

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MÜHENDİSLİK VE TEKNOLOJİ YÖNETİMİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**TÜRKİYE'DE BİR ÇİMENTO FABRİKASI İÇİN ANFİS YÖNTEMİ
İLE CO₂ EMİSYONU MİKTARI TAHMİNİNE BAĞLI FİNANSAL
YÜK ANALİZİ**

HAZIRLAYAN

İLKER TAŞKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2025

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MÜHENDİSLİK VE TEKNOLOJİ YÖNETİMİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**TÜRKİYE'DE BİR ÇİMENTO FABRİKASI İÇİN ANFİS YÖNTEMİ
İLE CO₂ EMİSYONU MİKTARI TAHMİNİNE BAĞLI FİNANSAL
YÜK ANALİZİ**

HAZIRLAYAN

İLKER TAŞKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. GÜLİN FERYAL URAL

ANKARA - 2025

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde İlker TAŞKIN tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 04 / 09 /2025

Tez Adı: Türkiye’de bir çimento fabrikası için anfis yöntemi ile CO₂ emisyonu miktarı tahminine bağlı finansal yük analizi

Tez Jüri Üyeleri

İmza

Prof. Dr. Gülin Feryal URAL	Başkent Üniversitesi
Doç. Dr. Burcu YILMAZ KAYA	Gazi Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Pelin TOKTAŞ	Başkent Üniversitesi

ONAY

Prof. Dr. Dilek ÇÖKELİLER SERDAROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... / 2025

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 12 / 09 / 2025

Öğrencinin Adı, Soyadı : İlker TAŞKIN

Öğrencinin Numarası : 22310297

Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği

Programı : Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Prof. Dr. Gülin Feryal URAL

Tez Başlığı : Türkiye’de Bir Çimento Fabrikası İçin Anfis Yöntemi İle CO₂ Emisyonu
Miktarı Tahminine Bağlı Finansal Yük Analizi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 144 sayfalık kısmına ilişkin, 12 / 09 / 2025 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 4’tür.

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

12 / 09 / 2025

Öğrenci Danışmanı:

Prof. Dr. Gülin Feryal URAL

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasının her aşamasında bilgi ve deneyimiyle bana rehberlik eden, sabır ve anlayıŐıyla desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. GÜlin Feryal URAL'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans sürecimde bilgi ve katkılarıyla yol gösteren değerli hocalarıma, jüri üyelerine ve Başkent Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'na teşekkür ederim.

Tez konumla ilgili veri ve bilgi paylaşımında destek sağlayan, çalıŐtıęım kuruma; özellikle bu sürece katkıda bulunan yöneticilerime ve ekip arkadaşlarıma da ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her döneminde manevi desteğini eksik etmeyen aileme ve sevgili eŐim Elif ÖRÜK TAŞKIN'a teşekkür ederim.

ÖZET

İlker TAŞKIN

TÜRKİYE’DE BİR ÇİMENTO FABRİKASI İÇİN ANFİS YÖNTEMİ İLE CO₂ EMİSYONU MİKTARI TAHMİNİNE BAĞLI FİNANSAL YÜK ANALİZİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

2025

Sanayileşme ile birlikte artan sera gazı emisyonları, küresel ısınmanın başlıca sebeplerinden biri haline gelmiş; bu bağlamda çimento sektörü, yüksek enerji tüketimi ve yoğun proses ve termal kaynaklı emisyonları nedeniyle dikkat çeken alanlardan biri olmuştur. Bu çalışma, Türkiye’de faaliyet gösteren bir çimento fabrikasına ait tarihsel karbon emisyon verilerini temel alarak, 2025 yılı ikinci altı aylık dönemine ait karbondioksit (CO₂) emisyon tahminlerini üretmek ve bu tahminler doğrultusunda karbon vergisi politikalarının sektöre olası etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive-Network Based Fuzzy Inference Systems - ANFIS) tahmin modeli kullanılarak gelecek dönem CO₂ salınımları bulunmuştur. Bulunan bu tahmin sonuçlarının ekonomik yansımaları incelenmiştir. Yapılan bu çalışma gelecek çalışmalar için bir altlık oluşturabilir ve benzer çalışmalar için karşılaştırılabilir veri oluşturmaktadır.

Avrupa Birliği (AB)’nin Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) ve Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (Carbon Border Adjustment Mechanism - CBAM) gibi güncel politikalar dikkate alınarak, Türkiye’nin henüz uygulamaya geçirmedığı karbon fiyatlandırma mekanizmalarının uygulanması durumunda bir çimento fabrikasında oluşabilecek finansal yükler ortaya konmuştur. Çalışma, sektöre özgü veri kullanımı sayesinde özgün bir örnek teşkil etmekte ve Türkiye’de bir fabrikada karbon yönetimi politikalarına geçiş sürecine yönelik önemli girdiler sunmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: CO₂ Emisyonları, Çimento Sektörü, ANFIS, Karbon Vergisi, Emisyon Tahminleme, Enerji Verimliliği, ETS, CBAM

ABSTRACT

İlker TAŞKIN

**FINANCIAL BURDEN ANALYSIS BASED ON CO₂ EMISSION AMOUNT
PREDICTION USING ANFIS METHOD FOR A CEMENT PLANT IN TURKEY**

Başkent University Institute of Science

Department of Industrial Engineering

2025

Increasing greenhouse gas emissions due to industrialization have become one of the primary causes of global warming; in this context, the cement sector has become a sector attracting attention due to its high energy consumption and intensive process and thermal emissions. This study was conducted to generate CO₂ emission projections for the second half of 2025, based on historical carbon emission data from a cement factory operating in Türkiye, and to assess the potential impact of carbon tax policies on the sector based on these projections. The study used the ANFIS forecasting model to estimate future CO₂ emissions. The economic implications of these results were examined. This study can serve as a basis for future research and provide comparable data for similar studies.

Considering current policies such as the European Union's (EU) Emissions Trading System (ETS) and CBAM, the study demonstrates the financial burdens that could arise on a cement factory if carbon pricing mechanisms, which Turkey has not yet implemented, are implemented. The study provides a unique example through the use of sector-specific data and offers important insights into the transition process to carbon management policies at a Turkish factory.

KEYWORDS: CO₂ Emissions, Cement Sector, ANFIS, Carbon Tax, Emission Forecast, Energy Efficiency, ETS, CBAM

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması.....	2
2. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE KÜRESEL İKLİM POLİTİKALARI	14
2.1. Tarihsel Süreç ve Uluslararası Anlaşmalar	14
2.2. Paris Anlaşması ve Avrupa Yeşil Mutabakatı.....	16
3. ÇİMENTO SEKTÖRÜ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE ETKİSİ.....	19
3.1. Çimento Tarihi ve İlk Kullanım Örnekleri.....	19
3.1.1. Çimento tarihi	19
3.1.1.1. Antik çağlarda bağlayıcı malzemeler	19
3.1.1.2. Roma dönemi ve puzolan kullanımı.....	19
3.1.1.3. Orta çağ ve modern döneme geçiş	20
3.1.1.4. Portland çimentosunun gelişimi	20
3.2. Türkiye'de Çimento Sanayisinin Tarihçesi.....	20
3.3. Çimento Üretim Süreçleri.....	21
3.3.1. Hammaddelerin temini ve hazırlanması.....	21
3.3.1.1. Ana hammaddeler.....	21
3.3.2. Hammaddelerin çıkarılması ve kırılması	23
3.3.3. Homojenleştirme	23
3.3.4. Farin öğütümü.....	24
3.3.4.1. Bilyalı değirmenler.....	24
3.3.4.2. Dik valsli değirmenler.....	25
3.3.5. Depolama	26
3.3.6. Yakıt hazırlama.....	26
3.3.7. Kalsinasyon.....	28

3.3.8. Klinker üretimi (pişirme aşaması)	30
3.3.8.1. Döner fırın yapısı ve işleyişi	31
3.3.8.2. Sinterleme süreci ve faz oluşumları.....	31
3.3.8.3. Fırın performansına etki eden faktörler	32
3.3.9. Soğutma	33
3.3.10. Öğütme	34
3.3.11. Paketleme	35
3.4. Üretim Sistemleri ve Teknolojik Gelişmeler	36
3.4.1. Yaş sistem	36
3.4.2. Yarı yaş ve yarı kuru sistemler	36
3.4.3. Kuru sistem.....	37
3.5. Çimento Sektöründe Karbon Oluşumu	38
3.5.1. Karbon emisyonunun kaynağı.....	38
3.5.1.1. Doğrudan karbon emisyonları.....	38
3.5.1.2. Dolaylı karbon emisyonları.....	39
3.5.2. Kullanılan yakıtın emisyon üzerindeki etkisi	39
3.5.3. Klinker oranının emisyona etkisi	40
3.5.4. Emisyonların azaltılmasına yönelik uygulamalar.....	40
3.6. Türkiye Çimento Sektörü ve Emisyon Durumu.....	40
3.7. Karbon Vergisi Uygulamaları ve Etkileri.....	44
3.7.1. Karbon vergisi kavramı ve amaçları.....	44
3.7.2. Emisyon ticareti sistemi ile karşılaştırma.....	45
3.8. Türkiye’de Karbon Vergisi Yaklaşımları	47
3.8.1. Karbon vergisinin çimento sektörüne etkileri.....	47
3.8.2. Uygulama ve geleceğe yönelik perspektifler	48
4. KAPSAMLAR VE CO ₂ HESAPLAMA YÖNTEMİ.....	50
4.1. Kapsamlara Göre Emisyon Sınıflandırması.....	50
4.2. Veri Toplama Süreci	52
4.3. Emisyon Hesaplama Metodolojisi.....	53
4.3.1. Proses kaynaklı CO ₂ emisyonları	53
4.3.2. Termal (yakıt) kaynaklı CO ₂ emisyonları	55
4.4. Toplam CO ₂ Emisyon Hesaplaması.....	56
4.4.1. Proses kaynaklı CO ₂ hesaplaması	57

4.4.2. Termal kaynaklı CO ₂ hesaplaması.....	59
4.5. Emisyon Tahmin Yöntemleri (Modelleme Süreci).....	65
5. UYGULAMA	67
5.1. Uygulama Özeti	67
5.1.1. Parametre seçimi.....	68
5.1.2. Veri analizi.....	68
5.1.3. ANFIS tahmini	69
5.1.4. Senaryo oluşturma	70
5.1.5. Sonuç karşılaştırma	70
5.2. Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağları.....	70
5.2.1. Bulanık mantık.....	71
5.2.1.1. Bulanık küme teorisi.....	71
5.2.1.2. Bulanık kurallar ve mantık.....	72
5.2.1.3. Bulanık çıkarım sistemleri	72
5.2.2. Yapay sinir ağları.....	73
5.2.3. Bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının birleştirilmesi.....	73
5.2.3.1. ANFIS.....	74
5.3. Tahmin hataları için kullanılan ölçütler	76
5.4. CO ₂ Tahmini için ANFIS ve Eğitim.....	78
5.4.1. Verilerin bulunması	78
5.4.2. ANFIS ile modelin eğitilmesi.....	89
5.5. Karbon vergisinin emisyonlara ekonomik yansımaları	104
6. KARBON VERGİSİ POLİTİKASI ANALİZİ	107
6.1. Karbon Vergisinin Sektöre Olası Etkileri.....	107
6.2. Ekonomik ve Çevresel Değerlendirme	107
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	108
7.1. Sonuç.....	108
7.2. Politika Önerileri.....	109
KAYNAKLAR.....	112

EKLER

EK 1: y₁ TAHMİNLEMESİ İÇİN MATLAB SÖZDE KODU

EK 2: y₂ TAHMİNLEMESİ İÇİN MATLAB SÖZDE KODU

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Uluslararası iklim anlaşmaları ve Türkiye'nin sürece katılımı.....	18
Tablo 4.1. Türkiye'de kapsamların uygulanabilirliği.....	52
Tablo 4.2. Proses kaynaklı CO ₂ emisyonu hesaplama formülünde kullanılan parametrelerin tanımı.....	55
Tablo 4.3. Termal kaynaklı CO ₂ emisyonu hesaplama formülünde kullanılan parametrelerin tanımı.....	56
Tablo 4.4. 2023 yılı Mart ayına ait proses verileri ve hesaplanan CO ₂ değerleri.....	58
Tablo 4.5. 2024 yılı Eylül ayına ait proses verileri ve hesaplanan CO ₂ değerleri.....	58
Tablo 4.6. 2023 yılı Mart ayına ait termal kaynaklı CO ₂ emisyon hesaplamasında kullanılan girdiler.....	61
Tablo 4.7. 2024 yılı Eylül ayına ait termal kaynaklı CO ₂ emisyon hesaplamasında kullanılan girdiler.....	62
Tablo 4.8. Dönemlere ait CO ₂ hesaplama sonuçları.....	64
Tablo 5.1. Veri analiz yöntemleri.....	69
Tablo 5.2. CO ₂ emisyonunu etkileyen değişkenler ve tanımları.....	79
Tablo 5.3. Shapiro-Wilk testi.....	84
Tablo 5.4. Toplam CO ₂ emisyonunu etkileyen faktörlerin korelasyon ve regresyon katsayıları.....	85
Tablo 5.5. CO ₂ tahminlemesi için ANFIS'e girdi olarak verilen değişkenler.....	87
Tablo 5.6. Üyelik fonksiyonları ve tanımları.....	89
Tablo 5.7. y ₁ için farklı eğitim-test oranları ve üyelik fonksiyonları ile hata metrikleri	90
Tablo 5.8. y ₂ için farklı eğitim-test oranları ve üyelik fonksiyonları ile hata metrikleri	91

Tablo 5.9. y_1 için yıllık gerçek ve tahmin tablosu.....	97
Tablo 5.10. y_2 için yıllık gerçek ve tahmin tablosu.....	100
Tablo 5.11. Dönemler arası ortalama artış oranları.....	104
Tablo 5.12. ngoru yapılan girdilerle x_1, x_5, x_7 ikinci dönem CO ₂ tahminlemesi.....	104
Tablo 5.13. Senaryoda 2025 yılı ikinci dönem aylara göre toplam CO ₂ vergisi.....	105

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. En fazla CO ₂ salınımı yapan ülkeler, 2021 (gigaton CO ₂).....	16
Şekil 3.1. Babil surlarının yapılışını anlatan çivi yazılı silindir.....	19
Şekil 3.2. Joseph Aspdin'in 1824 tarihli portland çimentosu patenti anı plakası, leeds, İngiltere.....	20
Şekil 3.3. Eskihisar çimento fabrikası'nın 1920'lerdeki görünümü.....	21
Şekil 3.4. Kalker.....	22
Şekil 3.5. Rotorlu kırıcı.....	23
Şekil 3.6. Preblending silosu.....	24
Şekil 3.7. Bilyalı değirmen.....	25
Şekil 3.8. Pfeiffer –MP dik valsli değirmen.....	26
Şekil 3.9. RDF kırıcı tesisi.....	27
Şekil 3.10. Kömür değirmeni.....	28
Şekil 3.11. Petrokok.....	28
Şekil 3.12. Kalsinatörlü ön ısıtıcı sistem.....	29
Şekil 3.13. Döner fırın.....	30
Şekil 3.14. Klinker fazları.....	32
Şekil 3.15. Alev borusu ve ateşleme.....	33
Şekil 3.16. Belirli bir sıcaklığa kadar klinker gelişimleri.....	33
Şekil 3.17. Alçı.....	35
Şekil 3.18. Tras.....	35
Şekil 3.19. Slingbag halinde gemiye yüklenen torbalı çimento.....	35
Şekil 3.20. Yaş sistem klinker üretim süreci.....	36

Şekil 3.21. Lepol yarı kuru ızgara-fırın klinker üretim süreci.....	36
Şekil 3.22. Yarı yaş klinker üretim süreci.....	37
Şekil 3.23. Kalsinatör sistemli çimento üretim süreci.....	37
Şekil 3.24. Çimento fabrikası CO ₂ oluşumu.....	38
Şekil 3.25. Türkiye çimento fabrikaları haritası.....	41
Şekil 3.26. Dünya’da en çok çimento üreten ülkeler, % (2022).....	42
Şekil 3.27. Dünya çimento üretimi dağılımı, 2022 (mn ton).....	42
Şekil 3.28. Türkiye çimento sektöründe alternatif yakıt kullanımı (bin ton), ikincil yakıt ikame kalori (%).....	43
Şekil 3.29. Yıllara göre Türkiye toplam çimento sektörü kaynaklı emisyon projeksiyonları (kapsam 1 ve kapsam 2, milyon ton CO ₂).....	44
Şekil 3.30. Dünyada karbon fiyatı.....	45
Şekil 3.31. ETS işleyişi.....	46
Şekil 3.32. İsveç’in yıllara göre ets ve karbon vergisi yüzdesi.....	49
Şekil 3.33. İsveç’in yıllara göre CO ₂ emisyonu.....	49
Şekil 4.1. Kapsamlara göre CO ₂ hesaplamaları.....	51
Şekil 4.2. Döner fırında CO ₂ formasyonu.....	57
Şekil 4.3. Yakıt bazlı emisyon faktörü.....	60
Şekil 4.4. 2019-06/2025 yılları arası fabrikanın proses ve termal kaynaklı CO ₂ verileri ve pişirme kalorisi.....	65
Şekil 4.5. Matlab uygulama görseli.....	66
Şekil 5.1. ANFIS katmanları.....	74
Şekil 5.2. x_1, x_2, x_3, x_4 ’ün y_1 ve y_2 bağımlı değişkenleriyle doğrusallık grafiği.....	82
Şekil 5.3. x_5, x_6, x_7, x_8 ’in y_1 ve y_2 bağımlı değişkenleriyle doğrusallık grafiği.....	83
Şekil 5.4. Parametrelerin normal dağılım grafikleri.....	83

Şekil 5.5. Değişkenlerin spearman korelasyon ısı haritası.....	85
Şekil 5.6. ANFIS model yapısının oluşturulması.....	93
Şekil 5.7. ANFIS yapısı.....	94
Şekil 5.8. Pimf ve trapmf üyelik fonksiyonlarına göre ANFIS model yapısı.....	95
Şekil 5.9. y_1 için pimf üyelik fonksiyonuna göre bulanık mantık kuralları.....	95
Şekil 5.10. y_1 için gerçek CO ₂ emisyonu verileri ve pimf üyelik fonksiyonu ile eğitilen ANFIS modelinin test sonuçları.....	96
Şekil 5.11. y_2 için trapmf üyelik fonksiyonuna göre bulanık mantık kuralları.....	96
Şekil 5.12. y_2 için gerçek CO ₂ emisyonu verileri ve trapmf üyelik fonksiyonu ile eğitilen ANFIS modelinin test sonuçları.....	97
Şekil 5.13. Gerçek ve y_1 için tahminlenen CO ₂ emisyonları.....	100
Şekil 5.14. Gerçek ve y_2 için tahminlenen CO ₂ emisyonları.....	102
Şekil 5.15. Dünya Bankası 2023-2030 yılları karbon vergi dolar tahminleri.....	105
Şekil 5.16. Tahmin edilen CO ₂ değerlerine göre karbon vergi miktarı.....	106

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
ANFIS	Adaptive- Network Based Fuzzy Inference Systems
ARIMA	AutoRegressive Integrated Moving Average
AYM	Avrupa Yeşil Mutabakatı
BM	Birleşmiş Milletler
BMİDÇS	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
BO	Biyokütle Oranı
BRICS-T	Brazil, Russian Federation, India, China, South Africa, Türkiye
C ₂ S	Belit
C ₃ A	Alüminat
C ₃ S	Alit
C ₄ AF	Ferrit
CaCO ₃	Kalsiyum Karbonat
CaO	Kalsiyum Oksit
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CCS	Karbon Yakalama ve Depolama (Carbon Capture and Storage)
CO ₂	Karbondioksit
DF	Dönüşüm Faktörü
DS	Karar Destek (Decision Support)
DVM	Destek Vektör Makineleri
EBRD	European Bank for Reconstruction and Development
EF	Emisyon Faktörü
ETS	Emisyon Ticaret Sistemi (Emissions Trading System)
Fe ₂ O ₃	Demir Oksit
FGD	Flue Gas Desulfurization (Baca Gazı Kükürt Giderimi)
FIS	Bulanık Çıkarım Sistemleri (Fuzzy Inference System)
FV	Faaliyet Verisi
GAO	Geri İzleme Arama Optimizasyon
GCCA	Global Cement and Concrete Association
GSYH	Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
İ&R	İzleme ve Raporlama
İHA	İnsansız Hava Aracı
K/Ç	Çimentoda Kullanılan Klinker Miktarı
KPI	Anahtar Performans Gösterge (Key Performance Indicator)
MAE	Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata
MF's	Üyelik Fonksiyonları (Membership Functions)

MgO	Magnezyum Oksit
MSE	Ortalama Kare Hata
NCV	Net Kalorifik Değer
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PWC	PricewaterhouseCoopers
R ²	Determinasyon Katsayısı
RDF	Atıktan Türetilmiş Yakıt (Refuse-Derived Fuel)
RKS	Döner Fırın Simülatörü (Rotary Kiln Simulator)
RMSE	Kök Ortalama Kare Hata
RTYSA	Radyal Temelli Yapay Sinir Ağı
SiO ₂	Silisyum Dioksit
SKDM	Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması
SQL	Yapılandırılmış Sorgu Dili (Structured Query Language)
TP	Total Population
TÜFE	Tüketici Fiyat Endeksi
UNEP	United Nations Environment Programme
UP	Urban Population
VRM	Dikey Valsli Değirmen (Vertical Roller Mill)
WBCSD	The World Business Council for Sustainable Development
WHR	Atık Isı Geri Kazanımı (Waste Heat Recovery)
WMO	Dünya Meteoroloji Örgütü (World Meteorological Organization)
YSA	Yapay Sinir Ağı

1. GİRİŞ

Sanayi devrimiyle birlikte artan üretim faaliyetleri, çevresel etkiler açısından giderek daha fazla sorgulanmaktadır. Özellikle enerji yoğun sektörler, küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olan sera gazı emisyonlarının başlıca kaynakları arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, çimento sektörü, hem enerji tüketimi hem de doğrudan CO₂ salınımı açısından kritik öneme sahiptir. Çimento üretimi, hammaddelerin çok yüksek sıcaklıklarda işlenmesini gerektiren bir süreç olduğundan, enerji tüketimi ve karbon emisyonu yoğun bir sektör olarak öne çıkmaktadır.

Türkiye’de çimento sektörü, inşaat ve altyapı projelerinin temel girdisini sağlaması açısından büyük bir ekonomik öneme sahiptir. Ancak sektörün çevresel etkileri göz önünde bulundurulduğunda, sürdürülebilir üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve karbon salınımını azaltmaya yönelik politikaların güçlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Özellikle AB’nin karbon düzenlemeleri ve küresel ölçekte artan iklim değişikliği ile mücadele çabaları, çimento sektöründe faaliyet gösteren firmaların çevresel etkilerini azaltmaya yönelik yeni stratejik yaklaşımlar benimsemelerini zorunlu kılmaktadır.

Günümüzde karbon emisyonlarının azaltılması yönünde uygulanan karbon fiyatlandırması, karbon vergisi ve emisyon ticaret sistemi gibi ekonomik araçlar, sanayilerin üretim süreçlerini yeniden şekillendirmekte ve çevre dostu teknolojilerin kullanımını teşvik etmektedir. Çimento sektörü de bu dönüşümden doğrudan etkilenmekte; hem üretim teknolojilerinde hem de enerji kaynaklarında değişime gitme gerekliliği ile karşı karşıya kalmaktadır. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde, bu dönüşüm süreçlerinin etkin bir şekilde yönetilmesi, hem ekonomik büyüme hedeflerinin korunması hem de çevresel yükümlülüklerin yerine getirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu çalışmada, Türkiye’de faaliyet gösteren bir çimento fabrikasının gelecekteki CO₂ emisyon miktarlarının tahmin edilmesi ve bu tahminlerin karbon vergi politikalarına yansımalarının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, sektörde karbon ayak izini azaltmaya yönelik ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda alınabilecek önlemler incelenecektir. Çalışmanın, hem sanayi işletmelerine hem de politika yapıcılara yol gösterici olabilecek stratejik bir perspektif sunması hedeflenmektedir. Ayrıca, karbon emisyonlarının

öngörülmesine yönelik yapılan bu analizlerin, Türkiye'nin ulusal iklim hedeflerine ulaşmasında ve sanayi sektörünün düşük karbonlu bir geleceğe uyum sağlamasında katkı sunması beklenmektedir.

1.1. Literatür Araştırması

Bu bölümde, 1997-2024 yılları arasında çimento sektöründe ortaya çıkan karbon emisyonları, bu emisyonların tahmin yöntemleri ve uygulanan karbon vergisi politikaları kapsamında yapılan akademik çalışmalar incelenmiştir. Aşağıda söz konusu çalışmalara ilişkin özet bilgiler yer almaktadır.

Güler (2018) tarafından, sanayinin gelişiminin, üretim ve tüketim alışkanlıklarında büyük değişimlere yol açtığı belirtilmiştir. Sanayi devrimi ile birlikte, sera gazı emisyonlarında özellikle CO₂ artışının gözlemlendiği ve bu artışın küresel ısınmanın temel nedenlerinden birini oluşturduğu ifade edilmiştir. Bu nedenle, sera gazı emisyonlarının azaltılması kapsamında iklim değişikliğiyle mücadele için köklü dönüşümlerin gerektiği vurgulanmıştır [1].

Çetintaş ve Türköz (2017) tarafından, küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında uygulanabilecek uluslararası önlemler ve karbon piyasalarının durumları ele alınmıştır. Çalışmada, karbon piyasalarının işleyişi incelenmiş, karbon piyasaları bağlamında Türkiye'nin mevcut durumu ve geleceği değerlendirilmiştir [2].

PricewaterhouseCoopers (PWC) ve Türkiye ve Sanayi Bakanlığı (2024) tarafından, Türkiye tarafından belirlenen, 2053 net sıfır hedefi doğrultusunda, çimento sektöründe düşük karbonlu dönüşüm için adımların atıldığı ifade edilmiştir. Küresel iklim politikaları ve Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM) gibi girişimlerin bu süreci hızlandırdıkları ve sektörün emisyon azaltımı açısından kritik önem taşıdığı ifade edilmiştir. Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (European Bank for Reconstruction and Development – EBRD) destekli bir proje ile, kamu ve sektör paydaşları iş birliği içinde bir düşük karbon yol haritasının oluşturulduğu ve öneriler sunulduğu belirtilmiştir. Yakın gelecekte CO₂ emisyonuna bağlı riskler nedeniyle, sektörün karbonsuzlaşması için ısı verim, atık ikamesi, biyokütle kullanımı ve klinker üretim ve klinker çimento oranlarının verimliliğini artıracak teknoloji ve politikaların hayata geçirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [3].

Türk Çimento (2023) tarafından, çimento sektörü %10 büyürken klinker üretimi %1,2 artarak 73 milyon tona ulaştı. Raporda üretim, ihracat, enerji maliyetleri ve karbon düzenlemelerinin sektöre etkileri analiz edilerek Türkiye çimento sanayisinin emisyon yoğunluğu ve kapasitesi değerlendirilmiştir [5].

Türk Çimento (2021) tarafından, çimentonun tarihsel gelişimi, üretim süreçleri, kimyasal yapısı ve çeşitleri ele alınmış; özellikle Portland çimentosunun özellikleri ve üretimi detaylandırılmıştır. Ayrıca, katkılı ve yenilikçi çimentoların çevresel etkileri, enerji verimliliği ve sürdürülebilir üretim açısından avantajları vurgulanmıştır. Ayrıca, atık ısı geri kazanımı (Waste Heat Recovery - WHR) ve dögüsel ekonomi uygulamaları üzerinden çimento sektöründeki karbon ayak izini azaltmanın önemi açıklanmıştır [6].

Türk Çimento (2019) tarafından, yayımlanan teknik kılavuzda, valsli değirmen sistemlerinin özellikle ince öğütme kabiliyeti, kapalı devre çalışabilme yeteneği ve düşük çevresel etkileri ön plana çıkarılmaktadır. Geleneksel bilyalı değirmen sistemlerine kıyasla daha düşük spesifik enerji tüketimi ile çalışabilen dikey valsli değirmen (Vertical Roller Mill - VRM)'lerin, aynı zamanda üretim esnasında proses değişkenlerinin daha hassas kontrol edilmesini mümkün kılarak hem ürün kalitesini hem de çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir [7].

Rende (2013) tarafından, çimento sektörü küresel sera gazı emisyonlarının %5-7'sinden sorumlu olup, Türkiye'de 2010'da toplam emisyonların %8,86'sını oluşturmuştur. Bu çalışmada geliştirilen "CO₂ Emisyonu Hesaplama Aracı" ile farklı senaryolar incelenerek; teknolojik iyileştirmeler, alternatif yakıtlar ve katkılı çimento üretimiyle emisyonların %6-17 azaltılabileceği belirtilmektedir. Ayrıca karbon yakalama, atık ısıdan enerji ve yasal düzenlemelerin sürdürülebilirlik için kritik olduğu vurgulanmaktadır [8].

Altınkaynak (2017) tarafından, çimento üretiminde enerji verimliliği ve atık ısı geri kazanımı konuları ele alınarak, iki ayrı klinker üretim hattının enerji, kütle, entropi ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Tezde, döner fırın ve ön ısıtıcı gibi ekipmanlar üzerinden yapılan termodinamik hesaplamalarla, emisyon azaltımı ve enerji tasarrufu sağlayabilecek iyileştirme senaryoları önerilmiştir. Bu kapsamda geliştirilen Rankine çevrimi tabanlı sistem önerisi, çimento üretim süreçlerinde sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik uygulanabilir bir çözüm olarak sunulmuştur [9].

Kökipek (2010) tarafından, çimento üretiminde doğal alçı taşı yerine baca gazı kükürt gideriminden elde edilen suni alçının (Flue Gas Desulfurization-FGD) kullanılabilirliği incelenmiştir. Deneysel analizlerde priz süresi, dayanım ve hacim kararlılığı gibi parametreler değerlendirilmiştir. Suni alçının teknik açıdan uygun olduğu ve ekonomik avantaj sağladığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca çimento üretim süreçlerine de bu çalışmada yer verilmiştir [10].

Telschow (2012) tarafından, çimento üretiminde enerji tüketimini azaltmaya yönelik süreç değişikliklerinin klinker oluşumu üzerindeki etkilerini analiz etmek amaçlanmıştır. Yazar, laboratuvar ölçeğinde bir döner fırın simülatörü (Rotary Kiln Simulator - RKS) tasarlayarak endüstriyel koşulları taklit eden deneyler gerçekleştirmiştir. Klinker fazlarının sıcaklık, dönüş hızı ve ısıtma profiline göre nasıl geliştiği incelenmiş, özellikle alit (C₃S), belit (C₂S), alüminat (C₃A) ve ferrit (C₄AF) fazlarının oluşum sırası ve kinetiği detaylandırılmıştır. Çalışma, endüstriyel fırın verimliliğinin artırılmasına yönelik modelleme ve proses iyileştirme çalışmalarına bilimsel temel sunmaktadır [11].

Yıldız (2015) tarafından, çimento üretiminde temel ara ürün olan klinkerin üretim süreci ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Çalışmada; yaş, yarı yaş, yarı kuru (özellikle Lepol sistemi) ve kuru üretim yöntemleri karşılaştırmalı şekilde açıklanmış; her yöntemin enerji tüketimi, üretim maliyeti ve çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Lepol sistemiyle yapılan yarı kuru üretim, düşük su ilavesiyle topaklanan ham maddenin ızgara fırınlarda kurutularak fırına beslenmesini esas almaktadır. Bu sistem, enerji verimliliği açısından geçmişte yaygın olarak kullanılmıştır. Ayrıca ön ısıtmalı ve kalsinatör sistemli modern yöntemlerle klinker üretiminde ısıtma işlem bölgeleri, kalış süreleri ve kullanılan ekipmanlar teknik detaylarıyla sunulmuştur. Çalışma, farklı üretim sistemlerinin CO₂ salımına etkilerine de değinerek çevresel boyutu da kapsamaktadır. [12].

Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency - IEA) (2022) tarafından, çimento sektörünün düşük karbonlu bir yapıya geçiş süreci tanımlanmıştır. Kısa, orta ve uzun vadeli çimento üretim ve satış miktarlarına istinaden karbon azaltım stratejileri detaylandırılmış, özellikle kalsinasyon ve enerji tüketimi üzerine odaklanılmıştır [13].

Andrew, R. M. (2019) tarafından, küresel ölçekte çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları uzun dönemli veriler ışığında analiz edilmiştir. Ülkeler bazında üretim ve

emisyron verileri değerlendirilerek, imento sektörünün karbon ayak izi detaylandırılmıştır. Kalsinasyon ve yakıt kaynaklı emisyonların oranlarına da yer verilmiştir [14].

Gursel, A. P., Masanet, E., Horvath, A. & Stadel, A. (2014) tarafından, beton üretiminin tüm yaşam döngüsü analiz edilerek, imento bileşenlerinin çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Karbon emisyon miktarının büyük ölçüde klinker oranı ve kullanılan yakıt türüne bağlı olduğu vurgulanmıştır [15].

Pwc Türkiye (2024) tarafından, Dünya’da ve Türkiye’de imento sektörünün tarihsel gelişimi, üretim kapasitesi ve tüketim ihracat-ithalat dengeleri ve karbon emisyonları bağlamındaki çevresel etkileri incelenmiştir. Türkiye, yaklaşık 74 milyon ton imento üretimiyle dünyanın en büyük ikinci imento ihracatçısı konumunda olduğu belirtilmiştir. Rapor, Kahramanmaraş depremleri sonrası çimentonun yeniden yapılanmadaki kritik rolüne dikkat çekerken, enerji yoğun üretim süreçleri ve karbon salımını azaltmaya yönelik sürdürülebilirlik politikalarına da odaklanmıştır. Ayrıca Avrupa imento standartları (EN 197-1, EN 197-5) ve yeni nesil imento türleri ile sektörün gelecekteki büyüme projeksiyonlarına yer verilmiştir [16].

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2015) tarafından, Sera gazı emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve doğrulanması konusunda sektörde nasıl bir yol izlenmesi gerektiği vurgulanmıştır [18].

Küresel imento ve Beton Birliği (Global Cement and Concrete Association - GCCA) (2021) tarafından, imento ve beton sektörünün 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonuna ulaşma taahhüdü ve bu hedef doğrultusunda izlenecek teknik, politik ve yapısal kapsamlı şekilde sunulmuştur. Betonun sadece modern yaşamın temel yapı taşı değil, aynı zamanda iklim krizine karşı dönüştürülebilir bir malzeme olduğu vurgulanmıştır [19].

GCCA (2020) tarafından, imento sektöründe CO₂ ve enerji tüketiminin izlenmesi ve raporlanmasına yönelik olarak GCCA tarafından oluşturulmuş standart bir yöntem çerçevesi sunulmuştur. Protokol, tesis ölçeğinde hem proses hem de yakıt kaynaklı emisyonların hesaplanmasında kullanılabilir temel formülleri, veri toplama gereksinimlerini ve raporlama esaslarını detaylı biçimde açıklamıştır. Aynı zamanda emisyonların kapsam 1, 2 ve 3 çerçevesinde nasıl sınıflandırılması gerektiği belirtilmiştir [20].

Yurtsever vd. (2023) tarafından yayımlanan rapor, çimento gibi enerji yoğun sektörlerde karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmak için alınması gereken önlemleri ele almaktadır. Çalışmada, Türkiye sanayisindeki emisyon azaltım potansiyeli değerlendirilmiş ve çimento üretimindeki dönüşüm stratejileri üzerinde durulmuştur [21].

Karakaya vd. (2023) tarafından, sanayi devriminden bu yana sera gazı emisyonlarının, iklim değişikliğine yol açarak toplumsal refaha zarar veren büyük bir piyasa başarısızlığı olduğu ifade edilmiştir. Karbon fiyatlandırmasının, karbon vergisi ve emisyon ticaret sistemi gibi araçlarla emisyon maliyetini içselleştirerek, düşük karbon alternatiflerini ve enerji verimliliğini teşvik ettiği vurgulanmıştır. Bu araçların etkilerinin, tasarımlarına, piyasa koşullarına ve ülkelerin ekonomik yapılarına göre farklılık gösterdikleri paylaşılmıştır [22].

Cembureau (2024) tarafından, yayımlanan raporda, Avrupa çimento sektörünün 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu hedefi doğrultusunda izlediği stratejileri ve alınması gereken önlemleri kapsamlı bir şekilde ortaya. “5C” yaklaşımı ile klinker, çimento, beton, inşaat ve karbonatlaşma başlıkları altında değer zinciri genelinde dekarbonizasyon hedefleri açıklanmıştır [23].

Dünya Bankası (2023) tarafından, dünya genelinde karbon fiyatlandırma uygulamalarının mevcut durumu ve gelişim süreci kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Raporda, karbon vergileri ve ETS küresel yayılımı, uygulama kapsamı, fiyat seviyeleri ve elde edilen gelirler gibi konular değerlendirilmiştir. Ayrıca karbon fiyatlandırmasının sera gazı emisyonlarını azaltmadaki etkinliği ile ekonomik ve sosyal etkileri de irdelenmiştir. 2023 itibarıyla 73 farklı karbon fiyatlandırma politikası uygulandığı belirtilmiş, bu uygulamaların yaklaşık %23'lük küresel emisyonu kapsadığı ifade edilmiştir. Rapor, karbon fiyatlarının artırılması gerektiğine, düşük karbonlu yatırımların teşvikine ve küresel uyum mekanizmalarına vurgu yapmaktadır [24].

Jonsson, Ydstedt ve Asen (2020) tarafından, hazırlanan raporda, İsveç'in karbon vergisinin 30 yıllık etkileri incelenerek, verginin sera gazı emisyonlarını %27 oranında azalttığı ve ekonomik büyümeyi engellemediği ortaya koyulmuştur. Ancak, verginin kapsamının sınırlı olması ve bazı sektörlerin muaf tutulması gibi yapısal eleştiriler de raporda yer almaktadır [25].

Birleşmiş Milletler Çevre Programı (United Nations Environment Programme – UNEP) (2016) tarafından, Birleşmiş Milletler Çevre Programı kapsamında, çevresel etkileri azaltmak için geliştirilen düşük karbonlu çimento türleri ele alınmıştır. Klinker oranının azaltılması ve alternatif hammaddelerin kullanımının ön planda olduğu ifade edilmiştir [26].

Toraman (2024) tarafından, Türkiye’deki bir açık ocak madeni örneği üzerinden elektrikli kamyon ve kepçelerin genel toplam ekipman etkinliği (Overall Equipment Effectiveness - OEE) analiz edilmiş ve düşük OEE değerlerinin genellikle uzun arıza süreleri ve plansız duruşlardan kaynaklandığını ortaya koymuştur. Çalışma, ekipman verimliliğini artırmak için bakım faaliyetlerinin iyileştirilmesi ve kamyon-kepçe eşleşmesinin optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu yönüyle OEE analizi, saha verimliliğini artırmaya yönelik önemli bir araç olarak değerlendirilmiştir [28].

Jang (1997) çalışmasında, bulanık mantık ile yapay sinir ağları birleştirilerek ANFIS yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem, verilerdeki ilişkileri öğrenmek için sinir ağlarının öğrenme kapasitesini ve bulanık sistemlerin yorumlama gücünü bir arada kullanmaktadır. Bu çalışmanın, özellikle regresyon ve sınıflandırma problemlerinde yüksek doğruluk elde etmek için sıkça başvurulan bir temel kaynak niteliğinde olduğu ifade edilmiştir [29].

Alam ve AlJarjani (2021) tarafından, yapılan çalışmada, Körfez ülkeleri için CO₂ emisyon tahminleri Bütünleşik otoregresif hareketli ortalama (AutoRegressive Integrated Moving Average – ARIMA), Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Holt-Winters modelleriyle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, bazı ülkelerde YSA modeli en yüksek doğruluğu sağlarken, bazı durumlarda ARIMA modelleri daha başarılı olmuştur. Çalışma, CO₂ tahminleri için tek bir modelin her ülke için en uygun çözüm olmadığını ve veri setine bağlı olarak performansın değişebileceğini ortaya koymuştur [30].

Güler ve Kandemir (2022) çalışmalarında, Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü (Organisation for Economic Co-operation and Development -OECD) ülkelerinin 1965-2020 yılları arasındaki CO₂ emisyon verilerini kullanarak lineer ve kübik regresyon modelleriyle tahmin gerçekleştirmiş ve bu modellerin performansı karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, kübik regresyon modeli başarı metriklerinde daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu çalışma, CO₂ tahmininde doğrusal olmayan modellerin avantajını ortaya koymaktadır [31].

Aydın ve Aydoğdu (2022) tarafından, Türkiye ve AB ülkelerinin 2010-2019 yılları arasındaki CO₂ emisyonları makine öğrenmesi algoritmalarıyla tahmin edilmiştir. Karar ağaçları, YSA ve destek vektör makineleri kullanılarak yapılan analizlerde, destek vektör makineleri (DVM) en başarılı sonuçları vermiştir. Türkiye'de CO₂ emisyonları artış eğilimindeyken, AB ülkelerinde artış hızının düştüğü tespit edilmiştir [32].

Cemrekli ve Demir (2021) tarafından, Türkiye'nin CO₂ emisyonları YSA, DVM ve Box-Jenkins zaman serisi yöntemleriyle tahmin edilmiştir. Üç yöntemin performansı karşılaştırıldığında en düşük hata oranının yapay sinir ağı modeline ait olduğu belirlenmiştir [33].

Boğar ve Boğar (2017) tarafından, Türkiye'nin sektörel CO₂ salımlarının tahmini için YSA modeli kullanılmıştır. 1990-2015 verileriyle model eğitilmiş, 2016-2030 dönemi için tahmin verileri elde edildiği belirtilmiştir [34].

Pabuğu ve Bayramoğlu (2016) tarafından, yapılan çalışmada, Türkiye'nin 2020-2030 yılları arasındaki CO₂ emisyonları YSA modeli ile tahmin edilmiştir. Modelde Gayrisafi yurt içi hasıla (GSYH), enerji üretim ve tüketimi gibi makro göstergeler kullanılmış ve 2020-2030 dönemine ilişkin CO₂ miktarları başarıyla öngörölmüştür. Tahmin sonuçları, Paris İklim Zirvesi hedeflerine göre Türkiye'nin daha fazla çaba göstermesi gerektiğini ortaya koymuştur [35].

Ahmet şenel ve Berrak Tekgönöl (2022) tarafından, yapılan çalışmada, Türkiye'nin yıllara göre CO₂ salım tahminleri ANFIS Sugeno tip yöntemiyle modellenmiştir. 1998–2020 dönemine ait ekonomik göstergelere dayalı olarak geliştirilen model ile 2021–2023 dönemi için CO₂ tahminleri yapılmış ve en uygun model yapısı seçilmiştir. Çalışma, karar vericilerin karbon azaltım planlamasında kullanılabilecek kestirimci bir araç sunmaktadır [36].

A. Mardani, D. Streimikiene, M. Nilashi, D. A. Aranda, N. Logeshkumar ve A. Jusoh, (2018) tarafından, yapılan çalışmada, G20 ülkelerine ait 1962–2016 dönemi verileri kullanılarak enerji tüketimi, ekonomik büyüme ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişki ANFIS yöntemiyle modellenmiştir. Yalnızca iki girdi değişkeni (enerji tüketimi ve ekonomik büyüme) ile CO₂ emisyon tahminlerinin yüksek doğrulukla yapılabildiği gösterilmiştir.

