geçmesinden bu yana Avrupa'da ortalama yıllık yüzde 3,5'lik bir emisyon azaltımı gerçekleşmiştir (Dünya Bankası, 2022a).

İzinlerin dağıtım yöntemleri, AB ETS'nin fazları süresince ciddi anlamda değişim göstermiştir. Örneğin, 2012'den önce, tüm izinler dahil olan sekiz üye devlet arasında ücretsiz olarak dağıtılıyordu (Uluslararası Karbon Eylem Ortaklığı, 2022). Daha sonra 2012 ile 2020 arasında, yaklaşık yarısı açık artırmaya çıkarıldı ve geri kalanı, karbon kaçağını (tahsisler yoluyla hesaba katılmayan salınan karbon olarak da bilinir) önlemeye yönelik yöntemler geliştirmeye odaklandığından, emisyon karşılaştırma ölçütlerine göre ücretsiz olarak tahsis edildi. 2021 itibariyle, izinlerin tahsisi aşağıdaki gibidir, (Uluslararası Karbon Eylem Ortaklığı, 2022);

Enerji: Elektrik sektörü ödeneklerinin yüzde 100'ü açık artırmayla satılır (düşük gelirli üye devletler için istisnalar dışında).

Sanayi/imalat: Tahsisler, her bir alt sektördeki en verimli %10'luk tesislerin ortalama emisyon yoğunluğuna dayalıdır ve sabit bir yıllık azaltma oranıyla birlikte (yüzde 0,2-1,6) teknolojik ilerleme için yıllık olarak ayarlanmıştır.

Havacılık: Yüzde 15'i açık artırmaya çıkarılır, yüzde 82'si ücretsiz olarak tahsis edilir ve yüzde 3'ü yeni girenlere ayrılır.

Yüksek karbon kaçağı riski olan sektörler: Emisyon belirsizliğini telafi etmek için ek tahsislerden oluşan bir koruma tamponu ile birlikte ücretsiz tahsis edilir. Bu kategorinin 2030 yılına kadar kullanımdan kaldırılması planlanmaktadır.

Yeni girenler rezervi (NER): Düzenlemeye tabi piyasalara yeni girenler için 200 milyon artık izin ayrılmıştır.

Bazı yüksek emisyonlu tesisler, piyasaya giriş engellerini azaltmak için ücretsiz ilk tahsis alabilirler ve küçük tesisler genellikle katılımdan muaftır. Tanımsal olarak, küçük tesisler, son üç yıllık süre boyunca 25.000 t CO₂'den daha az emisyonu ve 35 megavatın altında bir termal çıktıya sahip tesislerdir (Avrupa Parlamentosu, 2003).

AB ETS, karbon denkleştirmelerinin kullanılmasına izin vermez. Ancak onun yerine sonraki bölümlerde daha ayrıntılı olarak ele alınacak olan piyasa istikrar mekanizmalarını (MSM) içerir. AB ETS, pek çok ETS'nin aksine gönüllü bir piyasa olmadığı için katılımcı kuruluşlar raporlama ve katılım düzenlemelerine uymakla yükümlüdür. Düzenlemeye tabi kuruluşlar, kayıt dışı salınan her bir CO₂ tonu için 100 Avro ceza öder ve ayrıca eşdeğer sayıda izin satın almak zorundadır (Uluslararası Karbon Eylem Ortaklığı, 2022). Ayrıca, bu kuruluşların isimleri kamuoyuna duyurulur. Bu nedenle, bu cezaları ödemektense, regülasyonlara uymak her zaman daha az maliyetli olacaktır.

3.2. AB ETS'nin Dönemleri

1. Faz Dönemi (2005-2007)

AB ETS'in ilk faz dönemi 2005 yılında faaliyetine başladı ve enerji yoğun endüstrilerde faaliyet gösteren yaklaşık 10.500 işletmeyi kapsıyordu (Calder, 2009). Enerji sektöründen 20 megavattan daha düşük termal derecelendirme çıkışına sahip elektrik santralleri ve sanayi ve imalat sektöründen demir çelik fabrikaları, çimento, kireç, gaz, kağıt, kağıt hamuru, seramik, tahta, petrol rafinerileri ve kok fırınları, faz 1'in 2.096 Mt CO₂'lik üst sınırı kapsamına alındı. Bu aşamada, izinlerin %95'i kapsam dahilindeki sektörler için ücretsiz olarak tahsis edildi ve uyumsuzluk cezası Mt

başına 40 Avro olarak belirlendi (AB Komisyonu, 2020). Bu noktada, Birleşik Krallık Çevre Ajansı, programı denetlemekten ve programın planlandığı gibi ilerlemesini sağlamak için ilgili işletmelerle doğrudan iletişime geçmekten sorumluydu, ancak işletme emisyonları ayrıca bağımsız bir üçüncü taraf tarafından da doğrulandı.

Programın 1.faz dönemi, programın etkili bir şekilde işlemesi gereken ikinci aşamaya götürecek öğrenme aşaması olarak kabul edilmiştir (AB komisyonu, 2020). Ancak bu faz, emisyon kıyaslamasının çok katı veya gevşek olması konusunda yaşanan anlaşmazlıklar nedeni ile çok zor bir öğrenme dönemi olmuştur. Ancak, 2. aşamada değiştirilen yönerge, karşılaştırma ölçütlerinin 2005 yılında en düşük CO2 emisyon oranına sahip %10'u oluşturan her bir ETS sektöründeki tesisler için çıktı birimi başına ortalama emisyon oranı ile belirlenmesini zorunlu kılarak bu sorunları kısmen çözmüştür (Ellerman, 2016).

AB ETS'nin ilk aşaması başladığında, AB'de izinlerin fiyatı Mt CO2 başına 5-10 Avro arasında değişmekteydi ve ilk tahsisinin orta düzeyde bir emisyon azaltımını teşvik için yetersiz olduğuna inanıldığı için fiyat yavaş yavaş 30 Avroya kadar yükseldi (Delarue, 2008). Ancak 2006'nın 4. ayında, Hollanda, İspanya, Fransa, Estonya, Belçika Valon Bölgesi ve Çek Cumhuriyeti dahil olmak üzere bir dizi üye devlet ve bölgenin beklenen emisyon seviyelerinin 50 Mt altında olduğunu gösteren raporların yayınlanması nedeniyle, izinlerin fiyatı CO2 Mt başına yaklaşık 30 Avro'dan 13 Avro'ya kadar düştü (Ghoulder, 2013). Fiyatlar 2007 Mayıs ayında 1. aşama izinler için CO2 Mt başına 1 Avro'nun altına düşmeden önce küçük bir canlanma oldu. İzinlerin fiyatındaki bu düşüş kısmen, kapsam dahilindeki birçok sektörün 20 milyon ton ve sanayi sektörünün yaklaşık 120 milyon ton uzun (long) pozisyona sahip olması nedeni ile gerçekleşti. Ancak bu süreçte, ısı ve enerji

sektörleri de 20 milyon tondan fazla açık pozisyona sahipti (Delarue, 2008). 2006'da yapılan alternatif bir analiz, gerçekten de net bir uzun pozisyon olduğunu, ancak bunun sadece 60 Mt olduğunu, ısı ve enerji sektörünün yaklaşık 50 Mt kısa, sanayinin ise 110 Mt uzun pozisyonda olduğunu göstermektedir (Delarue, 2008). Bu iki analizin, sanayi sektörlerinin programa dahil edilmesi sonucu, bu sektörlerin aşırı dış rekabetle karşılaşmalarını engellemek adına ücretsiz izinlerin aşırı tahsis edildiğini göstermektedir.

Delarue, ekonometrik bir model kullanarak, enerji sektörünün emisyon azaltımının 2005 yılında 90 Mts ve 2006 yılında 60 Mts olduğunu hesaplamıştır (Delarue, 2008). Bu aşamada azaltım esas olarak enerji sektöründe görülmüştür, ancak bu başka sektörlerde de gerçekleşmediği anlamına gelmez.

Delarue'un analizine benzer olarak Ellerman ve Buchner, 1. fazdaki azalımın 120 ila 300 Mts CO₂ arasında değiştiğini tahmin etmektedir (Ellerman ve Buchner, 2008).

Genel olarak üst sınır ve ticaret programlarında, azaltım maliyetinin üretici üzerinden tüketiciye yansıtılıp yansıtılmadığı, dolayısıyla programın kirleten öder ilkesinin ihlal edilip edilmediği önemli bir konudur.

Programın ilk yılında fiyatlar bir miktar istikrarlı kalmıştır; ancak, bazı devletlerin beklenen emisyon seviyelerinin çok altında kaldığına dair haberlerin çıkmasının ardından 2006 Nisan ayında izinlerin fiyatı CO₂ Mt başına yaklaşık 30 Avro'dan 13 Avro'ya kadar düşmüştür. Bu durum, fiyatının 2007'de sıfıra düşmesi ve izinlerin ikinci aşamada bankaya yatırılmasının kısıtlanması ile nihayete ermiştir (AB Komisyonu, 2020).

Genel olarak, programın ilk aşaması, karbon için bir fiyat oluşturmayı başarması, EUA'nın AB genelinde serbest ticaretini kolaylaştırması ve kapsanan sektörlerden kaynaklanan emisyonları doğrulamak, izlemek ve raporlamak için gerekli altyapıyı oluşturması nedeniyle AB Komisyonu tarafından başarılı olarak değerlendirilmiştir (AB Komisyonu, 2020). Ancak kamuoyunda ilk aşama mevcut yaygın kusurlar ve çok yüksek fiyat volatilitesi nedeniyle büyük bir başarısızlık olarak nitelendirilmektedir.

2. Faz Dönemi (2008-2012)

Faz 1'in sonunda, faz 2'deki tahmini emisyonların yıllık üst sınırı yaklaşık 300 Mts aşması bekleniyordu, bu da ikinci aşamada yaklaşık 1.500 Mts izin eksikliği anlamına geliyordu (Delarue, 2008). İkinci aşamada azot oksit emisyonları sisteme dahil edilmiş, emisyon üst sınırı %6,5 oranında azaltılmış ve uyumsuzluk cezası Mt başına 100 Avro olmuştur. Ek olarak, İzlanda, Lihtenştayn ve Norveç AB ETS'ye katılmıştır (AB Komisyonu, 2020).

Hollanda, Avusturya, İrlanda, Macaristan, Almanya, Litvanya, Birleşik Krallık ve Çek Cumhuriyeti gibi ülkeler ikinci faz süresince izinlerinin %3'ünü açık artırmaya çıkarmayı tercih etmişlerdir. Ocak 2012 itibarıyla havacılık sektörünün de dahil edildiği 2. aşamada, bu sektörde izinlerin %85'i ücretsiz olarak tahsis edilmiştir; ancak Avrupa dışı ülkelere ve bu ülkelerden içeriye yapılan uçuşlar programa dahil edilmemiştir. Bu aşamada işletmelere nükleer enerji kredileri hariç olmak üzere ve toplam 1,4 milyar Mts emisyonu olan uluslararası dengeleme kredileri satın almalarına izin verilmiştir (AB Komisyonu, 2020). Bütün bu değişikliklerle, programın birinci aşamadan daha etkili olacağı öngörülmüyordu. Programın bir aşaması zaten geçmiş olduğundan, artık emisyonlarla ilgili doğrulanmış veriler vardı ve bu nedenle

üst sınır 2.049 Mts CO₂'ye düşürüldü (ICAP, 2019). İkinci aşamanın Kyoto Protokolü'nün (KP) ilk dönemine denk gelmesiyle birlikte, AB ETS katılımcısı ülkelere katı emisyon hedefleri verilmiş ve program kısmen başarıya ulaşmıştır.

Faz 2 tahsisleri 2007 yılı boyunca ve 2008 yılının ilk yarısında yüksek petrol ve gaz fiyatlarının karbon fiyatını yükseltmesi ve bir süre fiyat istikrarı sağlamasıyla yeterli görünüyordu. Bu durum, enerji sektöründe yakıt ikamesi nedeniyle emisyonlarda bir kez daha azalma olacağına işaret ediyor gibiydi. Bazı çalışmalarda aşama 2 sırasında emisyon azaltımları açısından, CO₂ Mt başına 20 Avroluk bir fiyatın yaz aylarında enerji sektörlerinde kömür yerine gaza geçişle sonuçlanacağı ve azaltıma neden olacağı, 40 Avroluk bir fiyatın ise yakıt değişimi nedeniyle yaz ve kış aylarında emisyonları büyük ölçüde azaltacağı öngörülmüştür (Delarue, 2008).

AB ETS'nin ikinci aşamasında, ilk aşamadaki denemeler ve alınan dersler göz önüne alındığında daha iyi sonuçlar elde edileceği öngörülmüştür; ancak 2008 yazında dünya ekonomisi resesyona girince beklentilerde ciddi değişimler olmuştur. Bu küresel durgunluğun program üzerindeki en derin etkileri, elektrik, yakıt ve EUA'lara olan talebin dramatik bir şekilde düştüğü 2008 ve 2009 yıllarında görülmüştür.

Aşama 2'nin başlangıcında, izinlerin fiyatı Temmuz 2008'de neredeyse Mt başına 30 Avro'ya yükseldi; ancak bu fiyat, ekonomik kriz nedeniyle 2008'in sonlarında %50'ye varan sert düşüş nedeniyle uzun süre geçerli olmayacaktı. Fiyat 2009 yılının başlarında Mt CO₂ başına 15 Avro civarında bir fiyatla istikrar kazanmış, 2011 yazında bir kez daha düşerek 7 Avroya inmiş ve 2. aşamanın sonunda da 4 Avroya kadar düşmüştür. Bu durum, durgunluğun yarattığı bir izin fazlası olacağını açıkça

ortaya koymuş ve bu izinlerin 3. aşamada rezerv edilmesiyle, fazlalığın 2020 yılına kadar devam edeceği öngörülmüştür (Grubb, 2012).

AB'deki emisyonlar 1990-2004 yılları arasında %0.08 oranında azalırken, 2005-2010 yılları arasında %1 oranında azalmıştır. 2008 ve 2009 yıllarındaki düşüşler, finansal kriz nedeniyle bu dönemdeki en belirgin düşüşlerdir. Durgunluğun azaltım üzerinde etkisi büyük olmuştur, özellikle İspanya'da emisyonlar 2007 ve 2008 yıllarında %7,7 oranında azalmış, büyüme oranı %2,7 oranında düşmüş ve 2009 yılında da %3,7 oranında daralmıştır (IMF, 2011).

Almanya, Birleşik Krallık, Fransa ve İspanya'daki emisyonlar hem 2009'dan sonra gerçekleşen ekonomik büyüme döneminde 80 MtCO₂, hem de 2008 ve 2009 ekonomik kriz döneminde 175 Mt CO₂ azalmıştır (Sansoussi, 2018).

Ekonometrik tekniklerle yapılan diğer tahminler 2008 yılında yaklaşık 28 Mts CO₂ azaltım olacağını tahmin etmişlerdir ancak bunun ne kadarının AB ETS'den kaynaklandığı tartışmalıdır (Lewis, 2010). AB28'de toplam emisyonlar 2004 ile 2012 yılları arasında %13,64 oranında azalmıştır ve bu azalmanın %76'sı küresel durgunluk sırasında gerçekleşmiş, diğer %24'ü ise 2004 ile 2008 yılları arasındaki azaltımlardan kaynaklanmıştır. Genel olarak bu çalışmalar, AB ETS'nin 1. ve 2. aşamalarındaki azaltımların ekonomik durgunluğa ve 1. aşamada izinlerin aşırı tahsisine atfedilebileceğini göstermektedir. Bu süre zarfında ekonomik küçülmenin de önemli bir etkisi olmuştur ve bu AB ETS gibi piyasa temelli müdahaleler yoluyla emisyonların azaltılmasının, ekonominin küçülmesinin veya büyüme hızının yavaşlamasının etkisiyle kıyaslandığında sönük kaldığını göstermektedir.

Faz 1'de olduğu gibi, programın bu aşaması sırasında belirlenen tavan ve ekonomik durgunluk nedeniyle olağandışı getirilere ilişkin ampirik kanıtlar mevcuttur. Tahminler bu olağandışı kârlarının tam olarak ne olduğu konusunda farklılık göstermektedir, ancak Maxwell, Birleşik Krallık enerji sektörünün 2. aşama kapsamında yılda 1 milyar pound tutarında olağandışı kâr elde ettiğini iddia etmektedir (Maxwell, 2011). Her bir Mt emisyon için 21-32 Avro aralığında bir emisyon izni varsayımı yapıldığında, Birleşik Krallık enerji sektörünün 6-15 milyar Avro, Alman enerji sektörünün ise 24-34 milyar Avro arasında getiri elde ettiğı tahmin edilmektedir (Point Carbon, 2008).

Neuff (2011), ETS kapsamında faaliyet gösteren işletmelerin büyük çoğunluğu için AB ETS'nin ve iklim politikalarının karar alma süreçlerinde yatırım getirilerinden daha önemli olmadığını ifade etmiştir. Bunun olası bir nedeni, izin dağıtım sisteminin aşırı cömert olması olabilir, zira 1. aşama sırasında aşırı bir izin söz konusuydu ve ikinci aşama sırasında da ekonomik kriz çok sayıda sektörün tahmin edilen emisyonlarının altında kalacağını garanti altına almıştır. Ayrıca, düşük karbonlu yeniliklere yatırım yapılmamasının ya da verimlilik artışlarının finanse edilmemesinin bir diğeri olası nedeni de dış rekabet eksikliği olabilir. Karbon kaçağı ihtimali ile birlikte AB sektörlerinin rekabet gücü kaybı programın başlangıcından beri endişe kaynağı olmuştur. Karbon kaçağı, yüksek karbon yoğunluğuna sahip bir işletmenin ürünlerini başka bir yerde üretmek için katılımcı AB ETS ülkelerinden ayrılması ve böylece karbonun program sınırlarının dışına çıkması olarak tanımlanabilir.

AB'nin 2050 yol haritası planı, 2020'ye kadar %20, 2030'a kadar %40 ve 2040'a kadar %60'lık ara hedeflerle birlikte 2050 yılına kadar emisyonları 1990 seviyelerinin %80-95 altına düşürme hedefiyle AB'nin iklim hedeflerinin geleceğini ana hatlarıyla

ortaya koymaktadır. 2050 yol haritası, AB'nin Kyoto Protokolü'nün kapsamının ötesinde daha zor hedefler koymaktadır. Gelecekle ilgili bir başka umut verici işaret, ulusal dağıtım planları (NAP) sürecinin sona ermesiyle ikinci aşamaya bir yıl kala gerçekleşmiştir. AB ETS katılımcı devletleri NAP'ı terk etmeyi kabul etmiş ve enerji sektörleri için 2013 yılında yürürlüğe girecek ve diğer sektörler için aşamalı olarak uygulanacak yıllık %1.74 oranında azalan bir üst sınır üzerinde program çapında 2027 yılına kadar anlaşmışlardır (Ellerman, 2016).

Genel olarak, programın 2. aşaması, 1. aşama katılımcılarının emisyon verilerinin mevcut olmasından yararlanmıştır, bu nedenle katılımcıların gerçek emisyonlarına dayalı olarak daha düşük miktarda izin sunulmuş ve bir önceki aşamaya göre %5'lik bir azalma görülmüştür (AB Komisyonu, 2020). Buna rağmen, 2008 yılının temmuz ayında izin fiyatının Mt başına 30 Avroya yükselmesiyle bu aşamada fiyat volatilitesi ciddi anlamda artış göstermiş, ancak ekonomik kriz nedeniyle 2008'in sonlarında %50'ye varan sert bir düşüş yaşanması ile volatilité daha da artmıştır. Bu aşamada, fiyat 2009'un başlarında bir miktar istikrar kazanmış ve iki yıllık bir istikrar dönemi boyunca CO₂ Mt başına yaklaşık 15 Avro seviyelerinde seyretmiştir (Ellerman, 2016). Ancak, 2011 yazında fiyat bir kez daha 7 Avroya düşmüş ve 3. fazdan hemen önce sanayi sektörlerinde fazla izin birikimi korkusu nedeniyle 4 Avroya kadar gerilemiştir (Delarue, 2008). Daha sonra, 2008 ve 2009'un sonlarında dünya çapında yaşanan ekonomik gerilemenin katılımcılar için emisyonları o kadar azalttığı ortaya çıkmıştır ki, 1,5 ila 2 milyar Mts emisyonu eşdeğer bir izin fazlası olduğu tahmin edilmektedir (Goulder, 2013). Genel olarak bu aşama, bir önceki aşamanın başarısızlığını tekrar etmemiştir, ancak üst sınır ve ticaret sistemi, dünya piyasasının

eğilimlerinden etkilenmeye yatkın olduğunu kanıtlamış ve böylece iklimin istikrara kavuşturulması için gereken emisyon azaltımlarını riske atmıştır.

Bu iki aşamadaki azaltım açısından AB ETS, konulan üst sınırların üzerinde gözlemlenen bir hareket olmadığı için başarılı olmuştur. Bununla birlikte, ilk iki aşama sırasında emisyon izinleri aşırı arz edilmiş ve ikinci aşama sırasında emisyonların azaltılması büyük ölçüde 2008 ve 2009'daki durgunluğa bağlanmıştır.

Toplamda, 2008 ve 2009 yılları arasında elektrik talebinin yaklaşık %5 oranında düştüğü tahmin edilmektedir. Bu durum iklim değişikliğinin etkilerini azaltılmak için en hızlı çözümlerden birinin tüketici davranışlarında bir değişiklik olduğunu göstermektedir. Genel olarak bu aşama, bir kez daha aşırı fiyat dalgalanması yaşanması, emisyon azaltımının tamamı olmasa da bir kısmının durgunluğa bağlanması, olağanüstü gelirlerin devam etmesi ve yönetim biriminin durgunluk sırasında piyasayı istikrara kavuşturmak için herhangi bir önlem almaması nedeniyle kısmen başarısız olmuş sayılabilir. Faz 3'te işletmelerin %10'u AB ETS'nin sıkılığının artacağı beklentisi nedeniyle hem yatırım kararlarında hem de genel faaliyetlerinde değişiklikler beklediklerini bildirmiştir ve bu oran 2. fazda %4'tür (Neuff, 2011). Bu aşamanın sonunda, yeni değişikliklerin işletmelerin 3. aşamaya geçerken AB ETS'nin katılımına ilişkin algılarını artıracığı umulmaktadır.

Üçüncü faz başlatılmadan önce, ikinci fazda uygulamaya konulan açık artırma yöntemi, önceki fazlarda yaşanan sorunların giderilmesine yardımcı olmak amacıyla daha da güçlendirilmiştir. Yaklaşık tahminler, 3. faz sırasında izinlerin %40'ının açık artırma yoluyla dağıtılacağını, geri kalanının ise serbestçe tahsis edileceğini göstermektedir (AB Komisyonu, 2020). Mali durgunluğun etkisi nedeniyle, açık artırmalardan elde edilmesi beklenen gelir önemli ölçüde azalmış, bu da yaklaşık on

yıl sonra temiz enerji altyapısına yatırım vaadinin yanlış olduğunu kanıtlamıştır (AB Komisyonu, 2020). Açık artırmaya geçiş, kirleticinin kendisine bedelsiz olarak önemli ölçüde izin verilmesi yerine emisyonları için doğrudan ödeme yapmasını gerektiren üst sınır ve ticaret teorisi ilkesini takip etmektedir. 3. aşamanın başında, enerji sektörleri için ücretsiz tahsisin sona ermesinin yanında umut verici bir değişiklik daha yapıldı ve sanayi sektörlerinin rekabet güçlerini korumak için 2013'te %80, 2020'de %30 ve 2027'de tamamen olmak üzere zaman içinde ücretsiz tahsisten aşamalı olarak çıkmalarına izin verildi (Ellerman, 2016). Son olarak, üçüncü aşamadan önce, fiyat seviyesini istikrara kavuşturmak amacı ile 900 milyon iznin 2019-2020'de piyasaya geri verilmek üzere bir rezerve taşınmasıyla son bir değişiklik daha yapıldı (ICAP, 2019).

3. Faz Dönemi (2013-2020)

Kasım 2012'de AB Komisyonu "Karbon Piyasasının Durumu" başlıklı bir rapor yayınladı ve bu raporda programın 3. aşamasında önemli olacak bazı değişiklikler önerildi. Bu değişiklikler arasında en dikkat çekici olanı, ihtiyari bir fiyat yönetim mekanizmasının getirilmesi ve AB genelindeki üst sınır azaltım oranının 4. aşamada yıllık %1,74'ten %2,2'ye yükseltilmesiydi. Bu rezerv Piyasa İstikrar Rezervi (MSR) olarak adlandırılmış ve karbon fiyatı istikrarı sağlamak için EUA'ların tedariki ve geri çekilmesi işlevini üstlenmiştir (AB Komisyonu, 2020). 3. faza ait diğer değişiklikler 2014 yılında, MSR ile üst sınır 2015 yılında kabul edilmiş ve 2019 yılında faaliyete geçmiştir. Ayrıca, programdaki inovasyon eksikliğine ilişkin eleştirileri ele almak için, NER 300 programında düşük karbonlu inovasyonu finanse etmek üzere 300 milyon izin ayrılmıştır (AB Komisyonu, 2020). Hem güneş hem de rüzgâr enerjisinin gelişimini teşvik etmek için kendi teşviklerini geliştirmiş olan İspanya ve Almanya da

dâhil olmak üzere bazı AB üye devletleri bu konuda zaten ilerleme kaydetmişti, 2014 yılında İspanya ve Almanya'da enerji üretiminin sırasıyla %24 ve %16'sını rüzgâr ve güneş enerjisinin oluşturması bunu desteklemektedir (Ellerman, 2016). Sisteme yeni kimyasal emisyonların dahil edilmesi ve yeni getirilen MSR ve daha düşük üst sınır, 3. aşamadaki program değişikliklerinin olumlu yönde olduğunu göstermektedir.

Faz 3'ün başlangıcında, azot oksit ve perflorokarbonlar gazları da kapsama eklenmiştir. Faz 3 boyunca, toplam izinlerin %57'si ve enerji sektöründeki izinlerin %100'ü açık artırmaya çıkarılmış ve sanayi sektörlerinde serbest izinler devam etmiştir (ICAP, 2019). Alınan kararlara göre risk altında olmayan işletmelerin ücretsiz izinleri, 2013'te karşılaştırma ölçütlerinin %80'inden, 2020'de %30'una kadar aşamalı olarak azaltılacaktır (ICAP, 2019). Bu olumlu değişiklikler, 3. aşamada daha sağlıklı işleyecek bir AB ETS'nin göstergesidir.

3. aşama kapsamında, program hem sanayi hem de enerji sektörlerinde 13.500 işletmeyi, küresel sera gazı emisyonlarının %4'ünü ve AB üye ülkelerindeki tüm yerel havayolu emisyonları kapsamıştır. 2. aşamada dahil edilen havacılık sektöründe, 2012 yılında izinlerin %85'i ücretsiz olarak tahsis edilirken, 3. aşamada izinlerin %82'si ücretsiz olarak verilmiş, %15'i açık artırmaya çıkarılmış ve kalan %3'lük kısım ise piyasaya yeni girenler için rezerve eklenmiştir (ICAP, 2019). Ayrıca aşama 3'te karbon dengeleme kredilerinin kullanımı, aşama 2 sırasında uygulanan 1,3 milyar sınırına ek olarak 300 kredi ile sınırlandırılmıştır. Bu sayı hala oldukça büyük olsa da bu dengelemelere yeni kısıtlamalar getirileceği ifade edilmiştir.

2013'ten 2016'ya kadar yapılan açık artırmalarda mekanizma 15,8 milyar Avro, 2005'ten bu yana toplam 50 milyar Avro ve 2019'da 14,65 milyar Avro gelir elde etmiş olup, bu açık artırmalardan elde edilen gelirin %80'inden fazlası enerji veya

iklimle ilgili amaçlar için ayrılmış ve gelecekteki açık artırma gelirlerinin en az %50'sinin aynı amaç için kullanılması planlanmıştır (AB Komisyonu, 2020). Aşama 3'teki program için artan finansmanın yanı sıra açık artırma gelirindeki artışın, özellikle emisyon azaltımı açısından aşama 4'ü fonlayabileceği düşünülebilir.

Yapılan değişikliklere rağmen AB'nin 2050 yol haritası konusunda şüpheler bulunmaktadır. 2030 yılında 2005 yılı emisyon seviyelerine kıyasla %36'lık bir azalma olacağı öngörülmektedir ki bu da 2030 yılı için belirlenen %43'lük emisyon azaltma hedefini karşılamak için yeterli değildir (AB Çevre Ajansı, 2019). Sistem bir bütün olarak, kısmen beklenmedik kârlar ve düşük ya da değişken karbon fiyatı nedeniyle başlangıçta programı çevreleyen umutlu beklentilerin gerisinde kalmıştır. Birleşik Krallık gibi bazı ülkeler kamuoyundaki bu olumsuz algıyı dikkate almış ve AB ETS'yi kendi sınırları içinde desteklemek için farklı politikalar uygulamaya koymuşlardır.

AB ETS'yi çevreleyen kötümserlik, programın geçmiş performansı veya programa ilişkin gelecekteki beklentilerden değil, programın sorunlarının kalıcı ve acil bir şekilde ele alınmamasından kaynaklanmaktadır. Bu sorunlar uzun süre devam etmiş ve tamamen ya da kalıcı olarak ele alınmamış, sadece göreceli iyileşmeler görülmüştür. İlk 3 fazın temel sorunları arasında beklenmedik kârlar (windfall profits), geçiş maliyetleri, 1. ve 2. aşamalarda ödeneklerin aşırı tahsisi ve AB'yi koruma kisvesi altında çok sayıda işletmeye ödeneklerin ücretsiz tahsisi yer almaktadır.

Özellikle, EUA maliyetlerinin tüketicilere yansıtılması, olağandışı gelirlerine ek olarak, kirlitenin gerçekten ödeme yapıp yapmadığı veya tüketicinin tüm maliyeti üstlenip üstlenmediği konusunda sorulara yol açmıştır. Eğer tüketici emisyonlarda en iyi ihtimalle olası bir azalmanın maliyetini üstleniyorsa, AB ETS kirleticie ödeme

yaptırma konusunda başarısız olurken aynı kirleticiler iyileştirme yapmadan programdan aşırı gelir elde etmektedir. AB ekonomiyi büyütmek için işletmelere para vermek istiyorsa bunu emisyonları azaltma kisvesi altında tüketiciden ödeme yapmasını isteyerek yapmamalıdır. Ayrıca, AB'nin işletmelerini uluslararası rekabetten korumak ve olası karbon kaçağını önlemek için izinlerin serbest bırakılmasına devam etmesi, asıl önemli olanın çevre değil ekonomi olduğunu göstermektedir.

Bireysel olarak devletler ya da bölgesel uluslararası birlikler bu ekonomik ve çevresel yükü kendi üzerlerine almadıkça, emisyonlarla mücadele açısından hiçbir zaman büyük ölçekli olumlu bir değişim olmayacaktır. Bu yük büyük olasılıkla kısa vadede söz konusu devletleri veya birlikleri daha zayıf bir ekonomik konuma getirecektir; ancak devletler bu sorumluluktan kaçtığı sürece de hiçbir değişiklik olmayacaktır. Bu küresel sistemde tüm ülkelerin ve bölgesel birliklerin eşgüdümde hareket etmesi hem maliyeti sorumlular arasında paylaştıracak hem de Porter'cı bir yaklaşımla öncü devletlere uzun vadede düşük karbon teknolojileri konusunda rekabet avantajı kazandıracaktır. AB ve ABD'yi takiben Çin, Güney Kore, Japonya ve Hindistan'ın kendi emisyon ticareti programlarını başlatılmasıyla birlikte, tüm dünyanın söz konusu karşılıklı avantajlı konuma ulaşması için bir sinerji ortaya konmuştur ancak birçok sanayileşmiş ülke hala bu oyunda serbest dolaşmayı tercih etmektedir. Emisyon ticareti programlarının kusurları olsa da emisyon azaltımı ve iklim değişikliğinin yavaşlatılması konusunda ciddi ilerlemelere destek olmuşlardır.

4. Faz Dönemi (2021-2030)

Bu çalışmanın zamanlaması nedeniyle 4. aşama hakkında derin bir değerlendirme yapılması zordur ancak AB ETS'yi nelerin beklediğini gözlemlemek

için bu aşamanın ayrıntıları ve 4. aşamaya giden programdaki değişiklikler kapsamlı bir şekilde incelenecektir.

Nisan 2018'de yürürlüğe giren revize edilmiş AB direktifi, MSR'de yapılan değişiklikler ve üst sınırın yıllık azaltım oranını %1,74'ten %2,2'ye çıkarılması gibi güçlendirici değişiklikler içermektedir (ICAP, 2019). Buna göre, MSR 2019-2023 yılları arasında güçlendirilmiş ve bu rezervi besleyen izin sayısı 2024 yılına kadar iki katına çıkarılarak %24'e yükseltilmiş ve rezervdeki bir önceki yılın açık artırma iznin aşan izinler kullanımdan kaldırılmıştır (AB Komisyonu, 2020). Piyasadaki izin sayısı 883 milyonun üzerine çıkarsa, 2023'e kadar yapılacak ihalelerde izinlerin %12'si, sonrasında %24'ü, 12 ay boyunca MSR'de saklanacak ve piyasadaki izin sayısı 400 milyonun altına düşerse bu rezervden 100 milyon izin piyasaya sunulacaktır (ICAP, 2019). Bir başka değişiklik de yeni ve büyüyen işletmeler için bir miktar ödenek ayrılması ve bu ödenek sayısının üçüncü aşamanın sonuna kadar dağıtılmayan serbest ödeneklerin sayısından ve MSR'den 200 milyon ek ödenekten oluşmasıdır (AB Komisyonu, 2020). Bununla birlikte, 1 Ocak 2020'de AB ETS üyeleri ile İsviçre'nin kendi emisyon ticareti programı arasında bir bağlantı anlaşmasının imzalanması ile programda bir başka olumlu değişiklik daha yapılmıştır (ICAP, 2020). Bu bağlantı ve diğer birçok değişiklikle birlikte 4. aşama, bugüne kadarki en umut verici aşama olmaya adaydır.

