

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TÜRKİYE'DE KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA
POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI- ÇİMENTO TESİSİ ÖRNEĞİ

Nazlıcan FİLTEKİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Yaşar AVŞAR

Temmuz, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE'DE KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA POTANSİYELİNİN
ARAŞTIRILMASI- ÇİMENTO TESİSİ ÖRNEĞİ**

Nazlıcan FİLTEKİN tarafından hazırlanan tez çalışması 06.07.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Yaşar AVŞAR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Yaşar AVŞAR, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail TORÖZ, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Sadullah Levent KUZU, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Yaşar AVŞAR sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Türkiye’de Karbon Yakalama Kullanma ve Depolama Potansiyelinin Araştırılması-Çimento Tesisi Örneği başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Nazlıcan FİLTEKİN

İmza



Minik lösemi savaşçım Arven Mira'ya...

TEŞEKKÜR

Lisans ve lisansüstü eğitim hayatım boyunca öğrencisi olmaktan gurur duyduğum, sohbetine ve hayata dair bakış açısına hayran olduğum, zor zamanlarımda desteğini en içten hissettiğim, sonsuz sabrının ve emeklerinin karşılığını asla ödeyemeyeceğim danışmanım Prof. Dr. Yaşar AVŞAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımdaki şükür sebeplerim olan anneme, babama ve halledemediğim her konuda, çözeceğinden asla şüphe duymayarak başvurduğum ve beni hiçbir zaman yanıltmayan, her zaman elimden tutan canım abim Yiğit Can FİLTEKİN'e sonsuz teşekkürler.

Nazlıcan FİLTEKİN

KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması.....	2
1.2 Tezin Amacı	7
1.3 Hipotez	7
1.4 Karbon Yakalama Depolama Teknolojisi	7
1.4.1 Biyoenerji ile Karbon Yakalama Depolama (BECCS)	9
1.4.2 Doğrudan Havadan Karbon Yakalama ve Depolama (DACs)	10
1.5 Karbon Yakalama	11
1.5.1 Yanma Sonrası Yakalama, YSY (Post Combustion Capture).....	11
1.5.2 Yanma Öncesi Yakalama, YÖY (Pre-Combustion Capture)	11
1.5.3 Oksi-Yakıt Yanması, OYY (Oxy-fuel Combustion)	12
1.6 Taşıma	13
1.7 Depolama.....	17
1.7.1 Depolama Kapasitesinin Hesaplanması.....	19
1.7.2 Depolama Durumu	20
1.7.3 Küresel Depolama Kapasitesi	21
1.7.4 İzleme.....	22
1.7.5 CO2 Depolama Maliyetleri.....	23
1.8 Global KYKD Uygulamaları	24
1.8.1 Avrupa Ülkeleri	24
1.8.2 Amerika.....	27
1.8.3 Çin.....	28
2 ÇİMENTO SEKTÖRÜ	30
2.1 Ham Maddeler	31
2.2 Klinker Üretimi	31
2.3 Klinkerden Çimento Üretimi.....	33
2.4 Katkılı Çimentolar	35

2.5 Yakıt Kullanımı	36
2.6 Çimento Üretiminden Kaynaklanan Gaz Emisyonları	36
2.6.1 CO ₂ Emisyonları.....	36
2.6.2 NO _x Emisyonları.....	37
2.6.3 SO _x Emisyonları	39
2.6.4 Karbon monoksit (CO) Emisyonları	40
2.6.5 Uçucu Organik Bileşikler (VOC) ve Toplam Organik Karbon Emisyonları (TOC)	41
2.6.6 Hidrojen klorür (HCl) ve hidrojen florür (HF) emisyonları.....	41
2.6.7 Poliklorlu dibenzodioksin (PCDD) ve Dibenzofuran (PCDF)	42
2.6.8 Metal Emisyonları.....	42
2.7 Çimento Üretiminden Kaynaklanan Toz Emisyonları	43
2.7.1 Yayılı Toz Emisyonları	43
2.7.2 Baca Toz Emisyonları	44
2.7.3 Fırın Yakma İşlemlerinden Çıkan Toz Emisyonları.....	45
2.7.4 Soğutma ve Öğütme İşlemlerinden Çıkan Toz Emisyonları.....	45
2.8 Küresel Çimento Sektörü.....	46
2.9 Türkiye’de Çimento Sektörü.....	47
2.10 Türkiye’de Çimento Üretiminden Kaynaklanan CO ₂ Emisyonları	49
2.11 Çimento Sektöründe CO ₂ Emisyonları Azaltma Uygulamaları	51
2.11.1 Enerji Verimliliğinin Arttırılması.....	51
2.11.2 Fırınlardan ve Soğutuculardan/ Kojenerasyondan Enerji Geri Kazanımı	5
2.11.3 Atıkların Yakıt Olarak Kullanımı	53
2.11.4 Atıkların Hammadde Olarak Kullanımı.....	54
2.11.5 Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama	54
3 ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ	55
3.1 Yanma Öncesi Yakalama	55
3.2 Yanma Sonrası Yakalama	55
3.3 Oksi Yakıt Teknolojisi.....	56
3.4 Dünya Çimento Endüstrisi KYKD Uygulamaları.....	57
4 TÜRKİYE’DE KYKD UYGULAMALARI	58
4.1 CO ₂ yakalama, enjeksiyon ve depolama projeleri	58

4.2 Türkiye Çimento Tesisi KYKD Senaryosu.....	61
4.2.1 Depolama	61
4.2.2 Endüstriyel Emisyonlar.....	64
4.2.3 CO2 Taşıma.....	67
4.2.4 Yakalama.....	78
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	86
KAYNAKÇA	94
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	100



KISALTMA LİSTESİ

BECCS	Bioenergy with carbon capture and storage
CCS	Carbon capture and storage
CH ₄	Metan
CO ₂	Karbon dioksit
COP	Conference of the parties
DACS	Direct air capture and storage
De-NO _x	NO _x giderme sistemleri
ESD	Emisyon sınır değeri
ESTMAP	Energy storage mapping and planning
EF	Emission factor
EOR	Enhanced oil recovery
FGD	Baca gazı kükürt giderme
FL	Factor of location
FT	Factor of terrain
GECO	Geothermal emission control
Gt	Giga ton
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KYD	Karbon yakalama depolama
KYKD	Karbon yakalama kullanma depolama
MET	Mevcut en iyi teknikler
Mt	Milyon ton
NO _x	Azot oksitler
Ppm	Milyonda bir
SKS	Sürdürülebilir kalkınma senaryosu
SO _x	Kükürt oksitler
SNCR	Selective non-catalytic reduction
SUCCEED	Synergetic utilisation of CO ₂ storage coupled with geothermal energy deployment
TÜPRAŞ	Türkiye petrol rafinerileri

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Karbon Yakalama ve Depolama-Kavramsal Diyagram	9
Şekil 1.2 Karbon Yakalama Teknolojileri	13
Şekil 1.3 CO ₂ Taşıma	15
Şekil 1.4 Boru Hattına Özgü Maliyet (USD/Ton/Km)	16
Şekil 1.5 Gemi Ve Boru Hattı Taşımacılığı Maliyetleri.....	17
Şekil 1.6 CO ₂ 'nin Uygun Jeolojik Formasyonlarda Depolanması	19
Şekil 1.7 Jeolojik Ortamlarda CO ₂ Depolama Kapasitesi İçin Tekno-Ekonomik Kaynak-Rezerv Piramidi.....	20
Şekil 1.8 2021 İtibariyle Avrupa Ülkelerinde Ulusal Mevzuata Göre CO ₂ Depolama İzin Haritası	27
Şekil 2.1 Çimento Üretiminde Enerji Ve Yakıt Kullanımı.....	31
Şekil 2.2 Çimento Üretim Prosesi.....	32
Şekil 2.3 Katkılı Çimentolarda Kullanılan Malzemeler	35
Şekil 2.4 1990–2019 Döneminde Bölgelere Göre Küresel Çimento Endüstrisinden Kaynaklanan CO ₂ Emisyonları	47
Şekil 2.5 Türkiye 2020 Klinker İhracatı	48
Şekil 2.6 Şekil : Türkiye 2020 Çimento İhracatı.....	49
Şekil 2.7 1990- 2019, Klinker-Çimento Üretiminden Kaynaklanan CO ₂ Emisyonları	50
Şekil 3.1 Yanma Öncesi Yakalama Teknolojisinin Prensibi.....	55
Şekil 3.2 Yanma Sonrası Yakalama Teknolojisinin Prensibi	56
Şekil 3.3 Oksi Yakıt Teknolojisinin Prensibi	56
Şekil 4.1 Türkiye Petrol Ve Doğalgaz Sahaları	62
Şekil 4.2 Türkiye Kömür Ve Linyit Sahaları	63
Şekil 4.3 Türkiye’de Potansiyel Depolama Alanları	63
Şekil 4.4 Çalışma Sahası	65
Şekil 4.5 Boru Hattı Uzunlukları.....	67
Şekil 4.6 Farklı Modellere Ait Boru Hattı Maliyetleri	73

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	ABD – KYKD İçin 45Q Kredisi	28
Tablo 2.1	Farklı Tip Fırınlarda Isı Tüketimi	33
Tablo 2.2	Türk Çimento Sektöründe Kullanılan Yakıt Türleri ve Isıl Değerleri...	36
Tablo 2.3	Nox Emisyonlarını Azaltmak İçin MET	38
Tablo 2.4	SNCR Kullanılması Durumunda MET	38
Tablo 2.5	Nox İçin MET-ESD’ler	38
Tablo 2.6	SNCR Uygulanması Halinde Baca Gazı NH3 Emisyonları.....	39
Tablo 2.7	Sox Emisyonlarını Azaltmak İçin MET	39
Tablo 2.8	Sox’e Yönelik MET-ESD’ler.....	40
Tablo 2.9	CO Yükselmelerinin Düşürülmesi İçin MET.....	40
Tablo 2.10	HCl Emisyonlarına Yönelik MET	41
Tablo 2.11	HF Emisyonlarına Yönelik MET.....	41
Tablo 2.12	PCDD/F Emisyonlarına Yönelik MET	42
Tablo 2.13	Metal Emisyonlarına Yönelik MET	43
Tablo 2.14	Metal Emisyonlarına Yönelik MET-ESD’ler.....	43
Tablo 2.15	Yayılı Toz Emisyonlarına Yönelik MET.....	44
Tablo 2.16	Döküm/Depolama Alanlarındaki Toz Emisyonlarına Yönelik MET...	44
Tablo 2.17	Fırın Yakma İşlemlerinden Çıkan Toz Emisyonlarına Yönelik MET ..	45
Tablo 2.18	Soğutma Ve Öğütme İşlemlerinden Çıkan Toz Emisyonlarına Yönelik MET	45
Tablo 2.19	Dünya Çimento Üretimi (Milyon Ton)	46
Tablo 2.20	Türk Çimento Sektörü Üretim Ve Tüketim Miktarları	48
Tablo 2.21	Türkiye Çimento Sektörü Doğrudan CO2 Emisyon Miktarı	51
Tablo 2.22	Enerji Optimizasyonlarının CO2 Emisyonuna Etkisi.....	52
Tablo 2.23	Klinker İkamesinin CO2 Emisyonuna Etkisi.....	53
Tablo 2.24	Fosil Yakıt İkamesinin CO2 Emisyonuna Etkisi.....	54
Tablo 3.1	Dünya Çimento Sektöründe Mevcut KYKD Uygulamaları.....	57
Tablo 4.1	Türkiye CO2 Depolama Kapasitesi(Ton)	64
Tablo 4.2	Batman Bölgesi Petrol Üretim Sahaları Üçüncül Üretim Tahminleri...	64
Tablo 4.3	Türkiye Çimento Endüstrisi Proses Kaynaklı CO2 Emisyonları	64
Tablo 4.4	Kurtalan ve Mardin Çimento Fabrikalarının Çimento Ve Klinker Üretim Kapasiteleri ve Doğrudan CO2 Emisyon Miktarları.....	65

Tablo 4.5 Kurtalan Ve Mardin Çimento Fabrikalarının Toplam CO2 Emisyon Miktarları.....	66
Tablo 4.6 Çimento Fabrikaları Emisyon Miktarları Ve Boru Hattı Uzunlukları...	68
Tablo 4.7 Boru Hattı Çapları.....	69
Tablo 4.8 IEAGHG 2005/2 Modeline Göre Toplam Boru Hattı Maliyeti.....	69
Tablo 4.9 Ecofys Modeline Göre Toplam Boru Hattı Maliyeti	70
Tablo 4.10 Parker Modeline Göre Toplam Boru Hattı Maliyeti	71
Tablo 4.11 Mccollum & Ogden Modeline Göre Km Başına Hesaplanan Maliyetler	72
Tablo 4.12 Mccollum & Ogden Modeline Göre Toplam Boru Hattı Maliyetleri ..	73
Tablo 4.13 Boru Hattı Maliyet Hesabı Çalışmalarının Varsayımları Ve Girdileri.	75
Tablo 4.14 Mccollum & Ogden - Ortak Tasarım Temelleri.....	76
Tablo 4.15 Boru Hattı İşletme Ve Bakım Maliyetleri	76
Tablo 4.16 Farklı CO2 Yakalama Teknolojilerindeki CO2 Akış Kompozisyonları (Hacim%)	77
Tablo 4.17 CO2 Akışlarındaki Tipik Safsızlıkların Min. Ve Max. Miktarları (%Mol)	77
Tablo 4.18 Karbon Yakalama Teknolojilerinin Karşılaştırılması	78
Tablo 4.19 Çimento Sektörü Emisyon Limit Değerleri – SKHKY	81
Tablo 4.20 Çimento Fabrikalarının Modifiye Potansiyelini Değerlendirmek İçin Kriterler Listesi.....	81
Tablo 4.21 Çimento Sektöründe MEA Solvent Bazlı CO2 Yakalama Teknolojisi Üzerine Tekno-Ekonomik Çalışmaların Sistemik İncelenmesi.....	83
Tablo 4.22 MEA Solvent Kullanılan Amin Bazlı Yıkama Teknolojisi CO2 Yakalama/Azaltım Maliyet Karşılaştırması	84
Tablo 4.23 MEA Solvent Kullanılan CO2 Yakalama Teknolojisi İşletme Parametreleri	84

Türkiye’de Karbon Yakalama ve Depolama Potansiyelinin Araştırılması - Çimento Tesisi Örneği

Nazlıcan FİLTEKİN

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yaşar AVŞAR

İklim değişikliği günümüzün küresel çevre problemlerinin başında gelmekte olup buna katkı sağlayan temel sorun ise atmosferde her geçen gün sera gazı emisyonlarının artmasıdır. Sera gazlarından olan karbondioksit, hem konsantrasyon hem de atmosferde uzun süre kalması nedeniyle küresel ısınmanın referans kirleticisi konumundadır. Bu nedenle tüm dünya üzerinde küresel ısınmayı 2°C’nin altında tutabilmek için karbondioksit emisyonlarını azaltmak veya atmosfere salım öncesi kontrol altında tutabilmenin yolları aranmaktadır. Bu çalışmada, CO₂ emisyonlarını atmosfere salım öncesi kontrol altında tutabilme yöntemlerinden biri olan Karbon Yakalama Kullanma ve Depolama (KYKD) teknolojilerinin çimento sanayi ölçeğindeki uygulamaları araştırılmıştır. Bu amaçla dünya çapında endüstriyel kaynaklardan oluşan küresel antropojenik CO₂ emisyonlarının %27’sinden sorumlu olan çimento endüstrisi için mevcut KYKD çalışmaları incelenerek, dünya çimento üretiminde önemli paya sahip olan Türk çimento sektörü için KYKD uygulaması ve potansiyel depolama alanları değerlendirilmiştir. Depolama alanları ve teknik deneyimler göz önünde bulundurularak, Siirt ve Mardin illerinde bulunan iki çimento fabrikasından

yakalanan CO₂ 'nin Batman bölgesine taşınarak, geliştirilmiş petrol geri kazanımı için kullanılması uygun görülmüş, bu yöntem ile üretilebilecek tahmini petrol miktarı hesaplanmıştır. Yakalanan CO₂'nin boru hattı ile taşınması durumunda, boru hattı yatırım ve işletme maliyetleri hesaplanmıştır. Ayrıca Türkiye'de KYKD teknolojilerinin uygulanabilmesi ve gelecekteki araştırmalar için teknik ve ekonomik önermeler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Karbon yakalama ve depolama, CO₂ giderimi, çimento sektöründe KYKD

.



Investigation of Carbon Capture and Storage Potantial in Turkey-Case Study for Cement Facility

Nazlıcan FİLTEKİN

Department of Environmental Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yaşar AVŞAR

Climate change is one of today's global environmental problems, and the main problem contributing to this is the increase in greenhouse gas emissions in the atmosphere, which are increasing day by day. Carbon dioxide, which is one of the greenhouse gases, is the reference pollutant of global warming due to both its concentration and its long stay in the atmosphere. For this reason, in order to keep global warming below 2°C all over the world, ways are sought to reduce carbon dioxide emissions or to keep them under control before they are released into the atmosphere. In this study, the applications of Carbon Capture and Storage (CCS) technologies, which is one of the methods of keeping CO₂ emissions under control before they are released into the atmosphere, were investigated in the cement industry. For this purpose, the current CCS studies for the cement industry, which is responsible for 27% of global anthropogenic CO₂ emissions from industrial sources worldwide, were examined, and the potential storage areas and application of CCS for the Turkish cement industry, which has an important share in world cement production, were evaluated. Considering the storage areas and technical experiences, the CO₂ captured from the two cement factories in Siirt and Mardin provinces was determined to be transported to the Batman region and

used for enhanced oil recovery, and the estimated amount of oil that could be produced with this method was calculated. In case the captured CO₂ is transported by pipeline, pipeline investment and operating costs are calculated. In addition, technical and economic proposals for the application of CCS technologies in Turkey and for future research are presented.

Keywords: Carbon capture and storage, CO₂ removal, CCS in cement industry



Atmosferde bulunan sera gazları, küresel sıcaklığın düzenlenmesine yardımcı olarak yaşamın devam edebilmesi için bir iklim ortamı sağlar. En yaygın sera gazları arasında su buharı, karbondioksit, metan, nitroz oksit ve florlu gazlar bulunmaktadır. Sera gazları, doğal süreçler ve insani faaliyetler sonucunda oluşur. Atmosferdeki sera gazlarının konsantrasyonlarının artması iklim değişikliğine sebep olmaktadır. İklim değişikliği hava sıcaklıklarının artmasına, yağış döngülerinin değişmesine, buzulların erimesine ve deniz seviyesinin yükselmesine neden olarak çeşitli felaketleri beraberinde getirir. Günümüzde sera gazlarından olan karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azotdioksit (N₂O) gazları sırası ile CO₂:410 ppm, CH₄:1866 ppb ve N₂O: 332 ppb seviyesine ulaşmıştır [1].

2015 yılında imzalanan Paris İklim Anlaşması ile küresel sıcaklık artışının sanayi öncesi döneme kıyasla 2°C'nin altında tutulması hatta 1,5°C ile sınırlandırılması hedeflenerek, iklim değişikliğine karşı mücadele başlatılmıştır. 2021 yılında Glasgow'da düzenlenen 26. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı (COP26) ile 1,5°C hedefi yinelenmiş ve yüzyılın ortasına kadar net sıfır emisyonu ulaşılması gerektiği belirtilmiştir. Net sıfır emisyon hedefi, toplam emisyonların giderilen emisyonlara eşit veya daha az olması anlamına gelmektedir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından yayımlanan "İklim Değişikliği 2022: İklim Değişikliğinin Azaltılması" raporunda tüm sektörlerde ani ve derin emisyon azaltımları olmadan, küresel ısınmanın 1,5°C ile sınırlandırılmayacağı ve net sıfır emisyon hedefine ulaşabilmek için atmosferden CO₂ gideriminin kaçınılmaz olduğu belirtilmiştir. Yaygın olan CO₂ giderim yöntemleri;

- Ağaçlandırma / yeniden ağaçlandırma
- Biyolojik kömür
- Karbon yakalama ve depolama ile biyoenerji
- 'Mavi karbon' habitat restorasyonu

- Biyokütle ile bina
- Alkali ile bulut veya okyanus tedavisi
- Doğrudan hava yakalama
- Geliştirilmiş okyanus verimliliği
- Geliştirilmiş ayrışma
- Toprak karbon tutumu

olarak tanımlanmıştır. Doğrudan hava yakalama ve karbon yakalama ve depolama ile biyoenerji yöntemleri, Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama teknolojisini (KYKD) içerir. Küresel emisyon modelleme ve senaryolarının birçoğunda, KYKD teknolojisinin net sıfır emisyon hedefine ulaşılmasında kritik role sahip olduğu belirtilmektedir.

KYKD teknolojisinin, 2030, 2050 ve 2070 yılına kadar CO₂ emisyonlarının kümülatif azaltılmasında sırası ile yaklaşık olarak %4, %12 ve %15'ini oluşturması beklenmektedir. Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu'na (SKS) göre, 2070 yılında net sıfır emisyon hedefine ulaşılması ve 10 Gt CO₂ yakalanması hedeflenmektedir [2].

KYKD teknolojisi, özellikle çimento, demir-çelik, kimya gibi karbon yoğun endüstrilerde ve enerji santrallerinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, çimento endüstrisinde KYKD teknolojisi ele alınmıştır.

1.1 Literatür Taraması

Çimento sektörüne yönelik KYKD teknolojisi için çeşitli ülkelerde farklı çalışmalar mevcuttur.

Hassan [3], tarafından yapılan bir çalışmada, Kanada'da bulunan referans bir çimento fabrikası için monoetanolamin (MEA) bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisinin maliyetini hesaplamaya yönelik araştırmalar yapılmıştır. Söz konusu çalışmada, bir çimento fabrikasının klinker üretim hacmi 2400 t/g olup, simülasyonda baca gazı arıtımı dikkate alınmamış, bunun yerine torbalı filtre ve desülfirizasyon maliyetleri için literatürdeki değerler kullanılmıştır. CO₂ emisyonu yakalama maliyetinin 49 – 54 USD/t CO₂ aralığında olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışma sonucunda, toplam yakalama maliyetinin yaklaşık %40'ının

buhar maliyeti olduğu, bunu takiben yaklaşık %18'inin değişken işletme ve bakım maliyetinden, yaklaşık %8'inin sabit işletme ve bakım maliyetinden oluştuğu belirtilmiştir.

Barker ve diğerleri [4] tarafından yapılan bir diğer çalışmada, Kuzey Doğu İskoçya'da bulunan, çimento üretim hacmi 1 Mt çimento /yıl (910 t klinker/yıl) olan bir çimento fabrikası için yanma sonrası ve oksijen yakıt teknolojilerinin kullanılması ile CO₂ yakalama maliyeti için farklı senaryolar hazırlanmıştır. Çalışmanın sonuçları, gelişmekte olan ülkelerde daha büyük ölçekte çimento fabrikalarının mevcut ve inşa ediliyor olması, ayrıca daha düşük inşaat ve işletme maliyetleri sebebi ile özellikle Asya bölgesi için CO₂ yakalama maliyetleri ile karşılaştırılmıştır. Oksijen yakıt teknolojisinin, yeni yapılan çimento fabrikaları için en düşük maliyetli çözüm olduğu fakat konuşlandırılması için teknik problemlerin çözülmesi ve geliştirilmesinin gerektiği belirtilmiştir. Oksijen yakıt teknolojisi ile CO₂ azaltım maliyetinin, Avrupa'da bulunan 1 Mt çimento/yıl kapasitede bir çimento fabrikası için €40/t CO₂ ve Asya'da bulunan 3 Mt çimento/yıl kapasitede bir çimento fabrikası için €23/t CO₂ olduğu sonucuna varılmıştır. Yanma sonrası teknoloji ile CO₂ yakalama maliyetinin, Avrupa'da bulunan 1 Mt çimento/yıl kapasitede bir çimento fabrikası için €107/t CO₂ ve Asya'da bulunan 3 Mt çimento/yıl kapasitede bir çimento fabrikası için €59/t CO₂ olduğu hesaplanmıştır. Söz konusu maliyetlerin bir elektrik santrali ile birlikte entegre edilmesi sonucu düşürülebileceği belirtilmiştir.

Jakobsen ve diğerleri [5] ise Norveç'te bulunan bir çimento fabrikasında KYKD için farklı teknolojiler ve senaryolar ile maliyet düşürme potansiyelini araştırmışlardır. Tam zincirli KYKD konuşlandırılması için tahmin edilen maliyet 100 – 150 €/t CO₂ olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışmada, MEA bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisi ile gelişmiş amin bazlı ve membran bazlı teknolojilerin kullanılması karşılaştırılmış ve gelişmiş amin bazlı ve membran bazlı teknolojilerin kullanılmasının CO₂ yakalama maliyetini %40 oranında düşüreceğini fakat membran modüllerindeki maliyet belirsizliklerinin, yakalama maliyetinin düşüş performansını etkileyebileceğini belirtmişlerdir. Yakalanan CO₂'nin taşınması için, açık deniz boru hattı ile taşıma ve gemi ile taşımanın maliyet üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır. Yakalanan CO₂ emisyonlarının, bağımsız bir boru hattı ile

taşınmamasının, gemi ile taşınmasına kıyasla, taşıma maliyetini %45 arttıracakı belirtilmiştir. Ancak, ortak bir boru hattı mevcudiyetinde veya yakalanan CO2 miktarının üç kat daha fazla olması halinde, boru hattı ile taşımacılığın, gemi ile taşımacılığa göre taşıma maliyetini %30 azaltabileceği belirtilmiştir. Depolama için CO2'nin EOR uygulamasında kullanılmasının uygun olduğu belirtilmiştir. CO2'nin 25 yıl süre ile EOR uygulaması ile depolanmasının, taşıma maliyetini %35, 10 yıl süre ile EOR uygulaması ile depolanmasının taşıma maliyetini %28 oranında düşüreceği sonucuna varılmıştır. Maliyetlerin petrol fiyatlarına, verimliliğe ve farklı EOR teknolojilerine göre değişiklik gösterebileceği belirtilmiştir.

Zhou ve diğerleri [6], Çin çimento endüstrisinde CO2 emisyonlarını azaltmak için farklı KYKD senaryoları üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Söz konusu çalışmada CO2 yakalama prosesinin, çimento üretimi ve kömür yakıtlı elektrik santrali için maliyet karşılaştırılması yapılmıştır. Kapasitesi 5000 t klinker/gün olan çimento tesisi için, ithal buhar ve ithal elektrik kullanılan MEA bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisi, kojenerasyon tesisi ile entegre edilen ve buhar ve elektrik ihtiyacının kojenerasyon tesisinden tedarik edildiği MEA bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisi ve ithal elektrik kullanılan oksijen yakıt teknolojisi ile CO2 yakalama maliyetleri hesaplanmıştır. Kurulu gücü 600 MW olan kömür yakıtlı elektrik santrali için, MEA bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisi kullanılarak, gerekli elektrik ve buhar ihtiyacının santralden tedarik edildiği CO2 yakalama maliyeti hesaplanmıştır. Çimento tesisinden CO2 azaltımı için gerekli olan toplam maliyet, ithal buhar ve ithal elektrik kullanılan MEA bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisi uygulandığı durumda 67 – 111 USD/t CO2, kojenerasyon tesisi ile entegre edilen ve buhar ve elektrik ihtiyacının kojenerasyon tesisinden tedarik edildiği MEA bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisi uygulandığı durumda 77 – 126 USD/t CO2, ithal elektrik kullanılan oksijen yakıt teknolojisi uygulandığı durumda 38 – 61 USD/t CO2 olduğu hesaplanmıştır. Kömür yakıtlı elektrik santralinden CO2 yakalamak için gerekli olan toplam maliyet, MEA bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisi uygulandığı durumda 84 – 137 USD/t CO2 olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, KYKD teknolojinin Çin çimento endüstrisinden kaynaklanan CO2 emisyonlarını 2030 yılına kadar %57 oranında azaltabileceğini ve farklı yakalama

teknolojileri kullanılarak çimento endüstrisinde CO₂ yakalama maliyetinin kömür yakıtlı termik santrallerden CO₂ yakalama maliyetine kıyasla %5-20 oranında daha düşük olacağı belirtilmiştir.

Peter Markewitz ve diğerleri [7] tarafından Almanya'da bulunan, kapasitesi 3000 t klinker/gün olan çimento fabrikası için farklı senaryolar hazırlanarak CO₂ yakalama ve azaltım maliyetleri hesaplanmıştır. Tüm senaryolar için MEA bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisi kullanılmıştır. Temel senaryoda baca gazı CO₂ içeriğinin %18 olduğu kabul edilmiş ve ithal buhar ve ithal elektrik kullanılarak hesap yapılmıştır. 2. senaryo için baca gazı CO₂ içeriğinin %22 olduğu kabul edilmiş ve yine ithal buhar ve ithal elektrik kullanılarak hesap yapılmıştır. 3. senaryo için baca gazı CO₂ içeriğinin %18 olduğu kabul edilmiş, gerekli buharın tesisteki mevcut kömür kazanından elde edildiği fakat gerekli elektriğin ithal edildiği varsayılarak hesap yapılmıştır. 4. senaryo için baca gazı CO₂ içeriğinin %18 olduğu kabul edilmiş ve gerekli olan buhar ve elektriğin, sisteme entegre edilen kömürle çalışan kojenerasyon tesisinden tedarik edildiği varsayılarak hesap yapılmıştır. Söz konusu kojenerasyon tesisinin yalnızca KYKD için değil, aynı zamanda çimento üretimi içinde gerekli olan elektriği tedarik ettiği ve kojenerasyon tesisinin CO₂ emisyonlarında KYKD teknolojisi ile yakalandığı belirtilmiştir. Temel senaryo için CO₂ yakalama maliyeti 64 €/t CO₂ ve CO₂ azaltım maliyeti 82 €/t CO₂ olarak bulunmuştur. 2. senaryo için CO₂ yakalama maliyeti 61 €/t CO₂ ve CO₂ azaltım maliyeti 77 €/t CO₂ olarak bulunmuştur. 3. senaryo için ise CO₂ yakalama maliyeti 61 €/t CO₂ ve CO₂ azaltım maliyeti 115 €/t CO₂ ve 4. senaryo için CO₂ yakalama maliyeti 54 €/t CO₂ ve CO₂ azaltım maliyeti 102 €/t CO₂ olarak hesaplanmıştır. 3. ve 4. senaryolarda CO₂ azaltım maliyetinin daha fazla olma sebebinin, yıllık azaltılan CO₂ kütlesinin yıllık yakalanan CO₂ kütlesine göre daha az olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca Almanya çimento endüstrisi için KYKD teknolojisinin 2025 yılına kadar ticari yatırımlarının yapılması dahilinde, KYKD teknolojisinin %70 oranında CO₂ azaltımına yardımcı olacağı kabul edilerek üç farklı durum için emisyon tahminleri yapılmıştır. Almanya klinker üretim kapasitesinin %30'unda KYKD teknolojisi kullanılması durumunda 2050 yılına kadar yıllık %21 emisyon azaltımı sağlanacağı, %80'inde KYKD teknolojisi kullanılması durumunda 2050 yılına

kadar yıllık %56 emisyon azaltımı sağlanacağı, %10'unda KYKD teknolojisi kullanılması durumunda 2050 yılına kadar yıllık %7 emisyon azaltımı sağlanacağı hesaplanmıştır.