Ayrıca, ülke bazlı yüzey analizleri ile bu iki değişkenin CO₂ salımları üzerindeki etkisi ayrıntılı biçimde ortaya konmuştur [37].

Boakye K. and Fenton K. ve Simske S. (2023) tarafından, çimento üretiminde CO₂ emisyonlarını tahmin etmek amacıyla farklı makine öğrenmesi modelleri uygulamışlardır. Heidelberg Materials Union Bridge Fabrikası'ndan elde edilen geçmiş üretim verileriyle yapılan bu çalışmada, özellikle oksidasyon derecesi ve kalkinasyon derecesinin CO₂ üzerinde önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir. Çalışma, sürece etki eden değişkenlerin duyarlılık analizi yapılarak hangi girdilerin emisyonları daha çok etkilediği başarılı bir şekilde ortaya koymuştur [38].

Özhan (2020) tarafından, yapılan çalışmada, Türkiye'nin CO₂ emisyonları için zaman serisi analizi kullanılarak gelecek dönem tahmini gerçekleştirilmiştir. YSA yöntemi ile Holt'un lineer trend modeli karşılaştırılmış ve YSA'nın daha düşük hata oranları ile daha başarılı tahminler yaptığı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, 2021 yılı CO₂ emisyonunun yaklaşık 366 milyon ton olacağı öngörülmüştür [39].

Karakurt ve Aydın (2020) tarafından, 1971–2016 yılları arasında çoklu regresyon analiz modeli kullanılarak çalışma yapılmıştır. Çalışma iki gruba ayrılmıştır. 1. Grup; 1971–2010 model geliştirme, 2. Grup; 2011–2016 model doğrulama yapılarak, bu yıllara ait gelecek tahminlemesi yapılmıştır. Bağımsız değişkenler; GSYH, toplam nüfus (Total Population - TP), kentsel nüfus (Urban Population - UP) iken bağımlı değişkenler Kömür kaynaklı CO₂ emisyonları (E)'dir. Modellerin doğruluğu hata metrik performanslarına bakılarak belirlenmiştir. Çalışmanın amacı Brezilya, Rusya Federasyonu, Hindistan, Çin Halk Cumhuriyeti, Güney Afrika ve Türkiye (Brazil, Russian Federation, India, China, South Africa, Turkey - BRICS-T) ülkelerinin kömür kaynaklı CO₂ emisyonlarını yüksek doğrulukla tahmin edilebildiği belirtilmiştir. Bu modeller, çevresel politika geliştirme ve enerji planlamasında kullanılabileceği aktarılmıştır [40].

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2023) tarafından hazırlanan rapor, çimento sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin enerji tüketimlerini karşılaştırmalı olarak analiz etmek ve sektörel verimlilik iyileştirmelerine katkı sağlamak amacıyla hazırlanmıştır. Çalışma, 56 entegre ve 12 öğütme-paketleme tesisine ait veriler üzerinden gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar sektörel kıyaslama için kullanılmıştır. Ana tema; enerji verimliliğini

artırmaya yönelik değerlendirme, sürdürülebilirlik, karbonsuzlaşma, çimento sektörünün performansı, ekonomi ve siyasal gelişmeler olduğuna değinilmiştir [41].

Yunus Emre Kuzu (2022) tarafından bu çalışmada, Türkiye'deki enflasyon tahmini için ARIMA ve ANFIS modelleri karşılaştırılmış; 2005–2021 dönemine ait tüketici fiyat endeksi (TÜFE) verileri kullanılmıştır. Performans kriterlerine göre ANFIS modeli, ARIMA'ya kıyasla daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu çalışmada ana amaç ANFIS ve ARIMA modellerini kıyaslamaktır [42].

Mustafa Akpınar (2022) tarafından, İnsansız Hava Aracı (İHA) itkisinin incelenmesine yönelik olarak ANFIS ve Geri-İzleme Arama Optimizasyon (GAO) algoritmalarına dayanan alternatif bir model önerilmiştir. Literatürdeki yöntemlere kıyasla, ANFIS tabanlı yaklaşımın hızlı, düşük maliyetli ve etkin sonuçlar sunduğu gösterilmiştir. Simülasyonlar, ANFIS'in İHA tasarımında itki optimizasyonu açısından güçlü bir araç olduğunu ortaya koymuştur [43].

Eda Hamamcıoğlu (2024) tarafından, Bu tezde, Türkiye'nin 2000-2021 verileriyle CO₂ emisyonları analiz edilmiş ve ANFIS Sugeno yöntemiyle 2022-2030 tahminleri yapılmıştır. Elektrik üretimi, ihracat, yakıt tüketimi ve nüfus gibi faktörlerin etkisi değerlendirilmiş; sonuçlar sürdürülebilir politika önerileri sunarak çevresel hedeflere katkı sağlaması hedeflenmiştir [44].

Bhaskar Pratap Singh, Anurag Malik & Pravendra Kumar (2016) tarafından, bu çalışmada, Hindistan'daki Arpa Nehri için günlük taşkın tahmini yapılmış ve ANFIS modeli, çoklu doğrusal regresyon yöntemine kıyasla daha yüksek doğrulukla sonuç vermiştir. ANFIS'in farklı üyelik fonksiyonlarıyla yapılan tahminlerde, daha etkili bir araç olduğu bilgisi aktarılmıştır [45].

Ümmü Ahat (2021) tarafından, sürdürülebilir tedarikçi seçimi için ANFIS ve YSA yöntemleri kullanılmış; ANFIS modeli en etkin kriterleri belirleyerek en başarılı tahmin performansını göstermiştir. Sonuç olarak, ANFIS ile en uygun tedarikçi seçilmiştir [46].

Mehmet Konar (2010) tarafından, uçuş kontrol sistemlerinin güvenlik ve verimlilikteki kritik rolü ele alınmış; B-737-300 ve B-767-200 uçaklarının hız ve yakıt

problemleri yapay zeka yöntemleriyle analiz edilmiştir. ANFIS, çok katmanlı YSA, radyal tabanlı YSA ve genelleştirilmiş regresyon YSA ile oluşturulan modeller, gerçek verilerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucu; ANFIS ve radyal temelli yapay sinir ağı (RTYSA) modelleri diğer modellere göre en iyi sonuçları verdiği gözlemlenmiştir [47].

Comparison Between Mamdani & Sugeno Fuzzy Inference System web sitesi (2025) tarafından, Mamdani ve Sugeno arasındaki farklar ortaya konmuştur. Mamdani, daha sezgisel, insan mantığına yakın olduğu Sugeno'nun ise daha matematiksel olduğu bilgisi verilmiştir [48].

Adem Bulut (2025) tarafından, uçakların minimum iniş pist uzunluğunun tahmini için karar destek (Decision Support - DS) algoritması tabanlı ANFIS modelleri geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, ANFIS'in doğruluk ve verimlilik açısından başarılı bir tahmin aracı olduğunu göstermiştir. [49].

Turgut Hacıvelioğulları (2022) tarafından, araç üstü ekipman sektöründe sürdürülebilir tedarikçi seçimi problemi Mamdani-tipi bulanık çıkarım sistemi ile ele alınmış; tedarikçilerin performans ve sürdürülebilirlik düzeyleri eş zamanlı değerlendirilerek en uygun tedarikçiler Mamdani-tipi bulanık çıkarım sistemi ile belirlenmiştir [50].

Mohammed Blej & Mostafa Azizi (2016) tarafından, gerçek zamanlı sistemlerde görev önceliklendirmesi için kullanılan Mamdani ve Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemleri (fuzzy inference system - FIS)'nin karşılaştırması yapılmıştır. Amaç, hangi yöntemin daha verimli ve uygun olduğunu belirlemektir. Sonuç olarak Mamdani tipinin daha sezgisel, Sugeno tipinin ise matematiksel analiz ve optimizasyonda daha iyi olduğu çıkarımına ulaşılmıştır. Bu sebeple Sugeno tipinin tercih edilmesinin daha uygun olduğu belirtilmiştir [51].

Fatma Şeyma Yüksel (2023) tarafından, Türkiye'nin iç hat havayolu yolcu talebi, 2000-2019 verileri kullanılarak yapay zeka ve ekonometrik modellerle tahmin edilmiştir. ANFIS ve YSA, Çoklu Doğrusal Regresyon modeliyle karşılaştırılmış; en başarılı sonuçların yapay zeka tabanlı modellerle elde edildiği görülmüştür [52].

Patrick Schober, Christa Boer & Lothar A. Schwarte (2018) tarafından, Spearman korelasyonunun normal dağılım gerektirmediği ve doğrusal olmayan monoton ilişkileri analiz etmek için bu korelasyonun kullanıldığı bilgisi verilmiştir [53].

Muhammad Zahir Khan & Muhammad Farid Khan (2019) tarafından, ANFIS'in düşük hata oranı, belirsiz ve karmaşık verilere uyumu, yüksek doğruluk ve güvenilirlik ve YSA'a göre performansının iyi olması sebebi ile tercih edilebilir olduğu bilgisi verilmiştir [54].

Fani Gkoutakou ve Basil Papadopoulos (2020) tarafından, 28 günlük çimentonun basınç dayanımının tahmini için bulanık doğrusal regresyon ve ANFIS yöntemleri incelenmiştir. Doğrusal regresyon ve ANFIS için aynı veri seti kullanılmış ve ANFIS'te daha düşük hata oranı görüldüğü belirtilmiştir [55].

Ayşe Nur Çırak (2023) tarafından, 2019 yılına ait veriler kullanılarak Avrupa Birliği'ne üye 27 ülke için sera gazı emisyonları, kişi başı milli gelir ve binek otomobil sayısı değişkenleri üzerinden incelenmiştir. Çalışmada çoklu doğrusal regresyon ve korelasyon analizleri uygulanmış, sonuçta bağımsız değişkenlerdeki artışın sera gazı emisyonlarını artırdığı görülmüştür [56].

O. F Uzor & J. O. Ogbuagu & R. U Arinze and Abuchi Princewill Okeke (2025) tarafından, Çimento üretimi, CO₂, CO ve H₂S gibi zararlı gazların atmosfere salımında önemli bir kaynak olduğu bilgisi verilmiştir. Nijerya'daki Dangote Çimento Fabrikası çevresinde yapılan bir çalışmada, bu gazların mevsimsel değişimi (sezonalite) incelenmiş ve kurak sezonda konsantrasyonların (kirletici gazların yoğunluğunu) yağışlı sezona göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Özetle mevsimsel değişiklik CO₂ emisyonunun etkilediği bilgisi verilmiştir. [57].

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 12.Bölüm: Korelasyon Analizi, İstatistik II Ders Notlarının yer aldığı web sitesinde, Pearson korelasyon katsayısı, iki değişkenin de sürekli olmasını ve değişkenlerin normal dağılım göstermesini gerektiği, eğer değişkenler normal dağılım göstermiyorsa Spearman kullanılması gerektiği bilgisi verilmiştir [58].

Esezi Isaac Obilor & Eric Chikweru Amadi tarafından, Pearson için iki değişkenin aralık (interval) veya oran (ratio) ölçeğinde ölçülmesi gerektiği, değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olması ve normal dağılıma sahip olması gerektiği belirtilmiştir [59].

Kadakatla Pavan Kumar, Visweswararao Reddi (2023) tarafından, Spearman korelasyon katsayısı, eşleşmiş veriler arasındaki monoton ilişkinin gücünü ölçen istatistiksel bir ölçü olduğu ve spearman korelasyon sonucunun 0.60'dan büyük olması durumunda güçlü ilişki olduğu anlamına geldiği ifade edilmiştir [60].

Asghar Ghasemi, Saleh Zahediasl (2012) tarafından, Shapiro-Wilk testinin normal dağılımdan sapma olup olmadığını tespit etme yeteneğiyle, normal dağılım testlerinin başarısını ölçmede en sık kullanılan bir test olduğu bilgisi verilmiştir [61].

Doğan (2016) tarafından bu çalışmada, işletmelerin belirsizlik ortamında daha etkin kararlar alabilmesi için talep tahmini problemi ANFIS yöntemiyle ele alınmıştır. Talebi etkileyen faktörler belirlenerek oluşturulan veri tabanı üzerinden yapılan analizle, ANFIS'in talep tahmininde başarılı bir yöntem olduğu gösterilmiştir [62].

2. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE KÜRESEL İKLİM POLİTİKALARI

2.1. Tarihsel Süreç ve Uluslararası Anlaşmalar

Atmosferin bileşimi ve bu bileşimin iklim üzerindeki etkileri, bilimsel çevrelerde 19. yüzyılın sonlarına doğru tartışılmaya başlanmıştır. Bu dönemde yapılan ilk çalışmalar, atmosferdeki belirli gazların ısıyı tutma yeteneğiyle iklim sistemi üzerinde önemli roller üstlendiğini göstermiştir. 1896 yılında İsveçli bilim insanı Svante Arrhenius tarafından yapılan hesaplamalar, atmosferdeki CO₂ miktarının iki katına çıkmasının, dünya ortalama sıcaklığında yaklaşık 5 ile 6 °C'lik bir artışa yol açabileceğini öngörmüştür. Bu öncü bulgular, ilerleyen yıllarda daha kapsamlı bilimsel araştırmalarla desteklenmiş ve sera gazlarının iklim değişikliği üzerindeki rolü bilimsel olarak kabul görmüştür [1].

Bu bilimsel farkındalık doğrultusunda, küresel ölçekte ilk önemli adımlardan biri 1979 yılında Dünya Meteoroloji Örgütü (World Meteorological Organization - WMO) liderliğinde düzenlenen Birinci Dünya İklim Konferansı olmuştur. Konferansta, insan faaliyetleri sonucunda artan fosil yakıt kullanımı ve ormansızlaşmanın atmosferdeki CO₂ birikimini artırdığı ve bunun iklim sistemini olumsuz etkileyebileceği ifade edilmiştir. Bu konferans, devletler arası iklim politikalarının temellerinin atıldığı dönüm noktalarından biri olarak kabul edilmektedir [1].

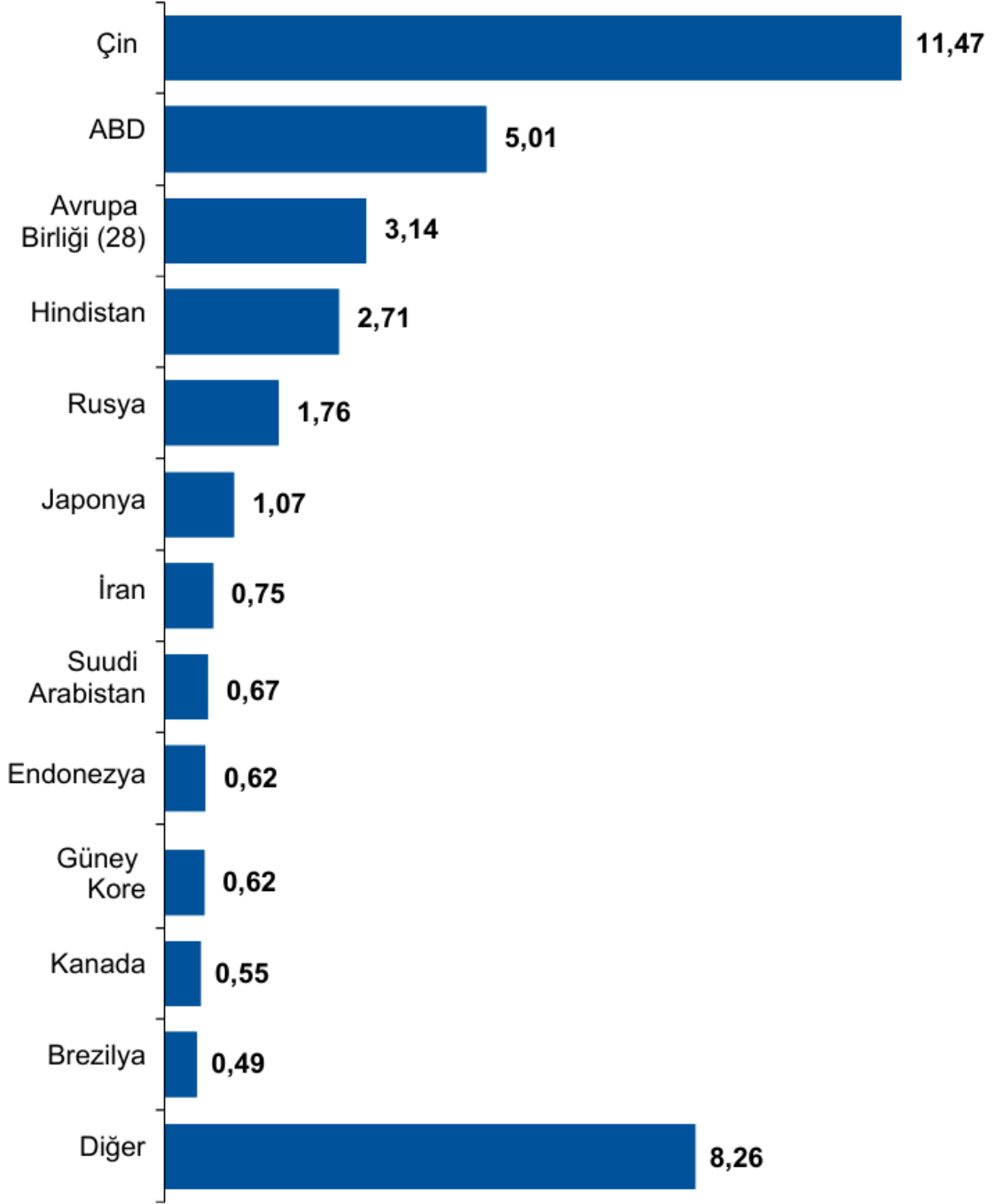
Küresel iklim değişikliğiyle ilgili bilimsel verilerin derlenmesi ve hükümetlere rehberlik edilmesi amacıyla 1988 yılında UNEP ve WMO'nun ortak girişimiyle Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) kurulmuştur. IPCC, 1990 yılında ilk değerlendirme raporunu yayımlayarak sera gazı emisyonlarının insan faaliyetleriyle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu süreçte, 1992 yılında Rio'da düzenlenen Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) kabul edilmiş ve 1994 yılında yürürlüğe girmiştir. Sözleşmenin temel amacı, atmosferdeki sera gazı birikimlerini iklim sistemi üzerinde tehlikeli insan kaynaklı etkileri önleyecek düzeyde sınırlandırmaktır [1].

BMİDÇS çerçevesinde geliştirilen Kyoto Protokolü ise 1997 yılında kabul edilerek 2005 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu protokol, sanayileşmiş ülkeler için bağlayıcı sera gazı emisyon azaltım hedefleri belirleyerek, uluslararası iklim politikalarında önemli bir dönüm

noktası olmuştur. Ancak Kyoto Protokolü'nün sınırlı ülke katılımı ve gelişmekte olan ülkeleri kapsamayışı, küresel ölçekte etkisinin sınırlı kalmasına yol açmıştır [1].

Bu uluslararası çabaların temelinde yatan çevresel tehdit, sera gazlarının atmosferdeki artışıdır. Sera gazları, güneşten gelen enerjinin bir kısmını tutarak yeryüzünün yaşanabilir sıcaklıkta kalmasını sağlayan doğal bir mekanizmanın parçasıdır. Ancak fosil yakıtların yoğun biçimde kullanılması, ormanların yok edilmesi ve sanayi faaliyetlerinin artması gibi insan kaynaklı süreçler, bu gazların atmosferdeki yoğunluklarını tehlikeli seviyelere taşımıştır. CO₂, bu gazlar arasında en yaygın olanıdır [1].

Son yıllarda yapılan analizler, küresel CO₂ emisyonlarının artmaya devam ettiğini göstermektedir. Özellikle 21. yüzyılın başından itibaren Çin başta olmak üzere gelişmekte olan ekonomilerin enerji tüketimi artışı, bu eğilimin temel nedenleri arasındadır. 2021 yılı itibarıyla, fosil yakıtlar ve sanayi faaliyetlerinden kaynaklanan küresel CO₂ emisyonları 37,1 gigaton seviyesine ulaşmıştır. Şekil 2.1.'den de görüldüğü gibi, bu miktarın %31'i Çin'e, %13'ü Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'ne ve %8,5'i AB'ye aittir. Türkiye ise aynı yıl içerisinde 0,45 gigaton CO₂ salımıyla küresel emisyonların yaklaşık %1,2'sinden sorumlu olmuştur [3]. Bu veriler, uluslararası anlaşmaların neden gerekli olduğunu ortaya koymakta; ülkelerin eşgüdüm içinde hareket etmesinin, küresel iklim krizinin önlenmesi açısından kritik önem taşıdığını göstermektedir.



Şekil 2.1. En fazla CO₂ salınımı yapan ülkeler, 2021 (gigaton CO₂) [3].

2.2. Paris Anlaşması ve Avrupa Yeşil Mutabakatı

İklim değişikliğiyle mücadelede küresel iş birliğini güçlendiren ve ülkelerin sürdürülebilir kalkınma stratejilerini dönüştüren en önemli iki politika çerçevesi, Paris Anlaşması ve AYM olmuştur. 2015 yılında BMİDÇS kapsamında kabul edilen Paris Anlaşması, gelişmiş ve gelişmekte olan tüm ülkelerin sera gazı emisyonlarını azaltma taahhüdünde bulunduğu ilk küresel uzlaşma belgesi olarak dikkat çekmektedir. Anlaşmanın temel hedefi, küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelere göre 2°C'nin altında tutmak

ve mümkünse 1,5°C ile sınırlamaktır. Bu hedef doğrultusunda taraf ülkelerden hem emisyon azaltımı hem de iklim değişikliğine uyum konusunda somut planlar geliştirmeleri beklenmektedir [3].

Paris Anlaşması, yalnızca bir çevre politikası aracı olmanın ötesinde, iklim değişikliğinin etkilerine karşı dirençli ekonomilerin inşasını teşvik eden bir kalkınma vizyonu sunmaktadır. Bu bağlamda Türkiye, 2053 yılı için ilan ettiği net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda özellikle yüksek emisyon yoğunluğuna sahip sektörlerde dönüşümü zorunlu hale getirmektedir. Bu sektörlerin başında, enerjiyle ilişkili küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumlu olan çimento sanayi gelmektedir. Betonun ana bileşeni olan çimento, yalnızca inşaat sektörünün değil, kentleşme ve altyapı projelerinin de temel taşı niteliğindedir. Türkiye'nin artan nüfusu ve büyük ölçekli altyapı yatırımları, bu sektördeki karbon ayak izini daha da önemli hale getirmektedir [3].

Avrupa Yeşil Mutabakatı ise AB'nin 2050 yılına kadar iklim nötr ilk kıta olma hedefini içeren, çok boyutlu bir dönüşüm planıdır. Bu Mutabakat kapsamında oluşturulan "Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması", AB'ye ithal edilen karbon yoğun ürünlerin üretim sürecinde ortaya çıkan emisyonları fiyatlandırmayı ve karbon kaçağını önlemeyi amaçlamaktadır. Bu düzenleme, yalnızca Avrupa iç pazarını değil, AB ile yoğun ticari ilişkiler yürüten ülkeleri de doğrudan etkilemektedir. Türkiye için bu durum, özellikle ihracat odaklı çimento üreticilerinin daha düşük karbon teknolojilerine geçişini kaçınılmaz kılmaktadır [3].

Sonuç olarak, hem Paris Anlaşması'nın küresel bağlayıcılığı hem de AYM'nin ticaret odaklı yaptırım gücü, Türkiye çimento sektörünün karbon yoğunluğunu azaltacak politika, teknoloji ve finansman mekanizmalarının hızla hayata geçirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu dönüşüm, yalnızca çevresel bir zorunluluk değil, aynı zamanda rekabetçiliğin sürdürülmesi ve yeni pazar fırsatlarına erişim açısından da stratejik bir gerekliliktir. Aşağıda, Tablo 2.1.'de Uluslararası İklim Anlaşmaları ve Türkiye'nin Sürece Katılım tablosu yer almaktadır.

Tablo 2.1. Uluslararası iklim anlaşmaları ve Türkiye'nin sürece katılımı [2].

Tarih	Etkinlik	Yer	Başlıca Kararlar/Sonuçlar	Türkiye'nin Pozisyonu
1979	1.Dünya İklim Konferansı	Cenevre, İsviçre	İklim değişikliği ilk kez bilimsel olarak uluslararası düzeyde ele alındı.	Türkiye gözlemci konumunda; doğrudan katkısı yok.
1988	IPCC'nin Kuruluşu	Cenevre, İsviçre	IPCC kuruldu, bilimsel raporlarla iklim değişikliği izlenmeye başlandı.	Türkiye o sırada doğrudan katkı sağlamadı.
1990	2. Dünya İklim Konferansı & IPCC 1. Raporu	Cenevre, İsviçre	İnsan faaliyetlerinin iklim değişikliği üzerindeki etkisi raporlandı.	Türkiye bu süreçte henüz taraf değildi.
1992	Rio Zirvesi	Rio, Brezilya	BMİDÇS kabul edildi. Sera gazı emisyonlarının azaltılmasını amaçlayan uluslararası antlaşma imzalanması.	Türkiye geç katıldı, özel koşullar talep etti.
1994	BMİDÇS'nin yürürlüğe girmesi	-	Gerekli 50 ülkenin onayı ve imzası ile yürürlüğe girdi.	Türkiye bu süreçte henüz taraf değildi.
1997	Kyoto Protokolü	Kyoto, Japonya	Gelişmiş ülkelere bağlayıcı hedefler getirildi.	Türkiye 2009'da taraf oldu, taahhüt üstlenmedi.
2005	Kyoto Protokolü'nün devreye girmesi	-	16 Şubat 2005 resmi olarak yürürlüğe girmiştir.	Türkiye bu süreçte henüz taraf değildi.
2009	Kopenhag Zirvesi	Kopenhag, Danimarka	2°C hedefi, finansman kararları.	Türkiye'nin protokolü imzalaması.
2015	Paris Anlaşması	Paris, Fransa	1,5°C hedefi, ulusal katkı beyanları.	Türkiye 2021'de onayladı, %21 azaltım hedefi.
2021	Glasgow Zirvesi	Glasgow, İngiltere	1,5°C vurgusu, Paris kuralları tamamlandı.	Türkiye net sıfır hedefi açıkladı.

3. ÇİMENTO SEKTÖRÜ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE ETKİSİ

3.1. Çimento Tarihi ve İlk Kullanım Örnekleri

3.1.1. Çimento tarihi

Çimento, insanlık tarihi boyunca çeşitli şekillerde kullanılmış, temel yapı malzemelerinden biridir. Kavram olarak Latince “caementum” kelimesinden türetilmiş olup, ilk anlamı “yontulmuş taş kırıntısı”dır. Ancak zamanla bu terim, daha çok “bağlayıcı” anlamında kullanılmaya başlanmıştır. Nitekim, “ciment” kelimesi 14. yüzyılda Fransa’da, “cement” ise 15. yüzyılda İngiltere’de kullanılmaya başlanarak modern çimento kavramının terminolojik temelleri atılmıştır [6].

3.1.1.1. Antik çağlarda bağlayıcı malzemeler

İlk çimento benzeri bağlayıcıların, M.Ö. 7. yüzyılda Asur ve Babil uygarlıkları tarafından kullanıldığı bilinmektedir. Bu dönemde volkanik küllerin suyla karıştırılması sonucu priz alabilen malzemeler elde edilmiştir. Antik Yunanlılar ve Romalılar ise doğal puzolanları, özellikle volkanik tüfleri, kireçle karıştırarak ilk hidrolik bağlayıcıları geliştirmiştir. Romalı mimar Vitruvius’un De Architectura adlı eserinde, bu tür bağlayıcıların kullanımına dair Şekil 3.1.’de de gösterildiği gibi detaylı bilgiler yer almaktadır [6].



Şekil 3.1. Babil surlarının yapılışını anlatan çivi yazılı silindir [6].

3.1.1.2. Roma dönemi ve puzolan kullanımı

Romalıların, özellikle sualtı yapılarında puzolan esaslı bağlayıcıları kullanarak oluşturduğu yapıların dayanıklılığı günümüze kadar ulaşmıştır. Roma betonu olarak da bilinen bu karışım, kireç ve puzolanın suyla karışmasıyla elde edilen, su altında da

sertleşebilen dayanıklı bir yapı malzemesidir. Bu teknoloji, Roma İmparatorluğu döneminde geniş bir coğrafyada uygulanmıştır [8].

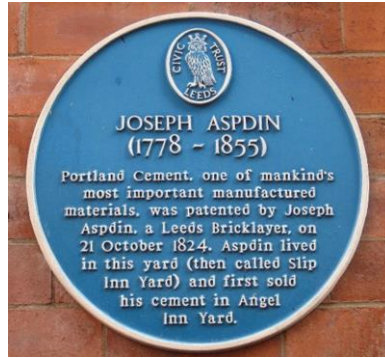
3.1.1.3. Orta çağ ve modern döneme geçiş

Orta Çağ boyunca kireç esaslı harçlar kullanılmaya devam edilmiştir. Ancak bu malzemeler yalnızca hava ile temas ettiklerinde sertleşebildiğinden, su altında veya nemli ortamlarda yeterli performansı gösterememekteydi. 18. yüzyılın sonlarına doğru İngiliz mühendis John Smeaton, Eddystone Deniz Feneri'nin inşasında hidrolik kireç kullanarak modern çimentonun gelişimi açısından önemli bir adım atmıştır [9].

3.1.1.4. Portland çimentosunun gelişimi

Modern anlamda çimento, 1824 yılında İngiliz tuğla ustası Joseph Aspdin tarafından geliştirilmiştir. Aspdin, kalker ve kil karışımını pişirip öğüterek bugünkü Portland çimentosunun temelini atmıştır. Elde ettiği ürün, Portland adasındaki doğal taşlara benzer renkte olduğu için bu adı almıştır. Aspdin'in geliştirdiği bu yöntem zamanla geliştirilerek bugünkü yüksek performanslı çimento üretim tekniklerine dönüşmüştür [5].

Aşağıda, Şekil 3.2.'de Aspdin'in Patent Anı Plakası yer almaktadır.

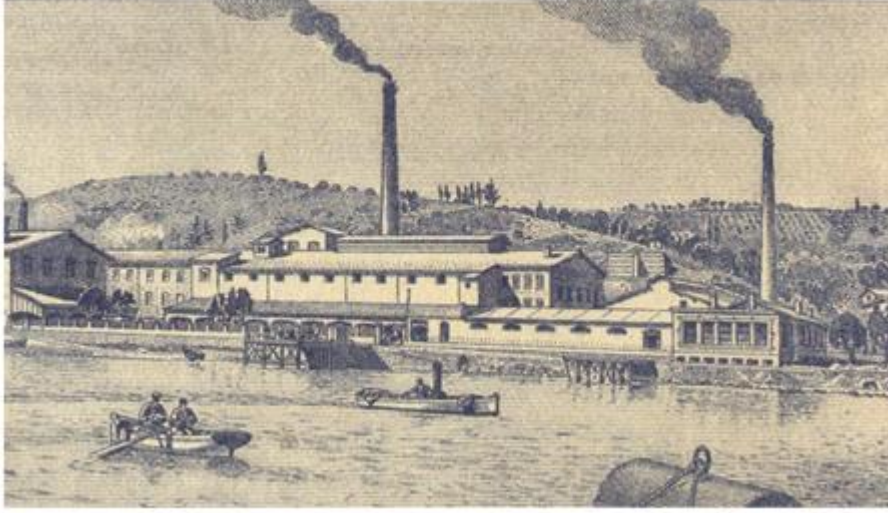


Şekil 3.2. Joseph Aspdin'in 1824 tarihli portland çimentosu patenti anı plakası, leeds, İngiltere [17].

3.2. Türkiye'de Çimento Sanayisinin Tarihçesi

Türkiye'de çimento üretimi ilk olarak 1911 yılında Darıca'da Şekil 3.3.'te de gösterildiği gibi kurulan özel sektör fabrikasıyla başlamıştır. Bu tesisi Zeytinburnu ve Kartal fabrikaları takip etmiştir. Cumhuriyetin ilanından sonra çimento üretimi stratejik bir sanayi kolu olarak değerlendirilmiş ve kamu öncülüğünde hızla yaygınlaşmıştır. Özellikle 1950'lerden sonra

kamu yatırımlarıyla fabrika sayısı artmış, 1980 sonrası özelleştirmeler ve özel sektör yatırımlarıyla sektör hızlı bir büyüme göstermiştir [5, 6].



Şekil 3.3. Eskişehir çimento fabrikası'nın 1920'lerdeki görünümü [6].

3.3. Çimento Üretim Süreçleri

Çimento, modern yapı sektörünün temel bileşenlerinden biri olup, yüksek dayanım, pratik uygulama kolaylığı ve ekonomik oluşuyla küresel ölçekte en yaygın kullanılan bağlayıcı yapı malzemelerindendir. Çimento üretimi; hammaddelerin temini ve hazırlanması, farin öğütümü, yakıt hazırlama, kalsinasyon, klinker üretimi, soğutma, öğütme, paketlenme ve üretim sistemleri gibi bir dizi teknik süreci kapsayan çok aşamalı bir endüstriyel faaliyettir [9].

3.3.1. Hammaddelerin temini ve hazırlanması

3.3.1.1. Ana hammaddeler

Çimento üretiminde kullanılan temel hammaddeler; kalker (kalsiyum karbonat - CaCO_3), kil, marn, boksit, demir cevheri ve silis kumudur. Bu hammaddeler çimento klinkerinin ana bileşenleri olan alit, belit, alüminat ve ferritin oluşumunda kullanılır:

- Kalker (CaCO_3): Çimentoda en yüksek oranda bulunan hammaddedir ve esas olarak kalsiyum oksit (CaO) sağlar. Klinker üretiminde CaO , alit (C_3S) ve belit (C_2S) gibi önemli bileşiklerin oluşumu için gereklidir. Aşağıda, Şekil 3.4.'de Kırıcıya boşaltılan Kalker gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Kalker [9].

- Kil: Silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve bir miktar demir oksit (Fe_2O_3) içerir. Klinkerin silikat ve alüminat fazlarının oluşmasına katkı sağlar. Kil aynı zamanda fırın içerisindeki reaksiyonların akışkanlığını da etkiler.
- Marn: Doğal olarak kalker ve kilin belirli oranlarda karışımıdır. Homojen yapıda olduğu için kimyasal kararlılığı yüksektir ve üretimde tercih edilir.
- Boksit: Al_2O_3 içeriği yüksek olan bu hammadde, özellikle alümina yetersizliğinde ilave olarak kullanılır. Klinker içindeki C_3A fazının oluşumuna katkıda bulunur.
- Demir cevheri: Demir oksit (Fe_2O_3) sağlar ve klinker içindeki C_4AF fazının oluşmasına yardımcı olur. Ayrıca fırın içerisindeki reaksiyon sıcaklığının düşürülmesine katkı sağlar.
- Silis kumu: Klinker hammadde harmanının hazırlanmasında SiO_2 içeriğini ayarlamak amacıyla kullanılan yardımcı bir hammaddedir. Kumun yüksek oranda SiO_2 içermesi istenmektedir, çünkü bu içerik klinker içerisindeki silikat fazlarının dengelenmesi açısından önemlidir. Hammaddelerin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri üretim sürecine doğrudan etki ettiğinden, bu tür katkıların kalitesi dikkatle kontrol edilmesi önem taşımaktadır [8].

3.3.2. Hammaddelerin çıkarılması ve kırılması

Hammaddeler patlatma, delme-patlatma veya ekskavatörlerle çıkarılır. Ardından Şekil 3.5.'te de gösterildiği gibi çeneli kırıcılar, ekili kırıcılar gibi ekipmanlar yardımıyla yaklaşık 20 mm altı boyutlara indirgenir. Bu işlem, daha sonraki öğütme işlemi için enerji verimliliği sağlar [9].



Şekil 3.5. Rotorlu kırıcı (yazar tarafından oluşturulmuştur).

3.3.3. Homojenleştirme

Çıkarılan hammaddeler, kimyasal analizlere göre farklı oranlarda karıştırılarak homojen hale getirilir. Stok sahalarında üst üste serme ve alma yöntemleriyle yapılan bu işlem, kalite sürekliliği açısından önemlidir [6].

Hammaddelerin homojenliğini sağlayan sisteme Şekil 3.6.'da da gösterildiği gibi preblending denmektedir.



Şekil 3.6. Preblending silosu (yazar tarafından oluşturulmuştur).

3.3.4. Farin öğütümü

Farin, klinker üretiminin temel hammaddesi olup, önceden homojenleştirilmiş kalker, kil, silis kumu, boksit ve diğer katkı maddelerinin belirlenen oranlarda karıştırılıp çok ince toz haline getirilmesine elde edilir. Bu işlem, çimento üretiminde kimyasal bileşimin tutarlılığı ve ürün kalitesi açısından kritik öneme sahiptir [9].

Farin öğütme işlemi genellikle iki farklı sistemle gerçekleştirilir. Bunlar; bilyalı değirmenler ve dik valsli (roller) değirmenlerdir.

3.3.4.1. Bilyalı değirmenler

Bilyalı değirmenler, Şekil 3.7.'de de gösterildiği gibi yatay konumda dönen silindirik bir tambur içinde çeşitli boyutlarda çelik bilyaların yardımıyla çalışan geleneksel bir öğütme sistemidir. Öğütme işlemi, bilyaların dönme hareketiyle farin karışımına uyguladığı darbe ve sürtünme kuvvetleri sayesinde gerçekleşir. Bu sistemin avantajı, kullanımının yaygın olması ve bakımının görece kolay olmasıdır. Ancak enerji verimliliği düşüktür ve öğütme sırasında yüksek ısı oluşumu gözlemlenebilir [9]. Enerji verimliliğinin düşük olması, iklim değişikliği ile mücadele kapsamında bu sistemin ilerleyen yıllarda tercih edilme oranının azalmasına neden olabilir.

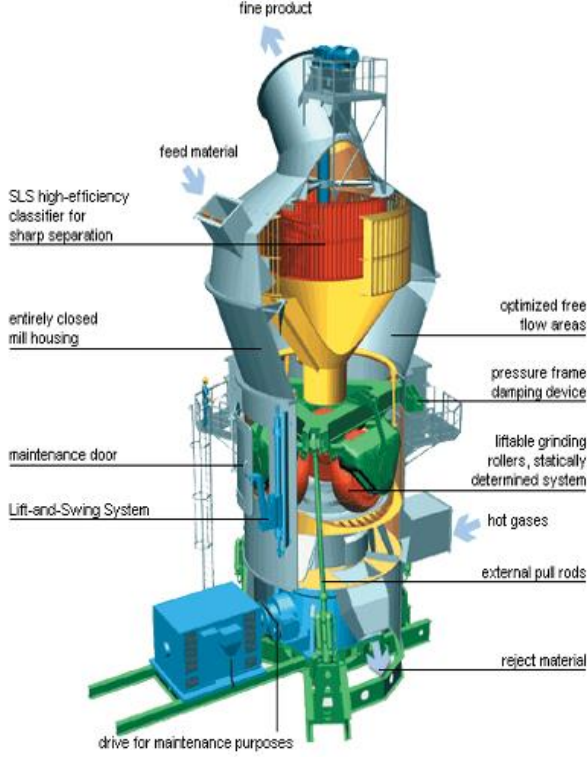


Şekil 3.7. Bilyalı değirmen (yazar tarafından çekilmiştir).

3.3.4.2. Dik valsli değirmenler

VRM, özellikle modern çimento fabrikalarında klinker, katkı ve hammadde öğütme süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel bilyalı değirmenlere göre daha düşük enerji tüketimi, daha az bakım ihtiyacı ve daha kompakt bir tasarım sunmaları sayesinde sürdürülebilir üretim stratejileri açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Dik değirmenlerde, Şekil 3.8.'de de gösterildiği gibi silindirik valsler dönme hareketi yaparken, değirmen tablası üzerinde bulunan malzemeye basınç uygulamakta ve böylece parçalama işlemi kapalı devre gerçekleştirilmektedir.

Bu sistem, öğütme verimliliğini artırmakla kalmaz; aynı zamanda ürün tane boyut kontrolünü de iyileştirerek çimento kalitesine doğrudan katkı sunmaktadır [7]. Kapalı devre çalışma, enerji geri kazanımını ve emisyon kontrolünü kolaylaştırarak VRM teknolojisini çimento sektöründe enerji verimliliği ve karbon azaltımı hedeflerine katkı sağlayan önemli bir çözüm haline getirmektedir [7].



Şekil 3.8. Pfeiffer –MP dik valsli değirmen [7].

3.3.5. Depolama

Öğütülen farin, üretim hattının kesintisiz çalışmasını sağlamak ve kararlılığı sürdürmek amacıyla farin silolarında depolanır. Bu silolar aynı zamanda farin karışımının homojenliğini korumak için karıştırıcı sistemlerle donatılmıştır. Depolanan farin, pişirme sistemine (siklonlar ve döner fırın) uygun debide sürekli olarak beslenir. Bu aşama, üretim verimliliğini doğrudan etkilediği gibi enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları açısından da kritik rol oynar [9].

3.3.6. Yakıt hazırlama

Çimento üretimi, yaklaşık 1450 °C'ye ulaşan pişirme sıcaklıkları nedeniyle oldukça yüksek enerji gerektiren bir prosestir. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla çimento fabrikalarında genellikle taş kömürü, linyit, petrokok ve doğal gaz gibi geleneksel fosil yakıtlar kullanılırken, son yıllarda alternatif yakıtların da kullanımı artmaktadır. Alternatif yakıtlar arasında atıktan türetilmiş yakıt (Refuse-Derived Fuel - RDF), atık lastikler, biyokütle, arıtma çamurları ve endüstriyel atıklar yer almaktadır. Bu yakıtlar, uygun boyutlandırma ve besleme sistemleri ile fırın veya kalsinatör sistemine dâhil edilir. Bu yöntem, enerji maliyetlerini düşürmenin yanı sıra sera gazı emisyonlarının azaltılmasına da

katkı sağlamaktadır [8]. Aşağıda, Şekil 3.9.'da alternatif yakıt olarak kullanılan RDF'in kırıldığı tesis gösterilmektedir.



Şekil 3.9. RDF kırıcı tesisi (yazar tarafından oluşturulmuştur).

Katı yakıtlar (Petrokok, linyit vb.) genellikle Şekil 3.10.'da da gösterildiği gibi değirmenlerde öğütülerek belirli bir tane boyutuna getirilir. Özellikle Şekil 3.11.'de petrokok ve kömür gibi yakıtlar için kurutma ve öğütme işlemleri enerji verimliliğini artıracak şekilde tasarlanmıştır [9]. Bu yakıtlar, döner fırın veya kalsinatör sistemine uygun dozajlarla beslenerek yanma sürecine dahil edilir.

Alternatif yakıt kullanımı, yalnızca maliyetleri düşürmekle kalmaz, aynı zamanda sera gazı (özellikle CO₂) emisyonlarını azaltarak çevresel fayda sağlar. Avrupa ülkelerinde çimento fabrikalarında atık kullanım oranı ısısal enerji anlamında %60'lara kadar ulaşırken, Türkiye'de bu oran %10–20 bandındadır ancak artış eğilimindedir [5].

