

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ALTERNATİF YAKIT
KULLANIMININ BACA GAZI EMİSYONLARI ÜZERİNE
ETKİLERİ**

BETÜL ÖZTÜRK

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ALTERNATİF YAKIT
KULLANIMININ BACA GAZI EMİSYONLARI ÜZERİNE
ETKİLERİ

BETÜL ÖZTÜRK

Prof. Dr. Aykan KARADEMİR
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Beyhan PEKEY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Asude ATEŞ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Mahmut Kemal KORUCU
Jüri Üyesi, Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Demet ARSLANBAŞ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 03.03.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Gelişen ve büyüyen teknolojiler ile sürdürülebilir üretim ve tüketimin önem kazandığı son yıllarda, doğal kaynak tüketimini azaltabilmek ve çevresel etkileri düşürebilmek önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, yapmış olduğumuz çalışmada yoğun emisyona sahip olan çimento fabrikalarında atıkların alternatif yakıt olarak kullanılması ile emisyonlar üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi amaçlanmıştır. Alternatif yakıtların kullanım oranları çimento fabrikalarında giderek artmaktadır bu nedenle alternatif yakıt kullanımının emisyonlara olan etkilerinin incelenmesi fabrikaların bu atıkları kullanmadan önce gerekli şartları sağlamalarını ve kullanımı arttırarak çevresel etkilerini düşürebilmelerini sağlayabilecektir. Emisyon etkilerinin bilinerek kullanım yapılmasının fabrikalarda daha çeşitli atığın daha yüksek oranlarda kullanılmasını sağlayabilmesi ve bu nedenle de hem ekonomik hem de çevresel iyileşmelerin sağlanabilmesini mümkün kılması beklenmektedir. Bu çalışmanın, farklı fırın tipleri ve farklı atıklar ile yapılacak çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Bu çalışmalar boyunca sabırlı, hakkaniyetli ve insan odaklı yaklaşımıyla motivasyonumu arttıran, birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum danışman hocam Sayın Prof. Dr. Aykan KARADEMİR'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez izleme komitemde bulunan ve tez çalışmam süresince desteğini, bilgi ve tecrübesini esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Beyhan PEKEY ve Sayın Doç. Dr. Asude ATEŞ'e katkılarından ve sabırlardan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bilgi birikimlerini, yönlendirmelerini ve desteklerini esirgemeyerek çalışmamda çok büyük katkıları olan Sayın Okan GÜVEN ve Sayın Mustafa ÇAĞATAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını, desteklerini ve sabırlarını esirgemeyen Evrim FİDAN, Berkan FİDAN, Özlem DÖNMEZ ve Canan ERDEM'e teşekkür ederim.

Sadece tez çalışmam süresince değil tüm yaşantım boyunca her daim yanımda olan annem Mürvet ÖZTÜRK, babam Ramiz ÖZTÜRK, ablam Işıl TURNALAR ve teyzem Sibel ARCAN'a tüm çaba ve emekleri için teşekkürü bir borç bilirim.

Sonsuz anlayış ve sabırla yanımda olan beni motive eden, en zor zamanlarda desteğini hep hissettiren kardeşim, Dr. Onur ÖZTÜRK'e çok teşekkür ederim.

Şubat – 2021

Betül ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xvii
GİRİŞ	1
1. ÇİMENTO ÜRETİMİ	5
1.1. Çimentonun Tarihçesi	5
1.2. Çimento Üretim Prosesi	10
1.2.1. Hammadde temini ve kırma üniteleri.....	12
1.2.1.1. Hammaddeler ve hammadde temini	13
1.2.1.2. Kırıcı üniteleri	15
1.2.2. Farin üretimi.....	16
1.2.3. Klinker üretim prosesi.....	18
1.2.4. Çimento üretim (öğütme) prosesi.....	26
1.2.5. Paketleme	29
1.3. Çimento Üretim Prosesinde Enerji Tüketimleri	31
2. ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE BİRİNCİL YAKIT VE ALTERNATİF YAKIT KULLANIMLARI	34
2.1. Alternatif Yakıtlar ve Çimento Fabrikalarında Kullanımları	37
2.1.1. Atıkların alternatif yakıt olarak kullanımında yasal süreçler	44
2.1.2. Atıkların kabul kriterleri ve döner fırına beslenme noktaları.....	49
2.2. Çimento Sektöründe Kullanılan Alternatif Yakıtlar	58
2.2.1. Atıktan türetilmiş yakıt	59
2.2.2. Ömrünü tamamlamış lastik	64
2.2.3. Arıtma çamurları	69
2.2.4. Sıvı tehlikeli atıklar	72
2.2.5. Diğer atıklar	75
2.2.5.1. Plastik atıklar	75
2.2.5.2. Evsel katı atıklar	75
2.3. Alternatif Yakıt Kullanımını Avantajları ve Karşılaşılan Zorluklar.....	76
3. ÇİMENTO FABRİKALARINDAN KAYNAKLANAN EMİSYONLAR.....	80
3.1. Toz Emisyonları.....	82
3.2. Azot Oksit (NO _x) Emisyonları.....	84
3.2.1. Termal NO _x	84
3.2.2. Yakıt NO _x	86
3.2.3. Besleme (feed) NO _x	86
3.2.4. Ani NO _x	86
3.2.5. NO _x İndirgeme Sistemleri	87
3.3. Kükürt Oksit (SO _x) Emisyonları	91

3.4.	Toplam Organik Karbon (TOK) ve Karbonmonoksit (CO) Emisyonları.....	95
3.5.	Hidrojen Klorür (HCl) ve Hidrojen Florür (HF) Bileşikleri.....	97
3.5.1.	Hidrojen klorür.....	97
3.5.2.	Hidrojen florür.....	99
3.6.	Ağır Metal Emisyonları.....	99
3.7.	Poli Aromatik Hidrokarbon (PAH) Emisyonları.....	102
3.8.	Dioksin/Furan (PCDD/F) Emisyonları.....	103
3.9.	Karbondioksit (CO ₂) Emisyonları.....	105
4.	LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	109
5.	MATERYAL VE METOD.....	120
5.1.	Çalışmaya Esas Fabrika.....	120
5.1.1.	Kırıcı ünitesi.....	120
5.1.2.	Kratzer ünitesi.....	120
5.1.3.	Farin değirmeni ünitesi.....	121
5.1.4.	Döner fırın ünitesi.....	122
5.1.5.	Çimento değirmenleri ve paketlenme ünitesi.....	124
5.1.6.	Atık kabulü, stoklama, besleme ünitesi.....	125
5.2.	Sürekli Emisyon Ölçüm Sistemleri.....	128
5.3.	Yapay Sinir Ağı.....	135
6.	ÇALIŞMA SONUÇLARININ İRDELENMESİ.....	142
6.1	Alternatif Yakıt Kullanımının Toz Emisyonları Üzerine Etkisi.....	148
6.1.1.	Atık yakılmayan dönemde toz emisyonlarının incelenmesi.....	153
6.1.2.	Ömrünü tamamlamış lastik kullanımı ve toz emisyonu ilişkisi.....	154
6.1.3.	Karışık endüstriyel atık kullanımı ve toz emisyonu ilişkisi.....	158
6.1.4.	Fosil bazlı atık kullanımı ve toz emisyonu ilişkisi.....	158
6.1.5.	Karışık atık kullanımı ile elde edilen atık ısı gücü ve toz emisyonu ilişkisi.....	160
6.2.	Alternatif Yakıt Kullanımının NO _x Emisyonları Üzerine Etkisi.....	166
6.2.1.	Atık yakılmayan dönem NO _x emisyonlarının incelenmesi.....	171
6.2.2.	Ömrünü tamamlamış lastik kullanımı ile NO _x emisyonları ilişkisi.....	172
6.2.3.	Karışık endüstriyel atık kullanımı ile NO _x emisyonları ilişkisi.....	175
6.2.4.	Fosil bazlı atık kullanımı ile NO _x emisyonları ilişkisi.....	176
6.2.5.	Karışık atık kullanımı ile NO _x emisyonları ilişkisi.....	177
6.3.	Alternatif Yakıt Kullanımının SO ₂ Emisyonları Üzerine Etkisi.....	183
6.3.1.	Atık yakılmayan dönem SO ₂ emisyonları.....	188
6.3.2.	Ömrünü tamamlamış lastik kullanımı ve SO ₂ emisyonu ilişkisi.....	189
6.3.3.	Karışık endüstriyel atık kullanımı ve SO ₂ emisyonu ilişkisi.....	192
6.3.4.	Fosil bazlı atık kullanımı ve SO ₂ emisyonu ilişkisi.....	192
6.3.5.	Karışık atık kullanımı ile SO ₂ emisyonları ilişkisi.....	194
6.4.	Alternatif Yakıt Kullanımının TOK Emisyonları Üzerine Etkisi.....	200
6.4.1.	Atık yakılmayan dönem TOK emisyonlarının incelenmesi.....	205
6.4.2.	Ömrünü tamamlamış lastik kullanımı ile TOK emisyonları ilişkisi.....	206

6.4.3. Karışık endüstriyel atık kullanımı ile TOK emisyonları ilişkisi.....	209
6.4.4. Fosil bazlı atık kullanımı ile TOK emisyonları ilişkisi.....	209
6.4.5. Karışık atık kullanımı ile TOK emisyonları ilişkisi.....	211
6.5. Alternatif Yakıt Kullanımının HF-HCl Emisyonları Üzerine Etkisi.....	218
6.5.1. Atık yakılmayan dönem HF- HCl emisyonları	222
6.5.2. Ömrünü tamamlamış lastik kullanımı ve HF- HCl emisyonları ilişkisi	223
6.5.3. Karışık endüstriyel atık kullanımı ile HF – HCl emisyonları ilişkisi	225
6.5.4. Fosil bazlı atık kullanımı ile HF – HCl emisyonları ilişkisi	226
6.5.5. Karışık atık kullanımı ile HF – HCl emisyonları ilişkisi	228
6.6. Alternatif Yakıt Kullanımının CO ₂ Emisyonları Üzerine Etkisi	234
6.6.1. Ocak ayı alternatif yakıt kullanımı CO ₂ emisyonlarına etkisi.....	238
6.6.2. Şubat ayı alternatif yakıt kullanımı CO ₂ emisyonlarına etkisi.....	241
6.6.3. Nisan ayı alternatif yakıt kullanımı CO ₂ emisyonlarına etkisi.....	243
6.6.4. Ağustos ayı alternatif yakıt kullanımı CO ₂ emisyonlarına etkisi.....	245
6.7. Yapay Sinir Ağı Tahmin Modelleri	248
6.7.1. CO tahmin modeli	248
6.7.2. NO _x tahmin modeli.....	253
6.7.3. SO ₂ tahmin modeli	259
6.7.4. TOK tahmin modeli	264
6.7.5. Toz tahmin modeli	270
6.7.6. YSA modellerinin değerlendirilmesi	275
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	277
KAYNAKLAR	284
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	300
ÖZGEÇMİŞ	301

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Dünya çimento üretimi ülkelere göre dağılımı-2018.....	7
Şekil 1.2.	Dünya çimento üretimi ülkelere göre dağılımı-2017.....	7
Şekil 1.3.	Türkiye çimento üretim ve tüketimin yıllara göre değişimi	9
Şekil 1.4.	Türkiye çimento fabrikaları haritası – 2020	9
Şekil 1.5.	Türk çimento sektörü klinker kapasite kullanım oranları-2018.....	10
Şekil 1.6.	Modern kuru proses çimento üretimi.....	12
Şekil 1.7.	Çimento akış şeması	12
Şekil 1.8.	Kırıcı üniteleri.....	15
Şekil 1.9.	Hammadde transfer hattı.....	16
Şekil 1.10.	Bilyalı farin değirmeni.....	17
Şekil 1.11.	Dik farin değirmeni.....	17
Şekil 1.12.	Alev borusu.....	19
Şekil 1.13.	Döner fırının ayaklar üzerine yerleşimi	20
Şekil 1.14.	Döner fırın ters akış prensibi	20
Şekil 1.15.	Kuru sistem döner fırında malzeme, hava ve yakıt akış diyagramı	21
Şekil 1.16.	Klinkerizasyon reaksiyonları	23
Şekil 1.17.	Döner fırın zonları ve klinkerleşme reaksiyonları	24
Şekil 1.18.	Döner fırın.....	24
Şekil 1.19.	Döner fırın siklon grupları	25
Şekil 1.20.	Klinkerin soğutma ünitesi şematik gösterimi	25
Şekil 1.21.	Klinkerin soğutulması.....	26
Şekil 1.22.	Bilyalı çimento değirmeni	26
Şekil 1.23.	Dik çimento değirmeni	27
Şekil 1.24.	Bilyalı çimento değirmeni iç görünüşü.....	27
Şekil 1.25.	Çimento siloları ve paketleme ünitesi.....	30
Şekil 1.26.	(a) Dökme yükleme ve (b) silobas.....	30
Şekil 1.27.	Çimento üretimin elektrik enerjisi tüketim dağılımı.....	31
Şekil 1.28.	Çimento üretiminde enerji tüketimi akış diyagramı	32
Şekil 1.29.	Klinker ve kırma, öğütme, pişirme elektrik enerjileri 2014-2018 kıyaslaması	33
Şekil 1.30.	Klinker pişirme enerjisi 2014-2018 kıyaslaması	33
Şekil 2.1.	Atık hiyerarşisinde birlikte işleme.....	36
Şekil 2.2.	Çimento sektörü alternatif yakıt kullanım miktarları, 1990-2017	38
Şekil 2.3.	Çimento sektörü global konvansiyonel yakıt kullanım dağılımı	39
Şekil 2.4.	Çimento sektörü global alternatif yakıt kullanım dağılımı.....	39
Şekil 2.5.	Avrupa Birliği ülkelere göre ısı yer değiştirme oranları (2014).....	40
Şekil 2.6.	Düzenli depolamaya giden atık yüzdesi ile ısı yer değiştirme yüzdesi ilişkisi.....	41
Şekil 2.7.	Avrupa Birliği çimento sektörü ısı yer değiştirme oranları 2014-2017.....	42
Şekil 2.8.	Avrupa Birliği çimento sektörü atık kullanım miktarları 2014-2017	42

Şekil 2.9.	Türkiye çimento sektörü ısı yer değiştirme oranları ile kullanılan toplam atık miktarları 2014-2018	43
Şekil 2.10.	Atık kodu okuma şeması.....	45
Şekil 2.11.	Çimento fabrikaları izin kapsamı ve kabul edilebilir atık gösterimi	48
Şekil 2.12.	Çimento fabrikalarında kullanılan alternatif yakıtlar.....	49
Şekil 2.13.	Alev borusu tarihsel gelişimi	53
Şekil 2.14.	İntikal bölgesinden alternatif yakıt beslemesi	54
Şekil 2.15.	Katı yakıtların fırın içerisinde mala karışması.....	55
Şekil 2.16.	Atıkların fırınlara beslenme noktaları ve şartları	56
Şekil 2.17.	2018 yılı Türkiye çimento fabrikaları alternatif yakıt yüzde ısı yer değiştirme oranları.....	59
Şekil 2.18.	2014-2018 yılları arası Türkiye çimento fabrikaları ATY kullanım miktarları	63
Şekil 2.19.	ATY görseli – 1	63
Şekil 2.20.	ATY görseli – 2	64
Şekil 2.21.	ÖTL beraber yakma kütle denkliği.....	66
Şekil 2.22.	İnce kıyılmış ömrünü tamamlamış lastik.....	67
Şekil 2.23.	Bütün lastik	68
Şekil 2.24.	2014-2018 yılları arası Türkiye çimento fabrikaları ÖTL kullanım miktarları.....	69
Şekil 2.25.	2014-2018 yılları arası Türkiye çimento fabrikaları artıma çamuru kullanım miktarları	71
Şekil 2.26.	Kurutulmuş çamur	72
Şekil 2.27.	2014-2018 yılları arası Türkiye çimento fabrikaları atık yağ kullanım miktarları.....	74
Şekil 2.28.	2018 yılı Türkiye çimento fabrikaları atık kullanım miktarları ve grupları	76
Şekil 2.29.	Döner fırında atık kullanımının sera gazı emisyonları üzerindeki etkisi	78
Şekil 3.1.	Kuru proses çimento üretimi kütle denkliği	81
Şekil 3.2.	Çimento fabrikalarında toz emisyonu oluşumu	83
Şekil 3.3.	Farklı oksijen seviyelerinde sıcaklık ve NO konsantrasyonları.....	85
Şekil 3.4.	Termal ve yakıt NO _x oluşum bölgeleri	87
Şekil 3.5.	Kuru sistem ön ısıtıcı ve kalsinatörlü fırında tekrar yakma prensipleri	89
Şekil 3.6.	SNCR enjeksiyonu yapılabilecek muhtemel noktalar	89
Şekil 3.7.	Döner fırın sistemindeki kükürt döngüsü	92
Şekil 3.8.	Döner fırın sistemi TOK emisyonları	97
Şekil 3.9.	Döner fırın ünitesi içerisinde klor döngüsü	98
Şekil 3.10.	Ağır metallerin fırın sistemindeki yolları	100
Şekil 3.11.	Döner fırın sistemi PAH emisyonları	102
Şekil 3.12.	Doksin kimyasal yapısı (PCDD).....	103
Şekil 3.13.	Fuanların kimyasal yapısı (PCDD/F)	103
Şekil 3.14.	PCDD/F oluşumu döner fırın ünitesi	104
Şekil 3.15.	Çimento üretimi kaynaklı CO ₂ emisyonlarının yüzde dağılımları	106
Şekil 3.16.	CO ₂ kütle denkliği	107
Şekil 4.1.	Atık besleme noktaları	111

Şekil 5.1.	Kırıcı ünitesi akış şeması	120
Şekil 5.2.	Kırıcı ünitesi	121
Şekil 5.3.	Kratzer ve farin ünitesi genel yerleşim ve akış şeması	121
Şekil 5.4.	Döner Fırın Ünitesi Genel Yerleşim Şeması	123
Şekil 5.5.	Fabrika A alternatif yakıt besleme noktaları.....	124
Şekil 5.6.	Fabrika atık besleme sistemi	125
Şekil 5.7.	Kancalı besleme sistemi.....	126
Şekil 5.8.	Fabrika hareketli taban besleme sistemi	126
Şekil 5.9.	Atık yakma akış diyagramı	127
Şekil 5.10.	Çimento fabrikası SEÖS takılı bulunan nokta.....	129
Şekil 5.11.	Numune Alma Düzlemi 1-Numune alma hattı, 2-Numune alma düzlemi, 3-Giriş delikleri, 4-Akış yönü	130
Şekil 5.12.	SEÖS ve ölçüm cihazları ana baca üzerine yerleşim mesafeleri ve açıları	130
Şekil 5.13.	Fabrika SEÖS cihazının bulunduğu nokta.....	131
Şekil 5.14.	Fabrika SEÖS takılı baca ve platform görünüşü	132
Şekil 5.15.	Fabrika baca üzeri numune alma düzlemi ve numune alma noktaları.....	132
Şekil 5.16.	Fabrika SEÖS yazılımı giriş sayfası	134
Şekil 5.17.	Fabrika SEÖS raporlama sayfası	135
Şekil 5.18.	Basit bir sinir hücresi	136
Şekil 5.19.	Bir nöronun şematik gösterimi	137
Şekil 6.1.	Ocak ayı atık ısı yer değiştirme oranları ve toz emisyonları arasındaki ilişki	151
Şekil 6.2.	Şubat ayı atık ısı yer değiştirme oranları ve toz emisyonları arasındaki ilişki	152
Şekil 6.3.	Nisan ayı atık ısı yer değiştirme oranları ve toz emisyonları arasındaki ilişki	152
Şekil 6.4.	Ağustos ayı atık ısı yer değiştirme oranları ve toz emisyonları arasındaki ilişki	152
Şekil 6.5.	Atık yakılmayan dönem toz emisyonu	153
Şekil 6.6.	ÖTL ısı yer değiştirme oranları ile toz emisyonları ilişkisi.....	155
Şekil 6.7.	Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları ortalama toz emisyonu ile atıksız toz emiyonu ortalama değeri karşılaştırması.....	157
Şekil 6.8.	FBA kullanımı toz değerleri ve atık yakılmayan toz ortalama değeri karşılaştırması	159
Şekil 6.9.	Ocak ve Şubat ayı FBA kullanımları toz ortalaması ile atıksız toz ortalaması karşılaştırması	160
Şekil 6.10.	ÖTL+KEA+FBA beraber kullanımı toz emisyonları	161
Şekil 6.11.	ÖTL+KEA+FBA kullanım oranları ve toz emisyonları	161
Şekil 6.12.	ÖTL+KEA birlikte kullanımı ile oluşan toz emisyonları	162
Şekil 6.13.	ÖTL ve FBA kullanımı ile toz emisyonları ilişkisi	163
Şekil 6.14.	FBA ve KEA birlikte kullanımı toz emisyonları	165
Şekil 6.15.	Ocak ayı atık ısı güç ve NO _x emisyonları arasındaki ilişki	169
Şekil 6.16.	Şubat ayı atık ısı güç ve NO _x emisyonları arasındaki ilişki.....	169
Şekil 6.17.	Nisan ayı atık ısı güç ve NO _x emisyonları arasındaki ilişki	170
Şekil 6.18.	Ağustos ayı atık ısı güç ve NO _x emisyonları arasındaki ilişki.....	170
Şekil 6.19.	Atık yakılmayan dönem NO _x emisyonları.....	171
Şekil 6.20.	ÖTL kullanımı ile NO _x emisyonları	172

Şekil 6.21.	ÖTL, NO _x ve CO emisyonları arasındaki ilişki.....	173
Şekil 6.22.	Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları ÖTL ısı yer değiştirme ve ortalama NO _x emisyonları.....	174
Şekil 6.23	FBA kullanımını NO _x değerleri ve atık yakılmayan NO _x ortalama değeri karşılaştırması.....	176
Şekil 6.24.	ÖTL+KEA+FBA beraber kullanımını NO _x emisyonları.....	177
Şekil 6.25.	ÖTL+FBA+KEA ısı yer değiştirme ve NO _x emisyonları değişimi.....	178
Şekil 6.26.	ÖTL+KEA birlikte kullanımını ile oluşan NO _x emisyonları.....	179
Şekil 6.27.	ÖTL ve FBA kullanımını ile NO _x emisyonları ilişkisi.....	180
Şekil 6.28.	KEA+FBA ısı yer değiştirme ve NO _x emisyonları.....	181
Şekil 6.29.	Ocak ayı ısı yer değiştirme ve SO ₂ emisyonları.....	186
Şekil 6.30.	Şubat ayı ısı yer değiştirme ve SO ₂ emisyonları.....	187
Şekil 6.31.	Nisan ayı ısı yer değiştirme ve SO ₂ emisyonları.....	187
Şekil 6.32.	Ağustos ayı ısı yer değiştirme ve SO ₂ emisyonları.....	187
Şekil 6.33.	Atık yakılmayan dönem SO ₂ emisyonları.....	188
Şekil 6.34.	ÖTL kullanımını ile SO ₂ emisyonları.....	189
Şekil 6.35.	FBA kullanımını SO ₂ değerleri ve atık yakılmayan SO ₂ ortalama değeri karşılaştırması.....	193
Şekil 6.36.	ÖTL+KEA+FBA beraber kullanımını SO ₂ emisyonları.....	194
Şekil 6.37.	ÖTL+FBA+KEA ısı yer değiştirme ve SO ₂ emisyonları değişimi.....	195
Şekil 6.38.	ÖTL+KEA birlikte kullanımını ile oluşan SO ₂ emisyonları.....	195
Şekil 6.39.	ÖTL ve FBA kullanımını ile SO ₂ emisyonları ilişkisi.....	197
Şekil 6.40.	ÖTL ve FBA ısı yer değiştirme ile SO ₂ emisyonları değişimi.....	198
Şekil 6.41.	KEA+FBA ısı yer değiştirme ve SO ₂ emisyonları.....	198
Şekil 6.42.	Ocak ayı atık ısı güç ve TOK emisyonları arasındaki ilişki.....	203
Şekil 6.43.	Şubat ayı atık ısı güç ve TOK emisyonları arasındaki ilişki.....	203
Şekil 6.44.	Nisan ayı atık ısı güç ve TOK emisyonları arasındaki ilişki.....	204
Şekil 6.45.	Ağustos ayı atık ısı güç ve TOK emisyonları arasındaki ilişki.....	204
Şekil 6.46.	Atık yakılmayan dönem TOK emisyonları.....	205
Şekil 6.47.	ÖTL Kullanımı ile TOK Emisyonları.....	206
Şekil 6.48.	Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları ÖTL ısı yer değiştirme ve TOK emisyonları.....	207
Şekil 6.49.	FBA kullanımını TOK değerleri ve atık yakılmayan dönem TOK ortalama değeri karşılaştırması.....	210
Şekil 6.50.	ÖTL+KEA+FBA beraber kullanımını TOK emisyonları.....	212
Şekil 6.51.	ÖTL+FBA+KEA ısı yer değiştirme ve TOK emisyonları değişimi.....	213
Şekil 6.52.	ÖTL+KEA birlikte kullanımını ile oluşan NO _x emisyonları.....	213
Şekil 6.53.	ÖTL ve FBA kullanımını ile TOK emisyonları ilişkisi.....	215
Şekil 6.54.	KEA+FBA ısı yer değiştirme ve TOK emisyonları.....	217
Şekil 6.55.	Ocak ayı atık ısı güç ve HF-HCl emisyonları arasındaki ilişki.....	221
Şekil 6.56.	Şubat ayı atık ısı güç ve HF- HCl emisyonları arasındaki ilişki.....	221
Şekil 6.57.	Nisan ayı atık ısı güç ve HF - HCl emisyonları arasındaki ilişki.....	221
Şekil 6.58.	Ağustos ayı atık ısı güç ve HF - HCl emisyonları arasındaki ilişki.....	222
Şekil 6.59.	Atık yakılmayan dönem HF – HCl emisyonları.....	223
Şekil 6.60.	ÖTL kullanımını ile HF emisyonları.....	224

Şekil 6.61.	ÖTL kullanımı ile HCl emisyonları.....	225
Şekil 6.62.	FBA kullanımı HF değerleri ve atık yakılmayan dönem HF ortalama değeri karşılaştırması	227
Şekil 6.63.	FBA kullanımı HCl değerleri ve atık yakılmayan dönem HCl ortalama değeri karşılaştırması.....	228
Şekil 6.64.	ÖTL+KEA+FBA beraber kullanımı ile HF ve HCl emisyonları	229
Şekil 6.65.	ÖTL+KEA birlikte kullanımı ile oluşan HF emisyonları.....	230
Şekil 6.66.	ÖTL+KEA birlikte kullanımı ile oluşan HCl emisyonları	230
Şekil 6.67.	ÖTL ve FBA kullanımı ile HF emisyonları ilişkisi	231
Şekil 6.68.	ÖTL ve FBA kullanımı ile HCl emisyonları ilişkisi.....	232
Şekil 6.69.	KEA+FBA ısı yer değiştirme HF- HCl emisyonları	233
Şekil 6.70.	SGİR Tebliği kapsamında izleme ve raporlama zamanlama haritası	235
Şekil 6.71.	Fabrika proses emisyonu sınırları	236
Şekil 6.72.	CO ağ yapısı.....	248
Şekil 6.73.	Farklı nöron sayıları için CO saklı katman MSE değerleri	249
Şekil 6.74.	CO ağının öğrenme performansı.....	249
Şekil 6.75.	CO ağına ait regresyon değerleri	251
Şekil 6.76.	Deneyssel ve tahmin edilen CO değerleri ilişkisi	252
Şekil 6.77.	CO hata dağılımı grafiği	252
Şekil 6.78.	CO modelinde girişlere ait önem faktörleri	253
Şekil 6.79.	NO _x ağ yapısı	254
Şekil 6.80.	Farklı nöron sayıları için NO _x saklı katman MSE değerleri	254
Şekil 6.81.	NO _x ağının öğrenme performansı	255
Şekil 6.82.	NO _x ağına ait regresyon değerleri	256
Şekil 6.83.	Deneyssel ve tahmin edilen NO _x değerleri ilişkisi	258
Şekil 6.84.	NO _x hata dağılımı grafiği	258
Şekil 6.85.	NO _x modelinde girişlere ait önem faktörleri	258
Şekil 6.86.	SO ₂ ağ yapısı.....	259
Şekil 6.87.	Farklı nöron sayıları için SO ₂ saklı katman MSE değerleri.....	260
Şekil 6.88.	SO ₂ ağının öğrenme performansı.....	260
Şekil 6.89.	SO ₂ ağına ait regresyon değerleri	262
Şekil 6.90.	Deneyssel ve tahmin edilen SO ₂ değerleri ilişkisi.....	263
Şekil 6.91.	SO ₂ hata dağılımı grafiği	263
Şekil 6.92.	SO ₂ modelinde girişlere ait önem faktörleri	264
Şekil 6.93.	TOK ağ yapısı.....	265
Şekil 6.94.	Farklı nöron sayıları için TOK saklı katman MSE değerleri.....	265
Şekil 6.95.	TOK ağının öğrenme performansı	266
Şekil 6.96.	TOK ağına ait regresyon değerleri.....	267
Şekil 6.97.	Deneyssel ve tahmin edilen TOK değerleri ilişkisi.....	268
Şekil 6.98.	TOK hata dağılımı grafiği.....	269
Şekil 6.99.	TOK modelinde girişlere ait önem faktörleri	269
Şekil 6.100.	Toz ağ yapısı.....	270
Şekil 6.101.	Farklı nöron sayıları için toz saklı katman MSE değerleri	271
Şekil 6.102.	Toz ağının öğrenme performansı	271
Şekil 6.103.	Toz ağına ait regresyon değerleri.....	273
Şekil 6.104.	Deneyssel ve tahmin edilen toz değerleri ilişkisi	274
Şekil 6.105.	Toz hata dağılımı grafiği.....	274
Şekil 6.106.	Toz modelinde girişlere ait önem faktörleri	275

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	G20 ülkeleri 2017 yılı çimento üretim miktarları.....	8
Tablo 1.2.	Klinker bileşenlerine ait hammadde kaynakları	14
Tablo 1.3.	Hammadde ve farinin kimyasal analizi	14
Tablo 1.4.	Hammadde ve farin içerisindeki metal bileşikleri	14
Tablo 1.5.	Klinker üretim prosesine göre spesifik termal enerji tüketimi	18
Tablo 1.6.	Klinker kimyasal kompozisyonu	22
Tablo 1.7.	Klinker bileşenleri.....	22
Tablo 2.1.	Alternatif yakıt gruplama tablosu	37
Tablo 2.2.	Beraber yakma yapan çimento fabrikaları ve yakma tesisleri emisyon limitleri karşılaştırması.....	47
Tablo 2.3.	Konvansiyonel yakıtlar ile alternatif yakıt kalorifik değer tablosu	51
Tablo 2.4.	Ağır metal bileşikleri için tavsiye edilen limitler	52
Tablo 2.5.	Alev Borusunda kullanılabilen bazı katı atıkların kompozisyon örnekleri	53
Tablo 2.6.	Atık yakılmasında göz önüne alınabilecek genel yaklaşımlar.....	57
Tablo 2.7.	Atıktan türetilmiş yakıt sınıfları.....	60
Tablo 2.8.	ATY özellikleri	61
Tablo 2.9.	Farklı besleme noktaları için tavsiye edilen ATY özellikleri.....	62
Tablo 2.10.	Lastiklerin kompozisyonları	64
Tablo 2.11.	Kömür ve ÖTL elementel analiz karşılaştırması	65
Tablo 2.12.	Yakıt analiz karşılaştırması.....	66
Tablo 2.13.	Arıtma prosesine bağlı olarak arıtma çamurlarının kalorifik değerleri	70
Tablo 2.14.	Solvent ve fuel oil elementel yapı karşılaştırması	73
Tablo 3.1.	Çimento fabrikaları için Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği sınır değerleri	82
Tablo 3.2.	Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik atıkları beraber yakan çimento fabrikaları sınır değerleri.....	82
Tablo 3.3.	Yakıtların net CO ₂ emisyon faktörleri	107
Tablo 4.1.	S0-S1-S2-S3 ve S4 sonuçları.....	113
Tablo 4.2.	Alternatif yakıt kullanımı ve emisyon etkileri derlemesi	113
Tablo 5.1.	SEÖS ölçüm prensipleri ve parametreleri	129
Tablo 5.2.	SEÖS ölçüm parametreleri, prensipleri ve sertifika aralıkları.....	133
Tablo 5.3.	DeneySEL veriler	138
Tablo 5.4.	DeneySEL verilerin istatistiki değerleri	141
Tablo 6.1.	Fabrika Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları ısııl yer değiştirme oranları	144
Tablo 6.2.	Ocak, Şubat, Nisan, Ağustos ayları yakıt ısııl güç, toz emisyonu ve fırın parametreleri	148
Tablo 6.3.	Ağustos ayı ÖTL ve Toz emisyonları değişimi tablosu	157
Tablo 6.4.	Oksijen, baca gazı sıcaklığı ve toz arasındaki ilişki	163
Tablo 6.5.	ÖTL ve ÖTL+FBA Toz emisyonları tablosu	164
Tablo 6.6.	Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları NO _x emisyonları.....	166

Tablo 6.7.	Aynı oranda ÖTL kullanımı, NO _x ve CO emisyon değrleri	173
Tablo 6.8.	ÖTL ve ÖTL+FBA NO _x emisyonları tablosu.....	181
Tablo 6.9.	Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları SO ₂ emisyonları	183
Tablo 6.10.	Aynı oranda ÖTL kullanımı ve SO _x emisyonları	190
Tablo 6.11.	Aynı ısıl yer değıştirme oranı ve SO ₂ emisyonları	196
Tablo 6.12.	Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları TOK emisyonları	200
Tablo 6.13.	Eş ısıl yer değıştirme oranı-TOK emisyonları karşılaştırma tablosu	211
Tablo 6.14.	Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları HF-HCl emisyonları.....	218
Tablo 6.15.	Ocak ayı AF kullanımı ve CO ₂ emisyonları	238
Tablo 6.16.	Petrokok eşlenik miktar tablosu.....	239
Tablo 6.17.	Ocak ayı petrokok eşlenik CO ₂ emisyonu	239
Tablo 6.18.	Ocak ayı CO ₂ tasarruf tablosu	239
Tablo 6.19.	Ocak ayı CO ₂ emisyonları	240
Tablo 6.20.	Şubat ayı AF kullanımı ve CO ₂ emisyonları	241
Tablo 6.21.	Petrokok eşlenik miktar tablosu.....	241
Tablo 6.22.	Şubat ayı petrokok eşlenik CO ₂ emisyonu	242
Tablo 6.23.	Şubat ayı CO ₂ tasarruf tablosu.....	242
Tablo 6.24.	Şubat ayı CO ₂ emisyonları.....	243
Tablo 6.25.	Nisan ayı AF kullanımı ve CO ₂ emisyonları	243
Tablo 6.26.	Petrokok eşlenik miktar tablosu.....	244
Tablo 6.27.	Nisan ayı petrokok eşlenik CO ₂ emisyonu	244
Tablo 6.28.	Nisan ayı CO ₂ tasarruf tablosu.....	244
Tablo 6.29.	Nisan ayı CO ₂ emisyonları	245
Tablo 6.30.	Ağustos ayı AF kullanımı ve CO ₂ emisyonları	246
Tablo 6.31.	Petrokok eşlenik miktar tablosu.....	246
Tablo 6.32.	Ağustos ayı petrokok eşlenik CO ₂ emisyonu	247
Tablo 6.33.	Ağustos ayı CO ₂ tasarruf tablosu.....	247
Tablo 6.34.	Ağustos ayı CO ₂ emisyonları.....	247
Tablo 6.35.	CO ağı katmanlar arası bağlantı ağırlık ve bias değrleri.....	250
Tablo 6.36.	CO ağı deneysel ve tahmin edilen gerçek değrleri.....	251
Tablo 6.37.	NO _x ağı katmanlar arası bağlantı ağırlık ve bias değrleri.....	255
Tablo 6.38.	NO _x ağı deneysel ve tahmin edilen gerçek değrleri	257
Tablo 6.39.	SO ₂ ağı katmanlar arası bağlantı ağırlık ve bias değrleri.....	261
Tablo 6.40.	SO ₂ ağı deneysel ve tahmin edilen gerçek değrleri.....	262
Tablo 6.41.	TOK ağı katmanlar arası bağlantı ağırlık ve bias değrleri	266
Tablo 6.42.	TOK ağı deneysel ve tahmin edilen gerçek değrleri	267
Tablo 6.43.	Toz ağı katmanlar arası bağlantı ağırlık ve bias değrleri	272
Tablo 6.44.	Toz ağı deneysel ve tahmin edilen gerçek değrleri	273
Tablo 6.45.	YSA modellerine ait istatistiki parametreler	276

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
Al_2O_4	: Alümina
As	: Arsenik
Be	: Berilyum
Br	: Brom
C	: Karbon
$CaCl_2$: Kalsiyum Klorür
$CaCO_3$: Kalsiyum Karbonat
CaO	: Kalsiyum Oksit (Kireç)
$CaO.Al_2O_3$: Mono Kalsiyum Alüminat
$Ca(OH)_2$: Kalsiyum Hidroksit
C_3A	: Alüminat
C_4AF	: Ferrit
CaF_2	: Kalsiyum Florür
$CaSO_3$: Kalsiyum Sülfür
$CaSO_4$: Kalsiyum Sülfat
Cd	: Kadmiyum
CH	: Hidrokarbon
$(CH_2CHCl)_n$: Poli Vinil Klorür
Cl	: Klor
Co	: Kobalt
CO	: Karbon Monoksit
CO_2	: Karbondioksit
Cr	: Krom
C_2S	: Belit
C_3S	: Alit
Cu	: Bakır
Fe_2O_3	: Demir Oksit
FeS	: Demir Sülfür
FeS_2	: Demir II Sülfür (Pirit)
H	: Hidrojen
HCl	: Hidrojen Klorür
HCN	: Hidrojen Siyanür
HF	: Hidrojen Florür
Hg	: Cıva
H_2O	: Su
I	: İyot
K	: Potasyum
K_2O	: Potasyum Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit
Mn	: Mangan
Mn_2O_3	: Mangan Oksit
N	: Azot

N ₂	: Serbest Azot
Na	: Sodyum
Na ₂ O	: Sodyum Oksit
NH ₃	: Amonyak
Ni	: Nikel
NO	: Azot Monoksit
NO ₂	: Nitroz Oksit
NO _x	: Azot Oksitler
O	: Oksijen
P	: Fosfor
Pb	: Kurşun
PCB	: Poliklorlu Bifeniller
P ₂ O ₅	: Fosfor Pentaoksit
S	: Kükürt
Sb	: Antimon
Se	: Selenyum
SiO ₂	: Silisyum Dioksit
SO ₃	: Kükürt Trioksit
SO _x	: Kükürt Oksitler
Te	: Telyum
TiO ₂	: Titanium Dioksit
TOK	: Toplam Organik Karbon
V _n	: Vanadyum
Zn	: Çinko
ZrO ₂	: Zirkonyum Oksit
ω _n	: n Sayılı Nöronun Ağırlığı
x _n	: Giriş Katmanındaki n Sayılı Nöron
ω _{ni} ^{ih}	: Giriş ve Saklı Katman Arasındaki Bağlantıların Ağırlığı
ω _{nt} ^{ho}	: Saklı ve Çıkış Katmanı Arasındaki Bağlantıların Ağırlığı
b _n ^{ih}	: Giriş ve Saklı Katman Arasındaki Bias Değerleri
b _t ^{ho}	: Saklı ve Çıkış Katmanı Arasındaki Bias Değerleri

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AF	: Alternatif Yakıt (Alternative fuel)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
ATY	: Atıktan Türetilmiş Yakıt
AYİY	: Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik
CEM	: Genel Amaçlı Çimento
Cembureau	: The European Cement Association (Avrupa Birliği Çimento Sanayicileri Birliği)
CSI	: Cement Sustainability Initiative (Çimento Sürdürülebilirlik Girişimi)
ÇED	: Çevresel Etki Değerlendirmesi
ÇİSAN	: Türkiye Çimento Sanayisi Türk Anonim Şirketi
EF	: Emisyon Faktörü, tCO ₂ /TJ
E _f	: Etkinlik Katsayısı, %

EPA	: ABD Çevre Koruma Ajansı
FBA	: Fosil Bazlı Atık, %
FID	: Alev İyonizasyon Detektörü
FIG	: Fırın Isıl Güç , MW
FO	: Fuel Oil (Akaryakıt), %
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GCCA	: Global Cement and Concrete Association (Global Çimento ve Beton Birliği)
GFB	: Geçici Faaliyet Belgesi
GNR	: Getting the Numbers Right Report
K	: Kömür, %
KEA	: Karışık Endüstriyel Atık, %
KGS1	: Kalite Güvence Sistemi 1
KGS2	: Kalite Güvence Sistemi 2
KGS3	: Kalite Güvence Sistemi 3
KK	: Kızdırma Kaybı
KO ₂	: Kule Oksijen Seviyesi, %
LM	: Levenberg-Marquardt Algoritması
MRF	: Materials recovery facilities residue (geri dönüşüm tesisi atığı)
MSE	: Ortalama Karesel Hata
MSW	: Municipal Solid Waste (Kentsel Katı Atık)
NKD	: Net Kalorifik Değer (TJ/t)
NRPP	: Plastik ve Kağıt Kalıntılarının Geri Kazanım Tesislerinde İşlenmesi İle Elde Edilen Atık
OF	: Oksidasyon Faktörü
ÖTL	: Ömrünü Tamamlamış Lastik
ÖTLB	: Bütün Ömrünü Tamamlamış Lastik, %
ÖTLK	: Kırpılmış Ömrünü Tamamlamış Lastik, %
P	: Petrokok, %
PAH	: Poli Aromatik Hidrokarbonlar
PCDD	: Poliklorlanmış Dibenzoparadioksin
PCDF	: Poliklorlanmış Dibenzofuran
PM	: Particulate Matter (Toz)
PVC	: Poli Vinil Klorür
RDF	: Refused Derived Fuel (Atıktan Türetilmiş Yakıt)
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hatası
R ²	: Korelasyon Katsayısı
SAP	: Raporlama Sistem Yazılımı
SCG	: Scaled Conjugate Gradient Algoritması
SCR	: Seçici Katalitik İndirgeme
SEÖS	: Sürekli Emisyon Ölçüm Sistemi
SGİR	: Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ
SKHKKY	: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği
SNCR	: Seçici Katalik Olmayan İndirgeme
SRF	: Solid Refused Fuel (Katı Atıklardan Türetilmiş Yakıt)
T	: Tonaj, t/s
TCDD-F	: Tetra Klorludibenzoparadioksinler ve Furanlar
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği

TDF	: Tire Derived Fuel (ÖTL, Kırpılmış Lastik)
TEQ	: Uluslararası Toksikite Ekivalent
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TSR	: Thermal Substitution Rate (Isıl Yer Değişirme Oranı), (%)
VOC	: Volatile Organic Carbon (Uçucu Organik Karbon)
WBCSD	: World Business Council of Sustainable Development (Sürdürülebilir Gelişim Dünya İş Konseyi)
YSA	: Yapay Sinir Ağı



ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ALTERNATİF YAKIT KULLANIMININ BACA GAZI EMİSYONLARI ÜZERİNE ETKİLERİ

ÖZET

Bu çalışmada, atıkların alternatif yakıt olarak çimento üretimi amaçlı döner fırınlarda kullanımının baca gazı emisyonları üzerine etkilerinin incelenmesi ve alternatif yakıt kullanımı ile emisyonlardaki değişimlerin tahmin edilmesini sağlayan bir modelin oluşturulması amaçlanmaktadır.

Deneysel çalışmadaki veriler, intikal ve alev borusundan atık beslemesi yapan ön ısıtıcılı bir döner fırına aittir. Çalışmada, döner fırında farklı atıkların ve konvansiyonel yakıtların kullanım miktarları, kalorileri ve sürekli emisyon ölçüm cihazı parametreleri kullanılmıştır. Konvansiyonel yakıt yerine atık ikamesi ile farklı oranlarda ısıl yer değiştirme elde edilerek toz, NO_x, SO_x, TOK, HF ve HCl ile CO₂ emisyon parametreleri üzerindeki etkileri gözlenmiştir.

Yapılan çalışma ile, bir döner fırında atık kullanımının toz, SO_x, TOK, HF ve HCl emisyonları üzerinde net etkiye sahip olmadığı, NO_x emisyonlarının ise ısıl yer değiştirme yüzdesinden bağımsız olarak azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Farklı tip ve farklı noktalardan atık beslemesi ile NO_x emisyonlarının %50 azaltılabileceği sonucu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, emisyon faktörü, konvansiyonel yakıtlardan daha düşük atıkların alternatif yakıt olarak kullanılması ile CO₂ emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Çalışma sonuçları ile %3,47 oranında CO₂ emisyonu azaltımı sağlandığı belirlenmiştir.

Döner fırında atıkların kullanılması ile elde edilen verilerden CO, NO_x, SO_x, TOK ve toz parametreleri 5 farklı yapay sinir ağı oluşturularak modellenmiştir. Deneysel veriler kullanılarak yapay sinir ağı eğitilmiş ve bu parametrelere ait çıktı değerleri elde edilmiştir. Ağlara ait parametreler kullanılarak giriş parametreleri için önem faktörleri belirlenmiştir.

Ağlarda korelasyon katsayısı (R²), kök ortalama kare hatası (RMSE) ve etkinlik katsayısı (E_f) hesaplanmış ve en yüksek doğrulukla tahmin edilen parametrelerin TOK ve toz YSA modellerinden elde edildiği görülmüştür. Hata payı en yüksek olan ve tahmin yeterliliği en düşük olan modelin ise CO olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alternatif Yakıtlar, Atıklar, Çimento, Döner Fırın, Emisyon, Klinker, Yapay Sinir Ağları.

EFFECTS OF ALTERNATIVE FUEL IN CEMENT MANUFACTURING ON FLUE GAS EMISSIONS

ABSTRACT

This study aims to investigate the effects of the use of wastes in rotary kilns for cement production as an alternative fuel, on flue gas emissions, and to construct a model that enables the use of alternative fuels to predict emissions' changes.

In the experimental study, the data of a preheater rotary kiln fed waste from the kiln inlet and the main burner were evaluated. In the study, the consumed amount, calories, continuous emission monitoring system parameters of different types of waste, and conventional fuels used in the rotary kiln were investigated. By substitution of waste instead of conventional fuel, different thermal substitution rates were obtained, and its effects on dust, NO_x, SO_x, TOC, HF, and HCl and CO₂ emission parameters were observed.

The study shows that the use of waste in a rotary kiln does not have a net effect on dust, SO_x, TOC, HF, and HCl emissions. On the other hand, it was determined that NO_x emissions showed a decreasing tendency regardless of the thermal substitution percentage. It was concluded that NO_x emissions could be reduced by 50% depending on the type of waste fed and feeding point. Also, it was seen that CO₂ emissions decreased by using wastes that have lower emission factors than conventional fuels as alternative fuels. It was determined that a CO₂ emission reduction of 3.47% could be achieved by substituting waste as an alternative fuel.

CO, NO_x, SO_x, TOK, and dust parameters, which are the data obtained using waste in the rotary kiln, were modeled by creating five different artificial neural networks. The artificial neural networks were trained using the experimental data, and the output values of these parameters were obtained. Importance factors for the input parameters were determined using the weight parameters of the networks.

The correlation coefficient (R^2), root mean square error (RMSE), and efficiency coefficient (E_f) in the networks were calculated. It was found that the parameters estimated with the highest accuracy were obtained from the TOK and dust ANN models. The model with the highest margin of error and the lowest estimation capability was determined to be CO.

Keywords: Alternative Fuels, Wastes, Cement, Rotary Kiln, Emission, Clinker, Artificial Neural Networks.

GİRİŞ

Barınma insanoğlunun en temel ihtiyaçlarından biri olmuştur. Bu nedenle yapılara, binalara ihtiyaç duymuştur. İlkel dönemlerde bu ihtiyacı mağara ile ya da dallar, yapraklar ve ahşaplar ile karşılayan insanoğlu modern çağa yaklaştıkça bağlayıcı özellikli malzemeleri keşfetmiş ve betonarme yapılara geçiş yapmıştır. Puzolan ve killerden başlayan yolculuk kuru proseslerde kalker ve kilin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile edilen çimentonun inşaatların en fazla aranan malzemesi olması ile ilerlemektedir [1].

Çimento; ana hammaddeleri kil, kalker ve demir cevheri olan, bu hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda pişirilerek yarı mamül denilen klinkerin elde edilmesi, klinkerin ise çeşitli katkı maddeleri eklenmesi ile öğütülmesi sonucu üretilen genellikle yeşilimsi gri renkteki hidrolik bağlayıcıdır [2, 3].

Çimento sektörü enerji ve yakıt kullanımı yüksek olan bir sektördür ve endüstriyel olarak harcanan enerjinin yaklaşık %15'i çimento sektörü tarafından kullanılır. Ortalama olarak kuru proseslerde 1(bir) ton çimentonun üretimi için 3,4 GJ termal enerji ve 110 kwh elektrik enerjisi harcanmaktadır. Bununla birlikte bir ton çimento üretiminden, klinker/çimento oranına bağlı olarak 0,73-0,99 kg aralığında CO₂ emisyonu açığa çıkmaktadır. Diğer endüstriler ile kıyaslandığında, çimentodan açığa çıkan CO₂ emisyonunun %50'sinden fazlası kalsiyum karbonatın parçalanarak kalsiyum oksit ve karbondioksit dönüşümü kalsinasyon prosesinden kaynaklandığı bilinmektedir. Çimento sektörü tek başına CO₂ gazı salımlarının %5 ila %7'sinden, tüm sera gazı salımlarının ise %3'ünden sorumludur [4-10].

Çimento sektörü karbondioksit olduğu gibi üretimin en önemli aşaması olan klinker üretim basamağı ile de azotoksit, kükürtoksit, toz, toplam organik karbon, hidrojen florür, hidrojen klorür, ağır metaller, poliaromatik hidrokarbonlar ve poliklorlu dibenzodioxinler ve dibenzofuranların atmosfere salımına neden olan ve enerji tüketiminin yoğun olduğu bir sektördür. Oldukça kapsamlı ve karmaşık bir konu olan sürdürülebilirlik, enerji yoğunluğu, hava kirletici salımları, tükenebilecek doğal

hammadde kullanımı ve fosil yakıt kullanımları gibi çevre dostu sayılmayan uygulamaları nedeniyle çimento sektörünün bu etkilerini azaltarak olumlu çevresel etkilere sahip olması için sektörde etkin bir şekilde takip edilmekte ve uygulanmaktadır [10-13].

İklim değişikliği ve küresel ısınma gibi kavramlar nedeniyle çimento sektörünün çevresel etkileri giderek daha da önem kazanmaktadır. Çimento fabrikaları çevresel etkilerini uyum sağlamak zorunda oldukları mevzuatlar çerçevesinde gerçekleştirmektedir. Üretim kısmında sebep oldukları hava kirleticileri, sera gazı emisyonlarını ve diğer çevresel etkilerini azaltmak amacıyla üretim faaliyetlerinde bazı değişiklikler yapmaktadırlar. Uyumsal değişiklikler, klinker/çimento oranını azaltmak ve katkılı çimento üretimini arttırmak, “Best Available Techniques” dökümanındaki uygulanabilir tekniklere geçebilmek adına teknolojik iyileştirmeler, filtre sistem iyileştirmeleri ve fosil yakıt yerine belirlenmiş ve izin verilmiş atıkları alternatif yakıt olarak birlikte işleme yapmaları sayılabilir [9].

Enerji yoğun bir sektör olan çimento sektöründe toplam maliyetlerin yaklaşık %30-40’lık oranı enerji maliyeti olarak değerlendirilebilir ve bu maliyetlere neden olan birincil yakıtlar da petrokok, kömür (linyit, steamcoal vb.), doğalgaz ve fuel oil olarak sıralanabilir [14, 15]. Dünyada çimento üretiminde en çok kullanılan yakıt kömürdür ve sektör bir ton çimento üretebilmek için ortalama olarak yaklaşık 120 kg kömür tüketmektedir. Dünyada 2018 yılında 2,4 milyar tonu Çin’de olmak üzere, yaklaşık 4,2 milyar ton çimento üretilmiştir ve bir ton çimento üretimi için ortalama 120 kg kömür veya eşleniği fosil yakıt tüketilmekte olup, dünya çimento üretimi için yıllık kömür eşleniği fosil yakıt tüketimi yarım milyar ton olmuştur. Çimento üretiminde fosil yakıtların payı %90 seviyesindedir. Çimento sektörü, yakıt maliyetlerini ve enerji maliyetlerini yönetebilmek zorunda olduğu gibi aynı zamanda da karbondioksit ve azotoksitler gibi yoğunlukla salımını yaptığı emisyonları azaltmak adına da artan baskılar ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, fosil bazlı yenilenemeyen kaynaklar yerine atıkları döner fırınlarında alternatif yakıt olarak kullanarak hem emisyonlarını azaltmayı, hem atık hiyerarşisine katkıda bulunmayı hem de enerji maliyetlerini düşürebilmeyi amaçlamaktadırlar [16, 17].

Çimento sektöründe alternatif yakıt kullanımı 1970'li yıllardan beri gerçekleşmektedir. Global yerdeğiştirme oranı %13 iken bazı ülkeler bireysel olarak %80 ısı yer değıştirme oranlarına ulaşmıştır [18, 19]. Global ısı yer değıştirme oranları 2017 yılında 1990 yılına oranla 8,8 kat artarak %2 seviyesinden %18 seviyelerine yükselmiştir. Avrupa birliğı ülkeri arasında en çok kullanılan atık tipleri %35 ile atıktan türetilmiş yakıt, %20 ile karışık endüstriyel atıklar, %18 ile de ömrünü tamamlamış lastikler olarak sıralanabilir [20]. Avrupa birliğı ülkelerinde 2014 yılında ısı yer değıştirme oranı %65 ila %7 arasında değışkenlik gösterirken birlik ortalaması %41 olarak gerçekleşmiştir. Birlik üyesi ülkelerden yalnızca 6 tanesinin %30'dan daha düşük ısı yer değıştirme oranına sahip olduğı görülmüştür [21]. Ülkemizde de alternatif yakıt kullanımı mevzuatlar gereğince lisansa tabi bir işlemdir. Ülkemizde faaliyet gösteren 54 fabrikanın 35'i ilgili lisansa sahiptir. Ancak, Türkiye'de atık kullanım oranları oldukça düşük ısı yer değıştirme oranlarında gerçekleşmektedir. 2018 yılında ülkemizdeki ısı yer değıştirme oranı yaklaşık %6 olurken bu oran 2017 yılında yaklaşık %5 olarak gerçekleşmiştir. Ancak, bazı fabrikalar bireysel olarak %30 oranlarını geçmişlerdir. Isıl yer değıştirmede %30 oranlarını geçen fabrikalar bulunmasına karşılık %5 seviyelerinde kalınmasının nedeni lisans alan bazı fabrikaların atık tedarik edememeleri ile yıl içerisinde hiç birlikte işleme yapamamasıdır [22, 23]. Türkiye'deki çimento fabrikaları son yıllarda alternatif yakıt kullanımlarını arttırabilmek için yatırımlar yapmakta ve proses iyileştirmelerine gitmektedir.

Bu çalışmada, atıkları birlikte işleme ile alternatif yakıt olarak kullanan çimento fabrikasının hava kirleticilerinin değışimlerinin incelenmesi ve alternatif yakıt kullanımlarının emisyonlar üzerindeki avantajlarının ve/veya dezavantajlarının belirlenebilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışma konusu, çimento fabrikalarının ülkemizde giderek artması, fosil yakıt kullanan çimento fabrikalarının hem çevresel etkilerini hem de maliyetlerini yönetebilmek adına sürdürülebilirlik çerçevesinde alternatif yakıt kullanımına yönelmeleri sonucu seçilmiştir. Böylelikle, dünyanın hızla yol aldığı birlikte işleme prosesinin ülkemizdeki fabrikaların toz ve gaz emisyonları üzerindeki etkilerinin belirlenerek konvansiyonel yakıt kullanımlarının azaltılmasına olanak sağlaması, emisyonların azaltılmasına olabilecek katkıları ile hava kirliliğı üzerindeki olumlu etkilerin görülebilmesi ve karbondioksit salımlarının düşürülmesine

olan etkilerinin incelenerek iklim değişikliği ve küresel ısınmadaki paylarının düşürülmesinin mümkün olup olmadığının görülmesinin sağlanması planlanmaktadır. Aynı zamanda, farklı alternatif yakıt türleri için yapay sınır ağları ile çalıştırılacak model ile kullanılan alternatif yakıtlar sonucunda oluşacak emisyonların tahmin edilmesi amaçlanmaktadır. Bu modelin kullanımı ile fırın işletim şartlarını ilgili koşullara göre ayarlayarak, fırın şartlarını, ürün kalitesini bozmadan ani değişimler ile karşılaşmadan kesintisiz üretim yapabilmeyi ve emisyon sınır değerlerinde sıkıntı yaşamadan en yüksek düzeyde atık kullanım oranına ulaşarak doğru oranlarda atık karışımını sağlamanın mümkün olup olmadığının araştırılması planlanmaktadır.

Çalışmanın hedefi, alternatif yakıt kullanım miktarı artarken fabrikaların çevresel performanslarında gaz ve toz emisyonlarında olumsuz etki yapmadığının ve hatta karbondioksit üzerinde azalma sağladığının anlaşılabilmesi ve yapay sınır ağı modelinin emisyonların tahmininde kullanılabilmesidir.

Çalışmanın birinci bölümünde, çimento üretimi, dünyada ve Türkiye’de çimento sektörünün genel durumu hakkında bilgiler verilmektedir. İkinci bölümde, çimento sektöründeki emisyonlardan, bu emisyonların oluşum koşullarından ve fabrikalarda uygulanan emisyon azaltım tekniklerinden bilgiler aktarılmaktadır. Üçüncü bölümde, irdelenmesi planlanan konu atık kullanımı olduğundan atık nedir, atık kullanım yasal şartları nelerdir, atıkların fabrikalarda beslendikleri noktalar neresidir ve atık tipleri nelerdir sorularının cevapları özetlenmektedir. Dördüncü bölümde, çalışma ile ilgili olarak yapılan literatür araştırmasının özeti verilmektedir. Beşinci bölümde, çalışmaya konu olan çimento fabrikası hakkında bilgi verilmekte, atıkların özellikleri besleme miktarları, emisyonların takip şekilleri anlatılmaktadır. Altıncı bölümde fabrikadan elde edilen atık kullanım ve emisyon verileri sonucunda yapılan değerlendirmeler irdelenmektedir. Yedinci bölümde, yapay sınır ağları kullanılarak oluşturulan model ve modelin işleyişi aktarılmaktadır. Sekizinci bölümde ise farklı yüzdeler de atık kullanımı sonucunda sürekli emisyon ölçüm sistem verilerine dayanılarak belirlenen emisyonların değişimleri, atık tipleri ve atık yüzdelerine göre hesaplanan karbondioksit salım miktar karşılaştırma sonuçları ve yapay sınır ağı ile oluşturulan modelin çıktularından elde edilen sonuçlar değerlendirilerek özetlenmektedir.

1. ÇİMENTO ÜRETİMİ

1.1. Çimentonun Tarihçesi

Yontulmuş taş kırıntısı anlamına sahip olan Latince "caementum" sözcüğünden ortaya çıkmış olan "çimento" kelimesi, sonraları "bağlayıcı" anlamında kullanılmaya başlanmıştır. Yapı malzemelerinde bağlayıcı madde kullanımları eski çağlara dayanmakla birlikte ilk kullanılan bağlayıcının kireç olduğu görülmüştür. Eski Mısır, Kıbrıs, Girit, Eski Yunan ve Roma'da kirecin hidrolik bağlayıcı olarak kullanıldığı belirlenmiştir [24]. Dünyada çimento en az 12 milyon yıldır varlık göstermektedir. Dünya jeolojik değişimler geçirirken doğal çimento oluşumu gözlenmiştir. İnsanoğlu öncelikle bu doğal çimentoyu kullanmaya başlamıştır. Daha sonraları ise farklı malzemelerden nasıl çimento yapılacağını keşfetmişlerdir. Antik romalılar kireç ve "puzzolin" şimdilerde ise puzolan olarak bilinen volkanik küller içeren karışımlar kullanarak binalarını yapmışlardır ki bu binalar, köprüler yollar 2000 yıl sonra bile hala ayakta durmaktadır [25-28].

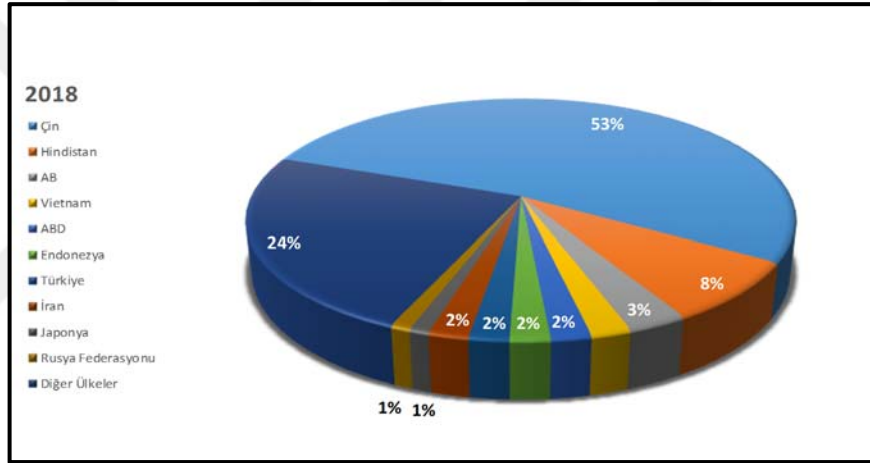
Çimentonun Latince kökeni "caementum" sözcüğünden, Romalı mimar-mühendis Marcus Vitruvius Pollio, "De Architectura" adlı eserinde bahsetmiştir. Bu sözcüğü kullanan ilk kişinin kendisi olduğu bilinmektedir. Vitruvius, o dönemler bu malzemeyi büyük binaların inşasındaki bağlayıcı madde olarak anlatmaktadır. Alçı ve kireç, duvar bloklarını birleştirmekte kullanılan ilk bağlayıcı maddeler olarak görünmüş, Mısır piramitleri, Çin seddi gibi yapılarda kalsine edilmiş killi jipsten bir tür bağlayıcı kullanıldığı görülmüştür. Mısır piramitlerinde kilin mi yoksa alçı ve kireç karışımı bağlayıcıların mı kullanıldığı tartışmalara neden olmakla birlikte tüm bu bağlayıcılar ile o tarihlerde yapılan yapılar hala ayakta durmaktadır. Bu tür yapılara Hitit-Frig döneminde kurulan Alişar'da (Yozgat) da rastlanmaktadır. Latince "bağlayıcı" anlamına gelen bu sözcük Farsçada bağlayıcı anlamını taşıyan, Kemênd olarak yer alırken Türkçeye de kement olarak geçmiş sonralarda ise Türk Dil Kurumu tarafından İtalyanca'dan "ÇİMENTO" kelimesi olarak dilimize geçtiği kabul edilmiştir [1, 3, 29-31].

Bağlayıcı malzemeler ortaçağda gelişme göstermemiştir. Bu yıllarda killi kalker 1000°C’de pişirilerek su kireci eldesi sağlandığı görülmüştür. Dünya çapında yıllık 4,2 milyar ton üretime sahip olan çimentonun dünyada en çok kullanılan inşaat malzemesi olması Endüstri Devrimi ile 18. yüzyıldan sonra gerçekleşmiştir [16, 32]. Cornwall (İskoçya) yakınlarındaki Eddystone deniz feneri inşaatını yapması istenen John Smeaton, orta çağda yapılmış olan Kendal ve Corfe kalelerinde kullanılan kireç-puzolan karışımını incelemiş ve 1756 yılında yaptığı çalışmalar sonucunda kil içeren kireçtaşlarından elde edilen bağlayıcının daha sağlam olduğu sonucuna varmıştır. John Smeaton kirecin hidrolik bağlayıcılığının kalkerin kil içeriğine bağlı olduğunu bularak bu gelişime ilk katkıyı sağlayanlardan olmuştur. Ayrıca, inşaat mühendisi tanınımı da ilk kullanan kişi olduğu kabul edilen Smeaton tarafından 1759 yılında yapılan Eddystone Feneri 126 yıl boyunca ayakta kalmıştır [1, 29, 33]. Daha sonraki yıllarda bildiğimiz çimentoya giden yollarda birçok araştırmacı farklı özellikleri keşfetmiştir. Bryan Higgins, kirecin pişirilmesi sonucu karbonsioksit gazının açığa çıktığını 1780 yılında saptadı. Sonrasında ise kil içeren kalkerin kalsinasyonu ile çimento yapımı için 1796 yılında Joseph Parker “Roma Çimentosu”, 1811 yılında ise James Frost “İngiliz Çimentosu” adı altında patent aldılar. Takip eden yıllarda hayatını çimento ve hidrolik bağlayıcıları araştırmak üzerine geçiren Louis-Joseph Vicat, kil ile kirecin beraber pişirilmesiyle hidrolik bağlayıcı üretebileceğini belirledi. Amerika Birleşik Devletleri’nde Erie kanalı inşaatında marnlı kalkerin kalsinasyonu ile doğal çimento elde edilebileceği görüldü. 1823 yılında ise farklı karışımlar pişirilerek sadece kireç-silis karışımlarının hidrolik özellikleri olduğu Berthier tarafından bulundu ve bugünkü çimentolarda sıklıkla kullanılan kalsiyum silikatlarını da sınıflandırmış oldu [29, 34].

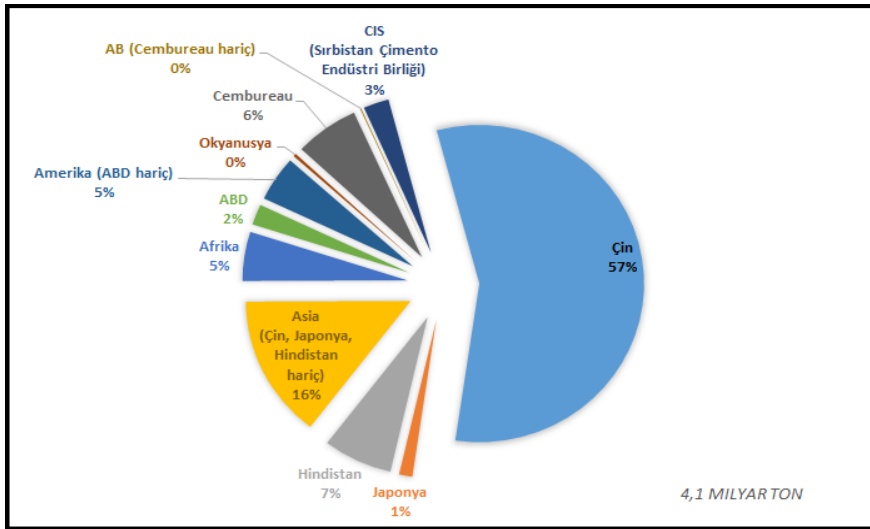
Günümüzde kullanılan çimento 1824 yılında İngiltere’de duvarcı ustası olan Joseph Aspdin tarafından geliştirilmiş ve Aspdin bu ürüne İngiltere’nin Portland adasındaki taşlara benzemesi açısından “Portland Çimentosu” adı ile patent almıştır [16]. Aspdin, kalker ve kili farklı oranlarda karıştırarak yüksek sıcaklıkta pişirmiş ve daha sonra öğütmüş ve yeşilimsi gri renkte bir çimento elde etmiştir [2]. Ne varki bu malzemelerin pişirilme sıcaklığının düşük olduğu, hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda pişirilip öğütülmesinin gerekliliği 1845 yılında Isaac Johnson tarafından ispatlanmıştır [24].

Tüm bu gelişmelerden sonra üretim için ilk fabrika İngiltere’de 1848 yılında kurulurken, 1871 yılında da Amerika Birleşik Devletlerinde çimento fabrikası kuruldu

[3]. Türkiye’de ise ilk çimento fabrikası Darıca’da 20.000 t/yıl kapasite ile kurulmuştur. Bir yıl sonra da 20.000 t/yıl kapasiteli Eskişehir Çimento Fabrikası kurulmuştur. Bu iki fabrika 1920 yılında rekabet nedeniyle birleşmişlerdir. Daha sonra Ankara, Zeytinburnu, Kartal ve Sivas’ta kurulan fabrikalar ile toplam kapasite 1950’li yıllarda 370.000 t/yıl’a yükselmiştir [24, 26]. 1950’den sonra Türkiye Çimento Sanayisi T.A.Ş.’nin (ÇİSAN) kurulmasıyla üretim artışı sağlanmıştır [35]. 2018 yılında Dünya’da çimento üretimi Şekil 1.1’de de görüldüğü gibi 4,2 milyar ton olarak gerçekleşmiştir. 2018 ve 2017 yıllarında da çimento üretiminde Çin birinci sırada yer almıştır. Türkiye üretim sıralamasında 2018 yılında Dünya’da 7. sırada yer almıştır. Türkiye 2017 yılında Şekil 1.2’den de görülebileceği gibi Dünya sıralamasında 6. sırada yer almaktaydı [16].



Şekil 1.1. Dünya çimento üretimi ülkelere göre dağılımı-2018 [16]



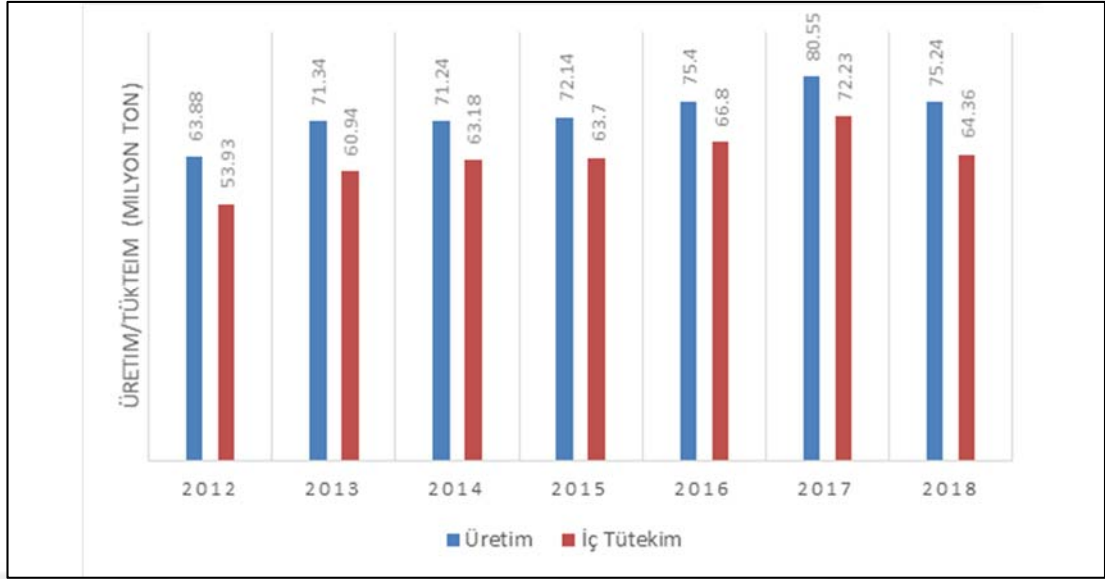
Şekil 1.2. Dünya çimento üretimi ülkelere göre dağılımı-2017 [16]

Tablo 1.1. G20 ülkeleri 2017 yılı çimento üretim miktarları [36]

Ülkeler	2001	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Çin	661,0	1.388,4	1.644,0	1.881,9	2.063,2	2.137,0	2.420,0	2.480,0	2.350,0	2.410,0	2.316,0
Hindistan	102,9	185,0	205,0	220,0	240,0	270,0	280,0	260,0	270,0	290,0	280,0
AB28	225,6	250,8	209,0	192,1	191,6	172,6	166,6	166,8	167,2	169,1	175,1
ABD	88,9	86,3	63,9	65,2	68,6	74,9	77,4	83,2	83,4	85,9	88,5
Brezilya	39,4	51,6	51,7	59,1	63,0	68,8	70,0	72,0	72,0	60,0	54,0
Türkiye	30,0	51,4	54,0	62,7	63,4	63,9	72,7	71,2	71,4	75,4	80,6
Rusya	28,7	53,5	44,3	50,4	56,1	53,0	72,0	68,4	69,0	56,0	58,0
Endonezya	31,1	38,5	36,9	39,5	45,2	32,0	56,0	65,0	65,0	63,0	69,0
G. Kore	52,0	51,7	50,1	47,4	48,2	48,0	47,3	63,2	63,0	55,0	62,6
Japonya	79,5	67,6	59,6	56,6	56,4	51,3	57,4	53,8	55,0	56,0	55,2
S.Arabistan	20,0	37,4	37,8	42,5	48,0	50,0	57,0	55,0	55,0	61,0	63,0
Meksika	33,2	37,1	35,1	34,5	35,4	35,4	34,6	35,0	39,8	40,8	46,1
Almanya	32,1	33,6	30,4	29,9	33,5	32,4	31,5	32,1	31,1	32,7	34,0
İtalya	39,8	43,0	36,3	34,4	33,1	26,2	23,1	21,4	20,8	19,3	19,3
Fransa	19,1	21,2	18,1	18,0	19,4	18,0	17,5	16,4	15,6	15,9	16,9
G. Afrika	8,4	13,4	11,8	10,9	11,2	13,8	14,9	13,8	14,0	13,6	13,6
Kanada	12,1	13,7	11,0	12,4	12,0	12,5	12,1	12,8	12,5	11,9	12,7
Arjantin	5,5	9,7	9,4	10,4	11,6	10,7	11,9	11,8	12,2	10,9	12,2
B.Krallık	11,9	10,5	7,8	7,9	8,5	7,9	8,5	9,3	9,6	9,4	9,4
Avustralya	6,8	9,4	9,2	8,3	8,6	8,8	8,6	9,3	9,3	9,4	9,8

Tablo 1.1, G20 ülkelerinin yıllar içerisindeki çimento üretim miktarlarındaki değişimleri göstermektedir. Enflasyon, artan yakıt maliyetleri ve ekonomik krizlerin gölgesinde, 2017 yılında küresel çimento üretimi tablodan da görülebileceği gibi yaklaşık 4.1 milyar ton olmuştur. Çin, dünya çimento üretiminin %57'sini 2,3 milyar ton ile gerçekleştirirken 2018 yılında üretim oranı %53'e gerilemiştir. Avrupa Birliği'nde Cembureau üyesi olan ülkelerin üretimi 2017 yılında 175,1 milyon ton ile toplam üretimin %6,3'üne denk gelmektedir. 2018 yılında Avrupa Birliği'nin üretim yüzdesi %3'e gerilemiştir [36].

Türkiye'de 2018 yılında sektör 52 entegre tesis ve 20 öğütme tesisi ile 75,24 milyon ton çimento üretimi yapmıştır. Bu üretim miktarı sektörün sahip olduğu 141,88 milyon ton olan kurulu kapasitesinin %53'ünü oluşturmaktadır. 2018 yılında klinker üretimi ise 89,86 milyon olan üretim kapasitesinin %78,3 oranında gerçekleşmesi ile 70,34 milyon ton olmuştur. Türkiye çimento sektöründe 2012 yılları ile 2018 yılları arasındaki çimento üretim ve tüketim miktarları Şekil 1.3'te görülebilmektedir. 2012 yılından 2018 yılına kadar olan artış yaklaşık %18 olmakla birlikte 2018 yılında çimento üretiminin 2017 yılına oranla %6 azaldığı da görülebilmektedir [35].



Şekil 1.3. Türkiye çimento üretim ve tüketimin yıllara göre değişimi [37, 38]

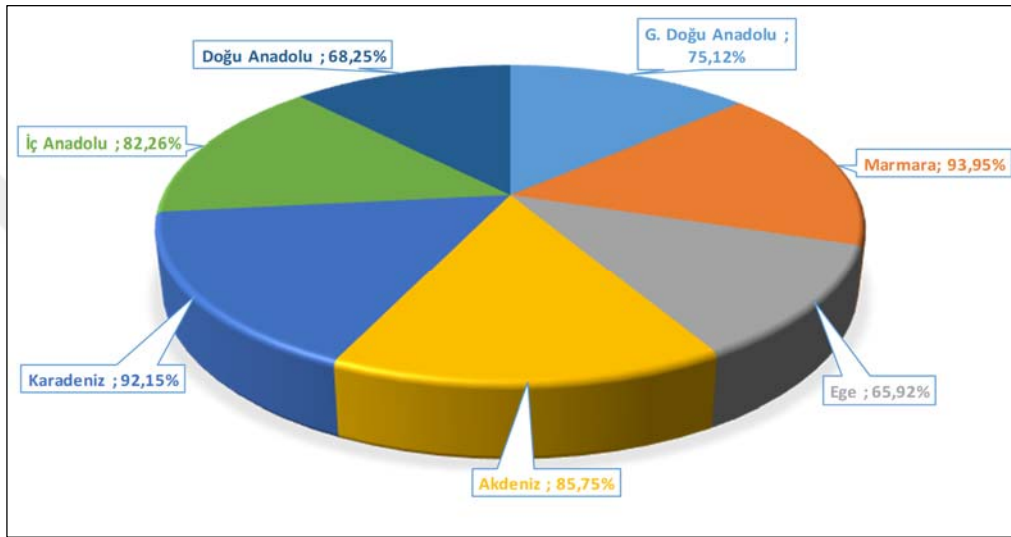
Türkiye’de tüm coğrafi bölgelerde çimento fabrikaları bulunmaktadır. Çimento sektörü dağılım haritası Şekil 1.4’te görülmektedir. Tüm sektörün klinker üretim kapasitesi 2018 yılı için 89,9 milyon ton olmuştur.



Şekil 1.4. Türkiye çimento fabrikaları haritası – 2020 [37]

Enerji ve yakıtın yoğun olarak kullanıldığı ve emisyonların oluşumuna neden olan döner fırın ünitesinin bulunduğu klinker üretiminin 2018 yılında gerçekleşen kapasite

kullanım yüzdelерinin bölgelere dağılımı Şekil 1.5'te verilmiştir. Türkiye'nin en yüksek klinker üretim kapasitesine sahip bölgesi yaklaşık 23 milyon ton ile Akdeniz Bölgesi iken Güneydoğu Anadolu Bölgesinin 6,3 milyon ton klinker üretim kapasitesi ile sonuncu sırada yer aldığı bilinmektedir. Her ne kadar Akdeniz Bölgesi klinker üretim kapasitesi olarak en yüksek miktara sahip olsa da en yüksek kapasite kullanım oranı yaklaşık %94 oranı ile Marmara Bölgesin'de, en düşük kapasite kullanım oranı ise %66 oranı ile Ege Bölgesi'nde gerçekleşmiştir [35, 37, 38].



Şekil 1.5. Türk çimento sektörü klinker kapasite kullanım oranları-2018 [37]

1.2. Çimento Üretim Prosesi

Çimento, gelişen ekonomi ile büyüme gösteren bir sektördür. 1950'li yıllarda küresel çimento üretimi 200 milyon tondan az iken 2006 yılında bu rakam 2,5 milyar tona ulaşmıştır. Tüm bu üretimler esnasında çimento endüstrisi küresel elektrik tüketiminin %2'sini harcamaktadır. Tüm çimento üretimi aşamalarında harcanan elektriğin %67'si kırıcılar ve öğütme proseslerinde harcanmaktadır [39].

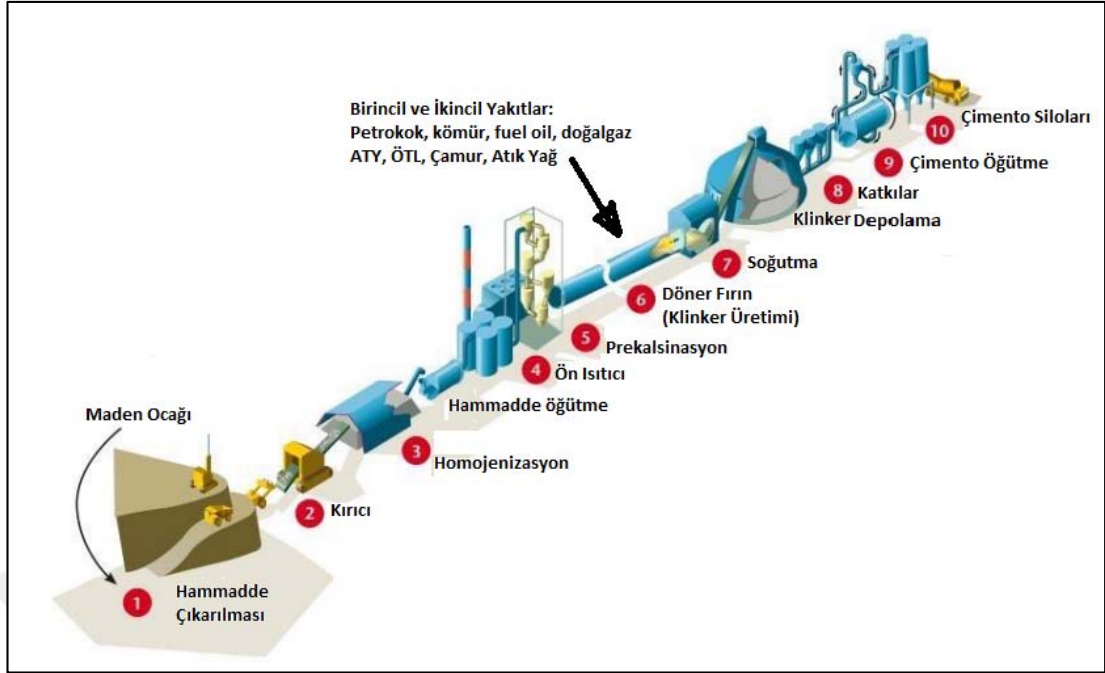
Çimento, suda ve havada sertleşebilen ve sonrasında belirli bir dayanım ve hacime sahip olan hidrolik bir bağlayıcıdır. Bu bağlayıcının üretimi kil ve kalker gibi doğal hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ve öğütülmesi sonucu gerçekleşir. Üretimin hammadde dışındaki diğer önemli girdileri elektrik, kömür, petrokok, fuel oil, doğalgaz gibi birincil yakıtlar ve ömrünü tamamlamış lastikler, atıktan türetilmiş yakıt, atık yağlar, atık çamurlar olarak gruplandırılan ikincil yakıtlar olarak sıralanabilir. Klinker üretim prosesinde günümüzde en çok tercih edilen yöntem kuru

sistem olarak adlandırılan döner fırınlardır. Portland çimento klinkeri, çoğunlukla kalsiyum karbonat (CaCO_3), silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) bileşiklerini içeren kalker/kil karışımından yapılmaktadır. Kalker/kil karışımının öğütülmesi ile elde edilen farin, ısıtıcı kule ya da kalsinatör vasıtası ile kalsine olarak döner fırına girer. Kalsinasyon sırasında CaCO_3 parçalanarak CO_2 ve bileşiklerine ayrılmaktadır.

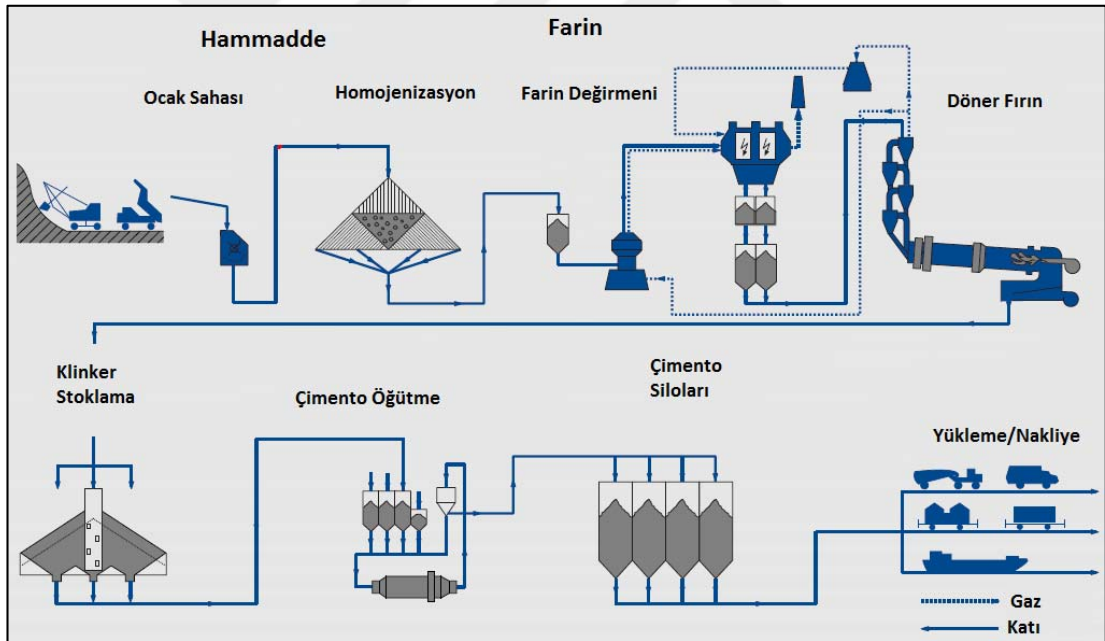
Döner fırına giren farin 1700°C 'de pişirilerek çimento dayanımı için gerekli olan kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat fazlarını oluşturur. Kalsinatör yaklaşık olarak döner fırın yakıtının %60'ının yakıldığı yerdir ve farinin fırına girmeden önce %90 oranında kalsine olmasına olanak sağlar. Çimento fırınları yaş ve kuru sistem olarak iki farklı tipte sınıflandırılabilir gibi kuru sistem fırınlar da "ön ısıtıcılı" ve/veya "kalsinatörlü" olmak üzere farklılık gösterir. Yaş sistem fırınlarda hammadde kurutmasından klinkerleşmeye kadar tüm proses fırında gerçekleşir. Ön ısıtıcılı fırınlarda, hammadde kurutma/öğütme farin değirmeninde gerçekleşir, kil minerallerinin dekompozisyonu ön ısıtıcı kulede, klinkerleşme ise fırında gerçekleşir. Kalsinatörlü fırınlarda ise kil ve kalker bileşiklerinin kompozisyonu ön ısıtıcı kulede klinkerleşme ise fırında meydana gelir [40].

Piştirme sonucu oluşan ürüne klinker denir ve klinker hızlı soğutma için soğutma ünitelerine alınır. Buradan da öğütülmek üzere çimento değirmenlerine gider ve çimento değirmenlerinde üretilecek olan çimento tipine göre standartlar çerçevesinde çeşitli katkıları eklenerek üretilen çimento, çimento silolarına aktarılarak satışa hazır hale getirilir. Klinker üretimi ve çimento üretiminin aynı yerleşkede yapıldığı çimento fabrikaları entegre fabrika olarak adlandırılmaktadır ve bir entegre fabrikada üretim aşamaları hammadde temini, kırıcı, homojenizasyon ve farin üretimi, klinker üretimi ve çimento üretimi aşamalarından oluşmaktadır. Tipik bir kuru sistem çimento üretim prosesi genel yerleşimi Şekil 1.6'da gösterilmektedir [10, 31, 40-44].

Şekil 1.7 ise Şekil 1.6'da verilmiş olan genel yerleşimin genel akışını göstermektedir. Şekil 1.7 ocaklardan başlayarak farin, klinker ve çimento oluşumu sırası ile üniteler ile katı ve gaz fazın akışını tanımlamaktadır.



Şekil 1.6. Modern kuru proses çimento üretimi [45, 46]



Şekil 1.7. Çimento akış şeması [47]

1.2.1. Hammadde temini ve kırma üniteleri

Çimento, yarı mamül klinkerin öğütülmesi ile elde edilir. Klinker ise ağırlıklı olarak kalker, kil ve marnın öğütülmesi ve pişirilmesi ile elde edilir. Klinkere çeşitli yardımcı malzemeler eklenerek 27 alt ismi olan 5 ana başlıkta çimento üretimi yapılmaktadır [44, 48].

1.2.1.1. Hammaddeler ve hammadde temini

Doğal hammaddenin tamamını kullanabilmek adına ocak işletmeciliği çimento fabrikaları için önemlidir. Madencilik faaliyetleri çoğunlukla açık ocak işletmeciliği şeklinde gerçekleştirilir. Patlatma ya da ekskavatör ile ana hammadde çıkarımı gerçekleştirilir ve buradan fabrikalara taşınırlar. Madencilik faaliyetleri genellikle fabrikalara yakın yerlerde bulunan ve ruhsat alınan sahalarda gerçekleştirilmektedir. Boksit, demir cevheri, yüksek fırın cürufu gibi diğer malzemeler ise herhangi bir yerden satın alınabilir [49, 50].

Kalker: Bileşiminde %90 oranında kalsiyum karbonat bulunduran ve doğada oldukça fazla miktarda bulunan doğal hammaddedir. Kalkerin yapısında ayrıca kil mineralleri, demir silikat bileşikler de bulunmaktadır. Kullanılacak olan kalkerin, nem içeriğinin düşük olması, kolay işlenebilir olması ve fabrikaya yakın mesafede bulunması tercih sebebidir [44, 51, 52].

Kil: Killer minerolojik yapılarında %90 oranında kil mineralleri bulunduran ve temel özellikleri alüminyum oksit ve sulu alüminyum silikat içermeleri olan kayalardır. Saf şekillerine kaolen denen killer, kaolin, profilit gibi isimler almaktadır ve kristal yapılarına göre farklı gruplara ayrılmaktadır. Çimentoda kullanılacak olan killerin alüminyum/silis oranının 2/1 olması tercih edilmekle birlikte alkali oksitlerin de %1 oranında kalması istenmektedir [44, 48, 51, 53].

Marn: Marn, kalker ve kil yerine kullanılabilen, bünyesindeki kalker oranı %50-70 arasında, kil oranı da %50-30 arasında olan hammaddedir. Klinker üretmek için doğal hammadde olan kalker ve kil sırasıyla %70 ve %30 oranlarında kullanılır ve marn bünyesinde bu oranları hali hazırda bulundurmaktadır. Minerolojik özellikleri nedeniyle marn çimento üretiminde ideal bir hammadde olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, kalkere göre daha yumuşak bir malzeme olması öğünme işlemlerini kolaylaştırarak maliyetleri de düşürmektedir [44, 53].

Demir Cevheri: Demir cevheri ana hammaddelerden biri olmamakla birlikte pişme özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla korrektör malzeme olarak kullanılabilir. Çimento fabrikalarında kullanılan demir cevherinin manyetit özelliği olması istenen bir durum değildir [53].

İlgili hammaddeler kullanılarak üretilen klinkerin ana bileşikleri CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ olup bu bileşiklerin elde edildiği ana kaynaklar Tablo 1.2’de gösterilmektedir. Tablo 1.3 ve Tablo 1.4 ise sırasıyla hammaddenin ve farin içerisindeki oksitlerin ağırlıkça yüzdelerini ve hammadde içerisindeki metallerin ağırlıklarını göstermektedir.