Mari Voldsund ve diğerleri [8] tarafından Horizon 2020 projesi kapsamında Avrupa çimento endüstrisi için büyük ölçekte CO₂ yakalama teknolojisi araştırılmıştır. Çalışmada, kapasitesi 3000 t klinker/gün olan ve MEA bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisi kullanılan çimento tesisi referans alınarak, oksijen yakıt teknolojisi, soğutulmuş amonyak teknolojisi, membran destekli CO₂ sıvılaştırma teknolojisi ve kalsiyum döngüsü teknolojisi ile çalışmalar yapılmış, sonuçlar referans teknoloji ile karşılaştırılmıştır. Tüm yakalama teknolojileri için baca gazı CO₂ azaltım oranı %90, boru hattında güvenli taşıma için gerekli olan oranlar >95% CO₂, <300 ppm su buharı ve basınç 110 bar olarak kabul edilmiştir. Çalışmalar sonucunda, referans alınan monoetanolamin (MEA) bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisi %64 CO₂, oksijen yakıt teknolojisi %82 CO₂, soğutulmuş amonyak teknolojisi %73 CO₂, membran destekli CO₂ sıvılaştırma teknolojisi %78 CO₂ ve kalsiyum döngüsü teknolojisi %90 CO₂ azaltım sağlama verimi göstermiştir. Ayrıca, CO₂ azaltım için gerekli olan spesifik birincil enerji tüketimi, referans alınan MEA bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisi için 7,08 MJ/kg CO₂, oksijen yakıt teknolojisi için 1,63 MJ/kg CO₂, soğutulmuş amonyak teknolojisi için 3,75 MJ/kg CO₂, membran destekli CO₂ sıvılaştırma teknolojisi için 3,22 MJ/kg CO₂ ve kalsiyum döngüsü teknolojisi için 4,07 MJ/kg CO₂ olarak hesaplanmıştır. Stefania Osk Gardarsdottir ve diğerleri [9] tarafından yapılmış bir diğer çalışmada ise CO₂ azaltımı için farklı teknolojilerin maliyetleri hesaplanmıştır. CO₂ azaltım maliyeti, referans alınan MEA bazlı kimyasal absorpsiyon teknolojisi için 80,2 €/t CO₂, oksijen yakıt teknolojisi için 42,4 €/t CO₂, soğutulmuş amonyak teknolojisi için 66,2 €/t CO₂, membran destekli CO₂ sıvılaştırma teknolojisi için 84,0 €/t CO₂ ve kalsiyum döngüsü teknolojisi için 52,4 €/t CO₂ olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, teknolojilerin performans ve maliyetinin, elektrik, buhar, baca gazı CO₂ konsantrasyonu, atık ısı mevcudiyeti, karbon vergisi, yakıt türü gibi değişkenler tarafından etkilenebileceği ve teknolojiler arasında herhangi birinin 'en iyi' olarak seçilemeyeceği, çimento fabrikalarına göre en iyi teknolojinin değişiklik gösterebileceği belirtilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada karbon azaltım yöntemlerinden biri olan KYKD teknolojisi incelenerek, karbon yoğun sektörlerden olan çimento sektörü ölçeğinde KYKD teknolojisi uygulamaları araştırılmış ve dünya çimento üretiminde önde gelen Türk çimento sektöründe KYKD teknolojisi değerlendirilmiştir.

1.3 Hipotez

Bu çalışma, Türk çimento sektöründe KYKD teknolojisi uygulanarak atmosfere CO₂ salınımı önlenabilir ve yakalanan CO₂'nin ham petrol bölgelerine enjeksiyonu ile ham petrol üretim miktarı arttırılabilir hipotezi üzerine kurulmuştur.

1.4 Karbon Yakalama Depolama Teknolojisi

Karbon Yakalama Kullanma ve Depolama (KYKD), 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarında net sıfıra ulaşmak için gerekli olan temel teknolojilerden biridir. KYKD teknolojisi, atmosfere CO₂ salan kaynaklardan veya direkt atmosferden CO₂ yakalayan kanıtlanmış ve güvenli bir teknolojidir. Çeşitli kaynaklardan toplanan CO₂, basınç ile taşınarak yerin en az 800 m derinliğine, gözenekli kayalarda kapana kısılarak kalıcı olarak depolanır.

KYKD teknolojisi ile emisyon azaltımı ve karbon giderimi için ana teknolojiler aşağıdaki gibidir:

Emisyonların azaltılması

KYKD teknolojileri, tüm kirletici azaltımı yöntemlerinde olduğu gibi kaynağında müdahale veya atık azaltımına odaklanır. Bu amaçla atmosferdeki CO₂ salımının azaltılmasında, üretim proseslerinden kaynaklanan emisyonların kontrol altına alınması ile bu sorunun etkili bir şekilde azaltılması hedeflenmektedir. Bunun için atılacak adımlar ve örnek çalışmalara ilişkin detaylar aşağıdaki gibidir:

- Ağır sanayinin karbondan arındırılması, özellikle çimento, çelik ve kimyasalların üretiminden kaynaklanan emisyonların azaltılması. Bu sektörler, doğal süreç emisyonları ve yüksek sıcaklıktaki ısı gereksinimleri nedeniyle CO₂ azaltılması en

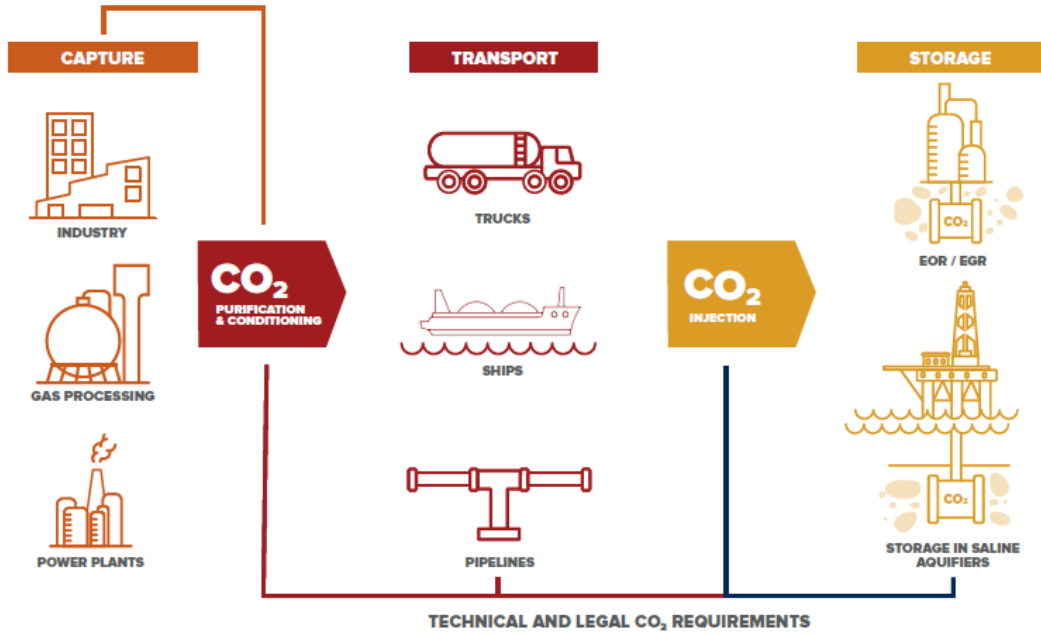
zor olan sektörler arasındadır. KYKD, bu sektörlerden kaynaklanan emisyonları azaltmak için en olgun ve uygun maliyetli seçeneklerden birini sağlar [10].

- Mavi hidrojen üretimi yoluyla hidrojen ekonomisinin etkinleştiricisi olarak temiz hidrojen üretimine katkı sağlar [10].
- Yakın zamanda inşa edilen enerji santrallerinden, özellikle Asya'daki kömür ve gaz tesislerinden kaynaklanan emisyonların azaltılmasını sağlar [11].

Karbon giderme

- KYKD teknoloji özellikle, BECCS (Biochar and Bioenergy with Carbon Capture and Storage) ve DACS (Direct Air Capture and Storage) dahil olmak üzere teknoloji tabanlı karbon giderme için temel sağlamaktadır [12]. BECCS teknolojisi özellikle depo sahalarına depolanacak organik içerikli atıkların azaltılması ve dolayısıyla metan üretimini de azaltarak, atıkların enerjiye dönüştürülmesini sağlamaktadır [10].

Emisyon azaltımı ile karbon giderim teknolojileri arasındaki farkı oluşturan temel etken, CO₂'nin yakalama kısmıdır; CO₂'nin taşınması ve depolanması her zaman aynı şekilde çalışmaktadır. Boru sonu bir yöntem olarak CO₂'yi yakalamak, emisyon azaltımları sağlayabilirken, CO₂'yi atmosferden uzaklaştırmak (doğrudan veya biyokütle yoluyla) karbonun giderilmesi ile sonuçlanabilir [10]. Şekil 1.1'de KYKD'nin kavramsal diyagramı verilmiştir.



Şekil 1.1 Karbon yakalama ve depolama – kavramsal diyagram [13]

1.4.1 Biyoenerji ile Karbon Yakalama Depolama (BECCS)

BECCS'nin ilkesi, biyokütlenin büyütülmesi ve enerji amaçlı kullanılmasıdır. Biyojenik CO₂, çoğu sera gazı hesaplama planında tipik olarak net sıfır emisyon olarak sayılmaktadır. Bu nedenle, eğer biyojenik CO₂'nin bir kısmı yakalanır ve depolanırsa, bu atmosferden net bir CO₂ azaltılması olarak tanımlanmaktadır [10].

Dünyanın BECCS tesislerinin çoğu, etanol tesisleri olup, bu tesislerdeki fermentasyonla CO₂'nin yakalanması sağlanmaktadır. Yüksek saflığa sahip olup, jeolojik depolama için sıkıştırılmadan önce tipik olarak yalnızca dehidrasyon gerektirir [10].

BECCS için iklim değişikliğini azaltma potansiyeli, yapılan bazı çalışmalar ve tahminler neticesinde yılda 5 ile 11 Gt CO₂ şeklinde hesaplanmaktadır [10].

Her teknoloji veya prosesin bazı sınırlayıcı yönleri bulunmaktadır. BECCS'nin sınırlayıcı faktörü ise biyokütle tedariğidir [14]. BECCS teknolojisinin geliştirilmesi, tarım ve ormancılığın atık ürünlerinden sürdürülebilir biyokütle için tedarik zincirlerinin ve enerji bitkilerinin yetiştirilmesi için potansiyel olarak önemli arazi alanlarının tahsisine ihtiyaç duymaktadır [15].

BECCS teknolojisinin uygulanmasının maliyeti değişiklik göstermekte olup, yapılan bilimsel raporlamalarda bu değerin yaklaşık olarak 15-85 ABD \$/t CO₂ seviyelerinde olacağı belirtilmektedir [2].

1.4.2 Doğrudan Havadan Karbon Yakalama ve Depolama (DACs)

BECCS'den farklı olarak, DACs tesisleri CO₂'yi doğrudan atmosferik havadan alır. Bu teknolojinin kendine özgü önemli avantajları bulunmaktadır. Bunlar:

- Yakalama tesisleri aynı zamanda depolama yerlerine yakın veya üzerlerinde inşaa edilebilmektedir. Bu sayede özellikle CO₂'nin depolama bölgelerine taşıma maliyeti oldukça azalım göstermektedir.
- Ayrıca bu gibi tesislerin rüzgarlı bölgelere kurulması ile fan çalıştırmak için gerekli enerji sağlanabilir ve bu sayede yakalama maliyetleri azaltım gösterebilmektedir.
- Tesisler, büyük ölçekli yenilenebilir elektrik kaynaklarına erişimlerinin olduğu yerlere yerleştirilebilir [10].

Bu teknolojinin en önemli sorunu ise atmosferdeki CO₂'nin yakalanmasının diğer kaynaklardan yakalamaya göre daha zor oluşudur. Çünkü atmosferik CO₂ konsantrasyonu ppm seviyelerinde olup milyonda yaklaşık 400 birim oranındadır. Bu, gazla çalışan bir elektrik santralinden çıkan baca gazındaki CO₂ konsantrasyonunun sadece yüzde biridir. CO₂'yi bu kadar düşük seviyelerden yoğunlaştırmak için gereken enerji gereksinimleri, daha yoğun kaynaklardan gelen CO₂'ye göre daha yüksektir [12].

DACS teknolojileri, CO₂'ye bağlanan veya yapışan kimyasalları kullanarak doğrudan atmosferden yakalayabilen modüler bir teknolojidir. CO₂ daha sonra depolanabilir veya inşaat agregaları, plastikler ve sentetik yakıtların üretimi gibi çeşitli amaçlar için yeniden kullanılabilir [10].

DACS ile atmosferden yılda 5 Gt CO₂ azaltılabileceği tahmin edilmektedir [16]. DACs için maliyet aralığı incelendiğinde ise, seçilen teknolojiye, düşük karbonlu enerji kaynağına ve dağıtım ölçeğine bağlı olarak bugün 250 \$-600 \$/t CO₂ arasında değiştii ifade edilmektedir [17].

1.5 Karbon Yakalama

CO₂'nin yakalanması, atmosfere CO₂ salınımını önleyen bir dizi teknolojinin ilk adımudur. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan elde edilen enerji üretimi, yan ürün olarak CO₂ emisyonu ile sonuçlanan bir süreçtir.

Enerji santralleri, petrol rafinerileri, biyogaz şartlandırma ve ayrıca amonyak, etilen oksit, çimento, demir ve çelik üretimi CO₂'nin oluşumunun sağlandığı ana endüstriyel kaynaklarıdır [18], [19].

CO₂'nin yakalanma şekli, temel olarak bir endüstriyel tesiste CO₂'nin üretilme şekline bağlıdır [20]. Genel olarak CO₂ yakalama yöntemleri yanma sonrası yakalama, yanma öncesi yakalama ve oksit yakıt yanması olarak uygulanmaktadır (Şekil 1.2).

1.5.1 Yanma Sonrası Yakalama, YSY (Post Combustion Capture)

Yanma sonrası sistemler, bir birincil yakıtın (kömür, doğal gaz, petrol veya biyokütle) hava ile yanması ile üretilen baca gazlarından CO₂'yi ayırır. Yanma sonrası sistemler, mevcut enerji santrallerinin yanı sıra yeni endüstriyel tesislere de uyarlanabilir [21].

CO₂'yi diğer yanma gazlarından ayırmak için farklı teknolojiler mevcuttur. Hepsi ortak bir ilkeye dayanır ve atmosferik basınçta diğer gazlardan CO₂'yi seçici olarak filtreleyebilme şeklindedir. Diğer bir deyişle, YSY'de kullanılan kimyasallar veya malzemeler, diğer yanma gazları olan azot, oksijen ve su ile reaksiyona girmez, sadece CO₂ ile reaksiyona girer. En yaygın olarak kullanılan teknoloji, belirli kimyasal çözücülerin özelliklerine dayanmaktadır. Bu kimyasal çözücüler, suda seyreltilmiş amin molekülleri adı verilen ve CO₂'yi absorbe etme kabiliyetine sahip spesifik moleküllerden oluşmaktadır.

1.5.2 Yanma Öncesi Yakalama, YÖY (Pre-Combustion Capture)

Yakıtı karbon içermeyen başka bir yakıtı dönüştürerek, yanma gerçekleşmeden önce CO₂'yi yakalamaya yönelik bir teknolojidir. Yakıtı dönüştürme yönteminde katı bir yakıt kullanılıyorsa buna gazlaştırma, gaz halinde yakıtlar kullanılıyorsa oto-termal reform olarak isimlendirilmektedir. Bu yöntemler hidrojen üretimi için geleneksel bir yöntem olan buhar metan değişiminden farklıdır. Gazlaştırma ve

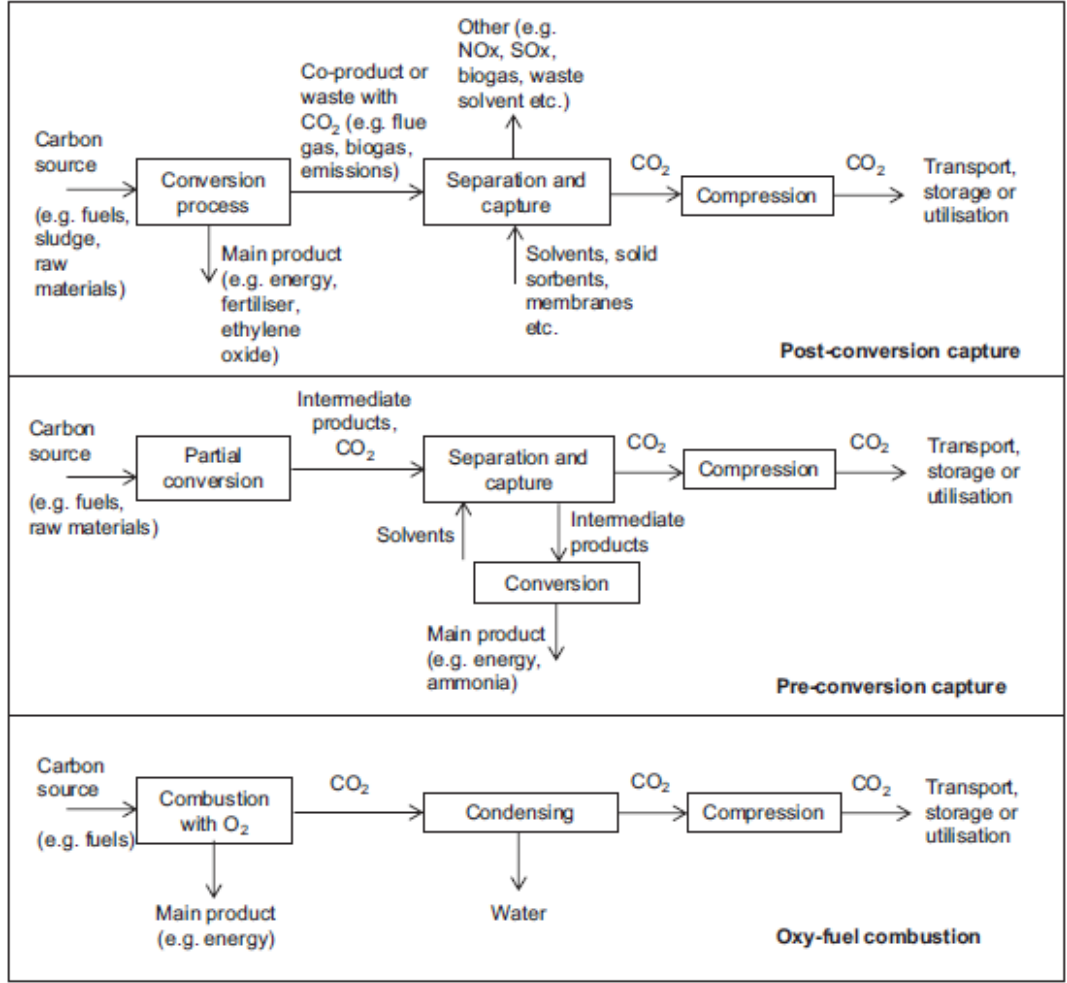
oto-termal değişimde, yakıtı hidrojen ve karbon monoksit'e dönüştürmek için oksijen, su veya buhar kullanılmaktadır. Bu teknolojiye öncelikle hava, iki ana bileşeni olan azot ve oksijene ayrılmak üzere bir hava ayırma ünitesine girer. Buradaki amaç, bir sonraki dönüşüm adımı olan gazlaştırıcıya girecek olan gaz içinde çok yüksek saflıkta oksijen üretmektir. Katı yakıt, gazlaştırıcıda yüksek sıcaklıkta ve yüksek basınçta oksijen ve buharla reaksiyona sokularak bir sentez gazı oluşturulur. Sentez gazı, yüksek basınçlı hidrojen, karbon monoksit, CO₂ ve suyun bir karışımıdır. Gazlaştırıcıdan sonraki ikinci adım kaydırma reaksiyonudur. Sentez gazı yüksek basınçlı hidrojen, CO₂ ve sudan oluşmaktadır. Böylece CO₂'nin %90-95'i çözücüler kullanılarak kimyasal bir işlemle yakalama ünitesinde yakalanır. Hidrojen, karbon monoksit ve CO₂ karışımı olan sentez gazı, fosil yakıtlardan veya biyokütleden üretilmektedir. Saf hidrojen veya ek emisyon azaltımlarının gerekli olduğu bazı durumlarda, karbon monoksit, ayrılabilir CO₂'ye dönüştürülürken sentez gazı hidrojene ağırlık olarak oluşturulabilmektedir [20].

1.5.3 Oksi-Yakıt Yanması, OYY (Oxy-fuel Combustion)

Bu teknolojiye havalı ortamda yanma sonucu yüksek konsantrasyonlu CO₂'den oluşan bir baca gazı elde etmek için yanma işleminde hava yerine saf oksijen kullanılır [20]. Proses sonucunda esas olarak H₂O ve CO₂ içeren baca gazı elde edilir, su buharı yoğunlaştıktan sonra CO₂ kolayca yakalanır [21].

Geleneksel bir yakma işleminde, yanma gazlarındaki CO₂ konsantrasyonları, yakıt ve uygulanan yakma teknolojilerine bağlı olarak %4-20 civarındadır. Oksi-yakıt sistemlerde CO₂ konsantrasyonu %90'a kadar ulaşır, yanma gazlarının geri kalanı esas olarak sudan oluştuğu için ayrıştırma işlemi bu teknolojiye çok daha kolay hale gelebilmektedir.

CO₂ ayırmanın üretimin doğal bir parçası olduğu tüm uygulamalar için, CO₂ yakalama prosesleri ticari olarak mevcuttur ve yaygın olarak kullanılmaktadır [20].



Şekil 1.2 Karbon yakalama teknolojileri [22]

1.6 Taşıma

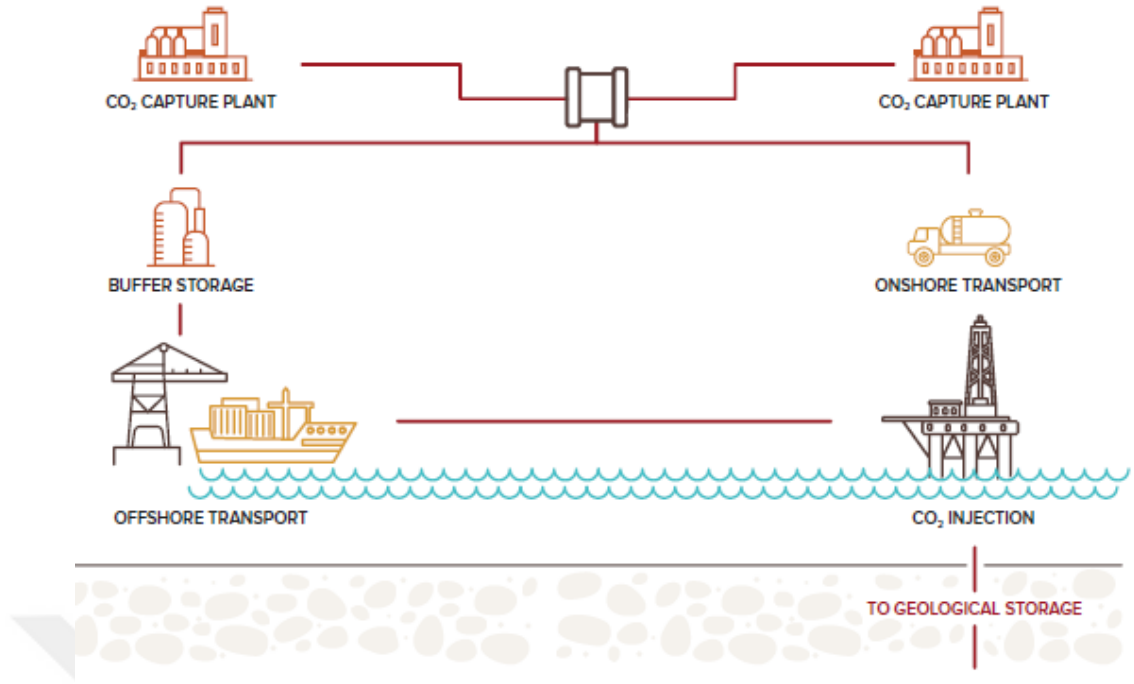
CO₂ gemilerle veya boru hatları ile taşınabilir. Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) taşınmasında kullanılan araçlar, CO₂ taşımacılığında da kullanılabilir (Şekil 1.3). Özellikle basınçlandırılan ve soğutulan CO₂ sıvı fazda taşınabilir. Ancak, gemi ile taşımacılık düşünüldüğünde, bunun için ayrıca limanlarda CO₂'nin yeniden yüklenmesi için ara depolama tesislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Boru hattı ile CO₂ taşımacılığı petrol şirketleri tarafından Geliştirilmiş Petrol Geri Kazanımı (EOR) amacı ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Genelde boru hattı ile taşıma, gemi ile taşımaya kıyasla daha ekonomiktir ve CO₂'nin yakalandığı noktadan depolanacağı alana kadar akışın kesintisiz olmasını sağlar. CO₂ boru hatları, yüksek basınç şartlarında, CO₂'nin sıvı yoğunluğuna sahip olduğu, ancak gaz gibi davrandığı süper kritik şartlar (31 °C, 73,8 bar) altında çalışmaktadır. Herhangi bir boru

hattının taşıyabileceği miktarı belirleyen üç temel faktör; boru hatlarının çapı, hat boyunca basınç ve borunun et kalınlığıdır [23].

Amerika Birleşik Devletleri'nde 7.600 km'den fazla kara boru hattı ile yılda yaklaşık 70 Mt CO₂ taşınmaktadır [2]. Yine Kanada'da 720 km uzunluğunda kara boru hattı yılda 6 Mt CO₂ taşımaktadır. Diğer kara CO₂ boru hatları Hollanda, Birleşik Arap Emirlikleri ve Suudi Arabistan'da faaliyet göstermektedir. Norveç'te bulunan Snøhvit doğal gaz sahası 153 km boru hattı ile açık denizde CO₂ taşıyan tek boru hattıdır. ISO, genel düzeyde, diğer boru hatlarına kıyasla CO₂ boru hatlarının ayırt edici özelliğinin ne olduğuna işaret eden uluslararası bir standart yayınlamıştır (ISO 13623). Ayrıca CO₂ boru hatlarıyla ilgili yönergeler ve önerilen uygulamalar da vardır (ör. DNC 2021) [24].

Daha küçük hacimlerde endüstriyel ve gıda sınıfı CO₂'nin nakliyesi, 40 yılı aşkın bir süredir kamyon ve demiryolu ile başarıyla gerçekleştirilmektedir. Taşıma maliyeti, boru hatlarına kıyasla bir ton CO₂ başına nispeten yüksektir, bu nedenle küçük ölçekli KYKD fırsatları veya pilot projeler dışında, kamyon ve demiryolu taşımacılığının KYKD dağıtımında sınırlı bir rolü olabilir [25].

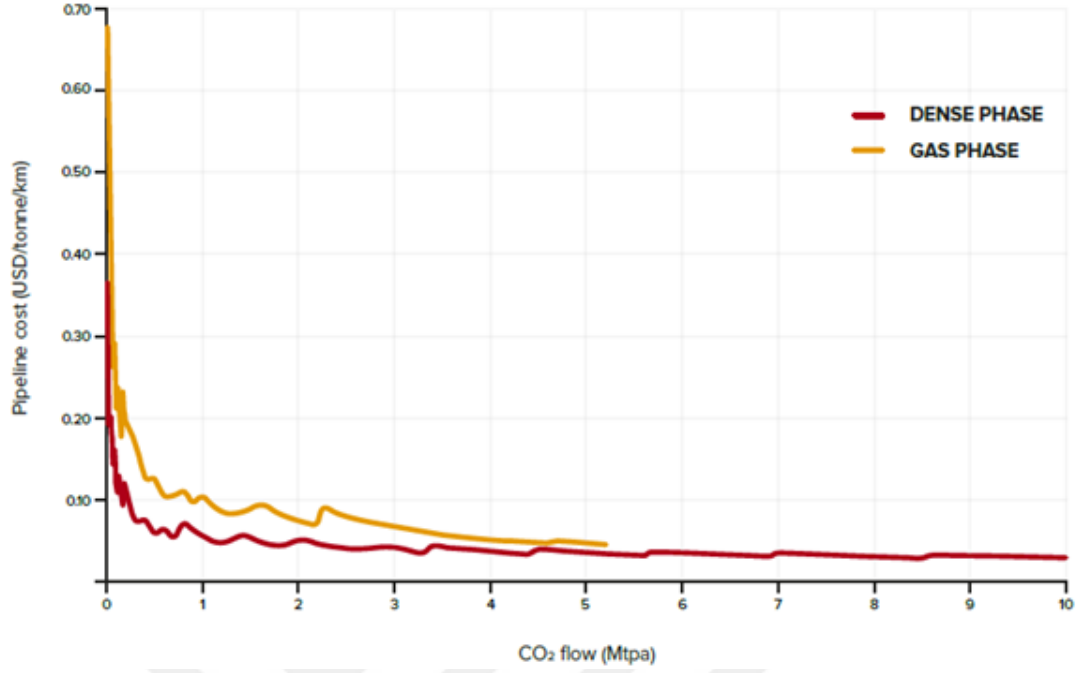
Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA), enerjiden kaynaklı CO₂ emisyonlarını 2050 yılına kadar en uygun maliyetle yarıya indirilmesi konusunda yaptığı hesaplamalara göre, önümüzdeki 30-40 yıl içinde CO₂ taşımacılığı için inşa edilecek altyapının, şu an var olandan yaklaşık 100 kat daha fazla olacağı tahmin edilmektedir [26].



Şekil 1.3 CO₂ taşıma [26]

CO₂ boru hatları için maliyet eğilimlerinin özeti Şekil 1.4'de verilmiştir. Boru hattı maliyetleri, gaz fazı (1 bar) ve yoğun faz (>74 bar) için hesaplanmıştır. Rakamlar Avustralya'daki bir uygulamadan alınmıştır.

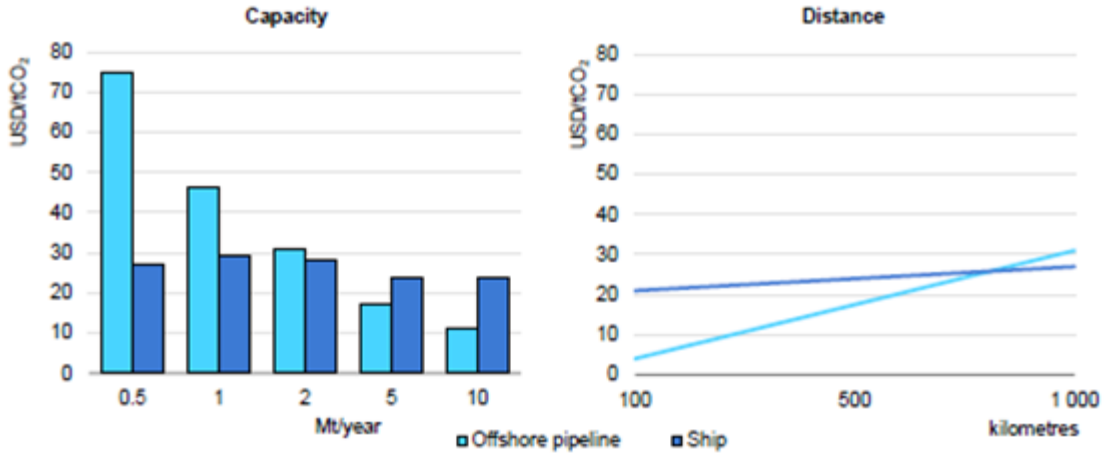
Grafiğe göre yoğun CO₂ fazı için gereken boru hatları, aynı akış kapasitesine sahip gaz CO₂ fazı için gerekli olan boru hatlarına göre daha düşük maliyet gerektirmektedir. Fakat gerekli hesaplamalar yapılırken gazın sıkıştırılma maliyeti de göz önünde bulundurulmalıdır. Genel olarak CO₂, kaynağından ilk yakalandığında yaklaşık basıncı 1 bar civarındadır. Gaz, taşınabilmesi için sıkıştırılır ve yoğun faz halinde kritik basınca, 73,8 bar'a yükseltilir. Daha sonra nihai basınca ulaştığında, taşıma için pompalanır. Grafiğe göre son basıncın 150 bar olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 1.4 Boru hattına özgü maliyet (USD/ton/km) [13]

Yeni boru hatlarının maliyetinin, Avrupa ülkelerine kıyasla Asya ülkelerinde %30 daha düşük olduğu tahmin edilmektedir [27].

Dünya'nın birçok yerinde mevcut olan petrol ve doğal gaz borularının yeniden kullanılması veya CO₂ taşınmasına uygun hale getirilmesi için önemli potansiyel vardır. Yeni bir boru hattı inşa etmek yerine, mevcut boru hatlarının CO₂ taşınmasına uygun hale getirilmesi, CO₂ için altyapı geliştirme maliyetini %1-10 oranında azaltabilecektir. Mevcut boru hatlarının yeniden kullanım olasılıklarını belirlemek için, özellikle CO₂'nin basınç ve nem içeriği gibi teknik hususlar dikkate alınmalıdır [27].



Şekil 1.5 Gemi ve boru hattı taşımacılığı maliyetleri [28]

Şekil 1.5’de CO₂ taşınmasında gemi ve boru hattı taşımacılığı için maliyet karşılaştırması verilmiştir. Soldaki çizelge 1000 km’lik bir mesafeyi varsayar. Sağdaki çizelge yılda 2 Mt CO₂ taşıma kapasitesini varsayar.

1.7 Depolama

CO₂ depolaması, basınçlı CO₂’nin bir veya daha fazla kuyu aracılığıyla 800 m’den birkaç km’ye kadar derinliklerde, yeraltındaki geçirgen gözenekli ortama enjeksiyonunu ifade etmektedir [29] (Şekil 1.6). CO₂, jeolojik rezervuarlarda, gözenekli rezervuarın üzerindeki kalın, geçirimsiz bir kaya tarafından tutulur. Daha sonra zamanla CO₂’nin bir kısmı çözünürken, bir kısmı fiziksel olarak gözeneklerde tutulur, bir kısmı çökerek yeni mineraller oluşturur [30].