AB ETS, 4. aşama itibarıyla AB'nin sera gazı emisyonlarının %45'ini, 28 AB ülkesine ilaveten Norveç, İzlanda ve Lihtenştayn'ı, AB içindeki 13.500 işletmeyi ve 2024 yılından itibaren uluslararası uçuşları da kapsamaktadır (AB Komisyonu, 2020). AB ETS'deki sanayi sektörlerini uluslararası rekabetten korumak amacıyla, açık artırmaya çıkarılacak olan 450 milyon EUA'nın üzerinde bir tampon

oluşturulmuş ve 6 milyar ücretsiz EUA miktarının tamamen emilmesi halinde sanayi sektörlerinin kullanımına sunulacağı belirtilmiştir (ICAP, 2019). AB Komisyonu ücretsiz tahsisleri bir süre daha devam ettirecek, yüksek risk altındaki sektörler EUA'larının %100'ünü ücretsiz olarak alırken, daha az risk altındaki sektörlerin ücretsiz EUA'ları 2026 yılına kadar aşamalı olarak %30'a ve 4. aşamanın sonunda %0'a düşecektir (AB Komisyonu, 2020). Ayrıca, ücretsiz izin alan tüm tesislerin bir listesi her beş yılda bir güncellenecek ve bu işletmeler için kıyaslama değerleri, olağandışı kârlarını önlemek ve 2008'den bu yana yapılan teknolojik değişiklikleri göstermek amacıyla dördüncü aşamada iki kez güncellenecektir (ICAP, 2019).

2020 yılında, AB ETS kapsamındaki sektörlerin emisyon seviyeleri 2005 yılına kıyasla %20 daha düşük gerçekleşmiştir ve 2030 yılında bunun 2005 seviyelerine kıyasla %43 oranında azaltılması hedeflenmektedir (AB Komisyonu, 2020). AB ETS'de bu noktada sistem, ticari havacılık, ısı üretimi, enerji üretimi, petrol rafinerileri, demir üretimi, alüminyum üretimi, çimento, cam, kağıt hamuru, karton, metaller, çelik fabrikaları, kireç, asitler ve seramikten kaynaklanan karbondioksit; glioksal, nitrik asitler, adipik ve glioksilik asitlerin üretiminden kaynaklanan azot oksit ve alüminyum üretiminden kaynaklanan perflorokarbonları da kapsamaktadır (AB Komisyonu, 2020).

4. aşamada, açık artırmaya çıkarılacak izinlerin %90'ı bir önceki aşama ile aynı şekilde dağıtılacak, kalan %10'luk kısım ise hem ekonomik hem de düşük karbonlu yatırımları teşvik etmek amacıyla en düşük gelire sahip olan üye ülkelere verilecektir (AB Komisyonu, 2020). Buna ek olarak, bu aşamada havacılık sektörüne ilişkin yeni kurallar getirilmiş, havacılık sektöründen kaynaklanan emisyonların 2005 seviyelerine kıyasla %21 daha düşük olması hedefiyle 2021'den itibaren emisyon

izinlerinin yıllık %2,2 oranında azalacağı ifade edilmiştir (AB Komisyonu, 2020). Son olarak, bu aşamada, Modernizasyon ve İnnovasyon Fonları aracılığı ile düşük karbonlu innovasyonu finanse etmeyi amaçlayan iki yeni fon oluşturulacaktır (ICAP, 2019). İnnovasyon fonu, düşük karbon innovasyonunu ve karbon yakalama teknolojilerini destekleyecek ve programın finansmanı en az 450 milyon emisyon hakkının mevcut değeri ve kalanı NER 300 program bütçesi olacaktır (ICAP, 2020). Modernizasyon fonu, en düşük gelirli ve karbon emisyonu yüksek on ülkede elektrik ve rüzgar enerjisi sektörlerinin modernizasyonunu destekleyecektir (AB Komisyonu, 2020). Aşama 4'te yapılan birçok değişiklik ve bu aşamada gerçekleşeceği kesin olan değişikliklerle, bu aşama belki de ilk olarak 2005'te belirlenen hedeflere ulaşma açısından şimdiye kadarki en iyi aşama olabilir.

AB ETS'nin ve daha önemli ölçüde AB karbon piyasasının etkinliğinin genel değerlendirmesi, AB ETS'nin AB tarafından belirlenen iklim istikrarı hedefi doğrultusunda emisyon azaltımlarına izin verip vermediğinin, bilim camiası tarafından belirlenen iklim istikrarı hedefleri doğrultusunda emisyon azaltımlarına ulaşıp ulaşılmadığının veya ulaşılmasının öngörülüp öngörülmediğinin belirlenmesi yoluyla ortaya konulacaktır. AB ETS'nin ilk aşaması, karbon için bir fiyat oluşturmayı başarması, AB genelinde EUA'nın serbest ticaretini kolaylaştırması ve kapsanan sektörlerden kaynaklanan emisyonların doğrulanması, izlenmesi ve raporlanması için gerekli altyapıyı oluşturması nedeniyle AB Komisyonu tarafından başarılı olarak değerlendirilmiştir (AB Komisyonu, 2020). Program ayrıca, 1 Avronun altındaki seviyelerden 30 Avroya kadar dalgalanan izin fiyat göz ardı edilirse, düşünce yapısında neden olduğu değişiklik nedeniyle başarılı olarak nitelendirilmiştir (Delarue, 2008). Programın deneme aşaması AB Komisyonu tarafından bir başarı

olarak görülse de, ilk aşama, mevcut kusurlar ve izin fiyatının 0 Avroya kadar düşmesi, olağandışı gelirler ve emisyon azaltım hedeflerinin çok gerisinde kalınması nedenleri ile ciddi bir başarısızlık olarak nitelendirilebilir.

AB ETS'nin 1. aşamasındaki kusurlar ve başarısızlıklar, Ulusal İzin Programı (NAP) ile ilgili sorunlardan, fiyat oynaklığına, izinlerin genel dağılımına, büyük olağandışı kârlara ve düşük karbon yatırımlarında gözle görülür bir değişiklik olmamasına kadar uzanmaktadır. Genel olarak, eğer amaç kirletici endüstrilere önemli ölçüde kâr sağlarken, düşük karbon yatırımlarında fark edilebilir bir emisyon azaltımı ya da iyileşme sağlamak değilse, o zaman AB ETS'nin 1. aşaması bu kriterlere göre bir başarı olarak değerlendirilebilir. Programın 1. aşamasının başarısızlığına ve sonraki aşamalardaki sorunlara rağmen, AB 20-20-20 yönergelerine göre hedeflerine ulaşma yolunda görünmektedir (Spinelli, 2016). Ancak, 2050 yol haritası hedefleri konusunda da şüpheler bulunmaktadır. 2030 yılında 2005 yılı emisyon seviyelerine kıyasla %36'lık bir azalma olacağı öngörülmektedir ki bu da 2030 yılında %43'lük emisyon azaltma hedefine ulaşılmasıyla uyumlu değildir (AB Çevre Ajansı, 2019).

2050 yol haritasının hedefi, 2050 yılına kadar emisyonların 1990 seviyelerinin %80-95 altına düşürülmesidir. 2050 yol haritası, AB tarafından belirlenen mevcut iklim dengeleme ve emisyon azaltma hedefi olarak hizmet etmektedir ve AB'nin şu anda AB ETS ve inşa ettiği karbon piyasası aracılığıyla emisyonlarda azaltım yoluyla bu hedefe ulaşma yolunda ilerlediği görülmediğinden, başarısız olduğu düşünülmelidir. Ne yazık ki, bilim camiası tarafından belirlenen hedefler doğrultusunda emisyonların azaltılması açısından, 2030 yılı için belirlenen %43'lük emisyon azaltma hedefinin, bilim camiası tarafından belirlenen 1,5°C'nin çok altında

ısıtma ve Paris Anlaşması'nın 1,5°C'lik ısıtma şeklindeki mevcut iklim dengeleme hedefi ile yeterli olmadığı görülmektedir.

3.3. AB ETS'in Sınırlamaları ve Çözüm Önerileri

Sınırlamalar:

AB ETS'nin sınırlamaları birçok yönden üst sınır ve ticaret sisteminin sınırlamaları ile örtüşmekte olup, en büyük örtüşme belirli sorunları çözmedeki yetersizlikleridir. Üst sınır ve ticaret teorisindeki belki de en önemli sınırlamalardan biri, böylesine önemli ve karmaşık bir programın doğru bir şekilde işleyebilmesi için gereken zaman ve bilgi miktarıdır.

Üst sınır ve ticaret programlarında üst sınır çok yüksek belirlenirse, emisyon seviyesinde bir artışa, izinler için düşük bir fiyata ve önemli fiyat dalgalanmalarına neden olabilir. Ayrıca programın bir noktasında üst sınırın çok yüksek olduğu fark edilirse, bu sorunu düzeltmek için bir sonraki aşamaya veya daha sonrasına kadar beklemek gerekecektir. Bu sorunun tespit edilmesi halinde, bilgi toplanması ve emisyonların azaltılması hedefine daha uygun bir üst sınır belirlenmesi gerekecektir ki bu da programın ölçeğine bağlı olarak uzun bir zaman alabilir. Bu aynı zamanda üst sınırın ne kadar düşürüleceğine dair endişelere de yol açacaktır ve bu da emisyon azaltımına yönelik piyasa temelli bir yaklaşımda katılımcıların gelecekle ilgili beklentilerini ve dolayısıyla piyasayı etkileyebilir. Genel olarak, üst sınır ve ticaret programları, etkili bir üst sınırın belirlenmesi ve programın verimli bir şekilde çalışması için önemli ölçüde tecrübe, zaman ve bilgi gerektirir. Bir üst sınır belirlemek, bir üst sınırı her iki yönde düzeltmek veya genel olarak herhangi bir

sorunu düzeltmek için gerekli zaman ve bilgi, programın nasıl uygulandığına bağlı olarak program için bir sınırlamadır.

Üst sınır ve ticaret programları, etkin bir şekilde işletildiğinde emisyonları azaltmak için oldukça yararlı araçlardır; ancak katılım oranı düşükse programlar çözüme ulaştırmaz. Üst sınırın çok yüksek belirlenmesi katılım oranını artırarak rekabet avantajı yaratabilir. Üst sınır ve ticaret programları düşük bir katılım oranına sahipse, rekabet çarpıklıklarına neden olabilir ve bazı işletmeler veya sektörler için aşırı rekabete neden olabilir. Ulusal düzeyde işletilen bir üst sınır ve ticaret programı ile işletmeleri programa katılmaya zorlamak mümkün olsa da ülkeyi aşırı rekabetçi bir uluslararası ekonomik dezavantaja sokmanın yanı sıra potansiyel yasal sorunlar da ortaya çıkarabilir.

Rekabetçi çarpıklıkların aksine, üst sınır ve ticaret sistemi kaynaklı fiyat dalgalanmaları aynı hızla çözülemez, üstelik bu fiyat dalgalanmalarını önlemek neredeyse imkansızdır. Bunun nedeni fiyat teorisinin içsel piyasa temelli doğasıdır. Üst sınır ve ticaret sistemleri ve hibrit veya karma modeller, program dışındaki piyasa güçlerine karşı hassastır ve bu durum, küresel durgunluk sırasında AB ETS'deki izin fiyatlarındaki düşüşle açıkça ortaya konmuştur (Ellerman, 2016). Bu sorunları fiyat tabanı, ihale rezervi veya diğer ekonomik müdahaleler yoluyla karma üst sınır ve ticaret çerçevesinde ele almak mümkün olsa da bu sorunu sadece üst sınır ve ticaret çerçevesinde çözmek o kadar kolay değildir. Ayrıca, fiyat dalgalanması sorunu taban fiyat, açık artırma rezervi veya piyasadaki izin arzının yönetimi yoluyla çözülsün bile, bu müdahalelerin istenmeyen sonuçları olabilir. Taban fiyat, izinler için çok yüksek olabilir ve bu da rekabetin bozulması, söz konusu izinleri karşılayamayan işletmelerin kapanması veya programa katılım oranının düşmesi gibi sorunlara yol

açabilir. Tekil veya karma bir üst sınır ve ticaret programının karbon fiyatını yönetememesi önemli bir kısıtlamadır ve istikrarlı bir fiyat sağlamak yüksek derecede esneklik, zaman ve bilgi gerektirir.

Üst sınır ve ticaret çerçevesindeki fiyat oynaklığı ve diğer pek çok husus sistemin sınırlamalarını temsil ederken, açık ara en sınırlayıcı olanı maliyet geçişinin ele alınamamasıdır. Üst sınır ve ticaret çerçevesinde emisyonlar için bir fiyat belirlenmekte ve bu fiyat haklı olarak emisyonların üretiminden doğrudan sorumlu olan üreticiye yüklenmektedir. Kirleticinin emisyonlarının bedelini ödemesi üst sınır ve ticaret teorisinin önemli ve olumlu bir yönüdür; ancak aynı üreticilerin bu maliyeti tüketiciye yansıtması sistemin amacına uygun değildir. Eğer kirletici, karbon fiyatının yükselmesi ile oluşan maliyeti tüketiciye yansıtarak aynı seviyede kirletmeye devam edebiliyorsa, kirletici artık sorumlu olduğu kirliliğin bedelini ödemiştir demektir. Maliyetlerin tüketicilere yansıtılması konusu, üreticilerin artan emisyon fiyatlarına sürekli tepki vermesi gibi bir dizi başka sorunu da gündeme getirmektedir. Bazı şirketler, piyasada rekabet avantajı elde etmek için emisyon maliyetlerini tüketicilere yansıtılmayı tercih edebilir. Bu durumun uzun süre devam etmesi halinde, finansal durumu yeterince güçlü olmayan işletmeler piyasadan çekilecek ve bu ürünler için piyasa daralacaktır. Bunun nedeni, büyük şirketlerin rakiplerini piyasanın dışına itene kadar artan emisyon maliyetini daha iyi absorbe edebilmeleri ve rakiplerini elimine ettikten sonra daha önce katlandıkları emisyon maliyetini fiyata aktarmakta özgür olmalarıdır. Eğer bu işletmeler emisyon maliyetleri üstlenmemeyi ve bunun yerine tüketiciye yansıtmayı seçerlerse ve aynı zamanda bedelsiz izin alırlarsa, bu durum olağandışı gelir durumunu ortaya çıkaracaktır. Bu yolla, üst sınır ve ticaret çerçevesi, geçiş maliyetleri konusuyla başa çıkamaz ve bu durum üst sınır ticaret

sistemleri için kolayca üstesinden gelinemeyecek bir sınırlamadır. Genel olarak hem katı hem de esnek üst sınır ve ticaret programları kolay çözülemeyen sorunlar nedeniyle bazı sınırlamalara sahiptir. Ancak katı üst sınır ve ticaret programları daha fazla sınırlamalara sahiptir, hibrit modeller bu sınırlamaların üstesinden gelmek için daha fazla esneklik sunarken, her ikisi de dış piyasa güçlerine karşı hassastır.

AB ETS İçin Çözüm Önerileri:

Sistem içinde devam eden bir dizi zorluk olduğu gibi, bunlar için çözüm önerileri de mevcuttur. İncelenecek olan zorluklara yönelik çözümler, AB ETS'e yönelik başlıca eleştiriler olan olağandışı kârlar, fiyat oynaklığı ve düşük karbon yatırımlarının seviyesidir. Çözüme kavuşturulması gereken bu konulardan ilki, sürekli bir sorun olan olağandışı kârlardır. AB ETS'nin hem 1. hem de 2. aşamalarında yüksek seviyede olağandışı kârlar mevcuttu ve bu süre zarfında sistem, işletmelerin büyük kârlar elde ettiğini gösteren bazı tahminlerle çok fazla eleştiri aldı. Bu kârların nedenleri arasında izinlerin aşırı tahsisi, ekonomik durgunluk, aşırı tahsis edilmiş izinlerin satışı ve yüksek maliyetli geçiş oranları yer almaktadır. Bunun bir örneği, Maxwell tarafından yapılan Birleşik Krallık enerji sektörünün 2. aşama kapsamında yılda 1 milyar pound tutarında olası olağandışı gelir elde ettiğini gösteren bir çalışmadır (Maxwell, 2011). Lise, AB 20'nin, enerji sektörü kapsamında 35 milyar Avroya varan olağandışı kârları olduğunu tahmin etmektedir (Lise, 2010). Olağandışı kârlar AB ETS için önemli bir sorundur ve kirletenin kirliliğinin bedelini ödemesi ilkesini ihlal etmektedir. Olağandışı kârlarının varlığıyla, karbon dengeleme kredileri şeklindeki izinlerin yanı sıra daha ucuz dış seçeneklerin ortadan kaldırılması, fiyat oynaklığının azaltılması ve serbest ticaretin sona erdirilmesi yoluyla mücadele edilebilir.

Üst sınır ve ticaret çerçevesi içinde kalarak olağandışı kârlarla mücadele etmenin en kolay yolu, ücretsiz ödenek tahsisinin sona erdirilmesi ve emisyon seviyelerinin saha bazında sık sık yeniden belirlenmesidir. Bireysel işletme düzeyinde emisyon seviyelerinin her yıl sık sık yeniden doğrulanmasının ardından, söz konusu işletme için belirli bir tolerans aralığı dahilinde emisyon üst sınırının ayarlanması seçeneği sunulacaktır. Bu iki çözümün bir araya gelmesi, olağandışı karlar sorununu ortadan kaldırmaya yardımcı olacaktır, ancak sorunu tamamen çözmeyebilir. Ancak açık artırma rezervinin getirilmesine ek olarak izinlerin tam açık artırmaya çıkarılması bu durumu çözebilir. AB ETS'de bu tür eklemelere ihtiyaç duymaktadır. Programın 1. ve 2. aşamalarındaki aşırı fiyat oynaklığı, olağandışı karlarının tahakkuk etmesine, emisyonlarda küçük bir azalmaya ve düşük karbonlu yatırımların finanse edilememesine neden olmuştur. Açık artırma rezerv fiyatı, emisyonların makul fiyatlanmasını destekleyerek üst sınır ve ticaret programının asgari düzeyde çalışması için faaliyet gösterebilir.

3.4. AB ETS Karbon Fiyat Mekanizması

AB ETS karbon fiyatlarını arz ve talep faktörlerine dayalı olarak belirleyen bir fiyat mekanizmasına sahiptir. Bu mekanizma, piyasa yapısı ve düzenleyici politikaların etkisi altındaki bazı iç ve dış faktörlerin yanı sıra esas olarak arz ve talep dengesi tarafından yönlendirilmektedir. (Nadirgil, 2023a)

Arz ve Talep Dengesi

Arz talep kanuna göre piyasadaki fiyat dengesi en basit tabirle söz konusu ürün veya hizmet için arz ve talep eğrilerinin kesiştiği noktada gerçekleşir ve bu denge talep veya arz değiştiğinde değişebilir. Daha yüksek girdi fiyatları, daha az sayıda

tedarikçi, üretim veya satış için elverişsiz ortam veya daha yüksek vergiler nedeniyle maliyetler yükselirse, arz eğrisi sola doğru kayarak toplam arzı azaltır. Arz bu sebeplerden biri nedeni ile azaldığında, mevcut dengeyi bozacak ve böylece fiyatı artıracak ve ticareti yapılan miktarı azaltacaktır.

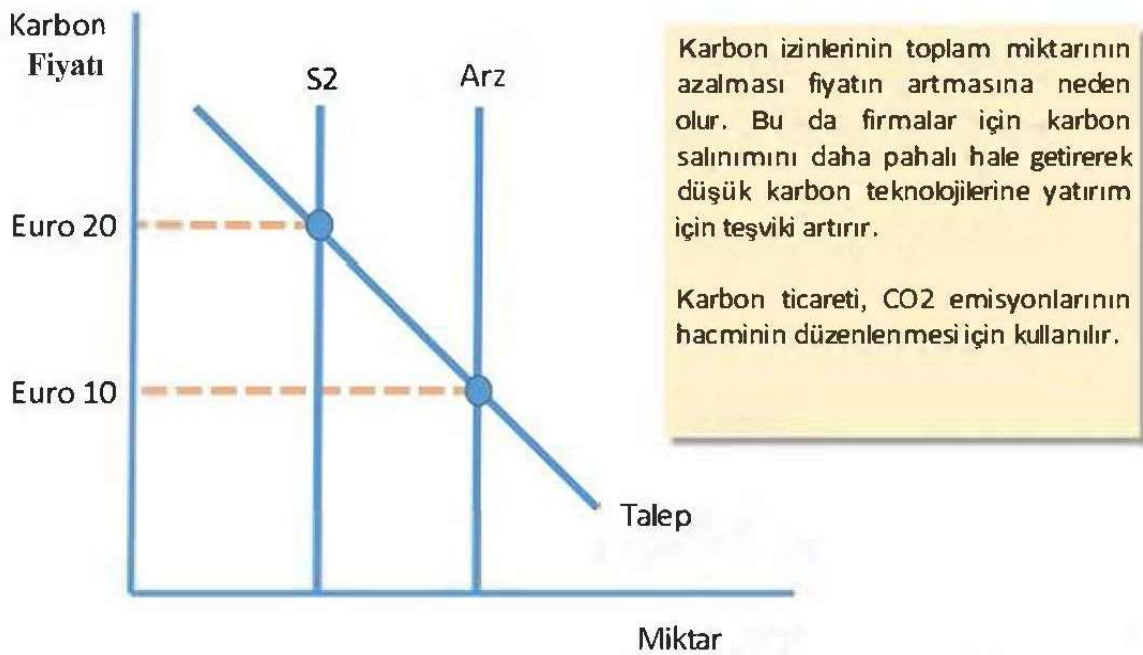
Arz ve Talep Kanunu, ETS'ler için de geçerlidir. Şekil 7'de görüldüğü üzere, karbon izinlerinin toplam arzını azaltmak öncelikle arz eğrisini sola kaydırarak fiyatta bir artışa yol açar ve bu da firmaların karbon emisyonunu daha pahalı hale getirir ve düşük karbon teknolojilerine yatırım için teşviki artırır. Kirleticiler, emisyon izin fiyatları emisyon miktarını azaltmaktan daha ucuz olana kadar azaltım eylemleri gerçekleştirirler (Common & Stagl, 2009).

Özetle, AB ETS, 'üst sınır ve ticaret' ilkesine dayanmaktadır. Üst sınır, sistem kapsamındaki işletmeler için salınabilecek sera gazlarının toplam azami miktarıdır. EUA terimi, AB ETS kapsamında ticareti yapılabilen karbon kredilerini tanımlamaktadır. Her EUA birimi bir ton CO₂'ye eşittir. EUA'lar serbest piyasa koşulları ile elde edilebilir veya açık artırmaya çıkarılır. Karbon kredileri, bir ton CO₂ veya bir ton karbondioksit eşdeğeri gaz emisyonuna izin veren sertifikalar veya izinlerdir ve bu krediler ulusal ve/veya uluslararası karbon piyasalarında alınıp satılabilir.

AB genelinde üst sınır dahilinde şirketler, gerektiğinde birbirleriyle karbon kredilerinin ticaretini yapabilirler. Ayrıca AB dışındaki emisyon tasarrufu sağlayan projeleri varsa bu projelerden sınırlı miktarda uluslararası kredi de satın alabilirler. Mevcut toplam izin sayısındaki sınır, bu kredilerin bir değeri olmasını sağlar. Her yılın sonunda şirketler tüm emisyonlarını karşılayacak kadar izin teslim etmelidir, aksi takdirde ağır para cezaları uygulanır. Bir şirket emisyonlarını azaltırsa,

gelecekteki ihtiyaçlarını karşılamak için yedek ödenekleri tutabilir veya denek sıkıntısı çeken başka bir şirkete satabilir. Bu durum, emisyonların en az maliyetli olduğu yerlerde azaltılmasını teşvik eden bir esneklik getirmektedir. Yüksek bir karbon fiyatı aynı zamanda temiz, düşük karbonlu teknolojilere geçişi de teşvik eder.

ETS program kapsamındaki işletmelere, EUA fiyatına bağlı olarak, yatırım yapmak veya EUA satın almak için esneklik sunmaktadır. Teknolojik yatırımlarla emisyon azaltım maliyetleri karbon fiyatından daha düşük olan işletmeler yatırım yapmaya teşvik edilmektedir. Yüksek emisyon azaltma maliyetine sahip işletmeler ise EUA satın almayı ve yatırım eylemlerini ertelemeyi tercih ederler. EUA'ların doğru takibi için, AB ETS katılımcıları birlik kayıt defterinde bir hesap açarlar ve hesap sahibi tüm tesisler, AB ETS kapsamında olup olmadığına bakılmaksızın EUA'ları satın alabilir veya satabilir. Alım satım için aracılara gerek yoktur ve ticaret organize borsalar veya aracılar vasıtasıyla doğrudan gerçekleştirilebilir.



şekil 7 Karbon Ticareti

3.5. AB ETS Piyasa İstikrar Mekanizması (EU ETS MSM)

Çoğu emtia piyasasından farklı olarak ETS'lerde, bir yönetim organı tarafından artırılabilen veya azaltılabilen, düzenlenmiş bir miktar izin dolaşımdadır. Bu yapı, ETS'lerde fiyat hareketlerini diğer piyasalara kıyasla çok daha öngörülebilir kılmaktadır çünkü izinlerde kademeli olarak fiyatı artırmak üzere tasarlanmış planlı bir düşüş söz konusudur (Uluslararası Enerji Ajansı 2020). Bu faktörler dış müdahaleye gerek kalmadan katılımcıların daha yüksek bir satış noktası beklentisiyle izinlerini tutmaları için bir teşvik yaratır. Ya da alternatif olarak, (COVID-19 salgını sırasında olduğu gibi) izinlere yönelik talepte kesinti kaynaklı bir azalma öngörmeleri halinde katılımcıları izinlerini satmaya motive edebilir. Ayrıca bu faktörler, fiyat oynaklığına neden olan hem içsel hem de dışsal talep şoklarının olasılığını artırabilirler ve bu nedenle, aktif ETS'lerin çoğu, bu tür sonuçları caydırmayı amaçlayan bir tür fiyat istikrar mekanizması (MSM) oluşturmuştur. MSM'ler birçok senaryoda izin fiyatlarını dengeleyebilirler. Örneğin, izin fiyatlarını yüksek tutma stratejisine sahip (düşük karbon teknolojisi yatırımlarını teşvik etmek için) daha küçük ve yeni ETS'ler, izin arz fazlasını ortadan kaldırmak için MSM'leri kullanabilir. Alternatif olarak, ETS'ler, karbon yoğun ürünlere/hizmetlere olan talebi azaltan ani bir dış şok (resesyon) yaşayabilir, MSM bu durumda fazla izinleri ortadan kaldıracaktır. MSM'lerin amacı serbest piyasa koşullarına hafif bir müdahale ile olağandışı durumlarda emisyon oluşturan kuruluşların emisyon azaltmak yerine ucuz izin satın almalarından caydırmak ve sistemin büyük şoklara karşı direncini artırmaktır (Acworth v.d., 2020).

Bu nedenlerle AB Komisyonu, 4. aşamanın başında Piyasa İstikrar Rezervi (MSR) olarak adlandırılan bir MSM uygulamaya karar vermiştir (AB Komisyonu 2021c). MSR, her yılın Mayıs ayında dolaşımdaki toplam izin sayısını yayınlayarak ve bu sayıyı önceden tanımlanmış kurallara göre kaç iznin açık artırmaya çıkarılacağını belirlemek için kullanır (AB Komisyon Personeli, 2021). Bu kurallar, fiyatların düşmesini engelleyen fazla izinleri elimine ederek toplam izin sayısını belirli bir eşiğin altında tutmaya çalışır (Marcu v.d., 2022). Bu fazla izinler daha sonra emisyon üst sınırını etkilemeden serbest bırakılabilecekleri bir rezerve yerleştirilir.

MSR üzerine çok az araştırma yapılmış olmasına rağmen, uzmanlar rezervin neden olabileceği fiyat oynaklığı konusundaki endişelerini dile getirmişlerdir. Örneğin, izinlerin iptal edilmesi, kısa vadeli dalgalanmalardan kaynaklanan fiyat artışlarını tetikleyebilecek olan izin kıtlığı ihtimalini güçlendirmektedir (Marcu v.d., 2022).

İzin fazlalığına iyi bir örnek, 2020'de AB ETS'nin 3. aşamasında görülmüştür. COVID salgınının yol açtığı ekonomik durgunluk, birçok sanayi ve enerji sektörü faaliyetini birkaç ay boyunca durdurmuş veya ciddi şekilde sınırlandırmıştır. Bu kapanmalar, AB Komisyonu'nun yılın başında karbon kredilerini tahsis ederken öngördüğünden daha düşük emisyonlarla sonuçlanmış, bu da izin fazlalığına ve ardından fiyatların bir hafta içinde yaklaşık 25 Avrodan 16 Avroya düşmesine neden olmuştur (AB Komisyonu 2021c; Trading Economics, 2022a).

Ancak Mayıs 2020'de AB Komisyonu, arz fazlalığı tespit etmiş ve toplam arzı yaklaşık 400 milyon azaltmaya karar vermiştir (AB Komisyon Personeli, 2021). Bu, toplam tahsisat sayısını 1,5 milyara indirmiş ve anında tahsisat fiyatlarını Covid öncesi seviyelere geri getirmiştir. Bu noktada MSR henüz yeni uygulanmaya

başlamış olsa da, mekanizma daha fazla fiyat düşüşünü önleyerek amaçlandığı gibi tepki vermiştir. Bu durum, Komisyon'un 4. aşamada daha duyarlı dengeleyici mekanizmalar için bastırmasını haklı çıkarmıştır (Dünya Bankası, 2022a).

Pandemi sırasındaki etkinliğine rağmen, bazı uzmanlar MSR'nin (ve genel olarak MSM'lerin) fiyat istikrarı üretme kabiliyetinden hala şüphe duymaktadır. Politika yapıcılar MSR'lerin sözde güçlü yönlerini vurgularken, ekonomistler çeşitli eksiklikler tespit etmişlerdir. Bunlar arasında artan fiyat oynaklığı ve spekülasyona açık olma olasılığı yer almaktadır (Perino v.d., 2022).

Bu sorunlar, fiyatları ayarlamak için sabit bir emisyon üst sınırı kullanan AB ETS MSR'de de gözlemlenmiştir. Potansiyel olarak, iklimsel fayda ve fiyat oynaklığı arasındaki değiş tokuş, MSM'lerle ilgili eleştirilerin ana kaynağıdır. Buna ek olarak, AB ETS MSR tahsisat arzını dolaşımdaki tahsisat sayısına göre ayarlamaktadır, yani komisyon belirlediği fiyat eşiğini aştığında tahsisatları alıkoyabilir veya iptal edebilir (AB Komisyonu 2021c). Bu üst sınır yapısı emisyonları azaltabilse de teorik olarak piyasa katılımcılarının bu fiyat hareketlerini öngörmek için potansiyel spekülatif çabalarına yol açabilir. Örneğin, piyasa katılımcıları hızlı bir karbon fiyatı artışı gözlemlerse, karbon fiyatlarını geri düşürecek MSR'nin devreye gireceği beklentisiyle tahsisatlarını satabilirler.

Komisyon, mevcut piyasa koşullarında AB ETS'nin istikrara kavuşturulmasına nasıl yardımcı olabileceğini görmek için MSR üzerinde çalışmaya devam etmektedir. Dinamik piyasa koşulları, MSR'nin etkinliğini sağlamak için düzenli olarak gözden geçirilmesinin gerekli olduğunu göstermektedir. Örneğin, AB'nin kömürden çıkış planlarına göre 2030 yılına kadar kömür santrallerinin çoğu kapatılacak ve bu da 2030 yılına kadar arz fazlasına 2 milyar izin ekleyecektir (AB Komisyonu, 2021a).

Arz fazlasından kaynaklanan bir fiyat çöküşünü önlemek için, MSR'nin güçlendirilmesi gerekir, böylece yüksek emisyonlu endüstriler aşamalı olarak ortadan kaldırıldığında tahsisatları dolaşımdan tamamen kaldırabilir. Ancak, mevcut haliyle yüksek emisyonlu ürünlerin aşamalı olarak kullanımdan kaldırılması bir tahsisat fazlası yaratma tehdidi oluşturmaktadır.



DÖRDÜNCÜ BÖLÜM KARBON FİYATINI BELİRLEYEN FAKTÖRLERİN ANALİZİ

4.1. Uygulamanın Önemi, Amacı, Kapsamı ve Kısıtları

Önemi:

İklim değişikliği, rekor düzeyde yüksek sıcaklıklara, deniz seviyesinin yükselmesine, şiddetli kuraklıklara, fırtınalara, sellere ve gitgide artan sıklıkta çevresel felaketlere yol açmaktadır. Daha da kötüsü iklim değişikliğinin sonuçlarının önümüzdeki on yıl içinde geçmişte olduğundan çok daha büyük ve yıkıcı olması beklenmektedir. İklim değişikliğinin başlıca nedenleri ısınma, enerji, üretim, tarım ve ulaşım sektörlerinin faaliyetleri gibi beşerî sebeplerle fosil yakıtların yakılması nedeniyle sera gazı (GHG) emisyonlarının artması ve doğal karbon yutaklarının azalmasıdır.

Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Programı (EU ETS), üye devletlerin Kyoto Protokolü kapsamındaki çevresel taahhütlerine uymalarını desteklemek amacıyla dünyadaki ilk büyük ölçekli emisyon ticareti sistemi olarak 2003 yılında kurulmuş ve 2005 yılında pilot fazı ile faaliyete geçmiştir. Halihazırda AB ETS mekanizması, Avrupa Ekonomik Alanı (AEA) genelinde enerji yoğun endüstrilerde (elektrik, ısı ve buhar üretimi, petrol rafinerileri, demir ve çelik üretiminde kok fırınları, maden endüstrileri ile kâğıt hamuru ve kâğıt fabrikaları) yaklaşık AB'nin sera gazı emisyonlarının %45'ini ve 28 AB ülkesine ilaveten Norveç, İzlanda ve Lihtenştayn'da faaliyet gösteren yaklaşık 13.500 işletmeyi kapsamaktadır.

AB ETS, üst sınırın tesislerin emisyon kotalarını temsil ettiği üst sınır ve ticaret (cap and trade) ilkesine göre çalışır. Eğer bir firma üst sınırını aşarsa, saldığı her bir

metrik ton karbondioksit için, kotasından daha az salım yapan diğer firmalardan EUA fiyatını ödeyerek ek emisyon izni (EUA) almalıdır.