Tablo 1.2. Klinker bileşenlerine ait hammadde kaynakları [54]

Bileşik	Formül	Ana Kaynak
Kireç	CaO	Kalker, Marn
Silisyum dioksit	SiO ₂	Kil, kum, kumtaşı, çakıl
Alümina	Al ₂ O ₃	Kil, boksit, kum, şeyl
Demir oksit	Fe ₂ O ₃	Hematit, limonit, pirit külü, demir cürufu

Tablo 1.3. Hammadde ve farinin kimyasal analizi [50]

Bileşik	Kalker, Marn	Kil	Demir Kaynağı	Farin
	kütle (%)			
SiO ₂	0,5-50	33-78	0,5-30	12-16
Al ₂ O ₃	0,1-20	7-30	0,2-4	2-5
Fe ₂ O ₃	0,2-5,9	4-15	0-93	1,5-2,5
Mn ₂ O ₃	0,02-0,15	0,0090	0,1-4	0-0,5
CaO	20-55	0,2-25	0,1-34	40-45
MgO	0,2-6	0,3-5	0,5-7	0,1-5
K ₂ O	0-3,5	0,4-	0,1-2	0,1-1,5
Na ₂ O	0,0-1,5	0,1-1,5	0,1-1	0,1-0,5
SO ₃ (¹)	0,0-0,7	0-4	0,1-1	0-1,5
Cl	0,0-0,6	0-1	0-3	0-0,3
TiO ₂	0,0-0,7	0,2-1,8	0-0,5	0-0,5
P ₂ O ₅	0,0-0,8	0-1	0-3	0-0,8
ZrO ₂		0,02	0-1	
CaCO ₃	96			
Kızdırma Kaybı (CO ₂ +H ₂ O) KK=950°C	2-44	1-20	0,1-30	32-36

(¹): Toplam kükürt

Tablo 1.4. Hammadde ve farin içerisindeki metal bileşikleri [50]

Element	Kil	Kalker, marn	Farin
	mg/kg (kuru baz)		
Antimon (Sb)	NA	1-3	<3
Arsenic (As)	13-23	0,2-20	1-20
Berilyum (Be)	2-4	0,05-2	0,1-2,5
Kurşun (Pb)	10-40	0,3-21	4-25

Tablo 1.4. (Devam) Hammadde ve farin içerisindeki metal bileşikleri [50]

Element	Kil	Kalker, marn	Farin
Kadmium (Cd)	0,02-0,3	0,04-0,7	0,04-1
Krom (Cr)	20-109	1,2-21	10-40
Kobalt (Co)	10-20	0,5-5	3-10
Bakır (Cu)	NA	3-12	6-60
Mangan (Mn)	NA	≤250	100-360
Nikel (Ni)	11-70	1,5-21	10-35
Civa (Hg)	0,02-0,15	<0,01-0,13	0,01-0,5
Selenyum (Se)	NA	1-10	<10
Telyum (Te)	NA	<4	<4
Talyum (Tl)	0,7-1,6	0,05-1,6	0,11-3
Vanadyum (Vn)	98-170	4-80	20-102
Çinko (Zn)	59-115	10-40	20-47

1.2.1.2. Kırıcı üniteleri

Maden ocaklarından temin edilerek fabrikalara getirilen hammaddelerin önhomojenizasyonunun sağlanması için uygun boyutlara getirilmesi gereklidir. Bu amaçla fabrikalarda çekiçli, valsli ve çeneli olarak adlandırılan kırıcılar bulunmaktadır. Bu kırıcılara çimento sektöründe yaygın olarak konkasör adı da verilmektedir [53]. Kalker, kil, marn gibi doğal hammaddelerin boyutları Şekil 1.8'de gösterilen kırıcı ünitelerinde küçültülür ve stokhollere alınırlar.



Şekil 1.8. Kırıcı üniteleri [56]

Bu işlem ile hem enerji tüketiminin hem de hammaddenin nem miktarının azaltılması amaçlanmaktadır [53]. Hammaddenin kimyasal bileşimine, sertliğine, kırıcı ve farin değirmeni tiplerine bağlı olmakla birlikte burada harcanan enerji genel olarak 25-35 kWh/ton hammadde olarak tespit edilmiştir [44, 55]. Kırıcı ünitesinden çıkan hammaddeler fabrikalarda kırma işlemi sonucu stokhole alınır. Kırılan hammadde belirlenen oranlarda karıştırılarak çevresel olarak tozumanın da önlenmesi amacıyla üstü kapalı lastik bantlar vasıtasıyla farin değirmenine beslenmek üzere taşınırlar [51]. Transfer hatları Şekil 1.9’da gösterilmiştir.

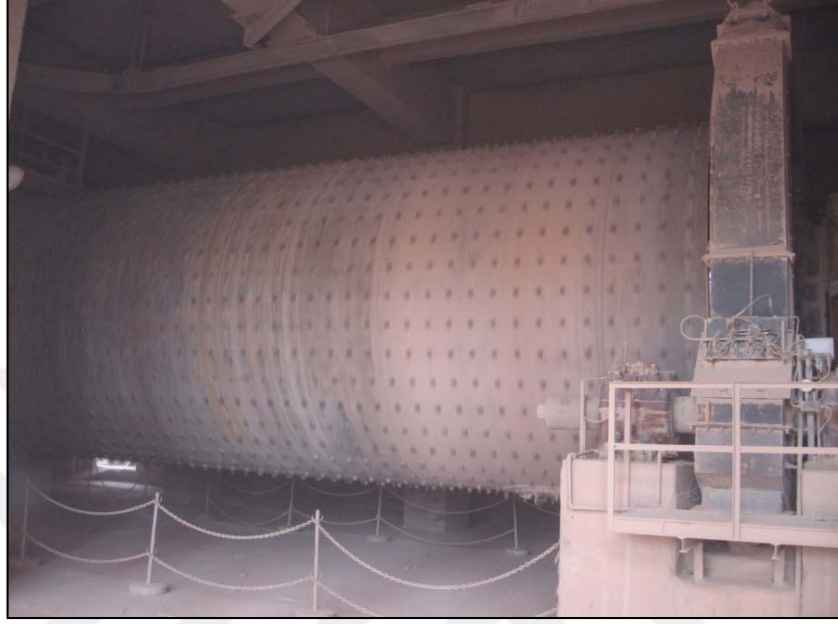


Şekil 1.9. Hammadde transfer hattı

1.2.2. Farin üretimi

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere çimento ve klinker CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşiklerinden oluşmaktadır. Bu nedenle, bu oksitlerin farin içerisindeki oranları oldukça önemlidir ve fabrikalar bu oranları farin içerisindeki analizler ile takip ederler [57]. Fransızca’da “un” anlamına gelen farin, klinkerin fırında pişmesinden önceki halidir ve istenilen klinkerin elde edilmesi için farin üretiminin doğru yapılması önemlidir. Boyutlarının küçültülmesi sonrasında stokhollerde depolanan hammaddeler içerdikleri oksitlere göre oranlanarak Şekil 1.10’da gösterilen bilyalı ya da Şekil 1.11’de gösterilen dik olarak adlandırılan farklı tiplerdeki farin değirmenlerine beslenmektedir. Farin değirmenlerinde 100 mikron’dan daha küçük boyutlara (75 ile 90 mikron) kadar öğütülen malzemeler farin silolarına taşınır [58].

Farin siloları, alt kısmı havalandırılan böylece çok ince tane yapısına sahip farinin oturmasını engelleyen ve fırına beslenene kadar farinin depolanmasını sağladığı silindirik yapılardır [59].



Şekil 1.10. Bilyalı farin değirmeni



Şekil 1.11. Dik farin değirmeni

1.2.3. Klinker üretim prosesi

Klinker üretim prosesi entegre fabrikalarda son ürün olan çimentonun üretimindeki en önemli basamaktır. Bu basamak, yakıt tüketiminin gerçekleşmesi nedeniyle enerji yoğunudur ve emisyonların bu noktada oluşması nedeniyle de çevresel etkileri yüksektir. Bu aşama ürün kalitesini de etkilemektedir. Farin besleme türüne göre döner fırınlar farklı tiplerde olabilirler, bu tipler; uzun döner fırınlar (yaş sistem), lepollü döner fırınlar (yarı kuru sistem) , ön ısıtıcılı döner fırınlar, dört kademeli ön ısıtıcılı fırınlar ve 4-6 kademeli ön ısıtıcılı ve kalsinatörlü fırınlar olarak sıralanmaktadır. Fırın tipine göre spesifik termal enerji tüketimi de farklıdır. Tablo 1.5 klinker üretim prosesine göre tüketilen termal enerjiyi göstermektedir [52, 60]. Çalışmada kuru fırınlar dikkate alınmıştır, modern fırınlara doğru gidildikçe termal enerji tüketiminin düştüğü Tablo 1.5'ten görülebilmektedir.

Tablo 1.5. Klinker üretim prosesine göre spesifik termal enerji tüketimi [61]

Fırın Prosesi	Termal Enerji Tüketimi (GJT/t klinker)
Uzun döner fırınlar	5,86-6,28
Uzun kuru fırınlar	4,60
Tek kademeli ön ısıtıcı	4,18
2 kademeli ön ısıtıcı	3,77
4 kademeli ön ısıtıcı	3,55
4 kademeli ön ısıtıcılı ve kalsinatörlü	3,14
4-6 kademeli ön ısıtıcılı ve kalsinatörlü	3,01-2,93

Modern çimento üretiminde düşük enerji tüketimi sağlamak amacıyla döner fırın ve multi basamak siklonlu ön ısıtıcılı ve prekalsinasyonlu (ön kalsinasyonlu) sistemler en iyi teknik olarak belirlenmiştir. Klinker üretiminde, son ürün olan çimentonun kalitesini ve yakıt tüketim miktarını etkileyen dört işlemden bahsedilebilir. Bu işlemler, farinin ön ısıtılması, kalsinasyon, klinkerin pişirilmesi ve klinkerin soğutulması olarak adlandırılmaktadır [62].

Klinkerin döner fırınlarda pişirilmesi enerji yoğun bir prosestir ve burada gerekli olan enerji kömür, petrokok, linyit, fuel oil ya da doğal gaz gibi konvansiyonel (birincil) yakıtların yakılması ile elde edilir. Boesch ve diğerleri, tipik olarak ton klinker üretimi için gerekli olan enerjinin 4,43 GJ olduğunu ve bu enerjinin %50'sinin kömürden, %22'sinin petrokoktan, %1'inin doğal gazdan, %11'inin endüstriyel atıklardan,

%13'ünün atıktan türetilmiş yakıtlardan, %1'inin atık plastiklerden ve %2'sinin ömrünü tamamlamış lastiklerden karşılanabileceğini belirtmişlerdir [63,64].

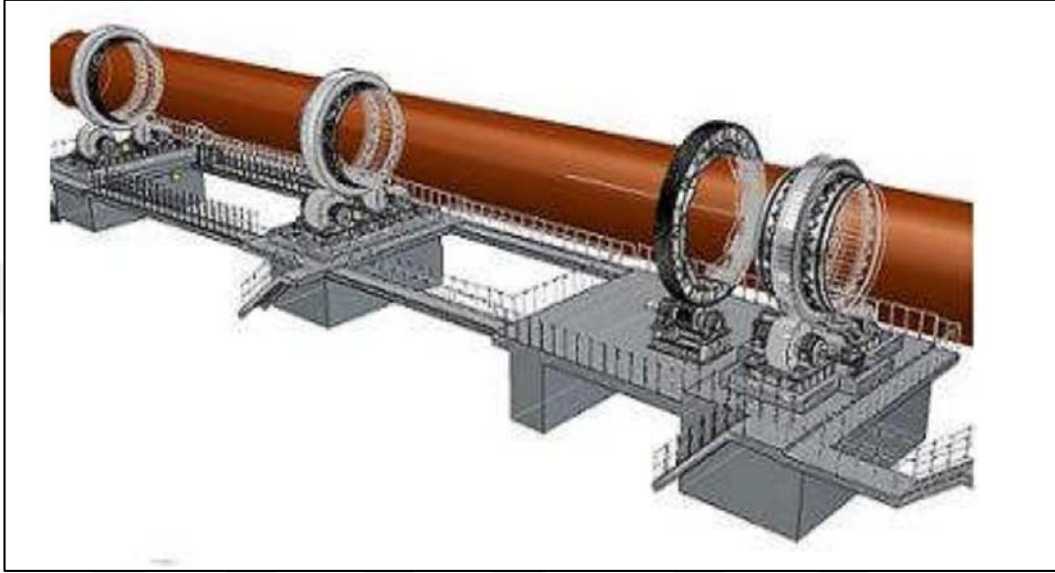
Döner fırınlarda kullanılan yakıtların Şekil 1.12'de gösterilen ters akım prensibi ile fırına beslenerek klinkerin pişmesini sağlaması için, farin değirmenlerine benzer değirmenlerde öğütülmesi sağlanır. Toz haline getirilen kömür, alev borusunda bulunan kanallar vasıtası ile döner fırına beslenir. Döner fırın alev borusu Şekil 1.12'de gösterilmiştir [65]. Kömür ve kömür karışımları bunkerlere beslenir ve lastik bantlar ile kömür değirmenine taşınır. Kömür değirmenine alınan miktarın bilinebilmesi için kömür tartım sistemleri kullanılmaktadır. Farklı teknolojiler ile gerçekleştirilebilecek olan tartımlara, teknolojilerine göre isimler verilebilmektedir. Kömür değirmenlerine beslenen kömür yaş halde olduğundan öğütme sırasında kömür değirmenine döner fırından gaz çekilerek kömürün kurutulması sağlanır. Öğütme sonraki aşamada kömür toz kömür bunkerlerine sevk edilir. Kömürün yanmasındaki en önemli özellik uçuculuğudur, eğer kömürde uçuculuk düşükse daha ince öğütülerek uçuculuğu artırılır [66].



Şekil 1.12. Alev borusu [65]

Döner fırınlar uzunlukları 200 ile 60 m arasında, çapları 3 ila 9 m arasında değişen yatay, silindirik, dönen borular olarak tanımlanabilir [67]. Farklı ısı bölgelerinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlarda fırın mantosunun aşınmasını, delinmesini engellemek amacıyla fırın iç kısmında refrakter tuğlalar örülüdür [68]. Döner fırın üst kısmında yer alan ön ısıtıcı kuleden gelen farin, fırının intikal deneni kısmından girerken fırının diğer ucunda bulunan alev borusundan ise petrokok, kömür, fuel oil,

doğalgaz gibi birincil yakıtlar ve ikincil yakıtlar girer. Döner fırınlar ters akım prensibi ile çalışır ve yatayda %3-4 eğim ile yerleştikleri noktada sürekli dönerek farinin kayarak, taşınarak, aleve doğru ilerlemesini ve kimyasal reaksiyonlar sonucu klinkerleşmesini sağlar [51, 60]. Bir döner fırının ayaklar üzerine yerleşimi Şekil 1.13'te, döner fırınlara ait ters akım prensibi ise Şekil 1.14'te gösterilmektedir.

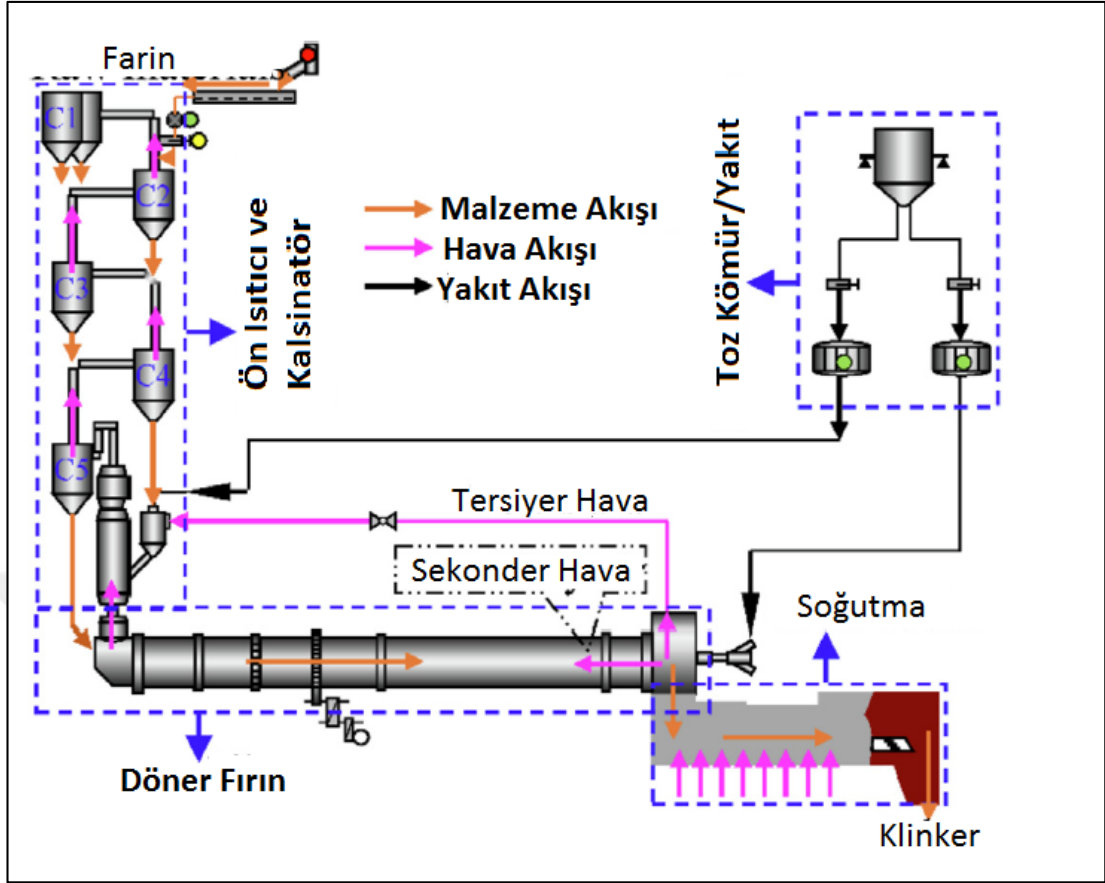


Şekil 1.13. Döner fırının ayaklar üzerine yerleşimi [60]



Şekil 1.14. Döner fırın ters akış prensibi [51]

Döner fırına giren farinin klinkerleşmesi tamamen kimyasal bir işlemdir. Fırının farklı bölgelerinde ve ön ısıtıcı kulede karşılaştığı sıcaklıklarda meydana gelen reaksiyonlar sonucunda fiziksel ve kimyasal değişikliklere uğrayan farin en son akışkan halde ani soğutmaya maruz bırakılarak klinker soğutma ünitesine iner [67]. Kuru sistem bir döner fırında mal girişi, hava akımları ve yakıt girişleri Şekil 1.15 ile gösterilmiştir.



Şekil 1.15. Kuru sistem döner fırında malzeme, hava ve yakıt akış diyagramı [69]

Şekil 1.15'ten de görüleceği gibi ön ısıtıcı ve kalsinatör bir seri siklondan oluşmaktadır. Kalsinatör ve fırından gelen, sıcaklığı 1.000°C 'yi bulan gaz ile siklonlarda farinin ön kalsinasyonu sağlanır. Sodyum, potasyum sülfatlar ve klorun bu gaz içerisinde bulunması siklonlarda sarmaya ve tıkanmalara sebebiyet verebileceğinden problemlidir [70]. Fırın kafa bölgesinden verilen yakıtlar sayesinde yüksek sıcaklıklara ulaşarak katı-katı ve katı-sıvı reaksiyonlarının gerçekleşmesine olanak sağlar [71]. Kalsine olan farin intikal bölgesinden fırına girerken kafa bölgesinden alev borusu ile yakıtlar verilir ki alevin bu noktada sıcaklığı 2.000°C 'yi bulur. Ayrıca, soğutma bölgesinden alınan sekonder hava da yanma için fırına verilir. Fırına giren farin farklı sıcaklık bölgelerinde farklı kimyasal reaksiyonlara maruz kalır, bu reaksiyonlar klinker fazları olarak adlandırılır. Fırının giriş bölgesinde $800-900^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda karbonatlar oksitlerine ayrılır. Daha sonra katı-katı reaksiyonları başlar, $1.000-1.200^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda dikalsiyum silikatlar oluşur. Bu noktalarda belit, alüminat ve ferrit katı fazları gerçekleşir. Ayrıca, bu sıcaklıklar hammadde ve yakıtların sahip olduğu alkaliler, sülfatlar ve klor gibi inorganik uçucuların açığa çıktığı sıcaklıklardır.

Açığa çıkan bu uçucular fırın içerisinde ring oluşumuna neden olarak kesit daralmasına yol açarlar. Daha sonra malzeme kalsinasyon bölgesi ya da yanma bölgesi olarak adlandırılan bölgeye gelir ve burada 1.300-1.450°C sıcaklıklarda alüminat ve ferrit fazın erimesi ile katı parçacıkların birbirine yapışmasını sağlayan, parçacıkları granüle eden belit fazı oluşumu ile klinker formasyonu gerçekleşmiş olur. Daha sonra oluşan klinker hızlı soğutmaya maruz kalarak fırın sistemini terk eder. Hızlı soğutmanın amacı, çimentonun sertleşmesinde yavaş ve kontrol edilebilir bir hidrasyon sağlanmasında önemli bir etkiye sahip olan alüminat fazının, stabil kalmasını sağlamaktır. Çünkü alüminat fazı 1.250°C ve üzeri sıcaklıklarda stabildir, düşük sıcaklıklarda bu faz belit ve kalsiyum oksit bileşiklerine dönüşen tersinir bir reaksiyondur. Soğutma gazı fırın içerisinde kalsinasyon bölgesinde (sekonder hava) ya da kalsinatörde (tersiyer hava) enerji verimliliği kapsamında kullanılmaktadır [69, 70, 72]. Klinkeri oluşturan ana bileşenler, hammadde ve yakıtların içeriklerine bağlı olarak geniş bir aralıkta dağılım göstermektedir. Klinker ana bileşikleri Tablo 1.6’da, klinkerleşme fazlarının yapıları ve adlandırılmaları ise Tablo 1.7’de verilmiştir.

Tablo 1.6. Klinker kimyasal kompozisyonu [39]

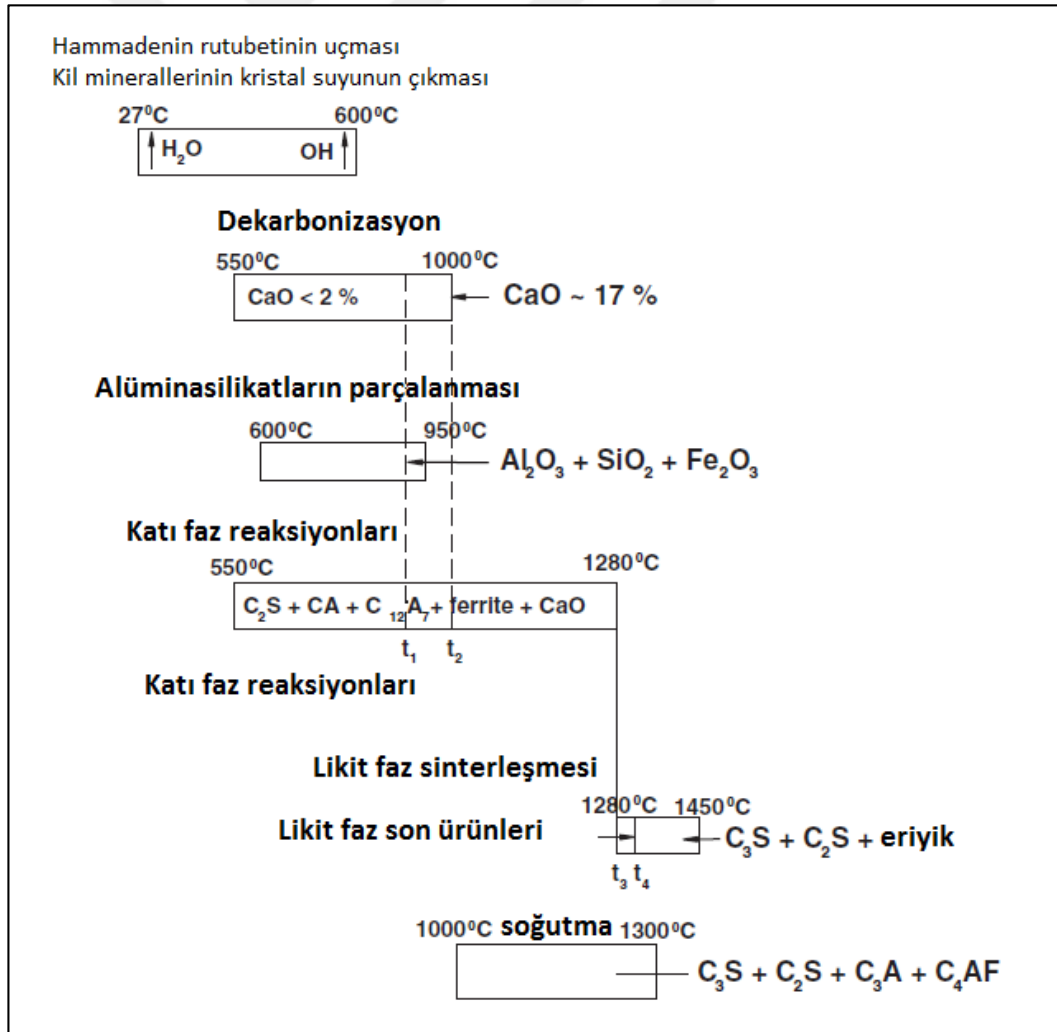
Bileşik	Klinker İçerisinde Bulunma Miktarı (%)
CaO	60 - 69
SiO ₂	20 - 25
Al ₂ O ₃	4 - 7
Fe ₂ O ₃	0,2 – 7
MgO	0,5 – 5
Na ₂ O + K ₂ O	0,5 – 1,5
SO ₃	0,1 – 1,3

Tablo 1.7. Klinker bileşenleri [73]

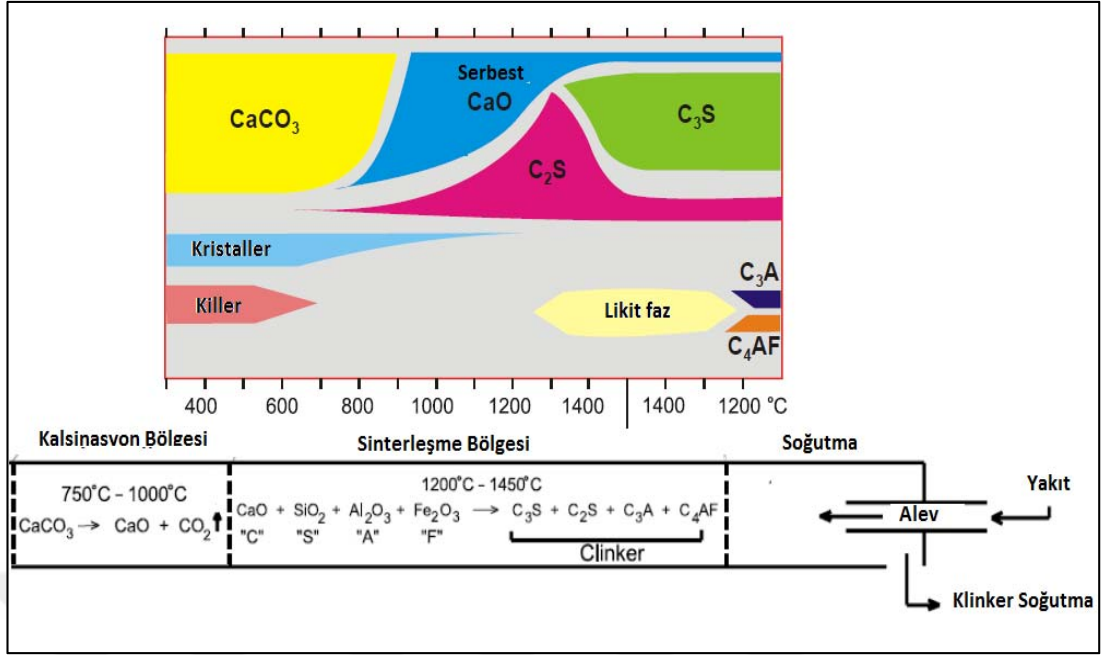
Bileşik Adı	Kimyasal Yapısı	Kısaltılmış Gösterimi	Klinker içerisinde bulunma miktarı (%)
Belit	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	2-30
Alit	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	40-80
Ferrit	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	4-15
Alüminat	3CaO. Al ₂ O ₃ .	C ₃ A	3-15

Tablo 1.7’de adlandırmaları verilmiş olan klinker fazlarının farklı özellikleri bulunmaktadır. C_2S suyla reaksiyonu yavaş olan ve az miktarda ısı açığa çıkaran bileşiktir ve bağlayıcılık özelliği kendini ilerleyen yıllarda belli eder. C_3S , su ile reaksiyonu sırasında orta miktarda ısı açığa çıkarır, bağlayıcı özelliği yüksektir. C_4AF su ile reaksiyonu yoktur ve bağlayıcı özelliği çok düşüktür. C_3A , su ile çabuk reaksiyona giren bir bileşiktir, reaksiyonu sırasında yüksek miktarda ısı açığa çıkarır. Bağlayıcı özelliğinin yanı sıra sülfatlara karşı çimento dayanımını da düşüren bir bileşiktir. Çimentonun hemen katılaşmasına neden olması yüzünden klinker öğütme sırasında alçı ile karıştırılır [74].

Farinden klinkere giden yolculukta döner fırın içerisinde gerçekleşen reaksiyonların özeti ve döner fırın bölgelerini gösteren çizim Şekil 1.16 ve Şekil 1.17’de gösterilmiştir.



Şekil 1.16. Klinkerizasyon reaksiyonları [75]



Şekil 1.17. Döner fırın zonları ve klinkerleşme reaksiyonları [73,75]

Klinkerleşme reaksiyonunun gerçekleştiği Döner Fırın fotoğrafı Şekil 1.18’de, kalsinasyonun gerçekleştiği ön ısıtıcı kule ve siklon grupları Şekil 1.19’da gösterilmiştir.

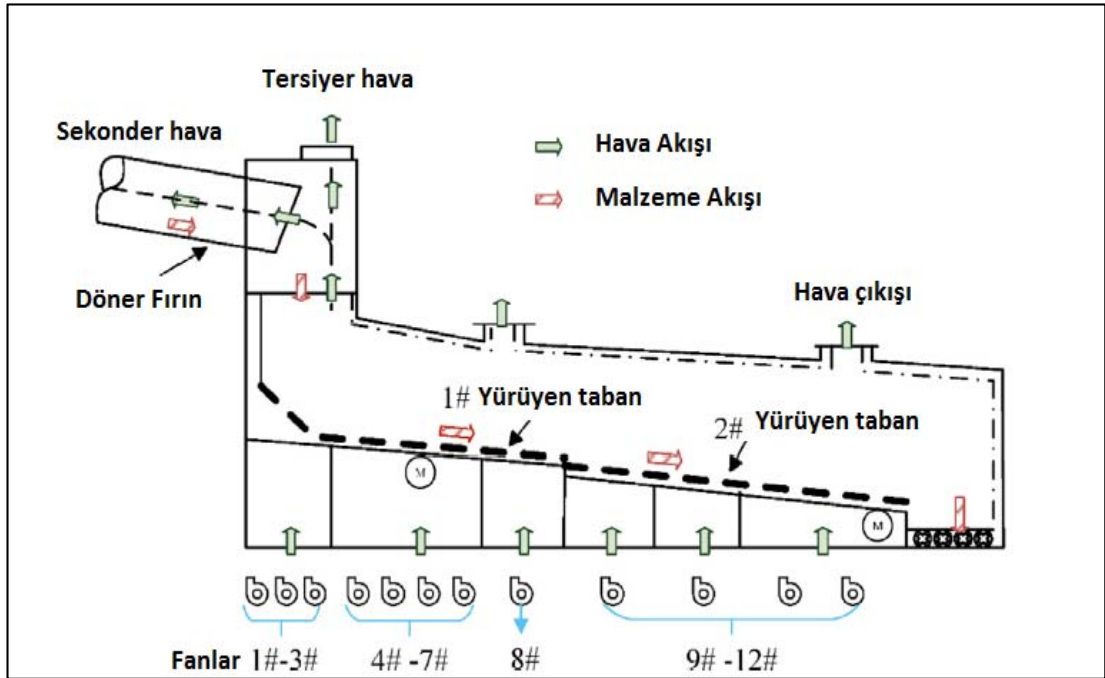


Şekil 1.18. Döner fırın

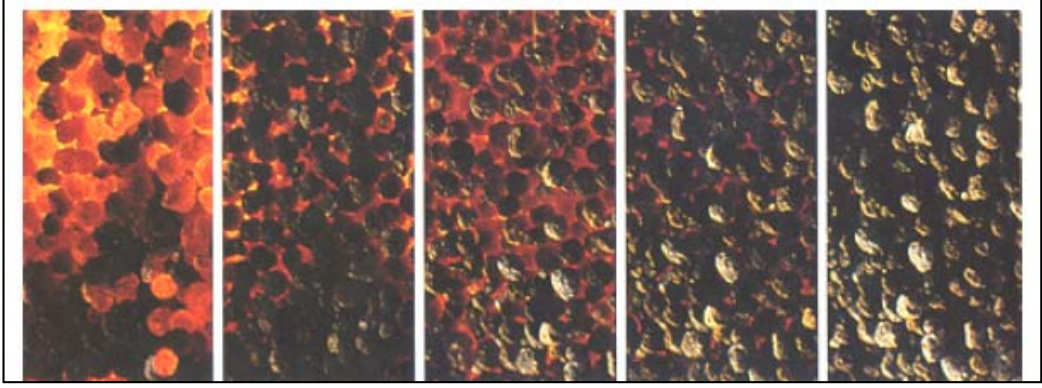


Şekil 1.19. Döner fırın siklon grupları

Klinkerin ani soğutulması amacıyla kullanılan soğutma ünitesinin şematik olarak gösterimi Şekil 1.20’de, klinkerin soğutma sırasındaki görüntüleri ise Şekil 1.21’de verilmiştir.



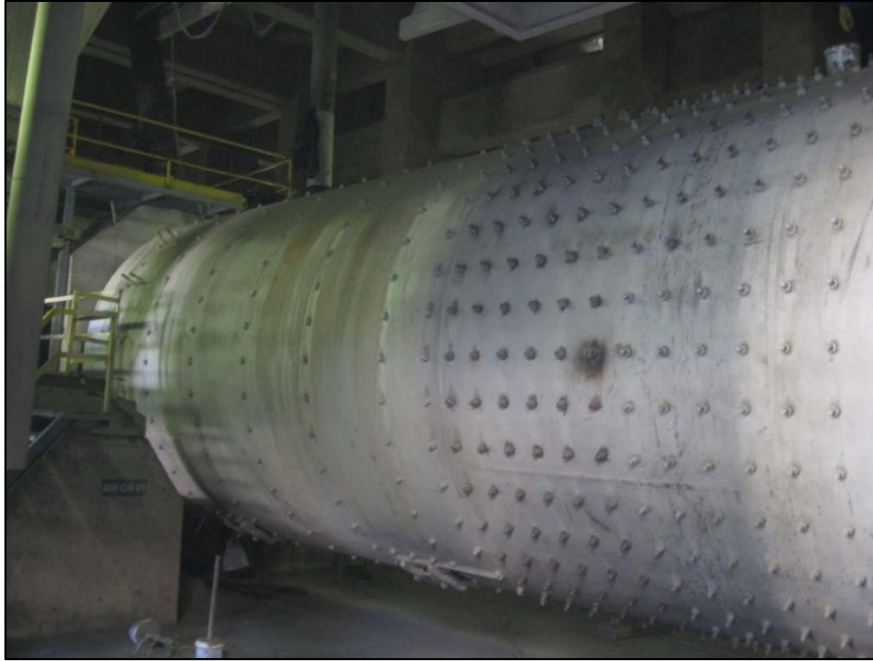
Şekil 1.20. Klinkerin soğutma ünitesi şematik gösterimi [69]



Şekil 1.21. Klinkerin soğutulması [74]

1.2.4.Çimento üretim (öğütme) prosesi

Döner fırında hammaddenin pişirilmesi ile elde edilen klinkerin kapalı devrede tamamı 90µm'dan geçecek şekilde öğütülmesi sonucu çimento elde edilir [77]. Çimentonun ince taneli öğütülmesi, beton olarak kullanım sırasındaki reaktivitesini arttırmak için önemlidir [39]. Klinker soğutma ünitesinden sonra taşıma sistemleri ile birlikte stok alanına taşınır. Buradan klinker genellikle bilyalı olarak adlandırılan yatay değirmenlere (Şekil 1.22) veya dikey değirmenlere (Şekil 1.23) alınır. Değirmenlerde, yaklaşık 2 cm çapındaki klinker, kalker, alçı taşı ve çeşitli katkıları ile öğütülerek son ürün olan çimento elde edilir [10, 74]. Şekil 1.24, bilyalı bir çimento değirmeninin iç kısmını ve bilyaları göstermektedir.



Şekil 1.22. Bilyalı çimento değirmeni



Şekil 1.23. Dik imento değirmeni



Şekil 1.24. Bilyalı imento değirmeni i görünüşü [53]

Çimento sektöründe genel olarak bilyalı değirmenler tercih edilmektedir. Genel olarak 3 m çapa sahip olan değirmenlere hacimlerinin üçte biri kadar elik bilya yerleştirilir,

yataya duran bu değrimerenler belli hızla döner ve dönme sırasında bilyaların arasında kalan klinker istenen inceliklere kadar öğütülür. Sıcak klinker ile çalışılması durumunda sıcaklığın artmasını engellemek adına çimento değirmenlerine basınçlı su verilerek soğutma yapılır. Klinkerin alçı ile öğütülmesi priz süresi kontrolü için oldukça önemlidir. Son yıllarda, öğütme kolaylaştırıcı kimyasalların kullanılmasına bağlıdır [74]. Çimento üretimi TSE standartlarına göre yapılır. Avrupa Standardizasyon komitesi tarafından çimento ile ilgili standartların yapılması çalışmalarına 1973 yılında başlamıştır. Genel çimentolar için 197-1'de oldukça geniş bir yelpazede çimento türleri bulunmaktadır. Bu standart Türkiye'de de doğrudan kabul görmüş TS EN 197-1 olarak yayınlanmıştır.

Genel amaçlı çimento (CEM), klinker, alçı ve çeşitli katkı maddelerinden oluşan ve kütlece en az %50'si CaO ve SiO₂'den oluşan, hidrolik sertleşmesi kalsiyum sülfatların hidratasyonu ile gerçekleşen çimentodur. TS EN 197-1 CEM çimentolarını 5 başlıkta 27 alt çeşitte değerlendirmektedir [78].

CEM I: Klinkerin %0-5 arasında mineral katkı ile öğütülmesi ile edilir, portland çimentosu olarak adlandırılır.

CEM II: Bu tip çimentoda klinker %6-35 arasında minör katkı ile öğütülür. Bu gruptaki çimentolar, Portland Cürufllu, Portland Puzolanlı gibi farklı şekillerde isimlendirilirler.

CEM III: Klinkerin %36-95 oranında katkı ile öğütülmesi ile meydana gelen çimento grubudur. Bu grupta, yüksek fırın cürufllu çimentolar bulunmaktadır.

CEMIV: Bu grup puzolanik çimentoların bulunduğu gruptur. Cüruf ya da kalker katkı olarak kullanılmaz. %11-55 arasında puzolan ve uçucu küller katkı olarak kullanılmaktadır.

CEM V: Kompoze çimentoların bulunduğu gruptur. Bu çimento grubundaki çimentolarda %18 ila 50 oranında hem cüruf hem de uçucu kül kullanılmaktadır. Dikkat edilen nokta ağırlıklarının klinker içersinde %20-64 arasında kalmasıdır.

TS EN 197-1 genel amaçlı çimentolar dışında kendine özgü klinker üretimi olan ve farklı minör katkılara sahip özel çimentoları da tanımlamaktadır.

Sülfatlara Dayanıklı Çimentolar: Bu çimento için klinker içerisinde C_3A oranı en fazla %5 olacak şekilde üretilir. Daha sonra $CaSO_4$ ile birlikte öğütülür.

Beyaz Portland Çimentosu: Renk verici oksitler içermeyen kil ve kalkerin hammadde olarak kullanıldığı klinker üretim prosesine sahiptir. Elde edilen beyaz klinker daha sonra $CaSO_4$ ile birlikte öğütülür.

Harç Çimentosu: Portland Çimentosu klinkeri ihtiva eden, sadece kum ve su ile karıştırılarak sıva, kaplama ve duvar işlerinde kullanıma uygundur.

Borlu Aktif Belit Çimentosu: Bu çimentonun normal portland çimentosundan farkı alit fazı yerine aktif belit fazı bulunmasıdır. Bu çimento kütle betonlarında, baraj yapımında kullanıma uygun bir çimentodur.

Yüksek Fırın Cürufu Katkılı, Düşük Erken Dayanımlı Çimentolar: Hidratasyonu bileşim, incelik ve bileşenlerinin reaktivitelerine bağlı olarak genel amaçlı çimentolara göre daha yavaş olan çimentolardır.

Çok Düşük Hidratasyon Isılı Özel Çimentolar: Hidratasyon gelişimi genel amaçlı çimentolara göre daha yavaş olan ancak su ile karıştırıldığında priz alan ve sertleşen bir hamur oluşturan ve sertleşme sonrasında dayanımı ve kararlılığı suyun altında da devam eden çimentolardır.

Kalsiyum Alüminat Çimentosu: Ana bileşeni mono kalsiyum alüminat ($CaO \cdot Al_2O_3$) olan sülfatlara ve yüksek sıcaklıklara dirençli, sıcaklık, aşınma ve kimyasal etkilere direncin önemli olduğu yerlerde kullanıma uygundur [31].

1.2.5. Paketleme

Çimento değirmenlerinden çıkan son ürün satışı yapılmaya kadar çimento silolarında stoklanır. Farklı tiplerde çimento üretimlerinin gerçekleşmesi nedeniyle fabrikalarda birden fazla çimento silosu bulunmaktadır. Depolanan çimento dökme ya da torbalı olarak satışa sunulmaktadır [74]. Temiz, kapalı ve rutubetsiz ortamlar olan çimento silolarında saklanan çimentonun sevki dökme yapılacaksa silobas adı verilen taşıtlar çimento siloları altına yanaşır ve burada bulunan körükler sayesinde çimentonun silobasa doldurulması sağlanır [53].

Torbalı çimento satışlarında kraft kağıtlardan oluşan ve toplamda 50 kg olacak şekilde doldurulabilen torbalar kullanılır. Döner bir kantar sisteminde musluk gibi bir ağız olan haznelere torbaların takılması suretiyle doldurulması sağlanır. Satışlarda genellikle 50 kg'lık torbalar kullanılmakla birlikte son yıllarda 25 kg'lık torba kullanımı da taşımanın kolay olması nedeniyle artış göstermektedir [74]. Çimento satışının dökme yapılması, çimentoda kullanılan kraft torba miktarını azaltacağı için ambalaj atığı miktarını da düşürmektedir. Şekil 1.25, çimento fabrikasında çimento siloları ile paketleme yüklemeye istasyonunu göstermektedir. Şekil 1.26 (a) Dökme çimento yüklemeye istasyonunu ve (b) ise dökme çimento taşıyan silobas'ı göstermektedir. Dökme çimento satışında körükler ile silobaslar doldurulmakta ve torba kullanılmayarak ambalaj atığı azaltılmaktadır.



Şekil 1.25. Çimento siloları ve paketleme ünitesi

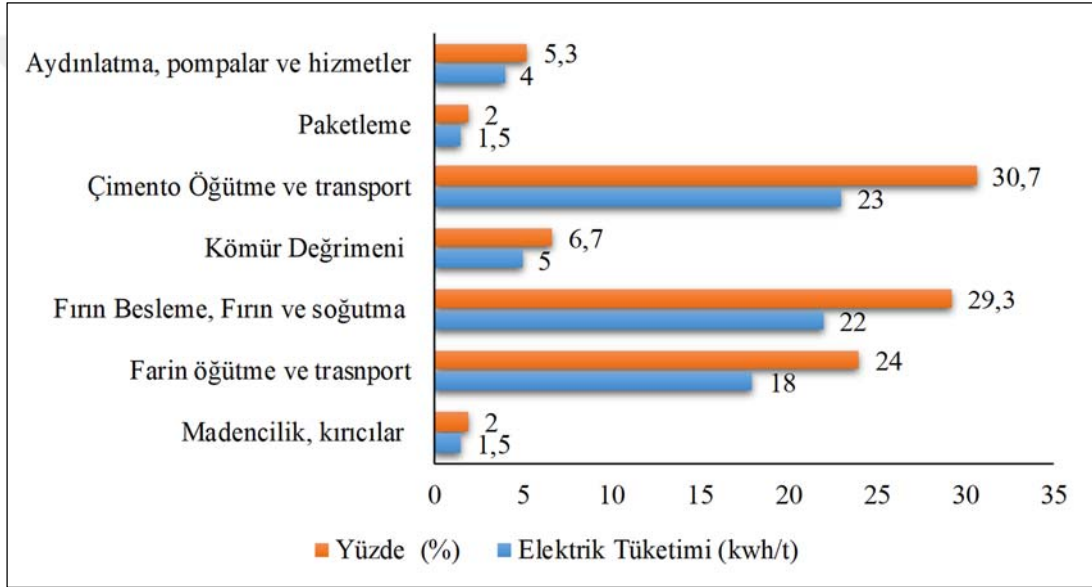


Şekil 1.26. (a) Dökme yüklemeye ve (b) silobas

1.3. Çimento Üretim Prosesinde Enerji Tüketimleri

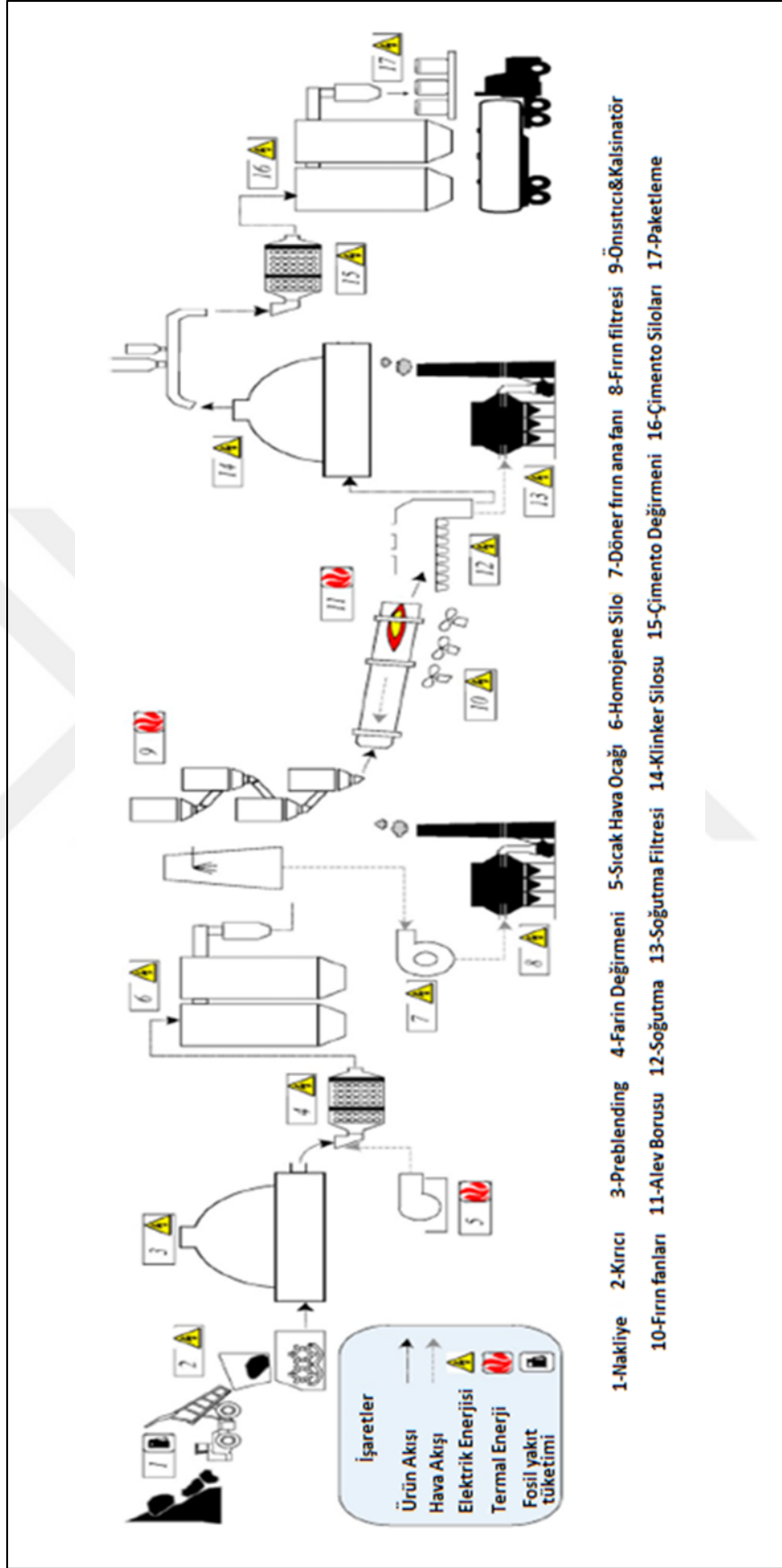
Çimento üretimi büyük miktarlarda doğal hammadde ve hem termal hem de elektrik enerjisi tüketmektedir. Proses, 1 ton klinker üretebilmek için 3,2 ile 6,4 GJ enerjiye ve 1,7 ton hammaddeye ihtiyaç duymaktadır. Modern çimento fabrikaları 1 ton çimento üretmek için 110-120 kwh elektrik enerjisi kullanmaktadır [79].

Çimento fabrikalarında elektrik enerjisinin %65'i çimento, hammadde ve kömür öğütme ile klinker üretiminde kullanılır. Şekil 1.27'de fabrika içerisinde elektrik tüketiminin miktarları ve yüzdesel dağılımları gösterilmektedir [80].



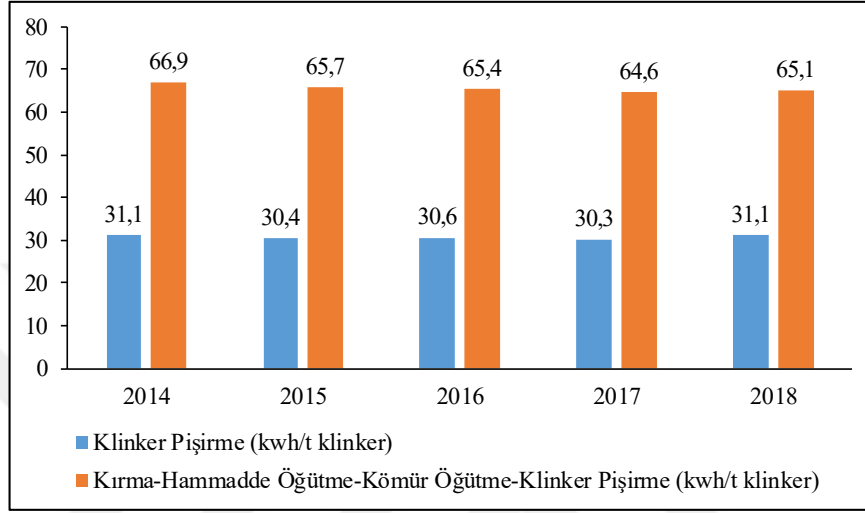
Şekil 1.27. Çimento üretimin elektrik enerjisi tüketim dağılımı [6]

Çimento sektöründe kullanılan enerji tüm endüstri sektöründe kullanılan enerjinin yaklaşık %12 ila 15'ini oluşturmaktadır. Elektrik ve yakıtlardan kaynaklanan termal enerji maliyetleri bir fabrikanın tüm maliyetlerinin %30 ile %40'ı arasındadır. Dünyada 1960 yılında 24,6 milyar ton, 1975 yılında 37,5 milyar ton, 1980 yılında 33,1 milyar ton ve 1990 yılında 24,4 milyar ton çimento üretilmişken bu yıllar için enerji tüketimleri sırasıyla 4,8 GJ, 3,8 GJ, 3,4 GJ ve 3 GJ fosil enerji ve 0,32 GJ, 0,34 GJ, 0,39 GJ ve 0,42 GJ elektrik enerjisi olarak gerçekleşmiştir [81]. Türkiye çimento sektörü 2018 yılında yaklaşık olarak 8 milyar kwh elektrik enerjisi harcamıştır. Şekil 1.28 çimento üretiminde enerji tüketiminin akışını göstermektedir [35].

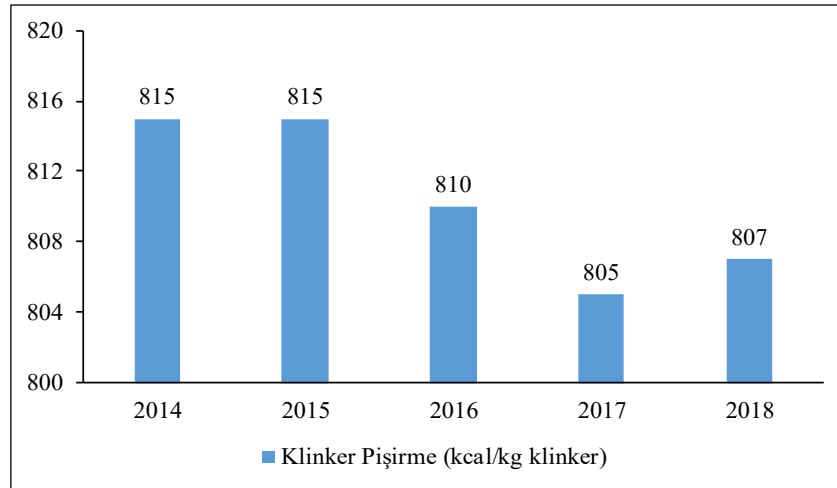


Şekil 1.28. Çimento üretiminde enerji tüketimi akış diyagramı [4]

TÇMB enerji tüketimi ile ilgili olarak Türkiye verilerinden 2014-2018 yılları için bir karşılaştırma çalışması gerçekleştirmiştir. Şekil 1.29 ve Şekil 1.30'da 1 ton klinker üretmek için gerekli olan elektrik enerjisi ile termal enerji görülebileceği gibi aynı zamanda kırma, hammadde öğütme, kömür öğütme ve klinker pişirme toplamları için harcanan elektrik enerjilerini de görmek mümkündür.



Şekil 1.29. Klinker ve kırma, öğütme, pişirme elektrik enerjileri 2014-2018 kıyaslaması [23]



Şekil 1.30. Klinker pişirme enerjisi 2014-2018 kıyaslaması [23]

Türkiye'de 1 ton klinker pişirebilmek için gerekli olan termal enerji 2014 yılları ile 2018 yılları arasında 3,3 ile 3,4 GJ olarak gerçekleşmiştir.

2. ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE BİRİNCİL YAKIT VE ALTERNATİF YAKIT KULLANIMLARI

Maliyetlere etkisinin çok yüksek olması nedeniyle çimento üretiminde kullanılacak olan yakıtın seçimi oldukça önemlidir. Kullanılacak yakıtın seçiminde, maliyet, ürün kalitesine etkisi ve çevresel etkileri dikkate alınmaktadır. Çimento fabrikalarında en yaygın şekilde kullanılan birincil yakıtlar kömür, petrokok ve gaz ve sıvı yakıtlar olarak sıralanabilir [82].

Kömür: En yaygın kullanılan fosil yakıtlardandır. 1970’lerde fuel oil fiyatlarında meydana gelen artışlar nedeniyle çoğu fabrika kömür kullanımına geçmiştir [82-83]. Kömürün tane boyutu ve uçucu madde içeriği yanma koşullarında büyük önem taşır. Genel kural olarak 90 µm elek altı bakiyesinin, kömürün uçucu madde içeriğinin %50’sini geçmesi istenmez. Bu boyuttan daha küçük öğütülmesi sıcaklık piklerinin yaşanmasına ve aşırı NO_x oluşumuna sebebiyet verebilir. Yaygın olarak kullanılan kömür tipleri, antrasit, bitümlü kömürler ve linyit olarak sıralanabilir. Kömürün yanması sonrasında oluşacak olan kül, klinkerin yapısına bağlanacağından dolayı iyi bir yanma prosesi sağlayabilmek için farinin kimyasal bileşimin ayarlanması önemlidir [82, 84-85].

Petrokok: Petrol rafineri tesislerinin yan ürünü olan petrokokun kömüre oranla daha iyi bir fiyata sahip olması çimento sektöründe geniş bir kullanıma ulaşmasına sebebiyet vermiştir. Petrokok kömüre oranlara daha düşük uçucu madde oranına sahip olduğunda reaktivitesi düşüktür. Ayrıca, petrokok %2 ila %7 arasında değişen kükürt oranına sahip olabilir. Bu kükürt oranı da döner fırında tıkanmaya sebebiyet verebilir [82].

Türkiye’de %5,5 kükürlü petrokok kullanımına ve ithalatına izin verilirken daha yüksek kükürt oranına sahip petrokok kullanımı için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü 2015/2 Genelgesi kapsamında deneme yakması yapılması zorunludur. Yapılan deneme yakmasında kullanılan petrokok yüzdesine göre ve kullanılan en yüksek kükürt oranına göre petrokok kullanım izni alınır. Yüksek

kükürtlü petrokokun yurtdışından ithalatı, bu izin sırasında alınan petrokok kullanım miktarına göre verilen kota dahilinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ÇED, İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü İzin ve Lisans Daire Başkanlığı İthalat İhracat İzinleri Şube Müdürlüğü tarafından verilen tahsisat formları ile birlikte gerçekleştirilir. Petrokok kullanım izinleri Çevre İzin ve Lisans Belgesi süresince yani 5 yıl süre ile geçerlidir. Bu izne bağlı verilen tahsisat formları ise her sene Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ilgili şube müdürlüğüne tahsisat kapatma dilekçesi ile verilerek, bakanlığın ithal edilen petrokok miktarını takip etmesine olanak verir [86-87].

Gaz ve Sıvı Yakıtlar: Gaz yakıtlar içerisinde doğal gaz, sektörde ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Doğal gazın külü yoktur, yakılması kolaydır ve genel olarak fırın ateşlemelerinde ve tavlamalarda kullanılır.

Sıvı yakıt olarak ASTM sınıflandırmasında 6 numara fuel oil olarak adlandırılan fuel oil kullanılmaktadır. Fuel oilin viskozitesi yüksek olduğundan kullanılmadan önce kolaylıkla pompalanabilmesi için 50°C'ye kadar ısıtılması gereklidir. Fuel oilde de petrokok gibi yüksek kükürt oranı bulunabilir, fuel oilde kükürt oranı %4'e kadar çıkabilir [82].

Yukarıda sayılan birincil yakıtların çimento sektöründe kullanımı öncelikli olsa da çimento sektöründe alternatif yakıt kullanımı maliyetlerin yanında çevresel etkileri azaltması ve çevresel ayak izini iyileştirmesi nedeniyle giderek yaygın bir hale gelmiştir. Alternatif yakıt kısaca farklı endüstrilerden kaynaklanan ve bertaraf ya da geri kazanım amacıyla düzenli depolama tesislerine ya da yakma tesislerine gönderilecek olan atıklar olarak tanımlanabilir [18, 88].

Çimento fabrikalarında atıkların alternatif yakıt olarak kullanılmasına birlikte işleme adı verilmektedir. Asıl amacı, çimento üretmek olan fabrikalar, proses özelliklerine bağlı olarak farklı özelliklerdeki atıkları fırında enerji elde etmek amacıyla konvansiyonel yakıtlar ile ikame edebilirler [66]. Döner fırınlar, yüksek sıcaklıklar, alkali ortam, ideal oranlarda gaz karışımı ve oksitleyici ortam ile ısı transferi için geniş yüzey alanı gibi özellikleri ile atık kullanımında sayısız avantaja sahiptir [89]. Çimentoda sıklıkla kullanılan bir çok alternatif yakıtın organik içeriği, yüksek sıcaklıklar (1.450°C), tam yanma ve uzun bekleme süreleri (8 sn) sayesinde tamamen

bozunurken inorganik bileşikler farin ile reaksiyona girer ve klinkerin yapısına bağlanır [88].

Atıkların, önleme, azaltım, tekrar kullanım ya da geri dönüşüm ile teknik ya da ekonomik olarak yönetilemediği durumlarda, düzenli depolama ya da atık yakma proseslerine oranla çimento üretim prosesi tüm enerji ve malzeme geri kazanımına olanak sağlayarak sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle, çimento fabrikalarında birlikte işleme prosesi atık hiyerarşisinde geri dönüşüm ile atıktan enerji kazanımı arasında konumlanmıştır. Atık hiyerarşisi Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Atık hiyerarşisinde birlikte işleme [90]

Çimento fabrikalarında alternatif yakıt kullanımının bir çok faydası bulunmaktadır. Alternatif yakıt kullanımı karbondioksit emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunur, bu nedenle iklim değişikliği ile mücadelede çimento fabrikaları için önemli bir kaldıraçtır [91]. Alternatif yakıt kullanımı ile 2050 yılına kadar dünyadaki sera gazı emisyon salımları 0,75 Gton azaltılabilir [92]. Bunun yanı sıra, yenilenemeyen kaynaklar olan fosil yakıt kullanımı azalır, fabrikalar atıktan enerji geri kazanımı yapmış olur ve yanma sonrasında bakiye atık kalmaması, tüm materyalin klinkerin yapısına bağlanması ile de kül depolanması yapılması gerekmez [88].

Sanayileşmiş toplumlar alternatif yakıt kullanımında 20 yıldan uzun bir tecrübeye sahiptirler [40]. Çimento sektöründe bir çok atığın alternatif yakıt olarak kullanılması mümkündür. Ancak, radyoaktif atıklar, enfekte atıklar ve patlayıcı atıkların çimento fabrikalarında kullanımları yasaktır [93]. Çimento sektöründe en çok kullanılan atıklar, atıktan türetilmiş yakıt, ömrünü tamamlamış lastik, atık yağ, kontamine atıklar

(emdirilmiş talaş tozu), solventler/sıvı atıklar, karışık endüstriyel atıklar olarak sıralanabilir.

2.1. Alternatif Yakıtlar ve Çimento Fabrikalarında Kullanımları

Çimento fabrikalarında kömür baskın yakıttır, 1 ton çimento üretebilmek için yaklaşık olarak 120 kg kömür kullanılmaktadır. Dünyada artan çimento ihtiyacı ile bu ihtiyacı karşılamak için gerekli olan enerji miktarı artacaktır ve bu durum da kömür tüketimini arttıracaktır. 2005 yılında Cembureau (Avrupa Birliği Çimento Sanayicileri Birliği) üyesi çimento fabrikaları çimento üretiminde 25 milyon ton kömür kullanmışlardır. Dünyada 2018 yılında 2,4 milyar tonu Çin’de olmak üzere, yaklaşık 4,2 milyar ton çimento üretilmiştir ve bir ton çimento üretimi için ortalama 120 kg kömür veya eşleniği fosil yakıt tüketilmekte olup, dünya çimento üretimi için yıllık kömür eşleniği fosil yakıt tüketimi yarım milyar ton olarak gerçekleşmiştir [16-17]. Artan çimento üretimi beraberinde fosil yakıt kullanımının artmasını da getirmiştir. Bu enerji ihtiyaçları nedeniyle çimento fabrikaları farklı gruplara bölünmüş alternatif yakıtları kullanmaya başlamışlardır. Çimento fabrikalarında çok geniş aralıkta ve tipte alternatif yakıtlar kullanılabilir. Rahman, Mokrzycki ve Uliasz-Bochenczyk tarafından alternatif yakıtların fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre Tablo 2.1’de verilen şekilde gruplandırıldığı söylenmiştir [94-95]

Tablo 2.1. Alternatif yakıt gruplama tablosu [94]

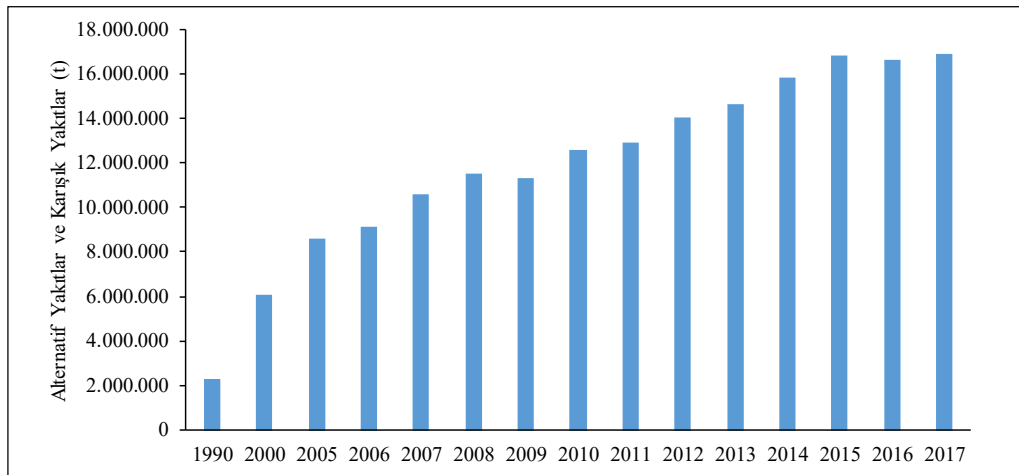
Fiziki Şart	Alternatif Yakıt
Gaz yakıtlar	Depolama sahası gazları, piroliz gazları
Sıvı Yakıtlar	Katran, kimyasal atıklar, distilasyon kalıntıları, solventler, atık yağlar, petrokimya atıkları, boya atıkları,
Katı Yakıtlar	Ömrünü tamamlamış lastikler, tahta atıkları, plastik atıkları, refrakter atıkları, kemik unu, arıtma çamurları, evsel katı atıklar, tarımsal atıklar (findık kabuğu, pirinç kabuğu vb.), atıktan türetilmiş yakıt (ATY), lastik atıkları, kağıt çamurları

Rahman ve arkadaşları, yaptıkları çalışma sonucu alternatif yakıtların katı, sıvı ve gaz olarak gruplamaya ek olarak atık yağları, ömrünü tamamlamış lastikleri, plastik atıkları ve solventleri de içerecek şekilde alt gruplamaları olması gerektiğini belirlemiştir. Bu alt listeye dahil olan ve çimento fabrikalarında birincil yakıtlar ile ikame edilen atıkların çimento endüstrisindeki tanımı World Business Council for

Sustainable Development organizasyonu tarafından 2005 yılında yayınlanan kılavuzda “belirlenmiş özelliklere uygun olarak kömür gibi konvansiyonel yakıtların bir kısmının ya da tamamının ikamesinde kullanılan kalorifik değere sahip seçilmiş atıklar” olarak yapılmaktadır [96]. Birlik, 2014 yılında değişen üretim teknolojileri ve atık kullanımının artmasına paralel olarak alternatif yakıt kullanımına ilişkin kılavuzunu güncellemiştir. Yapılan bu güncellemede birincil yakıt yerine ikame edilecek olan alternatif yakıtların tanımındaki “belirlenmiş özellikler” kılavuzda tanımlanmıştır. Nakliyesinden, ağır metal özelliklerine göre gerekli tavsiye tanımlamaları da kılavuza eklenmiştir [46, 96].

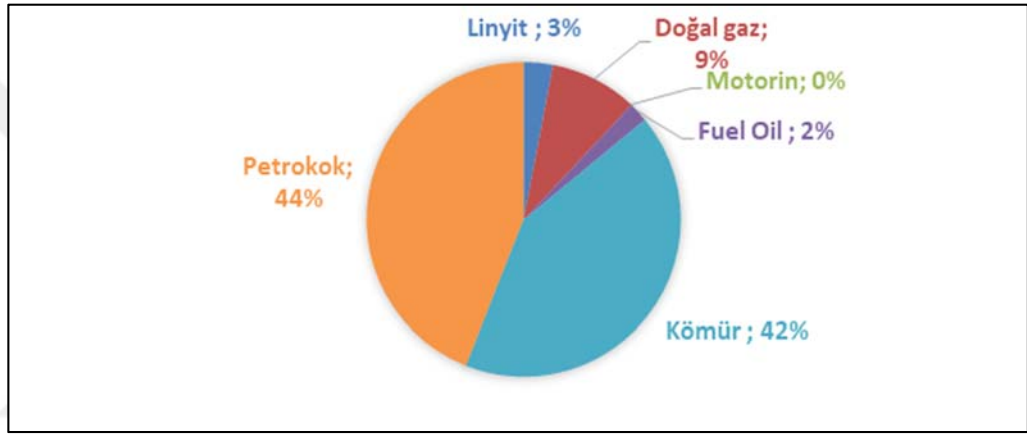
Çimento sektöründe alternatif yakıtlar için tam bir isimlendirme yapılmamıştır ancak aaktan türetilmiş yakıt (ATY), ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL) gibi oldukça genel kullanıma sahip tanımlamalar mevcuttur. Bu tanımlamaların yanında ikincil yakıt, AF (alternative fuel) gibi İngilizce baş harflerin kısaltılmasından oluşan isimlendirmeler de kullanılmaktadır [97].

Çimento sektöründe alternatif yakıt kullanımı 1970’li yıllardan beri gerçekleşmektedir. Ancak, son 20 yılda giderek yaygınlaşmış ve atık ikame oranları yükselmeye başlamıştır. 1990 yılından günümüze çimento fabrikaları atık yönetimi konusunda buldukları bölgelere katkı sağlamışlardır. Birlikte yakma işlemi ile 1990 ila 2017 yılları arasında 180 milyon ton atık, çimento fabrikaları tarafından konvansiyonel yakıtlar ile ikame edilmiştir. İlgili yıllara ait atık kullanım miktarlarının gösterildiği grafik Şekil 2.2’de verilmiştir.

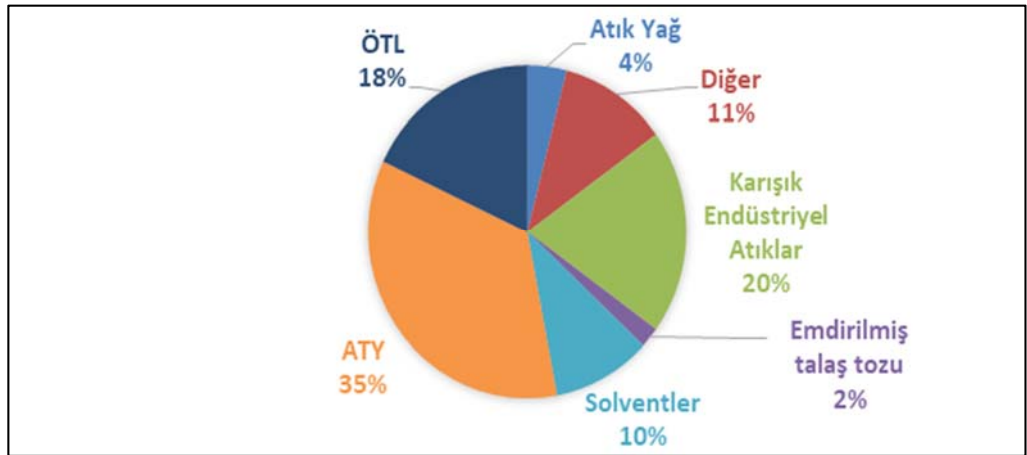


Şekil 2.2. Çimento sektörü alternatif yakıt kullanım miktarları, 1990-2017 [20]

Çimento sektöründe ağırlıklı olarak kullanılan fosil yakıtlar GCCA GNR 2017 yılı raporuna göre Şekil 2.3'teki gibi bir dağılıma sahiptir. Şekil 2.3'ten de görüleceği üzere sektör, 2017 yılında %44 oranında petrokok kullanımı gerçekleştirmiştir. Termal enerjiyi fosil bazlı yakıtlardan elde eden sektörde kömür %42 oranı ile kullanılan ikinci önemli yakıt olarak karşımıza çıkmıştır. Konvansiyonel birincil yakıtlardan elde edilen termal enerjinin %89 oranını petrokok, kömür ve linyit oluşturmaktadır. Termal enerjinin elde edilmesinde konvansiyonel birincil yakıtların yanında çimento sektörü atıkları yakıt ikamesi olarak kullanmıştır. 2017 yılında sektörde global olarak kullanılan atıkların dağılımı ise Şekil 2.4'te gösterilmiştir [20].



Şekil 2.3. Çimento sektörü global konvansiyonel yakıt kullanım dağılımı [20]



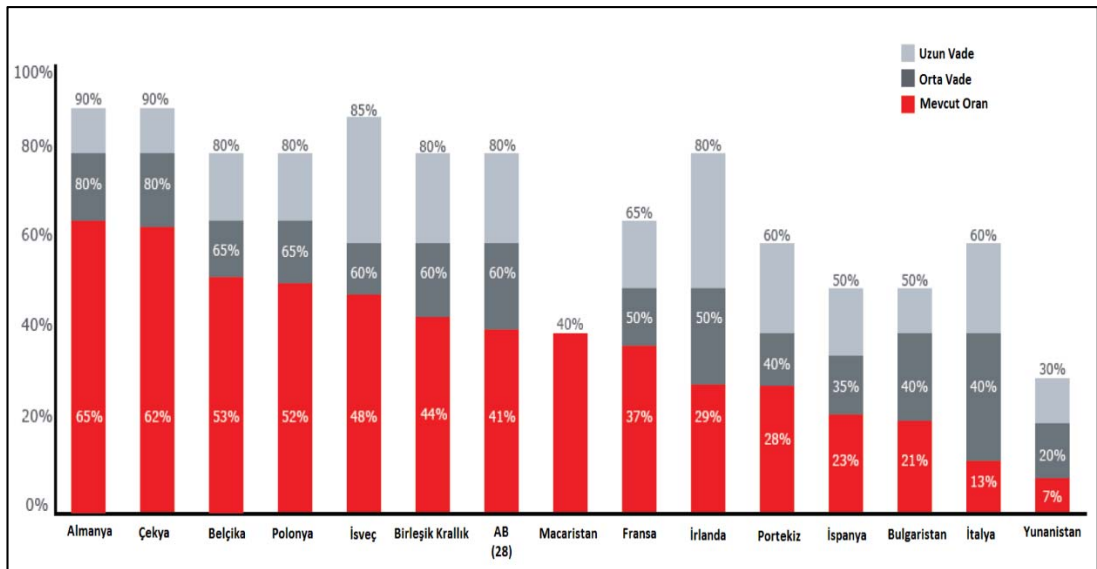
Şekil 2.4. Çimento sektörü global alternatif yakıt kullanım dağılımı [20]

Sektörün 40 yılı aşkın süre ile atık kullanımı sonucu ulaştığı veriler yukarıdaki iki grafikte özetlenmiştir. Avrupa'da çimento sanayi 40 yılı aşkın süredir 100'den fazla döner fırın ile atık kullanımında önemli bir yere sahiptir. 40 yılı aşkın süredir birlikte yakma konusunda faaliyet gösteren ülkelerden İsviçre ve Almanya alternatif yakıt

kullanımına ait tecrübelerini emisyon kontrolünde ve yasal gerekliliklerin geliştirilmesinde kullanmışlardır. 2018 yılında Almaya’da enerji ihtiyacının %67,5’lik kısmı, İsviçre’de ise %65,5’lik kısmı atık bazlı yakıtlardan karşılanmıştır [98]. Bazı araştırmalar 1997 yılında Avrupa genelinde döner fırınlarda birlikte yakmaya maruz bırakılan atık miktarını 1,8 milyon/t olarak raporlamışlardır. Avrupa da birlikte yakma ile enerji geri kazanımına dahil edilen atıklardan ilk sırada 1 milyon ton ile tehlikeli atıklar bulunurken ömrünü tamamlamış lastikler 550 bin ton/yıl kullanım ile ikinci sırayı almıştır [99].

Hem Avrupa’da hem de dünya’da enerji maliyetleri ve sürdürülebilirlik konularının öneminin artması nedeniyle çimento sektörü alternatif yakıt kullanımlarını yükseltmeye başlamışlardır. 2017 yılında global ısıl yer değiştirme oranları 1990 yılına oranla 8,8 kat artarak %2 seviyesinden %18 seviyelerine yükselmiştir. Dünya genelinde çimento sektöründe en çok kullanılan atık tipleri %35 oran ile atıktan türetilmiş yakıt, %20 oran ile karışık endüstriyel atıklar, %18 oran ile de ömrünü tamamlamış lastikler olarak sıralanabilir [20].

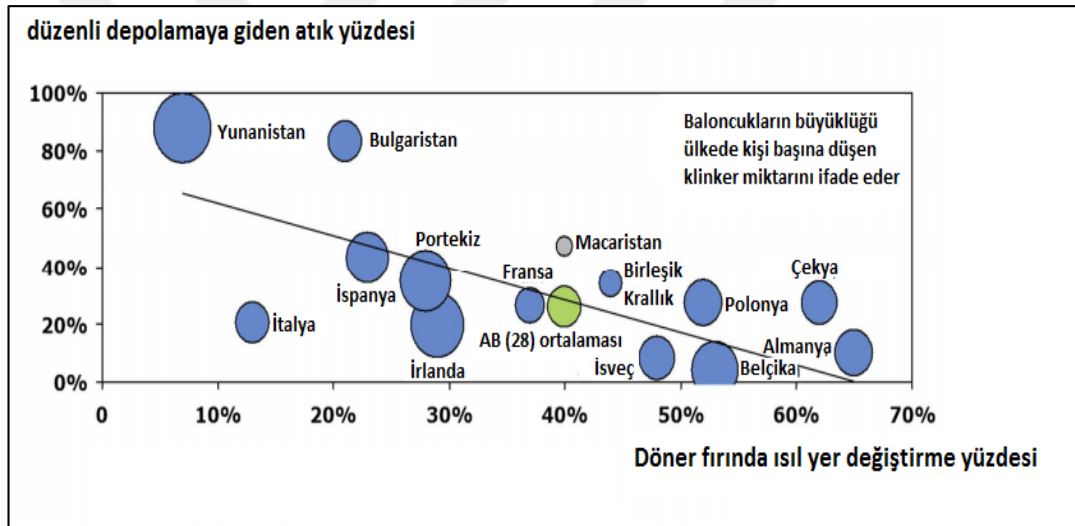
Avrupa birliği ülkelerinde 2014 yılında ısıl yer değiştirme oranı %65 ila %7 arasındaki değişkenlik gösterirken birlik ortalaması %41 olarak gerçekleşmiştir. Birlik üyesi ülkelere yalnızca 6 tanesinin %30’dan daha düşük ısıl yer değiştirme oranına sahip olduğu görülmüştür. Şekil 2.5, Avrupa ülkelerindeki mevcut atık yakma oranları ile orta ve uzun vadede gelinebilecek atık yakma oranlarını göstermektedir [21].



Şekil 2.5. Avrupa Birliği ülkelere göre ısıl yer değiştirme oranları (2014) [100]

Avrupa Birliği'ndeki fabrikalarda orta vadede ısı yer değiştirme oranlarında ortalama olarak %60'a yükselme imkanı bulunmaktadır. Orta vadede 9 Avrupa ülkesinin ortalama ısı yer değiştirme oranı %50 olabilecektir [100].

Birlikte yakma oranları atığın bulunabilirliğine bağlı olduğundan, ülkelerin mevcut atık yönetim uygulamaları ile atık yakma oranları arasında bir ilişki bulunmaktadır. Atıkların, düzenli depolamaya gönderilmesinde yüksek maliyetler olmayan ülkeler ile atıkların kaynağında düzgün toplanmadığı yani düzgün işleyen bir atık yönetimi faaliyetine sahip olmayan ülkelerde çimento fabrikalarına alternatif yakıt olarak gitmesi muhtemel atıkların ulaşılabilirliği düşmektedir. Şekil 2.6'da düzenli depolamaya giden ve çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanılan atık oranları arasındaki ilişki anlatılmıştır.



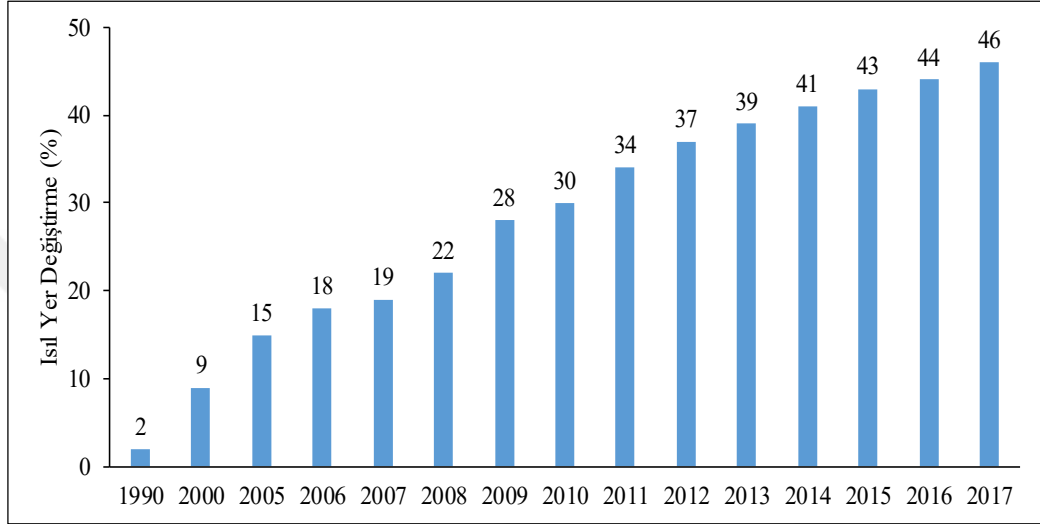
Şekil 2.6. Düzenli depolamaya giden atık yüzdesi ile ısı yer değiştirme yüzdesi ilişkisi [100]

Ecofys tarafından Cembureau adına hazırlanan raporda, 2030 yılında avrupa çimento sektörünün birlikte yakma oranının %60'a yükselmesinin ve 15,7 milyon ton atığın alternatif yakıt olarak kullanılabilmesinin önünde herhangi bir teknolojik engel olmadığı belirtilmiştir. 15,7 milyon ton atık, Hollanda, Yunanistan ve Bulgaristan tarafından 2014 yılında oluşturulan evsel kaynaklı atıkların miktarına eşittir [100].

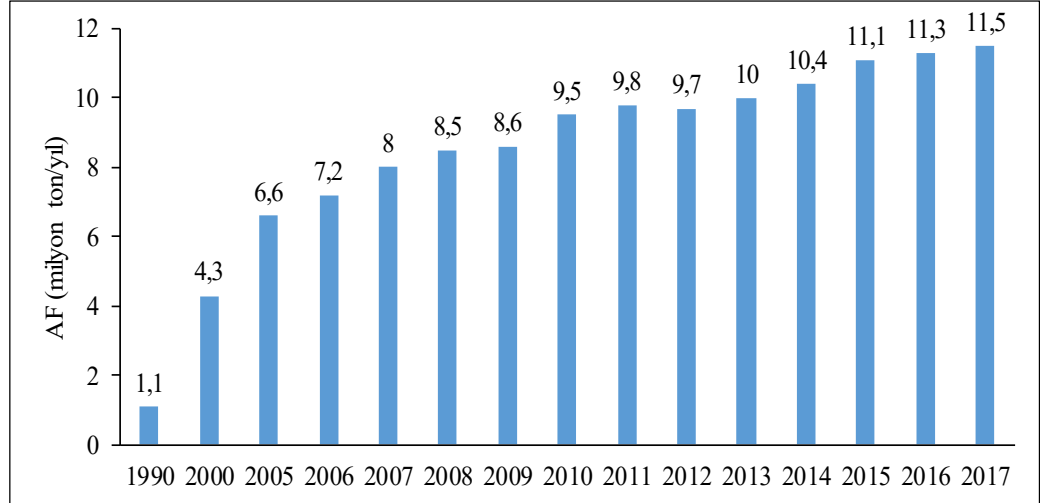
Atıkların fosil yakıtlar ile ikame edilmesindeki oranın artışıdaki önemli parametreler, atıkların kaynağında ayrı toplanması, Avrupa Birliği ülkelerinde düzenli depolamaya

yasaklar getirilmesi ve en önemlisi alternatif yakıt kullanımı yapmak isteyen döner fırınların bürokratik yüklerinin az olması olarak sayılabilir [100].

1990-2017 yılları arasında Avrupa Birliği çimento endüstrisi ısıl yer değiştirme yüzdeleri Şekil 2.7’de, aynı yıllar arasında tüketilen atık miktarları ise Şekil 2.8’de gösterilmektedir.



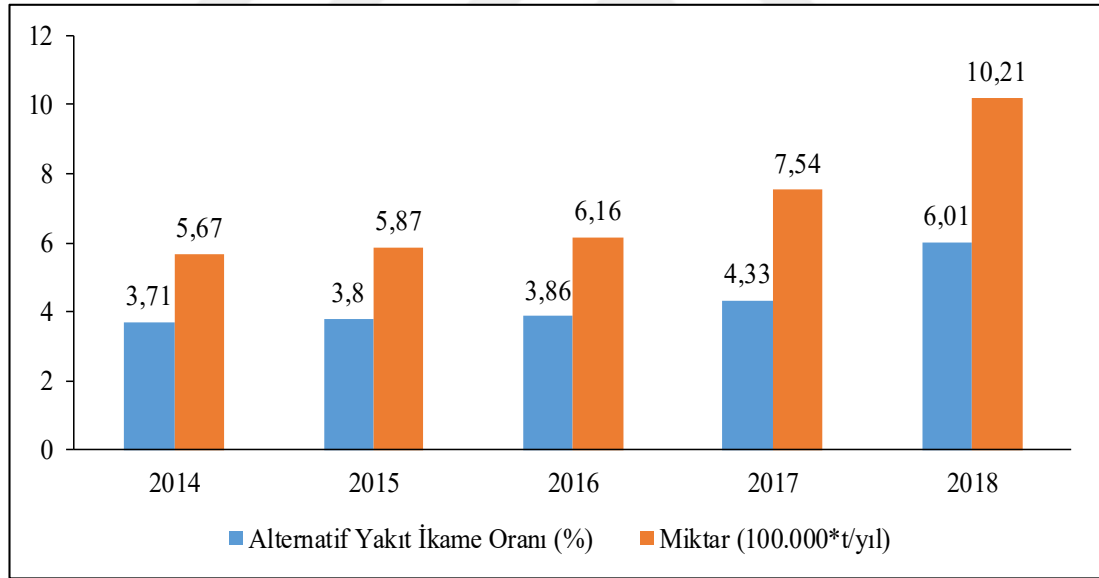
Şekil 2.7. Avrupa Birliği çimento sektörü ısıl yer değiştirme oranları 2014-2017 [101]



Şekil 2.8. Avrupa Birliği çimento sektörü atık kullanım miktarları 2014-2017 [101]

Ülkemizde alternatif yakıt kullanımı mevzuatlar gereğince lisansa tabi bir işlemdir. Mevzuatlar ile belirlenen kurallar ile Türkiye’de çimento sektörü birlikte yakma prosesine 2004 yılında yılında başlamıştır [102]. Ülkemizde faaliyet gösteren 54

fabrikanın 35'i ilgili lisansa sahiptir. Ancak Türkiye’de atık kullanım oranları oldukça düşük seviyelerde gerçekleşmektedir. 2015 yılında ortalama ısıl yer değiştirme oranı %3,8, 2017 yılında ise %5 olarak gerçekleşmiştir. 2018 yılında ise ısıl yer değiştirme oranı sadece %1’lik bir artış göstererek %6’ya ulaşmıştır. 2018 yılında Türkiye ısıl yer 9değiştirme oranında %6 seviyelerinde kalırken bazı fabrikalar bireysel olarak %30 birlikte yakma oranlarına ulaşmışlardır. Isıl yer değiştirme oranında %30 mertebelerini aşan fabrikalar bulunmasına karşılık ülke ortalamasının %5 seviyelerinde kalmasının nedeni, lisans alan bazı fabrikaların atık tedarik edememelerinden dolayı yıl içerisinde hiç alternatif yakıt kullanamamalarıdır. Çimento fabrikalarının 2014-2018 yılları arasındaki ısıl yer değiştirme oranları Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Aynı zamanda Şekil 2.7, 2014 yılında 567.000 ton/yıl olan atık kullanımının 2018 yılında 1 milyona yükseldiğini de göstermektedir [18, 23, 102]. Türkiye’deki çimento fabrikaları son yıllarda alternatif yakıt kullanımlarını arttırabilmek için yatırımlar yapmakta ve proses iyileştirmelerine gitmektedir.



Şekil 2.9. Türkiye çimento sektörü ısıl yer değiştirme oranları ile kullanılan toplam atık miktarları 2014-2018 [23]

Çimento sektörü, atık kullanımı ile enerji tedarigi güvenliğine katkıda bulunmanın yanı sıra, CO₂ emisyonlarında azalma sağlar, sektörün fosil yakıtlara olan bağılılığını azaltır, düzenli depolamaya gönderilen atık miktarını düşürür [103]. Ayrıca, birlikte yakma, her yıl 18 milyon ton karbondioksit ve 6,7 milyon ton kömür tasarrufu sağlar. Birlikte yakma bu katkıları ile sürdürülebilirlik üzerinde olumlu etkilere sahiptir [101].

2.1.1. Atıkların alternatif yakıt olarak kullanımında yasal süreçler

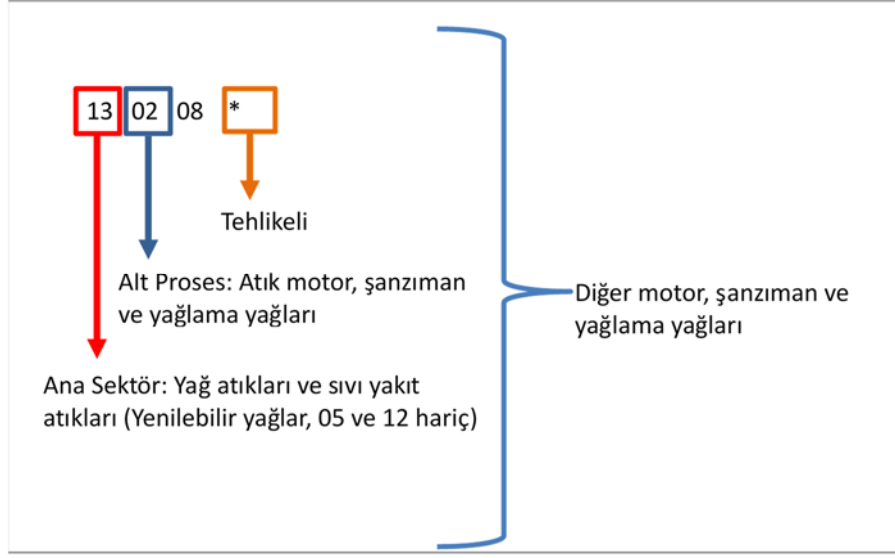
Ülkemizde çimento sektörünün alternatif yakıtları konvansiyonel yakıt ile ikame edebilmesi için sektör tarafından uyulması gerekli kurallar bulunmaktadır. Bu kurallar, atık tanımı, alternatif yakıt tanımı, alternatif yakıt özellikleri, depolama şartları ve lisans sürecini içermektedir. Avrupa Adalet Divanı, atıkların çimento fırınlarında yakıt olarak kullanılmasını yakma değil “geri kazanım” olarak sınıflandırmıştır [104].