CO₂ Depolamada Kullanılan Bazı Kavramlar

CO₂’nin yeraltına jeolojik depolanmasına yönelik uygulamalarda ifade edilen bazı kavramlar mevcut olup bunlar aşağıda açıklanmıştır:

Sedimanter Kayaçlar

Fosil yakıtların bulunduğu yerlerdir ve CO₂ depolaması buralarda gerçekleşir. En yaygın sedimanter (tortul) kayaçlardan biri kumtaşıdır. Boyut ve şekline bağlı olarak bireysel veya birbirine yapışmış taneciklerden oluşur. Tanecikler arasında gözenek boşlukları bulunur ve bu boşluklar hava, su, doğal gaz, petrol veya CO₂ içerebilir.

Rezervuar Kayaçlar

Petrol veya gazın bulunduğu tortul kayaçlara genellikle rezervuar kayaçlar denir. Bunlar yüksek gözenekliliğe sahiptirler. Bu sebeple rezervuar kayaçlar CO₂ depolamak için yüksek potansiyel içerirler.

Örtü Kayaçlar

Çoğu durumda rezervuar kayaçlar, diğerk kayaç katmanları tarafından örtülüdür (genellikle tortul kayaçlar). Bu kayaçlar genel olarak daha düşük gözenekliliğe sahiptir. Bu sayede rezervuar kayasında bulunan petrol, gaz, su veya CO₂ sızıntısı önlenabilmektedir.

Derin Tuzlu Akifer

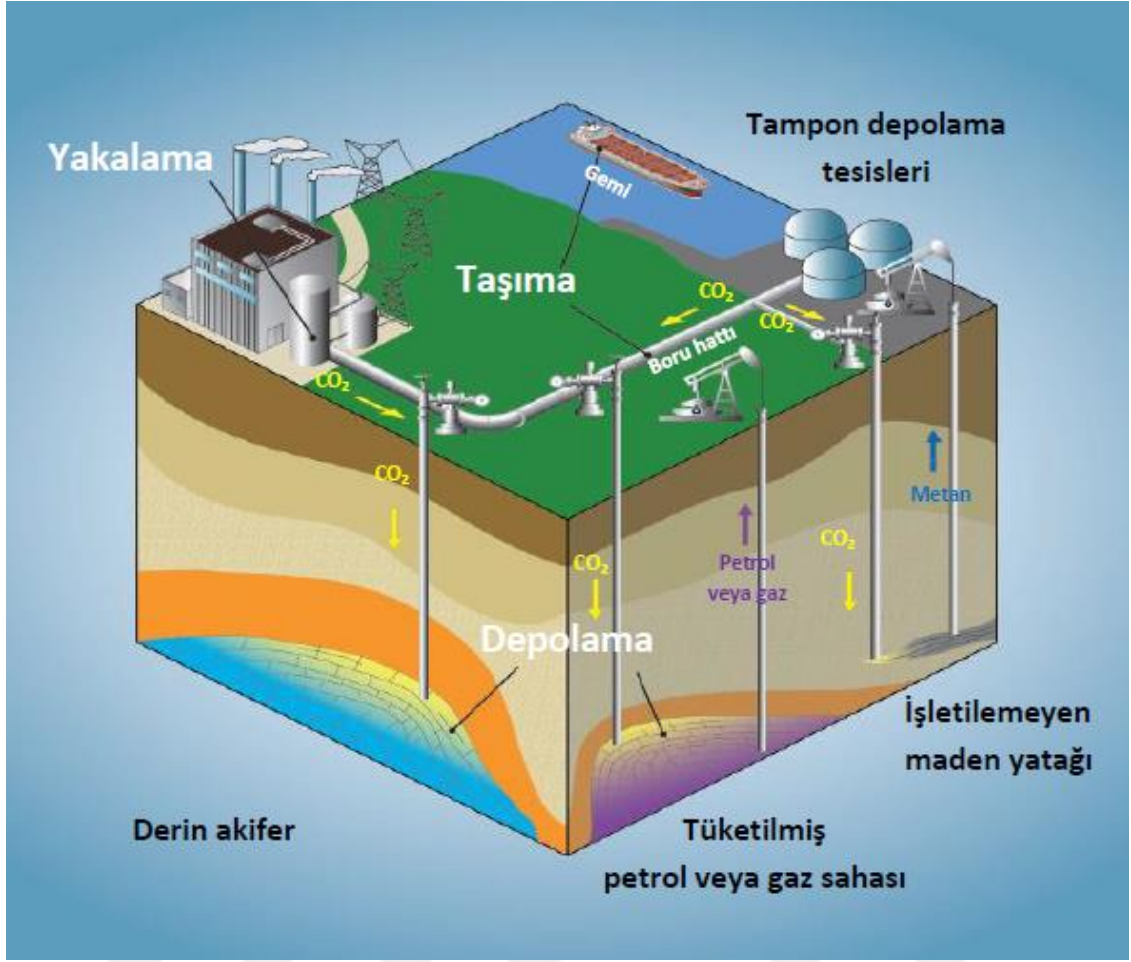
CO₂'nin depolanabileceğı başka bir rezervuar kayaç türü, derin tuzlu su akiferleridir. Derin tuzlu akiferler, kayadaki gözenek boşluklarının tuzlu su ile dolu olduğu rezervuar kayaçlardır. Bir derin tuzlu akiferin üzerinde uygun bir örtü kayaç varsa, potansiyel olarak CO₂ depolamak için uygundur.

Tükenmiş Petrol ve Gaz Yatakları

Tükenmiş petrol ve gaz yatakları CO₂ depolamak için en uygun seçeneklerden biridir. Çünkü geçmişte petrol veya gaz içeren bu rezervuarlar, milyonlarca yıl herhangi bir sızıntıya sebebiyet vermeyen örtü kayaçlara sahiptir.

Geliştirilmiş Petrol Üretimi (CO₂-EOR)

Üretimin yavaşladığı ve bitmeye yaklaştığı petrol rezervuarlarına CO₂ enjekte edilerek, kalan petrolün daha ucuz bir şekilde çıkarılması sağlanır. Dünya'da yaygın olarak kullanılan bu yöntem, uzun yıllardır uygulanmasından dolayı hem teknolojik olarak hem de CO₂'nin yeraltındaki davranışı hakkında derin bilgi birikimine sahiptir.



Şekil 1.6 CO₂'nin uygun jeolojik formasyonlarda depolanması [23]

1.7.1 Depolama Kapasitesinin Hesaplanması

Teorik Depolama Kapasitesi

CO₂'nin depolanacağı alanın tamamını kapsar. Jeolojik sistemin CO₂'nin ne kadarını kabul edebileceğinin fiziksel sınırıdır. CO₂'nin gözenek boşluklarında veya oluşum sıvılarında tamamen çözündüğünü veya tüm kömür kütlelerinde %100 doygunluk ile absorbe edildiğini varsayarak sistemin erişilebilir ve tam kapasite kullanımını ifade eder [31].

Etkin Depolama Kapasitesi

Etkin depolama kapasitesi "teorik" depolama kapasitesinin alt kümesini temsil eder. Teorik depolama kapasitesinin fiziksel olarak erişilebilen, jeolojik ve mühendislik kriterlerini karşılayabilen aralığı hesaplanarak elde edilir [31].

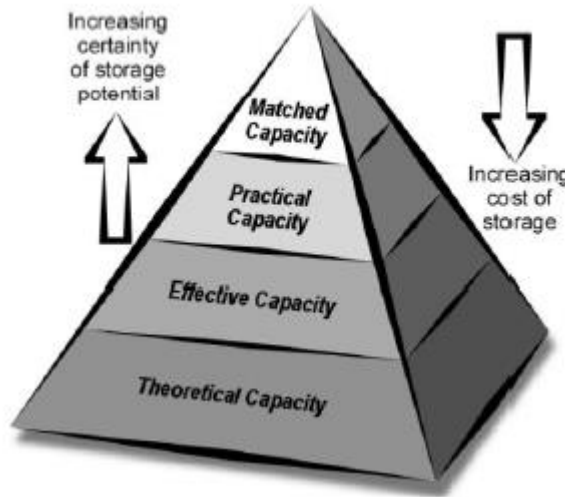
Pratik Depolama Kapasitesi

Pratik depolama kapasitesi, "etkin" depolama kapasitesinin alt kümesini temsil eder. CO₂'nin jeolojik depolanmasında teknik, yasal, düzenleyici, altyapısal ve genel ekonomik engelleri dikkate alınarak hesaplanır [31].

Eşleşen Depolama Kapasitesi

Eşleşen depolama kapasitesi, "pratik" depolama kapasitesinin alt kümesini temsil eder. Büyük noktasal CO₂ kaynaklarının, kapasite, enjektivite, bir veya birden fazla kaynaktan gelen CO₂ akışları için elverişli olan jeolojik depolama alanları ile eşleştirilmesi sonucu hesaplanır [31].

Şekil 1.7'de CO₂ depolama kapasitesi için tekno-ekonomik kaynak-rezerv piramidi gösterilmiştir.



Şekil 1.7 Jeolojik ortamlarda CO₂ depolama kapasitesi için tekno-ekonomik kaynak-rezerv piramidi [32]

1.7.2 Depolama Durumu

Jeolojik oluşumlarda CO₂ depolamasına ilişkin ulusal ve uluslararası düzenlemeler ve standartlar (EU 2009a,b,c; ISO 2017; US EPA Sınıf VI yönetmeliği), CO₂'nin güvenli uzun vadeli (bin yıl) depolanmasını sağlamak için enjeksiyonun başlamasından önce en az üç adet ön koşulu şart koşturmaktadır :

- Uygun depolama alanlarının belirlenmesi ve depolama kapasitelerinin doğrulanması.
- Depolama alanlarının yönetmeliğe uygun olarak karakterizasyonu.
- Enjekte edilen CO₂'nin sızıntı olmadan davrandığını ve sızıntılar veya beklenmeyen davranışlar durumunda uygun etki azaltma önlemlerinin alınabileceğini izlemeye yönelik araçları ve yöntemleri içeren depolama yönetim planları [24].

Geliştirilmiş kömür yatağı metan üretimi (ECBM), geliştirilmiş gaz geri kazanımı (EGR) ve geliştirilmiş gaz hidrat geri kazanımı (EGHR) çalışma sahalarında CO₂ depolanmasına yönelik çalışmalar halihazırda geliştirilmekte ve pilot ölçekte test edilmektedir. Fakat geliştirilmiş petrol geri kazanımı (EOR) sahaları ise, çoğunlukla karada olmak üzere CO₂ depolanması için yaygın olarak kullanılmaktadır [24]. EOR operasyonlarında, enjekte edilen CO₂'nin %90-95'i yer altında kalmaktadır [33].

1.7.3 Küresel Depolama Kapasitesi

Bir rezervuarın CO₂ depolaması için uygun olup olmadığının başlıca belirleyicileri; geçirgenlik, kalınlık, derinlik, gözeneklilik ve devamlılık gibi jeolojik parametrelerdir. Bu özellikler, bir rezervuarda toplam ne kadar CO₂ depolanabileceğini, açılması gereken kuyu sayısını ve basınç oluşumunun nasıl yönetilmesi gerektiğini belirlemektedir.

CO₂ depolama kapasitesini tahmin etmek, özellikle jeolojik ve jeofiziksel veri kapsamının yetersiz olduğu saha ve durumlarda zordur. Bu amaçla çeşitli kapasite belirleme yöntemleri geliştirilmiştir. Society of Petroleum Engineers'ın (SPE's) Jeolojik Depolama Kaynakları Yönetim Sisteminin (SRMS) (SPE 2017) piyasaya sürülmesi, bu konuda önemli bir adımdır. Petrol ve Gaz İklim Girişimi (OGCI) tarafından finanse edilen Pale Blue Dot ve GCCSI (Global Carbon Capture and Storage Institute) tarafından küresel bir SRMS uygulaması halihazırda yürütülmektedir [24]. SRMS'de şimdiye kadar, 12.000 Gt CO₂ keşfedilmemiş potansiyel depolama kapasitesi ve 400 Gt CO₂ keşfedilmiş depolama kapasitesi olduğu tanımlanmıştır [12]. Rusya, Kuzey Amerika ve Afrika en fazla depolama kapasitesine sahip ülkelerdir ve önemli kapasitenin Avustralya'da da bulunduğu

düşünülmektedir [2]. Küresel olarak, terk edilmiş petrol ve gaz sahalarındaki depolama kapasitesi, muhtemelen toplam kapasitenin %1'inden daha azdır [12]. CO₂'nin mineralizasyonu (bazalt veya diğer benzer oluşumlarda depolama), küresel depolama envanteri için önemli potansiyeller sunmaktadır. Karbon mineralizasyonu, tipik olarak kalsiyum veya magnezyum içeren kayalar gibi reaktif mineraller kullanarak CO₂'yi atmosferden uzaklaştırma yaklaşımıdır. Su içinde çözünen CO₂, reaktif kayaya enjekte edilir ve reaktif kayanın içerisindeki kalsiyum, magnezyum, demir gibi katyonlar su akışı ile birlikte serbest kalır. Serbest kalan katyonlar, zamanla CO₂ ile etkileşime girer ve kayanın gözeneklerinde karbonat minerallerini oluşturur. Bu yöntem, CO₂'nin kayanın gözenekleri içerisinde karbonatlaşması nedeni ile yeraltındaki diğer formasyonlara geçişini önler ve depolamanın kalıcılığını artırır [24].

1.7.4 İzleme

Sürekli İzleme

CO₂ rezervuarının tüm alanları her zaman yakın inceleme altında tutulur. Kuyu, örtü kayası ve bitişik kaya oluşumları, basınç ve CO₂ konsantrasyon seviyelerindeki değişiklikler için izlenir ve bu izleme, bir CO₂ rezervuarının tanımlama, enjeksiyon ve kapanmasına kadar rezervuar ömrünün tüm aşamalarında gerçekleşir [34].

CO₂ Hareketini Öngörmek

CO₂'nin rezervuarda beklenen davranışlarını gösteren simüle edilmiş tahmin modelleri geliştirilmiş ve buradan elde edilen izleme verileri dikkate alınarak, rezervuardaki CO₂ hareketinin seyri takip edilebilmektedir. Bu çalışmalarda özellikle CO₂'nin depolandığı kaya oluşumundan olası göçü, depolama kapasitesindeki değişiklikler ve örtü kayadaki olası faylar araştırılır [34].

İzleme Teknolojileri

İzleme sistemleri, sıcaklık değişikliklerini izlemek için termal sensörler ve yerdeki en küçük hareketi ölçen tiltmetreler (sarkaçlar) gibi sismik izleme araçlarını içermektedir. Rezervuarın yakınındaki ve içindeki basınç ve sıcaklık değişikliklerini kontrol etmek için izleyiciler ve kablolu monitörler yerin binlerce

metre altına gönderilir. Bunun yanı sıra, bitki örtüsünün hiperspektral görüntülenmesi ile bitki sağlığı kontrol edilerek ve özellikle arılar olmak üzere böcek davranışları da izlenerek herhangi bir CO₂ sızıntısının olup olmadığı konusunda incelemeler yapılabilmektedir [34].

İzleme teknolojilerini geliştirmek ve maliyetleri azaltmak için çeşitli finansman kurumları, ajanslar ve endüstriler bu çalışmalar için önemli miktarlarda fonlar sağlamaktadırlar [24].

2017'den bu yana gelişen izleme teknolojileri ve araçları aşağıda verildiği gibidir:

- Fiber optik algılama
- 4D ve gerçek zamanlı sismik izleme
- Pasif/mikro sismik izleme
- Basınca dayalı izleme
- Dağıtılmış akustik algılama (DAS)
- İzleme ve karakterizasyon verilerini gelişmiş hesaplama ile birleştirerek modeller ve simülasyonlar [24].

1.7.5 CO₂ Depolama Maliyetleri

CO₂ depolama maliyetinin farklı bileşenleri mevcuttur. Bunlardan ilki CO₂'nin depolanacağı sahanın özellikleridir. Jeolojik yapılar sahadan sahaya farklılık göstermektedir. Aynı zamanda işçilik, enjeksiyon, sondaj gibi maliyetler de bölgeden bölgeye değişmektedir.

CO₂ depolama maliyetleri üç ana değişkene bağlıdır:

- 1) jeolojik özellikler,
- 2) ölçek (depolanan CO₂ miktarı),
- 3) izleme, finansal ve diğer modelleme varsayımları [35].

Birçok entegre değerlendirme modelleri, CO₂ taşıma ve depolama maliyetini tek bir tahminde birleştirmektedir. Söz konusu tahminler 5 ile 15 \$/t CO₂'nin aralığında değişkenlik göstermektedir [36], [37], [38]. IPCC Beşinci Değerlendirme Raporu'nda (IPCC, 2014), CO₂'nin taşıma ve depolama maliyeti

için ortak bir varsayımın 10 \$/t CO₂ olduğu bilinmektedir. Bu yaklaşımlardan yola çıkılarak CO₂ depolamada ortak kanaatler oluşturulmuştur:

- Karada depolama, açık deniz depolamasından daha ucuzdur.
- Tükenmiş petrol ve gaz sahalarında depolama, derin tuzlu su akiferlerinde depolamadan daha ucuzdur.
- Büyük rezervuarlarda depolama, daha küçük rezervuarlarda depolamaya göre daha ucuzdur.
- Yüksek enjektivite ile depolama, zayıf enjektivite ile depolamaya göre daha ucuzdur.
- Depolama maliyetleri, karada depolama yapılan tükenmiş petrol ve gaz sahalarında 1-7 €/t CO₂, açık denizde depolama yapılan derin tuzlu su akiferlerinde 6-20 €/t CO₂ aralığında değişiklik göstermektedir [32].

1.8 Global KYKD Uygulamaları

Dünya çapındaki KYKD uygulamaları ülkeden ülkeye değişkenlik göstermektedir. KYKD raporlarında özellikle Amerika, Avrupa ve Çin hakkında önemli bilgilere yer verilmektedir.

1.8.1 Avrupa Ülkeleri

2013 yılından bu yana, uluslararası düzeyde ve AB düzeyinde birçok önemli politika geliştirmesi yapılmış ve birçok Avrupa ülkesi 2030 ve 2050 iklim hedeflerine yönelik yeni politikalar ve önlemler belirlemiştir. Çoğu üye devletin iklim politikalarında, endüstrinin karbonsuzlaştırılması ve/veya enerji üretimi için veya bir negatif emisyon teknolojisi (biyoenerji üretimi veya doğrudan havadan yakalama ile birleştirildiğinde) için değerlendirilmekte olan çeşitli seçeneklerden biri olarak KYKD'dan bahsedilmektedir. CO₂'nin jeolojik depolanmasına ilişkin 2009/31/EC sayılı AB Direktifi (AB CCS Direktifi) tüm AB Üye Devletleri, Norveç ve Birleşik Krallık'ta ulusal mevzuata aktarılmıştır. Türkiye, Bosna Hersek, İsviçre ve Ukrayna'da CO₂'nin jeolojik depolanması için yürürlükte olan hiçbir ulusal mevzuat bulunmamaktadır. 2012'den bu yana, KYKD uygulamalarının odak noktası, birçok ülkede fosil yakıtlı enerji santrallerinden CO₂ yakalamadan, endüstriyel tesislerde ve diğer alternatif yayıcılarda/kaynaklarda, örneğin atık yakma tesislerinde veya jeotermal enerji üretiminden CO₂ yakalamaya kaymıştır.

KYKD'nin düşük veya sıfır emisyonlu bir ekonomiye geçişin önemli bir unsuru olarak görüldüğü ülkelerde, uygulanması diğer ülkelerle iş birliği ihtiyacını da gerekli kılmaktadır. Çerçeve programları ve/veya iki veya çok taraflı iş birlikleri kurmak, örneğin Belçika, Hırvatistan, Danimarka, Estonya, Almanya ve İsveç tarafından bir amaç olarak ilan edilmiştir. Bu iş birliği, AB dışındaki ülkeleri de kapsayabilir [40].

KYKD projelerinin Avrupa'da ve dünya çapında uygulanmasıyla ilgili çeşitli uluslararası anlaşmalar ve düzenlemeler bulunmaktadır. 1972 tarihli "Atıkların ve Diğer Maddelerin Boşaltılması Yoluyla Deniz Kirliliğinin Önlenmesine İlişkin Sözleşme" ("Londra Sözleşmesi" veya LC), deniz ortamını insan faaliyetlerinden korumak ve atıklar ve diğer maddelerin denize boşaltılması ile deniz kirliliğini önlemek için yapılan ilk küresel sözleşmelerden biridir ve 1975'ten beri yürürlükte dir. Londra Protokolü (LP) 1996 yılında kabul edilmiş ve bazı kabul edilebilir atıklar dışında tüm dumpingi (denize boşaltmayı) yasaklamıştır. Protokol 2006'da yürürlüğe girmiştir. Londra Protokolü'nün 6. maddesinde, jeolojik depolama için CO₂ akışlarının ihracına izin veren bir değişiklik 2009 yılında kabul edilmiştir. Değişikliğin yürürlüğe girmesi, sözleşme taraflarının üçte ikisinin onayını gerektirmektedir. Bununla birlikte, tüm imzacılardan onay, değişikliğin kabul edilmesinden on yıl sonra dahi elde edilememiştir, dolayısıyla değişiklik hala yürürlükte değildir. CO₂'nin sınır ötesi taşınmasını içeren KYKD projelerinin uygulanmasının önündeki bu engelin üstesinden gelmek için, Ekim 2019'da sözleşme taraflarının LC 41/LP 14 toplantısında bu değişikliğin geçici bir uygulaması kabul edilmiştir, bu nedenle açık deniz depolamasına sınır ötesi CO₂ taşımacılığına ilgili ülkeler arasındaki anlaşmalara veya düzenlemelere dayanarak izin verilebilir duruma gelmiştir. Daha ayrıntılı olarak, CO₂'nin enjeksiyon ve deniz yatağı altında kalıcı olarak depolanması için sınır ötesi taşınmasına izin vermek isteyen ülkelerin, şu anda Londra Protokolü'nün 6. Maddesine göre 2009 değişikliğinin Geçici Uygulamasına ilişkin tek taraflı beyannameyi hem ithalatçı hem de ihracatçı ülke, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) genel sekreterliğine sunması gerekmektedir. Bu prosedür sadece Londra Protokolü tarafları için mümkündür [40].

Haziran 2021 itibariyle, CO2'nin jeolojik depolanmasına dair AB KYKD Direktifi ve diğer ulusal mevzuat ve yönetmeliklere göre incelenen 32 Avrupa ülkesinin on dokuzunda CO2 depolamaya izin verilmiştir. Bazı ülkeler, belirli bölgeleri hariç tutmuş ve ayrıca buna yönelik bazı belirli sınırlamalar da getirmişlerdir. Şekil 1.8'de 2021 itibariyle Avrupa ülkelerinde ulusal mevzuata göre CO2 depolama izin haritası gösterilmiştir.

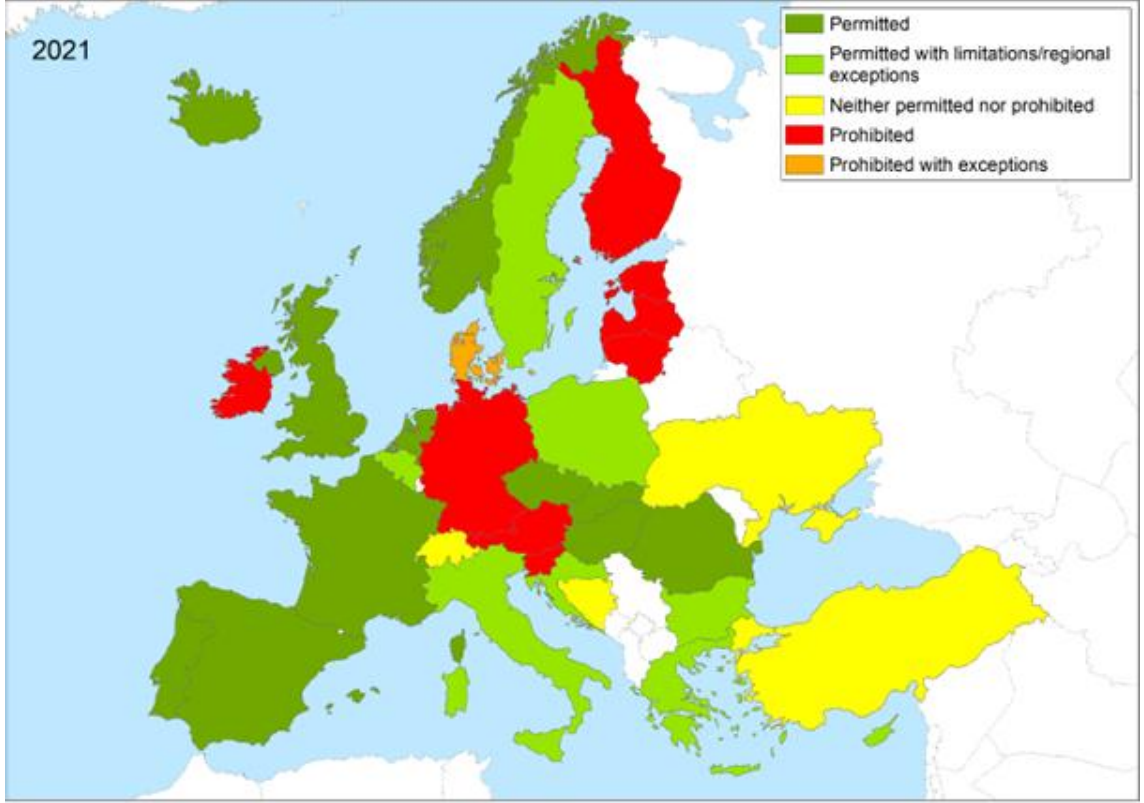
CO2 depolamasına izin veren ülkeler: Birleşik Krallık, İspanya, Portekiz, Norveç, Hollanda, İzlanda, Macaristan, Fransa, Çek Cumhuriyeti ve Romanya.

CO2 depolamasına belirli şartlarda izin veren ülkeler:

- İtalya → sismik/volkanik alanlar hariç,
- Hırvatistan → devlet belirli alanları hariç tutabilir,
- Belçika → Brüksel bölgesi ve Kuzey Denizi bölgesi: jeolojik olarak depolama mümkün değil, Flaman ve Valon bölgeleri: izin veriliyor,
- İsveç → sadece açık deniz,
- Yunanistan ve Kıbrıs → su sütununda veya depolama kompleksi Yunanistan veya Kıbrıs topraklarının ötesine uzanıyorsa CO2 depolanmasına izin verilmez,
- Yunanistan → yukarıdakilere ek olarak, yeraltı akiferlerinde depolama yasaktır,
- Polonya → yalnızca belirli alanlardaki tanıtım projeleri için izin verilir,
- Slovak Cumhuriyeti → keşfe yalnızca belirli alanlarda izin verilir,
- Bulgaristan → her bir CO2 depolama alanı için arama alanının büyüklüğü karada 5.000 km² ve Karadeniz'deki münhasır ekonomik bölgede 20.000 km² kıta sahanlığı ile sınırlıdır.

CO2 depolamasını yasaklayan ülkeler: Almanya, Slovenya, Litvanya, Letonya, İrlanda, Finlandiya, Estonya, Avusturya ve Danimarka (istisna: EOR operasyonlarına denizde izin vermektedir).

CO2 depolaması hakkında herhangi bir kararı olmayan ülkeler: Ukrayna, Türkiye, İsviçre ve Bosna-Hersek [40].



Şekil 1.8 2021 itibariyle Avrupa ülkelerinde ulusal mevzuata göre CO2 depolama izin haritası [40]

1.8.2 Amerika

ABD'de son birkaç yıl içinde birçok eyalet KYKD için düzenleyici mevzuat geliştirmiştir. Bunlar, CO2'nin yakalanmasını, taşınmasını, enjeksiyonunu ve depolanmasını içermektedir [41].

ABD Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA), Yeraltı Enjeksiyon Kontrolü (UIC) programı, yakalanan emisyonların yeraltında depolanmasını düzenlemektedir. Hem sondaj yapmak hem de yerin altındaki gazları fiilen enjekte etmek için Sınıf VI izinlerini gerekli kılmaktadır. Sınıf VI kuyuları, derin kaya oluşumlarına CO2 enjekte etmek için kullanılan kuyulardır. ABD'de KYKD için federal bir düzenleme yoktur. En az 21 eyalet, KYKD'ye özel yönetmelikler yayınlamıştır. Hükümet, İç Gelir Kanunu'nun 45Q Bölümü'nde belirtilen CO2'nin tutulması için belirlenen vergi kredisi ile karbon yakalama ve ayırmaya yönelik yatırımları teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Çeşitli yatırımlar, vergiler ve fonlar sayesinde ABD'de de KYKD teknolojisi için yapılan proje planları, 2021'in ilk dokuz ayında %50 artmış ve toplam planlanan kapasite yılda 122 Mt CO2'ye ulaşmıştır [42].

Tablo 1.1 ABD – KYKD için 45Q kredisi [43]

	Kt CO2/yıl cinsinden tesis boyutu		İlgili vergi kredisi seviyesi (\$/t CO2)							
	Enerji Santralleri	Endüstriyel Tesisler	DAC	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Jeolojik depolama	Min.500	100	100	34	36	39	42	45	47	50
CO2-EOR	Min.500	100	100	22	24	26	28	31	33	35
Gerçek emisyon azaltımlarına bağlı kullanım	25 - 500	25	25	22	24	26	28	31	33	35

Kaliforniya’da 2006 yılında yürürlüğe giren Düşük Karbonlu Yakıt Standardı (LCFS), eyaletteki tüm ulaşım yakıtlarının yaşam döngüsü kapsamında emisyon yoğunluğunun azaltılması amacı taşıyan krediye dayalı bir emisyon azaltma sistemi geliştirilmiştir. Söz konusu standart, 2018 yılının Eylül ayında KYKD ile etkinleştirilmiş ve 2019 yılının başlarında yürürlüğe girmiştir [44]. LCFS Standardı, Dünya’nın herhangi bir yerindeki Doğrudan Havadan Yakalama (DAC) projelerinin LCFS kredilerinden faydalanmasını sağlamaktadır [45].

KYKD proje sahiplerinin, LCFS kapsamında kredi talep edebilmeleri için Kalıcılık Sertifikası almaları gerekmektedir. Sertifika almak için gerekli asgari saha seçim kriterlerinin karşılanması, projenin yaşam döngüsü boyunca sahaya özel plan hazırlanması, sürdürülmesi ve bunlara uyulması ve düzenli raporların sunulmasını zorunlu kılmaktadır. Operatörlerin, enjeksiyondan sonra en az 100 yıl boyunca sahayı izlemeleri istenmektedir [43]. 2021 Ekim ayı verilerine göre LCFS kredisi ortalama 182 \$/t CO2’dir [45].

1.8.3 Çin

Çin’de KYKD’ye özgü herhangi bir mevzuat bulunmamaktadır. Çin’in karbon nötr hedefi, Çin Hükümeti tarafından KYKD’nin rolünün anlaşılması ve politika oluşturulması için bir temel oluşturmaktadır. Çin’in 14. beş yıllık planlamasında büyük ölçekli KYKD projelerinden bahsedilmiştir [46]. Pilot ve büyük ölçekli KYKD tesisleri için devlet teşvikleri mevcuttur. 2030’a kadar, KYKD teknolojisi ile yılda 2

Mt CO₂ kapasitesine ulaşmak amacı ile uzun mesafeli kara boru hatlarının hazır olması hedeflenmektedir. Ayrıca, CO₂ yakalama ile enerji tüketim ve maliyetlerinin 2030'da %10-15 ve 2040'ta ise %40-50 oranında azaltılması hedeflenmektedir. Çin'in, karada 325 Gt CO₂, denizde 100 Gt CO₂ depolama kapasitesine sahip olduğu tahmin edilmektedir [47]. Çin'de hali hazırda gıda ve endüstri için KYKD projeleri devam etmektedir. Çalışmaların çoğunluğunda CO₂-EOR kullanımı amaçlanmaktadır.