Avrupa karbon (EUA) fiyatı, piyasa yapısı ve düzenleyici politikaların etkisi altındaki diğer dış faktörlere ek olarak temelde arz ve talep mekanizması tarafından belirlenmektedir. AB ETS 3. fazının son dönemlerinden itibaren karbon fiyatının ciddi anlamda yükselmesi ve AB emisyon hedeflerinin katı bir şekilde sıkılaştırılması nedeniyle, karbon fiyatının doğru bir şekilde tahmin edilmesinin önemi, yatırımcılar ve emisyon yayan tesislerin karlılıkları ve stratejileri için hayati hale gelmiştir. Emisyon piyasalarının ve bu piyasalardaki ürünlerin konvansiyonel piyasa ürünleri ile düşük korelasyonu, bu ürünleri emisyon yayan şirketler dışındaki kurumsal ve bireysel yatırımcılar için cazip hale getirmiştir ve bu piyasaların işlem hacmi, yatırımcıların ilgi ve talepleri ile orantılı olarak giderek artmaktadır. Bu hedef doğrultusunda, hassas karbon fiyatı tahmin modelleri oluşturulması için doğru ve etkili fiyat etkenlerini ve doğru yöntemleri seçmek çok önemlidir.

Amacı:

Bu araştırmanın ilk amacı, İklim değişikliğinin sonuçları, nedenleri ve çözüm önerileri hakkında bilgi vermek, AB ETS özelinde emisyon ticaret sistemlerinin amacını, kapsamını ve faaliyetlerini açıklamak, bu kapsamda karbon fiyatının bu sistemlerin ve iklim politikalarının başarısı için ne denli önemli olduğunu ortaya koymaktır.

İkincil ve temel amaç, karbon fiyatının kompleks yapısal özellikleri nedeni ile hibrit yapay zeka uygulamaları kullanarak hassas, etkili ve orijinal karbon fiyatı tahmin modelleri geliştirmek ve bu amaç doğrultusunda öncelikle karbon fiyatını etkileyen

faktörlerin yine yapay zeka uygulamaları kullanarak geniş ve kapsamlı analizini yapmak ve karbon fiyatı tahmininde kullanılacak doğru ve etkili faktörleri belirlemektir.

Karbon fiyatı zaman serisi yüksek gürültü (noise), düzensizlik ve yapısal belirsizlik içermektedir, ayrıca lineer veya durağan da (stationary) değildir. Dolayısı ile etkili bir karbon fiyatı tahmin modeli geliştirmek oldukça zordur. Önceki çalışmalar, doğru karbon fiyatı tahmininde geleneksel yöntemlerin uygulanmasının yetersizliğini göstermektedir (Wang v.d., 2023). Karbon fiyatı verilerinin yukarıda belirtilen özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, parametrik olmayan denetimli makine öğrenimi (nonparametric supervised machine learning, DML) yöntemleri karbon fiyat tahmin modelleri oluşturma ve faktör seçimi için daha uygun olacaktır.

Mevcut çalışmalara göre, çok sayıda dışsal değişken AB ETS karbon fiyatı ve fiyat oynaklığı üzerinde etkiye sahiptir. Bu çalışmalara örnek olarak, Christiansen v.d. (2005), piyasa temel bileşenlerini, Zhang ve Sun (2016), fosil yakıt piyasalarını, Dutta v.d. (2018) temiz enerji piyasalarını, Tan v.d. (2020), enerji dışı piyasaları, Chevallier (2009), hisse senedi piyasalarını ve Wen v.d. (2022), piyasa belirsizliği, diğer piyasalar arasındaki bağlantı ve yayılma etkisini incelemiştir.

Şüphesiz, karbon fiyatının oynaklığının doğru bir şekilde modellenmesi, karbon fiyat dinamiklerinin analizinde ve piyasa riskinin kontrol edilmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Ancak, uygulamada, yatırımcılar ve piyasa katılımcıları için bunu doğru bir şekilde tahmin etmek karbon fiyatı veri setinin yapısal özellikleri açısından son derece karmaşıktır. Bu çalışma geçmiş çalışmaları göz önüne alarak, enerji, endeks ve finans başlıkları altında 3 kümede sınıflandırılan 28 değişkenin AB ETS karbon fiyat volatilitesi üzerindeki etkilerini araştırarak dışsal karbon fiyatı

etkenlerinin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Bu 28 faktör, değişkenlerin coğrafi etkilerini de analiz edebilmek için coğrafi olarak çeşitlendirilerek seçilmiştir.

Emisyon piyasalarının yatırımcılara sunduğu portföy çeşitlendirme faydaları ve likidite nedeniyle bu piyasalara olan ilgi ve işlem hacmi giderek artmaktadır. Özellikle, enerji yoğun endüstrilerde faaliyet gösteren emisyonları yüksek şirketler, yüksek hacimli karbon izin yatırımları nedeniyle emisyon piyasalarının bel kemiği haline gelmiştir. Bu nedenle, karbon fiyatının bu şirketlerin karlılığı ve hisse senedi getirileri üzerinde önemli bir etkiye sahip olması beklenmektedir ancak bu etkinin büyüklüğü firmaların karbonsuzlaştırma (decarbonization) iyileştirmelerinin marjinal maliyeti gibi endüstriyel özelliklere bağlıdır. Bu çalışmanın amaçlarından biri, karbon fiyatlarındaki volatilitenin çevreyi kirleten şirketlerin hisse senedi getirileri üzerindeki etkilerini sektörel farklılıkları ortaya koyarak araştırmaktır.

Öte yandan, kirletici şirketler emisyon piyasalarının başlıca oyuncularları ve müşterileridir, bu nedenle bir şirketin hisse senedi fiyatının (firmanın piyasa değeri) firmanın kullanılabilir fon tutarının önemli bir belirleyicisi olduğu düşünüldüğünde, bu şirketlerin hisse senedi performanslarının karbon fiyatı üzerinde önemli bir etkiye sahip olması beklenmektedir. Bu noktada, kirletici firmaların hisse senedi performansları, mevcut fon miktarları ve bu şirketlerin emisyon izinleri ile karbonsuzlaştırma yatırımları arasındaki yatırım tercihleri, bu şirketlerin emisyon izin sözleşmelerine olan taleplerini şekillendirecektir.

Yukarıdaki bilgiler ışığında, karbon fiyatının bu şirketlerin yatırım tercihlerini şekillendirmede temel bir belirleyici olduğu düşünüldüğünde, kirletici şirketlerin hisse senedi performansları ile karbon fiyatı oynaklığı arasında çift yönlü yakın bir ilişki bulunması beklenmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, kirletici endüstrilerin endeks

getirileri ile karbon fiyatı arasındaki çift yönlü ilişkinin çeşitli yapay zeka modelleri uygulanarak ve tüm kirletici sektörleri kapsayacak şekilde kapsamlı bir analizini sunarak literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

Kapsamı:

Bu çalışma ilk uygulama kısmında, 2016-2023 yılları arası AB ETS karbon (EUA) fiyatına etki eden faktörleri ve etkileme derecelerini kapsamlı bir şekilde 13 farklı ve orijinal parametrik olmayan denetimli makine öğrenimi modeli kullanarak araştırmaktadır. Daha önce yapılan çalışmaların ışığında, enerji, endeks ve finans başlıkları altında coğrafi olarak çeşitlendirilerek seçilen 28 değişkenin, geliştirilen 13 ML modelle Avrupa karbon fiyatı üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuçta bu modellerin karbon fiyatı tahminindeki hassasiyet ve uygunluk performansları 6 farklı parametre ile karşılaştırılmıştır.

Enerji grubu, coğrafi olarak çeşitlendirilmiş enerji fiyatlarının EUA fiyatı üzerindeki etkisini araştırmak için Avrupa genelinde 7 enerji fiyatından oluşmaktadır. Endeks grubu, özel ihtisas endekslerinin EUA fiyatı üzerindeki etkilerini açıklayarak literatürü genişletmek için endüstriyel metal endeksine ek olarak düşük karbon, temiz enerji ve enerji endeksleri ile birleştirilmiş 12 küresel ve coğrafi olarak çeşitlendirilmiş endeks değerlerini içerir ve son olarak finansal grup, dünyanın farklı bölgelerindeki finansman koşullarının Avrupa karbon fiyatı üzerindeki etkisini analiz etmek için dünya çapında çeşitlendirilmiş 9 farklı tahvil getirisi ve spread'leri içerir.

Uygulamanın ikinci kısmında, 1. kısımda geliştirilen 13 model ve granger VAR nedensellik testi kullanılarak AB ETS kapsamında faaliyet gösteren 14 sektörün

sektörel ortalama hisse senedi getirilerinin Avrupa karbon fiyatı ile olan çift taraflı ilişkisi araştırılmıştır.

Kısıtları

Genel olarak, yapay zeka temelli modeller özellikle lineer ve durağan olmayan kompleks veri setleri için tahmin performansı adına önemli faydalar sunabilirken, önyargılı (bias), eksik ve hatalı veri setlerinde çok başarılı netice vermeyebilirler. Ayrıca aşırı uyum (overfitting) ve hesaplama karmaşıklığı gibi bazı dezavantajlara da sahiptirler. Bu çalışmada, bu dezavantajları azaltmak için öncelikle veri seti temizlenmiş, normalleştirilmiş, yapılandırılmış ve aşırı uyum sorununu hafifletmek için her yöntem 10 kat çapraz doğrulama ile (10 fold cross-validation) uygulanmıştır.

4.2. Literatür İnceleme

Karbon fiyatı tahmin modelleri geliştirmeyi amaçlayan çok sayıda çalışma olmasına rağmen, bu çalışmaların çoğu yalnızca tahmin doğruluğuna odaklanmakta ve faktör seçimi için uygun yöntemleri uygulamakta başarısız olmaktadır. Buna ek olarak, bu çalışmaların kapsamı, geniş bir faktör yelpazesi mevcudiyetine rağmen genellikle birkaç karbon fiyatı etkeninin analiziyle sınırlıdır. Alberola v.d. (2008), EUA spot fiyatının enerji fiyatlarının yanı sıra beklenmedik sıcaklık değişimlerine de tepki verdiğini tespit etmiş, Benz ve Truck (2009), Markov ve AR-GARCH modeli kullanarak karbon spot fiyatının kısa vadeli davranışını analiz etmiş ve karbon emisyon seviyelerinin hava durumu verileri (sıcaklık, yağış ve rüzgar hızı), yakıt fiyatları ve ekonomik büyüme gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğu sonucuna varmıştır. Chevallier (2009), karbon vadeli işlem getirileri ile makroekonomik koşullardaki değişimler arasındaki ampirik ilişkiyi incelemiş ve hisse senedi temettü getirilerinin

ve 'önemsiz tahvil' priminin karbon fiyatı üzerinde zayıf bir etkisi olduğunu ifade etmiştir. Keppler ve Mansanet-Bataller (2010), kömür ve gaz fiyatlarının ilk aşamada karbon vadeli işlem fiyatını etkilediği ve bu nedenselliğin ikinci aşamada sıcaklık, gaz ve elektrik fiyatları tarafından karbon fiyatlarına taşındığı sonucuna varmıştır. Bredin ve Muckley (2010), AB ETS'nin ekonomik büyüme, enerji fiyatları ve hava koşulları gibi faktörler tarafından yönlendirilen olgunlaşmakta olan bir piyasa olduğunu ileri sürmektedir. Creti v.d. (2012), petrol fiyatı, hisse senedi endeksi ve gaz ve kömür yakıtlı elektrik santrallerinin marjinal maliyetlerinin eşit olduğu geçiş fiyatının etkisini araştırmış ve ilk iki aşama için eş bütünleşik bir ilişkinin varlığını kanıtlarken, bu denge ilişkisinin, ikinci aşamada faktörlerin artan etkisi ile iki alt dönem arasında farklılık gösterdiğini bulmuştur. Zhu v.d. (2019), farklı zaman ölçeklerinde karbon fiyatı etkenlerini yakalamak için hata düzeltme modeli uygulamış ve elektrik, kömür ve hisse senedi fiyatlarının önemli pozitif etkilerini bulmuştur. Batten v.d. (2021), karbon fiyatlarını açıklamada enerji fiyatlarının (kömür, gaz, petrol ve elektrik) ve hava durumu değişkenlerinin kapsamını araştırmış, III. aşamada enerji fiyatlarının karbon fiyatı üzerindeki etkisini göstermiş ve yalnızca enerji fiyatlarına dayalı modellerin karbon fiyatı hareketlerinin yalnızca %12'sini açıklayabildiğini belirtmiştir. Byun ve Cho (2013), petrol, kömür, gaz ve elektrik fiyatlarının tahmin yeteneğini analiz etmiş ve enerji oynaklığının tahmin performansını etkileyebileceğini savunmuştur. Son olarak, Tan v.d. (2020), enerji dışı emtiaların karbon fiyat oynaklığı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuç olarak, önceki araştırmaların çoğu çevre, enerji veya hisse senedi gibi tek bir değişken sınıfına odaklanmaktadır. Literatürün detaylı incelenmesi, karbon fiyatını etkileyen faktörlerin ve özelliklerinin kapsamlı bir analizine acil ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Son zamanlarda yapılan birkaç çalışma, geniş bir yelpazede karbon fiyat faktörlerinden gelen bilgilerin boyutunu azaltarak fiyat tahmini için önemli bilgileri ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır (Huang v.d., 2021; Zhang v.d., 2022; Wang v.d., 2023). Wang v.d. (2022), küresel ekonomik koşullardan bilgi çıkarmak için ölçeklendirilmiş temel bileşen analizi (SPCA) ve kısmi en küçük kareler regresyonu (PLS) kullanırken, Wang v.d. (2023), volatilité tahminleri oluşturmak için bireysel faktör analizi, kombinasyon tahmin yöntemi, difüzyon endeksi modeli ve denetimli öğrenme yöntemlerini uygulamış ve denetimli öğrenme yöntemlerinin EUA oynaklığını tahmin etmede difüzyon endeksi ve kombinasyon tahmin yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmıştır.

Sermaye piyasaları ile karbon fiyatı arasındaki ilişkiyi araştıran çalışmalar arasından, Oberndorfer (2009) karbon fiyatı ile Avrupa elektrik sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin hisse senedi fiyatları arasında pozitif ilişki tespit ederken, Mo v.d. (2012), Avrupa enerji sektörü ile olan ilişkisini araştırmıştır. Ayrıca, Creti v.d. (2012), Koch v.d. (2014) ve Rodriguez (2019) de çeşitli sektörlerdeki işletmelerin hisse senedi getirilerinin karbon fiyatı üzerindeki etkilerini araştırmış, Dutta v.d. (2018) karbon piyasası ile kirletici sektörlerin sermaye piyasası getirileri arasındaki ilişkinin politika değişiklikleri, çeşitlendirilmiş firma davranışları ve piyasa verimsizlikleri nedeniyle grift ve karmaşık olduğu sonucuna varmıştır.

Moreno ve Silva (2016), çok faktörlü bir piyasa modeli uygulayarak karbon fiyatı hareketleri ile İspanya'daki kirletici sektörlerin hisse senedi getirilerinin ilişkili olup olmadığını incelemiş ve karbon fiyatının hisse senedi getirileri üzerinde II. ve III. fazlarda etkili olduğu sonucuna varmıştır. Garcia v.d. (2020), AB karbon emisyon tahsisatlarının Avrupa enerji endüstrisi üzerindeki uzun vadeli etkisini analiz etmek

için sıradan en küçük kareler (OLS) yöntemini kullanmış ve III. aşamada Avrupa enerji üretim sektörü hisse senedi fiyatlarının EUA üzerindeki uzun vadeli etkisinin önemli olduğunu tespit etmiştir. Rodriguez (2019), Granger nedensellik testi uygulayarak Avrupa sermaye piyasaları ile Avrupa İklim Borsası (ECX) arasındaki ilişkiyi incelemiş ve hisse senedi piyasalarından ECX'e doğru bir nedensellik tespit etmiştir. Zhu v.d. (2018), EUA fiyatının Avrupa'daki karbon yoğun endüstrilerin hisse senedi getirileri üzerindeki etkilerini incelemek için panel dağılım regresyon yöntemini uygulamış ve EUA fiyatının I. ve III. aşamalarda borsa getirileri üzerinde önemli negatif etkisini tespit etmiştir. Sun v.d. (2022) Çin karbon fiyatları ile dört enerji yoğun hisse senedi endeksi arasındaki nedenselliği araştırmak için kalıp nedensellik yöntemini kullanmış ve Aralık 2017'den önce Nisan 2018'den sonrasına göre daha güçlü bir nedensel etki gösteren zayıf bir çift yönlü ilişki bulmuştur.

4.3. Veri Seti

Karbon Fiyatı:

Enformasyon asimetrisinin etkisini en aza indirmek ve yeni bilgilerin emisyon piyasasındaki etkilerini daha iyi gözlemlemek için, bu çalışmada 1 Ocak 2016'dan 1 Ocak 2023'e kadar Avrupa vadeli karbon emisyonu izinlerinin (EUA) günlük kapanış fiyatları kullanılmıştır. AB ETS'nin ilk 2 aşaması, bir önceki bölümde ele alınan, aşırı ücretsiz izin tahsisatı, yapısal eksiklikler ve makroekonomik faktörler gibi sebeplerin karbon fiyatında ciddi istikrarsızlığa sebep olması nedeniyle bu çalışmanın dışında tutulmuştur.

Fiyat Faktörleri:

Daha önce yapılan çalışmaların ışığında, bu çalışmada, çeşitli kaynaklardan 2016-2023 yıllarına ait enerji, endeks ve finans olmak üzere 3 gruptan 28 faktörün günlük verileri toplanmıştır. Enerji grubu, Fransa, İspanya ve Almanya'nın günlük ortalama toptan elektrik fiyatlarına ek olarak Intercontinental Exchange'de (ICE) işlem gören kömür, gaz, brent petrol ve gaz yağı vadeli işlem verilerinin günlük kapanış fiyatlarından oluşmaktadır. Endeks grubu, FTSE 100, FTSE 350 elektrik, FTSE 350 petrol ve gaz, FTSE 350 endüstriyel metaller, DAX, CAC40, NIKKEI 225, SHANGHAI, STOXX 600, S&P 500, Low Carbon 100 Europe (LC100) ve NASDAQ OMX Clean Energy Europe (NCE) dahil olmak üzere küresel olarak çeşitlendirilmiş 12 günlük hisse senedi endeksi verisinden oluşmaktadır. Finansal değişkenler, İngiltere 3 aylık (UK3M) ve 10 yıllık tahvil getirileri (UK10), Almanya 10 yıllık tahvil getirisi (GER10Y), Fransa 10 yıllık tahvil getirisi (FRA10Y), ABD 3 aylık (US3M), 2 yıllık (US2Y) ve 10 yıllık tahvil getirileri (US10Y), ABD 2-10 yıllık tahvil getirisi farkı (US2010S) ve EuroBund Eurex tahvil getirisi (EBUND) dahil olmak üzere coğrafi olarak çeşitlendirilmiş 9 tahvil getirisi ve farkını içermektedir. Tablo 2, 3 grupta seçilen 28 değişkenin tanımlarını, kodlarını ve veri kaynaklarını ayrıntılı olarak sunmaktadır.

Grup	Değişken	Kodu	Kaynak
Enerji	İce Kömür Vadeli	KOM	Investing
	İce Gaz Vadeli	GAZ	Investing
	İspanya Günlük Toptan Elektrik	ELK ISP	Ember
	Fransa Günlük Toptan Elektrik	ELK FR	Ember
	Almanya Günlük Toptan Elektrik	ELK ALM	Ember
	İce Petrol Vadeli	PET	Investing
	İce Petro-Gaz Vadeli	PET GAZ	Investing
Endeks	FTSE 350 Elektrik Endeks	FTSE ELK	Investing
	FTSE 350 Petro-Gaz Endeks	FTSE PG	Investing
	DAX Endeks	DAX	Investing
	CAC 40 Endeks	CAC40	Investing
	SHANGHAI Endeks	SHANG	Investing
	STOXX Endeks	STOXX 600	Investing
	FTSE 100 Endeks	FTSE 100	Investing
	S&P Endeks	S&P 500	Investing
	NASDAQ Temiz Enerji Endeks	NCE	Investing
	Low Carbon 100 Avrupa Endeks	LC 100	Investing
	Nikkei 225 Endeks	NIKKEI 225	Investing
	FTSE Endüstriyel Metaller Endeks	FTSE IM	Investing
Finans	Birleşik Krallık 10 yıllık tahvil getirisi	BK 10Y	Investing
	ABD 10 yıllık tahvil getirisi	ABD 10Y	Investing
	ABD 3 aylık tahvil getirisi	ABD 3M	Investing
	ABD 2-10 Yıllık Tahvil Spread (UGYS)	ABD 10YS	Investing
	EuroBund Vadeli	EBUND	ECB
	Almanya 10 Yıllık tahvil getirisi	ALM 10Y	ECB
	Fransa 10 Yıllık tahvil getirisi	FRA 10Y	ECB
	ABD 10 Yıllık tahvil getirisi	ABD 2Y	Investing
	Birleşik Krallık 3 aylık tahvil getirisi	BK 3M	Investing

Tablo 2 Seçilen Değişkenler

Sektörler ve Şirketler:

Uygulamanın 1. bölümünün 2. kısmında sektörel ortalama endeks getirilerinin karbon fiyatı ile olan iki taraflı ilişkisi analiz edilmiştir. Bu amaçla emisyon yayan kirletici sektörleri belirlemek için Eurostat'ın endüstriyel sera gazı emisyonlarına ilişkin üç aylık verilerinden yararlanılmıştır. Tablo 3 çalışma kapsamında seçilen 14 sektörü göstermektedir. Sektörel ortalama hisse getirilerini bulmak için seçilen sektörlerden Avrupa borsalarında işlem gören en yüksek piyasa değerine sahip ilk 5 şirketin günlük düzeltilmiş kapanış hisse senedi fiyatları kullanılmıştır. Endüstri endeksleri aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır;

$$W_i = \sum_{p=0}^{P=t} \frac{M_t}{M} x P_t \quad (1)$$

Burada M_t şirketinin toplam piyasa değeri, M seçilen endüstrinin toplam piyasa değeri, P_t şirketinin hisse senedi fiyatı ve W_i ağırlıklı ortalama endüstri endeksidir.

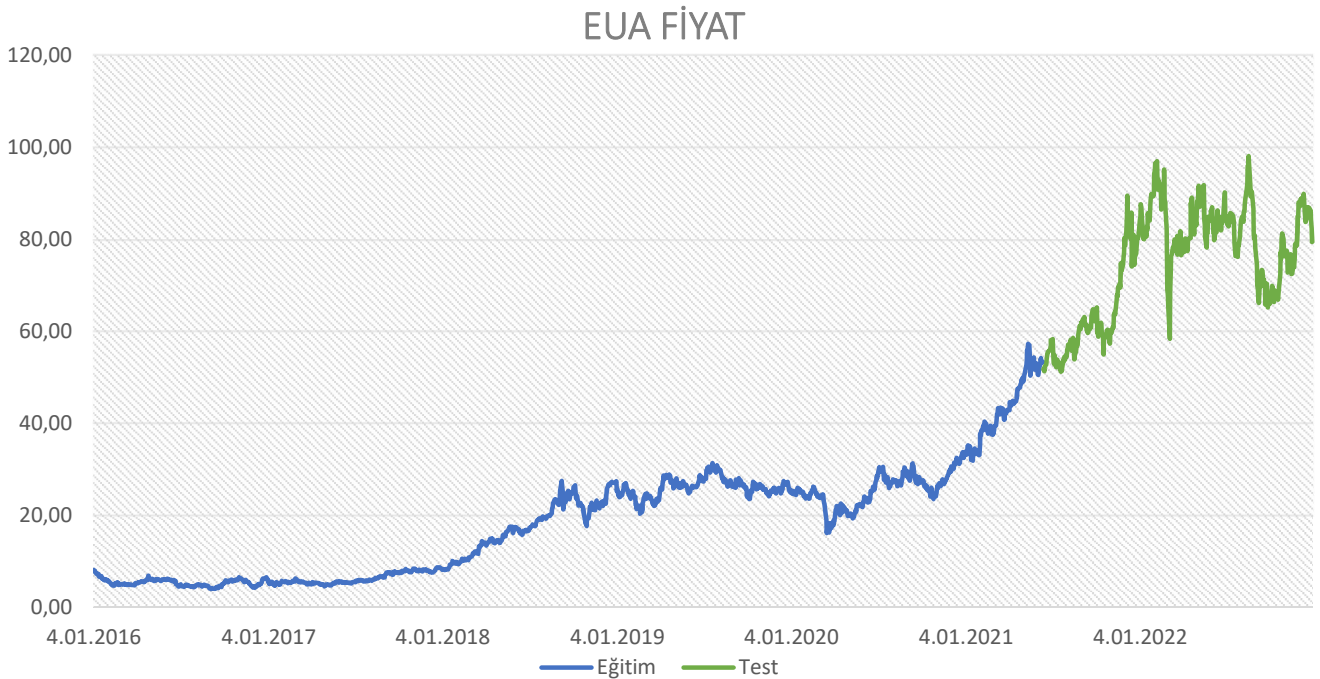
Sektör	Kodu	Sektör	Kodu
Petrol	1	Tarım	8
Gaz	2	Hayvancılık	9
Elektrik	3	Kimya	10
Yenilenebilir Enerji	4	Petrokimya	11
Havacılık	5	Çimento	12
Ulaşım	6	İnşaat	13
Demir Çelik	7	İmalat	14

Tablo 3 Seçilen Sektörler

4.3. Araştırmanın Yöntemi

İlk aşamada, seçilen 28 fiyat faktörü, 14 endüstriyel ortalama hisse senedi getirisi ve EUA fiyatını içeren çalışmanın veri seti istatistiksel olarak analiz edilmiş, temizlenmiş, normalize edilmiş ve son olarak da eğitim ve test (train and test subsets) alt veri setlerine ayrılmıştır.

Bir sonraki aşamada, 3 farklı kategoriden seçilen 28 faktörün ve 14 sektörel ortalama hisse getirisinin etki önem puanları geliştirilen 13 DML modelleri ile hesaplanmıştır. Ayrıca sektörel hisse getirileri ile karbon fiyatı arasındaki çift yönlü ilişki granger VAR testi ile analiz edilmiştir. Son aşamada ise uygulanan 13 modelin tahmin ve model uygunluk performansları 6 farklı parametre ile karşılaştırılmıştır. Şekil 8, tarihsel EUA fiyat verisini eğitme, doğrulama ve test amaçları için ayrılmış bölümleri ile birlikte göstermektedir. Uygulamanın 1. ve 2. kısımlarına ait yöntem çerçevesi şekil 9’da tasvir edilmiştir.



Şekil 8 EUA Tarihsel Fiyatı

Ayrıca, seçilen 28 değişkenin ve 14 sektörel ortalama hisse getirisinin istatistiksel özellikleri sırası ile tablo 4 ve 5’de gösterilmektedir.

	Ort.	Std. Hata	Medyan	Mod	Std Sapma	Basıklık	Çarpıklık	Menzil	Min	Maks
<i>EUA</i>	30.87	0.62	24.64	4.95	26.25	-0.27	0.98	94.08	3.93	98.01
<i>KOM</i>	127.97	2.42	93.15	51.00	102.73	2.44	1.93	409.30	48.50	457.80
<i>GAZ</i>	74.73	1.95	46.11	38.49	82.58	14.52	3.56	694.70	28.26	722.96
<i>ELK ISP</i>	90.82	2.40	47.24	35.83	102.02	6.38	2.42	697.86	5.05	702.91
<i>ELK FR</i>	102.62	2.71	51.15	46.89	114.92	4.92	2.18	734.17	5.95	740.12
<i>ELK ALM</i>	84.52	1.55	57.48	64.71	65.88	3.74	1.76	542.36	5.10	547.46
<i>PET</i>	64.25	0.46	62.70	73.44	19.37	0.43	0.66	108.65	19.33	127.98
<i>PET GAZ</i>	590.16	5.26	564.38	561.00	222.95	1.82	1.34	1331.75	190.75	1522.50
<i>FTSE ELK</i>	8473.89	28.20	8481.43	9019.46	1196.25	-0.25	0.41	5932.56	6047.59	11980.15
<i>FTSE PG</i>	7194.59	38.84	7690.62	9315.02	1647.73	-0.97	-0.41	6929.43	3233.46	10162.89
<i>DAX</i>	12608.32	39.08	12561.55	14671.33	1657.87	-0.41	0.15	7830.04	8441.71	16271.75
<i>CAC40</i>	5467.06	18.01	5380.17	6257.94	764.03	-0.66	0.32	3621.53	3754.84	7376.37
<i>FTSE 100</i>	6997.16	13.14	7171.92	7236.68	557.28	0.06	-1.00	2883.56	4993.89	7877.45
<i>NIKKEI225</i>	22584.88	95.41	22201.19	27663.39	4048.03	-0.99	0.17	15718.08	14952.02	30670.10
<i>SHANGHAI</i>	3159.46	6.51	3158.60	3052.78	276.16	-0.55	-0.09	1529.31	2464.36	3993.67
<i>STOXX 600</i>	390.73	0.97	385.48	423.08	40.97	-0.34	0.45	214.69	279.66	494.35
<i>S&P 500</i>	3087.80	18.75	2879.63	1864.00	795.37	-0.94	0.46	3046.56	1750.00	4796.56
<i>LC 100</i>	123.63	0.34	120.65	120.65	14.41	-0.62	0.35	66.26	92.49	158.75
<i>NCE</i>	1377.97	8.39	1227.45	1166.80	356.12	-0.71	0.76	1369.60	864.50	2234.10
<i>FTSE IM</i>	4583.91	50.32	4626.92	6718.19	2134.71	-0.96	-0.06	8415.17	567.57	8982.74
<i>BK 10Y</i>	1.14	0.02	1.07	1.31	0.78	3.19	1.56	4.43	0.08	4.50
<i>ALM 10Y</i>	0.16	0.02	0.08	-0.33	0.64	2.27	1.40	3.42	-0.85	2.56
<i>FRA 10Y</i>	0.53	0.02	0.46	0.74	0.70	1.96	1.33	3.55	-0.44	3.11
<i>ABD 10Y</i>	2.07	0.02	2.05	1.77	0.79	-0.45	0.08	3.74	0.51	4.25
<i>ABD 3M</i>	1.12	0.02	0.90	0.05	1.05	0.32	0.90	4.50	-0.05	4.46
<i>EBUND</i>	165.13	0.21	164.85	163.48	8.86	1.59	-1.05	46.51	132.93	179.44
<i>ABD 2Y</i>	1.49	0.03	1.35	0.12	1.10	-0.07	0.67	4.62	0.11	4.73
<i>ABD SPR</i>	0.58	0.01	0.56	0.25	0.48	-0.23	-0.31	2.43	-0.84	1.58
<i>BK 3M</i>	0.54	0.02	0.38	0.75	0.66	7.43	2.63	3.64	-0.09	3.55

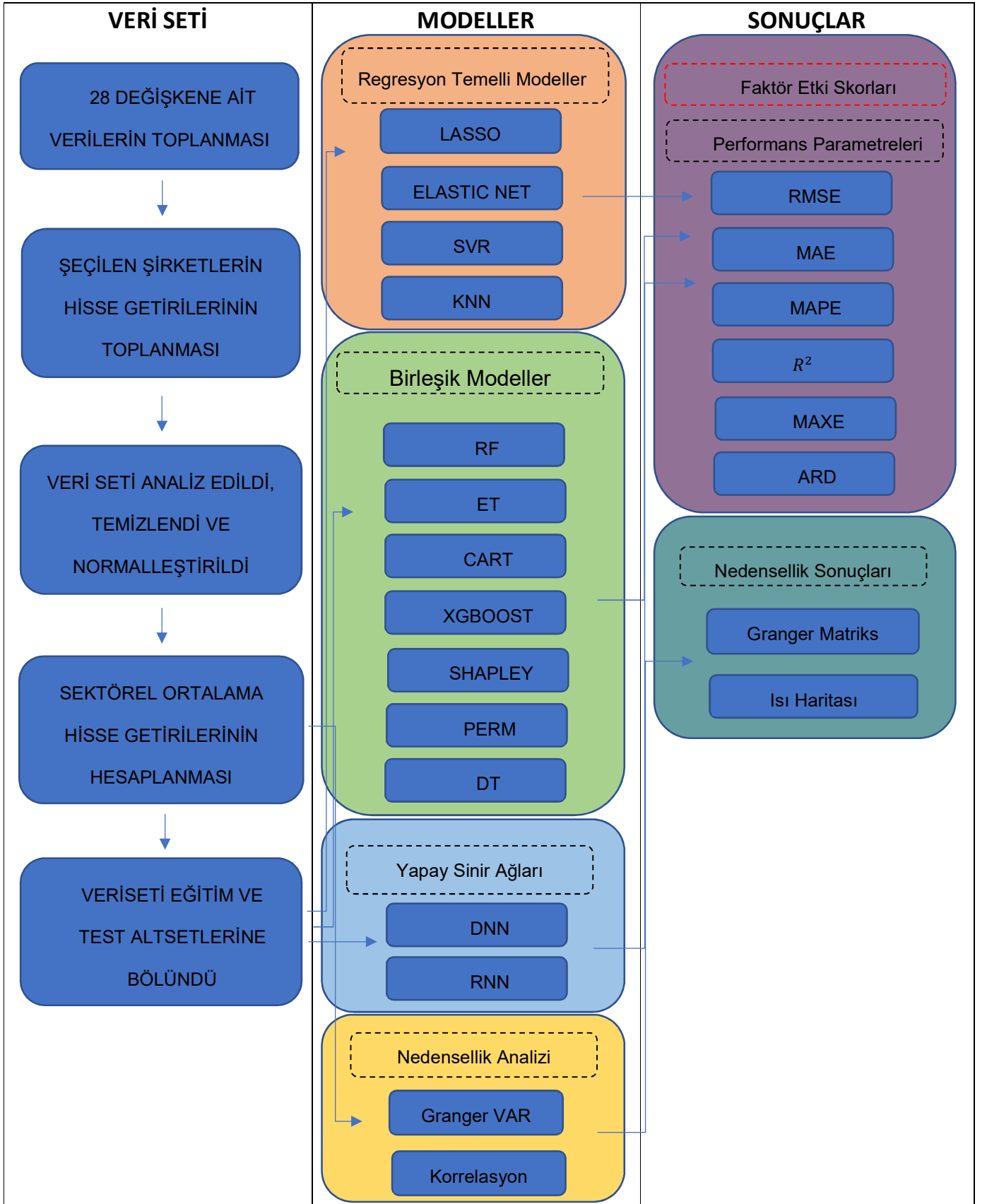
Tablo 4 Değişkenlerin İstatistiksel Özellikleri

	Ort.	Std. Hata	Medyan	Mod	Std. Sapma	Basıklık	Çarpıklık	Menzil	Min	Maks
PETROL	29.79	0.11	30.69	4.51	20.37	-0.13	-0.68	21.69	16.11	37.80
GAZ	7.28	0.02	7.25	0.92	0.84	3.56	-0.60	6.83	3.12	9.95
ELEKTRİK	15.21	0.14	13.31	5.80	33.62	-0.01	0.89	24.00	8.29	32.29
YEN. ENERJİ	24.97	0.21	22.05	9.05	81.87	0.44	1.10	37.77	14.41	52.18
HAVAYOLU	11.41	0.06	11.32	2.60	6.76	-0.43	0.27	11.71	5.59	17.30
ULAŞIM	557.00	4.48	514.41	189.66	35970.88	1.96	0.56	1225.46	2.00	1227.46
DEMİR ÇELİK	29.60	0.18	29.31	7.75	60.13	0.46	0.25	46.61	4.26	50.87
TARIM	206.03	0.64	204.51	27.02	730.22	-0.78	0.18	137.18	131.35	268.53
HAYVANCILIK	53.11	0.25	52.47	10.43	108.83	-1.09	0.07	45.18	29.71	74.88
KİMYA	101.07	0.49	95.00	20.73	429.81	2.02	1.47	113.41	61.26	174.68
PETROKİMYA	17.72	0.07	18.13	2.97	8.85	-0.61	-0.49	13.02	10.11	23.12
ÇİMENTO	49.71	0.19	49.95	8.02	64.30	2.73	-1.09	48.82	16.85	65.67
İNŞAAT	47.44	0.19	48.22	7.89	62.30	-0.64	-0.32	38.12	24.30	62.41
İMALAT	86.27	0.46	83.86	19.61	384.74	-1.18	0.35	72.43	52.62	125.04

Tablo 5 Sektörel Endekslerin İstatistiksel Özellikleri

Granger VAR Testi:

Granger testi, çift yönlü ilişkileri keşfetmek için güçlü bir araçtır. Temel olarak, Granger testi, değişkenlerin zamansal sıralamasını analiz ederek, bir değişkenin geçmiş değerlerinin başka bir değişkenin gelecekteki değerlerini tahmin etmeye hangi ölçüde katkıda bulunduğunu değerlendirerek, veri kümesindeki potansiyel nedensel ilişkiler hakkında öngörü sağlar. Granger testi, nedenselliğin varlığını ve yönünü belirleyerek karmaşık karşılıklı bağımlılıkların ortaya çıkarılmasına yardımcı olur ve veri kümesi içindeki ilişkilerin dinamiklerine ışık tutar. Veri setinin altında yatan



Şekil 9 Yöntem Çerçevesi

mekanizmaları ve itici güçleri anlamada değerli bir araç olarak hizmet eder ve belirlenen çift yönlü nedenselliğe dayalı olarak bilinçli kararlar alınmasını ve tahminlerde bulunulmasını destekler. Öte yandan, kolay uygulama, yorumlama ve gecikme tanımlama özelliğine rağmen, değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olduğunu varsayarak çalışır. Bu nedenle Granger testi lineer olmayan verilerin analizinde doğru sonuçlar vermeyebilir.