Atık tanımlaması, Atık Yönetimi Yönetmeliği ile yapılmıştır. Bu yönetmeliğe göre atık “üreticisi veya fiilen elinde bulunduran gerçek veya tüzel kişi tarafından çevreye atılan veya bırakılan ya da atılması zorunlu olan herhangi bir madde ve materyal” olarak tanımlanmaktadır [105]. Alternatif yakıt, faydalı ömrünü tamamlamış, atık haline gelmiş ve tanımı bu yönetmelik tarafından gerçekleştirilmiş maddelerden bakanlık tarafından çimento fabrikalarında kullanılması uygun görülen koda sahip olanları ifade etmektedir.

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere, çimento fabrikalarında çok geniş aralıkta atıklar alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır ve sınıflandırmaları katı, sıvı ve gaz olarak yapılmaktadır. Ancak, aynı zamanda atıklar oluştukları endüstri kollarına göre, tehlikelilik özelliklerine göre ve farklı atıkların karışımlarından oluşup oluşmadığına göre farklı şekillerde gruplanabilir. Atıklardan bahsedilirken ortak bir dil oluşması amacıyla Avrupa Atık Katalog kodları kullanılmaktadır.

Atık Yönetimi Yönetmeliği de bu atık kodlarını temel alarak Ek-4’ünde belirlenmiş ve tanımlanmış atıkları yayınlamıştır. Atık kodu, atığın oluştuğu ana sektörü, oluştuğu alt sektörü ve tehlikelilik özelliklerini gösteren 6 haneli numaranlandırma sistemidir. Yanında (*) işareti bulunan veya karışımında (A) yazan atıklar tehlikeli atıklardır. Yanında (M) notasyonu olan atıklar ise analiz yapılmak suretiyle tehlikelilik özelliğinin belirlenmesi gerekli atıklardır.

Atık listesi 20 ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler sanayi kollarını temsil etmektedir ve 01’den başlayarak 20 ile sonlanmaktadır. Herhangi bir atığın kodunun okunmasının açıklandığı görsel Şekil 2.10’da gösterilmiştir [97, 105].



Şekil 2.10. Atık kodu okuma şeması

Çimento fabrikalarında yukarıdaki kodlar ile tanımlanan atıkların çimento fabrikalarında kullanımına 6 Ekim 2010 tarih ve 27721 sayılı Resmi Gazetede yayımlanmış olan Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik hükümleri gereğince izin verilir. Yönetmelik, birlikte yakma işlemi yapan çimento fabrikalarını beraber yakma tesisi olarak tanımlamaktadır. Yönetmelik, beraber yakma tesisini “Ana geyesi enerji üretimi veya ürün imal etmek olan, atıkları alternatif veya ek yakıt olarak kullanan, atık kabul ünitesi, geçici depolama birimi, ön işlem ünitesi, atık besleme ve hava ikmal sistemleri, kazan, baca gazı arıtım üniteleri, yakma sonucu oluşan kalıntıların geçici depolama ve atık suların arıtılması için tesis içinde yer alan üniteler, baca, yakma işlemlerini kontrol etmek yakma şartlarını kaydetmek, izlemek için kullanılan ölçüm cihazları ve sistemler de dahil olmak üzere, beraber yakma tesisinde yer alan bütün üniteleri kapsayan her türlü tesis (ancak beraber yakma işlemi ürün veya enerji üretimi değil de atıkların termal olarak bertarafını hedefliyorsa yakma tesisi olarak kabul edilir)” olarak tariflemektedir ve bir beraber yakma tesisinin izin alma koşullarını özellikle yapılacak olan deneme yakmasını, işletim koşullarını, emisyon sınırlarını, sürekli ve periyodik emisyon izleme şartlarını ayrıntılandırmaktadır.

Öncelikli olarak beraber yakma yapmak isteyen çimento fabrikası Çevre İzin ve Lisans Yönetmeliği gereği lisans belgesi almak zorundadır. Lisans belgesinin alınabilmesi için tesisin 5 gün süre ile deneme yakması şarttır. Deneme yakması alternatif yakıt kullanımının fabrika emisyonlarına etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla

gerçekleştirilir. Deneme yakmasının yapılabilmesi için fabrikaların öncelikle Geçici Faaliyet Belgesi alması zorunludur. Geçici Faaliyet Belgesi (GFB) alınması sırasında diğer izin süreçlerinden farklı olarak İşletme Planı Onayı ve Deneme Yakma Planı hazırlanarak online izin sistemi üzerinden eklenmektedir.

İşletme planı formatı bakanlık tarafından yayınlanmışken deneme yakma plan formatı Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik Ek-7’inde anlatılmaktadır. İşletme planı, işletme bilgileri, sorumlu bilgileri, tesis üretim ve proses bilgileri, alternatif yakıtların işletmede kullanım şekillerini, miktarlarını, alternatif yakıt stoklanan ve beslenen ünitelerin bakım periyotlarını içeren bir dökümandır ve onayı Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü’nden yazılı olarak alınır. Daha sonra GFB başvurusunda sisteme onay yazısı eklenir. Deneme yakma planı, beraber yakma lisansı almak isteyen tesisin en az 5 gün süre ile gerçekleştirmesi gerekli olan deneme yakması sürecinin nasıl yapılacağını anlatan yazılı dökümandır. Tesisin tüm proses ve atık besleme sistemleri ile ilgili bilgilerle birlikte alternatif yakıtın yakılması planlanan ünitelere ait teknik bilgiler, deneme yakması sırasında yapılacak ölçümler ve hangi atıkların ne kadar miktarda besleneceği, bu besleme ile birlikte ulaşılabilecek ısı yer değişime oranı da deneme yakma planında belirtilir. 5 gün süre ile yapılacak olan deneme yakmasında, deneme yakma planında belirtilen aşamalara uyulması gereklidir. Geçici Faaliyet Belgesi onaylandıktan sonra deneme yakma planında belirtilen atık kodları ve miktarları tesise kabul edilmeye başlanabilmektedir. Deneme yakma planında belirtilen tarihte tesiste deneme yakmasına bakanlık ve/veya il müdürlüğü yetkilileri gözetiminde atık yakma ile toz, HCl, HF, TOK, NO_x, SO₂, ağır metaller, PAH ve PCDD/PCDF emisyonları üzerindeki değişimlerin izlenmesine başlanır. Akredite bir laboratuvar tarafından 3 set olarak gerçekleştirilen ölçümlere atık yakılmazken başlanır. Daha sonra fabrika atık yakmaya başlar ve laboratuvarında aynı anda 2.set emisyon ölçümlerine başlanır. Bu süreçte fabrika amaçladığı ısı yer değiştirme oranına ulaşmak için sürekli ve düzenli olarak atık yakmaya devam eder. Atık yakılmaya başlandıktan 2 tam gün sonra 3.set yani son set ölçümlere başlanır. Buradaki amaç, düzensiz haldeki emisyonlar ile düzenli ve sürekli atık beslemedeki emisyonları karşılaştırarak alternatif yakıt kullanımının etkilerini belirlemektir. Kükürtoksitlerin ve toplam organik karbonun atıkların yakıldığı sıradaki emisyonları atık yakılmazkenki emisyon değerlerinden yüksek değilse bu iki parametrenin

emisyon limiti Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'ne tabi olarak bırakılmaktadır. Emisyon ölçümleri döner fırın ana bacası ile döner fırından gaz alan diğer tüm bacalarda gerçekleştirilir. Beraber yakma tesisleri için önemli nokta gerçekleştirecekleri ısı yer değiştirme oranı bir diğer ifade ile fosil yakıt ile ikame edecekleri alternatif yakıt ısı oranıdır. Tesisler %100 ısı yer değiştirme oranına kadar başvuru yapabilirler. Isıl yer değiştirmede ulaşılması planlanan tehlikeli atık kullanımı tesisin anılan yönetmeliğin Ek-2'sindeki atıkları beraber yakan çimento fabrikaları için emisyon limitlerine mi yoksa Ek-5'teki yakma tesisleri emisyon limitlerine mi uyması gerektiğini belirleyen en kritik noktadır. Beraber yakma tesisi tehlikeli atık ısı yer değiştirme oranını %39,9 oranında gerçekleştirir ise bu tesis Ek-2'de belirlenen emisyon limitlerine tabi olur. Tesisler, deneme yakma planında %39,9 oranından yüksek oranlarda tehlikeli atık kullanımı için başvuru yapabilir ancak bu durumda emisyon limitleri Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik Ek-5 limitleri olarak belirlenir. Ek-5 limitleri atık yakma tesisleri olarak adlandırılan tesislere aittir ve limitler oldukça düşüktür. Ek-2 ve Ek-5 emisyon limitleri karşılaştırması Tablo 2.2'de verilmiştir.

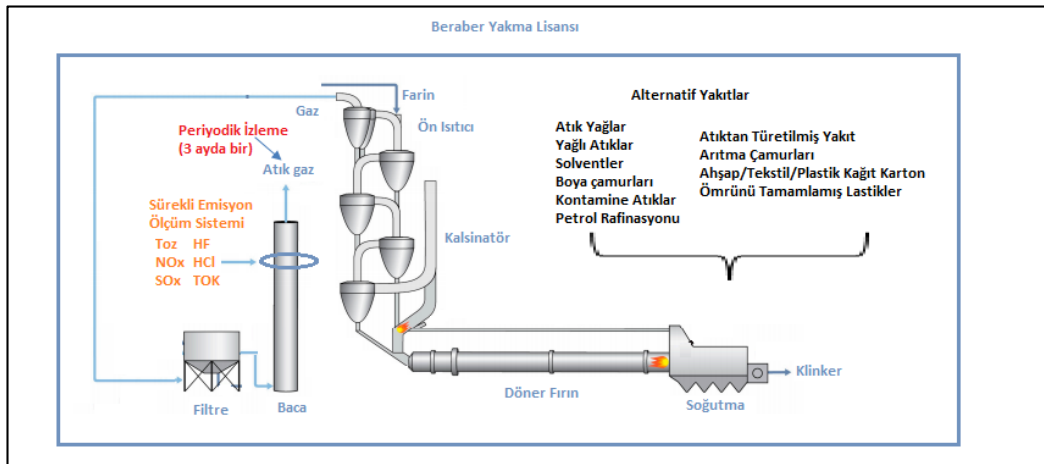
Tablo 2.2. Beraber yakma yapan çimento fabrikaları ve yakma tesisleri emisyon limitleri karşılaştırması [106]

	Ek-2 Sınır Değerleri (mg/m ³)	Ek-5 Sınır Değerleri (mg/m ³)
Toz	30	10
HCl	10	10
HF	1	1
NO _x	800 (Mevcut tesis)	200 (kapasite > 6 t/h)
	500 (yeni tesis)**	400 (kapasite < 6 t/h olan mevcut yakma tesisleri)
SO _x	300 (Atık yakmadan kaynaklandığı ispat edilirse)	-
	50	
TOK	150 (Atık yakmadan kaynaklandığı ispat edilirse)	10
	10	

*: Değerler 273°K sıcaklık, 101,3 kPa basınç, %10 Oksijen değerlerinde standartlaştırılmıştır.

** : Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik yayın tarihinden önce faaliyette olan ve emisyon izni bulunan tesisler yeni tesis olarak kabul edilmez.

Deneme yakmasının olumlu bulunması durumunda çimento fabrikaları alternatif yakıt kullanım lisansı olarak atık kullanımına başlayabilir. Lisans çerçevesinde kullanılacak atık kodları bakanlık tarafından 20 Haziran 2014 tarihli ve 29036 sayılı Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği Ek-4'ünde belirlenmiştir. Lisansa başvurulduğunda tesislerin kabul edecekleri atık kodlarını sisteme girmeleri gerekir. Lisans alınması sonrasında atık kodları fabrikaya ait online sisteme tanımlanır ve tesislerin bu atık kodlarından farklı atık kodlarını tesislere kabul etmeleri mümkün değildir. Tesisin ısı yer değiştirme oranında artış yapmak ya da atık kodu eklemek istemesi durumunda deneme yakmasını ve diğer adımları tekrarlaması gereklidir. Beraber yakma lisansı alan tesisler sürekli ölçüm sistemlerinde HF, HCL ve TOK parametrelerini de izlemek zorundadırlar. HF ve HCl için 3 ay boyunca yapılan sürekli ölçümlerin emisyon değerlerinin hiçbir şart altında emisyon limitinden yüksek olmadığına kanıtlanması halinde sürekli ölçüm yerine periyodik ölçüme izin verilebilir. Sürekli ölçüm yanında ağır metal, PAH ve PCDD/PCDF emisyonlarını görmek için tesisin yıl içerisinde 3 ayda bir periyodik ölçüm yaptırması zorunludur. Türkiye'de hangi atıkların alternatif yakıt olarak kullanılacağı yukarıda anılan tebliğ ile net şekilde belirlenmiştir. Bakanlık, bu atıkları; atıktan türetilmiş yakıt, ömrünü tamamlamış lastik, atık yağlar/sıvı atıklar ve petrol türevleri olarak beş grupta anmaktadır. Deneme yakması yaparken bu bahsedilen gruplara dahil bir atık türünün kullanılmaması, lisansa bu grubun eklenmemesi anlamına gelmektedir. Ancak, grupların altında bir çok kodda tehlikeli ve tehlikesiz atık yer almaktadır. Atık kodları alternatif yakıt kabul ve kullanım noktasında oldukça önemlidir [107, 108].

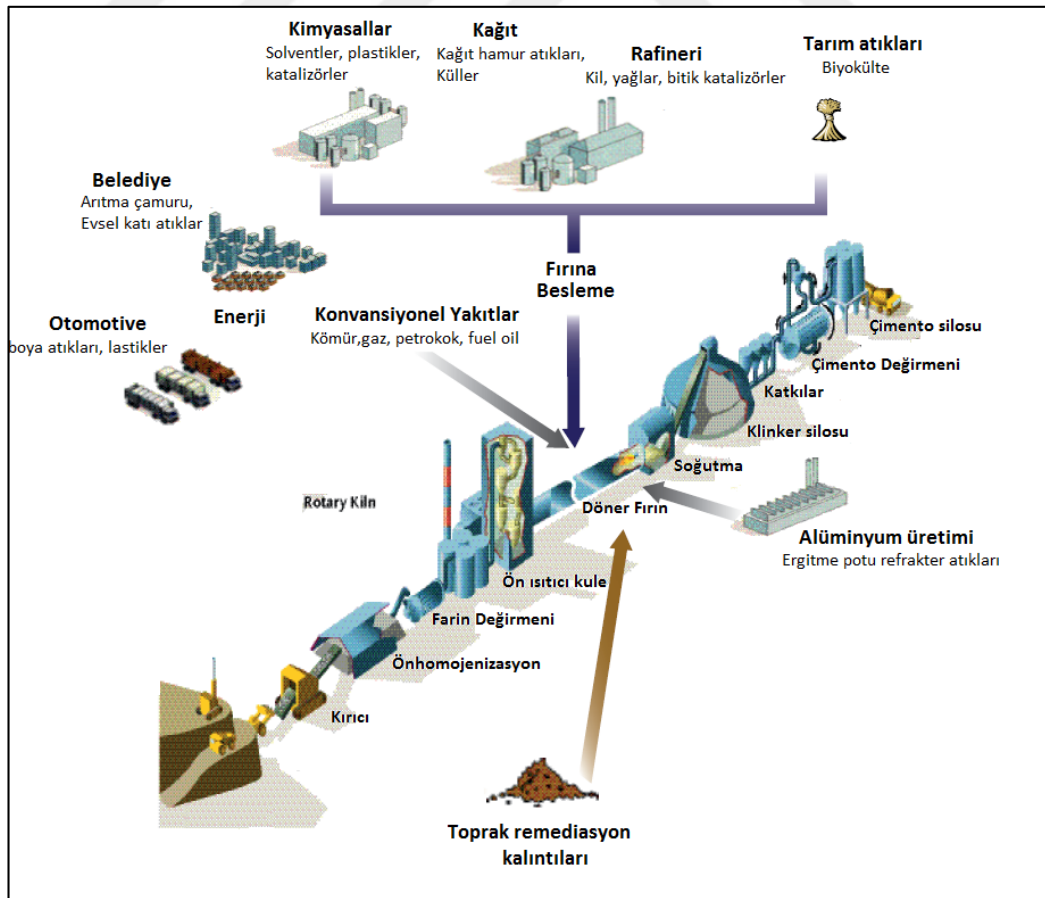


Şekil 2.11. Çimento fabrikaları izin kapsamı ve kabul edilebilir atık gösterimi

Türkiye’de çimento fabrikalarındaki akış ve alternatif yakıt olarak kullanılan atıkların genel gruplaması ve yaygın isimlendirilmesi Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Çimento fabrikalarına, radyoaktif atıklar, bulaşıcı tıbbi atıklar ve patlayıcı atıklar kesinlikle kabul edilmez [93, 104].

2.1.2. Atıkların kabul kriterleri ve döner fırına beslenme noktaları

Herhangi bir atığı alternatif yakıt olarak çimento sanayinde kullanabilmek için yakıtın bileşimini iyi bilmek gerekir. Genellikle yakıt seçimlerinde öncelikler, maliyet ve kolay ulaşılabirliktir. Bunun yanı sıra, kalorisi, kül içeriği, nemi, toksisitesi (organik içeriği, ağır metaller), uçucu miktarı, yoğunluğu, boyutu ve homojenliği gibi fiziksel özellikleri de önemli parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıvı, katı, iri parçalı ya da toz halindeki atıkların fırınlarda kullanılabilmesi için esnek besleme sistemleri olmalıdır. Atıklar, intikal bölgesinden, alev borusundan ya da kalsinatörden beslenebilir. Çimento fabrikalarında kullanılabilir atıklar Şekil 2.12’de gösterilmiştir [109, 110].



Şekil 2.12. Çimento fabrikalarında kullanılan alternatif yakıtlar [46]

Klinker üretimini, kalitesini, üretim maliyetlerini ve emisyonları etkilemesi yüzünden alternatif yakıt seçimi yani kabul kriterleri önemlidir. Bazı atıklar hiç bir işlem görmeden buldukları hallerde fırına beslenebilecek iken bazılarının fırın işletim koşullarına ve fırının özelliklerine göre ön işleme maruz bırakılması gerekebilir. Atıkların fırına beslenmek üzere ön işleme tabi tutulması, fırına alternatif yakıt beslemesinde üniform bir kimyasal dağılımın ve homojenliğin sağlanması için yapılmaktadır [111].

Klinker maliyetleri, sürekli ulaşılabilirlik, yasal uygunluk, nakliye ve elleçleme süreçleri alternatif yakıtların kabulünde rol oynayan etmenler olmakla birlikte alternatif yakıtın karşılaması gereken en önemli özellikleri, nem içeriği, sınır değerler içerisinde kalan minör bileşik içeriği, emisyonlar, fırın işletim şartları ve ürün kalitesi üzerine olumsuz etki yaratmaması, boyutu, şekli ve kalorifik değeridir [46, 73].

Fırın operasyonları açısından kullanılacak olan atıkların içerisinde kükürt ve klor içeriğininin yüksek olması istenmez [46]. Çimento fabrikalarında kullanılacak olan alternatif yakıtlara ait temel özelliklerden biri klor içeriğidir. Klor içeriğinin %0,7'den büyük olması tercih edilmemekle birlikte Türkiye'de bu oran %1 olarak kabul edilir. Klor içeriğinin yüksek olması fırın içerisinde tuz oluşumuna neden olur ve bu tuzlar tıkanmalara neden olabilir. Çimento fabrikalarında HCl ve HF atık yakma tesisleri ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeydedir. Fırınların alkali ortamda işletilmesi klor ve flor bileşiklerinin HF ve HCl olarak atmosfere salınmasından ziyade tuz haline gelmesini sağlar [112]. Bu tuzlar tıkanmalara neden olabilir [113].

Alternatif yakıt seçiminde önemli parametrelerden bir diğeri de kalorifik değeridir. Kalorifik değer fırın ihtiyacı olan termal enerjinin karşılanmasında kilit parametredir [46]. Kalorifik değer düşmesi atığın daha yüksek miktarda fırına beslenmesini gerektirir ki bu durum eğer besleme sistemi kapasitesi yeterli değilse ısı yer değiştirme oranının düşük değerlerde kalacağı anlamına gelmektedir. Bazı konvansiyonel yakıtlar ile atıkların kalorifik değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.3'te verilmiştir.

Nem içeriği, atık kabulünde ve kullanımında dikkat edilen bir parametredir [99]. Alternatif yakıtın nem içeriğinin yüksek olması gaz hacminin artmasına neden olur ve eğer ID-fan kapasitesi yeterli değilse bu durum fırın üretim miktarını düşürür ve verimini etkiler [73]. Ayrıca öncelikle atığın içerisindeki suyun buharlaştırılması

gerekli olacağından enerji tüketimini artırır [46]. Nem içeriği genellikle kömür ve petrokoktan yüksektir. Arıtma çamurlarının ve ATY'nin %50'den fazla nem içeriğine sahip olması mümkündür [114].

Tablo 2.3. Konvansiyonel yakıtlar ile alternatif yakıt kalorifik değer tablosu [45]

Yakıt Tipi	Kalorifik Değer (MJ/kg)
Konvansiyonel Yakıtlar	
Linyit	29,4
Petrokok	30,7
Alternatif Yakıtlar	
ÖTL	28,63
Atık yağ	34,7
RDF	18-23
Solventler	22,48

Klinker üretiminde gerekli olan farin içerisindeki kompozisyondan emin olabilmek adına külün içeriğinin takip edilmesi faydalı olacaktır [46]. ATY, kemik unu ve ÖTL (TDF) kütleli olarak 1/3 oranında kül içerebilirler. Eğer, külün içerisinde ÖTL'den gelebilecek çinko gibi çimento kalitesini olumsuz etkileyecek bir element mevcutsa bu miktarda kül sorun olabilir. Ancak, bu kül miktarı aynı zamanda kalsiyum, silikon, alümina ya da demir içermesi sayesinde çimento üretimi için gerekli hammadde miktarını da azaltarak olumlu etki yapabilir [73]. Atık kabulünde emisyonların etkilenmemesi adına dikkat edilmesi gerekli noktalar bulunmaktadır. Uygun olmayan bir noktadan besleme yapılması ya da fırının stabil olmayan koşullarında besleme olması durumunda atık içerisindeki organikler CO ve TOK'a neden olabilir. Fırın koşullarının bozulması, CO ve TOK oluşması durumlarında atık beslemesi kesilmelidir [46]. Avrupa Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Ofisi fırın içerisindeki yüksek sıcaklıklar ve uzun bekleme sürelerinin organik kirleticileri yok ettiğini belirlemiştir. Özellikle, yakıt kaynaklı dioksin/furan, uçucu organik karbon ve ağır metal salımının diğer yakma metodlarına oranla azaldığı görülmüştür. Organik mineraller çoğunlukla da uçucu olmayan ağır metaller klinker ve çimentonun karmaşık yapısına katılırlar. Bazı uçucu ağır metaller buharlaşma ve yoğunlaşma yoluyla tutulurlar, bu ağır metallerin çok az bir kısmı atmosfere salınır. Ancak, civa, kadmiyum, talyum gibi bazı ağır metaller tamamen bağlanamayabilir, bu nedenle atık içerisindeki miktarları kontrol edilmelidir. Yüksek oranlarda ağır metal içeren alternatif yakıtların kullanılması hem çevresel problemlere neden olabilir hem de klinkerin kalitesini

bozabilir. Ağır metal bileşikleri için tavsiye edilen limit değerler Tablo 2.4'te gösterilmiştir [46].

Tablo 2.4. Ağır metal bileşikleri için tavsiye edilen limitler [46]

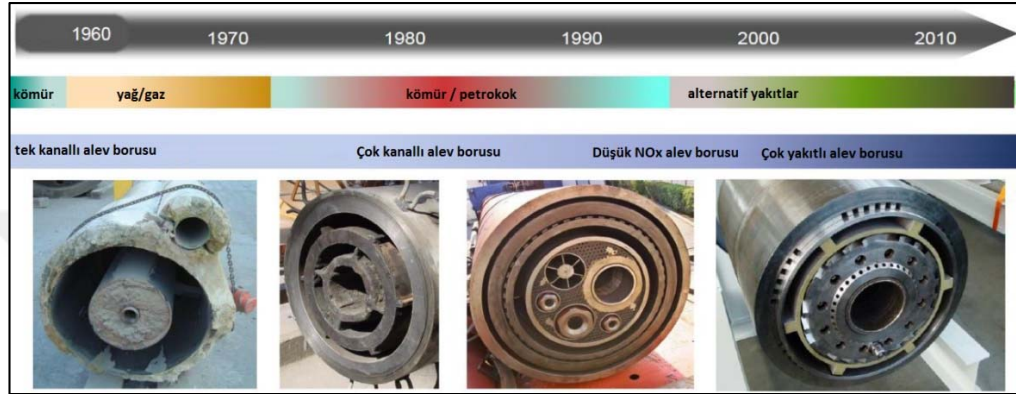
Bileşik	Limit
Hg + Cd + Tl	< 100 ppm
Cu	< 3.000 ppm
As+Ni+Co+Se+Te+Cr+Pb+Sb+Sn+V	< 10.000 ppm

Civa uçucu bir metal olduğundan klinkere nadiren bağlanır, atmosfere salınır ya da geri dönüş tozu içinde yoğunlaşır. Eğer civa için herhangi bir uzaklaştırma metodu yoksa hammadde ya da yakıttan gelen civa atmosfere salınacaktır. Bu nedenle girişteki civa miktarının kontrol edilmesi gereklidir. Denklem (2.1) ile hesaplanarak atıklardan gelebilecek civa miktarı kontrol edilebilir.

$$\text{Hg(ppb)} = \frac{\text{Alternatif Yakıt Alt Isıl Değeri} \left(\frac{\text{GJ}}{\text{t}}\right) * 100}{\text{fırın yakıt tüketimi} \left(\frac{\text{GJ}}{\text{t}}\right) \text{AF} (\%)} \quad (2.1)$$

Alternatif yakıt olarak kullanılacak olan atığın kalorifik değerinin yüksek olması istenmektedir. Atığın kalorisinin yüksek olması, atığın yüksek kalorili konvansiyonel yakıtların ikamesi için kullanıldığı düşünüldüğünde fırına beslenmesi gerekli alternatif yakıt miktarını azaltacaktır. Ancak, kalorisini düşük atık, nakliye, elleçleme gibi maliyet kalemlerinde avantaj sağlıyorsa fırında alternatif yakıt olarak kullanılabilir [73]. Katı alternatif yakıtların yanma davranışları boyutlarına ve şekillerine bağlıdır. Parça boyutunun geniş bir aralıkta dağılması çimento üretiminin kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, tesise özgü atık besleme boyutunun ve şeklinin belirlenmesi gereklidir [73]. Farklı boyutlara sahip alternatif yakıtların fırın koşullarını optimumda tutabilmek için uygun besleme noktalarında, uygun oranlarda ve emisyonların limitleri geçmesine izin vermeyecek şekilde beslenmesi gereklidir. Fırına besleme noktası seçilirken yeterli sıcaklığın, yeterli bekleme süresinin ve yeterli oksijenin olduğundan emin olunmalıdır [46]. Çimento üretiminde genellikle yakıt yakılan iki nokta kalsinatör ve alev borusudur. Ancak, alternatif yakıtlar döner fırın intikal bölgesi, kalsinatör ve alev borusu yolu ile de yakılabilmektedir. Alternatif yakıtın besleme noktası, atığın boyutu, nem içeriği ve kalorisine bağlı olarak farklılık gösterir. En çok kısıtlama alevin şeklinin bozulmaması, boyunun uzamaması ve atığın boyutu nedeniyle ağır gelmesi ve direkt soğutma bölgesine düşme riskleri nedeniyle

alev borusundan besleme noktasında bulunur. Alev borusundan besleme noktasında yayımlanmış olan genel atık kabul kriterleri bulunmamaktadır, ancak alternatif yakıtın tipi ve kalitesi, ısıl yer değiştirme yüzdesi, alev borusu dizaynı, prosesin stabilitesi oldukça önemlidir. Alev borularının tarihsel gelişimi Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Tek tip yakıtların, fuel oil ve gazların kullanıldığı dönemlerden günümüzde atıkların da beslenmesine olanak verecek şekilde alev borusu tasarımları değişmiştir [114].



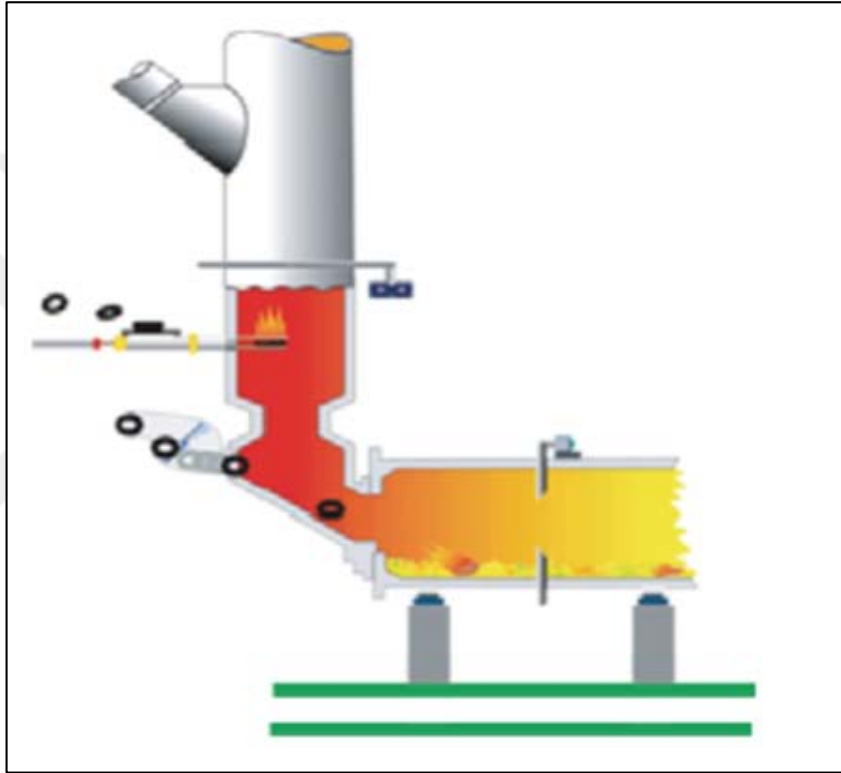
Şekil 2.13. Alev borusu tarihsel gelişimi [82]

ATY ve atık yağ çimento fabrikalarında alev borusundan en sıklıkla beslenen atık grupları olmakla birlikte solventler, kemik unu, arıtma çamuru, pirinç kabuğu ve fındık kabuğu da alev borusundan beslenebilen atıklardır. Alev borusundan beslenen atıkların parça boyutu maliyet avantajları düşünülerek konvansiyonel yakıtlardan daha büyük olabilir. Konvansiyonel yakıtlardan mikron ile bahsedilirken alternatif yakıtlar santimetre boyutunda olabilmektedir. Alev borusundan beslenmesi mümkün olan bazı atıklara ait içerikler Tablo 2.5'te gösterildiği gibidir [114].

Tablo 2.5. Alev Borusunda kullanılabilen bazı katı atıkların kompozisyon örnekleri [114]

Yakıt	% (Yaş Baz)				Kalori Alt Isıl Değer (MJ/kg)	Referanslar
	Karbon	Uçucu	Kül	Nem		
ATY (Endüstriyel)	8-12	57-80	5-15	3-20	16-21	[115]
ATY (Evsel)	2-6	39-74	5-20	10-35	12-16	[115]
Kemik unu	3-26	33-80	10-34	1-8	13-30	[116]
Kuru Arıtma Çamuru	5-9	48-69	18-35	6-12	12-18	[114]
Pirinç Kabuğu	9-16	60-73	10-16	8-11	14-16	[117-118]

Çimento fabrikaları, toprak halinde olan ya da çok büyük parçalı atıkları fırına intikal bölgesinden besleyebilmektedirler. Arada herhangi bir yakma ekipmanı eklenme zorunluluğunun olması bu yöntemi cazip kılmaktadır. Ancak, farin ve alternatif yakıtın doğrudan teması zorluk yaratabilmektedir. İntikal bölgesinden atık besleyerek %20 ısı yer değiştirme oranına ulaşan fabrikalar bulunmaktadır. İntikal bölgesinde bulunan bir klape yardımı ile Şekil 2.14'te görüldüğü gibi atık beslemesi yapılması mümkündür [73].

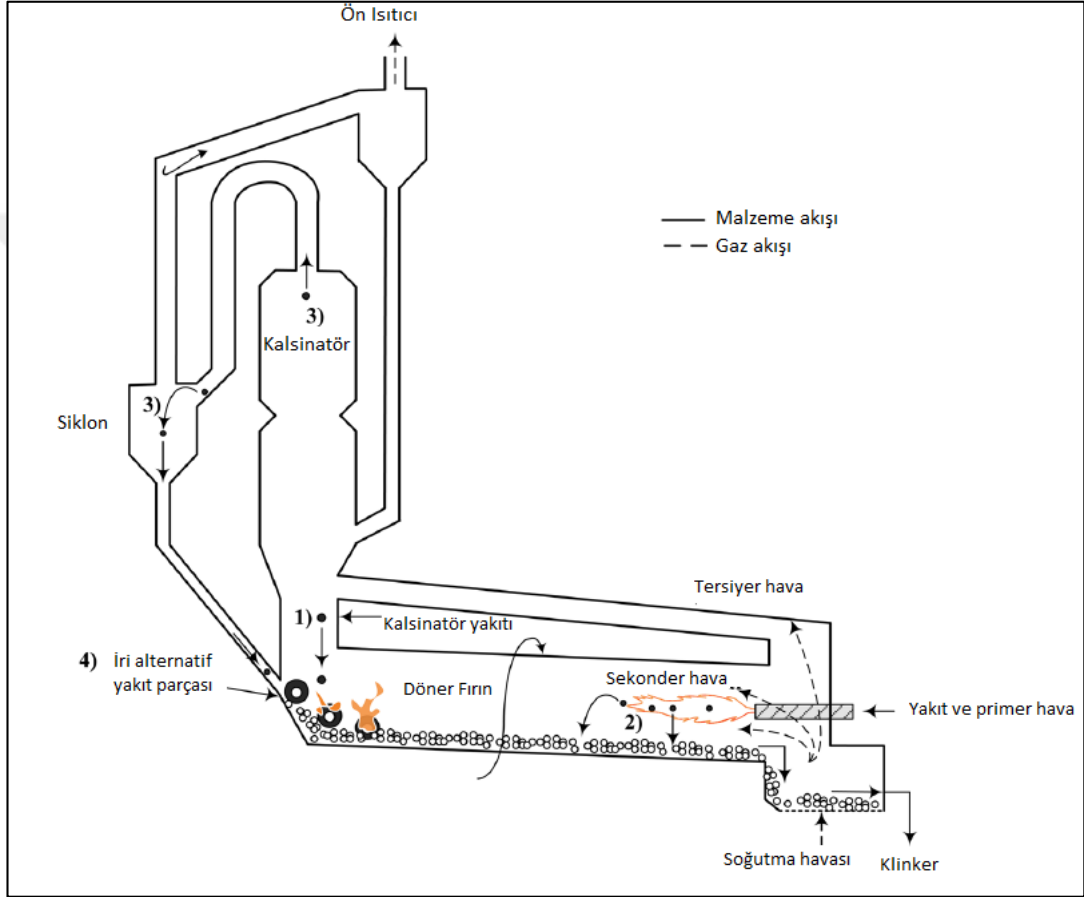


Şekil 2.14. İntikal bölgesinden alternatif yakıt beslemesi [73]

Kalsinatör ya da alev borusu alternatif yakıt besleme için modifiye edilmelidir. Değişikliklere rağmen, görece küçük parça boyutuna sahip atıkların tam olarak yandığından emin olunmalıdır. Büyük parça boyutlu atıkların kısmen yanması ya da yanmaması bu atıkların malzemenin üstüne düşmesine neden olur. İntikal bölgesinde yakılan atıklar da zaman zaman malzemeye karışabilir. Yanmayan yakıt, malzemeye 4 yol ile karışabilir. Bu yollar, Şekil 2.15'te verilmiş ve ayrıntıları aşağıdaki maddelerde anlatılmıştır [112].

1. Kalsinatöre beslenen iri parçalı yakıt önce intikal gaz hattına oradan da fırına girer

2. Alev borusundan beslenen iri parçalı yakıt tam olarak yanmayarak malın içerisine karışır
3. Kalsinatöre beslenen iri parçalı atık eğer hafifse gaz akımına kapılıp ilk kademe siklonlara taşınır. Eğer tam yanma olmamış ise yanmayan karbon kalsine farin ile taşınarak fırın içerisindeki mala karışır
4. İntikal bölgesinden doğrudan yakma ile yakıt mala karışır [112].

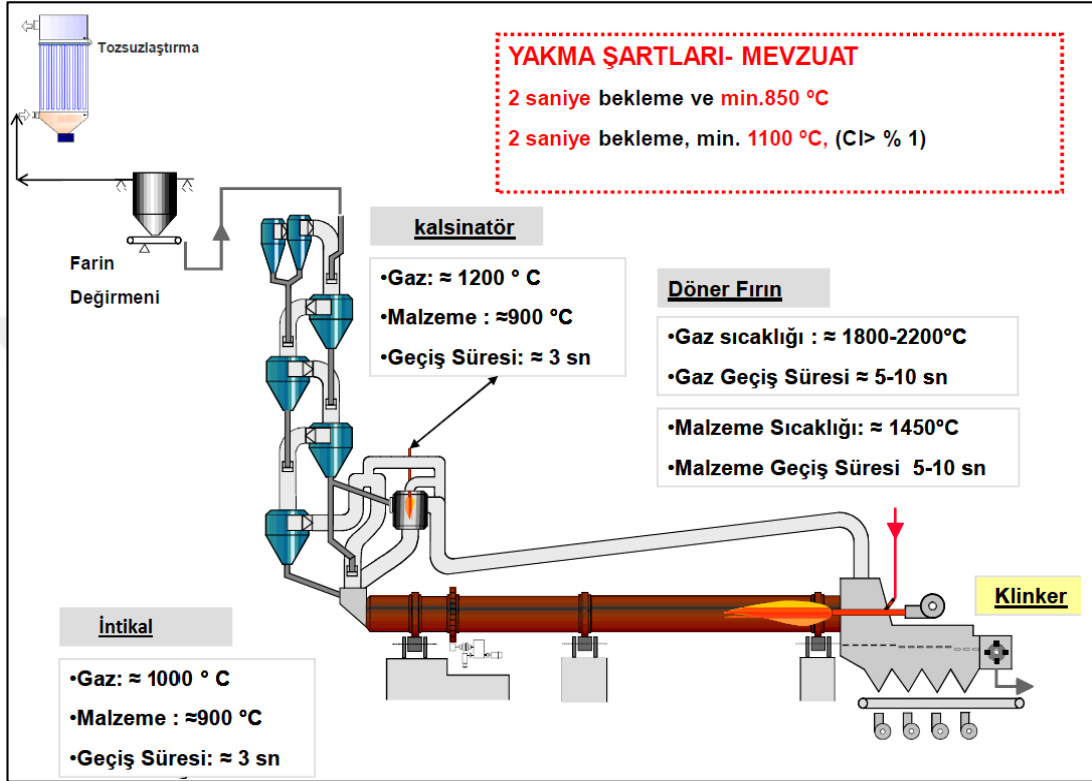


Şekil 2.15. Katı yakıtların fırın içerisinde mala karışması [73]

Alternatif yakıtların yakılması için gerekli minimum sıcaklıklar Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik içerisinde belirtilmiştir. Türkiye’de çimento fabrikaları alternatif yakıt kullanabilmek için Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik yakma şartı olan 2 saniye bekleme süresi ve en az 850°C sıcaklık şartını sağlamak zorundadırlar . Bu şarta ek olarak içeriğinde %1’den fazla halojenli organik madde bulunduran tehlikeli atık, beraber yakılacaksa sıcaklığın en az 1.100°C olması gereklidir [106].

Çimento fabrikalarında atıkların fırına beslendikleri noktalar Şekil 2.16’da gösterildiği gibidir. Gerekli sıcaklığın sağlanabilmesi için her atık aynı noktalardan

beslenmeyebilir. Eğer atık %1'den yüksek halojen içeriyorsa bu durumda beslendiği noktadaki sıcaklık en az 1.100°C olmak zorunda olduğundan intikal bölgesinden beslenemeyebilir. Ayrıca sıvı atıklar için bir enjeksiyon sistemi olmalıdır. Bu durumda sıvı atıkların beslenmesi için en uygun noktalar alev boruları olmaktadır [106].



Şekil 2.16. Atıkların fırınlara beslenme noktaları ve şartları [104]

Bir çimento fabrikasında gerekli olan termal enerjinin %40'ı alev borusunda, %60'ı ise kalsinatörde kullanılmaktadır. Daha uzun bekleme süresi nedeniyle alternatif yakıt ikamesinde daha büyük pay alev borusu yerine kalsinatöre kalmaktadır [82].

Alternatif yakıt olarak fabrikaya kabul edilecek atıkların nereden kaynaklandığı muhakkak bilinmelidir. Atıkların özelliklerinin fabrikanın atık kabul özellikleri ile örtüşüp örtüşmediği kontrol edilmelidir. Atık üreticisi ile çimento fabrikası arasında atık kabul protokolü/sözleşmesi yapılması şiddetle tavsiye edilmektedir. Kabulü yapılacak olan atıkların ilgili mevzuata uyumu kabule karar vermeden bakılması gereken en öncelikli konudur [46]. Çimento fabrikasında beraber yakma yapılması sırasında göz önünde tutulması gereken bir kaç genel kural bulunmaktadır. Ürün kalitesi, çevre, insan sağlığı ve ulusal atık yönetim stratejileri ile bağlantılı olan bu yaklaşımlar Tablo 2.6'da özetlenmiştir [119].

Tablo 2.6. Atık yakılmasında göz önüne alınabilecek genel yaklaşımlar [120]

Prensip	Yaklaşımlar
Atık Hiyerarşisi & Döngüsel Ekonomi	<ul style="list-style-type: none"> • Atığa beraber yakma öncesinde atık hiyerarşisi gereği uygulanacak bir metod varsa ,enerji geri kazanımı yerine bu metod seçilmelidir. • Atık yakma konvansiyonel fosil yakıt kullanımını azaltarak döngüsel ekonomiye katkıda bulunmalıdır.
Yasal ve kurumsal çerçeve	<ul style="list-style-type: none"> • Beraber yakma, ilgili ulusal mevzuata uygun olarak yapılmalıdır • Beraber yakma Basel ve Stockholm gibi uluslar arası sözleşmelere uygun olmalıdır • Beraber yakma için ülkenin atık yönetim stratejileri dikkate alınmalıdır. • Fabrikalar tüm ulusal yasal yükümlülükler ile uyumlu olmalıdır
Çevre	<ul style="list-style-type: none"> • Beraber yakma kaynaklı oluşabilecek ek emisyonlar ya da diğer olumsuz etkiler önlenmeli ya da asgari seviyede tutulmalıdır. • Hava emisyonları ya da su kirleticiler atık yakılmadığı zamanki durumdan yüksek olmamalıdır • Klinker, çimento, beton kesinlikle ağır metalleri bünyesinde tutmamalıdır
Operasyon & Kalite Kontrol	<ul style="list-style-type: none"> • Yalnızca besleme ve yakma sistemine uygun atıklar seçilmelidir. • Sürekli kontrol ve izleme ile üretime giren parametreler takip edilmeli ve fırına giren malzemenin emin olunmalıdır. • Ürün kalitesinin değişmediğinden emin olunmalıdır.
İş sağlığı ve güvenliği	<ul style="list-style-type: none"> • Çalışanlar ve müteahhitler için sağlıklı iş ortamının sağlanması için risk değerlendirmesi yapılmış olmalıdır • Fabrikalar, İSG açısından taahhütlerini yerine getirecek personel, sistem ve prosese ve iyi bir kayıt sistemine sahip olmalıdır.
Ekonomi ve Finans	<ul style="list-style-type: none"> • Beraber yakma finansal olarak sürdürülebilir bir modele sahip olmalıdır.
Uygulama	<ul style="list-style-type: none"> • İzleme ve denetleme sistemi mutlak suretle uygulanmalıdır. • Eğitimler her kademedede yapılmalıdır.

Alternatif yakıtlar karışım olduklarından belli özellikleri muhakkak sağlaması gereklidir. Atıklar ulusal ya da uluslararası yönetmeliklere uygun olmalıdır, belli bir kalorifik değere sahip olmalıdır, elleçleme ve nakliye için verecek fiziksel formda olmalıdır, kolay ulaşılabilir ve ucuz maliyetli olmalıdır. Alternatif yakıt seçiminde etkili olan parametreleri aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz [71].

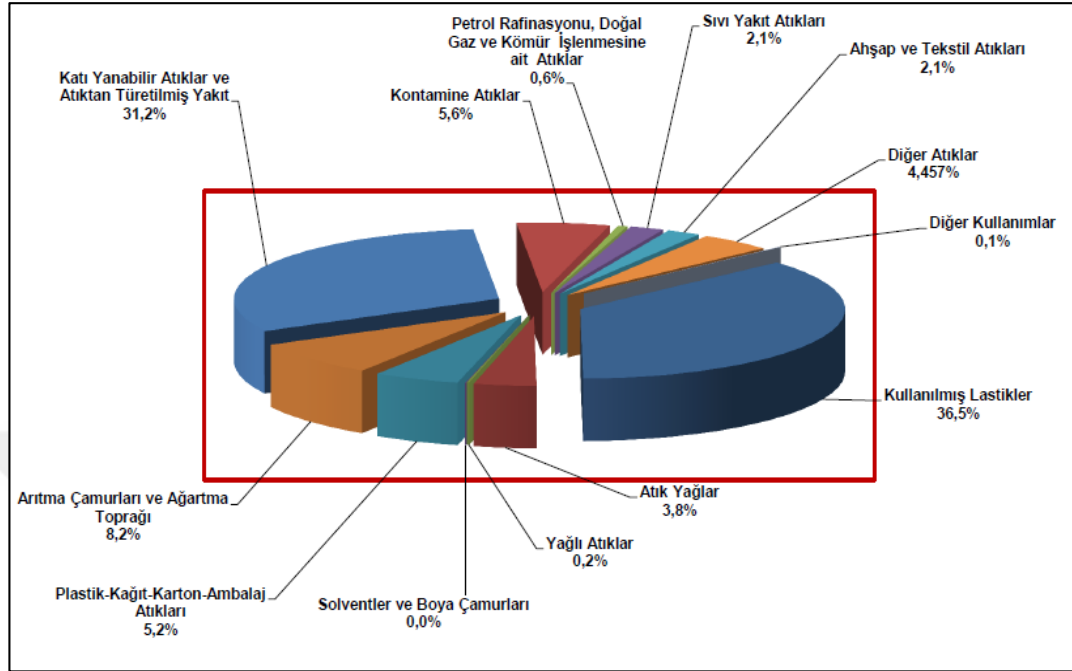
- a. Fiziksel durumu (katı, sıvı ,gaz)
- b. Sirkülasyona girecek element içeriği (Na, K, Cl, S)
- c. Toksisite (ağır metal içerikleri)
- d. Kül miktarı
- e. Uçucu miktarı
- f. Kalorifik değer
- g. Klor içeriği; < %0,2
- h. Kükürt içeriği; < %2,5
- i. Fiziksel özellikleri (parça boyutu, yoğunluk, homojenlik)
- j. Nem içeriği

2.2. Çimento Sektöründe Kullanılan Alternatif Yakıtlar

Çimento fabrikalarında kullanılan alternatif yakıtlar geniş bir yelpazeye sahiptir. Ancak, bazı atıkların sürekliliği yoktur ya da çok az miktarlarda atık üreticisine yakın fabrikalarda kullanılır. Alternatif yakıt kullanımında önemli olan noktalardan biri de sürekliliktir. Bu nedenle çoğunlukla kullanılan atıklar tekstil atıkları, halı-kilim atıkları, kemik unu, atıklardan türetilmiş yakıtlar, plastik atıklar, ömrünü tamamlamış atıklar olarak sıralanabilir. Ülkeden ülkeye, bölgeden bölgeye kullanılan atıklar ve miktarları farklılık göstermektedir. Alternatif yakıt olarak kullanılacak atıkların, nem, kül oranı, klor içeriği ve kalori gibi özelliklerinden bir ya da birkaçının atıkta bulunması gereklidir. Alternatif yakıtlar birincil yakıtlar ile ikame edileceğinden kalori içerikleri genel bir kabul ile petrokok kalorisi ile karşılaştırılmaktadır. Ömrünü tamamlamış lastikler petrokoka yakın bir kalori içeriğine sahipken atıktan türetilmiş yakıtların kalorisi petrokok ya da kömürden düşüktür [113].

Bu bölümde Türkiye’de alternatif yakıt olarak yaygın şekilde kullanılan atık grupları anlatılmaktadır. Çimento fabrikalarında kullanılan atıklar birçok farklı alt gruba ayrılmakla birlikte en yüksek yer değiştirme oranlarında kullanılan atıklar, ATY, Ömrünü tamamlamış lastikler, arıtma çamuru ve diğer atıklar olarak belirlenmiştir. 2018 yılında Türkiye’deki çimento fabrikalarındaki alternatif yakıt ısıl yer değiştirme

oranları Şekil 2.17’de gösterilmiştir. 2018 yılında %31,2 oranında ATY, %35 oranında ise ömrünü tamamlamış lastikler kullanılmıştır [121].



Şekil 2.17. 2018 yılı Türkiye çimento fabrikaları alternatif yakıt yüzde ısıl yer değiştirme oranları [121]

2.2.1. Atıktan türetilmiş yakıt

Atıklardan türetilmiş ikincil bir yakıt kullanmak, konvansiyonel yakıt tüketimini ve düzenli depolamaya gidecek atık miktarını azaltmaktadır. Ancak, düzenli depolamaya gönderilen evsel katı atıkların (MSW: Municipal Solid Waste) hiç bir işlem görmeden doğrudan alternatif yakıt olarak kullanılması etkin bir çözüm değildir. Bu nedenle atıkların işlenmesi gereklidir. Bu işlem, atıkları homojen, yüksek kalorili, kimyasal olarak sabit bir yapıda alternatif yakıtla dönüştürmektedir. Bu özellikleri ile atıklar yanma boyunca fazla oksijen ihtiyacını, kül miktarını ve kirletici emisyon miktarlarını düşürmektedir. Bu noktada, kentsel atıklardan üretilen atıktan türetilmiş yakıt üretimi önemli bir metod olarak karşımıza çıkmaktadır [122].

Atıktan türetilmiş yakıt (ATY) endüstriyel ya da kentsel atıkların geri kazanılabilir kısımları ayrıştırıldıktan sonra geriye kalan, yanabilir özellikte ve kalorifik değere sahip, maddesel geri dönüşümü mümkün olmayan ancak yakma tesislerinde ya da beraber yakma tesislerinde alternatif yakıt olarak kullanılabilir, işlenerek elde edilmiş bir yakıt türünün isimlendirmesidir [123].

ATY üretiminde, kağıt/karton, plastik atıklar, tekstil atıkları, ahşap atıkları, arıtma çamurları, evsel ve endüstriyel atıkların kalorili kısımları, atık yağlar ve solventler gibi bir çok atık kullanılabilir. ATY üretiminde kullanılacak atıkların hangileri olduğu Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği Ek-4 ile belirlenmiştir. Aynı tebliğ ATY'nin özelliklerini de Ek-3 ile belirlemiştir [49, 124].

Atığın homojen olması yakıtın verimliliğini arttıracığından, atıkların kaynağında ayrı toplanması ile başlayan süreç, yanmayan kısımların ayrılması, atıkların parçalanması, elenmesi, kurutulması ve peletizasyonu aşamalarını içermektedir. Tüm bu işlemler atığın yanma verimini arttırmak için gerekli olan kalorifik değeri kazandırmak için gerçekleştirilir [115, 122, 125]. Tüm bu işlemler sonrasında yaklaşık 3.500 kcal/kg kalorifik değere sahip hale gelmiş olan ATY alternatif yakıt olarak kullanılmak için uygun bir yakıt olmaktadır [126]. ATY'nin kalorifik değeri atıktaki organik madde içeriğine bağlı olarak 2.500 kcal/kg ile 4500 kcal/kg arasında değişkenlik göstermektedir [123].

ASTM E856-83 (2006) standardına göre yedi tip atıktan türetilmiş yakıt sınıflandırılması yapılmıştır. Bu sınıflandırmalar Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 2.7. Atıktan türetilmiş yakıt sınıfları [123]

ATY Sınıfı	Formu
ATY1	Atık formunda kullanılan atıklar
ATY2	Demir metal ayrımı yapılarak ya da yapılmayarak işlenen iri partiküllü atıklar (ağırlıkça %95'i 6 nolu elek aralığından geçen iri ATY)
ATY3	Metal, cam ve diğer inorganik maddelerden ayrıştırılmış atıklar (Ağırlıkça %95'i 2 nolu elekten geçen ATY)
ATY4	Toz formundaki yanabilir atıklar (Ağırlıkça %95'i 10 nolu elekten geçen ATY)
ATY5	Pelet, yumru ya da briket formundaki ATY
ATY6	Sıvı hale dönüştürülmüş ATY
ATY7	Gaz haline dönüştürülmüş ATY

Çimento fırınlarında ısıl yer değiştirme amacıyla kullanılan ATY geniş bir atık grubundan üretilmektedir. ATY'nin üretildiği atıklara göre kalorifik değeri değişkenlik göstermektedir. Evsel katı atıklardan üretilen ATY, endüstriyel atıklardan

üretile ATY'ye göre daha düşük kalorifik değere sahip olabilir. ATY üretiminde kullanılabilcek atık gruplarına ve kodlarına göre bir sınıflaması da yapılmaktadır. I.sınıf, ahşap, kağıt,karton, mukavva kutular, II.sınıf, tekstil,elyaf, III.sınıf, plastikler, IV.sınıf, diğler malzemeler ve V.sınıf karışık atıklardan kalorisi yüksek olan atıklardır. Bu atık gruplarına ait net kalorifik değler, klor ve civa içerikleri farklılık göstermetedir [49].

Türkiye'de ATY tanımı ve ATY'nin özellikleri Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliğı ile belirlenmiştir. Tebliğı göre ATY, özellikleri tebliğın Ek-3'üne uygun olarak Ek-4 listesinde izin verilen atıklardan türetilen yakma veya beraber yakma tesislerinde kullanılabilcek yakıt olarak tanımlanmaktadır. ATY'nin sağlaması gereken özellikler Tablo 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2.8. ATY özellikleri [108]

Parametre	Sınır Değler
Kalorifik Değler (kcal/kg)	>2500
Tane Boyutu (mm)	<50 ⁽¹⁾
Nem Oranı (%)	<35
Klor İçeriğı (%)	<1 ⁽²⁾
Hg (µg/MJ)	<330
Ağır Metal Toplamı (mg/MJ)	<2500
PCB (ppm)	<50
Solvent İçeriğı (%)	<15

⁽¹⁾: Tane boyutu parametresi ATY kullanacak tesislerde kullanılan teknolojilerin Bakanlıkça uygun bulunması halinde arttırılabilir.

⁽²⁾: Klor by-pass hattı bulunan tesisler için parametre üç katına kadar Bakanlıkça uygun bulunması halinde arttırılabilir.

Çimento fabrikalarında ATY kullanımını yasal kurallara uyumlu olarak üretilmiş olmasına, kalitesine, homojenliğine, boyutuna ve kalorifik değerine göre değlerlendirilebilir. ATY'nin fırına besleneceğı bölgeye göre üretim kriterleri farklılık göstermektedir. Kalsinatörden beslenecek ATY daha düşük kalorili ve daha büyük parça boyutuna sahipken alev borusundan beslenecek olan ATY sinterleme bölgesinde yüksek sıcaklık sağlaması gerekeceğı için daha küçük parça boyutlu ve yüksek kalorili olabilir. Tablo 2.9 farklı noktalardan beslenen ATY'nin tavsiye edilen özelliklerini göstermektedir [124]. Ancak, atık besleme sistemleri farklılık göstereceğinden ATY boyutunun besleme sistemi olanaklarına göre seçilmesi faydalı olacaktır.

Tablo 2.9. Farklı besleme noktaları için tavsiye edilen ATY özellikleri [124]

Parametre	Alev Borusu	Kalsinatör
Tane Boyutu	<30 mm, iki boyutlu	<50-80 mm, 2 ve 3boyutlu
Nem oranı	<%15-20	<%25
Kül	<%20	<%20
Klor	<%0,8	<%0,8
Kalorifik değer	Min 4.800 kcal/kg	Min 3.500 kcal/kg

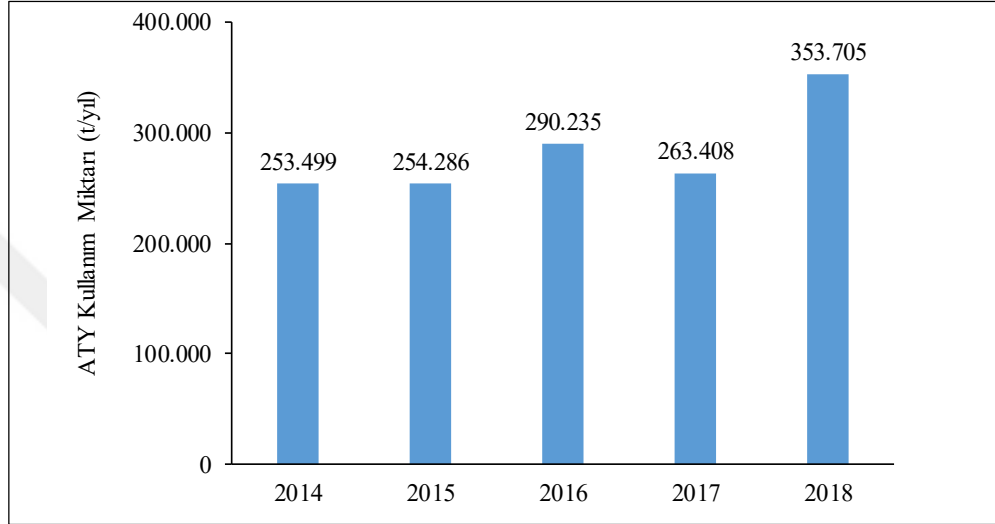
Çimento fabrikalarında ATY kullanımı Avrupa’da 1993 yılından beri uygulanan bir yöntemdir. ATY kullanımında Avrupa’da ilk sıralarda yer alan ülkeler, Avusturya, Belçika, Danimarka, İtalya ve Hollanda’dır. Literatüre göre 1997 yılında [115] çimento fırınlarında 115.000 ton evsel katı atık ile 2003 yılında 300.000 ton ATY kullanımı gerçekleştirilmiştir [115, 127].

Atıktan yeni bir yakıt üretmenin, yakıtın homojenliğini sağlamak, CO₂ emisyonunu azaltmak, yakıtın kalorifik değerini arttırmak ve nem içeriğini düşürmek gibi faydaları bulunmaktadır. Bazı çalışmalarda kömür yerine ATY ikamesi ile karbon ofsetlemek için ATY’nin nem içeriğinin %15’den düşük olması gerektiği ve böylelikle 0,4 ton CO₂/t kömür emisyon azaltımı sağlanabileceği belirtilmiştir [128, 129]. Genon ve Brizio, 2008 yılında yaptıkları çalışmada, çimento fabrikalarında ATY kullanımının konvansiyonel yakıtlara oranla tüketilen her 1 kg ATY için 1,61 kg CO₂ azaltımı sağlayabileceğini raporlamışlardır [99]. Bu durum ATY’nin karbondioksit azaltımı sağladığını ancak üretildiği malzeme, karbon içeriği ve nem içeriğine göre farklı oranlarda azaltım sağladığını göstermektedir.

ATY’nin çimento fabrikalarında beraber yakılması sırasında daha fazla yakma havasına ihtiyaç duyulduğu ve fırının termal verimini düşürdüğü görülmüştür. Bu durum fırının spesifik ısı tüketimini attırır ki bu da üretim kaybına sebebiyet verebilir [82].

ATY’nin çimento fabrikalarında kullanımında dikkat edilecek parametrelerden biri klordur. Çimentonun klor içeriği %1 ile sınırlıdır. Bu nedenle atıklar seçilirken klor içeriği yüksek olanlar tercih edilmemektedir. Ayrıca, ATY’nin tek başına yakma tesislerinde yakılması yerine çimento fabrikalarında kömür ile beraber yakılmasının PCDD ve PCDF emisyonlarında azalma neden olduğu görülmüştür [123].

Türkiye’de çimento fabrikalarında en yüksek oranlarda kullanılan atıklardan biri ATY’dir. 2018 yılında %31,2 oranında kullanılan ATY’nin yıl içerisinde kullanılan toplam miktarı 353.705 ton/yıl olmuştur. Türkiye’de kullanılan ATY, ağırlıklı olarak endüstriyel atıklardan üretilmektedir. 2014 yılında 253.499 ton/yıl miktarında kullanılan ATY, 4 yıl içerisinde 353.705 ton/yıl miktarına ulaşmıştır. Türkiye’de, 2014-2018 yılları arasındaki ATY kullanım miktarları Şekil 2.18 ile özetlenmiştir.



Şekil 2.18. 2014-2018 yılları arası Türkiye çimento fabrikaları ATY kullanım miktarları [23]

ATY, plastik ağırlıklı ve çok ince kıyılmış bir yapıda olabileceği gibi (Şekil 2.19), iri kıyılmış ve karışık bir çok atık içeren şekilde de olabilir (Şekil 2.20).



Şekil 2.19. ATY görseli – 1



Şekil 2.20. ATY görseli – 2

2.2.2.Ömrünü tamamlamış lastik

Ömrünü tamamlamış lastikler (ÖTL) ve bu lastiklerin kırılması ile elde edilen TDF (Tire Derived Fuel) yaklaşık 31,4 kJ/kg kalorifik değere sahip olmaları ve düşük nem içerikleri ile çimento fabrikalarında konvansiyonel yakıt yerine ikame edilebilen önemli alternatif yakıt kaynaklarından [130].

Lastikler genellikle vulkanize kauçuk, takviye dolgu maddeleri, fiberler ve vulkanize kauçuğun düşük sıcaklıklarda esnekliğini arttırabilmek için eklenen yağlardan oluşur. Vulkanizasyon işlemi nedeniyle lastiklerde çinko oksitler ve kükürt bulunmaktadır. Karbon siyahı en yaygın kullanılan dolgu malzemesidir. Tablo 2.10’da lastiklerin genel içerikleri verilmiştir [131].

Tablo 2.10. Lastiklerin kompozisyonları [131]

Komponent	Binek Araç Lastiği (%)	Kamyon Lastiği (%)
Doğal kauçuk	14	27
Sentetik kauçuk	27	14
Karbon siyahı	28	28
Çelik	14-15	14-15
Kord bezi, dolgular vb.	16-17	16-17
Ortalama Ağırlık	Yeni: 12 kg ÖTL: 9	Yeni: 54 ÖTL: 45

Döner fırınlarda kömür ya da diğer yakıtların yerine kullanılan lastiklerin değişken bir kompozisyonları yoktur. ÖTL'nin %88'i karbon ve oksijenden oluşmaktadır. Bu durum ÖTL'nin yüksek kalorifik değere sahip olmasını ve hızla yanmasını sağlar. Döner fırında ÖTL kullanılması ile her bir ton ÖTL için 1,25 t kömür kesilmesi mümkündür. Ancak, ÖTL kullanımını %30 olduğu durumlarda klinker içerisinde çinko bileşiklerine rastlanabilir. Çimento içerisinde çinko miktarı 4.000 ppb'den fazla olduğunda çimentonun donma süresi uzayabilir ki bu istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle yüksek oranlarda ÖTL kullanımında dikkatli olunması tavsiye edilmektedir [132, 133]. Kömür ve ÖTL'nin elementel analizlerinin karşılaştırılması Tablo 2.11'de verilmiştir.

Tablo 2.11. Kömür ve ÖTL elementel analiz karşılaştırması [17]

Element	Kömür (%)	Telli ÖTL (%)	Telsiz ÖTL (%)
Alüminyum	20,70	1,93	13,11
Kalsiyum	3,30	0,56	3,80
Demir	18,89	0,35	2,37
Magnezyum	0,79	0,10	0,68
Fosfor	0,62	0,10	0,68
Potasyum	2,06	0,14	0,95
Titanyum	0,82	0,14	0,95
Silicone	0,82	0,14	0,95
Kükürt	4,33	0,99	6,72
Çinko	0,02	5,14	34,81
Metal	-	85,26	-
Toplam	100,00	100,00	100,00

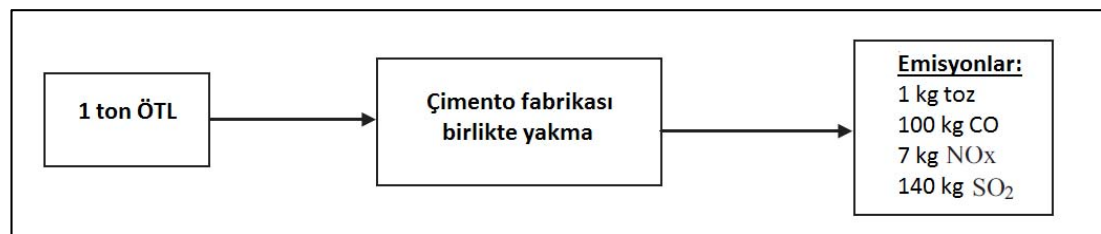
Tehlikesiz atık olan ÖTL yaklaşık 7500 kcal/kg'lık kalorifik değeri ve kimyasal yapısı ile çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanıma çok uygundur. Ağırlıkça %70-72 civarında uçucu ve %7 ile %10 oranında değişen kül miktarına sahiptir. Kükürt ve azot içeriği konvansiyonel yakıtlara oranla daha düşüktür [134]. Yüksek sıcaklıklar ve uzun bekleme süreleri ÖTL'nin çimento fırınlarında kullanılması için uygun ortamı sağlamaktadır [135]. Çimento üretiminde genel olarak demir cevheri kullanılmaktadır. Lastik, içerisinde bulunan tellerden dolayı üretimde kullanılan demir cevheri miktarının azalmasını sağlar. Ancak, ÖTL yaklaşık %1,4 oranında çinko içermektedir. Bu nedenle de çimentonun hidrasyonunu ve donmasını olumsuz etkileyebilir. Diğer yandan ÖTL konvansiyonel yakıtı göre daha düşük kükürt içeriğine sahiptir. ÖTL içerisindeki kükürt ağırlıkça %1,24 ila %1,30 oranında değişen

bir aralıkta iken çimento üretiminde kullanılan kömür yaklaşık %1,5 kükürt içermektedir. Çimento üretiminde yüksek miktarlarda bulunan kalsiyum karbonat etkili kükürt gidericidir ve bu durum kükürt emisyonlarının kontrolünü sağlamaktadır. ÖTL içerisindeki tüm ağır metaller ve yakma sonucu çıkan kül klinkerin yapısına bağlanır [132]. Tablo 2.12, petrokok, kömür ve ÖTL'nin yakıt özelliklerinin karşılaştırmasını sunmaktadır.

Tablo 2.12. Yakıt analiz karşılaştırması [132]

Parametre	Petrokok	Kömür	ÖTL
Uçucu (%)	13,00	36,80	72,00
Kül (%)	7,10	14,00	7,00
Karbon (%)	82,60	80,60	84,00
Hidrojen (%)	3,40	4,60	5,00
Kükürt (%)	4,90	0,70	2,00
Azot (%)	1,75	0,30	1,75
Kalorifik Değer (kJ/kg)	32,48	27,43	31,40

Avrupa'da çimento fabrikalarında sıklıkla kullanılan atıklardan biri ÖTL'dir. Finlandiya, Lüksemburg ve Portekiz'de alternatif yakıt olarak yalnızca ÖTL kullanılmaktadır [128]. Ayrıca, Ekincioglu ve diğ. 2013 yılında yayınladıkları çalışmada Türkiye'de 3 fırınlı bir çimento fabrikasında son 7 yıl içerisinde 12,2 milyon ton ÖTL kullanıldığını belirtmişlerdir [136]. ÖTL'nin çimento fabrikalarında kullanımı ile ilgili yapılan araştırmalarda çimento kalitesinde herhangi bir değişim olmadığı görülmüştür. Yanma sonrası hem lastiklerden hem de çelik tellerden kalan artıklar çimento içerisinde görülmemektedir. Döner fırınlarda ÖTL kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlardaki emisyonlar arasında da önemli değişimlere rastlanmamıştır. Tüm bu özellikleri nedeniyle ÖTL çimento fırınlarında çevre dostu olarak rahatlıkla kullanılabilen bir alternatif yakıttır [136]. Çimento fabrikalarında ÖTL kullanılması kütle denkliği genellemesi Şekil 2.21'de gösterilmektedir.



Şekil 2.21. ÖTL beraber yakma kütle denkliği [94]

Çimento fırınlarda kullanılan ÖTL'leri bütün ve parçalanmış olarak iki ana kategoride toplamak mümkündür. Bütün ve parçalanmış lastik kullanımları arasındaki temel fark kalorifik değerdir [132]. Bütün haldeki lastikler intikalde çift kademeli bir klape yardımı ile fırına beslenebilmektedir. Parça boyutuna bağlı olarak alev borusundan ya da kalsinatörden de ÖTL beslenmesi yapılabilmektedir [133]. ÖTL'nin tam yanmasının sağlanması uzun bekleme süresi gerektirir. Bazı çimento fabrikalarında ÖTL'ler fırına bütün halde beslenirken bazılarında iri parçalar ya da daha ufak parçalar halinde doğranır ve kalsinatörden beslenir. Kalsinatördeki düşük bekleme süreleri nedeniyle ince kıyılmış ÖTL tam yanmayabilir ve tersiyer gaz kanalına ya da fırın girişine düşebilir. Fırın girişinde ince parçalı lastiklerin yanmasına yetecek yeterli oksijen bulunmaz. Küçük parçalı ömrünü tamamlamış lastikler gaz akışı ile yanma tamamlanmadan kalsinatörden taşınabilir. Bu da bu lastik parçalarının karbon partikülleri olarak kasine olmuş farine karışmasına neden olur. Böylece, hem yeterli enerjiden fayda sağlanamaz hem de çimentonun alkalinitesi etkilendiği için çimento karakteristik rengini kaybeder [17].

İnce kıyılmış lastikler, 1.050-1.150°C sıcaklıklarda 22 m/s gaz hızında kalsinatörde 30 saniye içerisinde tüm uçuculuğunu kaybeder ve yanar. İnce kıyılmış lastik parçaları fırına beslendiklerinde tutuşma sonrası şiddetli bir alev ile yanarlar. Tutuşma süresi tamamen sıcaklığa bağlıdır. 900°C sıcaklıklarda tutuşma süresi yaklaşık olarak 3 sn'dir. Şiddetli alev ince kıyılmış lastik parçalarının yoğun şekilde uçuculuklarını kaybettiklerini ve yandıklarını göstermektedir [17]. Şekil 2.22'de kıyılmış lastikler, Şekil 2.23'te ise bütün haldeki lastikler gösterilmektedir.



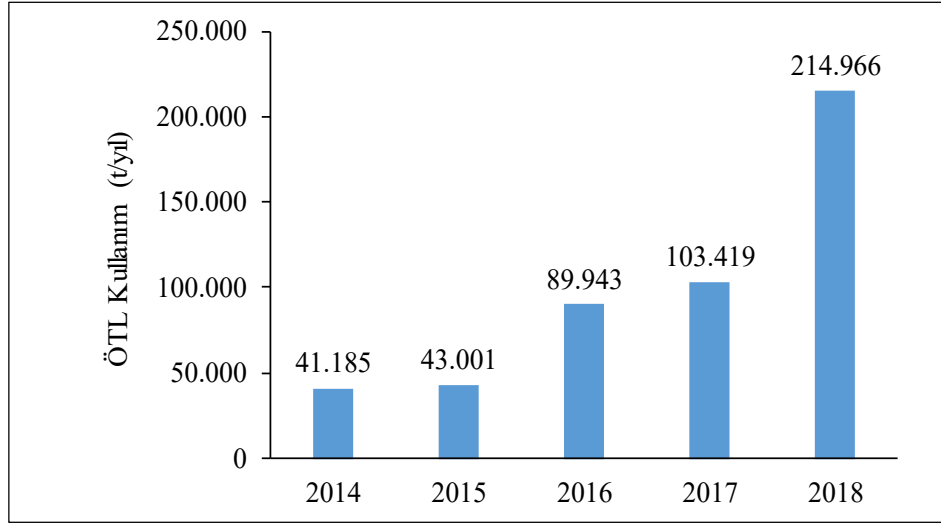
Şekil 2.22. İnce kıyılmış ömrünü tamamlamış lastik



Şekil 2.23. Bütün lastik

Japonya, Avrupa ve Amerika’da ömrünü tamamlamış lastikler 1970’li yıllardan beri çimento fabrikalarında kullanılmaktadır. 2003 yılında ABD’de 290 milyon lastik atık sınıfına grimiştir ve bu miktarın yaklaşık %45’i TDF olarak kullanılmıştır ve bu %45’lik oranın %58’i çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak tüketilmiştir. Avrupa’da her yıl yaklaşık 2,5 milyon ton lastik oluşmaktadır ve bu lastiklerin %40’lık kısmı herhangi bir işleme tabi tutulmadan atılmaktadır [17].

Türkiye’de en çok kullanılan alternatif yakıtlardan biri olan ÖTL 2018 yılı içerisinde 214.966 ton miktarında kullanılmıştır. Bu miktar ısııl yer değiştirme olarak %36,5 oranına denk gelmektedir. Ağrılıkça ATY’den daha az miktarda kullanılmasına rağmen yüksek kalorifik değeri nedeniyle ikame oranı ATY’den yüksek olarak geręekleşmiştir. Şekil 2.24’te 2014 ile 2018 yılları arasında kullanılan ÖTL miktarları gösterilmektedir. Özellikle 2016 yılı itibari ile çimento fabrikalarında kullanılan ÖTL miktarı yükseliş göstermektedir. Türkiye’de ömrünü tamamlamış lastiklerin kendilerine ait bir yönetmelikleri bulunmaktadır. İlgili yönetmelik ÖTL’nin yetkilendirilmiş kuruluşlardan temin edilerek çimento fabrikalarında kullanılabileceğini belirtmektedir. Türkiye’de bulunan lastiklerin kota usulü toplanması yapılmaktadır ve bu toplama işi lastik üreticileri tarafından ürettikleri miktarlara bağlı olarak geręekleştirilmektedir. Çimento fabrikaları aynı zamanda yurtdışından parçalanmış lastik ithal ederek fırınlarında kullanabilirler [137, 138].



Şekil 2.24. 2014-2018 yılları arası Türkiye çimento fabrikaları ÖTL kullanım miktarları [23]

2.2.3. Arıtma çamurları

Atıksu arıtma tesislerinde arıtma işlemi sonucunda arıtılmış su ve çamur oluşur. Her ikisinin de deşarjı belli yönetmeliklere tabidir. Arıtma çamuru, atıksuyun arıtılması sürecinde çöken katı, yarı katı ya da sıvı kalıntıları içeren malzemedir [139].

Atıksuyun arıtılması sonucu oluşan arıtma çamurlarının en bilinen bertaraf yöntemleri düzenli depolama, denize dökme ya da tarımsal gübre olarak kullanılmasıdır [17]. Gelişmiş ülkelerde çamurun arıtımı pahalı ve çevre açısından oldukça hassas bir konudur. Geleneksel yöntemler olan toprağa serme veya denize dökme yasaklanmıştır. İlgili yönetmelikler ile yayınlanan kısıtlamalar nedeniyle arıtma tesisleri, çamurun içindeki kokuyu uzaklaştırmak, çamuru kurutmak ve biyolojik olarak stabil hale getirmek için yatırımlar yapmaktadırlar. Arıtma çamurunun kalorifik değeri ve organik içeriği termal işleme tabi tutulmasına olanak vermektedir [140].

Çimento fabrikalarının çevresel etkilerini azaltmanın bir yolu da alternatif yakıt kullanımınıdır. Japonya, Danimarka, Hollanda gibi ülkeler arıtma çamurlarını çimento fabrikalarında kurutulmuş halde alternatif yakıt olarak kullanmaktadır. 2006 yılında İsviçre çimento fabrikalarında 54.964 ton kurutulmuş arıtma çamuru kullanmıştır. Bu miktar o sene kullanılan tüm alternatif yakıtların ağırlıkça %22'sini oluşturmaktadır. Almanya ise 2006 yılında 200.000 ton civarında susuzlaştırılmış evsel arıtma çamurunu ve 40.000 ton kurutulmuş çamurunu alternatif yakıt olarak kullanmıştır

[94]. Werther ve Ogada oksitleri sınırlar içerisinde tutabilmek adına klinker üretiminin %5'ini geçmeyecek oranda arıtma çamuru besleme oranı tavsiye etmektedir [141].

Kuru sistem fırınlarda arıtma çamurları kullanılırken çamurun nem oranının %1'e kadar düşürülmesi yanma şartlarının iyileştirilmesini sağlar [94, 141]. Kurutulmuş haldeki çamurun, nakliyesi, elleçlemesi ve kullanması daha kolay olduğu için bu form tercih edilmektedir. Kurutulmuş haldeki arıtma çamurları pnömatik yollarla alev borusundan fırına beslenebileceği gibi kömür ile karıştırılarak da fırına beslemesi yapılabilir. Arıtma çamurları döner fırınlarda kullanılırken organik kısımları tamamen parçalanır ve ağır metaller klinkere bağlanır [17]. Döner fırınların fizikokimyasal özellikleri arıtma çamurlarının tamamen yanmasına olanak verirken yanma sonucu oluşan ve klinkere bağlanan kül de klinker için gerekli olan hammadde miktarının azaltılmasına olanak sağlar [140].

Arıtma çamurlarının kalorifik değeri ve içerdiği elementler, atıksuyun kaynağına ve arıtma prosesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Farklı arıtma prosesleri sonucu oluşan arıtma çamurlarının kalorifik değerleri Tablo 2.13'te gösterilmiştir.

Tablo 2.13. Arıtma prosesine bağlı olarak arıtma çamurlarının kalorifik değerleri [94]

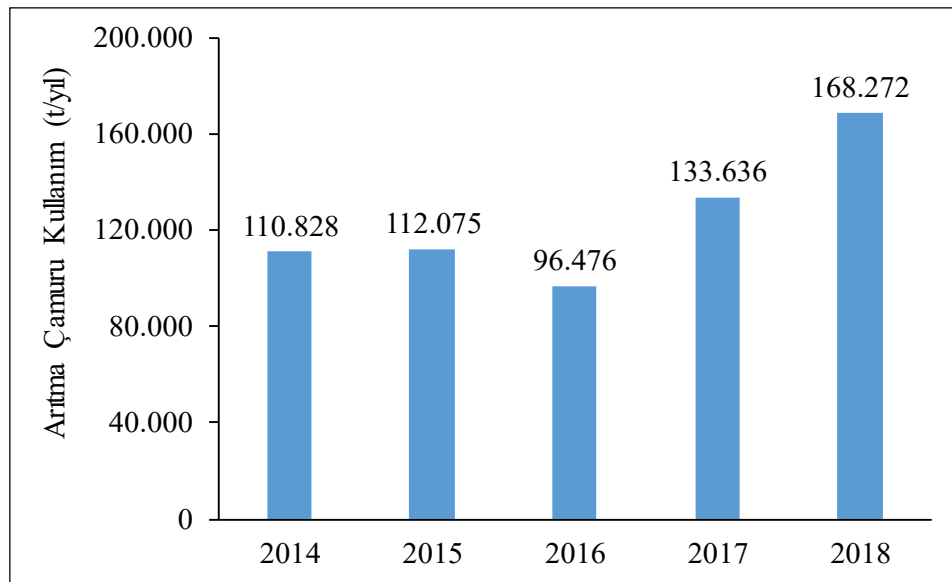
Çamur Tipi	Kurutulmuş Çamur Kalorifik Değer (MJ/kg)	
	Aralık	Tipi Değer
Ham çamur	23-29	25,5
Aktif çamur	16-23	21,0
Anaerobik ön çöktürme çamuru	9-13	11,0
Ham kimyasal ön çöktürme çamuru	14-18	16,0
Biyolojik çamur	16-23	19,5

Arıtma çamurlarının yakılması ile kükürtoksit emisyonlarının artması beklenir ancak çimento fabrikalarında beraber yakma işleminde kükürtoksit emisyonlarında, kükürtün %60 ila %80 arasındaki bir oranda fırın içerisindeki kalsiyum oksite bağlanmasından dolayı herhangi bir etkilenme görülmemiştir. Arıtma çamurları içerisindeki yüksek azot miktarına oranla kalsinatördeki azotoksit emisyonlarında herhangi bir artış görülmemektedir [17]. ABD Çevre Ajansı tarafından 2008 yılında yapılan bir çalışmada arıtma çamurlarının kullanılması ile NO_x emisyonlarının azaldığı görülmüştür [94]. Arıtma çamurları %0,2–0,5 aralığında klor içerebilir, bu

klor miktarı sikonlarda tıkanmalara neden olabilir. Arıtma çamurları, kömüre oranla daha fazla azot, uçucu madde ve kül içerirken çok daha düşük bağlı karbon içermektedir [17].

Arıtma çamurlarının alternatif yakıt olarak kullanılması durumunda konvansiyonel yakıt kullanımına oranla oluşan dioksin furan emisyonları azalmaktadır [140]. Arıtma çamuru içerisinde civa bulunabilir. Çimento fabrikalarında arıtma çamuru kullanılmasında tavsiye edilen civa miktarı 0,5 mg/kg olarak raporlanmıştır [94].

Türkiye’de atık çamur kullanımının şartları Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği ile belirlenmiştir. Çimento fabrikalarında arıtma çamurları hem alternatif hammadde hem de alternatif yakıt olarak kullanılabilir. Ancak, en önemli ayırım, alternatif yakıt olarak kullanılacak olan arıtma çamurunun nem oranıdır. Eğer tesiste bir kurutma ünitesi yoksa, %50’den fazla nem içeren arıtma çamurları alternatif yakıt olarak tesise kabul edilemezler. Türkiye’de 2018 yılı içerisinde kullanılan arıtma çamuru miktarı 168.272 ton olmuştur ve bu miktar ısıl yer değiştirme olarak %8,2 oranına denk gelmektedir. Şekil 2.25 son 4 (dört) yıl içerisinde Türkiye’deki çimento fabrikalarında kullanılan arıtma çamuru miktarlarını göstermektedir.



Şekil 2.25. 2014-2018 yılları arası Türkiye çimento fabrikaları arıtma çamuru kullanım miktarları [23]

Kurutulmuş arıtma çamuru Şekil 2.26’da gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Kurutulmuş çamur

2.2.4.Sıvı tehlikeli atıklar

Döner fırınlarda alternatif yakıt olarak konvansiyonel yakıt ikamesi olarak kullanılan bir atık grubu da sıvı tehlikeli atıklardır. Bu atık grubuna atık yağlar, atık solventler, boya atıkları, petrol kirleticileri girebilir. Kalorifik değerleri 29 ile 36 MJ/kg arasında değişen bu atıklara yakma dışında özel bir arıtım teknolojisi gerekmez [142].

Yüksek kalorileri ve elleçleme ve ön hazırlığa gerek duyulmaması atık yağların çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanılmasını cazip kılmaktadır [93]. Bu atıkların enerji geri kazanımlarının kolay olması, ek bir elleçleme ya da hazırlama süresi gerektiren atıklara göre konvansiyonel yakıt ikamesinde bu atıkları ön plana getirmektedir. Bünyelerinde bulundurdukları metallerin salımı bu atıkların kullanımında bir dezavantaj oluşturmaktadır. Ancak, atıkların beraber yakma işlemine tabi tutulduğunda açığa çıkan emisyonların, emisyon limitlerinin altında kaldığı raporlanmıştır [142].

Atık yağlar otomotiv, demiryolu ve endüstri kaynaklı tehlikeli atıklardır. Döner fırın içerisindeki sıcaklıklar atık yağların içerisindeki zararlı bileşikler tamamen yok eder. 2000°C üzerindeki sıcaklıklarda atık içerisindeki tüm organik bileşikler parçalanır. Yapılan çalışmalar, atık yağların alternatif yakıt olarak döner fırında kullanılmalari durumunda oluşan dioksin furan emisyonlarının son derece düşük olduğunu göstermiştir. Atık yağ kullanılan durumlarda bu emisyonların miktarının konvansiyonel yakıt kullanıldığı zamanlara göre düşük gerçekleştiği belirlenmiştir.

Baca gazındaki diğer emisyon parametrelerinin ise etkilenmediği görülmüştür. Kömür yakıldığı zamanlar ile karşılaştırıldığında ise ağır metal emisyonlarının da atık yağ yakılması durumunda daha az meydana geldiği belirlenmiştir [97].

Döner fırınlarda atık olarak kullanılmadan önce herhangi bir elleçleme gerektirmeyen solventler ve atık yağlar alev borusu ya da kalsinatörden fırına beslenebilmektedir [62]. Atık yağlar döner fırına alev borusunda bulunan ve fuel oil beslemek için kullanılan kanal vasıtası ile beslenebilir. Modern çok kanallı alev borularında ise kendisine ayrılan kanal kullanılabilir [97]. Atık yağın uzun süre depolanması yangın ve patlama riskini arttırabilir. Bu durumun önüne geçmek için uygun kontrol önlemleri alınmalıdır [94]. Atık yağlar genellikle klinker kalitesine etki etmemektedir. Ancak, bazı atık kodlarına sahip atık yağlar yüksek oranda çinko ve fosfor içerebilmektedir. Bu elementler klinker yapısında birikir ve donma süresini arttırarak erken dayanımı düşürür. Atık yağlar ile birlikte ÖTL gibi çinko içeren atıklar ve fosfor içeren farklı atıkların bir arada beslendikleri hallerde çinko ve fosfor miktarları ile ilgili bu durum dikkatle izlenmelidir [94]. Atık yağlar, canlıların sağlığı için oldukça toksik olan kurşun, kadmiyum, arsenik, dioksin, benzen ve poliaromatikleri içermektedir. Atık yağların fırınlarda yüksek sıcaklıklarda yakılması ile tüm organikler parçalanır ve organik olmayan kısımda klinkerin yapısına bağlanır [94]. Atık solventlerin yapısı ile fuel oil yapısının karşılaştırması Tablo 2.14’de sunulmuştur. Fuel oil’de ağır metal, kükürt, fosfor ve toplam halojenlerin miktarları daha yüksektir [94].

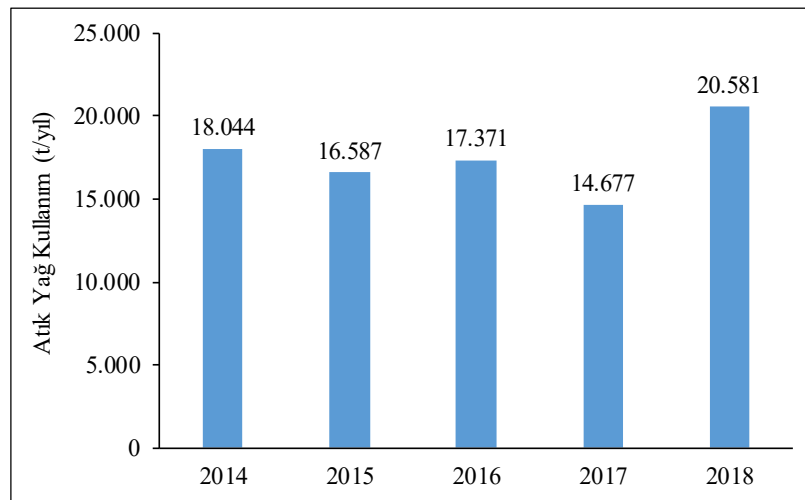
Tablo 2.14. Solvent ve fuel oil elementel yapı karşılaştırması [94]

Kompozisyon	Atık Solventler	Fuel Oil
H ₂ O	16,5 (%)	-
C	47,7 (%)	84 (%)
H	8,2 (%)	-
O	23,1 (%)	14,73 (%)
N	1,0 (%)	0,44 (%)
S	0,7 (%)	0,83 (%)
P	0,06 (5)	-
Cl	2,4 (%)	20 (g/t)
Br	2500 (ppm)	-
I	130 (ppm)	-
Fe	85 (ppm)	-
Co	4,1 (ppm)	-
Ni	4,6 (ppm)	15 (g/t)
Cu	6,2 (ppm)	3 (g/t)
Zn	57 (ppm)	0,9 (g/t)
As	-	0,8 (g/t)

Tablo 2.14. (Devam) Solvent ve fuel oil elementel yapı karşılaştırması [94]

Kompozisyon	Atık Solventler	Fuel Oil
Cd	-	2 (g/t)
Cr	-	1 (g/t)
Hg	-	0,006 (g/t)
Pb	-	3,5 (g/t)
Kalorifik Değer (Mj/kg)	21,7	40,4

Seyler ve diğ. yaptıkları bir çalışmada atık solventlerin döner fırında kullanılmaları sırasında fosil yakıt kullanımına göre azotoksitlerin ve ağır metallerin azaldığını görmüşlerdir [143]. Farklı bir çalışmada ise solvent ve boya çamurlarının kullanımı ile CO₂ emisyonlarının azaldığı belirlenmiştir. Mlakar ve diğ. yaptıkları çalışmada solventlerin fosil yakıt ile birlikte kullanılması durumunda civada düşüş gözlemlenmiştir [144]. Türkiye’de atık yağların “Atık Yağların Yönetimi Yönetmeliği” adını taşıyan kendilerine ait bir yönetmelikleri bulunmaktadır. İlgili yönetmelik atık yağları farklı kategorilerde incelemektedir. Atık yağların atık hiyerarşisi gereği geri kazanımları önceliklidir. Ülkenin geri kazanım kapasitesinin oluşan atık yağları karşılayamaması durumunda ise beraber yakma tesislerinde değerlendirilmeleri mümkündür. Deneme yakmasında kullanılması durumunda çimento fabrikaları lisanslarında atık yağ kodlarına sahip olurlar ve alternatif yakıt olarak kullanabilirler. 2018 yılında Türkiye’de çimento fabrikalarında 20.581 ton atık yağ, 640 ton solvent ve boya çamuru, 11.485 ton sıvı atık yakıtları kullanılmıştır. 2014 ile 2018 yılları arasında Türkiye’de kullanılan atık yağ miktarları Şekil 2.27’de gösterilmektedir [23, 145].