2 ÇİMENTO SEKTÖRÜ

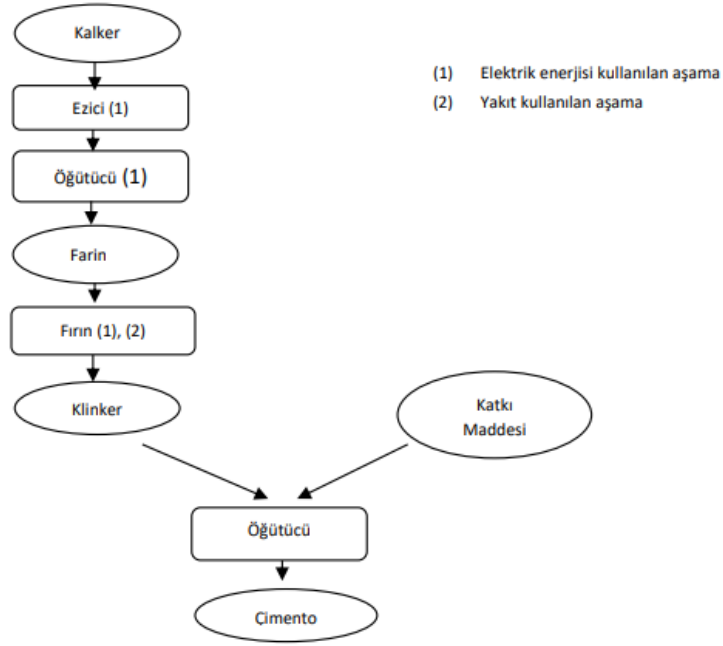
Çimento, özellikle inşaatlarda kullanılan betonun en temel hammaddesini oluşturmaktadır. Beton; güçlü, yangına dayanıklı, az bakım gerektirmesi ve her boyutta şekillendirilebilir olması sebebi ile yüzyıllardır çok yönlü yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Su, agrega ve çimento, betonun ana bileşenini oluşturur. Bu üç bileşenden bağlayıcı olan malzeme çimentodur.

Çimento genel olarak portland klinkeri, alçıtaşı, çimento esaslı ek maddeler ve dolgu maddelerinden oluşur. Çimento esaslı ek maddeler ve dolgu maddeleri olarak uçucu kül, cüruf ve kireçtaşı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Temel olarak çimento üretimi 4 safhadan oluşmaktadır [48]:

- 1. Hammaddenin Hazırlanması:** Hammaddeler kırılır ve öğütülür.
- 2. Farin Değirmenlerinde Hammaddelerin Karıştırılması:** Hammaddeler (kalker, kil, demir cevheri, cüruf vb.) belirli oranlarda karıştırılarak farin adı verilen mamül oluşturulur.
- 3. Döner Fırınlarda Farin Pişirme:** Farinin yaklaşık 1400-1500 °C sıcaklıklarda pişirilmesi ile klinker elde edilir.
- 4. Klinkerin Öğütülmesi:** Klinker, üretilecek çimento türüne göre farklı katkı malzemeleri ile birlikte değirmenlerde öğütülür ve çimento elde edilir.

Çimento üretiminde 1, 2 ve 4. safhalarda elektrik tüketimi gerçekleşir (Şekil 2.1). 3. safha olan klinker üretiminde ise kömür, fuel-oil, doğal gaz gibi yakıtlar kullanılır ve bu safha toplam enerji tüketiminin %70-80'ini oluşturur [49].



Şekil 2.1 Çimento üretiminde enerji ve yakıt kullanımı [48]

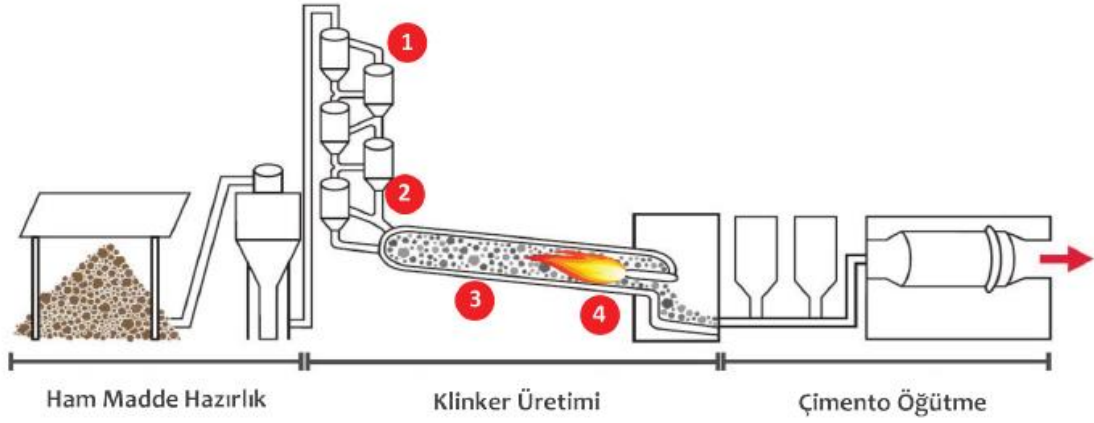
Çimento üretimi “enerji yoğun” olarak tanımlanan bir prosestir. Bir ton çimento üretiminde ortalama 3–3,5 GJ ısı enerjisi ve 100 kWh elektrik enerjisi gerekir [50].

2.1 Ham Maddeler

Ocaklardan elde edilen ham maddeler kırıcılardan geçirilerek tane boyları küçültülür. Hammadde karışımı farin, kalsine işlemi için öğütülür. Öğütme, dikey değirmenler ile veya yatay bilyalı değirmenler ile gerçekleştirilebilir. Belirli oranlarda farklı hammaddelerin karışımından oluşan farinin ana bileşenlerini kireç ve silis oluşturur. Bunları alüminyum ve demir oksit takip eder. Magnezyum ve alkali oksitler gibi diğer maddeler de daha az miktarlar da bulunur. Kireç, kalker veya marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayalar tarafından ortama girer. Kil, silisin başlıca kaynağıdır. Aynı zamanda kil, alüminyum ve demir oksit de içermektedir ve bunlar da kilden elde edilmekte veya ek olarak farklı kaynaklardan temin edilebilmektedirler [51].

2.2 Klinker Üretimi

Çimento üretiminde en mühim aşama farin pişirme aşamasıdır. Döner fırınların ve kuleler bu aşamada kullanılmaktadır. Şekil 2.2’deki numara sırası takip edilerek proses aşağıdaki gibi özetlenebilir:



Şekil 2.2 Çimento üretim prosesi [51]

1. Enerji tasarrufu sağlayabilmek için, farin fırına girmeden, ön ısıtma işlemi gerçekleştirilir. Yükseklikleri 60 metreden fazla olan ön ısıtma kulelerinde seri halde bulunan siklonlarda, fırından gelen sıcak egzoz gazları ile farin tanecikleri ısıtarak kısmen kalsine edilir [51].

2. Bazı çimento tesislerinde ön ısıtıcıda kulenin alt tarafında ve döner fırının hemen öncesinde bir ön kalsinasyon bölümü bulunur. Son siklon aşamasında, buraya sıcak hava ve yakıt ile birlikte giren farin tanelerinde kalsinasyon %95'e varan ölçüde tamamlanabilir. Kalsinasyon işlemi, oksit bileşenleri elde etmek amacı ile sıcaklığın etkisiyle karbonat ve hidratların parçalanmasına dayanır [51].

3. Döner fırınlar, Dünya'da endüstri tesislerine ait olan en büyük proses elemanı olarak kabul edilir. Genel olarak çapları 3-7 m, uzunlukları 50-75 m kadar olup 50 mm kalınlıkta çelik saçlardan yapılmış, refrakter tuğla ile kaplanmış borulardır. Yaklaşık %3-4 eğim ile monte edilen fırınlar, dakikada 1,5-4 devir yaparak döner. Ön ısıtıcıdan gelen malzeme, fırına yukarı uçtan girer ve fırın ile birlikte dönerek, daha sıcak olan ve altta bulunan aleve doğru kayarak ilerler [51].

4. Döner fırının alt ucunda petrokok, linyit, taş kömürü, doğal gaz, fuel oil gibi yakıtlar kullanılarak elde edilen alevlerin çıktığı boru bulunur. Borudan çıkan kor halindeki alevin sıcaklığı yaklaşık 1870°C'ye ulaşır. Bu bölgede, sıcaklığı yaklaşık 1480°C'ye ulaşan kalsine malzeme, kısmen ergir ve sıvılaşmaya başlar. İnce taneler birbirine yapışarak daha iri boylardaki klinker tanelerini oluştururlar. Fırının alt ucundan çıkan klinker, soğutma işlemine tabi tutulur [51].

Döner fırın içerisinde, çimento hammaddelerinin bileşenlerini oluşturan kireç, alüminyum ve silis sıcaklık arttıkça serbestleşir, daha sonra birleşerek yeni bileşikler meydana getirirler. Ön ısıtmada ve fırında en üst bölümde bulunan malzemenin içindeki serbest olan ve kristal haldeki sular buharlaşır, kilin ayrışması ile CO₂ kalkerden ayrılmaya başlar. Aşağıda bölümlerde ise daha sıcak bölgelerde kalsinasyon işlemi tamamlanır, serbest kalan kalsiyum oksit, kilden ayrılan silis dioksit ve alüminyum oksit ile birleşerek kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminatları meydana getirir [51].

Klinker üretiminde kuru, yaş veya yarı kuru olarak farklı prosesler kullanılmaktadır. Yaş proseslerin elektrik enerjisi tüketimleri nispeten daha düşüktür (> 100 kWh/ton) fakat termal enerji ihtiyaçları daha fazladır. Klinker üretimindeki farklı proses tiplerinin termal enerji gereksinimleri Tablo 2.1’de verilmiştir [52].

Tablo 2.1 Farklı tip fırınlarda ısı tüketimi [52]

Proses	Termal enerji talebi (MJ/ton klinker)
Kuru p. çok kademeli siklonlu ön ısıtıcılar ve ön kalsinasyon fırınları	3000 – 4000
Kuru p. siklon ön ısıtıcılı döner fırınlar için	3100 – 4200
Yarı kuru/ yarı yaş p. (Lepol fırın) için	3300 – 4500
Kuru p. uzun fırınları için	5000’e kadar
Yaş p. uzun fırınları için	5000 – 6400
Şaft fırınlar için ve özel çimentoların üretimi için	3100 – 6500 >

2.3 Klinkerden Çimento Üretimi

Klinker, döner fırın içinden yaklaşık 1300°C sıcaklık ile çıkar. Üretimin devam edebilmesi için klinkerin soğutulması gerekir. Klinker soğutulmasında genel olarak uygulanan yöntem, ızgara plakalar üstünde yavaş bir hızla ilerleyen klinker tanelerine basınçlı hava verilmesidir. Klinkerin bileşimine zarar verilmemesi için soğutma hızı kontrollü yapılmaktadır. Klinker soğutulurken ortamda oluşan ısı enerjisi geri kazanılır ve kazanılan enerji, klinker üretimi için gerekli olan enerjinin

yaklaşık üçte biri civarındadır. Klinker soğutucusundan gelen sıcak hava tekrar fırının ısıtılmasında ve ön kalsinasyonda kullanılır. Atık ısı, ham maddelerin kurutulması, sıcak su temini ve bina ısıtması gibi faydalar için kullanılabilir. Çimento üretiminde kullanılan yeni nesil döner fırın sistemleri fırın girişi öncesinde kademeli ön ısıtıcılardan ve prekalsinatörden, fırın çıkışında da soğutucudan oluşmaktadır. Fırın ön ısıtmadan ve klinker soğutmadan baca yoluyla dışarıya atılan ısı gerçekte çok yararlı bir termal enerjidir ve elektriğe dönüştürülebilme özelliğine sahiptir. Söz konusu bu dönüşümü sağlayan ve atılan sıcak gazların elektrik üretiminde kullanılmasına imkân tanıyan sistemler atık ısı geri kazanımı tesisleri olarak tanımlanmaktadır. Bir çimento fabrikasının toplam elektrik ihtiyacının yaklaşık %25'ine kadarını karşılayabilen atık ısı geri kazanım tesisleri sayesinde enerji üretiminde fosil yakıt kullanılmadığı için sera gazı emisyonları da azaltılabilmektedir. Böylece, hem atık ısıdan elektrik üretilip ekonomik fayda temin edilebilmekte hem de çevre yönünden olumlu bir uygulama hayata geçirilebilmektedir.

Soğutucudan çıkan klinker ara-ürün olarak tanımlanır. Çimento, genel olarak klinkerin bir miktar kalsiyum sülfat ile öğütülmesi sonucunda oluşur. Öğütme esnasında ya da ayrı bir şekilde ilave edilen mineral katkıları ile de katkı çimento cinsleri üretilmektedir. Klinker doğrudan fabrikada öğütülebilir veya başka yerlerdeki öğütme tesislerine gönderilir. Klinker taneleri yaklaşık 2 cm çapındadır ve bu tanelerin çimento tanesi inceliğine kadar öğütülmesi gerekir. Çimento taneleri genel olarak ortalama 15-20 mikron (0,0015-0,0020 cm) boyutundadır. Klinkerin uygun boyutlarda öğütülmesi işlemi dik valsli ya da bilyalı değirmenler ile yapılır. Yaklaşık 3 metre çapında çelik silindir şeklindeki bilyalı değirmenlerde çelik bilyalarla doldurulmuş bölmeler bulunur. Silindir dönmesi ile klinker taneleri bu bilyalara çarparak ufalanır. Değirmenin son bölümünde amaçlanan boyutlar elde edilmiş olur. Değirmene gelen klinker direkt olarak soğutucudan gelmiş ise öğütme sırasında değirmen içine basınçlı su verilir ve sıcaklığın artması önlenir. Özellikle son yıllarda yapılan değirmen yatırımlarında, enerji verimliliği açısından yüksek avantajlı olan Horomill, Roller Pres ve Dik Değirmen teknolojileri tercih edilmektedir [51].

2.4 Katkılı Çimentolar

Klinkere, öğütme esnasında ağırlıkça %3-5 arası kalsiyum sülfat (alçı) katılır. Bu, çimento ile su karıştırıldığında hem kimyasal reaksiyonların hem de katılaşma sürecinin kontrolü için zorunludur. Öğütmeyi kolaylaştırıcı ve performans arttırıcı bazı kimyasallar malzemeler de bu aşamada klinkere katılır. Elde edilen çimento Portland çimentosudur. Portland çimentosuna klinker ile kalsiyum sülfatın öğütülmesi sırasında veya ayrıca öğütülmüş olarak bazı mineral katkıların katılması ile farklı türlerde çimentolar üretilir. Katkılı çimento olarak adlandırılan bu çimentoların, ana bileşenlerini yüksek fırın cürufu, kireç taşı, uçucu kül, puzolan gibi mineral bileşenler oluşturur ve CEM I çimentosuna kıyasla düşük karbonlu olmaları sebebi ile öne çıkan çimentolardır (Şekil 2.3). Katkılı çimentolar, CEM I Portland çimentosuna oranla daha az klinker içerdikleri ve beton performansını olumlu etkiledikleri için tercih edilirler. Düşük karbonlu katkılı çimentolar, yoğun çevre etkilerine karşı betonarme yapının hizmet ömrü boyunca dayanıklı kalmasını sağlamaktadır. Katkılı çimentolar düşük karbonlu üretim için son derece faydalıdır. Yüksek karbon ayak izine sahip klinker oranının %1 oranında azaltılması karbon emisyonunun da %1 oranında azaltılması anlamına gelmektedir. Ayrıca; uçucu kül ve cüruf gibi atık malzemelerin ekonomiye kazandırılmasına ve doğal kaynak tüketiminin azaltılmasına katkı sağlamaktadır [51].



Şekil 2.3 Katkılı çimentolarda kullanılan malzemeler [51]

2.5 Yakıt Kullanımı

Çimento sektöründe enerji tüketimi yoğundur. Çimento sektöründe enerji tüketimi, üretimdeki maliyetlerin yaklaşık %40-60'ını oluşturmaktadır. Kömür, en çok kullanılan fosil yakıttır. Doğal gaz, petrokok, fuel oil ve linyit gibi çeşitli türlerdeki katı, sıvı veya gaz halindeki fosil yakıtlar da enerji için kullanılmaktadır. Bu yakıtlara ek olarak, büyük miktarlarda yakıt katkı maddesi olarak atıklar veya biyokütle de kullanılmaktadır. Çeşitli yakıt ve alternatif yakıtlara ait ısı değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 Türk çimento sektöründe kullanılan yakıt türleri ve ısı değerleri [53]

Yakıt Türleri	Ortalama Isıl Değer (kcal/kg)
Linyit	6000 - 6500
Fuel oil	9200 - 9800
Doğal gaz	8000 - 9000
Petrokok	7500
Alternatif Yakıtlar	Ortalama Isıl Değer (kcal/kg)
Ömrünü tamamlamış lastik	5500
Endüstriyel plastik	5000
Atık yağlar	9000
Solventler	7500
Parçalanmış kağıt	3400
Yağlı kontamine atıklar	3500
Bitki kabukları	4760
Atıktan üretilen yakıt (RDF)	2800
Arıtma çamuru	3000
Kontamine atıklar (ambalaj-giysi)	3000

2.6 Çimento Üretiminden Kaynaklanan Gaz Emisyonları

2.6.1 CO2 Emisyonları

Portland çimentosu üretiminde açığa çıkan CO₂ miktarının güçlü bir çevresel etkisi vardır. Bir ton klinker üretilmesi için yaklaşık 0,83 ton; bir ton çimento üretilmesi için ise yaklaşık 0,54 ton CO₂ salınmaktadır [54]. Çimento endüstrisi küresel antropojenik CO₂ emisyonlarının %8'inden [55] ve Dünya çapında endüstriyel kaynaklardan oluşan küresel antropojenik CO₂ emisyonlarının %27'sinden sorumludur [56]. Bu sebeple çimento endüstrisi küresel CO₂

emisyollarının azaltılması için kilit bir sekt6rd6r [57]. Çimento 6retiminden kaynaklanan CO2 emisyonlarının iki ana kaynağı bulunmaktadır [58].

- 1400  C'nin 6zerinde kireçtaşının ayrışması (imento 6retimi toplam CO2 emisyonlarının yaklaşık %60 ila 65'ini oluşturmaktadır),
- Çimento fırını ve kalsinasyon 6nitesini ısıtmak amacı ile fosil yakıt kullanımı (imento 6retimi toplam CO2 emisyonlarının geri kalan %35 ila %40'ını oluşturmaktadır)

Çimento 6retiminden kaynaklanan CO2 emisyonlarının miktarı, 6retim teknolojisine, yakıt t6r6ne ve klinker-imento oranına g6re değişiklik g6sterebilir.

2.6.2 NOx Emisyonları

Çimento fabrikalarından kaynaklanan azot oksitler (NOx), hava kirliliği açısından 6nemlidir. Azot oksit t6rlerinden NO ve NO2, imento fırınları çıkış gazlarında en fazla bulunan azot oksitlerdir (NO >%90). NOx oluşumu aşağıdaki işlemlerden kaynaklanır:

- Isıl NOx: yanma havasındaki azotun oksijenle reaksiyonu

-Yakıt NOx: kimyasal olarak yakıtta bulunan azotun havadaki oksijenle reaksiyonu

Hava/yakıt oranının ayarlanması ile NOx oluşumu azalabilmektedir. Fakat s6z konusu bu hava, atmosferde bulunan ve %21 oksijen ihtiva eden hava olmayıp, inert bir gaz ile seyreltilmiş ve içindeki oksijen y6zdesi d6ř6r6lm6ř bir havadır. S6z konusu hava, normal hava içerisine %15-20 oranında baca gazının enjekte edilmesiyle elde edilir. Elde edilen gaz karışımının içindeki oksijen y6zdesi d6ř6kt6r. Bu sayede oksijen y6zdesi d6ř6k olan gaz, yakıt ile birlikte yakıldığında ortam sıcaklığı y6kselmez ve dolayısıyla CO yerine CO2 meydana gelir ve yanma işlemi tam olur. Yanma işleminin tam olması ile ortamda oksijen kalmaz ve bu sayede NO gazı ve dolayısıyla NO2 oluşmaz [59].

NOx emisyonlarını azaltmak için Mevcut En İyi Teknikler (MET) Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3 NO_x emisyonlarını azaltmak için MET [60]

	Teknik	Uygulanabilirlik
A	Öncelikli teknikler	
	I. Ateş soğutma	Her tip fırın için uygundur.
	II. Düşük NO _x Brülörleri	Her tip döner fırında, ön kalsinatörde ve ana brülörde uygulanabilir.
	III. Orta fırın ateşleme	Genelde uzun tip döner fırınlar için uygulanabilir
	IV. Hammaddenin yanmasının artması için mineralleştirici ekleme	Her tip fırında ürün kalitesine dikkat edilerek uygulanabilir.
	V. İşlem optimizasyonu	Genelde her tip fırına uygulanabilir.
B	Aşamalı tutuşma (atık yakıtlar ya da konvansiyonel), + önden kalsinasyon ve optimize yakıt karışımı kullanımı ile birleştirilmiş	Genelde yalnızca ön kalsinasyon içeren fırın tiplerinde uygulanabilir. Diğer tip fırınlarda modifikasyon gerekir, bu tipler için ham yakıt yakılarak NO _x azaltılabilir.
C	Seçici Katalitik Olmayan Konvertör (SNCR)	Çimento fırınlarında uygulanabilir. Fırınların proses tipine göre enjeksiyon noktası değişir.
D	Seçici Katalitik Konvertör (SCR)	Uygun katalizöre ve çimento üretiminde proseslerin gelişmesine bağlıdır.

Seçici Katalitik Olmayan Konvertör (SNCR) kullanılması durumunda, etkili NO_x azaltımı için, amonyak çöküşü de düşük tutulmalıdır ve Tablo 2.4’de verilen teknikler uygulanmalıdır. SNCR döner tip çimento fırınlarında için uygulanabilir.

Tablo 2.4 SNCR kullanılması durumunda MET [60]

	Teknik
A	Stabil işletme prosesiyle uygun bir şekilde yeterli NO _x azaltımının sağlanması
B	NO _x azaltım verimini arttırmak ve amonyak ilavesini azaltmak için amonyak dağılımının iyi olması
C	Bacı gazından çıkan amonyak emisyonlarını min.da tutabilmek için NO _x azaltımı ile NH ₃ ilavesinin bağlantısına dikkat edilmesi

NO_x emisyonları için MET’e dayalı emisyon sınır değerleri (MET-ESD) Tablo 2.5’te ve SNCR uygulandığında baca gazındaki NH₃ emisyon seviyeleri Tablo 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.5 NO_x için MET-ESD’ler [60]

Fırın Tipi	Birim	MET-ESD
Önden Isıtma	mg/Nm ³	<200 – 450
Uzun döner ve lepol	mg/Nm ³	<400- 800

Tablo 2.6 SNCR uygulanması halinde baca gazı NH₃ emisyonları [60]

Parametre	Birim	MET-ESD (günlük ort. değer)
NH ₃ indirgenmesi	mg/Nm ³	< 30 – 50

2.6.3 SO_x Emisyonları

Çimento üretiminden kaynaklanan SO₂ emisyonları, kullanılan yakıt ve ham madde içerisinde bulunan kükürt miktarına bağlıdır. Sülfür içeriği az olan ham maddelerin kullanıldığı fırınlarda, baca gazından çıkan SO₂ emisyon miktarı 10 mg/m³ 'den düşüktür. Ham madde ve yakıtta bulunan kükürt, oksijenle reaksiyona girerek SO₂ ve SO₃ emisyonlarını oluşturur. Ham maddelerin pirit veya organik sülfür içermesi, SO₂ emisyonlarının yüksek olmasına sebep olabilir. Çimento üretiminde SO₃ emisyonları ve redüksiyon koşulları altında H₂S de oluşur fakat serbest kalan ana sülfür bileşiği SO₂'dir (%99). Ham maddenin içindeki sülfürün buharlaşması ile SO₂ emisyonlarının %30'u veya daha fazlası ön ısıtma sürecinde salınabilir. Buradan çıkan gazlar doğrudan atmosfere verilir veya ham madde değirmenine geri beslenir. SO₂'in %20-70'i, ham madde değirmeninde tutulur. Bu sebeple ham madde değirmeni tarafından SO₂ emisyonları düşürülür. Ön ısıtma fırınları için kullanılan yakıtın içerisindeki sülfür, sinterleme, kireçleme bölümü ve ön ısıtıcıdaki alkali ortamdan dolayı önemli ölçüde SO₂ emisyonlarına yol açmaz ve sülfür klinker içerisinde tutulur. Oksijen fazlalığı, (%1-3 oranında oksijen fırında yeterli ürün kalitesi temini için bırakılır) salınan her sülfid bileşiğini SO₂'e oksitler [59]. SO_x emisyonlarını azaltmak için Mevcut En İyi Teknikler (MET) Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 2.7 SO_x emisyonlarını azaltmak için MET [60]

	Teknik	Uygulanabilirlik
A	Absorban Eklenmesi	Absorban eklenmesi genelde ön ısıtıcılarda kullanılır fakat tüm çimento fırın tiplerinde uygulanabilir.
B	Yaş Yıkama	Tüm fırın tiplerinde, SO ₂ seviyesi alçı üretimi için yeterli ise uygulanabilir.

Fırın SO_x emisyonları azaltımında değirmen işlemlerinin optimize edilmesi için aşağıdaki parametreler kontrol edilebilir:

- Ham maddenin nem değeri
- Değirmenin sıcaklığı
- Değirmenin içinde kalış süresi
- Öğütülen madde boyutu

Bu teknik, eğer değirmen + kuru öğütme prosesi fırın birlikte çalıştırılmakta ise uygulanabilmektedir [60].

SO_x emisyonları için MET'e dayalı emisyon sınır değerleri (MET-ESD) Tablo 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2.8 SO_x'e Yönelik MET-ESD'ler [60]

Parametre	Birim	MET-ESD (günlük ort. değer)
SO ₂ olarak ifade edilen SO _x	mg/Nm ³	< 50 – 400

2.6.4 Karbon monoksit (CO) Emisyonları

Ham madde içerisindeki organik karbondan kaynaklanan CO, ham maddenin ön ısıtılması sırasında okside olarak CO₂' ye dönüşür. Klinker pişirme işleminde de CO oluşabilir. CO varlığı yanma koşulunun bir ölçütüdür. Yanma sırasında ortamda yeterli miktarda O₂ bulunması halinde CO, CO₂'ye dönüşür [61].

Elektrostatik çökticiler (ESP) veya hibrid filtre kullanılmasıyla CO yükselme frekanslarının en aza indirilmesi ve toplam yükselmenin yıllık 30 dakikadan az olması için Tablo 2.9'daki teknikler birlikte uygulanmalıdır.

Tablo 2.9 CO yükselmelerinin düşürülmesi için MET [60]

	Teknik
A	CO yükselişleri kontrol edilerek ESP'nin devre dışı kalması azaltılır
B	Hassas ölçüm cihazları ile CO ölçümleri yapılması

2.6.5 Uçucu Organik Bileşikler (VOC) ve Toplam Organik Karbon Emisyonları (TOC)

Uçucu organik bileşik (VOC) emisyonları, hammadde ısındıkça üretimin ilk safhalarında oluşabilir. Ham madde içindeki uçucu organik maddeler, 400 ila 600°C aralığındaki sıcaklıklarda salınır. Çimento fırınlarından baca gazlarının VOC muhtevası tipik olarak 10 ila 100 mg/Nm³ arasındadır, nadiren de olsa ham maddenin özelliklerinden dolayı VOC emisyonları 500 mg/Nm³'e kadar çıkabilir [59].

Fırın baca gazında Toplam Organik Karbon (TOC) emisyonlarının düşük seviyede tutulması için, fırın beslemesinde VOC miktarı yüksek ham maddeden kaçınılmalıdır [60].

2.6.6 Hidrojen klorür (HCl) ve hidrojen florür (HF) emisyonları

HCl emisyonları azaltımında kullanılması önerilen teknikler Tablo 2.10'da verilmiştir.

Tablo 2.10 HCl emisyonlarına yönelik MET [60]

	Teknik
A	Ham madde veya yakıtın düşük klorin içermesi
B	Alternatif ham madde veya yakıt olarak kullanılacak atıkta klorin içeriğinin sınırlandırılması

HCl emisyonlarının MET-ESD <10 mg/Nm³'tür (günlük ort.) [60].

HF emisyonlarının azaltılması için kullanılması önerilen teknikler Tablo 2.11'de verilmiştir. HF emisyonlarının MET-ESD <1 mg/Nm³'tür (günlük ort.) [60].

Tablo 2.11 HF emisyonlarına yönelik MET [60]

	Teknik
A	Ham madde veya yakıtın düşük florin içermesi
B	Alternatif ham madde veya yakıt olarak kullanılacak atıkta florin içeriğinin sınırlandırılması

2.6.7 Poliklorlu dibenzodioksin (PCDD) ve Dibenzofuran (PCDF)

Ham madde içerisinde bulunan klor, üretim aşamasında poliklorlu dibenzodioksin (PCDD) ve poliklorlu dibenzofurans (PCDF) gazlarını oluşturabilir. PCDD'ler ve PCDF'ler, ham madde içerisinde yeterli miktarda klor ve hidrokarbon var ise ön ısıtma sürecinde ve sonrasında veya baca gazı soğutma aşamasında oluşabilir. Baca gazının soğutulması esnasında dioksin ve furanların yeniden oluşması sebebi ile gazların fırın sisteminden çıkarken 450°C ile 200°C aralığında hızlıca soğutulması gerekir [59].

PCDD/F emisyonlarını azaltmak için önerilen teknikler Tablo 2.12'de verilmiştir.

Tablo 2.12 PCDD/F emisyonlarına yönelik MET [60]

	Teknik	Uygulanabilirlik
A	Ham madde seçimi	Genelde uygulanabilir
B	Yakıt seçimi	Genelde uygulanabilir
C	Kullanılan atıkların klorlu org. madde içeriğinin sınırlandırılması	Genelde uygulanabilir
D	İkincil yakma işleminde halojen içeriği yüksek olan yakıt beslemesini önlemek	Genelde uygulanabilir

2.6.8 Metal Emisyonları

Metal bileşikleri; ham madde, fosil yakıt veya alternatif yakıtlardan kaynaklanabilir. Uçucu olmayan metal bileşikleri türleri olan Fe, Mg Cu, Cr, Ni, Ba, Be, Al, Ti, As, V, Ca, Ag ateşe karşı dayanıklı olmaları sebebi ile klinkere bağlanarak fırını terk ederler. Yarı uçucu metal bileşikleri olan Pb, S, Sb, Cd, Zn, K, Na ise fırın gazında 700-900 °C sıcaklıklarda klinker bünyesine geçerler. Civa ve talyum bileşikleri, ön ısıtıcı içinde farin bünyesinde tutulurlar. Flor, kalsiyuma bağlanarak klinker bünyesinde fırını terk eder [61].

Yanma gazlarındaki metal emisyonlarını azaltmak için önerilen teknikler Tablo 2.13'de, metal emisyonları için MET-ESD'ler Tablo 2.14'de verilmiştir.

Tablo 2.13 Metal emisyonlarına yönelik MET [60]

	Teknik
A	Başta cıva olmak üzere düşük metal içeren malzeme seçimi
B	Kullanılan atık malzeme özelliği için kalite güvencesi sistemi kullanımı
C	Etkili toz uzaklaştırma

Tablo 2.14 Metal emisyonlarına yönelik MET-ESD'ler [60]

Metal emisyonları	Birim	MET-ESD (min. yarım saat süresince)
Hg	mg/Nm ³	<0,05
Σ (Tl, Cd,)	mg/Nm ³	<0,05
Σ (Cu, Mn, as, Sb,Co, Ni, V, Cr, Pb)	mg/Nm ³	<0,05

2.7 Çimento Üretiminden Kaynaklanan Toz Emisyonları

Çimento üretiminde fırın bacalarından salınan toz emisyonları, partikül madde açısından önemli kirleticilerdendir. Üretim aşamasındaki önemli toz emisyonları oluşturan kanyaklar, fırınlar, ham madde değirmenleri, klinker soğutucuları ve çimento değirmenleridir. Üretim esnasında oluşan toz emisyonları ham madde ve kömürden kaynaklıdır. Kömürden kaynaklanan toz emisyonları, organik ve inorganik maddeler barındırır. İnorganik maddelerin çoğunluğu cüruf halindedir. Çimento üretiminden kaynaklanan diğer toz emisyonları, klinker, çimento ve atıkların ambalajlanması, taşınması ve depolanması sırasında oluşur [59].

2.7.1 Yayılı Toz Emisyonları

Tozlu proseslerde toz emisyonlarının yayılmasını indirmek veya bunları engellemek için kullanılması önerilen teknikler Tablo 2.15'te verilmiştir.