Destek Vektör Makinası (Support Vector Machine – SVM)

Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine veya SVM), sınıflandırma ve regresyon problemleri için kullanılan etkili ve önemli bir yöntemdir. SVM, veri noktalarını bir uzayda temsil eder ve bu veri noktalarını birbirinden ayıran en iyi hiper düzlemi bulmayı amaçlar. SVM, özellikle doğrusal ayrılabilirliğe sahip veri setlerinde etkili sonuçlar elde edebilir.

SVM, sınıflandırma problemlerinde iki sınıf arasında en iyi ayrımı sağlayan bir hiper düzlemi bulmayı amaçlar. Regresyon problemlerinde ise, veri noktalarını çevreleyen en iyi uygun hiper düzlemi bulmayı hedefler. Hiper düzlem, uzayda iki sınıfı en iyi ayıran düzlemi ifade eder. Destek vektörler, sınıfların sınırına en yakın olan veri noktalarını ifade eder. Bu noktalar, hiper düzleme en fazla katkı sağlayan ve sınıflar arasındaki ayrımı en iyi temsil eden noktalardır.

Doğrusal ayrılabilir veri setleri için SVM, doğrusal hiper düzlemi bulur. Ancak, çoğu veri seti doğrusal olarak ayrılamaz. Bu durumda, kernel fonksiyonları kullanarak veriyi daha yüksek boyutlu uzaya taşıyarak doğrusal ayrılabilir hale getirir.

SVM, marjin kavramını kullanarak sınıfları ayıran hiper düzlemi bulmaya çalışır. Marjin, destek vektörlerin arasındaki en yakın uzaklığı ifade eder. SVM, marjin'i maksimize etmek ve sınıflar arasındaki ayrımı en iyi şekilde gerçekleştirmek ister.

C parametresi, SVM'nin genel hata toleransını kontrol eder. Daha düşük C değerleri daha geniş bir marjinle sonuçlanabilirken, yüksek C değerleri eğitim verisinin tamamına daha yakın bir sınıflandırma yapmaya çalışır. Gamma, kernel fonksiyonunun esnekliğini kontrol eder. Düşük Gamma değerleri daha düz bir karar sınırı oluştururken, yüksek Gamma değerleri karmaşık sınırlar oluşturabilir.

SVM hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde kullanılabilir. Marjin kavramı sayesinde aykırı değerlere karşı daha dirençlidir. Kernel fonksiyonları ile doğrusal olmayan verilerde de etkili sonuçlar elde edilebilir. Ancak SVM, büyük veri setlerinde zaman ve bellek açısından maliyetli olabilir. Kernel seçimi ve C, Gamma parametre ayarları deneyim ve çapraz doğrulama gerektirebilir. Destek Vektör Makinesi, özellikle sınıflandırma problemlerinde başarılı sonuçlar elde etmek için sıklıkla kullanılan bir algoritmadır.

Karar Ağaçları (DT)

Karar ağaçları, bilgiyi sınıflandırmak ve kararlar almak amacıyla kullanılan ağaç yapısına sahip bir modelleme yöntemidir. Temelde, bu ağaçlar bir dizi karar düğümü ve sonuçları içeren yapılardan oluşur. Sınıflandırma ağaçları, sınıf etiketlerini belirlemek için kullanılırken, regresyon ağaçları sayısal değerleri tahmin etmek için kullanılır.

Karar ağaçları, açıklanabilirlik, yüksek hız ve düşük hesaplama maliyeti gibi avantajlara sahiptir. Ancak, aşırı uyum (overfitting) ve alt dalların tekrarı gibi

dezavantajları da göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak, alt dalların tekrarı veri ön filtreleme ile aşırı uyum ise budama (pruning) ve çapraz doğrulama ile aşılabilir.

CART (Classification and Regression Trees)

CART hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerini çözmek için kullanılır. CART modeli, veri kümesinin özelliklerine dayalı olarak veriye en iyi uyan karar ağaçlarını oluşturur. Bu ağaçlar, veriyi basit ve anlaşılır bir şekilde bölmeye ve yorumlamaya olanak tanır.

CART modeli, veri kümesindeki farklı özellikler veya değişkenler kullanılarak bir karar ağacı oluşturur. Karar ağacı, veriyi hiyerarşik olarak bölen ve her bir dalda bir karar kuralı belirleyen bir yapıdır.

Her düğümde (node) veriyi bölmek için bir bölme kriteri seçilir. Sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan bölme kriterleri “Gini impurity” veya “entropy” olabilir. Regresyon problemlerinde ise genellikle ortalama hatanın karekökü (mean squared error) kullanılır. Bu kriterler, veriyi mümkün olduğunca homojen alt gruplara bölmeyi amaçlar.

Başlangıçta tüm veri kümesi bir kök düğümünde (node) bulunur. Model, bölme kriterine göre veriyi iki veya daha fazla alt gruba böler. Bu bölmeler ardışık olarak devam eder ve her bir alt grup daha fazla düğüme ve alt düğümlere ayrılır. Ağaç oluşturma süreci, önceden belirlenmiş bir durdurma kriterine göre sona erer. Bu kriterler, ağacın aşırı uyum (overfitting) yapmasını engellemek için kullanılır. Örneğin, minimum örnek sayısı, derinlik sınırlaması veya belirli bir homojenlik seviyesi gibi kriterler kullanılabilir.

Oluşturulan ağaç genellikle veriye fazla uyarlanabilir ve karmaşık olabilir. Bu nedenle, ağaç budama (pruning) adı verilen bir süreçle basitleştirilir. Budama, gereksiz dalların veya düğümlerin kaldırılması anlamına gelir, böylece daha basit ve genelleştirilmiş bir model elde edilir.

CART tekniği veri üzerindeki karmaşıklığı basit ve yorumlanabilir karar ağaçlarına dönüştürerek basit ve açıklanabilir modeller oluşturur. Ancak, aşırı uyum eğilimi vardır, bu nedenle doğru budama (pruning) önemlidir. Veri dengesizliği veya gürültülü veri gibi sorunlarda performansı düşebilir. Tek bir ağaç bazen yetersiz olabilir, bu nedenle bütünleşik yöntemler daha karmaşık sorunları ele almak için kullanılabilir.

Rastlantısal Orman (Random Forest, RF)

Rastlantısal Orman, makine öğrenimi alanında yaygın olarak kullanılan ve sınıflandırma ile regresyon problemlerini ele alan bütünleşik (ensemble) bir yöntemdir. Bütünleşik yöntemler, birden fazla zayıf tahminci modelin bir araya getirilmesiyle daha güçlü ve genelleştirilmiş bir model oluşturmayı amaçlar. RF bu tür zayıf modelleri kullanarak daha güçlü ve istikrarlı tahminler elde etmeyi hedefler.

Rastlantısal Orman, temel olarak karar ağaçlarını kullanarak çalışır. Her bir karar ağacı, veri kümesinin farklı alt örnekleriyle ve alt özellikleriyle eğitilir. Karar ağaçları, birbirinden bağımsız olarak çalışır ve farklı özelliklerin alt gruplarını inceleyerek tahminlerde bulunur.

"Rastlantısal" ifadesi, Rastlantısal Orman'ın temel özelliğini anlatır. Bu yöntem, rastlantısal örnekleme ve rastlantısal özellik seçimi gibi rastlantısallık unsurları ekler. Her bir karar ağacı oluşturulurken veri kümesinden rastlantısal örnekler seçilir. Bu,

her ağacın farklı bir veri alt kümesi üzerinde eğitilmesini sağlar. Ayrıca, her bir düğümde bölme yaparken rastlantısal özellikler seçilir. Bu da ağaçların farklı özellikleri keşfetmesini sağlar.

Rastlantısal Orman yöntemi, tüm karar ağaçlarının tahminlerini birleştirirken oybirliği ilkesini kullanır. Sınıflandırma problemlerinde, çoğunluk oyu alınarak tahmin edilen sınıf belirlenir. Regresyon problemlerinde ise ağaçların tahminleri ortalama alınarak final tahmin değeri elde edilir.

Rastlantısallık unsurları ve birden fazla ağacın bir araya getirilmesi, modelin aşırı uyuma karşı daha dirençli olmasını sağlar. RF, genelleştirme yeteneği yüksek olan bir model oluşturarak yeni verilere daha iyi uyum sağlar.

RF yönteminde önemli parametreler vardır, örneğin, ağaç sayısı, rastlantısal özellik seçimi, maksimum derinlik gibi. Bu parametreler, modelin performansını etkiler. Genellikle, çapraz doğrulama (cross-validation) gibi yöntemlerle en iyi parametre değerleri bulunur. Ayrıca RF genelleştirme yeteneği sayesinde aşırı uymayı azaltır. Rastlantısallık unsurları, çeşitli özellikleri ve ilişkileri keşfetmeyi teşvik eder ve daha istikrarlı ve güvenilir tahminler yapmayı sağlar.

Birden fazla ağacın eğitilmesi ve bir araya getirilmesi, eğitim ve tahmin sürelerini artırabilir. Modelin iç yapısı bazen karmaşık olabilir ve sonuçların yorumlanması da zor olabilir.

XGBOOST

XGBoost (Extreme Gradient Boosting), sınıflandırma ve regresyon gibi yapılandırılmış veri problemlerinde kullanılan son derece popüler bir ML algoritmasıdır. Gradient Boosting yönteminin geliştirilmiş ve optimize edilmiş bir

versiyonudur. XGBoost, yüksek performanslı, genelleştirilebilir ve düşük hata oranlarına sahip tahmin modelleri oluşturmak için kullanılır.

XGBoost, Gradient Boosting algoritmasına dayanır. Gradient Boosting, zayıf tahminci modellerin (genellikle karar ağaçları) ardışık olarak birleştirilmesiyle daha güçlü bir model oluşturmayı amaçlar. Bu yöntemde, her bir ağaç önceki ağaçların hatalarını düzeltmeye çalışır. Sonuç olarak, birçok zayıf tahminci model bir araya gelerek güçlü bir tahminci model oluşturur.

XGBoost, Gradient Boosting'in optimizasyonunu ve genelleştirmesini artırmak için çeşitli teknikler kullanır. Hız ve bellek verimliliğini artırmak için düşük seviye optimizasyonlar kullanır. Aynı zamanda, regülerite ve ağaçların derinliği gibi parametrelerle aşırı uyumu azaltmaya çalışır.

XGBoost, her bir ağacın oluşturulması sırasında Gradyan ve Hess matrislerini hesaplar. Gradyan, hataların negatif gradyanını ifade eder ve ağaçlar boyunca takip edilir. Hess matrisi ise gradyanın ikinci türevidir ve ağaç düğümlerindeki hataların ölçülmesini sağlar.

XGBoost modelinin performansını artırmak için kapsamlı bir parametre ayarlama süreci gerekebilir. Parametre ayarlaması sırasında çapraz doğrulama kullanılır. En iyi parametrelerin seçilmesi, modelin en iyi performansını elde etmesini sağlar.

XGBoost, diğer makine öğrenimi algoritmalarına kıyasla daha hızlı bir şekilde çalışabilir. Büyük veri kümelerinde ve yüksek boyutlu özellik uzaylarında iyi performans gösterir. XGBoost kazançları aşağıdaki denklemle bulunur,

$$kazanç = \frac{1}{2} \left[\frac{(\sum_{\epsilon S_L} p_i)^2}{(\sum_{\epsilon S_L} r_i) + \tau} + \frac{(\sum_{\epsilon S_R} p_i)^2}{(\sum_{\epsilon S_R} r_i) + \tau} + \frac{(\sum_{\epsilon S} p_i)^2}{(\sum_{\epsilon S} r_i) + \tau} \right] - \lambda \quad (2)$$

Burada p_i ve r_i birinci ve ikinci dereceden gradyanları temsil etmektedir. S_L ve S_R sol ve sağ düğümlerin örneklerini, τ ve λ ise ceza parametrelerini ifade etmektedir (Jiang v.d., 2023).

XGBoost yüksek performanslı tahminler yapar, genelleştirme yeteneği yüksektir ve aşırı uymayı azaltmak için düzenleme yöntemleri uygular ve çeşitli parametre ayarları sayesinde çeşitli senaryolara uyarlanabilir. Ancak, dezavantaj olarak parametre ayarlaması ve iç yapısının karmaşıklığı verilebilir.

Ekstra Ağaçlar (Extremely Randomized Trees, ET)

Extra Ağaçlar (Extremely Randomized Trees), karar ağaçlarına dayalı bütünleşik bir yöntemidir ve sınıflandırma ile regresyon gibi yapılandırılmış veri problemlerini ele alır. ET RF'ye benzer şekilde birden fazla karar ağacını birleştirirken, daha fazla rastlantısallık ekleyerek modelin genelleştirilmesini sağlar. Bu yöntem, varyansı ve özgünlüğü artırarak performansı artırmayı amaçlar.

ET karar ağaçlarını temel alır. Her bir karar ağacı, veri kümesinin alt örnekleri ve alt özellikleriyle eğitilir. Karar ağaçları, sınıflandırma veya regresyon probleminin gerektirdiği tahminleri yapmak için kullanılır.

ET, RF gibi modele rastlantısal örnekleme ve rastlantısal özellik seçimi gibi rastlantısallık unsurları ekler. Rastlantısal özellik seçimi, her bir düğümde bölme yaparken rastlantısal alt küme özellikleri seçilmesini sağlar.

ET, karar ağaçlarını rastlantısal bölme noktaları ve rastlantısal ayrıştırma kriterleri kullanarak oluşturur ve sonuçları birleştirmek için oybirliği ilkesini kullanır. Sınıflandırma problemlerinde çoğunluk oyu, regresyon problemlerinde ise tahminlerin ortalaması alınır.

ET modelinin performansını artırmak için çeşitli parametre ayarları yapılabilir. Karar ağaçlarının sayısı, düğüm bölme sayısı, alt örneklem büyüklüğü gibi parametreler ayarlanabilir.

ET'nin daha fazla rastlantısallık sayesinde sınıflandırma yeteneği daha güçlüdür. Ağaç oluşturma sürecinin hızı, diğer bütünleşik yöntemlere kıyasla daha hızlı olabilir ve daha az veri ön işlemine ihtiyaç duyabilir. Ancak daha fazla rastlantısallık, ağaçların boyunun uzamasına ve daha fazla dalı olan daha karmaşık yapılara sahip olmasına neden olabilir.

Lasso ve Elastik Net (EN)

Lasso ve EN gibi cezalandırıcı regresyon yöntemleri (Penalized Regression Techniques), regresyon katsayılarının aşırı değer almasını önleyerek ve aşırı uyum sorununu hafifleterek sıradan en küçük kareler (OLS) yönteminden daha iyi performans göstermektedir. Ayrıca, önemli çoklu doğrusal bağlantı ve eş bütünleşme durumlarında, cezalandırma yöntemleri değişken seçimi sürecindeki üstün performanslarıyla doğrusal yöntemlerin önüne geçmektedir. Bu çalışmada kullanılan cezalandırma yöntemleri, parametreleri aşağıdaki amaç ve ceza fonksiyonları ile tahmin etmektedir;

$$\min_{\beta} \frac{1}{N} \sum_i^N l(y_i - \beta_0 - x_i^T \beta_x) + \lambda P(\beta) \quad (3)$$

$$P(\beta) = \lambda \left(\alpha \sum_{j=1}^N \frac{|\beta_{xj}|}{w_j} + (1 - \alpha) \sum_{j=1}^N \frac{|\beta_{xj}|^2}{w_j} \right) \quad (4)$$

Burada λ , daha büyük değerlerin daha büyük önyargıya (bias) ve daha küçük varyansa yol açtığı düzenleme ceza parametresidir ve α modelin duyarlılık parametresidir. Ek olarak, x_i i gözlemindeki p değerlerinin vektörü, w_j j

parametresinin azaltma ağırlığı ve β tahmin edilen katsayıdır. Farklı (λ , α , ω_j) ayarları aşağıdaki yöntemleri oluşturmaktadır; (Smeeke ve Wijler, 2018)

1. Ridge ($\lambda > 0$, $\alpha = 0$, $\omega_j = 1 \forall j$)
2. Lasso ($\lambda > 0$, $\alpha = 1$, $\omega_j = 1$),
3. Elastik Net ($\lambda > 0$, $0 < \alpha < 1$, $\omega_j = 1 \forall j$)

Optimize edilmiş λ ve α değerlerinin seçilmesi, büyük boyutlu modeller için çok önemlidir. Bu nedenle, optimum λ ve α değerlerini bulmak için lasso ve elastik net yöntemleri uygulanır. Modellerin aşırı uyum sorununun olumsuz sonuçlarını ortadan kaldırmak için genellikle tahmin hatalarının ortalamalarını birleştiren çapraz doğrulama yöntemi kullanılır (Xu et. al, 2020). Bu çalışmada seçilen her bir yöntem için veri kümesi üzerinde 10 kat çapraz doğrulama uygulanmıştır.

Shapley Yöntemi (SHAP)

Shapley değerleri, oyun teorisinden gelen bir kavramdır ve katkı değerleri olarak da bilinir. Bu kavram, bir grup oyuncunun kooperatif bir oyun içindeki her bir oyuncunun katkısını ne kadar değerlendirebileceğini ölçer. SHAP (Shapley Additive Explanations) ise bu kavramın makine öğrenimi modelleri üzerindeki kullanımını ifade eder.

SHAP, özellik değerlerinin tahmin sonuçlarına nasıl katkı sağladığını anlamak için kullanılan bir açıklama yöntemidir. Bu yöntem, bir özellik değerinin diğer tüm özellik değerleriyle birlikte etkileşimini değerlendirir. Shapley değerleri, bir kooperatif oyun içindeki oyuncuların her birinin oyunda ne kadar önemli olduğunu ölçer. Bu oyunda, oyuncular bir araya gelerek bir koalisyon oluştururlar ve belli bir kazanç dağıtımını elde

ederler. Shapley değeri, her oyuncunun ortalama katkısını ölçer, yani oyuna herhangi bir oyuncu katılmasa bile kazançta ne kadar değişiklik olacağını hesaplar.

SHAP değerleri, makine öğrenimi modellerinin tahminlerini anlamak ve yorumlamak için kullanılır. Özellikle, tahmin sonucunu belirleyen her bir özelliğin katkısını hesaplamak için kullanılır. Özelliklerin katkıları, bu özelliklerin tahmin sonucunu ne kadar değiştirdiğini belirtir.

SHAP değerleri, her bir özellik değerini içeren gözlemin gözlem kümesinden çıkarılması ile modelin tahminini hesaplayarak bulunur. Ardından, bu farkın beklenen değeri, tüm gözlem kümeleri üzerinde ağırlıklı bir şekilde hesaplanır. SHAP değeri, bir özelliğin diğer özelliklerle etkileşimi de göz önünde bulundurularak hesaplanır. J oyuncusu için Shapley değeri aşağıdaki formül ile hesaplanabilir;

$$\phi_j(v) = \sum_{S \subseteq P \setminus \{j\}} \frac{|S|!(t-|S|-1)!}{t!} (v(S \cup \{j\}) - v(S)) \quad (5)$$

$\phi(v)$ fonksiyonu, toplam P oyuncu sayısı için kazanç dağılımının $\phi(v) = (\phi_1(v) + \dots \dots \phi_t(v))$ vektörü ile temsil edildiği S oyuncu koalisyonunun işbirliği yaparak elde edebileceği kolektif kazancı ifade eder.

SHAP değerleri, her bir özelliğin model tahminine olan etkisini ölçer. Bu değerler, bir modelin hangi özelliklere daha fazla önem verdiğini ve tahminlerde nasıl etkileşimler olduğunu anlamak için kullanılır. Özellik önem sıralamaları, modelin kararları hakkında daha fazla anlayış sağlar.

SHAP değerleri, modelin iç yapısına ve tahminlerine dair daha iyi bir anlayış elde etmek için kullanışlı bir araçtır. Bu yöntem, modelin neden belirli tahminleri yaptığını anlamak ve tahminlerin sonuçlarına dair daha detaylı bir yorum yapmak için kullanılabilir.

K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbors, KNN)

KNN temel bir sınıflandırma ve regresyon algoritmasıdır. Bu algoritma, özellikle sınıflandırma problemlerinde kullanılır ve bir veri noktasını, ona en yakın olan K adet komşu veri noktasının etiketi veya değeri üzerinden tahmin etmeyi amaçlar. KNN, basit ama etkili bir yaklaşım sunar ve sınıflandırma, regresyon ve benzeri yapılandırılmış veri problemlerinde kullanılır.

KNN algoritması, veri noktalarını bir uzayda temsil eder ve bu uzayda noktalar arasındaki mesafeleri hesaplar. Sınıflandırma problemlerinde, bir veri noktasının komşularının çoğunluğunun sınıf etiketi, tahmin edilen sınıf olarak kullanılır. Regresyon problemlerinde ise, K en yakın komşunun hedef değerlerinin ortalaması, tahmin edilen değer olarak kullanılır. Öncelikle tahmin yapılacak veri noktası belirlenir, daha sonra bu noktanın K en yakın komşusu belirlenir. En yakın komşular, genellikle Öklidyen veya Manhattan mesafesi gibi metrikler kullanılarak hesaplanır. En yakın komşuların sınıf etiketleri (sınıflandırma) veya hedef değerleri (regresyon) incelenir. Sınıf etiketlerinin (sınıflandırma) veya hedef değerlerinin (regresyon) sayılarına bakılarak tahmin yapılır.

K değeri, komşu sayısını belirler. Bu değer, genellikle çapraz doğrulama gibi yöntemlerle belirlenir. Çok küçük bir K değeri, gürültüye ve tekil verilere duyarlılığı artırabilir. Çok büyük bir K değeri ise daha düşük bir karmaşıklık seviyesine yol açabilir.

KNN algoritması, veri setinin özelliklerine ve özelliklerin ölçeklerine duyarlıdır. Özellikleri standartlaştırmak veya normalize etmek önemlidir. Ayrıca, özellikler arasındaki uzaklığı etkileyecek şekilde ağırlıklar eklemek de mümkündür.

KNN basit ve anlaşılır bir yapıya sahiptir. Veriye özgü karmaşıklık modelleri oluşturur ve hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde kullanılabilir.

KNN modelinin dezavantajları, büyük veri kümelerinde hesaplama maliyeti yüksek olabilir ve optimal K değerinin seçimi bazen deneyim veya çapraz doğrulama gerektirebilir.

Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks, ANN)

Derin Sinir Ağları (DNN), birbirine bağlı yapay nöronların veya nodların (nodes) çoklu katmanlarından oluşarak verilerdeki karmaşık desenleri ve temsilleri yakalamada oldukça etkili bir yapay sinir ağları (ANN) sınıfıdır.

DNN'ler, genellikle giriş katmanı, gizli katmanlar ve çıkış katmanından oluşan çok katmanlı bir yapıya sahiptir ve her katman, ağırlıklar ve aktivasyon fonksiyonları ile bağlı olan düğümlerden oluşur. Derin sinir ağlarının başarılı olabilmesi için doğru bir şekilde eğitilmeleri gerekmektedir. Geri yayılım algoritması ve optimizasyon yöntemleri, bu süreçte önemli bir rol oynar. Derin öğrenme, özellikle büyük veri setleri ve karmaşık yapıdaki verilerle çalışırken diğer modellere göre daha yüksek performans sağlar. Otomatik öğrenme yeteneği, özellik mühendisliği ihtiyacını azaltır ancak, DNN'ler yüksek boyutlu veri kümeleriyle uğraşırken aşırı uyum sağlamaya eğilimlidir (Nadrigil, 2023b).

Tekrarlayan Sinir Ağları (Recurrent Neural Networks, RNN), özellikle sıralı veri gibi zaman bağımlı veya ardışık yapıya sahip veri türlerini işlemek için tasarlanmış yapay sinir ağı modelleridir. RNN'ler, geleneksel yapay sinir ağlarının sıralı veri işleme yeteneklerini geliştirir ve önceki zaman adımlarından gelen bilgileri saklayarak bu tür verilerde daha iyi performans gösterir.

RNN'ler, geri beslemeli bir yapıya sahiptir. Yani her adımda, önceki adımlardan gelen çıktılar (gizli durum) yeni girdi ile birleştirilir. Bu yapısı sayesinde RNN'ler, sıralı verilerdeki desenleri ve ilişkileri yakalama yeteneğine sahiptir.

RNN'lerin en temel bileşeni hücrelerdir. Hücreler, önceki adımlardan gelen bilgileri saklar ve yeni girdilerle birleştirerek yeni çıktıları üretir. RNN'ler genellikle gradyan iniş gibi algoritmalar kullanılarak eğitilir. Ancak, RNN'lerde zamanla kaybolan gradyan sorunu yaşanabilir. Bu, uzun süreli bağımlılıkları etkileyebilir.

Sıralı veri işleme yetenekleri sayesinde dil işleme, metin oluşturma, zaman serisi analizi gibi alanlarda etkili sonuçlar verirler ve uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme yeteneği, diğer yöntemlerle elde edilmesi zor sonuçları ortaya çıkarabilir.

RNN'ler bazen zamanla kaybolan gradyan sorunlarına maruz kalabilir, hesaplama yükü yüksek olabilir ve eğitim süreçleri diğer modellere göre daha uzun sürebilir. LSTM ve GRU gibi gelişmiş hücre tipleri, bu tür problemlerde daha iyi sonuçlar elde etmek için tercih edilebilir.

Uzun Kısa Vadeli Hafıza (Long Short-Term Memory, LSTM), Tekrarlayan Sinir Ağlarının (RNN) bir türüdür ve sıralı veri analizinde uzun vadeli bağımlılıkları daha etkili bir şekilde yakalamak amacıyla geliştirilmiştir. LSTM, RNN'nin zaman içindeki kaybolan gradyan sorununu aşarak daha büyük veri setlerinin analizinin yapılabilmesine olanak tanır.

LSTM hücreleri, geleneksel RNN'lere kıyasla daha karmaşık bir yapıya sahiptir. LSTM hücreleri, hafıza hücresi ile unutma (forget gate), giriş (input gate) ve çıkış kapısı (exit gate) olmak üzere 3 kapı içerir. Bu kapılar, hafıza hücresine hangi bilginin eklenip çıkarılacağını düzenler.

Unutma kapısı, hafıza hücresindeki bilginin ne kadarının unutulacağını belirler ve geçmiş zaman adımlarından gelen bilgilerin unutulması veya korunması için kullanılır. Giriş kapısı, yeni bilgilerin hafıza hücresine ne kadar ekleneceğini düzenler ve yeni verilerin ne kadarının hafızaya alınacağını kontrol eder. Çıkış kapısı, hafıza hücresindeki bilgilerin ne kadarının kullanılacağını belirler ve hafıza hücresindeki bilgileri kullanarak çıkış üretir. LSTM, unutma kapısı sayesinde uzun vadeli bağımlılıkları koruyabilir. Bu, zaman aralıkları arasında daha geniş bir anlama yeteneği sağlar.

LSTM'lerin, unutma, giriş ve çıkış kapıları sayesinde bilgi akışını düzenleme yeteneği vardır, ancak karmaşık bir yapıya sahip olduğu için eğitim süreçleri daha uzun sürebilir.

ML modelleri dinamik yapıları sayesinde büyük veri setlerinde tahmin doğruluğu için önemli faydalar sağlarken, eksik veya hatalı veri setleri ile başa çıkmada, aşırı uyum ve sonuçların yorumlanmasının zorluğu gibi bazı dezavantajlara da sahiptir. Bu nedenle bu çalışmada, veri setindeki hataları ortadan kaldırmak için öncelikle veri seti temizlenmiş, normalleştirilmiş ve yapılandırılmış ve sonrasında aşırı uyum sorununu azaltmak için her yöntem 10 kat çapraz doğrulama ile uygulanmıştır.

4.3. Araştırmanın Birinci Kısım Bulguları

Faktör Önem Puanları

Bu çalışmadaki tüm veri analizleri Piton (Python) programlama dili üzerinde çeşitli açık kaynak paketleri kullanılarak tamamlanmıştır.

Tablo 6, 3 kategoride seçilen 28 EUA fiyat faktörü için uygulanan 13 DML yönteminin faktör önem puanlarını göstermektedir. Uygulanan tüm yöntemler için daha yüksek

önem puanları, seçilen tahmin edicinin karbon fiyat hareketleri üzerindeki etkisinin daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Tek tip bir karşılaştırma sağlamak için, Lasso, EN, KNN ve Shapley yöntemlerinin özellik önem puanları mutlak değerler olarak sunulmuştur. Tablodaki mutlak sıfır değerleri söz konusunu faktörün bağımlı değişken karbon fiyatı üzerinde hiçbir etkisi olmadığını göstermektedir, dolayısı ile mutlak sıfır değerine sahip değişkenlerden model tarafından dışarıda bırakılmıştır. Tablo 6'daki sonuçlara göre, yerleşik özellik seçim algoritmaları ile Lasso modeli FTSE PG, LC 100, FRA 10Y, ve ABD 10Y ve Elastik Net, ALM 10Y, FRA 10Y, ABD 2Y, ABD 3M ve EBUND faktörlerini toplam model performansına yetersiz katkıları nedeniyle model dışında bırakmıştır. Buna ek olarak, RF modeli ELK ALM, FTSE PG, SHANGHAI ve ABD 10Y'yi, XGboost modeli ELK ALM, ELK FRA, FTSE PG, STOXX 600 ve ABD 10Y'yi ve son olarak DT ve CART modelleri KOM, NIKKEI 225 ve BK 10Y hariç değişkenlerin çoğunu dışarıda bırakmıştır.

Her faktör kümesi için toplam grup önem puanları tablo 7'de gösterilmiştir. Sonuçlara göre enerji grubunun Elastik Net, SVR ve RNN'ye ek olarak DT, Cart, XGBoost, Shap ve RF'yi içeren karar ağacı grubu yöntemlerinden de en yüksek faktör seçim puanlarını aldığını göstermektedir. Lasso ve ET sonuçlarına göre ise, endeks grubu en yüksek faktör seçim puanına sahiptir ve son olarak KNN, DNN ve LSTM yöntemleri için finans grubu en önemli belirleyici grup olarak seçilmiştir.

Tablo 7'deki sonuçlardan, alt ağaçların tekrarlanması olasılığı nedeni ile DT, CART, RF ve Shap gibi karar ağaçlarına dayalı yöntemlerin grup önem puanları arasında uçuruma yol açmış olabileceği, ancak XGBoost ve ET yöntemlerinin yapılarındaki artan rastlantısallık sayesinde bu etkiyi hafiflettiği çıkarılabilir.