Ayrıca, alternatif yakıtların farklı ısısal değerleri nedeniyle fırın sistemlerinin tasarımı, otomasyonu ve yakma kontrolü bu çeşitliliğe göre optimize edilmelidir. Uygun ön işlem

yapılmadan beslenen düşük kaliteli yakıtlar, klinker kalitesini ve emisyon kontrolünü olumsuz etkileyebilmektedir [10].



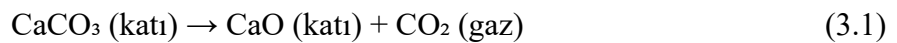
Şekil 3.10. Kömür değirmeni (yazar tarafından oluşturulmuştur).



Şekil 3.11. Petrokok (yazar tarafından oluşturulmuştur).

3.3.7. Kalsinasyon

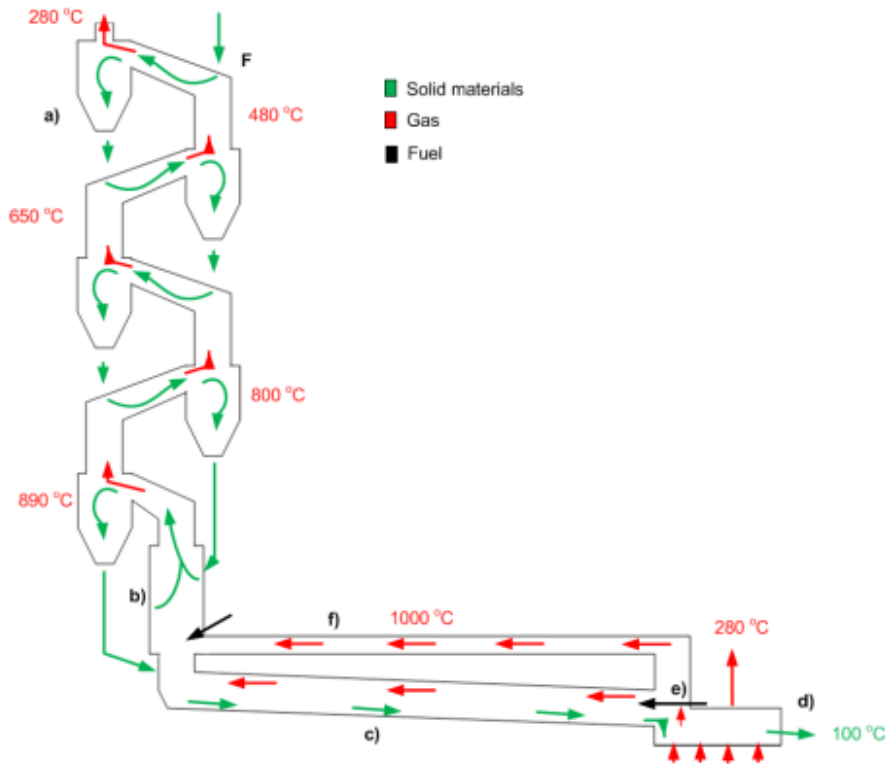
Kalsinasyon, çimento üretiminin kimyasal açıdan en kritik aşamalarından biridir. Bu süreçte, farin içerisinde bulunan karbonatlardan CaCO_3 , yaklaşık $850\text{--}950\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında ısıtılarak; Eşitlik (3.1)'deki gibi CaO ve CO_2 gazına ayrılmaktadır. Bu ayrışma tepkimesi şu şekilde gösterilebilmektedir:



Kalsinasyon işlemi, genellikle Şekil 3.12.'de de gösterildiği gibi ön ısıtma kulelerindeki siklonlar ve ardından gelen kalsinatör ünitesinde gerçekleştirilmektedir. Bu sistemlerde farin, sıcak gazlarla karşı akışlı olarak hareket etmekte ve böylece sıcaklık kontrollü şekilde yükseltilerek kalsinasyon tepkimesi sağlanmaktadır [9].

Çimento üretimi sırasında oluşan toplam CO₂ emisyonlarının büyük bir bölümü, doğrudan kalsiyum karbonatın kalsiyum oksit ve karbon dioksit'e ayrıştığı kalsinasyon reaksiyonundan kaynaklanmaktadır. Bu oranın yaklaşık %60 civarında olduğunu ve çimento üretim sürecindeki en yoğun CO₂ salınımının bu aşamada gerçekleştiği belirtilmektedir. [8]. Dolayısıyla, kalsinasyon süreci hem enerji tüketimi hem de çevresel etkiler açısından kritik bir aşama olarak değerlendirilmektedir.

Telschow'un (2012) deneysel çalışmasında, kalsinasyonun kinetiği ve sıcaklık profili detaylı olarak incelenmiş; özellikle CaCO₃'ün parçalanma hızının, farin bileşimi ve partikül boyutuna bağlı olarak değiştiği ortaya konmaktadır. Ayrıca ısıl verimliliğin artırılması için kalsinatörlerde ısı dağılımının ve gaz akışının optimize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır [11]. Yetersiz kalsinasyon, döner fırın üzerinde ek yük oluşturarak enerji tüketimini artırır ve klinker fazlarının düzgün oluşmasını engellemektedir [5].



Şekil 3.12. Kalsinatörlü ön ısıtıcı sistem [11].

Burada ;

- a) Ön ısıtıcı Kule,
- b) Kalsinatör,
- c) Döner Fırın,
- d) Klinker Soğutucu,
- e) Alev borusu ve Sekonder hava,
- f) Tersiyer havası

3.3.8. Klinker üretimi (pişirme aşaması)

Kalsinasyon süreci tamamlanan farin, yaklaşık 1400–1450 °C sıcaklık aralığında döner fırında pişirilerek klinkere dönüştürülmektedir. Bu aşamada meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler, çimento kalitesini belirleyen Eşitlik 3.2.'de de Alit reaksiyonunun gösterildiği gibi dört ana fazın oluşumunu sağlar: C₃S, C₂S, C₃A ve C₄AF . Şekil 3.13'de de gösterildiği gibi döner fırın, çimento üretiminin merkezinde yer alan ve çok kademeli bir termal reaksiyon sürecini yöneten temel ekipmandır [9,10].



Şekil 3.13. Döner fırın (yazar tarafından oluşturulmuştur).

3.3.8.1. Döner fırın yapısı ve işleyişi

Döner fırınlar, hafif eğimli ve yatay ekseninde dönen silindirik çelik gövdelerden oluşur. Farin, fırının soğuk ucundan içeri girerken, fırının sıcak ucunda bulunan brülörden (yakıcıdan) gelen alevle ısıtılır. Kalsinatörlü sistemlerde Kalsinatör ve Fırın kafa kısmından yakıt verilir. Bu karşı akış prensibi sayesinde malzeme, kademeli olarak artan sıcaklıklarla pişirilir.

Fırın içinde sıcaklık bölgelere ayrılır:

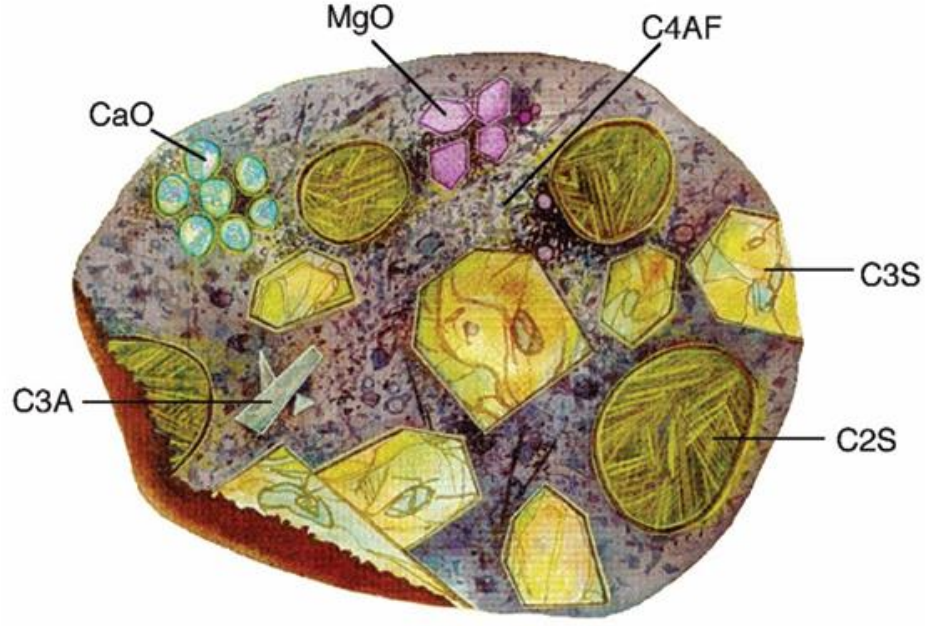
- Kurutma bölgesi: Giriş kısmında, farin içindeki serbest nem uzaklaştırılır (~100–400 °C).
- Kalsinasyon bölgesi: CaCO_3 , CaO ve CO_2 'ye ayrıştırır (~800–900 °C).
- Sinterleme bölgesi: En sıcak alanda (%20–30 fırın uzunluğu), klinker fazları oluşur (~1400–1450 °C).

3.3.8.2. Sinterleme süreci ve faz oluşumları

Sinterleme, katı haldeki bileşenlerin kısmen eriyerek tepkimeye girmesiyle Şekil 3.14.'de de gösterildiği gibi yeni kristal fazların oluştuğu yüksek sıcaklık reaksiyonudur. Farin içerisinde bulunan CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oksitleri birleşerek aşağıdaki fazları oluşturur:

- C_3S : Dayanım gelişimini sağlar; en baskın fazdır.
- C_2S : Geç dayanımda etkilidir.
- C_3A : Erken priz süresini etkiler.
- C_4AF : Renk ve priz davranışına katkı sağlar.

Bu fazlar fırının sıcak ucunda, ergime noktasına yakın sıcaklıklarda oluşur ve soğutma aşamasına geçilmeden önce sabitlenir [10].



Şekil 3.14. Klinker fazları [4].

3.3.8.3. Fırın performansına etki eden faktörler

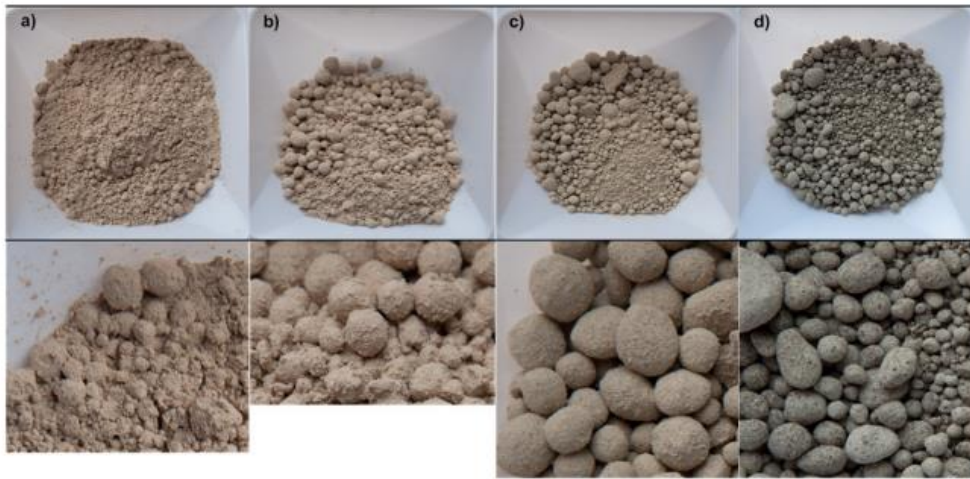
Klinker üretiminde verimliliği ve kaliteyi belirleyen temel faktörler şunlardır:

- Farın tane boyutu ve kimyasal homojenlik
- Yakıt türü ve yanma verimi
- Fırın iç refrakter kaplama durumu
- Fırın dönüş hızı, eğimi ve boyu
- Yanma havası ve alev geometrisi

Şekil 3.15'te de gösterildiği fırının ateşlenmesi sırasında Alev borusunun ucundaki alevin geometrisi gösterilmektedir. Genelde, fırın prosesinde oval ve parlak olması gerekmektedir.



Şekil 3.15. Alev borusu ve ateşleme (yazar tarafından oluşturulmuştur).



Şekil 3.16. Belirli bir sıcaklığa kadar klinker gelişimleri a) 900 °C b) 1000 °C; c) 1200 °C ve d) 1300 °C [11].

Bu parametrelerin uygun şekilde kontrolü, Şekil 3.16’da da gösterildiği gibi sıcaklığa bağlı klinker kalitesini doğrudan etkilemektedir [5, 9].

3.3.9. Soğutma

Klinker üretiminde, döner fırından çıkan 1400–1500 °C sıcaklıktaki malzemenin hızlı soğutulması hem ürün kalitesi hem de enerji verimliliği açısından kritik öneme sahip olmaktadır. Bu işlem, yüksek debili fanlarla soğuk havanın klinker üzerine üflenmesiyle gerçekleştirilmektedir ve mineral fazların istenilen yapıda kristalleşmesini sağlamaktadır

[9]. Soğutma sırasında açığa çıkan ısı, sekonder ve tersiyer hava olarak fırına geri kazandırılarak sistemin enerji verimliliği arttırmaktadır [11]. Ayrıca, çevre sıcaklığı ve soğutma havasının özellikleri ekserji kayıplarını etkileyerek ısı geri kazanım sistemlerinin uygulanabilirliğini belirlemektedir [9, 11].

Soğutma hızı, klinkerin mikroyapısını ve dolayısıyla çimentonun hidratasyon özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Özellikle C_3A ve C_4AF gibi fazların yeniden kristalleşmesi bu aşamada gerçekleşmektedir. Hızlı soğutma, alit fazının stabil kalmasını sağlarken bazı fazların amorf yapıda kalmasına neden olabilmektedir [11]. Bu nedenle soğutma süreci yalnızca termodinamik değil, aynı zamanda mikroyapısal kontrol açısından da optimize edilmesi gereken bir aşama olmaktadır.

3.3.10. Öğütme

Çimento üretiminde öğütme aşaması, klinkerin katkı maddeleriyle birlikte ince toz haline getirilerek son ürün olan çimentoya dönüştürüldüğü kritik bir süreçtir. Bu aşamada kullanılan değirmen tipi, öğütme verimliliği ve enerji tüketimi açısından büyük önem taşımaktadır. Geleneksel olarak kullanılan bilyalı değirmenler, yüksek enerji tüketimi nedeniyle yerini giderek daha verimli olan valsli değirmenlere bırakmaktadır. Özellikle valsli değirmenlerin daha düşük enerjiyle daha ince öğütme sağlayabilmesi, modern tesislerde tercih edilmelerinin başlıca nedenidir [9].

Öğütme işlemi sırasında klinkerin fiziksel özellikleri de büyük rol oynamaktadır. Örneğin, iri taneli alit ve belit kristalleri içeren klinkerlerin öğütülmesi daha zor olmakta, bu da enerji tüketimini artırmakta ve değirmen ekipmanlarında aşınmaya neden olmaktadır [11]. Bu nedenle, öğütme öncesi klinker yapısının homojenliği ve mineral faz dağılımı da dikkate alınmalıdır. Öğütme sırasında, Şekil 3.17.'de de gösterildiği üzere Alçı gibi, Şekil 3.18'de de gösterildiği gibi Tras gibi katkı maddelerinin, doğru oranlarda eklenmesi, çimentonun priz süresi ve dayanımı gibi özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Tüm bu etkenler göz önüne alındığında, çimento öğütme süreci yalnızca mekanik bir işlem değil, aynı zamanda ürün kalitesini belirleyen stratejik bir adımdır.



Şekil 3.17. Alçı (yazar tarafından oluşturulmuştur).



Şekil 3.18. Tras (pozzolan) (yazar tarafından oluşturulmuştur).

3.3.11. Paketleme

Elde edilen çimento, silolarda depolanır ve ihtiyaca göre Şekil 3.19'da da gösterildiği gibi torbalı (genellikle 50 kg) veya dökme olarak paketlenir. Sevkiyat sürecinde çimentonun nemden korunması kalite açısından kritik öneme sahiptir [5].

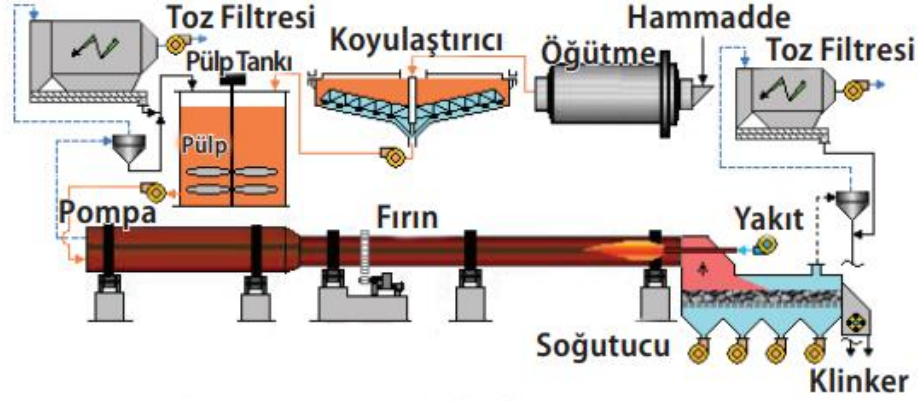


Şekil 3.19. Slingbag halinde gemiye yüklenen torbalı çimento (yazar tarafından oluşturulmuştur).

3.4. Üretim Sistemleri ve Teknolojik Gelişmeler

3.4.1. Yaş sistem

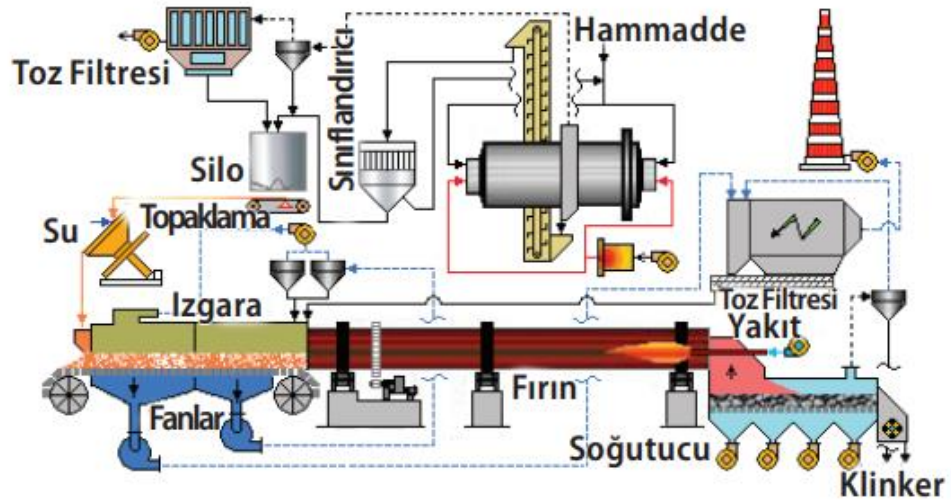
Bu yöntemde Şekil 3.20.'de de gösterildiği gibi farin, suyla karıştırılarak çamur haline getirilir ve döner fırına beslenir. Karışım homojenliği avantajına rağmen, çamurdaki suyun buharlaştırılması için yüksek miktarda enerjiye ihtiyaç duyulduğundan enerji verimliliği düşüktür. Türkiye'de ve dünyada büyük oranda terk edilmiştir [8].



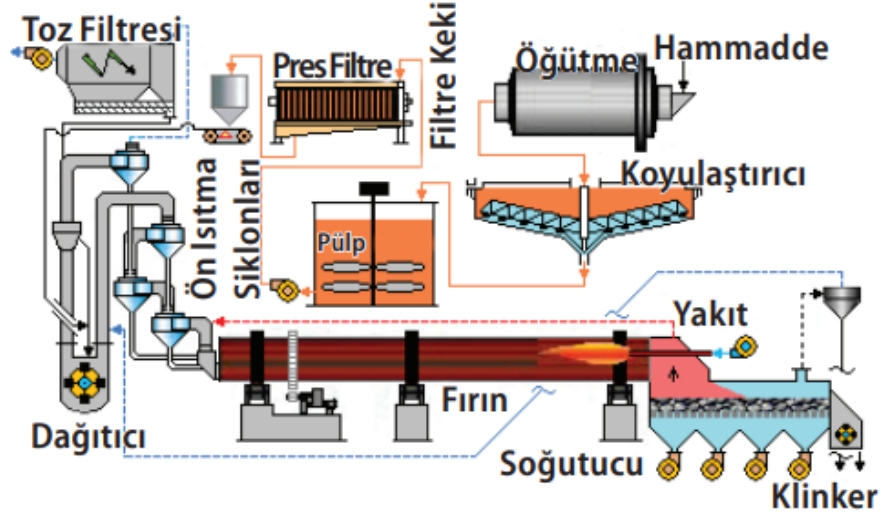
Şekil 3.20. Yaş sistem klinker üretim süreci [12].

3.4.2. Yarı yaş ve yarı kuru sistemler

Yarı yaş sistemde su oranı azaltılmış bulamaç kullanılır. Yarı kuru sistemde farin granül hale getirilip döner ızgara üzerinde kurutulur. Bu sistemler yaş sisteme göre daha düşük enerji tüketimine sahiptir ancak karmaşık yapıları nedeniyle yaygın değildir [9]. Aşağıda, Şekil 3.21 ve Şekil 3.22 de yarı yaş ve yarı kuru sistemler gösterilmiştir.



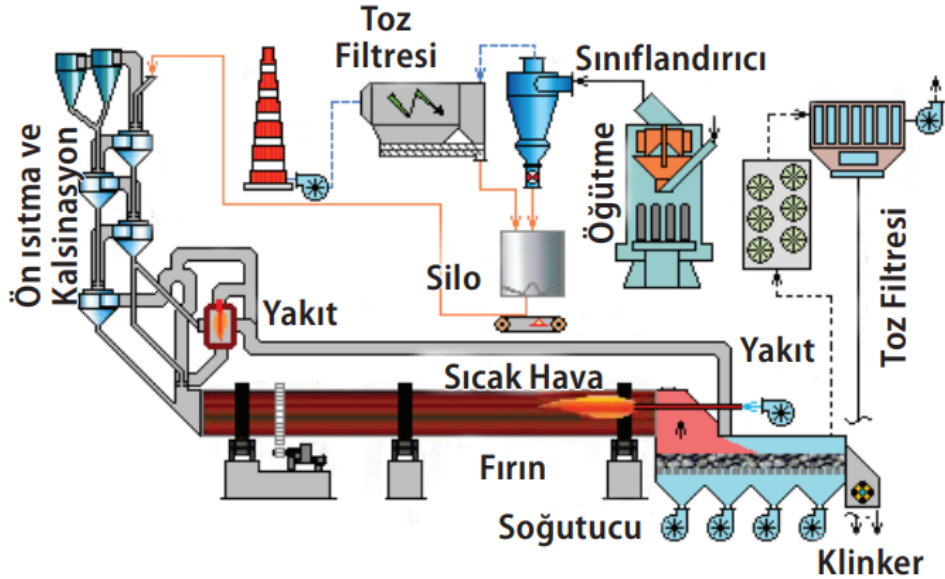
Şekil 3.21 Lepol yarı kuru ızgara-fırın klinker üretim süreci [12].



Şekil 3.22. Yarı yaş klinker üretim süreci [12].

3.4.3. Kuru sistem

En yaygın kullanılan sistemdir. Farin tamamen kuru olarak hazırlanır ve çok kademeli siklonlarda ön ısıtıldıktan sonra kalsinatöre gönderilir. Burada CaCO_3 parçalanarak CaO ve CO_2 'ye dönüşür. Bu işlemle döner fırın yükü azalır ve enerji verimliliği artar. Kuru sistem, düşük emisyon, yüksek kapasite ve çevresel uyumluluğu ile Şekil 3.23'de de gösterildiği gibi günümüz çimento fabrikalarının tercih ettiği yöntemdir [5].

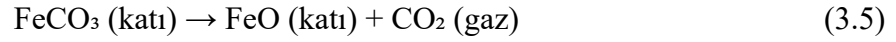
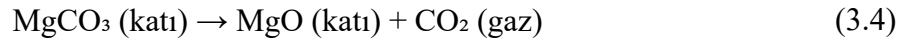
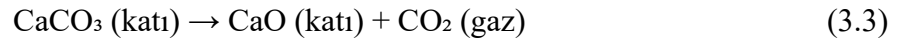


Şekil 3.23. Kalsinatör sistemli çimento üretim süreci [12].

3.5. Çimento Sektöründe Karbon Oluşumu

3.5.1. Karbon emisyonunun kaynağı

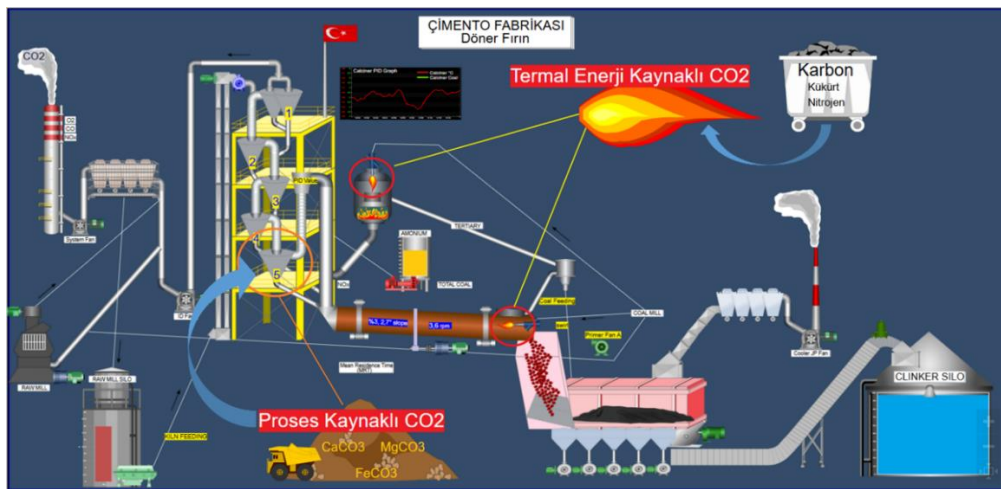
Çimento üretimi, IEA'ya göre küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %7-8'inden sorumlu olan enerji yoğun bir sanayi koludur [13]. Emisyonun temel kaynakları, kullanılan fosil yakıtların yakılması ve kireçtaşı gibi hammaddelerin (karbonatların) pişirilmesi sürecinde gerçekleşen kalsinasyon reaksiyonudur. Bu süreçte CaCO_3 gibi karbonatlar, ısı etkisiyle Eşitlik 3.3, 3.4 ve 3.5'de de gösterildiği gibi CaO , magnezyum oksit (MgO), demir oksit (FeO) ve CO_2 gazına ayrışır.



Bu reaksiyon, çimento üretiminden kaynaklanan toplam emisyonun yaklaşık %60-65'ini oluştururken, kalan kısım ısıtma enerjisi tüketimiyle ilişkilidir.

3.5.1.1. Doğrudan karbon emisyonları

Çimento üretiminde ortaya çıkan doğrudan karbon emisyonları, üretim tesisinin sınırları içerisinde gerçekleşen ve doğrudan atmosfere salınan CO_2 gazı salımlarını ifade etmektedir. Bu emisyonlar, Şekil 3.24.'te de gösterildiği gibi esas olarak iki ana kaynaktan oluşmaktadır. Bunlar; proses kaynaklı emisyonlar ve termal (enerji kaynaklı) emisyonlardır. Bu emisyonlar, çimento sektörünün toplam sera gazı salımlarının çok büyük bir kısmını oluşturmaktadır ve çevresel etkilerin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.24. Çimento fabrikası CO_2 oluşumu (yazar tarafından PI Vision programında oluşturulmuştur).

- Proses Kaynaklı Emisyonlar

Proses kaynaklı emisyonlar, çimento üretiminin en temel aşamalarından biri olan kalsinasyon süreci sırasında ortaya çıkmaktadır. Bu süreçte, çimentonun ana hammaddesi olan CaCO₃, yaklaşık 850–950 °C sıcaklıkta ısıtılarak CaO ve CO₂ gazına ayrışır.

Bu dönüşüm, klinker üretiminin temelini oluşturur ve çimento sektörünün çevresel etkileri açısından en önemli süreçlerden biridir. Çünkü kimyasal yapı gereği her ton klinker üretiminde ortalama 0.53 ton CO₂, yalnızca bu kimyasal tepkime nedeniyle atmosfere salınmaktadır. Bu nedenle proses kaynaklı emisyonlar, sektörün toplam doğrudan emisyonlarının yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır. Bu emisyonlar yakıt türünden ya da enerji verimliliğinden bağımsız olarak meydana gelmektedir; dolayısıyla azaltılması için hammadde bileşimi optimizasyonu, klinker faktörünün düşürülmesi veya alternatif bağlayıcı maddelerin kullanımı gibi yapısal çözümler gerekmektedir [14].

- Termal (Enerji Kaynaklı) Emisyonlar

Çimento üretiminde doğrudan emisyonların ikinci büyük bileşeni, termal emisyonlardır. Bu emisyonlar, yüksek sıcaklıkların elde edilmesi amacıyla kullanılan fosil yakıtların yanması sonucu oluşmaktadır. Özellikle klinker üretiminde döner fırınlarda gereken 1400–1450 °C sıcaklıkların sağlanması için kömür, petrokok, doğal gaz gibi karbon yoğun yakıtların yakılması gerekmektedir. Yakıtların yanması sırasında atmosfere CO₂ salınır ve bu da çimento sektörünün doğrudan emisyonlarının yaklaşık %30–40'ını oluşturmaktadır. Aşağıda, yakıtın tam yanma reaksiyonu Eşitlik 3.6'te gösterilmiştir.



3.5.1.2. Dolaylı karbon emisyonları

Dolaylı emisyonlar, üretim sürecinde kullanılan elektrik enerjisi ve yardımcı ekipmanlardan kaynaklanmaktadır. Özellikle çimento değirmenlerinde kullanılan elektrik tüketimi, emisyon açısından önemli bir etkidir. Ayrıca, taşıma, ambalajlama ve yardımcı hammadde üretimi gibi faaliyetler de dolaylı emisyonlar arasında yer almaktadır [15].

3.5.2. Kullanılan yakıtın emisyon üzerindeki etkisi

Çimento üretiminde geleneksel olarak kömür, petrokok ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Ancak emisyon azaltım stratejileri doğrultusunda rdf ve biyokütle kaynaklı enerji kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Biyokütle kaynaklı enerji kullanıldığında, CO₂

emisyonlarının bir kısmı "nötr" kabul edilmekte ve toplam emisyon değerinden düşülmektedir. Yakıt türü ve ısıl verimlilik, ton başına düşen CO₂ emisyonunu doğrudan etkilemektedir.

Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi (The World Business Council for Sustainable Development - WBCSD) standartına göre, çimento sektöründe CO₂ emisyonlarının ölçümü ve raporlanmasına yönelik metodolojik çerçeveyi sunmaktadır. Özellikle doğrudan (kalsinasyon) ve dolaylı (enerji kaynaklı) emisyonların ayırımı bu standartta detaylandırılmıştır.

3.5.3. Klinker oranının emisyon etkisi

Çimento içerisinde kullanılan klinker oranı, ürün başına düşen karbon miktarını belirleyen önemli bir parametredir. Klinker oranı düştükçe, çimentonun bağlayıcılık özelliğini koruyan ancak daha düşük karbon ayak izine sahip katkı maddeleri (uçucu kül, tras, cüruf vb.) devreye girmektedir. Bu işlem ile birim çimento başına düşen emisyon miktarının azaltılması sağlanmaktadır [26].

3.5.4. Emisyonların azaltılmasına yönelik uygulamalar

Emisyonların azaltılmasına yönelik başlıca uygulamalar şu şekildedir [48] :

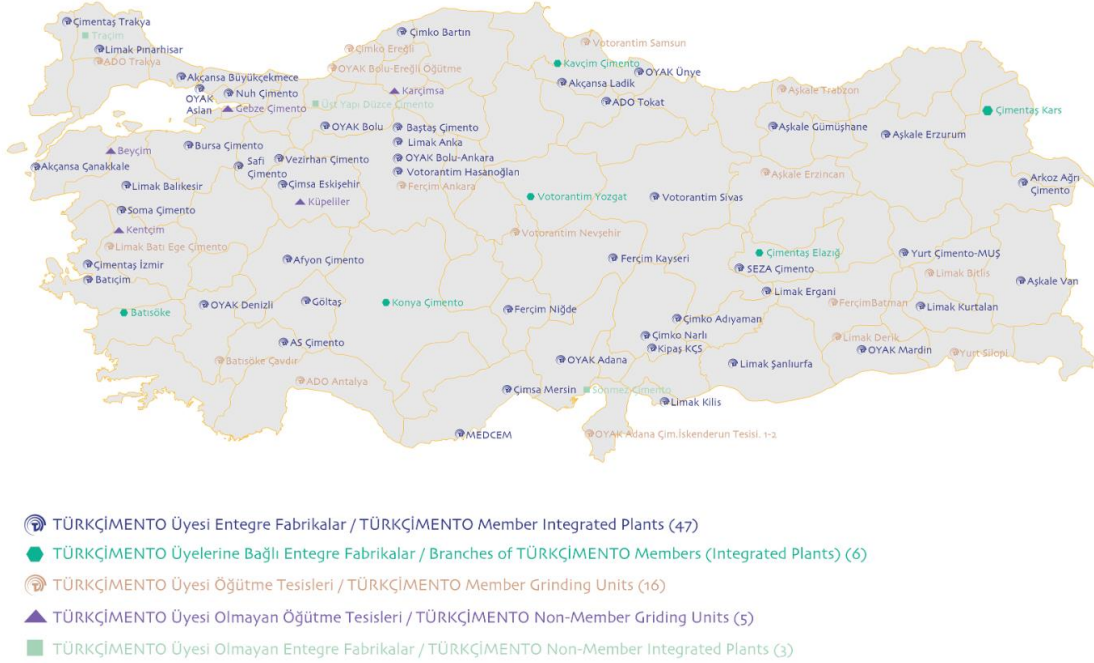
- Enerji verimliliğinin artırılması (Ön ısıtıcı ve kalsinatör sistemleri, WHR),
- Alternatif yakıt ve hammaddelerin kullanımı,
- Klinker oranının düşürülmesi,
- Karbon yakalama ve depolama (Carbon Capture and Storage - CCS) teknolojileridir.

Bu uygulamalar, Paris Anlaşması gibi uluslararası taahhütlerin yerine getirilmesi ve karbon vergisi gibi regülasyonlara uyum sağlanması açısından kritik rol oynamaktadır.

3.6. Türkiye Çimento Sektörü ve Emisyon Durumu

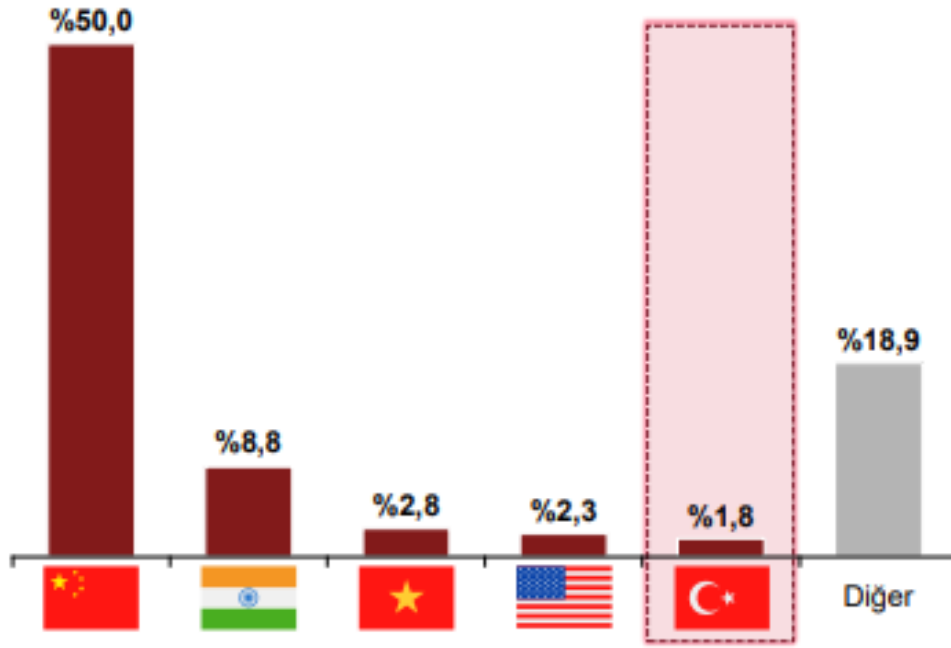
Türkiye, Avrupa'nın en büyük ve dünyanın beşinci en büyük çimento üreticisi konumunda olduğu gösterilmektedir. Ülke genelinde Şekil 3.25.'de de gösterildiği gibi yaklaşık 77 adet entegre ve öğütme tesisi faaliyet göstermekte olup 2022 yılı itibarıyla

klinker üretim kapasitesi 81 milyon ton, çimento üretim kapasitesi ise 120 milyon ton düzeyinde olduğu ifade edilmiştir. Bu üretim hacmi, çimento sektörünü Türkiye'nin en enerji yoğun ve en fazla sera gazı salımı yapan sanayi kollarından biri haline getirmiştir [16, 41].

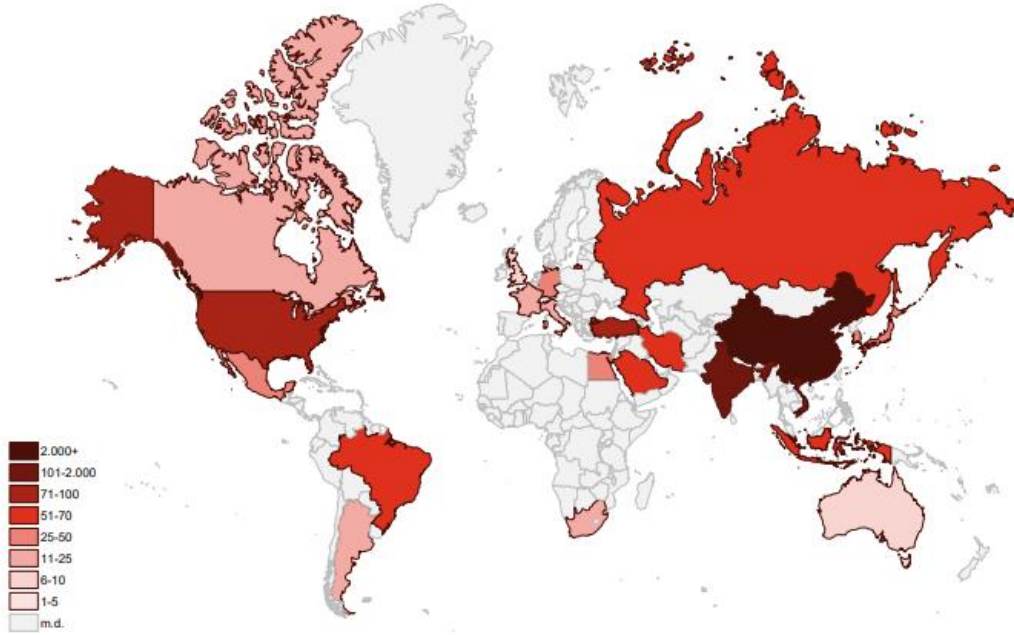


Şekil 3.25. Türkiye çimento fabrikaları haritası [4, 41].

Aşağıda, Şekil 3.26. ve Şekil 3.27.'de Dünya Çimento üretimi ve Türkiye'nin yüzdelik dilimi gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Dünya’da en çok çimento üreten ülkeler, % (2022) [16].

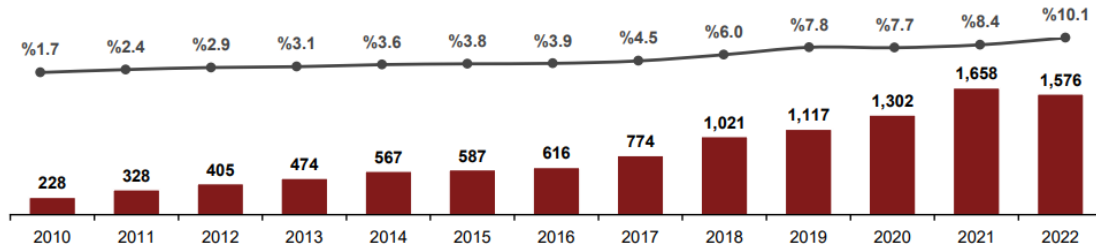


Şekil 3.27. Dünya çimento üretimi dağılımı, 2022 (mn ton) [16].

Türkiye’de çimento sektörü, 2014 yılında yürürlüğe giren "Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Tebliği" çerçevesinde Kapsam 1 emisyonlarını zorunlu olarak raporlamaktadır [18]. Bu kapsamda, çimento fabrikalarının doğrudan proses ve enerji kullanımına bağlı emisyonları ölçülmekte ve raporlanmaktadır . Ancak Kapsam 2 (elektrik

tüketimi kaynaklı) ve Kapsam 3 (tedarik zinciri, taşıma, atık gibi dolaylı) emisyonlarının izlenmesi hâlen gönüllülük esasına dayalı olup henüz tüm firmalar tarafından bütüncül bir şekilde uygulanmamaktadır.

Son yıllarda, Türkiye çimento sektörü karbon azaltım stratejileri geliştirme konusunda önemli adımlar atılmaktadır. Pwc tarafından hazırlanan 2024 tarihli "Türkiye Çimento Sektörü İçin Düşük Karbonlu Yol Haritası" raporunda, sektörün 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşabilmesi için enerji verimliliği, alternatif yakıt kullanımı ve karbon yakalama teknolojilerinin entegrasyonu gibi stratejiler önerilmektedir. Özellikle Şekil 3.28.'de de gösterildiği gibi alternatif yakıt kullanımı, hem termal emisyonların azaltılması hem de fosil yakıtlara olan bağımlılığın düşürülmesi açısından kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir [3]. 2023 yılı itibarıyla Türkiye’de alternatif yakıt kullanım oranı %11 civarında olup, bu oranın 2030’a kadar %30’a çıkarılması hedeflenmektedir [16].