Tablo 2.15 Yayılı toz emisyonlarına yönelik MET [60]

	Teknik	Uygulanabilirlik
a	Yerleşim için basit ve doğrusal plan	Yalnız yeni tesisler için
b	Toza sebep olan işlemlerin korumalı ve kapalı ortamda yapılması	Genelde uygulanabilir
c	Toz emisyonlarının sebebi tozlu ham maddeler ise elevator ve konveyör gibi sistemler kapalı inşa edilmeli	
d	Kaçak hava ve dökülen malzemelerin azaltılması	
e	Cihaz ve kontrol sistemlerinin otomatikleştirilmesi	
f	Arıza ve sorun olmayan faaliyet sağlanması	
g	Sabit ve hareketli vakum tesisatlarının bakımı	
h	Toz tutma ve havalandırma işlemleri için torbalı filtre kullanılması	
ı	Donanımlı ve otomatik sistemli kapalı stoklama	
j	Yükleme ve sevk için tozları emebilen dolun boruları kullanımı	

Depolama yahut döküm alanlarından yayılan toz emisyonlarını azaltmak için önerilen teknikler Tablo 2.16’da verilmiştir.

Tablo 2.16 Döküm/depolama alanlarındaki toz emisyonlarına yönelik MET [60]

	Teknik
a	Stok ve depolama alanlarının çeşitli yöntemler ile kapatılması
b	Açıkta kalan bölümler için rüzgar korumaları
c	Tozu bastırabilmek için kimyasal ve su spreyleri kullanımı
d	Temizliğin ve yol kaplamasının sağlanması
e	Yığın stokların nemlendirilmesi

2.7.2 Baca Toz Emisyonları

Ham maddelerin kırılması, depolama, sevkiyat gibi baca toz emisyonlarını azaltmak için, filtreler kullanılmaktadır. Bu ünitelerin belirli zamanlarda gerekli bakımlarının yapılması ihmal edilmemelidir. Tozlu işlemlerden atılan baca gazlarında toz miktarı ortalama $< 10 \text{ mg/Nm}^3$ olmalıdır [60].

2.7.3 Fırın Yakma İşlemlerinden Çıkan Toz Emisyonları

Fırındaki yanma gazlarından kaynaklı toz emisyonlarının azaltılmasında filtreler için kuru gaz temizlik sisteminin kullanılması ve tozun günlük ort. konsantrasyonu $<10-20 \text{ mg/Nm}^3$ değerini aşmamalıdır [60]. Fırın yakma işlemlerinden çıkan toz emisyonlarını azaltmak için önerilen teknikler Tablo 2.17’de verilmiştir.

Tablo 2.17 Fırın yakma işlemlerinden çıkan toz emisyonlarına yönelik MET [60]

	Teknik	Uygulanabilirlik
a	Elektrostatik Filtre (ESP)	Tüm fırınlarda uygulanabilir.
b	Torba Filtre	
c	Melez/Hibrit Filtre	

2.7.4 Soğutma ve Öğütme İşlemlerinden Çıkan Toz Emisyonları

Öğütme ve soğutma işlemlerindeki baca gazı toz emisyonlarının azaltılabilmesi için filtre sistemleri uygulanmalı ve ort. Olarak günlük değerin $10-20 \text{ mg/Nm}^3$ ’ten az olması beklenmektedir. Toz emisyonları, bez filtre yardımı ile veya iyileştirilmiş elektrostatik filtreler (ESP) ile daha düşük seviyelere düşürülebilir [60]. Soğutma ve öğütme prosesleri sonucu çıkan toz emisyonlarını azaltmak için önerilen teknikler Tablo 2.18’de verilmiştir.

Tablo 2.18 Soğutma ve öğütme işlemlerinden çıkan toz emisyonlarına yönelik MET [60]

	Teknik	Uygulanabilirlik
a	Elektrostatik çöktici (ESP)	Genelde klinker soğutucu ve çimento değirmeni için uygulanabilir
b	Bez filtre	
c	Hibrid filtre	

2.8 Küresel Çimento Sektörü

2020'de küresel olarak 4,3 Gt çimento üretilmiştir. 2015'ten 2020'ye kadar, küresel klinker-çimento oranı 0,72 seviyesinde olmuştur. 2015-2020 döneminde çimento üretiminden kaynaklı CO2 yoğunluğu yılda %1,8 artmıştır [62].

Küresel çimento üretiminin 2050 yılına kadar %12-23 oranında büyümesi beklenmektedir. Çin Halk Cumhuriyeti ve Orta Doğu gibi bazı bölgeler aşırı çimento üretim kapasitesine sahiptir ve kişi başına düşen çimento üretimi küresel ortalamanın oldukça üzerindedir. Hindistan ve Afrika gibi diğer bölgeler, altyapı geliştirme ihtiyaçlarını karşılamak için yerel çimento üretim kapasitelerini artırmaya hazırlanmaktadır.

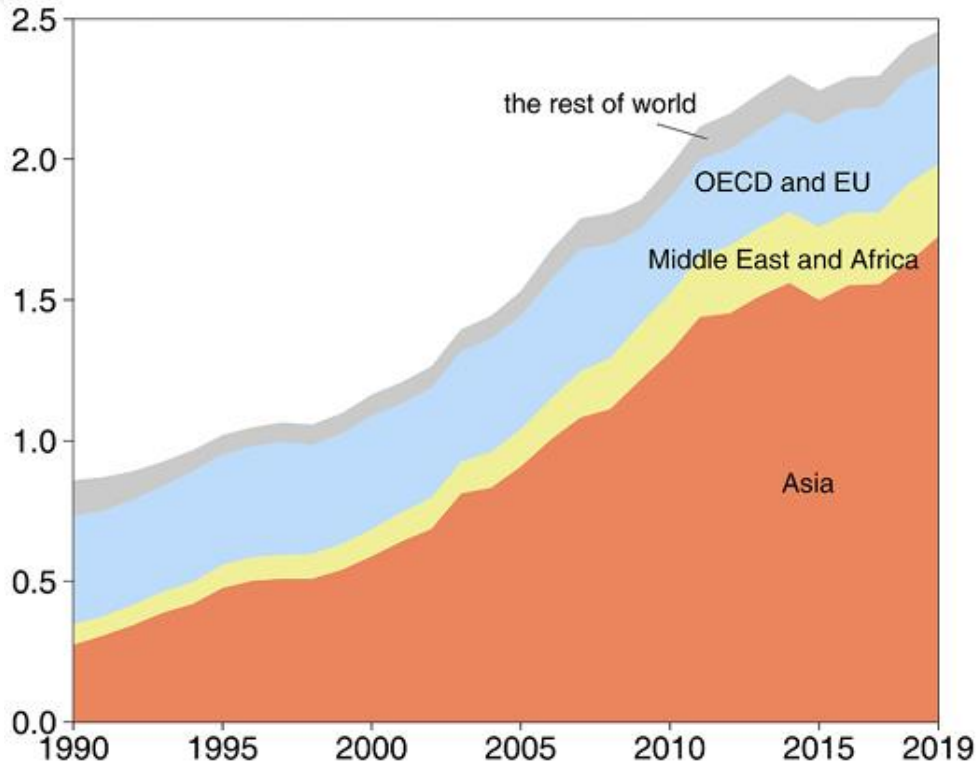
Çin, küresel çimento üretiminin %56'sını gerçekleştirirken, AB ülkeleri %4,4'ünü gerçekleştirmektedir. Yıllık bazda bakıldığında, Uzak Doğu'da Vietnam (80 Mt) ve Tayland (35 Kt), Orta Doğu'da ise İran (55 Mt), Mısır (52 Mt) ve Pakistan (50 Mt) Dünya çimento üretiminde %6,5'lik paya sahiptir [63].

Tablo 2.19 Dünya çimento üretimi (milyon ton) [63]

Ülkeler	2017	2018	2019
ÇİN	2.316,3	2.176,7	2.300,0
HİNDİSTAN	285,0	327,7	320,0
AB 28	175,1	179,8	182,1
ABD	86,1	87,8	88,6
BREZİLYA	54,0	53,5	53,4
TÜRKİYE	80,6	72,5	57,0
RUSYA	54,7	53,7	54,1
ENDONEZYA	68,0	70,8	64,2
GÜNEY KORE	57,9	55,0	56,4
JAPONYA	55,5	55,3	55,2
SUUDİ ARABİSTAN	47,1	42,2	42,2
MEKSİKA	42,8	42,8	47,5
ALMANYA	34,0	33,7	34,2
İTALYA	19,3	19,3	19,2
FRANSA	16,9	16,5	16,5
GÜNEY AFRIKA	13,2	12,5	12,4
KANADA	12,7	13,3	13,4
ARJANTİN	12,0	11,8	11,5
İNGİLTERE	9,4	9,2	9,1
AVUSTRALYA	10,0	9,8	10,0

Artan çimento talebi ile, çimento üretiminden kaynaklanan CO2 emisyonları 2000 yılından itibaren hızla artarak, 2019 yılında 1,57 Gt CO2'ye ulaşmıştır [64].

Çimento üretimi sonucu oluşan CO2 emisyonunu azaltmak için alternatif yakıt ve alternatif hammadde kullanımı giderek artmaktadır. Çimento üretiminde karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik temel stratejiler arasında enerji verimliliğinin artırılması, daha düşük karbonlu yakıtlara geçiş, malzeme verimliliğinin geliştirilmesi (klinker-çimento oranının ve toplam talebin azaltılması) ve KYKD gibi yeniliklerin ve teknolojilerin geliştirilmesi yer almaktadır. Çimento kullanımını optimize etmek için malzeme verimliliği stratejilerinin benimsenmesi, tüm inşaat zinciri boyunca talebin azaltılmasına ve çimento üretiminden kaynaklanan CO2 emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olabilecektir.



Şekil 2.4 1990–2019 döneminde bölgelere göre küresel çimento endüstrisinden kaynaklanan CO2 emisyonları [65]

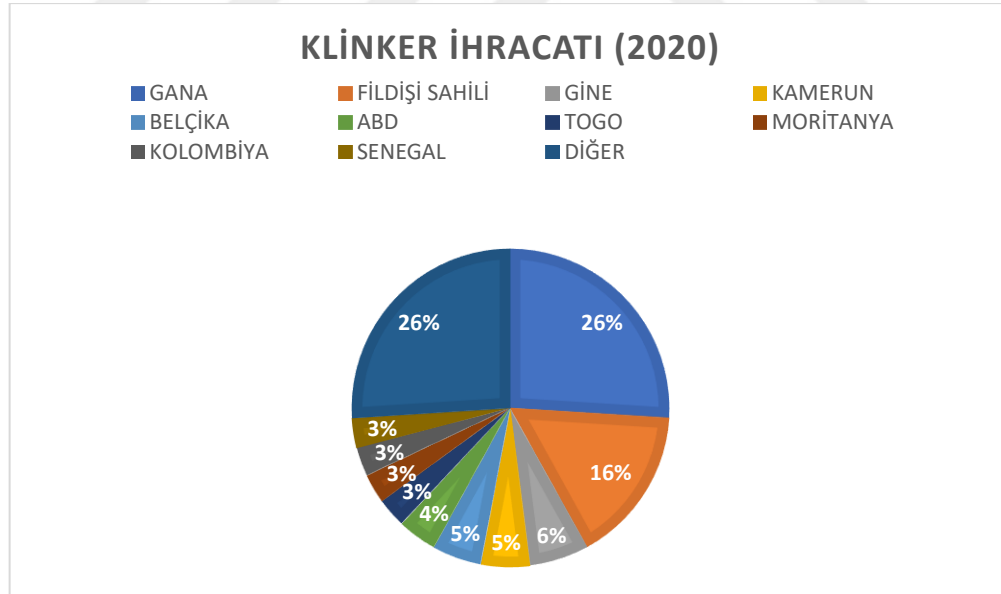
2.9 Türkiye’de Çimento Sektörü

2020 yılı itibarıyla Türkiye’de çimento sektöründe 55 entegre tesis ve 21 öğütme tesisi bulunmaktadır. 2020 yılında toplam üretim 76,5 Mt olup, sektörün

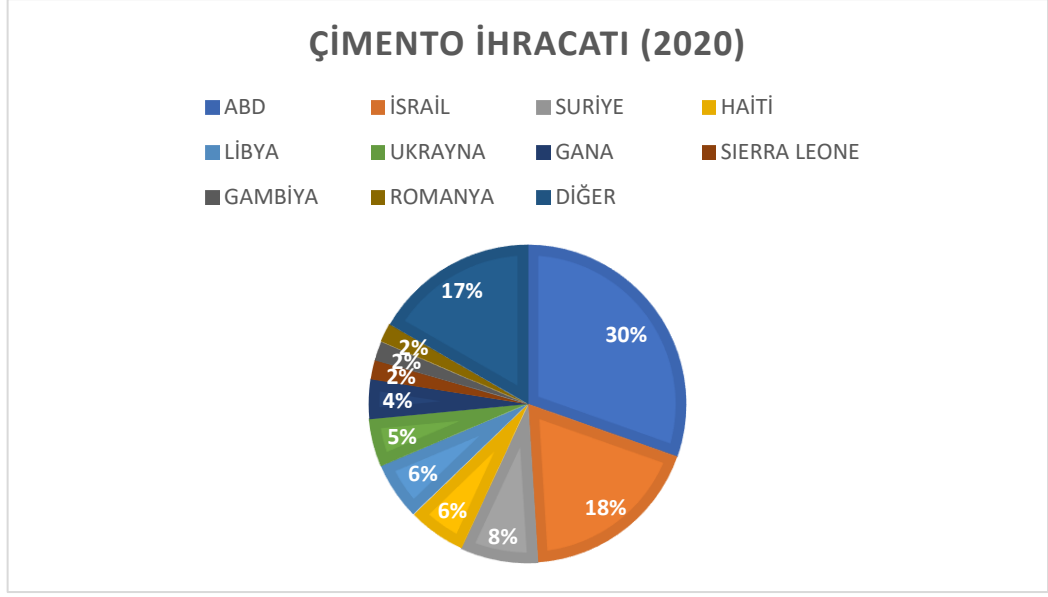
tamamının iç satışı 59,2 Mt olarak gerçekleşmiştir. Üretilen çimentonun yaklaşık %22,1'i ihracatta kullanılmıştır. Orta Doğu ve Akdeniz bölgesinin ihracat ağırlığı azalırken, Amerika kıtasının ağırlığı artmıştır. 2020 yılında üretilen toplam klinker miktarı 71,8 Mt'dur. En fazla klinker ihracatı Gana, Fildişi Sahili ve Gine'ye yapılmıştır. Klinker ihracatının %72'si Afrika'ya yapılmıştır. Çimento ihracatının %40'ı Amerika, %32'si Asya, %15'i Afrika ve %12'si Avrupa ülkelerine gerçekleştirilmiştir [66].

Tablo 2.20 Türk çimento sektörü üretim ve tüketim miktarları [67]

Yıllar	Üretim (Milyon Ton)	Tüketim (Milyon Ton)
2018	72,54	64,36
2019	56,7	45,41
2020	72,30	59,20



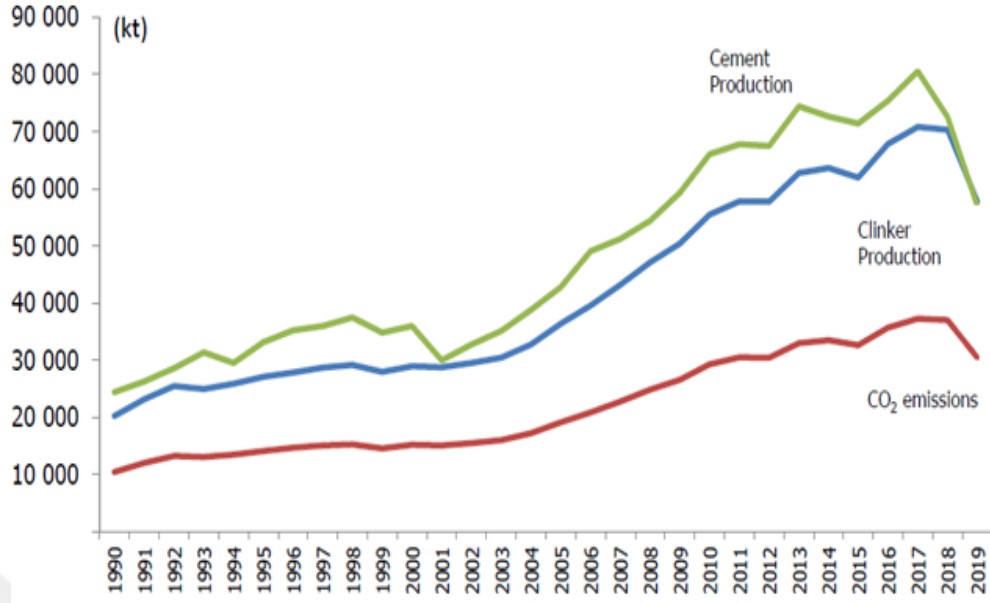
Şekil 2.5 Türkiye 2020 klinker ihracatı [67]



Şekil 2.6 Türkiye 2020 çimento ihracatı [67]

2.10 Türkiye’de Çimento Üretiminden Kaynaklanan CO2 Emisyonları

Çimento üretimi, üretim sırasında kireçtaşının kalsinasyonu nedeniyle oluşan CO2 emisyonları (doğrudan emisyonlar), IPCC kategorisi 2.A.1 CRF kapsamı altında rapor edilmektedir. Çimento fırınlarının ısıtılması için kullanılan birincil enerji kaynakları kömür, petrol koku ve linyittir. Çimento üretiminde gerekli olan enerji kaynaklı oluşan emisyonlar 1.A.2f CRF kategorisine dahildir. Türkiye’de 1990 - 2019 yılları arasında CO2 emisyonları %166 oranında artmıştır.



Şekil 2.7 1990- 2019, Klinker-Çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları [68]

IPCC yönergelerinde Tier 2 yaklaşımı ile ülkeye özgü emisyon faktörü (EF) kullanılarak, ton klinker başına ortaya çıkan CO₂ emisyon miktarı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır :

$$CO_2 \text{ emissions} = M_{c1} * EF_{c1} * CF_{ckd} \quad (2.1)$$

Burada;

CO₂ emisyonu = çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonu, (ton)

M_{c1} = üretilen klinker miktarı, (ton)

EF_{c1} = klinker için emisyon faktörü, (ton CO₂/ton klinker)

CF_{ckd} = emisyon düzeltme faktörü, birimsiz

Ulusal Sera Gazı Envanteri'nde belirtilen, Türkiye için EF değeri 0.516 t CO₂/t klinker ve CKD faktörü 1.02 kabul edilerek, Türkiye'de çimento üretiminden kaynaklanan doğrudan CO₂ emisyonları hesaplanmıştır (Tablo 2.21).

Tablo 2.21 Türkiye çimento sektörü doğrudan CO2 emisyon miktarı

Yıllar	Üretilen Çimento Miktarı (kt)	Üretilen Klinker Miktarı (kt)	EF (tonCO2/ton klinker)	CKD	CO2 Emisyonu (kt)
2018	72.544	70.345	0,516	1,02	37.024
2019	56.700	57.800	0,516	1,02	30.421
2020	72.300	71.770	0,516	1,02	37.774

2.11 Çimento Sektöründe CO2 Emisyonları Azaltma Uygulamaları

2.11.1 Enerji Verimliliğinin Arttırılması

Çimento sektöründe enerji kullanımı; termal enerji kullanımı ve elektrik enerjisi kullanımı olmak üzere ikiye ayrılır. Fırınlara için en iyi termal koşulların belirlenmesi ile enerji kullanımı azaltılabilir Yeni yapılan çimento tesislerinde veya mevcut çimento tesislerinde yapılması planlanan büyük ölçekte değişikliklerde, entegre kalsinatör veya tersiyer hava kanalına sahip çok kademeli (4 -6 kademeli) siklon ön ısıtıcı fırın sistemleri tercih edilmelidir. Ön ısıtıcılarda bulunan siklon sayıları yakıt ve ham maddenin nem içeriğine göre belirlenebilmektedir. Termal enerji optimizasyonu tesis içindeki farklı ünitelerde uygulanabilir. Farklı ünitelerde uygulanabilecek optimizasyon teknikleri aşağıda sıralanmıştır:

- *Soğutucu:* modern tip klinker soğutucuların kullanılması. Soğutma havasının dağılımını eşit miktarda yapan, akış direncinin yükek olduğu soğutucu plakalarının kullanılması. Soğutma havasının kontrollü bir şekilde sağlanması.
- *Fırın:* yüksek kapasiteli fırınların kullanılması. Uzunluk/çap oranının optimizasyonu. Kullanılan yakıt türüne göre fırın tasarlanması. Fırın ateşleme sistemlerinin optimize edilmesi. Tersiyer hava kanalı. Giren havanın sızıntısının azaltılması. Çok kademeli ön ısıtıcı ve prekalsinatörlü kuru proses fırınları kullanımı.
- *Ön ısıtıcı:* siklonlardaki basınç kaybının düşürülmesi ve yüksek atık ısı geri kazanımının sağlanması. Siklon kademeleri (3 – 6 siklon).

- *Malzeme:* kullanılan ham madde ve yakıtlardaki nem muhtevasının düşük olması. Yüksek kalorifik değere sahip olan ve kolay tutuşabilen yakıt tercih edilmesi. Fırına giren malzemenin homojen olması.
- *Değirmenler:* birleşik çalışan değirmenler.

Yukarıdaki tekniklere ek olarak; çimento üretimindeki klinker oranının azaltılması, enerji tüketimini ve çimento üretiminde ton başına düşen CO₂ emisyonlarını azaltmak için kullanılan bir tekniktir. Bu azaltım, öğütme aşamasında, çeşitli malzemelerin (puzolan, cüruf, kül, uçucu kül, kireçtaşı, vb.) eklenmesi ile yapılmaktadır. Elektrik enerjisinin kullanımı, güç yönetimi sağlayan sistemlerinin kurulumu, klinker ufalaama için kullanılan ekipmanlarda enerji tasarruflu olanlarının seçilmesi ve eski değirmenlerinin yerine yeni değirmenlerin kullanılması gibi teknikler de enerji tüketimini azaltmaya yönelik tedbirler kapsamında sayılabilir. Proses kontrolü optimizasyonunun da elektrik enerjisi azaltımında olumlu etkileri olduğu görülmüştür [69].

Tablo 2.22 Enerji optimizasyonlarının CO₂ emisyonuna etkisi [70]

Metod	Doğrudan CO ₂ azaltma kg CO ₂ /t klinker	Dolaylı CO ₂ azaltma kg CO ₂ /t klinker
Uzun fırınlardan ön ısıtıcı / ön kalsinatörlü fırınlara geçiş	80 – 250 azalma	0 – 3.5 azalma
Ön ısıtıcı modifikasyonu	0.0	0 – 1 azalma
Klinker soğutucu teknolojisi	9 – 28 azalma	1 – 3 artma
Atık ısı geri kazanımı	0.0	4 – 15 azalma
Ek ön ısıtıcı siklon kademeleri	6 – 8 azalma	0.0
Oksijen zenginleştirme teknolojisi	170'e kadar azalma	15 – 25 artma
Tesis otomasyon/kontrol paketinin yükseltilmesi	4 – 18 azalma	0 – 0.7 azalma
Fırın kapasitesinin arttırılması (2 Mt/y kapasite)	15 – 20 azalma	1 – 3 azalma
Akışkan yataklı gelişmiş çimento fırını sistemi	27' ye kadar azalma	4 – 6 artma

Tablo 2.23 Klinker ikamesinin CO2 emisyonuna etkisi [70]

Metod	Doğrudan CO2 azaltma kg CO2/t çimento	Dolaylı CO2 azaltma kg CO2/t çimento
%30-70 yüksek fırın cürufu içeren çimento	60 – 380 azalma	0.0
%25-35 uçucu kül içeren çimento	20 – 100 azalma	1 – 8 azalma
%15-35 puzolan içeren çimento	0 – 100 azalma	0.0
%25-35 kireçtaşı içeren çimento	20 – 100 azalma	6 – 8 azalma
Düşük karbonatlı klinkerler	50 azalma	10 – 30 artma

2.11.2 Fırınlardan ve Soğutuculardan/ Kojenerasyondan Enerji Geri Kazanımı

Çimento üretiminde buhar ve elektrik tedariği için kojenerasyon ve enerji santrallerinin kullanılması uygun olabilmektedir. Çünkü çimento üretim sürecinde ısı ve elektrik ihtiyacı aynı anda olmaktadır. Klinker soğutucusundan ve fırından çıkan atık ısılar geri kazanılabilmektedir. Kazanılan atık ısı çeşitli amaçlar için kullanılabilir. Kazanılan atık ısı sayesinde buhar ve elektriğin üretilerek hem enerji maliyetleri hem de emisyonlar azaltılabilir [69].

2.11.3 Atıkların Yakıt Olarak Kullanımı

Çeşitli atıklar yeterli derecede kalorifik değere sahip iseler çimento üretiminde alternatif yakıt olarak kullanılabilirler. Atıklar genel olarak bir ön arıtmadan geçerek yakıt olarak kullanılırlar. Fırın çalışmasını ve üretim sonucu oluşan emisyon miktarlarını önemli derecede etkileyebilecek atıkların yakıt olarak seçilmesinde, fiziksel ve kimyasal özellikleri önemlidir. Alternatif yakıt olarak kullanılacak tehlikeli atıklar için ve kendi kendine tutuşma potansiyeli olan alternatif yakıtlar için güvenlik önlemleri alınmalıdır. Çimento üretiminde enerji kullanımı, üretim maliyetlerinin %30-40' ını oluşturmakta ve genel olarak enerji fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Alternatif yakıtların kullanılması, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltması ve daha ucuz olması sebebi ile işletme maliyetlerini düşürmektedir [69].

Tablo 2.24 Fosil yakıt ikamesinin CO₂ emisyonuna etkisi [70]

Metod	Doğrudan CO ₂ kg CO ₂ /t klinker	Dolaylı CO ₂ kg CO ₂ /t klinker
Fosil Yakıt İkamesi	80 – 200 azalma	0 – 2 artma

2.11.4 Atıkların Hammadde Olarak Kullanımı

Atıkların ham madde olarak kullanılması, klinker üretim sürecinde büyük miktarda ham madde kullanımını önlemektedir. Fakat kullanılacak atık madde, klinker pişirme prosesi için gereken özelliklere, kimyasal elementlere ve bileşenlere sahip olmalıdır. Atıkların ham madde olarak kullanımı ile doğal kaynakların kullanılması azaltılabilmektedir [69].

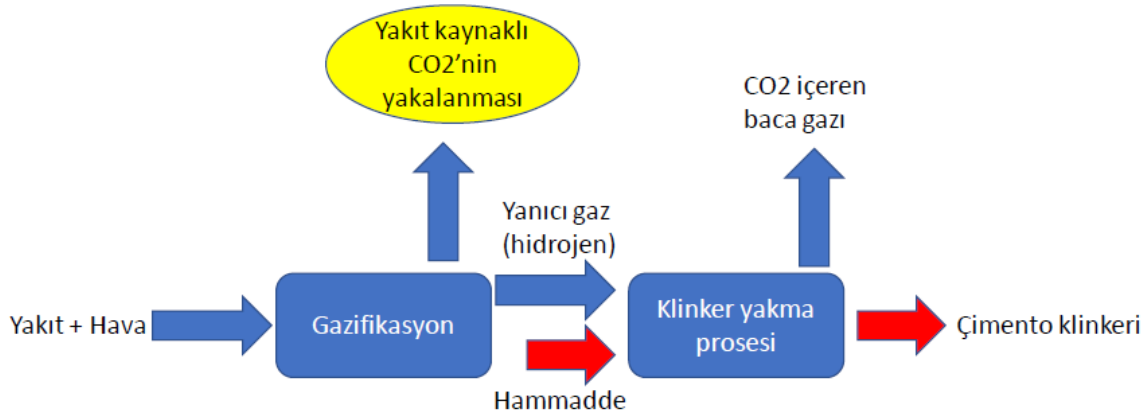
2.11.5 Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama

Çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları çeşitli yakalama teknolojileri kullanılarak uygun depolama sahalarında depolanabilmekte veya çeşitli amaçlar için gıda, ilaç, kimya vb. sektörlerde kullanılmak üzere bu sektörler ile paylaşılabilir.

ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

3.1 Yanma Öncesi Yakalama

Yanma öncesi CO₂ yakalama, çimento endüstrisi için en az tercih edilen yöntemdir. Sebebi, yanma öncesi yakalama ile yalnızca kullanılan yakıtın yanması ile oluşan CO₂ emisyonları tutulmakta, kalsinasyondan oluşan CO₂ emisyonları tutulamamaktadır. Böylece üretilen CO₂ emisyonlarının yaklaşık %60'ı azaltılamamaktadır. Ayrıca diğer yakalama yöntemleri ile karşılaştırıldığında, teknolojinin uygulanabilmesi için klinker yakma prosesinde daha fazla teknik değişikliklerin yapılmasını gerektirmektedir [70].

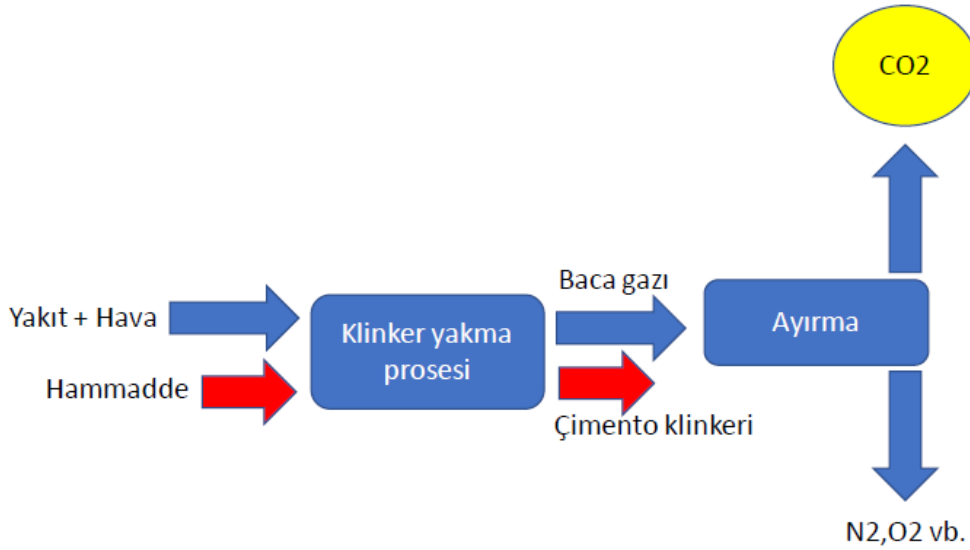


Şekil 3.1 Yanma öncesi yakalama teknolojisinin prensibi [70]

3.2 Yanma Sonrası Yakalama

Yanma sonrası yakalama bir boru sonu önlemdir ve klinker yakma prosesinde temel değişiklikler yapılmasını gerektirmez. Yanma sonrası yakalama teknolojisi yalnızca yeni fırınlar için değil, mevcut fırınlar içinde uyarlanabilmektedir. Bu teknoloji ile hem yakıt kaynaklı CO₂ emisyonları hem de kalsinasyon prosesi sonucu oluşan CO₂ emisyonları yakalanabilmektedir. Yanma sonrası yakalama teknolojisinin çeşitli yöntemleri vardır [70]:

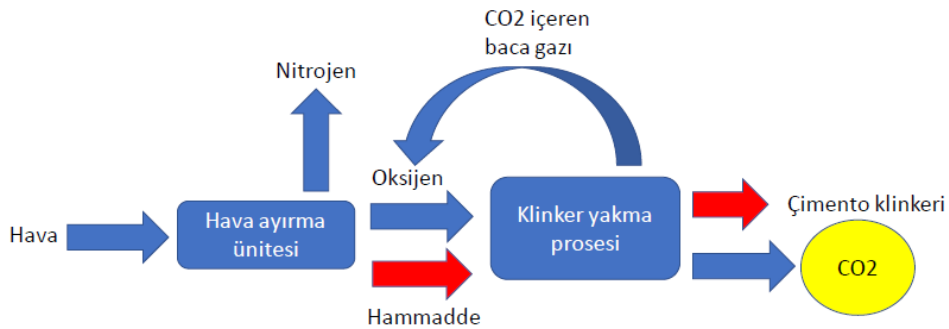
- Kimyasal absorbsiyon (amin bazlı yıkama, soğutulmuş amonyak)
- Membran teknolojileri
- Mineralizasyon
- Kalsiyum döngüsü



Şekil 3.2 Yanma sonrası yakalama teknolojisini prensibi [70]

3.3 Oksi Yakıt Teknolojisi

Oksi yakıt teknolojisi ile çimento fırınlarında bir hava ayırma ünitesi tarafından sağlanan yüksek saflıkta oksijen kullanılır ve oluşan CO₂ bakımından zengin baca gazları yakıcılarda tekrar kullanılarak değerlendirilir. Uygun alev sıcaklığını korumak için belirli miktarda baca gazı sirküle edilmektedir [70].