Faktör	Lasso	Elastik Net	ET	RF	XGboost	KNN	DT	SVR	CART	SHAP	DNN	LSTM	RNN
KOM	5.110	2.530	0.189	0.799	0.461	69.295	0.801	26.251	0.801	18.185	0.0675	0.0701	0.0679
GAZ	0.043	1.597	0.007	0.001	0.001	47.029	0.000	19.147	0.000	0.072	0.0610	0.0589	0.0626
ELK ISP	0.141	1.622	0.014	0.000	0.000	71.465	0.000	18.905	0.000	0.024	0.0567	0.0571	0.0566
ELK FR	3.273	1.964	0.074	0.003	0.000	78.625	0.000	20.302	0.000	0.071	0.0594	0.0617	0.0582
ELK ALM	2.085	0.909	0.027	0.002	0.019	14.712	0.001	11.664	0.001	0.190	0.0565	0.0578	0.0568
PET	0.406	1.305	0.016	0.001	0.001	249.248	0.000	18.860	0.000	0.045	0.0589	0.0584	0.0585
PET GAZ	0.184	1.551	0.009	0.001	0.002	93.236	0.001	21.649	0.001	0.122	0.0651	0.0671	0.0678
FTSE ELK	1.150	1.076	0.016	0.002	0.001	38.014	0.003	14.235	0.003	0.336	0.0633	0.0649	0.0623
FTSE PG	0.000	1.462	0.007	0.000	0.000	110.412	0.000	5.984	0.001	0.028	0.0637	0.0611	0.0622
DAX	0.888	0.040	0.008	0.002	0.001	92.192	0.000	13.916	0.000	0.244	0.0547	0.0529	0.0563
CAC40	7.501	1.778	0.080	0.002	0.001	337.022	0.002	22.950	0.000	0.075	0.0644	0.0653	0.0683
FTSE 100	5.152	1.064	0.004	0.002	0.004	132.242	0.001	7.184	0.001	0.322	0.0580	0.0557	0.0555
NIKKEI225	0.004	1.974	0.130	0.011	0.017	260.275	0.016	16.610	0.016	0.963	0.0623	0.0626	0.0653
SHANGHAI	0.763	0.015	0.001	0.000	0.001	50.473	0.000	6.925	0.000	0.027	0.0630	0.0591	0.0641
STOXX 600	0.002	0.916	0.042	0.001	0.000	120.289	0.000	18.643	0.000	0.068	0.0574	0.0603	0.0587
S&P 500	14.350	3.640	0.157	0.039	0.193	245.360	0.001	24.992	0.001	2.554	0.0636	0.0656	0.0674
LC 100	0.000	2.164	0.022	0.004	0.009	159.510	0.003	21.343	0.003	0.780	0.0547	0.0566	0.0569
NCE	6.561	0.905	0.013	0.002	0.005	42.469	0.004	11.220	0.004	0.240	0.0564	0.0546	0.0590
FTSE IM	6.039	2.830	0.066	0.002	0.001	98.191	0.001	18.617	0.003	0.325	0.0584	0.0619	0.0557
BK 10Y	1.619	0.246	0.040	0.065	0.109	205.875	0.096	14.804	0.096	3.642	0.0676	0.0669	0.0665
ALM 10Y	2.786	0.000	0.013	0.001	0.002	280.935	0.000	11.709	0.000	0.288	0.0607	0.0625	0.0591
FRA 10Y	0.000	0.000	0.009	0.001	0.003	214.593	0.001	11.772	0.001	0.091	0.0559	0.0534	0.0554
ABD 10Y	0.000	0.617	0.002	0.000	0.000	321.128	0.000	7.477	0.000	0.081	0.0571	0.0585	0.0561
ABD 3M	4.609	0.000	0.005	0.002	0.011	20.526	0.004	9.389	0.004	0.497	0.0727	0.0744	0.0713
EBUND	0.000	0.000	0.006	0.003	0.004	140.565	0.027	10.435	0.027	0.194	0.0625	0.0633	0.0614
ABD 2Y	1.226	0.000	0.015	0.021	0.108	51.099	0.037	9.106	0.037	0.971	0.0564	0.0563	0.0549
ABD SPR	0.775	1.830	0.020	0.032	0.044	235.898	0.000	10.518	0.000	1.201	0.0676	0.0705	0.0699
BK 3M	3.646	1.369	0.007	0.001	0.001	19.020	0.000	17.845	0.000	0.197	0.0575	0.0573	0.0568

Tablo 6 Faktör Önem Puanları

	Lasso	Elastik Net	ET	RF	XGboost	K-NN	DT	SVR	CART	Shap	DNN	LSTM	RNN
ENERJİ	1.377	1.557	0.040	0.090	0.054	85.782	0.090	17.444	0.123	2.119	0.0614	0.0619	0.0614
ENDEKS	4.126	1.532	0.052	0.006	0.023	153.802	0.003	16.240	0.027	0.560	0.0593	0.0595	0.0607
FİNANS	1.629	0.451	0.013	0.014	0.031	165.516	0.018	11.451	0.048	0.796	0.0620	0.0626	0.0613

Tablo 7 Sektörel Faktör Seçim Puanları

Model Performans Parametreleri

Bu çalışmada uygulanan tüm DML modellerinin tahmin performansı ve model uygunluk dereceleri, matematiksel formülleri aşağıda ifade edilen Ortalama Mutlak Göreceli Sapma (ARD), Maksimum Hata (MAXE), R^2 , Ortalama Hatanın Karekökü (RMSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) parametreleri ile yorumlanmaktadır;

$$ARD = \sqrt[4]{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} * 100 \quad (7)$$

$$MAXE = \max |y_i - \hat{y}_i| \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=0}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| * 100 \quad (12)$$

Tablo 8, uygulanan tüm makine öğrenimi modellerinin performans metriklerini sunmaktadır. Veri setinin istatistiksel özellikleriyle tutarlı olarak, performans değerlendirmesi ve yorumlaması için RMSE, MAE, MAPE, R^2 , MAXE ve ARD

parametreleri kullanılmıştır. Tüm modellerin yüksek R^2 değerleri göz önüne alındığında, RMSE ve MAPE metrikleri doğrusal olmayan ML modelleri için etkili performans tanımlayıcıları olarak işlev görebilir. Tablo 8'deki sonuçlara göre net bir kazanan olmamasına rağmen, ET, RF ve XGboost'un güçlü performansları göz önüne alındığında karar ağacı grubu modellerinin diğerlerinden biraz daha iyi performans gösterdiği özetlenebilir. Öte yandan, regresyon temelli KNN ve ANN bazlı DNN modelleri, en yüksek performans puanlarıyla DT grubu modellerinin baskınlığını dengelemiştir.

	RMSE	MAE	MAPE	R2	MAXE	ARD
KNN	1.3837	0.7332	4.20%	97.77%	12.545	117.6317
ET	1.3	0.7029	4.29%	97.80%	11.9742	114.0183
RF	1.7436	0.9283	5.24%	97.60%	15.0522	132.0449
XGBoost	1.8473	0.9733	5.28%	97.54%	16.7983	135.9139
DNN	1.7166	1.0524	5.60%	97.61%	9.2265	131.0205
DT	2.3604	1.1144	5.82%	97.22%	25.15	153.6345
CART	2.5338	1.212	6.09%	97.10%	30.54	159.1801
SHAP	2.3798	1.4028	7.53%	97.21%	17.3257	154.2658
LSTM	3.4838	1.9386	8.27%	96.25%	24.3108	186.6482
RNN	2.6782	1.6359	8.50%	96.98%	19.7697	163.6533
SVR	4.196	2.2649	11.21%	95.43%	22.7998	204.8416
Lasso	4.1913	2.9117	18.18%	95.44%	21.2098	204.7261
EN	6.461	4.71	33.33%	91.85%	30.965	254.1855

Tablo 8 Modellerin Performans Metrikleri

Tablo 9, artan RMSE ve azalan R^2 sırasına göre sıralanan modeller için en önemli faktörleri göstermektedir. Sonuçlar, faktör seçiminde uygulanan farklı model grupları arasında dikkate değer farklılıklar olduğunu göstermektedir. Özellikle, önceki çalışmaların aksine, bu çalışma kömür fiyatlarının karbon fiyatı tahminindeki önemini, literatürde karbon fiyatının belirleyicileri olarak sıklıkla analiz edilen elektrik, petrol ve gaz gibi diğer enerji fiyatlarına kıyasla ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, sonuçlar Avrupa dışındaki hisse senedi endekslerinin ve tahvil getirilerinin Avrupa

karbon fiyatı üzerinde Avrupa'dakilerden daha güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, sonuçlara göre Birleşik Krallık ve ABD tahvil getirileri, özellikle BK 10Y VE ABD 2Y, kıta Avrupası tahvil getirilerine göre karbon fiyatını üzerinde daha önemli bir etkiye sahiptir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ET	KOM	S&P 500	NIKKEI225	CAC40	ELK FR	FTSE IM	STOXX 600	BK 10Y	ELK ISP	LC 100
KNN	CAC40	NIKKEI225	PET	S&P 500	LC 100	EBUND	STOXX 600	FTSE IM	PETGAZ	DAX
DNN	ABD 3M	BK 10Y	ABD SPR	KOM	PET GAZ	CAC40	FTSE PG	S&P 500	FTSE ELK	SHANGHAI
RF	KOM	BK 10Y	S&P 500	ABD SPR	ABD 2Y	NIKKEI225	LC 100	EBUND	ELK FR	FTSE ELK
XGboost	KOM	S&P 500	BK 10Y	ABD 2Y	ABD SPR	ELK ISP	NIKKEI225	ABD 3M	LC 100	NCE
DT	KOM	BK 10Y	ABD 2Y	EBUND	NIKKEI225	ABD 3M	NCE	FTSE ELK	LC 100	CAC40
SHAP	KOM	BK 10Y	S&P 500	ABD SPR	ABD 2Y	NIKKEI225	LC 100	ABD 3M	FTSE ELK	FTSE IM
CART	KOM	BK 10Y	ABD 2Y	EBUND	NIKKEI225	NCE	ABD 3M	FTSE ELK	FTSE IM	LC 100
RNN	ABD 3M	ABD SPR	CAC40	KOM	PET GAZ	S&P 500	BK 10Y	NIKKEI225	SHANGHAI	GAZ
LSTM	ABD 3M	ABD SPR	KOM	PET GAZ	BK 10Y	S&P 500	CAC40	FTSE ELK	EBUND	NIKKEI225
Lasso	S&P 500	CAC40	NCE	FTSE IM	FTSE 100	KOM	ABD 3M	BK 3M	ELK FR	ALM 10Y
SVR	KOM	S&P 500	CAC40	PET GAZ	LC 100	ELK FRA	GAZ	ELK ALM	PET	STOXX 600
EN	S&P 500	FTSE IM	KOM	LC 100	NIKKEI225	ELK FRA	ABD SPR	CAC40	ELK ALM	GAZ

Tablo 9 RMSE'ye göre Sıralı En Önemli Faktörler

4.3. Araştırmanın İkinci Kısım Bulguları

Granger Nedensellik Testi Sonuçları

Tablo 10 çalışma kapsamında incelenen kirletici endüstrilerin endeksleri ile karbon fiyatı arasındaki çift yönlü nedensellik ilişkisinin Granger VAR testi ile analiz sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlara göre petrokimya ve yenilenebilir enerji endüstrilerinin sanayi endeksleri ile karbon fiyatı arasında çift yönlü bir nedensellik ilişkisi vardır.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
PETROL (1)	0.000	0.000**	0.201	0.258	0.415	0.225	0.002**	0.345	0.665	0.393	0.636	0.009**	0.210	0.882	0.000**
GAZ (2)	0.174	0.000	0.277	0.903	0.064	0.067	0.246	0.200	0.286	0.085	0.734	0.034	0.003**	0.426	0.008**
ELEKTRİK (3)	0.430	0.719	0.000	0.016*	0.897	0.424	0.120	0.637	0.369	0.167	0.683	0.903	0.109	0.430	0.197
YEN. ENERJİ (4)	0.178	0.656	0.509	0.000	0.391	0.736	0.190	0.546	0.671	0.04*	0.326	0.161	0.004**	0.058	0.023*
HAVACILIK (5)	0.318	0.952	0.024	0.163	0.000	0.161	0.075	0.231	0.001**	0.001**	0.782	0.000**	0.452	0.168	0.044*
ULAŞIM (6)	0.007**	0.300	0.316	0.553	0.263	0.000	0.445	0.894	0.053	0.004**	0.814	0.000**	0.452	0.615	0.692
DEMİR ÇELİK (7)	0.352	0.014*	0.268	0.251	0.729	0.072	0.000	0.678	0.616	0.116	0.468	0.459	0.073	0.350	0.701
TARIM (8)	0.156	0.392	0.085	0.025*	0.079	0.629	0.582	0.000	0.865	0.227	0.028*	0.733	0.048	0.032*	0.599
HAYVANCILIK (9)	0.101	0.161	0.000**	0.977	0.028*	0.223	0.160	0.693	0.000	0.485	0.498	0.089	0.034*	0.548	0.891
KİMYA (10)	0.510	0.184	0.002**	0.000**	0.354	0.097	0.002**	0.367	0.922	0.000	0.250	0.118	0.803	0.681	0.600
PETROKİMYA (11)	0.058	0.002**	0.299	0.360	0.319	0.677	0.000**	0.358	0.872	0.618	0.000	0.159	0.911	0.534	0.001**
ÇİMENTO (12)	0.553	0.000**	0.007**	0.070	0.278	0.017*	0.022*	0.528	0.068	0.117	0.088	0.000	0.017*	0.961	0.503
İNŞAAT (13)	0.254	0.462	0.900	0.008**	0.022*	0.801	0.014*	0.041*	0.000**	0.110	0.775	0.087	0.000	0.208	0.204
İMALAT (14)	0.373	0.438	0.003**	0.000**	0.251	0.455	0.016*	0.617	0.105	0.505	0.722	0.165	0.000**	0.000	0.299
EUA FİYATI (15)	0.757	0.627	0.000**	0.000**	0.903	0.116	0.003**	0.439	0.001**	0.258	0.044*	0.226	0.500	0.005**	0.000

Tablo 10 Granger Testi Sonuçları

Önceki araştırmalarla tutarlı olarak, karbon fiyatı ile kirlenici sektör endeks getirileri arasındaki nedensellik ilişkisinin sektör spesifik olduğu tespit edilmiştir. Özetle, 2016-2023 dönemi için, sonuçlar karbon fiyatının elektrik, yenilenebilir enerji, demir-çelik, hayvancılık, petrokimya ve imalat sanayi endeksleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve petrol, gaz, yenilenebilir enerji, havacılık ve petrokimya sektör endekslerinin de karbon fiyatı üzerindeki karşı güçlü etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Faktör Önem Puanları

EUA fiyat veri setinin doğrusal ve durağan olmayan, grift ve düzensiz yapısı göz önüne alındığında, ekonometrik modellerin endüstriyel hisse senedi getirileri ile karbon fiyatı arasındaki doğrusal olmayan ve karmaşık ilişkiyi keşfetmede yetersiz kalması beklenmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada bu karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkiyi yakalamak için ilk kısımda kullanılan 13 DML yöntemi uygulanmıştır. Tablo 11, uygulanan her bir yöntem için seçilen endüstri endekslerinin faktör önem puanlarının mutlak değerlerini sunmaktadır.

Yüksek faktör önem puanları, söz konusu faktörün karbon fiyat hareketlerine olan daha güçlü etkisine işaret ederken, sıfır değerleri uygulanan modeller tarafından dışarıda bırakılan değişkenleri ifade etmektedir. Sonuçlar, lasso modelinin hayvancılık ve inşaat sektörünü, Elastik Net'in gaz ve petrokimya sektörlerini ve son olarak XG ve CART modellerinin de petrol sektörünü dışarıda bıraktığını göstermektedir.

Sonuçlara göre kimya sektörü uygulanan yöntemlerin çoğunluğu tarafından karbon fiyat hareketleri için en önemli sektör olarak tesbit edilmiştir. Bu sektörü yenilenebilir enerji, et, elektrik, ulaşım, inşaat, imalat ve demir-çelik sektörleri takip etmektedir. Eurostat'ın kimya, petrokimya ve imalat sektörlerini imalat başlığı altında sınıflandırdığı göz önüne alındığında, tablo 11 sonuçları, en yoğun kirletici sektörlerin endüstriyel hisse senedi getirilerinin karbon fiyatı oynaklığı üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğunu şekil 5 ile uyumlu olarak göstermektedir.

	LASSO	EN	ET	RF	SVR	XG	PERM	DT	CART	KNN	SHAP	DNN	RNN
PETROL	4.819	0.004	0.002	0.001	5.817	0.000	0.001	0.001	0.000	61.304	0.043	0.124	0.123
GAZ	1.180	0.000	0.004	0.004	5.694	0.002	0.003	0.001	0.001	74.817	0.148	0.129	0.128
ELEKTRİK	4.362	2.866	0.228	0.050	39.484	0.004	0.004	0.010	0.011	95.520	1.149	0.134	0.133
YEN. ENERJİ	14.058	3.107	0.325	0.111	46.877	0.340	0.188	0.003	0.004	464.548	1.911	0.118	0.117
HAVACILIK	0.000	0.765	0.004	0.001	9.743	0.001	0.002	0.002	0.002	95.795	0.098	0.124	0.124
ULAŞIM	2.972	1.513	0.073	0.042	37.426	0.037	0.075	0.051	0.051	15.083	1.054	0.128	0.130
DEMİR ÇELİK	0.520	1.100	0.041	0.002	20.688	0.018	0.006	0.002	0.001	247.215	0.120	0.176	0.175
TARIM	0.072	0.850	0.007	0.003	18.294	0.003	0.003	0.001	0.002	51.050	0.191	0.137	0.136
HAYVANCILIK	0.766	1.363	0.098	0.225	19.279	0.155	0.062	0.251	0.251	378.576	5.868	0.191	0.191
KİMYA	2.581	2.130	0.142	0.547	47.252	0.430	0.252	0.662	0.662	30.651	5.356	0.160	0.162
PETROKİMYA	5.209	0.000	0.005	0.001	5.414	0.001	0.002	0.001	0.001	28.843	0.061	0.123	0.124
ÇİMENTO	1.794	1.266	0.006	0.002	8.930	0.001	0.001	0.005	0.001	154.301	0.088	0.133	0.132
İNŞAAT	0.000	0.433	0.017	0.004	16.749	0.002	0.002	0.004	0.004	156.323	0.404	0.155	0.154
İMALAT	1.642	1.576	0.047	0.006	30.058	0.007	0.017	0.006	0.010	49.286	0.802	0.123	0.125

Tablo 11 Faktör Önem Puanları

4.4. Modellerin Karşılaştırılması

Tablo 12, çalışmanın ikinci kısmında kullanılan modellerin performans parametrelerini sunmaktadır ve sonuçlar bazı farklılıklar dışında birinci kısım sonuçlarına çok yakındır. İkinci kısımda da DT temelli ET, RF ve XGboost modellerine ek olarak, KNN, RNN ve DNN modelleri de olağanüstü performans göstermişlerdir.

	RMSE	MAE	MAPE	R2	MAXE	ARD
ET	0.931	0.509	4.04%	98.03%	7.607	96.497
KNN	1.075	0.595	4.51%	97.91%	9.344	103.661
RNN	1.479	0.835	4.87%	97.59%	12.123	121.614
RF	1.195	0.661	5.05%	97.83%	9.33	109.308
XGBoost	1.14	0.675	5.13%	97.87%	6.496	106.778
DNN	1.598	0.886	5.61%	97.50%	13.948	126.402
DT	1.624	0.85	5.74%	97.47%	12.49	127.422
CART	1.56	0.822	5.81%	97.53%	12.21	124.892
RNN	2.155	0.79	6.31%	97.33%	9.73	146.806
SHAP	1.452	0.934	7.38%	97.63%	10.533	120.479
SVR	4.055	1.763	9.87%	93.34%	30.128	201.374
LASSO	3.756	2.673	19.84%	94.04%	22.359	193.796
EN	5.351	3.785	27.57%	89.69%	33.315	231.328

Tablo 12 Modellerin Karşılaştırması

Tablo 13, uygulanan her yöntem için MAPE değerlerine göre sıralanmış en önemli 8 endüstriyel hisse senedi getirisini göstermektedir. Sonuçlar, uygulanan yöntemlerin çoğunun kimya sektörünü en önemli karbon fiyatı itici gücü olarak belirlediğini ve bunu yenilenebilir enerji, hayvancılık, demir-çelik, elektrik, ulaşım, inşaat, imalat ve çimento sektörlerinin takip ettiğini göstermektedir. Tablo 13'deki sonuçlar, şekil 5'teki sektörel sera gazı emisyonları ile korelasyon içindedir.

Kirletici şirketlerin bir birim karbonsuzlaştırmanın marjinal maliyeti karbon fiyatının altında olduğu sürece karbonsuzlaştırma teknolojilerine yatırım yapacakları göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmanın sonuçları kirletici şirketlerin yatırım tercihleri hakkında, bu şirketlerin çoğunluğunun mevcut yatırıma elverişli fonlarıyla karbonsuzlaştırma teknolojilerine yatırım yapmak yerine emisyon tahsisatı sözleşmelerine yatırım yapmayı tercih ettiklerine dair güçlü bir öngörü ortaya koymaktadır. Sonuçlara politika yapımcıların çerçevesinden bakıldığında, mevcut karbon fiyatının karbonsuzlaştırma teknolojilerinin adaptasyonunu teşvik edecek eşiğin altında olduğu izlenimi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca uygulanan modellerin

yüksek performans metrikleri seçilen modellerin çalışmanın amacına oldukça uygun olduğunu da göstermektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8
ET	YEN. ENERJİ	ELEKTRİK	KİMYA	HAYVANCILIK	ULAŞIM	İMALAT	DEMİR ÇELİK	İNŞAAT
KNN	YEN. ENERJİ	HAYVANCILIK	DEMİR ÇELİK	İNŞAAT	ÇİMENTO	HAVAYOLU	ELEKTRİK	GAZ
RNN	HAYVANCILIK	DEMİR ÇELİK	ELEKTRİK	İNŞAAT	KİMYA	GAZ	ULAŞIM	ÇİMENTO
RF	KİMYA	HAYVANCILIK	YEN. ENERJİ	ELEKTRİK	ULAŞIM	İMALAT	GAZ	İNŞAAT
XGBOOST	KİMYA	YEN. ENERJİ	HAYVANCILIK	ULAŞIM	DEMİR ÇELİK	İMALAT	ELEKTRİK	TARIM
DNN	HAYVANCILIK	DEMİR ÇELİK	KİMYA	İNŞAAT	TARIM	ELEKTRİK	ÇİMENTO	GAZ
DT	KİMYA	HAYVANCILIK	ULAŞIM	ELEKTRİK	İMALAT	ÇİMENTO	İNŞAAT	YEN. ENERJİ
CART	KİMYA	HAYVANCILIK	ULAŞIM	ELEKTRİK	İMALAT	İNŞAAT	YEN. ENERJİ	HAVAYOLU
RNN	KİMYA	YEN. ENERJİ	ULAŞIM	HAYVANCILIK	İMALAT	DEMİR ÇELİK	ELEKTRİK	GAZ
SHAP	HAYVANCILIK	KİMYA	YEN. ENERJİ	ELEKTRİK	ULAŞIM	İMALAT	İNŞAAT	TARIM
SVR	KİMYA	YEN. ENERJİ	HAYVANCILIK	ULAŞIM	DEMİR ÇELİK	İMALAT	ELEKTRİK	TARIM
LASSO	YEN. ENERJİ	PETROCHEM	PETROL	ELEKTRİK	ULAŞIM	KİMYA	ÇİMENTO	İMALAT
EN	YEN. ENERJİ	ELEKTRİK	KİMYA	İMALAT	ULAŞIM	HAYVANCILIK	ÇİMENTO	DEMİR ÇELİK

Tablo 13 MAPE Değerlerine Göre En Önemli Sektörler

BEŞİNCİ BÖLÜM YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ KULLANARAK KARBON FİYATI TAHMİN MODELLEMESİ

5.1. Uygulamanın Önemi, Amacı, Kapsamı ve Kısıtları

Bir önceki uygulama kısmında da ifade edildiği üzere emisyon piyasalarının gelişimine paralel olarak, yatırımcılar için artan portföy çeşitlendirme faydaları ve likiditesi nedeniyle emisyon sözleşmelerine ve diğer yeşil finansman ürünlerine olan ilgi ve talep giderek artmaktadır. Her ne kadar bu ürünlerin en önemli yatırımcıları emisyon yayan şirketler olsa da önümüzdeki yıllarda bu ürünlerin tüm kurumsal ve bireysel yatırımcılar açısından yaygın bir yatırım aracına dönüşeceği de açıktır. Dolayısı ile karbon fiyatı hem kurumsal hem de bireysel yatırımcılar için kritik stratejik öneme sahiptir ve bu önem giderek artmaktadır.

Ayrıca, karbon fiyatları uygulanan iklim politikalarının etkinliği ve makroekonomik parametre tahminleri hakkında geri bildirim sağlar ve aynı zamanda işletmelerin faaliyet ve yatırım stratejilerini belirler. Bu nedenlerle, doğru karbon fiyatı tahmini hem kurumsal hem de bireysel yatırımcılar açısından oldukça kritik bir öneme sahiptir. Çalışmanın ikinci uygulama kısmı, tekli ve çiftli veri ayrıştırma ve ileri düzeyde optimizasyon teknikleri ile çalışmanın birinci ve ikinci kısımlarında elde edilen bulguları kullanarak hassas ve doğru tahmin modelleri oluşturmayı amaçlamaktadır.

Çalışmanın üçüncü kısmında ilk iki kısmın bulguları ve tarihsel EUA fiyatı girdi olarak alınmıştır. Bu amaçla, 2016-2023 yılları arası EUA vadeli fiyat tahmini için ilk kısımda incelenen 28 değişken arasından karbon fiyatı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu tespit edilen vadeli kömür fiyatı, S&P 500 endeksi, Birleşik Krallık 10

yıllık tahvil getirisi ve NIKKEI endeksi ile ikinci kısımda karbon fiyatı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu tespit edilen kimya, yenilenebilir enerji ve hayvancılık sektörlerinin endeks getiri verileri girdi olarak alınarak, tekli ve çiftli veri ayrıştırma teknikleri sonrasında, 4 farklı yapay sinir ağı modeli (ANN) ile karbon fiyatı tahmini için 12 yeni DML modeli oluşturulmuştur. Son aşamada ise oluşturulan ANN modellerinin kritik öneme sahip uygulama parametreleri en iyi sonuca ulaşmak adına genetik algoritma ile optimize edilmiş ve optimize edilmiş yeni 12 model daha çalışmaya eklenmiştir. Sonuç olarak farklı veri ayrıştırma, ANN yapısı ve optimizasyon seçenekleri ile oluşturulan 24 tekli ve çoklu modelin tahmin ve uygunluk performansları birinci kısımda da kullanılan 4 farklı metrik ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın birinci kısmına benzer olarak ikinci kısımda kullanılan ANN modelleri önyargılı (biased), eksik ve hatalı veri setlerinde çok başarılı netice vermeyebilir. Ancak ikinci kısımda kullanılan veri ayrıştırma yöntemlerinin bu sorunları ortadan kaldırması beklenmektedir. Ayrıca ML modellerinin temel sorunlarından olan aşırı uyum (overfitting) sorunu 10 kat çapraz doğrulama ile elimine edilmiştir.

5.2. Literatür İnceleme

Emisyon piyasalarının artan önemi nedeniyle, literatürde karbon fiyatlarının tahminine olan ilgi son on yılda önemli ölçüde artmıştır. Literatürdeki önceki çalışmaların çoğu, karbon fiyatlarını tahmin etmek için Vektör Oto Regresyon (VAR), Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama (ARIMA), Otoregresif Koşullu Değişen Varyans (ARCH) veya Genelleştirilmiş Otoregresif Koşullu Değişen Varyans (GARCH) gibi doğrusal modelleri benimsemiştir. Ancak, karbon fiyatları çevresel değişiklikler ve teknolojik ilerlemeler, ekonomik ve siyasi krizler, yeni yapısal

düzenlemeler gibi dış faktörlere son derece bağımlıdır. Önceki araştırmalar genellikle politik, ekonomik ve çevresel şokların karbon fiyatı üzerindeki önemli etkileri konusunda hemfikir olmasına rağmen, doğrusal olmayan modelleri uygulayan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Bu yöntemleri kullanan sınırlı çalışmaların arasından, Zhu ve Wei (2013), ARIMA modelinin tek başına yeterli olmadığını tespit ederek ARIMA ve en küçük kareler destek vektör makinesi (LSSVM) kullanarak hibrit bir karbon fiyatı tahmin modeli önermişlerdir. Yi v.d. (2017) ise geri yayılım sinir ağı (BPNN) modeli kullanmıştır.

Veri ön işleme ve ayrıştırma metotları karbon fiyatı veri seti gibi grift ve doğrusal olmayan zaman serileri için tahmin modellerinin tahmin doğruluğunu artırmak için kullanılmaktadır. Bu metotların ilk örneklerinden olan ampirik mod ayrıştırması (Empirical Mode Decomposition, EMD) orijinal zaman serisini daha düzenli alt serilere dönüştürmek için kullanılmıştır (Yang ve Lin, 2017). Zhu (2012), karbon fiyatlarını tahmin etmek için ANN modeli kurmuş ve genetik algoritma (GA) ile birlikte ampirik mod ayrıştırması (EMD) ile uygulamıştır. EMD doğrusal olmayan modellerin doğruluğunu artırsa da etkisi mod karıştırma problemi ile sınırlıdır. Bu sorunu aşmak için, Bütünleşik Deneysel Mod Ayrışımı (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD), Dalgacık Paket Ayrıştırması (Wavelet Packet Decomposition, WPD), Tamamlayıcı Bütünleşik Deneysel Mod Ayrışımı (Ensemble Empirical Mode Decomposition, CEEMD), Uyarlanabilir Gürültüyle Tam Bütünleşik Deneysel Mod Ayrışımı (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN) ve Değişken Mod Ayrıştırma (Variational Modal Decomposition, VMD) dahil olmak üzere çeşitli daha gelişmiş ayrıştırma teknikleri kullanılmıştır. Zhou v.d.

(2022), karbon fiyatını tahmin etmek için yapay sinir ağlarını CEEMDAN metodu ile beraber kullanmıştır. (Nadirgil, 2023a)

5.3. Veri Seti

Uygulamanın birinci kısmında olduğu gibi, ikinci kısımda da enformasyon asimetrisinin etkisini en aza indirmek ve yeni bilgilerin emisyon piyasasındaki etkilerini daha iyi gözlemlemek için 01.01.2016- 01.01.2023 tarihleri arası EUA günlük kapanış fiyatları kullanılmıştır. AB ETS'nin ilk 2 aşaması, bir önceki bölümde ele alınan, aşırı ücretsiz izin tahsisatı, yapısal eksiklikler ve makroekonomik faktörler gibi sebeplerin karbon fiyatında ciddi istikrarsızlığa sebep olması nedeniyle bu çalışmanın dışında tutulmuştur.

Karbon fiyatı belirleyicileri olarak çalışmanın ilk iki kısmının sonuçları ışığında, 28 değişken arasından karbon fiyatı üzerinde en önemli etkiye sahip olan vadeli kömür fiyatı, S&P 500 endeksi, Birleşik Krallık 10 yıllık tahvil getirisi ve NIKKEI endeksi ile sektörel endeks getirileri arasında en önemli etkiye sahip olduğu tespit edilen kimya, yenilenebilir enerji ve hayvancılık sektörlerinin endeks getirisi verileri bir önceki dönem EUA_{t-1} zaman serisi ile birlikte analiz edilmiştir.

5.4. Yöntem

Tam Bütünleşik Ampirik Mod Ayrıştırma (CEEMDAN)

Torres v.d. (2011) tarafından ortaya konulan CEEMDAN metodu EMD'nin gelişmiş bir versiyonudur ve her ayrıştırma sırasında gürültü seviyesini denetleyen beyaz gürültü için ek sinyal-gürültü oranı ekleyerek mod karıştırma ve modal örtüşme sorunlarının etkilerini azaltmaktadır. Sonuç olarak, EMD, EEMD ve CEEMD ile karşılaştırıldığında, yüksek ayrıştırma verimliliğine sahiptir.

CEEMDAN uygulama adımları aşağıdaki gibidir;

(i) $w_i(t)$ beyaz gürültüsü ve ϵ_0 sinyal/gürültü oranı $z(t)$ zaman serisine eklenerek $z_i(t)$ yeni zaman serisi oluşturulur.

(ii) İlk IMF $IMF_1(t)$ 'yi elde etmek için $z(t)$ EMD ile aşağıdaki denklem kullanılarak n kez ayrıştırılır ve ilk artık değer $r_1(t)$ denklem 14 kullanılarak hesaplanır.

$$IMF_1(t) = \frac{1}{n} EMD_1(z_i(t)) \quad (13)$$

$$r_1(t) = z(t) - IMF_1(t) \quad (14)$$

(iii) $w(t)$ beyaz gürültüsü ve EMD'nin ilk IMF'sinin ϵ_1 sinyal/gürültü oranını ilk kalıntı $r_1(t)$ 'ye ilave ederek yeni bir zaman serisi elde edilir. Sonuç olarak, $IMF_2(t)$ ve ikinci artık değer $r_2(t)$ denklem 15 ve 16 kullanılarak hesaplanabilir.

$$IMF_2(t) = \frac{1}{n} EMD_1(r_1(t) + \epsilon_1 EMD_1(w_i(t))) \quad (15)$$

$$r_2(t) = r_1(t) - IMF_2(t) \quad (16)$$

(iv) İki den fazla uç nokta kalmayana ve kalıntı daha fazla ayrıştırılamayana kadar 3. adım tekrarlanır ve CEEMDAN'ın son artık değeri denklem 17 ile elde edilir

$$r_t = z(t) - \sum_1^K IMF_k(t) \quad (17)$$

Permütasyon Entropisi (PE)

Permütasyon Entropisi (PE), bir zaman serisinin değerleri arasındaki sıralama ilişkilerine ve sıralı modellerin göreceli sıklığına dayanan zaman serisinin karmaşıklığının ölçülmesini sağlayan etkili bir yöntemdir.

$Z = \{z_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 'nin n dizi uzunluğuna sahip bir ayrık zaman serisi olduğu varsayıldığında, $\{z_i\}$ 'nin yeniden yapılandırma dizisi, gömme boyutu ve gecikme süresi aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$z_k^{d,\varphi} = [z_k + z_{k+\varphi} + \dots + z_{k+(d-1)\varphi}] \quad k = 1, 2, 3, \dots, n - (d-1)\varphi \quad (18)$$

Burada d ve φ gömme boyutu ve yeniden yapılandırma parametreleri için gecikmedir ve $z_k^{d,\varphi}$ yeniden yapılandırılmış vektörlerin bir kümesidir. Vektördeki her bir elemanın indeks konumu denklem 19'daki gibi bir dizi sembolü belirler ve bunların olasılıkları denklem 20'deki gibi hesaplanır;

$$S_v^d = [f_1, f_2, \dots, f_d], v = 1, 2, \dots, d \quad (19)$$

$$P_v^{d,\varphi} = \frac{F_v}{n-(d-1)\varphi} \quad (20)$$

Burada F_v , S_v^d deseninin frekans değerleridir ve zaman serilerinin permütasyon entropi değerleri denklem 21 ile bulunur,

$$PE(d) = -\sum_{v=1}^{d!} P_v^{d,\varphi} \ln(P_v^{d,\varphi}) \quad (21)$$

Değişken Mod Ayırıştırması (VMD)

VMD, girdileri çeşitli frekanslara sahip alt dizilere ayırştırmak için etkin bir araçtır. VMD, her bir bileşenin öngörülen bant genişliğini en aza indirmeyi amaçlar ve denklem 22 ve 23 ile ifade edilir,

$$\min_{\{u_k\}, \{w_k\}} \sum_{k=1}^K \left| \partial(t) \left[(\vartheta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right|_2^2 \quad (22)$$

$$s. t. \sum_{k=1}^K u_k(t) = z(t) \quad (23)$$

Burada $z(t)$ orijinal zaman serisini, u_k alt sinyal kümesini, w_k alt sinyallerin merkez frekanslarını, K ayrıştırılacak IMF sayısını, $\partial(t)$ t'nin kısmi türevini, $\vartheta(t)$ birim dürtü fonksiyonunu ve t zamanı göstermektedir.