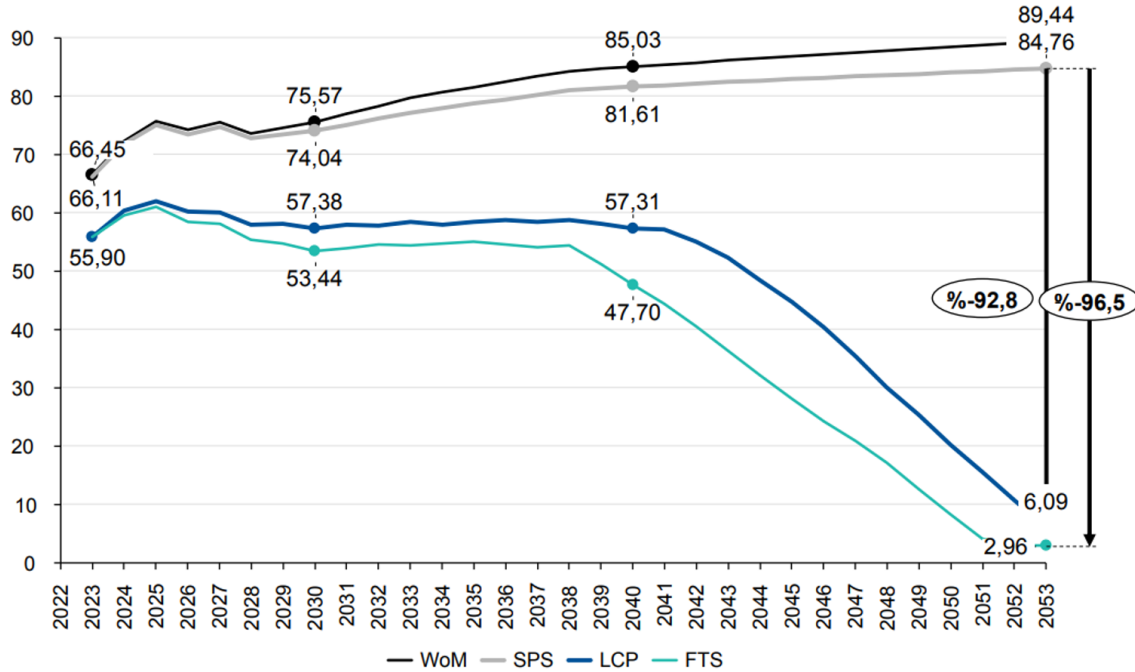


Şekil 3.28. Türkiye çimento sektöründe alternatif yakıt kullanımı (bin ton), ikincil yakıt ikame kalori (%) [16].

GCCA 2050 Yol Haritası'na paralel olarak Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÜRKCİMENTO) kendi sektörüne özgü stratejileri hayata geçirmiştir. Bu kapsamda, düşük karbonlu üretim tekniklerinin yaygınlaştırılması, klinker oranının azaltılması vb. ve dögüsel ekonomi ilkelerinin uygulanması hedeflenmiştir. Ayrıca, “Enerji Yoğun Sektörlerde Dekarbonizasyon” raporunda belirtildiği üzere, emisyon azaltımının sürdürülebilirliği için kamu ve özel sektör arasında iş birliğinin artırılması gerektiği vurgulanmaktadır [19, 21]. Aşağıda, Şekil 3.29.'da dekarbonizasyon için senaryo örnekleri verilmiştir.

- WoM : Azaltıcı Önlemlerin Öngörülmediği Senaryo
- SPS : İlave bir yeni teknoloji yatırımı öngörülmeyen Kararlaştırılmış Politikalar Senaryosu

- LCP : En düşük maliyetli ve optimal azaltım senaryosu olan Düşük Karbonlu Yol Haritası Senaryosu
- FTS : En İyi Teknolojiler Senaryosu



Şekil 3.29. Yıllara göre Türkiye toplam çimento sektörü kaynaklı emisyon projeksiyonları (kapsam 1 ve kapsam 2, milyon ton CO₂) [3].

Türkiye'nin ulusal iklim hedefleri doğrultusunda çimento sektörünün dekarbonizasyonu, sadece sektörel değil aynı zamanda ulusal ölçekte bir dönüşüm gerektirmektedir. Bu dönüşümün gerçekleştirilmesi için finansal teşvikler, mevzuat düzenlemeleri ve teknolojik yatırımların eş zamanlı olarak devreye alınması gerekmektedir.

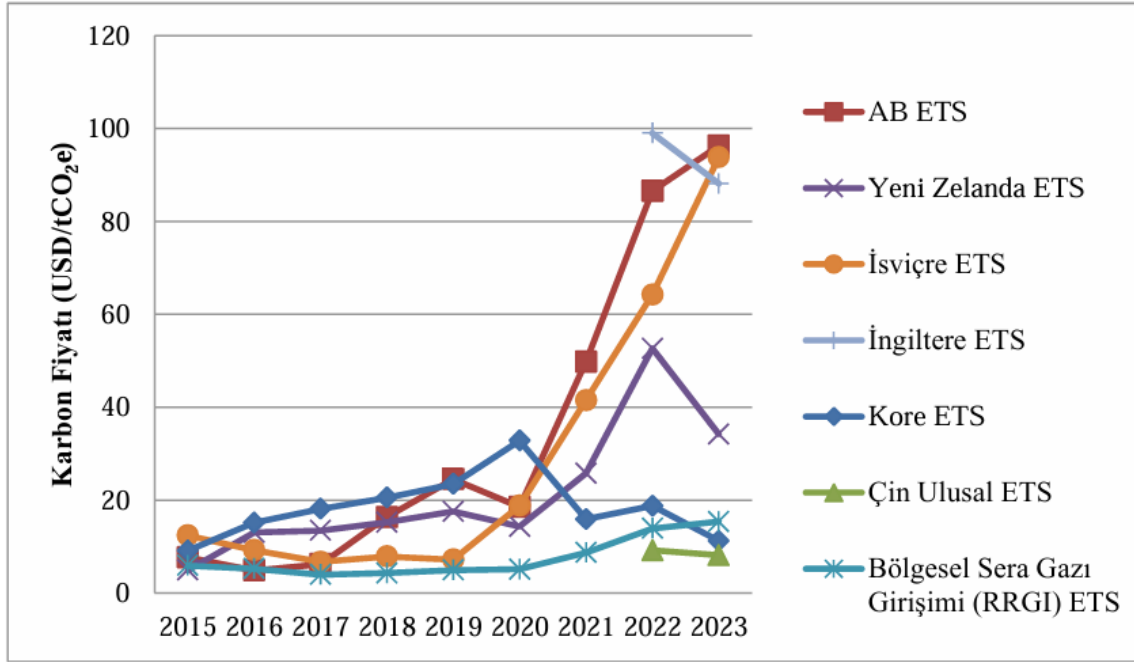
3.7. Karbon Vergisi Uygulamaları ve Etkileri

3.7.1. Karbon vergisi kavramı ve amaçları

Karbon vergisi, sera gazı emisyonlarını fiyatlandırarak azaltmayı hedefleyen piyasa temelli bir araç olduğu ifade edilmektedir. Bu vergilendirme yöntemi, emisyon kaynaklarına ekonomik bir yük getirerek çevresel maliyetleri içselleştirmeyi ve üreticileri daha az karbon yoğun teknolojilere yönlendirmeyi amaçlamaktadır [22].

Şekil 3.30'da gösterildiği gibi karbon fiyatlandırması, fosil yakıtların kullanımını sınırlandırarak enerji verimliliğini ve yenilenebilir enerjiye geçişi teşvik etmektedir. Karbon

vergisi emisyon azaltımına ek olarak kamu bütçesine gelir ve çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bir yapı oluşturmaktadır.



Şekil 3.30. Dünyada karbon fiyatı [22].

3.7.2. Emisyon ticareti sistemi ile karşılaştırma

Karbon vergisi, sabit bir fiyat mekanizması sunarken; ETS, emisyonları sınırlayan üst sınırlar koyarak piyasada karbon izinlerinin ticaretini sağlamaktadır. Literatürde her iki mekanizmanın avantajları ve sınırlılıkları detaylı biçimde analiz edilmiştir. Karbon vergisi, öngörülebilir maliyetler sunarken; ETS, emisyon miktarına doğrudan sınırlama getirerek çevresel hedeflere daha kesin ulaşım sağlayabilmektedir [1]. Uygulanan politika araçlarının etkinliği, ülkenin ekonomik yapısına, piyasa dinamiklerine ve sektörel özelliklere göre değişmektedir [22].

ETS Örnekleri: AB ETS ve Diğer Ülkeler

AB ETS :

- 2005'ten beri yürütülmektedir.
- Enerji, sanayi ve havacılık sektörleri dâhil edilmiştir.
- İzinler müzayede ile dağıtılır ya da geçmiş performansa göre ücretsiz verilmektedir.
- 2023 itibarıyla AB ETS fiyatları 90-100 €/ton CO₂ civarında seyretmektedir.
- AB'deki çimento sektörü bu sistemden doğrudan etkilenmektedir.

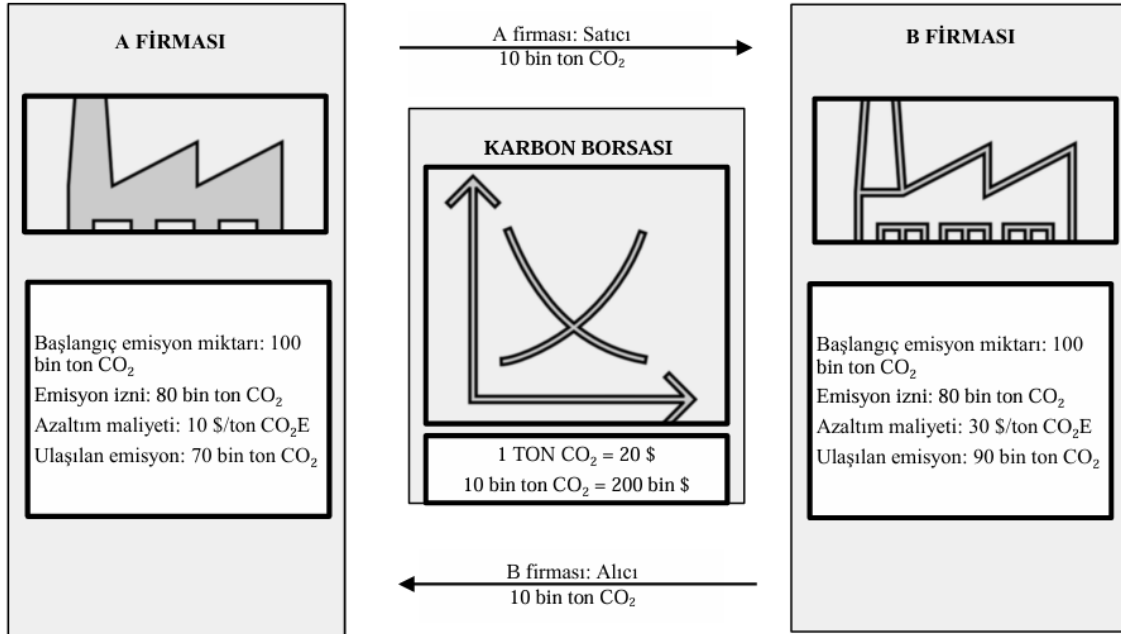
Güney Kore ETS:

- 2015'te başlatılmıştır.
- Enerji, çimento, çelik gibi sektörleri kapsamaktadır.
- Firmalara verilen izin miktarları zamanla düşürülmektedir.
- Ayrıca performansa dayalı tahsis mekanizmaları yer almaktadır.

Çin ETS:

- Dünya'nın en büyük ETS'sine sahip olup, 2021'de başlanmıştır.
- Başlangıçta enerji sektörüne odaklanmıştır.
- Emisyon yoğunluğuna göre tahsis yapılmakta, yani üretim arttıkça izin miktarı da artabilmektedir.

Örnek ETS işleyiş sistemi aşağıda anlatılmıştır :



Şekil 3.31. ETS işleyişi [22].

İlk olarak, devlet veya ilgili düzenleyici kurum tarafından her bir tesise belirli miktarda “emisyon izni” tahsis edilmiştir. Bu izinler, söz konusu tesisin belirlenen dönemde atmosfere salabileceği toplam CO₂ miktarını temsil etmektedir. Eğer bir tesis, tahsis edilen bu hakkın altında kalırsa, daha az emisyon salarsa, elindeki fazla izinleri Şekil 3.31.’de de gösterildiği gibi ETS piyasasında satabilmektedir. Öte yandan, tahsis edilen kotayı aşan tesisler, fazla salım yaptıkları miktarı dengelemek için piyasadaki izin satın alması gerekmektedir. Bu

şekilde “kirleten öder” prensibi işletilerek çevresel sorumluluk finansal yükümlülüğe dönüştürülmesi hedeflenmektedir [22].

Bu sistemin işleminde piyasa mekanizması büyük rol oynamaktadır. Emisyon izinlerinin fiyatı arz-talep dengesine göre oluşur ve fiyat sinyalleri sayesinde işletmeler daha az karbon salacak teknolojilere yönelme konusunda teşvik edilmektedir. Böylece ETS hem çevresel hem ekonomik bir araç işlevi görmektedir. Toplam emisyon miktarını sınırlanırken, diğer yandan karbonun ekonomik bir maliyet unsuru haline gelmesi sağlanmaktadır. Bu örnek Türkiye için de önemli bir model niteliği taşımaktadır. ETS altyapısına geçildiğinde çimento gibi enerji yoğun sektörler karbon maliyetiyle tanışacak ve karbon azaltımına yönelik yatırımların önemi artması hedeflenmektedir [22].

3.8. Türkiye’de Karbon Vergisi Yaklaşımları

Türkiye’de henüz doğrudan bir karbon vergisi uygulanmamakla birlikte, emisyon ticareti sistemine yönelik hazırlıklar ve karbon fiyatlandırma stratejileri gündemde oluşturmaktadır. Türkiye’nin Paris Anlaşması’na taraf olması ve 2053 net sıfır emisyon hedefi, karbon vergisi benzeri ekonomik araçların uygulanma potansiyelini artırmıştır [3].

2021 yılında yayımlanan “İklim Şurası Raporu”nda, karbon fiyatlandırmasının yasal ve kurumsal çerçevesi tartışılmış ve özel sektörün bu sisteme entegrasyonu üzerinde durulmuştur.

3.8.1. Karbon vergisinin çimento sektörüne etkileri

Çimento sektörü, yüksek enerji tüketimi ve proses kaynaklı CO₂ emisyonları nedeniyle karbon vergisinin en fazla etkileyeceği sektörler arasında yer almaktadır. Özellikle klinker üretiminde ortaya çıkan doğrudan emisyonlar, karbon maliyetlerini ciddi şekilde arttırabilmektedir. Bu durum, sektörün alternatif bağlayıcı maddelere yönelmesi, atık ısı geri kazanımı ve alternatif yakıt kullanımı gibi önlemlerle maliyet azaltıcı stratejiler geliştirmesini zorunlu kılmaktadır [23].

Ayrıca, karbon maliyetinin ürün fiyatlarına yansımaları da rekabet gücü açısından sektör için bir tehdit oluşturabilmektedir.

3.8.2. Uygulama ve geleceğe yönelik perspektifler

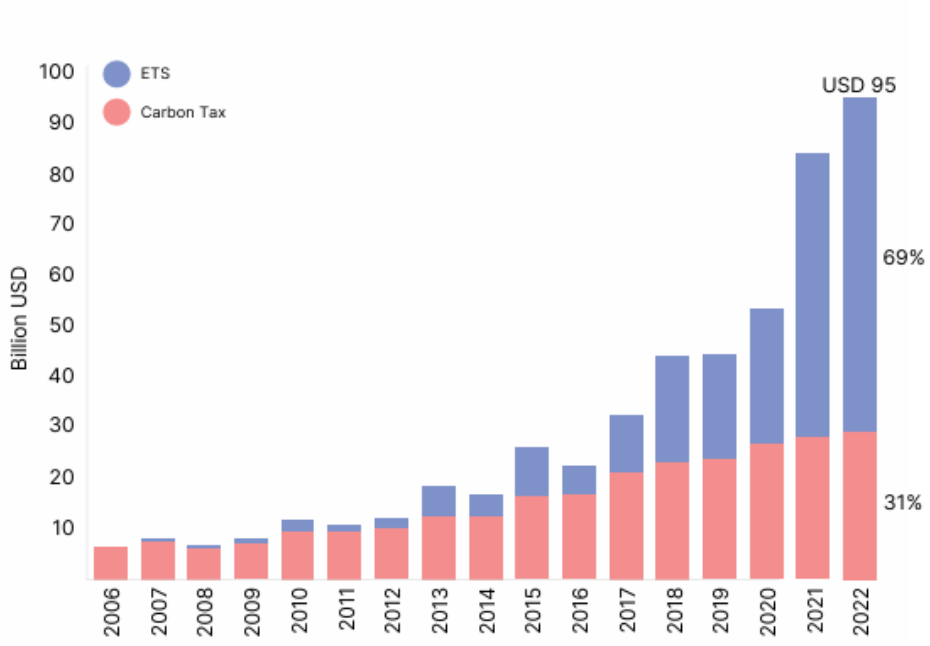
Karbon vergisi uygulamaları, çevresel hedeflere ulaşmak için oldukça etkili olmakla birlikte, sosyal ve ekonomik etkilerinin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Türkiye'nin bu alanda uluslararası örneklerden faydalanarak kendi karbon fiyatlandırma sistemini kurması ve bunu kademeli olarak hayata geçirmesi beklenmektedir [2].

Bu çerçevede özellikle çimento sektörü gibi enerji yoğun sektörler için geçiş destek mekanizmalarının (teknik destek, mali teşvikler, sınırda karbon düzenlemeleri) devreye alınması önem arz etmektedir.

- İsveç'te Karbon Vergisi

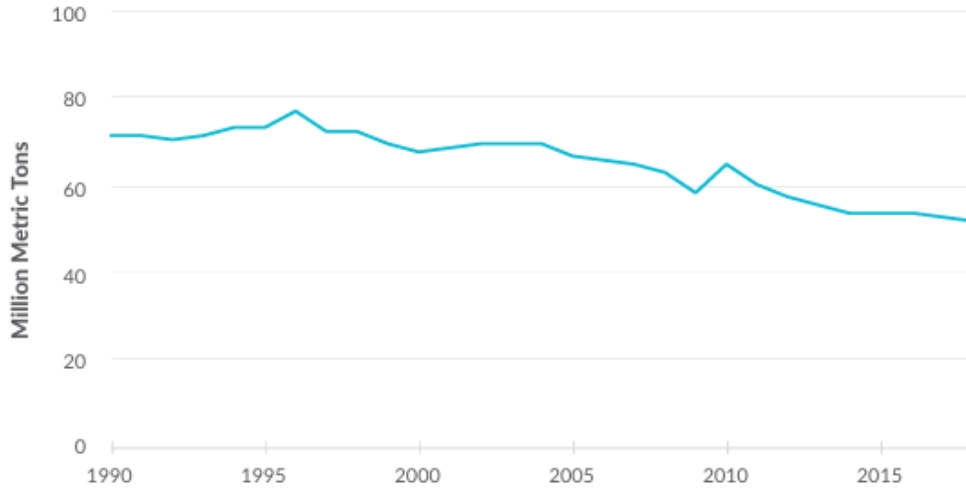
İsveç karbon vergisi uygulamaları açısından en dikkat çekici ülke olarak yer almaktadır. 1991 yılında karbon vergisini uygulamaya başlayan İsveç, bugün dünya genelinde en yüksek karbon vergisi oranına sahip ve Şekil 3.32.'de de gösterildiği gibi ETS ticareti yapan ülkelerden birisi olarak yer almaktadır. 2023 yılı itibarıyla karbon vergisi yaklaşık 130 Euro/ton CO₂ seviyesine ulaşmıştır [24, 25].

İsveç, bu yüksek fiyatlandırma seviyesine rağmen hem ekonomik büyümeyi hem de emisyon azaltımını sürdürebilmiştir. Uygulama kapsamına enerji sektörü ve sanayi dahil edilmiş, ancak bazı sektörler kademeli olarak daha düşük oranlarda vergilendirilmiştir. İsveç örneği, Şekil 3.33.'de de görüldüğü üzere karbon vergisinin çevre dostu yatırımların teşvikinde ve enerji verimliliğinin artırılmasında ne derece etkili olabileceğini göstermektedir [25].



Şekil 3.32. İsveç'in yıllara göre ets ve karbon vergisi yüzdesi [24].

Greenhouse Gas Emissions in Sweden in CO₂-Equivalents, 1990-2018



Şekil 3.33. İsveç'in yıllara göre CO₂ emisyonu [25].

4. KAPSAMLAR VE CO₂ HESAPLAMA YÖNTEMİ

4.1. Kapsamlara Göre Emisyon Sınıflandırması

Çimento üretiminden kaynaklanan karbon emisyonlarının doğru, izlenebilir ve uluslararası standartlara uygun biçimde raporlanması; sürdürülebilirlik hedeflerinin izlenmesi, karbon azaltım politikalarının etkinleştirilmesi ve emisyon ticareti gibi çevresel yükümlülüklerin yerine getirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, çimento sektöründe CO₂ emisyonlarının hesaplanması ve raporlanması için yaygın olarak kullanılan iki temel mevzuat bulunmaktadır. Bunlardan ilki, GCCA tarafından yayımlanan “Cement CO₂ and Energy Protocol” [20], ikincisi ise Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından hazırlanan ve yasal zorunluluk içeren “Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ”i olarak yer almaktadır [18].

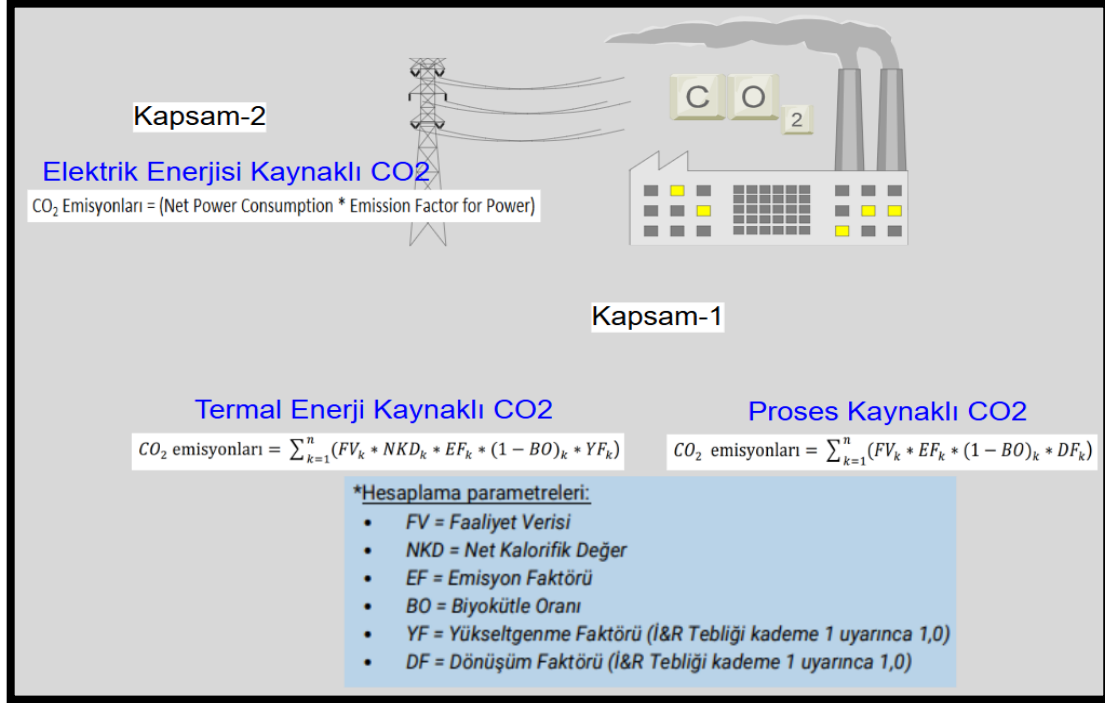
Sera gazı emisyonları, kaynağına ve kontrol edilebilirliğine göre üç temel kapsamda değerlendirilmektedir [20].

Kapsam 1 – Doğrudan Emisyonlar: Tesis sınırları içinde gerçekleşen ve doğrudan kontrol edilebilen emisyonlar bu kapsamda incelenmektedir. Çimento üretimi özelinde bu kapsama, kalker gibi karbonat içeriği yüksek hammaddelerin kalsinasyonu (proses kaynaklı emisyon) ve fosil yakıtların pişirme fırınlarında yakılması sonucu oluşan termal kaynaklı emisyonlar dahil edilmektedir [20]. Bu tez çalışmasında hem proses hem de termal emisyonlar bu kapsam altında değerlendirilmiş ve doğrudan tahminlenmiştir.

Türkiye’de 2014 yılından bu yana yürürlükte olan Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ (Resmî Gazete, 29003) kapsamında, tesislerin doğrudan sera gazı emisyonlarını raporlaması yasal zorunluluk haline getirilmiştir [18].

Kapsam 2 – Dolaylı Enerji Emisyonları: Tesisin dış tedarikçilerden sağladığı elektrik, buhar gibi enerjilerin kullanımından doğan dolaylı emisyonlar arasında yer almaktadır. Elektrik tüketimi ile elektrik üretimindeki emisyon faktörünün çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Bu kapsamda hesaplama yapılmamış, ancak veri erişimi ve güvenilirliği nedeniyle gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliği gereği dolaylı enerji emisyonlarının raporlanması zorunlu olmayıp raporlama önerilmektedir [20]. Aşağıda, Şekil 4.1.'de Kapsam 1 ve Kapsam 2'nin hesaplama parametreleri yer almaktadır.



Şekil 4.1. Kapsamlara göre CO₂ hesaplamaları (yazar tarafından oluşturulmuştur).

Kapsam 3 – Diğer Dolaylı Emisyonlar: Tedarik zinciri, taşımacılık, atık yönetimi gibi faaliyetlerden kaynaklanan dolaylı emisyonları kapsamaktadır. Hammadde taşımaları, dış hizmet araçları veya satış sonrası süreçlerde oluşan emisyonlar bu kapsama girmektedir. Çimento sektörü özelinde diğer dolaylı emisyonların kapsamı daha karmaşık bir izleme gerektirdiğinden ve buna istinaden güvenilir olmadığından tez kapsamına dahil edilmemiştir. Türkiye’de yasal zorunluluğu bulunmamaktadır [18]. Kapsam zorunlulukları aşağıda Tablo 4.1. de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Türkiye’de kapsamların uygulanabilirliği (yazar tarafından oluşturulmuştur).

Kapsam	Türkiye’de Durum	Yasal Zorunluluk	Açıklama
1 (Doğrudan)	Uygulanıyor.	✓ Evet	Sanayi tesislerinde zorunlu.
2 (Dolaylı)	Kısmen uygulanıyor.	⚠ Önerilir	Enerji tüketimi takibi var.
3 (Diğer Dolaylı)	Gönüllü.	✗ Hayır	Şirket inisiyatifine bağlı.

Bu çalışmada verilerin temin zorluğu, yasal zorunluluk durumu ve güvenilirliği düşük olması sebebiyle hesaplamalarda Kapsam 2 ve Kapsam 3 tercih edilmemiştir.

4.2. Veri Toplama Süreci

Bu çalışmada kullanılan veri setine, Microsoft Access tabanlı bir platform olan Estatica Fabril programı aracılığıyla ulaşılmıştır. Söz konusu sistem, yapılandırılmış sorgu dili (Structured Query Language - SQL) veri tabanına entegre bir yapıya sahip olup, kullanıcı girdilerini arka planda otomatik işleyerek verilerin dinamik biçimde işlenmesini sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde, geçmiş dönemlere ait proses ve termal ısı enerjisi tüketim, üretim vb. verileri belirli tarih aralıklarında hızlı, güvenilir ve esnek bir şekilde düzenlenebilmektedir.

Yukarıdaki yapı sayesinde sistem, her ay ve yıla ait tanımlı metrikleri otomatik olarak SQL tabanından çekerek modellemeye hazır hale getirmektedir. Bu çalışmada hesaplama ve modelleme sürecinde kullanılan başlıca değişkenler aşağıda yer almaktadır:

- Klinker üretimi için net farin tüketimi (ton)
- Sirkülasyon tozu (ton)
- Atık ikame oranı (%)
- Biomass ikame oranı (%)
- Çimento üretiminde klinker kullanımı (%) (K/Ç%)
- Çimento satışı (ton)
- Fırın ortalama ekipman verimi (%) (OEE %)

- Sezonallite faktörü (%)
- Isı tüketimi (kcal/kg klinker)
- Klinker üretimi (ton)
- Termal yaş kalorifik güç (kcal/kg)
- Yaş termal tüketimler (ton)

Bu değişkenlerin bazılarının yardımıyla Kapsam-1'e göre oluşturulan veri seti, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde CO₂ emisyon tahmini için modellenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan 2019–06/2025 dönemine ait üretim ve CO₂ emisyon verileri, şeffaflık ve yeniden üretilebilirliği sağlamak amacıyla çevrimiçi bir veri arşivinde paylaşılmıştır [63].

4.3. Emisyon Hesaplama Metodolojisi

GCCA Protokolü ve İzleme ve Raporlama (İ&R) Tebliği doğrultusunda CO₂ emisyonları, proses kaynaklı ve termal kaynaklı olmak üzere iki ana kaynak üzerinden hesaplanmaktadır [18, 20].

4.3.1. Proses kaynaklı CO₂ emisyonları

Proses kaynaklı CO₂ emisyonları, kalsinasyon sürecinde CaCO₃ gibi karbonat içeren hammaddelerin ısıtılarak CaO ve CO₂'ye ayrışması sonucu ortaya çıkmaktadır.

Proses kaynaklı CO₂ emisyonları hesaplamalarında iki yöntem bulunmaktadır:

- Girdi Bazlı Yöntem (A Yöntemi)

A yöntemi, proses kaynaklı CO₂ emisyonlarının üretim sürecine giren hammaddeler üzerinden hesaplandığı bir yaklaşım olarak yer almaktadır. Bu yöntemde, net farin tüketimi, klinker üretimi ve proses emisyon faktörü gibi doğrudan izlenebilir üretim verileri kullanılarak CO₂ emisyon miktarı hesaplanmaktadır. Tesislerde net farin tüketimi, klinker üretimi gibi veriler düzenli olarak kaydedilmektedir. Yöntem kolay uygulanabilmekte, güvenilir ve mevzuatla uyumlu hareket etmektedir [18].

- Çıktı Bazlı Yöntem (B Yöntemi)

B yöntemi ise, klinker içeriğinde bulunan CaO oranının laboratuvar analizlerine dayalı olarak belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Emisyon miktarı, oluşan klinkerin kimyasal

bileşimi üzerinden hesaplanmaktadır. Ancak bu yöntemde sürekli analiz ihtiyacı ve veri temininde karşılaşılan operasyonel zorluklar nedeniyle, uygulamada A yöntemine göre daha sınırlı kullanılmaktadır [18].

Bu çalışmada, klinker üretiminden kaynaklanan proses kaynaklı CO₂ emisyonlarının hesaplanmasında, girdi bazlı A yöntemi esas alınmaktadır. A yönteminin tercih edilmesinin başlıca nedeni, üretim tesislerinde kullanılan faaliyet verilerinin (net farin tüketimi, klinker üretimi, emisyon faktörü vb.) düzenli olarak ölçülmesi ve sistematik şekilde kayıt altına alınabilmektedir. Bu durum, emisyon hesaplamalarının hem daha pratik hem de izlenebilir olmasını sağlamaktadır. Buna karşılık çıktı bazlı B yöntemi, klinker içeriğindeki CaO oranının laboratuvar analizlerine dayalı olarak belirlenmesini gerektirdiğinden, sürekli ve güvenilir veri temini açısından operasyonel zorluklar içermektedir. Ayrıca, Türkiye’de yürürlükte olan Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ [18] ile GCCA Cement CO₂ and Energy Protocol [20] gibi uluslararası metodolojik kaynaklar da çimento sektörü özelinde A yöntemini öncelikli yaklaşım olarak tanımlamaktadır. Bu nedenle, bu tez çalışmasında proses emisyonları, girdi bazlı hesaplama yöntemi ile hesaplanmaktadır. İlgili hesaplama, aşağıdaki Eşitlik 4.1’de genel formül üzerinden gerçekleştirilmektedir [18, s.53]:

$$CO_2 \text{ Emisyonları (proses)} = \sum_{k=1}^n (FV_k * EF_k * (1 - BO)_k * DF_k) \quad (4.1)$$

Formül ile ilgili parametrelerin tanımı Tablo 4.2.’de açıklanmıştır.

Tablo 4.2. Proses kaynaklı CO₂ emisyonu hesaplama formülünde kullanılan parametrelerin tanımı [18].

Sembol	Açıklama
FV_k (Faaliyet Verisi)	İlgili dönemde kullanılan karbonatlı hammadde miktarıdır. Genellikle net farin tüketimi (ton) olarak ifade edilir.
EF_k (Emisyon Faktörü)	Hammaddenin birim başına saldığı CO ₂ miktarını gösterir (ton CO ₂ / ton hammadde).
BO_k (Biyokütle Oranı)	Girdilerde biyokütle oranını gösterir. Proses emisyonlarında genellikle 0 kabul edilir.
DF_k (Dönüşüm Faktörü)	Genellikle 1 olarak alınır. Kimyasal dönüşüm oranına göre düzeltme yapılabilir.
k	Her bir hammadde türünü veya veri dönemini temsil eder.
n	Toplam veri veya hesaplama adedi.

4.3.2. Termal (yakıt) kaynaklı CO₂ emisyonları

Termal emisyonlar, çimento pişirme sürecinde kullanılan yakıtların yanması sonucu oluşan doğrudan emisyonlar olarak ifade edilmektedir. Yakıt türüne göre değişen emisyon faktörleri ve net kalorifik değerler kullanılarak hesaplanmaktadır. Formül aşığıda yer almaktadır [18 s.53, 20]. Eşitlik 4.2’de formülde kullanılan parametrelerin tanımı Tablo 4.3.’tedir.

$$CO_2 \text{ Emisyonları (termal)} = \sum_{k=1}^n (FV_k * NKD_k * EF_k * (1 - BO)_k * YF_k) \quad (4.2)$$

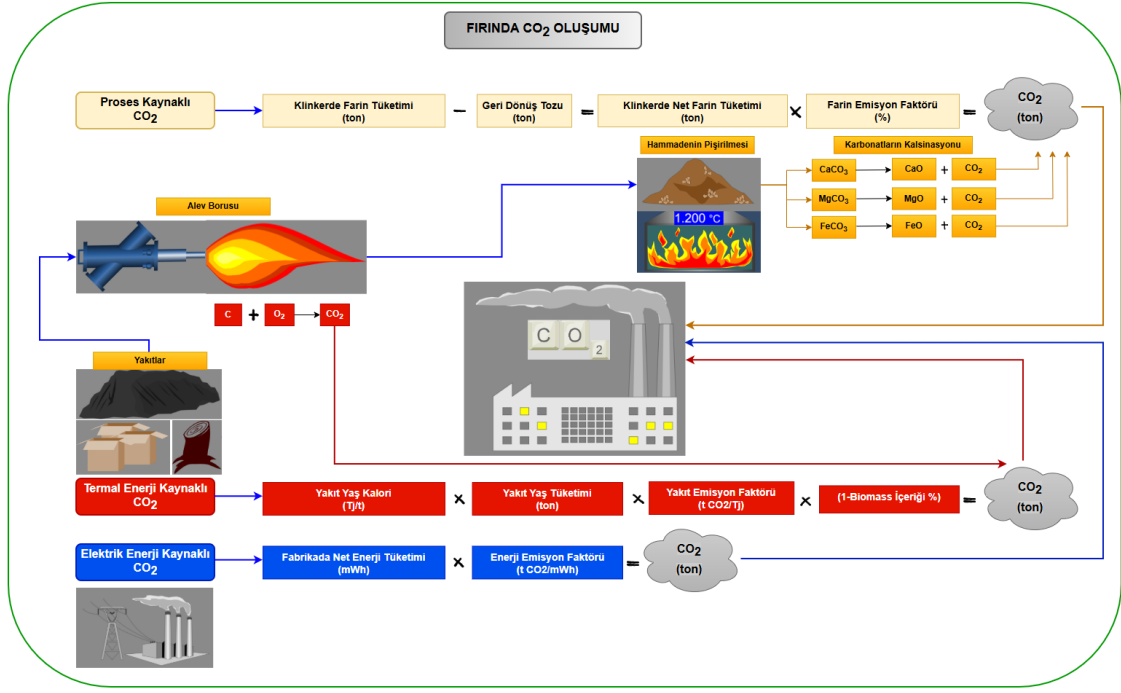
Tablo 4.3. Termal kaynaklı CO₂ emisyonu hesaplama formülünde kullanılan parametrelerin tanımı [18].

Sembol	Açıklama
FV_k (Faaliyet Verisi)	İlgili dönemde tüketilen fosil yakıt miktarıdır. Genellikle ton veya Nm ³ cinsindedir.
NKD_k (Net Kalorifik Değer)	Yakıtın birim başına sağladığı enerji miktarıdır (GJ/ton veya GJ/Nm ³).
EF_k (Emisyon Faktörü)	Yakıtın yanmasıyla ortaya çıkan CO ₂ miktarıdır (ton CO ₂ / GJ).
BO_k (Biyokütle Oranı)	Yakıtın içindeki biyokütle yüzdesidir. Biyokütle oranı emisyon hesabından düşülür.
YF_k (Yükseltgenme Faktörü)	Yakıtın tam oksitlenme oranını gösterir. Genellikle 1 alınır.
k	Her bir yakıt türünü veya veri dönemini temsil eder.
n	Toplam veri noktası veya kullanılan yakıt çeşidi sayısıdır.

4.4. Toplam CO₂ Emisyon Hesaplaması

Çimento fabrikasında 2019–2025 (ilk 6 ay) yılları arasında gerçekleşen toplam CO₂ emisyonları hesaplanmıştır. Hesaplama sürecinde, hem kalsinasyon sonucu oluşan proses kaynaklı hem de fırınlarda fosil yakıtların yanması sonucu oluşan yakıt (termal) kaynaklı CO₂ emisyonları ayrı ayrı ele alınmış ve yıllık bazda toplam emisyon miktarları ortaya konulmuştur.

Hesaplamalarda kullanılan faaliyet verileri, ilgili yıllara ait net farin tüketimi, klinker üretimi, yaş yakıt tüketimi, net yaş kalorifik değer ve emisyon faktörlerine dayanmaktadır. Bu veriler Estatica sistemi üzerinden SQL veri tabanı aracılığıyla temin edilmiş ve GCCA Protokolü ve İ&R Tebliği esaslarına uygun formüllerle işlenmiştir [18, 20]. Böylece, hem geçmiş performansın ortaya konulması hem de ileriye dönük tahminlerin kalibrasyonu açısından temel bir veri seti oluşturulmuştur. Döner Fırında oluşan CO₂ oluşumu ile ilgili parametreler Şekil 4.2.'de yer almaktadır.



Şekil 4.2. Döner fırında CO₂ formasyonu (yazar tarafından oluşturulmuştur).

4.4.1. Proses kaynaklı CO₂ hesaplaması

Proses kaynaklı CO₂ emisyonlarının hesaplanmasında, biyokütle oranı 0 ve düzeltme faktörü 1 olarak alındığında, klinker üretimi için tüketilen net farin miktarı ile proses emisyon faktörünün çarpımı esas alınmaktadır. Bu yöntem, girdi bazlı A yöntemi olarak adlandırılmakta olup, bu çalışmada da tercih edilen yöntem olarak belirlenmiştir [18].

Aşağıda, Mart 2023 ve Eylül 2024 dönemlerine ait proses kaynaklı CO₂ emisyon miktarları örnek olarak hesaplanmıştır.

- Mart 2023 Dönemi Hesaplamalar :

Proses kaynaklı CO₂ emisyonu, Eşitlik 4.1'deki genel formül ve bu formülün sadeleştirilmiş hali olan Eşitlik 4.3'e dayanarak, Eşitlik 4.4'te hesaplanmıştır. Eşitlik 4.4.'te kullanılan hesaplama verileri, aynı döneme ait proses kaynaklı CO₂ emisyonunun A yöntemi ile hesaplanan Tablo 4.4.'deki veri setinden alınmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ proses} = \text{Net Farin Tüketimi (ton)} \times \text{Proses Emisyon faktörü (t CO}_2\text{/t)} \times 1 - \text{BO} \times \text{DF} \quad (4.3)$$

Tablo 4.4. 2023 yılı Mart ayına ait proses verileri ve hesaplanan CO₂ değerleri (yazar tarafından oluşturulmuştur).

2023 Yılı Mart Ayı Proses Kaynaklı Veri Seti	Net Farin Tüketimi (ton)	Farin Tüketimi (ton)	Sirkülasyon Tozu (ton)	Sirkülasyon Tozu (%)	Proses Emisyon Faktörü (t CO ₂ /t)	Proses Kaynaklı CO ₂ (ton)
Mart	42323,9	45131,0	2807,1	0,062	0,340	14398,6

$$CO_2 \text{ Mart } 2023 = 42.324 \text{ ton} \times 34,02 \text{ t } CO_2/t \times 1 \times 1 = 14.399 \text{ ton } CO_2 \quad (4.4)$$

- Eylül 2024 Dönemi Hesaplamalar :

Bu döneme ait proses kaynaklı CO₂ emisyon hesaplamasında ise; Eşitlik 4.1'deki genel formül ve bu formülün sadeleştirilmiş hali olan Eşitlik 4.5'e dayanarak, Eşitlik 4.6'da hesaplanmıştır. Eşitlik 4.6.'da kullanılan hesaplama verileri, Tablo 4.5.'deki yöntem A ile hesaplanan veri setinden alınmıştır.

$$CO_2 \text{ proses} = \text{Net Farin Tüketimi (ton)} \times \text{Proses Emisyon faktörü (t } \frac{CO_2}{t}) \times 1 - BO \times DF$$

(4.5)

Tablo 4.5. 2024 yılı Eylül ayına ait proses verileri ve hesaplanan CO₂ değerleri (yazar tarafından oluşturulmuştur).

2024 Yılı Eylül Ayı Proses Kaynaklı CO ₂ Veri Seti	Net Farin Tüketimi (ton)	Farin Tüketimi (ton)	Sirkülasyon Tozu (ton)	Sirkülasyon Tozu (%)	Proses Emisyon Faktörü (t CO ₂ /t)	Proses Kaynaklı CO ₂ (ton)
Eylül	124220,6	134307,1	10086,5	0,075	0,336	41775,4

$$CO_2 \text{ Eylül } 2024 = 124.221 \text{ ton} \times 33,63 \text{ t } CO_2/t \times 1 \times 1 = 41.775 \text{ ton } CO_2 \quad (4.6)$$

Hesaplamalarda kullanılan proses emisyon faktörü, hammaddenin birim başına açığa çıkardığı CO₂ miktarını ifade etmektedir. Bu değer, her 50.000 ton üretim için en az yılda dört kez alınan numunelerin laboratuvar analizleri sonucunda belirlenmekte ve yıl boyunca bir kez güncellenmesi gerekmektedir [18].

Klinker Üretimi için tüketilen farin miktarından sirkülasyon toz miktarı düşülerek, net farin miktarı bulunmaktadır. Çünkü bu toz geri dönen ve sistemde kalan miktarı temsil etmektedir.