Şekil 3.3 Oksi yakıt teknolojisini prensibi [70]

3.4 Dünya Çimento Endüstrisi KYKD Uygulamaları

Çimento sektöründe KYKD teknolojilerinin uygulanması artmaktadır. Tablo 3.1’de, çimento endüstrisi için Dünya genelinde uygulanan KYKD projelerinin bilgileri verilmiştir.

Tablo 3.1 Dünya çimento sektöründe mevcut KYKD uygulamaları [71]

Tesis İsmi	Tesis Kategorisi	Tesis Durumu	Ülke	İşletme Yılı	Yıllık CO2 Yakalama Kapasitesi (Mt)
CEMCAP	Pilot ve kanıtlanmış	Tamamlanmış	Norveç	2015	
Norcem Brevik - CO2 yakalama test	Pilot ve kanıtlanmış	Tamamlanmış	Norveç	2013	
Hanson	Ticari	Erken gelişim	İngiltere	2026	0,8
ITRI - Kalsiyum döngüsü	Pilot ve kanıtlanmış	İşletmeye hazır	Çin	2013	
LafargeHolcim	Ticari	Erken gelişim	ABD	2020	1 – 2
LEILAC	Pilot ve kanıtlanmış	İnşaat	Belçika	2020	
Norcem Brevik – Çimento tesisi	Ticari	İnşaat	Norveç	2024	0,4
Norcem Brevik – Nakliye yolu	Ticari	İnşaat	Norveç	2024	

4.1 CO₂ yakalama, enjeksiyon ve depolama projeleri

Türkiye'de CO₂ depolaması için olası jeolojik alanların değerlendirilmesinde bazı çalışmaların olduğu bilinmektedir. Bunlardan biri olan, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yürütülen ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından finanse edilen TÜBİTAK, KAMAG Projesi 106G110 (2009) kapsamında gerçekleştirilmiştir. Söz konusu bu çalışmada, Türkiye'deki termik santraller ve endüstriyel tesislerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının hesaplanması ve Türkiye'deki yeraltı jeolojik oluşumlarında CO₂ depolama potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. IPCC direktifi doğrultusunda yapılan bu çalışmada, 500 MW üstünde kurulu gücü olan termik santrallerden, çimento fabrikalarından, demir-çelik endüstrisinden, şeker fabrikalarından ve rafinerilerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının hesaplandığı gözlemlenmektedir. Bu çalışma ile Siirt ilinde bulunan Dodan dağı doğal CO₂ sahası ve Mersin Soda Endüstrisi tuz mağaraları dahil olmak üzere Türkiye'deki petrol ve gaz sahalarında ve derin tuzlu akiferlerde CO₂ depolama potansiyelleri değerlendirilmiştir. Petrol ve doğal gaz rezervuarlarının üretim verileri gizli tutulmuştur, bu nedenle sadece Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı'na lisans verilen sahalar incelenmiştir. Emisyon kaynaklarının ve olası depolama yerlerinin değerlendirilmesi sonucunda, depolama alanı olarak Çaylarbaşı petrol sahası (Şanlıurfa) seçilmiş ve sahaya yaklaşık 130 km uzaklıkta bulunan bir çimento fabrikasından oluşan CO₂ emisyonlarının kullanılmasına karar verilmiştir. Hem depolama hem de ek petrol üretimi için petrol sahasına enjeksiyon modellenmiş, buna bağlı olarak CO₂ kaynağından depolanacak sahaya kadar taşıma ve enjeksiyon için teknik tasarım önerilmiş ve ekonomik değerlendirme yapılmıştır. Modellemede, 20 yıllık proje ömrü için, 8 yıl boyunca EOR için CO₂ enjeksiyonu ile 2 milyon varil petrol üretilebileceği, kalan 12 yıl boyunca 220 milyon Sm³ CO₂ depolanabileceği belirtilmiştir. CO₂'nin taşınması için tanker ve boru hattı ile nakliyenin

karşılaştırılması yapılmıştır. Tanker taşımacılığı için yatırım maliyeti 34 milyon USD, işletme maliyeti 408,000 USD/ay ve boru hattı ile taşımacılığın yatırım maliyeti 53,5 milyon USD, işletme maliyeti 414,000 USD/ay olarak hesaplanmıştır. Daha ekonomik olması sebebi ile tanker taşımacılığı önerilmiştir [72].

Türkiye'nin yeraltı enerji depolama verileri, Energy Storage Mapping and Planning ESTMAP (2015-2016) kapsamında “Enerji Depolama Haritalama ve Planlama” başlığı altında toplanmıştır. Projede yer altı ve yer üstü olmak üzere, mevcut ve gelecekteki potansiyel enerji depolaması için, iki hidrokarbon rezervuarı ve iki tuz mağarasında yer altı gaz depolaması hakkında coğrafi veri tabanı oluşturulmuştur. Belirlenen yer altı gaz depolama sahaları, gelecekteki potansiyel CO₂ depolama seçenekleri olarak düşünülebilmektedir [40].

Türkiye'de ODTÜ-PAL tarafından yürütülen Düşük Karbon Geliştirme Projesi (2017) kapsamında, 103 petrol sahası incelenmiştir. Ön bulgulara göre, Batman Bölgesi'nde 79,5 Mt CO₂, Adıyaman Bölgesi'nde 28,7 Mt CO₂, Trakya Bölgesi'nde 473 kt CO₂ depolanabileceği belirtilmiştir [40].

Türkiye'de CO₂-EOR projeleri temel amaç olarak CO₂ depolamadan ziyade petrol geri kazanımını artırmak için yürütülmüştür. Türkiye'de ilk büyük ölçekli ticari CO₂-EOR projesi 1986 yılında Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı tarafından Batı Raman'da başlatılmıştır. 1961 yılında keşfedilen Batı Raman Sahası, yaklaşık 300 milyon Sm³ (1,850 milyon varil) kapasitesi ile Türkiye'nin en büyük petrol sahasıdır. Geri kazanımı artırmak ve azalan rezervuar basıncını desteklemek için, 1986 yılında Dodan gaz sahasından gelen doğal CO₂ kullanılarak EOR projesi başlatılmıştır. Aralık 2011 sonu itibariyle Batı Raman'da kümülatif üretim 106,3 milyon varil petrol olup, bunun 70,4 milyon varili CO₂ enjeksiyonu sırasında elde edilmiştir [40]

Bir diğer CO₂-EOR projesi, Türkiye Petrolleri tarafından 1985 yılından beri faaliyette olan Güneydoğu Anadolu'da bulunan Batı Kozluca Sahası'na 10 km uzaklıktaki Çamurlu sahasından gelen doğal CO₂ kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 2004 yılında Batı Kozluca'da yaklaşık %3 oranında birincil geri kazanım ile CO₂-

EOR projesi başlatılmıştır. 5 yıllık enjeksiyondan sonra iyileşme %4'ün üzerine çıkmıştır [40].

Başka bir CO₂-EOR projesi, 60 milyon Sm³ (380 milyon varil) ağır petrol bulunan Çamurlu sahasında gerçekleştirilmiştir. Pilot testlerde kullanılan CO₂, petrol rezervuarının altında yatan CO₂ açısından zengin bir doğal gaz bölgesinden elde edilmiştir. Teknik sorunlardan dolayı planlanan süre içerisinde istenilen miktarda CO₂ enjekte edilememiş ve proje durdurulmuştur [40].

1987 yılında Japon Ulusal Petrol Şirketi (JNOC), Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO) ve Japon EOR Araştırma Derneği (JEORA) işbirliğiyle İkiztepe sahasında (Mardin) bir CO₂-EOR pilot tesis uygulaması yapılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışma, CO₂-EOR pilot tesisinde, ham petrole ait yağ viskozitesinde gelişmeler olduğunu göstermiştir [40].

Türkiye'de bir diğer çalışma ise Jeotermal Emisyon Kontrolü (GECO) projesi olup, Avrupa Birliği - Horizon 2020 kapsamında finanse edilmekte ve Reykjavik Enerji tarafından koordine edilmektedir. Proje, jeotermal enerji üretiminden meydana gelen CO₂ gibi sera gazlarının yeniden enjeksiyonuna odaklanmaktadır. Fransa, İtalya, İspanya, Norveç, Almanya, İngiltere ve İzlanda'dan sanayi, araştırma ve teknoloji geliştirme ortaklarının bulunduğu GECO konsorsiyumunda, Türkiye'den Zorlu Enerji Elektrik Üretim A.Ş. ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi yer almaktadır. Projede Türkiye, İzlanda, Almanya ve İtalya'da bulunan jeotermal sahaları seçilmiştir. GECO projesi aracılığıyla, Türkiye'de Denizli ve Aydın illerinde bulunan Kızıldere jeotermal sahasında bir pilot CO₂ enjeksiyon çalışması yapılmaktadır. Proje ile, jeotermal enerji üretiminin CO₂ emisyonlarını azaltmanın yanı sıra, rezervuarın sürdürülebilirliğinin korunması da hedeflenmektedir [40].

Bir başka pilot ölçekli çalışma, bir ERA-NET Ortak fonu olan ACT – Accelerating CCS Technologies tarafından finanse edilen SUCCEED (CO₂ depolamasının Sinerjetik Kullanımı ile Jeotermal Enerji Dağıtımı) projesidir. Projenin amacı, jeotermal performansı iyileştirmek ve üretilen CO₂'nin yeniden enjeksiyonunun fizibilitesini geliştirmektir. Proje koordinatörü Londra - Imperial College'dir ve Türkiye'den Zorlu Enerji Elektrik Üretim A.Ş. ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi ile

işbirliği yapılmaktadır. Projede, Türkiye'de Kızıldere Sahası ve İzlanda'da Hellisheidi sahasında CO₂ enjeksiyon operasyonları, saha performansı ve rezervuar davranışının izlenmesi hedeflenmektedir. Projede, CO₂ enjeksiyonu öncesi ve sonrası için farklı simülasyonlar geliştirilerek alternatif CO₂ enjeksiyon stratejilerinin geliştirilmesi ve uygulanması planlanmaktadır [40].

Türkiye'de bir jeotermal rezervuara ilk pilot ölçekli CO₂ enjeksiyonu (diğer yoğunlaşamayan gazlarla birlikte) 2016-2017'de Umurlu Jeotermal sahasında (Aydın) yapılmıştır. Pilot çalışma sırasında, 20 gün boyunca rezervuara toplam 1248 ton CO₂ enjekte edilmiştir ve ortalama akış hızı 2,65 ton/saattir [40].

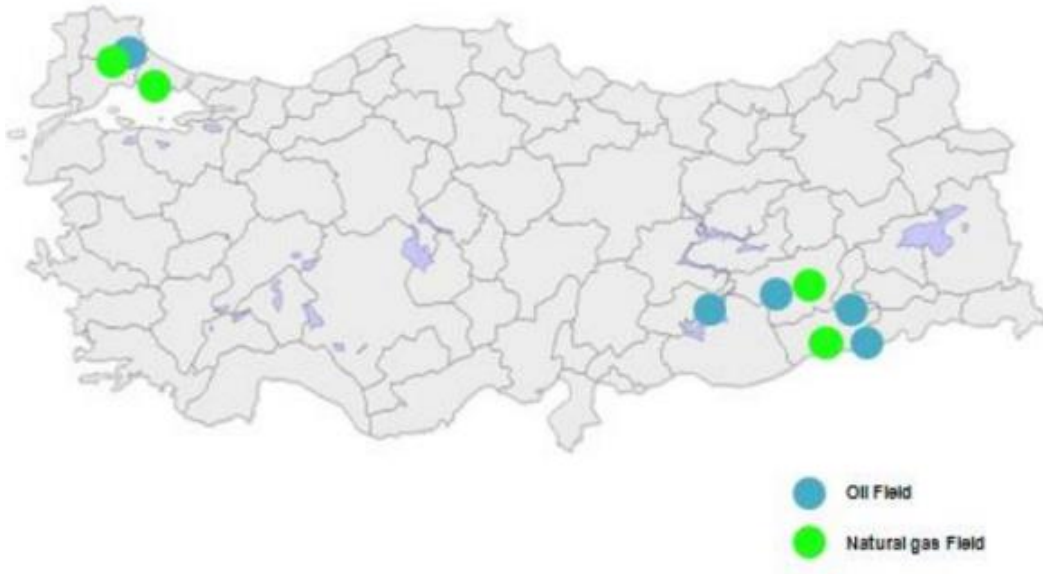
Türkiye'de bilinen tek CO₂ yakalama projesi, Horizon 2020 tarafından finanse edilen "Gelişmiş Karbon Dioksit Yakalama Teknolojileri" adı altında yürütülen ve Avrupa'nın 7. büyük rafineri işletmesi olan TÜPRAŞ'ın İzmit tesisinde pilot çalışmaları yapılan H2020 MOF4AIR projesidir. Belçika - Mons Üniversitesi tarafından koordine edilen projeye, Norveç, Fransa, İtalya, Yunanistan, İngiltere, Güney Kore ve Türkiye'den toplam 14 ortaklık bulunmaktadır. Proje ile CO₂ gazının endüstriyel proseslerden etkin bir şekilde tutulması ve CO₂ emisyonlarını azaltacak teknolojik bir yöntemin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu proje ile TÜPRAŞ, baca gazlarındaki atık CO₂'nin yakalanması için çalışmalar yürütecek ve gelişmiş teknolojiyi rafineri sahasında test etme imkanına sahip olacaktır. Proje kapsamında geliştirilen teknoloji ve sistemin, enerji santralleri, rafineriler, çimento, demir-çelik gibi çeşitli enerji ve CO₂ yoğun sektörlerde kullanılması hedeflenmektedir [73].

4.2 Türkiye Çimento Tesisi KYKD Senaryosu

4.2.1 Depolama

Türkiye'de karbon yakalama teknolojisinin uygulanabileceği sektörler oldukça yoğundur. Bu sektörlerden biri, dünya sıralamasında önemli üretim payına sahip olan çimento sektörüdür. Türk çimento sektörü, 55 entegre tesis ve 21 öğütme tesisine sahip ve karbon yoğun sektör olması sebebi ile çalışma konusu olarak seçilmiştir.

Türkiye’de henüz endüstri sektöründe uygulanan mevcut bir karbon yakalama teknolojisi bulunmamaktadır. Karbon depolama hakkında ise yalnızca COR-EOR projeleri için yeterli teknik bilgi mevcuttur. Yeni çalışmalar ile jeotermal sahalarda CO2 depolama çalışmaları yapılmaktadır. Depolama alanı potansiyeli olan kömür damarları, derin tuzlu akiferler, tükenmiş petrol, gaz ve kömür rezervleri için depolama kapasiteleri hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. Ayrıca Türkiye deprem bölgesi olduğu için, jeolojik formasyonlar uygun olsa bile depolama kapasitesinin sismik sebeplerden dolayı düşük olacağı düşünülmektedir. TÜBİTAK, KAMAG Projesi 106G110 (2009) ve ODTÜ-PAL tarafından yürütülen Düşük Karbon Geliştirme Projesi (2017) kapsamında, Türkiye’de potansiyel depolama alanları belirlenmiştir. Türkiye’de depolama alanı olarak seçilebilecek petrol ve doğalgaz sahaları Şekil 4.1’de, kömür ve linyit sahaları Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

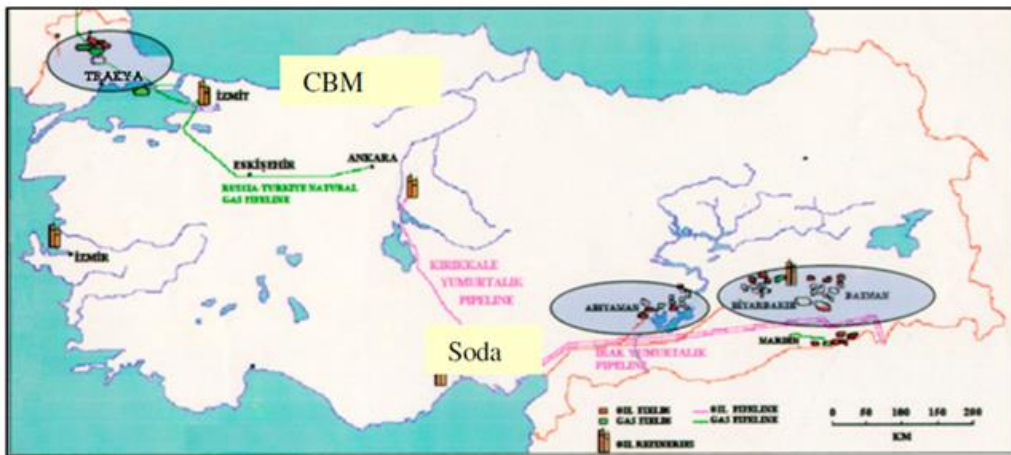


Şekil 4.1 Türkiye petrol ve doğalgaz sahaları [21]



Şekil 4.2 Türkiye kömür ve linyit sahaları [21]

Bu çalışmada Türkiye’de bulunan çimento fabrikalarının sebep olduğu CO2 emisyonunun, CO2-EOR uygulaması için kullanılması uygun görülmüştür. TÜBİTAK, KAMAG Projesi 106G110 (2009) ve ODTÜ-PAL tarafından yürütülen Düşük Karbon Geliştirme Projesi (2017) sonuçları dikkate alınarak, depolama alanı olarak en fazla CO2 depolama kapasitesine sahip olan Batman bölgesi seçilmiştir. Proje bölgeleri Şekil 4.3’te ve bölgelere ait CO2 depolama kapasiteleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Türkiye’de potansiyel depolama alanları [72]

Tablo 4.1 Türkiye CO2 depolama kapasitesi(ton) [74]

Bölgeler	CO2 Depolama Kapasitesi (Ton)
Batman Bölgesi	79.548.418,74
Adıyaman Bölgesi	28.697.172,83
Trakya Bölgesi	473.070,61

Batman bölgesinde bulunan ham petrol sahalarının üretilebilir miktarları dikkate alındığında, çimento fabrikalarından tedarik edilecek olan CO2'nin, Batı Raman petrol sahasında kullanılması önerilmektedir. Batman bölgesine ait petrol rezerv bilgileri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Batman bölgesi petrol üretim sahaları üçüncül üretim tahminleri [75]

Saha	Yerinde Rezerv	Üretilebilir Rezerv	Üretim Faktörü	Yöntem	Hedef Üretim Faktörü	İlave Üretim
Batı Raman	1841	192,9	10,5	CE	12,0	28,0
Raman	615,3	146,9	23,9	CE	33,9	61,7
Şelmo	539	99,3	18,4	ÇCE	33,4	80,7
Garzan	199,1	46,5	23,4	CE	33,4	20,0

(Rezervler ve üretim miktarları “milyon varil” cinsinden belirtilmiştir. CE: Öteleme CO2 Enjeksiyonu, ÇCE: Çözünür CO2 Enjeksiyonu)

4.2.2 Endüstriyel Emisyonlar

Türkiye’de çimento endüstrisinden kaynaklanan doğrudan CO2 emisyonları Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.3 Türkiye çimento endüstrisi proses kaynaklı CO2 emisyonları

Yıllar	CO2 emisyonu (kton)
2018	37 024
2019	30 420
2020	37 774

Batı Raman petrol sahasında CO2-EOR uygulaması için kullanılacak olan CO2 tedariki için, bölgeye yakın olan Siirt ilindeki Limak Kurtalan Çimento Fabrikası ve Mardin ilindeki Oyak Mardin Çimento Fabrikası seçilmiştir.

Limak Kurtalan Çimento Fabrikası'nın klinker üretim kapasitesi 779.700 t/y, çimento üretim kapasitesi 1.242.000 t/y'dir [76].

Oyak Mardin Çimento Fabrikası'nın klinker üretim kapasitesi 980.191 t/y ve çimento üretim kapasitesi 2.000.000 t/y'dir [77]. (Klinker üretim kapasitesi olarak 2020 yılında üretilen klinker miktarı dikkate alınmıştır.)



Şekil 4.4 Çalışma sahası

Tablo 4.4 Kurtalan ve Mardin çimento fabrikalarının çimento ve klinker üretim kapasiteleri ve doğrudan CO2 emisyon miktarları

Çimento Fabrikası	Üretilen Çimento Miktarı (ton/yıl)	Üretilen Klinker Miktarı (t/y)	EF (tCO2/t klinker)	CKD	CO2 Emisyonu (t/y)
Kurtalan	1.242.000	779.700	0.516	1.02	410.371
Mardin	2.000.000	980.191	0.516	1.02	515.894
Toplam					926.265

Tablo 4.4'te Kurtalan ve Mardin çimento fabrikalarının çimento ve klinker üretim kapasiteleri ve doğrudan CO₂ emisyon miktarları hesaplanmıştır. Çimento tesislerine ait CO₂ emisyon miktarı yalnızca klinker üretiminden (doğrudan) kaynaklanan CO₂ emisyonlarını yansıtmaktadır. Yakıt ve elektrik kaynaklı CO₂ emisyonlarının (dolaylı) hesaplanması için, her iki çimento tesisinde kullanılan fosil yakıt ve alternatif yakıtların miktarları ve türleri bilinmediğinden, klinker üretimi dışında kaynaklanan CO₂ emisyonları için literatürden yararlanılmıştır. Literatüre göre, klinker üretimi, çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır. Bu sebeple Tablo 4.4'te verilen klinker üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyon miktarlarının, her iki çimento tesisi için çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyon miktarlarının %60'ı olduğu kabul edilerek, kalan %40'ının yakıt ve elektrik kaynaklı emisyonlar olduğu varsayılarak toplam CO₂ emisyon miktarları hesaplanmıştır. Her iki çimento tesisine ait toplam CO₂ emisyon miktarları Tablo 4.5'de gösterilmiştir.

Tablo 4.5 Kurtalan ve Mardin çimento fabrikalarının toplam CO₂ emisyon miktarları

Çimento Fabrikası	Doğrudan CO ₂ emisyonu (t/y)	Dolaylı CO ₂ emisyonu (t/y)	Toplam CO ₂ emisyonu (t/y)
Kurtalan	410.371	273.581	683.952
Mardin	515.894	343.930	859.824
Toplam			1.543.776

Literatür uygulamalarına bakıldığında genel olarak ortalama 1 ton CO₂ enjeksiyonu karşılığında yaklaşık 4,5 varil ham petrol üretimi gerçekleştirilmektedir [75]. Batı Raman petrol sahasında CO₂ enjeksiyonu ile üretilmesi beklenen 28 milyon varil ham petrolün, yapılan söz konusu hesaplamalara göre yılda 6,95 milyon varilinin, Kurtalan ve Mardin çimento fabrikalarından tedarik edilecek CO₂ ile üretilebileceği tahmin edilmektedir.

4.2.3 CO2 Taşıma

Bu tez kapsamında söz konusu çimento fabrikalarından Batı Raman petrol sahasına taşınacak olan CO2 için boru hattı taşımacılığı önerilmiştir.

Boru hattı taşımacılığında genel olarak karbon çelik borular kullanılmaktadır. Özellikle X60, X70 ve X80 karbon çelik boru tipleri CO2 taşımacılığında tercih edilmektedir. Bir CO2 taşıma sistemi, kompresörlü ve güçlendirici pompalar, basınç kontrol istasyonları, akış kontrol istasyonları, valfler, denetleyici kontrol ve veri toplama sistemleri, güvenlik sistemleri ve korozyon koruma sistemleri içerir. Boru hattının geçirileceği derinlik, ülkeye ve bölgeye göre farklılık göstermektedir fakat genel olarak en az 1 m derinlik olması gerekmektedir [78].

Mardin ve Siirt illerinde bulunan çimento fabrikalarından, Batı Raman petrol sahasına taşınacak olan CO2 boru hattı için, mevcut yol güzergahı uzunlukları dikkate alınmıştır. Şekil 4.5'te mevcut yol güzergahları gösterilmiştir. Boru hatlarından günlük taşınacak olan CO2 kütlesi için, çimento fabrikalarının 360 gün çalıştığı varsayılmıştır. Çimento fabrikalarına ait günlük emisyon miktarları ve yapılması beklenen boru hattı uzunlukları Tablo 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5 Boru hattı uzunlukları

Tablo 4.6 Çimento fabrikaları emisyon miktarları ve boru hattı uzunlukları

Çimento Fabrikası	CO2 emisyonu (t/g)	Boru hattı uzunluğu (km)
Kurtalan	1900	65
Mardin	2388	140

Boru hattı tasarım, inşaat ve işletme maliyetleri için literatürde var olan mevcut çalışmalar, CO2'nin güvenli taşınması için, sıcaklık, viskozite, yoğunluk gibi çeşitli parametrelere dayanmaktadır ve maliyet analizleri için bir çok modelleme geliştirilmiştir. Bu çalışmada, IEA GHG 2005/2, Ecofys, Parker ve Mccollum, DL & Ogden tarafından geliştirilen boru hattı maliyet modellemeleri kullanılarak boru hattı maliyet hesaplamaları yapılmıştır.

4.2.3.1 IEA GHG 2005/2 Modeli Boru Hattı Maliyet Hesabı

Boru Çapı Hesabı

Mardin ve Kurtalan çimento fabrikaları ile Batı Raman petrol sahası arasında yapılacak olan boru hatlarının çaplarının hesaplanması için IEAGHG 2005/2 modeline ait aşağıdaki formül kullanılmıştır [79]:

$$D = [m/(0,25 * \pi * p * v)]^{0,5/0,0254} \quad (4.1)$$

Burada;

D : boru hattı çapı (inç)

m : CO2 kütle akış hızı (kg/s)

p : CO2 yoğunluğu (kg/m³)

v : akış hızı (m/s) → Bu modelde akış hızı v: 2 m/s kabul edilmektedir.

Hesaplamalarda CO2 yoğunluğu, Mccollum, DL & Ogden tarafından kabul edilen ortak parametrelere dayanarak p: 884 kg/m³ kabul edilmiştir. Hesaplanan boru çapları Tablo 4.7'de gösterilmiştir.

Tablo 4.7 Boru hattı çapları

Çimento Fabrikası	CO2 Emisyonu (kg/s)	Boru Çapı (inç)
Kurtalan	21,69	4,92
Mardin	27,26	5,52

Boru Hattı Maliyeti

IEAGHG 2005/2 modeline göre boru hattı maliyeti aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır [79]:

$$\text{Toplam Boru hattı maliyeti (€)} = FT * 10^6 * [(0,057 * L + 1,8663) + (0,00129 * L) * D + (0,000486 * L - 0,000007) * D^2] \quad (4.2)$$

Burada;

L : boru hattı uzunluğu (km)

D : boru hattı çapı (inç)

FT : Arazi faktörü (ekili alan=1,10, çayır=1,00, ormanlık=1,05, orman=1,10, taşlı çöl=1,10, <20% dağlık=1,30, >%50 dağlık=1,50)

Hesaplamalarda arazi faktörü olarak 1,30 kabul edilmiştir. IEAGHG 2005/2 modeline göre hesaplanan boru hattı maliyetleri Tablo 4.8’de gösterilmiştir.

Tablo 4.8 IEAGHG 2005/2 modeline göre toplam boru hattı maliyeti

Çimento Fabrikası	Boru hattı uzunluğu (km)	Boru çapı (inç)	Toplam Boru hattı maliyeti (€)
Kurtalan	65	4,92	8.772.859
Mardin	140	5,52	16.791.066
Toplam			25.563.925

4.2.3.2 Ecofys Model Boru Hattı Maliyet Hesabı

Ecofys modeline göre boru hattı maliyet hesabı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır [79]:

$$\text{Toplam boru hattı maliyeti (€)} = \left(1100 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}\right) * FT * D * L \quad (4.3)$$

Burada;

D : boru hattı çapı (m)

L : boru hattı uzunluğu (m)

FT : Arazi faktörü

Hesaplamalarda arazi faktörü olarak 1,30 kabul edilmiştir.

Formülde kullanılacak çap için, IEA GHG 2005/2 Modeli ile hesaplanan çaplar kabul edilerek inç-m dönüşümü yapılmıştır. Ecofys modeline göre hesaplanan boru hattı maliyetleri Tablo 4.9'da gösterilmiştir.

Tablo 4.9 Ecofys modeline göre toplam boru hattı maliyeti

Çimento Fabrikası	Boru hattı uzunluğu (m)	Boru çapı (m)	Toplam Boru hattı maliyeti (€)
Kurtalan	65000	0,124	11.525.800
Mardin	140000	0,140	28.028.000
Toplam			39.553.800

4.2.3.3 Parker Modeli Boru Hattı Maliyet Hesabı

Parker modeline göre boru hattı maliyet hesabı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır [79]:

$$\text{Malzeme Maliyeti ($) } = [330,5 * D^2 + 687 * D + 26.960] * L + 35.000 \quad (4.4)$$

$$\text{İşçilik Masrafı (\$)} = [343 * D^2 + 2.074 * D + 170.013] * L + 185.000 \quad (4.5)$$

$$\text{Diğer Maliyetler (\$)} = [8.417 * D + 7.324] * L + 95.000 \quad (4.6)$$

$$\text{Kamulaştırma Maliyeti (\$)} = [577 * D + 29.788] * L + 40.000 \quad (4.7)$$

$$\text{Toplam Boru Hattı Maliyeti (\$)} = \text{Malzemele M.} + \text{İşçilik M.} + \text{Diğer M.} + \text{Kamulaştırma M.} \quad (4.8)$$

Burada;

D : boru hattı çapı (inç)

L : boru hattı uzunluğu (mil)

Parker modeline göre hesaplanan boru hattı maliyetleri Tablo 4.10'da gösterilmiştir.

Tablo 4.10 Parker modeline göre toplam boru hattı maliyeti

Çimento Fabrikası	Boru çapı (inç)	Boru hattı uzunluğu (mil)	Toplam boru hattı maliyeti (\$)
Kurtalan	4,92	40,40	12.807.193
Mardin	5,52	87	28.151.014
Toplam			40.958.208

4.2.3.4 Mccollum & Ogden Modeli Boru Hattı Maliyet Hesabı

Mccollum & Ogden modeline göre boru hattı maliyet hesabı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır [79]:

$$\text{Ortalama – (BHM) Boru hattı m. (\$/km): } (9970 * m^{0.35}) * L^{0.13} \quad (4.9)$$

$$\text{Düşük – (BHM) Boru hattı m. (\$/km): } (8500 * m^{0.35}) * L^{0.06} \quad (4.10)$$

$$\text{Yüksek – (BHM) Boru hattı m. (\$/km): } (4100 * m^{0.50}) * L^{0.13} \quad (4.11)$$

Burada;

m : CO2 kütle akış hızı (ton/gün)

L : boru hattı uzunluğu (km)

$$\text{(TBHM) Toplam boru hattı m.: } FL * FT * L * BHM \quad (4.12)$$

Burada;

FL : Lokasyon faktörü (Avrupa =1,0)

FT : Arazi faktörü

Lokasyon faktörü olarak (Avrupa) 1,0 ve arazi faktörü olarak 1,30 kabul edilmiştir.

Tablo 4.11’de Mccollum & Ogden modeline göre km başına hesaplanan düşük, orta ve yüksek boru hattı maliyet sonuçları gösterilmiştir.