Şekil 2.27. 2014-2018 yılları arası Türkiye çimento fabrikaları atık yağ kullanım miktarları [23]

2.2.5. Diğer atıklar

2.2.5.1. Plastik atıklar

Plastik atıklar sahip oldukları 29-40 MJ/kg değerindeki kalorifik değerleri, yaygın şekilde üretilmeleri ve kolay beslenebilmeleri ile önemli bir alternatif yakıt kaynağıdır. Plastik atıklar evsel ve/veya endüstriyel kaynaklı olabilirler. Kullanımları ile ilgili sıkıntı yüksek klor içerikli olmalarıdır. Hem kalsinatörden hem de alev borusundan döner fırına beslenebilirler [94].

Matematik modelleme ile yapılan çalışmalarda polietilen ya da polistiren kullanımlarında kömür kullanımına oranla 1 ton CO₂/t kömür tasarrufu gerçekleşebileceği görülmüştür. Plastik atığın klor içeriğinin %0,7 üzerinde olması klinker kalitesine etki edebilir. HCl, dioksin ve furan emisyonları plastiklerde bulunan klor içeriği nedeniyle yükselebilir. Civa ve talyum gibi uçucu bileşiklerin plastiklerin kullanımı ile yükselme ihtimali bulunmaktadır [94].

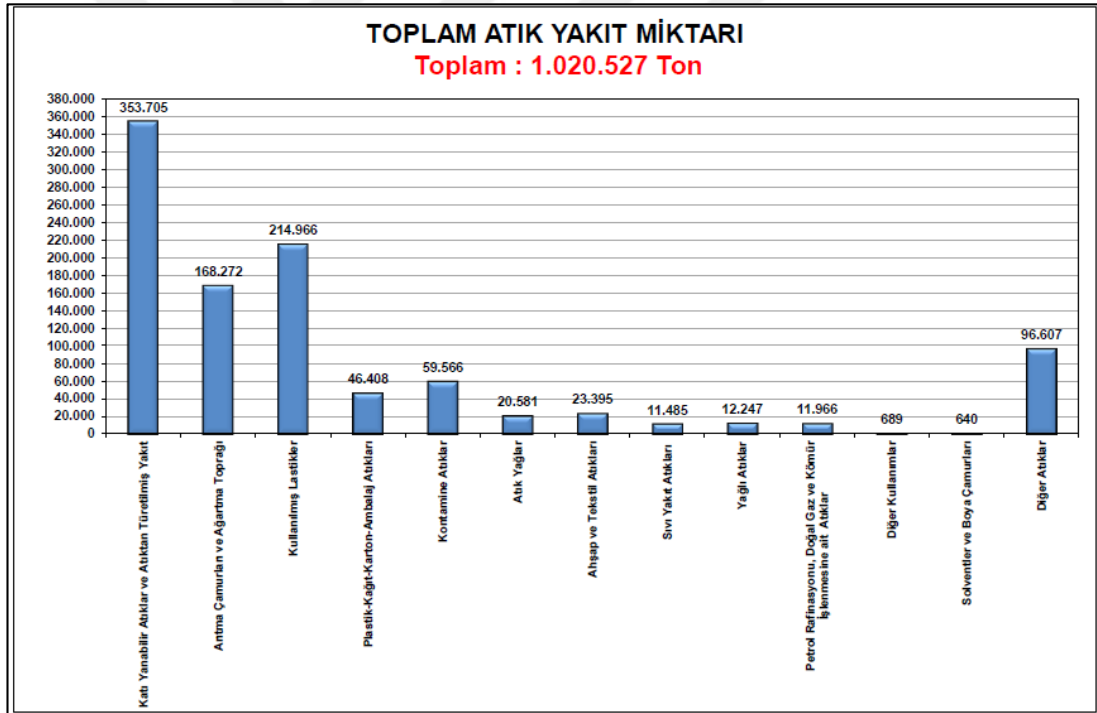
2.2.5.2. Evsel katı atıklar

Evsel katı atıklar şehirlerde en çok üretilen organik içeriği yüksek atıklardır ve en önemli bertaraf yöntemleri depolama sahalarına gömmektir. Ancak, arazi kullanımına yönelik nedenler ile son zamanlarda bu atıklarında insinerasyonu ve beraber yakılması (koinsinerasyonu) hacim azaltılması, organik kirleticilerin giderimi ve enerji geri kazanımı gibi nedenler ile cazip hale gelmiştir [146].

Evsel atıklar, yemek atıkları (yaklaşık %25-70), kağıt, plastik, metal, cam, tekstil, tahta, kauçuk, deri ve diğer materyallerden oluşmaktadır. Geri kazanılabilen kısımları ayrıldıktan sonra evsel ATY adı verilen bir atık üretilir ki bu atık ATY'den farklı olarak yalnızca evsel atıklardan oluşur, tehlikesizdir ve ATY kodundan farklı bir kod ile fabrikalara kabulü yapılır [147, 108].

Evsel katı atıklar çimento fabrikalarında kullanımı ile ilgili en önemli kısıtlar düşük kalorifik değer, heterojen yapı ve nem miktarıdır. Evsel katı atıkların kalorifik değeri 8-11 MJ/kg'dır. Evsel atıklardan elde edilen ATY'nin kalorifik değeri ise 15-20 MJ/kg'dır [94].

Yukarıda bahsedilen atıklar dışında halı ve tekstil atıkları, tahta atıkları, kontamine atıklar, ambalaj atıkları gibi atık grupları da bulunmaktadır [94]. Türkiye’de, Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği Ek-4 ek yakıt sütununda bulunan ve fabrikanın lisansında kodu bulunan tüm tekil atıklar çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanılabilir. Ancak, alternatif yakıt tercihlerinde atığın sürekliliği, nakliyesi, elleçlemesi, nemi ve boyutunun önemli olması nedeniyle bir çok atığın işlenmeden fabrikalarda kullanılması zor olmaktadır. Bu nedenle atıktan türetilmiş yakıt üretimi önem kazanmış ve çimento fabrikaları homojenliği, boyutu ve nemi nedeniyle bu atıkların kullanımına yönelmişlerdir. Çimento fabrikalarında bir çok farklı koda ve düşük miktarlarda farklı atıkların kullanımı söz konusudur. TCMB tarafından yapılan çalışma ile fabrikalarda kullanılan atık gruplamaları ve 2018 yılındaki kullanımları Şekil 2.28’de verilmiştir.



Şekil 2.28. 2018 yılı Türkiye çimento fabrikaları atık kullanım miktarları ve grupları [121]

2.3. Alternatif Yakıt Kullanımını Avantajları ve Karşılaşılan Zorluklar

Uzun yıllardır alternatif yakıt kullanan çimento fabrikalarının hem ekonomik hem de ekolojik açıdan girişimlerinin oldukça uygun olduğu görülmüştür. Atıkları, çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanmanın bir çok faydası bulunmaktadır.

Çimento fabrikaları mevcut durumları ile gerekli olan tüm yakma koşullarını sağladıkları için yeni bir yakma tesisi kurarak atık yakılmasına oranla daha ucuz ve kolay adapte edilir bir çözümdür [148].

Alternatif yakıtlar fosil yakıtlara oranla daha ucuzdur. Maliyetler açısından atık hazırlama, nakliye ve elleçleme süreçlerinin minimumda olması önem kazanmaktadır. En önemli avantajı yenilenemeyen kaynakların kullanımının ve depolanacak atık miktarının azaltılmasıdır [94]. Alternatif yakıt kullanımı ile konvansiyonel yakıtların kullanımı azaldığı gibi bu yakıtların çıkarılması için gerekli olan madencilik faaliyetlerinin de etkisi azaltılabilir. Avrupa’da çimento fabrikalarında alternatif yakıt kullanımı ile yıllık 2,5 milyon ton kömür eşleniği yakıtın tasarrufu sağlanmıştır [17]. Atık yönetim hiyerarşisinde enerji geri kazanımından sonraki basamak olan düzenli depolamaya gönderilecek atık miktarı azalır ki bu da depolama sahalarının ömrünün uzamasına katkıda bulunmaktadır. Atıktan türetilmiş yakıtların kullanımı ile depolamaya gidecek olan atık miktarı %50’ye kadar azaltılabilmektedir. Ayrıca, tehlikeli atıkların güvenli şekilde bertarafına olanak vermektedir [127, 148].

Yüksek sıcaklıklar, uzun bekleme süresi, yükseltgen ortam, alkali varlığı, küllerin klinkere bağlanması gibi özellikleri ile alternatif yakıt kullanımına çok uygun olan döner fırınlarda alternatif yakıtların kullanılması organiklerin tamamen parçalanmasına ve ağır metallerin küller ile ürün içerisinde kalmasına olanak sağlar [17]. Atıktan türetilmiş yakıtın tek başına yakılması durumunda poliklorlanmış dibenzoparadioksin (PCDD) ve poliklorlanmış dibenzofuran (PCDF) oluşma ihtimali bulunmaktadır. Ancak, beraber yakma durumunda bu bileşiklerin emisyonlarının önlendiği görülmüştür [123].

Çimento sanayi global sera gazı üretiminin yaklaşık olarak %5’inden sorumludur ve bu salımın %40’ı yakıt kaynaklıdır. Alternatif yakıtlar genel olarak fosil yakıtlardan daha düşük emisyon faktörlerine sahip olduklarında alternatif yakıt kullanımı CO₂ emisyonlarının azalmasını sağlar [82].

Alternatif yakıt kullanımının bir çok avantajı yanında, alternatif yakıt kullanımı ile ilgili deneyimlerin kısıtlı olması, alternatif yakıt kompozisyonunun değişken olması, partikül boyutu, nem içeriği ve uçucu sirkülasyonu gibi bazı zorlukları da bulunmaktadır [82].

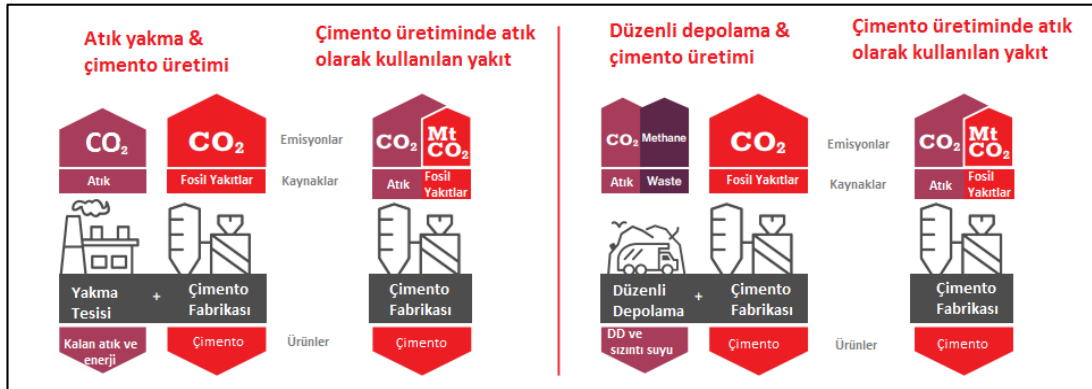
Konvansiyonel yakıtlardan alternatif yakıt dönmek iki yakıt arasındaki fizikokimyasal özellik farklılıkları nedeniyle bazı zorlukları taşımaktadır. Bunlar arasında, kötü ısı dağılımı, kalsinatör işletiminde değişkenlik, ön ısıtıcı kulede tıkanma problemleri, fırında tozuşma ve emisyonların yükselmesi sayılabilir [111].

Fırının kimyasal yapısı, beslenen farinin kompozisyonuna bağlı olduğu kadar aynı zamanda da yakıt içeriğine bağlıdır. Yakıt içerisinde bulunan bazı bileşikler çimento kalitesine, refrakter ömrüne ve emisyonlara olumsuz etkilerde bulunabilir. Atıklar içerisinde yüksek miktarda klorür bulunması da atıkların fırına beslenmesi noktasında kısıtlayıcı bir faktördür. Bazı atıklar, PVC ve arıtma çamurları gibi, yüksek oranda klor içerebilirler. Yüksek miktarda klor fırın içerisinde döngüye girer. %0,2-0,5 oranında yüksek klor içeriği ön ısıtıcı kule siklolarında tıkanmalara sebebiyet verebilmektedir. Aynı zamanda da klinker kalitesine olumsuz etkileri vardır [17].

Alternatif yakıt ikamesinde atığın stoklanması için stok alanı yapılması, alev borusu modifikasyonu, atığın güvenli taşınabilmesi için atık taşıma ve besleme sistemlerinin kurulması gibi nedenlerle bazı yatırımlar gerekli olabilir [94].

Alternatif yakıt yakılmasının avantajları aşağıdaki başlıklarda özetlenebilir;

a. CO₂ emisyonlarında azaltım; Şekil 2.29 döner fırınlarda atık kullanımı ile sera gazı emisyonlarındaki azaltımı göstermektedir.



Şekil 2.29. Döner fırında atık kullanımının sera gazı emisyonları üzerindeki etkisi [149]

b. Maliyet azaltımı

c. Fosil kaynak kullanımının azalması ile yenilenemeyen kaynak kullanımının azalması

- d. Atık yakılması nedeniyle herhangi bir bakiye atık oluşmaması
- e. Emisyonlarda belirgin bir değişim olmaması
- f. Yüksek sıcaklıklar, uzun bekleme süresi, alkali ortam nedeniyle tehlikeli maddelerin tamamen bertaraf edilmesi
- g. Düzenli depolama alanlarından tasarruf edilmesi [61].



3. ÇİMENTO FABRİKALARINDAN KAYNAKLANAN EMİSYONLAR

Hava emisyonları ve enerji tüketimi çimento fabrikalarının en önemli çevresel boyutlarını oluşturmaktadır. Su tüketimi çoğunlukla soğutma amaçlı kullanıldığından su kirliliğine katkısı yoktur. Yakıt tüketimi, depolanması ve tesis içerisinde taşınması toprak ve yeraltı sularını kirlletme potansiyeline sahip olabilir [50].

Çimento fabrikası girdi ve çıktılarını değerlendirmek için sistem girdi ve çıktıları önemlidir. Farin değirmeni, ön ısıtıcı kule, döner fırın ve soğutma bölümlerinden oluşan bir çimento üretim sürecinde aşağıda belirtilen girdi ve çıktı akışlarından bahsedilir.

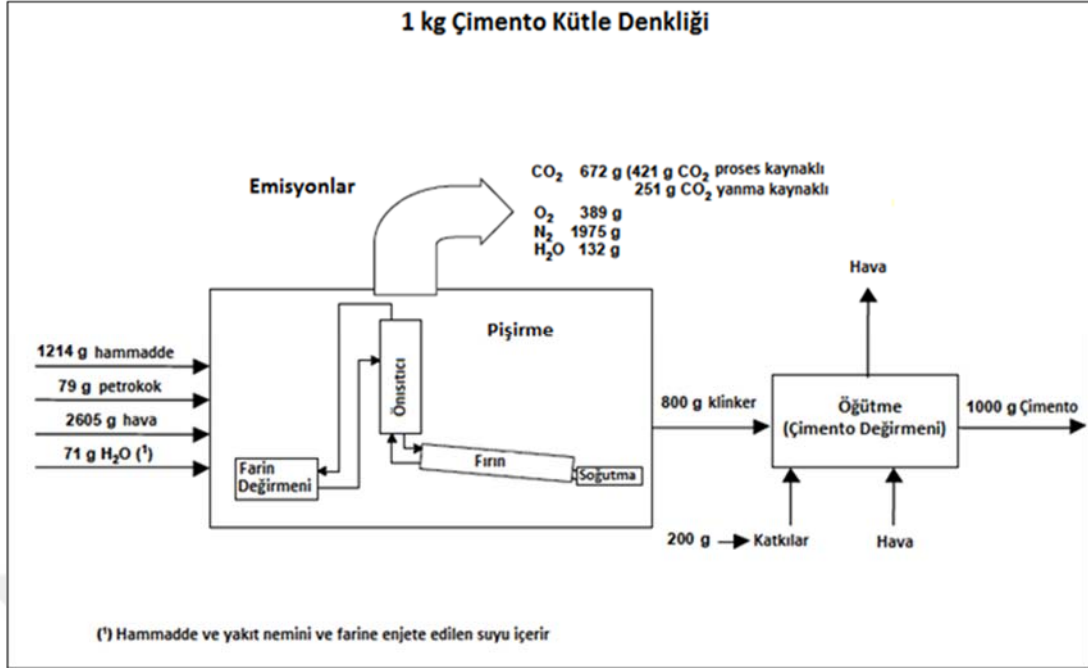
Girdiler:

- Hammadde : doğal hammaddeler ve alternatif hammaddeler
- Enerji : fosil yakıtlar, alternatif yakıtlar, biyokütle, elektrik enerjisi
- Su : yakıt nemi, hammadde nemi
- Hava: birincil hava, soğutma havası, kaçak hava, nakil havası
- Yardımcı maddeler: mineral katkıları, ambalaj malzemeleri

Çıktılar:

- Klinker
- Proses kayıpları: Filtre tozları
- Hava emisyonu: toz, NO_x, SO_x

Dik farin değirmeni, 5 kademeli ön ısıtıcı kule, kalsinatör ve ızgaralı soğutucuya sahip bir döner fırın ünitesinde %100 petrokok kullanılarak kütle dengeli sistemde; spesifik ısı 3.300 kJ/kg klinker, petrokok net kalorifik değeri 335.000 kJ/kg petrokok, standart kimyasal yapıda 1,66 kg/kg klinker besleme miktarı, 1,52 kg/kg klinker farin faktörü ve %5 farin nemi, %1 hava nemi, %30 kaçak hava, 0,8 klinker/çimento oranı kabulleri yapılarak Şekil 3.1'deki şekilde oluşturulmuştur [50].



Şekil 3.1. Kuru proses çimento üretimi kütle denkliği [50]

Global CO₂ emisyonlarının %5'inden sorumlu olmakla birlikte, çimento üretimi aynı zamanda azot oksitler (NO_x), kükürdioksit (SO₂), karbon monoksit (CO), toz, uçucu organik karbonlar ki toplam organik karbon olarak ele alınmaktadır ve bunun yanında hidrojen klorür, hidrojen florür, PCDD/F ve ağır metal emisyonlarına da sahiptir [150]. Türkiye'de çimento fabrikalarının hava kirletici emisyonları ile ilgili sınır değerler Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde (SKHKKY) sektöre ait başlık altında anlatılmıştır. SKHKKY'ne göre çimento fabrikaları toz, NO_x, SO_x parametrelerinde sürekli izleme sınır değerine ve ağır metal periyodik ölçüm sınır değerlerine uyum göstermelidir. Alternatif yakıtların kompozisyonlarının fosil yakıtlardan farklı olmasına bağlı olarak çimento üretiminde alternatif yakıt kullanımı ile fırına giren minör elementler farklılık gösterebilir. Bu farklılıkların fırın düzenliliğine ve klinker kalitesine etkisi olabileceği her zaman göz önüne alınmalıdır. Alternatif yakıt fırına beslendiğinde, fırında takip edilmesi gereken hava kirleticilerde farklılık göstermektedir. Fabrikaların alternatif yakıt kullanması durumunda, uyum göstermesi gereken emisyon limit değerleri, parametreleri ve izleme periyotları değişiklik göstermektedir ve uyulması gereken emisyon limitleri Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik hükümleri olmaktadır. Her iki yönetmelikte emisyon limit değerlerine uygunluk göstermesi gereken sonuçların, 273 K, 101,3 kPa, %10 oksijen ve kuru baz olarak standartlaştırılması zorunludur. Tablo 3.1 SKHKKY

emisyon sınır değerlerini gösterirken, Tablo 3.2 AYİY emisyon sınır değerlerini göstermektedir [106, 151].

Tablo 3.1. Çimento fabrikaları için Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği sınır değerleri [151]

Kirletici	Emisyon Limiti	Birim
Toz	50	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)
NO _x	800	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)
SO _x	300	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)
TOK	150	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)

Tablo 3.2. Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik atıkları beraber yakan imento fabrikaları sınır değerleri [106]

Kirletici	Emisyon Limiti	Birim
Toz	30	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)
NO _x	800 /500*	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)
SO _x	300 /50**	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)
TOK	150 / 10**	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)
HCl	10	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)
HF	1	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)
Cd+Tl	0,05	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)
Hg	0,05	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+Vn	0,5	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)
PCDD/F	0,1	mg/Nm ³ %10 O ₂ (kuru baz)

*:Yeni tesisler

**.:Atıkların yakılmasından değil yakıttan kaynaklandığı kanıtlanırsa SKHKKY sınır değeri uygulanır.

Genellikle doğru ekipmanların kullanılması durumunda alternatif yakıt kullanımının emisyonların yükselmesine neden olmadığı söylenebilir [73]. Bu bölümde imento fabrikasındaki emisyonlar ve alternatif yakıt kullanımı ile nasıl etkilendikleri anlatılmaktadır. Yukarıda bahsedilen emisyonlar dışında imento fabrikalarından CO₂ emisyonları da salınmaktadır.

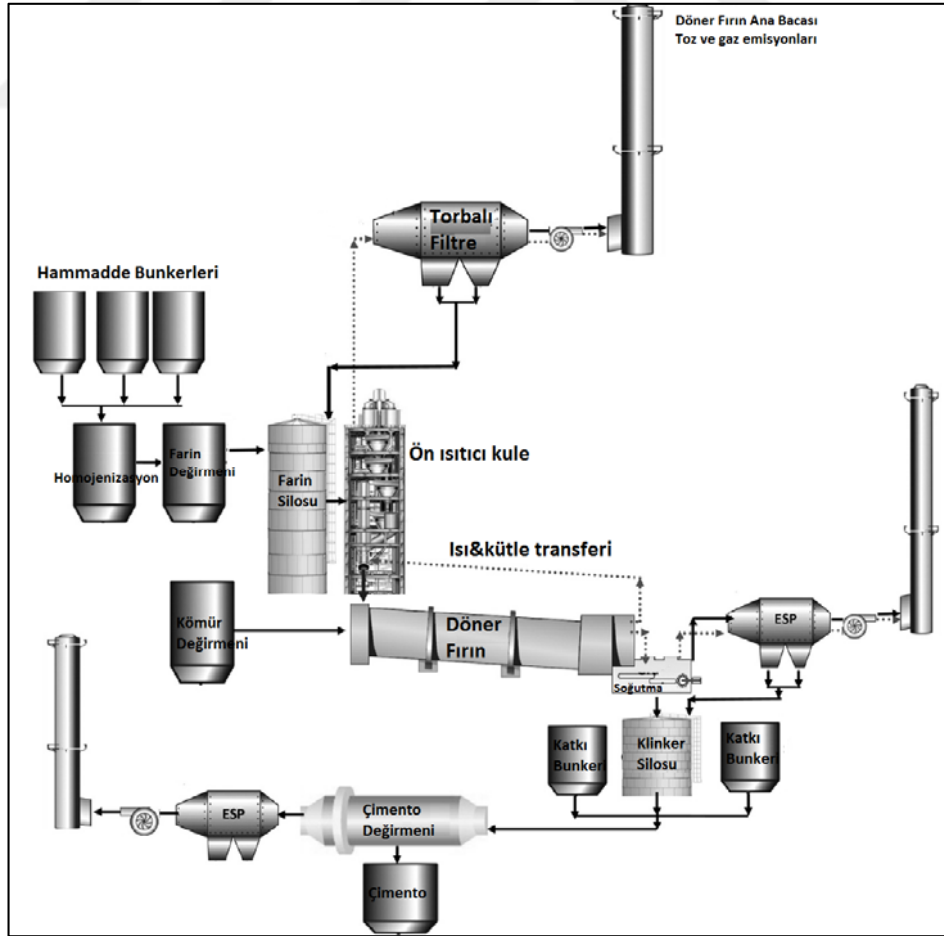
3.1. Toz Emisyonları

Çimento retimi sırasında hammadde temininden son ürünün paketlemesine kadar olan hemen her adımda toz oluşumu muhtemeldir [152]. Toz emisyonlarının en önemli kaynağı, döner fırın ana bacası ile soğutma bacasıdır [153].

Alternatif yakıt kullanılsa da kullanılsa da imento fabrikaları, hammadde kırıcıları, hammadde konveyorleri, hammadde ve imento stoklaması, kömür ve imento

öğütme, yakıt stoklama ve paketleme gibi aktiviteler nedeniyle toz oluşturmaya devam edecektir [50].

Çimento üretimi sırasındaki toza neden olabilecek tüm aktiviteler torbalı ya da elektrostatik toz tutucular ile donatılmıştır. Modern filtreler 10 mg/Nm^3 'e kadar toz azaltım garantisi vermektedir. Elektrostatik filtrelerin kullanılması durumunda toz emisyonları 10 ila 30 mg/Nm^3 aralığında değişirken bu değerler torbalı filtre kullanılması durumunda 10 ila 20 mg/Nm^3 aralığında değişmektedir. Elektrofiltrelerin kullanılması sırasında CO seviyelerini dengelemek ve filtrelerde güvenliği sağlamak için zaman zaman filtrelerin kapatılması gerekliliği doğmaktadır. Torbalı filtrelerde ise bu durum yaşanmaz [50]. Çimento döner fırınlarında toz oluşumu ve döngüsü Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Torbalı/elektrofiltrelerde tutulan tozlar farin silosuna geri döndürülerek ön ısıtıcı kule vasıtasıyla sisteme tekrar beslenmektedir. Döner fırın ana bacası gaz kirleticiler ile birlikte tozların da atmosfere salındığı noktadır.



Şekil 3.2. Çimento fabrikalarında toz emisyonu oluşumu [154]

3.2. Azot Oksit (NO_x) Emisyonları

Çimento üretmek için gerekli olan yükseltgen ortam NO_x oluşumu için oldukça elverişlidir. Temelde NO_x olarak adlandırılan azot gazlarının içeriğinde ağırlık olarak azot monoksit (NO) ve azot dioksit (NO₂) gazları bulunur. Çimento endüstrisinde NO_x gazlarının %90'lık kısmını reksiz, toksik bir gaz olan azot monoksit gazları geri kalan kısmını ise kırmızı kahverengi, toksik bir gaz olan azot dioksit gazları oluşturmaktadır [155].

Çimento fabrikalarında NO_x emisyonu yakıt yakılması sırasında iki ana mekanizma sonucu oluşur [156].

1. Yakma havası içerisindeki moleküler azotun oksidasyonu (Termal NO_x)
2. Yakıt içerisindeki azot bileşiklerinin oksidasyonu (Yanma NO_x)

Tüm bu mekanizmalar yakılan malzemeye ve yakma sıcaklığına bağlı olarak gelişir. Bazı durumlarda fırına beslenen malzeme içerisinde de azot bileşikleri bulunabilir bu da yakıt NO_x oluşumuna benzeyen ancak besleme (feed) NO_x oluşumu adı verilen bir oluşuma sebebiyet vermektedir. Klinkerin pişirilmesi sırasında yüksek sıcaklıklar mevcut olduğundan fırın sistemindeki NO_x oluşumları arasında termal NO_x oluşumu baskın olan mekanizmadır [156]. Önısıtıcı/kalsinatörlü kuru proseste NO_x hem döner fırında hem de kalsinatörde yanma bölgelerinde oluşur. Düşük azot içeren doğal gaz fırında yüksek sıcaklıkta yakıldığında, yüksek azot içerikli kömürün düşük sıcaklıkta yakılmasına oranla daha yüksek NO_x oluşumuna neden olur. Her fabrika farklı yakıtlar kullanır, son yıllarda atıkların yakıtlar ile karıştırılarak yakılması ivmelenmiş durumdadır [153].

3.2.1. Termal NO_x

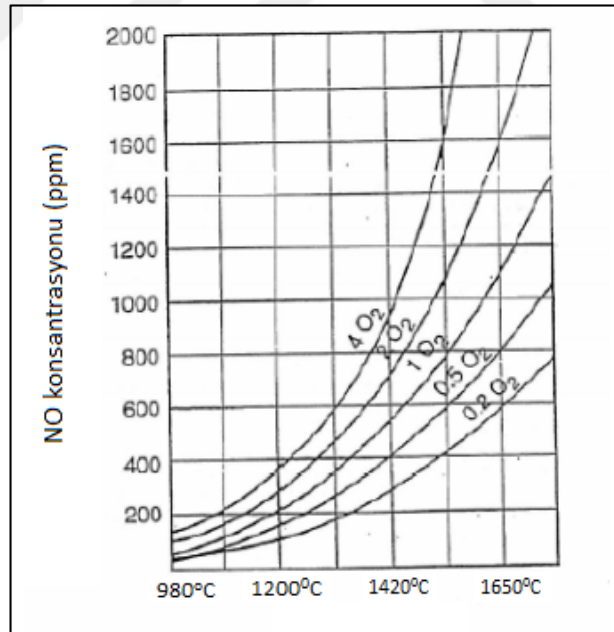
Termal NO_x oksijen ve azotun yüksek sıcaklıklardaki homojen reaksiyonu sonucu fırının yanma bölgesi olarak adlandırılan kısmında oluşur. NO_x emisyonlarının büyük çoğunluğu atmosferik azotun termal olarak indirgenmesi sonucu ortaya çıkmaktadır.

NO_x oluşum sıcaklığı 1.200-1.600°C aralığıdır. Alev sıcaklığı bu değerler aralığında olduğundan yanma bölgesinde önemli miktarda NO oluşumu gözlemlenir. İntikal gaz kanalında ya da kalsinatörde sıcaklığın 1.200°C'nin altında olması NO_x oluşumunu

baskılamaktadır. Yanma sıcaklığı ile birlikte gaz fazının bekleme süresi ve yanma bölgesindeki oksijen miktarı da oldukça önemlidir. Uzun bekleme süresi ve fazla miktarda oksijen varlığı NO_x oluşumunu arttıracaktır. NO_x'un düşük sıcaklıklarda dekompozisyonu termodinamik olarak mümkündür ancak kinetik olarak sınırlıdır. Zeldovich reaksiyonu olarak bilinen oksijen ve azotun reaksiyonu sonucu NO oluşumu Denklem (3.1) ve (3.2)'de gösterilmiştir [155, 156].



NO oluşumu sıcaklığın artması ile üstel olarak artar. NO oluşumu için oksijen gerekli olduğundan fazla hava oluşacak olan NO emisyonunu etkiler. Döner fırın yanma bölgesi genel olarak %5-10 arasında fazla hava ile çalışır. Fazla havanın artması NO oluşumunu arttırmaktadır. 1400°C'nin üzerindeki ufak sıcaklık değişimleri NO oluşumunda büyük değişimlere sebebiyet vermektedir. Oksijen ve sıcaklık değişimlerinin NO oluşumuna etkisi Şekil 3.3'te gösterilmiştir [156].



Şekil 3.3. Farklı oksijen seviyelerinde sıcaklık ve NO konsantrasyonları [156]

Yanma bölgesindeki termal NO_x oluşumu döner fırınlardan kaynaklanan NO_x emisyonlarının en önemli kısmını oluşturmaktadır. Termal NO_x oluşum reaksiyonu Denklem (3.3)'te verilmiştir [155].



Oluşan NO baca çıkışında Denklem (3.4)'te verilen şekli ile atmosferik koşullarda kıvılcak kahverengi renkli NO₂'ye dönüşür.



3.2.2. Yakıt NO_x

Yakıt NO_x oluşumu, yakıt içerisindeki azotun oksidasyonu ile meydana gelir. Buradaki reaksiyonlar oldukça karmaşıktır. Döner fırınlarda yakıt olarak, kömür, doğalgaz, fuel oil, ve alternatif yakıtlar kullanılmaktadır. Kömür ağırlıkça %1 ila 3 oranında azot içeren doğal gaz ve fuel oil daha düşük azot içeren yakıtlardır. Ayrıca, alternatif yakıtlar da önemli miktarda azot içeriyor olabilirler [156].

Yakıt NO_x, çoğunlukla kalsinatörde düşük sıcaklıktaki yanma bölgelerinde görülür. Ayrıca, döner fırın yanma bölgesinde de görülür. Yaklaşık olarak yakıt içerisindeki azotun %60'ı NO_x emisyonuna dönüşmektedir. Burada alevdeki oksijen miktarı ve alevin sıcaklık profili önem taşımaktadır [156].

NO_x emisyonlarında yakıt kaynaklı NO_x oluşumu ihmal edilebilir düzeydedir. Kalsinatörde tersiyer hava yokluğunda yakıtın %15-30'u NO_x'a dönüşürken tersiyer hava varlığında bu oran %30-75 olmaktadır. Kalsinatörlü fırınlarda NO_x oluşumu kalsinatörsüz fırınlara göre %35-50 oranında daha azdır [50, 155-156].

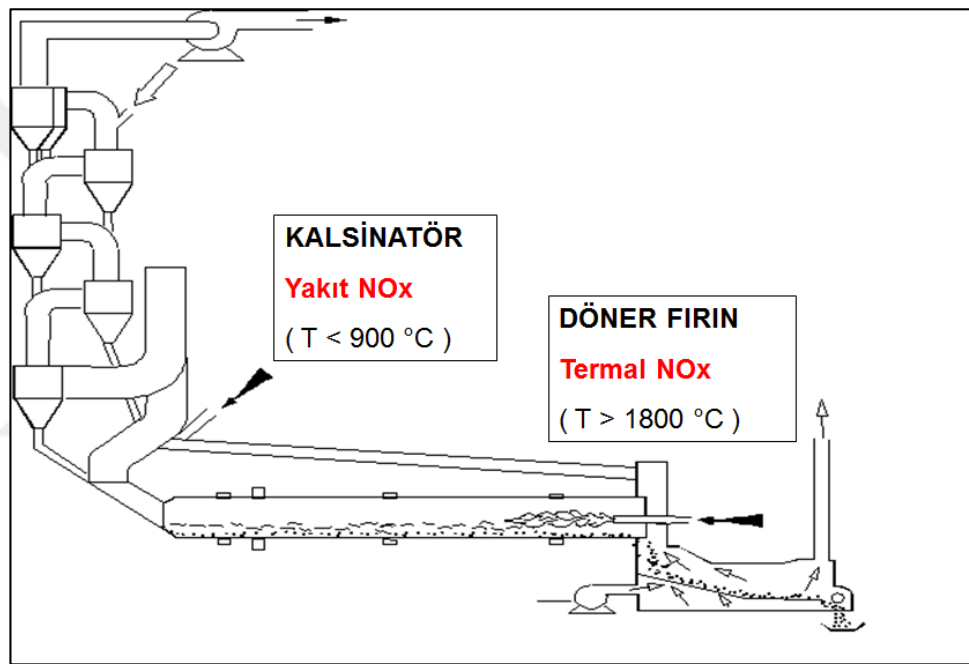
3.2.3. Besleme (feed) NO_x

Hammadde içerisinde bulunan azotun 300-800°C sıcaklıklarda ve besleme oranına göre oksitlenmesi ile oluşur. Besleme oranının yüksek olması NO_x oluşumunu azaltmaktadır. Toplam NO_x oluşumu içerisinde hammadde besleme kaynaklı NO_x oluşumu ihmal edilebilir seviyededir [156].

3.2.4. Ani NO_x

Ani NO_x, yakıt içerisindeki serbest radikallerin yanma havası içerisindeki N₂ ile reaksiyona girmesi sonucunda oluşur. Hidro karbonlar N₂ ile reaksiyona girerek hidrojen siyanür ve azot bileşiklerinin oluşmasına neden olurlar. Karmaşık bir dizi

reaksiyon sırasında amonyak oluşumu da görülür, daha sonra hidrojen siyanür amonyak ile reaksiyona girerek NO_x oluşturur. Bu reaksiyonlar Denklem (3.5), (3.6) ve (3.7)'de özetlenmiştir [156]. Döner fırın ünitesindeki NO_x oluşumu Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Termal ve yakıt NO_x oluşum bölgeleri

3.2.5. NO_x İndirgeme Sistemleri

Modern çimento üretiminde hem döner fırın hem de kalsinatör NO_x oluşumuna sebebiyet vermektedir. NO_x azaltımı için süreç optimizasyonu ve emisyon kontrolü sistemleri kullanılabilir. NO_x limitindeki sıkı kurallar uyarınca NO_x emisyonlarını azaltacak düşük NO_x alev boruları, seçici katalik olmayan indirgeme (SNCR), seçici katalitik indirgeme (SCR), kademeli yakma gibi sistemler çimentoda görülmeye başlanmıştır [157].

Süreç optimiasyonlarını, mal besleme tarafında düşük sıcaklıkta pişme sağlanabilmesi için farin besleme düzenliliği ve alev sıcaklığı üzerindeki sekonder hava

dalgalandırmalarını azaltmak için klinker soğutma iyileştirmesi olarak sayabiliriz. Bunun yanında yanma modifikasyonları da uygulanabilir. Daha düşük azot içeren yakıt seçimi, fazla havanın azaltılması, alevin önündeki yükseltgenlik oranını azaltmak için primer havanın azaltılması, düşük NO_x alev borusu kullanılması olarak sıralanabilir [49, 156].

Düşük NO_x alev boruları genel olarak döner fırınlarda kullanılmaktadır. Ancak, yüksek sıcaklıklar ve değişken proses koşulları nedeniyle yeterli etkiye sahip değildirler, ek bir teknoloji ile birlikte kullanılma gereksinimleri vardır.

SNCR, uygun sıcaklıklarda baca gazına sulu amonyak ya da üre enjeksiyonu olarak tanımlanabilir. Çimento fabrikalarında sıklıkla kullanılan malzeme sulu amonyaktır ve ön ısıtıcılı ya da kalsinatörlü fırınlarda iyi sonuçlar vermektedir. SNCR sistem performansı, sıcaklığa, bekleme süresine, oksijen miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. SNCR sisteminin NO_x giderim reaksiyonları Denklem (3.8) ve (3.9)'da verilmiştir. İlk eşitlik NO'nun baca gazı içerisinde %95 oranında bulunması nedeniyle baskın olan reaksiyondur [156].

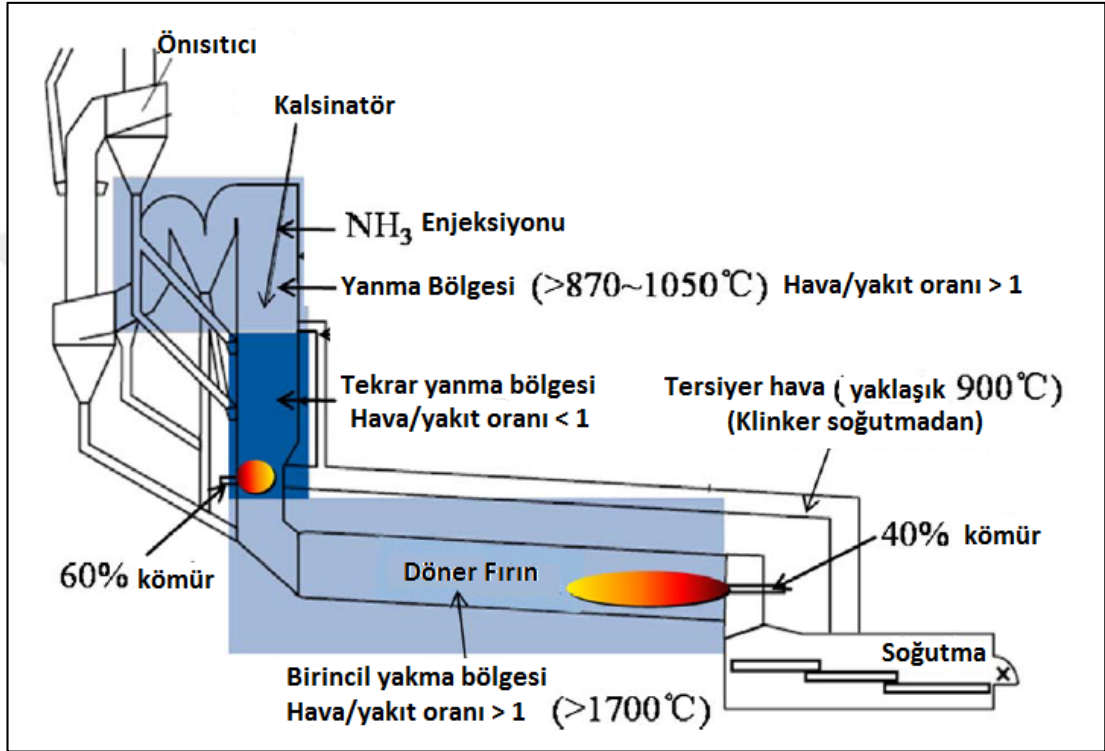


Yanma bölgesine %40 oranında yakıt beslemesi yapılan döner fırın gaz sıcaklığı 1.700°C civarındadır bu sıcaklık termal NO_x oluşumuna sebebiyet vermektedir. İkinci olarak yakıt yakılan yer olan kalsinatörde ise %60 oranında yakıt kullanılmaktadır ve gaz sıcaklığı 870-1.050°C aralığında değişir. Bu sıcaklıklar da yakıt NO_x oluşumunu sağlar. NO_x emisyon azaltımında yüksek sıcaklıkların hakim olduğu döner fırında verim elde etmek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle kalsinatör NO_x emisyon azaltım teknolojilerinin uygulanmasına olanak sağlayan bölümdür [158]. Ayrıca, kalsinatörde gazın kalış süresi yaklaşık 5 saniyedir ve bu süre NO_x azaltım reaksiyonu için gerekli olan 200 ms'nin oldukça üstündedir. Bu nedenlerle kalsinatör SNCR sisteminin uygulanması için en uygun yer olarak karşımıza çıkmaktadır [159].

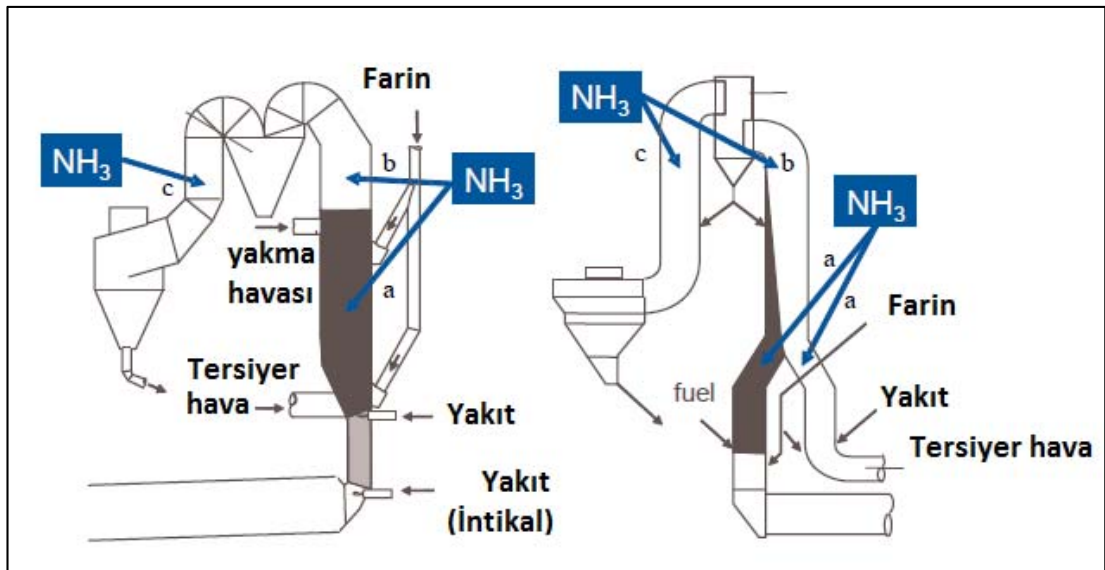
SNCR sistemi ile kalsinatöre amonyaklı su ya da üre vererek %50'ye yakın oranda NO_x indirgemesi sağlanabilmektedir. En iyi sonuç verdiği çalışma aralığı 800-1.100°C

aralığı olması, yüksek amonyak tüketimi, yüksek işletim maliyetleri ve amonyak kaçağı nedeniyle ikincil bir kirletici salımına neden olması olumsuz yanları olarak özetlenebilir [157, 160].

Şekil 3.5, önısıtıcılı kalsinatörlü bir fırında tekrar yakma prensiplerini, Şekil 3.6 ise farklı amonyak enjeksiyon besleme noktalarını göstermektedir [156, 158].



Şekil 3.5. Kuru sistem ön ısıtıcılı ve kalsinatörlü fırında tekrar yakma prensipleri [158]



Şekil 3.6. SNCR enjeksiyonu yapılabilecek muhtemel noktalar [156]

Kuru sistem ön ısıtıcı kalsinatörlü bir fırında en uygun besleme noktaları, döner fırın sonundaki soğutma, intikal gaz hattı ve ön ısıtıcı kule alt kademeleridir. Önemli döner fırın üreticileri SNCR enjeksiyonu için 3 önemli noktayı işaret etmektedir. Şekil 3.6’da gösterildiği gibi bu alanlar,

- a. İndirgen şartlarda işletilen kalsinatör yakma bölgesi (930-990°C). Sıcaklık nedeniyle bu bölge en uygun bölgedir.
- b. Yakma havası girişi üst kısmındaki oksidasyon bölgesi (850-890°C)
- c. Son siklon grubu girişi

SCR, prosese katalizörler varlığında amonyak ya da üre enjekte edilmesi ile NO_x azaltımı sağlayan sistemdir. Kuru amonyak, hava ya da buhar ile seyreltilerek katalizör yatağına enjekte edilir. Katalizör olarak genellikle, titanyum dioksit, vanadyum pentaoksit ve zeolit bazlı malzemeler kullanılır. Reaksiyonun optimum sıcaklığı kullanılan katalizöre göre değişkenlik göstermektedir. Katalizörlerin en iyi reaksiyon verdiği sıcaklıklar 230-430°C aralığındadır. Çimento fabrikalarındaki SCR prosesine ait iki ana reaksiyon Denklem (3.10) ve (3.11)’de verilmiştir.



NO_x’in %90-95’i NO olduğundan ilk reaksiyon baskın reaksiyondur. SNCR ve SCR proseslerinde kimyasal reaksiyonlar benzerdir aradaki fark katalizör kullanımının SCR prosesinin düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesine olanak sağlamasıdır [156].

NO_x indirgeme verimi baca gazı sıcaklığı, amonyak ise NO_x molar oranı ve gazın katalizör yatağında kalış süresine bağlıdır [156]. SCR, NO_x indirgeme veriminde %90’a kadar ulaşabilmektedir. Kullanılan katalizörlerin 300-400°C’de reaksiyon vermesi nedeniyle gaz akışı içerisinde tozun yüksek olduğu ön ısıtıcı ilk siklon çıkışına uygulanır. Gaz akışı bu noktada yüksek miktarda farin içerdiği için katalizörlerin deaktivasyonuna sebebiyet verir. Ancak, yapılan bir çok araştırma düşük sıcaklıklarda uygulanan SCR veriminde yüksek toz oranının ihmal edilebileceği sonucuna varmıştır. Ancak, uygulamanın henüz çok az sayıda olduğu da dikkate alınmalıdır [157].

Kademeli yakmada amaç kalsinatör yanma koşullarını kötüleştirerek CO emisyonunu arttırmak ve NO_x azaltımı sağlamaktır. Sonrasında tekrar yanma bölgesi oluşturarak açığa çıkan CO emisyonu oksijen ile yakılır. Kademeli yakma teknolojisi laboratuvar ölçeğinde iyi sonuçlar vermekle birlikte sektörde geniş bir uygulama ağına henüz sahip değildir. Due ve diğ., bu metodu kalsinatörün yanma koşullarını indirgeyerek tekrar yanma bölgesi etkisini incelemek için kullanmışlardır ve %70-80 oranında verim elde etmişlerdir [157].

Her fırın, hammaddesi ve üretilen klinkere kalitesine göre birbirinden farklı ve benzersizdir. Farklı hammaddelerin pişirilmesi farklı alev sıcaklığı gerektirmektedir. Klinker içerisinde olması istenenden daha fazla miktarda alkali içeren hammaddeler içerisindeki fazla alkalilerin uçurulması için daha yüksek alev sıcaklığında pişirilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda pişirme tüketilen yakıt miktarını ve NO_x oluşumunu artırır.

Kirletici emisyonları, alternatif yakıt özelliklerinden etkilendiği gibi yakıt/hava karışımında da etkilenirler. Fazla havanın ya da yanma ısısının düşük olması NO_x salımı ve alit oluşumunu engellemek için azaltılabilir. ATY kullanımı ile 0,36 kg NO_x/t ATY azaltım sağlandığı raporlanmıştır [110].

3.3. Kükürt Oksit (SO_x) Emisyonları

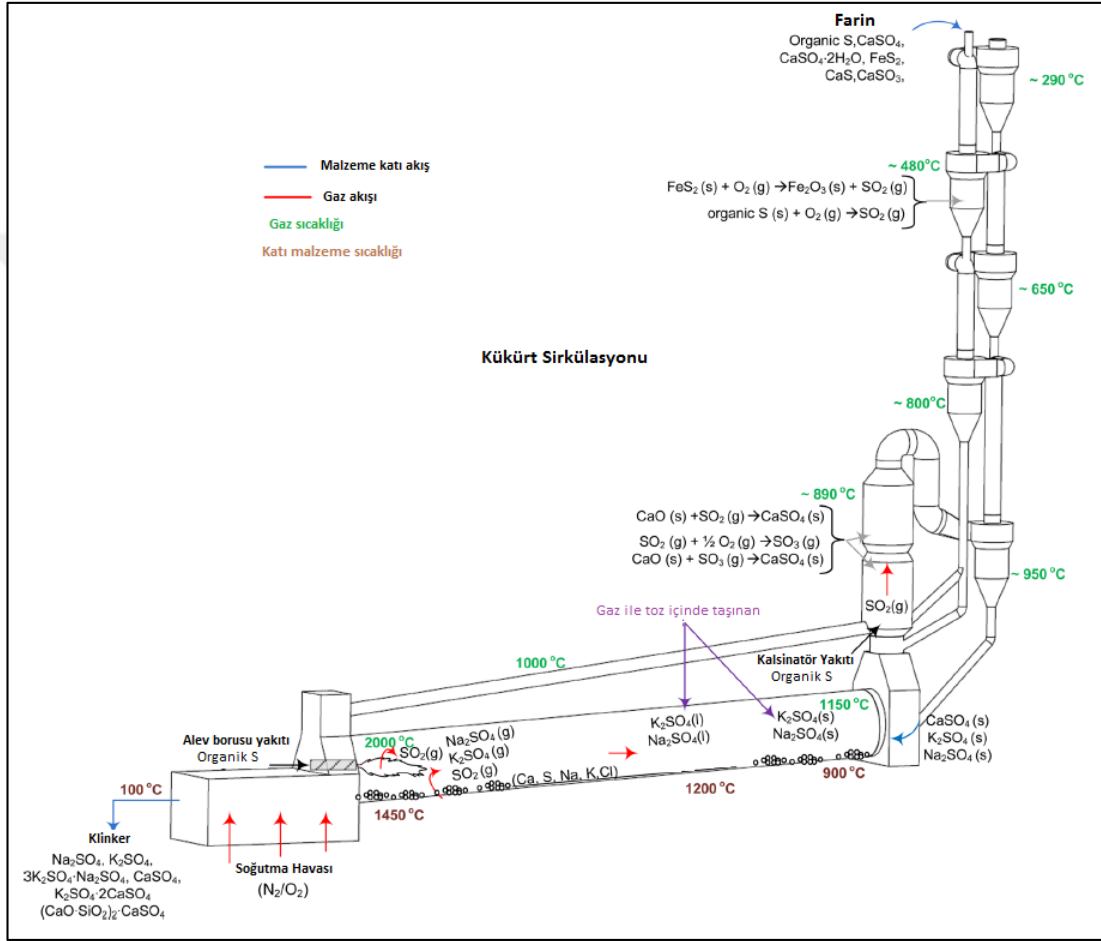
Döner fırın sisteminde SO_x oluşumu ağırlıklı olarak hammaddeki uçucu sülfür içeriğine bağlıdır. Hammadde içinde organik kükürt ya da pirit (FeS) olması durumunda kükürt dioksit emisyonlarının yüksek olma ihtimali vardır [161].

Kükürt oksitler yakıt içerisinde SO₂ ve SO₃ olarak salınırlar. Kükürt oksitler atmosferde sulu ortamda asit formuna dönüşmektedir. SO₂, renksiz ancak kokulu bir gazdır, havadaki konsantrasyonu 1.000-3.000 µg/m³ olduğu durumlarda kokusu hissedilebilir düzeydedir [155]. Hammadde ve yakıt içerisindeki kükürt oksijen ile reaksiyon verir ve bu reaksiyonlar sonucu SO₂ ve SO₃ oluşur [49].

Yakıt ve hammadde içerisindeki kükürt içeriği her fabrika ve coğrafik koşula göre farklılık gösterir. Fırın içerisindeki alkali ortam SO₂'yi ürün içerisine absorbe eder ve böylelikle baca çıkış gazındaki kükürt oksit emisyonları azalır. Proses tipine ve kükürt

kaynağına bağlı olarak absorpsiyon miktarı %70 ile %95 aralığında değişkenlik göstermektedir [153].

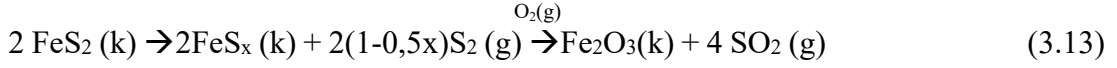
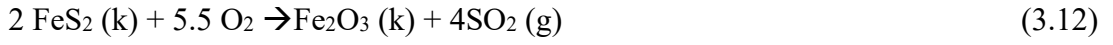
Döner fırın içerisindeki kükürt döngüsü oldukça karmaşıktır. Çimento fabrikasındaki farklı noktalardaki kükürt içeren bileşikleri ve transformasyonları Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Kükürt fırına hammadde ve yakıt ile girmektedir.



Şekil 3.7. Döner fırın sistemindeki kükürt döngüsü [112]

Ön ısıtıcı kulede farin içerisindeki organik kükürt ve pirit okside olur bu arada SO₂ salınımı meydana gelir. Kükürt içeren bileşiklerin oksidasyonu, ön ısıtıcı kule ilk yada ikinci siklondaki sıcaklıklar dolayısıyla 300 ile 600°C arasında görülür. Piritin oksidasyonu sırasında demir sülfat minor bileşikleri oluşur. Ön ısıtıcı kuleden farin değirmeninde malzemeyi kurutmak için çıkan gazın taşıdığı SO₂ malzemeye absorbe olur ve bu sayede de SO₂ emisyonları azalır. Hammadde ile pirit formunda sisteme giren kükürtün, genel olarak %30-50 oranında ön ısıtıcı kuleyi SO₂ olarak terk edeceği kabul edilmektedir. Ancak, ön ısıtıcı kuleyi terk eden SO₂ miktarı %10 ila %65

arasında değişkenlik göstermektedir. Pirit reaksiyonları Denklem (3.12) ve (3.13)'te gösterilmektedir [112].



Döner fırından gelen kükürt katı-gaz karışımının ve ve sıcaklığın kükürt yakalamaya olanak sağladığı kalsinatöre hareket eder. CaO ile SO₂ arasındaki reaksiyon yüksek sıcaklıkta, karmaşık ve heterojen bir tepkime olarak tanımlanmaktadır. Sülfatlaşma reaksiyonları bir çok adıma sahiptir ancak Moss bu konuda yaptığı çalışmalar ile iki muhtemel yol üzerinde durmuştur. CaSO₃ bozunması ile ya da SO₂'nin SO₃'e dönüşümü ile gerçekleşen süreç SO₃ ile CaO'nun CaSO₄'ü oluşturması ile devam eder. Reaksiyon denklemleri aşağıda gösterilmiştir [112, 162].



ya da;



Büyük olasılıkla reaksiyon Denklem (3.14) ve (3.15) ile CaSO₃ termal olarak kararlı olduğu 850°C'den düşük sıcaklıklarda gerçekleşirken, Denklem (3.16) ve (3.17)'deki reaksiyonların ise 850°C'den büyük sıcaklıklarda baskın olduğu tahmin edilmektedir. Araştırmacılar ikinci yolu desteklerken Lin her iki mekanizmanın da gerçekleşebilir olduğunu söylemektedir [112, 163].

Döner fırına yakıtlar ile giren kükürt SO₂'ye oksitlenir. Sinterleşme bölgesinde, kalsinasyon bölgesinde ve ön ısıtıcı kule düşük basamaklarındaki alkali ortam nedeniyle önemli miktarda SO₂ emisyon oluşumu gözlenmez. Döner fırın kalsinasyon bölgesi SO₂ tutma için ideal ortamdır. Ancak, SO₂ tutma verimi, sıcaklık, nem, gazın sistemde kalma süresi ve gaz fazdaki oksitlerin konsantrasyonu gibi parametrelerden

etkilenmektedir. Herhangi bir arıtma yöntemi uygulanmadan da bazı fırınlarda 10 mg/m³ altında SO₂ emisyonları görülebilmektedir [50].

SO₂ kontrolünde hammadde ve yakıt seçimi ile optimum oksijen önemli işletim süreçleridir. SO₂ azaltım teknikleri arasında, absorban kullanımı, kuru yıkayıcılar, ıslak yıkayıcılar ve aktif karbon kullanımı sayılabilir [49].

Kükürt içeriğinin azaltılması: Fırın girdilerindeki kükürtün azaltılmasının amaçlandığı bu yöntem stratejik bir yöntemdir. Kükürt emisyonlarını azaltmanın en kolay yoludur, ancak, yakıt kaynaklarını değiştirmek olanaklı olsa da hammadde kaynaklarını değiştirmek maliyet açısından etkin bir yöntem olmayabilmektedir [164].

Klinker Pişirme Optimizasyonu: Pişirme optimizasyonları, enerji tasarrufu, klinker kalitesinin iyileştirilmesi ve ekipman ömürlerinin uzatılması için yapılır, SO₂ emisyonlarının azaltılması bu optimizasyonda yan etki olarak ortaya çıkmaktadır. Bu metod, yakıt, hammadde, alev borusu, alev şekli gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Bu nedenle her fabrikaya özgü uygulama ve ek teknoloji gerektirir [164].

Absorban Kullanımı: Çeşitli absorban malzemelerin ön ısıtıcı kule üst kısımlarında fırın çıkış gazına eklenerek SO₂ absorpsiyonu sağlanabilmektedir. Tercih edilen absorbanlar söndürülmüş kireç (Ca(OH)₂), sönmemiş kireç (CaO) veya yüksek CaO içerikli aktive uçucu küllerdir. Bu absorbanların baca gazına eklenmesi ile SO₂, CaSO₃ ve CaSO₄ oluşturacak şekilde reaksiyona girerek ham malzeme ile fırına girer ve klinkerin yapısına bağlanır. Bu sistemin kullanılabilmesi için 400°C'nin üstünde bir sıcaklık gerekmektedir [49].

Kuru Yıkayıcılar: SO₂ emisyonlarının 1.500 mg/m³ ve üzerinde olduğu durumlarda uygulanan, ayrı bir venturi kanalı ile söndürülmüş kireç ve ham malzeme karışımı oluşturulan sistemdir. Kuru yıkayıcıların verimleri %90'ı bulurken aynı zamanda HF ve HCl giderimi de sağlanır [49].

Islak Yıkayıcılar: Kuleden püskürtülen bir sıvı çimento harcı tarafından SO_x'lerin emilmesi ya da hava kabarcıkları halinde alınmasıdır. Absorban olarak kalsiyum karbonat kullanılabilir. Çimento harcı çıkış gazına doğru püskürtülür, oluşan sülfür

hava ile oksitlenme ile sülfata dönüşür, kalsiyum sülfat dehidrat oluşur. Oluşan dehidrat alçı olarak kullanılabilirken su ise yıkayıcıya geri basılır. Bu yöntem %90 oranında kükürt oksit giderimi sağlayabilir [49].

Aktif Karbon Kullanımı: Aktif karbon filtresi enjeksiyon tekniği ya da moduler olarak kullanılabilir. Moduler uygulama farklı kapasite ve gaz debilerine uyumda kolaylık sağlamaktadır. Kullanılmış aktif karbonların periyodik olarak yenileri ile değiştirilmesi gereklidir. Kullanılmış aktif karbonlar fırında yakıt olarak değerlendirilebilir. Aktif karbon yönteminde absorban ile SO₂ ve HCl, HF, organik metal bileşikler de tutulabilir [50].

3.4. Toplam Organik Karbon (TOK) ve Karbonmonoksit (CO) Emisyonları

Klinker pişirme prosesi saf yanma prosesi değildir aynı zamanda malzeme dönüşüm prosesidir. Bu nedenle, emisyonlar hem yanma hem de hammaddenin organik bileşiklerinin termal bozunması ile ortaya çıkar, bu durumda hammaddeye bağlı olan CO ve organik bileşik emisyonlarının meydana gelmesine sebebiyet verir. Bahsedilen bu oluşumlar nedeniyle organik bileşik emisyonlarının hammadde kaynaklı ya da alternatif yakıt kaynaklı olması durumu için farklı emisyon limitleri uygulanmaktadır [98].

Yakma ile ilgili proseslerde uçucu organik bileşiklerin görülmesi genel olarak tam yanma olmaması ile ilişkilidir. Çimento fırınlarında, fırın tipine, uzun bekleme sürelerine, yüksek sıcaklıklara ve fazla oksijene bağlı olarak emisyonlar düşük seyretmektedir. Sayılan tüm bu özellikler organik bileşiklerin tamamen parçalanmasına sebebiyet vermektedir [50].

Uçucu organik bileşik emisyonları prosesin ilk basamaklarında önısıtıcı ya da kalsinatörde yani hammaddenin sıcak gaz ile temasında ortaya çıkar. Buradaki sıcaklık karbonun uçurulmasını sağlamaya yetecek miktarda ancak reaksiyonun CO₂ ve H₂O oluşturmak üzere sonuçlanmasına yetecek miktarda değildir [165]. Organik madde 400 ila 600°C sıcaklıklarda salınır. TOK olarak ölçümü yapılan baca gazı içerisindeki uçucu organik bileşik emisyonları, tipik bir döner fırında 1-80 mg/Nm³ aralığında bulunmuştur. Ancak, bazı durumlarda hammadde tipinden kaynaklı olarak 120 mg/Nm³'e kadar yükselen emisyon değerleri görülebilmektedir [50].

CO emisyonu ve organik bağı karbon, klinker pişirme prosesi sırasında doğal hammadde girdisi ile az miktarda oluşabilir. Karbon bileşikleri fırın besleme sürecinde dönüşürler ve okside olarak CO ve CO₂ meydana getirirler. Bu süreç sırasında az miktarda TOK oluşumu da gözlenebilir. CO emisyonu oluşumu aynı zamanda kötü yanma koşullarında da meydana gelir. Diğer taraftan CO emisyonun yükseldiği zamanlar NO_x emisyonlarının düştüğü zamanlara denk gelmektedir [50].

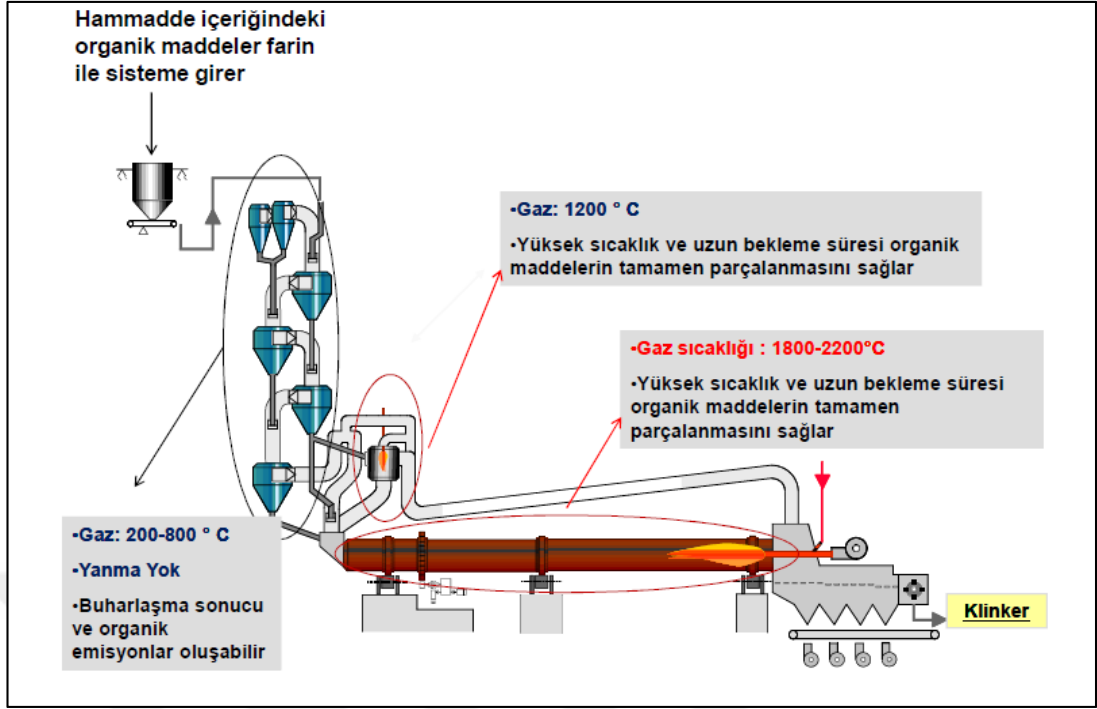
Hammaddenin içeriğine bağlı olarak 1,5 ila 6 g organik karbon/kg klinker prosese sokulmuş olur. Farklı hammaddeler ile yapılan denemeler sonucunda hammadde içerisindeki organik karbonun %3 oksijen varlığında, %85-95 oranında CO₂'e, %5-15 oranında ise CO'e dönüştüğü görülmüştür [50].

Alternatif yakıtlar fosil yakıtlardan farklı yanma karakteristiğine sahiptirler. Bu farklılık da CO oluşumunu etkileyebilir. CO oluşumu 650-950°C'de belirli miktarda düşüş göstermektedir ve 650°C altında ise neredeyse CO oluşumu görülmez [73]. Kalsinatördeki organik karbon emisyonları yakıtın tam yanmaması kaynaklıdır. Kalsinatörde yapılan çalışmalarda kalsinatör yakıtının %80'inin kırılmış lastikten karşılanması durumunda petrokok yakılmasına oranla CO veya TOK emisyonlarında herhangi bir değişim olmadığı görülmüştür. Kalsinatör yakıtının %40'ının, hotdisc aracılığı ile bütün kullanılmış lastikten elde edilmesi halinde ise kalsinatörde %100 oranında orta uçuculukta kömür kullanılması durumuna oranla %20 CO azalımı tespit edilmiştir [165].

CO ve TOK emisyonlarının genel olarak aşağıdaki faktörden kaynaklandığı söylenebilir [73].

- 1) Kalsinatörde yakıtın tam yanmaması
- 2) Yakıt besleme oranında görülen dalgalanmalar
- 3) Hammadde içerisindeki organik karbon içeriği

Döner fırın sisteminde TOK emisyon oluşumları Şekil 3.8 ile özetlenmektedir.



Şekil 3.8. Döner fırın sistemi TOK emisyonları [104]

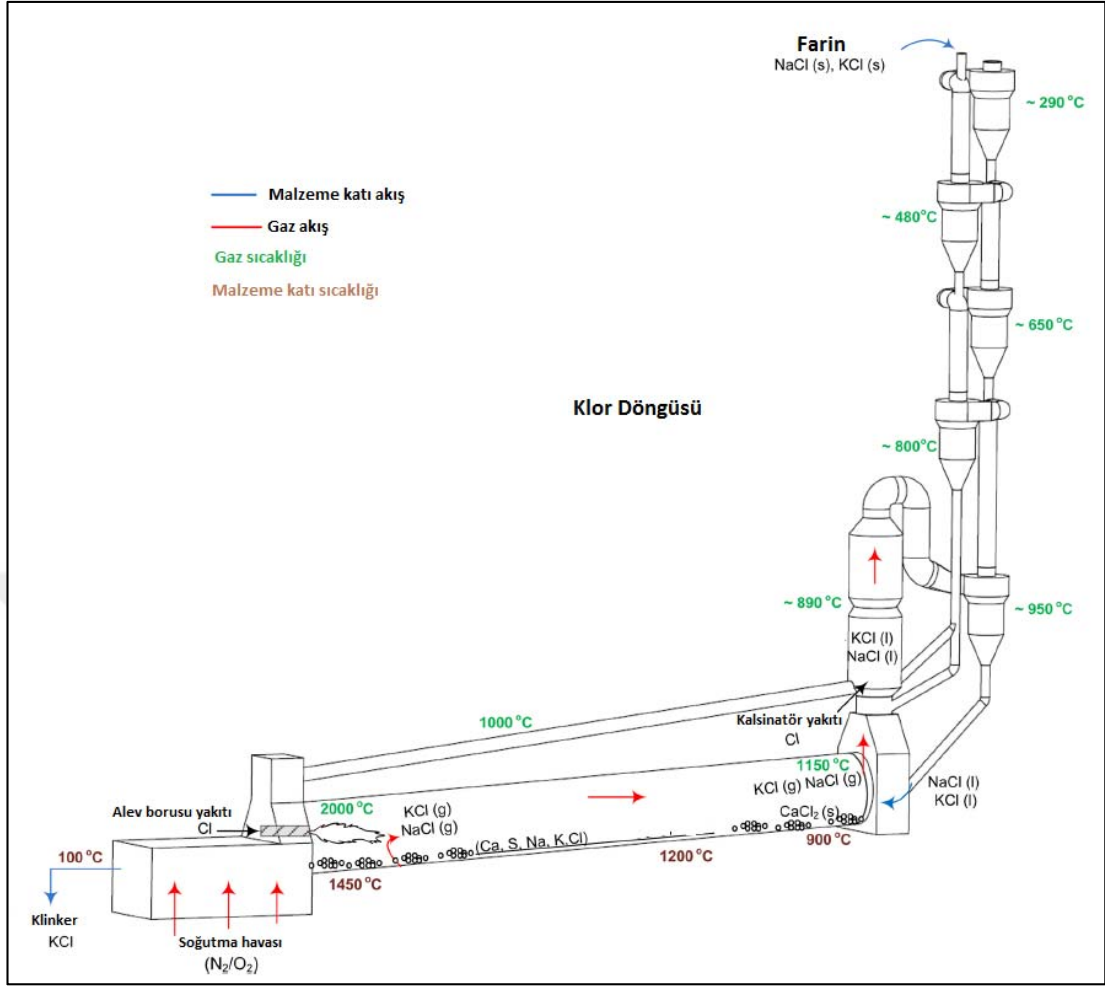
3.5. Hidrojen Klorür (HCl) ve Hidrojen Florür (HF) Bileşikleri

Klor ve flor minor bileşiklerdir. Yakıt ya da hammadde ile fırına girerler. Atık yakma ve beraber yakma lisansına sahip fabrikalarda sürekli ölçüm cihazları ile takip edilen parametrelerdir. Hidrojen klorür ve hidrojen florürün fırın sisteminde oluşumu ve izlediği yollar aşağıda aktarılmıştır.

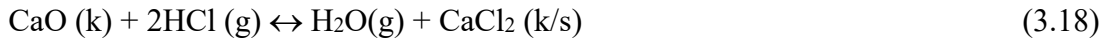
3.5.1. Hidrojen klorür

Klorlu bileşikler yakıt ya da hammadde ile fırına girerler ve yanma süresince alkaliler ile reaksiyona girerek alkali klorürleri oluştururlar. Klor'da kükürt gibi fırın içerisinde bir döngüye sahiptir. Kömür ya da petrokokun klor içeriği ATY gibi alternatif yakıtlara oranla daha düşüktür. Klor döngüsü ve farklı klor bileşiklerinin oluşum yerleri Şekil 3.9'da gösterilmiştir [50, 112].

HCl, yakıt içerisinde organik bağlı klor yanması sırasında ya da inorganik klor tuzlarının yanması ile oluşur. Kalsinatörde ve ön ısıtıcı kule alt siklonlarında Denklem (3.18)'de gösterildiği gibi HCl serbest kireç tarafından absorbe olur. Ancak, absorpsiyon gazın nemine bağlıdır.



Şekil 3.9. Döner fırın ünitesi içerisinde klor döngüsü [112]



Yanma bölgesinde, alevde reaktif serbest kireç olmaması nedeniyle, fırın yakıtından gelen HCl ön ısıtıcı kuleye taşınır ve orada CaCl_2 'ye dönüşür. Kalsinatör ve alt kademe siklonlarda 800-850°C sıcaklıklarda hammadde kaynaklı klor türleri eriyebilir ve fırın gazı içerisindeki klor türlerinin yoğunlaşması meydana gelir. Bu sırada klor bileşikleri sıvı fazdadır [112].

Kullanılan farklı yakıtların farklı kompozisyonları ve farklı klor içerikleri vardır. Kömür hem organik bağlı hem de inorganik bağlı klor içerebilir. Madenden çıkarıldıktan sonra kömür eleme sonrası inorganik bağlı klor bileşikleri azalabilmektedir. Harkov ve Ross, Appaliachian kömür ile yaptıkları çalışmada kömür içerisindeki klorun büyük oranda organik bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Ek olarak Chow ve diğ. yaptıkları çalışma ile enerji tesislerinde kullanılan kömürün sahip

olduğu klorun %86'sının HCl olarak salındığını göstermişlerdir. Bu bilgiler ışığında HCl salımı doner fırında komur yakılması ile gayet mumkundur. Ayrıca, fuel oil kullanımı da komur kullanımı ile aynı etkiye sahip olup HCl salımına neden olur. Çimentoda alternatif yakıt kullanımı giderek artmaktadır. Alternatif yakıtlar organik ve inorganik bağlı klor bileşikleri içerir. Klor içeriği alternatif yakıtın tipine bağlı olarak değişkenlik gostermektedir. PVC, evsel atıklarda organik klor içeren en onemli bileşiktir ve 200-250°C sıcaklıklarda bozunarak HCl salımı yapar. Denklem (3.19) bu reaksiyonu gostermektedir [166-168].



3.5.2. Hidrojen florur

Stabil yanma koşulları altında fırında bulunan florurun %90-95 oranı klinker içerisine bağlanır geri kalan kısım ise toz içerisine CaF_2 formunda bağlanır. Kalsiyum zenginliği gaz halindeki florur bileşiklerinin ve hidrojen florurun oluşmasına pek olanak vermez. Çok ince toz kısımları filtreden geçerek çok duşuk florur bileşiklerinin gorulmesine neden olabilir. Minor miktarda florur fırın tozu ile birlikte sistemi terk eder [50].

Alternatif yakıt kullanımının artması fırın sistemine klor girmesine neden olabilir. Doner fırınlar alkali ortama sahip olduklarından klor ve flor, HCl ve HF yerine çoğunlukla tuzlar halinde bulunurlar. Bu nedenle atık yakma tesislerine gore imento fırınlarından kaynaklanan HF ve HCl ihmal edilebilir duzeydedir [165].

3.6. Ağır Metal Emisyonları

Metal bileşiklerinin kaynağı hammadde ve yakıt olabilir. Metal emisyonlarını 3 grupta toplamak mumkundur.

1. Uçucular: Civa (Hg) ve Talyum (Tl)

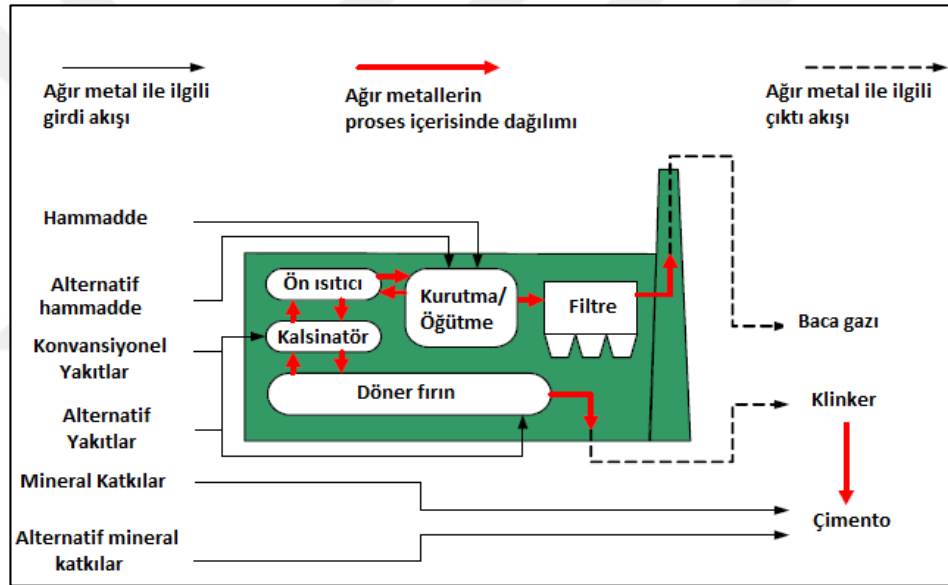
Talyum, on ısıtıcı ust kısımlarında 450-500°C arasında yoğuşur. Hg ve Hg bileşikleri fırını ve on ısıtıcı kuleyi geçerek farin tozu içerisinde absorblanırlar [50].

2. Yarı uçucular: Antimon (Sb), Kadmiyum (Cd), Kurşun (Pb), Selenyum (Se), inko (Zn), Potasyum (K) ve Sodyum (Na)

Bu bileşikler 700-900°C arasında yanma bölgesinde sülfatlar ya da klorürler olarak yoğunlaşırlar ve sirkülasyona girerler. Genellikle, baca emisyonlarında pek gözlenmezler [165].

3. Uçucu olmayanlar: Baryum (Ba), Krom (Cr), Arsenik (As), Nikel (Ni), Vanadyum (V), Mangan (Mn), Bakır (Cu) ve Gümüş (Ag)

Bu bileşikler tamamen klinkere absorbe olur ve sirkülasyona girmezler. Baca gazı çıkışında, giriş miktarlarının %0,1 oranından daha düşük emisyonlara sahiptirler [50, 153,165]. Kuru proses çimento üretiminde metallerin izledikleri yollar Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Ağır metallerin fırın sistemindeki yolları [50]

Klinker pişirme prosesindeki metallerin davranışları ve emisyonları, uçuculuklarına, giriş noktalarına, yakıt ve hammadde içerisindeki metal bileşik miktarlarına ki atıklar ve tehlikeli atıklar kullanıldığında önem kazanır, prosesin tipine ve toz toplama sisteminin verimine bağlı olarak farklılık göstermektedir [50].

Metal bileşikleri fırına hammadde ve yakıtlar ile girerler, tamamen ya da kısmen fırının sıcak bölgelerinde buharlaşma ve yoğunlaşma ile fırın sistemi içerisinde döngüye girerler. Yakıt ile sisteme giren metaller, fırında ve ön kalsinatörde gazın kalış süresi sayesinde yalnızca küçük bir miktarda salınırlar [50, 112].

Uçucu olmayan metal bileşikleri proses içerisinde tutulur ve klinkerin yapısına katılır. Sb, Cd ve Pb gibi yarı uçucu metaller sinterleşme sıcaklıklarında buharlaşır ve partiküller üzerine absorbe olarak fırında döngüye girer [165]. Yüksek uçuculukları nedeniyle civa ve talyum emisyonlar açısından en çok dikkat edilen ağır metallerdir. Talyum ön ısıtıcıda toz üzerinde farin değirmeni ya da ana baca filtresi ile tutulur ve ön ısıtıcıya geri döner. Ön ısıtıcı, hammadde kurutma ve çıkış gazı arasında bir döngü oluşabilir [50, 165].

Civa oldukça uçucu ve zehirli bir gazdır. Civa ve civa bileşikleri tamamen fırın sisteminde çöktürülemezler ve klinkerin yapısına katılmazlar. Hg ön ısıtıcı kule üst basamaklarında buharlaşır bu nedenle de %90 oranında bacadan salınırlar. Ön ısıtıcı kuleden çıkıp farin değirmenine giden gaz ile taşınan civa, farin değirmeninin ve gazın sıcaklığının yeteri kadar yüksek olmaması durumunda, katı bileşikler halinde tekrar yoğunlaşır, ön ısıtıcı kuleye taşınır ve ön ısıtıcı kule üst kısımlarında tekrar buharlaşır. Bu durum farin değirmeni ve ön ısıtıcı kule üst basamakları arasında bir döngü oluşturur. Bu nedenle civa yalnızca ön ısıtıcı tozu ile uzaklaştırılabilir. Civa emisyonundan bahsetmemek için gaz sıcaklığının 130°C altında tutulması yararlıdır. Eğer farin değirmeninde civa absorpsiyonu gerçekleşmezse ana baca filtre tozunda yüksek oranda civaya rastlanır. Civa'nın fırın sistemine girmesinin ana nedeni hammaddedir. Ancak, belediye atıklarından elde edilen ATY veya ATY gibi yüksek oranda civa içeren atıkların kullanımında da dikkatli olmak gerekir [165]. Hammadde ya da yakıttan gelen ağır metallerin büyük çoğunluğu klinker içerisine bağlanır. Uçucu haldeki civa (Hg) ve kadmiyum (Cd) genellikle klor ile birlikte atık gaz içerisinde yer alır. ATY gibi bazı atıklar petrokoktan daha yüksek miktarlarda Sb, Hg, Cd, As, Pb, Cu, Cr and Zn içerebilir. Ağır metal konsantrasyonları 300-400 mg/kg (ppm)'ı geçmemelidir [110, 169-170].

Tehlikeli atıkların yanması ile fırına giren kurşun ve çinkonun davranışları çalışılmıştır. Kütle denkliği ile bakıldığında, çinko'nun %86 oranında klinkere bağlandığı geri kalan kısmında ise filtre tozu içinde kaldığı görülmüştür. Sonuçlar, kurşunun yarısından fazlasının klinkere bağlandığını geri kalan yarısının ise filtre tozunda kaldığını ortaya koymuştur. Kurşun ve çinko 600°C üzerindeki sıcaklıklarda klorürler ile tepkime verebilirler ve bu klorürler ön ısıtıcı kuledeki toz içerisinde yoğunlaşarak gaz akışı ile sistem dışına taşınabilir [112].

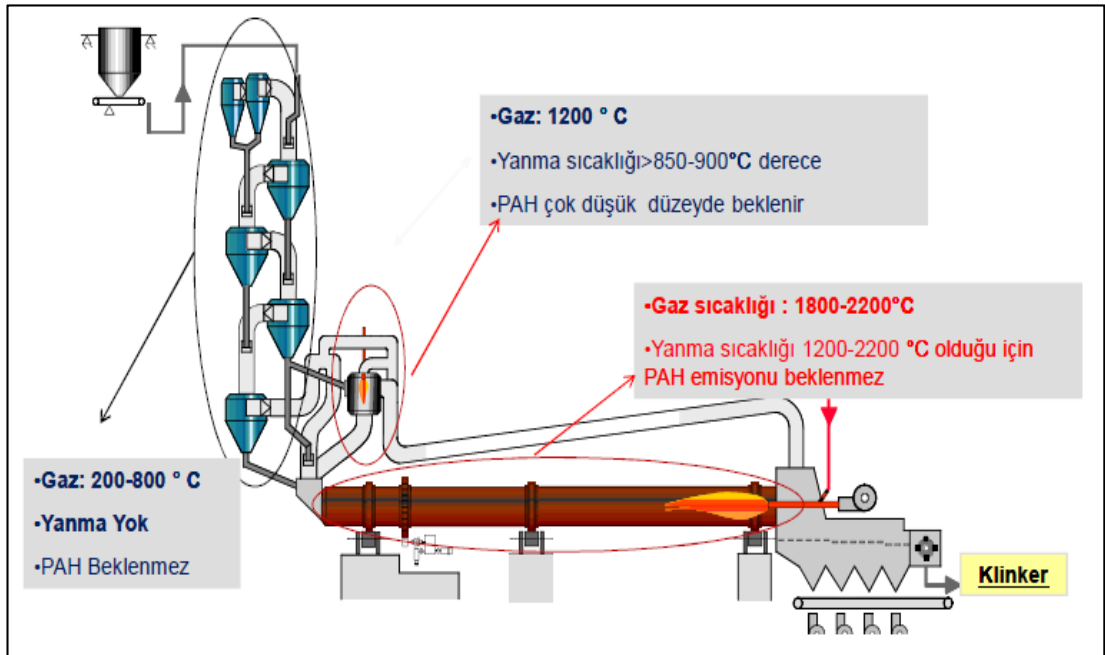
3.7. Poli Aromatik Hidrokarbon (PAH) Emisyonları

Döner fırında oksijen yokluğunda yetersiz atık hava karışımı nedeniyle tam yanma olmaması nedeniyle yarı uçucu organik bileşikler olan PAH oluşumu gözlemlenebilir [171-172].

Poliaromatik hidrokarbonlar (PAH) 2-7 halkalı yapıya sahip hidrokarbon bileşikleridir. Her türlü yanma sonucunda atmosfere salınan bu kimyasal grubun 100'den farklı türü vardır [173]. Yapısında sadece C ve H bulunan PAH'lar 2 veya daha fazla aromatik halkaya sahiptirler. Yeterli oksijen olmayan, sıcaklığın 650-900°C arasında olduğu ve yüksek oksitleme yeteneğine sahip yakıtların olduğu durumlar PAH oluşumu için ideal ortamlardır [174].

PAH'lar kimyasal yapılarına bağlı olarak erime ve kaynama noktaları, suda çözünübilirliği ve buhar basınçlarına göre sınıflandırılırlar. EPA (A.B.D Çevre Koruma Ajansı) tarafından 16 adet PAH listelenmiştir. PAH'ların büyük çoğunluğu kalıcı organik kirleticidir ve kimyasal olarak inert bileşiklerdir. PAH'ların erime sıcaklıkları genel olarak 100°C'dir [175].

Fırın sistemi içerisinde PAH oluşum noktaları Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

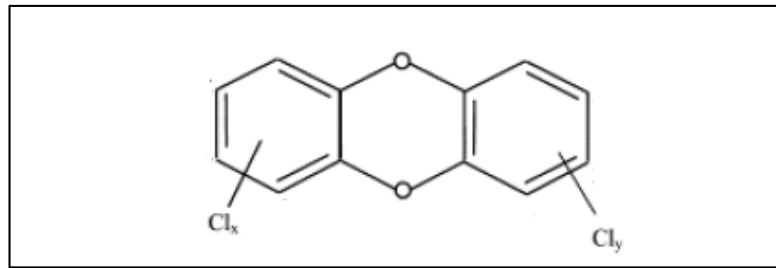


Şekil 3.11. Döner fırın sistemi PAH emisyonları [104]

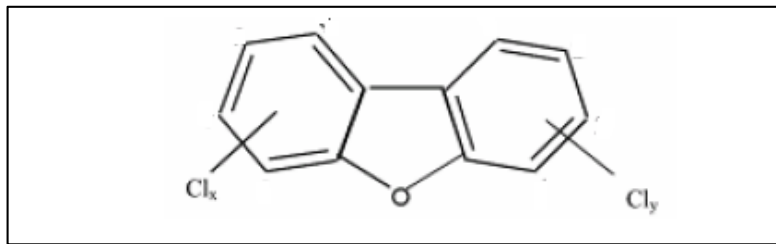
3.8. Dioksin/Furan (PCDD/F) Emisyonları

Hammaddenin klor içeriğine bağlı olarak ağır metaller gibi poliklorludibenzodioxinler ve poliklorludibenzofuranlar da çimento fabrikalarından atmosfere salınabilir. Dioksinler, özellikleri ve toksisiteleri birbirine benzer ancak kimyasal yapıları birbirinden farklı geniş bir kimyasal madde grubudur. Poliklorludibenzofuranlar ve PCB ise yapısal olarak dioksinlerden farklı olmakla birlikte dioksin benzeri davranış ve zehirlilik özelliği gösterebilirler [176].

Karbon bazlı ve klor içeren yakıtların tam yanmaması sonucu klorlu hidrokarbonların oluşması söz konusudur. Klorlu hidrokarbonları moleküler yapılarına göre üç başlıkta toplayabiliriz. Bunlardan ilki dioksinler, ikincisi furanlar üçüncüsü ise poliklorlu bifeniller (PCB)'dir. 210 adet PCDD/F bulunmaktadır ve bunların 17 tanesi oldukça toksiktir. Toksikiteyi ifade etmesi açısından bileşiklerin birimleri Uluslararası Toksikite Ekvivalent (TEQ) ile ifade edilmektedir [177]. Fırın sıcaklıkları ve bekleme süreleri organik bileşiklerin CO₂ ve H₂O oluşacak şekilde tam bir reaksiyon vermelerine olanak sağladığından, dioksin ve furan oluşumu çimento fabrikalarında oldukça düşük seviyelerdedir. Döner fırına oranla bekleme süreleri ve sıcaklıkların düşük olduğu kalsinatörde dioksin furan oluşumuna, kötü yakıt karışımı ve yanma havası neden olmaktadır [73]. Dioksin ve furanların kimyasal yapılarını gösteren çizimler sırayla Şekil 3.12 ve 3.13'te gösterilmiştir.

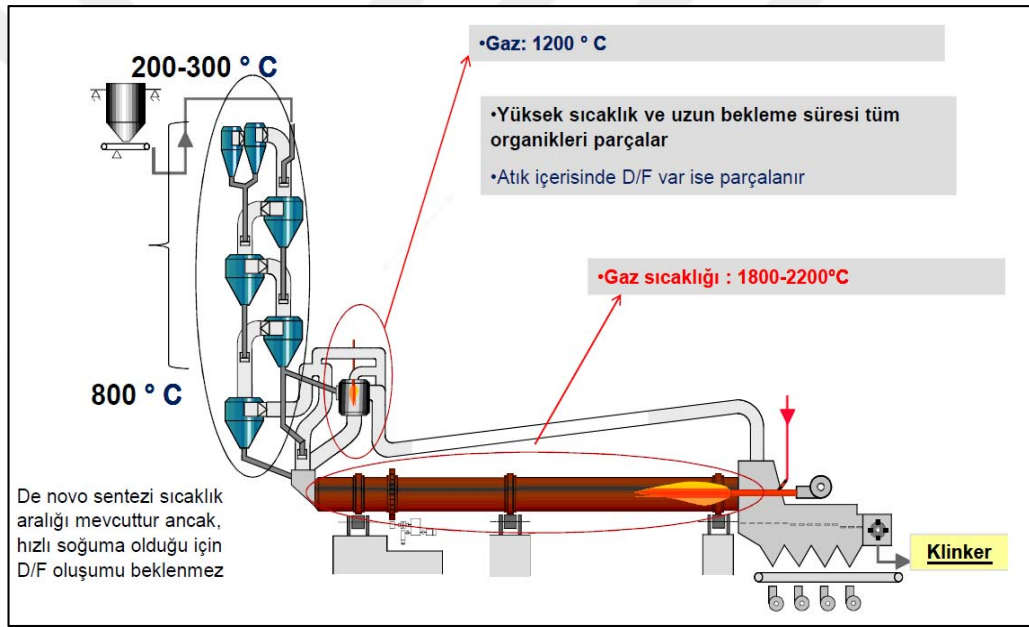


Şekil 3.12. Dioksin kimyasal yapısı (PCDD) [178]



Şekil 3.13. Furanların kimyasal yapısı (PCDD/F) [178]

PCDD/F oluşumu için, hidrokarbonlar, klorürler, Cu ve/veya Fe gibi katalizör varlığı, 200-450°C aralığında sıcaklık ve bu sıcaklıkta yeterli bekleme süresi gereklidir. Bu şartların hepsinin birarada bulunması ile de-novo sentezi ile hammadde içerisinde yeterli miktarda hidrokarbon ve klorür bulunması durumunda ön ısıtıcı kulede ya da sonrasında PCDD/F emisyonları oluşabilir [50, 104]. Buradaki önemli nokta fırını terkeden gazın hızlı şekilde bu aralığa soğutulmasıdır ki ön ısıtıcı kulede de bu durum oluşmaktadır. Ancak, ön ısıtıcı kulede ulaşılan sıcaklıklar nedeniyle dioksin furan oluşumu beklenmez. Çünkü 850°C üzerindeki sıcaklıklarda 2 sn bekleme süresinde tüm organikler parçalanır. Döner fırın sisteminde PCDD/F oluşumları Şekil 3.14'te gösterilmiştir [50, 104, 177].