Sirkülasyon tozu, klinker üretimi sırasında fırın sisteminde oluşan ve prosesten sürekli olarak döngüye girip çıkan ince toz parçacıkları oluşmaktadır. Genellikle kalsinasyon bölgesinden veya soğutucudan çıkan gazlarla birlikte taşınan bu tozlar, içerdikleri alkali, kükürt ve klor gibi bileşenler nedeniyle sistemde birikmekte ve dengesizlik yaratabilmektedir. Eşitlik 4.7 ve Eşitlik 4.8’de farin tüketimi miktarından sirkülasyon tozu miktarı çıkarılarak net farin tüketimi hesaplanmıştır.

$$\text{Net Farin Tüketimi} = \text{Farin Tüketimi (ton)} - \text{Sirkülasyon tozu (ton)} \quad (4.7)$$

Eylül 2024 dönemi için Net Farin tüketimi hesaplaması Tablo 4.5.’de veri seti kullanılarak Eşitlik 4.8’deki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Net Farin Tüketimi} = 134.307 - 10.086 = 124.221 \text{ ton} \quad (4.8)$$

4.4.2. Termal kaynaklı CO₂ hesaplaması

Termal kaynaklı CO₂ emisyonların hesaplamasında yakıt tüketimi, yakıtın yaş kalorifik değeri, emisyon faktörü, biyokütle oranı ve yükseltgenme faktörü temel alınmaktadır. Termal emisyonlar, Eşitlik 4.2’deki formül ve bu formülün sadeleştirilmiş hali olan Eşitlik 4.9’da da gösterildiği gibi aşağıdaki genel formül ile hesaplanmaktadır [18]:

$$\text{CO}_2 \text{ termal} = \text{Yaş Yakıt Tüketimi (ton)} \times \text{Yaş Kalorifik Değer (Tj/t)} \times \text{Emisyon faktörü (t CO}_2\text{/Tj)} \times 1 - \text{BO (\%)} \times \text{YF} \quad (4.9)$$

Yakıt kalorifik değeri verileri sıklıkla kcal/kg cinsinden raporlanmaktadır. Bu değerlerin standart enerji birimine (GJ/ton) dönüştürülmesinde 1 kcal = 4,184 joule dönüşüm katsayısı esas alınmakta ve sonuçlar 1.000.000’a bölünerek TJ/ton veya GJ/ton cinsine çevrilmektedir.

Termal kaynaklı CO₂ emisyonlarının hesaplanmasında IPCC ve Sera Gazı Emisyonları İzleme ve Raporlama Tebliği doğrultusunda önerilen yakıt bazlı emisyon faktörleri (tCO₂/TJ) esas alınmıştır. Yakıt tipi özelinde fabrika tarafından beyan edilen değerler öncelikli olarak dikkate alınmış, emisyon faktörleri mevcut değilse Şekil 4.3.’te de gösterilen default katsayılar kullanılmıştır [18, 20].

Name	Unit	Value	Comment
diesel oil	kg CO ₂ /GJ	74,1	
natural gas (dry)	kg CO ₂ /GJ	56,1	
oil shale	kg CO ₂ /GJ	107	
lignite	kg CO ₂ /GJ	101	
gasoline	kg CO ₂ /GJ	69,3	
Alternative fossil fuels			
waste oil	kg CO ₂ /GJ	74	Based on measurements compiled by former WBCSD/CSI Task Force 1. See Guidance Document, Appendix 4 for details.
tyres	kg CO ₂ /GJ	85	Best estimate of former WBCSD/CSI Task Force 1
tyres - % biomass	% biomass	27,0%	Best estimate of former WBCSD/CSI Task Force 1
plastics	kg CO ₂ /GJ	75	Best estimate of former WBCSD/CSI Task Force 1
solvents	kg CO ₂ /GJ	74	Based on measurements compiled by former WBCSD/CSI Task Force 1. See Guidance Document, Appendix 4 for details.
impregnated saw dust	kg CO ₂ /GJ	75	Best estimate of former WBCSD/CSI Task Force 1
mixed industrial waste	kg CO ₂ /GJ	83	Best estimate of former WBCSD/CSI Task Force 1
other fossil based wastes	kg CO ₂ /GJ	80	Best estimate of former WBCSD/CSI Task Force 1
Biomass fuels			
dried sewage sludge	kg CO ₂ /GJ	110	= IPCC default for solid biomass fuels
wood, non impregnated saw dust	kg CO ₂ /GJ	110	= IPCC default for solid biomass fuels
paper, carton	kg CO ₂ /GJ	110	= IPCC default for solid biomass fuels
animal meal	kg CO ₂ /GJ	89	Based on measurements compiled by former WBCSD/CSI Task Force 1. See Guidance Document, Appendix 4 for details.
animal bone meal	kg CO ₂ /GJ	89	Best estimate of former WBCSD/CSI Task Force 1
animal fat	kg CO ₂ /GJ	89	Best estimate of former WBCSD/CSI Task Force 1
agricultural, organic, diaper waste, charcoal	kg CO ₂ /GJ	110	= IPCC default for solid biomass fuels
other biomass	kg CO ₂ /GJ	110	= IPCC default for solid biomass fuels

Şekil 4.3. Yakıt bazlı emisyon faktörleri [20].

Bu yöntemde doğrudan yakıt tüketimi, yakıtın kalorifik değeri ve Şekil 4.3'deki emisyon faktörleri kullanılarak CO₂ miktarı hesaplanmıştır.

Aşağıda, Mart 2023 ve Eylül 2024 dönemlerine ait termal kaynaklı CO₂ emisyon miktarları örnek olarak hesaplanmıştır.

• Mart 2023 Dönemi Hesaplamalar :

Bu döneme ait termal kaynaklı CO₂ emisyon hesapları, Eşitlik 4.2'deki genel formül ve bu formülün sadeleştirilmiş hali olan Eşitlik 4.10'a dayanarak, Tablo 4.6.'da ki veri seti kullanılarak hesaplanmıştır.

$$CO_2 \text{ termal} = \text{Yaş Yakıt Tüketimi (ton)} \times \text{Yaş Kalorifik Değer (Tj/t)} \times \text{Emisyon faktörü (t CO}_2\text{/Tj)} \times 1 - \text{BO (\%)} \times \text{YF} \quad (4.10)$$

Tablo 4.6. 2023 yılı Mart ayına ait termal kaynaklı CO₂ emisyon hesaplanmasında kullanılan girdiler

2023 Yılı Mart Ayı Termal Kaynaklı CO ₂ Veri Seti	Termal Yaş Kalorifik Güç (TJ/t)	Yaş Termal Tüketim (ton)	Emisyon Faktörü (t CO ₂ /Tj)	Biyokütle Oranı (%)	Termal Kaynaklı CO ₂ (ton)
Biyokütle	0,0000	0,00	110,0	1,00	0,00
Karbon Siyahı	0,0000	0,00	83,0	0,00	0,00
Doğalgaz	0,0000	6484,00	56,1	0,00	12,56
Atık Yağlar	0,0448	30,93	74,0	0,00	102,64
Diğer Alternatif Yakıt	0,0180	64,50	83,0	0,84	15,43
Petrokok	0,0300	1213,35	92,8	0,00	3379,71
Lastik	0,0292	1523,20	85,0	0,27	2760,70
ATY	0,0112	1317,00	75,0	0,14	948,30
Aritma Çamuru	0,0131	33,73	110,0	0,00	48,74
Taşkömürü	0,0000	0,00	96,0	0,00	0,00

Tüketilen her yakıt için CO₂ miktarının hesaplanması gerekmektedir.

Doğalgaz için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.11’de hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Mart 2023 (Doğalgaz)} = 6.484 \text{ ton} \times 0,000035 \frac{\text{Tj}}{\text{t}} \times 56,1 \text{ t CO}_2 / \text{Tj} \times (1 - 0) \times 1 = 12,6 \text{ ton CO}_2 \quad (4.11)$$

Atık yağlar için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.12’de hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Mart 2023 (Atık yağlar)} = 31 \text{ ton} \times 0,045 \text{ Tj/t} \times 74 \text{ t CO}_2 / \text{Tj} \times (1 - 0) \times 1 = 102,6 \text{ ton CO}_2 \quad (4.12)$$

Diğer Alt. Yakıtlar için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.13’de hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Mart 2023 (Diğer Alt. Yakıtlar)} = 65 \text{ ton} \times 0,018 \text{ Tj/t} \times 83 \text{ t CO}_2 / \text{Tj} \times (1 - 0,84) \times 1 = 15,4 \text{ ton CO}_2 \quad (4.13)$$

Petrokok için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.14’de hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Mart 2023 (Petrokok)} = 1.213 \text{ ton} \times 0,030 \text{ Tj/t} \times 92,8 \text{ t CO}_2 / \text{Tj} \times (1 - 0) \times 1 = 3.379,7 \text{ ton CO}_2 \quad (4.14)$$

Lastik için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.15’de hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Mart 2023 (Lastik)} = 1.523 \text{ ton} \times 0,029 \text{ Tj/t} \times 85 \text{ t CO}_2 / \text{Tj} \times (1 -$$

$$0,27) \times 1 = 2.760,7 \text{ ton CO}_2 \quad (4.15)$$

ATY için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.16'de hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ Mart 2023 (Atıktan Türetilmiş Yakıt)} &= 1.317 \text{ ton} \times 0,011 \\ \text{Tj/t} \times 75 \text{ t CO}_2/\text{Tj} \times (1 - 0,14) \times 1 &= 948,3 \text{ ton CO}_2 \end{aligned} \quad (4.16)$$

Arıtma çamuru için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.17'de hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ Mart 2023 (Arıtma Çamuru)} &= 34 \text{ ton} \times 0,013 \text{ Tj/t} \times 110 \text{ t CO}_2/\text{Tj} \times (1 - \\ &0) \times 1 = 48,7 \text{ ton CO}_2 \end{aligned} \quad (4.17)$$

Toplam Termal ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.18'da hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \text{Toplam Termal CO}_2 \text{ miktarı} &= 12,6 + 102,6 + 15,4 + 3.379,7 + \\ &2.760,7 + 948,3 + 48,7 = 7.268,1 \text{ ton CO}_2 \end{aligned} \quad (4.18)$$

- Eylül 2024 Dönemi Hesaplamalar :

Eylül 2024 dönemine ait termal kaynaklı CO₂ emisyon hesapları, Eşitlik 4.2'deki genel formül ve bu formülün sadeleştirilmiş hali olan Eşitlik 4.19'ye dayanarak, Tablo 4.7.'deki veri seti kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ termal} &= \text{Yaş Yakıt Tüketimi (ton)} \times \text{Yaş Kalorifik Değer (Tj} \\ &/ \text{t)} \times \text{Emisyon faktörü (t CO}_2/\text{Tj)} \times (1 - \text{BO (\%)} \times \text{YF} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Tablo 4.7. 2024 yılı Eylül ayına ait termal kaynaklı CO₂ emisyon hesaplanmasında kullanılan girdiler

2024 Yılı Eylül Ayı Termal Kaynaklı CO ₂ Veri Seti	Termal Yaş Kalorifik Güç (TJ/t)	Yaş Termal Tüketim (ton)	Emisyon Faktörü (t CO ₂ /Tj)	Biyokütle Oranı (%)	Termal Kaynaklı CO ₂ (ton)
Biyokütle	0,0162	135,15	110,0	1,00	0,00
Karbon Siyahı	0,0000	0,00	83,0	0,00	0,00
Doğalgaz	0,0000	7908,00	56,1	0,00	15,31
Atık Yağlar	0,0263	68,59	74,0	0,00	133,63
Diğer Alternatif Yakıt	0,0178	86,30	83,0	1,00	0,00
Petrokok	0,0316	3961,00	92,8	0,00	11601,75
Lastik	0,0257	4740,20	85,0	0,27	7572,95
ATY	0,0131	3102,90	75,0	0,42	1771,33
Arıtma Çamuru	0,0106	556,97	110,0	0,69	200,98
Taşkömürü	0,0000	0,00	96,0	0,00	0,00

Her Yakıt için CO₂ miktarını hesaplamamız gerekmektedir.

Biyokütle için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.20’de hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Eylül 2024 (Biomass)} = 135 \text{ ton} \times 0,016 \text{ Tj/t} \times 110 \text{ t CO}_2/\text{Tj} \times (1 - 1) \times 1 = 0,0 \text{ ton CO}_2 \quad (4.20)$$

Doğalgaz için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.21’de hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Eylül 2024 (DoğalGaz)} = 7.908 \text{ ton} \times 0,000035 \frac{\text{Tj}}{\text{t}} \times 56,1 \text{ t CO}_2 / \text{Tj} \times (1 - 0) \times 1 = 15,3 \text{ ton CO}_2 \quad (4.21)$$

Atık yağlar için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.22’de hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ Eylül 2024 (Atık yağlar)} &= 69 \text{ ton} \times 0,026 \frac{\text{Tj}}{\text{t}} \times 74 \text{ t} \frac{\text{CO}_2}{\text{Tj}} \times (1 - 0) \times 1 \\ &= 133,6 \text{ ton CO}_2 \end{aligned} \quad (4.22)$$

Diğer Alt. Yakıtlar için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.23’de hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Eylül 2024 (Diğer Alt. Yakıtlar)} = 86 \text{ ton} \times 0,018 \text{ Tj/t} \times 83 \text{ t CO}_2/\text{Tj} \times (1 - 1) \times 1 = 0,0 \text{ ton CO}_2 \quad (4.23)$$

Petrokok için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.24’de hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Eylül 2024 (Petrokok)} = 3.961 \text{ ton} \times 0,032 \text{ Tj/t} \times 92,8 \text{ t CO}_2/\text{Tj} \times (1 - 0) \times 1 = 11.601,8 \text{ ton CO}_2 \quad (4.24)$$

Lastik için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.25’de hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Eylül 2024 (Lastik)} = 4.740 \text{ ton} \times 0,026 \text{ Tj/t} \times 85 \text{ t CO}_2/\text{Tj} \times (1 - 0,27) \times 1 = 7.572,9 \text{ ton CO}_2 \quad (4.25)$$

ATY için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.26’da hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Eylül 2024 (Atıktan Türetilmiş Yakıt)} = 3.103 \text{ ton} \times 0,013 \text{ Tj} / \text{t} \times 75 \text{ t CO}_2/\text{Tj} \times (1 - 0,42) \times 1 = 1.771,3 \text{ ton CO}_2 \quad (4.26)$$

Arıtma çamuru için ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.27’de hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ Eylül 2024 (Arıtma Çamuru)} = 557 \text{ ton} \times 0,011 \frac{\text{Tj}}{\text{t}} \times 110 \text{ t CO}_2 / \text{Tj} \times (1 - 0,69) \times 1 = 201,0 \text{ ton CO}_2 \quad (4.27)$$

Toplam Termal ton CO₂ miktarı Eşitlik 4.28’de hesaplanmıştır.

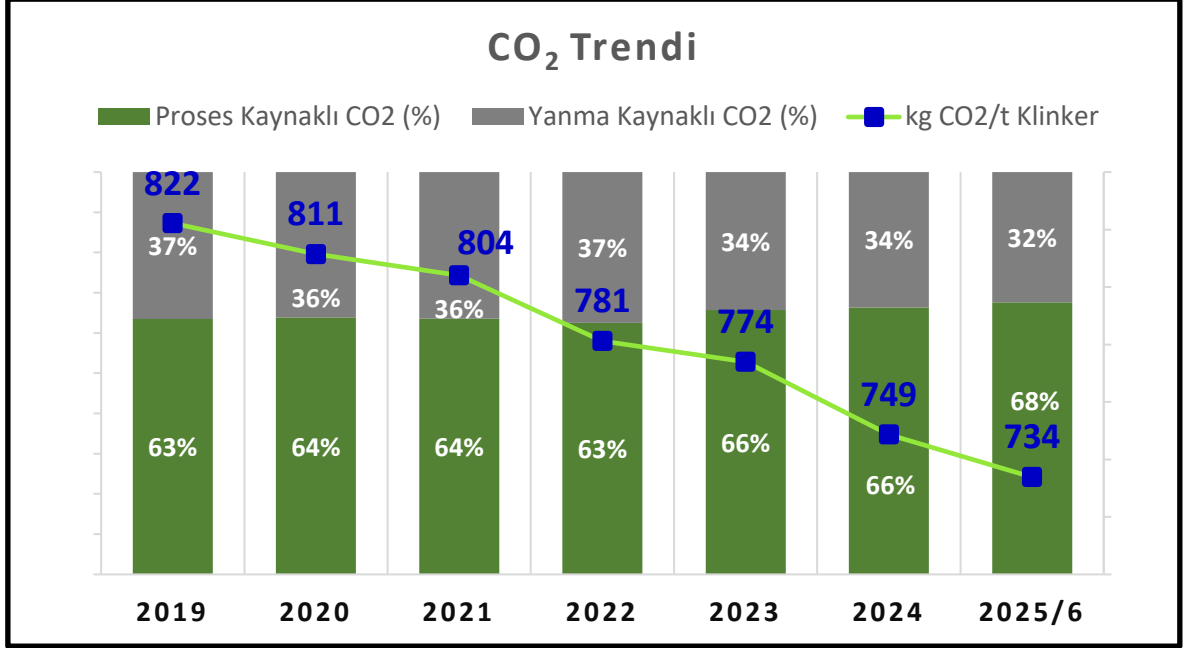
$$\begin{aligned} \text{Toplam Termal CO}_2 \text{ miktarı} &= 0,0 + 15,3 + 133,6 + 0,0 + 11.601,8 \\ &+ 7.572,9 + 1.771,3 + 201,0 = 21.296 \text{ ton CO}_2 \end{aligned} \quad (4.28)$$

Mart 2023 ve Eylül 2024 dönemlerine ait Proses ve Termal kaynaklı toplam CO₂ miktarı Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8. Dönemlere ait CO₂ hesaplama sonuçları

Dönem	Proses kaynaklı CO ₂ (ton)	Termal kaynaklı CO ₂ (ton)	Toplam CO ₂ (ton)
	A Yöntemi	Termal	Proses + Termal (A yöntemi + Termal)
Mart 2023	14.399	7.268	21.667
Eylül 2024	41.775	21.296	63.071

Şekil 4.4’te grafik, 2019–2025/6 döneminde fabrikanın proses ve yakıt kaynaklı CO₂ emisyonlarının yüzdesel dağılımını ve toplam spesifik emisyon değerini (kg CO₂/t klinker) göstermektedir. Bu dönemde toplam CO₂ emisyon yoğunluğunda belirgin bir azalış gözlemlenmiştir. İyileşmenin temel nedeni, enerji verimliliğini artırmaya yönelik uygulamalar, alternatif ve biyojenik yakıt kullanım oranındaki artış ve fırın işletme optimizasyonları gibi yanma kaynaklı emisyonları azaltan stratejilerden kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, proses kaynaklı emisyonların görelî payı sabit kalmış veya hafif artış göstermiştir; bu durum, klinker üretim sürecinin kimyasal doğasından kaynaklanan kalsinasyon emisyonlarının toplam emisyonlar içindeki baskın rolünü koruduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla kısa vadede enerji tarafındaki iyileştirmeler etkili olduğu, ancak uzun vadede finansal ve çevresel risklerin azaltılması için süreç odaklı teknolojilerin (örneğin karbon yakalama ve kullanım çözümleri, klinker kullanım oranının düşürülmesi) kritik öneme sahip olduğu anlaşılmaktadır. Genel olarak grafik, fabrikanın enerji yönetimi ve yakıt stratejilerinde kaydettiği ilerlemeyi yansıtırken, proses emisyonlarının azaltılmasının gelecekteki en büyük zorluk olarak öne çıktığını göstermektedir.



Şekil 4.4. 2019-06/2025 yılları arası fabrikanın proses ve termal kaynaklı CO₂ verileri (yazar tarafından oluşturulmuştur).

4.5. Emisyon Tahmin Yöntemleri (Modelleme Süreci)

Çimento üretiminden kaynaklanan toplam CO₂ emisyonları, proses ve termal kaynaklı olmak üzere iki temel bileşen üzerinden ayrı ayrı modellenmiş, ardından bu iki bileşenin toplamı esas alınarak genel emisyon tahmini oluşturulmuştur. Modelleme süreci, her iki emisyon bileşeni ile ilişkili olan değişkenlerin Spearman korelasyon katsayısı ve regresyon p-değerleri dikkate alınarak seçilmesiyle yapılandırılmıştır.

Seçilen değişkenler kullanılarak, proses kaynaklı CO₂ (y_1) ve termal kaynaklı CO₂ (y_2) emisyonlarına yönelik ayrı tahmin modelleri oluşturulmuştur. Bu doğrultuda, geçmiş yıllara ait verilerle ANFIS'te eğitilen modeller, ANFIS'te test edilmiş ve elde edilen sonuçlar fiili değerlerle karşılaştırılmıştır. Modellerin performansı, determinasyon katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (mean absolute error-MAE), ortalama mutlak yüzde hata (mean absolute percentage error-MAPE), kök ortalama kare hata (root mean square error-RMSE) ve ortalama kare hata (mean squared error-MSE) gibi hata metrikleri aracılığıyla değerlendirilmiştir.

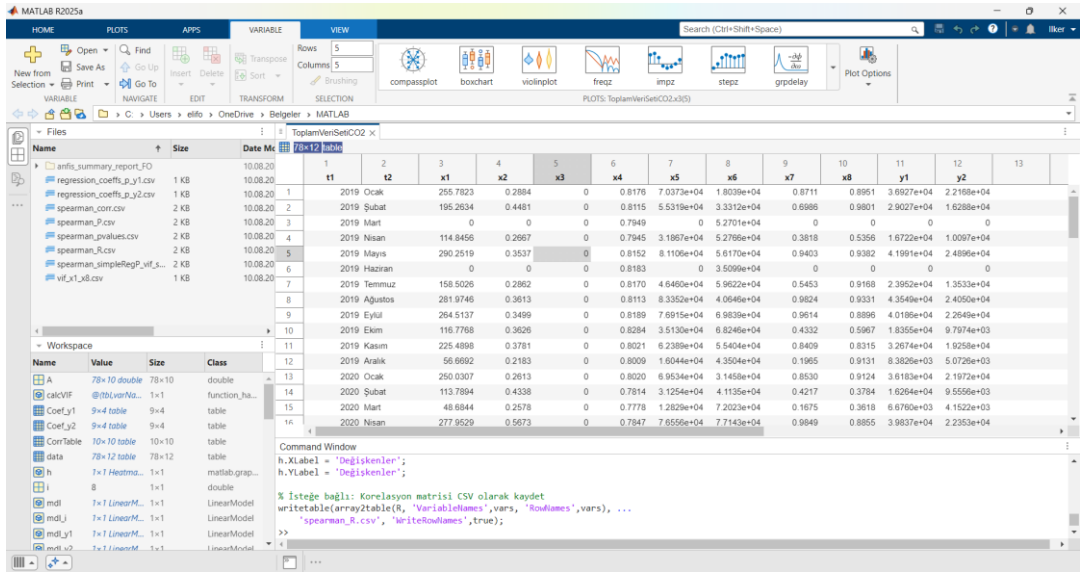
Elde edilen sonuçlara göre, ANFIS yöntemi güçlü bir doğruluk seviyesi göstermiştir. Çimento üretim sürecine ait 2025 Temmuz ve Aralık ayları arası toplam CO₂ tahmin

emisyonu belirlenmiş ve bu yapı sayesinde bileşen bazında daha detaylı bir karbon salımı öngörüsü gelecek aylar için sağlanmıştır.

- Tahminleme için Uygulama Programı

Bu çalışmadaki veri işleme, modelleme ve CO₂ emisyon tahmin süreçleri, MATLAB R2025a programı ortamında gerçekleştirilmiş ve MATLAB kodları openai desteği ile yazılmıştır [27]. Sözde kodları EK-1 ve EK-2’de yer verilmiştir. MATLAB’in sahip olduğu fuzzy logic toolbox, statistics and machine learning toolbox ve gelişmiş grafik/görselleştirme desteği, hem sezgisel bulanık mantık temelli ANFIS yönteminde etkin bir şekilde kullanılmıştır.

Modelleme sonuçları, hem kullanıcı dostu arayüzde hem de yapısal biçimde yorumlanabilir formatta sunulmuş; böylece çimento üretim sürecine ait CO₂ emisyonlarının detaylı ve bileşen bazlı şekilde öngörülmesi mümkün kılınmıştır. Şekil 4.5’da MATLAB’a verileri analiz etmek adına yüklenen görsel yer almaktadır.



Şekil 4.5. Matlab uygulama görseli (yazar tarafından oluşturulmuştur.)

5. UYGULAMA

Bu bölümde, bir çimento fabrikasına ait 2019-6/2025 yılları arası toplanan ve hesaplanan veriler yardımı ile 2025 yılı son 6 aylık döneminin CO₂ emisyonları tahmin etmek amacıyla ANFIS yöntemi kullanılmıştır.

5.1. Uygulama Özeti

Bu çalışma, bir çimento fabrikasına ait 2019–2025 (ilk 6 ay) dönemi üretim verileri temel alınarak, 2025 yılının ikinci yarısına yönelik CO₂ emisyonlarının tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Sera gazı emisyonlarının önemli bir bileşeni olan CO₂, iklim değişikliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olup, Türkiye'nin Paris Anlaşması başta olmak üzere çeşitli uluslararası iklim protokollerine taraf olması, bu emisyonların azaltılmasına yönelik taahhütlerin önemini daha da artırmaktadır. Bu doğrultuda çalışmanın temeli, ANFIS yönteminin, çimento üretim sürecine ait teknik veriler kullanılarak CO₂ emisyonlarının gelecek dönemdeki seviyelerini ne başarıda öngördüğü ve bu öngörüye göre vergilendirilmesi durumunda firmaya olan maliyetinin hesaplanması amaçlanmıştır.

ANFIS, YSA ile bulanık mantık (BM) sistemlerini birleştiren bir yaklaşım olarak ifade edilmektedir. Bu sistem, verilen giriş ve çıkış verilerini kullanarak öğrenme yapmaktadır. Öğrenme sürecinde, bulanık mantıkta kullanılan üyelik fonksiyonlarının parametrelerini belirlemektedir ve gerekli kuralları otomatik olarak oluşturmaktadır. Bu sayede, klasik matematiksel yöntemlerle modellenmesi zor olan karmaşık sistemlerin daha kolay ve esnek bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır [42].

ANFIS yönteminin başlıca tercih edilme sebepleri aşağıda yer almaktadır: [37, 43, 44, 45, 46, 54, 62].

- Zaman gibi dinamik olan verilerin analizinde başarılı olması
- ANFIS'in gelecek tahminlemede diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç elde etmesi
- Karmaşık sistemleri modelleyebilmesi
- Girdi- Çıktı verilerini öğrenme yeteneğine sahip olması
- Bulanık mantığın esnekliği ile yapay sinir ağlarının öğrenme kapasitesi bir arada kullanılabilmesi
- Yeni verilere göre kendini güncelleyip iyileştirebilmesi olarak sıralanmaktadır.

5.1.1. Parametre seçimi

Parametrelerin belirlenmesinde çimento sektöründeki literatür araştırma çalışmalarından yararlanılmış [3, 8, 16, 21, 23, 35, 40] ve çimento fabrikalarındaki uzman personelin teknik görüşleri alınmıştır. CO₂ emisyonlarını etkileyen proses ve termal kaynaklı parametrelerle sınırlı kalınmamıştır. Emisyonlar üzerinde etkili olabilecek ve tezin ilerleyen sayfalarında Tablo 5.3.'te de belirtildiği gibi diğer operasyonel değişkenler de değerlendirmeye dahil edilmiştir. Bu parametreler arasından en uygun olanların seçilmesinde ise istatistiksel analiz yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Bölüm 4.2, 4.3 ve 4.4'te ayrıntılı olarak açıklandığı üzere, 2019–2025 (ilk 6 ay) yılları arasındaki CO₂ hesaplamalarında kullanılacak geçmiş veriler SQL Server aracılığıyla toplanmıştır. Bu kapsamda, ilgili parametrelerle proses ve termal kaynaklı CO₂ ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ayrıca bölüm 4.1'de de anlatıldığı gibi CO₂ bildiriminin Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na yapılması zorunluluğu nedeniyle yüksek doğruluk ve tutarlılık taşıdığı değerlendirilmektedir.

5.1.2. Veri analizi

Veri analizi için iki ölçüt belirlenmiştir. Bu ölçütlerden ilki olan Spearman korelasyonu, veri setindeki aykırı değerlerin etkisini azaltarak değişkenler arasındaki ilişkinin daha güvenilir biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır. İkinci ölçüt olan regresyon p katsayısı, değişkenlerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için kullanılmıştır. [52]. Doğrusal ve doğrusal olmayan yapıyı işleyebilen [44, 52, 55] ANFIS yöntemi için parametrelerin ön değerlendirme süreci önem taşımaktadır.

Spearman korelasyon katsayısı, regresyon p katsayısı sonucunda yüksek ilişkili, anlamlı değişkenler tespit edilmiştir [44]. Ölçüt tanımları Tablo 5.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Veri analiz yöntemleri

Ölçüt	Neyi Ölçer?	Neden Kullanılır?
Spearman Korelasyonu	Değişkenler arası monoton ilişki (sıralama temelli)	Girdi değişkeninin hedef değişkenle ilişkisi var mı, yönü ne?
Regresyon p-değeri (istatistiksel anlamlılık)	Korelasyonun ya da model parametresinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını	Elde edilen ilişkinin tesadüf mü yoksa anlamlı mı olduğunu test eder.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, en güçlü ilişkiye sahip olan üç parametre belirlenmiştir. Bu parametreler: Isıl enerji tüketimi, Klinker üretimi, Sezonallite Faktörü olarak belirlenmiştir.

Modelin eğitilmesi ve geçerliliğinin değerlendirilmesi adına veri seti, eğitim ve test verisi olarak ikiye bölünmüştür [44]. Kullanılan bölme oranları şunlardır: %69 eğitim- %31 test, %80 eğitim - %20 test, %84 eğitim - %16 test, %89 eğitim - %11 test, %95 eğitim - %5 test şeklinde ilerlenmiştir. En iyi oranı belirleyebilmek adına sonuçlar değerlendirilmiştir.

5.1.3. ANFIS tahmini

ANFIS modeliyle yapılan tahmin çalışmalarında, ANFIS başlığı altında detaylı olarak bahsedilen üyelik fonksiyonlarının model başarısı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla 7 farklı üyelik fonksiyonu değerlendirilmiştir [47]. Bu üyelik fonksiyonlarının detayı Tablo 5.6.'de yer almaktadır.

Her bir üyelik fonksiyonu için modelin performansı; R^2 , MSE, RMSE, MAPE gibi istatistiksel değerlendirme ölçütleri kullanılarak analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Bu performans göstergeleri, modelin doğruluk düzeyini ve tahmin hatalarını ortaya koymada önemli rol oynamaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek R^2 değerine ve en düşük MAE, MAPE, RMSE, MSE değerlerine sahip olan üyelik fonksiyonu, 2025 yılı son altı aylık dönemine ait CO₂ emisyonlarını tahmin etmek için en uygun model olarak belirlenmiştir.

5.1.4. Senaryo oluşturma

Gelecekteki CO₂ emisyonlarını tahmin etmek amacıyla, belirlenen üç parametreye dayalı olarak senaryo geliştirilmiştir. Bu senaryo, 2025 yılının ikinci yarısındaki değişimleri öngörmek üzere çimento üretim sürecindeki farklı ısıl enerji tüketimi, klinker üretim miktarı ve sezonsal etkiler dikkate alınarak oluşturulmuştur. Parametrelerin fabrika için öngörülen gelecek değerlerinden hareketle değişim eğilimleri ve olası etkiler analiz edilmiş, 2025 son 6 aylık dönem için elde edilen parametreler 2025 yılının ikinci yarısına ait CO₂ tahmin emisyonlarının belirlenmesine katkı sağlamıştır.

5.1.5. Sonuç karşılaştırma

2019 – 2025 Haziran dönemine ait veriler kullanılarak, ANFIS yöntemi ile proses kaynaklı ve termal kaynaklı CO₂ emisyonları için ayrı ayrı tahmin modelleri oluşturulmuştur. Tüm üyelik fonksiyonları denenmiş ve farklı eğitim–test veri oranları kullanılarak, R², MAE, MAPE, MSE ve RMSE gibi performans metrikleri üzerinden her iki emisyon türü için en iyi sonucu veren üyelik fonksiyonları belirlenmiştir.

Belirlenen en iyi modeller, oluşturulan senaryo kapsamında 2025 yılının ikinci yarısına ait öngörölü parametrelerle çalıştırılarak, proses ve termal kaynaklı CO₂ emisyon tahminleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ANFIS'in her iki emisyon türünde de yüksek doğruluk ve düşük hata değerleriyle tahmin yapabildiğini ortaya koyulmuştur. Üyelik fonksiyonları arasındaki performans farklılıklarının, veri setinin özelliklerinden ve her fonksiyonun modelleme kabiliyetinin farklı olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

ANFIS modeli, parametrelerin etkilerini dinamik ve esnek bir biçimde yakalayabilmesi sayesinde, özellikle karmaşık ve değişken yapıya sahip üretim süreçlerinde CO₂ emisyonlarının doğru tahminlenmesine imkân tanımaktadır. Bu durum, üretim optimizasyonu gibi alanlarda ANFIS modellerinin güçlü bir karar destek aracı olabileceğini göstermektedir.

5.2. Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağları

Teknoloji ve yapay zekâ alanında yaşanan hızlı gelişmeler, karmaşık ve kesin olmayan verilerin analizinde yeni ve etkili yöntemlerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Özellikle belirsizliklerin ve değişken koşulların yoğun olduğu sistemlerde, bulanık mantık

ve yapay sinir ağıları, esnek yapıları ve uyarlanabilir özellikleri sayesinde güçlü modelleme ve optimizasyon araçları olarak ön plana çıkmaktadır. Bu teknikler, geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda, sistemlerin davranışlarını daha doğru temsil ederek çözüm üretme kapasitesini artırmaktadır [44].

5.2.1. Bulanık mantık

Bulanık mantık, belirsizliklerin sistematik olarak ifade edilip işlenebilmesi için geliştirilmiş matematiksel bir yöntem olarak ifade edilmektedir. Bu yaklaşım, kesin ve net bilgiye ulaşmanın mümkün olmadığı durumlarda, insanların düşünme ve karar verme süreçlerini taklit ederek tutarlı sonuçlar elde etmeyi amaçlamaktadır. Yani, bulanık mantığın temel işlevi, mevcut verilerden öğrenim yaparak mantıklı ve güvenilir karar mekanizmalarını oluşturmaktır.

Bulanık mantık, makinelerin insan deneyimi ve sezgisine benzer bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bu sayede, makineler sadece sayısal verilere değil, aynı zamanda sembolik ve bulanık ifadelerle dayalı bilgileri de işleyebilmektedir. Bu sembolik ifadelerin matematiksel olarak modellenmesi, bulanık kümeler teorisi üzerine kurulmaktadır ve böylece karmaşık ve kesin olmayan bilgilerin makineler tarafından anlamlandırılmasına olanak tanımaktadır [47].

5.2.1.1. Bulanık küme teorisi

Bulanık kümeler, klasik kümelerden ayrılarak elemanların kümeye tam olarak ait olup olmamasından ziyade, bu aitliğin dereceli bir şekilde ifade edilmesini sağlayan matematiksel yapılar olarak ifade edilmektedir. Bir eleman, bir bulanık kümeye tamamen dahil olmak zorunda olmayıp, aitlik derecesi 0 ile 1 arasında değişen bir değer alabilmektedir. Örneğin, bir aracın hızı 60 km/s olduğunda, bu hız hem “düşük hız” hem de “orta hız” bulanık kümelerine farklı oranlarda dahil olabilir; bu sayede gerçek dünyadaki belirsizlikler daha esnek biçimde modellenebilmektedir.

Üyelik fonksiyonları, bir elemanın belirli bir bulanık kümeye aitlik derecesini nicel olarak ifade eden fonksiyonlardan oluşmaktadır. Bunlar genellikle üçgen, trapezoidal veya gauss biçiminde olup, bu şekiller bulanık kümelerin esnek ve farklı durumlara uyarlanabilir modellerle temsil edilmesini sağlamaktadır [47].

Bulanıklaştırma ise kesin ve net sayısal bir değeri, farklı üyelik derecelerine sahip bulanık değerlere dönüştürme işlemi olarak ifade edilmektedir. Bu süreç, karmaşık ve belirsiz verilerin işlenmesinde temel bir adımdır ve birçok uygulamada belirsizliğin matematiksel olarak modellenmesini mümkün kılmaktadır [44].

5.2.1.2.Bulanık kurallar ve mantık

Bulanık mantık sistemleri, genellikle “Eğer ... ise ...” yapısındaki kurallarla tasarlanmaktadır ve belirsiz koşulları kontrol etmek için kullanılmaktadır. Bu kurallar, bir öncül ve bir sonuç kısmından oluşmaktadır. Örneğin, “Eğer hız düşük ve yol kaygansa, fren mesafesini artır” kuralı, bir aracın güvenli sürüşü için karar mekanizması sağlamaktadır. Kurallar, bulanık operatörler olan “ve”, “veya” ve “değil” ile işlenerek, farklı girişlerin etkisi değerlendirilmekte uygun çıktılar oluşturulmaktadır.

5.2.1.3.Bulanık çıkarım sistemleri

Bulanık çıkarım sistemlerinin iki ana türü bulunmaktadır. Bunlar Mamdani ve Sugeno tipidir olarak adlandırılmaktadır. İhtiyaca göre bu iki tip veya bunların kombinasyonları kullanılmaktadır. Sugeno, Mamdani’ye göre daha az sezgisel, matematiksel model ağırlıklı olarak tanımlanmaktadır. Genellikle çoklu giriş-tek çıkışta kullanılmaktadır [48]. Literatürde en yaygın kullanılan yaklaşım Sugeno tipidir [48, 51]. Bunun temel nedeni, parametre optimizasyonunun kolay yapılabilmesi ve yüksek doğruluk oranı sağlamasıdır.

ANFIS, Sugeno tipi çıkarım sistemi mantığıyla çalışmakta ve her bir düğüm belirli bir matematiksel fonksiyonu gerçekleştirecek şekilde yapılandırılmaktadır. Bu özellik, hem öğrenme sürecinin verimliliğini artırmakta hem de modelin tahmin gücünü güçlendirmektedir [49].

Mamdani Tipi Bulanık Sistemler: Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi, kullanıcı dostu yapısı ve sezgisel kural tabanı nedeniyle karar verme mekanizmalarında yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Bu model, gerçek dünya verilerinde var olan belirsizlik ve bulanıklıkları, uygun tanımlanmış kural setleri aracılığıyla temsil ederek, insan zekasının problem çözme yeteneklerini taklit etme kapasitesine sahip olduğu ifade edilmektedir [29, 50].

Sugeno Tipi Bulanık Sistemler: Sistem davranışını yaklaşık olarak doğrusal ya da doğrusal olmayan fonksiyonlar setiyle ifade eden bulanık kural tabanlı bir model olarak ifade

edilmektedir. Dilsel değişkenler kullanılmaz; bunun yerine, kuralların sonuç kısımları doğrudan giriş değişkenlerinin fonksiyonları şeklinde ifade edilmektedir. Basitliği, yorumlanabilirliği ve hesaplama verimliliği ile öne çıkmaktadır. Genellikle çoklu giriş-tek çıkışta kullanılmaktadır [29, 51]. Formülü Eşitlik 5.1’de gösterilmiştir [62].

$$f_i = p_i \cdot x + q_i \cdot y + r_i \quad (5.1)$$

Burada:

- f_i : i. kuralın çıkış fonksiyonu.
- p_i : i.kuralın x girdi değişkeninin katsayısı.
- q_i : i.kuralın y girdi değişkeninin katsayısı.
- r_i : Sabit terim

5.2.2. Yapay sinir ağları

İnsan beyninin çalışma prensibini taklit eden, karmaşık veri desenlerini öğrenme ve analiz etme yeteneğine sahip güçlü bir makine öğrenmesidir. Bu ağlar, biyolojik sinir sisteminden ilham alarak tasarlanmıştır ve temel yapı taşları, birbiriyle bağlantılı yapay nöronlardan oluşmaktadır. Nöronlar, genellikle bir giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir çıkış katmanı şeklinde düzenlenmektedir [30, 32, 33, 34, 39].

5.2.3. Bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının birleştirilmesi

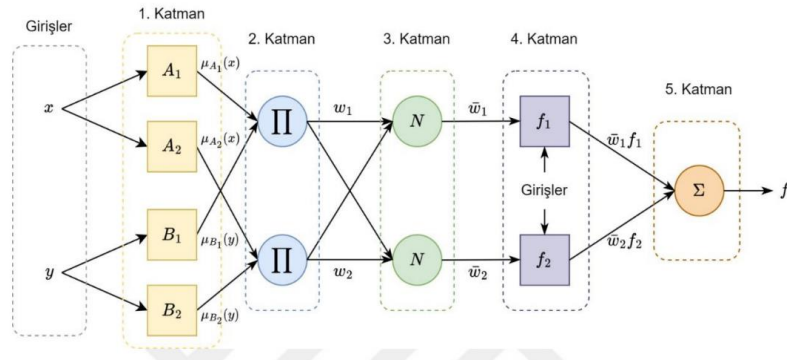
Bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının birleşmesiyle oluşan hibrit sistemler, her iki yöntemin güçlü yönlerini bir araya getirmektedir. Yapay sinir ağları, verilerden otomatik öğrenme ve optimizasyon yaparken, bulanık mantık sistemin kararlarını daha anlaşılır hale getirmektedir. Böylece, uzman bilgisi olmadan bulanık kurallar oluşturulabilmekte ve sistemin nasıl çalıştığı daha kolay yorumlanabilmektedir. Bu yaklaşımlar, belirsiz ve eksik verilerin bulunduğu karmaşık alanlarda (örneğin mühendislik, tıp ve robotikte) daha güvenilir ve uyarlanabilir çözümler sunmaktadır. Özetle, ANFIS, YSA ve BM sistemlerini birleştiren bir yaklaşımdır. Bulanık mantık belirsizliği modellemeye, yapay sinir ağları ise öğrenmeye katkı sağlamaktadır. Birleşimleri ise daha akıllı ve etkili sistemleri yaratmaktadır.

5.2.3.1.ANFIS

ANFIS, yapay zeka temelli hibrit bir model olup, bulanık mantık sistemleri ile yapay sinir ağlarının güçlü yönlerini tek bir çatı altında birleştirmektedir [29]. Model, giriş verilerinden öğrenme kabiliyeti sayesinde farklı türdeki veri setlerine uyum sağlayabilmekte ve değişkenler arasındaki ilişkileri dinamik biçimde modelleyebilmektedir. Bulanık mantık sistemleri, belirsiz ve kesin tanımlanamayan bilgilerin yorumlanmasında esneklik sağlarken; yapay sinir ağları, doğrusal olmayan karmaşık ilişkilerin modellenmesinde etkin bir çözüm sunmaktadır. ANFIS, bu iki yaklaşımın birleşimiyle, verilerden anlamlı ve güvenilir tahminler üretebilen esnek bir yapı ortaya koymaktadır.

Modelin çalışma süreci iki temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, giriş verileri tanımlı bulanık kurallara dönüştürülerek bulanık kümeler oluşturulmakta, ikinci aşamada ise bu kümeler kullanılarak çıkarımlar yapılmakta ve sayısal sonuçlar elde edilmektedir. Bu yapı, modelin hem açıkça gözlemlenebilen hem de veri içinde gizli kalan ilişkileri ortaya çıkarabilmesini sağlamaktadır. Öğrenme süreci boyunca parametreler optimize edilerek, hedeflenen görev için en yüksek performans yakalanmaktadır [49].

ANFIS modeli, Şekil 5.1.'de de gösterildiği üzere beş temel katmandan oluşmaktadır.



Şekil 5.1. Anfis Katmanları [49].

1. Katman : Bulanıklaştırma (Fuzzification)

Bu katmanda, giriş değişkenleri uygun üyelik fonksiyonları kullanılarak ($\mu_{A_i}(x)$, $\mu_{B_i}(y)$) bulanık kümelere dönüştürülmekte ve sözel değişkenlerin üyelik dereceleri belirlenmektedir. Katmandaki düğüm sayısı, giriş değişkenlerinin sayısına eşit olmaktadır. Üyelik fonksiyonları, verilerin bulanık mantık kuralları ile ifade edilebilmesini sağlamaktadır [44, 62].