Geçitli Tekrarlayan Birim Sinir Ağı (Gated Recurrent Unit, GRU)

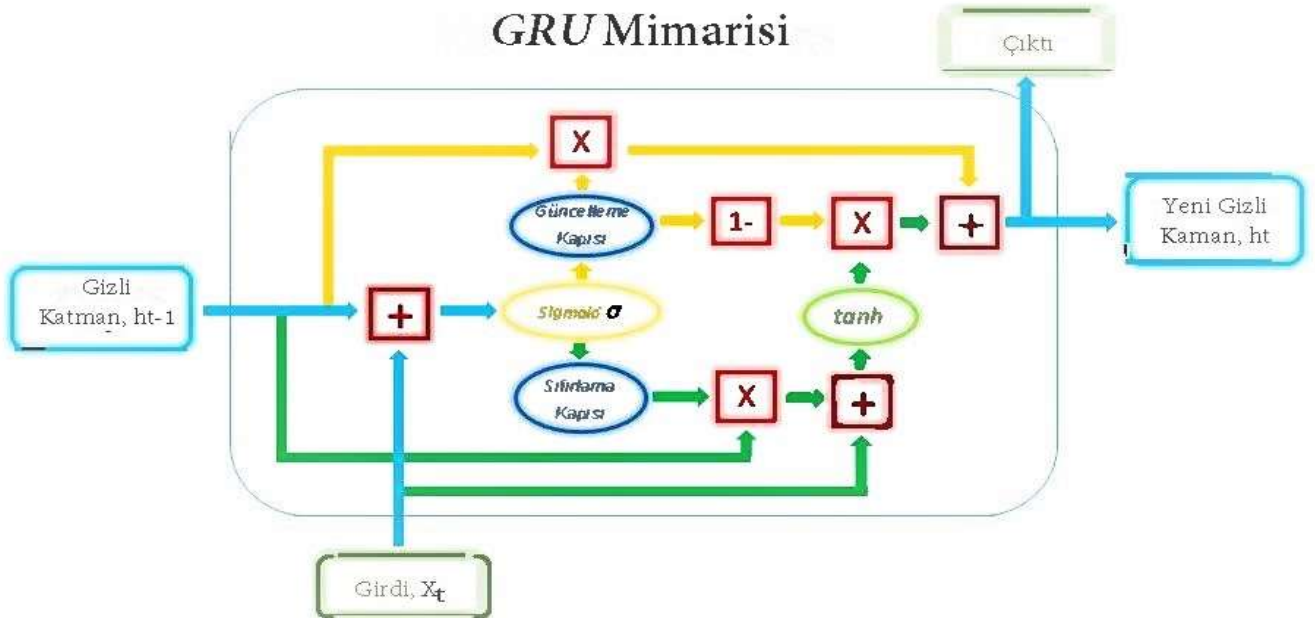
GRU, LSTM'nin daha az parametreye sahip daha basit ve daha hızlı bir versiyonudur ve LSTM'deki üç kapı yerine biri güncelleme kapısı ve biri sıfırlama kapısı olmak üzere iki kapı kullanır. Şekil 10'da örnek bir GRU mimarisi resmedilmiştir. Bir GRU hücresi aşağıdaki gibi çalışır;

$$u = \sigma(W_U x_t + W_U h_{t-1} + b_u) \quad (24)$$

$$r = \sigma(W_r x_t + W_r h_{t-1} + b_r) \quad (25)$$

$$h_c = \tanh(W[r * h_{t-1} + W x_t]) \quad (26)$$

$$h_t = (1 - u_t) * h_{t-1} + u_t * h_c \quad (27)$$



Şekil 10 GRU Hücre Yapısı

Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron, MLP)

MLP, belirli bir hedefe ulaşmak için ağırlıkların ve önyargıların eğitilebildiği bir tür ileri beslemeli yapay sinir ağıdır. Üç ayrı katmandan oluşur ve nöronlar BPNN algoritması ile eğitilir. Girdi ve çıktı katmanları aşağıdaki gibi çalışır,

$$h(x_t) = f_1(b_1 + w_1x) \quad (28)$$

$$O(x_t) = f_2(b_2 + w_2h_x) \quad (29)$$

Burada b_1 ve b_2 yanlılık vektörleri, w_1 ve w_2 ağırlık matrisleri ve f_1 ve f_2 aktivasyon fonksiyonlarıdır.

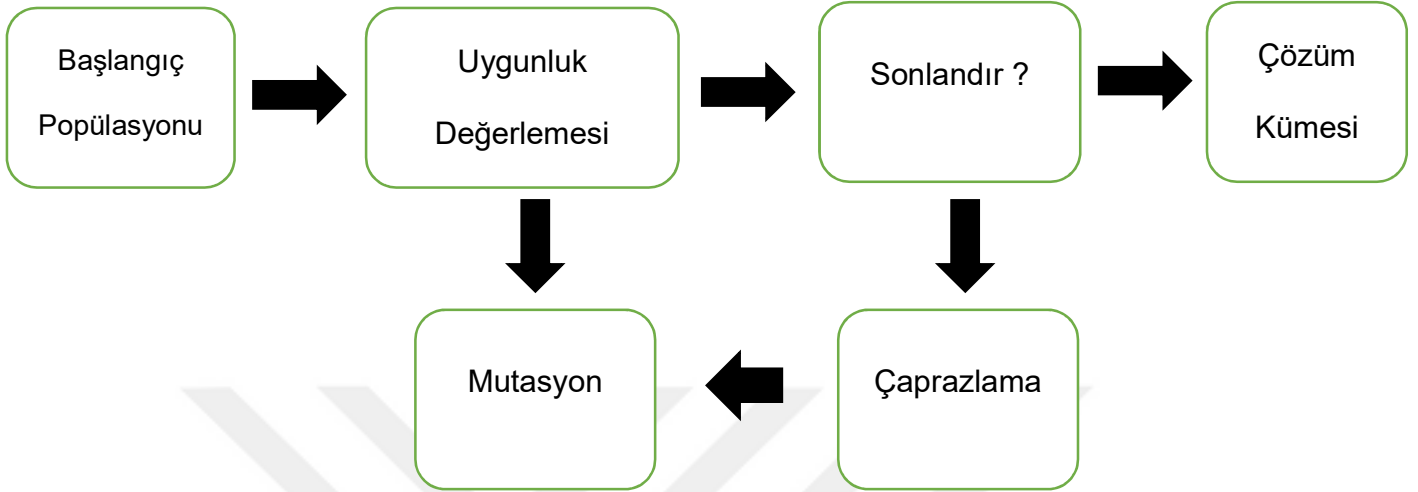
Genetik Algoritma (GA)

Genetik algoritma (GA), mutasyon, doğal seleksiyon, kalıtım ve çaprazlama kavramlarını benimseyen yeni bir optimizasyon tekniğidir. GA genetik çaprazlamalar, mutasyonlar ve doğal seçim kullanarak çalışır. (Simoncini v.d., 2019)

Şekil 11 genetik algoritma işleyişini göstermektedir. GA temel olarak aşağıdaki adımları izler,

- (i) Başlangıç popülasyonunun oluşturulması,
- (ii) Uygunluk fonksiyonunun geliştirilmesi ve uygunluk puanlarının değerlendirilmesi,
- (iii) Ebeveyn çiftlerinin seçilmesi,
- (iv) Çaprazlama ve mutasyon ile yeni nesil oluşturulması,

(v) Daha fazla iyileşme gözlenmediğinde sürecin sonlandırılması.



Şekil 11 Genetik Algoritma Şeması

Normalizasyon (Range Transformation)

Normalizasyon veya aralık dönüşümü (Min-maks normalizasyonu) giriş verileri üzerinde doğrusal bir dönüşüm gerçekleştirir. min_z ve max_z 'ın z dizisi için minimum ve maksimum değerler olduğu varsayıldığında, aralık dönüşümü aşağıdaki denklemi kullanarak z 'nin v değerini ($newmin_z$, $newmax_z$) aralığında v' ile eşler.

$$v' = \left(\frac{v - min_z}{max_z - min_z} \right) * (newmax_z - newmin_z) + newmin_z \quad (19)$$

Hibrit Model Çerçevesi

Tek ve çift ayrıştırmalı hibrit modellerin diyagramları sırasıyla şekil 12 ve 13'te gösterilmiştir. Hibrit çift ayrıştırma modeli aşağıdaki gibi uygulamıştır,

(i) Öncelikle girdiler CEEMDAN ile 7 IMF bileşenine ayrıştırılmıştır.

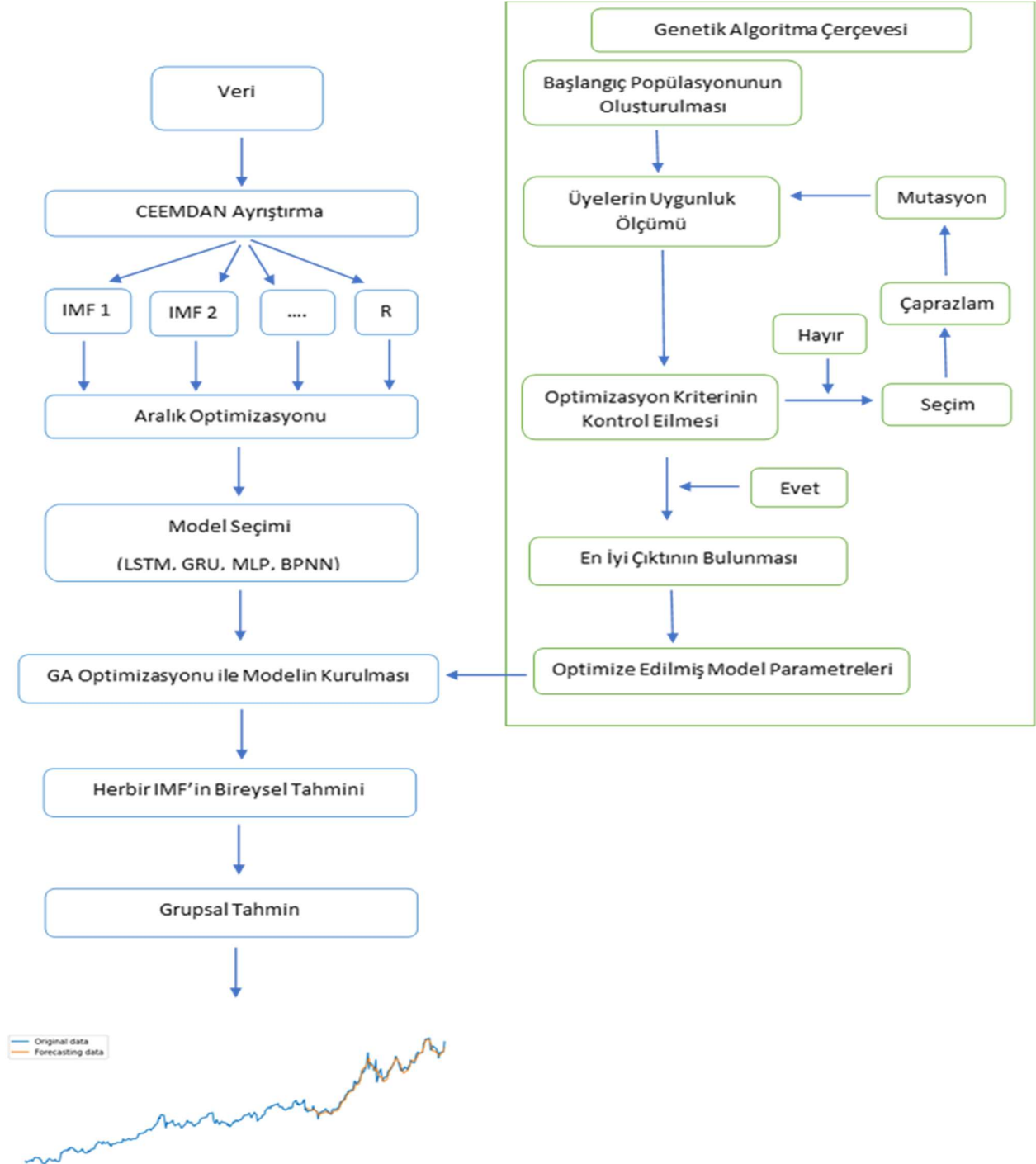
(ii) CEEMDAN ile elde edilen IMF bileşenleri, permütasyon entropi ile 3 CO-IMF olarak gruplandırılır.

(iii) Birinci CO-IMF, VMD ile ikinci defa ayrıştırılır.

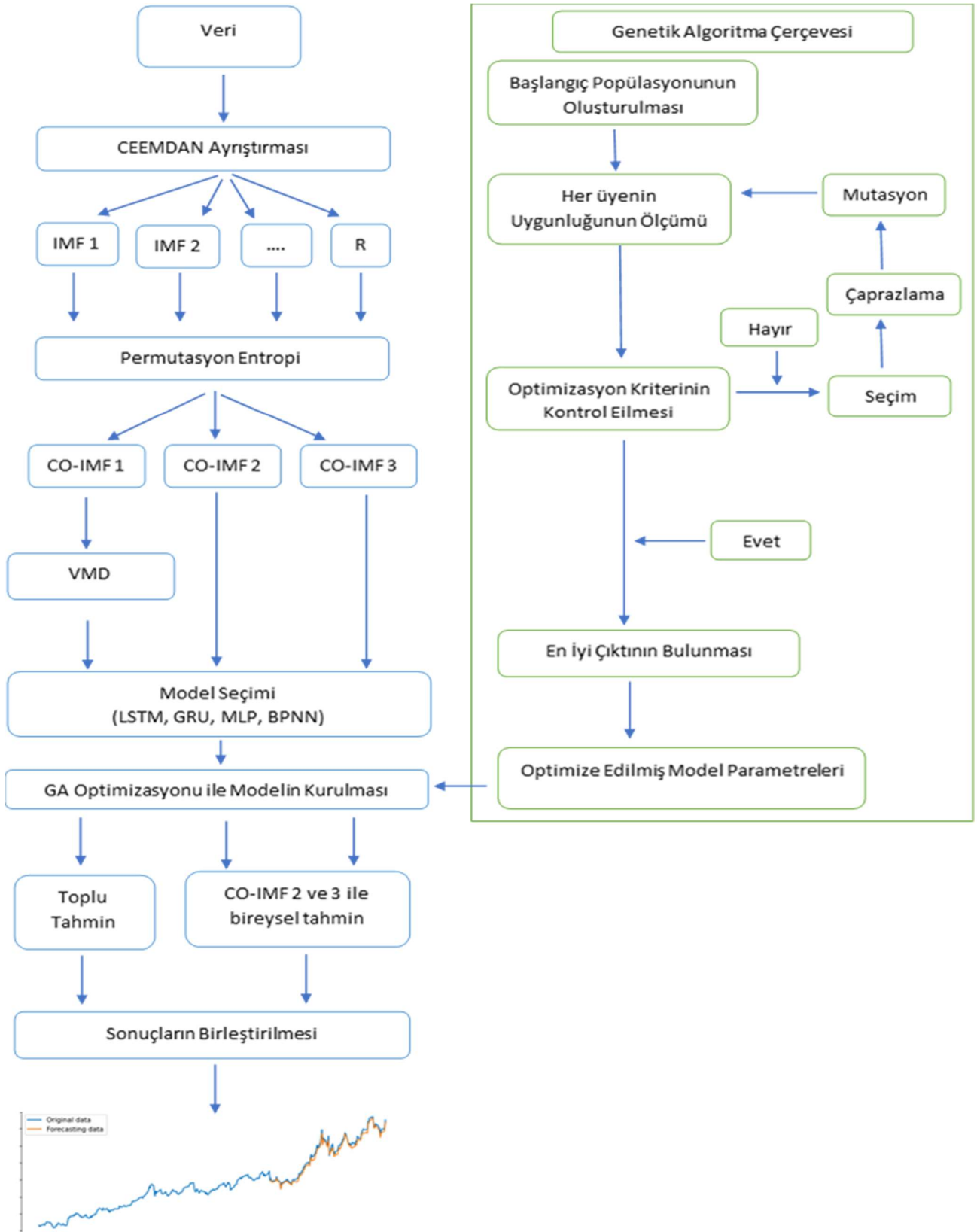
(iv) GA ile model parametreleri için başlangıç popülasyonu oluşturulur ve optimum model parametreleri elde edilene kadar GA döngüsü tekrarlanır.

(v) GA tarafından optimize edilen parametrelerle tekli ve çoklu ANN modelleri oluşturulur.

(iv) VMD ile elde edilen çıktılar çoklu tahmin modeli ile kalan 2 bileşen tekli tahmin modeli ile analiz edilir ve son aşamada tüm çıktılar ortak tahmin modelinde girdi olarak kullanılır. Tek ayrıştırmalı yöntemde ise her bir IMF bileşeni tekli tahmin modeli tarafından kullanılmak üzere girdi vektörlerine dönüştürülür ve şekil 12'de detaylı olarak gösterildiği gibi ortak tahmin modeli olarak kullanılır.



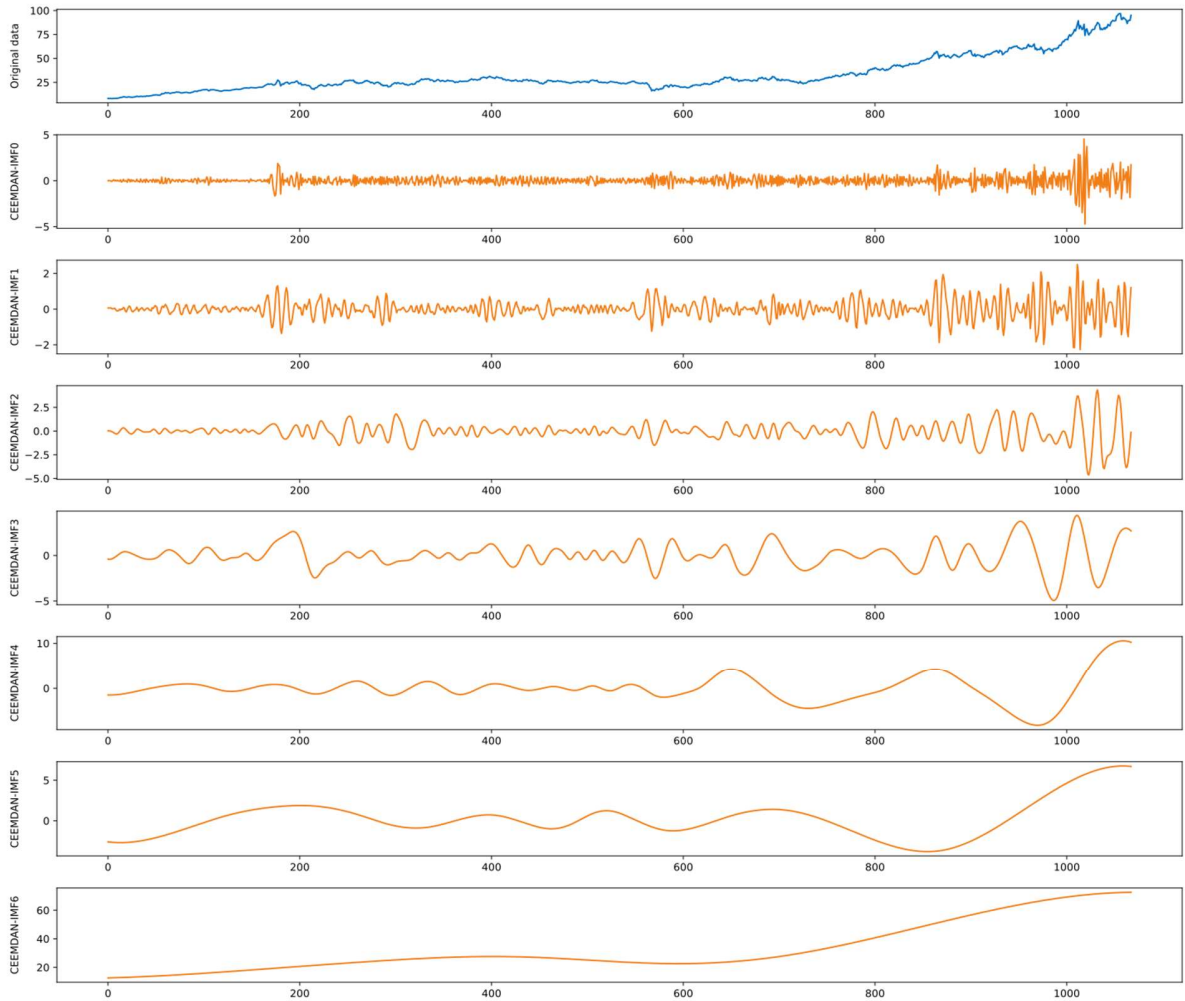
Şekil 12 Tek Ayrıştırmalı Model Diyagramı



Şekil 13 Çift Ayırıştırma Hibrit Model Diyagramı

5.4. CEEMDAN Sonuçları

Bu çalışmada, AB ETS karbon fiyatı verilerini ayırtmak için Python EMD-sinyal paketi kullanılmıştır. Şekil 10, örnek olarak EUA_{t-1} fiyatına ait CEEMDAN ayırtması ile elde edilen artık değer de dahil olmak üzere 7 IMF bileşeninin grafiklerini göstermektedir. Sonuçlar, ilk IMF'den sonuncuya doğru düzensizliğinin ve frekansının kademeli ve sürekli olarak azaldığını göstermektedir.



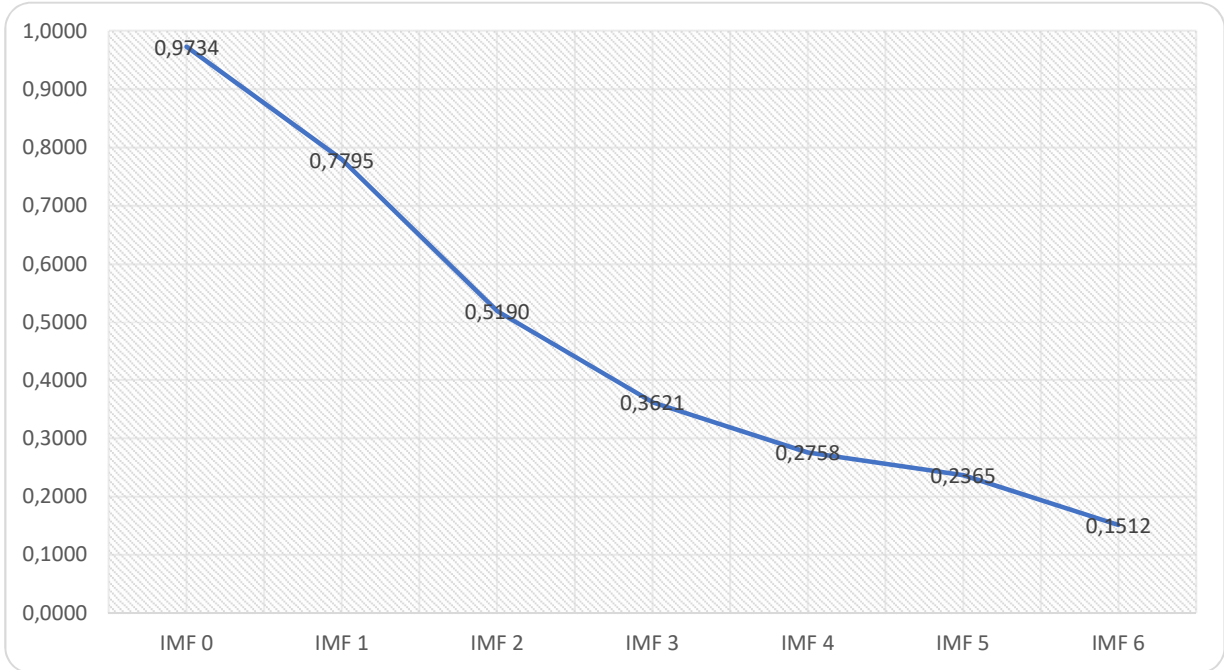
Şekil 14 IMF Diyagramları

5.5. Permutasyon Entropi Sonuçları

Permutasyon entropi sonuçlarına göre işlem sürelerinin azaltılması ve aşırı uyum sorununun hafifletilmesi amacı ile IMFler skorlarına göre sınıflandırmış ve 3 Co-IMF olarak gruplandırılmıştır. Zaman serisi daha düzenli ve deterministik hale geldikçe PE değeri 0'a yaklaşmakta, 1'e yaklaştıkça ise zaman serisinin gürültüsü ve rastlantısallık artmaktadır.

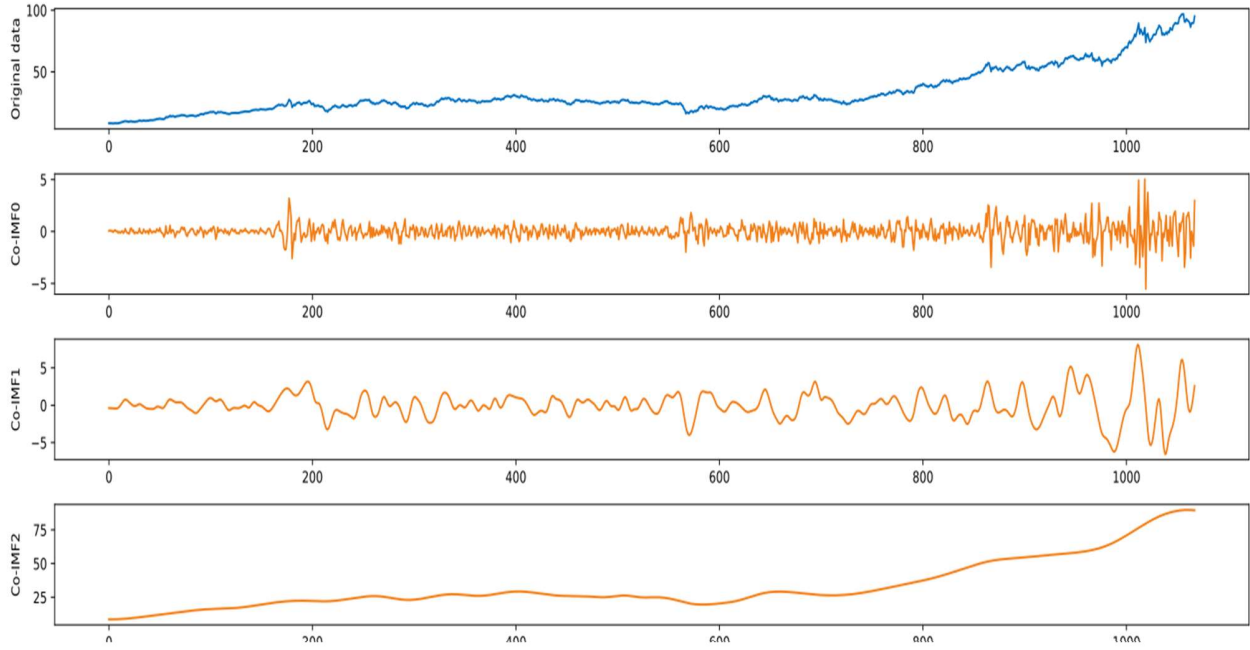
Şekil 15'de EUA_{t-1} serisine ait 7 IMF bileşeninin PE skorları gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, PE değerleri ilk IMF bileşeninden son artık değere doğru kademeli olarak düşmektedir. Sonuç olarak, yedi IMF çıktısı PE skorları doğrultusunda IMF 0 ve 1, IMF 2 ve 3 ve IMF 4, 5 ve 6'yi kapsayacak şekilde 3 yeni içsel mod fonksiyon (Co-IMF) olarak gruplandırılmıştır.

Şekil 16, EUA_{t-1} verisine ait CO-IMF bileşenlerini göstermektedir. AB Komisyonu tarafından Temmuz 2021'de kabul edilen ve toplam emisyon tahsisatı sayısını



Şekil 15 Permutasyon Entropi Sonuçları

önceki %1,74'lük oran yerine yıllık %2,2 oranında azaltmayı öngören yasa tekliflerinin etkisinin, 900 zaman noktasından başlayarak Co-IMF 0 ve 1'in frekansını ve volatilitiyi artırdığı şekilde görülmektedir.



Şekil 16 CO-IMF Grafikleri

5.6. Değişken Mod Ayırıştırması (VMD) Sonuçları

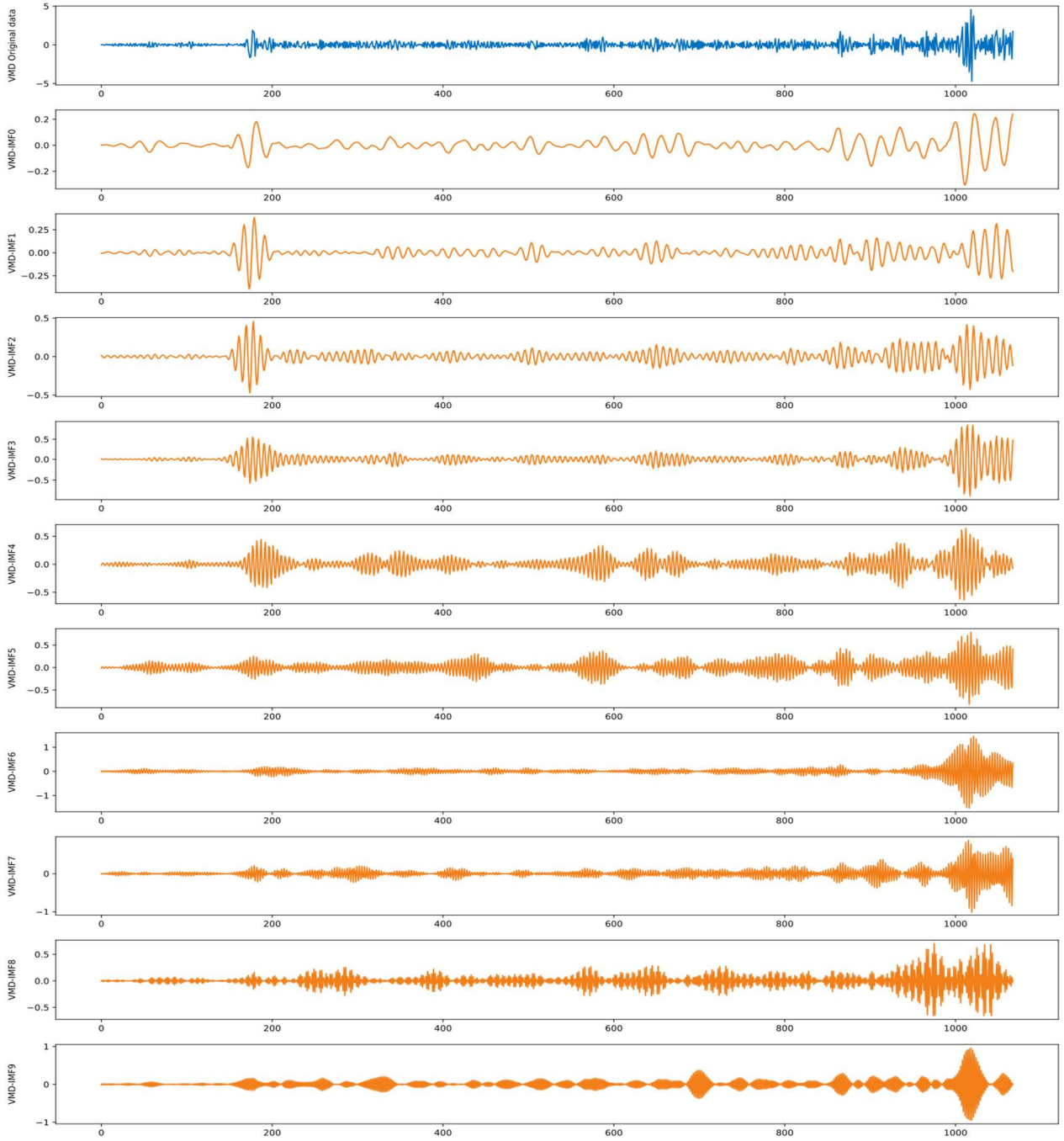
ML modellerinin performansı veri setinin yüksek frekans ve volatilityesinden olumsuz etkilenmektedir. Bu doğrultuda, bu çalışmada, CO-IMF'lerin frekans ve volatilitelerinin sonuçlar üzerindeki olası olumsuz etkilerini azaltmak için ikincil bir mod ayırıştırması uygulanmıştır. Zhou v.d. (2022), yaptığı çalışmada ilk ayırıştırma ile elde edilen IMF bileşenlerinin tekrar aynı yöntemle ikinci defa ayırıştırılmasının sonucu değiştirmediğini göstermiştir. Bu bilgi ışığında, CEEMDAN EMD, EEMD ve OEMD metotlarının aynı kökten geldiği düşünüldüğünde, bu metotların ikincil ayırıştırma kullanılmasının uygun olmayacağı öngörülmektedir.

VMD'nin EMD temelli yöntemlere göre yüksek gürültü direnci, daha iyi ayırıştırma performansı ve kararlılığa sahip olması nedenleri ile bu çalışmada, 0 ve 1 numaralı

IMF'lerin gruplandırılmasıyla elde edilen ilk CO-IMF bileşenini ayırtırmak için VMD uygulanmıştır ve VMD çıktıları Şekil 17'de gösterilmektedir.

5.7. Genetik Algoritma Optimizasyonu

Gizli katman ve nod sayısı, uzunluk ve bırakma oranı (drop-out ratio) gibi duyarlılık parametreleri ML modellerinin tahmin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sinir ağı yapısında, bırakma katmanı (drop-out layer) eğitim süresi boyunca her adımda bırakma oranı frekansı ile girdi birimlerini rastlantısal 0'a ayarlar ve kalan girdileri ($1/(1-\text{bırakma oranı})$) kadar ölçeklendirir. Bu karmaşıklığı azaltmada ve aşırı uyumu önlemede güçlü bir yöntemdir. Katmanların nod sayısı, modelin performansı için diğer bir önemli parametredir ve optimum nod sayısı verilerin karmaşıklık ve lineerlik düzeyine göre belirlenmelidir.