Şekil 3.14. PCDD/F oluşumu döner fırın ünitesi [104]

Atıkların, çimento fabrikalarında yakılması sırasında atıkların sahip olduğu klor içeriği ve yakma sırasında dioksin ve furanların açığa çıkmasından dolayı halk arasında genel bir ön yargı bulunmaktadır. Ancak, çimento fabrikalarında atıkların yakıldığı noktalardaki uzun bekleme süreleri ve fırın içerisindeki yüksek sıcaklıklar nedeniyle dioksin ve furan salımı ihmal edilebilir düzeydedir. Columbia Üniversitesi tarafından kontrol edilebilir (endüstriyel gibi) ya da kontrol edilemeyen (düzenli depolama alanlarındaki yangınlar, bahçelerdeki yangınlar gibi) kaynaklardan gelen dioksinler üzerine bir envanter hazırlanmıştır. Envanterden görülmüştür ki ABD’de çimento fabrikalarından kaynaklanan yıllık toplam dioksin emisyonu 18 g TEQ değerinde

oluşmaktadır ve bu değer tüm dioksin emisyonlarının %0,05'ine denk gelmektedir [113, 179]. Ayrıca, WBCSD tarafından, global olarak alternatif yakıt kullanımı yapan çimento fabrikalarından 1990-2005 yılları arasında 2200'e yakın dioksin emisyon verisi toplanarak yapılan çalışmada da Columbia Üniversitesi sonuçlarına benzer olarak dioksin emisyonlarının çimento fabrikalarında ihmal edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır [180].

Çimento fabrikalarında alternatif yakıt kullanımı ve dioksin furan emisyonları arasındaki ilişki ile ilgili olarak Lang yaptığı çalışmada arıtma çamuru kullanılan ve kullanılmayan her iki durumda da emisyonların limit değerlerin altında kaldığını raporlamıştır. Pech ve Douillet, %15 kemik unu ısıl yer değiştirme oranındaki bir fırında emisyonların kömür yakıldığı durumlara göre düştüğünü gözlemlemiştir [165, 181-182].

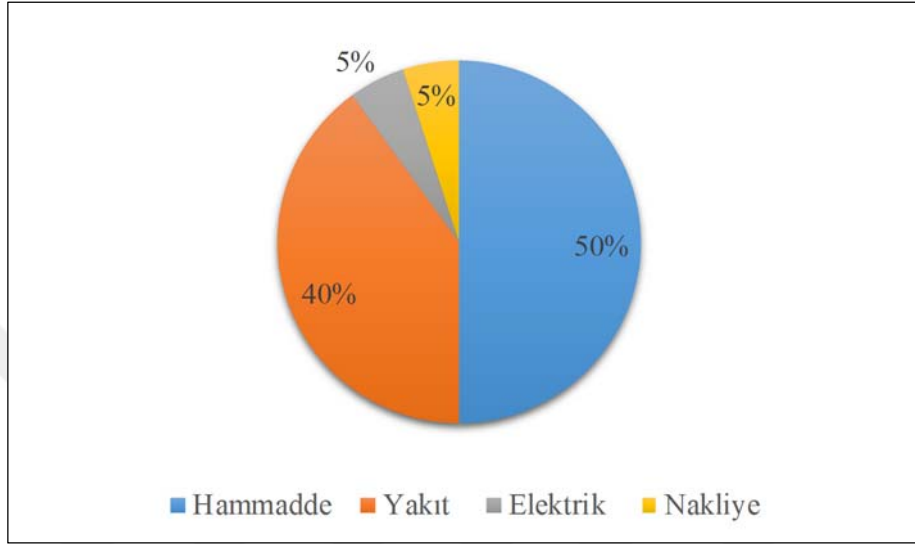
3.9. Karbondioksit (CO₂) Emisyonları

Karbondioksit en önemli sera gazıdır. Fosil yakıtların yakılması ve çimento üretimi iklim değişikliğinde insan kaynaklı faktörlerdir. İnsan kaynaklı sera gazı emisyonlarının %5 ila %7'sinden çimento sektörü sorumludur. Çimento üretimi "iki öğütme bir yakma" olarak kısaltılabilir. Buradaki "iki öğütme" farin değirmenleri ve çimento değirmenlerini ifade ederken "bir yakma" hammadde kalsinasyonunun ve yakıt kullanımının olduğu klinker pişirme prosesini anlatmaktadır. Klinker pişirme prosesi tüm çimento üretim prosesinden kaynaklanan CO₂'in %90-95'lik oranının kaynağıdır [183].

Çimento üretiminde CO₂ emisyonlarını azaltmak için dünya genelinde birçok çalışma yapılmıştır. Hızlı ekonomik büyüme ve kentleşmeye bağlı olarak bu çalışmalar Asya'daki gelişmekte olan ülkeler için özellikle de Çin için yapılmıştır. Bunun nedeni en çok üretimin bu noktalarda gerçekleşmiş olmasıdır. Avrupa Birliği ülkelerine bakıldığında bu ülkelerdeki CO₂ emisyonlarının tüm emisyonlara katkısının %4,1 olduğu görülmektedir. ABD'de bu oran %2 olurken Çin'de bu oran %15'e yükselmektedir [62].

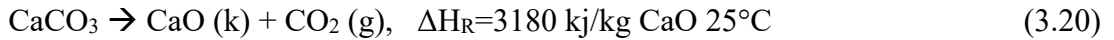
Çimento sektöründen kaynaklanan CO₂ yalnızca yakıtların yakılmasından değil aynı zamanda hammaddenin kalsinasyonundan salınmaktadır. Tipik bir çimento

fabrikasında CO₂ emisyonlarının %50'si hammaddenin kalsinasyonundan kaynaklanırken %40'lık kısmı fosil yakıtların yanmasından, %5'lik kısmı elektrik tüketiminden kalan %5'lik kısmı ise hammadde ve ürünün nakliyesinden kaynaklanmaktadır [184]. CO₂ emisyonlarının yüzde dağılımları Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

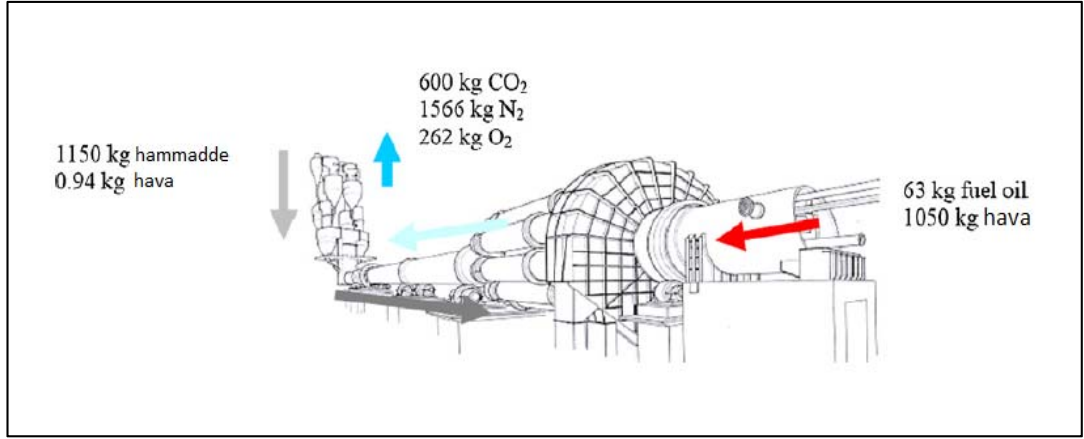


Şekil 3.15. Çimento üretimi kaynaklı CO₂ emisyonlarının yüzde dağılımları [185]

Çimento üretiminde iki önemli kimyasal reaksiyon vardır. Bunlardan ilki farinin 900°C'de kalsinasyonudur diğeri ise 1.350-1.500°C'deki klinkerleşme reaksiyonudur. İlki ısıtıcı kulede meydana gelir ve Denklem (3.20)'de gösterilmektedir. Çimento üretimi sırasında meydana gelen emisyonların yaklaşık yarısı bu eşitlik kaynaklıdır [186].



Çimento sektöründe yakıta bağlı olarak 1 ton klinker üretiminde 0,9-1,0 ton CO₂ açığa çıktığı kabul edilmektedir. Klinkerin %64-67'si CaO geri kalan kısmı ise demir oksitler ve alüminyum oksitlerden oluşmaktadır. Yaklaşık olarak kalsinasyon sonrası 1 ton klinker için 0,5 kg CO₂ emisyonu oluşmaktadır. CO₂ emisyonları klinker çimento oranına bağlıdır ve bu oran genel olarak 0,5 ila 0,9 aralığındadır. Oluşan CO₂ emisyonu hammaddenin (kalker) kızdırma boyunca kaybettiği ağırlığıdır. Çimento üretiminde CO₂ kütle dengesi Şekil 3.16'da gösterilmektedir [61].



Şekil 3.16. CO₂ kütle denklği [61]

Klinker üretiminde yakıtlar, hammaddeden suyun uçurulması ve 900-1.000°C arasında kalsine edilmesi için kullanılırlar. Bu kısımda salınan emisyonlar atığın kömür, petrokok, alternatif yakıt gibi kullanılan yakıt tipine bağlıdır [61].

Tablo 3.3'te çimento sektöründe kullanılan bazı yakıtların net CO₂ emisyon faktörleri gösterilmiştir. Tablo 3.3'ten görüldüğü gibi emisyon faktörleri yakıtların kaynağına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Özellikle evsel atıktan üretilmiş ATY ve tahta atıkları düşük CO₂ emisyonuna sahipken petrokok ve kömür CO₂ emisyonları oldukça yüksektir.

Tablo 3.3. Yakıtların net CO₂ emisyon faktörleri [82]

Yakıt	Net CO ₂ Emission (g CO ₂ /MJ)
Petrokok	101
Kömür	96
Doğal gaz	54
ÖTL	85
Atık Yağ	74
Plastik	75
Evsel ATY	9
Tahta atık	0

Toplamda oluşan CO₂ emisyonları, klinker çimento oranına, yakıt tipine ve üretim prosesine bağlıdır [61]. CO₂ emisyonları sürekli emisyon ölçüm cihazları ile ya da periyodik ölçümler ile akredite laboratuvarlar tarafından ölçülmemektedir. CO₂ emisyonları Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ kapsamında izleme planları ile sene boyunca izlenmekte ve her yıl sonunda hazırlanan

emisyen raporları akredite firmalar tarafından doğrulanmaktadır. İzlenme raporlarında proses emisyonları ve yakıt emisyonları hesaplanarak toplam CO₂ emisyonu bulunmaktadır. Bu noktada önemli olan emisyon faktörlerinin doğru bulunmasıdır. Hesaplar kütle denkliği ve tüketilen miktarlar üzerinden emisyon faktörleri ile çarpım sonucu hesaplanmaktadır [187].



4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalışmanın bu bölümde 2003 yılları ile 2019 yılları arasında çimento fabrikalarında alternatif yakıt kullanımı üzerine yapılmış olan çalışmalar özetlenmiştir. Deneysel atık besleme oranları çimento fabrikalarında kullanılarak farklı yöntemler ile emisyonlara ait çalışmalar incelenmiştir.

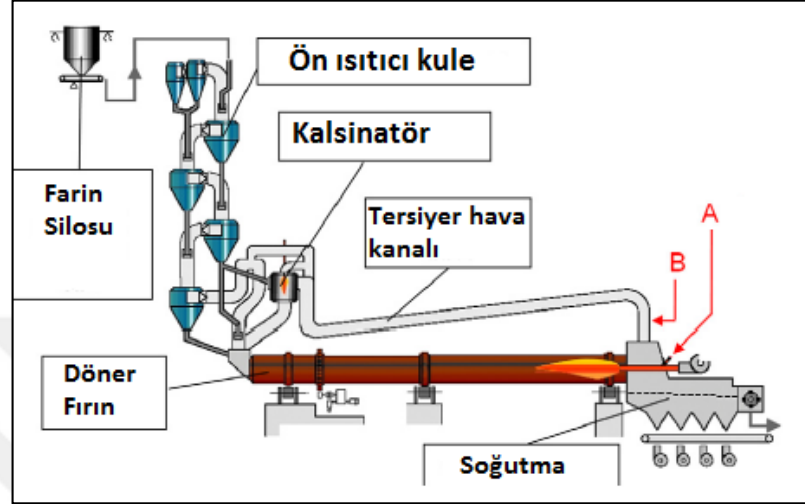
Carrasco ve diğ., 2002 yılında alternatif yakıt olarak ÖTL kullanımının gaz emisyonları üzerine etkilerini incelemiştir. Çalışmalar sekiz farklı fırın bacasından örnek toplanması ile yapılmıştır. Toz ve metaller için aynı zamanda klinker soğutma bacaları da hesaba katılmış ve toplam miktar üzerinden değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Çalışma, yalnızca kömür ve kömür+ÖTL kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Gaz kirleticiler için baca çıkışlarından üç farklı günde toplanmıştır. Çalışmada; toz, CO, NO_x, SO₂, seçilen ağır metaller, HCl, ve PCDD/F emisyonları dikkate alınmıştır. Alınan numunelerin sonuçları USEPA ISC2_ST (Industrial Source Complex, Version 2 Short Term) yazılımı kullanılarak yer seviyesinde konsantrasyonları mg/kg klinker olarak 1 saat ile 1 yıllık olarak hesaplanmıştır. Öncelikle, Gaussian eşitliği ile alıcı noktadaki 1 saatlik konsantrasyon hesaplanmış, bu saatlik değerlerden 24 saatlik ortalamaya geçilmiş ve 8760 saat çalışma süresi kabul edilerek yıllık değerler hesaplanmıştır. ÖTL ve kömür karışımı kullanıldığında ana baca toz değerinin 177,4 mg/kg klinker olduğu hesaplanmıştır. Bu değer kömür kullanıldığı durumda 166,4 mg/kg klinker'dir. ÖTL kullanımının toz değerlerinde %7'lik bir artışa neden olduğu belirlenmiştir. Soğutma ünitelerinde de %30 oranında bir artış saptanmıştır. Böylece tozdaki toplam artış %15 olarak raporlanmıştır. NO_x emisyonlarının %11'lik azalım ile 2,94'ten 2,63 mg/kg klinker seviyelerine düştüğü hesaplanmıştır. SO₂ emisyonları ise 1,17'den 1,45 mg/kg klinkere gelerek %23 bir artış göstermiştir. CO emisyonları 262'den 365 mg/kg klinkere yükselmiştir ki bu da %37 bir artış olarak kayıtlara geçmiştir. Ağır metallerde en büyük değişimin ÖTL'nin önemli bir bileşiği olan çinkoda görüldüğü belirtilmiştir. Çinko emisyonu tek yakıtın kömür olduğu duruma göre kömür+ÖTL yakıldığı duruma göre 7,2 kat artış göstermiştir. Çinkoyu takiben, Cr 5,2 kat, Mn 2,7 ve kurşun 2,4 kat

artış gösteren metaller olarak tespit edilmiştir. Toplamda ağır metallerdeki artış fırın için %133 olarak kaydedilmiştir. Soğutmada ise emisyonlar arasındaki değişim fırındakinden daha düşük seviyelerde gözlenmiştir. Cu ve Hg hariç tüm metallerde %15 ila %45 arasında değişen oranlarda artış saptanmıştır. Toplamdaki artış soğutma için %22 olarak raporlanmıştır. Hem fırın hem de soğutma için hesaplanan toplam ağır metal emisyonlarında artış %82 olarak belirtilmiştir. PAH'lardaki azalım %14, dioksin furan emisyonlarındaki azalım ise %45 oranında gerçekleşmiş olarak raporlanmıştır. Sonuç olarak emisyonlarda artış olmasına rağmen emisyon sınırlarında bir aşım rastlanmadığı belirtilmiştir [188].

Prisciandaro ve diğ., 2003 yılında alternatif yakıt kullanımı ile gerçek tesis verileri kullanarak incelemiştir. Çalışmada iki çimento fabrikasının verileri kullanılmıştır. Her iki fabrika yarı kuru proses ile çalışan fabrikalardır. Çalışma sürecince her gün klinker üretimi, farin tüketimi ve NO_x, SO₂ ve CO gibi kirletici parametreleri incelenmiştir. İki ayrı fabrikada iki durum tanımlanarak gerçekleştirilen çalışmada, birinci fabrika geleneksel durum1 yalnızca petrokok 1 kullanımını alternatif durum 1 ise petrokok ile birlikte ÖTL kullanımını tanımlarken, ikinci fabrikada geleneksel durum 2 petrokok 2 kullanımını, alternatif durum 2 ise petrokok 2 ile organik atık yağ karışımı olan ve ECOFLUID olarak adlandırılan atık yağın kullanıldığı durumu anlatmaktadır. Parametreler 20-30 gün boyunca incelenmiştir. Toplanan veriler istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, alternatif yakıtın yer değiştirme oranı %20'ye kadar olursa klinker karakteristiğinde herhangi bir değişim olmamaktadır. Ancak, ÖTL kullanımı olan durumda baca gazı emisyonlarında hafif bir artış gözlenmiştir. Bu artış olsa bile emisyon limitleri yasal sınırlar içerisinde kalmıştır. SO₂ emisyonlarında yaşanan artışın ÖTL'nin petrokoka oranla daha düşük kükürt içeriği olması durumuna ters bir durum oluşturduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni tam yanmanın gerçekleşmemiş olabileceği ihtimaline bağlanmıştır. Ayrıca, çinko emisyonunun da birinci fabrikada ÖTL kullanımı durumu olan alternatif durum 1'de görüldüğü kaydedilmiştir. İkinci fabrikada ECOFLUID kullanılan alternatif durum 2'de atık yağ beslenmesinde SO₂, NO_x ve CO emisyonlarında azalış meydana gelmiştir [189].

Giannopoulos ve diğ., (2007) kesme yağının çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanılması ile NO_x, CO ve VOC emisyonlarının hesaplanabilmesi üzerine

çalışmışlardır. Yağların döner fırına alev borusu (A) ve tersiyer hava kanalı (B) ile beslendiği iki senaryo üzerinden çalışmışlardır. Senaryolara baz olan besleme noktaları Şekil 4.1’de gösterilmektedir. İki senaryo üzerinden emisyonlar stokiyometrik yöntemler ile hesaplanmıştır [177].



Şekil 4.1. Atık besleme noktaları [177]

Kesme yağlarının fırında kullanımı durumunda azotoksitlerin hesaplanabilmesi kalsinatör ve fırın için detaylı bir yanma kimyası tanımlaması gerektirmiştir. Çalışmada, fırına ve kalsinatöre kömür, petrokok ve kesme yağı beslendiği durum için düşük sıcaklıklarda katı yakıt karbonizasyon modeli uygulanmış ve emisyonlar hesaplanmaya çalışılmıştır. Çalışmada, kesme yağı beslenmesinin NO emisyonları üzerine pozitif etksi olduğu belirlenmiştir. Kesme yağı beslenmesinin emisyon hesaplamaları, metan-hava ve karbonmonoksit-hidrojen-hava karışımlarında hesaplanmıştır. Hacimsel olarak %15 oranında kesme yağı beslenmesi durumunda metan-hava karışımı şartlarında %50 NO emisyon azaltımı sağlanabileceği görülmüştür. Çalışma ile CO ve VOC hesaplamalarının da yapılabileceği söylenmiştir [177].

Conesa ve diğ., (2008) 150 t/s klinker üretim kapasitesine sahip bir döner fırında ÖTL ve çamur ile ısıl yer değiştirme gerçekleştirerek PCDD/F, PAH, ağır metaller, HF, HCl, CO, CO₂ ve NO_x emisyonlarını izlemişlerdir. Çalışmanın gerçekleştiği fırında ana yakıt olarak petrokok kullanılmakta olup fırın ısıl gücü 3000 MJ/t olarak hesaplanmıştır. Çamurları tek kaynaktan getirmek mümkün olmadığı için farklı kaynaklardan temin edilmiştir. Çamurlar fırına alev borusundan, ÖTL ise fırına

intikalden beslenmiştir. Çamur besleme miktarı 700-5.500 kg/h, ÖTL besleme miktarı 500-1.500 kg/h aralığında değiştirilmiştir. 1 yıl içerisinde 6 farklı set besleme yapılarak PCDD/F, PAH, ağır metaller, HF, HCl için standartlara uygun numunelendirme yapılmış, diğer parametreler ise sürekli emisyon ölçüm sistemi üzerinden alınmıştır. Yapılan diğer araştırmalara ters olacak şekilde çamur beslemesi olmadığı zamanda en yüksek PCDD/F değeri görülmüştür. ÖTL beslemesi ile de PCDD/F ve PAH değerlerinin yükseldiği görülmüştür, bu durumun muhtemel nedeninin de ÖTL besleme noktası olduğu vurgulanmıştır. Bazı ağır metallerin atık beslemesi ile yükseldiği belirlenmiştir. Nikel ve kurşun gibi ağır metaller ÖTL beslemesi ile artmıştır. Ancak, çamur içerisinde bulunan Cu, Cr, Mn, Ni ve V miktarlarının çamur beslemesi ile değişmediği görülmüştür. Bunun nedeninin de besleme noktası farklılığı olabileceği söylenmiştir. Çamurlar alev borusundan beslendiğinden maksimum sıcaklık ve uzun bekleme sürelerinden dolayı bileşikler tamamen parçalanmaktadır [190].

Arshed ve diğ., 2014 yılında Pakistan'da Pioneers Çimento fabrikasında farklı oranlarda ÖTL'yi kömür ile beraber yakarak CO₂, CO, NO_x, SO_x ve toz emisyonlarını incelemişlerdir. Fabrika 2 fırınlı toplam enerji ihtiyacı 5000 MJ/t olan ve birinci hattında günlük 300 ton ikinci hattında ise günlük 320 ton kömür kullanan bir fabrikadır. İthal kırılmış lastik alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır. Fabrikada 5 ayrı ısı yer değiştirme oranı kullanılmıştır. İlk olarak yalnızca kömür (S0), ikinci olarak %85 kömür ve %15 ÖTL (S1), üçüncü olarak %80 kömür ve %20 ÖTL (S2), dördüncü olarak %75 kömür ve %25 ÖTL (S3) ve son olarak da %70 kömür ve %30 ÖTL (S4) kullanımı sağlanmıştır. S0'da baca gazı emisyonlarında en yüksek konsantrasyon CO'de görüldüğü, SO₂'ye rastlanmadığı raporlanmıştır. S1'de CO₂ %11 ve NO_x %51 azalma, CO ve toplam tozda kayda değer bir değişim olmadığı, SO₂'nin aynı kaldığı söylenmiştir. S2'de CO₂'de %2 azalma, NO_x'da ise %31 azalma görülürken, CO %35 ve toplam toz ise %8 artış görüldüğü saptanmıştır. S3'de, S2'de S1'e göre yükseliş gösteren CO₂ ve NO_x emisyonlarının %21 ve %33 düşüş kaydettiği, CO'in %35, SO_x ise %100 ve toplam toz miktarının ise %25 arttığı belirtilmiştir. S4 durumunda tüm parametlerin artış gösterdiği ancak CO₂'in %4 azaldığı kaydedilmiştir. NO_x azalımı %100 kömür kullanılan S0'a göre %29 olarak raporlanmıştır. S4 besleme oranlarında SO₂'nin 1,49 mg/Nm³ değerine kadar ulaştığı

saptanmıştır. Toplam toz miktarında da büyük bir artış olduğu belirtilmiştir. Çalışmaya ait sonuçlar Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Çalışma sonucuna göre %85 kömür ile %15 ÖTL karışımının en uygun oranlar olduğu belirtilmiştir [191].

Tablo 4.1. S0-S1-S2-S3 ve S4 sonuçları

Parametreler (Gaz ve Toz Emisyonları)	%100 kömür ve farklı oranlardaki ÖTL için 24 saatlik ortalama değerler				
	S0	S1	S2	S3	S4
CO ₂ , %	9,45±0,13	8,55±1,0	9,40±0,4	9,39±0,02	9,25±0,20
CO, mg/Nm ³	614,99±28,0	650,39±80,0	951,20±272,0	949,10±38,20	1.228,9±17,3
NO _x , mg/Nm ³	309,39±4,0	153,10±17,0	216,29±23,0	206,29±24,0	220,29±41,1
SO ₂ , mg/Nm ³	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,90±0,51	1,49±1,0
Total PM, mg/Nm ³	408,59±33,20	413,29±0,00	444,49±26,0	541,0±77,0	2.831,9±247,4

Rahman ve diğ., 2015 yılında alternatif yakıt kullanımı ile çimento üretim prosesindeki son gelişmeleri derledikleri bir çalışma yapmışlardır. Alternatif yakıt kullanımının önemli çevresel etkilerinden biri de emisyonlar olduğundan araştırmacıların NO_x, CO₂, SO₂ ve ağır metal emisyonları üzerine yoğunlaştıklarını tespit etmişlerdir. Derleme kapsamında kullanılan bilgiler doğrultusunda oluşturulan sonuçlar Tablo 4.2’de özetlenmiştir.

Tablo 4.2. Alternatif yakıt kullanımı ve emisyon etkileri derlemesi [94]

Parametre	Alternatif Yakıtlar						
	ÖTL	MSW*	Kemik Unu	Kuru Çamur	Biyokütle	Plastik Atıklar	Atık yağlar ve solventler
Kalorifik Değer (MJ/kg)	35.6	15.4	14.47	15.28	14-21	29-40	43-45
Nem içeriği (%)	0.62	31.2	6	Değişken	6-12	Değişken	<3
NO _x Emisyonları	Değişmez	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Değişmez	Azalır
CO ₂ Emisyonları	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır
SO ₂ Emisyonları	Artar	Artar	Azalır	Artar	Azalır	Azalır	Data Yok
Ağır Metal Emisyonları	Azalır	Artar	Data Yok	Değişmez	Azalır	Artar	Azalır

*MSW: Municipal Solid Waste, Kentsel Katı Atık

Birkaç çalışma dışında yapılan çalışmaların sonuçlarında kömür yerine alternatif yakıt kullanımının emisyonlar üzerinde azaltım etkisi var olduğu raporlanmıştır. CO₂ emisyonları çimento fabrikaları için önemli sorunlardır ve alternatif yakıt kullanımı ile karbondioksit emisyonlarında da azalma kaydedildiği derlemede kullanılan bilgiler

doğrultusunda belirtilmiştir. Yapılan çalışmalar 1 ton kömür yerine alternatif yakıt olarak atık yağlar ve solventlerin kullanımının CO₂ emisyonunda 2,02 ton azalım sağladığını göstermiştir. Ayrıca, plastik atık kullanımı ile %15 ve ÖTL kullanımı ile %10 CO₂ azaltımları literatürde raporlanmıştır. NO_x emisyonları CO₂ emisyonları ile benzerlik göstermektedir. Arıtma çamuru ve evsel atıkların kullanımı durumunda SO₂ emisyonlarında da azalma şansı olduğu belirtilmiştir. Karışık atıkların incelendiği çalışmaların eksik olduğu, literatürde açıklık olduğu da belirlenmiştir [94].

Parlikar ve diğ., (2016), Hindistan'da atıkların çimento fabrikalarında alternatif yakıt ve hammadde olarak kullanılması durumunda girdileri, prosesi, emisyonları ve kaliteyi incelemiştir. Atık yakılmasının Hindistan'da sürdürülebilir ve uygulanabilir olup olmadığının kanıtlanması amacıyla, hangi atıkların birlikte işlemeye dahil olacağını kararının verilmesi için Hindistan Çevre Koruma Kontrol Yönetimi tarafından 22 farklı fabrikada testler yapılmış ve bu test sonuçları yorumlanmıştır. Parlikar ve diğerleri, 2008 ve 2013 yılları arasında devam eden bu deneme kullanımları ile ilgili verileri derleyerek kimyasal özelliklerine göre denemesi yapılan atıkların klinker içerisindeki miktarlarını belirlemiştir. Denemelerde boya çamuru, arıtma çamuru, fosfat çamurları gibi çamur kullanımları ağırlıklı olmakla birlikte, kontamine atıklar, atık katalizörler ve yakma tesisi külleri de kullanılmıştır. Atıkların ağır metal içerikleri, kül ve nem miktarları her bir deneme yapılan tesis için belirlenmiş ve giriş miktarları ile klinker içerisindeki miktarları karşılaştırılmıştır. Kimyasal özellikleri farklılık gösteren bu atıkların intikal ya da kalsinatörden beslenmelerinin ürün kalitesine ve emisyonlar üzerine bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır [192].

2016 yılında Lv ve diğ., arıtma çamurunun döner fırında alternatif yakıt olarak kullanılmasının NO_x, NH₃ ve PAH emisyonları üzerine etkilerini çalışmışlardır. Çalışma, Çin'de çift siklon gruplu kalsinatörlü ve SNCR sistemine sahip bir fırında gerçekleştirilmiştir. SNCR sisteminde saatte 600 kg %17,5 su içeren amonyak kullanımı yapılmaktadır. Fırında kuru ve ham olmak üzere iki tip çamur kullanımı gerçekleştirilmiştir. Her iki çamurda kalsinatöre beslenmiştir. Çamurlar, evsel atıksu arıtma tesisi çamurlarıdır. Çamurlar I: 5 t/s ham çamur, II:2,5 t/s ham çamur, III:çamur beslemesi yok, IV: 0,35 t/s kuru çamur ve V: 0,7 t/h kuru çamur olmak üzere 5 farklı çeşitte yapılmıştır. Amonyak beslemesi ise 3 farklı çeşitte gerçekleştirilmiştir. 0 kg/s, 600 kg/s ve 900 kg/s olarak amonyak verilmiştir. İşletim koşulları stabil hale gelince

baca gazından NO_x emisyonları sürekli emisyon ölçüm cihazı ile ölçülmüş ve PAH için de numunler alınmıştır. NO_x emisyonları 5 farklı çamur beslemesi sırasında 600 kg/s amonyak beslenmesi durumunda incelenmişlerdir. Kuru çamurun 3,5 mg-NH₃/g ve ham çamurun da 12,2 g-NH₃/g amonyak salımı yapabileceği bilinmektedir bu durumda fırın içerisindeki NH₃ miktarı 1,5 kg/h, 8,75 kg/d, 4,25 kg/s ve 6,5 kg/s miktarlarına 5 t/s ham çamur, 2,5 t/s ham çamur, 0,35 t/s kuru çamur ve 0,7 t/s kuru çamur besleme durumlarında sırasıyla ulaşacaktır. Bu miktarların %16,7, 8,3, 34 ve 8,1 amonyak beslemesine karşılık geldiği hesaplanmıştır. Arıtma çamurları uçucu olmayan organik bileşikleri az miktarda içerirken yüksek toksisiteye sahip PAH bileşikleri arıtma çamuru içerisinde birikebilmektedir. Yapılan çalışmada kullanılan çamurlar içerisinde kuru çamurun ham çamura göre 2,7 kez daha fazla PAH bileşiklerine sahip olduğu belirlenmiştir. 4 farklı çamur besleme koşullarında PAH konsantrasyonları, hiç çamur beslemesi olmadığı duruma göre sırasıyla %51,1, 14,4, 7,7 ve 17,4 artış göstermiştir. Sonuçlar, arıtma çamuru beslemesinin, çamurun içerisindeki NH₃ içeriğine bağlı olarak NO_x emisyonlarında azalma sağladığını göstermiştir. NO_x ve NH₃ arasında baca gazında negatif bir korelasyon olduğu, çamur kullanımının NO_x azaltımı üzerindeki etkisinin SNCR sisteminde kullanılmak üzere sulu amonyakın fırına girmesi durumunda azaldığı saptanmıştır. Bu nedenle, arıtma çamuru kullanımı sırasında sulu amonyak kullanım miktarının azaltılmasının yarar sağlayabileceği sonucuna varılmıştır. PAH emisyonlarının ise arıtma çamurunun kullanılması durumunda yükseldiği görülmüştür. Ancak, PAH dağılımının pek değişiklik göstermediği belirlenmiştir [193].

Fyffe ve diğ., (2016), çimento döner fırını kalsinatörüne 118 ton evsel ATY besleyerek nakliye, düzenli depolama, proses ve yakıt yakma aşamalarını incelemişlerdir. Denemede kullanılan atık SRF olarak adlandırılan %60 geri kazanım tesis atıkları (Materials recovery facilities residue-MRF) ve %40 oranında da işlenmiş atık içermektedir. %40'lık işlenmiş atığın %60 oranı plastik ve %40 oranı da lifli malzemeden oluşan bir karışımdır. SRF 24 saat boyunca 0,9 t/s sonraki 48 saat ise 1,8 ton/s olarak beslenmiştir. Çalışmada, MRF atıklarının işlenmeden düzenli depolamada kullanıldığı ve çimento fabrikasında yakıt olarak kömür kullanıldığı durum ile işlenerek SRF haline getirildikten sonra alternatif yakıt olarak döner fırında kullanıldığı durumlar irdelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, MRF atıklarından

SRF elde edilerek döner fırınlarda alternatif yakıt olarak kullanılmasının bu atıkların düzenli depolanmasına oranla daha avantajlı bir durum olduğu görülmüştür. SRF kullanımı fosil yakıt azaltımı ile CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlar. Çalışma kapsamında kullanılan SRF 7.700 ve 8.700 ton kömür kullanımında tasarruf sağlamış bu tasarruf da %1,4 CO₂ emisyonu tasarrufu sağlamıştır. Ek olarak, SO₂ emisyonlarında %19 azaltım sağlandığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte NO_x emisyonlarında ise 0,9 t/s ve 1,8 t/s SRF kullanım durumlarında sırasıyla %16 ve %24 artış tespit edilmiştir. Toz, civa, HCl ve TOK parametrelerinde ise %2,2 artış ya da azalış tespit edilmiştir [194].

Richards ve Agranovski 2017 yılında Avustralya'daki 10 adet çimento fabrikası baca emisyonlarında atık yakılması sırasında dioksin benzeri PCB ve PCDD/F emisyonlarını araştırmışlardır. Numunelendirme baz koşulda (tesis normal çalışma şartları) ve çeşitli oranlarda farklı alternatif yakıt kullanımlarında yapılmıştır. Kullanılan alternatif yakıtlar atık yağlar, solventler, kıyılmış tahta, karbon tozu, parçalanmış ÖTL olarak sıralanmıştır. Denemeler boyunca sahadan toplanan tüm dataolar %10 O₂'de standartlaştırılarak Dünya Sağlık Örgütü toksik ekivalent birimi ile ifade edilmiştir. Çalışmada A'dan J'ye etiketlenen 10 çimento fabrikası yer almıştır. Fabrikaların kapasiteleri, alev sıcaklıkları, yakıt bileşim ve kalorileri yakıt yakma miktarları gibi parametreleri birbirinden farklı olduğunda alınan emisyon numunelerinin karşılaştırılması ve değerlendirilebilmesi için bu parametreler de dikkate alınmıştır. Denemeler petrokok ile birlikte %3,5, 5, 5,5 ve 7,5 oranlarında atık yağ, %15 oranında Pasminco kumu, %7, 10 ve 25 oranlarında kıyılmış tahta atık, %5-10 oranında tahta atık ile %0 plastik içeren ATY, %10 oranında anot-karbon tozu ve %5,5, 7,6, 8,1, 14 ve 19 oranlarında ÖTL kullanımı şartlarında yapılmıştır. Atık yağların kalorifik değerleri 30 MJ/kg ile 21 MJ/kg aralığında değişmektedir. ATY boyutu ani yanmaları ve yakıt kaynaklı tıkanmaları engellemek için 12-15 mm olarak seçilmiş ve kalorifik değeri de 20 MJ/kg olarak belirlenmiştir. ÖTL 25 mm boyutunda kırılmış, %1 S içeriğine sahiptir ve kalorifik değeri 30 MJ/kg'dır. Atık yağlar kalsinatöre öğütülmüş kömür ve nozzle ile, ATY kalsinatöre açık tartımlı bant konveyör ile ve TDF kalsinatöre çiftli klape yardımı ile beslenmiştir. Numuneler baca üzerinde bulunan ve standartlara uygun olarak açılan flanşlar yardımıyla toplanmıştır. Yapılan tüm araştırmalar sonucunda atıkların çimento fabrikalarında beraber

yakılmasının sağlık açısından kritik olan dioksin ve dioksin benzer PCB bileşiklerinden kaynaklı emisyonları azalttığı görülmüştür. Yapılan denemeler dioksin benzeri PCB ve PCB'lerin TEQ değerlerinin Stokholm Sözleşmesinde belirtilen 10 pg TEQ/Nm³ değerinin altında kaldığını göstermiştir. Bir çok durumda artan alternatif yakıt oranları ile dioksin benzeri PCB baz duruma oranla azalmıştır. TCDD-F ve PeCDD-F izomerleri gibi toksik izomerlerin dağılımının atık yağlar, solventler, kıyılmış tahta, karbon tozu denemelerinde baskın olduğu belirlenmiştir. ÖTL kullanımında toksisite dağılımı daha düşük olarak saptanmıştır [195].

Bourtsalas ve diğ., (2018) Balcones çimento fabrikasında geri dönüştürülemeyen plastik ve kağıt kalıntılarının (NRPP) geri kazanım tesislerinde doğranması ile hazırlanan ve işlenmiş bir atık olan NRPP kullanılmasını incelemiştir. NRPP çoğunlukla kağıt liflerinden oluşan kalorifik değeri yaklaşık 17 MJ/kg biyojenik bir malzemedir ve bu nedenle de CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkısı olduğu belirtilmiştir. Çalışmada Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, SimaPro altyapısını kullanan Eco-indicators 99 ile yapılmıştır ve 4 senaryo oluşturulmuştur. Balcones fabrikası kalsinatörlü 5 siklonlu ön ısıtıcılı kuru bir fırına sahiptir. NO_x indirgeme amaçlı SNCR sistemi ve toz tutma amaçlı torbalı filtre bulunmaktadır. Fabrikada, NRPP kullanımı ile CO₂ emisyonlarının tanımlanması amaçlı 4 senaryo oluşturulmuştur. Senaryo 1: %75 EF kullanımı %25 kömür kullanımı, Senaryo 2: %50 NRPP ve %50 kömür, Senaryo 3: %25 NRPP ve %75 kömür, Senaryo 4: %100 kömür kullanımı olarak kurgulanmıştır. CO₂ hesapları 1 ton klinker üretimi için bazı kabuller ile gerçekleştirilmiştir. Klinker üretimi enerji ihtiyacı 4500 MJ/t klinker alınmıştır. Kömürün kalorifik değeri 26,3 MJ/kg, NRPP kalorifik değeri 17,5 MJ/kg olarak kabul edilmiştir. Atığın temin edildiği mesafe 50 km, 7,5-16 tonluk kamyonlar kullanıldığı varsayılmıştır. Kömürün nakliye mesafesinin 300 km olduğu ve raylı sistemler ile yapıldığı kabul edilmiştir. NRPP'nin %80 karbon oranının biyojenik %20 oranının da fosil bazlı olduğu kabul edilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda, NRPP'nin çimento fabrikasında kullanılmaması durumunda düzenli depolamaya gideceği ve NRPP'nin organik fraksiyonundan kaynaklanan %75 oranında metanın yakalanacağı ve %25 oranının ise atmosfere salınacağı varsayılmıştır. Bu şartlar, SimaPro yaşam döngüsü değerlendirmesi çimento fabrikasına 1,31 kg CO₂/kg NRPP kaynaklı sera gazı tasarrufu hesaplamıştır. 1 ton NRPP'in çimento fabrikasında kullanılması ile 1,6

t CO₂ emisyon azaltımı gerçekleşmiştir. Böylece çalışmada toplamda CO₂ azaltımının 1 ton NRPP için 3 ton olduğu sonucuna varılmıştır. %100 oranında kömür kullanıldığında CO₂ emisyonlarının 390 kg olduğu ancak bu değer %75 NRPP ve %25 kömür kullanımı durumunda 137 kg olduğu raporlanmıştır [113].

Papanikola ve diğ., 2019 yılında yemek artıklarını kapsayan biyokütle içerikli ve FORBI adı ile anılan bir yakıtın hazırlanması ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. FORBI'nin çimento fabrikasında kullanılması ile ilgili durum için iki senaryo geliştirilmiştir. Baz senaryoda FORBI kullanımı olmadan %70 petrokok ve %30 kömür karışımı kullanılmış, ikinci senaryoda ise %30 kömür, %50 petrokok ve %20 oranında nem içeriği %15 olan FORBI kullanılmıştır. Termal olarak kullanılan petrokok yüzdesi %70'den %30'a gerilerken FORBI'nin termal katkısı %20 olarak belirlenmiştir. Excel'de bir yazılım ile sabit koşullar altında yanma stokiometrisine dayalı hesaplama yapan bir model kullanılmıştır. Model çalıştırılırken %20 fazla hava ve oksijen zenginleştirilmesi olmadığı kabulleri yapılmıştır. FORBI kullanımı ile uçucu olmayan metallerin baz senaryoya göre yükseldiği görülmüştür. SO₂'nin %70 oranında, NO_x'lerin ise 1,2 kat yükseldiği tespit edilmiştir [111].

Literatürde yapılan çalışmalar da yalnızca ÖTL kullanımı ve farklı oranlarının incelenmesi, farklı atıkların ve farklı karışım oranları ile hava kalitesi üzerindeki tozun incelenmesi, farklı atıklar ve karışımları ile dioksin ve dioksin benzeri PCB emisyonlarını incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar kısa süreli izlemeler ve belirlenen oranlar ile deneysel olarak yapılmıştır. Çalışmalarda, fırının canlı koşulları izlenmemiş, belirlenen koşullardaki davranışları gözlenmiştir.

Bu çalışma, literatürde yapılan şekli ile farklı atıkların ön ısıtıcılı bir fırına intikal ve alev borusundan beslenmesini dört aylık sürede tesisin gerçek koşullarında izlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. %0 ila %39 oranında geniş bir besleme aralığında elde edilen değerlerin yarım saatlik ortalamalarından oluşan toplam 120 günlük veri doğrudan ana baca üzerinde bulunan sürekli ölçüm cihazı üzerinden alınmış ve fırının gerçek koşullarına müdahale edilmeden izleme yapılmıştır. Rahman ve diğ.'nin belirttiği karışık endüstriyel atık kullanımı eksikliğine karşılık düşük oranda da olsa döner fırında karışık endüstriyel atık kullanımı gerçekleştirilmiş ve emisyonlar üzerine etkileri gözlenmiştir. Atıkların farklı fırın koşullarında, farklı karışım oranlarında,

farklı atıklar ile birlikte beslenmeleri durumunda ve tek başlarına beslenmeleri durumunda oluşturdukları emisyonların izlenmesi noktaları bu çalışmanın seçilmesini ve diğer çalışmalardan ayrılmasını sağlamıştır.

Ayrıca yapılan çalışmada emisyon parametrelerinin yapay sinir ağı ile çalışılması ve mevcut fırın koşullarına uygun parametreler ile eğitilen bir model ile emisyonların tahminlerinin sağlanması çalışmanın literatürden farklı olması ve çalışmayı ileriye götürmesi açısından önemlidir.



5. MATERYAL VE METOD

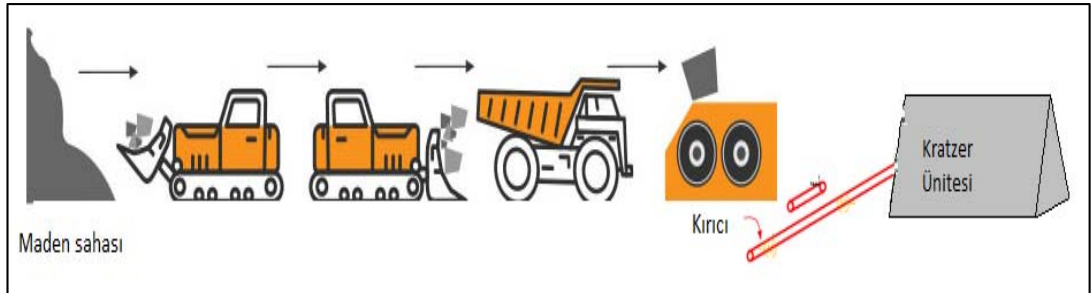
5.1. Çalışmaya Esas Fabrika

Çalışmada seçilen Fabrika, 2.390 ton/gün.klinker kapasitesine sahip kuru sistem ön ısıtıcılı döner fırına sahip bir fabrikadır. Yıllık klinker üretim kapasitesi 788.700 ton/yıl klinker ve 798.000 ton/yıl çimentodur.

Tipik bir çimento üretim prosesine sahip olan fabrikada, kırıcı ünitesi, kratzer ünitesi, farin değirmeni, döner fırın sistemi, çimento öğütme ve paketleme üniteleri yer almaktadır.

5.1.1. Kırıcı ünitesi

Tesiste 350 t/s kapasiteli bir adet kırıcı bulunmaktadır. Hammadde ve yardımcı malzemelerin boyut küçültme işlemi bu ünite de yapılmaktadır. Klinker üretim hattında kullanılacak olan malzemeler kapalı taşıyıcı lastik bantlar ile kratzer (ön homojenizasyon) ünitesine taşınır. Kırıcı ünitesi akış şeması 5.1’de verilmiştir. Kırıcı ünitesinin gösteren fotoğraf ise şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Kırıcı ünitesi akış şeması

5.1.2. Kratzer ünitesi

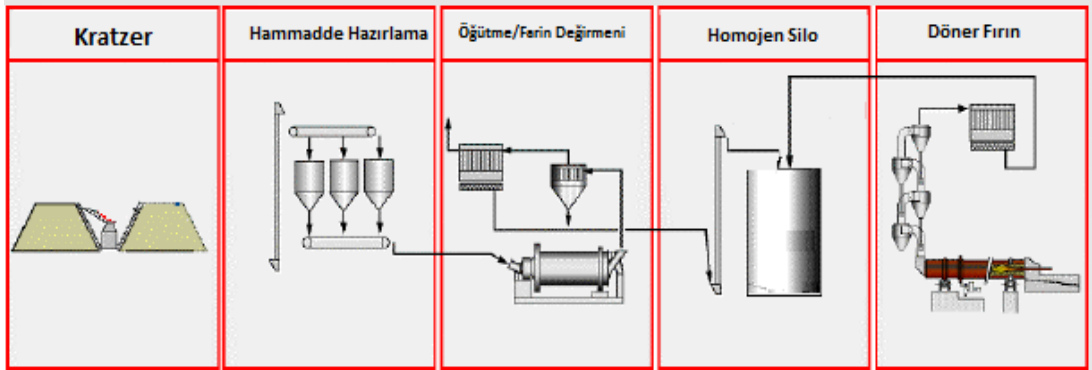
Kırıcıda kırılan hammaddelerin farin değirmenine beslenmeden önce tutuldukları ön homojenizasyon 2 adet tırnaklı kazıyıcı (kratzer) ile kalker ve marn bulunan piramit şeklindeki yığınlardan öne doğru kazınarak homojenliğinin sağlandığı ünite dir.



Şekil 5.2. Kırıcı ünitesi

5.1.3. Farin değirmeni ünitesi

Laboratuvar tarafından belirlenen reçete dahilinde ön homojene ünitesinden malzemeler bantlar vasıtası ile farin değirmenine taşınır. Tesiste 1 adet 170 t/s bilyalı farin değirmeni bulunmaktadır. Ön homojenizasyondan gelen malzemelerin 90 μ boyutuna kadar değirmende öğütülmesi ile elde edilen malzemeye “farin” adı verilmektedir ve farin pişirilmesi ile klinker elde edilir. Öğütülen ve farin haline gelen malzeme değirmenden çıktıktan sonra kendisini taşıyan gazdan ayrılır, gaz filtreye giderken malzeme havalı bantlar ve elevatör ile farin silosuna taşınır. Kratzer ve farin değirmeni ünitesi genel akışı Şekil 5.3 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Kratzer ve farin ünitesi genel yerleşim ve akış şeması

5.1.4. Döner fırın ünitesi

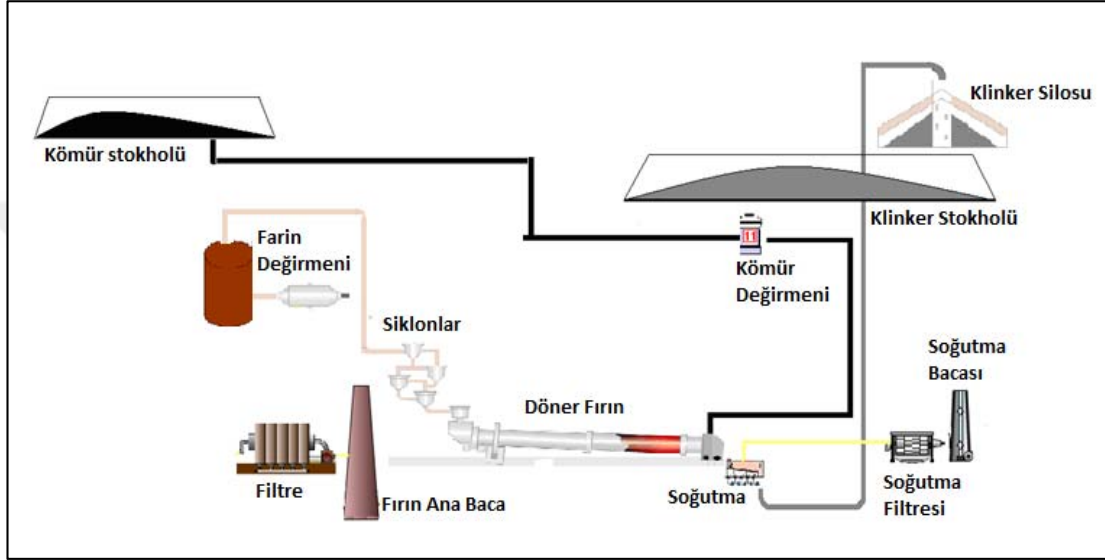
Döner fırın ünitesi ön ısıtıcı kule, döner fırın, soğutma, kömür değirmeni ünitelerinden oluşmaktadır. Tesiste alternatif yakıt kullanımı da yapılan döner fırın 4,6 m çapında, 64 m boyunda ve 2.390 t/gün.klinker üretim kapasitesindedir. Döner fırında konvansiyonel yakıt olarak petrokok, fuel oil ve steamcoal kullanılmaktadır. Alternatif yakıt olarak da ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL), karışık endüstriyel atıklar (KEA) ve fosil bazlı atıklar (FBA) kullanılmaktadır.

Farin değirmeninde öğütülerek silolarda depolanan farin tartı bandıyla tartılıp elevatör ile fırın gazları ile farinin ısı alışverişinin meydana geldiği ön ısıtıcı kuleye gönderilir. Ön ısıtıcı kule 4 basamak siklondan oluşmaktadır. Farin siklonlardan aşağı doğru inerken sıcaklığı 75°C'den 850°C'ye yükselir ve farinin kalsine olması sağlanır. Siklonlar ters akım prensibi ile çalıştığı için fırın gazları yukarı çıkarken farin tozlarına çarparak ısı transferi gerçekleşir ve gazlar baca gazı fanı vasıtası ile emilir. Farin daha sonra döner fırına girer.

Döner fırın içi ateşe dayanıklı tuğla (refrakter malzeme) ile kaplı silindirik sac bir yapıdır. Refrakter malzeme pişirme sırasında sacı (fırın mantosu) korur. Çalışmaya esas teşkil eden tesisteki döner fırın %3 eğim ile 2,8 tur hızıyla dönerek fırına giren farinin gravitesi ile aşağıya doğru hareket etmesini sağlayacak şekildedir.

Döner fırının çıkış ağzında alev borusu bulunmaktadır. Bu alev borusuna kömür değirmenin öğütülen toz haldeki kömür kompresörlerde üretilen basınçlı hava yardımı ile püskürtülür ve alev borusu ucunda yanar. Fırına giren farin sıcaklığı yükselerek çıkış ağzına doğru ilerler. Sıcaklık 1.350°C'ye ulaştığında klinker meydana gelir. Fırında beş termal bölge bulunmaktadır. Kurutma ve ön ısıtma bölgesinde malzeme içerisinde bulunan serbest ve moleküler su buharlaşır. Malzeme sıcaklığının 1.200°C'ye kadar yükseldiği kalsinasyon bölgesinde oluşan reaksiyonlar sonucu karbondioksit, kalsiyumkarbonattan ayrılarak fırın içerisinde kalsiyumoksit oluşmaktadır. Ayrıca, hammadde içerisinde az miktarda bulunan magnezyumkarbonat, karbondioksitin serbest kalması ile magnezyumoksite dönüşür. Malzemenin 1.500°C'ye kadar ısıtıldığı pişirme bölgesinde dikalsiyumsilikat, yarı alüminat ve ferrit bileşenleri oluşur. Sinterleşme bölgesinde trikalsiyumalüminat ve

tetrakalsiyumalüminaferrit oluşmaktadır. Malzeme bu noktada yarı sıvı haldedir. Fırının son bölümü soğutma bölgesidir. Bu bölgede klinker sertleşmekte ve soğumaya başlamaktadır. 1.500°C sıcaklığında fırından çıkan klinker, klinker soğutma ünitesinde 110-150°C'ye kadar 6 fan yardımı ile hava ile soğutulur. Klinker soğutmadan çıkan hava fırına sekonder (ikincil) yanma havası olarak alınır. Döner fırın ünitesinin genel yerleşimi Şekil 5.4 ile gösterilmiştir.



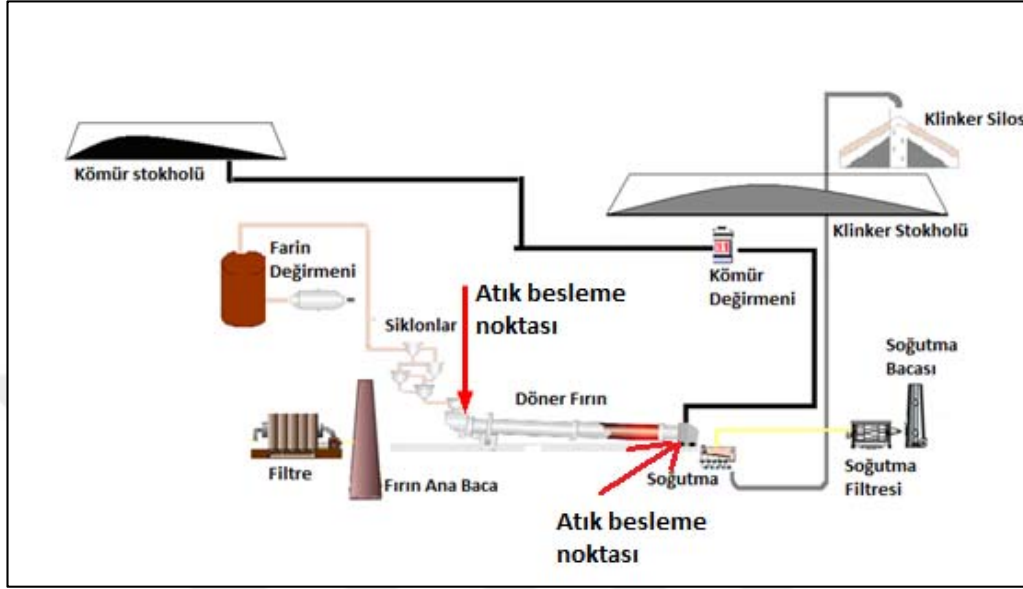
Şekil 5.4. Döner Fırın Ünitesi Genel Yerleşim Şeması

Tesiste konvansiyonel yakıtların boyutunun küçültüldüğü bir adet 15 t/s kapasiteli bir adet kömür değirmeni bulunmaktadır. Kömür, bunker altında bulunan tartılı besleme sistemi ile belirli oranlarda içerisindeki rutubetin atılmasının sağlandığı ünite olan trommele beslenir. Silindir şeklinde dönen bir yapı olan trommel sonrası kömür değirmene beslenir ve 90 mikron elek bakiyesi %3-5 olacak şekilde öğütülerek toz kömür silosuna oradan da alev borusuna beslenir.

Beraber yakma amacıyla kullanılan atıklar döner fırın ünitesindeki ortam sıcaklığı asgari 1.000°C olan fırın girişi veya intikal olarak adlandırılan bölgeden ve alev borusundan beslenmektedir. Atıkların döner fırına beslenme noktaları Şekil 5.5'te verilmiştir.

Fabrika, sahip olduğu lisans belgesinde bulunan atık kodlarındaki atıkları alternatif yakıt olarak kullanmak üzere fabrikaya kabul eder. Beraber yakma amacıyla kabul edilen atıkların besleme miktarları o anki fırın proses şartlarına ve fabrikada bulunan

atık miktarlarına göre tespit edildikten sonra kendi besleme özelliklerine uygun besleme sistemi ile fırına beslenir. Atıklar fırına kancalı besleme sistemi, hareketli taban besleme sistemi ya da toz-granül besleme sistemi ile beslenir.



Şekil 5.5. Fabrika A alternatif yakıt besleme noktaları

Döner fırından 1.500°C sıcaklığında fırından çıkan klinker 110-150°C'ye kadar soğutularak klinker stokholünde depolanmaktadır. Depolanan klinker daha sonra çimento değirmenlerine gönderilir.

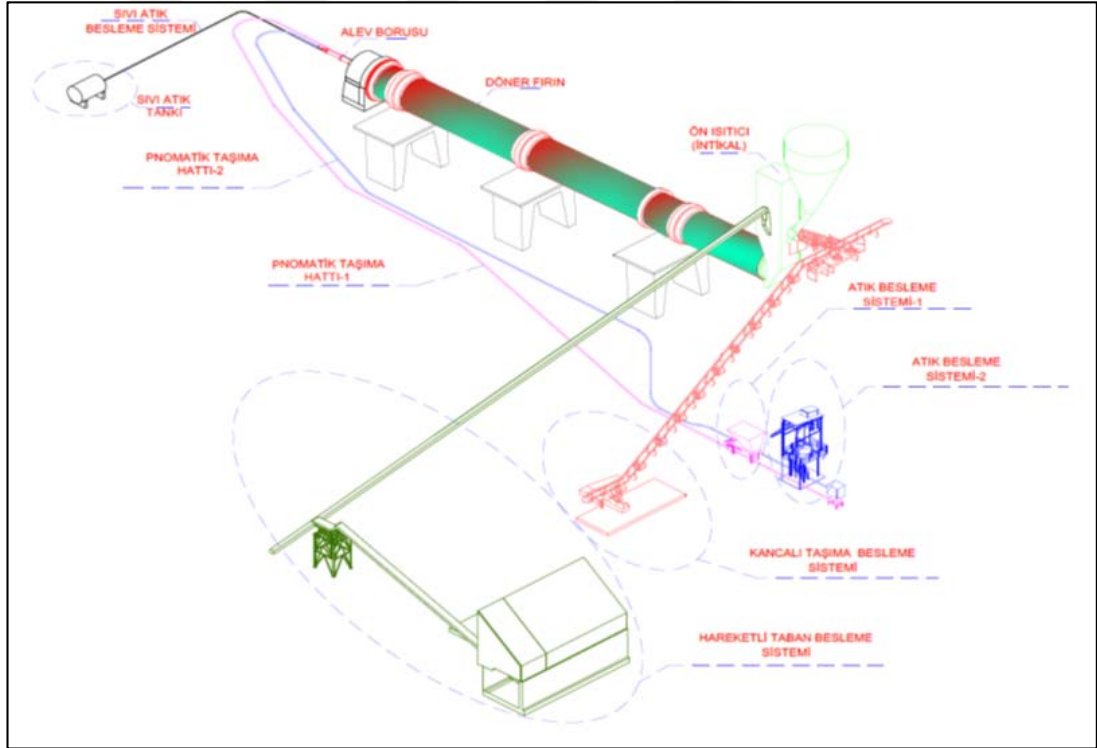
5.1.5. Çimento değirmenleri ve paketleme ünitesi

Üretilen klinker, ilgili katkı maddeleri ile beraber çimento değirmenlerinde öğütülerek çimento elde edilir. Fabrika, 3 farklı tip çimento üretmektedir. 2 adet bilyalı değirmende üretilen çimento basınçlı hava ile paketleme ünitesindeki çimento silolarına sevk edilir.

Silolarda depolanan çimento 100 t/s kapasiteli kantarlar vasıtası ile torbalı ve dökme çimento olarak piyasaya sürülmektedir. Paketleme ünitesinde, çimento silolarında bulunan ürünler çimento talebine göre havalı bant yolu ile elevatöre oradan da paketleme kantarlarına beslenerek torbalanır ve lastik bantlarla yükleme peronlarındaki silobaslara yükleme yapılır. Araç yüklemesi tamamlandıktan sonra kantarda tartılarak sevkiyatı yapılmaktadır.

5.1.6. Atık kabulü, stoklama, besleme ünitesi

Atık yakma ve birlikte yakma işleminde kullanılan atıkların stoklanması için fabrikada 985 m² alan yer almaktadır. Uygun şartlardaki ÖTL, karışık endüstriyel atıklar ve fosil bazlı yakıtlar döner fırın ünitesinde bulunan bant sistemi ya da kanca sistemi ile intikal bölgesine ve alev borusuna taşınmaktadır. Atık stoklama sistemi farklı fiziksel özelliklerdeki atıkların beslenmesine olanak verecek şekildedir. Tesise kabul edilen atıklar stoklama noktasında kendine ayrılmış alanlarda depolanmaktadır. Fabrika, hem katı-toz hem de sıvı atık beslemesine olanak verecek şekilde dizayn edilmiştir. Hareketli taban sistemi, kancalı taşıma besleme sistemi ve pnömomatik besleme sistemi katı ve toz halindeki atıkların beslenmesinde kullanılırken enjeksiyon sistemi ile de sıvı yakıtların beslenmesi sağlanır. Atık besleme sistemi Şekil 5.6'da, kancalı taşıma sistemi Şekil 5.7'de ve hareketli taban besleme sistemi ise Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Fabrika atık besleme sistemi

Fabrika, Çevre ve Şehircilik Bakanlığında aldığı atık yakma ve beraber yakma lisansı kapsamında 2018 yılında 94 MW olan ısı gücünün %39'unu atıklardan karşılayabilmekteydi. 2020 yılı Şubat ayında Fabrika, lisans yenileme yaparak 94 MW ısı gücünün %100 oranını atıklardan karşılama hakkını almıştır.



Şekil 5.7. Kancalı besleme sistemi

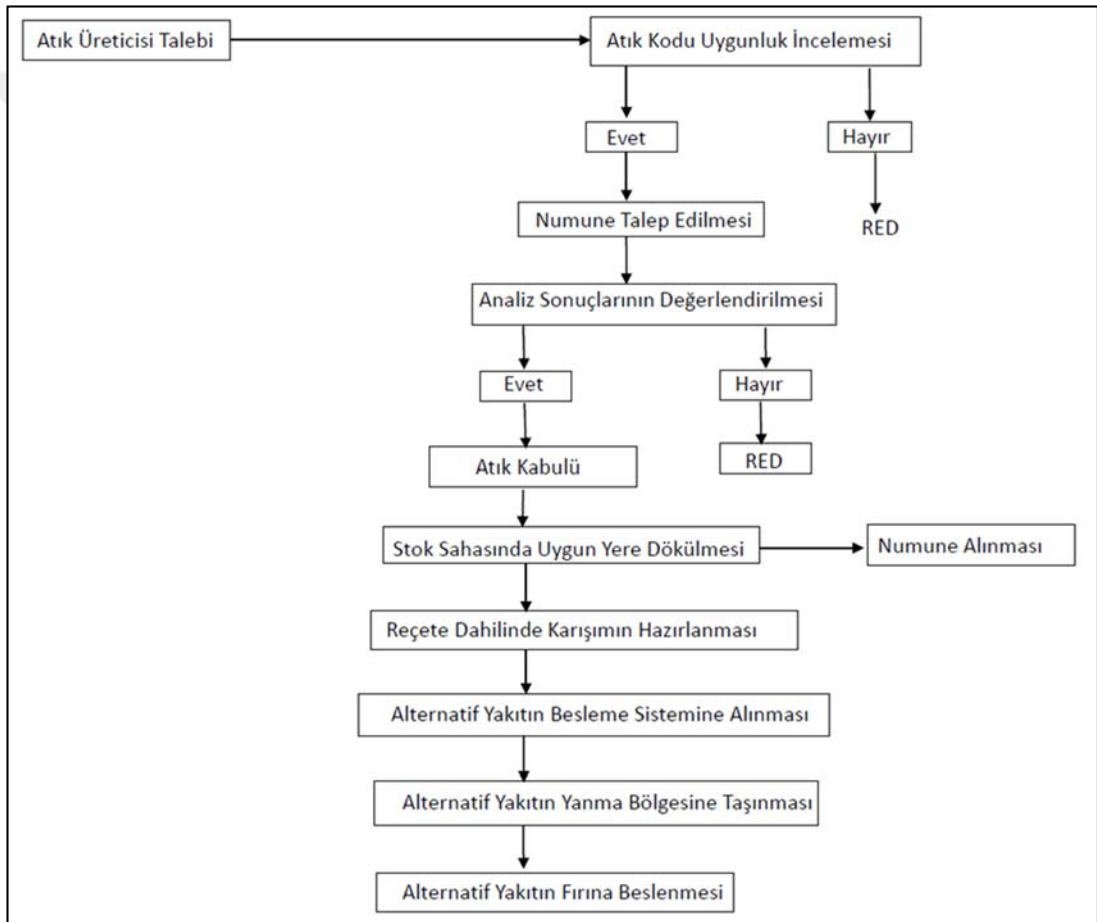


Şekil 5.8. Fabrika hareketli taban besleme sistemi

Fabrika, yalnızca sahip olduğu lisansta bulunan atık kodlarını kabul etmektedir. Atık kabulü öncesi atık üreticisinden numune alınarak fabrika laboratuvarında analizleri gerçekleştirilmektedir. Numune analizinin fabrika kabul kriterleri ile uyuşması durumunda atık üreticisi bilgilendirilir ve gerekli organizasyonlar tamamlandıktan sonra fabrikaya kabulü yapılır. Atıklar fabrikaya yer kantarlarında tartılıp miktarları tespit edildikten sonra alınır. Tehlikeli atıklar fabrikaya bakanlığın lisanslı taşıma

sistemi (MoTAT) ile alınırken tehlikesiz atıklar atık üreticisi ve fabrika arasında yapılan tutanaklar ile gelmektedir. Fabrika, gelen her atığın miktarını ve kullanılan miktarını kalori bilgileri ile birlikte bakanlığın kütle denge sistemine bildirmektedir.

Atıklar, yer kantarlarında tartıldıktan sonra kabul noktasında atıklardan numune alınarak kalite kontrol laboratuvarı tarafından rutubet, kalorifik değer ve kükürt ve kül analizleri yapılmaktadır. Çıkan analizlere bağlı olarak üretim departmanı hangi atıktan ne miktarda besleme yapacağına dair kararı vermektedir. Fabrikada atık yakma akışı Şekil 5.9’da gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Atık yakma akış diyagramı

Tesise kabulü yapılan her bir atık kodu için miktarları ayrı takip edilir ve işletme raporlarına girilir. İşletme raporu, o güne ait fabrikaya ait her türlü kalemin takip edildiği ve fabrikanın kabul ettiği, tükettiği hammadde, alternatif hammadde, konvansiyonel yakıt, alternatif yakıt, üretilen farin, tüketilen farin, üretilen klinker, üretilen çimento (ayrı ayrı her bir tip çimento), fırın ısıl tüketim ve kaloriler gibi

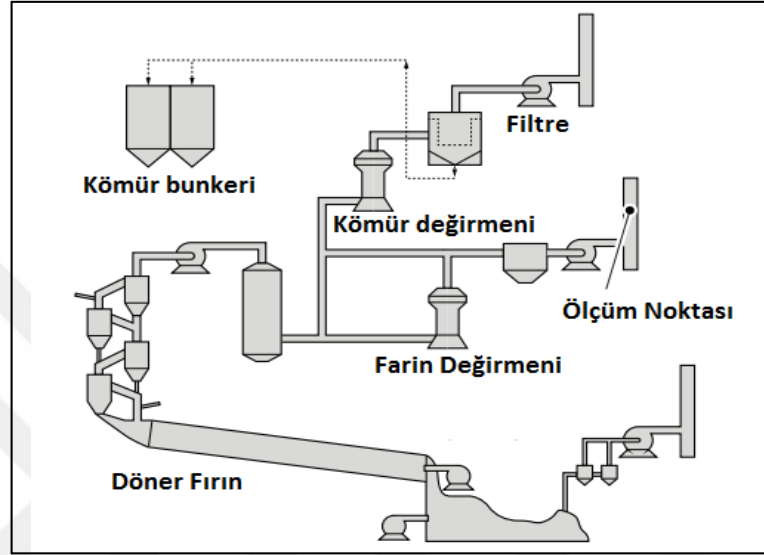
fabrikanın performansına dair her türlü bilginin girilerek performansların ve stokların takip edildiği yegane raporlardır. Günlük bazda hesaplanır, stok ölçümleri ya da sürekli tartım sistemleri ile hesaplanan veriler ile doldurulur ve kontrolleri fabrika içi raporlama sistemleri ve SAP sistemi ile yapılır. Çalışmaya esas tüketim verileri, bakanlık kütle denge veri sistemine girilen, yer kantarları ile tespit edilerek iç raporlama ve SAP ile takip edilen miktarlar üzerinden alınmıştır. Miktarlar, işletme raporlarına günlük tüketim olarak ton cinsinden yazılmaktadır. İşletme raporları hergün bir önceki günün tüm üretim ve tüketim verilerini kapsayacak şekilde yayınlanmaktadır. Isıl yer değiştirme oranlarının hesaplanmasında kullanılan kalori miktarı kalite laboratuvarları tarafından hesaplanan ve günlük raporlarda fırın ısıl gücünün hesaplanmasında da kullanılan analizlerden günlük raporlara girilmiş değerlerden alınmıştır.

5.2. Sürekli Emisyon Ölçüm Sistemleri

Çimento fabrikaları ana bacalarından atmosfere saldıkları toz ve gaz emisyonlarını kesintisiz ve müdahalesiz online bir sistem ile izlemek ve alınan bu verileri doğrudan Çevre ve Şehircilik Bakanlığı online veri takip sistemine aktarmak ile yükümlüdürler. Sürekli emisyon ölçüm sistemi (SEÖS), bacada emisyonların sürekli olarak izlenmesini sağlayan elektronik ekipmanlardır. SEÖS, örnekleme, şartlandırma ve yazılıma sahip gerçek zamanlı, baca gazı içerisindeki izlenen parametrelerin konsantrasyonlarının ölçümünü yapan komple bir sistemdir [196]. Çimento fabrikaları Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği gereği emisyonlarını sürekli kaydedicili cihazlar ile izlemekle yükümlü iken 2011 yılında yayınlanan Sürekli Emisyon Ölçüm Sistemleri (SEÖS) Tebliği ile izledikleri emisyonları online olarak bakanlık alt yapısına göndermeye başlamışlardır. SEÖS Tebliği, sisteme uygun cihaz seçimini, cihazın çalıştırılma şeklini, cihazın takılacağı alan ile ilgili bilgileri, cihazın kalibrasyon şekillerini anlatan tebliğdir. Çimento fabrikalarında takılı olan SEÖS'lerin buldukları noktalar Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

Sürekli ölçümler için uygun ölçüm cihazları, ölçüm sistemi içinde ölçülen parametre tarafından üretilen fiziksel veya fiziko-kimyasal değişiklikleri kaydeder ve bunları elektrik sinyallerine dönüştürür. Bunu yapmak için, numune gazı ya ana gaz akışından çıkarılabilir ve ölçüm cihazına sokulabilir (ekstraktif örnekleme) ya da numune gazı

doğrudan baca kanalında incelenebilir (yerinde ölçüm). Numunenin bir hat ile çekilerek ölçüm cihazına sokularak yapılan ölçüm şekli ekstraktif örnekleme olarak, direkt baca gazı içerisinde ölçüm yapılması ise yerinde ölçüm olarak adlandırılmaktadır. Her iki ölçüme ait prensipler ve ölçülen parametreler Tablo 5.1 ile özetlenmiştir.



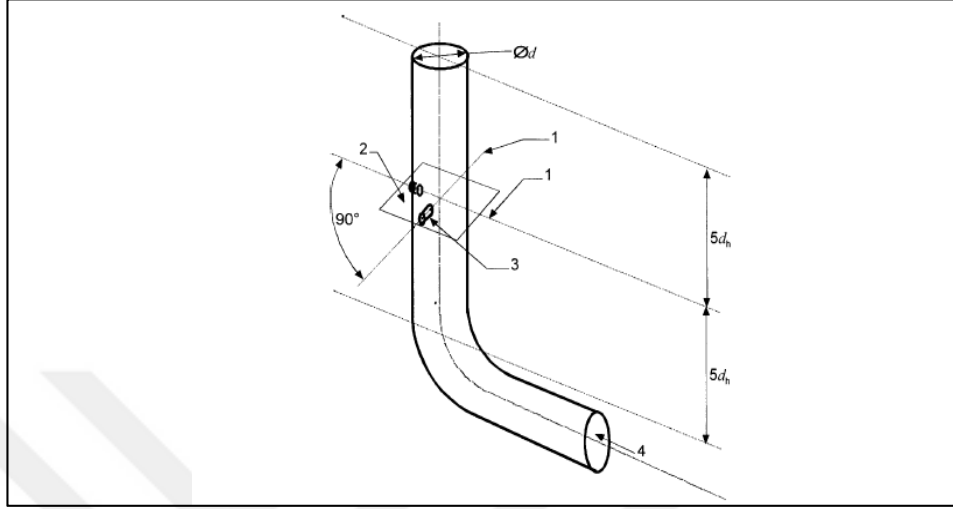
Şekil 5.10. Çimento fabrikası SEÖS takılı bulunan nokta

Tablo 5.1. SEÖS ölçüm prensipleri ve parametreleri

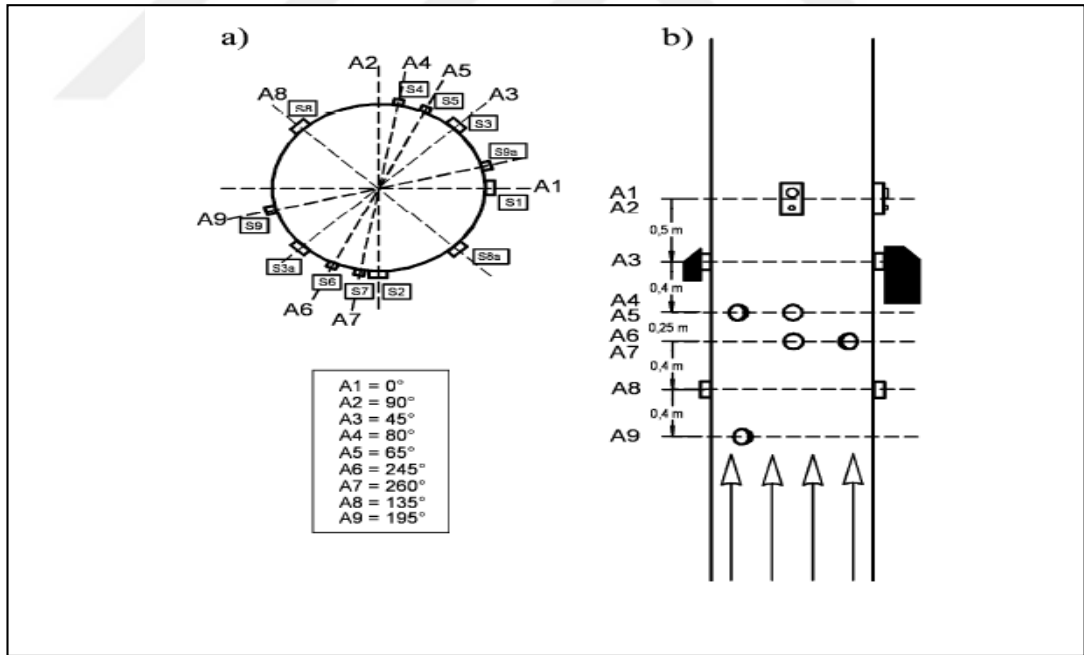
Adımlar	Metot	Parametre	Ekstraktif		Yerinde Ölçüm
			Isıtmalı	Soğuk	
Örnekleme		Toz			X
		NO	X	X	X
		SO ₂	X	X	X
Taşıma	Ekstraktif	O ₂	X	X	X
		TOK		X	
		CO	X	X	X
Hazırlama		CO ₂	X	X	X
		NH ₃		X	X
Analiz	Yerinde Ölçüm	NO ₂		X	X
		HCl		X	X
Veri İşleme		HF			X
		H ₂ O		X	X

SEÖS'te kullanılan analizörlerin TS EN 14181 standardına göre onaylanmış, uluslararası kabul görmüş mcerts, TÜVRheinland gibi sertifikalandırma kuruluşlarından KGS1 (Kalite Güvence Seviyesi 1-QAL 1) sertifikasına sahip olması gereklidir. Cihaz seçiminde bu sertifika öncelikli olarak aranmak zorundadır. Ölçüm

parametrelerine sahip ve sertifikası bulunan ölçüm cihazı alınarak SEÖS tebliği ile belirlenen koşullarda ana bacaya yerleştirilir. SEÖS'ün ana bacaya kurulumunda dikkat edilmesi gereken mesafeler Şekil 5.11 ve 5.12 ile gösterilmiştir.

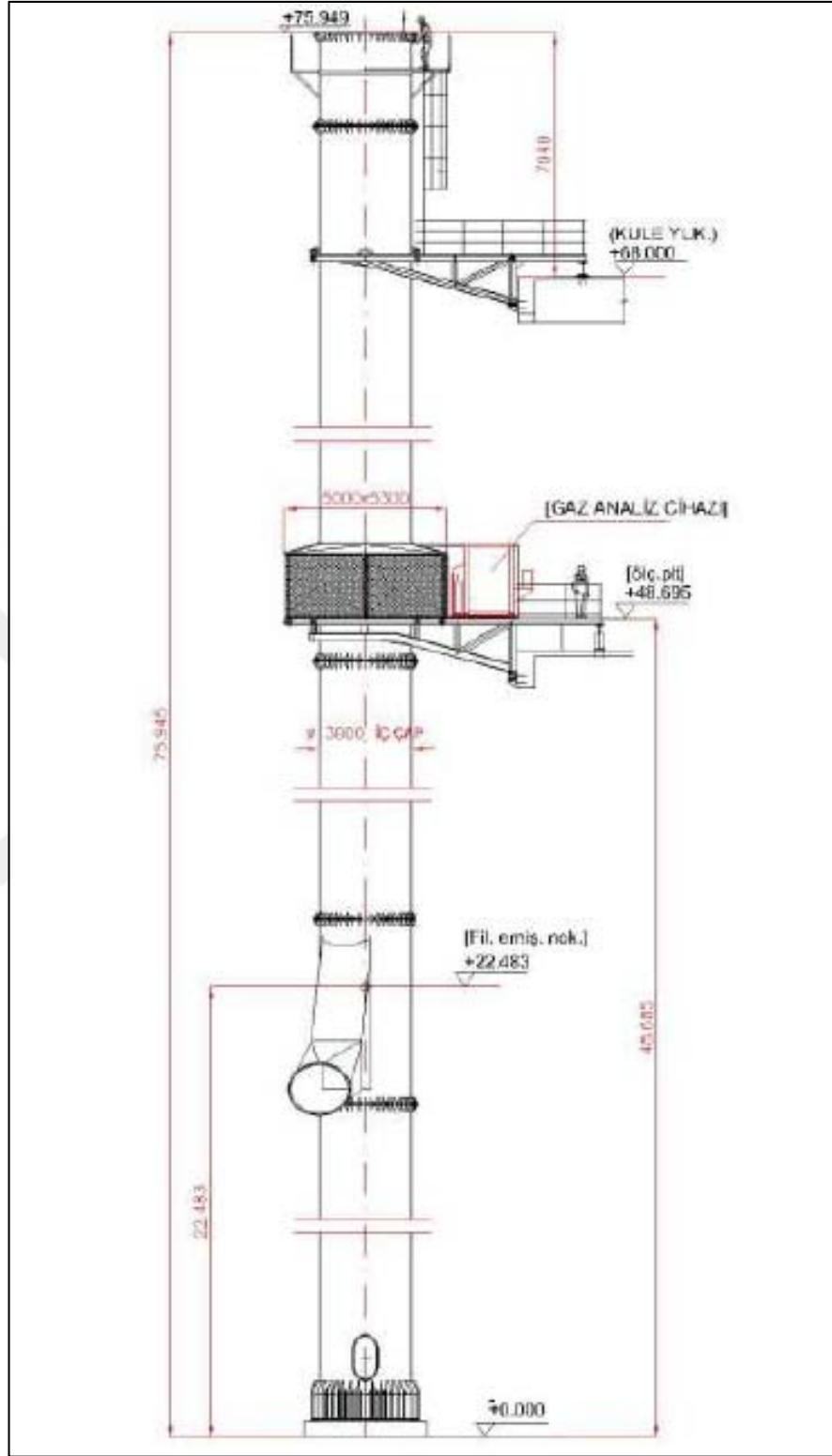


Şekil 5.11. Numune Alma Düzlemi 1-Numune alma hattı, 2-Numune alma düzlemi, 3-Giriş delikleri, 4-Akış yönü [197]



Şekil 5.12. SEÖS ve ölçüm cihazları ana baca üzerine yerleşim mesafeleri ve açıları [197]

Fabrika, KGS1 sertifikasına sahip; CO, NO, SO₂, TOK, HF, HCl parametrelerini okuyan bir sürekli ölçüm cihazını tebliğ ile belirlenen noktaya takmıştır. Şekil 5.13 Fabrika'nın SEÖS cihazının takılı olduğu noktayı göstermektedir.



Şekil 5.13. Fabrika SEÖS cihazının bulunduğu nokta

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 sırasıyla Fabrika'nın SEÖS takılı olan bacasının ve platformun gösterildiği görseli ve baca üzerinde ölçüm cihazlarının pozisyonlarını göstermektedir.



Şekil 5.14. Fabrika SEÖS takılı baca ve platform görünüşü



Şekil 5.15. Fabrika baca üzeri numune alma düzlemi ve numune alma noktaları

Fabrika, ana bacasında CO, NO, SO₂, O₂, hız, nem, TOK, HF ve HCl parametreleri ve toz sürekli ölçülen parametrelerdir. Fabrika, ana bacada toz ölçümünü SICK marka

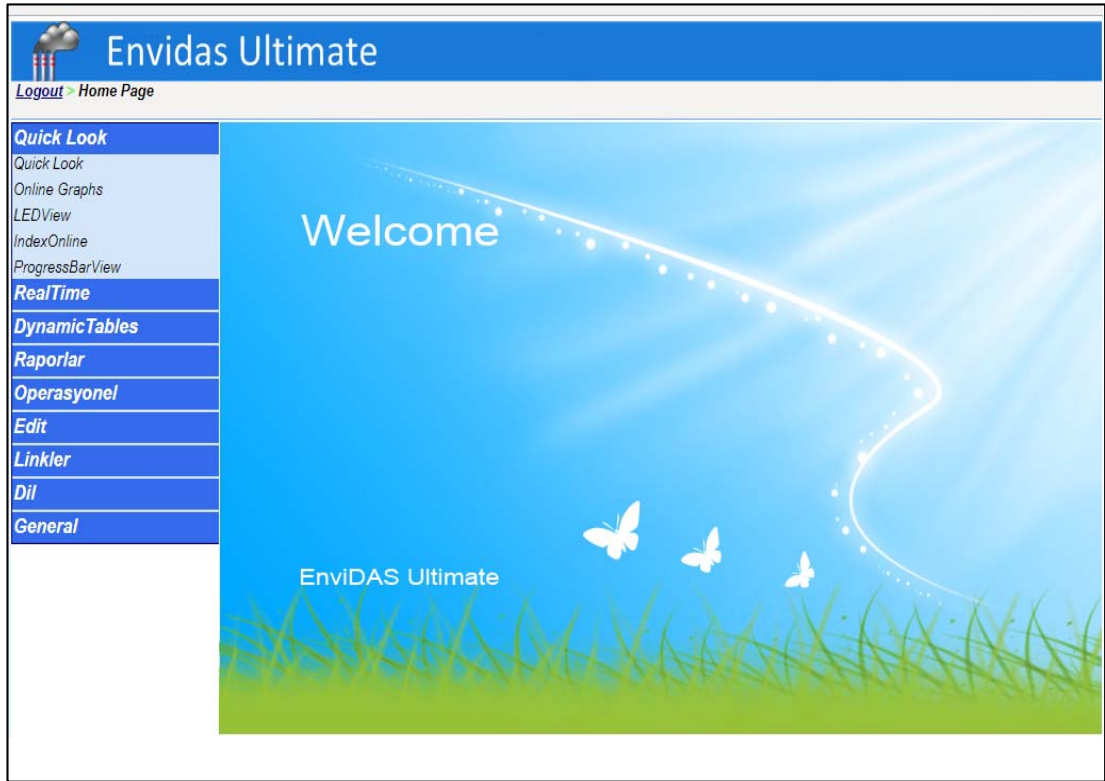
Dusthunter C 200 model bir cihaz ile sürekli yapmaktadır. Gaz emisyonları ve sıcaklık, SICK marka MCS100FT / FID model dijital çıkışa sahip cihaz ile ölçülmektedir. Debi ölçümü SICK marka FLOWSIC 100/200 model bir cihaz ile yapılmaktadır. Gaz ölçümü yapılan sistem SICK marka 10 metre uzunluğunda ısıtmalı bir hata sahiptir. 76 m uzunluğunda ve 3 metre çapındaki ana baca üzerine yerleştirilen sürekli ölçüm cihazları ve numune alma hattı ile atmosfere salınan toz ve gazlar izlenmekte ve kayıt altına alınmaktadır. Gaz ölçümleri bir prop yardımı ile alınan gaz numunelerinin ısıtmalı hat ile SICK MCS100 FT cihazına ulaştırılması ardından da yazılım aracılığı ile SEÖS bilgisayarına aktarılması ile ekstraktif metod ile yapılmaktadır. Çalışmaya esas teşkil edilen veriler, bu cihazlar ile yapılan ölçümlerden dış müdahalelere kapalı yazılım sistemine aktarılan verilerdir. Ölçülen parametreler, ölçüm teknikleri ve sertifikadaki ölçüm aralıkları Tablo 5.2 ile gösterilmiştir.

Tablo 5.2. SEÖS ölçüm parametreleri, prensipleri ve sertifika aralıkları

Parametre	Birim	Ölçüm Prensibi	Sertifika Aralığı
O ₂	%	Zirkonyum Dioksit Sensör	0-21
CO	mg/m ³	FTIR	0-1.500
NO	mg/m ³	FTIR	0-2.000
SO ₂	mg/m ³	FTIR	0-1.500
Toz	mg/m ³	Işık saçılması	0-15
Debi	(Hız:m/s)	Fark basınç	0-20
H ₂ O	%	FTIR	0-40
HF	mg/m ³	FTIR	0-3
HCl	mg/m ³	FTIR	0-15
TOK	mg/m ³	FID	0-150

KGS1 sertifikasına sahip SEÖS cihazı bacaya takıldıktan sonra çalışma ortamına uygun ölçüm yapabilmesini sağlamak adına Kalite Güvence Seviyesi 2 (KGS2) adı verilen kalibrasyon işlemi bakanlık tarafından atanan akredite bir ölçüm laboratuvarı tarafından gerçekleştirilir. KGS2 ölçümleri tebliğ ile belirlenen koşullarda bir değişiklik olmaması halinde beş yıl süre ile geçerlidir. Fabrika, KGS2 ölçümlerini yaptırarak geçerli kalibrasyon fonksiyonunu belirlemiş ve bu fonksiyon sistemin sahip olduğu yazılıma girilmiştir. Ham olarak okunan değerlere geçerli kalibrasyon fonksiyonu uygulandıktan sonra yazılıma yansıtılmaktadır. SEÖS cihazına KGS2 yaptırıldıktan sonra çalışma koşullarının belirlenen fonksiyon ile uygun gidip

gitmediğinin kontrolü için en az ayda bir olmak üzere Kalite Güvence Seviyesi 3 (KGS3) ölçümleri yapılmaktadır. KGS3 ölçümleri tesis sorumluluğundadır. KGS3 ölçümleri, SEÖS'e belli aralıklarla sertifikalı gazların verilmesi ile sıfır ve span değerlerinin okunması ile gerçekleştirilir. KGS3 ile yapılan okumalarda elde edilen değerler tebliğ uyarınca değerlendirilerek SEÖS'ün var olan KGS2 denklemi ile ölçüme devam edip edemeyeceğini gösterir. SEÖS'ten alınan verilerin elektronik veri değerlendirme sistemine iletilmesi, kaydedilmesi ve değerlendirilmesi zorunlu olduğundan 10 saniyelik ortalama değerler halinde konsantrasyon olarak alınan veriler, Fabrika çalışır olduğu tüm durumlarda kaydedilir. Veri değerlendirme sistemi olarak ara bir yazılım kullanılmaktadır. Bu yazılımda, dijital bağlantı ile aktarılan veriler kalibrasyon fonksiyonu uygulanmış, standartlaştırılmış şekillerde kaydedilir. Yazılım sistemi verileri sakladığı için raporlama araçları ile istenilen aralıklardaki veriler sistem üzerinden çekilerek incelenebilmektedir. Çalışmada kullanılan veriler Fabrika'nın sahip olduğu Envidas yazılım sistemi üzerinden KGS2 uygulanmış ve yönetmelikler gereği standartlaştırılmış olarak yarım saatlik ortalamaların günlük hali olarak alınmıştır. Fabrika'nın sahip olduğu yazılım ve verilerin alındığı raporlama sistemi Şekil 5.16 ve 5.17'de gösterilmiştir.