2. Katman : Kural Üretimi (Rule Layer)

İlk katmandan gelen bulanık değerler kullanılarak “Eğer–O halde” (IF–THEN) biçimindeki kurallar oluşturulmaktadır. Her düğüm, ANFIS yapısında tanımlanmış Eşitlik 5.2’te ki formülle bir kuralı temsil etmektedir. Bu kuralların sayısı, modelin karmaşıklığını doğrudan etkilemektedir [44, 62].

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \quad (5.2)$$

Burada:

- w_i : kuralın ateşleme gücü.
- $\mu_{A_i}(x)$: Girdi x 'in, A_i adlı bulanık kümeye aitlik derecesi.
- $\mu_{B_i}(y)$: Girdi y 'nin, B_i adlı bulanık kümeye aitlik derecesi.

3. Katman : Normalizasyon (Normalization Layer)

Bu aşamada, ikinci katmandan gelen tüm kuralların ateşleme (aktivasyon) güçleri Eşitlik 5.3.’te ki formül ile normalize edilmektedir. Böylece her kuralın, toplam sistem içindeki göreceli etkisi belirlenmiş olmaktadır [44, 62].

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum w_i} \quad (5.3)$$

Burada:

- \bar{w}_i : normalize edilmiş ateşleme gücü.
- w_i : i.kuralın ateşleme gücü.
- $\sum w_i$: Toplam ateşleme gücü.

4. Katman : Durulaştırma (Defuzzification)

Bu katmanda, her kuralın sonuca katkısını belirleyen uyarlanabilir parametreler kullanılarak bulanık sonuçlar Eşitlik 5.4’de de gösterildiği gibi katman çıktısı elde edilmektedir. Bu parametreler “sonuç parametreleri” olarak adlandırılmaktadır ve öğrenme sürecinde optimize edilerek modelin doğruluğunu arttırmaktadır [44, 62].

$$\text{Katman Çıktısı} = \bar{w}_i \cdot f_i \quad (5.4)$$

Burada:

- \bar{w}_i : normalize edilmiş ateşleme gücü.

- f_i : i. kuralın çıkış fonksiyonu

5. Katman : Toplama (Summation Layer)

Son katman, tüm kurallardan gelen çıktıları birleştirerek Eşitlik 5.5’de ki formül kullanılarak modelin nihai çıktısını üretmektedir. Bu aşama, ANFIS’in tahmin veya sınıflandırma sonucunu ortaya koyduğu son basamaktır [44, 62].

$$x_0 = \sum \bar{w}_i \cdot f_i \quad (5.5)$$

Bu beş aşamalı yapı sayesinde ANFIS, hem bulanık mantığın belirsizlikleri yönetme esnekliğini hem de yapay sinir ağlarının öğrenme yeteneğini bir arada kullanarak güçlü ve esnek bir tahminleme sistemi oluşturmaktadır [49].

5.3. Tahmin hataları için kullanılan ölçütler

Tahmin hatalarının analizi, bir modelin performansını anlamada temel adımlardan birini oluşturmaktadır. Bu amaçla çeşitli istatistiksel ölçütler kullanılmaktadır. Söz konusu ölçütler, yalnızca modelin tahmin doğruluğunu değerlendirmekle kalmamakta, aynı zamanda hangi noktaların geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu bölümde, literatürde en yaygın şekilde kullanılan tahmin hata ölçütlerine yer verilmiştir. Bu ölçütler sayesinde modelin, gerçek veri setleri ile ne ölçüde uyum sağladığı objektif biçimde değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, modelin güvenilirliğinin test edilmesi ve karar vericilere iyileştirme yönünde somut bilgiler sunulması açısından da kritik önem taşımaktadır. Bunu analiz edebilmek adına yöntemlerden başlıcaları şu şekilde sıralanmaktadır; R^2 , MAE, MAPE, RMSE, MSE [31, 52]. Her birinin açıklaması aşağıda yer almaktadır.

Performans ölçümünde kullanılan temel kriterlerden biri R^2 ’dir. Bu katsayı, modelin bağımlı değişken üzerindeki açıklayıcılığını ifade etmekte ve tahminlerin doğruluğunu değerlendirmektedir. Formülü Eşitlik 5.6’de gösterilmiştir.

$$R^2 = \frac{1 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{1 - \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.6)$$

Burada:

- Y_i : Gerçek CO₂ değeri (ton).
- \hat{Y}_i : Tahmin edilen CO₂ değeri (ton).
- \bar{Y} : Gerçek CO₂ değerlerinin ortalaması.
- n : Gözlem sayısı.

MAE, tahmin edilen değerlerin gerçek sonuçlara ne kadar yakın olduğunu nicel olarak ölçmek amacıyla kullanılan metriklerden biridir. MAE'nin hesaplanma yöntemi ilgili denklem aracılığıyla gösterilmektedir [44].

MAE formülü Eşitlik 5.7'de gösterilmiştir:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (5.7)$$

Burada:

- Y_i : Gerçek CO₂ değeri (ton)
- \hat{Y}_i : Tahmin edilen CO₂ değeri (ton)
- n : Test veri setindeki gözlem sayısı

MAPE ise her dönem için hesaplanan mutlak yüzde hataların ortalamasını ifade etmektedir. Formülü Eşitlik 5.8'de gösterilmiştir.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - Y_i}{X_i} \right| \times 100 \quad (5.8)$$

Bu formülde "X_i" gerçek değeri, "Y_i" ise tahmin değerini temsil etmektedir.

RMSE, MSE karekökü alınarak elde edilir. Bu ölçüt, tahmin hatalarının orijinal ölçü biriminde ifade edilmesini sağlamaktadır. Böylece, modelin tahmin ettiği değerlerin gerçek değerlere olan uzaklığı daha anlaşılır bir biçimde yorumlanabilmektedir. RMSE değerinin düşük olması, modelin daha hassas ve güvenilir tahminler ürettiğini göstermektedir [44]. Formülü Eşitlik 5.9'da gösterilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (5.9)$$

Bu formülde "X_i" gerçek değeri, "Y_i" ise tahmin değerini temsil etmektedir.

MSE, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karesinin ortalamasını ifade etmektedir. Bu ölçüt, modelin yaptığı hataların büyüklüğünü değerlendirmek için kullanılmaktadır. Hataların karelerinin alınması, büyük sapmaların daha fazla etkili olmasını sağlamaktadır. MSE değeri ne kadar düşükse, modelin tahmin performansı o kadar yüksek kabul edilmektedir. Formülü Eşitlik 5.10'da gösterilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 \quad (5.10)$$

Bu formülde "Xi" gerçek değeri, "Yi" ise tahmin değerini temsil etmektedir.

5.4. CO2 Tahmini için ANFIS ve Eğitim

ANFIS eğitimi, modelin doğru ve güvenilir tahminler yapabilmesi için kritik bir süreçtir. Bu süreç, uygun girdi değişkenlerinin seçilmesi, model mimarisinin ve üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi, eğitim algoritmasının optimize edilmesi gibi adımları içermektedir. Eğitim aşamasında veriler eğitim ve test setlerine ayrılarak modelin performansı R², MAE, MSE, RMSE gibi metriklerle değerlendirilmektedir.

ANFIS tabanlı CO₂ tahmin modellerinin eğitim süreci, yalnızca iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından değil, aynı zamanda ekonomik planlama açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada temel amaç, ANFIS yöntemiyle geleceğe yönelik tahminler yaparak, gelecekte ne kadar vergi ödeneceğinin öngörülmesidir. Bu doğrultuda, doğru veri seçimi, modelin optimize edilmesi ve doğrulama sürecinin dikkatli bir şekilde yürütülmesi, güvenilir sonuçlar elde etmek açısından büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, karar vericilere hem çevresel hem de mali açıdan stratejik bir bakış açısı sunarak, daha etkili politika geliştirme süreçlerine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

5.4.1. Verilerin bulunması

Emisyon tahmin modellerinde girdi olarak kullanılacak olan Tablo 5.2'de gösterildiği gibi parametrelerin seçim süreci büyük önem taşımaktadır. Modelde yer alacak girdilerin, CO₂ salımını ne ölçüde etkilediğini ortaya koymak amacıyla çok yönlü bir analiz gerçekleştirilmiştir ve başlık 5.1.1'de belirtildiği üzere CO₂ üzerinde etkili olan aşağıdaki değişkenler belirlenmiştir. CO₂ emisyonlarını doğrudan etkileyen temel faktörler (enerji tüketimi, yakıt ikame oranları, üretim hacmi, proses verimliliği) olduğu için seçilmiş; veri

erişimi ve güvenilirlik sorunları nedeniyle diğer potansiyel değişkenler kapsam dışı bırakılmıştır.

Tablo 5.2. CO₂ emisyonunu etkileyen değişkenler ve tanımları.

Değişken	Tanım
x₁ :	Isıl enerji tüketimi (Tj)
x₂ :	Atık ikame oranı (%)
x₃ :	Biyokütle ikame oranı (%)
x₄ :	K/Ç (%)
x₅ :	Klinker üretimi (ton)
x₆ :	Çimento satışı (ton)
x₇ :	Sezonalite Faktörü (%)
x₈ :	Fırın OEE (%)
y₁ :	Proses kaynaklı CO ₂ (ton)
y₂ :	Termal enerji kaynaklı CO ₂ (ton)
t₁ :	Yıl
t₂ :	Ay

Çimento sektöründe CO₂ emisyonlarının modellenmesi, üretim süreçlerine ilişkin çok sayıda operasyonel değişkenin doğru değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Gelecek CO₂ tahminlemede kullanılacak olan bağımsız değişkenler (x₁–x₈), 2019 Ocak ile 2025 Haziran tarihleri arası için bir çimento fabrikasında günlük olarak kaydedilen SQL tabanlı veri sisteminden alınarak Excel formatında derlenmiştir. Bağımlı değişkenler (y₁ ve y₂) için hesaplama detayları ve örnekleri ise 4.4 başlık altında sunulmaktadır. Bu çalışmada kullanılan verilere ilişkin gerekli kullanım izni, ilgili firmadan alınmıştır.

Aşağıda CO₂ emisyonları açısından x₁–x₈ değişkenlerinin önemi açıklanmıştır :

1. x₁ – Isıl enerji tüketimi (Tj)

Üretim sürecinde kullanılan toplam ısıl (termal) enerji miktarıdır. Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan doğrudan CO₂ emisyonları, tüketilen ısıl enerji ile doğru orantılıdır. Yüksek enerji tüketimi, daha fazla yakıt yakımına ve dolayısıyla daha fazla emisyonla neden olmaktadır [3, s.16, s.39].

2. x₂ – Atık ikame oranı (%)

Toplam yakıt tüketimi içinde alternatif yakıtların (örneğin RDF, lastik) ısıl enerjisinin toplam ısıl enerjiye oranıdır. Fosil yakıt yerine kullanılan atık kökenli alternatif yakıtlar, daha

düşük net karbon salımı sağlamaktadır. Bu nedenle ikame oranının artması, emisyonları azaltıcı etki yapmaktadır [3].

3. x_3 – Biyokütle ikame oranı (%)

Yakıt olarak kullanılan biyokütlenin toplam yakıtta ısı enerjisi olarak oranıdır. Biyokütle karbon nötr kabul edildiğinden, fosil yakıt yerine biyokütle kullanımı emisyonları azaltmaktadır. Bu oran arttıkça net CO₂ salımı düşmektedir [3, s.40].

4. x_4 – Klinker çimento oranı (K/Ç %)

Üretilen çimentodaki klinker kullanım oranıdır. Klinker üretimi, hem kireç taşının kalsinasyonu hem de yakıt yanması yoluyla yüksek CO₂ salımına neden olmaktadır. Klinker çimento oranı ne kadar yüksekse, emisyonlar da o kadar artmaktadır [3, s.41].

5. x_5 – Klinker üretimi (ton)

Döner fırında üretilen klinker miktarıdır. Klinker üretimi, çimento üretim sürecinde en fazla CO₂ emisyonuna neden olan aşamadır. Üretim miktarı arttıkça hem proses kaynaklı hem de yakıt kaynaklı emisyonlar artmaktadır [3, s.48].

6. x_6 – Çimento satışı (ton)

Belirli bir periyotta satılan çimento miktarıdır. Çimento satışları, dolaylı olarak üretim hacmini ve dolayısıyla emisyon hacmini etkilemektedir. Satıştaki artış, üretim artışı ve enerji tüketimiyle bağlantılı olduğundan satış arttıkça emisyon miktarı da yükselmektedir [13].

7. x_7 – Sezonluluk faktörü (%)

Mevsimsel etki, çimento üretiminde talep ve üretim hacmindeki dönemsel dalgalanmaları temsil eden kritik bir faktördür [57]. Özellikle inşaat sektöründeki yoğunluk, yılın belirli aylarında artış gösterdiğinden, üretim planlaması da bu talep değişimlerine göre şekillenmektedir. Bu durum, enerji tüketimi ve üretim kaynaklı CO₂ emisyonlarında belirgin farklılıklara yol açmaktadır. Örneğin, yüksek talep dönemlerinde fırınların daha uzun süre çalışması, yakıt tüketimini ve hammadde kullanımını dolayısıyla yanma ve proses kaynaklı emisyonları artırırken; düşük talep dönemlerinde fırınların kısmi yükte veya duruşta olması enerji yoğunluğunu ve spesifik emisyon değerlerini etkileyebilmektedir. Bu değişken, döner fırın operasyon saatinin takvim saatine oranı olarak tanımlanmakta ve üretim kapasite kullanımını doğrudan yansıtmaktadır. Dolayısıyla, mevsimsel üretim-emisyon ilişkisini

dengelemek ve yıllık bazda karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için bu faktörün dikkate alınması büyük önem taşımaktadır.

8. x_8 – Fırın OEE (%) (Overall equipment effectiveness)

OEE, üretim ekipmanlarının kullanılabilirlik, performans ve kalite olmak üzere üç temel parametre üzerinden değerlendirildiği bütünsel bir verimlilik göstergesidir. Eşitlik 5.11'de OEE formülü gösterilmiştir [28].

Performans ölçütü fırın sisteminin verimliliğini gösteren parametrelerden bir tanesini ifade etmektedir. Üretilen klinker miktarının döner fırının üretim dizayn kapasitesine bölümüyle bulunmaktadır. Fırın verimliliği düşüğe daha fazla yakıt tüketilmekte ve daha fazla CO₂ salımı gerçekleşmektedir. Yüksek performanslı fırınlar, daha düşük özgül emisyon sağlamaktadır.

Çimento üretim süreçlerinde kalite faktörü genellikle 1 olarak kabul edilmektedir. Bunun nedeni, düşük dayanım değerine sahip çimentoların dahi daha yüksek dayanım sağlayan çimentolarla karıştırılarak homojenleştirilmesi ve istenen kalite standardına ulaştırılmasıdır.

Kullanılabilirlik ise ; Ekipman çalışma saatinin, ekipman çalışma saati ve planlı/plansız duruş toplamalarına oranı olarak ifade edilmektedir.

$$OEE = \text{Performans \%} \times \text{Kalite \%} \times \text{Kullanılabilirlik \%} \quad (5.11)$$

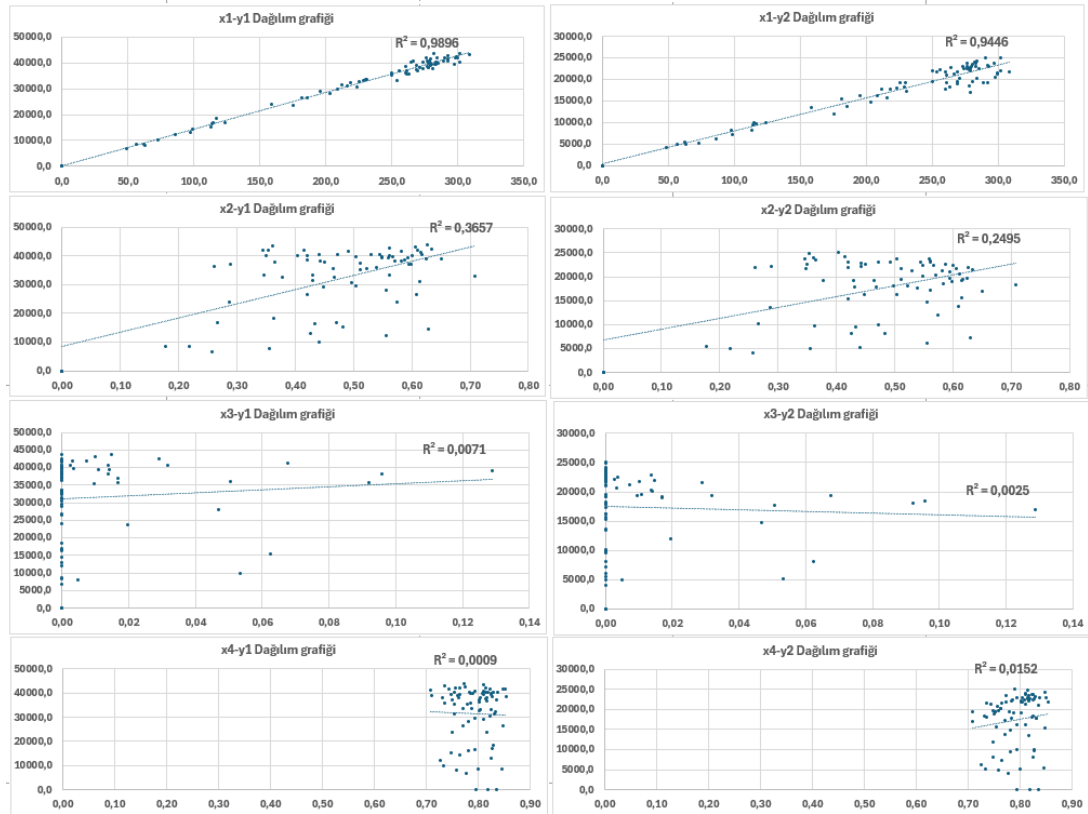
Bu bağlamda, OEE'nin çimento sektöründe özellikle ekipman verimliliği ve üretim sürekliliği açısından önemi büyüktür. OEE oranının yüksek olması, enerji tüketiminin optimize edilmesine ve dolayısıyla CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Bu değişkenler, hem literatür hem de çimento sektöründeki uygulama tecrübeleri ile doğrulanmış ve bu nedenle modelleme sürecine dahil edilmiştir. Çalışmanın sonraki bölümlerinde, bu değişkenlerin CO₂ tahmin modellerine etkisi ayrıntılı olarak test ve analiz edilmiştir.

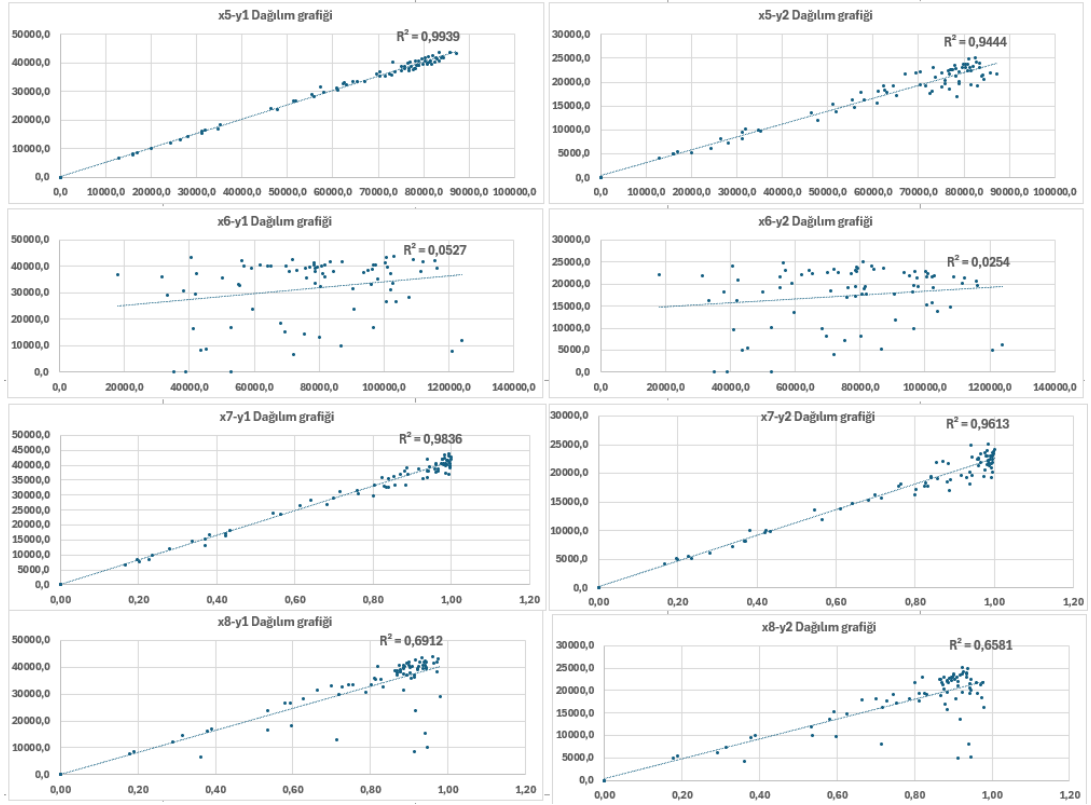
Çalışmada kullanılan veri seti 2019–06/2025 dönemine ait aylık anahtar performans gösterge (key performance indicator-KPI) verilerini içermekte olup, CO₂ emisyonları iki temel bileşen üzerinden modellenmiştir:

- y_1 : Proses kaynaklı CO₂ (ton)
- y_2 : Termal enerji kaynaklı CO₂ (ton)

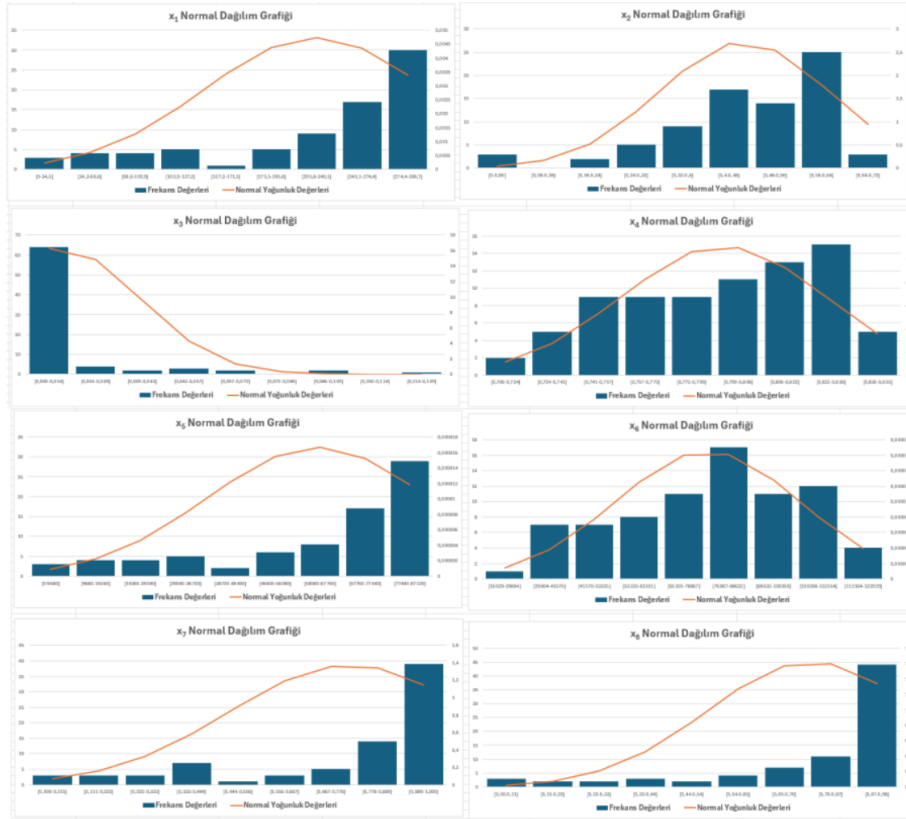
Her iki çıktı değişkeni (y_1 ve y_2) ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla ilk aşamada korelasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Korelasyon analiz türünün seçilebilmesi için, verilerin doğrusallığı ve normal dağılım gösterip göstermediği incelenmiş; bu kapsamda Şekil 5.2, Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.’te sunulan doğrusallık ve histogram grafikleri ile Tablo 5.3.’te de gösterildiği gibi Shapiro-Wilk testleri uygulanmıştır.



Şekil 5.2.. x_1 , x_2 , x_3 , x_4 'ün y_1 ve y_2 bağımlı değişkenleriyle doğrusallık grafiği.



Şekil 5.3. x_5 , x_6 , x_7 , x_8 'in y_1 ve y_2 bağımlı değişkenleriyle doğrusallık grafiği.



Şekil 5.4. Parametrelerin normal dağılım grafikleri (yazar tarafından oluşturulmuştur.)

Tablo 5.3. Shapiro-Wilk testi

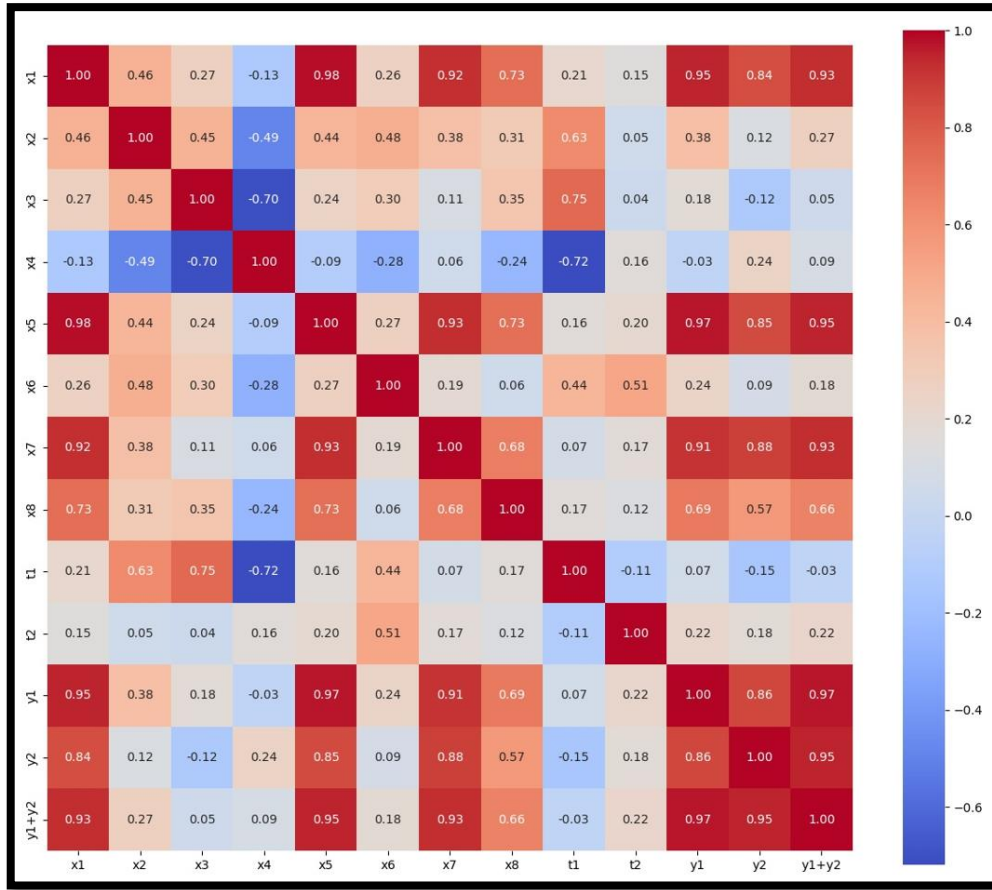
Değişken	W	p-değeri	Normal Dağılım?
x1	0.8052	0,0000000009	YOK.
x2	0.8969	0,0000114000	YOK.
x3	0.5044	0,0000000000	YOK.
x4	0.9677	0,0450000000	YOK.
x5	0.8137	0,0000000159	YOK.
x6	0.9770	0,0610000000	VAR.(0,05'ten büyük)
x7	0.7685	0,0000000337	YOK.
x8	0.7280	0,0000000293	YOK.

Yapılan analizler sonucunda, x_1-y_1 , x_1-y_2 , x_5-y_1 , x_5-y_2 , x_7-y_1 , x_7-y_2 değişken ilişkileri Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Tablo 5.4'te de görüldüğü üzere R^2 değerlerine göre doğrusal bir yapı göstermektedir.

Ayrıca, her bir değişken için histogram grafikleri incelendiğinde, sadece x_6 değişkeninin çan şeklinde bir yapı gösterdiğinden normal dağılıma sahip olduğu gözlemlenmiştir. Shapiro Wilk testi ile de w (1'e yakılığı) ve p ($> 0,05$) [61] değerlerine de bakılarak x_6 'nın normal dağılıma sahip olduğu görülmektedir.

Korelasyon katsayılarının hesaplanmasında Spearman korelasyon yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemin kullanılma nedeni, hem verilerdeki gürültünün etkisini azaltma kapasitesine sahip olması hem de literatürde de en sık tercih edilen shapiro-wilk testi uygulanan [61] normal ve normal dağılım göstermeyen değişkenlerle etkili bir şekilde çalışabilmesidir. Shapiro-Wilk testinde her değişken için w ve p değerleri hesaplanarak Spearman, ham değerler yerine değişkenlerin sıralamalarını dikkate aldığı için, ani dalgalanmalar ve uç değerlerin analiz üzerindeki bozucu etkisini minimize etmektedir. Ayrıca parametrik olmayan bir yöntem olması, dağılımı normal olmayan veri setlerinde de güvenilir sonuçlar sunmaktadır [44, 53, 58]. Pearson korelasyonu ise, değişkenler arasındaki doğrusal ilişkileri ve normal dağılıma sahip verileri analiz etmek için uygun bir yöntemdir. Spearman de böyle bir ön koşul gerektirmediği için, doğrusal olmayan ilişkilerde de güvenilir sonuçlar vermektedir [38, 58, 59].

Spearman korelasyonu ısı haritası Şekil 5.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Değişkenlerin spearman korelasyon ısı haritası.

Spearman korelasyonu ile birlikte, regresyon analizi p-değeri kullanılarak istatistiksel anlamlılık da değerlendirilmiştir. Böylece, yalnızca güçlü ilişkiye sahip ($> 0,6$) [60] olan değil, aynı zamanda istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0,05$) [44] olan değişkenler de tahmin modeline dahil edilmiştir.

Tablo 5.4. Toplam CO₂ emisyonunu etkileyen faktörlerin korelasyon ve regresyon katsayıları.

Değişken	Bağımlı	Spearman ρ	R ²	Regresyon p	Çoklu Reg. P (Diğer x'ler sabit)
x1	y1	0.946936453	0.9896361	$3,567 \times 10^{-77}$	0.540387179
x2	y1	0.382763199	0.3657355	$4,525 \times 10^{-09}$	0.983554384
x3	y1	0.177937416	0.0071111	0.46292	0.378831666
x4	y1	-0.032360863	0.0008656	0.79818	0.707361512
x5	y1	0.97164717	0.9939036	$6,224 \times 10^{-86}$	$1,68 \times 10^{-8}$
x6	y1	0.235049382	0.0527396	0.04312	0.37166937
x7	y1	0.914106861	0.9835732	$1,428 \times 10^{-69}$	0.098174027

Tablo 5.4. devam ediyor.

Değişken	Bağımlı	Spearman ρ	R²	Regresyon p	Çoklu Reg. P (Diğer x'ler sabit)
x ₈	y ₁	0.693986721	0.6911899	4,427 x 10 ⁻²¹	0.791869402
x ₁	y ₂	0.84020234	0.944643	1,632 x 10 ⁻⁴⁹	1,26 x 10 ⁻⁵
x ₂	y ₂	0.116282011	0.2494718	3,237 x 10 ⁻⁰⁶	0.000812733
x ₃	y ₂	-0.123382357	0.0025226	0.66233	1,21 x 10 ⁻⁵
x ₄	y ₂	0.243926806	0.0152383	0.28159	5,23 x 10 ⁻⁶
x ₅	y ₂	0.849484666	0.9443727	1,964 x 10 ⁻⁴⁹	0.112717391
x ₆	y ₂	0.085372485	0.0254333	0.16311	0.959297336
x ₇	y ₂	0.881277268	0.961258	2,086 x 10 ⁻⁵⁵	0.067440053
x ₈	y ₂	0.567119823	0.6580956	2,17 x 10 ⁻¹⁹	0.004261208

Tablo 5.4.'te sunulan sonuçlara göre, spearman korelasyon katsayısı dikkate alınmış ve bağımlı değişkenlerle güçlü ilişki ($> 0,6$) gösteren parametreler belirlenmiştir. Ayrıca, R² değerleri de incelenerek değişkenlerin açıklama gücü değerlendirilmiş ve regresyon analizi p-değerleri yardımıyla istatistiksel anlamlılık test edilmiştir. Bu üç ölçüte göre seçim yapılırken, çoklu regresyon analizi ise değişkenlerin birlikte modele sağladıkları katkıları görmek amacıyla destekleyici nitelikte uygulanmıştır [56]. Sonuç olarak, tahmin modellerine bağımsız değişken olarak x₁, x₅ ve x₇ dahil edilmiştir.

- x₁: Isıl enerji tüketimi (TJ)
- x₅: Klinker üretimi (ton)
- x₇: Sezonalite Faktörü (%)

Bu değişkenler, modelleme sürecinde ANFIS'e y₁ ve y₂ tahminlemesi için x₁, x₅ ve x₇ bağımsız değişkenler (girdi değişkenleri) olarak verilmiştir. Bu üç değişken ANFIS için Üyelik Fonksiyonları (Membership Functions – MF's) oluşturmaktadır. Girdi değişkenleri Tablo 5.5.'de gösterilmektedir.

Literatürde yer alan birçok uygulamanın yanı sıra yöntemi geliştiren Jang'ın da ortaya koyduğu üzere ANFIS yöntemi az girdi ile etkin bir çözüm ortaya koymaktadır. Bu nedenle girdi sayısının az olması daha az hata ile öngörü yapabilme imkânı vermektedir [62].

Tablo 5.5. CO₂ tahminlemesi için ANFIS'e girdi olarak verilen değişkenler.

t ₁	t ₂	x ₁	x ₅	x ₇	y ₁	y ₂
2019	Ocak	255,8	70373,5	0,87	36927,2	22167,6
2019	Şubat	195,3	55318,6	0,70	29027,4	16287,6
2019	Mart	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
2019	Nisan	114,8	31867,2	0,38	16721,7	10097,1
2019	Mayıs	290,3	81106,4	0,94	41990,7	24896,3
2019	Haziran	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
2019	Temmuz	158,5	46460,0	0,55	23952,1	13532,6
2019	Ağustos	282,0	83351,9	0,98	43549,2	24049,6
2019	Eylül	264,5	76914,6	0,96	40185,8	22649,0
2019	Ekim	116,8	35130,1	0,43	18354,6	9797,4
2019	Kasım	225,5	62389,5	0,84	32674,4	19257,7
2019	Aralık	56,7	16044,1	0,20	8382,6	5072,6
2020	Ocak	250,0	69534,1	0,85	36183,4	21972,4
2020	Şubat	113,8	31254,4	0,42	16263,9	9555,6
2020	Mart	48,7	12829,3	0,17	6676,0	4152,2
2020	Nisan	278,0	76556,0	0,98	39837,4	22352,8
2020	Mayıs	292,4	81891,1	1,00	42613,7	23371,0
2020	Haziran	230,0	64357,9	0,86	33489,9	19153,3
2020	Temmuz	266,3	78119,9	0,96	40651,2	21284,3
2020	Ağustos	276,2	80436,7	0,98	41856,8	23670,4
2020	Eylül	181,6	51249,1	0,68	26668,5	15378,7
2020	Ekim	279,4	79729,4	0,99	41488,8	22971,3
2020	Kasım	260,2	75204,4	0,97	38610,1	21859,4
2020	Aralık	283,9	82782,4	1,00	41885,3	24178,3
2021	Ocak	62,4	16906,4	0,23	8501,1	5486,5
2021	Şubat	260,9	73704,0	0,99	37060,7	20987,2
2021	Mart	276,4	77220,8	0,96	38586,1	22509,8
2021	Nisan	282,9	79808,7	1,00	39546,6	23646,5
2021	Mayıs	283,4	81193,2	0,99	40232,6	23014,9
2021	Haziran	97,5	26378,7	0,37	13071,1	8132,4
2021	Temmuz	279,3	80743,9	0,99	40010,0	22450,6
2021	Ağustos	276,5	80299,7	1,00	40494,4	23094,4
2021	Eylül	218,4	62956,5	0,83	32464,1	17803,8
2021	Ekim	228,6	62555,5	0,83	33064,1	18276,9
2021	Kasım	211,6	57320,0	0,76	31470,9	17834,4
2021	Aralık	273,3	73212,1	0,98	40196,4	23028,0
2022	Ocak	223,5	61114,3	0,76	30559,3	18120,1
2022	Şubat	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
2022	Mart	253,6	66937,1	0,88	33353,1	21734,8
2022	Nisan	297,3	80857,7	1,00	39384,2	23751,2

Tablo 5.5. devam ediyor.

t1	t2	x1	x5	x7	y1	y2
2022	Mayıs	301,7	82489,8	0,99	40104,2	25083,3
2022	Haziran	280,6	77942,9	0,97	37893,6	23418,4
2022	Temmuz	277,4	78302,0	0,94	38112,2	22877,8
2022	Ağustos	273,6	77599,0	0,96	37726,4	22524,5
2022	Eylül	268,8	76666,2	0,99	37272,9	21735,3
2022	Ekim	123,6	34827,5	0,42	16932,1	9983,5
2022	Kasım	285,2	81638,3	1,00	39690,2	22472,9
2022	Aralık	292,6	83511,8	0,98	40601,1	22959,1
2023	Ocak	278,6	79015,6	0,99	40485,8	22062,8
2023	Şubat	208,7	57908,5	0,80	29671,0	16272,7
2023	Mart	98,8	28101,5	0,34	14398,6	7268,1
2023	Nisan	230,8	65247,7	0,80	33431,5	17274,9
2023	Mayıs	216,0	60965,5	0,72	31237,3	15666,5
2023	Haziran	269,0	75770,7	0,92	38823,2	19585,1
2023	Temmuz	185,6	51873,0	0,61	26578,6	13732,9
2023	Ağustos	301,7	85793,0	1,00	43726,3	21889,7
2023	Eylül	270,9	75838,2	0,94	38156,2	20278,8
2023	Ekim	299,1	84139,5	0,98	42332,8	21532,3
2023	Kasım	249,8	70304,6	0,84	35372,1	19459,5
2023	Aralık	203,1	55864,2	0,64	28106,8	14736,8
2024	Ocak	260,2	72417,7	0,82	36017,6	17703,7
2024	Şubat	283,4	78950,7	1,00	39266,9	20153,2
2024	Mart	175,4	47724,8	0,56	23736,3	11974,7
2024	Nisan	261,1	71487,3	0,93	35554,9	19279,0
2024	Mayıs	63,0	15895,0	0,20	7905,5	4952,2
2024	Haziran	288,7	81496,1	0,97	40532,8	19364,3
2024	Temmuz	280,4	79013,9	0,94	39298,3	19603,7
2024	Ağustos	298,0	84327,8	0,98	41941,2	20620,7
2024	Eylül	299,5	83994,4	0,99	41775,4	21296,0
2024	Ekim	308,7	87119,9	0,99	43198,9	21678,8
2024	Kasım	269,3	75040,7	0,89	37088,7	18952,8
2024	Aralık	113,1	31159,0	0,37	15400,3	8106,6
2025	Ocak	277,7	76709,2	0,88	38045,0	18453,7
2025	Şubat	263,0	73050,7	0,94	35753,7	18130,7
2025	Mart	279,2	78446,8	0,89	39118,1	17061,8
2025	Nisan	292,3	82947,8	0,99	41362,5	19326,6
2025	Mayıs	86,0	24351,8	0,28	12143,2	6123,4
2025	Haziran	72,8	20086,2	0,24	10016,1	5180,3

5.4.2. ANFIS ile modelin eğitilmesi

ANFIS modelinde kullanılan üyelik fonksiyonları, sistemin öğrenme sürecinde önemli bir rol oynamaktadır ve tahmin performansını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada kullanılan fonksiyonlar farklı şekil ve parametre yapılarına sahip olup, CO₂ tahminlerinde çeşitli sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Her bir üyelik fonksiyonuna ait tanımlar Tablo 5.6.'da yer almaktadır.

Tablo 5.6. Üyelik fonksiyonları ve tanımları [36, 42, 44, 49].

Üyelik Fonksiyonu	İngilizce Adı	Kısaltma	Açıklama
Üçgen Üyelik Fonksiyonu	Triangular Membership Function	trimf	Üçgen şekilli; alt, orta ve üst sınırla tanımlanır.
Yamuk Üyelik Fonksiyonu	Trapezoidal Membership Function	trapmf	Yamuk şekilli; daha esnek sınırlar sağlar.
Gauss Üyelik Fonksiyonu	Gaussian Membership Function	gaussmf	Normal dağılım eğrisine benzer; yumuşak geçiş sağlar.
İki Gausslu Fonksiyon	Gaussian Combination MF	gauss2mf	İki Gauss eğrisinin birleşimi; daha karmaşık yapılar için.
Genel Bell Fonksiyonu	Generalized Bell MF	gbellmf	Çan şeklinde; parametrelerle şekli ayarlanabilir.
Çarpım Ters Üyelik fonksiyonu	Product Inverse MF	pimf	İki ters sigmoid fonksiyonun çarpımıyla oluşturulur. Orta bölgede yüksek, uçlarda düşük üyelik verir. Yumuşak geçişli ve simetriktir.
Sigmoid Farklı Üyelik Fonksiyonu	Difference of Sigmoid MF	dsigmf	İki sigmoid fonksiyonun farkı alınarak tanımlanır. Geçiş bölgesinde keskin ve asimetric üyelik sağlar.

Bu fonksiyonların her biri, ANFIS modelinin eğitim sürecinde farklı öğrenme dinamikleri oluşturmaktadır. Modelin eğitimi sırasında, her fonksiyonun CO₂ tahmin

performansı üzerindeki etkisi ayrı ayrı y_1 ve y_2 için değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme 5 Eğitim-Test Oranı üzerinden 7 Üyelik Fonksiyonu ile toplamda 35 modelden performans metrikleri baz alınarak en iyi sonuç seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar y_1 için Tablo 5.7. ve y_2 için tablo 5.8.'de gösterildiği gibi üyelik fonksiyonu seçiminin tahmin doğruluğu açısından kritik olduğunu gösterilmiştir.

Tablo 5.7. y_1 için farklı eğitim-test oranları ve üyelik fonksiyonları ile hata metrikleri.