Şekil 17 VMD IMF Diyagramları

Yapay sinir ağıları modelleri için optimum parametrelerin denemelerle bulunması çok zaman alan ve verimli olmayan bir yöntemdir. Genetik algoritma, uygunluk fonksiyonunu belirleme esnekliği ile ML model yapısının parametre optimizasyon problemini çözmek için güvenilir bir araçtır.

Bu çalışmada, uygunluk puanı olarak rastlantısal ortalama kare hataları kullanarak, mevcut karbon fiyatını tahmin etmek için geçmiş veri setinin uzunluğunun (pencere boyutu), bırakma oranının ve nod sayısının optimum değerlerini bulmak için genetik algoritma optimizasyonu uygulanmıştır.

5.8. Değerlendirme Metrikleri

Bu makalede, çalışmanın birinci uygulama kısmında da kullanılan, R^2 , Ortalama Hatanın Karekökü (RMSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) gibi literatürde sıklıkla kullanılan tahmin doğruluğu ölçütleri kullanılmaktadır.

5.9. Tekli Tahmin Modellerinin Karşılaştırılması

Tablo 15'de uygulanan modellerinin performans parametreleri görülmektedir. İlk grup sonuçlar, düğümler, uzunluk ve bırakma oranı parametreleri için varsayılan değerler kullanılarak seçilen modellerin performans metriklerini sunarken, ikinci grup aynı model parametrelerinin genetik algoritma ile optimize edilmiş performanslarına ait metrikleri sunmaktadır.

	Model	R	RMSE	MAE	MAPE
Optimize Edilmemiş	LSTM	0.84	0.0495	0.0374	5.24%
	GRU	0.91	0.0307	0.0270	3.80%
	MLP	0.79	0.0609	0.0536	5.86%
	BPNN	0.94	0.0268	0.0175	3.05%
GA ile Optimize Edilmiş	LSTM-GA	0.89	0.0322	0.0353	4.33%
	GRU-GA	0.93	0.0283	0.0170	3.00%
	MLP-GA	0.85	0.0462	0.0391	5.11%
	BPNN-GA	0.95	0.0235	0.0162	2.92%

Tablo 14 Tekli Modellerin Performansı

Modellerin uygunluk (fitness) performansı olarak R^2 dikkate alındığında, BPNN ve GRU modellerinin yüksek R^2 değerleri, LSTM ve MLP modellerine göre daha üstün performanslarına işaret etmektedir. Tahmin performansının ölçümünde ise RMSE, MAE ve MAPE metrikleri kullanılmıştır. Seçilen bu metriklerin değerlerinin küçülmesi, modelin hata teriminin küçülmesi dolayısı ile tahmin performansının artması anlamına gelir. R^2 sonuçları ile tutarlı olarak, BPNN ve GRU modellerinin daha düşük hata değerleri, üstün tahmin performanslarını göstermektedir.

Tablo 14 sonuçları genetik algoritma optimizasyonunun uygulanan her modelin tahmin performansları üzerindeki önemli etkisi olduğunu göstermektedir. Ek olarak, sonuçlar, GA optimizasyonunun etki düzeyi ile modelin uygunluk değeri arasında bir ilişki olduğunu ve uygunluk değeri yükseldikçe GA optimizasyonunun etkisinin azaldığını göstermektedir. Uygulanan tekli modellerin optimizasyonsuz ve optimizasyonlu fiyat tahmin performansı grafikleri ek A'da görülebilir.

5.10. CEEMDAN Uygulanan Modellerin Karşılaştırılması

Tekli ayrıştırma modelinde, CEEMDAN metodunun IMF çıktıları tekli tahmin modeli tarafından kullanılır ve ikinci aşamada buradan elde edilen çıktılar toplu tahmin modelinde girdi olarak kullanılır.

CEEMDAN ile uygulanan modellerin performans metrikleri tablo 16'da gösterilmektedir. Tabloya göre CEEMDAN tüm modellerin performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. CEEMDAN yöntemi özellikle LSTM, GRU ve MLP modelleri üzerinde modellerin katman sayılarıyla negatif ilişkili bir etkiye sahiptir.

GA optimizasyon sonuçları, R^2 değeri küçüldükçe GA optimizasyonunun etkisinin öneminin arttığı önceki bölümle tutarlıdır. GA, 0,858 ile en düşük R^2 değerine sahip

MLP modelinin performansı üzerinde en yüksek etkiye sahiptir. Ek B, uygulanan makine öğrenimi modellerinin GA optimizasyonlu ve GA optimizasyonsuz tahmin grafiklerini göstermektedir.

	Model	R	RMSE	MAE	MAPE
Optimize Edilmemiş	CEEMDAN-LSTM	0.946	0.0393	0.0346	2.76%
	CEEMDAN-GRU	0.987	0.0274	0.0231	1.59%
	CEEMDAN-MLP	0.87	0.0592	0.0521	5.41%
	CEEMDAN-BPNN	0.979	0.0277	0.024	1.88%
GA ile Optimize Edilmiş	CEEMDAN-LSTM-GA	0.951	0.0352	0.0287	2.56%
	CEEMDAN-GRU-GA	0.993	0.0265	0.0193	1.28%
	CEEMDAN-MLP-GA	0.906	0.0539	0.0436	4.49%
	CEEMDAN-BPNN-GA	0.987	0.0245	0.0185	1.53%

Tablo 15 Modellerin CEEMDAN ile Performansı

5.11. Çift Ayırıştırma Uygulanan Bütünleşik Modellerinin Karşılaştırılması

Şekil 13’de tasvir edildiği üzere, ikili ayırıştırma modelleri ilk olarak CEEMDAN yöntemini kullanarak orijinal verileri IMF'lere ayırıştırır ve daha sonra bunları sınıflandırmak için permütasyon entropi skorlarını kullanarak Co-IMF'leri oluşturur. Daha sonra, en yüksek frekansa sahip Co-IMF, VMD ile bir kez daha ayırıştırılır. VMD özyinelemeli olmayan bir ayırıştırma yöntemidir, bu nedenle VMD-IMF çıktılarının toplam değeri orijinal girdiye eşit olmayacaktır. Sonuç olarak, VMD'den sonra gruplanmış tahmin modelinin uygulanmasının tahmin doğruluğunu artırması beklenmektedir.

Genetik algoritma ile optimize edilmemiş ve optimize edilmiş ikili ayırıştırma modellerinin tahmin doğruluğu metrikleri tablo 17’de gösterilmektedir. Sonuçlara

göre, genetik algoritma ile optimize edilmiş CEEMDAN-VMD-BPNN-GA modeli en yüksek R^2 değerine ve en düşük hata yüzdesi (MAPE) ile tahmin doğruluğuna sahiptir ve bunu CEEMDAN-VMD-GRU-GA, CEEMDAN-VMD-BPNN, CEEMDAN-VMD-GRU ve CEEMDAN-VMD-LSTM-GA modelleri izlemektedir. Sonuçlar ayrıca, ikili ayrıştırmanın tüm modellerin performanslarını yakınlılaştırarak uygulanan modellerin R^2 değerleri arasındaki farkları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Bu sonuç, uygun mod ayrıştırma modelinin uygulanmasının tahmin doğruluğu için model yapısından daha önemli olduğuna işaret etmektedir. Sonuç olarak optimizasyonlu ve optimizasyonsuz modellerin tahmin performansları Ek C'deki grafiklerde gösterilmiştir.

	Model	R	RMSE	MAE	MAPE
Optimize Edilmemiş	CEEMDAN-VMD-LSTM	0.969	0.0330	0.0296	2.39%
	CEEMDAN-VMD-GRU	0.990	0.0234	0.0208	1.61%
	CEEMDAN-VMD-MLP	0.934	0.0401	0.0373	3.85%
	CEEMDAN-VMD-BPNN	0.991	0.0205	0.0161	1.44%
GA ile Optimize Edilmiş	CEEMDAN-VMD-LSTM-GA	0.977	0.0312	0.0225	1.95%
	CEEMDAN-VMD-GRU-GA	0.993	0.0157	0.0182	1.11%
	CEEMDAN-VMD-MLP-GA	0.951	0.0322	0.0335	3.32%
	CEEMDAN-VMD-BPNN-GA	0.995	0.0123	0.0147	1.01%

Tablo16 Çift Mod Ayrıştırımlı Hibrit Modellerin Performansı

SONUÇLAR

Aşırı yüksek sıcaklıklara, deniz seviyesinin yükselmesine, şiddetli kuraklıklara, fırtınalara, sellere ve gitgide artan sıklıkta çevresel felaketlere yol açan iklim değişikliğinin başlıca nedenleri ısınma, enerji, üretim, tarım ve ulaşım sektörlerinin faaliyetleri gibi beşerî sebeplerle fosil yakıtların yakılması nedeniyle sera gazı emisyonlarının artması ve doğal karbon yutaklarının azalmasıdır. İklim değişikliğinin sonuçları ise ekosistemlerde, insan sağlığında, sosyal hayatta, ekonomide, tarımda, su kaynaklarında ve daha birçok alanda birçok ciddi tahribata neden olmaktadır.

İklim değişikliği konusundaki farkındalığın giderek artmasıyla birlikte, iklim değişikliğinin etkilerini hafifletmeye yönelik, Kyoto Protokolü, Avrupa Birliği Emisyon Ticareti düzenlemeleri, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Kaliforniya Küresel Isınma Çözümleri Yasası, Kanada Düzenleyici Çerçevesi, Karbon Emisyonu Yönetmelikleri, Karbon Vergileri veya Emisyon Azaltma Yönetmelikleri gibi ulusal ve uluslararası boyutta iklim düzenlemelerinin sayısı ve sıklığı hızla artmıştır. Ancak bu düzenleme ve sözleşmelerin birçoğu belirlediği hedeflerin çok gerisinde kalmıştır.

Dünya her yıl yaklaşık 50 milyar ton sera gazı salmaktadır ve 2022'de küresel enerjiyle ilgili CO₂ emisyonları %0,9 artarak 36,8 Gt'nin üzerinde yeni bir zirveye ulaşmıştır. 2022'nin son çeyreğinde, AB'de en fazla sera gazı emisyonundan sorumlu olan ekonomik sektörler imalat ve hane halkı kaynaklı emisyon (her biri %21), elektrik, gaz tedariki (%20) ve tarım (%13) sektörleridir. Bu sektörleri ulaşım ve depolama sektörleri (%11) izlemektedir.

Bölgesel Birlikler, yerel yönetim birimleri ve devletler iklim değişikliği ile mücadelede birçok politika aracı kullanmaktadır ve bu araçlar piyasa temelli ve doğrudan müdahale araçları olarak sınıflandırılmaktadır. Piyasaya tabanlı olmayan araçlar belirli yükümlülüklerin dayatılması yoluyla veya davranışı değiştirmek için doğrudan parasal olmayan teşvikler yükleyerek çalışırken, piyasaya dayalı araçlar aktörlerin davranışlarını etkileyen dolaylı düzenleyici araçlardır. Piyasa temelli araçlardan en etkili olan ve yaygın kullanılanları emisyon vergileri ve emisyon ticaret sistemleridir.

Temeli ABD'deki Asit Yağmuru, Bölgesel Temiz Hava Teşvik Pazarı ve NOX programları, kükürt dioksit ve nitrojen oksitleri azaltım mekanizmalarına dayanan emisyon ticaret sistemleri emisyon vergileri gibi toplumsal aktörlerin davranışlarını değiştirmek ve kirliliği azaltmak için ekonomik teşvikler üretir. Ancak, belirli bir mal veya hizmetin fiyatına eklenen sabit bir tutar yerine, emisyon üst sınırı ve ticaret (cap and trade) sisteminde başlangıç noktası, politika yapıcılar tarafından belirlenen emisyon miktarına ilişkin üst sınırdır.

2023 itibariyle dünya genelinde emisyon fiyatlandırması sunan farklı karbon piyasası türleri olan 32 ETS ve 36 karbon vergi sistemi dahil olmak üzere yaklaşık 70 karbon fiyatlandırma girişi vardır. Bunlar arasında, AB ETS Programı Avrupa Birliğini Kyoto hedeflerine ulaştıracak en önemli program ve uluslararası alanda uygulanan ilk emisyon ticareti sistemidir. AB ETS, üst sınırın sistemdeki bir katılımcı tarafından salınabilecek toplam sera gazı miktarını ifade ettiği üst sınır ve ticaret temelinde çalışmaktadır.

AB ETS, 2005'ten başlayarak dört faz döneminden geçmiştir. 2005'ten 2007'ye kadar olan ilk faz, mekanizmaların ve düzenlemelerin deneyimlenerek geliştirildiği

pilot dönem olarak tanımlanmaktadır. Ücretsiz izinlerin azaltılması ve arz tarafını düzenlemek için bazı önemli yaptırımların uygulanması ile 2008'deki mali krizin ve 2011'deki AB borç krizinin ciddi sonuçlarına rağmen, AB ETS mekanizmaları ikinci faz döneminde (2007-2012) ilk aşamaya kıyasla daha istikrarlı bir şekilde çalışmıştır. AB ETS'in ilk 2 dönemine kıyasla, 3. ve 4. faz dönemleri ücretsiz tahsisatların önemli ölçüde azaltılması, piyasa mekanizmasının güçlendirilmesi ve MSR gibi yeni mekanizmaların faaliyete geçmesi ile ciddi emisyon azaltımlarına neden olmuş ve AB ETS'nin etkinliğini ciddi anlamda artırmıştır. 2023 itibari ile AB ETS, 31 katılımcı ülkeyi, izinleriyle birlikte 4.001 mega ton CO₂ eşdeğeri (MtCO₂e) emisyonu ve toplam küresel sera gazı emisyonlarının yüzde üçünden biraz fazlasını kapsar. Bu yetki alanı aynı zamanda AB'nin toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık yüzde 40'ını kapsar ve büyüklüğüne dayalı bazı istisnalar dışında AB'deki çoğu enerji, üretim ve havacılık temelli kuruluşun katılımını içine alır.

AB ETS karbon fiyatlarını arz ve talep faktörlerine dayalı olarak belirleyen bir fiyat mekanizmasına sahiptir. Bu mekanizma, piyasa yapısı ve düzenleyici politikaların etkisi altındaki bazı iç ve dış faktörlerin yanı sıra esas olarak arz ve talep dengesi tarafından yönlendirilmektedir.

AB ETS 3. fazının son dönemlerinden itibaren karbon fiyatının ciddi anlamda yükselmesi ve AB emisyon hedeflerinin katı bir şekilde sıkılaştırılması nedeniyle, karbon fiyatının doğru bir şekilde tahmin edilmesinin önemi, yatırımcılar ve emisyon yayan tesisler için karlılıkları ve işletme stratejilerini oluşturmaları anlamında hayati hale gelmiştir. Emisyon piyasalarının ve bu piyasalardaki ürünlerin konvansiyonel piyasa ürünleri ile düşük korelasyonu, bu ürünleri emisyon yayan şirketler dışındaki kurumsal ve bireysel yatırımcılar için cazip hale getirmiştir ve bu piyasaların işlem

hacmi, yatırımcıların ilgi ve talepleri ile orantılı olarak giderek artmaktadır. Bu hedef doğrultusunda, hassas karbon fiyatı tahmin modelleri oluşturulabilmesi amacı ile doğru ve etkili fiyat etkenlerini ve doğru yöntemleri seçmek çok önemlidir.

Karbon fiyatı zaman serisi yüksek gürültü (noise), düzensizlik ve yapısal belirsizlik içermektedir, ayrıca lineer veya durağan da (stationary) değildir. Bu nedenle iyi bir karbon fiyatı tahmin modeli geliştirmek oldukça zordur. Bu doğrultuda, bu çalışmanın temel amacı karbon fiyatının yapısal özellikleri nedeni ile hibrit yapay zeka uygulamaları ve teknikler kullanarak hassas, etkili ve orijinal karbon fiyatı tahmin modelleri geliştirmek ve bu amaç doğrultusunda öncelikle karbon fiyatını etkileyen faktörlerin yine yapay zeka uygulamaları kullanılarak geniş ve kapsamlı analizini yapmak ve doğru ve etkili faktörleri belirlemektir.

Bu amaç doğrultusunda ve geçmiş çalışmalarının ışığında bu çalışmada, enerji, endeks ve finans başlıkları altında 3 kümede sınıflandırılan 28 değişkenin ve AB ETS kapsamında faaliyet gösteren 13 sektörün ve yenilebilir enerji sektörünün ortalama endeks getirilerinin AB ETS karbon fiyat volatilitesi üzerindeki etkileri araştırılarak dışsal karbon fiyatı etkenlerinin kapsamlı bir analizi sunulmaktadır.

Uygulamanın birinci kısmında, 13 DML modeli uygulanarak enerji, öz sermaye ve finansallar olmak üzere 3 grupta 28 karbon fiyat faktörünün karbon fiyatı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçta, önceki çalışmaların aksine EUA fiyat volatilitesi üzerinde kömür fiyatının gaz, elektrik ve petrol fiyatlarını içeren diğer enerji değişkenlerinden daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, Avrupa dışındaki hisse senedi endeksleri ve tahvil getirilerinin karbon fiyatı üzerinde Avrupa'dakilere kıyasla daha önemli etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir.

Uygulamanın ikinci kısmında, AB'deki kirletici sektörlerin endüstriyel ortalama endeks getirileri ile EUA fiyatı arasındaki çift yönlü ilişki Granger VAR testi ile birlikte 13 yeni ML modeli uygulanarak kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Granger testi sonuçları, karbon fiyatı ile yenilenebilir enerji ve petrokimya endüstrilerinin endeks getirileri arasındaki çift yönlü nedenselliğin yanı sıra, karbon fiyatından elektrik, demir-çelik, et ve imalat endüstrilerinin endeks getirilerine ve petrol, gaz ve havacılık endüstrilerinin endeks getirilerinden karbon fiyatına doğru tek yönlü nedenselliği ortaya koymaktadır.

Uygulanan 13 ML modeli, her bir sektörel endeks getirisi için faktör önem skorlarını bulmuş ve yenilenebilir enerji, kimyasallar, demir-çelik, elektrik, ulaşım, inşaat, imalat ve çimento endeks getirilerini karbon fiyat volatilitelerini açıklamada en etkili girdiler olarak tespit etmiştir.

Ayrıca uygulanan modellerin tahmin ve uygunluk performansları 6 performans metriği ile ölçülmüş ve ET, KNN, RNN, RF ve XG-boost çalışmanın birinci ve ikinci kısımları için seçilen karbon fiyat belirleyici değişkenleri için en uygun ve etkili yöntemler olmuştur. İkinci uygulama kısmının sonuçlarına göre karbon fiyatının karbonsuzlaştırmanın marjinal maliyetinin altında kalması sonucu, kirletici şirketlerin çoğunluğunun karbonsuzlaştırma teknolojilerine yatırım yapmak yerine mevcut fonlarıyla emisyon izni sözleşmelerine yatırım yapmayı tercih ettikleri ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, karbon fiyatının seçilen dönem boyunca kirletici endüstrilerin çoğunluğu için karbonsuzlaştırma yatırımlarını teşvik etmede başarısız olduğu sonucuna varılabilir.

Uygulanan modellerin karşılaştırılmasına gelince, karar ağacı temelli modeller diğerlerinden biraz daha iyi performans gösterirken, üst düzey performans gösteren

modellerin performansları birbirine oldukça yakındır. İkinci analiz kısmın sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir,

- Bu çalışmanın sonuçları, kirletici sektörlerin endeks getirilerinin karbon fiyatı oynaklığı üzerindeki güçlü etkisini göstererek, kirletici şirketlerin yatırım tercihlerine ve mevcut karbon fiyatı seviyesinin karbonsuzlaştırma teknolojilerine yatırımları teşvik etme kabiliyetine ışık tutmaktadır. Ayrıca sonuçlar, AB ETS'nin karbonsuzlaştırma teknolojisindeki gelişmeleri harekete geçirmedeki etkisini de sorgulamaktadır.
- Ayrıca bu araştırma, kirletici endüstrilerin karbon fiyatı tahmini için faktör önem skorlarını ve ML modellerinin tahmin performanslarını karşılaştırarak hem kurumsal ve bireysel yatırımcıların karar verme süreçlerini hem de bu konudaki yeni araştırmaları desteklemektedir.

Uygulamanın son kısmında, karbon fiyatı tahmini için 3 grup altında gruplandırılan 24 farklı hibrit ML modeli geliştirilerek tamamen yeni bir yaklaşım önerilmiş ve tekli ayrıştırma (CEEMDAN), çift mod ayrıştırma (CEEMDAN + VMD) ve genetik algoritma (GA) optimizasyonunun makine öğrenimi modellerinin tahmin doğrulukları üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Öncelikle herhangi bir ayrıştırma metodu uygulanmadan geliştirilen 4 farklı mimarideki ANN modelinin GA optimizasyonu ile ve optimizasyonsuz performans metrikleri, ardından CEEMDAN yöntemi uygulandıktan sonraki performansları ve son olarak da çift mod ayrıştırma (CEEMDAN + VMD) uygulandıktan sonraki performansları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu sonuçlara göre,

- Genetik algoritma optimizasyonu, uygulanan her modelin performansını önemli ölçüde artırırken, etkisi tek tahmin modelleri üzerinde daha etkilidir ve bu etki mod ayrıştırma aşamalarının sayısı arttıkça kademeli olarak azalmaktadır.
- CEEMDAN mod ayrıştırma yöntemi, uygulanan modellerin performanslarını önemli ölçüde artırmaktadır ve etkisinin büyüklüğü R^2 değerleri ile negatif ilişkilidir.
- Permütasyon Entropisi yöntemi CEEMDAN ile elde edilen IMF'lerin hızlı ve etkili bir şekilde sınıflandırılmasını sağlamaktadır.
- Çift modlu ayrıştırma, özellikle düşük katman sayısına sahip MLP yapısı için model uygunluğunu ve tahmin doğruluklarını önemli ölçüde artırmaktadır.
- Tekli modeller karşılaştırıldığında, BPNN-GA modeli en yüksek R^2 ve en düşük MAPE değerleri ile en iyi performansı göstermiştir. Ayrıca, CEEMDAN-GRU-GA modeli tek ayrıştırma hibrit modelleri arasında ve CEEMDAN-VMD-BPNN-GA modeli çift ayrıştırmalı modeller arasında en iyi performansa sahip modeller olmuşlardır. CEEMDAN-VMD-BPNN-GA modelinin oldukça düşük MAPE ve RMSE değerleri ve oldukça yüksek R^2 model uygunluk değeri modelin seçilen dönem için karbon fiyat tahminindeki olağanüstü başarısını göstermektedir.

Sonuç olarak bu çalışma 4 farklı kümeden 42 değişkenin karbon fiyatındaki değişimleri açıklamadaki etkilerini incelemiş ve karbon fiyatı tahmini için farklı özelliklerde tekli ve çoklu 61 farklı ve orijinal DML model geliştirerek performanslarını karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonuçları oldukça etkili ve orijinal karbon fiyat tahmin modelleri sunmasının yanı sıra, AB ETS karbon fiyat mekanizmasının işleyişi, etkenleri ve endüstriyel endeks getirileri ve sektörel yatırım stratejileri ile olan ilişkileri hakkında oldukça kapsamlı bilgi vermektedir.

KAYNAKLAR

- Acworth, W., Katrin S., and Tobias B., 2020. Market Stability Mechanisms in Emissions Trading Systems. International Carbon Action Partnership.
- Agiostratiti, A., 2019. European Union Emissions Trading System (EU ETS) and its contribution to achieving the EU Targets on climate policy. University of Piraeus School of Business
- Agrawala, S., Carraro M., Kingsmill N., Lanzi E., Mullan M. & Prudent-Richard, G., 2011. Private Sector Engagement in Adaptation to Climate Change: Approaches to Managing Climate Risks. OECD Environment Working Papers 39, OECD Publishing Paris.
- Alan, L. P., 1995. Addressing the Public's Goals for Environmental Regulation When Communicating Acid Rain Allowance Trades. The Electricity Journal.
- Alberola, E., Chevallier, J., Chèze, B., 2008. Price drivers and structural breaks in European carbon prices 2005–2007. Energy Policy 36 (2), 787–797. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.10.029>.
- Aslan, A., Posch, P., 2022. Does carbon price volatility affect European stock market sectors? A connectedness network analysis. Finance Research Letters, Elsevier, vol. 50(C).
- Batten, J.A., Maddox, G.E., Young, M.R., 2021. Does weather, or energy prices, affect carbon prices? Energy Economics 96 (2021) 105016.
- Benz, E., Trück, S., 2009. Modeling the price dynamics of CO2 emission allowances. Energy Econ. 31 (1), 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2008.07.003>.

- Blyth, W., & Bunn, D.W. (2011). Coevolution of policy, market and technical price risks in the EU ETS. *Energy Policy*, 39, 4578-4593.
- Branger, F., Quirion, P., & Chevallier, J. (2016). Carbon Leakage and Competitiveness of Cement and Steel Industries Under the EU ETS: Much Ado About Nothing. *The Energy Journal*, 37(3), 109-135.
- Bredin, D., Muckley, C., 2010. An emerging equilibrium in the EU emissions trading scheme. *Energy Economics*. doi:10.1016/j.eneco.2010.06.009.
- Byun, S.J., Cho, H., 2013. Forecasting carbon futures volatility using GARCH models with energy volatilities. *Energy Econ.* 40, 207–221.
- Carbon, P. (2008). EU ETS Phase II–The potential and scale of windfall profits in the power sector. A report for WWF By Point Carbon Advisory Services.
- Chevallier, J., 2009. Carbon futures and macroeconomic risk factors: a view from the EU ETS. *Energy Econ.* 31 (4), 614–625. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2009.02.008>.
- Christiansen, A.C., Arvanitakis, A., Tangen, K., Hasselknippe, H., 2005. Price determinants in the EU emissions trading scheme. *Clim. Pol.* 5 (1), 15–30.
- Creti, A., Jouvét, P.-A., Mignon, V., 2012. Carbon price drivers: phase I versus phase equilibrium? *Energy Econ.* 34, 327–334. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.11.001>.
- Coase, R. H., 1960. The Problem of Social Cost. *The Journal of Law & Economics*, The University of Chicago Press, 3,, Volume 3, pp. 1-44.

- Common , M. & Stagl, S., 2009. Ecological Economics. An Introduction. Cambridge University Press.
- Dales, J. H., 1968. Pollution, Property and Prices: An Essay in Policy-Making. Toronto: Toronto University Press..
- Delarue E, Voorspools K, D'haeseleer W, 2008. Fuel Switching in the Electricity Sector under the EU ETS: Review and Prospective. Journal of Energy Engineering 134(2)40-46
- Dragomiretskiy K., Zosso D. (2013). Variational mode decomposition. IEEE Trans Signal Process 2013;62(3):531–44.
- Dutta, A., 2018. Modeling and forecasting the volatility of carbon emission market: the role of outliers, time-varying jumps and oil price risk. J. Clean. Prod. 172, 2773–2781.
- Ellerman, A. D., and Buchner B. K, (2008). A preliminary analysis of the EU ETS based on the 2005-06 emissions data. Environmental and Resource Economics 41(2): 267-87
- Ellerman, A. D., Marcantonini, C., & Zaklan, A. (2016). The European Union emissions trading system: ten years and counting. Review of Environmental Economics and Policy, 10(1), 89-107
- EU Commission Staff, 2015. Impact Assessment: Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Amending Directive 2003/87/EC to Enhance Cost-Effective Emission Reductions and Lowcarbon Investments. European Commission.

———. 2021. Publication of the Total Number of Allowances in Circulation in 2020 for the Purposes of the Market Stability Reserve under the EU Emissions Trading System Established by Directive 2003/87/EC. European Commission.

European Commission, 2020. Development of EU ETS (2005-2020).

———. 2021a. Coal Regions in Transition. Official website of the European Union. European Commission.

———. 2021b. Revision for Phase 4 (2021-2030).

European Environment Agency (2019). The EU Emissions Trading System in 2019: trends and projections.

European Parliament. 2003. Consolidated Text: Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 Establishing a System for Greenhouse Gas Emission Allowance Trading within the Union and Amending Council Directive 96/61/EC (Text with EEA Relevance) Vol. DIRECTIVE 2003/87/EC.

Grubb, M. (2012). Strengthening The EU ETS: Creating a stable platform for EU energy sector investment (pp. 05-10, Rep.). Climate Strategies.

Fang, Y., Yin, J. & Wu, B. (2018). Climate Change And tourism: A Scientometric Analysis Using Cite Space. *Journal of Sustainable Tourism*, 26, 108-126.

Garcia, A., Garcia-Alvarez, M.T., Moreno, B., The Impact of EU Allowance Prices on the Stock Market Indices of the European Power Industries: Evidence From the Ongoing EU ETS Phase III. *Organization & Environment* 2021, Vol. 34(3) 459–478.

- Grubb, M., Laing, T., Sato, M., & Comberti, C. (2012). Analyses of the effectiveness of trading in EU-ETS (pp. 13-32, Rep.). Climate Strategies.
- Goulder, L. H., & Schein, A. R. (2013). Carbon taxes versus cap and trade: a critical review. *Climate Change Economics*, 4(03), 1350010.
- Görlach, B., 2013. What constitutes an optimal climate policy mix? Defining the concept of optimality, including political and legal framework conditions. CECILIA2050 Deliverable 1.1 ed. Berlin: Ecologic Institute.
- Guerin, K., 2003. Property Rights and Environmental Policy: A New Zealand Perspective. Wellington, : New Zealand: NZ Treasury .
- Haites, Erik F. (2002); An Emerging Market for the Environment: A Guide to Emissions Trading, (Vol. 3), United Nation Publication, Denmark.
- Havlík, P., Valin, H. J. P., Gusti, M., Schmid, E., Forsell, N., Herrero, M., Khabarov, N., Mosnier, A., & Obersteiner, M. (2015). Climate Change Impacts and Mitigation in The Developing World: An Integrated Assessment of the Agriculture and Forestry Sectors. Policy Research Working Paper, 7477(1), 1-56.
- Huang, D., Jiang, F., Li, K., Tong, G., Zhou, G., 2021. Scaled PCA: a new approach to dimension reduction. *Manag. Sci.* <https://doi.org/10.1287/mnsc.2021.4020>.
- ICAP, (2019). Emissions Trading Worldwide: Status Report 2019. Berlin: ICAP.
- IMF World Economic Outlook (Edition: September 2011)
- International Energy Agency (IEA), 2009. World Energy Outlook 2009. OECD/IEA. Paris: s.n. International Carbon Action Partnership. 2022. "EU Emissions Trading System (EU ETS)." December 23, 2022.

IPCC, (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report

IPCC, (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis

IPCC, (2014b). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change

IPCC, 2019. Summary for Policymakers in Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.

Keppler, J.H., Mansanet-Bataller, M., 2010. Causalities between CO₂, electricity, and other energy variables during phase I and phase II of the EU ETS. Energy Policy 38 3329–3341.

Kolk, A. & Pinkse, J. (2004). Market Strategies for Climate Change. European Management Journal, 22(3), 304-314.

Lecocq, Franck ve Capoor, Karan (2005); State and Trends of The Carbon Market 2004, World Bank, Washington.

Lewis, M. C., & Curien, I., (2010). Carbon Emissions Hard to Credit: ETS Offsets Use Again in Spotlight. Technical report, Deutsche Bank.

Li, H.T., Jin, F., Sun, S.L., (2020). A new secondary decomposition ensemble learning approach for carbon price forecasting. Knowledge Base Syst 2020;214(1e20): 106686.

Marcu, A., Hernández, J.F.L., Alberola, E., Faure, A., et al., 2022. 2022 State of the EU ETS Report. European Roundtable on Climate Change and Sustainable Transition.

- Maxwell, D. (2011). *Hot Air: The carbon price floor in the UK. London: IPPR.*
- Mo JL, Zhu L, Fan Y., 2012. The impact of the EU ETS on the corporate value of European electricity corporations. *Energy* 45(1), 3–11.
- Montgomery County Council, 2012. Repeal of Department of Finance Regulation 12-10, Excise Tax: Major Emitters of Carbon Dioxide, Introduced : July 10, 2012.
- Moreno, B., Silva, P. P., 2016. How do Spanish polluting sectors' stock market returns react to European Union allowances prices? A panel data approach. *Energy* 103 (2016) 240-250.
- Morgan, J. P., 2006. Carbon Trading Under the Kyoto Protocol: Risks and Opportunities for Investors. *Fordham Environmental Law Review* 18 (1): 151–84.
- Nadirgil, O., 2023a. Carbon price prediction using multiple hybrid machine learning models optimized by genetic algorithm, *Journal of Environmental Management* 342, 118061.
- Nadirgil, O., 2023b. The relationship between the contaminating industries and the European carbon price, machine learning approach, *Journal of Cleaner Production* 426, 139131.
- Neuhoff, K., 2011. Carbon Pricing for Low-Carbon Investment: Executive Summary. Climate Policy Initiative and Climate Strategies.
- Oberndorfer, U., 2009. EU Emission Allowances and the stock market: Evidence from the electricity industry. *Ecological Economics* 68 (2009) 1116-1126.
- Perch-Nielsen, S. L. (2010). The Vulnerability of Beach Tourism to Climate Change- An Index Approach. *Climatic Change*, 100, 579–606.

- Perino, G., Willner, M., Quemin, S., Pahle, M., 2022. The European Union Emissions Trading System Market Stability Reserve: Does It Stabilize or Destabilize the Market. *Review of Environmental Economics and Policy* 16 (2): 338–45. <https://doi.org/10.1086/721015>.
- Rodriguez, J.R., 2019. What happens to the relationship between EU allowances prices and stock market indices in Europe? *Energy Economics* 81 (2019) 13–24.
- Sanoussi, H., & Bhattacharyya, S. (2017). Comparing European CO₂ Emission Trends Before and After The 2008 Economic Crisis: A Case Study of Four European Countries. *The Journal of Energy and Development*, 43(1/2), 27-46.
- Simoncini, D., Zhang, K.Y.J. (2019). Population-Based Sampling and Fragment-Based De Novo Protein Structure Prediction. *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology Volume 1*, 2019, Pages 774-784.
- Sun, X., Fang, W., Gao, X., Liu, H., Wu, T., 2022. Complex causalities between the carbon market and the stock markets for energy intensive industries in China. *International Review of Economics & Finance*, Volume 78, 2022, p. 404-417, ISSN 1059-0560,
- Sun, W., Zhang, C.C. (2018). Analysis and forecasting of the carbon price using multiresolution singular value decomposition and extreme learning machine optimized by adaptive whale optimization algorithm. *Appl Energy* 2018;231: 1354e71.
- Swan, W.G., 2020. The EU ETS: A Critical Analysis. the Faculty of the College of Arts, Humanities and Social Sciences University of Denver.