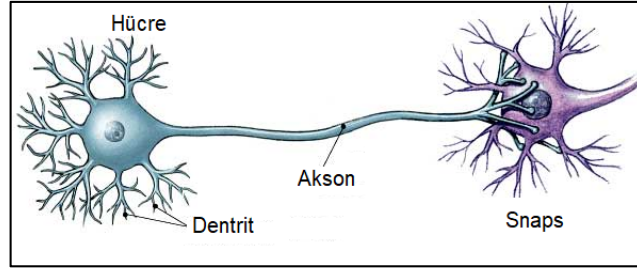


Şekil 5.16. Fabrika SEÖS yazılımı giriş sayfası

Şekil 5.17. Fabrika SEÖS raporlama sayfası

5.3. Yapay Sinir Ağı

Yapay sinir ağları (YSA) biyolojik sinir sistemini taklit edebilen bilgisayar modelleri olarak tanımlanmaktadır. Biyolojik bir sinir ağı, deneyimlemiş olduğu bilgiyi depolamak ve kullanıma sunmak amacıyla doğal bir eğilime sahip, büyük ölçüde paralel dağıtılmış bir işlemci olarak düşünülebilir. Bilgi işlem biriminin yapısı bu modelin ana bileşenidir. Biyolojik bir nöron dört ana bölümden oluşmaktadır: dendritler, sinapslar, akson ve hücre gövdesi. Dendritler diğer nöronlardan sinyaller alır. Tek bir nöronun aksonu diğer nöronlarla sinaptik bağlantılar oluşturmaya yarar. Bir nöronun hücre gövdesi, dendritlerden gelen sinyalleri toplar. Giriş sinyalleri, nöronu eski haline getirmek için yeterliyse, nöron aksonuna bir dürtü gönderir. Öte yandan, girişler istenen seviyeye ulaşmazsa, dürtü meydana gelmez [198]. Basit bir sinir hücresinin (nöron) şematik gösterimi Şekil 5.18’de verildiği gibidir.

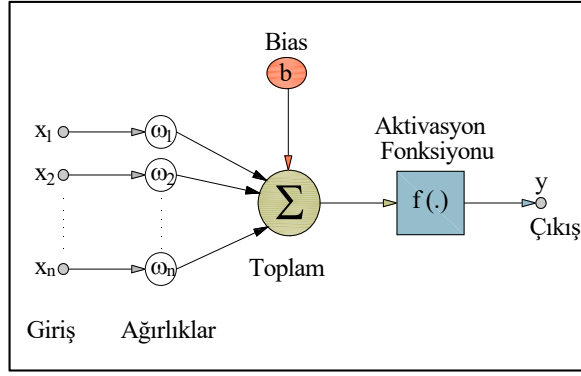


Şekil 5.18. Basit bir sinir hücresi

Biyolojik sinir sisteminin çalışma şekline benzeyen YSA'lar, nöronların farklı şekillerde birbirlerine bağlanmasıyla oluşan ağlardır. Bu ağlar nöronlar aracılığıyla; bilgiyi öğrenme, saklama ve datalar arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma yeteneğine sahiptirler. Diğer bir ifadeyle, YSA'lar, normalde bir insanın yaşayarak veya deneyerek biyolojik nöronlar ile sahip olduğu öğrenme yeteneğini yapay olarak gerçekleştirirler [199]. Bir yapay sinir ağı, mühendislik uygulamalarında bir giriş değerini bir çıkış değeri ile eşleştirmek için kullanılan bir eşleştirici olarak tanımlanabilir [200].

Bir ağ, katmanlardaki “nöron” olarak isimlendirilen birçok temel parçanın bir araya gelmesiyle oluşur. Bir nöronun yalnızca bir çıkışı varken birçok girişi vardır. Nörona gelen bilgiler, bir nörona aktarılmadan önce geldikleri bağlantıların ağırlıklarıyla çarpılır. Bu sayede her bir girdinin, çıktılar üzerindeki etkisi ölçeklendirilebilir [201]. Bir nöron; ağırlıklar, bias ve aktivasyon fonksiyonu olarak isimlendirilen üç temel elemandan meydana gelir. Yapay bir nöron modeli için şematik diyagram Şekil 5.19'da gösterildiği gibidir. Burada $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ giriş katmanındaki n adet girdi, $\omega=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ girdilere etki eden ağırlıkları, b bias değerini ve y çıkış katmanındaki çıktı değerini temsil etmektedir.

Tüm nöronlar, bağlantılar ile birbirine bağlıdır ve ağa tanımlanan sinyaller, bu bağlantılar aracılığıyla bir nöronun bir başka nörona aktarılarak iletilir. Her nöronun çıktı değerinin belirlenmesi için bir aktivasyon fonksiyonuna gerek vardır. Aktivasyon fonksiyonu, bir YSA'yı önemli hale getiren doğrusal olmayan davranışın tanımlandığı en önemli değişkendir. YSA'lar ağda tanımlanan örnekleme geçmişine göre eğitilir ve ağa bilinmeyen bir girdi girildiğinde geçmiş öğrenmeye göre bir çıktı üretir [202].



Şekil 5.19. Bir nöronun şematik gösterimi

YSA ağı mimari (nöronlar arasındaki bağlantı), öğrenme yöntemi (bağlantı ağırlıklarının belirlenmesi) ve aktivasyon fonksiyonu ile tanımlanır. Bir YSA, nöronlar veya düğümler adı verilen çok sayıda basit işleme elemanından oluşur. Nöronlar katmanlar halinde düzenlenir ve ağ mimarisini oluşturur. Çok katmanlı ileri beslemeli ağ modelinin mimarisi, giriş, gizli ve çıkış katmanı olarak adlandırılan en az 3 farklı katman türü gerektirir. Giriş katmanı düğümleri, dış ortamdan giriş verilerini alır ve bunları gizli katman düğümlerine iletir. Bu katman üzerinde hiçbir veri işlemi gerçekleştirilmez. Giriş katmanı düğümlerinin giriş değerleri, giriş katmanı düğümlerini gizli katman düğümlerine bağlayan ayarlanabilir bağlantı ağırlıklarının her biri ile çarpılır. Gizli katman, üzerinde bir aktivasyon fonksiyonu dönüşümleri ile aktarılan ağırlıklı girişler gerçekleştiren ve çıkışı bir sonraki bağlı çıkış katmanına geçiren düğümlerden oluşur. Son olarak, çıktı katmanı düğümleri yapay sinir ağı modelinin çıktı değerini üretir [203].

Çalışmanın bu bölümünde deneysel çalışma sonucunda elde edilmiş olan CO, NO_x, SO₂, TOK ve toz değerlerinin YSA kullanılarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır. HF ve HCl parametreleri sifıra yakın ve oldukça minör değişiklikler gösterdiğinden tahmin edilecek ana parametreler arasında değerlendirilmemiştir. Bu amaçla en doğru sonuçların elde edilebileceği ağların oluşturulabilmesi için her bir çıktı değerinin ayrı ayrı elde edilebileceği 5 farklı YSA modeli oluşturulmuştur. Geri yayılım (Back-propagation/BP), fonksiyon yaklaşımı ve örüntü sınıflandırması yapmak için doğrusal olmayan, çok katmanlı YSA'ları eğitmek için kullanılan en popüler yöntemdir [204]. Bu nedenle bu çalışmada modellenmiş olan tüm ağlarda 3 katmanlı BP sinir ağı modeli kullanılmıştır. Tüm ağlar giriş, gizli ve çıkış katmanı olmak üzere 3 katmandan meydana gelmektedir. Sigmoid transfer (logsig) fonksiyonu, her bir nöron üzerindeki

gizli katmanda kullanılmış ve çıktı katmanı için doğrusal fonksiyon (purlin) kullanılmıştır. BP öğrenme kuralı, ağırlıklarını ve sapmalarını, elde edilen değerler arasındaki ortalama kare hatasını (MSE) en aza indirmek, analitik modelin denklemlerini ve sinir ağı modelinden tahmin edilenleri çözmek için kullanılmaktadır. Ağlarda eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquardt (LM) ve Scaled Conjugate Gradient (SCG) algoritmaları deneme yanılma yöntemi kullanılarak en uygun olan algoritma tercih edilmiştir. Ağların giriş katmanları fuel oil (FO), petrokok (P), kömür (K), ÖTL bütün (ÖTLB), ÖTL kırılmış (ÖTLK), KEA (karışık endüstriyel atık), FBA (fosil bazlı atık), kule O₂ (KO₂), fırın ısı gücü (FIG) ve tonaj (T) olmak üzere toplam 10 adet nörondan oluşmaktadır. Döner fırında birlikte yakma işlemi yapılması amacıyla kullanılan atık tiplerinin farklı ısı yer değiştirme oranları, bu atıklar ile birlikte kullanılan yakıt ısı güçleri, fırın çalışma şartlarından ısı yer değiştirme oranını belirleyen ana parametrelerden fırının ısı gücü, yanma reaksiyonunun gerçekleşmesi için gerekli olan oksijen miktarı, asıl amaç klinker üretimi olduğundan ve besleme miktarına göre fırın şartlarının ve gerekli yakıtların değişmesi nedeniyle tonaj etkin parametrelerdir. Fırındaki yanma reaksiyonları dolayısıyla bacadan atmosfere salınacak olan toz ve gaz emisyonlarını etkileyen parametreler yakıtlar, atıklar, tonaj ve oksijendir bu nedenle bu parametreler girdi olarak seçilmiştir. Ağların eğitilmesi, doğrulanması ve test edilmesi amacıyla deneysel verilerden elde edilen toplam 120 veri YSA modellemesi amacıyla kullanılmıştır. Modellemede kullanılan veriler Tablo 5.3'te verilmiştir. Tablo 5.3'teki verilerde yakıtların tamamı yüzde ısı gücü oranlarıdır. Fırın ısı gücü MW cinsinden verilmiştir. Tonaj, farin besleme tonajıdır ve ton/saat birimine sahiptir. Emisyonlar ise sürekli emisyon cihazı üzerinden ilgili kalibrasyon fonksiyonu uygulanmış şekilde mg/Nm³ %10 oksijen değerinde standartlaştırılmış değerlerdir.

Tablo 5.3. Deneysel veriler

No.	FO (%)	P (%)	K (%)	ÖTLB (%)	ÖTLK (%)	KEA (%)	FBA (%)	KO ₂ (%)	FIG (MW)	T (t/s)	CO	NO _x	SO ₂	TOK	toz
											(mg/Nm ³)				
1	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	83,62	160,4	1.671,6	568,9	0,1	5,1	0,0
2	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,34	92,60	160,6	2.508,2	584,0	0,0	3,6	0,0
3	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,13	95,10	159,1	2.780,1	584,0	0,0	4,2	5,6
4	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,96	90,26	157,5	3.570,2	528,0	1,6	4,2	5,7
5	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,10	89,60	158,0	1.973,6	624,4	1,9	6,1	6,1
6	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,46	92,82	159,1	1.272,7	751,6	9,8	7,8	6,6
7	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,40	90,51	158,0	2.010,0	652,0	9,5	7,7	6,3
8	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,51	100,82	159,3	1.415,6	731,8	6,6	7,9	6,4
9	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,71	94,72	159,2	2.462,9	600,3	22,0	10,3	6,3
10	0,00	96,30	0,00	3,70	0,00	0,00	0,00	3,15	98,18	157,7	3.939,8	476,3	67,1	9,8	6,3

adet veri ise ağın test edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Modellemelerde kullanılan verilerin istatistiki değerleri Tablo 5.4'de özetlenmiştir.

Tablo 5.4. Deneysel verilerin istatistiki değerleri

Veriler	Min.	Maks.	Ort.	Std. Sap.
FO (%)	0,00	8,09	0,10	0,79
P (%)	40,66	100,00	81,70	16,15
K (%)	0,00	25,19	2,68	7,31
TLB (%)	0,00	33,95	11,47	8,30
TLK (%)	0,00	13,07	2,09	3,93
KEA (%)	0,00	10,55	0,50	1,51
FBA (%)	0,00	12,62	1,48	2,36
KO ₂ (%)	1,57	3,85	2,41	0,50
FIG (%)	36,81	101,93	69,90	20,23
T (%)	149,20	166,30	159,70	3,47
CO (mg/Nm ³)	1.272,70	13.782,40	4.784,21	1.736,26
NO _x (mg/Nm ³)	136,50	751,60	452,29	123,01
SO ₂ (mg/Nm ³)	0,00	124,20	19,40	27,82
TOK (mg/Nm ³)	0,60	130,4	28,56	34,07
TOZ (mg/Nm ³)	0,00	19,70	9,71	3,60

Kullanılan giriş ve çıkış verileri, ağa tanımlanmış olan transfer fonksiyonu dikkate alınarak ağa belirli bir formatta verilmelidir. Bu çalışmada hazırlanmış olan ağlarda sigmoidal transfer fonksiyonu kullanıldığı için verilerin st ve alt sınır değerleri sırasıyla 1 ve 0 olarak alınmalıdır. Doğru ve hızlı bir öğrenmenin sağlanabilmesi için ağa tanımlanan verilerin 0-1 aralığında olması büyük bir önem arz etmektedir. Bu çalışmada verilerin normalizasyonu, verilerin en büyük değerine bölünmesi sonucu elde edilen değerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. YSA analizleri MATLAB programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

6. ÇALIŞMA SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Çalışmaya ait veriler ön ısıtıcılı bir çimento fabrikasından alınmıştır. Çalışmaya konu fabrikada atık kullanımları çalışma koşullarına bağlı olarak izlenmiştir. Fabrika, yıl içerisinde sürekli çalışmamış, çalıştığı bazı aylarda da ayın tüm günleri faaliyet göstermemiştir. Bu nedenle fabrikanın tüm günlerinde çalıştığı aylar seçilmiş ve veriler ilgili aya ait birincil yakıtlar, alternatif yakıtlar ile bu yakıtlara ait ısı güç miktarları ile atık kullanımı kaynaklı ürün üretmek için harcanan ısı güç oranı olarak verilmiştir.

Isıl güç, yakıtın sahip olduğu kalorinin yanma sonucu ortaya çıkardığı enerji olarak tanımlanır ve MegaWatt cinsinden ifade edilir. Atıklardan elde edilen MW cinsinden ısı gücün tüm yakıtlardan elde edilen MW cinsinden ısı güce yüzdesel oranı “ısıl verdiğimiz oranı” olarak isimlendirilmektedir. Fabrikalar, atık yakma ve beraber yakma lisansı alırken döner fırının ısı kapasitesine oranlanan ısıl yer değiştirme oranına göre lisanslandırılırlar. Döner fırın ısı kapasitesi, kullanılan yakıtlar ile ilgili yakıtlara ait “kcal/kg” cinsinden kalori ile hesaplanır. Bölüm 2, 2.1.1 başlığı altında yasal süreçlerden bahsedilirken lisans alınması aşamasında hedeflenen ısıl yer değiştirmenin ve bu hedefe ulaşmak için kullanılacak atıkların deneme yakma planında verildiği anlatılmıştır. Isıl yer değiştirme hesabı Denklem (6.1)’de gösterilmiştir. Hesap yapılırken dikkat edilmesi gereken nokta, yakıt miktarı yaş bazda ise kalorinin de yaş bazda alınmasıdır. Kuru miktar kullanılacaksa kalori kuru bazda olmak zorundadır.

$$\text{Isıl Güç (MW)} = \frac{\text{Yakıt Miktarı (kg/s)} * \text{Yakıt Kalorisi} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)}{3600} \mathbf{4,18} \quad (6.1)$$

Her bir yakıt tipi için ısıl güç hesabı Denklem (6.1) uyarınca yapılarak atık yakma ısıl güçlerin tamamı toplanarak döner fırın toplam ısıl gücüne yüzdesel oranı Denklem (6.2) ile bulunur.

$$\text{Isıl Yer Değiştirme (\%)} = \frac{\text{Atık 1 Isıl Güç (MW)} + \text{Atık 2 Isıl Güç (MW)} + \text{Atık 3 Isıl Güç (MW)} + \dots}{\text{Döner Fırın Toplam Isıl Güç (MW)}} \mathbf{100} \quad (6.2)$$

Çalışmada incelenen periyotta Fabrika %39,99 ısıl yer değıştirme oranına sahiptir.

Fabrika, çalışmada incelenen periyotta, Türkiye’de ve dünyada olduğu gibi en çok ÖTL kullanımı gerçekleştirmiştir. ÖTL, kancalı besleme sistemi ile fırına intikal bölgesinden beslenmektedir. Aynı zamanda Fabrika, “Karışık Endüstriyel Atık” beslemesi yapmaktadır. Karışık Endüstriyel Atık Tanımı, GCCA (Global Cement and Concrete Association) tarafından kullanılan CSI (Cement Sustainability Initiative) CO₂ hesaplamasında tanımlanan atık grubudur. İlgili CO₂ hesap dosyası dünyadaki çimento fabrikaları tarafından doldurularak GNR (Getting Number Rights) projesi kapsamında sektörün verilerinin hesaplanmasında ve kıyaslanmasında kullanılmaktadır. Birlik, doğru verilere ulaşabilmek adına 6 haneli kodlar ile yüzlerce atığı hesaba katmak yerine en çok kullanılanları başlıklar altında toplamış ve adlandırmıştır. Çalışmada, fabrikalar tarafından kullanılan atıklar da bu çerçevede gruplandırılmıştır. Karışık Endüstriyel Atıklar; 19 12 11 kodu dışındaki atıktan türetilmiş yakıtları (19 12 10 ve 19 12 12), kontamine atıkları ve plastik bazlı atıkları kapsamaktadır. Fabrika, çalışmaya konu olan periyotta karışık endüstriyel atık olarak plastik bazlı atık kullanımı gerçekleştirmiştir. Yine aynı periyotta fabrika, CSI gruplamasında fosil bazlı yakıt olarak adlandırılan karbon içerikli yakıt kullanımını da gerçekleştirmiştir.

Çalışmada alternatif yakıt kullanımının hava emisyonları üzerine etkileri irdelenmiştir. Çalışmada farklı ısıl yer değıştirme oranlarının ve farklı atık tiplerinin benzer fırın koşullarında kullanılması ile oluşan emisyonların değışimleri gözlenmiş bu nedenle de ana parametre ısıl yer değıştirme oranı olarak seçilmiştir. İzlenen parametreler Sürekli Emisyon Ölçüm Sistemi üzerinden online olarak takip edilen emisyon parametreleri ve değerleri olmuştur. Bu parametreleri; toz, CO, NO_x, SO_x, HF, HCl ve TOK olarak sıralayabiliriz. Ayrıca, sürekli ölçümlemesi yapılmayan ancak küresel iklim değışikliğinde etkili bir sera gazı olan CO₂, Türkiye’deki mevzuat gerekliliklerine bağlı olarak hesaplanarak alternatif yakıt kullanımının yakıt kullanımından kaynaklı CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Fabrikada kullanılan yakıt miktarları ve kalorileri fabrikanın işletme raporlarından alınmıştır. Kaloriler fabrikanın kalite kontrol labortuvarlarında yapılan analiz sonuçlarından alınarak üretim birimi tarafından döner fırın tüketim hesaplarında

kullanılmak üzere raporlara işlenmektedir. Tüm hesaplamalar günlük bazda alınmıştır.

Fabrikanın çalışma günlerine ait emisyon parametreleri döner fırın ana bacasında bulunan, sürekli emisyon ölçüm sistemi (SEÖS) üzerinde var olan yazılımın raporlama kısmından alınmıştır. İlgili sistemin Bölüm 5.3’de anlatıldığı şekilde 5 yıl geçerli KGS2 formülü mevcuttur. Bakımları periyodik olarak yaptırılmakta ve KGS3 ölçümleri aylık olarak yapılarak KGS2 formülünün doğruluğu kontrol edilmektedir. Sistemden veriler yarım saatlik ortalamalardan elde edilen günlük ortalama şeklinde ve yönetmelikte belirtildiği şekilde KGS2 formülü uygulanmış ve 273 K, 101,3 kPa, %10 oksijen ve kuru baz olarak standartlaştırılmış olarak alınmıştır.

Atık kullanım verileri Fabrikanın düzenli çalıştığı ve düşük atık kullanımından yüksek kullanıma doğru ilerlediği, tekil atık kullanımı ile karışık oranlarda atık kullanımı da yapılmış olması nedeniyle 2018 yılından seçilmiştir. 2018 yılında Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları emisyon verileri alınmıştır. Dört aya ait veriler genel olarak irdelenmiştir. Ocak ayı atık kullanımı olmadığı günlerin varlığı nedeniyle atıksız karşılaştırmaya da olanak vermiştir. Fabrikaya ait Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ısı yer değiştirme oranları Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Fabrika Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları ısı yer değiştirme oranları

Tarih	Birincil Yakıt (%)	ÖTL (%)	Karışık End.Atık (%)	Fosil Bazlı AF (%)	Atık/Toplam ısı güç (%)
01.01.2018	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
02.01.2018	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
03.01.2018	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
04.01.2018	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
05.01.2018	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06.01.2018	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
07.01.2018	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
08.01.2018	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
09.01.2018	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10.01.2018	96,30	3,70	0,00	0,00	3,70
11.01.2018	90,07	9,93	0,00	0,00	9,93
12.01.2018	90,57	9,43	0,00	0,00	9,43
13.01.2018	90,67	9,33	0,00	0,00	9,33
14.01.2018	90,39	9,61	0,00	0,00	9,61
15.01.2018	93,37	6,63	0,00	0,00	6,63
16.01.2018	93,43	6,57	0,00	0,00	6,57
17.01.2018	97,55	2,45	0,00	0,00	2,45
18.01.2018	93,83	6,17	0,00	0,00	6,17

Tablo 6.1. (Devam) Fabrika Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları ısı yer değiştirme oranları

Tarih	Birincil Yakıt (%)	ÖTL (%)	Karışık End.Atık (%)	Fosil Bazlı AF (%)	Atık/Toplam ısı güç (%)
19.01.2018	93,70	6,30	0,00	0,00	6,30
20.01.2018	91,27	6,50	2,23	0,00	8,73
21.01.2018	94,95	2,66	2,38	0,00	5,05
22.01.2018	99,08	0,00	0,00	0,92	0,92
23.01.2018	97,82	0,00	0,00	2,18	2,18
24.01.2018	92,20	0,00	0,00	7,80	7,80
25.01.2018	96,96	0,00	1,11	1,94	3,04
26.01.2018	93,67	0,00	0,00	6,33	6,33
27.01.2018	95,32	0,00	1,65	3,03	4,68
28.01.2018	98,37	0,00	1,63	0,00	1,63
29.01.2018	97,03	2,67	0,31	0,00	2,97
30.01.2018	90,81	9,19	0,00	0,00	9,19
31.01.2018	92,51	7,49	0,00	0,00	7,49
01.02.2018	90,65	7,45	0,00	1,90	9,35
02.02.2018	92,92	0,00	0,00	7,08	7,08
03.02.2018	94,37	0,00	0,00	5,63	5,63
04.02.2018	97,46	0,00	0,00	2,54	2,54
05.02.2018	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06.02.2018	93,86	6,14	0,00	0,00	6,14
07.02.2018	88,43	10,24	0,00	1,33	11,57
08.02.2018	87,88	10,26	0,00	1,86	12,12
09.02.2018	88,56	10,12	0,00	1,31	11,44
10.02.2018	83,51	10,32	0,00	6,17	16,49
11.02.2018	84,76	10,21	0,00	5,04	15,24
12.02.2018	86,74	8,75	0,00	4,51	13,26
13.02.2018	85,76	2,96	4,57	6,72	14,24
14.02.2018	88,36	2,97	1,91	6,76	11,64
15.02.2018	87,24	7,39	0,00	5,37	12,76
16.02.2018	87,71	9,64	0,00	2,65	12,29
17.02.2018	85,44	9,18	0,00	5,38	14,56
18.02.2018	87,21	8,79	0,00	4,00	12,79
19.02.2018	89,73	8,69	0,00	1,58	10,27
20.02.2018	88,20	8,85	0,00	2,95	11,80
21.02.2018	88,04	8,22	0,00	3,74	11,96
22.02.2018	87,12	8,86	0,00	4,03	12,88
23.02.2018	88,61	8,74	0,00	2,65	11,39
24.02.2018	86,38	8,77	0,00	2,66	11,43
25.02.2018	85,93	8,76	0,00	5,31	14,07
26.02.2018	88,18	9,07	0,00	2,75	11,82
27.02.2018	84,43	10,61	0,00	4,96	15,57
28.02.2018	86,92	9,19	0,00	3,90	13,08
01.04.2018	86,90	13,10	0,00	0,00	13,10
02.04.2018	91,89	8,11	0,00	0,00	8,11
03.04.2018	91,03	8,97	0,00	0,00	8,97
04.04.2018	87,28	12,72	0,00	0,00	12,72
05.04.2018	85,70	14,30	0,00	0,00	14,30

Tablo 6.1. (Devam) Fabrika Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları ısı yer değiştirme oranları

Tarih	Birincil Yakıt (%)	ÖTL (%)	Karışık End.Atık (%)	Fosil Bazlı AF (%)	Atık/Toplam ısı güç (%)
06.04.2018	84,40	15,60	0,00	0,00	15,60
07.04.2018	84,38	15,62	0,00	0,00	15,62
08.04.2018	85,27	14,73	0,00	0,00	14,73
09.04.2018	84,78	15,22	0,00	0,00	15,22
10.04.2018	78,29	11,16	10,55	0,00	21,71
11.04.2018	85,40	14,60	0,00	0,00	14,60
12.04.2018	85,26	14,74	0,00	0,00	14,74
13.04.2018	95,30	4,70	0,00	0,00	4,70
14.04.2018	84,86	15,14	0,00	0,00	15,14
14.04.2018	84,86	15,14	0,00	0,00	15,14
15.04.2018	84,02	15,98	0,00	0,00	15,98
16.04.2018	90,98	9,02	0,00	0,00	9,02
17.04.2018	92,61	7,39	0,00	0,00	7,39
18.04.2018	85,52	14,48	0,00	0,00	14,48
19.04.2018	85,78	14,22	0,00	0,00	14,22
20.04.2018	84,84	15,16	0,00	0,00	15,16
21.04.2018	77,19	17,86	4,95	0,00	22,81
22.04.2018	76,47	17,18	6,35	0,00	23,53
23.04.2018	80,31	15,57	4,12	0,00	19,69
24.04.2018	76,91	22,15	0,94	0,00	23,09
25.04.2018	87,84	8,85	3,31	0,00	12,16
26.04.2018	87,75	10,42	1,83	0,00	12,25
27.04.2018	87,20	12,80	0,00	0,00	12,80
28.04.2018	77,40	17,05	5,55	0,00	22,60
29.04.2018	88,27	9,54	2,19	0,00	11,73
30.04.2018	98,61	1,39	0,00	0,00	1,39
01.08.2018	84,86	15,14	0,00	0,00	15,14
02.08.2018	60,56	39,44	0,00	0,00	39,44
03.08.2018	72,78	27,22	0,00	0,00	27,22
04.08.2018	73,61	26,39	0,00	0,00	26,39
05.08.2018	69,14	30,86	0,00	0,00	30,86
06.08.2018	66,78	33,22	0,00	0,00	33,22
07.08.2018	64,80	35,20	0,00	0,00	35,20
08.08.2018	79,01	20,99	0,00	0,00	20,99
09.08.2018	66,71	33,29	0,00	0,00	33,29
10.08.2018	62,90	37,10	0,00	0,00	37,10
11.08.2018	63,63	36,37	0,00	0,00	36,37
12.08.2018	64,01	35,99	0,00	0,00	35,99
13.08.2018	61,62	34,31	4,07	0,00	38,38
14.08.2018	61,51	38,49	0,00	0,00	38,49
15.08.2018	61,33	36,60	0,00	2,07	38,67
16.08.2018	70,28	24,87	0,00	4,85	29,72
17.08.2018	61,49	25,88	0,00	12,62	38,51
18.08.2018	60,02	32,40	0,00	7,59	39,98
19.08.2018	70,36	29,64	0,00	0,00	29,64
20.08.2018	68,03	30,53	0,00	1,44	31,97

Tablo 6.1. (Devam) Fabrika Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları ısı yer değiştirme oranları

Tarih	Birincil Yakıt (%)	ÖTL (%)	Karışık End.Atık (%)	Fosil Bazlı AF (%)	Atık/Toplam ısı güç (%)
21.08.2018	71,15	27,75	0,00	1,10	28,85
22.08.2018	70,59	27,96	0,00	1,45	29,41
23.08.2018	69,12	30,16	0,00	0,72	30,88
24.08.2018	68,09	29,36	0,00	2,55	31,91
25.08.2018	62,69	35,91	0,00	1,40	37,31
26.08.2018	68,78	29,76	0,00	1,45	31,22
27.08.2018	71,15	28,85	0,00	0,00	28,85
28.08.2018	69,94	25,70	0,00	4,37	30,06
29.08.2018	67,98	27,44	0,00	4,58	32,02
30.08.2018	70,51	27,30	0,00	2,19	29,49
31.08.2018	72,96	23,36	0,00	3,69	27,04

Çalışmaya konu fabrika, Ocak ayı içerisinde tüm ay boyunca çalışmıştır. Birincil yakıt (konvansiyonel yakıt) olarak petrokok kullanımı gerçekleştirmiştir. Bunun yanı sıra alternatif yakıt olarak bütün ÖTL, Karışık Endüstriyel Atık ve Fosil Bazlı Yakıt kullanmıştır. Fabrika'nın 2018 yılı Ocak ayına ait fırın toplam ısı gücüne karşılık toplam yakıt ısı güç dağılımı ve kullanılan atıklar günlük olarak Tablo 6.2'de verilmiştir. Döner fırında klinker üretmek için gerekli olan termal enerjinin elde edilmesi için kullanılan yakıtların kalorileri sonucu açığa çıkardıkları enerjinin toplam termal enerji içerisindeki dağılımları da Tablo 6.1'de gösterilmiştir. Birincil yakıtın yüzdesinin 100 olduğu günlerde atık kullanımı gerçekleştirilmemiştir. Fabrika, Ocak 2018 ayında 356 ton bütün ÖTL, 84,66 ton karışık endüstriyel atık (KEA) ve 64 ton fosil bazlı yakıtı (FBA) alternatif yakıt olarak döner fırında beraber yakma kapsamında değerlendirerek enerji geri kazanımı sağlamıştır. Karışık endüstriyel atık ve fosil bazlı alternatif yakıt kullanım miktarları oldukça düşük gerçekleşmiştir.

Fabrika Şubat 2018 ayında tüm günlerde çalışmış yalnızca bir gün alternatif yakıt kullanımı gerçekleştirmemiş geri kalan günlerde en düşük %, 2,54 en yüksek %15,57 oranlarına denk gelecek şekilde alternatif yakıt kullanımı gerçekleştirmiştir. Tablo 6.1'de görülen ısı yer değiştirmelere ulaşmak için fabrika ay boyunca toplamda 692 ton ÖTL, 24,06 ton KEA ve 380 ton FBA kullanmıştır. Şubat ayında karışık endüstriyel atık kullanımı çok az miktarda olmakla birlikte üç tip atığın bir arada kullanıldığı ay olarak karşımıza çıkmıştır. Nisan 2018 ayında fabrika, atık ısı

yer değiştirme oranlarını yükseltmeye başlamıştır ve %23 yer değiştirme oranına ulaşmıştır. Nisan ayında da kullanılan atık tipleri bütün ÖTL ve KEA olmuştur. Nisan ayı boyunca FBA kullanımı gerçekleştirilmemiştir. Ay boyunca toplamda kullanılan bütün ÖTL miktarı 877 ton ve KEA miktarı 95,82 ton'dur.

Fabrika Ağustos ayı içerisinde tüm ay boyunca çalışmıştır. Birincil yakıt (konvansiyonel yakıt) olarak petrokok ve kömür kullanımı gerçekleştirmiştir. Bunun yanı sıra alternatif yakıt olarak bütün ve kırılmış ÖTL, Karışık Endüstriyel Atık ve Fosil Bazlı Yakıt kullanmıştır. Fabrika'nın 2018 yılı Ağustos ayına ait fırın toplam ısıl gücüne karşılık toplam yakıt ısıl güç dağılımı ve kullanılan atıklar günlük olarak Tablo 6.1'de verilmiştir. Fabrika Ağustos ayında tüm günlerde atık kullanımı gerçekleştirmiştir. Ağustos 2018'de 1.356 ton bütün ÖTL, 493 ton kırılmış ÖTL, 6 ton karışık endüstriyel atık ve 132 ton fosil bazlı yakıtı, alternatif yakıt olarak döner fırında beraber yakma kapsamında değerlendirerek enerji geri kazanım sağlamıştır. Ağustos ayında yüksek oranlarda ısıl yer değiştirme gerçekleşmiştir, bu yüksek ısıl yer değiştirmelerin etkileri izlenebilecektir.

6.1 Alternatif Yakıt Kullanımının Toz Emisyonları Üzerine Etkisi

Çalışmada seçilen fabrikaya ait fırın besleme tonajı ton/saat olarak, baca gazı sıcaklığı derece (°C) olarak ve oksijen değeri yüzde (%) olarak sürekli emisyon ölçüm sisteminden yarım saatlik verilerin günlük ortalamaları olarak alınmıştır. Emisyonların oluşmasında fırının çalışma şartları oldukça önemlidir. Tablo 6.2 fırın şartları, ısıl yer değiştirme ve toz emisyonlarını göstermektedir. Aynı zamanda Tablo 6.2'de kullanılan atık tiplerinin hangileri olduğu da belirtilmiştir.

Tablo 6.2 Ocak, şubat, Nisan, Ağustos ayları yakıt ısıl güç, toz emisyonu ve fırın parametreleri

Tarih	Kullanılan Atıklar	Atık Isıl Güç (%)	Toz (mg/Nm ³ , %10 O ₂)	O ₂ (%)	Fırın Besleme Tonajı (t/s)	Sıcaklık (°C)	CO (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
1 Ocak	-	0,00	ÖA*	10,8	160,4	76,0	1.671,6
2 Ocak	-	0,00	ÖA	10,9	160,6	79,0	2.508,2
3 Ocak	-	0,00	5,6	10,9	159,1	72,3	2.780,1
4 Ocak	-	0,00	5,7	10,8	157,5	70,7	3.570,2
5 Ocak	-	0,00	6,1	11,0	158,0	75,9	1.973,6
6 Ocak	-	0,00	6,6	11,1	159,1	76,9	1.272,7

Tablo 6.2. (Devam) Ocak, Şubat, Nisan, Ağustos ayları yakıt ısıl güç, toz emisyonu ve fırın parametreleri

Tarih	Kullanılan Atıklar	Atık Isıl Güç (%)	Toz (mg/Nm ³ , %10 O ₂)	O ₂ (%)	Fırın Besleme Tonajı (t/s)	Sıcaklık (°C)	CO (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
7 Ocak	-	0,00	6,3	10,9	158,0	76,0	2.010,0
8 Ocak	-	0,00	6,4	11,1	159,3	76,4	1.415,6
9 Ocak		0,00	6,3	10,9	159,2	75,8	2.462,9
10 Ocak	ÖTL	3,70	6,3	10,8	157,7	75,4	3.939,8
11 Ocak	ÖTL	9,93	6,7	10,9	158,8	76,5	3.731,9
12 Ocak	ÖTL	9,43	6,3	10,8	156,8	73,7	5.635,6
13 Ocak	ÖTL	9,33	6,2	10,7	157,1	77,7	3.969,6
14 Ocak	ÖTL	9,61	5,8	10,8	159,9	74,7	4.488,2
15 Ocak	ÖTL	6,63	5,7	10,6	160,9	75,6	4.278,2
16 Ocak	ÖTL	6,57	5,8	10,0	159,5	79,1	6.537,8
17 Ocak	ÖTL	2,45	6,3	9,2	157,7	85,6	5.619,3
18 Ocak	ÖTL	6,17	6,3	9,7	157,1	69,7	5.191,1
19 Ocak	ÖTL	6,30	6,1	10,2	160,6	75,8	4.273,6
20 Ocak	ÖTL+KEA	8,73	6,1	10,4	158,2	75,7	4.427,6
21 Ocak	ÖTL+KEA	5,05	6,7	10,2	160,0	76,4	4.112,4
22 Ocak	FBA	0,92	6,2	10,1	163,3	68,7	3.169,7
23 Ocak	FBA	2,18	7,8	9,8	161,1	85,1	3.405,2
24 Ocak	FBA	7,80	7,2	10,3	159,1	79,0	3.372,3
25 Ocak	KEA+FBA	3,04	6,6	10,3	159,5	70,2	4.442,4
26 Ocak	FBA	6,33	6,8	10,2	155,3	73,5	5.895,1
27 Ocak	KEA+FBA	4,68	7,7	10,4	155,7	76,3	3.136,0
28 Ocak	KEA	1,63	7,6	10,5	157,1	75,5	3.102,7
29 Ocak	ÖTL+KEA	2,97	7,5	10,9	159,5	72,5	3.949,5
30 Ocak	ÖTL	9,19	7,9	10,6	163,5	73,2	3.505,4
31 Ocak	ÖTL	7,49	8,7	10,4	159,2	76,3	4.571,5
1 Şubat	ÖTL+FBA	9,35	9,4	10,3	159,8	76,7	2.445,7
2 Şubat	FBA	7,08	9,7	10,3	159,1	76,1	3.606,5
3 Şubat	FBA	5,63	9,6	10,3	159,3	75,6	3.367,1
4 Şubat	FBA	2,54	10,5	10,4	160,6	76,0	2.564,6
5 Şubat	-	0,00	11,3	11,2	159,7	74,9	1.858,0
6 Şubat	ÖTL	6,14	11,2	10,9	159,4	77,3	2.823,0
7 Şubat	ÖTL+FBA	11,57	11,2	10,8	158,8	78,1	3.580,0
8 Şubat	ÖTL+FBA	12,12	11,1	10,8	159,4	74,2	3.433,0
9 Şubat	ÖTL+FBA	11,44	11,3	10,9	158,5	75,1	3.983,4
10 Şubat	ÖTL+FBA	16,49	12,3	10,6	162,3	75,2	4.199,0
11 Şubat	ÖTL+FBA	15,24	12,6	10,6	159,8	76,2	4.986,8
12 Şubat	ÖTL+FBA	13,26	13,2	10,8	155,6	74,8	3.710,5
13 Şubat	ÖTL+FBA+KEA	14,24	13,5	10,6	157,8	75,8	4.128,7
14 Şubat	ÖTL+FBA+KEA	11,64	9,7	10,8	156,2	72,5	4.132,5
15 Şubat	ÖTL+FBA	12,76	5,5	10,8	156,8	73,3	4.478,2
16 Şubat	ÖTL+FBA	12,29	5,6	10,9	158,5	73,5	4.188,3
17 Şubat	ÖTL+FBA	14,56	5,6	10,9	156,6	74,4	3.809,3
18 Şubat	ÖTL+FBA	12,79	5,6	10,9	158,2	72,4	3.516,9
19 Şubat	ÖTL+FBA	10,27	6,0	10,9	157,7	73,6	4.356,0
20 Şubat	ÖTL+FBA	11,80	6,0	10,8	157,9	74,5	5.125,2
21 Şubat	ÖTL+FBA	11,96	6,0	10,8	156,8	75,5	6.161,4

Tablo 6.2. (Devam) Ocak, Şubat, Nisan, Ağustos ayları yakıt ısıl güç, toz emisyonu ve fırın parametreleri

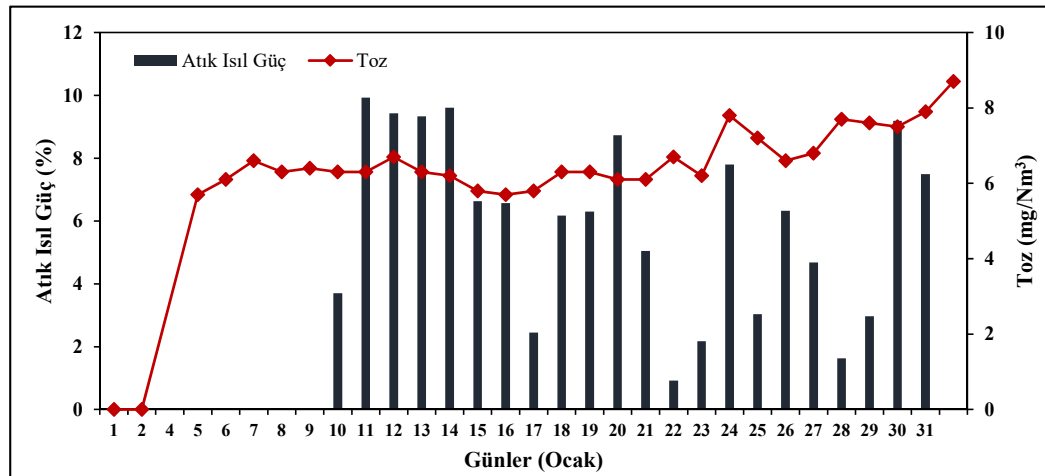
Tarih	Kullanılan Atıklar	Atık Isıl Güç (%)	Toz (mg/Nm ³ , %10 O ₂)	O ₂ (%)	Fırın Besleme Tonajı (t/s)	Sıcaklık (°C)	CO (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
22 Şubat	ÖTL+FBA	12,88	6,3	10,8	157,5	76,1	5.772,8
23 Şubat	ÖTL+FBA	11,39	6,9	10,4	157,5	80,6	5.687,4
24 Şubat	ÖTL+FBA	11,43	6,7	10,6	155,3	80,9	4.894,0
25 Şubat	ÖTL+FBA	14,07	6,0	11,1	157,2	69,5	4.713,2
26 Şubat	ÖTL+FBA	11,82	8,9	11,0	158,2	74,3	5.560,3
27 Şubat	ÖTL+FBA	15,57	19,7	11,1	153,3	77,1	3.305,5
28 Şubat	ÖTL+FBA	13,08	9,6	11,3	150,2	69,6	3.608,5
1 Nisan	ÖTL	13,10	8,3	10,2	158,1	77,3	6.397,4
2 Nisan	ÖTL	8,11	8,4	10,5	157,4	73,3	6.890,2
3 Nisan	ÖTL	18,97	8,3	10,6	159,9	76,5	4.333,6
4 Nisan	ÖTL	12,72	8,3	10,6	157,6	76,7	3.660,9
5 Nisan	ÖTL	14,30	8,6	10,4	157,0	78,6	4.147,3
6 Nisan	ÖTL	15,60	9,5	9,9	157,1	85,8	5.001,4
7 Nisan	ÖTL	15,62	8,8	10,3	159,5	79,3	5.147,9
8 Nisan	ÖTL	14,73	10,3	10,1	153,5	85,1	5.069,1
9 Nisan	ÖTL	15,22	10,1	10,3	157,1	81,0	5.850,0
10 Nisan	ÖTL+KEA	21,71	10,5	10,1	151,1	83,1	6.657,9
11 Nisan	ÖTL	14,60	11,9	9,2	150,5	94,5	6.669,5
12 Nisan	ÖTL	14,74	10,3	10,5	149,2	82,0	6.149,3
13 Nisan	ÖTL	4,70	10,1	10,3	151,7	84,0	6.688,6
14 Nisan	ÖTL	15,14	9,7	10,3	158,6	80,7	4.993,7
15 Nisan	ÖTL	15,98	9,2	10,3	162,5	78,8	4.820,6
16 Nisan	ÖTL	9,02	11,1	9,7	165,6	90,5	5.599,5
17 Nisan	ÖTL	7,39	10,8	10,5	164,9	77,5	6.581,3
18 Nisan	ÖTL	14,48	10,3	10,5	161,6	80,5	7.775,6
19 Nisan	ÖTL	14,22	11,7	9,5	166,0	91,3	4.656,8
20 Nisan	ÖTL	15,16	10,2	10,6	165,2	77,2	5.173,0
21 Nisan	ÖTL+KEA	22,81	11,3	9,9	165,3	85,3	6.297,5
22 Nisan	ÖTL+KEA	23,53	10,8	10,4	164,6	80,3	6.568,7
23 Nisan	ÖTL+KEA	16,69	11,9	9,6	160,8	90,7	7.308,9
24 Nisan	ÖTL+KEA	23,09	10,7	10,3	164,9	82,2	6.177,6
25 Nisan	ÖTL+KEA	12,16	12,6	9,7	166,3	96,0	7.270,2
26 Nisan	ÖTL+KEA	12,25	13,1	10,1	162,4	100,7	5.689,6
27 Nisan	ÖTL	12,80	13,4	9,5	161,9	104,0	5.689,6
28 Nisan	ÖTL+KEA	22,60	12,5	10,6	166,3	85,5	12.634,5
29 Nisan	ÖTL+KEA	11,73	12,5	10,0	163,1	94,0	13.782,4
30 Nisan	ÖTL	1,39	13,7	9,5	164,0	96,0	5.886,9
1 Ağustos	ÖTL	15,14	15,7	9,0	154,4	116,0	3.198,7
2 Ağustos	ÖTL	39,44	14,5	9,7	158,5	104,2	3.231,5
3 Ağustos	ÖTL	27,22	14,4	9,6	160,2	102,2	3.450,7
4 Ağustos	ÖTL	26,39	14,6	9,6	158,2	102,7	4.359,3
5 Ağustos	ÖTL	30,86	14,7	9,6	162,8	99,8	3.859,3
6 Ağustos	ÖTL	33,22	15,4	9,6	165,8	99,6	4.557,0
7 Ağustos	ÖTL	35,20	15,8	9,7	164,1	96,5	5.665,2
8 Ağustos	ÖTL	20,99	15,4	10,6	160,7	89,2	5.658,8
9 Ağustos	ÖTL	33,29	16,4	9,9	159,9	94,2	5.564,2

Tablo 6.2. (Devam) Ocak, Şubat, Nisan, Ağustos ayları yakıt ısıl güç, toz emisyonu ve fırın parametreleri

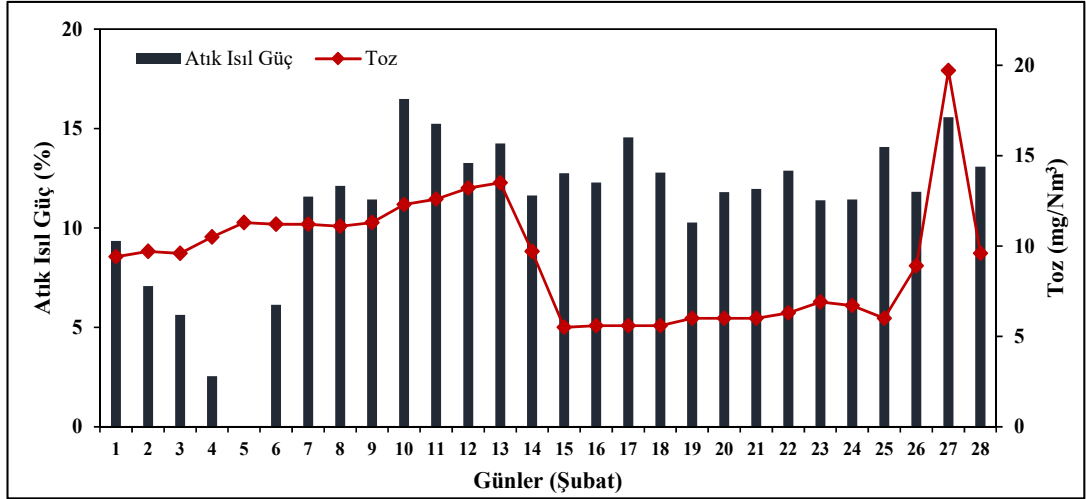
Tarih	Kullanılan Atıklar	Atık Isıl Güç (%)	Toz (mg/Nm ³ , %10 O ₂)	O ₂ (%)	Fırın Besleme Tonajı (t/s)	Sıcaklık (°C)	CO (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
10 Ağustos	ÖTL	37,10	17,9	9,7	163,3	96,2	4.963,9
11 Ağustos	ÖTL	36,37	17,7	9,7	161,7	96,0	4.783,0
12 Ağustos	ÖTL	35,99	18,8	10,0	160,4	96,5	5.275,0
13 Ağustos	ÖTL+KEA	38,38	18,5	9,8	160,3	95,2	5.009,3
14 Ağustos	ÖTL	38,49	16,9	10,4	160,0	93,7	6.123,3
15 Ağustos	ÖTL+FBA	38,67	11,2	9,7	160,8	94,4	5.984,4
16 Ağustos	ÖTL+FBA	29,72	8,3	10,5	158,9	88,7	5.796,1
17 Ağustos	ÖTL+FBA	38,51	8,5	9,6	160,3	96,8	4.944,8
18 Ağustos	ÖTL+FBA	39,98	8,3	9,5	162,8	96,3	4.621,1
19 Ağustos	ÖTL	29,64	8,2	10,2	163,5	89,6	4.488,3
20 Ağustos	ÖTL+FBA	31,97	8,6	9,3	164,3	97,5	5.478,9
21 Ağustos	ÖTL+FBA	28,85	9,6	9,3	162,7	100,9	4.854,2
22 Ağustos	ÖTL+FBA	29,41	9,7	9,2	164,5	99,2	5.091,6
23 Ağustos	ÖTL+FBA	30,88	9,2	10,1	164,0	90,7	5.501,2
24 Ağustos	ÖTL+FBA	31,91	9,8	9,2	162,0	103,3	6.271,0
25 Ağustos	ÖTL+FBA	37,31	9,7	9,2	165,9	99,8	5.188,3
26 Ağustos	ÖTL+FBA	31,22	9,7	9,9	163,0	95,3	5.809,0
27 Ağustos	ÖTL	28,85	10,1	9,2	163,2	100,8	4.794,0
28 Ağustos	ÖTL+FBA	30,06	9,9	9,4	163,5	99,9	3.764,5
29 Ağustos	ÖTL+FBA	32,02	11,2	10,7	161,3	103,3	5.512,8
30 Ağustos	ÖTL+FBA	29,49	12,4	11,6	161,2	103,4	6.312,8
31 Ağustos	ÖTL+FBA	27,04	13,1	11,6	154,4	103,4	6.007,9

*ÖA: Ölçüm alınmadı

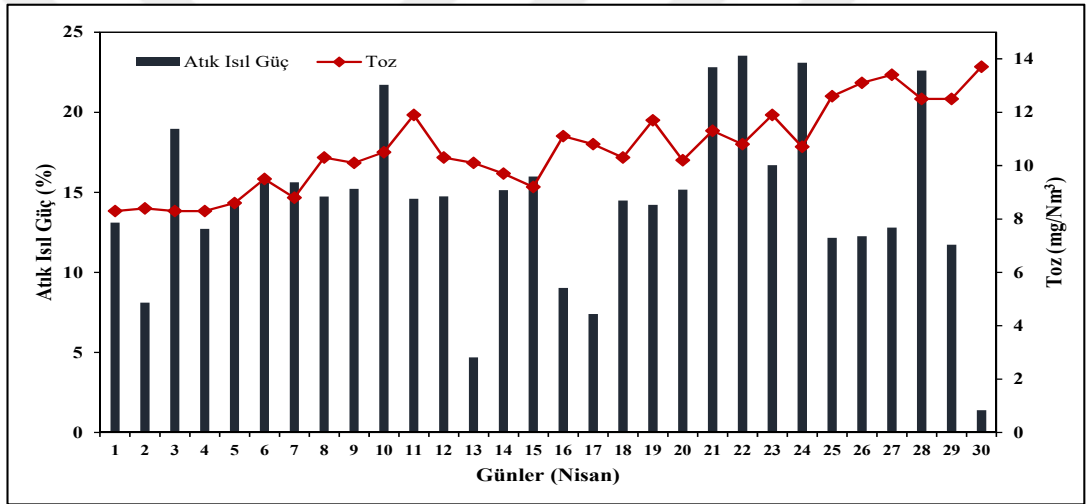
Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'den elde edilen veriler ile Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos aylarına ait toz emisyonlarının atık ısıl yer değiştirme oranları ile ilişkisi sırasıyla Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 ile gösterilmiştir.



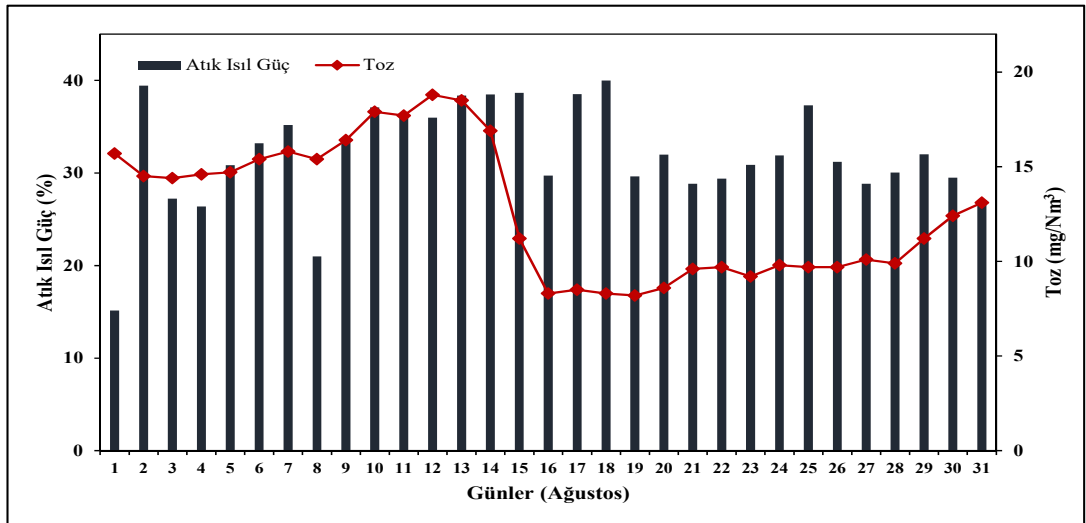
Şekil 6.1. Ocak ayı atık ısıl yer değiştirme oranları ve toz emisyonları arasındaki ilişki



Şekil 6.2. Şubat ayı atık ısı yer değiştirme oranları ve toz emisyonları arasındaki ilişki



Şekil 6.3. Nisan ayı atık ısı yer değiştirme oranları ve toz emisyonları arasındaki ilişki

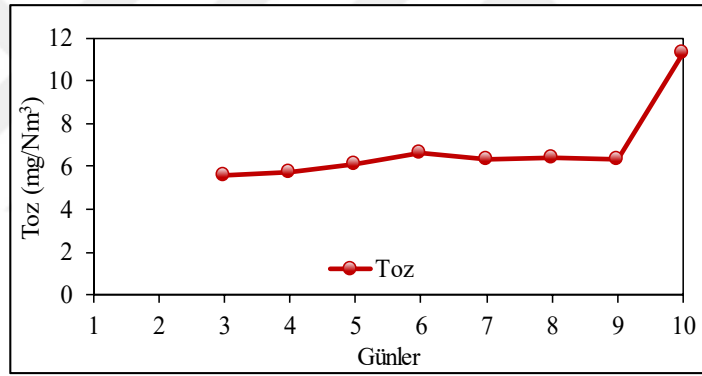


Şekil 6.4. Ağustos ayı atık ısı yer değiştirme oranları ve toz emisyonları arasındaki ilişki

Tablo 6.1’de verilen kullanımlar ve Tablo 6.2’de verilen emisyonlar çerçevesinde değerlendirmeler öncelikli olarak atık yakılmayan dönemin kendi arasında kıyaslanması ile yapılmıştır. Fırının kendi özgün şartlarında yalnızca konvansiyonel yakıt kullanımı ile fırın koşulları ve emisyonlarının değişkenliği, atık yakılan dönemin kıyaslanmasında değişimlerin atık kaynaklı mı yoksa yakıt kaynaklı mı olduğuna dair bilgi vermektedir.

6.1.1. Atık yakılmayan dönemde toz emisyonlarının incelenmesi

Çalışmada seçilen fabrikada Ocak ayının ilk dokuz günü ile 5 Şubat günü atık kullanımı gerçekleşmemiştir. Çalışmanın bu noktasında atık kullanımı olmayan dönemde toz emisyonları incelenmiştir ve elde edilen değişimler Şekil 6.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Atık yakılmayan dönem toz emisyonu

Fabrikada ilk iki gün toz emisyonları ölçümü alınamamıştır bu nedenle ilk iki gün toz emisyonlarında değerlendirmeye katılmamıştır. Şekil 6.5’te görülen 10 numaralı değer 5 Şubat tarihine aittir.

Atık yakılmayan dönemde fırın tonajı 155-160 ton/gün arasında, oksijen yüzde 10,8 ila 11 arasında değişmiş ve sıcaklık 76°C olarak belirlenmiştir. Fırın koşullarının birbiri ile oldukça benzer olduğu bugünlerde toz emisyonları, oksijen ve CO emisyonlarında yaşanan değişimlerden bağımsız olarak değişmiştir.

5 Ocak’ta 6,1 mg/Nm³ değerine sahip olan toz emisyonları 6 Ocak’ta 6,6 mg/Nm³ değerine yükselmiştir. 7 Ocak’ta toz emisyonları 6 Ocak’a göre düşüş göstermiş ancak 5 Ocak tarihine göre yine yüksek seyretmiştir. 8 Ocak’taki toz emisyonu hem

5 Ocak'tan hem de 7 Ocak'tan yüksektir ancak 6 Ocak tarihine göre düşüktür. 9 Ocak'ta toz emisyonu 7 Ocak toz emisyonu ile aynı değerde olup 6,3 mg/Nm³ olarak meydana gelmiştir. En düşük toz emisyonu 6,1 mg/Nm³ ile 5 Ocak tarihinde gerçekleşmiştir.

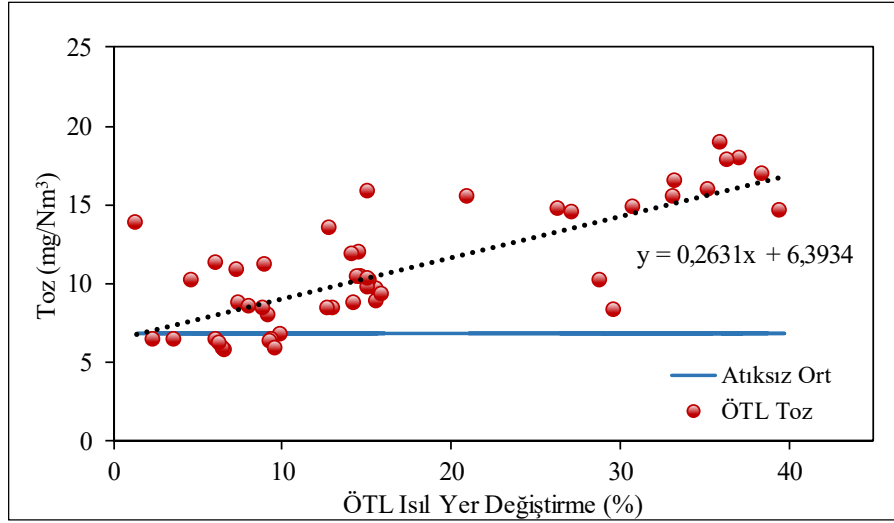
Atık yakılmamasına rağmen fırın dinamiklerine bakıldığında CO ve toz değerlerinde artış kaydedilmiş ve Ocak ayı ortalaması 6,14 mg/Nm³ ortalamaya ulaşmıştır. 5 Şubat tarihinde de fırında yanma koşulları Ocak ayının ilk 9 günü ile aynı özelliklere sahiptir. Atık yakılmamasına rağmen ve koşulları Ocak ayı ile aynı olmasına rağmen 5 Şubat günü toz emisyonları 11,3 mg/Nm³ değerine yükselmiştir. Atık yakılmayan günlerde yakılan konvansiyonel yakıtlar da birbirleri ile aynı özellikte ve tipte yakıtlardır. Bu nedenle toz emisyonlarında yaşanan yükselme ana bacada bulunan torbalı filtre performansına bağlanabilir.

6.1.2. Ömrünü tamamlamış lastik kullanımı ve toz emisyonu ilişkisi

Çalışmaya konu olan fabrikada en çok kullanılan atık tipi ömrünü tamamlamış lastik olmuştur. Diğer atıklara oranla daha kolay ulaşılabilen bir atık olması ÖTL'yi ön plana çıkarmıştır. Ayrıca, değişmeyen kimyasal bileşenleri, kalorisi ve ortalama ağırlığı nedeniyle beslenmesi en kolay olan atıklardan biri olarak karşımıza çıktığından fabrika ağırlıklı olarak bu atığı beslemeyi tercih etmiştir. Fabrikada Ocak, Şubat ve Nisan aylarında yalnızca bütün ÖTL kullanılırken Ağustos ayında TDF (parçalanmış lastik) kullanımı da gerçekleşmiştir.

Atık yakılan dönemlerde en çok kullanılan atık olan ÖTL 120 günlük veri seti içerisinde 49 gün boyunca tek başına kullanılmıştır. Bütün ve parçalanmış halde de olsalar ÖTL'ler aynı besleme noktasından fırına beslenmiştir.

Tablo 6.1 ve Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'ten görülebileceği üzere toz emisyonları ısı yer değiştirme oranları ile paralel bir değişiklik göstermemiştir. Ocak ayında gerçekleşen düşük ısı yer değiştirme oranlarında toz emisyonları atık yakılmayan döneme benzer bir değişim sergilemiştir. Ancak, Şubat ayı ile birlikte artan ısı yer değiştirme oranlarında toz emisyonları da artış göstermeye başlamıştır. Şekil 6.6 ÖTL kullanımı ile değişen toz emisyonlarının atık yakılmayan dönemdeki ortalama toz emisyonuna göre dağılımını göstermektedir.



Şekil 6.6. ÖTL ısıl yer değiştirme oranları ile toz emisyonları ilişkisi

Fabrikada çalışmaya esas veriler içerisinde atık kullanılmayan 10 günlük dönemin toz emisyonları ortalaması $6,80 \text{ mg/Nm}^3$ olarak, ÖTL kullanılan 49 günlük dönemin toz emisyonları ortalaması ise %58 oranında bir artış ile $10,8 \text{ mg/Nm}^3$ olarak gerçekleşmiştir.

Ocak ayında fabrika 12 gün boyunca fırına alternatif yakıt olarak yalnızca ÖTL beslemiştir. En düşük ısıl yer değiştirme oranı %2,5 iken en yüksek ısıl yer değiştirme %9,9 olmuştur. Ulaşılan ısıl yer değiştirmeye karşılık toz emisyonları $5,7$ ila $8,7 \text{ mg/Nm}^3$ değerlerinde değişmiştir.

Atık kullanılmayan en çok sayıda gün Ocak ayında görülmüştür. Ocak ayında atık yakılmayan günlerin toz ortalaması $6,14$ olarak karşımıza çıkmıştır. Ocak ayı ÖTL kullanımı ile meydana gelen toz emisyonları ortalaması ise $6,5 \text{ mg/Nm}^3$ olmuştur. Her ne kadar atıksız ve atıklı ortalamalar tüm kullanımlara oranla düşük olsa da ÖTL kullanımı ile Ocak ayı içerisinde toz emisyonları %5,5 oranında artış göstermiştir.

Şubat ayında fabrika sadece bir gün boyunca fırına yalnızca ÖTL beslemiştir. %6 oranındaki bu ısıl yer değiştirmede toz emisyonu $11,2 \text{ mg/Nm}^3$ değerine yükselmiştir. Şubat ayında yalnızca tek gün atık kullanımı gerçekleşmemiştir. Atık yakılmayan gün ile atık yakılan günde oluşan toz emisyonları aynı olmuştur. Atık yakılmayan tüm gün toz emisyonlarına göre ise Şubat ayında yalnızca ÖTL yakılan günde toz emisyonu %64 oranında artış göstermiştir. Şubat ayı ÖTL yakılan gün ile Ocak ayı atık yakılan günlerde fırın koşulları birbirine benzer olarak gerçekleşmiştir.

Nisan ayında fabrika 21 gün boyunca fırına yalnızca ÖTL beslemesi gerçekleştirmiştir. Isıl yer değiştirme oranları %1,9 ile %15,9 oranı arasında değişiklik göstermiş ortalaması %12,28 olarak gerçekleşmiştir. Nisan ayında yalnızca ÖTL kullanımı gerçekleşen günler içerisinde toz emisyonları 8,3 ile 13,7 mg/Nm³ değerleri arasında değişmiş ve ortalaması 10,1 olarak gerçekleşmiştir. ÖTL yakılan günlerin tamamında toz emisyonu ortalama değerin üzerinde gerçekleşmiştir.

En yüksek toz emisyonları Ağustos ayı içerisinde görülmüştür. Aynı zamanda Ağustos ayı en yüksek ısıl yer değiştirmeye ulaşılan en düşük oksijen seviyelerinde çalışılan dönemdir. Ağustos ayında fabrika 15 gün boyunca fırına yalnızca ÖTL beslemiştir. Bu 15 günlük periyotta ısıl yer değiştirme oranları %15 ile %39,4 oranında değişirken toz emisyonları 8,2 ile 18,8 mg/Nm³ değerleri arasında değişmiştir. Ağustos ayı toz emisyonu ortalaması 15,1 mg/Nm³ olarak gerçekleşmiştir.

En yüksek toz emisyonları Ağustos ayında gözüktüğünden, toz emisyonlarındaki değişimler Ağustos ayında yüksek toz emisyonlarının gerçekleştiği günlere ait olan ısıl yer değiştirme ile fırın koşullarını gösteren Tablo 6.3 ile irdelenmiştir.

Tablo 6.3'ten görüleceği gibi Ocak ayında yalnızca ÖTL kullanılan döneme oranla toz emisyonları artış göstermiştir. Ocak, Şubat ve Nisan aylarında Tablo 6.1'den görüleceği üzere %10'dan yüksek oksijen miktarları ile çalışılmış ortalama oksijen seviyesi %10,3, ısıl yer değiştirme oranı en fazla %15 olarak görülmüştür. Baca gazı çıkış sıcaklığı ortalama 80°C olmuştur. Ağustos ayında ise 6-27 günleri arasında en yüksek ısıl yer değiştirme oranları gerçekleştirmiş ve bu günlerde oksijen seviyesi %10 altında kalmış, ortalama %9,9 oksijen seviyesinde çalışılmıştır. 7-10-11 Ağustos tarihlerinde oksijen seviyeleri ve baca gazı çıkış sıcaklıkları aynı olan günlere bakıldığında %35, %36 ve %37 oranlarında ısıl yer değiştirme oranları gerçekleşirken toz miktarlarının da artış göstererek sırasıyla 15,8, 17,7 ve 17,9 mg/Nm³ miktarlarına geldiği görülmüştür. Ağustos ayında diğer aylardan farklı olarak ÖTLK beslemesi de gerçekleştirilmiştir. ÖTLK'nın kullanılması ile toz emisyonu oluşumunda ÖTL'nin etkisi artış göstermiştir.

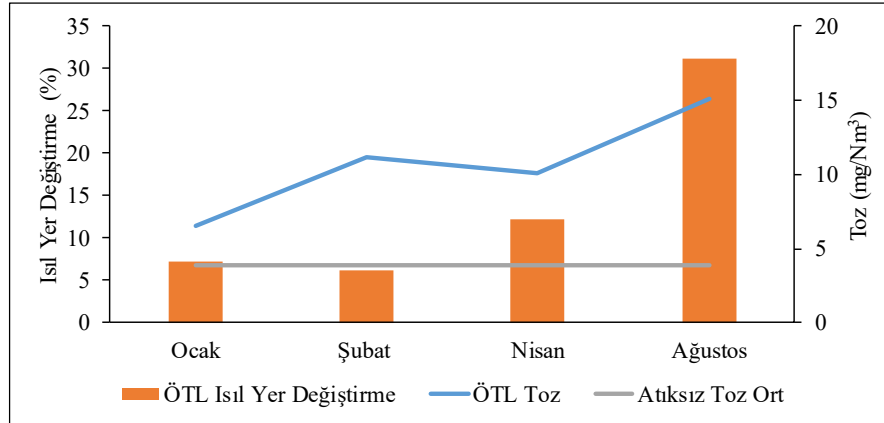
Tablo 6.3. Ağustos ayı ÖTL ve Toz emisyonları değişimi tablosu

Tarih	Toz (mg/Nm ³ %10O ₂)	Atık Isıl Güç (%)	O ₂ (%)	Fırın Besleme Tonajı (t/s)	Sıcaklık (°C)
06.08.2018	15,4	33,220	9,6	165,8	99,6
07.08.2018	15,8	35,201	9,7	164,1	96,5
08.08.2018	15,4	20,987	10,6	160,7	89,2
09.08.2018	16,4	33,285	9,9	159,9	94,2
10.08.2018	17,9	37,096	9,7	163,3	96,2
11.08.2018	17,7	36,365	9,7	161,7	96,0
12.08.2018	18,8	35,991	10,0	160,4	96,5
14.08.2018	16,9	38,487	10,4	160,0	93,7
19.08.2018	8,2	29,644	10,2	163,5	89,6
27.08.2018	10,1	28,853	9,2	163,2	100,8

Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos aylarına ait ortalama toz emisyonları, ortalama ısıl yer değiştirme değerleri atıksız toz ortalama değerleri ile kıyaslanarak Şekil 6.7’de verilmiştir.

Tüm verilere bakıldığında atık yakılmasının oksijen seviyesini düşürdüğü ve baca gazı çıkış sıcaklığını arttırdığını ve bu nedenle de toz emisyonlarında artış meydana geldiği sonucuna varılabilir.

Toz emisyonlarında artış yaşanmaması için yüksek ısıl yer değiştirme oranı gerçekleştirirken oksijen seviyesini %10,2 oranında tutarak yanma şartlarını iyileştirmek ve baca gazı sıcaklığını düşük tutmak gerektiği fabrika özelinde belirlenmiştir. Baca gazı sıcaklığı artışı torbalı filtre performansında etkili olduğundan toz emisyonu kontrolünde baca gazı sıcaklığını ayarlamanın önemi ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.7. Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları ortalama toz emisyonu ile atıksız toz emisyonu ortalama değeri karşılaştırması

Carrasco ve diğeri 2007 yılında yaptıkları çalışmada ÖTL kullanımının toz emisyonları üzerinde %7 artışa neden olduğunu söylemişlerdir. Bu çalışmada yalnızca ÖTL kullanılan periyod değerlendirildiğinde atık kullanımının toz emisyonlarındaki artışı Carrasco ve diğ., 2007 desteklemiş ancak oran olarak %58 olarak gerçekleşmiştir.

6.1.3. Karışık endüstriyel atık kullanımı ve toz emisyonu ilişkisi

Çalışmaya konu fabrikada Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos aylarında toplamda 210,54 ton KEA kullanımı olmuştur. Karışık endüstriyel atık çalışmaya konu olan 120 gün içerisinde yalnızca 28 Ocak tarihinde tek başına kullanılmıştır. 28 Ocak tarihinde %1,63 ısı yer değiştirme oranına ulaşmak için 15 ton KEA beslemesi yapılmıştır. Bu sırada fırında %10,5 oksijen varken baca gazı çıkış sıcaklığı da 75,6°C olarak oluşmuştur.

Tüm bu fırın koşullarında ve kaloriye toz emisyonu 7,6 mg/Nm³ olarak okunmuştur. Ocak ayı atık yakılmayan günlerin ortalaması 6,14 mg/Nm³ olarak gerçekleştiğinden %23,78 oranında bir artış meydana geldiği söylenebilir.

Ancak, önceki bölümde bahsedildiği gibi atık yakılmayan tüm günlerin ortalaması 6,8 mg/Nm³'tür. Bu atık özelinde çalışmada bu veri yalnızca bir tane olduğundan ve sadece Ocak ayı içerisinde kullanıldığından yalnızca Ocak ayı dinamikleri arasında değerlendirilmesi daha doğru olarak görülmüş ve 6,8 mg/Nm³ değeri değil 6,14 mg/Nm³ değeri dikkate alınmıştır. Bu nedenle KEA'nın tek başına kullanımı ile toz emisyonlarının %24'e yakın bir oranda arttığı kabul edilebilir.

28 Ocak günü dışında KEA'nın tüm kullanımları ÖTL ve/veya FBA ile birlikte olmuştur. Bu nedenle bu başlıkta tek bir değer verilebilmiştir. Ancak, atıkların karışık kullanımları 6.1.5 başlığında ayrıca değerlendirilecektir. KEA yapılan hiçbir çalışmada kullanılan bir atık olmadığından literatür karşılaştırması yapılamamıştır.

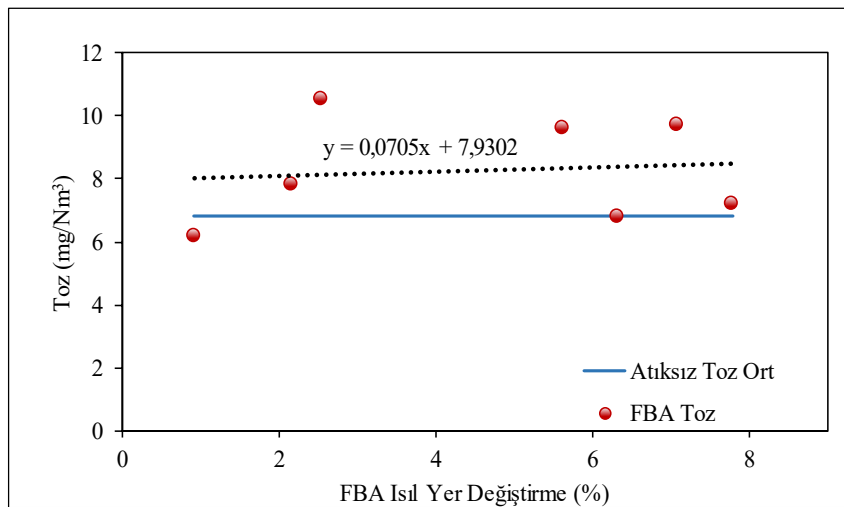
6.1.4. Fosil bazlı atık kullanımı ve toz emisyonu ilişkisi

Fosil bazlı atık çalışmaya konu fabrikada Ocak, Şubat ve Ağustos aylarında toplam olarak 576 ton kullanılmıştır. Nisan ayında fosil bazlı atık kullanımı gerçekleşmemiştir. Fosil bazlı atık Ocak ayında 22 Ocak, 23 Ocak, 24 Ocak ve 26

Ocak tarihleri olmak üzere 4 gün Şubat ayında ise 2 Şubat, 3 Şubat ve 4 Şubat tarihleri olmak üzere 3 gün toplamda da 7 gün tek başına kullanılmıştır. Şubat ayında da kullanım olduğundan toz emisyonları Şubat ayı atık yakılmayan dönemi de göz önüne alınarak değerlendirilmiş ve atıksız toz ortalaması $9,9 \text{ mg/Nm}^3$ değeri baz alınarak incelenmiştir. Ağustos ayında FBA kullanılmış ancak tek başına bir kullanımı olmamıştır.

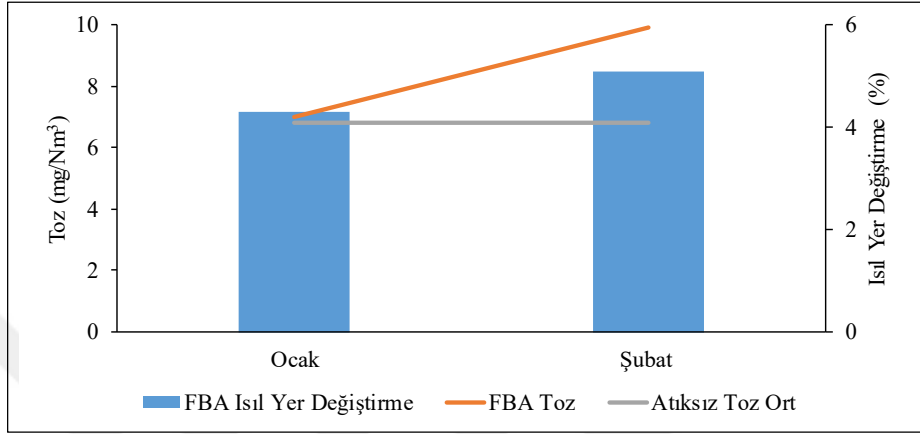
Ocak ayında %0,9 ila %7,8 oranlarında değişen atık ısı yer değiştirme mevcuttur. Şubat ayında ise %2,5, %5,6 ve %7,08 oranlarında ısı yer değiştirmeye ulaşılmıştır. Ocak ayında %0,9 yer değiştirmede $6,2 \text{ mg/Nm}^3$ toz değeri, %7,8 oranında ise $7,2 \text{ mg/Nm}^3$ değeri görülmüştür. Şubat ayında ise %2,5 yer değiştirmede toz miktarı en yüksek değere ulaşmış ve $10,5 \text{ mg/Nm}^3$ olmuştur. %7,08 ısı yer değiştirmede görülen toz miktarı ise $9,7 \text{ mg/Nm}^3$ 'tür. Ocak ve Şubat aylarında yalnızca FBA kullanılan dönemlere ait toz değerlerinin atık yakılmayan günlere ait toz ortalaması ile karşılaştırılması Şekil 6.8 ile gösterilmiştir.

Şekil 6.8'den görüleceği üzere fosil bazlı atık kullanımı ile toz değerleri atıksız toz ortalama değerinin üstünde gerçekleşmiştir. Yalnızca 1 adet değer ortalama değerinin altında kalmıştır. Fosil bazlı atık kullanımı olan günlerin toz ortalaması $8,3 \text{ mg/Nm}^3$ olmuştur. Şartlar gözönüne alındığında fosil bazlı atık kullanımı ile %21 oranında toz artışı yaşandığı görülmüştür.



Şekil 6.8. FBA kullanımı toz değerleri ve atık yakılmayan toz ortalama değeri karşılaştırması

Şekil 6.9, Ocak ayı ve Şubat ayı yalnızca FBA kullanımı gerçekleştirilen günlere ait aylık ortalamalarının atıksız günlerin ortalaması ile karşılaştırmasını göstermektedir. Ocak ayında yalnızca FBA kullanılan dönem toz emisyonları ortalaması 7 mg/Nm^3 olarak gerçekleşirken, Şubat ayında bu değer $9,7 \text{ mg/Nm}^3$ değerine yükselmiştir. Her iki değer de $6,8 \text{ mg/Nm}^3$ olan atıksız günlerin ortalamasından yüksektir.



Şekil 6.9. Ocak ve Şubat ayı FBA kullanımları toz ortalaması ile atıksız toz ortalaması karşılaştırması

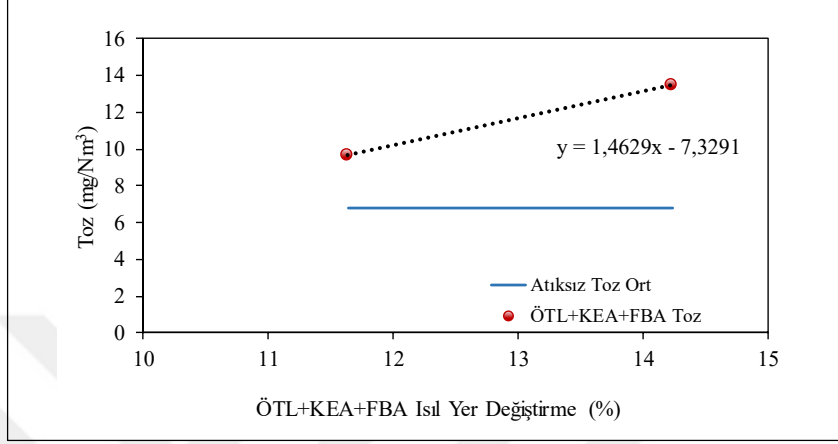
Ocak ve Şubat aylarında FBA'nın tek başına kullanıldığı dönemde fırın koşulları birbirini ile aynıdır. Atıksız günler dikkate alındığında aynı tonaj ve sıcaklık değerinde FBA kullanılan günlerde oksijen değerinin düştüğü ve toz miktarının arttığı görülmüştür. ÖTL kullanımının aksine FBA baca gazı sıcaklıklarında artışa neden olmamıştır. Bunun nedeni FBA'nın alev borusundan fosil yakıtların yakıldığı noktadan daha yüksek sıcaklığa sahip bölgede yakılması olduğu sonucuna varılabilir. FBA yapılan hiçbir çalışmada kullanılan bir atık olmadığından literatür karşılaştırması yapılamamıştır.

6.1.5. Karışık atık kullanımı ile elde edilen atık ısı güç ve toz emisyonu ilişkisi

Çalışmaya esas fabrikada 120 günlük veri seti içerisinde 55 gün boyunca atıklar ÖTL+KEA, ÖTL+FBA, KEA+FBA ve ÖTL+KEA+FBA karışımı olarak kullanılmıştır.

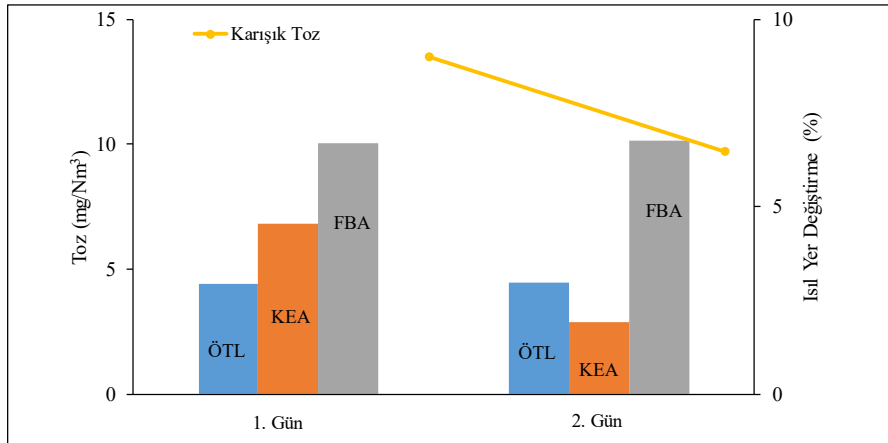
Her üç atığın birlikte kullanımı fırında yalnızca iki gün boyunca 13 ve 14 Şubat tarihlerinde gerçekleşmiştir. ÖTL'nin tek kullanımı ve KEA'nın tek kullanımı toz emisyonlarında artışa neden olmuşken FBA tek başına kullanıldığında toz

emisyonlarında azalma meydana getirmiştir. Şekil 6.10'dan görüleceği üzere üç atık karışım halinde kullanıldığında ise toz emisyonlarında artış görülmüştür. 13 ve 14 Şubat tarihlerinde toz emisyonları sırasıyla 13,5 ve 9,7 mg/Nm³ olmuştur ve 6,8 mg/Nm³ olan atıksız toz ortalamasının üstünde gerçekleşmiştir.



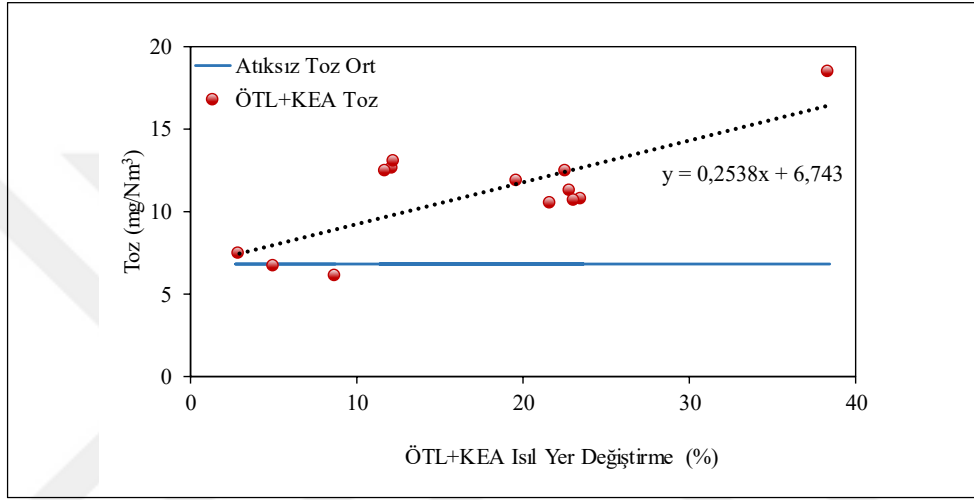
Şekil 6.10. ÖTL+KEA+FBA beraber kullanımı toz emisyonları

13 ve 14 Şubat tarihlerinde ÖTL %3, FBA %6,7 oranlarında kullanılırken KEA 13 Şubat tarihinde %4, 14 Şubat tarihinde ise %1 oranında kullanılmıştır. ÖTL+KEA+FBA kullanımları ve bu tarihlerdeki toz emisyonları şekil 6.11 ile gösterilmiştir. Şekil 6.11'den de görüleceği gibi FBA ve ÖTL kullanım oranlarının aynı kalması, KEA kullanım oranının %3 azalması toz emisyonlarında %28 oranında bir azalma sağlamıştır. KEA'nın tek kullanımı ortalama olarak toz emisyonlarında %24 artışa neden olmuştur. ÖTL ve FBA'nın aynı oranda kalması ancak KEA'nın az kullanılması ile düşen ısıl yer değiştirme oranı ile toz emisyonları da azalma göstermiştir.



Şekil 6.11. ÖTL+KEA+FBA kullanım oranları ve toz emisyonları

Çalışmaya esas 120 verinin 13 tanesi ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanıldığı verilerdir. 20-21 ve 29 Ocak, 10, 21-26, 28, 29 Nisan ve 13 Ağustos bu iki atığın birlikte yakıldığı tarihlerdir. Bu iki atığın birlikte kullanılması ile oluşan toz emisyonlarının yalnızca %15'i yani yalnızca 2 adeti atıksız toz ortalama verisinin altında kalmıştır geri kalan tüm toz emisyonlarında artış görülmüştür. ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanıldığı günlere ait toz emisyonlarının atıksız toz ortalama değeri ile karşılaştırması Şekil 6.12 ile verilmiştir.



Şekil 6.12. ÖTL+KEA birlikte kullanımı ile oluşan toz emisyonları

Şekil 6.12'den görüleceği üzere %2 ile %38 arasında yer değiştirme elde edilen atık karışımının fırında kullanımı ile elde edilen toz emisyonları 6,1 mg/Nm³ değerinden 18,5 mg/Nm³ değerine yükselmiştir. Bu iki atığın beraber kullanımı ile elde edilen ortalama toz emisyonu 11,1 mg/Nm³ değeridir ve bu değer toz emisyonlarının %64 oranında yükseldiğini göstermektedir.

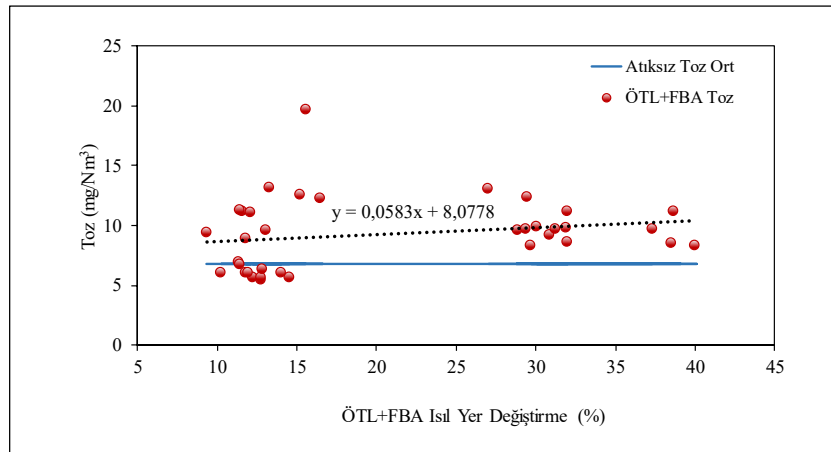
ÖTL ve KEA birlikte kullanıldığı dönemde fırın tonajı 160-166 ton arasında kalarak büyük değişim göstermemiştir. Oksijen değeri %9,6 ile %10,9 arasında oksijen için geniş aralık sayılabilecek bir düzeyde değişim göstermiştir. Baca gazı sıcaklığı ise 75°C ile 100°C arasında değişmiştir. ÖTL ve KEA kullanımı ile oluşan en yüksek toz emisyonu 13 Ağustos günü meydana gelmiştir. 13 Ağustos tarihinde %38'lik bir ısıl yer değiştirmede fırın tonajı 160,3 t, oksijen %9,8 ve sıcaklık 95,2°C olmuştur. Bu tarihte artış atıksız toz ortalamasının 3 katına ulaşmış ve toz değeri 18,5 mg/Nm³ olmuştur. Bu noktada ÖTL'nin tek yakılması ile oluşan sonuca paralel olarak oksijen değeri ve baca gazı sıcaklığının toz emisyonlarının artışında önemli olduğu sonucuna

varılmıştır. Fırında düşük oksijen ve yüksek baca gazı sıcaklığı bulunduğunda yakılan atık tipi ve erişilen ısı yer değiştirme aynı olsa da toz emisyonlarının arttığı belirlenmiştir. Tablo 6.4 aynı atık tipi ve ısı yer değiştirmenin oluşturduğu toz emisyonlarının oksijen ve baca gazı sıcaklığı ile olan ilişkisini göstermektedir.

Tablo 6.4. Oksijen, baca gazı sıcaklığı ve toz arasındaki ilişki

Tarih	Atık Tipi	Atık Isıl Güç (%)	O ₂ (%)	Sıcaklık (°C)	Toz (mg/Nm ³ %10O ₂)
21.04.2018	ÖTL+KEA	22,8	9,9	85,3	11,3
28.04.2018	ÖTL+KEA	22,6	10,6	85,5	12,5
24.04.2018	ÖTL+KEA	12,1	9,7	96	12,6
25.04.2018	ÖTL+KEA	12,2	10,1	100,7	13,1

%12 ısı yer değiştirme elde edildiğinde baca gazı sıcaklığı değerinin 100°C olması ile toz emisyonunu artışı da Tablo 6.4'ten görülebilmektedir. Atık tipleri ve ısı yer değiştirme oranları aynı olan günlerde baca gazı sıcaklığının yükselmesi toz emisyonlarının yükselmesine neden olmaktadır. ÖTL ve KEA birlikte kullanılacağı zaman %17 ÖTL ve %6 KEA karışımının %10,2-%10,4 oksijen seviyesinde ve baca gazı sıcaklığının 80-83°C arasında tutulması ile toz emisyonları 7,5 ila 10,5 mg/Nm³ değerleri arasında kalabilir. Çalışmaya esas 120 verinin 36 tanesinde ÖTL ve FBA birlikte kullanılmıştır. 1-12 Şubat, 15-28 Şubat, 15-18 Ağustos, 20-26 Ağustos ve 28-31 Ağustos bu iki atığın birlikte yakıldığı tarihlerdir. Bu iki atığın birlikte kullanılması ile oluşan toz emisyonlarının %28'i atıksız toz ortalama verisinin altında kalmıştır. ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanıldığı günlere ait toz emisyonlarının atıksız toz ortalama değeri ile karşılaştırması Şekil 6.13 ile verilmiştir.



Şekil 6.13. ÖTL ve FBA kullanımı ile toz emisyonları ilişkisi

Bölüm 6.1.2 ÖTL'nin tek başına kullanımını ve bölüm 6.1.4 ise FBA'nın tek başına kullanımının toz emisyonları üzerine etkilerini incelemiştir. ÖTL'nin ve FBA'nın tek başına kullanımlarının toz emisyonlarında artışa neden olduğu belirlenmiştir. ÖTL ve FBA atıklarının birarada kullanılmasında ise toz emisyonlarındaki artış %36,7 ÖTL'nin tek kullanımındaki artışın altında kalmıştır.

ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanıldığı dönemlerin toz ortalaması 9,3 mg/Nm³ olmuştur. Bu bölümde ÖTL'nin tek başına kullanıldığı ve ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanıldığı benzer ısı yer değiştirmeye sahip günler incelenmiştir. Tablo 6.5 kullanılan atıklar ve karışım miktarlarının toz emisyonlarını göstermektedir.

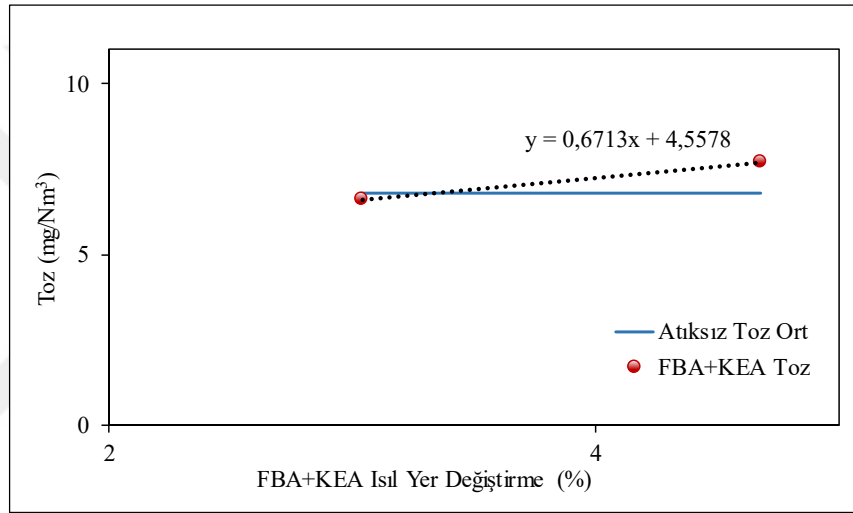
Tablo 6.5. ÖTL ve ÖTL+FBA Toz emisyonları tablosu

Tarih	Atık Karışımı (Isıl Güç %)	O ₂ (%)	Sıcaklık (°C)	Toz (mg/Nm ³ %10O ₂)
2 Nis.	%8,1 ÖTLB	10,5	73,3	8,4
3 Nis.	%8,9 ÖTLB	10,6	76,5	8,3
19 Şub.	%8,7 ÖTLB+%1,58 FBA	10,6	85,5	6,0
20 Şub.	%8,9 ÖTLB+%2,9 FBA	9,7	96,0	6,0
21 Şub.	%8,2 ÖTLB+%3,7 FBA	10,1	100,7	6,0
4 Ağu.	%16 ÖTLB+%10 ÖTLK	9,6	102,7	14,6
17 Ağu.	%12,9 ÖTLB+%12,9 ÖTLK+%12,6 FBA	9,6	96,8	8,5

FBA tek kullanıldığında %21 civarında toz emisyonlarında artışa neden olurken ÖTL tek kullanıldığında ise %5,5 ila %60 oranında toz emisyonlarında artış olduğu çalışmaya esas fabrika verilerinden elde edilmiştir. ÖTL+FBA beraber kullanıldığında ise artışın %36 oranında olduğu tespit edilmiştir. Tablo 6.5'te verilen ısı karışımlardaki atıklar birbirleri ile karşılaştırıldığında %8 civarında yalnızca ÖTL kullanılan durumdaki toz emisyonları ile aynı oranda ÖTL ile birlikte %1,5, %2,9 ve %3,7 oranlarında FBA'nın eklenmesi ile toz emisyonlarının 8 mg/Nm³ değerinden 6 mg/Nm³ değerine düştüğü görülmüştür.

Aynı şekilde Ağustos ayında %16 ÖTLB ve %10 ÖTLK kullanılması ile %26'lık ısı yer değiştirme 17 Ağustos tarihinde %12,9 ÖTLB+%12,9 ÖTLK+%12,6 FBA karışımı ile sağlanmış ve bu tarihteki toz emisyonu yalnızca ÖTL kullanılan güne göre %40 oranında azalmıştır. Tablo 6.5'ten de görülebileceği üzere yüksek ısı yer değiştirme oranlarında FBA kullanımının arttırılması toz emisyonlarında azalmaya neden olmaktadır.

Çalışmaya esas 120 veri arasında 2 tanesinde FBA ve KEA beraber kullanılmış ve bunların her ikisi de Ocak ayı içerisinde gerçekleşmiştir. Bu iki veriden bir tanesi atıksız toz ortalama değerinin altında kalırken diğeri üzerinde gerçekleşmiştir. Şekil 6.14 FBA ve KEA'nın birlikte kullanıldığı günlerin toz emisyonlarını göstermektedir. FBA ve KEA'nın birlikte kullanılması sırasındaki ısıl yüzde dağılımları 25 Ocak için %1,1 KEA ve %1,9 FBA, 27 Ocak için ise %1,6 KEA ve %3 FBA'dır. KEA'nın %1,1 değerinden %1,6 değerine çıkışması toz emisyonlarında artış yaşanmasına neden olmuş ve toz emisyonu $6,6 \text{ mg/Nm}^3$ değerinden $7,7 \text{ mg/Nm}^3$ değerine yükselmiştir.



Şekil 6.14. FBA ve KEA birlikte kullanımı toz emisyonları

Atık yakılmayan dönem ve farklı atıkların yakıldığı dönem, karışık atıkların kullanıldığı dönemler toz emisyonları açısından kendi içlerinde değerlendirilmiştir. ÖTL kullanımı ile toz emisyonlarında %60 artış, KEA kullanımı ile %24 oranında artış ve FBA kullanımı ile %21 oranında toz emisyonlarında artış olduğu belirlenmiştir. Atıkların karışık kullanımlarında ise her üç atığın beraber kullanılması ile elde edilen veriler atıksız ortalamanın üstünde gerçekleşmiş ancak KEA oranında %4'ten %1 oranına düşmesi ile toz emisyonlarında azalma görülmüştür. ÖTL ve FBA birlikte kullanıldığında toz emisyonlarında yalnızca ÖTL kullanımına göre azalma görülmüştür.

KEA ve FBA kullanımında da FBA'nın ısıl yer değiştirme yüzdesi daha yüksek olduğunda toz emisyonlarının azaldığı tüm bu sonuçlara paralel olarak belirlenmiştir. FBA ile birlikte ÖTL kullanımı ile yüksek ısıl yer değiştirme oranlarında toz emisyon

artışının diğer atık kullanımlarına oranla daha düşük değerlerde tutulabileceği görülmüştür. %16 ÖTLB ve %10 ÖTLK kullanılması ile %26'lık ısı yer değiştirme 17 Ağustos tarihinde %12,9 ÖTLB+%12,9 ÖTLK+%12,6 FBA karışımı ile sağlanmış ve bu tarihteki toz emisyonu yalnızca ÖTL kullanılan güne göre %40 oranında azalmıştır.

Atık yakılması sırasında oksijen %10,2-10,4 civarında tutulduğunda, baca gazı sıcaklığı 75-80°C olduğunda toz emisyonu düşük olarak gerçekleşmektedir. Buna ek olarak alev borusundan beslenen fosil bazlı atık, yakılan karışımın içerisinde bulunduğu toz emisyonları azalma eğilimindedir.

6.2. Alternatif Yakıt Kullanımının NO_x Emisyonları Üzerine Etkisi

Çalışmada seçilen fabrikaya ait fırın besleme tonajı ton/saat olarak, baca gazı sıcaklığı derece (°C) olarak ve oksijen değeri yüzde (%) olarak sürekli emisyon ölçüm sisteminden yarım saatlik verilerin günlük ortalamaları olarak alınmıştır. Emisyonların oluşmasında fırının çalışma şartları oldukça önemlidir. Tablo 6.1 atık kullanım yüzdeleri ve kullanılan atıkları, Tablo 6.2 ise fırın şartlarını göstermektedir. Tablo 6.6'da ise tarihler ve NO_x emisyonlarını göstermektedir.

Tablo 6.6. Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları NO_x emisyonları

Tarih	NO _x (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
1 Ocak	568,9
2 Ocak	584,0
3 Ocak	584,0
4 Ocak	528,0
5 Ocak	624,4
6 Ocak	751,6
7 Ocak	652,0
8 Ocak	731,8
9 Ocak	600,3
10 Ocak	476,3
11 Ocak	528,6
12 Ocak	380,7
13 Ocak	586,4
14 Ocak	542,9
15 Ocak	511,2
16 Ocak	356,7
17 Ocak	406,4
18 Ocak	435,7
19 Ocak	436,8

Tablo 6.6. (Devam) Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları NO_x emisyonları

Tarih	NO _x (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
20 Ocak	448,7
21 Ocak	520,7
22 Ocak	609,5
23 Ocak	503,8
24 Ocak	562,1
25 Ocak	516,0
26 Ocak	374,1
27 Ocak	602,2
28 Ocak	484,4
29 Ocak	421,6
30 Ocak	466,5
31 Ocak	437,6
1 Şubat	595,9
2 Şubat	550,8
3 Şubat	496,9
4 Şubat	573,1
5 Şubat	644,1
6 Şubat	636,6
7 Şubat	572,1
8 Şubat	679,5
9 Şubat	563,5
10 Şubat	517,8
11 Şubat	431,4
12 Şubat	446,9
13 Şubat	465,0
14 Şubat	409,6
15 Şubat	437,1
16 Şubat	463,4
17 Şubat	453,7
18 Şubat	471,8
19 Şubat	348,7
20 Şubat	361,1
21 Şubat	297,7
22 Şubat	317,9
23 Şubat	350,7
24 Şubat	491,0
25 Şubat	468,0
26 Şubat	416,4
27 Şubat	497,6
28 Şubat	328,0
1 Nisan	306,2
2 Nisan	258,4
3 Nisan	499,2
4 Nisan	518,2
5 Nisan	500,2
6 Nisan	458,9
7 Nisan	418,4
8 Nisan	454,8

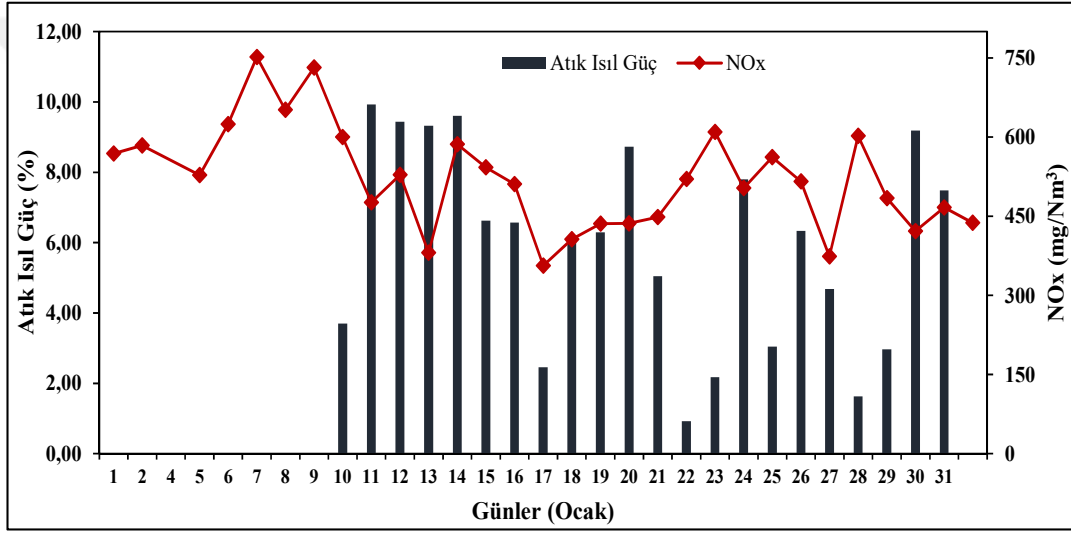
Tablo 6.6. (Devam) Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları NO_x emisyonları

Tarih	NO _x (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
9 Nisan	426,1
10 Nisan	216,7
11 Nisan	235,9
12 Nisan	232,6
13 Nisan	246,3
14 Nisan	426,9
15 Nisan	526,2
16 Nisan	418,4
17 Nisan	311,1
18 Nisan	170,1
19 Nisan	532,9
20 Nisan	414,5
21 Nisan	415,9
22 Nisan	283,6
23 Nisan	204,0
24 Nisan	253,7
25 Nisan	317,2
26 Nisan	217,7
27 Nisan	283,4
28 Nisan	146,1
29 Nisan	136,5
30 Nisan	241,2
1 Ağustos	564,7
2 Ağustos	604,2
3 Ağustos	591,1
4 Ağustos	535,7
5 Ağustos	615,0
6 Ağustos	540,6
7 Ağustos	466,9
8 Ağustos	415,0
9 Ağustos	489,0
10 Ağustos	544,0
11 Ağustos	540,9
12 Ağustos	519,9
13 Ağustos	509,3
14 Ağustos	384,4
15 Ağustos	382,7
16 Ağustos	381,8
17 Ağustos	449,7
18 Ağustos	487,7
19 Ağustos	499,4
20 Ağustos	387,1
21 Ağustos	387,7
22 Ağustos	410,1
23 Ağustos	414,0
24 Ağustos	298,0
25 Ağustos	479,4
26 Ağustos	337,2

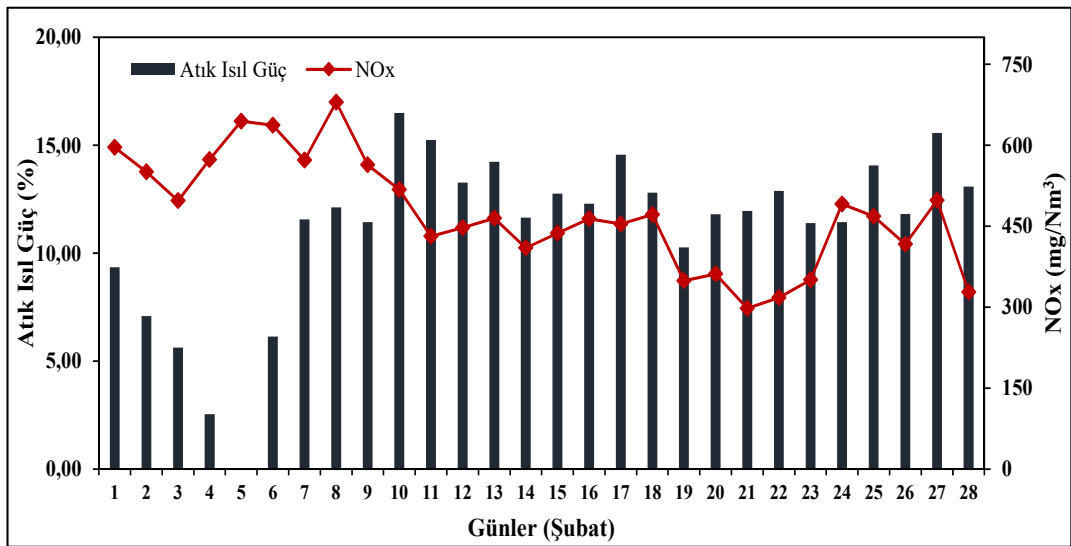
Tablo 6.6. (Devam) Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları NO_x emisyonları

Tarih	NO _x (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
27 Ağustos	479,5
28 Ağustos	402,1
29 Ağustos	474,7
30 Ağustos	546,5
31 Ağustos	545,0

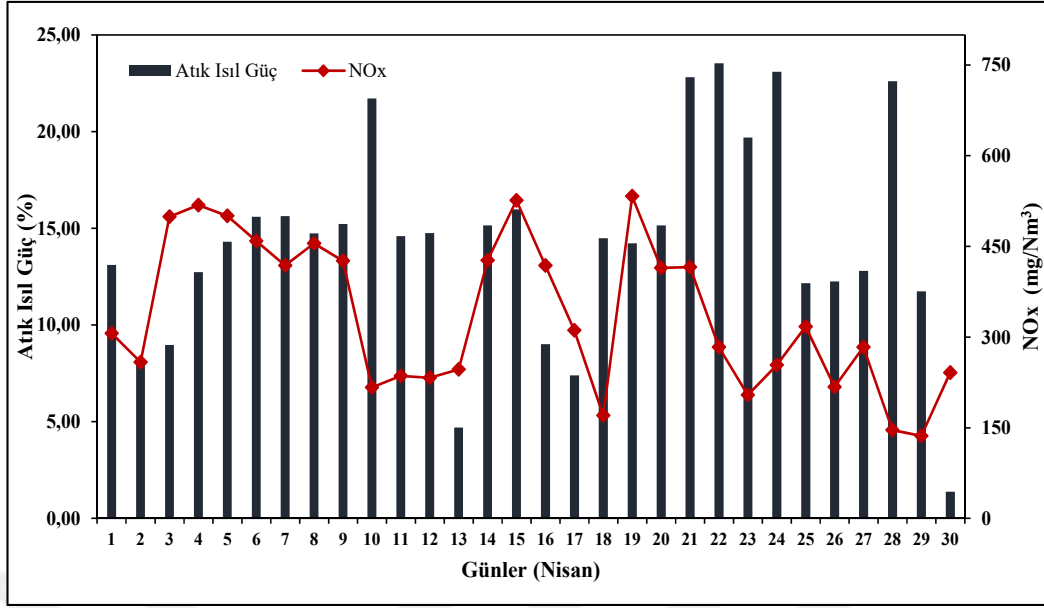
Tablo 6.1 ve Tablo 6.6'dan elde edilen veriler ile Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos aylarına ait NO_x emisyonlarının atık ısı yer değıştirme oranları ile ilişkisi sırasıyla Şekil 6.15, Şekil 6.16, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18 ile gösterilmiştir.



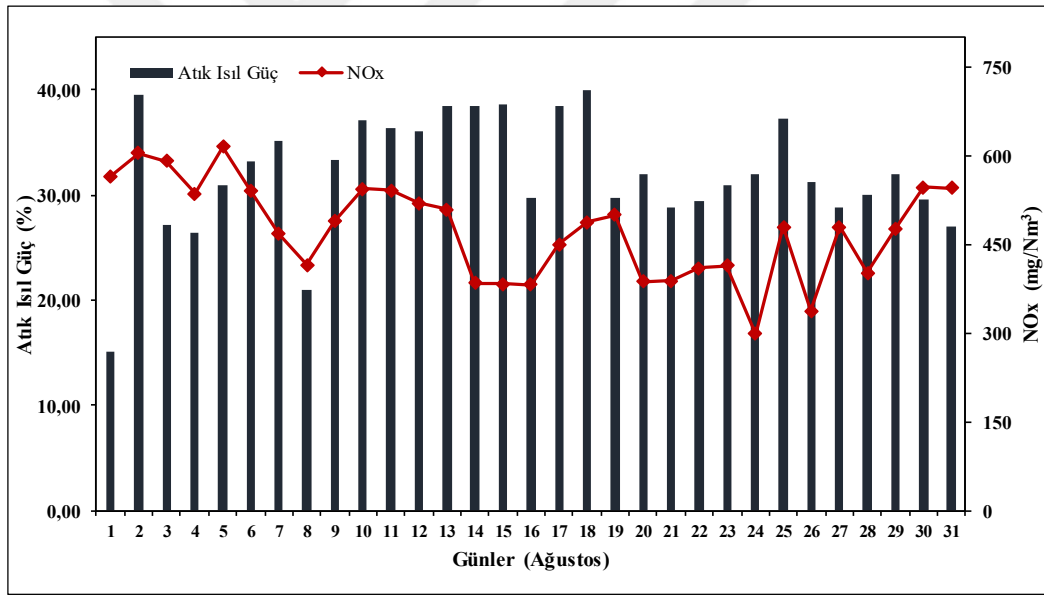
Şekil 6.15. Ocak ayı atık ısı güç ve NO_x emisyonları arasındaki ilişki



Şekil 6.16. Şubat ayı atık ısı güç ve NO_x emisyonları arasındaki ilişki



Şekil 6.17. Nisan ayı atık ısıl güç ve NO_x emisyonları arasındaki ilişki



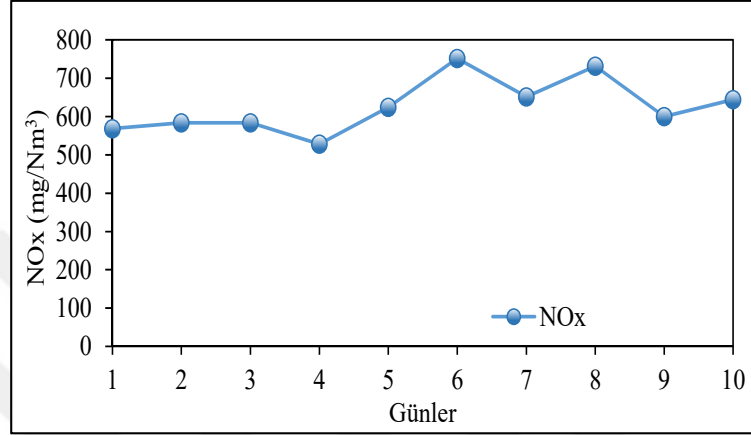
Şekil 6.18. Ağustos ayı atık ısıl güç ve NO_x emisyonları arasındaki ilişki

Tablo 6.1’de verilen kullanımlar ve Tablo 6.6’da verilen emisyonlar çerçevesinde değerlendirmeler öncelikli olarak atık yakılmayan dönemin kendi arasında kıyaslanması ile yapılmıştır.

Fırının kendi özgün şartlarında yalnızca konvansiyonel yakıt kullanımı ile fırın koşulları ve emisyonlarının değişkenliği atık yakılan dönemin kıyaslanmasında değişimlerin atık kaynaklı mı yoksa yakıt kaynaklı mı olduğuna dair bilgi vermektedir.

6.2.1. Atık yakılmayan dönem NO_x emisyonlarının incelenmesi

Çalışmada seçilen fabrikada Ocak ayının ilk dokuz günü ile 5 Şubat günü atık kullanımı gerçekleşmemiştir. Çalışmanın bu noktasında atık kullanımı olmayan dönemde NO_x emisyonları incelenmiştir ve elde edilen değişimler Şekil 6.19 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.19. Atık yakılmayan dönem NO_x emisyonları

Atık yakılmayan dönemde fırın tonajı 155-160 ton/gün arasında, oksijen yüzde 10,8 ila 11 arasında değişmiş ve sıcaklık 76°C olarak belirlenmiştir. Atık yakılmayan dönemde, yalnızca birincil yakıt kullanımı olmasına rağmen NO_x emisyonları 530 ila 750 mg/Nm³ arasında değişmiştir.

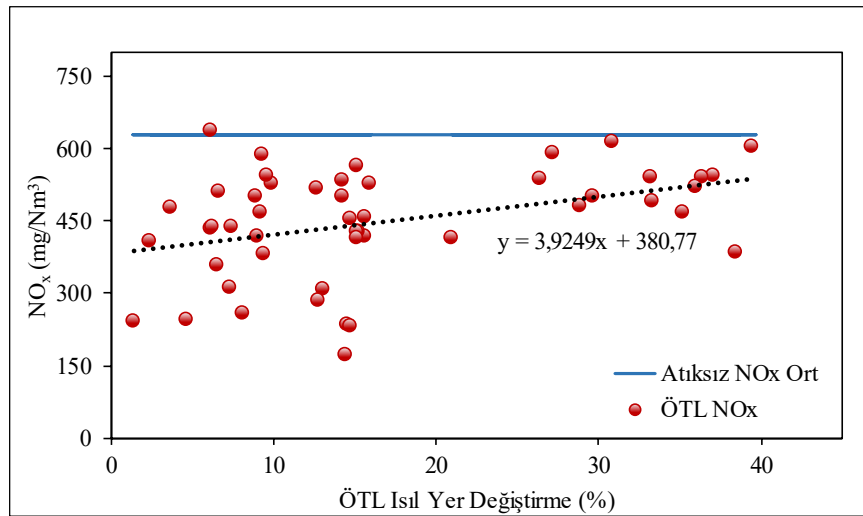
Bölüm 3.2'de de anlatıldığı üzere oksijence zengin ortam ve yüksek sıcaklıklar fırın içerisinde NO_x oluşumunu tetiklemektedir. Yanma sonucu oluşan yan ürün olan NO_x emisyonları, Tablo 6.1, Tablo 6.2 ve Tablo 6.6'dan görüleceği üzere CO emisyonları düştüğü dönemde artmış, CO emisyonları yükseldikçe NO_x emisyonları azalmıştır. 5 Ocak'ta 624 mg/Nm³ NO_x emisyonu oluşan şartlar ile 9 Ocak'ta 600 mg/Nm³ NO_x emisyonuna neden olan şartlar aynı iken aradaki tek fark CO emisyonununun 1.973 mg/Nm³ değerinden 2.463 mg/Nm³ değerine yükselmiş olmasıdır. Fırında yanma şartları kötüleştikçe CO emisyonu artmakta bu nedenle soğuyan fırında NO_x emisyonu azalmaktadır.

Atık yakılmayan dönemin NO_x emisyonları ortalaması 626,9 mg/Nm³ olarak hesaplanmıştır.

6.2.2. Ömrünü tamamlamış lastik kullanımı ile NO_x emisyonları ilişkisi

Atık yakılan dönemlerde en çok kullanılan atık olan ÖTL 120 günlük veri seti içerisinde 49 gün boyunca tek başına kullanılmıştır. Bütün ve parçalanmış halde de olsalar ÖTL'ler aynı besleme noktasından fırına beslenmiştir. Şekil 6.15, Şekil 6.16, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'den görülebileceği üzere NO_x emisyonları ısıl yer değiştirme oranları ile paralel olarak azalma eğilimi göstermiştir. Ancak, ısıl yer değiştirme oranındaki artış yüzdesi kadar yüzdelik bir azalma olmamıştır. Isıl yer değiştirme oranı kadar yanma koşullarının değişiklik göstermesi de NO_x emisyonlarında değişikliğe neden olmuştur. Şekil 6.20 yalnızca ÖTL kullanılan dönemin NO_x emisyonlarının dağılımı ve atıksız NO_x ortalaması ile karşılaştırmasını göstermektedir.

ÖTL kullanılan 49 günün yalnızca bir adetinde NO_x emisyonları atıksız ortalama değer üzerinde kalırken 49 günlük ortalama değer 446,4 mg/Nm³ değerine ulaşarak %28,8'lik bir oranda NO_x azalımı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.20'den görüldüğü gibi atık kullanımı ile NO_x emisyonları azalmıştır ancak azalma ısıl yer değiştirme oranı ile bağlantılı değildir. Artan ısıl yer değiştirme ile NO_x emisyonlarının daha yüksek oranda düşüş gösterdiği söylenememektedir. En düşük NO_x emisyonuna 18 Nisan günü %14 oranında ÖTLB kullanıldığı dönemde ulaşmış ve NO_x emisyonu 171 mg/Nm³ değeri olmuştur. %14 oranında ÖTLB kullanılan diğer günlere bakıldığında 18 Nisan tarihindeki tek farkın CO emisyonu olduğu görülebilir. Tablo 6.7 aynı oranda ÖTL kullanımı ile NO_x ve CO değerlerini göstermektedir.

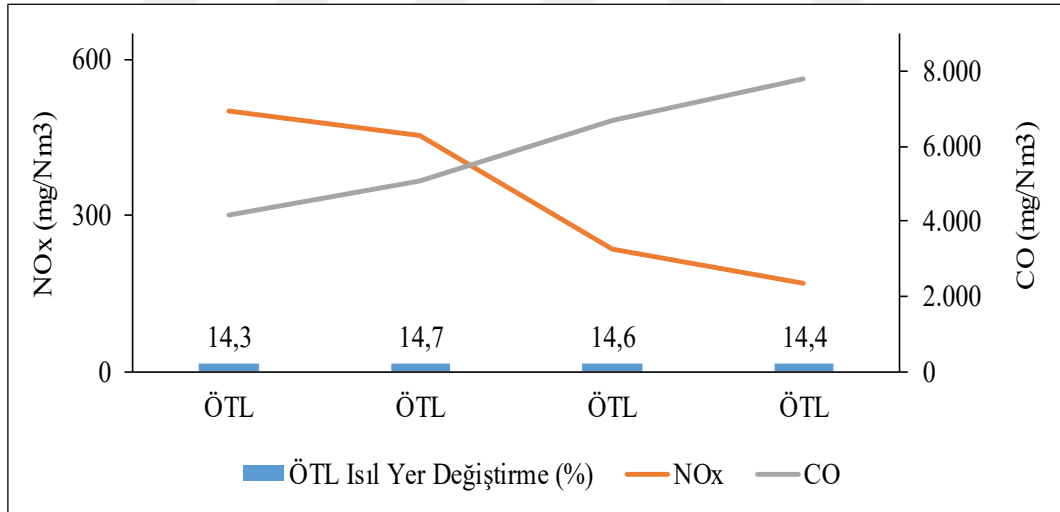


Şekil 6.20. ÖTL kullanımı ile NO_x emisyonları

Tablo 6.7. Aynı oranda ÖTL kullanımı, NO_x ve CO emisyon değerleri

Tarih	ÖTL (Isıl Güç %)	NO _x (mg/Nm ³ %10O ₂)	CO (mg/Nm ³ %10O ₂)	O ₂ (%)	Sıcaklık (°C)
05 Nis	14,3	500,2	4.147,3	10,5	78,6
08 Nis	14,7	454,8	5.069,1	10,1	85,1
11 Nis	14,6	235,9	6.669,5	9,2	94,5
18 Nis	14,4	170,1	7.775,6	10,5	80,5

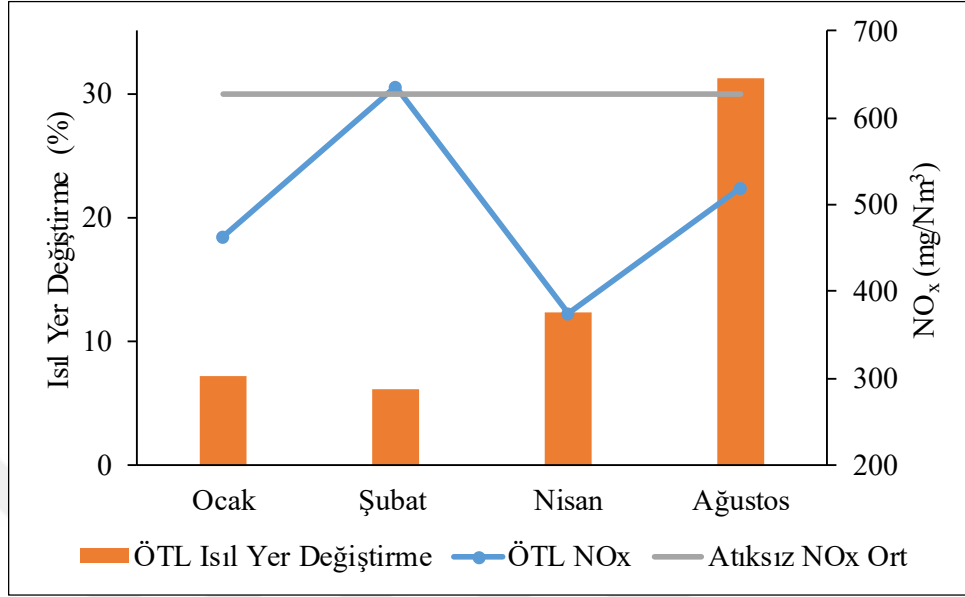
Tablo 6.7’den de görüldüğü üzere aynı oranda aynı noktadan beslenen ÖTLB’nin NO_x üzerindeki etkisi CO emisyonları arttıkça artmıştır. En düşük NO_x emisyonu yanmanın en düzensiz olduğu CO emisyonunun en yüksek olduğu günde gerçekleşmiştir. NO_x emisyonlarının iyi yanma sonucunda ve yüksek sıcaklıklarda oluştuğu düşünüldüğünde intikalden beslenen bütün haldeki lastiklerin yanma verimini düşürdüğü azalan fosil yakıt nedeniyle alev borusundaki sıcaklığın düşmesi ile termal NO_x oluşumunun azaldığı düşünülebilir. Tablo 6.7 verilerinin arasındaki ilişki Şekil 6.21 ile ifade edilmiştir.



Şekil 6.21. ÖTL, NO_x ve CO emisyonları arasındaki ilişki

ÖTL ısı yer değişirme yüzdesinin aynı kaldığı durumda NO_x emisyonlarının azaldığı Şekil 6.22’den görülmektedir. Beslenen atığın aynı olması, ısı yer değişirme yüzdesinin aynı olması durumları göz önüne alındığında CO emisyonlarındaki artışın NO_x emisyonları üzerindeki etkisi net şekilde görülebilmektedir.

ÖTL kullanımının aylık bazdaki ortalama NO_x emisyonları incelendiğinde Şekil 6.22'de görülen grafik elde edilmektedir.



Şekil 6.22. Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları ÖTL ısı yer değiştirme ve ortalama NO_x emisyonları

Ocak ayında gerçekleşen düşük ısı yer değiştirme oranlarında da NO_x emisyonları atık yakılmayan döneme göre azalma eğilimi göstermiştir ve ortalama değer olarak 463,8 mg/Nm³ değerinde gerçekleşmiştir. Ocak ayındaki tüm değerler atıksız ortalama değer olan 626,9 mg/Nm³ değerinin altında kalmış ve %26 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Ocak ayı içerisinde yalnızca ÖTL kullanılan günlere ait ısı yer değiştirme oranları %2 ila %9 oranında değişmiş ortalama olarak %7,2 oranında gerçekleşmiştir.

Şubat ayında ÖTL kullanımı sadece bir gün gerçekleşmiş ve bugünde ısı yer değiştirme oranı %6 olmuştur. Yalnızca ÖTL kullanılan günler içerisinde sadece bugüne ait NO_x emisyonu ortalama değer üzerinde kalarak 636,6 mg/Nm³ olmuştur. Bugüne ait fırın koşullarına bakıldığında CO emisyonlarının düşük olduğu görülmüştür. Nisan ayı içerisinde 21 gün boyunca ÖTL tek başına kullanılmıştır. 21 günlük bu kullanımların hepsinde NO_x emisyonları atıksız NO_x emisyonlarının altında gerçekleşmiştir. Nisan ayında NO_x emisyonları ortalaması 375,2 mg/Nm³ olmuştur. Nisan ayında en düşük NO_x emisyonlarına ulaşılmış ve %40 NO_x azalımı sağlanmıştır.

Ağustos ayı içerisinde ise 15 gün boyunca ÖTL tek kullanılmış ve bugünlerde gerçekleşen tüm NO_x emisyonları atıksız ortalama değerin altında kalmıştır. Ağustos ayında NO_x emisyon ortalaması 519,4 mg/Nm³ olmuştur. Bu değer Ağustos ayında NO_x emisyonlarında %17'lik bir azalmanın olduğunu göstermiştir.

Çalışmaya esas fabrikada intikalden %38 oranında toplam ÖTL kullanırken, %28,9 oranında ÖTLB ve %9,6 oranında ÖTLK dağılımı ile beslenmesiyle 6.123 mg/Nm³ değerinde CO emisyonuna ulaşarak NO_x emisyonları %40'a varan oranlarda azaltılabilir. Bu oran ısı yer değiştirme oranı olarak en yüksek değerde NO_x emisyonları için düşülebilecek emisyonları ifade etmektedir.

Arshed ve diğ., 2014 yılında yaptıkları çalışmada ÖTL kullanımı ile %33 oranında NO_x emisyonlarında azalma saptarken, Carrasco ve diğ. 2002 yılında yaptıkları çalışmada ise ÖTL+çamur karışımı ile %11 oranında NO_x azaltımı elde etmişlerdir. Fabrikaya ait sonuçlar incelendiğinde elde edilen %29 oranında emisyon azalımı literatür çalışmaları ile benzerlik göstermiştir.

6.2.3. Karışık endüstriyel atık kullanımı ile NO_x emisyonları ilişkisi

Çalışmaya konu fabrikada Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos aylarında toplamda 210,54 ton KEA kullanımı olmuştur. Karışık endüstriyel atık çalışmaya konu olan 120 gün içerisinde yalnızca 28 Ocak tarihinde tek başına kullanılmıştır. 28 Ocak tarihinde %1,63 ısı yer değiştirme oranına ulaşmak için 15 ton KEA beslemesi yapılmıştır. Bu sırada fırında %10,5 oksijen varken baca gazı çıkış sıcaklığı da 75,6°C olarak oluşmuştur. Tüm bu fırın koşullarında ve kalorigide NO_x emisyonu 484,4 mg/Nm³ olarak okunmuştur. Ocak ayı atık yakılmayan günlerin ortalaması 625 mg/Nm³ olarak gerçekleştiğinden %22,50 oranında bir azalma meydana geldiği söylenebilir. Ancak, önceki bölümde bahsedildiği gibi atık yakılmayan tüm günlerin ortalaması 626,9 mg/Nm³'tür. Bu atık özelinde çalışmada bu veri yalnızca bir tane olduğundan ve sadece Ocak ayı içerisinde kullanıldığından yalnızca Ocak ayı dinamikleri arasında değerlendirilmesi daha doğru olarak görülmüş ancak her iki veri de birbirine yakın olduğundan %23 oranındaki azalış net şekilde söylenebilir.

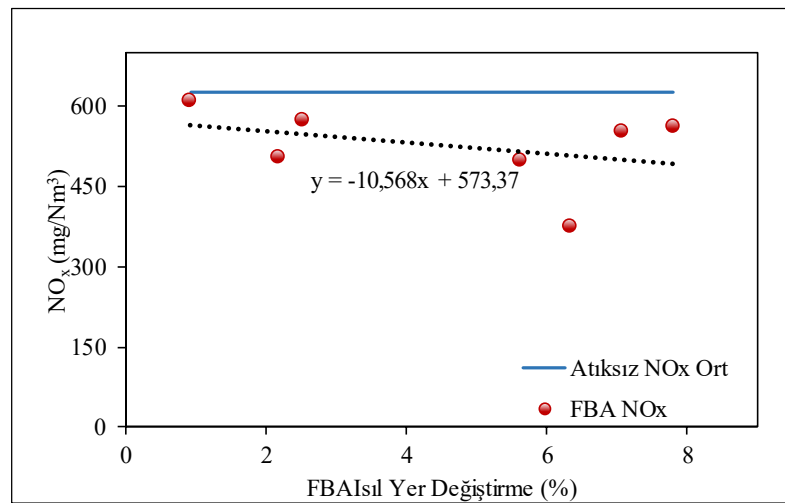
28 Ocak günü dışında KEA'nın tüm kullanımları ÖTL ve/veya FBA ile birlikte olmuştur. Bu nedenle bu başlıkta tek bir değer verilebilmiştir. Ancak, atıkların karışık

kullanımları 6.2.5 başlığında ayrıca değerlendirilecektir. KEA yapılan hiçbir çalışmada kullanılan bir atık olmadığından literatür karşılaştırması yapılamamıştır.

6.2.4. Fosil bazlı atık kullanımı ile NO_x emisyonları ilişkisi

Fosil bazlı atık çalışmaya konu fabrikada Ocak, Şubat ve Ağustos aylarında toplam olarak 576 ton kullanılmıştır. Nisan ayında fosil bazlı atık kullanımı gerçekleşmemiştir. Fosil bazlı atık Ocak ayında 22 Ocak, 23 Ocak, 24 Ocak ve 26 Ocak tarihleri olmak üzere 4 gün Şubat ayında ise 2 Şubat, 3 Şubat ve 4 Şubat tarihleri olmak üzere 3 gün toplamda da 7 gün tek başına kullanılmıştır. Şubat ayında da kullanım olduğundan NO_x emisyonları Şubat ayı atık yakılmayan dönemi de göz önüne alınarak değerlendirilmiş ve atıksız NO_x ortalaması 626,9 mg/Nm³ değeri baz alınarak incelenmiştir. Ağustos ayında FBA kullanılmış ancak tek başına bir kullanımı olmamıştır.

Ocak ayında %0,9 ila %7,8 oranlarında değişen atık ısı yer değiştirme mevcuttur. Şubat ayında ise %2,5, %5,6 ve %7,08 oranlarında ısı yer değiştirmeye ulaşılmıştır. Ocak ayında %0,9 yer değiştirmede 609,5 mg/Nm³ NO_x değeri, %7,8 oranında ise 562,1 mg/Nm³ değeri görülmüştür. Şubat ayında ise %2,5 yer değiştirmede NO_x miktarı en yüksek değere ulaşmış ve 573,1 mg/Nm³ olmuştur. %7,08 ısı yer değiştirmede görülen NO_x miktarı ise 550,8 mg/Nm³'tür. Ocak ve Şubat aylarında yalnızca FBA kullanılan dönemlere ait NO_x değerlerinin atık yakılmayan günlere ait NO_x ortalaması ile karşılaştırılması Şekil 6.23 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.23 FBA kullanımı NO_x değerleri ve atık yakılmayan NO_x ortalama değeri karşılaştırması

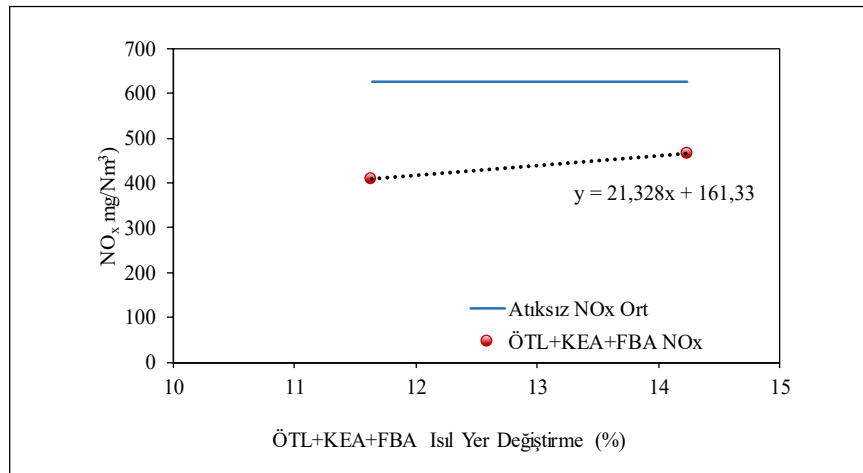
Şekil 6.23'ten görüleceği üzere fosil bazlı atık kullanımı ile NO_x değerleri atıksız NO_x ortalama değerinin altında gerçekleşmiştir. Fosil bazlı atık kullanımı olan günlerin NO_x ortalaması 524,3 mg/Nm³ olmuştur. Şartlar gözönüne alındığında fosil bazlı atık kullanımı ile %16 oranında azaltım meydana geldiği görülmüştür.

Ocak ve Şubat aylarında FBA'nın tek başına kullanıldığı dönemde fırın koşulları birbiri ile aynıdır. Atıksız günler dikkate alındığında aynı tonaj ve sıcaklık değerinde FBA kullanılan %6,3 oranında ısı yer değiştirme yüzdesinde 374,1 mg/Nm³ NO_x emisyonuna %10,2 oksijen değeri ve 73,5°C baca gazı sıcaklığında 5895,1 mg/Nm³ CO emisyon değerinde ulaşılmıştır. FBA özelinde % 6,3'lük ısı yer değiştirme oranının uygulanabilecek en uygun oran olduğu çalışmadaki fabrika için ve bu fabrikaya benzer intikalden atık besleyen fabrikalar için söylenebilir.

6.2.5. Karışık atık kullanımı ile NO_x emisyonları ilişkisi

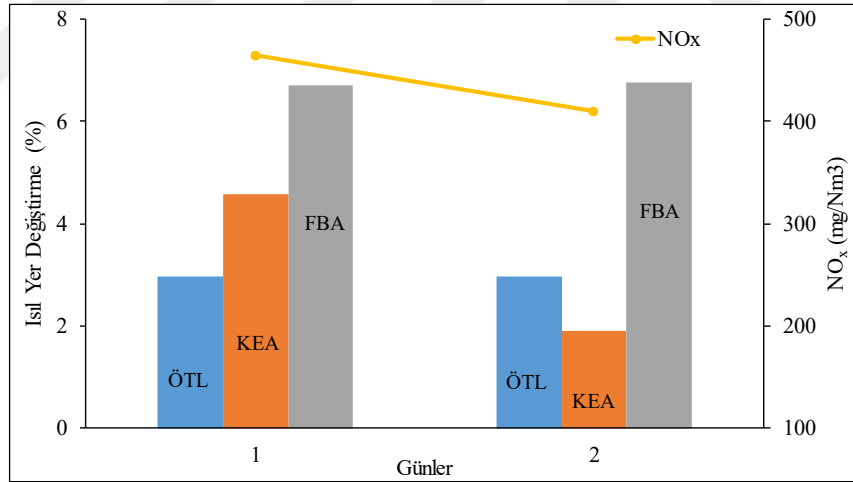
Çalışmaya esas fabrikada 120 günlük veri seti içerisinde 55 gün boyunca atıklar ÖTL+KEA, ÖTL+FBA, KEA+FBA ve ÖTL+KEA+FBA karışımı olarak kullanılmıştır.

Her üç atığın birlikte kullanımı fırında yalnızca iki gün boyunca 13 ve 14 Şubat tarihlerinde gerçekleşmiştir. Her iki günün NO_x emisyon değerleri atıksız NO_x emisyonları ortalamasından düşük gerçekleşmiştir. Şekil 6.24'den görüleceği üzere üç atık karışım halinde kullanıldığında da NO_x emisyonlarında azalma görülmüştür. 13 ve 14 Şubat tarihlerinde NO_x emisyonları sırasıyla 465 ve 409 mg/Nm³ olmuştur.



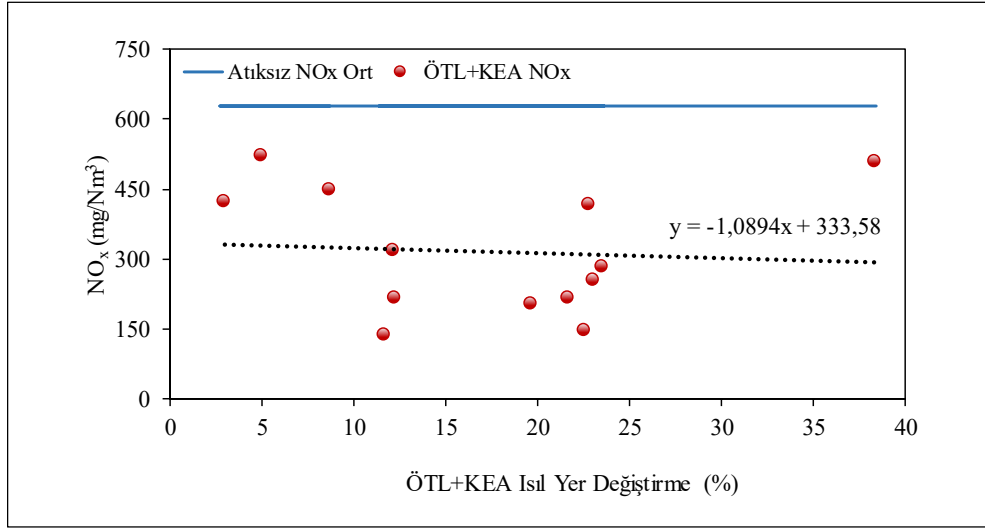
Şekil 6.24. ÖTL+KEA+FBA beraber kullanımı NO_x emisyonları

13 ve 14 Şubat tarihlerinde ÖTL ve FBA ısı yer değiştirme yüzdeleri, oksijen seviyesi, baca gazı sıcaklığı ve CO emisyonları aynıdır. Değişkenlik gösteren tek parametre KEA yüzdesinin azalmasıdır. Bu durumda üç atık birlikte kullanılması durumunda KEA'nın karışım içindeki yüzdesinin düşürülmesinin NO_x emisyonlarındaki azalmanın beklenen seviyeden düşük olmasına neden olduğu görülmüştür. Bu üç atığın karışımının kullanıldığı iki günün ortalaması 437,3 mg/Nm³ olmuştur ve değer atıksız ortalamadan %30 daha azdır. ÖTL, FBA ve KEA'nın birlikte kullanıldığı iki güne ait atık oranları ve NO_x emisyonları Şekil 6.25 ile gösterilmiştir. ÖTL tek kullanıldığında %29, KEA tek kullanıldığında %22,50 ve FBA tek kullanıldığında %16 emisyon azaltımı elde edilirken her üç atık birlikte kullanıldığında atık kullanım oranı %11 oranına düşse de NO_x emisyonlarında da düşüş görülmüştür. %14 ısı yer değiştirme oranından %11 oranında düşüş %3 oranında KEA kullanımında azalma ile olmuştur. ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanımının KEA kullanılmadan daha yüksek oranda NO_x azaltımına etkisi olduğu söylenebilir.



Şekil 6.25. ÖTL+FBA+KEA ısı yer değiştirme ve NO_x emisyonları değişimi

Çalışmaya esas 120 verinin 13 tanesi ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanıldığı verilerdir. 20-21 ve 29 Ocak, 10, 21-26, 28, 29 Nisan ve 13 Ağustos bu iki atığın birlikte yakıldığı tarihlerdir. Bu iki atığın birlikte kullanılması ile oluşan NO_x emisyonlarının tamamı atıksız NO_x ortalama verisinin altında kalmıştır. ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanıldığı günlere ait NO_x emisyonlarının atıksız NO_x ortalama değeri ile karşılaştırması Şekil 6.26 ile verilmiştir.



Şekil 6.26. ÖTL+KEA birlikte kullanımı ile oluşan NO_x emisyonları

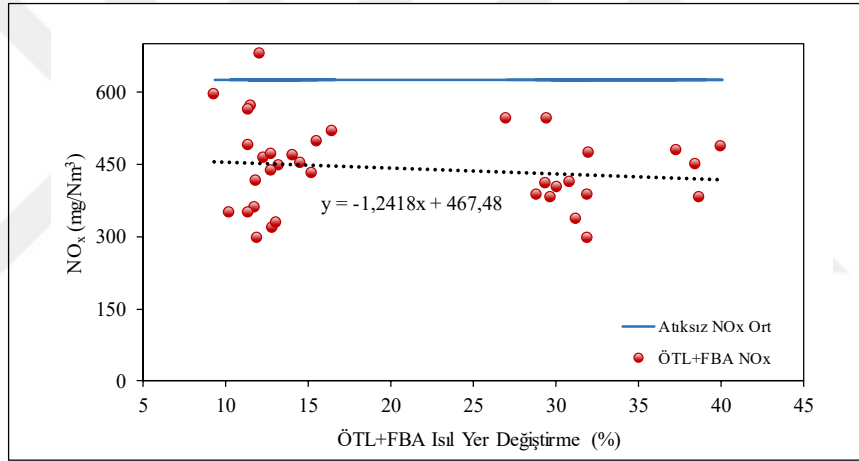
Şekil 6.28'ten görüleceği üzere %2 ila %38 arasında yer değiştirme elde edilen atık karışımının fırında kullanımı ile elde edilen NO_x emisyonları 626,90 mg/Nm³ ortalama değerinden 314,7 mg/Nm³ ortalama değerine düşmüştür. Bu iki atığın beraber kullanımı ile elde edilen ortalama NO_x emisyonu 314,7 mg/Nm³ değeridir ve bu değer NO_x emisyonlarının %50 oranında azaldığını göstermektedir.

ÖTL ve KEA birlikte kullanıldığı dönemde fırın tonajı 160-166 ton arasında kalarak büyük değişim göstermemiştir. Oksijen değeri %9,6 ila %10,9 arasında oksijen için geniş aralık sayılabilecek bir düzeyde değişim göstermiştir. Baca gazı sıcaklığı ise 75°C ila 100°C arasında değişmiştir. ÖTL ve KEA kullanımı ile oluşan en yüksek NO_x emisyonu 21 Ocak günü meydana gelmiştir. 21 Ocak tarihinde %5'lik bir ısıl yer değiştirmede fırın tonajı 160 t, oksijen %10,2 ve sıcaklık 76,4°C olmuştur. Bu tarihte NO_x değeri 520,7 mg/Nm³ olmuştur ancak en yüksek değer olmakla birlikte bu değer de atıksız NO_x ortalamasından %17 düşük olarak gerçekleşmiştir.

ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanımı hem ÖTL'nin hem de KEA'nın tek kullanımı ile NO_x azaltımı elde edilen sonuçları ile paralellik göstermiştir. ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanımı ile elde edilen en düşük NO_x değeri ise 136,5 mg/Nm³ olmuştur. Ancak, bu değer gerçekleştiğinde fırındaki CO emisyonu 13.782 mg/Nm³ olduğundan fırında yanmanın kötüleştiği ve fırın şartlarındaki bozulma nedeniyle termal NO_x oluşumunun azaldığı söylenebilir. Bu tarihte ısıl yer değiştirme oranı da %11 olarak kaydedilmiştir.

ÖTL ve KEA birlikte kullanılacağı zaman %17 ÖTL ve %6 KEA karışımı, %10,4 oksijen seviyesinde ve baca gazı sıcaklığının 80°C arasında olması ile NO_x emisyonu 283,6 mg/Nm³ değerlerinde olmaktadır. Bu tarihte CO emisyonu da 6.000 mg/Nm³ olarak fırın şartlarının yönetilebilir uygunlukta olduğunu göstermektedir. Bu durumda atıksız ortalama emisyonun %55 oranında azalma sağlanmış olmaktadır.

Çalışmaya esas 120 verinin 36 tanesinde ÖTL ve FBA birlikte kullanılmıştır. 1-12 Şubat, 15-28 Şubat, 15-18 Ağustos, 20-26 Ağustos ve 28-31 Ağustos bu iki atığın birlikte yakıldığı tarihlerdir. Bu iki atığın birlikte kullanılması ile oluşan NO_x emisyonlarından yalnızca bir tanesi atıksız NO_x ortalama verisinin üzerinde kalmıştır. ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanıldığı günlere ait NO_x emisyonlarının atıksız NO_x ortalama değeri ile karşılaştırması Şekil 6.27 ile verilmiştir.



Şekil 6.27. ÖTL ve FBA kullanımı ile NO_x emisyonları ilişkisi

Bölüm 6.2.2 ÖTL'nin tek başına kullanımını ve Bölüm 6.2.4 ise FBA'nın tek başına kullanımının NO_x emisyonları üzerine etkilerini incelemiştir. ÖTL'nin ve FBA'nın tek başına kullanımlarının NO_x emisyonlarında azalma meydana getirdiği belirlenmiştir. ÖTL ve FBA atıklarının birarada kullanılmasında da NO_x emisyonlarında azalma meydana gelmiş ve bu azalma %30 oranında olmuştur. Bu oran ÖTL ve FBA'nın tek kullanımı ile elde edilen ortalama azaltım oranlarından fazladır.

ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanıldığı dönemlerin NO_x ortalaması 441,5 mg/Nm³ olmuştur. Bu bölümde ÖTL'nin tek başına kullanıldığı ve ÖTL ve FBA'nın birlikte

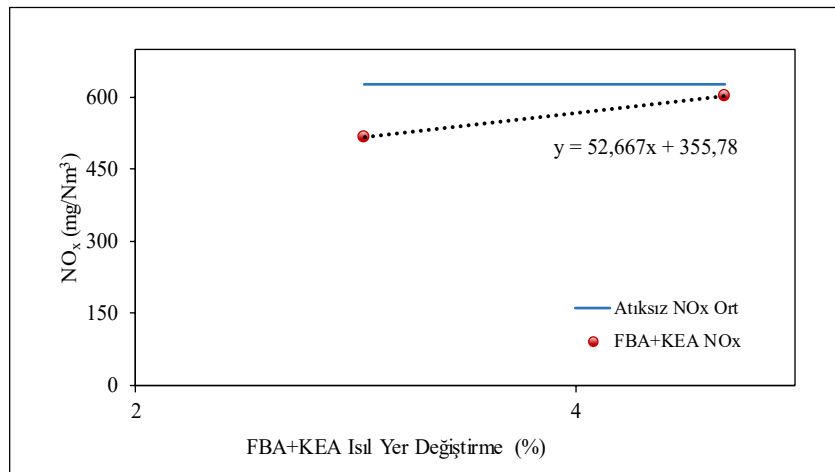
kullanıldığı benzer ısı yer değiştirmeye sahip günler incelenmiştir. Tablo 6.8 kullanılan atıklar ve karışım miktarlarının NO_x emisyonlarını göstermektedir.

Tablo 6.8. ÖTL ve ÖTL+FBA NO_x emisyonları tablosu

Tarih	Atık Karışımı (Isıl Güç %)	Toplam Atık Isıl Yer Değişirme (%)	NO _x (mg/Nm ³ %10O ₂)
3 Nis.	%8,9 ÖTLB	8,90	499,2
20 Şub.	%8,9 ÖTLB+%2,9 FBA	11,80	361,1
21 Şub.	%8,2 ÖTLB+%3,7 FBA	11,96	297,7

FBA tek kullanıldığında %16 civarında NO_x emisyonlarında azalmaya neden olurken ÖTL tek kullanıldığında ise %29 oranında NO_x emisyonlarında azalma olduğu çalışmaya esas fabrika verilerinden elde edilmiştir. ÖTL+FBA beraber kullanıldığında ise azalmanın %30 oranında olduğu tespit edilmiştir. Tablo 6.8’te verilen ısı karışımlardaki atıklar birbirleri ile karşılaştırıldığında %9 civarında yalnızca ÖTL kullanılan durumdaki NO_x emisyonları ile aynı oranda ÖTL ile birlikte %1,5, %2,9 ve %3,7 oranlarında FBA’nın eklenmesi ile NO_x emisyonlarının 499,2 mg/Nm³ değerinden 361,1 ve 297,7 mg/Nm³ değerlerine düştüğü görülmüştür. Bu tarihlerdeki NO_x emisyonları yalnızca ÖTL kullanılan güne göre %28 ve %40 oranında azalmıştır.

Çalışmaya esas 120 veri arasında 2 tanesinde FBA ve KEA beraber kullanılmış ve bunların her ikisi de Ocak ayı içerisinde gerçekleşmiştir. Her iki veride atıksız NO_x ortalama değerinin altında kalmıştır. Şekil 6.28, FBA ve KEA’nın birlikte kullanıldığı günlerin NO_x emisyonlarını göstermektedir.



Şekil 6.28. KEA+FBA ısı yer değiştirme ve NO_x emisyonları

FBA ve KEA'nın birlikte kullanılması sırasındaki ısı yüzde dağılımları 25 Ocak için %1,1 KEA ve %1,9 FBA, 27 Ocak için ise %1,6 KEA ve %3 FBA'dır. KEA'nın %1,1 değerinden %1,6 değerine çıkması NO_x emisyonlarında artış yaşanmasına neden olmuş ve NO_x emisyonu 516 mg/Nm³ değerinden 602 mg/Nm³ değerine yükselmiştir. Her ne kadar bir yükselme görülmüş olsa da NO_x emisyonları atıksız dönem ortalamasının altında kalmıştır. FBA ve KEA'nın birlikte kullanımı ile elde edilen NO_x emisyon azaltımı %10 oranında gerçekleşmiş ve diğer atık karışımlarına göre daha az NO_x emisyonu azaltımına olanak sağlamıştır.

FBA ve KEA'nın birlikte kullanılmasıdaki emisyon değişimi ile  TL, FBA ve KEA'nın birlikte kullanıldığı dönem emisyonları ile paralellik göstermiş ve KEA'nın tek başına sağladığı NO_x emisyon azalımını diğer atıklar ile beraber kullandığında gösteremediği sonucuna varılmıştır. Atıkların beraber kullanılması d ş n ld ğunde  TL ve FBA birlikte kullanımı önerilebilir, bunun yanında KEA kullanılması da planlanıyorsa KEA ısı y r değiştirme oranını düşük tutmak faydalı olacaktır.

Atık yakılmayan dönem ve farklı atıkların yakıldığı dönem, karışık atıkların kullanıldığı dönemler NO_x emisyonları açısından kendi içlerinde değerlendirilmiştir.  TL kullanımı ile NO_x emisyonlarında %29 azalma, KEA kullanımı ile %22,50 oranında azalma ve FBA kullanımı ile %16 oranında NO_x emisyonlarında azalma olduğu belirlenmiştir. Atıkların karışık kullanılması durumunda NO_x emisyonlarında atıksız ortalamaya göre %30 azalma,  TL ve FBA birlikte kullanıldığında NO_x emisyonlarında %30 azalma saptanmıştır. KEA ve FBA kullanımında da FBA'nın ısı y r değiştirme yüzdesi daha yüksek olduğunda NO_x emisyonlarının azaldığı tüm bu sonuçlara paralel olarak belirlenmiştir.

Atık yakılması sırasında NO_x emisyonunun en düşük olduğu gün %14  TLB beslenmesi ile elde edilen 170,1 mg/Nm³ değeridir.  TLB beslenmesi sırasında  TLK beslenmesi ile elde edilen değerlerden daha düşük NO_x emisyonları g r lm ştir.  TL ile KEA beslenmesi ile NO_x emisyonları %50 oranında azalmıştır. Çalışmaya esas veriler gözönüne alındığında %17  TLB ve %6 KEA beslenmesi NO_x emisyonlarında %50 oranında azalma sağladığından bu oranlarda atıkların kullanımı da fabrikaya benzer koşullarda dikkate alınabilir.

Giannopoulos ve diğ., 2007 yılında kesme yağlarını çimento fabrikalarında kullanarak yaptıkları çalışmada %15 oranında kesme yağı beslenmesi durumunda NO emisyonlarının %50 oranında azaltılabileceğini belirlemişlerdir. Ayrıca, Fyffe ve diğ., 2016 yılında yaptıkları çalışmada farklı atıkları kullanarak çimento fabrikalarında NO_x emisyonlarını incelemişlerdir. Çalışmada SRF kullanımı sağlanmıştır. SRF kullanımı ile yapılan denemelerde NO_x emisyonları %24 oranında artmıştır. Papanikola ve diğ., 2019 yılında FORBI adını verdikleri atık ile çimentoda yaptıkları çalışmada ise kullanılan atığın NO_x emisyonlarını 1,2 kat arttırdığı görülmüştür. Carrasco ve diğ., 2002 yılında alternatif yakıt olarak ÖTL kullanımının gaz emisyonları üzerine etkilerini incelemişler ve NO_x emisyonlarının %11 azaldığını tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmalara bakıldığında farklı atıkların farklı karakterleri nedeniyle NO_x emisyonları üzerindeki etkilerinin farklı olduğu da görülmüştür. Çalışmaya esas verilere bakıldığında Carrasco ve diğ., yaptığı çalışmada elde edilen NO_x azaltımına benzer şekilde ÖTL kullanımında azaltım elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan diğer atıklar literatür ile benzerlik göstermemektedir. Ancak farklı atıklarla yapılan çalışmalarla benzer sonuçlara ulaşılmamıştır. Çalışmada kullanılan atıklar ile NO_x emisyonlarında azaltım elde edilmiştir.

6.3. Alternatif Yakıt Kullanımının SO₂ Emisyonları Üzerine Etkisi

Çalışmada seçilen fabrikaya ait fırın besleme tonajı ton/saat olarak, baca gazı sıcaklığı derece (°C) olarak ve oksijen değeri yüzde (%) olarak sürekli emisyon ölçüm sisteminden yarım saatlik verilerin günlük ortalamaları olarak alınmıştır. Emisyonların oluşmasında fırının çalışma şartları oldukça önemlidir. Tablo 6.1 atık kullanım yüzdeleri ve kullanılan atıkları, Tablo 6.2 ise fırın şartlarını göstermektedir. Tablo 6.9 ise tarihler ve SO₂ emisyonlarını göstermektedir.

Tablo 6.9. Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları SO₂ emisyonları

Tarih	SO ₂ (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
1 Ocak	0,1
2 Ocak	0,0
3 Ocak	0,0
4 Ocak	1,6
5 Ocak	1,9
6 Ocak	9,8

Tablo 6.9 (Devam) Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları SO₂ emisyonları

Tarih	SO ₂ (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
7 Ocak	9,5
8 Ocak	6,6
9 Ocak	22,0
10 Ocak	67,1
11 Ocak	45,2
12 Ocak	14,0
13 Ocak	31,8
14 Ocak	0,0
15 Ocak	0,0
16 Ocak	0,0
17 Ocak	28,0
18 Ocak	26,9
19 Ocak	2,9
20 Ocak	0,0
21 Ocak	0,0
22 Ocak	0,0
23 Ocak	0,2
24 Ocak	3,1
25 Ocak	0,0
26 Ocak	10,8
27 Ocak	0,0
28 Ocak	0,0
29 Ocak	0,0
30 Ocak	0,9
31 Ocak	0,0
1 Şubat	2,9
2 Şubat	0,4
3 Şubat	0,9
4 Şubat	0,0
5 Şubat	0,0
6 Şubat	0,0
7 Şubat	25,8
8 Şubat	16,4
9 Şubat	0,0
10 Şubat	0,3
11 Şubat	0,0
12 Şubat	3,8
13 Şubat	6,3
14 Şubat	4,8
15 Şubat	6,8
16 Şubat	3,8
17 Şubat	3,2
18 Şubat	4,1
19 Şubat	0,0
20 Şubat	0,5

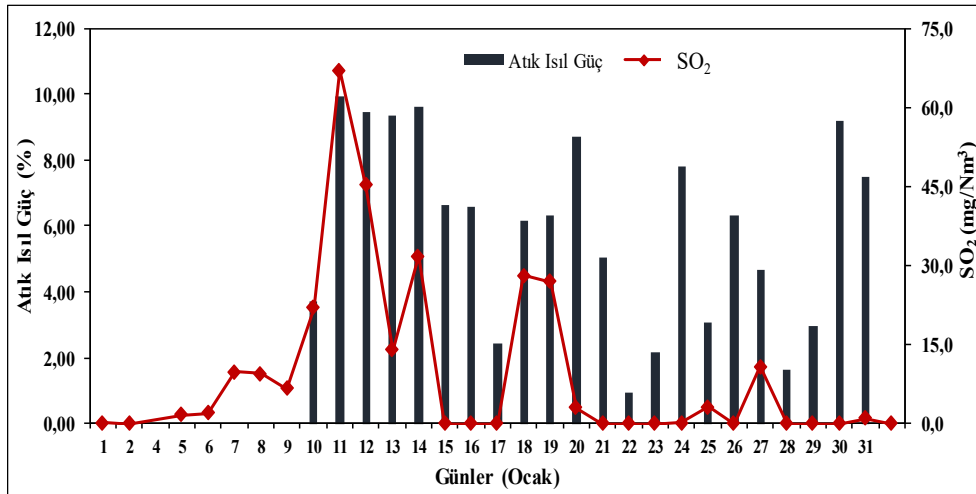
Tablo 6.9. (Devam) Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları SO₂ emisyonları

Tarih	SO ₂ (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
21 Şubat	0,0
22 Şubat	2,3
23 Şubat	1,0
24 Şubat	0,5
25 Şubat	0,0
26 Şubat	0,0
27 Şubat	0,0
28 Şubat	0,0
1 Nisan	8,8
2 Nisan	4,6
3 Nisan	0,0
4 Nisan	0,0
5 Nisan	0,0
6 Nisan	9,5
7 Nisan	0,0
8 Nisan	0,0
9 Nisan	0,0
10 Nisan	3,9
11 Nisan	10,0
12 Nisan	1,2
13 Nisan	0,4
14 Nisan	0,0
15 Nisan	0,0
16 Nisan	41,2
17 Nisan	0,0
18 Nisan	0,0
19 Nisan	8,2
20 Nisan	10,4
21 Nisan	9,8
22 Nisan	49,4
23 Nisan	124,2
24 Nisan	27,9
25 Nisan	8,9
26 Nisan	72,6
27 Nisan	22,2
28 Nisan	19,7
29 Nisan	19,7
30 Nisan	44,9
1 Ağustos	27,4
2 Ağustos	34,6
3 Ağustos	30,2
4 Ağustos	36,1
5 Ağustos	29,4
6 Ağustos	35,3
7 Ağustos	3,4

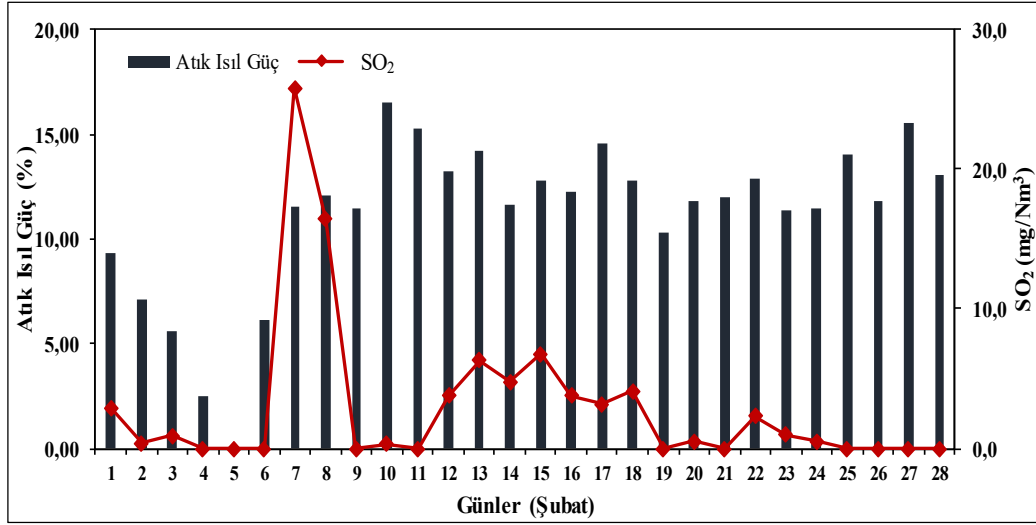
Tablo 6.9 (Devam) Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları SO₂ emisyonları

Tarih	SO ₂ (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
8 Ağustos	2,7
9 Ağustos	38,1
10 Ağustos	15,7
11 Ağustos	42,8
12 Ağustos	5,7
13 Ağustos	25,2
14 Ağustos	44,3
15 Ağustos	115,0
16 Ağustos	71,9
17 Ağustos	75,8
18 Ağustos	120,6
19 Ağustos	34,9
20 Ağustos	66,2
21 Ağustos	88,7
22 Ağustos	79,5
23 Ağustos	50,2
24 Ağustos	65,8
25 Ağustos	59,7
26 Ağustos	59,7
27 Ağustos	80,0
28 Ağustos	14,1
29 Ağustos	21,4
30 Ağustos	60,6
31 Ağustos	28,8

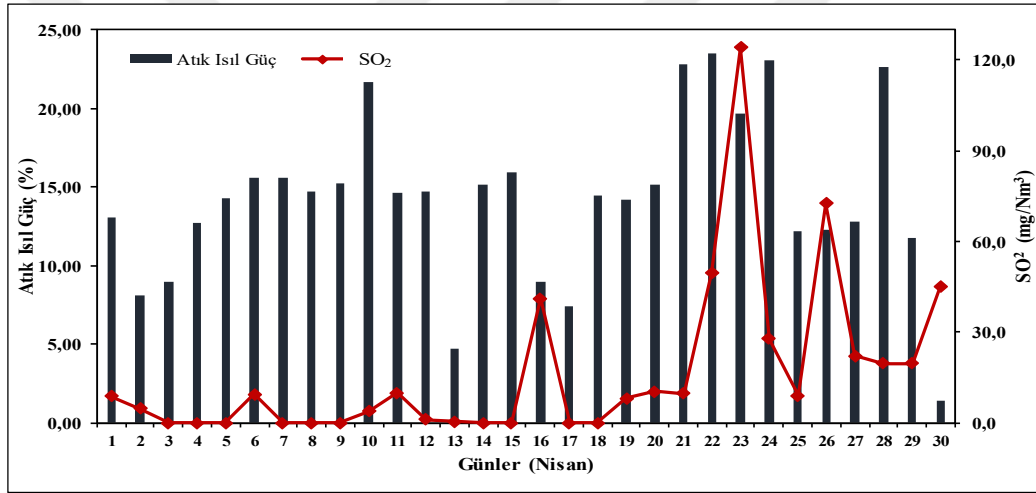
Tablo 6.1, Tablo 6.2 ve Tablo 6.9'dan elde edilen veriler ile Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos aylarına ait SO₂ emisyonlarının atık ısıl yer değıştirme oranları ile ilişkisi sırasıyla Şekil 6.29, Şekil 6.30, Şekil 6.31 ve Şekil 6.32 ile gösterilmiştir.



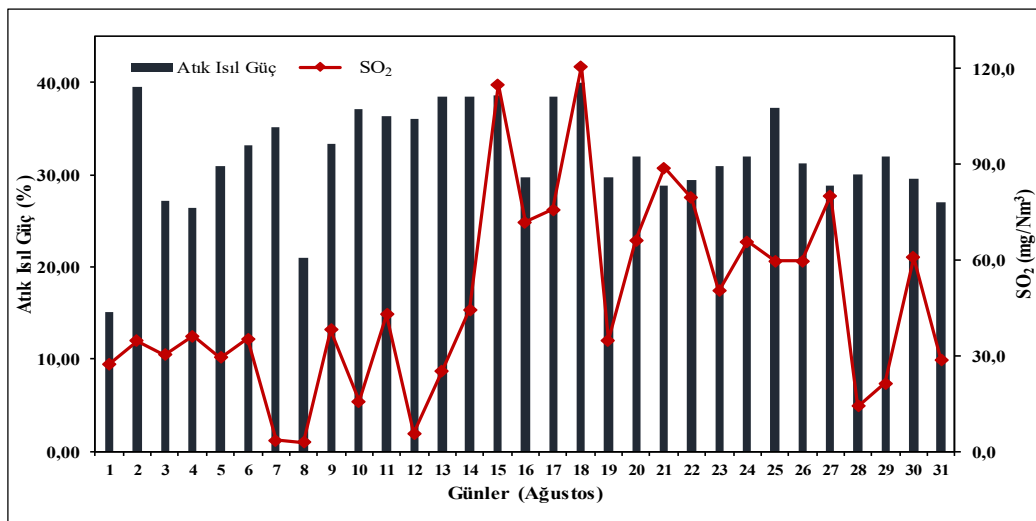
Şekil 6.29. Ocak ayı ısıl yer değıştirme ve SO₂ emisyonları



Şekil 6.30. Şubat ayı ısıl yer değıştirme ve SO₂ emisyonları



Şekil 6.31. Nisan ayı ısıl yer değıştirme ve SO₂ emisyonları

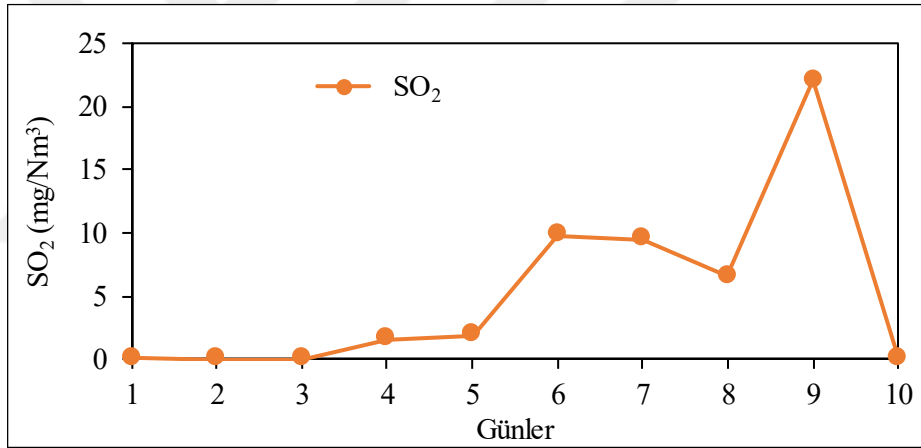


Şekil 6.32. Ağustos ayı ısıl yer değıştirme ve SO₂ emisyonları

Tablo 6.1’de verilen kullanımlar ve Tablo 6.9’da verilen emisyonlar çerçevesinde değerlendirmeler öncelikli olarak atık yakılmayan dönemin kendi arasında kıyaslanması ile yapılmıştır. Fırının kendi özgün şartlarında yalnızca konvansiyonel yakıt kullanımı ile fırın koşulları ve emisyonlarının değişkenliği atık yakılan dönemin kıyaslanmasında değişimlerin atık kaynaklı mı yoksa yakıt kaynaklı mı olduğuna dair bilgi vermektedir.

6.3.1. Atık yakılmayan dönem SO₂ emisyonları

Çalışmada seçilen fabrikada Ocak ayının ilk dokuz günü ile 5 Şubat günü atık kullanımı gerçekleşmemiştir. Çalışmanın bu noktasında atık kullanımı olmayan dönemde SO₂ emisyonları incelenmiştir ve elde edilen değişimler Şekil 6.33 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.33. Atık yakılmayan dönem SO₂ emisyonları

Atık yakılmayan dönemde fırın tonajı 155-160 ton/gün arasında, oksijen yüzde 10,8 ila 11 arasında değişmiş ve sıcaklık 76°C olarak belirlenmiştir. Atık yakılmayan dönemde, yalnızca birincil yakıt kullanımı ile SO₂ emisyonları 0 ila 22 mg/Nm³ arasında değişmiştir. Tüm şartlar aynı olmasına rağmen SO₂ emisyonları 22 mg/Nm³ değerine ulaşmıştır ki bu da Bölüm 3.3’te anlatıldığı gibi SO₂ emisyonlarının yakıt içerisindeki kükürt kaynağı ve organik maddenin oksidasyonu ile değişeceğini göstermiştir. Atık yakılmayan dönemde yanma koşullarından bağımsız olarak SO_x emisyonları değişkenlik göstermiştir.

Atık yakılmayan 5 Ocak günü SO_x emisyonları 1,9 mg/Nm³ olarak gerçekleşmiştir. Bu emisyonlarda oksijen, tonaj ve CO emisyonları kalan dört gün ile benzerdir. 6 Ocak

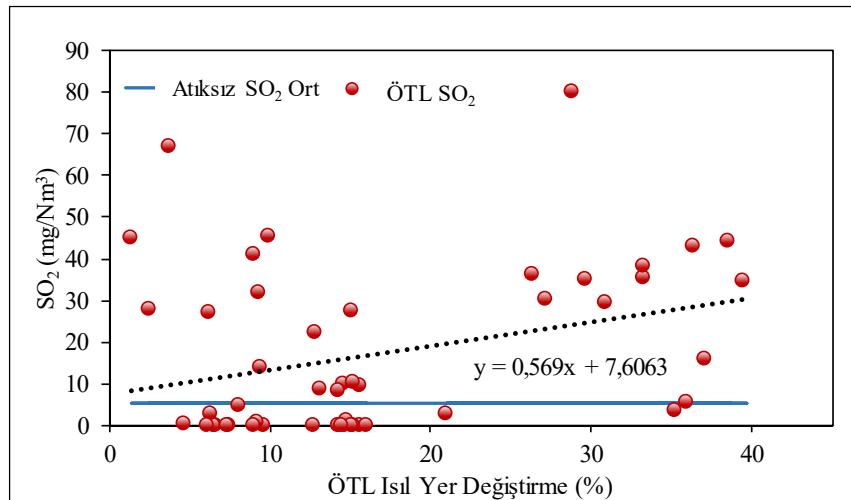
günü fırın tonajı 1 ton artmış, CO emisyonu azalmış ve SO_x emisyonları 9,8 mg/Nm³ değerine yükselmiştir. 9 Ocak günü tonaj, 5 Ocak gününe göre 1,2 ton ve CO emisyonları da 490 mg/Nm³ artmıştır. Bu parametrelerde çalışan fırında SO_x emisyonları 1,9 mg/Nm³'ten 22 mg/Nm³ değerine yükselmiştir. Atık yakılmayan dönemin SO₂ emisyonları ortalaması 5,2 mg/Nm³ olarak hesaplanmıştır.

Sıcaklık, tonaj ve CO emisyonlarının aynı kaldığı yakıt tipinin ve yakıt oranının değişmediği dönemde SO₂ emisyonlarında 10 kata yakın görülen artışların hammadde kaynaklı olduğu söylenebilir. Tosun'un, 2006 yılındaki çalışmasında belirtildiği gibi döner fırınlardaki SO_x oluşumu genel olarak hammadde içerisindeki uçucu sülfüre bağlı olarak değişir [161].

6.3.2. Ömrünü tamamlamış lastik kullanımı ve SO₂ emisyonu ilişkisi

Atık yakılan dönemlerde en çok kullanılan atık olan ÖTL, 120 günlük veri seti içerisinde 49 gün boyunca tek başına kullanılmıştır. Bütün ve parçalanmış halde de olsalar ÖTL'ler aynı besleme noktasından fırına beslenmiştir.

Şekil 6.29, Şekil 6.30, Şekil 6.31 ve Şekil 6.32'den görülebileceği üzere SO₂ emisyonları ısıl yer değiştirme oranları ile paralel olarak değişim göstermemiştir. Genel olarak yükselme eğiliminde de olsa ısıl yer değiştirme olan günlerde de 0 mg/Nm³ olduğu günler bulunmaktadır. Şekil 6.34 yalnızca ÖTL kullanılan dönemin SO₂ emisyonlarının dağılımı ve atıksız SO₂ ortalaması ile karşılaştırmasını göstermektedir.



Şekil 6.34. ÖTL kullanımı ile SO₂ emisyonları

ÖTL kullanılan 49 günün yalnızca 22 adetinde SO₂ emisyonları atıksız ortalama değer altında kalırken 49 günlük ortalama değer 17,1 mg/Nm³ değerine ulaşarak 3,2 katlık (%230) bir oranda artış meydana gelmiştir. Her ne kadar 49 adet verinin %45'i SO₂ ortalamasının altında kalsa da diğer kısımdaki verilerin SO₂ değerleri yüksek gerçekleştiğinden ortalama değer atıksız ortalamaya oranla 3,2 kat artış göstermiştir. Şekil 6.34'den görüldüğü gibi atık kullanımı ile SO₂ emisyonları yükselmiştir ancak artan ısı güç ile doğru orantılı olarak bir değişim gözlenmemektedir.

Yalnızca ÖTL kullanılan günlerin 15 adetinde %6-%15,9 oranında değişen ısı yer değiştirme oranlarında SO₂ emisyonu 0 mg/Nm³ olarak ölçülmüştür. Bu tarihler ve bu tarihlerdeki ısı yer değiştirme oranları ile benzer oranlara ve fırın koşullarına sahip günlere ait SO₂ emisyonları Tablo 6.10'da verilmiştir.

Tablo 6.10. Aynı oranda ÖTL kullanımı ve SO_x emisyonları

Tarih	ÖTL (Isıl Güç %)	SO ₂ (mg/Nm ³ %10O ₂)	Tarih	ÖTL (Isıl Güç %)	SO ₂ (mg/Nm ³ %10O ₂)
14 Oca	9,60	0,0	11 Oca	9,92	45,2
05 Nis	14,29	0,0	19 Nis	14,22	8,2
07 Ağu	35,20	3,4	12 Ağu	35,99	5,7

Tablo 6.10'dan da görüldüğü üzere aynı oranda beslenen ÖTL'nin SO₂ emisyonları üzerinde etkisi oldukça farklı olarak karşımıza çıkmaktadır. 14 Ocak günü %9,60 oranında ısı yer değiştirmede kükürtdioksit emisyonu 0 mg/Nm³ olurken 11 Ocak günü aynı atıktan aynı oranda %9,9 beslenmesi ile SO₂ emisyonları 45,2 mg/Nm³ olarak ölçülmüştür. Tablo 6.10'dan 07 Ağustos ve 12 Ağustos karşılaştırmasına bakılırsa %35 oranında ÖTL beslenmesinin 3,4 ve 5,7 mg/Nm³ emisyonuna neden olduğu görülmektedir. 5 Nisan ve 19 Nisan tarihlerinde ise %14 oranında gerçekleşen ısı yer değiştirme oranlarında 0 ve 8,2 mg/Nm³ emisyon değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir. Isıl yer değiştirme oranı aynı kalsa da artsa da SO₂ emisyonu ÖTL kullanımından bağımsız hareket etmiştir diyebiliriz.

Ocak ayında gerçekleşen düşük ısı yer değiştirme oranlarında da SO₂ emisyonları atık yakılmayan döneme göre artış göstermiştir ve ortalama değer olarak 18 mg/Nm³ değerinde gerçekleşmiştir. Ocak ayındaki 5 günlük değerler atıksız ortalama değer olan 5,2 mg/Nm³ değerinin altında kalmış ve 3,5 kat oranında artış meydana

gelmiştir. Ocak ayı içerisinde en yüksek değer %3 oranında ısı yer değiştirme sırasında 67,1 mg/Nm³ değerinin ölçülmesi ile gerçekleşmiştir.

Şubat ayında ÖTL kullanımı sadece bir gün gerçekleşmiş ve bugünde ısı yer değiştirme oranı %6 olmuştur. Bugün meydana gelen SO₂ emisyonu ise 0 mg/Nm³ olarak ölçülmüştür.

Nisan ayı içerisinde 21 gün boyunca ÖTL tek başına kullanılmıştır. 21 günlük bu kullanımların 13 gününde SO_x emisyonları atıksız ortalama değerinin altında kalmıştır. Nisan ayında atıksız ortalama emisyon üzerinde kalan değerler gün sırasına göre 8,8, 9,5, 10, 41,2, 8,2, 10,4, 22,2 ve 44,9 olarak gerçekleşmiştir.

Ağustos ayı içerisinde ise 15 gün boyunca ÖTL tek kullanılmış ve bugünlerden yalnızca 3 günlük veri atıksız ortalama emisyon verisinin altında kalmıştır. SO₂ emisyon değerlerinin en yüksekleri Ağustos ayı içerisinde gerçekleşmiştir. Yükselen ısı yer değiştirmenin SO₂ emisyonlarının artışına neden olduğu düşünülebilir. Ancak, Ağustos ayında %35 oranındaki ısı yer değiştirmede 3,4 ve 5,7 mg/Nm³ SO₂ emisyonları ölçülmüştür. Bu durumda düşük SO₂ emisyonu için %24 ÖTLB ve %11 ÖTLB kullanımı optimum değer olarak kabul edilebilir.

Çalışmaya esas fabrikada intikalden %35 oranında toplam ÖTL kullanırken, %24 oranında ÖTLB ve %11 oranında ÖTLK dağılımı ile beslenmesiyle SO₂ emisyonları atıksız ortalama ile aynı seviyede tutulabilir ya da %34 oranında azaltım sağlanabilir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar Arshed ve diğ., 2014 yılında yaptıkları çalışma ile benzerlik göstermiştir. Arshed ve diğ., 2014 yılında, ÖTL kullanımı ile çimento fabrikasında yaptıkları 5 farklı besleme sonucunda SO₂ emisyonlarının değişmediğini ya da 1,49 kat artış gösterebileceğini belirlemişlerdir. Carrasco ve diğ., 2002 yılında ÖTL ile yaptıkları çalışmada SO₂ emisyonlarını %23 oranında artış kaydettiğini söylemişlerdir. Bu çalışmada da emisyonların 0 mg/Nm³ kalması mümkün iken bazı durumlarda da 3,5 kat artış olabileceği görülmüştür. Nielsen tarafından 2012 yılında gerçekleştirilmiş olan çalışmada ÖTL'nin kükürt içeriği nedeni ile fırın içerisindeki kükürt miktarında artışa neden olabileceğini belirtilmiştir. Bölüm 2'de ömrünü tamamlamış lastikler anlatılırken, kömür, telli ÖTL ve telsiz ÖTL için Tablo 2.11'de elementel analiz değerleri verilmiş ve orada kükürt değeri

telli ÖTL için %0,99 olarak belirtilmiştir. Fabrika’da kullanılan ÖTL için kükürt değeri yapılan analizlerde %1 ila 2 arasında değişen seviyelerde bulunmuştur. Kullanılan birincil yakıt için kükürt oranı ise %6 civarındadır. Ancak, çalışmaya esas fabrika için ÖTL ile fırına giren kükürtün emisyon olarak bacadan atmosfere verilmediği de söylenebilir. Kükürt döngüsü ile sistemde kalmış olma olasılığı da mevcuttur. Literatür ile paralel sonuçlar görülmüştür.

6.3.3. Karışık endüstriyel atık kullanımı ve SO₂ emisyonu ilişkisi

Çalışmaya konu fabrikada Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos aylarında toplamda 210,54 ton KEA kullanımı olmuştur. Karışık endüstriyel atık çalışmaya konu olan 120 gün içerisinde yalnızca 28 Ocak tarihinde tek başına kullanılmıştır. 28 Ocak tarihinde %1,63 ısıl yer değiştirme oranına ulaşmak için 15 ton KEA beslemesi yapılmıştır. Bu sırada fırında %10,5 oksijen varken baca gazı çıkış sıcaklığı da 75,6°C olarak oluşmuştur.

Tüm bu fırın koşullarında ve kalorigide SO₂ emisyonu 0 mg/Nm³ olarak okunmuştur. Ocak ayı atık yakılmayan günlerin ortalaması 5,7 mg/Nm³ olarak gerçekleştiğinden %100 oranında bir azalma meydana geldiği söylenebilir.

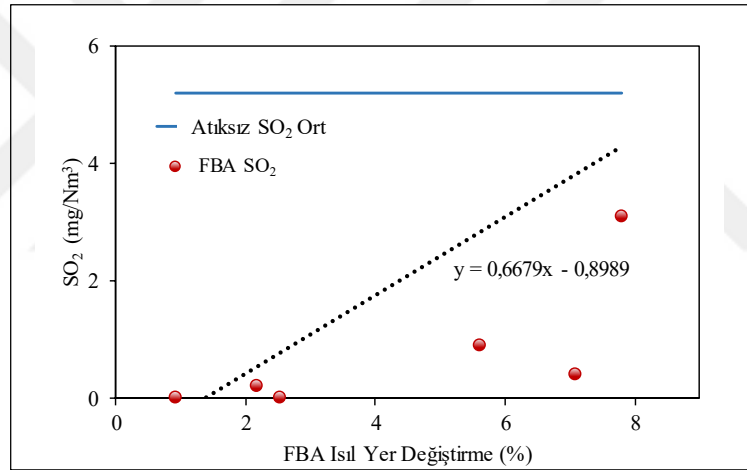
Ancak, önceki bölümde bahsedildiği gibi atık yakılmayan tüm günlerin ortalaması 5,2 mg/Nm³’tür. Ancak, bu atık özelinde çalışmada bu veri yalnızca bir tane olduğundan ve sadece Ocak ayı içerisinde kullanıldığından yalnızca Ocak ayı dinamikleri arasında değerlendirilmesi daha doğru olarak görülmüş ancak her iki veri de birbirine yakın olduğundan %100 oranındaki azalış net şekilde söylenebilir.

28 Ocak günü dışında KEA’nın tüm kullanımları ÖTL ve/veya FBA ile birlikte olmuştur. Bu nedenle bu başlıkta tek bir değer verilebilmiştir. Ancak, atıkların karışık kullanımları Bölüm 6.3.5 altında ayrıca değerlendirilecektir. KEA yapılan hiçbir çalışmada kullanılan bir atık olmadığından literatür karşılaştırması yapılamamıştır.