Değişken (y_1 için)	Eğitim- Test Oranı	MF Tipi	MF's	R^2	MAE	MSE	RMSE	MAPE
x_1, x_5, x_7	95-5	pimf	3 3 3	0,9998	212,8	49165	221,7	1,033
x_1, x_5, x_7	95-5	trapmf	3 3 3	0,9997	413,3	3,99E+05	631,9	3,094
x_1, x_5, x_7	95-5	gauss2mf	3 3 3	0,9999	849,6	1,29E+06	1136	4,053
x_1, x_5, x_7	95-5	dsigmf	3 3 3	0,9999	631,3	1,32E+10	1150	1,883
x_1, x_5, x_7	95-5	trimf	3 3 3	0,9995	1387	2,54E+06	1593	10,47
x_1, x_5, x_7	95-5	gaussmf	3 3 3	0,9999	1630	6,15E+06	2479	6,509
x_1, x_5, x_7	95-5	gbellmf	3 3 3	0,5522	5004	9,57E+07	9784	13,03
x_1, x_5, x_7	89-11	trimf	3 3 3	0,9924	937,4	1,21E+06	1098	3,623
x_1, x_5, x_7	89-11	dsigmf	3 3 3	0,9775	1530	3,59E+06	1895	5,79
x_1, x_5, x_7	89-11	gbellmf	3 3 3	0,8996	2525	1,60E+07	4003	9,179
x_1, x_5, x_7	89-11	gauss2mf	3 3 3	0,8929	2878	1,71E+07	4133	9,255
x_1, x_5, x_7	89-11	trapmf	3 3 3	0,8500	3377	2,39E+07	4892	10,35
x_1, x_5, x_7	89-11	gaussmf	3 3 3	0,7173	3855	4,51E+07	6716	12,29
x_1, x_5, x_7	89-11	pimf	3 3 3	-1,032	9487	3,24E+08	18004	25,65
x_1, x_5, x_7	84-16	trimf	3 3 3	0,9933	831,4	9,68E+05	983,7	3,339
x_1, x_5, x_7	84-16	trapmf	3 3 3	0,9921	803,2	1,13E+06	1065	3,288
x_1, x_5, x_7	84-16	dsigmf	3 3 3	0,9683	14,63	4,58E+06	2139	4,64
x_1, x_5, x_7	84-16	gbellmf	3 3 3	0,9025	29,03	1,41E+07	3750	10,08
x_1, x_5, x_7	84-16	gauss2mf	3 3 3	0,8972	2167	1,48E+07	3851	6,099
x_1, x_5, x_7	84-16	gaussmf	3 3 3	0,7569	3751	3,51E+07	5922	10,38
x_1, x_5, x_7	84-16	pimf	3 3 3	-18,284	15725	2,78E+09	52738	40,9
x_1, x_5, x_7	80-20	trapmf	3 3 3	0,9918	856,5	1,32E+06	1149	3,578
x_1, x_5, x_7	80-20	gauss2mf	3 3 3	0,8850	2676	1,85E+07	42,96	7,634
x_1, x_5, x_7	80-20	gbellmf	3 3 3	0,8212	3104	2,87E+07	5357	9,739
x_1, x_5, x_7	80-20	trimf	3 3 3	0,7914	2985	3,35E+07	5786	27,51
x_1, x_5, x_7	80-20	gaussmf	3 3 3	0,7648	3214	3,77E+07	6144	9,405
x_1, x_5, x_7	80-20	pimf	3 3 3	0,6938	3272	4,91E+07	7010	9,577

Tablo 5.7. devam ediyor.

Değişken (y1 için)	Eğitim-Test Oranı	MF Tipi	MF's	R ²	MAE	MSE	RMSE	MAPE
X1, X5, X7	80-20	dsigmf	3 3 3	0,6921	3952	4,94E+07	7029	11,48
X1, X5, X7	69-31	trapmf	3 3 3	0,9947	574,6	6,44E+05	802,6	2,357
X1, X5, X7	69-31	pimf	3 3 3	0,9421	1407	7,08E+06	2661	4,207
X1, X5, X7	69-31	dsigmf	3 3 3	0,9031	2156	1,18E+07	3436	7,403
X1, X5, X7	69-31	gauss2mf	3 3 3	0,8547	2639	1,78E+07	4216	8,564
X1, X5, X7	69-31	gbellmf	3 3 3	0,6758	4223	3,97E+07	6298	14,69
X1, X5, X7	69-31	trimf	3 3 3	0,4780	4625	6,39E+07	79,92	20,59
X1, X5, X7	69-31	gaussmf	3 3 3	-0,7359	7048	2,12E+08	145,7	19,71

Tablo 5.8. y2 için farklı eğitim-test oranları ve üyelik fonksiyonları ile hata metrikleri

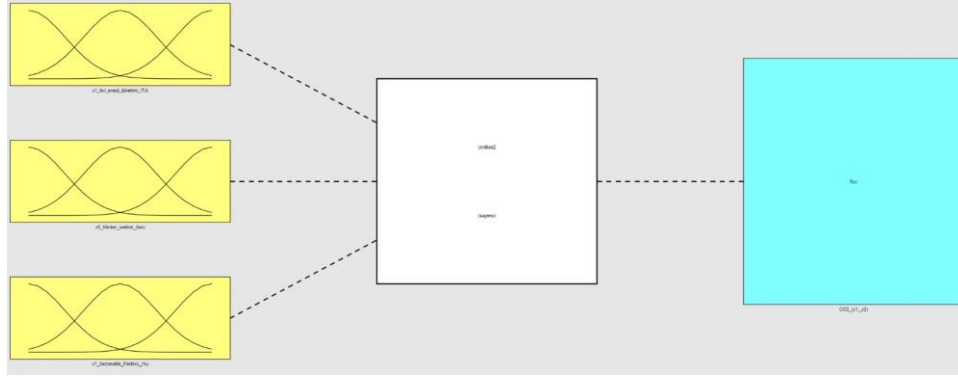
Değişken (y2 için)	Eğitim-Test Oranı	MF Tipi	MF's	R ²	MAE	MSE	RMSE	MAPE
X1, X5, X7	95-5	gauss2mf	3 3 3	0,8943	1707	4,24E+06	2058	19,487
X1, X5, X7	95-5	gbellmf	3 3 3	0,8827	1611	4,70E+06	2169	11,621
X1, X5, X7	95-5	gaussmf	3 3 3	0,8541	2013	5,85E+06	2418	15,257
X1, X5, X7	95-5	trapmf	3 3 3	0,8361	2403	6,57E+06	2563	23,071
X1, X5, X7	95-5	dsigmf	3 3 3	0,8302	2093	6,81E+06	2609	15,052
X1, X5, X7	95-5	pimf	3 3 3	0,7836	2526	8,67E+06	2945	20,704
X1, X5, X7	95-5	trimf	3 3 3	-0,2865	6264	5,16E+07	7181	95,002
X1, X5, X7	89-11	trapmf	3 3 3	0,9069	1552	3,19E+06	1785	12,273
X1, X5, X7	89-11	dsigmf	3 3 3	0,8720	1704	4,38E+06	2093	13,968
X1, X5, X7	89-11	trimf	3 3 3	0,7529	2615	8,45E+06	2908	19,24
X1, X5, X7	89-11	gbellmf	3 3 3	0,3374	3229	2,27E+07	4761	22,313
X1, X5, X7	89-11	gaussmf	3 3 3	0,1197	4148	3,01E+07	5488	26,529
X1, X5, X7	89-11	gauss2mf	3 3 3	-0,1005	5018	3,76E+07	6136	40,418
X1, X5, X7	89-11	pimf	3 3 3	-0,3711	4657	4,69E+07	6849	31,351
X1, X5, X7	84-16	dsigmf	3 3 3	0,8554	1881	4,85E+06	2203	14,016
X1, X5, X7	84-16	trapmf	3 3 3	0,8538	1962	4,90E+06	2214	12,774
X1, X5, X7	84-16	pimf	3 3 3	0,8241	2221	5,90E+06	2429	14,582
X1, X5, X7	84-16	gbellmf	3 3 3	0,8152	2213	6,20E+06	2490	15,101
X1, X5, X7	84-16	trimf	3 3 3	0,7238	2805	9,26E+06	3044	21,813
X1, X5, X7	84-16	gauss2mf	3 3 3	-0,3518	4679	4,53E+07	6734	32,803
X1, X5, X7	84-16	gaussmf	3 3 3	-0,7775	4723	5,96E+07	7721	29,129

Tablo 5.8 devam ediyor.

Değişken (y2 için)	Eğitim-Test Oranı	MF Tipi	MF's	R ²	MAE	MSE	RMSE	MAPE
X1, X5, X7	80-20	pimf	3 3 3	0,8619	1753	5,35E+06	2244	11,515
X1, X5, X7	80-20	trapmf	3 3 3	0,8507	2025	5,44E+06	2333	12,759
X1, X5, X7	80-20	trimf	3 3 3	0,7635	2620	8,62E+06	2937	22,493
X1, X5, X7	80-20	dsigmf	3 3 3	0,7160	2693	1,04E+07	3218	18,158
X1, X5, X7	80-20	gaussmf	3 3 3	0,7139	2601	1,04E+07	3230	21,41
X1, X5, X7	80-20	gbellmf	3 3 3	0,5956	3043	1,47E+07	3840	22,584
X1, X5, X7	80-20	gauss2mf	3 3 3	0,5190	3182	1,75E+07	4188	21,656
X1, X5, X7	69-31	gaussmf	3 3 3	0,5326	3177	1,36E+07	3681	29,97
X1, X5, X7	69-31	trapmf	3 3 3	0,3706	3270	1,82E+07	4272	18,779
X1, X5, X7	69-31	dsigmf	3 3 3	0,3124	3612	1,99E+07	4465	20,698
X1, X5, X7	69-31	gauss2mf	3 3 3	0,2455	3253	2,19E+07	4677	18,82
X1, X5, X7	69-31	trimf	3 3 3	-0,5346	4342	4,45E+07	6670	32,918
X1, X5, X7	69-31	gbellmf	3 3 3	-2,332	6436	9,66E+07	9829	44,908
X1, X5, X7	69-31	pimf	3 3 3	-3,520	5575	1,31E+08	11448	31,404

Yapılan ANFIS tahminleme sonuçları değerlendirildiğinde R² değerleri en yüksek, MAE'nin düşük olması, modelin doğru tahminler yaptığını göstermektedir. MSE'nin düşük olması, daha küçük hatalara sahip bir modeli işaret etmektedir. RMSE'nin ve MAPE'nin düşük olması, modelin daha kesin tahminler yaptığını göstermektedir [44].

Değerlendirme neticesinde, eğitim ve test verilerinin y₁ için 95-5 oranında ayrıldığı göz önünde bulundurularak en iyi performansı gösteren üyelik fonksiyonu olarak pimf ve y₂ için 89-11 oranında ayrıldığı göz önünde bulundurularak en iyi performansı gösteren üyelik fonksiyonu olarak trapmf tespit edilmiştir. Bu fonksiyonlar, 2019-2025/6.Ay dönemi için yapılan tahminlemelerde kullanılmış ve en iyi sonucu verdiği tespit edilen pimf ve trapmf için adım adım ANFIS yapısı aşağıda anlatılmıştır.



Şekil 5.6. ANFIS model yapısının oluşturulması

Bu çalışmada kullanılan Şekil 5.6.'da da gösterildiği gibi ANFIS modeli, Sugeno FIS yapısı kullanılmıştır. Tahminleme problemlerinde (örneğin CO₂ emisyonu) mamdani tipinin daha sezgisel kalması, Sugeno tipinin ise matematiksel analiz yapması, hız avantajı, çoklu giriş-tek çıkışta kullanılması ve literatür taramasında CO₂ tahminlemede çoğunlukla bu yöntemin kullanılması sebebiyle bu yapı tercih sebebi olmuştur [36, 44, 48, 49, 51]. giriş değişkenleri olarak x_1 , x_5 ve x_7 kullanılmış ve her biri için üçer üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Üçer üyelik fonksiyonu kombinasyonu ile toplam 27 kural oluşturulmuş, 150 kez döngüye sokularak, bu kurallar giriş değerlerine göre lineer çıkışlar üretmiştir.

Sabit (constant) çıkışta her kural tek bir sabit değer üretmektedir, girdiler değişse de sonuç değişmemektedir. Doğrusal (linear) çıkışta ise her kural, girdilerin doğrusal fonksiyonu olarak ifade edilmektedir ve girdiler değiştikçe çıktılar da değişmektedir. Sabit daha basit ve tahmini sonuç verirken, doğrusal daha esnek olup genellikle daha yüksek doğruluk sağlamaktadır.

Modelin işleyişi; girişlerin bulanıklaştırılması, kuralların çalıştırılması, elde edilen çıkışların ağırlıklı ortalama ile birleştirilmesi ve nihai tahminin üretilmesi adımlarından oluşmuştur. Bu yaklaşım, verilerin esnek ve gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlamıştır.

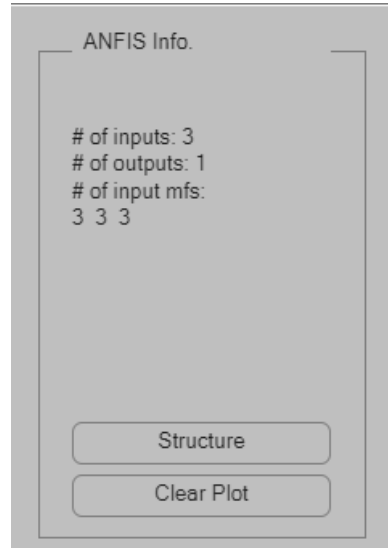
Şekil 5.7.'de ANFIS yapısı gösterilmektedir. "MFs 3 3 3" ifadesi, modelde yer alan üç giriş değişkeninin her biri için üçer adet pimf ve trapmf üyelik fonksiyonu tanımlandığını ifade etmektedir. Bu yapı, eğitim aşamasında verilerin en düşük hata oranına göre denenerek bulunmuştur. Veri setinin az olmasından kaynaklı, "MFs 4 4 4" veya "MFs 5 5 5" gibi fazla kurallı sistemde hata oranı yüksek ve sabit kalmaktadır. Seçilen üyelik katmanı her giriş

değişkeninin değer aralığını düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç bölgeye ayırarak daha ayrıntılı ve hassas bir modelleme yapılmasına imkân sağlamaktadır.

Örneğin, x_1 için düşük, orta ve yüksek seviyeleri temsil eden üç üyelik fonksiyonu bulunmaktadır. Bu üyelik fonksiyonları y_1 için pimf, y_2 için ise trapmf olarak seçilmiştir. Her girişte üçer üyelik fonksiyonu bulunması, toplamda $3 \times 3 \times 3 = 27$ kuralın oluşmasını sağlamaktadır. Bu kurallar, giriş değerlerinin kombinasyonlarına göre çıkış fonksiyonunu belirlemektedir.

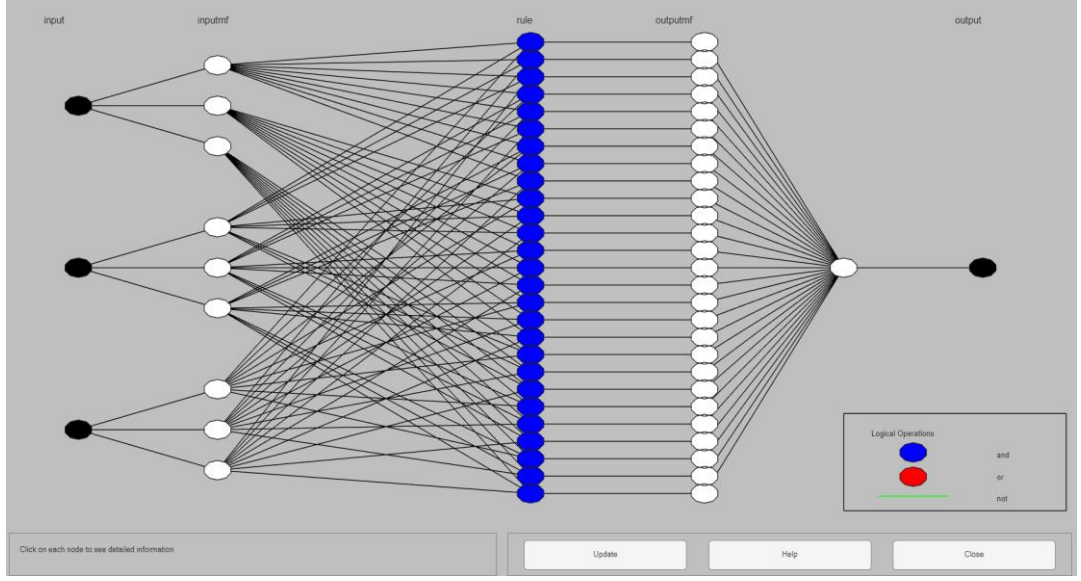
Katsayılar, girdilerin (x_1, x_5, x_7) çıktı (y) üzerindeki etki düzeylerini belirlemektedir. “ x_1 düşük, x_5 yüksek ve x_7 orta ise $y = 0,5 \cdot x_1 + 0,3 \cdot x_5 + 0,2 \cdot x_7 + \text{sabit}$ ” şeklinde ifade edilmektedir. 0,5 katsayısı x_1 'in en yüksek etkiye sahip olduğunu, 0,3 katsayısı x_5 'in orta düzeyde etkide bulunduğunu, 0,2 katsayısı ise x_7 'nin daha düşük bir etki yarattığını göstermektedir.

Sonuçta hangi malzeme (girdi) ne kadar baskın olacaksa katsayı ona göre büyür/küçülür.



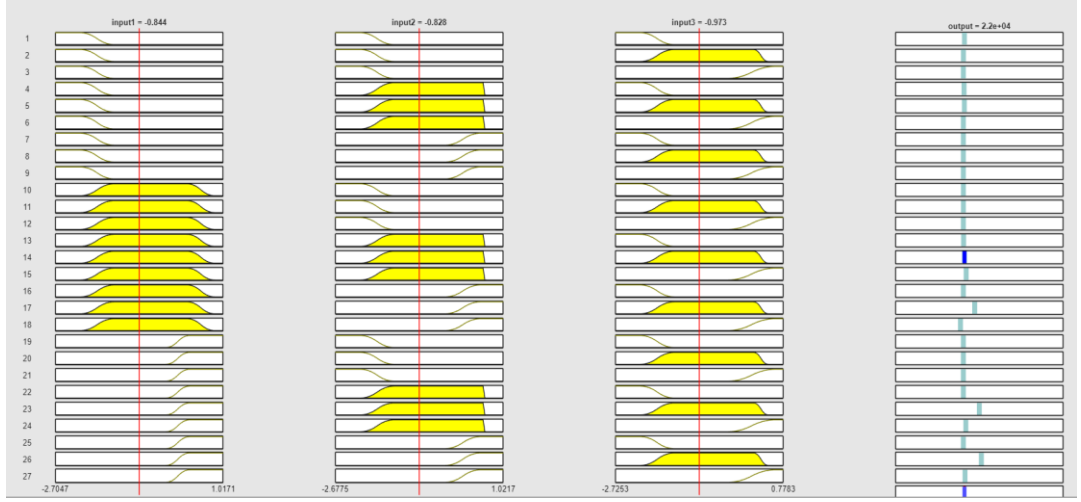
Şekil 5.7. ANFIS yapısı

Şekil 5.7.' de gösterilen kurallar sonucunda pimf ve trapmf üyelik fonksiyonlarına göre oluşturulan ANFIS model yapısı Şekil 5.8.'de gösterilmiştir.



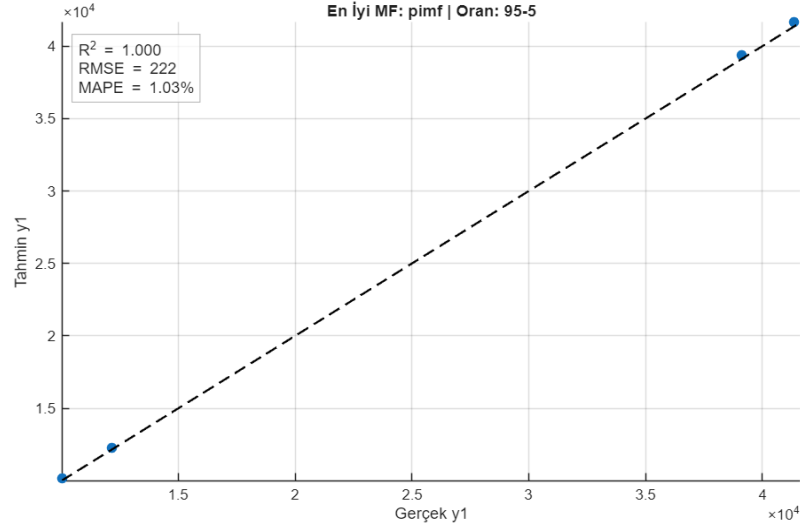
Şekil 5.8. Pimf ve trapmf üyelik fonksiyonlarına göre anfis model yapısı.

y_1 için model oluşturulduktan sonra bulanık kurallar tanımlanmış ve pimf üyelik fonksiyonuna dayalı olarak oluşturulan bulanık mantık modeli Şekil 5.9.'da sunulmuştur.



Şekil 5.9. y_1 için pimf üyelik fonksiyonuna göre bulanık mantık kuralları

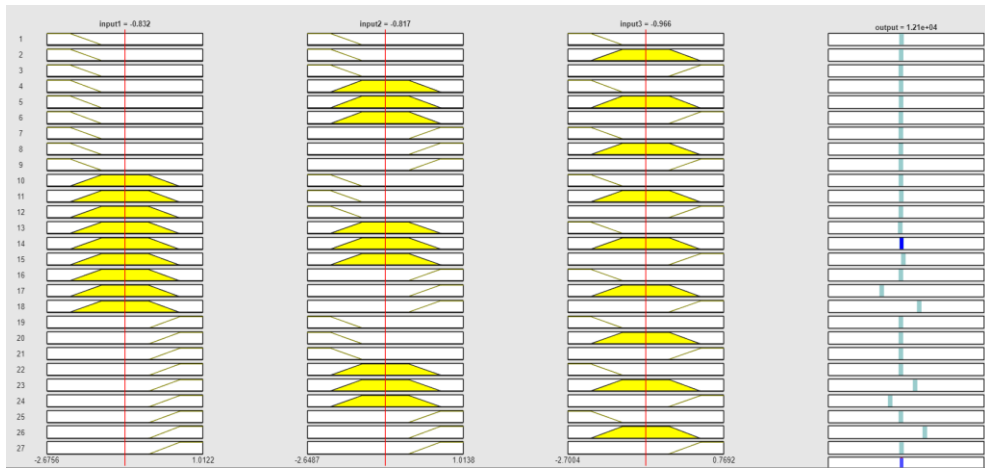
Pimf üyelik fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilen tahmin sonuçları ile gerçek CO₂ emisyon değerlerinin karşılaştırmalı analizi ise Şekil 5.10.'da grafik olarak gösterilmiştir. Bu karşılaştırma, modelin farklı veri setlerinde ne ölçüde doğru tahminler yapabildiğini göstermesi açısından önemli bir değerlendirme sağlamaktadır.



Şekil 5.10. y₁ için gerçek CO₂ emisyonu verileri ve pimf üyelik fonksiyonu ile eğitilen ANFIS modelinin test sonuçları.

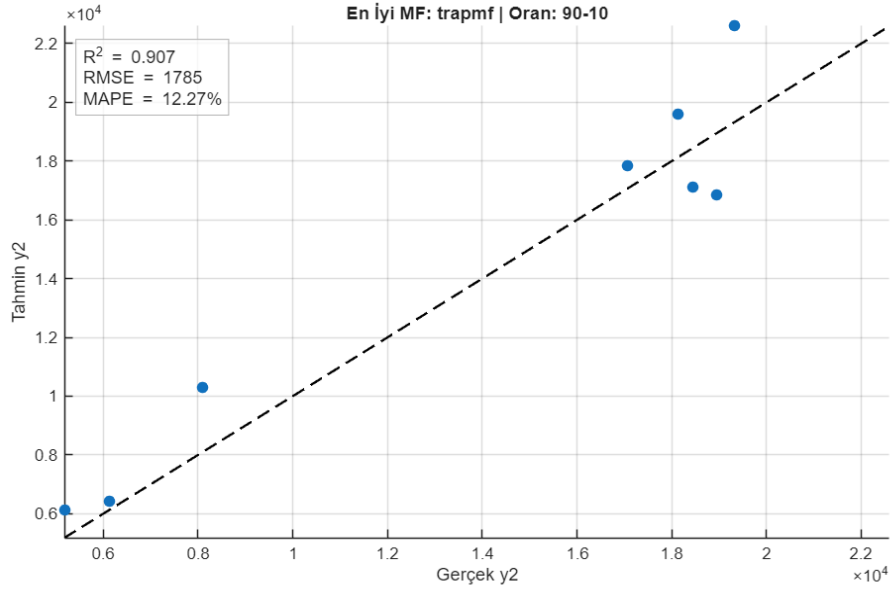
Yapılan değerlendirmeler sonucunda, y₁ değişkeni için en iyi performansın Pimf üyelik fonksiyonu ile, y₂ değişkeni için ise Trapmf üyelik fonksiyonu ile elde edildiği belirlenmiştir.

Trapmf üyelik fonksiyonu ile eğitilen ANFIS modeli ve bu modele ait bulanık mantık kuralları Şekil 5.11.'de sunulmuştur.



Şekil 5.11. y₂ için trapmf üyelik fonksiyonuna göre bulanık mantık kuralları

Trapmf üyelik fonksiyonu kullanılarak y₂ için gerçekleştirilen tahmin sonuçları ile gerçek CO₂ emisyon değerlerinin karşılaştırmalı analizi ise Şekil 5.12.'de görselleştirilmiştir.



Şekil 5.12. y_2 için gerçek CO₂ emisyonu verileri ve trapmf üyelik fonksiyonu ile eğitilen ANFIS modelinin test sonuçları.

Pimf ve trapmf üyelik fonksiyonları kullanılarak y_1 ve y_2 tahmini için eğitilen ANFIS modelleri karşılaştırılmıştır. Her bir model, giriş değişkenlerinin farklı üyelik fonksiyonları ile nasıl temsil edileceğini belirlemiş ve bu temsil biçimine göre CO₂ emisyon tahminleri 2019-06/2025 yılları arası aylık olarak yapılmıştır. Elde edilen tahmin sonuçları aşağıda y_1 için Tablo 5.9. ve y_2 için Tablo 5.10.'da ayrıntılı olarak sunulmuştur. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, pimf ve trapmf üyelik fonksiyonları ile eğitilen ANFIS modellerinin CO₂ emisyon tahminlerinde öne çıktığı görülmüştür.

Tablo 5.9. y_1 için yıllık gerçek ve tahmin tablosu

Yıl	Ay	Gerçek_y1	Tahmin_y1	Hata
2019	Ocak	36927,2	36575,0	-352,2
2019	Şubat	29027,4	29170,0	142,6
2019	Mart	0,0	0,0	0,0
2019	Nisan	16721,7	16077,0	-644,7
2019	Mayıs	41990,7	40691,0	-1299,7
2019	Haziran	0,0	0,0	0,0
2019	Temmuz	23952,1	23879,0	-73,1
2019	Ağustos	43549,2	42608,0	-941,2
2019	Eylül	40185,8	39713,0	-472,8
2019	Ekim	18354,6	18304,0	-50,6
2019	Kasım	32674,4	32631,0	-43,4
2019	Aralık	8382,6	8382,2	-0,4

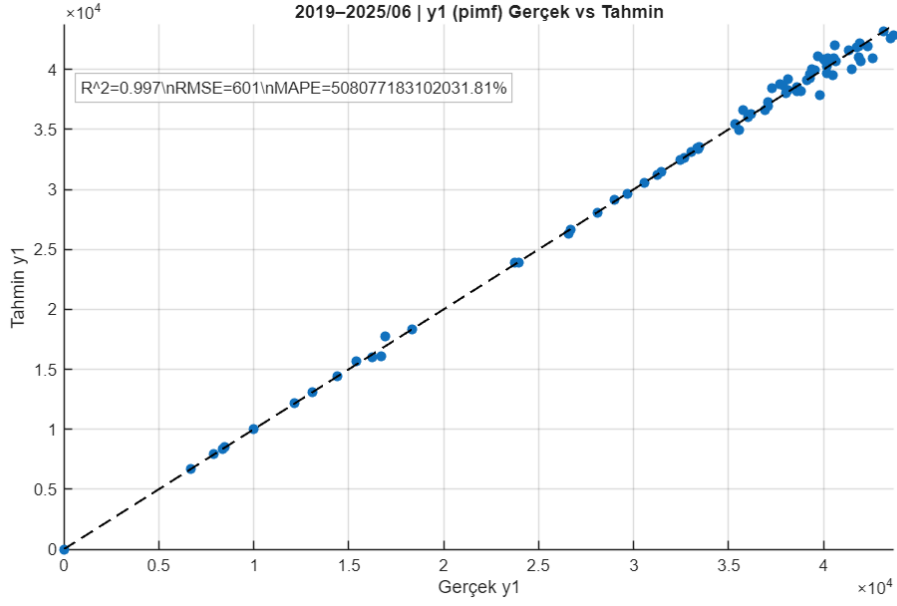
Tablo 5.9. devam ediyor.

Yıl	Ay	Gerçek_y1	Tahmin_y1	Hata
2020	Ocak	36183,4	36317,0	133,6
2020	Şubat	16263,9	16014,0	-249,9
2020	Mart	6676,0	6676,1	0,1
2020	Nisan	39837,4	37879,0	-1958,4
2020	Mayıs	42613,7	40942,0	-1671,7
2020	Haziran	33489,9	33525,0	35,1
2020	Temmuz	40651,2	46677,0	6025,8
2020	Ağustos	41856,8	40979,0	-877,8
2020	Eylül	26668,5	26667,0	-1,5
2020	Ekim	41488,8	40006,0	-1482,8
2020	Kasım	38610,1	38535,0	-75,1
2020	Aralık	41885,3	41966,0	80,7
2021	Ocak	8501,1	8501,2	0,1
2021	Şubat	37060,7	36960,0	-100,7
2021	Mart	38586,1	38232,0	-354,1
2021	Nisan	39546,6	39900,0	353,4
2021	Mayıs	40232,6	40899,0	666,4
2021	Haziran	13071,1	13071,0	-0,1
2021	Temmuz	40010,0	40844,0	834,0
2021	Ağustos	40494,4	40730,0	235,6
2021	Eylül	32464,1	32472,0	7,9
2021	Ekim	33064,1	33092,0	27,9
2021	Kasım	31470,9	31466,0	-4,9
2021	Aralık	40196,4	40245,0	48,6
2022	Ocak	30559,3	30572,0	12,7
2022	Şubat	0,0	0,0	0,0
2022	Mart	33353,1	33467,0	113,9
2022	Nisan	39384,2	39984,0	599,8
2022	Mayıs	40104,2	40753,0	648,8
2022	Haziran	37893,6	38659,0	765,4
2022	Temmuz	38112,2	39176,0	1063,8
2022	Ağustos	37726,4	38796,0	1069,6
2022	Eylül	37272,9	38466,0	1193,1
2022	Ekim	16932,1	17718,0	785,9
2022	Kasım	39690,2	41105,0	1414,8
2022	Aralık	40601,1	41984,0	1382,9
2023	Ocak	40485,8	39504,0	-981,8
2023	Şubat	29671,0	29673,0	2,0
2023	Mart	14398,6	14399,0	0,4
2023	Nisan	33431,5	33367,0	-64,5

Tablo 5.9. devam ediyor.

Yıl	Ay	Gerçek_y1	Tahmin_y1	Hata
2023	Mayıs	31237,3	31244,0	6,7
2023	Haziran	38823,2	38234,0	-589,2
2023	Temmuz	26578,6	26279,0	-299,6
2023	Ağustos	43726,3	42809,0	-917,3
2023	Eylül	38156,2	38294,0	137,8
2023	Ekim	42332,8	41965,0	-367,8
2023	Kasım	35372,1	35420,0	47,9
2023	Aralık	28106,8	28040,0	-66,8
2024	Ocak	36017,6	36010,0	-7,6
2024	Şubat	39266,9	39275,0	8,1
2024	Mart	23736,3	23941,0	204,7
2024	Nisan	35554,9	34953,0	-601,9
2024	Mayıs	7905,5	7905,4	-0,1
2024	Haziran	40532,8	40928,0	395,2
2024	Temmuz	39298,3	39581,0	282,7
2024	Ağustos	41941,2	42166,0	224,8
2024	Eylül	41775,4	41837,0	61,6
2024	Ekim	43198,9	43200,0	1,1
2024	Kasım	37088,7	37289,0	200,3
2024	Aralık	15400,3	15655,0	254,7
2025	Ocak	38045,0	38037,0	-8,0
2025	Şubat	35753,7	36608,0	854,3
2025	Mart	39118,1	39094,0	-24,1
2025	Nisan	41362,5	41624,0	261,5
2025	Mayıs	12143,2	12143,0	-0,2
2025	Haziran	10016,1	10016,0	-0,1

Bu karşılaştırmalar sonucunda, pimf üyelik fonksiyonu ile eğitilen ANFIS modellerinin CO₂ emisyon tahminindeki etkinlikleri ise Şekil 5.13.'te net bir biçimde ortaya konmuştur.



Şekil 5.13. Gerçek ve y₁ için tahminlenen CO₂ emisyonları

Tablo 5.10. y₂ için yıllık gerçek ve tahmin tablosu

Yıl	Ay	Gerçek_y2	Tahmin_y2	Hata
2019	Ocak	22167,6	21985,0	-182,6
2019	Şubat	16287,6	16336,0	48,4
2019	Mart	0,0	0,0	0,0
2019	Nisan	10097,1	9067,6	-1029,5
2019	Mayıs	24896,3	20682,0	-4214,3
2019	Haziran	0,0	0,0	0,0
2019	Temmuz	13532,6	12961,0	-571,6
2019	Ağustos	24049,6	22296,0	-1753,6
2019	Eylül	22649,0	21857,0	-792,0
2019	Ekim	9797,4	10506,0	708,6
2019	Kasım	19257,7	19000,0	-257,7
2019	Aralık	5072,6	5069,6	-3,0
2020	Ocak	21972,4	21833,0	-139,4
2020	Şubat	9555,6	9277,1	-278,5
2020	Mart	4152,2	4153,7	1,5
2020	Nisan	22352,8	22634,0	281,2
2020	Mayıs	23371,0	22876,0	-495,0
2020	Haziran	19153,3	19331,0	177,7
2020	Temmuz	21284,3	21774,0	489,7
2020	Ağustos	23670,4	22270,0	-1400,4
2020	Eylül	15378,7	15337,0	-41,7
2020	Ekim	22971,3	22799,0	-172,3

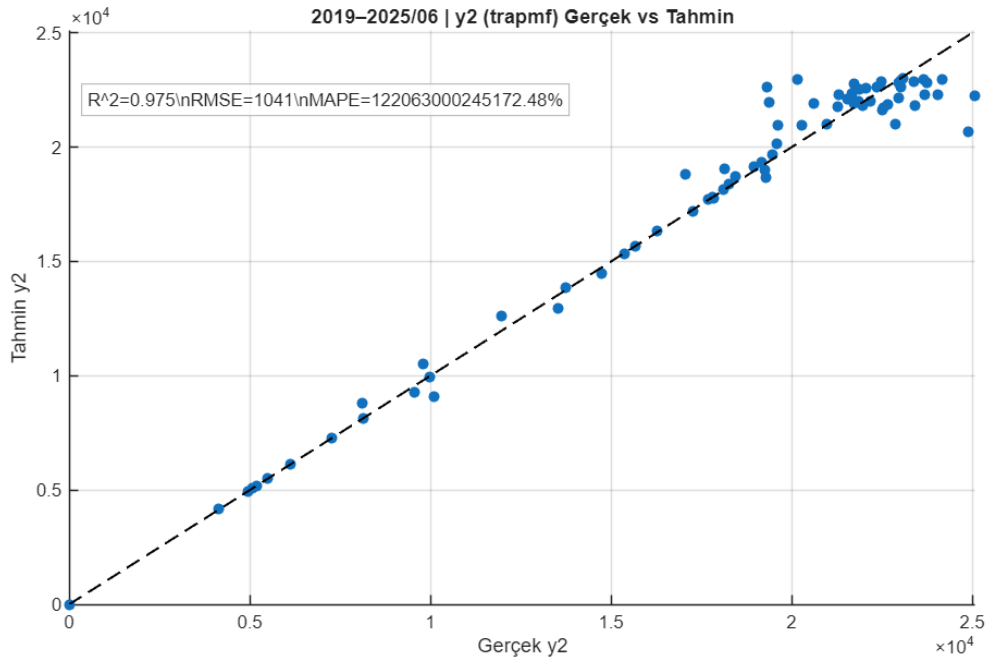
Tablo 5.10. devam ediyor.

Yıl	Ay	Gerçek_y2	Tahmin_y2	Hata
2020	Kasım	21859,4	21986,0	126,6
2020	Aralık	24178,3	22963,0	-1215,3
2021	Ocak	5486,5	5487,3	0,8
2021	Şubat	20987,2	21023,0	35,8
2021	Mart	22509,8	21601,0	-908,8
2021	Nisan	23646,5	22937,0	-709,5
2021	Mayıs	23014,9	22623,0	-391,9
2021	Haziran	8132,4	8131,9	-0,5
2021	Temmuz	22450,6	22656,0	205,4
2021	Ağustos	23094,4	22986,0	-108,4
2021	Eylül	17803,8	17801,0	-2,8
2021	Ekim	18276,9	18391,0	114,1
2021	Kasım	17834,4	17784,0	-50,4
2021	Aralık	23028,0	22932,0	-96,0
2022	Ocak	18120,1	18144,0	23,9
2022	Şubat	0,0	0,0	0,0
2022	Mart	21734,8	21888,0	153,2
2022	Nisan	23751,2	22823,0	-928,2
2022	Mayıs	25083,3	22253,0	-2830,3
2022	Haziran	23418,4	21828,0	-1590,4
2022	Temmuz	22877,8	20982,0	-1895,8
2022	Ağustos	22524,5	21720,0	-804,5
2022	Eylül	21735,3	22773,0	1037,7
2022	Ekim	9983,5	9935,7	-47,8
2022	Kasım	22472,9	22880,0	407,1
2022	Aralık	22959,1	22147,0	-812,1
2023	Ocak	22062,8	22596,0	533,2
2023	Şubat	16272,7	16329,0	56,3
2023	Mart	7268,1	7269,4	1,3
2023	Nisan	17274,9	17205,0	-69,9
2023	Mayıs	15666,5	15669,0	2,5
2023	Haziran	19585,1	20148,0	562,9
2023	Temmuz	13732,9	13858,0	125,1
2023	Ağustos	21889,7	22522,0	632,3
2023	Eylül	20278,8	20942,0	663,2
2023	Ekim	21532,3	22116,0	583,7
2023	Kasım	19459,5	19664,0	204,5
2023	Aralık	14736,8	14477,0	-259,8
2024	Ocak	17703,7	17695,0	-8,7
2024	Şubat	20153,2	22935,0	2781,8
2024	Mart	11974,7	12614,0	639,3

Tablo 5.10. devam ediyor.

Yıl	Ay	Gerçek_y2	Tahmin_y2	Hata
2024	Nisan	19279,0	18655,0	-624,0
2024	Mayıs	4952,2	4950,2	-2,0
2024	Haziran	19364,3	21979,0	2614,7
2024	Temmuz	19603,7	20958,0	1354,3
2024	Ağustos	20620,7	21897,0	1276,3
2024	Eylül	21296,0	22297,0	1001,0
2024	Ekim	21678,8	22351,0	672,2
2024	Kasım	18952,8	19164,0	211,2
2024	Aralık	8106,6	8823,1	716,5
2025	Ocak	18453,7	18708,0	254,3
2025	Şubat	18130,7	19050,0	919,3
2025	Mart	17061,8	18825,0	1763,2
2025	Nisan	19326,6	22635,0	3308,4
2025	Mayıs	6123,4	6119,8	-3,6
2025	Haziran	5180,3	5185,7	5,4

Bu karşılaştırmalar sonucunda, trapmf üyelik fonksiyonu ile eğitilen ANFIS modellerinin CO₂ emisyon tahminindeki etkinlikleri ise Şekil 5.14.'de net bir biçimde ortaya konmuştur.



Şekil 5.14. Gerçek ve y2 için tahminlenen CO₂ emisyonları

Sonuç olarak y₁ tahminlemesi için pimf, y₂ tahminlemesi için trapmf üyelik fonksiyonu kullanılmış ve tahminlenen CO₂ emisyonlarının 2019-06/2025 yılları arasında

gerçek değerlere yakın olduğu gözlemlenmiş, belirlenen eğitim-test oranı ve bu üyelik fonksiyonları kullanılarak 2025 ikinci 6 aylık dönemin tahmini için kullanılabilir olduğu kanıtlanmıştır.

5.4.3. Senaryoların oluşturulması ve gelecek döneme ait tahminlerin yapılması

ANFIS ile eğitilen parametreler kullanılarak, 2025 yılın son 6 aylık dönemin CO₂ emisyon tahminleri gerçekleştirilmiştir. Tahmin sürecinde ANFIS'e girdi olarak verilmek üzere bir çimento fabrikası için öngörülen gelecek değerlerinden hareketle öngörü senaryosu oluşturulmuş ve elde edilen tahmin sonuçları, İsveç karbon fiyatlandırması ile çarpılarak fabrikanın 2025 son 6 aylık dönemi için karbon vergisi bulunmuştur. Senaryo içeriği; ısıtma enerjisi tüketimi (x_1), klinker üretimi (x_5) ve sezonalite faktörü (x_7) verilerindeki 2025 yılı 2.dönem için öngörü yapılan değerlere istinaden ortalama artış oranları belirlenmiştir.

2.dönem öngörü değerlerinin aylık bazda benzerlik göstermesi, esas olarak fırınların çalışma süresi ve klinker üretim miktarındaki değişkenliğe bağlı olmaktadır. Ocak-Haziran ayları arası gerçekleşen değerlerin ortalaması ile firmanın projeksiyonu olan Temmuz-Aralık ayları değerleri ortalaması alınarak, iki dönemin ortalamasının birbirine oranı ile artış değerleri belirlenmektedir. Buna göre örneğin 1.dönem ortalama ısıtma enerjisi tüketimi 211,8 Tj, 2. Dönem öngörü ısıtma enerjisi ortalama tüketimi 256,3 Tj olup, birbirine oranı %21,01'dir. Klinker üretiminde ise; 1.dönem ortalama klinker üretimi 59265,4 ton, 2. Dönem öngörü ortalama klinker üretimi 72499,1 olup, birbirine oranı %22,33'tür. Sezonalite faktörü, 1.dönem ortalama sezonalite faktörü 0,70, 2. Dönem öngörü ortalama sezonalite faktörü 0,85 olup, birbirine oranı %21,64'tür. Bu hesaplamalara ait detaylar Tablo 5.11.'de sunulmaktadır.