- Tan, X., Sirichand, K., Vivian, A., Wang, X., 2020. How connected is the carbon market to energy and financial markets? A systematic analysis of spillovers and dynamics. *Energy Econ.* 90, 104870.
- Tavares, E., 2023. External market disruptions and carbon pricing: How the Russian gas ban tested the resilience of the European Emissions Trading System. Tufts University, *Environmental Policy & Planning*.
- The World Bank. 2022a. "Carbon Pricing Dashboard | Up-to-Date Overview of Carbon Pricing Initiatives." April 2022.
- . 2022b. "Climate Explorer: Article 6." World Bank. May 17, 2022.
- Torres, M.E., Colominas, M.A., Schlotthauer, G., Flandrin, P.A. (2011). Complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise. In: 2011 IEEE international conference on acoustics, speech, and signal processing (ICASSP). IEEE; 2011, p. 4144–7.
- Tracker, C. A., (2020). Climate action tracker. <http://climateactiontracker.org>
- Tsai, M.T., Kuo, Y.T. (2013). A forecasting system of carbon price in the carbon trading markets using artificial neural network. *Int. J. Environ. Sustain Dev.* 2, 163e167.
- Tunahan, H., (2010); Küresel İklim Değişikliğini Azaltmanın Bir Yolu Olarak Karbon Finansmanı, *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (46), s. 199-215.
- tutor2u, 2017. Evaluating Policies to Cut Carbon Emissions, A Level Economics Revision. <https://www.slideshare.net/tutor2u/evaluating-carbon-policies>
- UNFCCC, 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change

United Nations. Kyoto Protocol.

http://www.unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php.

United Nations. 2021. "COP26: Together for Our Planet." United Nations Climate Action.

United Nations. October 2021. <https://www.un.org/en/climatechange/cop26>.

———. 2022. "The Sustainable Development Goals Report 2022." United Nations. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/>.

Vasser, C.P., 2009. The Kyoto Protocol : Economic Assessments, Implementation Mechanisms and Policy Implications, Nova Science Publishers, Inc., 2009,s,188.

Veith, S., Werner, J.R., Zimmermann, J., 2009. Capital market response to emission rights returns: evidence from the European power sector. *Energy Econ.* 31, 605–613.

Wang, J., Ma, F., Bouri, E., Zhong, J., 2022. Volatility of clean energy and natural gas, uncertainty indexes, and global economic conditions. *Energy Econ.* 108, 105904.

Wang, J.,Guo, X., Tan, X., Chevallier, J., Ma, Feng., 2023, Which exogenous driver is informative in forecasting European carbon volatility: Bond, commodity, stock or uncertainty? *Energy Economics* 117, 106419.

Xu, Q.F., Ding, X.H., Jiang, C.X., Yu, K.M., Shi, L., An elastic-net penalized expectile regression with Applications, *Journal of Applied Statistics*, 48:12, 2205-2230, DOI: 10.1080/02664763.2020.1787355.

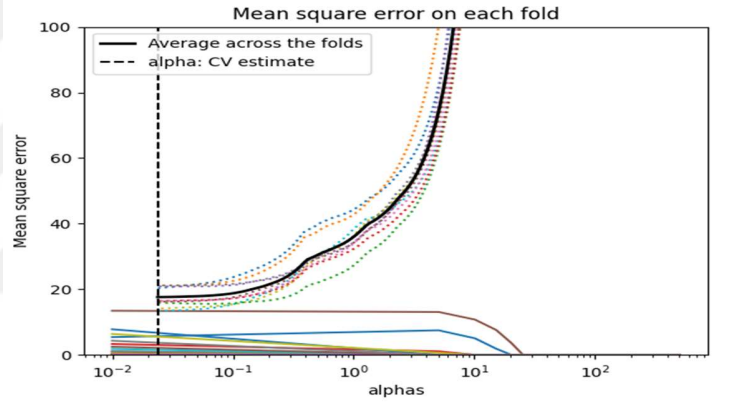
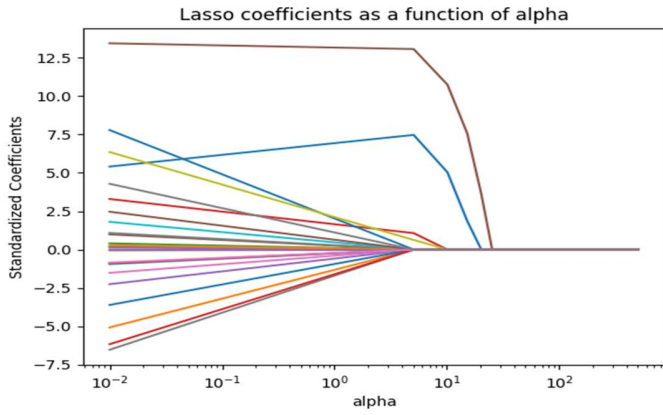
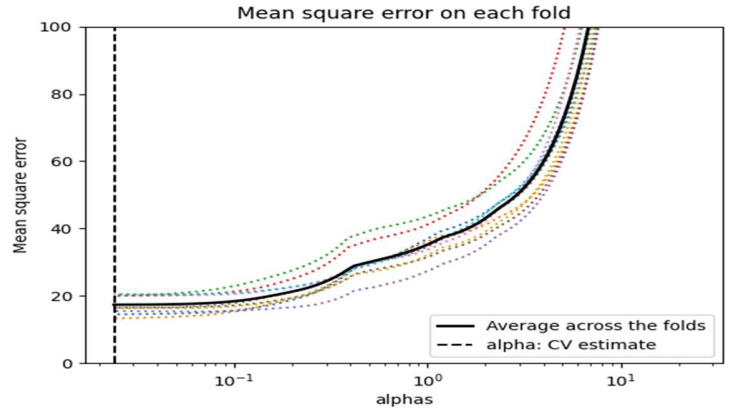
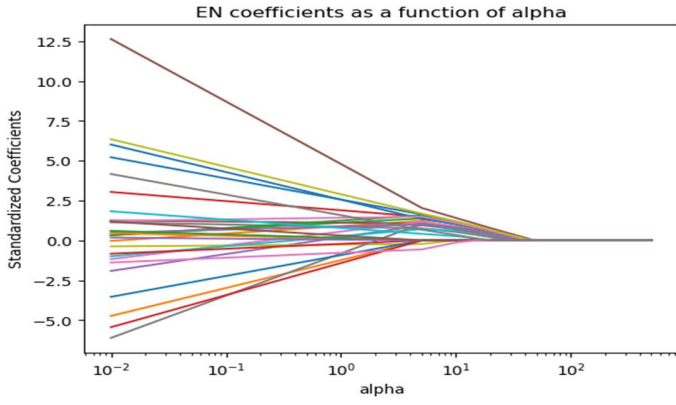
- Yi, L., Li, Z., Yang, L., & Liu, J. (2017). The Scenario Simulation Analysis of the EU ETS Carbon Price Trend and the Enlightenment to China [J]. *Journal of Environmental Economics*, 2(3), 22-35.
- Yin, H., Dong, Z., Chen, Y.L., Ge, J.F., Lai, L.L., Vaccaro, A., Meng, A.N. (2017). An effective secondary decomposition approach for wind power forecasting using extreme learning machine trained by crisscross optimization. *Energy Convers. Manag.* 150, 108e121. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.014>.
- Zhang, Y., Wahab, M.I.M., Wang, Y., 2022. Forecasting crude oil market volatility using variable selection and common factor. *Int. J. Forecast.* <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.12.013>.
- Zhang YJ, Sun YF (2016) The dynamic volatility spillover between European carbon trading market and fossil energy market. *J Clean Prod* 112:2654–2663. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.118>
- Zhou, F., Huang, Z., Zhang, C. (2022). Carbon price forecasting based on CEEMDAN and LSTM. *Applied Energy* 311.
- Zhu, B.Z., Wei, Y.M. (2011). Carbon price prediction based on integration of GMDH, particle swarm optimization and least squares support vector machines. *Syst Eng-Theory Pract* 2011;31(12):2264–71.
- Zhu, B., Wei, Y. (2013). Carbon price forecasting with a novel hybrid arima and least squares support vector machines methodology. *Omega* 41 (3), 517e524.
- Zhu, H., Tang, Y., Peng C., Yu, K., 2018. The heterogeneous response of the stock market to emission allowance price: evidence from quantile regression, *Carbon Management*, 9:3, 277-289, DOI: 10.1080/17583004.2018.1475802

Zhu, B., Ye, S., Han, D., Wang, P., He, K., Wei, Y., Xie, R., 2019. A multiscale analysis for carbon price drivers, *Energy Economics* 78 202–216.

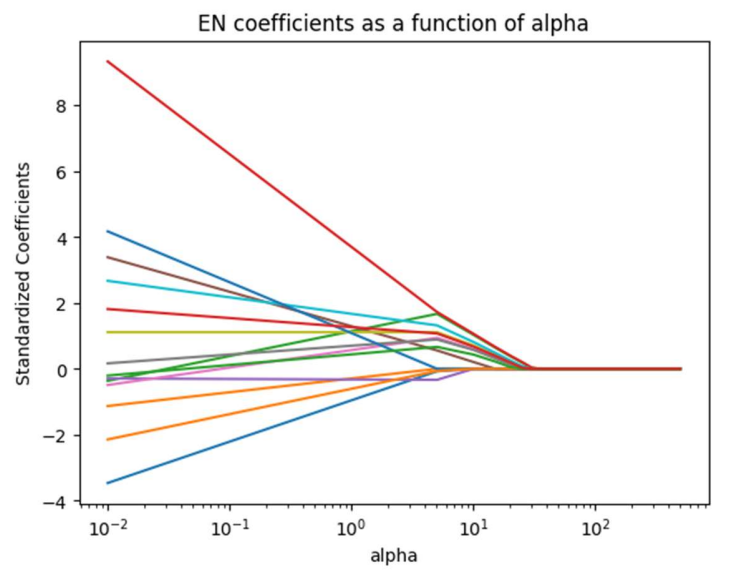
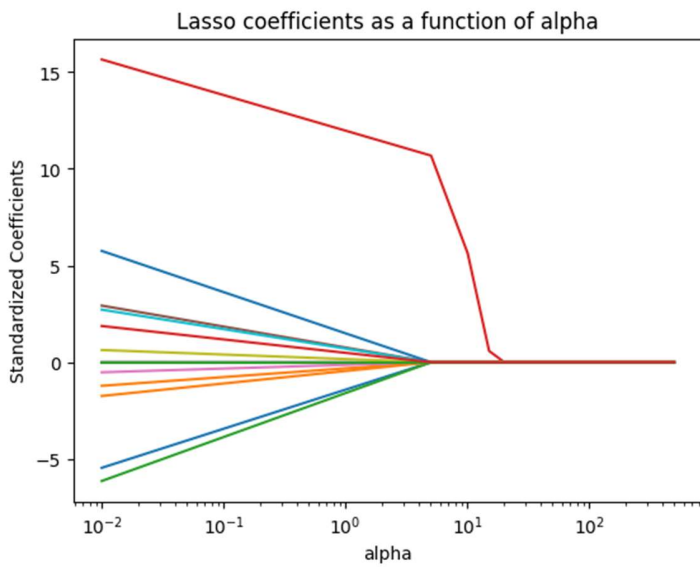


EKLER

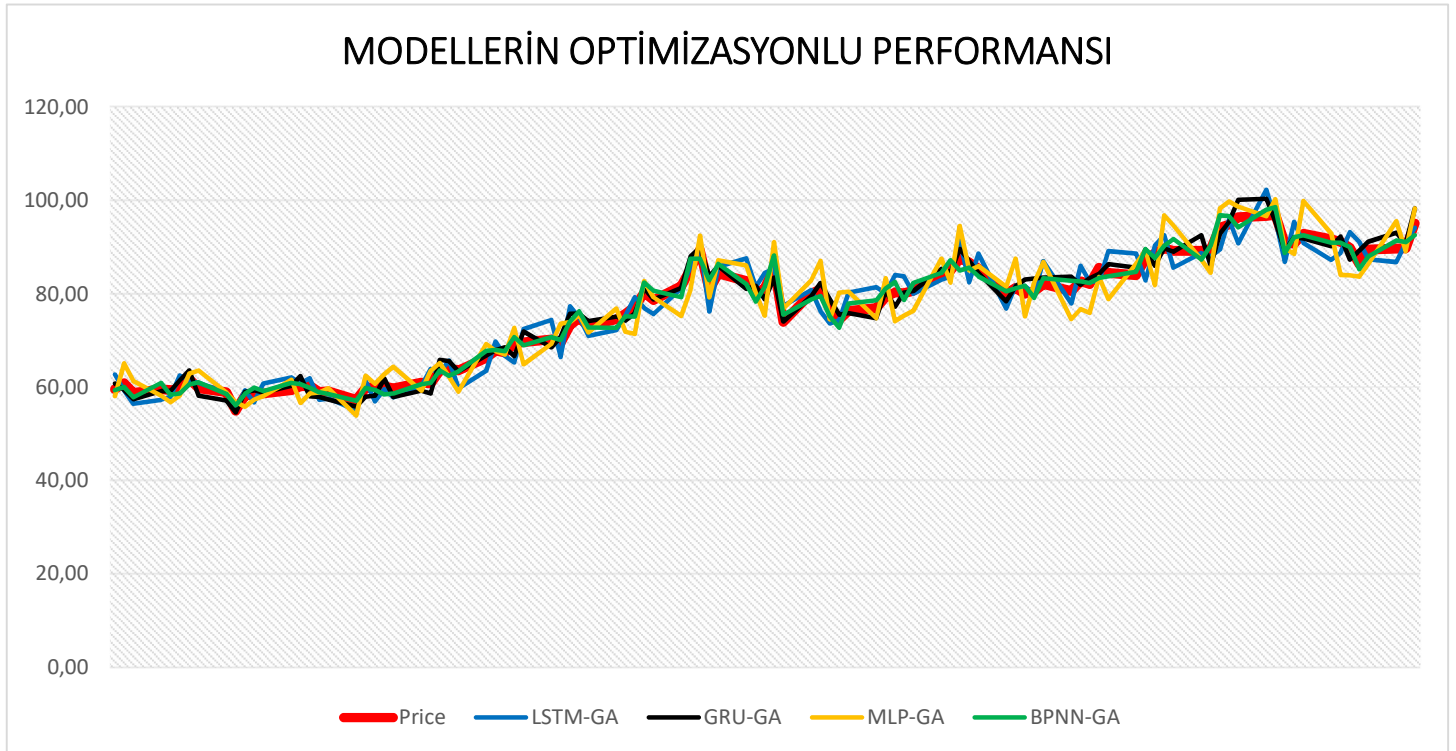
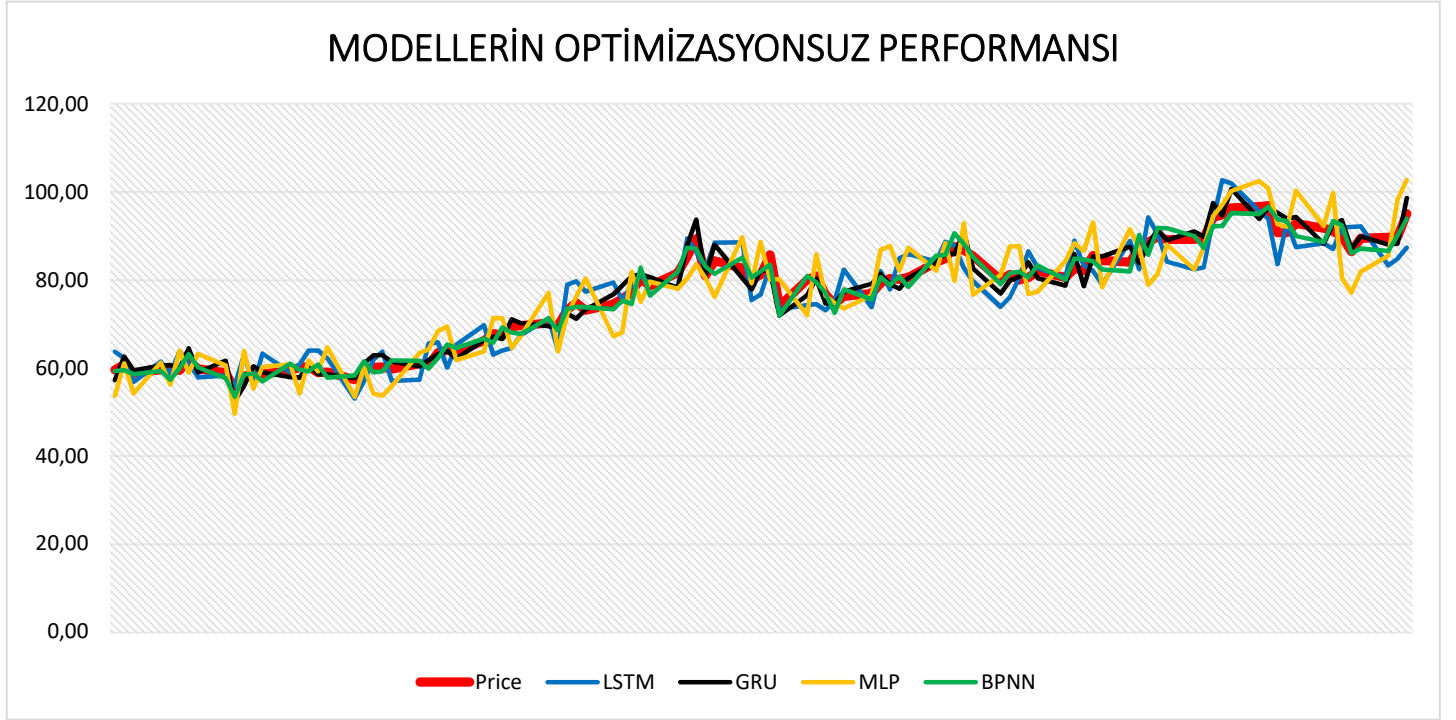
EK 1: Değişkenlerin Lasso ve EN Grafikleri



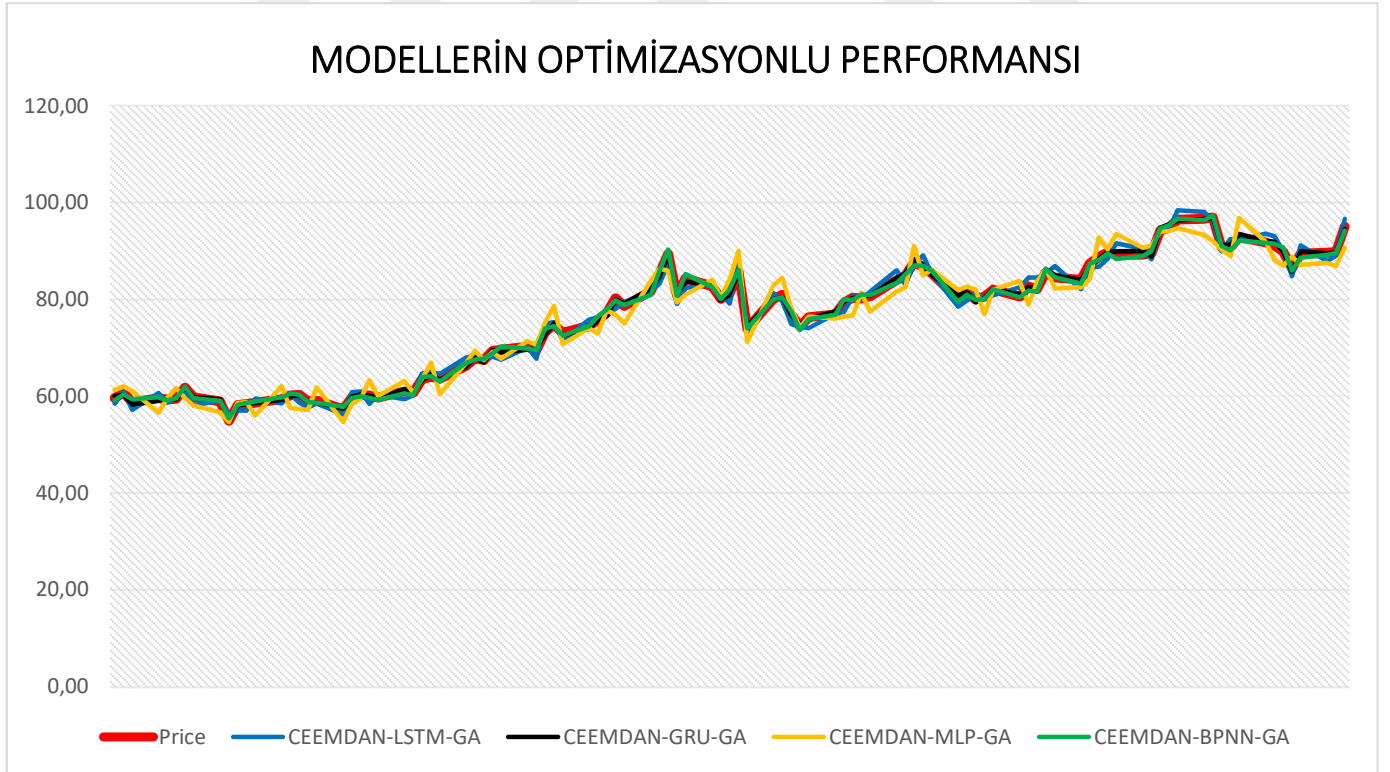
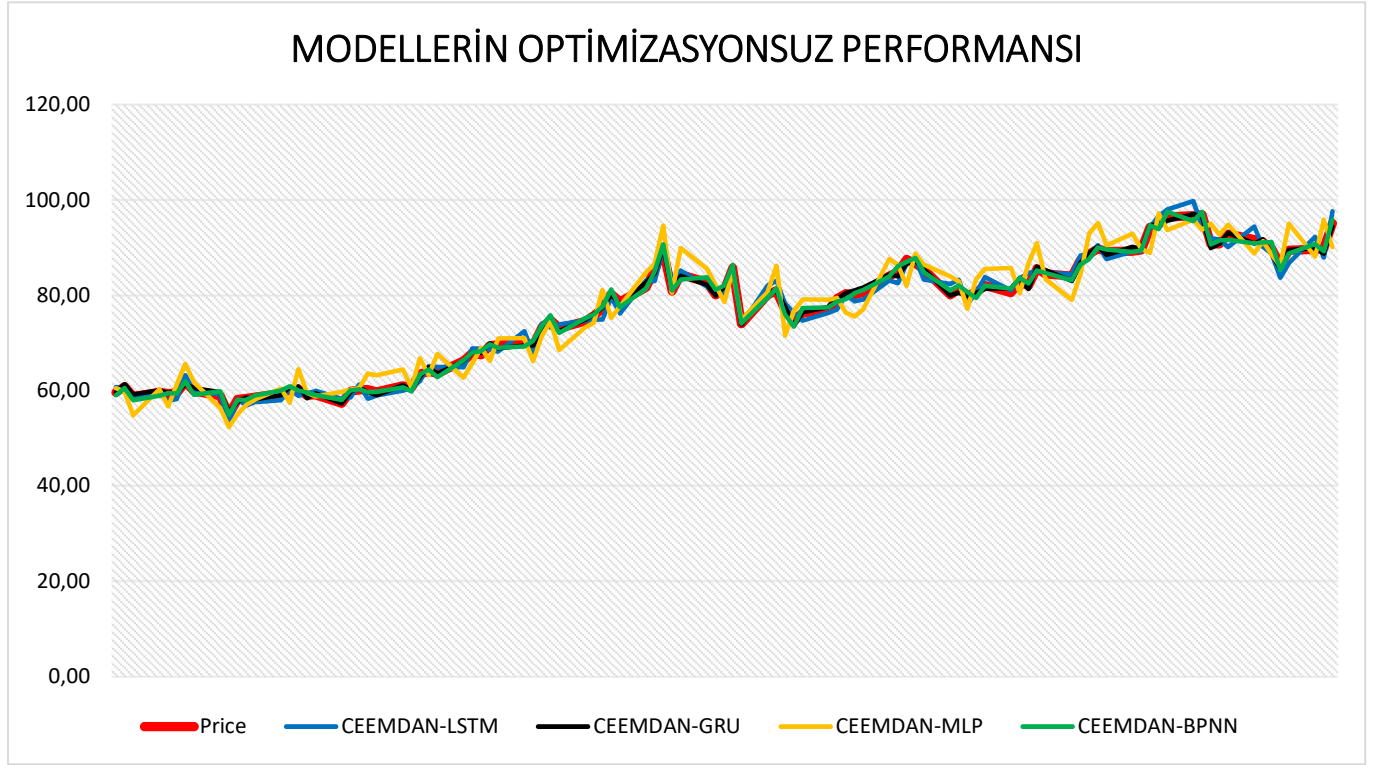
EK 2: Sektörlerin Lasso ve En Grafikleri



EK 3: Tekli Modellerin Tahmin Performans Grafikleri

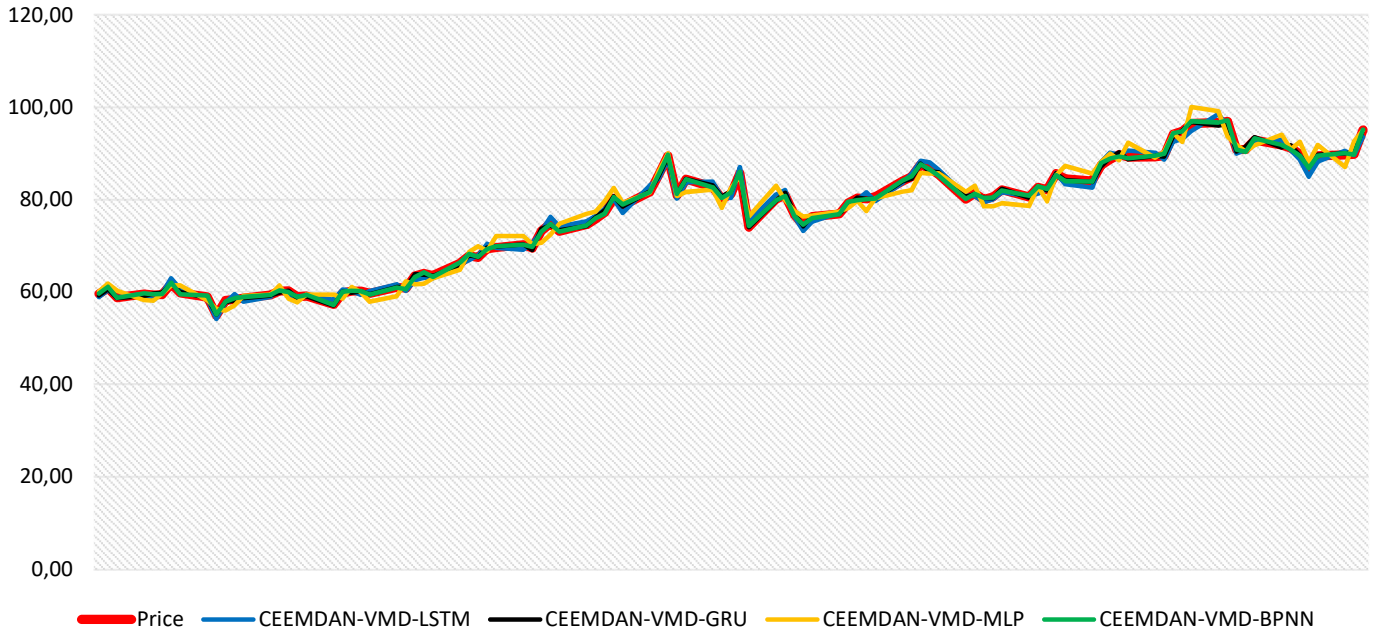


EK 4: Tek Ayrıştırılmalı Modellerin Performansı

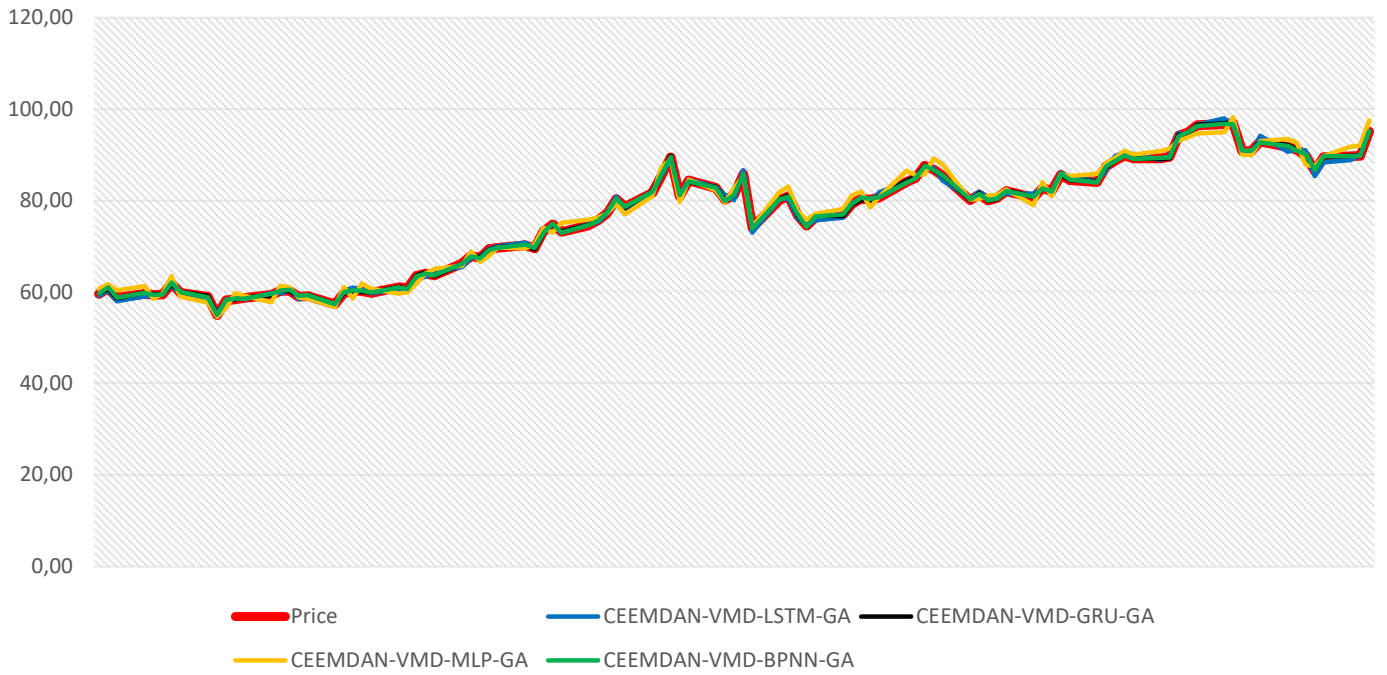


EK 5: Çift Ayırıştırılmalı Modellerin Performans

MODELLERİN OPTİMİZASYONSUZ PERFORMANSI



MODELLERİN OPTİMİZASYONLU PERFORMANSI



ÖZET

Günümüzün en ciddi ve karmaşık küresel sorunlarının başında gelen iklim değişikliği dünya genelinde ortalama sıcaklıkları ve deniz seviyesini yükselterek, iklim dinamiklerinde ve desenlerinde ciddi değişikliklere neden olup, hayatın her alanına etki eden ciddi sonuçlar doğurmaktadır. Bu kapsamda, toplumlar gibi işletmeler de iklim değişikliğinin olumlu ve olumsuz etkilerine maruz kalmaktadır. İklim değişikliğine neden olan sera gazı emisyonlarının azaltılması için 1980'lerden itibaren artan bir ivme ile uluslararası alanda birçok adım atılmıştır. Bu doğrultuda, 2003 yılında kurulan ve 2005 yılında faaliyete geçen Avrupa Emisyon Ticaret Sistemi (AB ETS) ilk bölgesel emisyon ticaret sistemi olmuştur. Zaman içinde dünya çapında emisyon ticaret sistemlerinin yaygınlaşması ve bu piyasalara olan yatırımcı ilgisinin hızla artması ile bu piyasalarda işlem gören emisyon izin (karbon) fiyatlarının yalnızca bu sistemlerin ve iklim politikalarının başarısı için değil kirletici işletmeler, bireysel ve kurumsal yatırımcılar açısından da giderek artan kritik bir öneme sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Bu çerçevede bu çalışma ilk uygulama kısmında, öncelikle 3 farklı kategoride 28 değişkenin ve AB ETS kapsamında faaliyet gösteren 14 farklı sektörün sektörel endeks getirilerinin karbon fiyatı ile olan karşılıklı ilişkisini, özgün olarak geliştirilen 13 denetimli makine öğrenimi (DML) yöntemi ile analiz etmiş ve elde edilen sonuçları kullanarak ikinci uygulama bölümünde, tekli ve çiftli veri ayrıştırma teknikleri, 4 farklı yapay sinir ağı modeli (ANN) ve genetik algoritma optimizasyonu kullanarak karbon fiyatı tahmini için 24 yeni denetimli ML modeli oluşturmuştur. Sonuçta, oluşturulan tüm modellerin tahmin doğruluğu ve model uygunluk performansları çeşitli metriklerle karşılaştırılmış ve en iyi performans gösteren modeller tespit edilmiştir.

ABSTRACT

Climate change, which is one of the most serious and complex global problems of the new age, causes serious changes in climate dynamics and patterns by raising worldwide average temperatures and sea levels, and leads to consequences affecting all areas of our life. In this context, businesses, as well as societies are exposed to the positive and negative effects of the climate change. In order to mitigate the negative consequences of climate change, many global steps have been taken with an increasing momentum since the 1980's to reduce global greenhouse gas emissions. In this context, the European Emissions Trading System (EU ETS), which was established in 2003 and became operational in 2005, was the first regional emissions trading system in the world. Over time, through the global spread of emissions trading systems and rapid increase in investor interest in these markets, the emission allowance (carbon) price has an incrementally increasing significance not only for the success of ETS systems and climate policies, but also for polluting enterprises, individual and institutional investors. In this framework, in the first analysis section, this study researches the correlation between the carbon price and the sectoral index returns of 28 variables in 3 different categories and sectoral indices of 14 sectors operating within the scope of the EU ETS by using 13 original supervised machine learning (DML) methods. In the second analysis section, by using the results of the first section, 24 new carbon price forecasting DML models are developed through using single and double data decomposition techniques, 4 different artificial neural network models (ANN) and genetic algorithm optimization. Consequently, the prediction accuracies and model fitness

performances of the applied novel models are evaluated with various metrics and the best performing models are identified.