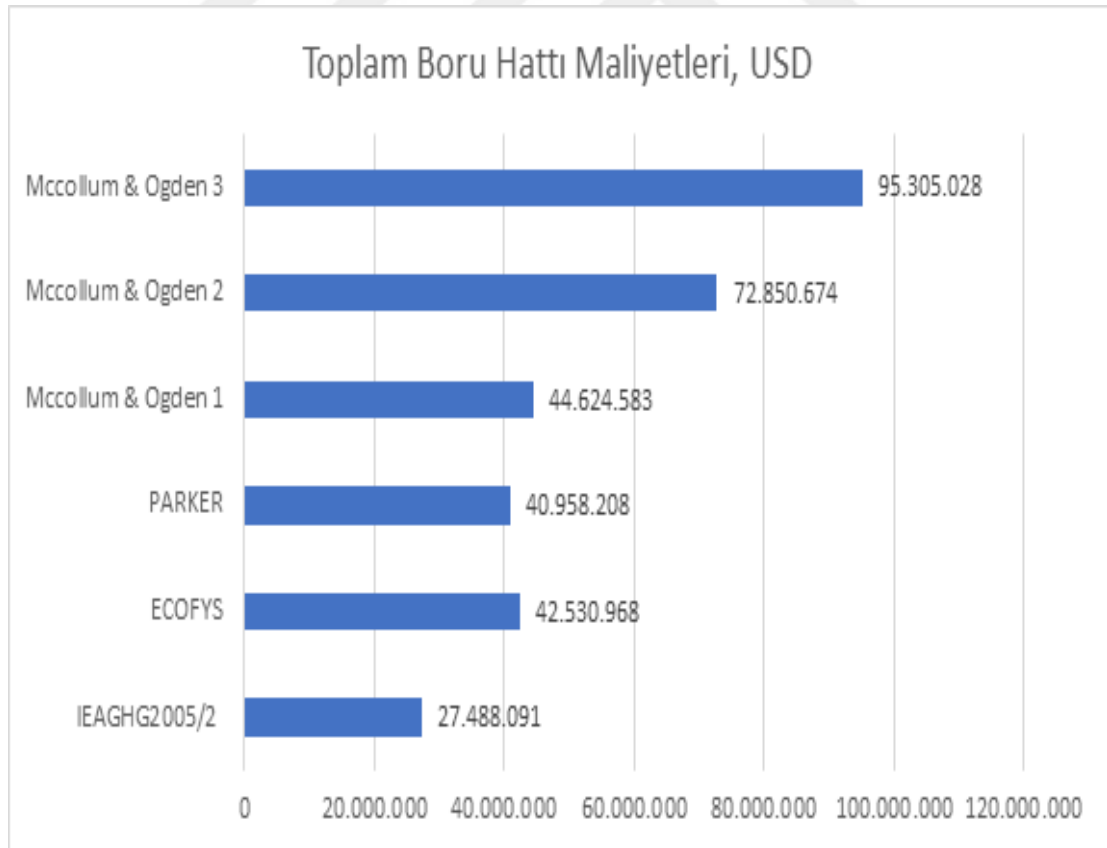
Tablo 4.11 Mccollum & Ogden modeline göre km başına hesaplanan maliyetler

Boru hattı uzunluğu (km)	CO2 emisyonu (t/g)	1-Düşük boru hattı maliyeti (\\$/km)	2-Ortalama boru hattı maliyeti (\\$/km)	3-Yüksek boru hattı maliyeti (\\$/km)
65	1900	153.376	240.956	307.496
140	2388	173.979	288.406	380.888

Tablo 4.12 Mccollum & Ogden modeline göre toplam boru hattı maliyetleri

Boru hattı uzunluğu (km)	CO2 emisyonu (t/g)	1-Düşük boru hattı maliyeti (\$)	2-Ortalama boru hattı maliyeti (\$)	3-Yüksek boru hattı maliyeti (\$)
65	1900	12.960.274,39	20.360.782	25.983.412
140	2388	31.664.308,54	52.489.892	69.321.616
Toplam		44.624.583	72.850.674	95.305.028

1 USD=0,93 € kabul edilerek tüm modellerden elde edilen boru hattı maliyetleri USD cinsinden hesaplanarak Şekil 4.6 'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.6 Farklı modellere ait boru hattı maliyetleri

Farklı modellere göre hesaplanan boru hattı maliyetleri karşılaştırıldığında, Ecofys, Parker ve Mccollum & Ogden 1 düşük maliyete dayalı tahmin modeli yaklaşımlarının kendi aralarında boru hattı maliyet hesapları açısından birbirleri ile yakın değerlerde oldukları belirlenmiştir. IEA GHG 2005/2 modeli ile hesaplanan maliyetin diğer modellere göre hesaplanan maliyetlerden çok düşük kaldığı görülmektedir. KYKD teknolojisinin yakın gelecekte trend olacağı göz önünde bulundurulduğunda, boru hattı maliyetlerinin de artacağı ve söz konusu maliyetlerin, IEA GHG 2005/2 modelinde hesaplanan değer kadar düşük olamayacağı düşünülmektedir. Aynı zamanda teknolojinin yaygınlaşma sürecinde, maliyetlerin Mccollum & Ogden 2 ortalama maliyete dayalı modellemesi ile hesaplanan değere doğru artabileceği fakat her teknolojide olduğu gibi, KYKD teknolojisinde de seçeneklerin çoğalması ve rekabet ortamının oluşması ile söz konusu maliyetlerin Mccollum & Ogden 3 yüksek maliyete dayalı modellemesi ile hesaplanan değere kadar artamayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmalara ait maliyet analizleri incelendiğinde; Mccollum & Ogden modelinin [79], MIT, Ecofys, IEA GHG PH4/6, IEA GHG 2005/2, IEA GHG 2005/3 ve Parker çalışmalarının göz önünde bulundurularak hazırlanması ve Ecofys ve Parker modelleri ile yakın sonuçlar vermesi sebebi ile boru hattı maliyet hesabı için Mccollum & Ogden modelinin düşük maliyete dayalı modellemesinin kullanılmasının daha anlamlı olacağı düşünülmektedir. Boru hattı maliyet hesabı için geliştirilen çeşitli modellerin varsayımları ve girdileri Tablo 4.13'te verilmiştir.

Mccollum & Ogden tarafından geliştirilen modelde, farklı girdi ve varsayımlar ortadan kaldırılarak, aynı ortak temel girdiler üzerinden çeşitli hesaplamalar yapılmış ve yeni bir boru hattı maliyet denklemi elde edilmiştir. Buna göre Tablo 4.14'de bu amaca yönelik dizayn için ortak kabul edilen parametreler verilmiştir.

Tablo 4.13 Boru hattı maliyet hesabı çalışmalarının varsayımları ve girdileri [79]

Girdiler ve varsayımlar	Çalışmalar						
	Ogden	MIT	Ecofys	IEA GHG PH4/6	IEA GHG 2005/2	IEA GHG 2005/3	Parker
Referans yıl	2001	1998	2003	2000	2000	2002	2000
Sermaye Geri Kazanım Faktörü [%/yıl]	15	15	-	'kullanıcıya özel'	-	-	-
İşletme [yıl]	-	-	25	-	20	25	-
İşletme ve Bakım Faktörü	toplam sermaye maliyetinin %4,0/yıl	3.100 \$/km /yıl	toplam sermaye maliyetinin %2,1/yıl	Özel denklem ile hesaplanır.	boru hattı sermayesinin %3/yıl + destek sermayesinin %5/yıl	toplam sermaye maliyetinin %2,0/yıl	-
Tesis Kapasite Faktörü [%]	-	80	-	'kullanıcıya özel'	90	-	-
Elektrik Maliyeti [/kWh]	-	-	-	'kullanıcıya özel'	0.04 €	-	-
Güçlendirici istasyonlar dahil mi? (pompa veya kompresörler)	Hayır	Hayır	Hayır	Evet/Hayır 'kullanıcıya özel'	Evet	Hayır	-
Boru Hattı Giriş Basıncı [MPa]	15	15,2	12	'kullanıcıya özel'	-	-	-
Boru Hattı Çıkış Basıncı [MPa]	10	10,3	8	'kullanıcıya özel'	-	-	-
Sürtünme Faktörü	~0.0021 (denklemlerle)	~0.0033 (Moody grafiğine göre)	0,015 - 0,020	0.015	-	-	-
CO2 Sıcaklığı [°C]	4,44 – 37,78	25	10	-	-	-	-
CO2 Yoğunluğu [kg/m ³]	-	884	800	800	800	-	-
CO2 Viskozitesi [N-s/m ²]	-	6,06 x 10 ⁻⁵	-	-	-	-	-
Arazi Faktörü	-	-	1,0	1,05 – 1,50 (araziye göre)	1,05 – 1,50 (araziye göre)	1,17	-
Lokasyon Faktörü	-	-	-	0,7 - 1,2 (lokasyona göre)	-	-	-

Tablo 4.14 Mccollum & Ogden - Ortak Tasarım Temelleri [79]

Ortak Tasarım Temelleri	
Tesis Kapasite Faktörü [%]	80
Boru Hattı Giriş Basıncı [MPa]	15,2
Boru Hattı Çıkış Basıncı [MPa]	10,3
CO2 Sıcaklığı [°C]	25
CO2 Yoğunluğu [kg/m ³]	884
CO2 Yoğunluğu @ STP [kg/Nm ³]	1,965
CO2 viskozitesi [N-s/m ²]	6.06E-05

4.2.3.5 İşletme ve Bakım Maliyeti

Boru hattı maliyet hesaplama modellerinde, işletme ve bakım maliyetleri, toplam boru maliyetinin %2 ila %4'ü olarak kabul edilmektedir. Mccollum & Ogden modeline göre bu oran %2,5 kabul edilmektedir [79]. Bu çalışmada da işletme ve bakım maliyetleri, toplam boru maliyetlerinin %2,5'i olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4.15'de Kurtalan ve Mardin çimento fabrikaları için inşa edilecek olan boru hatlarına ait işletme ve bakım maliyetleri verilmiştir.

Tablo 4.15 Boru hattı işletme ve bakım maliyetleri

Çimento Fabrikası	Boru uzunluğu (km)	Toplam boru hattı maliyeti (\$)	İşletme ve bakım maliyeti (\$)
Kurtalan	65	12.960.274,39	324.006
Mardin	140	31.664.308,54	791.608
Toplam		44.624.583	1.115.614

4.2.3.6 CO2 Akış Kompozisyonları

CO2 akışları genellikle saf değildir ve çeşitli safsızlıklar içerebilir. Akış içerisindeki safsızlıklar, akışkanın fiziksel ve termodinamik özelliklerini etkiler. CO2 akışındaki bileşimler, CO2 kaynağına bağlı olarak değişir. CO2 yakalama teknolojilerine göre

de CO₂ akışlarındaki bileşimler farklılık gösterir [80]. Tablo 4.16'da, farklı CO₂ yakalama teknolojilerindeki CO₂ akış kompozisyonları verilmiştir.

Tablo 4.16 Farklı CO₂ yakalama teknolojilerindeki CO₂ akış kompozisyonları (hacim%) [80]

Bileşen	Yanma Sonrası	Yanma Öncesi	Oksi-Yakıt
CO ₂	>99	>95,6	>85
CH ₄	< 0,01	< 0,035	-
N ₂	< 0,17	< 0,6	< 7
H ₂ S	Eser miktarda	< 3,4	Eser miktarda
C ₂₊	< 0,01	< 0,01	-
CO	< 0,001	< 0,4	< 0,075
O ₂	< 0,01	Eser miktarda	< 3
NO _x	< 0,005	-	< 0,25
SO _x	< 0,001	< 0,07	< 2,5
H ₂	Eser miktarda	< 3	Eser miktarda
Ar	Eser miktarda	< 0,05	< 5
H ₂ O	0,01	0,06	0,01

Boru hattı ile CO₂ taşınmasında, iki veya daha fazla CO₂ akışının karıştırılması, faz davranışını önemli ölçüde etkiler. Zengin CO₂ akışlarında, yoğunluk, faz davranışı ve viskozite boru hattını modellemek için önemlidir. Yakalama türüne ve yakıt saflığına bağlı olarak, CO₂ akışlarındaki safsızlıkların konsantrasyonları arasındaki farklar yüksek olabilir [80]. Tablo 4.17'de CO₂ akışlarındaki tipik safsızlıkların minimum ve maksimum mol yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.17 CO₂ akışlarındaki tipik safsızlıkların min. ve max. miktarları (%mol) [80]

	CO ₂	N ₂	O ₂	Ar	SO ₂	H ₂ S	NO _x	CO	H ₂	CH ₄	H ₂ O	NH ₃
Min. %	75	0,02	0,04	0,005	<0,01	0,01	<0,002	<0,01	0,06	0,7	0,005	<0,01
Max. %	99,95	10	5	3,5	1,5	1,5	0,3	0,2	4	4	6,5	3

Sülfür türleri gibi safsızlıklar, özellikle serbest su varlığında korozyon riski oluştururlar. Benzer şekilde, NO_x türleri nitrik asit oluşturabildikleri için

korozyona neden olurlar. Metal elementlerinden özellikle cıva, aşındırıcı etkiye sahiptir. Hidrojen, çelik boruların gevrekleşmesine neden olur. CO₂ akışlarındaki su varlığı, karbonik asitlerin ve klatrat hidratların oluşmasına neden olur [81]. Belirtilen sebeplerden dolayı boru hattı taşımacılığında CO₂ akışlarının kompozisyonları önem arz etmektedir.

4.2.4 Yakalama

Çimento sektöründe en uygun CO₂ yakalama teknolojisinin hangisi olduğuna dair kesin bir çalışma ve bunun sonucunda varılmış net bir yargı bulunmamaktadır. Mevcut çimento fabrikaları ve yeni yapılan çimento fabrikaları için, CO₂ yakalama teknolojisi ve buna bağlı olarak maliyetler değişkenlik gösterebilmektedir. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda çimento sektöründe, amin bazlı yıkama, oksi yakıt yanması ve kalsiyum döngüsü teknolojilerinin kullanılması önerilmektedir. Gelişmeler ve mevcut proses bilgileri incelendiğinde (enerji sektöründe), amin bazlı yıkama en olgun teknoloji olarak kabul edilir. Çeşitli teknolojilere ait karşılaştırma, Tablo 4.18’de verilmiştir.

Tablo 4.18 Karbon yakalama teknolojilerinin karşılaştırılması [82]

Özellik	Amin bazlı yıkama	Kalsiyum döngüsü	Oksi yakıt
Tipik yakalama oranı	>90%	>90%	>90%
Karmaşıklık	Düşük: olgun boru sonu teknolojisi, fakat yakalamadan önce kapsamlı baca gazı temizliği gerekir.	Orta: entegrasyon basit olmalıdır, fakat akışkan yataklı yanma odası işletmeciliği konusunda çimento endüstrisi yeterli bilgiye sahip değildir.	Yüksek: artan tasarım ve bakım karışıklığı, tesisin işleyişi değişir (özellikle fırın ve soğutucularda)
Çimento sürecinde büyük değişiklikler	Yok	Ön kalsinatör, ikili akışkan yataklarla değiştirilir. Buhar döngüsü ve ilgili ekipman gerekir.	Yeni ön ısıtıcılar ve ön kalsinatör gerekir. Brülör ve soğutucu tasarımlarında değişiklikler gerekir. Değişiklik yapılan ünitelerde yanlış hava akışlarının azaltılması gerekir.
Yakalama tesisi ayak izi	Yakalama ünitesinin yanı sıra, seçilmiş katalitik indirme ve baca gazı kükürt giderme kurulumu gerektirmesi nedeni ile yüksektir.	Oksi yakıt teknolojisine göre daha küçüktür. Suyu ve klorürü uzaklaştırmak için CO ₂ işleme ünitesi gerekir. Buhar döngüsü için kurulum gerekir.	Büyük hava ayırma ünitesi, atık ısı geri kazanımı ve CO ₂ işleme ünitesi sebebi ile yüksektir.
Çimento kalitesi	Herhangi bir değişiklik olmamaktadır.	Laboratuvar ölçeğinde herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir.	Laboratuvar ölçeğinde herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir.

Tablo 4.19 Karbon yakalama teknolojilerinin karşılaştırılması [82] (devamı)

Modifiye	Çimento fabrikasında birkaç değişiklik gerektirdiği için kolaydır. Çimento tesisine fiziksel bağlantı için yıllık kapatma süresi yeterlidir. Yakalama tesisi için gereken alan sorun olabilir.	Saptırma ve ikame tasarımlar gerektirdiği için uyarlanabilirliği mümkündür fakat ikili akışkan yatakların kurulumu uzun süreli kapatmaya neden olabilir. Yakalama tesisi için gereken alan sorun olabilir.	Teknik olarak mümkündür fakat uzun süreli pratiklik için şüpheler vardır. Mevcut birimlerin değiştirilmesi ve yeni ekipmanların kurulumu nedeni ile uzun süreli kapatma gerekir.
-----------------	--	--	--

Yanma sonrası yakalama teknolojisi, mevcut çimento tesisleri için daha az modifiye gerektirmektedir. Özellikle MEA kullanılan amin bazlı yıkama teknolojisi çalışmalarının daha fazla olması ve en olgun teknoloji olarak kabul edilmesi sebebi ile Mardin ve Kurtalan çimento fabrikalarında da MEA kullanılarak amin bazlı yıkama teknolojisinin uygulanması önerilmektedir.

MEA solvent ile yakalama teknolojisinde, baca gazı absorpsiyon kolonunda çözelti ile temas ettirilir ve CO₂ çözelti tarafından absorplanır. Daha sonra, CO₂ içeriği yönünden zengin olan çözelti, rejenerasyon bölümünde 100-200 °C sıcaklıklarda buhar yardımı ile CO₂'den sıyrılır. Su buharı yoğunlaştırılır ve %99'luk CO₂ içeriğine sahip olan çıkış gazı son kullanma veya depolama için sıkıştırılır. Rejenere edilen solvent 40-65 °C'ye soğutulur ve absorpsiyon kolonuna geri beslenir [83].

Teknolojinin kullanımında aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

Kükürt Dioksit (SO₂): Çimento fabrikasından çıkan baca gazındaki SO₂ konsantrasyonu, kullanılan farin içerisindeki sülfür konsantrasyonuna bağlıdır. Amin bazlı yıkama teknolojisinde aminlerin asidik bileşikler ile reaksiyonu sonucu oluşan tuz formları, amin yıkama sisteminde çözünmeyecektir [65]. Amin absorpsiyon prosesinde giriş SO₂ konsantrasyonu 10 ppmv (6% O₂) ile sınırlandırılmalıdır [84].

Azot Dioksit (NO₂): Baca gazı içindeki NO_x, MEA absorpsiyon prosesinde çözücü bozunmasına sebep olan bir diğer problemdir. Özellikle NO₂, ısıya dayanıklı tuzlar oluşturmak üzere reaksiyona girer [85]. Çimento fırınlarındaki NO_x emisyonları genellikle <200 ve 3000 mg/Nm³ arasında

değişir [86]. Fakat tipik olarak NO_x'un %10'dan daha azı NO₂'dir ve kalan çoğunluğu NO formundadır [87]. Baca gazı kükürt giderme için max. NO₂ konsantrasyonun 7 mg/m³ (3,4 ppmv (6% O₂)) olması önerilir [88].

Toz: Çimento üretim prosesinde baca gazındaki toz miktarı genelde 3000 mg/Nm³ civarındadır [86]. Bu tozlar genelde elektrostatik filtre veya torbalı filtreler ile tarafından tutulur. Toz varlığı, amin absorpsiyon prosesinin verimini düşürmektedir, bu sebeple toz miktarı 15 mg/Nm³'ün altında olmalıdır [84].

Ek Buhar Gereksinimleri: MEA kullanılan amin bazlı yıkama teknolojisinde en büyük sorunlardan biri buhar ihtiyacının fazla olmasıdır. Buhar koşulları genelde 3,5 bar ve 140-150 °C'dir [4].

İndirgeyici Koşullar: Ön ısıtıcı, ön kalsinatör ve fırın içerisindeki O₂ konsantrasyonu >2% (w/w) olmalıdır. MEA ile CO₂ absorpsiyonu için gereken O₂ içeriği >1.5% (v/v) olmalıdır [84].

MEA Absorpsiyonu İçin Isı Azaltma: Çimento prosesinde farin değirmeninden çıkan baca gazının ısısı yaklaşık 110 °C'dir. MEA ile CO₂ absorpsiyonu için bu ısının yaklaşık 50 °C'ye kadar soğutulması gerekir. Bu soğutma, baca gazı kükürt giderme ünitesinde gerçekleştirilebilir [4].

Diğer Gazlar: Çimento prosesinde baca gazında küçük miktarlarda hidroklorik asit bulunabilir. Tipik olarak konsantrasyonlar yaklaşık 8 mg/Nm³ civarındadır. Herhangi bir asidik bileşenin varlığı, MEA absorpsiyon sürecinin verimini azaltır [87].

Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğine (SKHKKY) göre, Türkiye'de çimento sektörü için uyulması gereken toz ve gaz emisyon değerleri Tablo 4.19'da verilmiştir.

Tablo 4.20 Çimento sektörü emisyon limit değerleri – SKHKKY [89]

Ünite adı	Toz		SO ₂	NO _x		NH ₃
Döner Fırınlarda ve Döner fırın yanma gazları çıkışı olan bacalar	Mevcut olan tesislerde 31/12/2026 tarihine kadar	Yeni ve 01.01.2027'den sonra mevcut olan tesislerde	300 mg/Nm ³	Mevcut olan tesislerde 31/12/2026 tarihine kadar	Yeni ve 01.01.2027'den sonra mevcut tesislerde	
	50 mg/Nm ³	20 mg/Nm ³		800 mg/Nm ³	Ön ısıtıcı fırınlarda 450 mg/Nm ³ Uzun rotative ve lepol fırın tipleri 800 mg/Nm ³	
SNCR Kullanımı						50 mg/Nm ³
Soğutma ve öğütme iş. İçin	50 mg/Nm ³	20 mg/Nm ³				
Diğ. prosesler	50 mg/Nm ³	10 mg/Nm ³				

MEA bazlı absorpsiyon teknolojisi ile CO₂ yakalama, çimento fabrikalarında bazı modifikasyonlara gidilmesini zorunlu kılmaktadır. Genel olarak çimento tesislerinde MEA bazlı yakalama teknolojisinin kullanılabilmesi için dikkat edilmesi gereken kriterler Tablo 4.20’de verilmiştir.

Tablo 4.21 Çimento fabrikalarının modifiye potansiyelini değerlendirmek için kriterler listesi [90]

Kriterler	Açıklama
A. Gerekli alan	- Olası kombine ısı ve güç tesisi içeren yanma sonrası yakalama ünitesi için yeterli alan - CO ₂ yakalama ünitesinin alanı, ön ısıtıcıya ve fırına yakın olmalıdır. - CO ₂ 'yi sıkıştırmak ve geçici olarak depolamak için yeterli alan
B. Depolama alanına erişim	- Yakalanan karbondioksitin potansiyel depolama alanına taşınması - CO ₂ 'nin seçilen depolama sahasına erişimi için sağlık ve güvenlik endişelerinin olmayacağı taşıma yöntemi ve rotası seçilmesi
C. Su temini ve proses suyu arıtımı	- Yanma sonrası yakalama tesisi için proses ve soğutma suyu temini - Yeni inşa edilen enerji üretim tesisi için soğutma suyu temini - Atık su arıtma gereksinimi

Tablo 4.22 Çimento fabrikalarının modifiye potansiyelini değerlendirmek için kriterler listesi [90] (devamı)

Kriterler	Açıklama
D. Yeterli güç ve buhar kaynağı	- Çimento fabrikası için mevcut enerji kaynağı - Mevcut enerji kaynağından ön ısıtıcıya ve fırına olan mesafe (uygulanabilir ise) - Modifiye için diğer büyük enerji santralleri ile ortak yerleşim potansiyeli (uygulanabilir ise)
E. Çimento üretimi için teknoloji	- Farin tipi (kuru, yarı kuru, yarı ıslak veya yaş) - Fırın tasarımı - Tesis hacmi - Kalan tesis ömrü - Elektrostatik filtre - Seçilmiş katalitik indirmege - Baca gazı kükürt giderme
F. Baca gazı özellikleri	- Atık gaz akışındaki CO2 konsantrasyonu - Çözücü bozunmasına sebep olabilecek diğer gazların konsantrasyonu (NO_x,SO_x,toz) - Atık gaz akışındaki diğer safsızlıklar - Ek enerji üretim tesislerinden (ör. kombine ısı ve güç tesisi) CO2 yakalamak için stratejiler belirlenmesi

Çimento tesislerinde CO2 yakalama teknolojisi maliyetlerini etkileyen bir çok parametre bulunmaktadır. Seçilmiş katalitik indirgeme, baca gazı kükürt giderme, CO2 sıyırıcı, eşanjör (ısı değiştirici), absorpsiyon kulesi, arıtma üniteleri, solvent tipi, amonyak, soğutma suyu, elektrik tüketimi, ısı tüketimi, buhar tüketimi, yakıt tüketimi gibi değişkenler maliyet analizi hesaplamalarında dikkate alınmaktadır. Literatürde farklı senaryolar için karbon yakalama/azaltım maliyetleri hesaplanmıştır. Söz konusu maliyetler, özellikle elektrik, ısı, buhar tedarikine göre önemli değişiklikler göstermektedir. Ayrıca ülkelerin yatırım ve işletme maliyetlerindeki farklılıkların yanı sıra, karbon piyasası da karbon yakalama/azaltım maliyetlerini etkilemektedir. Çimento sektöründe MEA kullanılan amin bazlı yıkama teknolojisi için yapılan çalışmalardan elde edilen enerji tüketimi ve sermaye maliyetleri Tablo 4.21’de ve literatür çalışmalarından elde edilen karbon yakalama/azaltım maliyetleri ise Tablo 4.22’de gösterilmiştir.

Tablo 4.23 Çimento sektöründe MEA solvent bazlı CO₂ yakalama teknolojisi üzerine tekno-ekonomik çalışmaların sistematik incelenmesi [91]

Yakalama Teknolojisi	Detaylar	Enerji tüketimi (GJ/t CO ₂)			Yakalama Oranı %	Maliyet	Döviz	Ülke
		Yakıt	Buhar	Elektrik*				
MEA	Modifiye, yeni inşaat. Buhar, kojenerasyon ünitesinde üretilir. Gereken ısıнын %15'i atık ısıdan elde edilir.	7,61	0	-0,16	90	541-545 (TSM)	M€ ₂₀₁₃	Avrupa
MEA	Modifiye, yeni inşaat. Buhar, gaz kazanında üretilir. Gereken ısıнын %15'i atık ısıdan elde edilir.	10,68	0	-1,73	90	440-443 (TSM)	M€ ₂₀₁₃	Avrupa
MEA	Modifiye. Buhar, gaz kazanında üretilir. Atık ısı 6 MW	3,1-3,3	6-9 *10E ⁻⁵	0,74-0,81	60-90	286-309 (TTM)	M€ ₂₀₁₄	Norveç
MEA	Modifiye. Isı geri kazanımı	3,13	0	-0,04	85	210 (TYM)	M\$ ₂₀₁₂	Çin
MEA	Modifiye. Atık ısı 31 MW Kalan ısı için gaz kazanı.	0	0	0,15-0,29	42-85	75-120 (CAPEX)	M€ ₂₀₁₄	Norveç
MEA	Modifiye. Buhar için gaz kazanı.	2,94	0	0,15	90	270	M€ ₂₀₁₄	Avrupa
MEA	Kojenerasyon ünitesi. İthal elektrik.	14	0	-0,31	95	233	M€ ₂₀₁₄	Avrupa

*TSM : Toplam sermaye maliyeti, TTM : Toplam tesisi maliyeti , TYM : Toplam yatırım maliyeti * : Elektrik tüketimindeki negatif değerler, fazla enerjinin, ihraç edilen ve üçüncü bir tarafa satılan yerinde bir enerji santralinde üretildiğini gösterir.*

Tablo 4.24 MEA solvent kullanılan amin bazlı yıkama teknolojisi CO2 yakalama/azaltım maliyet karşılaştırması

Literatür	Ülke	Çimento tesisi kapasitesi	CO2 yakalama maliyeti	CO2 azaltım maliyeti
Barker vd. [4]	İskoçya	1 Mt çimento/yıl	59,6 €/tonCO2 (64,07 USD/t CO2)	107,4 €/t CO2 (115,45 USD/t CO2)
Stefania Osk Gardarsdottir vd. [9]	Avrupa Ülkeleri	1 Mt klinker/yıl	-	80,2 €/t CO2 (86,21 USD/t CO2)
Peter Markewitz vd. [7]	Almanya	1 Mt klinker/yıl	54,4 – 63,6 €/tonCO2 (58,48 – 68,37 USD/t CO2)	77,1 – 115 €/t CO2 (82,88 – 123,62 USD/t CO2)
Minh T. Ho vd. [92]	Avustralya	-	-	68 USD/t CO2
Jakobsen vd. [5]	Norveç	1,2 Mt çimento/yıl	-	100 – 150 €/t CO2 (107,49 – 161,24 USD/t CO2)
Xi Liang vd. [90]	Çin	2 Mt çimento/yıl	-	68 USD/t CO2
Wenji Zhou vd. [6]	Çin	5000ton çimento/gün	-	67 – 126 USD/t CO2

(1 USD=0,93 € kabul edilerek dönüşüm yapılmıştır.)

Tablo 4.25 MEA solvent kullanılan CO2 yakalama teknolojisi işletme parametreleri [70]

Parametreler	Birim
Klinker üretimi	t/sa
Yakıt	t/sa
Elektrik enerjisi	MW
Buhar enerjisi	MW
Soğutma suyu	t/sa
MEA	t/sa
Proses suyu	t/sa
Desülfirizasyon için NaOH çözeltisi	t/sa
Seçiçi katalitik indirgeme için amonyak çözeltisi	t/sa

Literatürde hesaplanan maliyetler göz önüne alındığında, CO₂ azaltım maliyetinin en az 67 USD/t CO₂ ve en fazla 161,24 USD/t CO₂ olduğu görülmektedir. Mardin ve Kurtalan çimento fabrikaları için yapılacak olan karbon yakalama tesislerinin CO₂ azaltım maliyetlerinin de literatür çalışmalarından elde edilen aralıkta olacağı tahmin edilmektedir. Her iki çimento fabrikası için daha net ve kesin maliyet analizlerinin belirlenmesi amacıyla daha kapsamlı çalışmalar yapılmalı ve farklı senaryolar geliştirilerek maliyet hesaplamaları gerçekleştirilmelidir. Genel olarak işletme maliyetleri için dikkate alınması gereken parametreler Tablo 4.23'te verilmiştir. MEA solvent kullanılan CO₂ yakalama teknolojisinin çimento fabrikalarına uyarlanması, çimento fabrikalarında kullanılan yakıt türleri, baca gazı çıkış kalitesi ve buna göre baca gazı arıtımı, elektrik ve buhar enerjisi kaynağı, maliyeti etkileyecek olan en önemli parametrelerdir.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Aralık 2015'te Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Taraflar Konferansı'nda 195 ülkenin onayıyla kabul edilen Paris Anlaşması, küresel sıcaklık artışını sanayi devrimi öncesine göre 2°C'nin altında, hatta 1,5°C ile sınırlamayı amaçlar. Paris Anlaşması, sera gazı emisyonlarının mümkün olan en kısa sürede azaltmayı hedeflemekte ve yüzyılın ikinci yarısında net sıfır emisyona ulaşmayı planlamaktadır [2].

Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosunda KYKD net sıfır emisyon hedefine ulaşmada önemli rol oynamaktadır. KYKD ile CO₂ kalıcı olarak yer altında depolanabilir veya çeşitli endüstrilerde kullanılabilir. Ayrıca karbon yakalama ve depolama ile biyoenerji üretimi veya doğrudan havadan yakalama depolama teknolojileri negatif emisyon sonucunu doğurabilmektedir. KYKD'nin, CO₂ emisyonlarının kümülatif azaltımına %15 oranında katkıda bulunması beklenmektedir. Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosunda, 2070 yılında net sıfır emisyon hedefine ulaşıldığı ve 10 Gt CO₂ yakalanıyor olacağı varsayılmaktadır [2].

Endüstri sektöründe, özellikle çimento, kimyasal hammadde ve çelik üretimindeki CO₂ emisyonlarını yakalamak için KYKD önemli bir adımdır. Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosuna göre, 2070 yılında yakalanacak olan toplam CO₂ emisyonlarının %30'u (yaklaşık 2,9 Gt CO₂) endüstri sektörüne ait olacaktır. Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosuna göre, 2070 yılına kadar KYKD ile azaltılacak olan kümülatif emisyonların %45'ini çimento, demir-çelik ve kimyasal üretim sektörlerinin oluşturması beklenmektedir. 2030 yılından 2070 yılına kadar, endüstri sektöründen CO₂ yakalamamanın 24 kat artacağı ve 2070 yılında endüstri sektöründe, çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının %90'ının, kimya ve demir çelik üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının ise %75'inin yakalanacağı beklenmektedir. Bunun gerçekleşmesi için, 2070 yılına kadar her yıl yaklaşık 40 çimento fabrikasının, 15'ten fazla kimyasal fabrikasının ve 10'dan fazla çelik fabrikasının CO₂ yakalama teknolojisi ile donatılması gerekmektedir [2].

Betonun hammaddesi olan çimento sektörü, Dünya çapında endüstriyel kaynaklardan oluşan küresel antropojenik CO₂ emisyonlarının %27'sinden sorumludur. Çimento üretiminden kaynaklanan doğrudan emisyonlar, klinkerin üretildiği kalsinasyon adı verilen kimyasal süreçte meydana gelmektedir. Bu emisyonlar, klinkerin hammaddesi olan kireçtaşı yerine alternatif malzemelerin kullanılması, klinker ihtiyacını azaltmak için uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi çimento esaslı malzemelerin kullanılması veya karbon yakalama depolama ile azaltılabilir. Ayrıca çimento üretimi enerji yoğun bir süreçtir ve genellikle enerji kaynağı olarak ucuz olan kömür tercih edilmektedir. Biyoenerji ve atık maddeler gibi alternatif yakıtlar bir seçenek olsa da, sürdürülebilir biyokütle mevcudiyeti sınırlıdır ve yenilenemeyen atıkların karbon ayak izlerinin oldukça değişken olması sebebi ile bazı durumlarda kömürden daha fazla emisyon oluşmasına sebep olabilmektedirler. 2070 yılına gelindiğinde, klinker üretiminin %80 oranında KYKD ile donatılacağı ve 2070 yılına kadar sektörden kümülatif olarak 40 Gt CO₂ yakalanması beklenmektedir. Enerji verimliliğinin artırılması, hammadde veya yakıt ikamesi gibi CO₂ azaltım yöntemlerinin maliyetleri, genel olarak bölgesel hammadde mevcudiyetine ve teknolojik gelişmelere göre farklılık göstermektedir. CO₂ fiyatı 80 – 130 USD/t olduğunda (klinker/çimento oranı ve KYKD maliyetlerine bağlı olarak), KYKD teknolojisinin diğer CO₂ azaltım yöntemlerine göre oldukça rekabetçi olması beklenmektedir [2]. Küresel çimento üretiminin 2050 yılına kadar %12-23 oranında büyümesi beklenmektedir ve Çin, küresel çimento üretiminin %56'sını oluşturmaktadır. 2019 yılında çimento sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları 1,57 Gt CO₂'ye ulaşmıştır [64].