Tablo 5.11. Dönemler arası ortalama artış oranları.

t ₁	t ₂	x ₁	x ₅	x ₇	Takvim Gün Sayısı	Fırın Çalışma Gün Sayısı
2025	Ocak	277,7	76709,2	0,88	31,0	27,3
2025	Şubat	263,0	73050,7	0,94	28,0	26,3
2025	Mart	279,2	78446,8	0,89	31,0	27,5
2025	Nisan	292,3	82947,8	0,99	30,0	29,8
2025	Mayıs	86,0	24351,8	0,28	31,0	8,7
2025	Haziran	72,8	20086,2	0,24	30,0	7,1
1.Dönem Ortalama Değer		211,8	59265,4	0,70	-	-
2025	Temmuz	304,9	86242,5	1,00	31,0	31,0
2025	Ağustos	303,4	85804,1	1,00	31,0	31,0
2025	Eylül	293,6	83036,2	1,00	30,0	30,0
2025	Ekim	303,4	85804,1	1,00	31,0	31,0
2025	Kasım	293,6	83036,2	1,00	30,0	30,0
2025	Aralık	39,1	11071,5	0,13	31,0	4,0
2.Dönem Ortalama Değer		256,3	72499,1	0,85	-	-
Dönemlik Ortalama Artış Oranı (%)		21,01%	22,33%	21,64%	-	-

Eğitilen ANFIS ile projeksiyon değerleri kullanılarak y₁ ve y₂ tahmin sonuçları Tablo 5.12’de yer almaktadır.

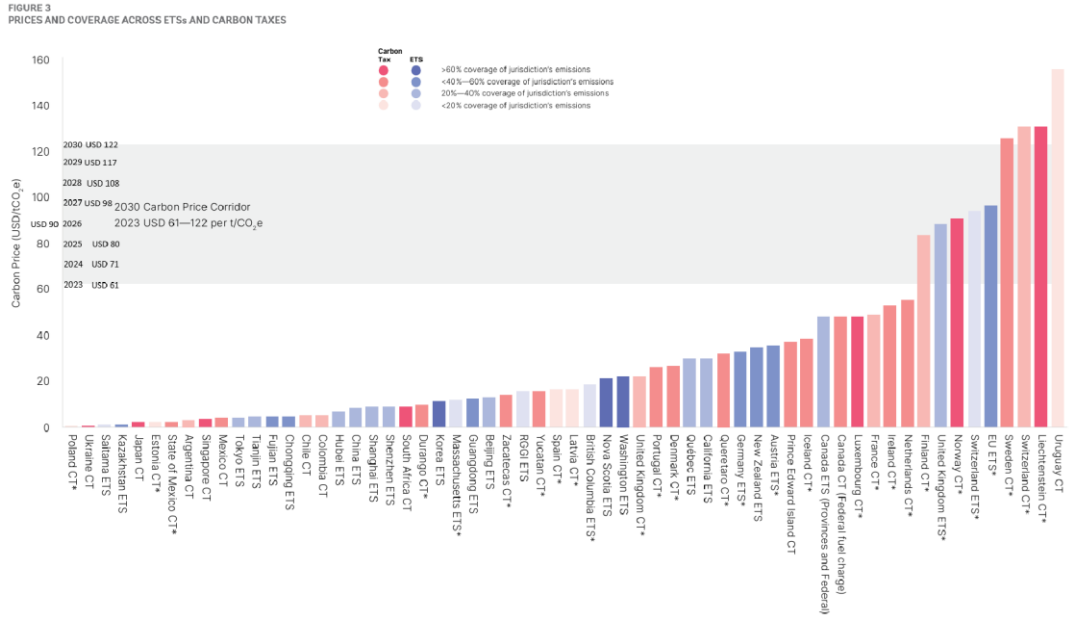
Tablo 5.12. Öngörü yapılan girdilerle(x₁, x₅, x₇) 2.dönem CO₂ tahminlemesi (y₁, y₂).

t ₁	t ₂	x ₁	x ₅	x ₇	y ₁ _Tahmin	y ₂ _Tahmin
2025	Temmuz	304,9	86242,5	1,00	42769	22854
2025	Ağustos	303,4	85804,1	1,00	42562	22855
2025	Eylül	293,6	83036,2	1,00	41272	22861
2025	Ekim	303,4	85804,1	1,00	42562	22855
2025	Kasım	293,6	83036,2	1,00	41272	22861
2025	Aralık	39,1	11071,5	0,13	5423,4	2905,7

5.5. Karbon vergisinin emisyonlara ekonomik yansımaları

Bu bölümde, çimento üretiminden kaynaklanan fabrikanın 2025 yılı son 6 aylık döneminin toplam CO₂ emisyonlarına uygulanabilecek karbon vergilerinin ekonomik etkileri değerlendirilmiştir. Yaklaşım, Tablo 5.13.’de yer alan tahmin y₁ ve y₂ değerlerine göre ödenecek olan karbon vergisini hesaplamaktır. Gelecek karbon vergisi için Dünya Bankası 2023-2030 yılları karbon vergi dolar tahmin dataları kullanılmıştır.

Karbon fiyatları, Dünya Bankasının raporundaki kademeli artış eğilimlerine dayalı olarak Şekil 5.15'e göre İsveç vergilendirme model alınarak belirlenmiştir [24]. Bu kapsamda kullanılan karbon vergisi birim fiyatları şu şekildedir: 2025 yılı için 80 \$/ton CO₂, 2026 için 90 \$/ton CO₂, 2027 için 98 \$/ton CO₂, 2028 için 108 \$/ton CO₂ ve 2029 yılı için 117 \$/ton CO₂'tir.

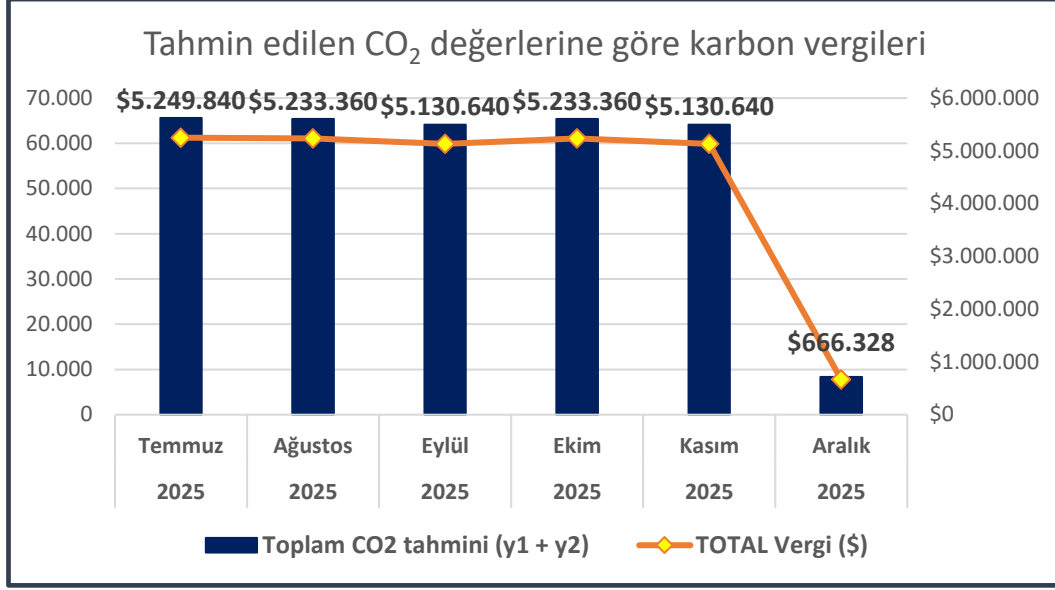


Şekil 5.15. Dünya Bankası 2023-2030 yılları karbon vergi dolar tahminleri [24].

Senaryo için tahmin edilen emisyon miktarları, aylara göre öngörülen karbon vergisi birim fiyatlarıyla çarpılarak Tablo 5.13. gösterildiği gibi potansiyel mali yük aşağıda hesaplanmıştır.

Tablo 5.13. Senaryoda 2025 yılı ikinci dönem aylara göre toplam CO₂ vergisi.

Senaryo Aylara Göre Toplam CO ₂ Vergisi Tahmini					
Toplam CO ₂ tahmini (y ₁ + y ₂)				Karbon Vergisi (\$/ton CO ₂)	TOPLAM Vergi (\$)
2025	Temmuz	65.623	ton	\$80,00	\$5.249.840
2025	Ağustos	65.417	ton	\$80,00	\$5.233.360
2025	Eylül	64.133	ton	\$80,00	\$5.130.640
2025	Ekim	65.417	ton	\$80,00	\$5.233.360
2025	Kasım	64.133	ton	\$80,00	\$5.130.640
2025	Aralık	8.329	ton	\$80,00	\$666.328
TOPLAM		333.052	ton	\$80,00	\$26.644.168



Şekil 5.16. Tahmin edilen CO₂ değerlerine göre karbon vergi miktarları

Elde edilen sonuçlara göre, 2025 yılının ikinci yarısında karbon vergilendirme uygulaması yürürlükte olsaydı, bir çimento fabrikası için Şekil 5.16.'da da gösterildiği gibi toplam 26,6 milyon dolar tutarında bir vergi yükümlülüğüne tabi olması öngörülmektedir. Ancak, devletin karbon politikası kapsamında uygulanacak serbest tahsisat ve belirli kotalar sayesinde fabrikanın bu vergi yükümlülüğünün tamamını ödemesi gerekmeyip, yalnızca belirli bir kısmı fiilen ödemesi yeterli olacağı değerlendirilmektedir.

2025 yılının ilk yarısına kıyasla ikinci yarıda tahmin edilen değerlere istinaden daha yüksek emisyon değerleri oluşmuş olup bu durum; ısıl enerji tüketimi, klinker üretimi ve sezonsal etkilerin artışına bağlı olarak doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle termal ve proses kaynaklı CO₂ emisyonlarının azaltılmasına yönelik teknolojik yatırımların yapılması, çevresel fayda sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda ekonomik açıdan da önemli olduğu ortaya konmuştur.

Türkiye'de henüz zorunlu bir emisyon sınırı uygulaması veya tam anlamıyla işler bir ETS bulunmamaktadır. Ancak AB'nin CBAM kapsamında ithalatçı ülkelerdeki karbon fiyatlandırması uygulamalarına artan ilgisi, ülkemizi dolaylı olarak etkileyebilmektedir. Bu nedenle, karbon vergisi zorunlu hale gelmeden önce emisyonları minimize etmeye yönelik proaktif adımlar atılması stratejik bir öneme sahip olduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışma ile, gelecekte uygulanabilecek bir karbon vergisi sistemine karşı önceden hazırlanarak hem mali risklerin azaltılması hem de rekabet avantajı kazanılması hedeflenmiştir.

6. KARBON VERGİSİ POLİTİKASI ANALİZİ

6.1. Karbon Vergisinin Sektöre Olası Etkileri

Karbon vergisinin çimento sektörü üzerindeki etkisinin oldukça büyük olduğu bilinmektedir. Yapılan modellemeler ışığında, vergi uygulaması doğrudan maliyet yapısını etkilemekte, özellikle termal ve proses kaynaklı CO₂ emisyonlarının azaltımına yönelik teknolojik dönüşüm ihtiyacını artırmaktadır. Çimento üreticileri, vergi yükünden kaçınmak için enerji verimliliğini artıran yatırımlar ve alternatif yakıt kullanımı gibi stratejilere yönelmek durumundadır. Bu bağlamda, hem geleneksel üretim reçetelerinin karbon içeriği azaltılmakta hem de emisyon faktörünü düşürücü önlemlerin uygulanması ivme kazanmaktadır. Ancak, bu dönüşüm süreçlerinin kısa vadede yatırım ve üretim maliyetlerini artırabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle küçük ve orta ölçekli fabrikalar için finansal sürdürülebilirlik bir risk unsuru olarak öne çıkmaktadır [3, 41].

6.2. Ekonomik ve Çevresel Değerlendirme

Ekonomik açıdan bakıldığında, karbon vergisinin doğru tasarlandığı takdirde piyasa içi mekanizmaları dönüştürücü bir güce sahip olduğu görülmektedir.

Çevresel açıdan ise, daha düşük karbon yoğunluğuna sahip bir üretim yapısına geçilmesi, Türkiye'nin iklim hedeflerine büyük katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Böylece, sektör hem çevresel sürdürülebilirliği gözetmekte hem de olası mali yaptırımlardan korunma fırsatı elde etmektedir [3].

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuç

Bu çalışmada, Türkiye’de bir çimento fabrikasında 2019-06/2025 dönemleri arası kapsam 1’e göre CO₂ emisyon miktarları hesaplanmış ve 2025 ikinci altı aylık döneminin CO₂ emisyonları ANFIS yöntemi uygulanarak tahmin edilmiştir. Literatür incelemesi ve teknik uzman görüşleri sonucunda, CO₂ emisyonlarını etkileyen temel parametreler belirlenmiş ve veriler derlenmiştir. Bu parametreler üzerinde gerçekleştirilen regresyon ve korelasyon analizleri ile yüksek derecede ilişkili ve istatistiksel olarak anlamlı değişkenler tespit edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, farklı üyelik fonksiyonlarına sahip alternatif ANFIS modelleri oluşturulmuş; farklı eğitim-test oranları kullanılarak geliştirilen proses kaynaklı emisyon (y_1) tahminleri için 35 model ve termal kaynaklı emisyon (y_2) tahminleri 35 model arasından en düşük hata oranına sahip her bir bağımlı değişken için bir model seçilmiştir. Seçilen modellerin her ikisi de CO₂ emisyonlarını yüksek doğrulukla tahmin etmiş olup, düşük hata oranları ile yüksek güvenilirlik seviyesine ulaşmıştır. Birinci model olan pimf y_1 için en iyi model, trapmf ise y_2 için en iyi model olarak tespit edilmiştir.

Her iki model, 2025 ikinci dönemi CO₂ emisyon tahminleri için senaryo oluşturulup, ANFIS’e girdi olarak verilmiştir. Senaryo, ısıl tüketim miktarı, klinker üretim miktarı ve sezonsal faktör gibi parametrelerin farklı artış oranları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Senaryo analizleri sonucunda, 2025 ikinci dönem CO₂ tahminlemesi yapılp, aylık karbon vergileri hesaplanmıştır.

2019-06/2025 dönemleri arası CO₂ hesaplamalarında, Kapsam 2 ve Kapsam 3 emisyonları, veri teminindeki zorluklar, güvenilirlik sorunları ve mevcut yasal zorunlulukların yalnızca Kapsam 1’i kapsamaması nedeniyle hesaplamalara dahil edilmemiştir. Ancak, değişen koşullar ve düzenlemelerle birlikte bu kapsamların raporlanmasının gelecekte zorunlu hale gelmesi beklenmektedir. Bu nedenle, veri erişiminin kolaylaşması ve metodolojik standartların netleşmesiyle birlikte Kapsam 2 ve Kapsam 3 emisyonlarının detaylı analizi gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

Çalışmada seçilen x_1 – x_8 parametreleri, çimento üretim sürecinde CO₂ emisyonlarını doğrudan etkileyen temel operasyonel ve yapısal değişkenleri temsil etmektedir. Bu parametreler, enerji tüketimi, yakıt ikame oranları, üretim hacmi ve proses verimliliği gibi

emisyon oluşumunun ana belirleyicilerini kapsadığı için tercih edilmiştir. Diğer potansiyel değişkenler (örneğin hammadde kimyasal bileşimi, ekipman bakım durumu, sistem hava akış debileri, kalsinasyon dereceleri vb.) veri erişimindeki zorluklar, ölçüm sıklığı ve güvenilirlik sorunları nedeniyle çalışmaya dahil edilmemiş olup, bu faktörlerin etkisinin incelenmesi gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

Bu çalışmada yalnızca tahminleme için ANFIS yöntemi kullanılmış olup, farklı tahmin modelleriyle karşılaştırma yapılmamıştır. Bunun temel nedenleri arasında, çalışmanın öncelikli amacının çoklu model kıyaslamasından ziyade tek bir yöntem üzerinden sürecin detaylı incelenmesi ve elde edilen sonuçların politika ve finansal boyutlara taşınması yer almaktadır. Ayrıca, alternatif modelleme tekniklerinin uygulanması ileri düzey yazılım, donanım ve uzmanlık gerektirmekte, bu da mevcut zaman ve kaynak kısıtları çerçevesinde mümkün olmamıştır. Kullanılacak ek yöntemlerin (örneğin yapay sinir ağları, regresyon tabanlı modeller veya hibrit yaklaşımlar) her biri için ayrı veri ön işleme, parametre optimizasyonu ve doğrulama süreçleri gerekmekte olup, bu durum çalışmanın kapsamını aşmaktadır. Bununla birlikte, farklı modellerin performans karşılaştırmalarının yapılması, tahmin doğruluğunun artırılması ve belirsizlik analizlerinin gerçekleştirilmesi, hem metodolojik çeşitlilik hem de karar destek sistemlerinin güçlendirilmesi açısından önemli bir katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Bu nedenle, veri erişiminin kolaylaşması, hesaplama altyapısının geliştirilmesi ve uzmanlık desteğinin sağlanmasıyla birlikte, çoklu model karşılaştırmalarının yapılması ve en uygun tahmin yönteminin belirlenmesi gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

Hesaplanan karbon vergi değerlerine istinaden CO₂ emisyonlarının iyileştirilmesi için aşağıda öneriler sunulmuştur.

7.2. Politika Önerileri

Araştırmanın sonucuna yönelik öneriler aşağıda yer almaktadır:

- Kademeli Vergilendirme: Karbon vergisinin, firmaların rekabetçiliğini ve uyum kapasitesini gözeterek kademeli biçimde uygulanması önem taşımaktadır. Başlangıçta düşük oranlı bir vergi, ilerleyen yıllarda artan oranlarda vergilendirme uygulanması tavsiye edilmektedir [22].

- Yatırım Teşvikleri: Emisyon azaltıcı yatırımların özendirilmesi amacıyla yeşil dönüşüm fonları kurulması, özellikle atık ısı geri kazanımı, biyokütle kullanımı ve alternatif hammaddelerle üretime destek sağlanması önerilmektedir [22].
- Emisyon Takip Sistemi: Emisyonların izlenebilirliği için tesis bazlı doğrulanabilir veri sistemlerinin geliştirilmesi önerilmektedir. Bu sistemler firmalarda şeffaflığı sağlayacak hem de etkin vergi tahsilatına imkan tanıyacağı öngörülmektedir [3]. Üretim süreçlerinin dijital entegrasyonunu sağlamak amacıyla, PI Vision vb. gibi araçlar üzerinden tüm fabrika birimlerine ait emisyon verileri anlık olarak izlenebilir hale getirilmesi operasyonel müdahalelerin etkinliği artırması fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.
- Emisyon Ticaret Sistemi Altyapısına Geçiş: Türkiye'nin ulusal iklim hedefleri doğrultusunda ETS'ye geçişi, sadece çevresel değil aynı zamanda ekonomik olarak da teşvik edici olacağı değerlendirilmektedir. Mevcut AB, ETS deneyimleri ve CBAM düzenlemeleri de dikkate alındığında, çimento sektörü öncelikli pilot alanlardan biri olması gerektiği ifade edilmektedir [22].

Çalışmanın bulguları, gelecekteki araştırmalar için yol gösterici nitelikte olup, CO₂ emisyonlarının yanı sıra diğer sera gazlarının da benzer modelleme yöntemleri ile incelenmesini önermektedir. Ayrıca, farklı ülke veya bölgelerde ki çimento fabrikaları için gerçekleştirilecek benzer çalışmalar tahmin sonuçlarının doğruluğunu arttıracığı öngörülmektedir.

Bu bağlamda, çalışmadan elde edilen veriler, Türkiye'de ki bir çimento fabrikasının CO₂ emisyonlarına ilişkin gelecek projeksiyonları ve enerji politikaları için stratejik önem taşımaktadır. ANFIS'te uygulanan modellerin yüksek doğruluk seviyeleri, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma çabalarına somut katkılar sağlamakta; aynı zamanda, gerek Türkiye özelinde gerekse küresel ölçekte iklim politikalarının geliştirilmesi ve uygulanmasına yönelik bilimsel temelli stratejik planlamalara zemin hazırlayacağı öngörülmektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, çimento sektöründe karbon emisyonlarının teknik parametreler kullanılarak ANFIS ile tahminlenmesi ve yönetilmesine yönelik hem teorik hem de uygulamalı bir model ortaya koymaktadır. Türkiye'de faaliyet gösteren bir çimento

fabrikasının özgün üretim ve emisyon verilerine dayalı olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, proses ve termal kaynaklı CO₂ emisyonlarının ANFIS yöntemi ile tahmin edilmesi sonucunda elde edilen değerlerin, önceki yıllara ait verilerle karşılaştırıldığında birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

Ayrıca, Dünya Bankası tarafından yapılan karbon vergisi tahminleriyle, Türkiye’de bir çimento fabrikasının karbon fiyatlandırma politikalarına geçiş sürecinde dikkat edilmesi gereken kritik parametreler belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, yalnızca çalışılan fabrika özelinde değil, genel olarak Türkiye çimento sektörü için de uygulanabilir politika önerileri sunmaktadır. Gelecekte yapılacak benzer çalışmaların, senaryo ve modellemelerle bu çalışmayı genişletmesi ve karbon emisyonlarının azaltımında daha etkin stratejiler geliştirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Y. Güler, “Sera Gazları, İklim Değişikliğinde Sera Gazı Emisyonlarının Rolü ve Emisyon Ticareti” Research article, Kocaeli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü ISHAD2018-page: 517-527, 2018.
- [2] H. Çetintaş, K. Türköz “İklim değişikliği ile mücadelede karbon piyasalarının rolü” Research article, Balıkesir University The Journal of Social Sciences Institute Volume: 20 - Number: 37, pg: 147-168, 2017, <https://doi.org/10.31795/baunsobed.645182>
- [3] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve Pwc Türkiye, “Türkiye Çimento Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası” raporu, Ocak 2024.
- [4] TürkÇimento, Türkiye Çimento Fabrikaları Haritası, 2025.
https://www.turkcimento.org.tr/tr/uye_fabrikalar
- [5] TÜRKÇİMENTO, “Türk Çimento Sektörü 2023” Türk Çimento Sanayicileri Birliği Yayını, 2023,
https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/2023_sektor_kitabi2.pdf
- [6] S. Türk, Yasin Engin “Geçmişten geleceğe inovatif yapı malzemesi” Türk Çimento raporu, 2021, https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/ÇİMENTO_geçmişten_geleceğe_inovatif_yapı_malzemesi1.pdf
- [7] TürkÇimento, “Dik Değirmen Uygulama ve İşletme Kılavuzu”, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayınları, Ankara, 2019.
- [8] K. Rende, “Türkiye çimento sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonları” M.S. thesis Chemical Engineering of Gebze Technical University, 2013,
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=OdTq3d3vs0VJV7XwmbtqtQ&no=UjcbCUqXeMqDCBvKqNvHkg>
- [9] Altınkaynak, M., “Çimento üretim sistemlerinin termodinamik analizi ve iyileştirilmesi,” Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, 2017,
https://acikbilim.yok.gov.tr/bitstream/handle/20.500.12812/277228/yokAcikBilim_10147334.pdf?sequence=-1&isAllowed=y

- [10] Kökipek, B., “Suni Alçının Çimento Üretiminde Kullanılabilirliği,” (Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı), 2010,
https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=GSwV7kUUzzWnvNRUyWEE_A&no=KWaVN5Ipqb36TkHQOOLeQ
- [11] Telschow, S., Dam-Johansen, K., Jappe Frandsen, F., Wedel, S., & Theisen, K. “Clinker Burning Kinetics and Mechanism,” (Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark), 2012, <http://orbit.dtu.dk>
- [12] Yıldız, N., “Klinker Üretimi”, Araştırma Makalesi, Madencilik Türkiye, Sayı 46, 88-91, 2015,
https://www.researchgate.net/publication/284186077_Klinker_Uretimi
- [13] IEA (International Energy Agency), Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, 2022,
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>
- [14] Andrew, R. M., “Global CO₂ emissions from cement production,” Earth System Science Data, 11(4), 1675-1710, 2019,
doi: 10.5194/essd-11-1675-2019
- [15] Gursel, A. P., Masanet, E., Horvath, A., & Stadel, A., “Life-cycle inventory analysis of concrete production: a critical review,” Cement and Concrete Composites, 44, 39-48, 2014,
https://www.researchgate.net/publication/261184161_Life-cycle_inventory_analysis_of_concrete_production_A_critical_review
- [16] PWC Türkiye, “Dünyada ve Türkiye’de Çimento Sektörü” raporu, Şubat 2024,
<https://www.pwc.com.tr/tr/sektorler/insaat-ve-muhendislik/pdf/dunyada-ve-turkiyede-cimento-sektoru.pdf>
- [17] Joseph Aspdin (4694177548).jpg <https://taxfoundation.org/>

- [18] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, “Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ”, Resmî Gazete, 29003, 2014, https://webdosya.csb.gov.tr/db/destek/icerikler/sektorel_hesaplama_ornekler--20191127114542.pdf
- [19] GCCA (Global Cement and Concrete Association), “Net Sıfır Karbon Emisyonlu Beton İçin Yol Haritası,” 2021, https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/GCCA_2050_Çimento_ve_Beton_Sanayi_Yol_Haritası.pdf
- [20] GCCA, “Cement CO₂ and Energy Protocol, Version 3.1. Global Cement and Concrete Association,” 2020, <https://www.cement-co2-protocol.org/>
- [21] Yurtsever, Ö., et al., “Enerji Yoğun Sektörlerde Dekarbonizasyon,” MMO-Teskon Bildiriler Kitabı, 29-41, 2023, <https://mmoteskon.org/wp-content/uploads/2023/04/2023-BEP-029.pdf>
- [22] Etem Karakaya, Gamze Akkoyun, Burcu Hiçyılmaz “Sera gazı emisyonu azaltımı için karbonun fiyatlanması: karbon vergisi mi emisyon ticareti mi?” Review Article, Ekonomi, Politika & Finans Araştırmaları Dergisi, 2023, 8(4): 813-841. <https://doi.org/10.30784/epfad.1367596>
- [23] CEMBUREAU, Avrupa Çimento Birliği, “Vizyondan Uygulamaya: 2050 Yol Haritası,” 2024, https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/tr-CemBureau-Vizyondan_Uygulamaya1.pdf
- [24] World Bank, “State and Trends of Carbon Pricing 2023,” <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/41947>
- [25] Jonsson, S., Ydstedt, A., & Asen, E., Looking Back on 30 Years of Carbon Taxes in Sweden (Fiscal Fact No. 727). Tax Foundation, 2020, <https://taxfoundation.org/>
- [26] UNEP (United Nations Environment Programme), “Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry,” 2016,

https://www.devalt.org/Pdf/L2_SixThemePdfs/2016-UNEPReport-Complete4%20%281%29.pdf

- [27] OpenAI, ChatGPT (June 2024 version), OpenAI, 2024, <https://chat.openai.com/>
- [28] Toraman, S., “Evaluation of overall equipment effectiveness (OEE) for mining equipment (shovel-truck): A case study Manisa-Soma (Turkey) open pit mine,” *Journal of Scientific Reports-A*, 56, 45–55, 2024.
- [29] J. S. R and Sun, C. T. ve Mizutani, E., “Neurofuzzy and soft computing,” Prentice Hall, Upper Saddle River, 1997.
- [30] Alam, T. & AlJarjani, A., “A comparative study of CO₂ emission forecasting in the Gulf countries using autoregressive integrated moving average, artificial neural network, and Holt-Winters exponential smoothing models,” *Advances in Meteorology*, 2021, 1–9, 2021.
- [31] Güler, E. ve Kandemir, S. Y. , “Lineer ve Kübik Regresyon Analizleri Kullanılarak OECD Ülkelerinin CO₂ Emisyonlarının Tahminlenmesi,” *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Özel Sayı 34, 175-180, 2022.
- [32] Aydın, S. & Aydoğdu, G., “Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanılarak Türkiye ve AB Ülkelerinin CO₂ Emisyonlarının Tahmini,” *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı 37), 42-46, 2022.
- [33] Cemrekli, F., & Demir, Ö., “Estimating CO₂ Emission Time Series with Support Vector Machines Regression, Artificial Neural Networks, and Classic Time Series Analysis,” *Turkish Journal of Forecasting*, 5(2), 36-44, 2021.
- [34] Boğar, E. & Boğar, Z. Ö., “Türkiye’nin Sektörel CO₂ Gazı Salımlarının Yapay Sinir Ağları ile Tahmini,” *Akademia Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Dergisi*, 3(2), 15-27, 2017.
- [35] Pabuçcu, H. & Bayramoğlu, T., “Yapay Sinir Ağları ile CO₂ Emisyonu Tahmini: Türkiye Örneği.” *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(3), 762-778, 2016.

- [36] A. Şenel ve B. Tekgönül, “ANFIS yöntemi ile Türkiye karbondioksit salınımı tahmini,” Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi, cilt 13, sayı 34, ss. 486–504, 2022, doi: 10.21076/vizyoner.990380.
- [37] A. Mardani, D. Streimikiene, M. Nilashi, D. A. Aranda, N. Logeshkumar and A. Jusoh, “Energy consumption, economic growth, and CO₂ emissions in G20 countries: Application of adaptive neuro-fuzzy inference system,” *Energies*, cilt 11, no. 10, s. 2771, 2018, doi: 10.3390/en11102771.
- [38] Boakye, K. and Fenton, K., and Simske, S., “Machine learning algorithm to predict CO₂ using a cement manufacturing historic production variables dataset: A case study at Union Bridge Plant, Heidelberg Materials, Maryland,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(4), 199, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/jmmp7060199>.
- [39] Özhan, E., “Yapay Sinir Ağları ve Üstel Düzleştirme Yöntemi ile Türkiye’deki CO₂ Emisyonunun Zaman Serisi ile Tahmini,” *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi (European Journal of Science and Technology)*, 19, 282–289, 2020, <https://doi.org/10.31590/ejosat.705666>
- [40] Karakurt, İ. ve Aydın, G., “Kömür kaynaklı CO₂ emisyonlarının tahminine yönelik model geliştirilmesi: BRICS-T ülkeleri örneği,” *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 10(1), 214-229, 2020, DOI: 10.31466/kfbd.611850.
- [41] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Çimento Sektörü Kıyaslama Raporu,”2023. https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/2023_sekt%C3%B6r_kitab%C4%B12.pdf
- [42] Yunus Emre Kuzu, “Bütünleşik otoregresif hareketli ortalama (ARIMA) ve uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) yöntemleri kullanılarak enflasyon tahmini” *Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2022.*
- [43] Mustafa Akpınar, “İnsansız hava aracı itkisinin GAO algoritması tabanlı ANFIS modeliyle incelenmesi” *Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Ana Bilim Dalı, Erciyes Üniversitesi, Türkiye, 2022*

- [44] Eda Hamamcıoğlu, “Türkiye'nin Co2 Emisyonunun Anfis İle Tahmin Edilmesi” Endüstri Mühendisliği, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Türkiye, 2024
- [45] Bhaskar Pratap Singh and Anurag Malik and Pravendra Kumar, “A comparative study of adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) and multiple linear regression (MLR) for rainfall-runoff modelling, Dec 2016, (PDF) A comparative study of adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) and multiple linear regression (MLR) for rainfall-runoff modelling
- [46] Ümmü Ahat, “Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ile sürdürülebilir tedarikçi seçimi ” İşletme, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye, 2021
- [47] Mehmet Konar, “Bulanık mantık ve yapay sinir ağları kullanılarak uçuş kontrol sistemlerine ait bazı parametrelerin hesaplanması” Havacılık Mühendisliği, Erciyes Üniversitesi, Türkiye, 2010
- [48] Comparison Between Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference System, <https://www.geeksforgeeks.org/blogs/comparison-between-mamdani-and-sugeno-fuzzy-inference-system/> (12 Jul 2025)
- [49] Adem Bulut, “Uçakların minimum iniş pist uzunluğunun ANFIS ile tahmin edilmesi” Havacılık Mühendisliği, Erciyes Üniversitesi, Türkiye, 2025
- [50] Turgut Hacıvelioğulları, “Bulanık çıkarım sistemleri kullanılarak sürdürülebilir tedarikçi seçim probleminin incelenmesi”, İşletme, Aksaray Üniversitesi, Türkiye, 2022
- [51] Mohammed Blej ve Mostafa Azizi, “Comparison of Mamdani-type and Sugeno-type fuzzy inference systems for fuzzy real time scheduling”, Jan 2016, (PDF) Comparison of Mamdani-type and Sugeno-type fuzzy inference systems for fuzzy real time scheduling
- [52] Fatma Şeyma Yüksel, “Türkiye'nin havayolu taşıyıcı modellerine göre yolcu talebinin çoklu doğrusal regresyon, ANFIS ve YSA teknikleri ile tahminlenmesi”, Endüstri Mühendisliği, Çukurova Üniversitesi, Türkiye, 2023

- [53] Patrick Schober and Christa Boer and Lothar A. Schwarte “Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation”, February 2018 DOI:10.1213/ANE.0000000000002864
- [54] Muhammad Zahir Khan and Muhammad Farid Khan “Application of ANFIS, ANN and fuzzy time series models to CO₂ emission from the energy sector and global temperature increase”, International Journal of Climate Change Strategies and Management 11(3) 2019 DOI: <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-01-2019-0001>
- [55] Fani Gkountakou and Basil Papadopoulos “The Use of Fuzzy Linear Regression and ANFIS Methods to Predict the Compressive Strength of Cement”, Department of Civil Engineering, Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi, Greece, August 2020 DOI:10.3390/sym12081295
- [56] Ayşe Nur Çırak “Çoklu Doğrusal Regresyon Modeliyle Sera Gazı Emisyonu Üzerine Bir Araştırma: Avrupa Birliği Ülkeleri Örneği” Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı, Türkiye, 2023 DOI:10.35342/econder.1303366
- [57] O. F Uzor and J. O. Ogbuagu and R. U Arinze and Abuchi Princewill Okeke “Seasonal Variation of CO₂, CO, and H₂S Emissions and Meteorological Influences Around a Cement Factory in Nigeria”, Journal of Global Ecology and Environment 21(3):218-229 July 2025 DOI: 10.56557/jogee/2025/v21i39483
- [58] Ondokuz Mayıs Üniversitesi - avys.omu.edu.tr “İstatistik-II Dersi 12.Bölüm: Korelasyon Analizi.” OMÜ | Ondokuz Mayıs Üniversitesi
- [59] Ezezi Isaac Obilor and Eric Chikweru Amadi “Test for Significance of Pearson's Correlation Coefficient (r)” <https://www.researchgate.net/publication/34360969>, Jan 2018
- [60] Kadakatla Pavan Kumar , Visweswararao Reddi “Significance of Spearman’s Rank Correlation Coefficient”, International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR), E-ISSN: 2582-2160, 2023, DOI: <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2023.v05i04.5203>

- [61] Asghar Ghasemi, Saleh Zahediasl “Normality Tests for Statistical Analysis: A Guide for Non-Statisticians, Int J Endocrinol Metab. 2012;10(2):486-489. DOI: 10.5812/ijem.3505
- [62] Onur DOĞAN “Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sisteminin (ANFIS) Talep Tahmini İçin Kullanımı ve Bir Uygulama” 2016 ;Cilt 31(1), s: 257-288., <https://dergipark.org.tr/tr/pub/deuiebfd/issue/27618/512480>
- [63] <https://zenodo.org/records/17012915>

EKLER

EK 1: y_1 TAHMİNLEMESİ İÇİN MATLAB SÖZDE KODU

```
% =====  
% ANFIS ile CO2 Tahmini - MATLAB Pseudocode  
% Girdiler: x1, x5, x7 | Hedef: y1  
% Kaynak tablo: Tfull = DogrusalVeriSeti  
% =====  
  
%% 1. Ayarlar ve Veri Hazırlığı  
splitRatios      = [0.70 0.80 0.85 0.90 0.95]; % Eğitim/Test oranları  
keepOrder        = true; % Zaman sırasını koru  
removeZeroTarget = true; % y1=0 kayıtlarını çıkar  
numMFs           = 3; % Her giriş için MF sayısı  
epochNum         = 150; % Eğitim döngüsü  
mfTypes = {'trimf','trapmf','gbellmf','gaussmf','gauss2mf','pimf','dsigmf'};  
  
% Gerekli sütunlar kontrol edilir: x1, x5, x7, y1  
% Sadece gerekli sütunlar alınır, NaN değerler temizlenir  
% removeZeroTarget=true ise y1=0 olan satırlar silinir  
% Örnek sayısı < 15 ise hata verilir  
  
%% 2. Sonuç Tablosu Hazırlığı  
% Sonuç kolonları: Split, Eğitim/Test oranları, MF tipi,  
% R2, MAE, MSE, RMSE, MAPE, BIAS (train & test),  
% Eğitim ve test örnek sayıları  
% Boş bir sonuç tablosu oluşturulur
```

```
%% 3. Eğitim/Test Bölme ve Döngü
for her splitRatio içinde
    n = toplam örnek sayısı
    indeksler = sıralı (keepOrder=true) veya rastgele
    nTrain = floor(splitRatio * n)
    nTest = n - nTrain
    eğer nTest < 1 ise devam et

    Train = ilk nTrain satır
    Test = kalan satırlar

%% 4. Ölçekleme
% Girişler (x1,x5,x7) için Z-score ölçekleme yapılır
% Train ve Test veri kümeleri normalize edilir

%% 5. MF Tipleri Üzerinde Döngü
for her mfType içinde
    % Başlangıç FIS oluşturulur (giriş sayısı ve MF tipine göre)
    fis0 = başlangıç_FIS(Train, numMFs, mfType)

    % Eğitim parametreleri ayarlanır (epochNum vb.)
    fis = ANFIS modeli Train verisi ile eğitilir

    % Tahminler yapılır
    ytr_hat = evalfis(fis, Train girişleri)
    yte_hat = evalfis(fis, Test girişleri)
```

```
%% 6. Performans Metrikleri
% --- Eğitim verisi ---
MAE, MSE, RMSE, BIAS, R2, MAPE hesaplanır
% --- Test verisi ---
MAE, MSE, RMSE, BIAS, R2, MAPE hesaplanır

%% 7. Sonuçların Kaydı
% Hesaplanan metrikler sonuç tablosuna eklenir
% Opsiyonel: Test tahminleri CSV'ye yazılır
end
end

%% 8. Sonuçların Düzenlenmesi
% Sonuç tablosu R2_test değerine göre azalan şekilde sıralanır
% Tablo ekrana yazdırılır ve özet CSV dosyasına kaydedilir
```

EK 2: y_2 TAHMİNLEMESİ İÇİN MATLAB SÖZDE KODU

```
% ANFIS ile CO2 (y2) Tahmini - MATLAB Pseudocode
% Girdiler: x1, x5, x7 | Hedef: y2
% Kaynak tablo: Tfull = DogrusalVeriSeti
% =====

%% 1) Ayarlar ve veri hazırlığı
splitRatios      = [0.70 0.80 0.85 0.90 0.95];    % Eğitim/Test oranları
keepOrder        = true;                        % Zaman sırasını koru
removeZeroTarget = true;                       % y2 = 0 kayıtlarını çıkar
numMFs           = 3;                          % Her giriş için MF sayısı
epochNum         = 150;                        % Eğitim epoch
mfTypes = {'trimf', 'trapmf', 'gbellmf', 'gaussmf', 'gauss2mf', 'pimf', 'dsigmf'};

% Gerekli sütunları doğrula: {'x1', 'x5', 'x7', 'y2'}
% Tfull içinden yalnızca bu sütunları seç → tabloyu matrise çevir → NaN'ları at
% removeZeroTarget=true ise y2=0 satırlarını sil
% Örnek sayısı < 15 ise işlemi durdur (yetersiz veri)

%% 2) Sonuç tablosu başlıklarını hazırla
% Alanlar: Split, Eğitim/Test (%), MFType,
%          R2_train, MAE_train, MSE_train, RMSE_train, MAPE_train, BIAS_tr,
%          R2_test, MAE_test, MSE_test, RMSE_test, MAPE_test, BIAS_te,
%          N_train, N_test
% Boş bir sonuç kapsayıcı oluştur

%% 3) Tüm split oranları ve MF tipleri üzerinde denemeler
for her splitRatio içinde
```

```

n = toplam örnek sayısı
idx = (keepOrder ? 1:n : rastgele permütasyon(1:n))
nTrain = max(1, floor(splitRatio * n))
nTest = n - nTrain
eğer nTest < 1 ise bu split'i atla

Train = D(idx(1:nTrain), :)
Test = D(idx(nTrain+1:end), :)

%% 4) Z-score ölçekleme (yalnızca girişler)
mu = ortalama(Train(:,1:3)) % [x1 x5 x7] için
sig = std(Train(:,1:3)); sıfır olanları 1 yap
Ztr = [ (Train(:,1:3)-mu)./sig , Train(:,4) ] % Son sütun y2
Zte = [ (Test(:,1:3) -mu)./sig , Test(:,4) ]

% Raporlama için eğitim/test yüzdeleri
egitim_oran = 100 * size(Train,1) / (size(Train,1)+size(Test,1))
test_oran = 100 - egitim_oran

%% 5) MF tipleri döngüsü
for her mfType içinde
    % Başlangıç FIS'i üret (giriş sayısı, numMFs, mfType)
    fis0 = başlangıç_FIS_üret(Ztr, numMFs, mfType)

```

```

% Eğitim seçenekleri (InitialFIS=fis0, EpochNumber=epochNum, sessiz çıktı)
opt = anfisOptions(...)

% ANFIS'i eğit
fis = anfis(Ztr, opt)

% Tahminler
p = 3; % giriş sayısı
ytr = Ztr(:,end); % gerçek y2 (train)
ytr_hat = evalfis(fis, Ztr(:,1:p))
yte = Zte(:,end); % gerçek y2 (test)
yte_hat = evalfis(fis, Zte(:,1:p))

%% 6) Performans metrikleri
% ---- TRAIN ----
err = ytr - ytr_hat
MAE_tr = mean(|err|)
MSE_tr = mean(err.^2)
RMSE_tr = sqrt(MSE_tr)
BIAS_tr = mean(ytr_hat - ytr)
SST = sum( (ytr - mean(ytr)).^2 )
SSE = sum( err.^2 )
R2_tr = 1 - SSE / max(ε, SST)
nz = |ytr| > ε
MAPE_tr = mean( |ytr(nz)-ytr_hat(nz)| ./ |ytr(nz)| ) * 100

```

```

% ---- TEST ----
err = yte - yte_hat
MAE_te = mean(|err|)
MSE_te = mean(err.^2)
RMSE_te = sqrt(MSE_te)
BIAS_te = mean(yte_hat - yte)
SST = sum( (yte - mean(yte)).^2 )
SSE = sum( err.^2 )
R2_te = 1 - SSE / max(ε, SST)
nz = |yte| > ε
MAPE_te = mean( |yte(nz)-yte_hat(nz)| ./ |yte(nz)| ) * 100

%% 7) Sonuçların eklenmesi ve (opsiyonel) dışa aktarım
% Sonuç tablosuna bir satır ekle:
% [splitRatio, egitim_oran, test_oran, mfType,
% R2_tr, MAE_tr, MSE_tr, RMSE_tr, MAPE_tr, BIAS_tr,
% R2_te, MAE_te, MSE_te, RMSE_te, MAPE_te, BIAS_te,
% N_train=size(Train,1), N_test=size(Test,1)]
sonuç_tablosuna_satır_ekle(...)

% Opsiyonel: Test sonuçlarını CSV'ye yaz
% Kolonlar: {'Gercek_y2', 'Tahmin_y2', 'Hata', 'MutlakHata', 'APEYuzde'}
% Dosya adı: "predictions_split_<egitim%>_<mfType>.csv"
test_tahminlerini_CSV_yaz(...)

end

end

%% 8) Özet ve kayıt
% Sonuç tablosunu R2_test'e göre azalan sırala
% Ekranda göster; "anfis_y2_multi_split_multi_mf_summary.csv" olarak kaydet

```