2020 yılı itibari ile Türkiye, Dünya çimento sektörü sıralamasında ilk 10'da yer almaktadır ve 55 entegre tesis ve 21 öğütme tesisine sahiptir. Bu çalışmada çimento üretiminde Dünya çapında önemli paya sahip olan Türk çimento sektörü için KYKD teknolojisi ele alınmıştır. Türkiye'de, 2018, 2019 ve 2020 yıllarındaki çimento üretim miktarları sırası ile 72.544 Mt, 56.700 Mt ve 72.300 Mt'dir. 2018, 2019 ve 2020 yıllarındaki klinker üretim miktarları sırası ile 70.345 Mt, 57.800 Mt ve 71.770 Mt'dir. IPCC yönergelerinde Tier 2 yaklaşımı ile ton klinker başına ortaya çıkan CO₂ emisyon miktarları hesaplanmıştır. Hesaplama, Ulusal Sera Gazı Envanteri'nde belirtilen, Türkiye için emisyon faktörü değeri 0.516 ton

CO₂/ton klinker ve emisyon düzeltme faktörü 1.02 kabul edilmiştir. 2018, 2019 ve 2020 yıllarına ait ton klinker başına ortaya çıkan CO₂ emisyon miktarları sırası ile 37.024 Mt, 30.421 Mt ve 37.774 Mt'dir.

Türkiye'de CO₂ depolama alanı potansiyeli olan kömür damarları, derin tuzlu akiferler, tükenmiş petrol, gaz ve kömür rezervleri hakkında kapsamlı araştırma ve depolama kapasitelerine ait yeterli bilgi bulunmamaktadır. Jeotermal sahalarda CO₂ depolama için pilot çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. CO₂ ile petrol üretimi ise Türkiye'de yıllardır yapılmaktadır ve yeterli teknik bilgiler mevcuttur. Bu sebeple CO₂ depolama seçeneği olarak, çimento fabrikalarından yakalanan CO₂'nin petrol üretiminde kullanılması önerilmiştir. TÜBİTAK, KAMAG Projesi 106G110 (2009) ve ODTÜ-PAL tarafından yürütülen Düşük Karbon Geliştirme Projesi (2017) sonucunda Batman, Adıyaman ve Trakya bölgelerinin CO₂ depolama kapasiteleri belirlenmiştir. Bu çalışmada, Batman bölgesi 79.548.418,74 ton CO₂ depolama kapasitesine sahip olduğu için depolama alanı olarak seçilmiştir. Batman bölgesinde yer alan Batı Raman petrol sahasının, yerinde ve üretilebilir rezerv miktarının, yine Batman bölgesinde bulunan Raman, Şelmo ve Garzan petrol sahalarına göre daha fazla olması sebebi ile, çimento fabrikalarından tedarik edilecek CO₂'nin Batı Raman petrol sahasında kullanılması önerilmiştir. CO₂ tedariği için Siirt ilindeki Limak Kurtalan Çimento Fabrikası ve Mardin ilindeki Oyak Mardin Çimento Fabrikası seçilmiştir. Kurtalan çimento fabrikasının çimento ve klinker üretim miktarı sırası ile 1.242.000 t/y ve 779.700 t/y'dir. Mardin çimento fabrikasının çimento ve klinker üretim miktarı sırası ile 2.000.000 t/y ve 980.191 t/y'dir. Her iki çimento fabrikasına ait ton klinker başına ortaya çıkan CO₂ emisyon miktarları Tier 2 yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Kurtalan çimento fabrikasında klinker üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyon miktarı 410.371 t/y ve Mardin çimento fabrikasında klinker üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyon miktarı 515.894 t/y'dir. Söz konusu emisyon miktarları yalnızca klinker üretimi sonucu oluşan emisyon miktarlarını oluşturmaktadır. Çimento tesisinden yakalanacak olan CO₂ emisyonları için, enerji kaynaklı emisyonların da hesaplanması gerekir. Her iki çimento tesisi için, kullanılan fosil yakıt ve alternatif yakıtların miktarları ve türleri bilinmediğinden, klinker üretimi dışında kaynaklanan CO₂ emisyonları için literatürden

yararlanılmıştır. Klinker üretiminin, çimento üretiminden kaynaklanan CO2 emisyonlarının yaklaşık %60'ını oluşturduğu kabul edilerek, enerji kaynaklı CO2 emisyonları hesaplanmıştır. Kurtalan çimento fabrikasında enerji kaynaklı CO2 emisyon miktarı 273.581 t/y ve Mardin çimento fabrikasında enerji kaynaklı CO2 emisyon miktarı 343.930 t/y olarak hesaplanmıştır. Kurtalan ve Mardin çimento fabrikalarına ait toplam CO2 emisyon miktarları sırası ile 683.952 t/y ve 859.824 t/y olmakla beraber, her iki tesisten Batı Raman petrol sahasına tedarik edilecek olan CO2 miktarı toplam 1.543.776 t/y'dir. Batı Raman petrol sahasının CO2 enjeksiyonu ile ilave üretim kapasitesi 28 milyon varildir. 1 ton CO2 enjeksiyonu karşılığında yaklaşık 4,5 varil ham petrol üretimi gerçekleştirilmektedir. Kurtalan ve Mardin çimento fabrikalarından tedarik edilecek CO2 ile, Batı Raman petrol sahasında yılda 6,95 milyon varil ilave ham petrol üretimi gerçekleştirilebilecektir.

Kurtalan ve Mardin çimento fabrikalarından tedarik edilen CO2'nin, Batı Raman petrol sahasına boru hattı ile taşınması önerilmiştir Her iki çimento fabrikasından, Batı Raman petrol sahasına olan uzaklık için mevcut yol güzergahı uzunlukları dikkate alınmıştır. Kurtalan çimento fabrikasının Batı Raman petrol sahasına uzaklığı 65 km ve Mardin çimento fabrikasının Batı Raman petrol sahasına uzaklığı 140 km'dir. Boru hatlarında günlük taşınacak CO2 emisyon miktarı için, çimento fabrikalarının 360 gün çalıştığı varsayılmıştır. Hesaplamalarda arazi faktörü 1,30 ve lokasyon faktörü 1,0 olarak kabul edilmiştir. Boru hattı maliyet hesabı için, IEA GHG 2005/2, Ecofys, Parker ve Mccollum, DL & Ogden tarafından geliştirilen boru hattı maliyet modellemeleri kullanılarak boru hattı maliyet hesaplamaları yapılmıştır. Mccollum & Ogden modeli, düşük-orta ve yüksek olmak üzere 3 farklı boru hattı maliyet hesabına dayanmaktadır, bu çalışmada düşük boru hattı maliyet hesabı dikkate alınmıştır.

Kurtalan-Batı Raman boru hattı için IEA GHG 2005/2, Ecofys, Parker ve Mccollum, DL & Ogden modellemelerine göre hesaplanan maliyetler sırası ile, 8.772.859 (€), 11.525.800 (€), 12.807.193 (\$) ve 12.960.274 (\$) 'dır. Mardin-Batı Raman boru hattı için IEA GHG 2005/2, Ecofys, Parker ve Mccollum, DL & Ogden modellemelerine göre hesaplanan maliyetler sırası ile, 16.791.066 (€), 28.028.000 (€), 28.151.014 (\$) ve 31.664.308 (\$) 'dır. Kurtalan ve Mardin çimento fabrikalarından, Batı Raman petrol sahasına inşa edilecek olan boru

hatları için (1 USD=0,93 € kabul edilerek) IEA GHG 2005/2, Ecofys, Parker ve Mccollum, DL & Ogden modellemelerine göre hesaplanan toplam maliyetler sırası ile, 27.488.091 (\$), 42.530.968 (\$), 40.958.208 (\$) ve 44.624.583 (\$)'dır.

Mccollum & Ogden 2 modeli, MIT, Ecofys, IEA GHG PH4/6, IEA GHG 2005/2, IEA GHG 2005/3 ve Parker modellemelerinin tümünün göz önünde bulundurularak hazırlanması ve Ecofys ve Parker modelleri ile yakın değerlerde sonuç vermesi sebebi ile boru hattı maliyet hesabı için Mccollum & Ogden modelinin düşük maliyete dayalı modellemesinin kullanılmasının boru hattı maliyet hesaplamalarında daha gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesini sağlayacağı düşünülmektedir.

Çimento sektöründe CO2 yakalama teknolojisi olarak, amin bazlı yıkama, oksijen yakıt yanması ve kalsiyum döngüsü teknolojilerinin kullanılması önerilmektedir. Enerji sektöründe yıllardır kullanılan amin bazlı yıkama teknolojisi, en olgun teknoloji olarak kabul edilmekte ve mevcut çimento fabrikalarına daha az değişiklik ile uyarlanabilmesi sebebi ile çimento sektörü için de önde gelen teknoloji olarak kabul edilmektedir. Literatürde, yeni yapılan çimento fabrikalarının oksijen yakıt yanma teknolojisi ile kurulmasının CO2 azaltım maliyetlerinin daha az olmasını sağladığı kanıtlanmıştır fakat bu çalışmada, Kurtalan ve Mardin çimento fabrikalarının işletme halinde olması ve daha az modifiye gerektirmesi nedeni ile her iki fabrika için amin bazlı yıkama teknolojisinin kullanılması önerilmiştir. Literatürde, amin bazlı yıkama teknolojisinde çözücü olarak genelde MEA kullanılmıştır. MEA kullanılan amin bazlı yıkama teknolojisi yüksek buhar ve elektrik gerektirmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, gerekli ek üniteler, atık ısı geri kazanımı, buhar ve elektrik kaynakları, yakıt türü, karbon vergisi gibi parametrelerin CO2 azaltım maliyetini etkilediği görülmüştür. İncelenen literatür çalışmalarında, CO2 azaltım maliyetinin en az 67 USD/t CO2 ve en fazla 161,24 USD/t CO2 olduğu görülmüş ve Kurtalan ve Mardin çimento fabrikaları içinde CO2 azaltım maliyetinin bu aralıkta olacağı düşünülmüştür.

Bu tez kapsamında yapılan incelemeler neticesinde Dünya'da uygulanan karbon yakalama, taşıma, kullanma ve depolama hususlarında Türkiye'de KYKD

teknolojinin uygulanması durumunda aşağıdaki önerilerin dikkate alınmasının uygun olacağı düşünülmektedir:

- Dünya petrol üretimi çeşitli yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Türkiye günlük ham petrol üretimi yaklaşık 49.000 varil/gün civarındadır. Ham petrol üretilebilirliğinde, Dünya ortalaması %25-35 arası iken Türkiye ortalaması %15-20 seviyelerindedir. Petrol sahalarındaki üretimin düşük olma sebeplerinden biri, petrol üretim artırma yöntemlerinin yeteri kadar kullanılmamasıdır. Türkiye'deki petrol sahalarından petrol üretiminin arttırılabilmesi için, yeni teknoloji ve üretim artırma yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Türkiye'deki petrol üretim sahalarının olgunluğuna ulaşmış durumdadır ve birkaç yıl içinde Türkiye'de ham petrol üretiminde hızlı bir düşüş beklenmektedir. Bu düşüşü ötelemek ya da azaltmak için üçüncül üretim yöntemlerinin (termal yöntemler, kimyasal yöntemler ve gaz enjeksiyonu) uygulanmasına ağırlık vermek kaçınılmaz görünmektedir. Türkiye'de halihazırda uygulanan tek üçüncül üretim yöntemi, Batı Raman petrol sahasında uygulanan CO₂ öteleme enjeksiyonudur. İlk olarak 1986'da, Batı Raman sahasına 90 km uzaklıkta bulunan ve doğal CO₂ sahası olan Dodan sahasından, boru hattı ile CO₂ temin edilerek EOR işlemi için kullanılmış ve olumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Sahada günlük olarak ortalama 30-40 milyon ft³ CO₂ enjeksiyonu yapılarak ham petrol üretimi gerçekleştirilmektedir. Mevcut sahaya bugüne kadar 350 milyar ft³'den fazla CO₂ enjekte edilmiş, bu sayede 82 milyon varilden fazla ilave ham petrol üretimi artışı sağlanmıştır [75].

Bu çalışmada, Kurtalan ve Mardin çimento fabrikalarından Batı Raman sahasına tedarik edilecek olan CO₂ miktarı ve üretilebilecek ham petrol miktarı hesapları, Dodan sahasından Batı Raman sahasına temin edilen CO₂ miktarı hesaba katılmadan yapılmıştır. Batı Raman sahasındaki günlük petrol üretim kapasitesine ve CO₂ ihtiyacına göre, Dodan sahasındaki CO₂ rezervi tükenene kadar, Dodan sahasından temin edilen CO₂'ye ek olarak, yalnızca Kurtalan veya yalnızca Mardin çimento fabrikasından CO₂ temin edilmesi yeterli olabilir. Boru hattı maliyetini düşürmek için, Kurtalan çimento fabrikasından temin edilecek olan CO₂

gazının, daha kısa bir boru hattı ile Dodan-Batı Raman boru hattına bağlantısının sağlanıp sağlanamayacağı araştırılmalıdır. Batman bölgesinde bulunan petrol sahalarındaki toplam ilave üretim miktarı yaklaşık 190,4 milyon varildir. Bölgedeki ham petrolün üretilmesi için Kurtalan ve Mardin çimento fabrikalarından temin edilecek CO₂ büyük öneme sahiptir. KYKD teknolojisinin Türk çimento sektöründe uygulanmaya başlanması ile Türkiye'deki önemli petrol sahalarında, üçüncül üretim yöntemlerinin uygulanması arttırılabilir.

Ayrıca, CO₂ enjeksiyonu ile yapılan ham petrol üretimi için alınan devlet hissesinde indirim yapılması, petrol şirketleri için iyi bir motivasyon olabilir. Düşük ham petrol fiyatları, ham petrol üretim trendinin azalması ve petrol aramaları için Türkiye'nin zorlu jeolojik koşulları göz önüne alındığında, böyle bir düzenlemenin uygulamaya konulması uzun vadede olumlu sonuçlara yol açabilir [75].

- Bölgedeki petrol üretiminin sona ermesi halinde, bölgeye yakın olan çimento fabrikalarının oluşturduğu CO₂ emisyonlarının, tükenmiş petrol rezervlerinde kalıcı olarak depolanabilirliği araştırılabilir.
- Kümelenmiş emisyon kaynakları için ortak boru hatları kullanmak, boru hattı maliyetlerini düşürecektir.
- Türkiye'de KYKD'nin uygulanması için yatırım yapılabilir depolama rezervlerinin belirlenmesine ihtiyaç vardır.
- Bazaltik kayalar gibi reaktif kayaların olduğu bölgeler potansiyel CO₂ depolama alanlarıdır ve Türkiye'de depolama alanı olarak varlığı ve uygulanabilirliği araştırılabilir.
- Türkiye'de KYKD teknolojisinin uygulanabilmesi için teknik bilgilerin arttırılması gerekmektedir.
- Teknolojinin yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması sebebi ile devlet teşviği gereklidir.
- AB Karbon Yakalama ve Depolama Direktifi'nin Türkiye'de uyumlaştırılmasına karar verilmesi halinde hükümet, KYKD ile uyumlu olan gerekli teknik, ekonomik ve düzenleyici çerçeveyi tanımlamalıdır.

- Türkiye’de karbon ticareti sistemi yerine, ton CO2 başına karbon vergisi de uygulanabilir.
- KYKD ile ilgili yeni kurumsal yapılar oluşturulabilir.



- [1] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu ve B. Zhou, Ed. *IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, Baskıda.
- [2] IEA, “Energy technologies perspectives (ETP)”, Paris, 2020.
- [3] S. M. N. Hassan, “Techno-Economic Study of CO₂ Capture Process for Cement Plants,” Yüksek Lisans Tezi, Kimya Mühendisliği, University of Waterloo: Waterloo, Canada, 2005.
- [4] D. J. Barker, S. A. Turner, P. A. Napier-Moore, M. Clark ve J. E. Davison, “CO₂ capture in the cement industry,” *Energy Procedia*, 2009.
- [5] J. Jakobsen, S. Roussanaly ve R. Anantharaman, “A techno-economic case study of CO₂ capture, transport and storage chain from a cement plant in Norway,” *J. Clean. Prod.* sayı 144, s. 523–539, 2017.
- [6] W. Zhou, D. Jiang, D. Chen, C. Gri y-Brown, Y. Jin ve B. Zhu, “Capturing CO₂ from cement plants: A priority for reducing CO₂ emissions in China,” *Energy*, sayı 106, s. 464–474, 2016.
- [7] P. Markewitz ve L. Zhao, “Carbon capture for co₂ emission reduction in the cement industry in Germany,” *Energies*, cilt 12, sayı 12, s. 2432, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12122432>.
- [8] M. Voldsund, “Comparison of technologies for co₂ capture from cement production part 1: Technical evaluation,” *Energies*, sayı 12, s. 559, 2019. doi:10.3390/en12030559.
- [9] S. O. Gardarsdottir, “Comparison of technologies for co₂ capture from cement production part 2: cost analysis,” *Energies*, sayı 12, s. 542, 2019. doi:10.3390/en12030542.
- [10] E. Tamme, “Carbon removal with CCS technologies,” Global CCS Institute, 2021.
- [11] J. Friedmann, A. Zapantis ve B. Page, “Net-zero and geospheric return: actions today for 2030 and beyond,” Center on Global Energy Policy, 2020.
- [12] Global CCS Institute, “The global status of CCS: 2020,” Australia, 2020.
- [13] D. Kearns, H. Liu, ve C. Consoli, “Technology readiness and costs of CCS,” Global CCS Institute, 2021.

- [14] C. Consoli, "Bioenergy and carbon capture and storage," Global CCS Institute, 2019.
- [15] A. Townsend, N. Raji ve A. Zapantis, "The value of carbon capture and storage (CCS)," Global CCS Institute, 2020."
- [16] S. Fuss, T. K. William, F. Lamb, W. Callaghan, J. Hilaire, F. Creutzig, T. Amann, T. Beringer, W. O. Garcia ve J. Hartmann, "Negative emissions-part 2: Costs, potentials and side effects," *Environ. Res. Lett.*, cilt 13, sayı 6, 2018.
- [17] K. Lebling, N. McQueen, M. Pisciotta ve J. Wilcox, (2021, January 6). "Direct air capture: definition, cost, & considerations," World Resources Institute, 2021.
- [18] P. Styring, D. Jansen, H. Coninck, H. Reith ve K. Armstrong, "Carbon capture and utilisation in the green economy," Centre for Low Carbon Futures, 2011.
- [19] P. Markewitz, W. Kuckshinrichs, W. Leitner, J. Linssen, P. Zapp, R. Bongartz, A. Schreiber ve T.E. Muller, "Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂" *Energy Environ. Sci.*, cilt 5, sayı 6, s. 7281–7305, 2012.
- [20] IEA, "Technology roadmap," Paris, 2013.
- [21] M. V. Kok ve A. Vural, "The clean coal and carbon capture and storage technology of turkey," *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*, cilt 34, sayı 5-8, s. 531–539, 2012. doi:10.1080/15567036.2011.606454
- [22] R. Cuéllar-Franca ve A. Azapagic, "Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts," *Journal of CO₂ Utilization*, cilt 9, 2015.
- [23] Orta Doğu Teknik Üniversitesi Petrol Araştırma Merkezi, "CO₂'nin yer altı katmanlarına depolanması gerçekte ne anlama geliyor?", CO₂Geonet, 2011.
- [24] Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), "2021 Technology roadmap (TRM)," www.cslforum.org. Erişim tarihi: 2021
- [25] S. Roussanaly, G. Skaugen, A. Aasen, S. J. Jacobsen ve L. Vesely, "Techno-economic evaluation of CO₂ transport from a lignite-fired IGCC plant in the Czech Republic," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, sayı 65, s. 235–250, 2017.
- [26] Global CCS Institute, "Fact Sheet Transporting CO₂," Australia, 2018.
- [27] S. Mcculloch, U. Remme ve P. Bains, "ETP 2020 special report on carbon capture utilisation and storage: CCUS in clean energy transitions," IEA, 2020.
- [28] IEAGHG, "The Status and Challenges of CO₂ Shipping Infrastructures.," Technical Report 2020-10, 2020c.
- [29] B. Metz, vd., Ed. "IPCC special report on carbon dioxide capture and storage," New York, NY, USA: Cambridge University Press for the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005.

- [30] IEAGHG, “Carbon capture and storage and the sustainable development goals”, Technical Report 2020-14, 2020.
- [31] IEAGHG, “National CO₂ storage assessment guidance”, 2016/TR6, October 2016.
- [32] S. Bachu, “Comparison between methodologies recommended for estimation of CO₂ storage capacity in geological media by the CSLF task force on CO₂ storage capacity estimation and the USDOE capacity and fairways subgroup of the regional carbon sequestration partnerships program,” Phase III Report, CSLF-T-2008-04, 21 Nisan, 2008.
- [33] A. A. Eidan, S. Bachu, L. S. Melzer, L. I. Eide ve M. Ackiewicz, “Technical challenges in the conversion of CO₂ EOR projects to storage projects,” *SPE Enhanced Oil Recovery Conference* içinde, Kuala Lumpur, Malaysia, Ağustos 11– 13, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.2118/174575-MS>.
- [34] Zero Emission Platform, <https://zeroemissionsplatform.eu/about-ccs-ccu/what-is-ccs/storage/>. Erişim tarihi: 2019
- [35] E. E. Smith, “The cost of CO₂ transport and storage in global integrated assessment modeling,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, cilt 109, 2021, 103367.
- [36] H. Herzog, “Scaling up carbon dioxide capture and storage: from megatons to gigatons,” *Energy Economics*, sayı 33, s. 594-604, 2011.
- [37] S.T. McCoy ve E.S. Rubin, 2008. “An engineering-economic model of pipeline transport of CO₂ with application to carbon capture and storage,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, sayı 2, s. 219-229, 2008.
- [38] R.T. Dahowski, C. Davidson ve J. Dooley, “Comparing large scale CCS deployment potential in the USA and China: a detailed analysis based on country-specific CO₂ transport and storage cost curves,” *Energy Procedia*, sayı 4, s. 2732-2739, 2011.
- [39] ZEP, “The costs of CO₂ storage: post-demonstration CCS in the EU,” European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants. Brussels, Belgium, 2011a.
- [40] CO₂GeoNet, “State-of-play on CO₂ geological storage in 32 European countries-an update,” CO₂GeoNet Report, s. 325, 2021. doi: 10.25928/co2geonet_eu32-o21u
- [41] H. Javedan, “Regulation for underground storage of CO₂ passed by U.S. states”, Massachusetts Institute of Technology, 2013.
- [42] G. Parker, “Carbon, capture, and storage: History, current state, and obstacles for the future (part 2),” Environmental Law Institute, 2022, Erişim: <https://www.eli.org/vibrant-environment-blog/carbon-capture-and-storage-history-current-state-and-obstacles-future-part-2>.
- [43] A. Townsend, “The Lcfs and CCS Protocol: An overview for policymakers and project developers,” Global CCS Institute, 2019.

- [44] L. Beck, "Carbon capture and storage in the USA: the role of US innovation leadership in climate-technology commercialization," *Clean Energy*, cilt 4, sayı 1, s 2–11, 2020. doi: 10.1093/ce/zkz031
- [45] California Air Resources Board, "LCFS credit generaiton opportunities," <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/low-carbon-fuel-standard/lcfs-credit-generation-opportunities>. Erişim tarihi: 2021
- [46] Global CCS Institute, "The global status of CCS: 2021." Australia, 2021.
- [47] J. Kearns, G. Teletke, J. Palmer, H. Thomann, H. Keshgi, Y. H. Chen, S. Paltsev ve H. Herzog, "Developing a consistent database for regional geologic CO2 capacity worldwide," *Energy Procedia*, cilt 114, s. 4697-4709, 2017.
- [48] H. A. Usta, "Karbon maliyetlerinin muhasebeleştirilmesi: Çimento sektörü uygulaması," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, cilt 15, sayı 1, s. 267 – 294, 2020.
- [49] E. Worrell ve L. Price, "Carbon dioxide emissions from the global cement industry," *Annual Review of Energy and the Environment*, cilt 26, s.303-329, 2001.
- [50] S. Türk ve Y. Engin, "imento ve yeni nesil enerji kaynakları," *TRKİMENTO*, 2022.
- [51] S. Türk ve Y. Engin, imento "Geçmişten geleceğe inovatif yapı malzemesi", *TRKİMENTO*, 2021.
- [52] T.C. evre ve şehircilik Bakanlığı, "Entegre evre (Ei) tabi imento üretim tesislerinin uyum durumları ve gerekliliklerin belirlenmesi projesi nihai rapor," 2017.
- [53] E. Öztürk, "imento sektöründe alternatif hammadde ve alternatif yakıt kullanımının çevresel yararlarının değerlendirilmesi," Yüksek lisans tezi, evre Mühendisliği Anabilim Dalı, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, 2016.
- [54] IEA, "Technology roadmap low-carbon transition in the cement industry; technical report," International Energy Agency: Paris, France, 2018.
- [55] R. M. Andrew, "Global CO2 emissions from cement production, 1928–2017," *Earth Syst. Sci. Data*, sayı 10, s. 2213–2239. doi: <https://doi.org/10.5194/essd-10-2213-2018>, 2018a.
- [56] IEA, "World energy outlook 2011 report," International Energy Agency, Paris, France, 2011.
- [57] M. Fantini, M. Spinelli, M. C. Romano, S. Campanari, S. Consonni, M. Balocco, F. Canonico, B. Arias, J. Hammerich ve K. My"oh"anen, "Cleaner–clean clinker by calcium looping process for low-CO2 cement production." *14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference* içinde, Melbourne, 2018.
- [58] M. S. Imbabi, C. Carrigan ve S. McKenna, "Trends and Developments in Green Cement and Concrete Technology." *Int. J. Sustain. Built Environ.*, sayı 1, s.194–216, 2012.

- [59] Tosun F., “Çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak katı atıkların kullanımı,” Yüksek lisans tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006.
- [60] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, “Çimento sektöründe entegre kirlilik önleme ve kontrol tebliği taslağı,” 2021.
- [61] F. D. Tunçez, “Sürdürülebilir çimento üretiminde çevre yönetimi yasal bileşenleri,” *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, cilt 4, sayı 1, s. 41-56, 2021.
- [62] International Energy Agency, <https://www.iea.org/reports/cement>. Erişim tarihi: 2021
- [63] The European Cement Association, “CEMBUREAU Activity Report,” 2020.
- [64] R. Guo, J. Wang, L. Bing, “Global CO₂ uptake by cement from 1930 to 2019,” *Earth Syst. Sci. Data*, sayı 13, s. 1791–1805, 2021. doi: <https://doi.org/10.5194/essd-13-1791-2021>.
- [65] C. Chen, R. Xu ve D. Tong, “A striking growth of CO₂ emissions from the global cement industry driven by new facilities in emerging countries,” *Environ. Res. Lett.* sayı 17, 2022. doi: 10.1088/1748-9326/ac48b5.
- [66] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, “Çimento sektörü raporu,” 2021.
- [67] “Türkiye Çimento İstatistikleri 2011-2020,” TÜRKÇİMENTO, 2021.
- [68] “Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990-2019,” TUIK, 2021.
- [69] F. Schorcht, F. Kourti, I. Scalet, B.M. Roudier ve S. Sancho, “Best available techniques (BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide,” Joint Research Centre of the European Commission, Spain, 2013.
- [70] IEAGHG, “Deployment of CCS in the cement industry,” 2013.
- [71] Global CCS Institute, “CCS Facilities,” Erişim: <https://co2re.co/>, 2022.
- [72] E. Okandan ve Y. Karakece, “Assessment of CO₂ emissions from industrial sites, potential for underground storage in Turkey and modelling of storage in an oil field,” *Energy Procedia*, sayı 4, s. 4849-4856, 2011.
- [73] TÜPRAŞ, Medya İlişkileri, Basın Yayınları, 2020. Erişim: <https://www.tupras.com.tr/en/press-releases?detay=EU-Arge-inovasyon->.
- [74] S. Akın, “AB karbon yakalama ve depolama direktifi düzenleyici etki analizi çalışması bulguları,” 2019. Hulla konferansı, Movenpick Oteli, Ankara’da sunulmuştur, Erişim: http://www.lowcarbonturkey.org/wp-content/uploads/2019/05/LCDTR_KYDD_Bulgular_SerhatAkin.pdf
- [75] E. Özgür, “Petrol rezervuarlarında uygulanan üçüncül üretim yöntemleri ve türkiye için öneriler,” Erişim : http://www.emreozgur.com/EmreOzgur_EOR.pdf, 2017
- [76] Limak Çimento, 2021 Faaliyet Raporu, 2021. Erişim: <https://www.limak.com.tr/files/LimakFaaliyetRaporu2021.pdf>.

- [77] Oyak Çimento, 2020 Entegre Rapor, 2020. Erişim: <https://assets.oyakcimento.com/contents/pdf/2021173/162446013910784217161624460163752706.pdf>.
- [78] J. Serpa, J. Morbee ve E. Tzimas, "Technical and economic characteristics of a CO₂ transmission pipeline infrastructure," European Commission Joint Research Centre Institute for Energy, 2011.
- [79] D. McCollum ve J. Ogden, 2006. "Techno-economic models for carbon dioxide compression, transport, and storage & correlations for estimating carbon dioxide density and viscosity." Institute of Transportation Studies, University of California.
- [80] S. P. Peletiri, "CO₂ pipeline design: A review," *Energies*, sayı 11, s. 2184, 2018. doi:10.3390/en11092184.
- [81] M. T. Spitz, "Balancing the variability of flow in carbon dioxide transport and storage networks: Low- carbon electricity systems in great britain," Doktora Tezi, Mühendislik Fakültesi, University of Edinburgh, 2019.
- [82] N. F. MacDowell, "An overview of CO₂ capture technologies," *Energy & Environmental Science*, cilt 3, sayı 11, s. 1645-1669, 2010.
- [83] N. F. MacDowell, "An overview of CO₂ capture technologies," *Energy & Environmental Science*, cilt 3, sayı 11, s. 1645-1669, 2010.
- [84] D. G. Chapel., C. L. Mariz ve J. Ernest, "Recovery of CO₂ from flue gases: commercial trends," *Annual Meeting of the Canadian Society of Chemical Engineering*, cilt 4, sayı 340, Saskatoon: Canada, 1999.
- [85] IEAGHG, "Improvement in power generation with post-combustion capture of CO₂," Report PH4/33, 2004.
- [86] European Commission, *PPC: Reference Document on Best Available Technologies in the Cement and Lime Manufacturing Industries*, Brussels: EC, 2001.
- [87] G. Hegerland, J. O. Pande, H. A. Haugen, N. Eldrup, L. Tokheim ve L. Hatlevik, *Capture of CO₂ from a Cement Plant - Technical Possibilities and Economic Estimates in Greenhouse Gas Control Technologies 8*, Trondheim, Norway: Elsevier, 2006.
- [88] D. Adams, "Flue gas treatment for CO₂ capture," IEA Clean Coal Centre, 2010.
- [89] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "Sanayi kaynaklı hava kirliliğinin kontrolü yönetmeliği," 2009.
- [90] X. Liang, "Assessing the value of retrofitting cement plants for carbon capture: A case study of a cement plant in Guangdong, China," *Energy Conversion and Management*, cilt 64, 2012, s. 454-465, 2012.
- [91] IEAGHG, "Cost of CO₂ capture in the industrial sector: Cement and iron and steel industries," Technical Review 2018-TR03, 2018.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Uluslararası Konferans Bildirisi

1. N. Filtekin ve Y. Avşar, "Investigation of carbon capture and storage potential in Turkey – case study for cement facility," *8th International Mardin Artuklu Scientific Researches Conference* içinde, Haziran 4-6, Mardin, Turkey, 2022.