6.3.4. Fosil bazlı atık kullanımı ve SO₂ emisyonu ilişkisi

Fosil bazlı atık çalışmaya konu fabrikada Ocak, Şubat ve Ağustos aylarında toplam olarak 576 ton kullanılmıştır. Nisan ayında fosil bazlı atık kullanımı gerçekleşmemiştir. Fosil bazlı atık Ocak ayında 22 Ocak, 23 Ocak, 24 Ocak ve 26

Ocak tarihleri olmak üzere 4 gün Şubat ayında ise 2 Şubat, 3 Şubat ve 4 Şubat tarihleri olmak üzere 3 gün toplamda da 7 gün tek başına kullanılmıştır. Şubat ayında da kullanım olduğundan SO₂ emisyonları Şubat ayı atık yakılmayan dönemi de göz önüne alınarak değerlendirilmiş ve atıksız SO₂ ortalaması 5,7 mg/Nm³ değeri baz alınarak incelenmiştir. Ağustos ayında FBA kullanılmış ancak tek başına bir kullanımı olmamıştır. Ocak ayında %0,9 ila %7,8 oranlarında değişen atık ısıl yer değiştirme mevcuttur. Şubat ayında ise %2,5, %5,6 ve %7,08 oranlarında ısıl yer değiştirmeye ulaşılmıştır. Ocak ayında %0,9 yer değiştirmede 0 mg/Nm³ değeri, %7,8 oranında ise 3,1 mg/Nm³ değeri görülmüştür. Şubat ayında ise ölçülen tüm SO₂ değerleri 1 mg/Nm³ değeri altında kalmıştır. Ocak ve Şubat aylarında yalnızca FBA kullanılan dönemlere ait SO₂ değerlerinin atık yakılmayan günlere ait SO₂ ortalaması ile karşılaştırılması Şekil 6.35 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.35. FBA kullanımı SO₂ değerleri ve atık yakılmayan SO₂ ortalama değeri karşılaştırması

Şekil 6.35'den de görüleceği üzere fosil bazlı atık kullanımı ile SO₂ değerleri atıksız SO₂ ortalama değerinin altında gerçekleşmiştir. Fosil bazlı atık kullanımı olan günlerin SO₂ ortalaması 2,2 mg/Nm³ olmuştur. Şartlar gözönüne alındığında fosil bazlı atık kullanımı ile %58 oranında azaltım meydana geldiği görülmüştür.

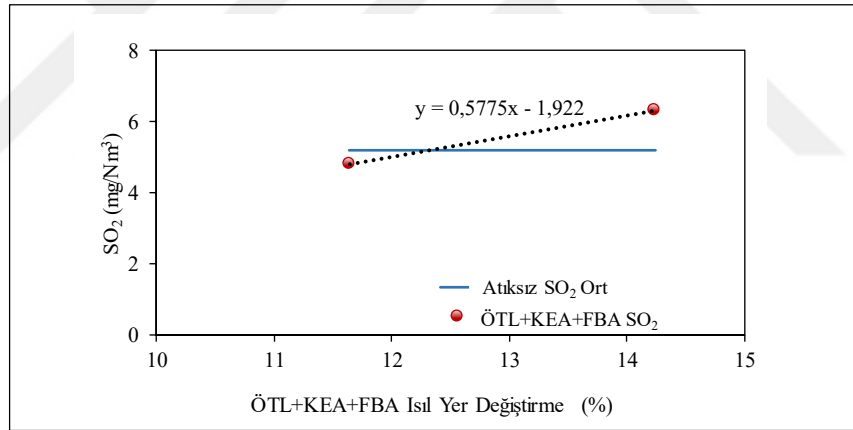
Ocak ve Şubat aylarında FBA'nın tek başına kullanıldığı dönemde fırın koşulları birbirini ile aynıdır. Atıksız günler dikkate alındığında aynı tonaj ve sıcaklık değerinde FBA kullanılan %7,084 oranında ısıl yer değiştirme yüzdesinde 0,4 mg/Nm³ SO₂ emisyonuna %10,3 oksijen değeri ve 76,1°C baca gazı sıcaklığında ulaşılmıştır. FBA özelinde %7,084'lük ısıl yer değiştirme oranının SO₂'nin en fazla azaltıldığı oran

olarak uygulanabileceği çalışmadaki fabrika için ve bu fabrikaya benzer intikalden atık besleyen fabrikalar için söylenebilir.

6.3.5. Karışık atık kullanımı ile SO₂ emisyonları ilişkisi

Çalışmaya esas fabrikada 120 günlük veri seti içerisinde 55 gün boyunca atıklar ÖTL+KEA, ÖTL+FBA, KEA+FBA ve ÖTL+KEA+FBA karışımı olarak kullanılmıştır.

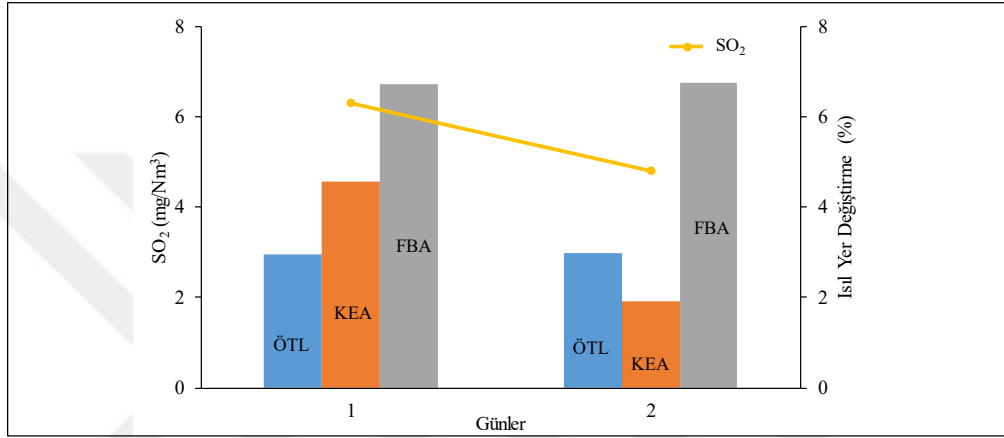
Her üç atığın birlikte kullanımı fırında yalnızca iki gün boyunca 13 ve 14 Şubat tarihlerinde gerçekleşmiştir. Bu iki günden birinde SO₂ emisyon değerleri atıksız SO₂ emisyonları ortalamasından yüksek bir gününde ise düşük gerçekleşmiştir. Bu üç atığın karışım halinde kullanılması ile ölçülen SO₂ emisyonları Şekil 6.36 ile gösterilmiştir. 13 ve 14 Şubat tarihlerinde SO₂ emisyonları sırasıyla 6,3 ve 4,8 mg/Nm³ olmuştur.



Şekil 6.36. ÖTL+KEA+FBA beraber kullanımı SO₂ emisyonları

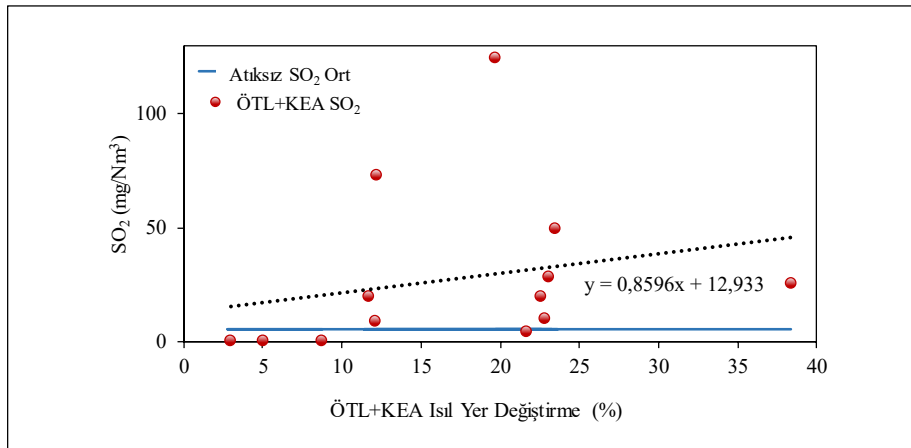
13 ve 14 Şubat tarihlerinde ÖTL ve FBA ısıl yer değiştirme yüzdeleri, oksijen seviyesi, ve baca gazı sıcaklığı aynıdır. Değişkenlik gösteren tek parametre KEA yüzdesinin azalmasıdır. Üç atık birlikte kullanılması durumunda KEA'nın karışım içindeki yüzdesinin düşürülmesinin SO₂ emisyonlarında azalmaya neden olduğu görülmüştür. Fırının tüm koşulları aynı tutulduğunda ısıl yer değiştirme yüzdesinin düşüşü SO₂ emisyonlarında azalmayı desteklemektedir. Bu üç atığın karışımının kullanıldığı iki günün ortalaması 5,6 mg/Nm³ olmuştur ve değer atıksız ortalamadan sadece %6 daha yüksektir. ÖTL, FBA ve KEA'nın birlikte kullanıldığı iki güne ait atık oranları ve SO₂ emisyonları Şekil 6.37 ile gösterilmiştir. ÖTL tek kullanıldığında

3,2 kat artışa, KEA tek kullanıldığında 0 mg/Nm³ değerine ve FBA tek kullanıldığında %58 emisyon azaltımı gerçekleşmiş her üç atık birlikte kullanıldığında atık kullanım oranı %11 oranına düştüğü zaman SO₂ emisyonlarında %7,6 oranında düşüş görülmüştür. %14 ısıl yer değiştirme oranından %11 oranında düşüş %3 oranında KEA kullanımında azalma ile olmuştur. ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanımının KEA kullanılmadan daha yüksek oranda SO₂ azaltımına etkisi olduğu söylenebilir.



Şekil 6.37. ÖTL+FBA+KEA ısıl yer değiştirme ve SO₂ emisyonları değişimi

Çalışmaya esas 120 verinin 13 tanesi ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanıldığı verilerdir. 20-21 ve 29 Ocak, 10, 21-26, 28, 29 Nisan ve 13 Ağustos bu iki atığın birlikte yakıldığı tarihlerdir. Bu iki atığın birlikte kullanılması ile oluşan SO₂ emisyonlarının 3 tanesi atıksız SO₂ ortalama verisinin altında kalmıştır. ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanıldığı günlere ait SO₂ emisyonlarının atıksız SO₂ ortalama değeri ile karşılaştırması Şekil 6.38 ile verilmiştir.



Şekil 6.38. ÖTL+KEA birlikte kullanımı ile oluşan SO₂ emisyonları

Şekil 6.38'ten görüleceği üzere %2 ila %38 arasında yer değiştirme elde edilen atık karışımının fırında kullanımı ile elde edilen SO₂ emisyonları 27,1 mg/Nm³ ortalama değerine yükselmiştir. Bu artış yalnızca ÖTL kullanıldığı zaman SO₂ emisyonlarında görülen artıştan yüksek olmuştur. KEA tek kullanıldığında fırında 0 mg/Nm³ SO₂ emisyonu görülmüşken ÖTL ve KEA kullanımı fırında SO₂ emisyonlarının 5,4 kat artmasına neden olmuştur. Bu iki atığın beraber kullanımı ile elde edilen ortalama SO₂ emisyonu bakılarak beraber kullanılmasının emisyonlar üzerinde olumsuz etki yaptığı söylenebilir.

ÖTL ve KEA birlikte kullanıldığı dönemde fırın tonajı 160-166 ton arasında kalarak büyük değişim göstermemiştir. Oksijen değeri %9,6 ila %10,9 arasında oksijen için geniş aralık sayılabilecek bir düzeyde değişim göstermiştir. Baca gazı sıcaklığı ise 75°C ila 100°C arasında değişmiştir. ÖTL ve KEA kullanımı ile oluşan en yüksek SO₂ emisyonu 23 Nisan günü meydana gelmiştir. 23 Nisan tarihinde %19,68'lik bir ısıl yer değiştirmede fırın tonajı 160,8 t, oksijen %9,6 ve sıcaklık 90,7°C olmuştur. Bu tarihte SO₂ değeri 124,2 mg/Nm³ olmuştur.

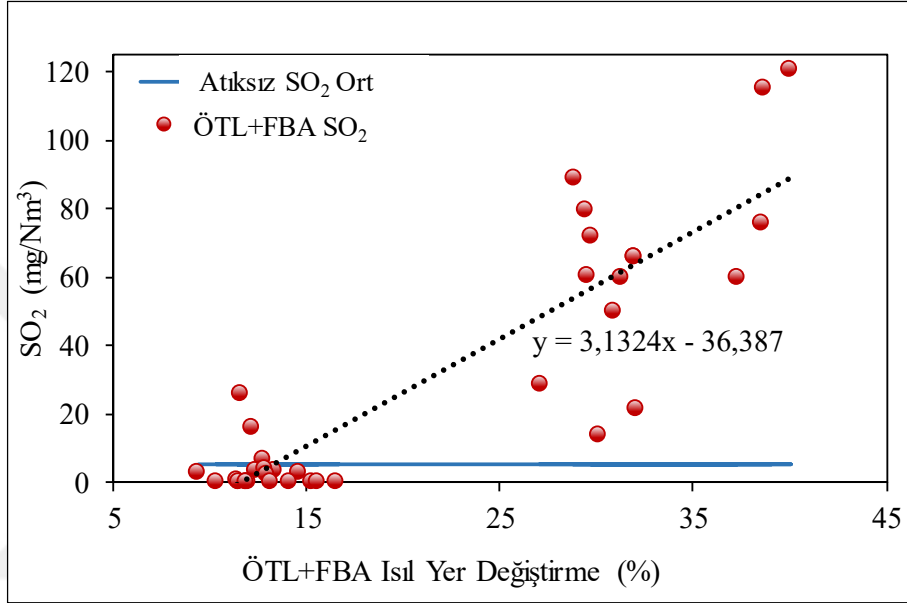
ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanımı hem ÖTL'nin hem de KEA'nın tek kullanımı ile elde edilen SO₂ sonuçları ile paralellik göstermemiştir. ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanımı ile elde edilen SO₂ değerleri ÖTL ve KEA'nın ısıl yer değiştirme oranlarından da bağımsız olarak değişmiştir. Aynı ısıl değerdeki ÖTL ve KEA kullanılan günlere ait SO₂ karşılaştırmaları Tablo 6.11 ile sunulmuştur.

Tablo 6.11. Aynı ısıl yer değiştirme oranı ve SO₂ emisyonları

Tarih	ÖTL+KEA (Isıl Güç %)	SO ₂ (mg/Nm ³ %10O ₂)	Tarih	ÖTL+KEA (Isıl Güç %)	SO ₂ (mg/Nm ³ %10O ₂)
21 Nis	22,81	9,8	28 Nisan	22,60	25,8
25 Nis	12,16	8,9	26 Nisan	12,25	72,6

Tablo 6.11'den de görüleceği üzere ÖTL ve KEA birlikte kullanıldığında SO₂ emisyonları artış göstermektedir. Ancak, artış ısıl yer değiştirme oranından ve fırın koşullarından bağımsız olarak değişmiştir. Benzer fırın koşullarında aynı oranda kullanılan atıklarda elde edilen SO₂ emisyonları, emisyonların hammadde kaynaklı olabileceğini düşündürmektedir.

Çalışmaya esas 120 verinin 36 tanesinde ÖTL ve FBA birlikte kullanılmıştır. 1-12 Şubat, 15-28 Şubat, 15-18 Ağustos, 20-26 Ağustos ve 28-31 Ağustos bu iki atığın birlikte yakıldığı tarihlerdir. Bu iki atığın birlikte kullanılması ile oluşan SO₂ emisyonlarının %50'si atıksız SO₂ emisyon ortalamasından düşükken %50'si ise yüksektir. ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanıldığı günlere ait SO₂ emisyonlarının atıksız SO₂ ortalama değeri ile karşılaştırması Şekil 6.39 ile verilmiştir.

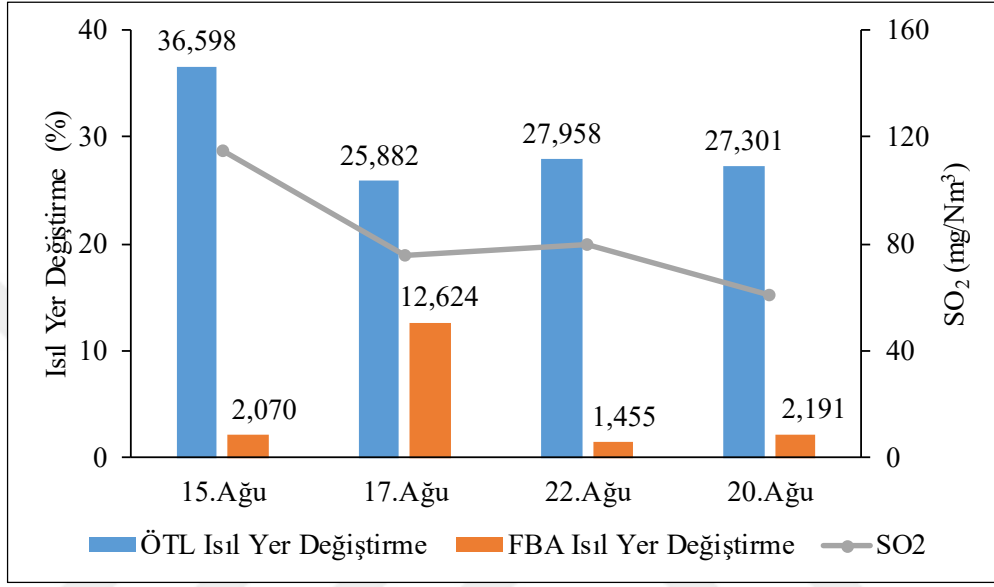


Şekil 6.39. ÖTL ve FBA kullanımı ile SO₂ emisyonları ilişkisi

Bölüm 6.3.2 ÖTL'nin tek başına kullanımını ve Bölüm 6.3.4 ise FBA'nın tek başına kullanımının SO₂ emisyonları üzerine etkilerini incelemiştir. ÖTL'nin tek kullanımının SO₂ emisyonlarını 3,2 kat (%230) arttırdığı ve FBA'nın tek başına kullanımlarının SO₂ emisyonlarında %58 azalma meydana getirdiği belirlenmiştir. ÖTL ve FBA atıklarının bir arada kullanılmasında ise SO₂ emisyonlarındaki 5,4 kat (%435) artış meydana gelmiştir. ÖTL ve KEA birlikte kullanımında olduğu gibi ÖTL ve FBA kullanımı ile de SO₂ emisyonları artış göstermiştir.

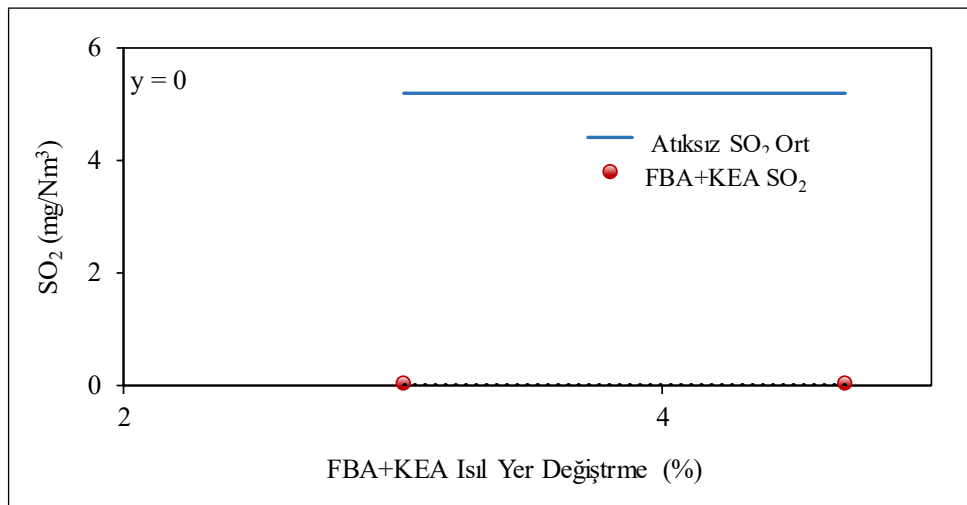
ÖTL ve FBA birlikte kullanıldığı durumda ısıl yer değiştirme %15 oranına kadar olduğunda SO₂ emisyonununun 0 mg/Nm³ olduğu görülmüştür. %15 ısıl yer değiştirme oranında ÖTL %10'a kadar FBA ise %5'e kadar kullanılmıştır. ÖTL'nin tamamı bütün şekilde beslenmiştir. Isıl yer değiştirme %38 oranına çıktığında ve kırılmış ÖTL kullanımı ile de SO₂ emisyonları artış kaydetmiş ve en yüksek değer olarak 120 mg/Nm³ değerine ulaşmıştır. %23 ila %38 arasındaki ısıl yer değiştirme oranlarında

FBA %0,7-%12 arasında kullanılmıştır. Tablo 6.9 ve Şekil 6.40'dan görüleceği üzere ısıl yer değiştirme arttıkça SO₂ emisyonları ÖTL ve FBA karışımı kullanıldığı durumlarda artış göstermiştir. İntikalden ÖTL ve alev borusundan FBA beslenmesi durumunda birincil yakıtlara oranla 6 kat daha az kükürt içeren yakıtların kullanılmasına rağmen SO₂ emisyonlarının artışına rastlanmıştır.



Şekil 6.40. ÖTL ve FBA ısıl yer değiştirme ile SO₂ emisyonları değişimi

Çalışmaya esas 120 veri arasında 2 tanesinde FBA ve KEA beraber kullanılmış ve bunların her ikisi de Ocak ayı içerisinde gerçekleşmiştir. Her iki veride atıksız SO₂ emisyon değeri 0 mg/Nm³ olarak ölçülmüştür. Şekil 6.41, FBA ve KEA'nın birlikte kullanıldığı günlerin SO₂ emisyonlarını göstermektedir.



Şekil 6.41. KEA+FBA ısıl yer değiştirme ve SO₂ emisyonları

FBA ve KEA'nın birlikte kullanılması sırasındaki ısıl yüzde dağılımları 25 Ocak için %1,1 KEA ve %1,9 FBA, 27 Ocak için ise %1,6 KEA ve %3 FBA'dır. KEA ve FBA'nın yüzdesel dağılımları SO₂ emisyonu açısından bir farklılık oluşturmamıştır. FBA ve KEA'nın birlikte kullanılmasıdaki emisyon değişimi ile ÖTL, FBA ve KEA'nın birlikte kullanıldığı dönem emisyonları ile paralellik göstermiştir. KEA'nın tek başına kullanıldığı dönemde SO₂ emisyonları 0 mg/Nm³ olmuş, FBA'nın tek kullanıldığı dönemde ise SO₂ emisyonları %58 oranında azalmıştır. KEA ve FBA'nın birlikte kullanımı ile elde edilen 0 emisyon değeri bu iki kullanımı doğrular şekilde gerçekleşmiştir.

Atık yakılmayan dönem ve farklı atıkların yakıldığı dönem, karışık atıkların kullanıldığı dönemler SO₂ emisyonları açısından kendi içlerinde değerlendirilmiştir. ÖTL kullanımı ile SO₂ emisyonları 3,5 kat artmış, KEA kullanımı ile 0 mg/Nm³ değerinde ölçümlene yapılmış ve FBA kullanımı ile %58 oranında azalmıştır. Atıkların karışık kullanılması durumunda SO₂ emisyonları atıksız ortalamaya göre %6 oranında artmış, ÖTL ve FBA ve ÖTL ve KEA kullanılması ile birlikte ise 5,4 kat artmıştır.

Atık yakılması sırasında SO₂ emisyonları 0 ila 120 mg/Nm³ değerleri arasında ısıl yer değiştirme oranından bağımsız olarak değişiklik göstermiş olsa da genel olarak yükselme eğilimi göstermiştir. Özellikle ÖTLK ve ÖTLB'nin birlikte kullanıldığı dönemlerde SO₂ emisyonları diğer dönemlere göre daha yüksek seyretmiştir. Çalışmaya esas veriler gözönüne alındığında KEA tek başına ya da KEA ve FBA beraber kullanımı 0 mg/Nm³ değerinde olması sebebiyle tercih edilebilecek karışımlar olarak görülebilir.

Papanikola ve diğ., 2019 yılında FORBI adını verdikleri atık ile çimentoda yaptıkları çalışmada kullanılan atığın SO₂ emisyonlarını %70 oranında arttırdığını raporlamışlardır.

Carrasco ve diğ., 2002 yılında alternatif yakıt olarak ÖTL kullanımının gaz emisyonları üzerine etkilerini incelemişler ve SO₂ emisyonlarının %23 arttığını tespit etmişlerdir.

Fyffe ve diğ., 2016 yılında yaptıkları çalışmadan evsel ATY kullanmışlar ve çimento fabrikası SO₂ emisyonlarının incelemiştir. Yapılan çalışmada kullanılan atığın %19 oranında SO₂ azaltımı sağladığını belirlemiştir.

Bu noktada yapılan çalışmada endüstriyel atıkların kullanımına yönelik çalışma sonuçları ile benzerlik göstermiş ve SO₂ emisyonlarında genel olarak bir artış olduğunu belirlemiştir.

6.4. Alternatif Yakıt Kullanımının TOK Emisyonları Üzerine Etkisi

Organik bileşikler döner fırına hammadde ile girer. Yüksek sıcaklıklarda ve uzun bekleme sürelerinde TOK emisyonu oluşumu beklenmez. TOK emisyonunun oluşum nedenleri, yakıtın tam yanmaması, yakıt besleme oranında görülen dalgalanmalar ve hammadde içerisindeki organik karbon içeriğidir.

Çalışmada seçilen fabrikaya ait fırın besleme tonajı ton/saat olarak, baca gazı sıcaklığı derece (°C) olarak ve oksijen değeri yüzde (%) olarak sürekli emisyon ölçüm sisteminden yarım saatlik verilerin günlük ortalamaları olarak alınmıştır. Emisyonların oluşmasında fırının çalışma şartları oldukça önemlidir. Tablo 6.1 atık kullanım yüzdeleri ve kullanılan atıkları, Tablo 6.2 ise fırın şartlarını göstermektedir. Tablo 6.12’de ise tarihler ve TOK emisyonlarını göstermektedir.

Tablo 6.12. Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları TOK emisyonları

Tarih	TOK (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
1 Ocak	5,1
2 Ocak	3,6
3 Ocak	4,2
4 Ocak	4,2
5 Ocak	6,1
6 Ocak	7,8
7 Ocak	7,7
8 Ocak	7,9
9 Ocak	10,3
10 Ocak	9,8
11 Ocak	9,4
12 Ocak	6,8
13 Ocak	7,3
14 Ocak	4,4
15 Ocak	3,4
16 Ocak	4,9
17 Ocak	10,1

Tablo 6.12. (Devam) Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları TOK emisyonları

Tarih	TOK (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
18 Ocak	10,9
19 Ocak	11,7
20 Ocak	59,2
21 Ocak	53,5
22 Ocak	30,2
23 Ocak	10
24 Ocak	22,2
25 Ocak	28,5
26 Ocak	65,9
27 Ocak	42,1
28 Ocak	26,0
29 Ocak	6,2
30 Ocak	11,5
31 Ocak	3,2
1 Şubat	6,6
2 Şubat	5,5
3 Şubat	5,4
4 Şubat	6,0
5 Şubat	3,2
6 Şubat	1,6
7 Şubat	2,7
8 Şubat	4,1
9 Şubat	6,7
10 Şubat	4,1
11 Şubat	6,8
12 Şubat	8,7
13 Şubat	6,6
14 Şubat	7,3
15 Şubat	4,9
16 Şubat	2,7
17 Şubat	5,5
18 Şubat	7,5
19 Şubat	14,2
20 Şubat	6,9
21 Şubat	7,1
22 Şubat	5,1
23 Şubat	4,3
24 Şubat	9,2
25 Şubat	2,3
26 Şubat	10,4
27 Şubat	3,2
28 Şubat	0,6
1 Nisan	7,7
2 Nisan	8,5
3 Nisan	5,3
4 Nisan	4,0
5 Nisan	3,7
6 Nisan	6,1

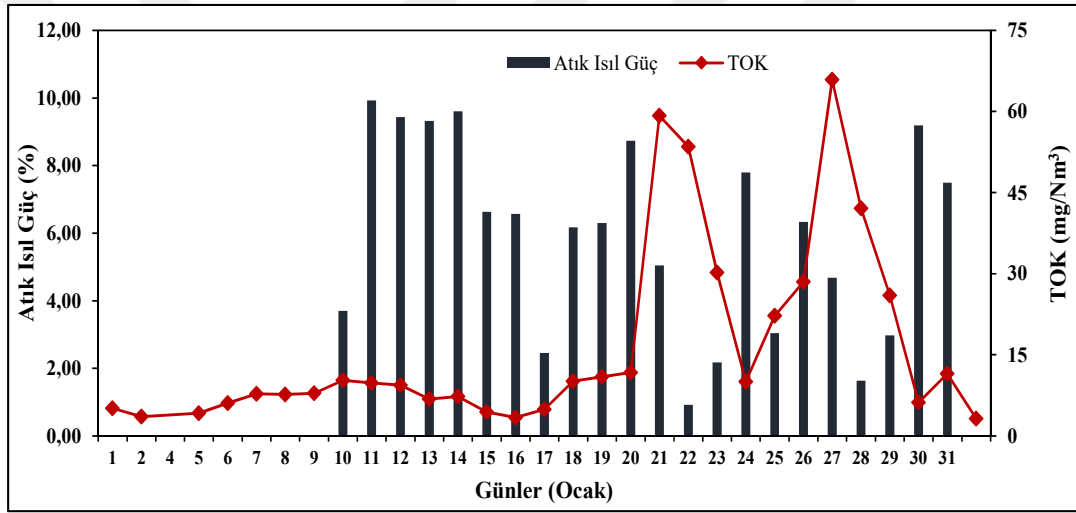
Tablo 6.12. (Devam) Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları TOK emisyonları

Tarih	TOK (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
7 Nisan	5,0
8 Nisan	9,0
9 Nisan	8,4
10 Nisan	15,8
11 Nisan	6,8
12 Nisan	8,2
13 Nisan	3,5
14 Nisan	3,6
15 Nisan	4,3
16 Nisan	8,8
17 Nisan	8,6
18 Nisan	12,8
19 Nisan	19,5
20 Nisan	12,5
21 Nisan	6,0
22 Nisan	9,6
23 Nisan	17,8
24 Nisan	11,8
25 Nisan	13,8
26 Nisan	13,4
27 Nisan	14,7
28 Nisan	25,8
29 Nisan	25,8
30 Nisan	11,2
1 Ağustos	34,8
2 Ağustos	48,1
3 Ağustos	40,7
4 Ağustos	62,4
5 Ağustos	65,2
6 Ağustos	63,9
7 Ağustos	77,5
8 Ağustos	76,7
9 Ağustos	114,6
10 Ağustos	67,8
11 Ağustos	93,1
12 Ağustos	94,8
13 Ağustos	104,7
14 Ağustos	103,1
15 Ağustos	35,1
16 Ağustos	66,9
17 Ağustos	130,4
18 Ağustos	75,7
19 Ağustos	71,3
20 Ağustos	108
21 Ağustos	91,5
22 Ağustos	79,4
23 Ağustos	90,9
24 Ağustos	120,1

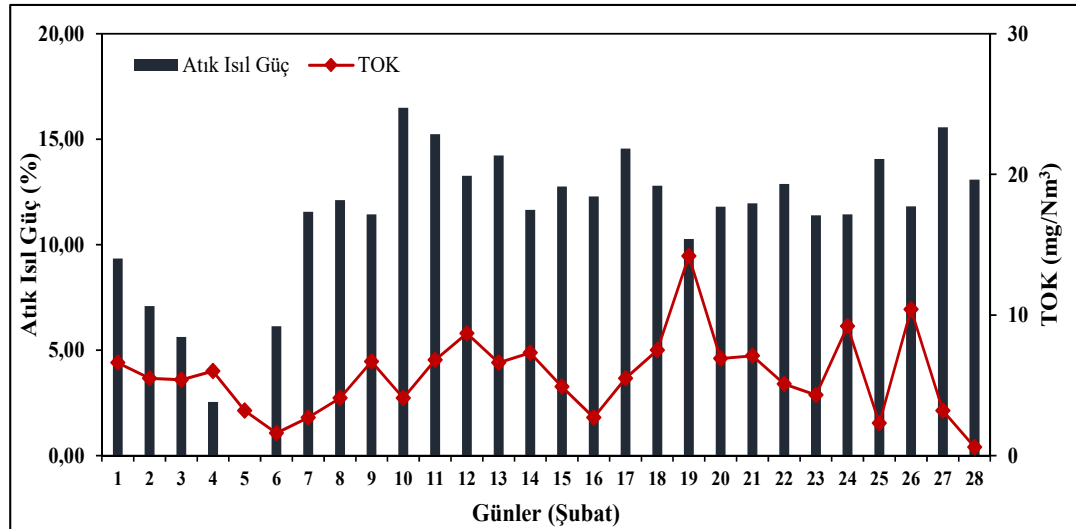
Tablo 6.12. (Devam) Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları TOK emisyonları

Tarih	TOK (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
25 Ağustos	82,1
26 Ağustos	76,4
27 Ağustos	59,3
28 Ağustos	51,1
29 Ağustos	74,1
30 Ağustos	87,4
31 Ağustos	114,8

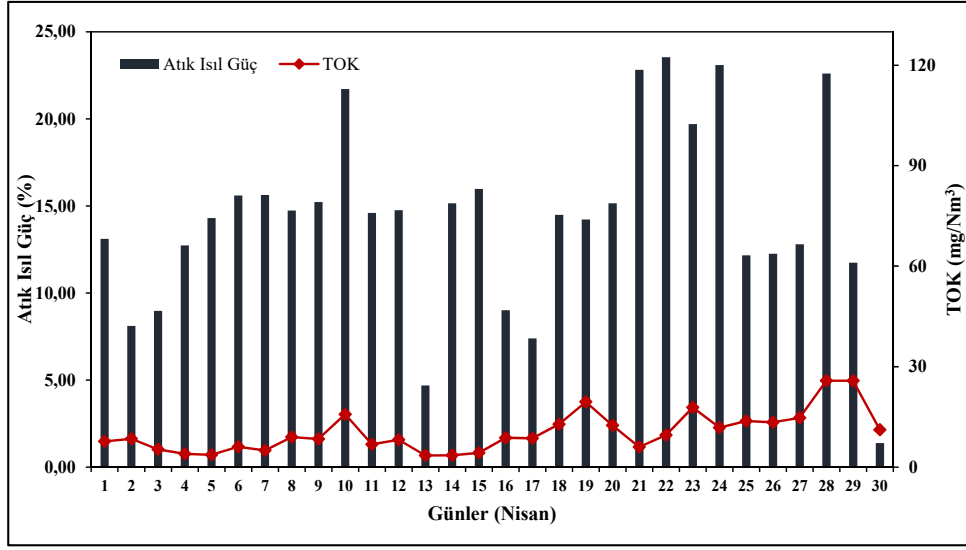
Tablo 6.1, Tablo 6.2 ve Tablo 6.12’den elde edilen veriler ile Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos aylarına ait TOK emisyonlarının atık ısı yer değiştirme oranları ile ilişkisi sırasıyla Şekil 6.42, Şekil 6.43, Şekil 6.44 ve Şekil 6.45 ile gösterilmiştir.



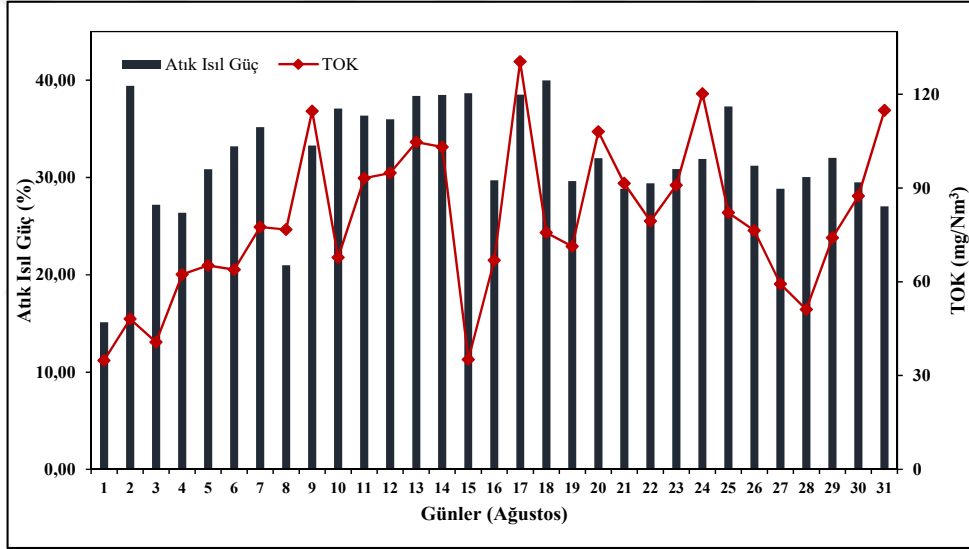
Şekil 6.42. Ocak ayı atık ısı güç ve TOK emisyonları arasındaki ilişki



Şekil 6.43. Şubat ayı atık ısı güç ve TOK emisyonları arasındaki ilişki



Şekil 6.44. Nisan ayı atık ısıl güç ve TOK emisyonları arasındaki ilişki



Şekil 6.45. Ağustos ayı atık ısıl güç ve TOK emisyonları arasındaki ilişki

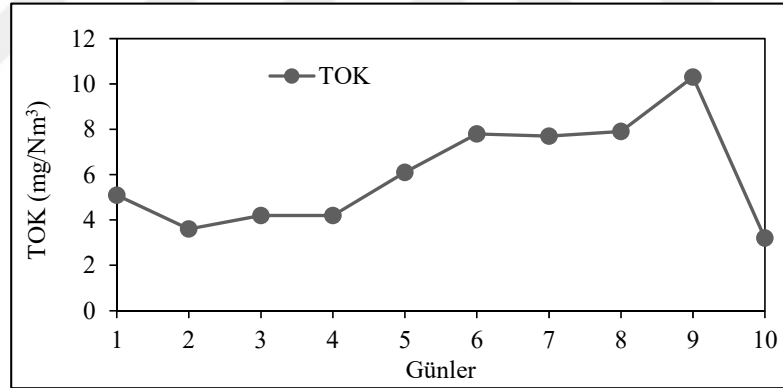
Tablo 6.1’de verilen kullanımlar ve Tablo 6.12’de verilen emisyonlar çerçevesinde değerlendirmeler öncelikli olarak atık yakılmayan dönemin kendi arasında kıyaslanması ile yapılmıştır. Fırının kendi özgün şartlarında yalnızca konvansiyonel yakıt kullanımı ile fırın koşulları ve emisyonlarının değişkenliği atık yakılan dönemin kıyaslanmasında değişimlerin atık kaynaklı mı yoksa yakıt kaynaklı mı olduğuna dair bilgi vermektedir. Fabrika’ya ait fırın besleme tonajı ton/saat olarak, baca gazı sıcaklığı derece (°C) olarak ve oksijen değeri yüzde (%) olarak sürekli emisyon ölçüm sisteminden yarım saatlik verilerin günlük ortalamaları olarak alınmıştır. Emisyonların oluşmasında fırının şartları önemli olduğundan ve

parametrelerin birbirleri ile kıyaslanabilmesi adına koşulları belirlediğinden emisyon parametreleri yalnızca ısıl yer değiştirme oranlarına göre değil emisyonun oluştuğu fırın koşulları da dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

TOK emisyonlarının 18 Ocak gününe kadar 5-10 mg/Nm³ arasında değiştiği sonraki günlerde ise atık ısıl yer değiştirme oranının artışı ile paralel bir artış göstermemekle birlikte 59,2 ile 65,9 mg/Nm³ değerleri ile pik yaptığı görülmektedir. TOK emisyonunun yükseldiği ve pik değerlere ulaştığı noktada atık kullanım oranının en yüksek değerine ulaşmadığı görülmektedir.

6.4.1. Atık yakılmayan dönem TOK emisyonlarının incelenmesi

Çalışmada seçilen fabrikada Ocak ayının ilk dokuz günü ile 5 Şubat günü atık kullanımı gerçekleşmemiştir. Çalışmanın bu noktasında atık kullanımı olmayan dönemde TOK emisyonları incelenmiştir ve elde edilen değişimler Şekil 6.46 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.46. Atık yakılmayan dönem TOK emisyonları

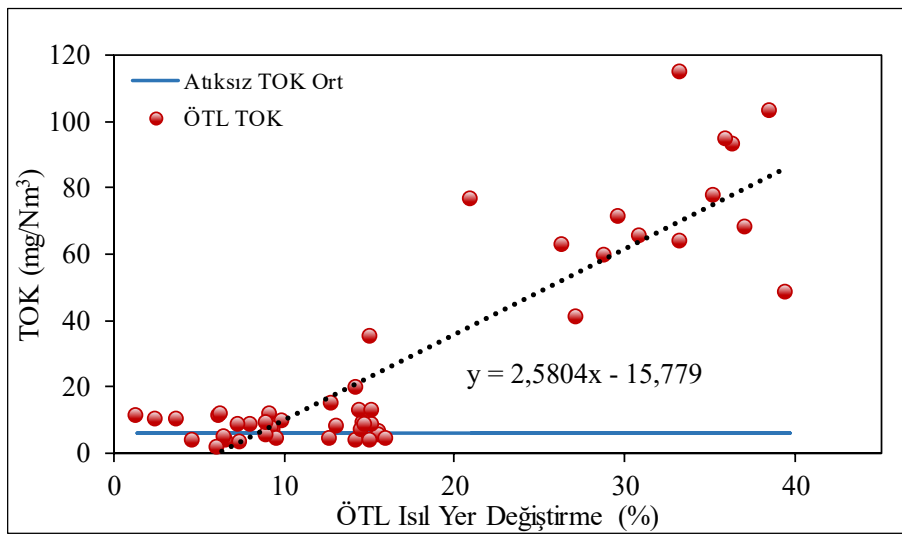
Atık yakılmayan dönemde fırın tonajı 155-160 ton/gün arasında, oksijen yüzde 10,8 ila 11 arasında değişmiş ve sıcaklık 76°C olarak belirlenmiştir. Atık yakılmayan dönemde, yalnızca birincil yakıt kullanımı olmasına rağmen TOK emisyonları 3,2 ila 10,3 mg/Nm³ arasında değişmiştir. Bölüm 3.4'te anlatıldığı üzere uçucu organik bileşik emisyonları prosesin ilk basamaklarında önısıtıcı ya da kalsinatörde yani hammaddenin sıcak gaz ile temasında ortaya çıkar. Buradaki sıcaklık karbonun uçurulmasını sağlamaya yetecek miktarda ancak reaksiyonun CO₂ ve H₂O oluşturmak üzere sonuçlanmasına yetecek miktarda değildir. Organik madde 400 ila 600°C sıcaklıklarda salınır. TOK olarak ölçümü yapılan baca gazı içerisindeki uçucu

organik bileşik emisyonları, tipik bir döner fırında 1-80 mg/Nm³ aralığında bulunmuştur. Ancak, bazı durumlarda hammadde tipinden kaynaklı olarak 120 mg/Nm³'e kadar yükselen emisyon değerleri görülebilmektedir. CO emisyonları ise karbon bileşiklerinin oksidasyonu ile meydana gelir. Aynı zamanda CO emisyonları kötü yanma koşullarında da meydana gelir ve CO emisyonlarının yükseldiği dönemler NO_x emisyonlarının azaldığı zamana denk gelmektedir. Tüm bu mekanizmalar dikkate alındığında ve Şekil 6.46 incelendiğinde TOK emisyonlarındaki salınımlar da gözlenebilir.

Atık yakılmayan dönemin TOK emisyonları ortalaması 6,0 mg/Nm³ olarak hesaplanmıştır.

6.4.2. Ömrünü tamamlamış lastik kullanımı ile TOK emisyonları ilişkisi

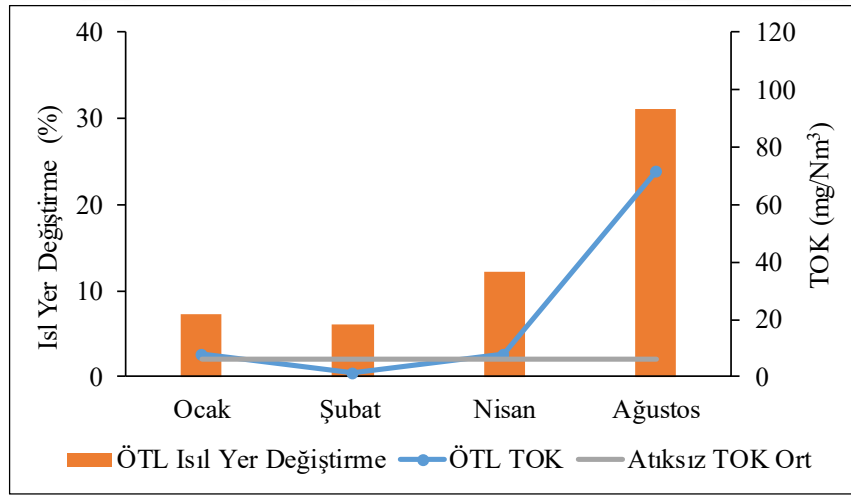
Atık yakılan dönemlerde en çok kullanılan atık olan ÖTL 120 günlük veri seti içerisinde 49 gün boyunca tek başına kullanılmıştır. Bütün ve parçalanmış halde de olsalar ÖTL'ler aynı besleme noktasından fırına beslenmiştir. Şekil 6.42, Şekil 6.43, Şekil 6.44 ve Şekil 6.45'ten görülebileceği üzere TOK emisyonları ısıl yer değiştirme olan günlerde artış eğilimi göstermiştir. Ancak, ısıl yer değiştirme oranındaki artış yüzdesi kadar yüzdelik bir artış olmamıştır. Isıl yer değiştirme oranının kadar yanma koşullarının değişiklik göstermesi de TOK emisyonlarında değişikliğe neden olmuştur. Şekil 6.47 yalnızca ÖTL kullanılan dönemin TOK emisyonlarının dağılımı ve atıksız TOK ortalaması ile karşılaştırmasını göstermektedir.



Şekil 6.47. ÖTL Kullanımı ile TOK Emisyonları

ÖTL kullanılan 49 günün 37 adetinde TOK emisyonları atıksız ortalama değer üzerinde kalırken 49 günlük ortalama değer 27,4 mg/Nm³ değerine ulaşmış ve 4,56 kat oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.47'den görüldüğü gibi atık kullanımı ile TOK emisyonları Ağustos ayında ÖTLB ve ÖTLK'nın birlikte beslendiği ve yüksek ısıl yer değiştirme oranlarına ulaşıldığı noktada artış göstermiştir.

Ocak ayında ÖTL kullanımı ile ısıl yer değiştirme ortalama oranı %7,2 olurken TOK emisyonları ortalaması 7,8 mg/Nm³ olarak gerçekleşmiştir. Şubat ayında yalnızca bir gün ÖTL kullanılmış ısıl yer değiştirme oranı %6,1 olurken TOK emisyonu 1,6 mg/Nm³ olmuştur. Nisan ayında %12 ısıl yer değiştirme ortalamasına ulaşılmış ve TOK emisyonları da Ocak ve Şubat aylarına göre artış göstermiş ve 8,2 mg/Nm³ değerinde okunmuştur. Ağustos ayında ise ısıl yer değiştirme oranı en yüksek ortalamaya ulaşmış ve %31,2 oranına çıkmıştır. Artan bu ısıl yer değiştirme sonucu TOK emisyonları ortalaması da 71,6 mg/Nm³ değeri ile en yüksek ortalama değere ulaşmıştır. Aylara göre ısıl yer değiştirme oranları ve TOK emisyonları Şekil 6.48 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.48. Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları ÖTL ısıl yer değiştirme ve TOK emisyonları

Ocak ayında gerçekleşen düşük ısıl yer değiştirme oranlarında da TOK emisyonları atık yakılmayan döneme göre artma eğilimi göstermiştir ve ortalama değer olarak 7,8 mg/Nm³ değerinde gerçekleşmiştir. Ocak ayındaki 4 değer atıksız ortalama değer olan 6,0 mg/Nm³ değerinin altında kalmış ve %30 oranında bir artış meydana

gelmiştir. Ocak ayı içerisinde yalnızca ÖTL kullanılan günlere ait ısı yer değiştirme oranları %2 ila %9 oranında değişmiş ortalama olarak %7,2 oranında gerçekleşmiştir.

Şubat ayında ÖTL kullanımını sadece bir gün gerçekleştirmiş ve bugünde ısı yer değiştirme oranı %6 olmuştur. Yalnızca ÖTL kullanılan günler içerisinde sadece bugüne ait TOK emisyonu ortalama değerinin altında kalarak 1,6 mg/Nm³ olmuştur.

Nisan ayı içerisinde 21 gün boyunca ÖTL tek başına kullanılmıştır. 21 günlük bu kullanımların 7 gününde TOK emisyonları atıksız TOK emisyonlarının altında gerçekleşmiştir. Nisan ayında TOK emisyonları ortalaması 8,2 mg/Nm³ olmuştur. Nisan ayında %36,6 oranında TOK emisyonlarında artış görülmüştür.

Ağustos ayı içerisinde ise 15 gün boyunca ÖTL tek kullanılmış ve bugünlerde tüm TOK emisyonları atıksız ortalama değerinin üstünde gerçekleşmiştir. Ağustos ayında TOK emisyon ortalaması 71,6 mg/Nm³ olmuştur. Bu değer Ağustos ayında TOK emisyonlarında 11,9 kat oranında bir artış olduğunu göstermiştir.

TOK emisyonları ÖTL kullanımını ile genel olarak bir artış eğilimi göstermiştir. Çalışmaya esas verilere bakıldığında TOK emisyonlarının kırılmış lastik kullanımı gerçekleşmesi ile artan ısı güç oranlarında yükseldiği tespit edilmiştir. TOK olarak ölçümü yapılan baca gazı içerisindeki uçucu organik bileşik emisyonları 400 ila 600°C arasında salınırlar. Yüksek sıcaklıklar ve uzun bekleme süreleri organik maddenin tam olarak parçalanmasını sağlar. Bu durumda kırılmış lastik kullanımının sıcaklıkları düşürdüğü ve TOK emisyonlarını arttırdığı sonucuna varılabilir.

Ayrıca, TOK emisyonlarının oluşumu aynı zamanda yakıt beslemedeki dalgalanmalara da bağlıdır. Isıl güç oranının sabit kalmaması, fırın içerisindeki sıcaklığı ayarlamaya çalışmak sırasında fosil yakıt kesilmesi ve verilmesi sonucu oluşan dalgalanmaların da TOK emisyonlarındaki artışlara neden olduğu düşünülebilir. ÖTLK kullanılmaya başlandığında TOK emisyonları oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu durumda TOK emisyon mekanizması dikkate alındığında ÖTLK kullanımının yakıtta dalgalanma oluşturduğu bu nedenle de TOK emisyonlarının arttığı düşünülebilir.

Çalışmaya esas fabrikada intikalden %15 oranına kadar ÖTLB kullanılması durumunda TOK emisyonları atıksız TOK emisyonları seviyelerinde tutulabilmektedir. Fyffe ve diğ., 2016 yılında yaptıkları çalışmada çimento fırınlarında evsel ATY kullanımı incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda evsel ATY kullanımının %2,2 oranında TOK emisyonlarında artışa neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Fabrikaya ait sonuçlar incelendiğinde elde edilen veriler Fyffe ve diğ., 2016 yılında yaptıkları çalışma ile benzerlik göstermiş ve TOK emisyonlarında artışı ortaya koymuştur.

6.4.3.Karışık endüstriyel atık kullanımı ile TOK emisyonları ilişkisi

Çalışmaya konu fabrikada Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos aylarında toplamda 210,54 ton KEA kullanımı olmuştur. Karışık endüstriyel atık çalışmaya konu olan 120 gün içerisinde yalnızca 28 Ocak tarihinde tek başına kullanılmıştır. 28 Ocak tarihinde %1,63 ısı yer değiştirme oranına ulaşmak için 15 ton KEA beslemesi yapılmıştır. Bu sırada fırında %10,5 oksijen varken baca gazı çıkış sıcaklığı da 75,6°C olarak oluşmuştur. Tüm bu fırın koşullarında ve kalorige TOK emisyonu 26 mg/Nm³ olarak okunmuştur. Ocak ayı atık yakılmayan günlerin ortalaması 6,3 mg/Nm³ olarak gerçekleştiğinden 4,1 kat (%313) artış meydana geldiği söylenebilir. Ancak, önceki bölümde bahsedildiği gibi atık yakılmayan tüm günlerin ortalaması 6,0 mg/Nm³'tür. Bu atık özelinde çalışmada bu veri yalnızca bir tane olduğundan ve sadece Ocak ayı içerisinde kullanıldığından yalnızca Ocak ayı dinamikleri arasında değerlendirilmesi daha doğru olarak görülmüş ancak her iki veri de birbirine yakın olduğundan 4 kat artışın her koşulda gerçekleştiğinden rahatlıkla söz edebiliriz.

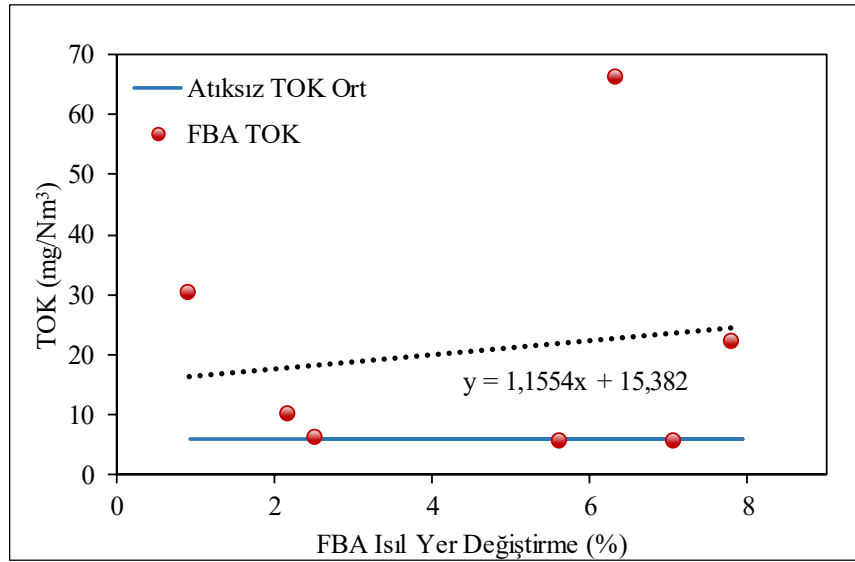
28 Ocak günü dışında KEA'nın tüm kullanımları ÖTL ve/veya FBA ile birlikte olmuştur. Bu nedenle bu başlıkta tek bir değer verilebilmiştir. Ancak, atıkların karışık kullanımları 6.4.5 başlığında ayrıca değerlendirilecektir. KEA yapılan hiçbir çalışmada kullanılan bir atık olmadığından literatür karşılaştırması yapılamamıştır.

6.4.4. Fosil bazlı atık kullanımı ile TOK emisyonları ilişkisi

Fosil bazlı atık çalışmaya konu fabrikada Ocak, Şubat ve Ağustos aylarında toplam olarak 576 ton kullanılmıştır. Nisan ayında fosil bazlı atık kullanımı gerçekleşmemiştir. Fosil bazlı atık Ocak ayında 22, 23, 24 ve 26 Ocak tarihleri olmak

üzere 4 gün, Şubat ayında ise 2 Şubat, 3 Şubat ve 4 Şubat tarihleri olmak üzere 3 gün olmak üzere toplamda 7 gün tek başına kullanılmıştır. Şubat ayında da kullanım olduğundan TOK emisyonları Şubat ayı atık yakılmayan dönemi de göz önüne alınarak değerlendirilmiş ve atıksız TOK ortalaması 6,0 mg/Nm³ değeri baz alınarak incelenmiştir. Ağustos ayında FBA kullanılmış ancak tek başına bir kullanımı olmamıştır.

Ocak ayında %0,9 ila %7,8 oranlarında değişen atık ısı yer değiştirme mevcuttur. Şubat ayında ise %2,5, %5,6 ve %7,08 oranlarında ısı yer değiştirmeye ulaşılmıştır. Ocak ayında %0,9 yer değiştirmede 30,2 mg/Nm³ TOK değeri, %7,8 oranında ise 22,2 mg/Nm³ değeri görülmüştür. Şubat ayında ise %2,5 yer değiştirmede TOK emisyonu 6,0 mg/Nm³ olmuş ve atıksız TOK ortalaması ile aynı değerde kalmıştır. %7,08 ısı yer değiştirmede görülen TOK miktarı ise 5,5 mg/Nm³ ve %5,63 ısı yer değiştirmede ise 5,4 mg/Nm³ olmuştur. Şubat ayında elde edilen TOK emisyonları ortalaması 5,6 olurken Ocak ayında elde edilen TOK emisyonu ortalaması 32,1 mg/Nm³ olmuştur. Ocak ve Şubat aylarında yalnızca FBA kullanılan dönemlere ait TOK değerlerinin atık yakılmayan günlere ait TOK ortalaması ile karşılaştırılması Şekil 6.49 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.49. FBA kullanımı TOK değerleri ve atık yakılmayan dönem TOK ortalama değeri karşılaştırması

Şekil 6.49'dan görüleceği üzere fosil bazlı atık kullanımı ile ısı yer değiştirme oranından bağımsız olarak TOK emisyonları değişim göstermiştir. Ortalama olarak

atıksız TOK emisyonu ortalamasından 3,45 kat yüksek emisyonlar oluşmuş olsa da Şubat ayındaki ısı yer değiştirme oranları atıksız ortalama değer ile aynı gerçekleşmiştir.

Ocak ayında gerçekleşen %7 oranındaki ısı yer değiştirmede 22,2 mg/Nm³ değerinde TOK emisyonu gerçekleşirken Şubat ayındaki %7 ısı yer değiştirmede 5,5 mg/Nm³ TOK emisyonu ölçülmüştür. Tablo 6.13 aynı ısı yer değiştirme durumundaki TOK emisyonları ile fırın koşullarını göstermektedir.

Tablo 6.13. Eş ısı yer değiştirme oranı-TOK emisyonları karşılaştırma tablosu

Tarih	FBA (Isıl Güç %)	TOK (mg/Nm ³ %10O ₂)	Oksijen (%)	Sıcaklık (°C)	Tonaj (t)
24 Oca	7,79	22,2	10,3	79,0	159,1
02 Şub	7,08	5,5	10,3	76,1	159,1

Tablo 6.13'ten de görüleceği gibi fırın koşulları aynı olsa da TOK emisyonları FBA beslenmesi ile birbirinden farklı emisyonlar oluşturmuştur. 24 Ocak'ta ortalama atıksız TOK emisyonundan 3,7 kat fazla iken 2 Şubat'ta TOK emisyonu atıksız ortalamanın altında gerçekleşmiştir.

7 gün boyunca tek başına kullanılan FBA ortalama emisyonu 20,7 mg/Nm³ olarak atıksız ortalamanın 3,45 kat (%245,7) artış göstermiştir. %7,084 oranında ısı yer değiştirme oranında 5,5 mg/Nm³ en uygun kullanım oranı olarak karşımıza çıkmıştır.

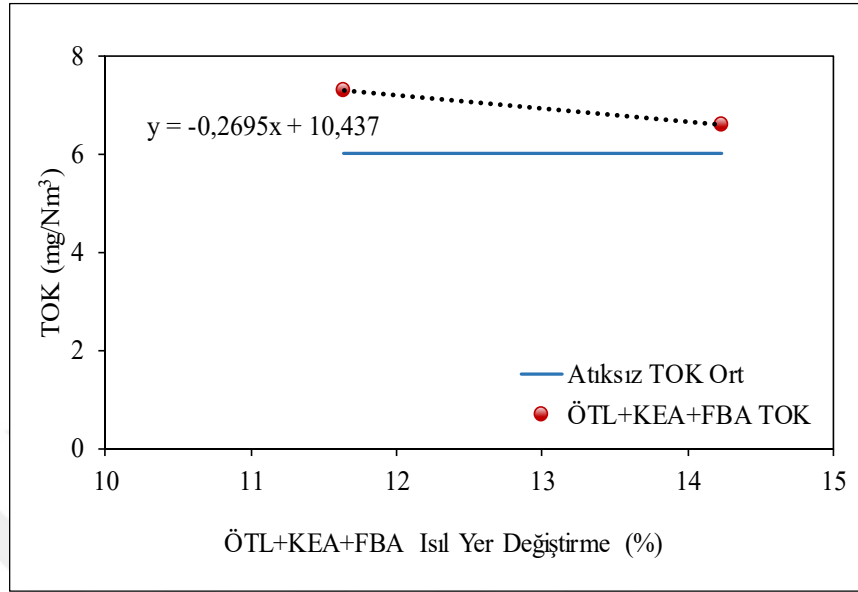
Bu durumda FBA kullanımının yakıtta dalgalanma yaratmasının daha yüksek olasılık olduğu bu nedenle de TOK emisyonlarının kontrolünün zor olduğu ısı yer değiştirme oranları ile oluşan farklı TOK emisyonlarına bakarak söylenebilir.

6.4.5. Karışık atık kullanımı ile TOK emisyonları ilişkisi

Çalışmaya esas fabrikada 120 günlük veri seti içerisinde 55 gün boyunca atıklar ÖTL+KEA, ÖTL+FBA, KEA+FBA ve ÖTL+KEA+FBA karışımı olarak kullanılmıştır.

Her üç atığın birlikte kullanımı fırında yalnızca iki gün boyunca 13 ve 14 Şubat tarihlerinde gerçekleşmiştir. Her iki günün TOK emisyon değerleri atıksız TOK emisyonları ortalamasından yüksek gerçekleşmiştir. Şekil 6.50'den görüleceği üzere

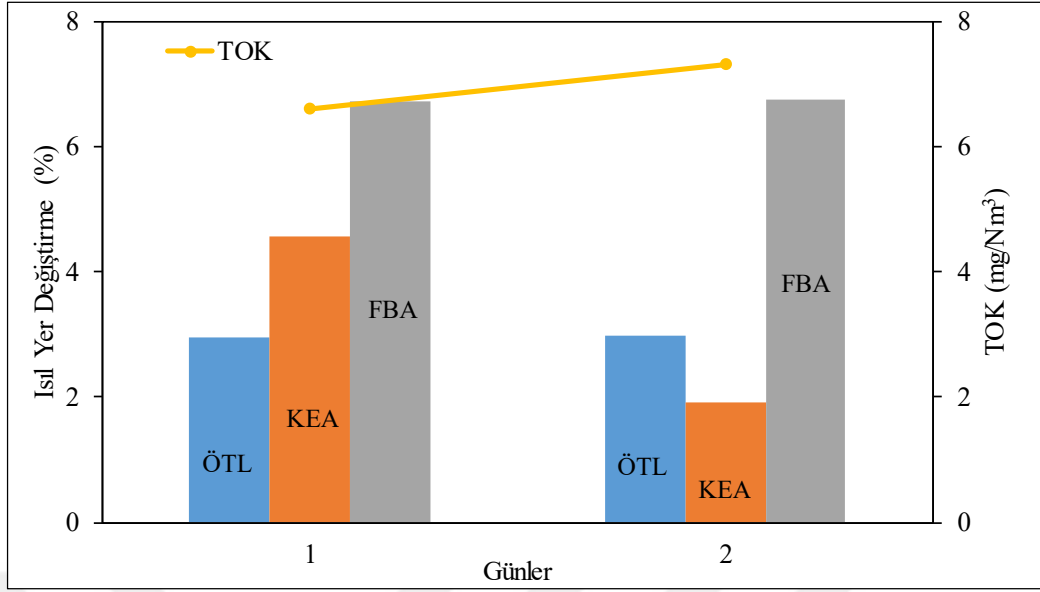
üç atık karışım halinde kullanıldığında da TOK emisyonlarında artış görülmüştür. 13 ve 14 Şubat tarihlerinde TOK emisyonları sırasıyla 6,6 ve 7,3 mg/Nm³ olmuştur.



Şekil 6.50. ÖTL+KEA+FBA beraber kullanımı TOK emisyonları

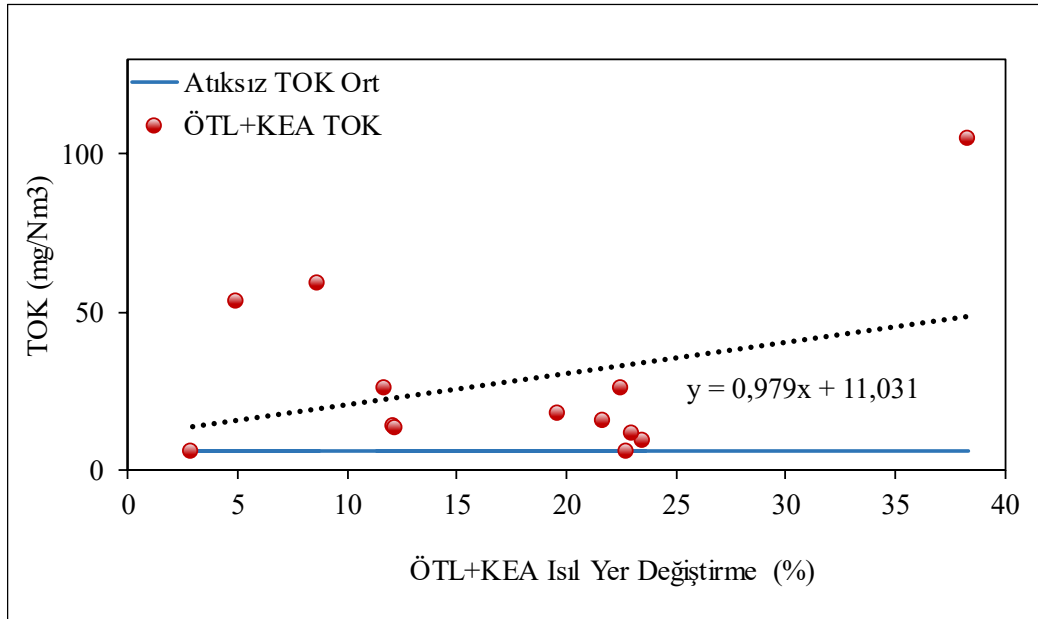
13 ve 14 Şubat tarihlerinde ÖTL ve FBA ısıl yer değiştirme yüzdeleri, oksijen seviyesi, baca gazı sıcaklığı ve CO emisyonları aynıdır. Değişkenlik gösteren tek parametre KEA yüzdesinin azalmasıdır. Bu durumda üç atık birlikte kullanılması durumunda KEA'nın karışım içindeki yüzdesinin düşürülmesinin TOK emisyonunda artışa neden olduğu görülmüştür. Bu üç atığın karışımının kullanıldığı iki günün ortalaması 7,0 mg/Nm³ olmuştur ve değer atıksız ortalamadan %15,8 daha yüksektir. Her bir atık tek başına kullanıldığında TOK emisyonları üzerinde daha yüksek oranlarda artış yaşanmasında etkileri olmuştur. Ancak, ÖTL, FBA ve KEA'nın birlikte kullanıldığı TOK emisyonlarında yaşanan artış çok daha düşük oranda olmuştur. Şekil 6.51 her üç atığın beraber kullanımı ile emisyonlarda yaşanan değişimleri göstermektedir.

ÖTL tek kullanıldığında 4,56 (%356) kat, KEA tek kullanıldığında 4,1 kat (%313) ve FBA tek kullanıldığında 3,45 kat (245,7) TOK emisyonu artışı yaşanırken her üç atık birlikte kullanıldığında atık kullanım oranı %11 oranındayken emisyon 6,6 ve ısıl yer değiştirme oranı %14 iken 7,3 mg/Nm³ değerleri ile artış yalnızca %15,8 ile sınırlı kalmıştır. İntikal ve alev borusundan atık beslemesi ile karışım halinde bu üç atığın %14 oranında kullanılması ile TOK emisyonları kontrol altında tutulabilir.



Şekil 6.51. ÖTL+FBA+KEA ısı yer değıştirme ve TOK emisyonları değışimi

Çalışmaya esas 120 verinin 13 tanesi ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanıldığı verilerdir. 20-21 ve 29 Ocak, 10, 21-26, 28, 29 Nisan ve 13 Ağustos bu iki atığın birlikte yakıldığı tarihlerdir. Bu iki atığın birlikte kullanılması ile oluşan TOK emisyonlarının tamamı atıksız TOK ortalama verisinin üstünde kalmıştır. ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanıldığı günlere ait TOK emisyonlarının atıksız TOK ortalama değeri ile karşılaştırması Şekil 6.52 ile verilmiştir.



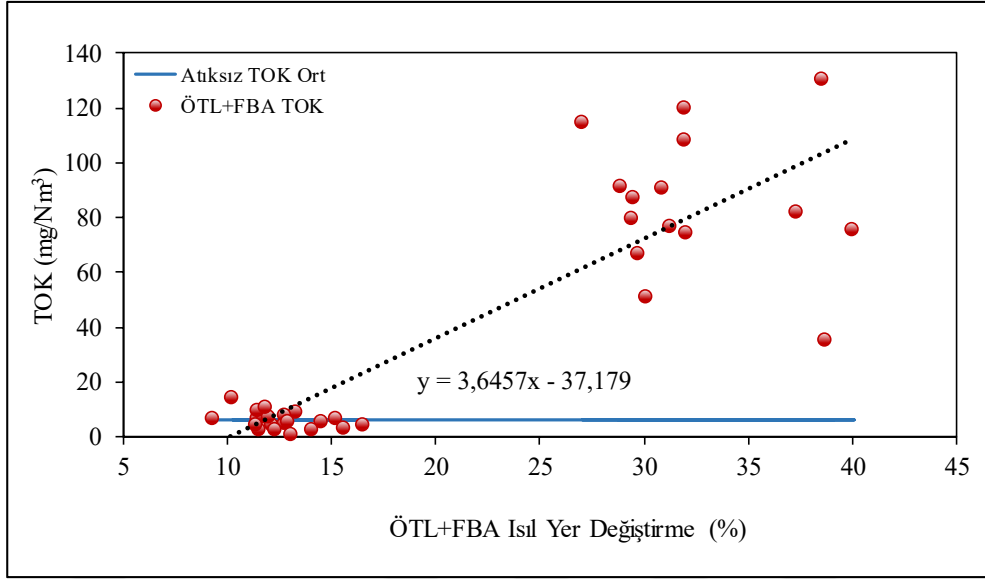
Şekil 6.52. ÖTL+KEA birlikte kullanımı ile oluşan NO_x emisyonları

Şekil 6.52'den görüleceği üzere %2 ila %38 arasında yer değiştirme elde edilen atık karışımının fırında kullanımı ile oluşan TOK emisyonları ortalama değeri 28 mg/Nm³ olmuştur ve bu değer TOK emisyonlarının 4,7 kat (% 363) arttığını göstermektedir.

ÖTL ve KEA birlikte kullanıldığı dönemde fırın tonajı 160-166 ton arasında kalarak büyük değişim göstermemiştir. Oksijen değeri %9,6 ila %10,9 arasında oksijen için geniş aralık sayılabilecek bir düzeyde değişim göstermiştir. Baca gazı sıcaklığı ise 75°C ila 100°C arasında değişmiştir. ÖTL ve KEA kullanımı ile oluşan en yüksek TOK emisyonu 13 Ağustos günü meydana gelmiştir. 13 Ağustos tarihinde %38,38'lik bir ısıl yer değiştirmede fırın tonajı 160,3 t, oksijen %9,8 ve sıcaklık 95,2°C olmuştur. Bu tarihte TOK değeri 104,7 mg/Nm³ olmuştur. %38,38'lik ısıl yer değiştirmedeki atık oranları ise %26,9 ÖTLB, %7,39 ÖTLK ve %4,07 KEA olmuştur. Bu sonuçta ÖTL ile değerlendirmelerin yapıldığı bölüm ile benzerlik göstermiş ve kırılmış lastik kullanıldığından TOK emisyonlarındaki artışı desteklemiştir.

ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanımı hem ÖTL'nin hem de KEA'nın tek kullanımı ile TOK artışı elde edilen sonuçları ile paralellik göstermiştir. ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanımı ile elde edilen en düşük TOK değeri ise 6,0 mg/Nm³ olmuştur. 21 Nisan tarihine ait olan bu değerde fırında %17,85 ÖTLB ve %4,95 KEA kullanımı gerçekleşmiştir. ÖTL ve KEA birlikte kullanılacağı zaman bu oranlarda fırın %9,9 oksijende, 85,3°C sıcaklıkta ve 165 ton farin besleme koşullarında çalıştırılmalıdır. Aksi halde TOK emisyonlarında artış görülebilir.

Çalışmaya esas 120 verinin 36 tanesinde ÖTL ve FBA birlikte kullanılmıştır. 1-12 Şubat, 15-28 Şubat, 15-18 Ağustos, 20-26 Ağustos ve 28-31 Ağustos bu iki atığın birlikte yakıldığı tarihlerdir. Bu iki atığın birlikte kullanılması ile oluşan TOK emisyonlarının 25 adeti atıksız TOK ortalama verisinin üzerinde iken 11 adet veri de atıksız TOK ortalama verisinin altında kalmıştır. ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanıldığı günlere ait TOK emisyonlarının atıksız TOK ortalama değeri ile karşılaştırması Şekil 6.53 ile verilmiştir.



Şekil 6.53. ÖTL ve FBA kullanımı ile TOK emisyonları ilişkisi

Bölüm 6.4.2 ÖTL'nin tek başına kullanımını ve Bölüm 6.4.4 ise FBA'nın tek başına kullanımının TOK emisyonları üzerine etkilerini incelemiştir. ÖTL'nin ve FBA'nın tek başına kullanımlarının TOK emisyonlarında sırasıyla 4,56 ve 3,45 kat artış meydana getirdiği belirlenmiştir. ÖTL ve FBA atıklarının birarada kullanılmasında da TOK emisyonlarında artış eğilimi olduğu görülmüştür. Artış eğilimi ısıl yer değiştirme oranı arttıkça ve ÖTLK kullanımı devreye girdiğinde meydana gelmiştir.

ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanıldığı dönemlerin TOK ortalaması $39,1 \text{ mg/Nm}^3$ olmuştur. Ancak, ÖTLK kullanıma başlanmadan önceki bölümde yani Ocak, Şubat aylarında TOK emisyonu ortalaması $5,9 \text{ mg/Nm}^3$ değeri ile atıksız TOK ortalaması ile aynı seviyede kalmıştır. Aradaki emisyon farklılıkları nedeni ile Ağustos ayı ayrı Ocak ve Şubat ayı emisyonlarının ayrı değerlendirilmesinde fayda olacaktır. ÖTL ve KEA kullanımında da TOK emisyonları ÖTLK kullanımı olan yüksek ısıl yer değiştirmede daha yüksek değerlere ulaştığından ÖTL ve FBA kullanımının da bu sonuçlar ile paralellik gösterdiği söylenebilir.

Ocak ve Şubat ayında ÖTL ve FBA en yüksek %16,49 ısıl yer değiştirme oranında kullanılmıştır ve bu ısıl yer değiştirmede TOK emisyonu $4,1 \text{ mg/Nm}^3$ değeri ile atıksız TOK ortalamasından %32 oranında daha düşük bir değere ulaşmıştır.

Ağustos ayında ise ÖTL ve FBA kullanımı ile %27 ila %39,9 oranında ısıl yer değiştirme oranlarına ulaşılmıştır. En yüksek TOK emisyonlarının görüldüğü tarih

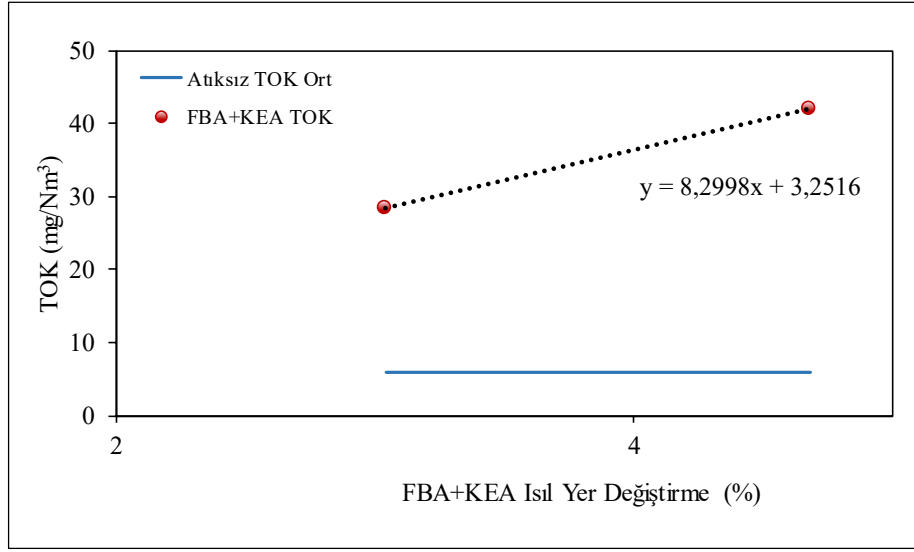
17 Ağustos tarihinde %12,94 ÖTLB, %12,94 ÖTLB ve %12,62 FBA kullanılan gün olmuştur. Buradaki TOK emisyonu 130,4 mg/Nm³ değeri ile bu iki atığın kullanıldığı döneme ait en yüksek TOK emisyonu olmuştur.

FBA tek kullanıldığında 3,45 kat TOK misyonlarında artışa neden olurken ÖTL tek kullanıldığında 4,56 kat oranında TOK emisyonlarında artma olduğu çalışmaya esas fabrika verilerinden elde edilmiştir. ÖTL+FBA beraber kullanıldığında ise %16 oranında kadar ısı yer değiştirmede ÖTLB ve FBA kullanımının TOK emisyonlarında değişime neden olmadığı söylenebilir. Ancak, ÖTLK kullanılmaya başlandığından TOK emisyonları oldukça yüksek seviyelere vardığı görülmüştür. Bu durumda TOK emisyon mekanizması dikkate alındığında ÖTLK kullanımının yakıtta dalgalanma oluşturduğu bu nedenle de TOK emisyonlarının arttığı düşünülebilir. Tüm ÖTL ve FBA kullanımına bakılırsa TOK emisyonları 6,5 kat (%551) artış göstermiştir.

Çalışmaya esas 120 veri arasında 2 tanesinde FBA ve KEA beraber kullanılmış ve bunların her ikisi de Ocak ayı içerisinde gerçekleşmiştir. Her iki veride atıksız TOK ortalama değerinin oldukça üstünde gerçekleşmiştir. Şekil 6.54, FBA ve KEA'nın birlikte kullanıldığı günlerin TOK emisyonlarını göstermektedir.

FBA ve KEA'nın birlikte kullanılması sırasındaki ısı yüzde dağılımları 25 Ocak için %1,1 KEA ve %1,9 FBA, 27 Ocak için ise %1,6 KEA ve %3 FBA'dır. KEA'nın %1,1 değerinden %1,6 değerine çıkması ve FBA'nın %3 civarına yükselmesi TOK emisyonlarının da 28,5 değerinden 42,1 değerine yükselmesine neden olmuştur. Bu iki atığın kullanımı ile elde edilen ortalama TOK emisyonu 35,3 mg/Nm³ değerine ulaşmış ve ÖTLB+ÖTLK+FBA kullanılan dönemdeki yüksek ısı yer değiştirme oranlarında gerçekleşen yüksek TOK emisyonlarına benzer şekilde yüksek gerçekleşmiştir. Şekil 6.54 KEA ve FBA kullanımı ile TOK emisyonları ilişkisini göstermektedir.

FBA ve KEA'nın birlikte kullanılmasındaki emisyon değişimi ile FBA ve KEA'nın kullanıldığı dönemde fırını stabil koşullarda tutabilmenin zor olduğunu ve yakıt dalgalanmalarının yüksek oranda gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Bu dalgalanmalar sonucunda da TOK emisyonları yüksek değerlerde kalmış ve atıksız TOK ortalama değerine göre 5,88 kat (%488) artış tespit edilmiştir.



Şekil 6.54. KEA+FBA ısıl yer değıştirme ve TOK emisyonları

Atık yakılmayan dönem ve farklı atıkların yakıldığı dönem, karışık atıkların kullanıldığı dönemler TOK emisyonları açısından kendi içlerinde değerlendirilmiştir. ÖTL kullanımı ile TOK emisyonlarında 4,56 kat artış, KEA kullanımı ile 4,1 kat oranında artış ve FBA kullanımı ile 3,45 kat TOK emisyonlarında artış olduğu belirlenmiştir. Atıkların karışık kullanılması durumunda TOK emisyonlarında atıksız ortalamaya göre %15,8 artış, ÖTL ve FBA birlikte kullanıldığında TOK emisyonlarında 6,5 kat (%551) artış saptanmıştır. KEA ve FBA kullanımında da TOK emisyonlarının 5,88 kat (%488) arttığı görülmüştür. KEA ve FBA'nın yükseldiği durumda yakıt dalgalanmaları da yükseldiğinden TOK emisyonlarının da yükseldiği görülmüştür.

Atık yakılması sırasında TOK emisyonunun en düşük olduğu gün %9,18 ÖTLB ve %3,89 FBA beslenmesi ile elde edilen 0,6 mg/Nm³ değeridir. ÖTLB beslenmesi sırasında ÖTLK beslenmesi ile elde edilen değerlerden daha düşük TOK emisyonları görülmüştür. ÖTL ile KEA beslenmesi ile TOK emisyonları 4,7 kat (%363) artış göstermiştir. Çalışmaya esas veriler gözönüne alındığında %16 oranında ÖTLB ve FBA karışımı beslenmesinin TOK emisyonlarının atıksız TOK emisyonları seviyesinde kalmasına olanak sağladığı belirlenmiştir.

Fyffe ve diğ., 2016 yılında yaptıkları çalışmada farklı atıkları kullanarak çimento fabrikalarında hava emisyonlarını inelemişlerdir. Çalışmada SRF kullanımı sağlanmıştır. SRF kullanımı ile yapılan denemelerde TOK emisyonları %2,2

oranında artmıştır. Çalışmaya esas veriler incelendiğinde genel olarak bir artış eğilimi gözlenmekle birlikte artışlar Fyffe ve diğ., 2016 yılında yaptıkları çalışmadan daha yüksek olmuştur.

6.5. Alternatif Yakıt Kullanımının HF-HCl Emisyonları Üzerine Etkisi

Çalışmada seçilen fabrikaya ait fırın besleme tonajı ton/saat olarak, baca gazı sıcaklığı derece (°C) olarak ve oksijen değeri yüzde (%) olarak sürekli emisyon ölçüm sisteminden yarım saatlik verilerin günlük ortalamaları olarak alınmıştır. Emisyonların oluşmasında fırının çalışma şartları oldukça önemlidir. Tablo 6.1 atık kullanım yüzdeleri ve kullanılan atıkları, Tablo 6.2 ise fırın şartlarını göstermektedir. Tablo 6.14 ise tarihler ile HF ve HCl emisyonlarını göstermektedir.

Tablo 6.14. Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları HF-HCl emisyonları

Tarih	HF (mg/Nm ³ , %10 O ₂)	HCl (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
1 Ocak	0,27	0,00
2 Ocak	0,28	0,10
3 Ocak	0,24	0,00
4 Ocak	0,24	0,00
5 Ocak	0,29	0,00
6 Ocak	0,30	0,00
7 Ocak	0,25	0,00
8 Ocak	0,27	0,00
9 Ocak	0,25	0,00
10 Ocak	0,23	0,00
11 Ocak	0,24	0,00
12 Ocak	0,21	0,00
13 Ocak	0,24	0,00
14 Ocak	0,23	0,00
15 Ocak	0,20	0,00
16 Ocak	0,18	0,00
17 Ocak	0,20	0,22
18 Ocak	0,19	0,14
19 Ocak	0,19	0,00
20 Ocak	0,20	0,00
21 Ocak	0,22	0,00
22 Ocak	0,23	0,00
23 Ocak	0,22	0,24
24 Ocak	0,21	0,36
25 Ocak	0,16	0,10
26 Ocak	0,19	0,05
27 Ocak	0,22	0,01
28 Ocak	0,23	0,00
29 Ocak	0,21	0,00
30 Ocak	0,23	0,00

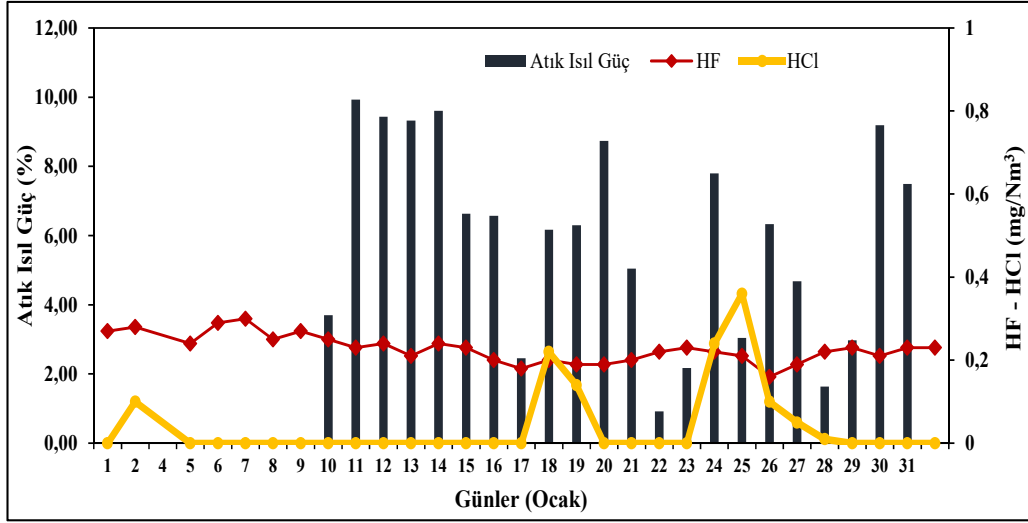
Tablo 6.14. (Devam) Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları HF-HCl emisyonları

Tarih	HF (mg/Nm ³ , %10 O ₂)	HCl (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
31 Ocak	0,23	0,00
1 Şubat	0,25	0,00
2 Şubat	0,22	0,00
3 Şubat	0,23	0,00
4 Şubat	0,23	0,00
5 Şubat	0,27	0,00
6 Şubat	0,25	0,00
7 Şubat	0,22	0,00
8 Şubat	0,23	0,00
9 Şubat	0,22	0,00
10 Şubat	0,23	0,00
11 Şubat	0,21	0,00
12 Şubat	0,21	0,00
13 Şubat	0,20	0,00
14 Şubat	0,21	0,00
15 Şubat	0,22	0,00
16 Şubat	0,22	0,00
17 Şubat	0,21	0,00
18 Şubat	0,21	0,00
19 Şubat	0,21	0,00
20 Şubat	0,20	0,00
21 Şubat	0,21	0,00
22 Şubat	0,20	0,00
23 Şubat	0,19	0,03
24 Şubat	0,17	0,00
25 Şubat	0,18	0,00
26 Şubat	0,18	0,00
27 Şubat	0,21	0,00
28 Şubat	0,20	0,00
1 Nisan	0,19	0,00
2 Nisan	0,18	0,00
3 Nisan	0,18	0,00
4 Nisan	0,21	0,00
5 Nisan	0,22	0,00
6 Nisan	0,20	0,07
7 Nisan	0,20	0,00
8 Nisan	0,20	0,00
9 Nisan	0,21	0,00
10 Nisan	0,20	0,00
11 Nisan	0,19	0,17
12 Nisan	0,21	0,00
13 Nisan	0,20	0,10
14 Nisan	0,19	0,00
15 Nisan	0,18	0,00
16 Nisan	0,13	0,30
17 Nisan	0,04	0,00
18 Nisan	0,02	0,00
19 Nisan	0,03	0,14

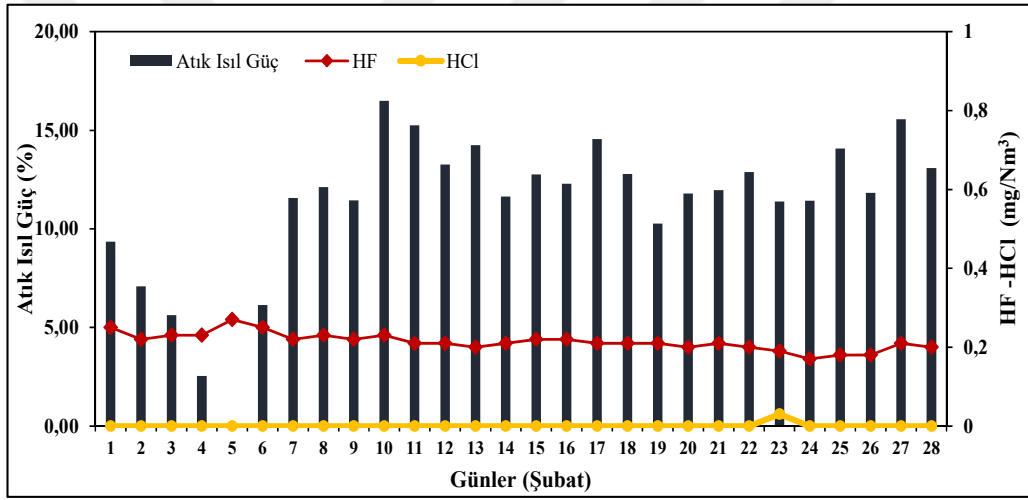
Tablo 6.14. (Devam) Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos ayları HF-HCl emisyonları

Tarih	HF (mg/Nm ³ , %10 O ₂)	HCl (mg/Nm ³ , %10 O ₂)
20 Nisan	0,01	0,00
21 Nisan	0,01	0,04
22 Nisan	0,00	0,00
23 Nisan	0,00	0,13
24 Nisan	0,00	0,00
25 Nisan	0,01	0,09
26 Nisan	0,00	0,00
27 Nisan	0,01	0,27
28 Nisan	0,00	0,00
29 Nisan	0,00	0,00
30 Nisan	0,00	3,00
1 Ağustos	0,02	3,00
2 Ağustos	0,01	1,26
3 Ağustos	0,01	0,56
4 Ağustos	0,01	0,38
5 Ağustos	0,01	0,24
6 Ağustos	0,01	0,23
7 Ağustos	0,01	0,10
8 Ağustos	0,01	0,02
9 Ağustos	0,00	0,10
10 Ağustos	0,01	0,10
11 Ağustos	0,00	0,13
12 Ağustos	0,01	0,14
13 Ağustos	0,01	0,08
14 Ağustos	0,00	0,01
15 Ağustos	0,01	0,04
16 Ağustos	0,01	0,01
17 Ağustos	0,01	0,06
18 Ağustos	0,01	0,05
19 Ağustos	0,01	0,01
20 Ağustos	0,01	0,06
21 Ağustos	0,01	0,14
22 Ağustos	0,01	0,10
23 Ağustos	0,00	0,01
24 Ağustos	0,01	0,13
25 Ağustos	0,01	0,09
26 Ağustos	0,00	0,01
27 Ağustos	0,01	0,12
28 Ağustos	0,05	0,05
29 Ağustos	0,01	0,06
30 Ağustos	0,01	0,20
31 Ağustos	0,03	0,25

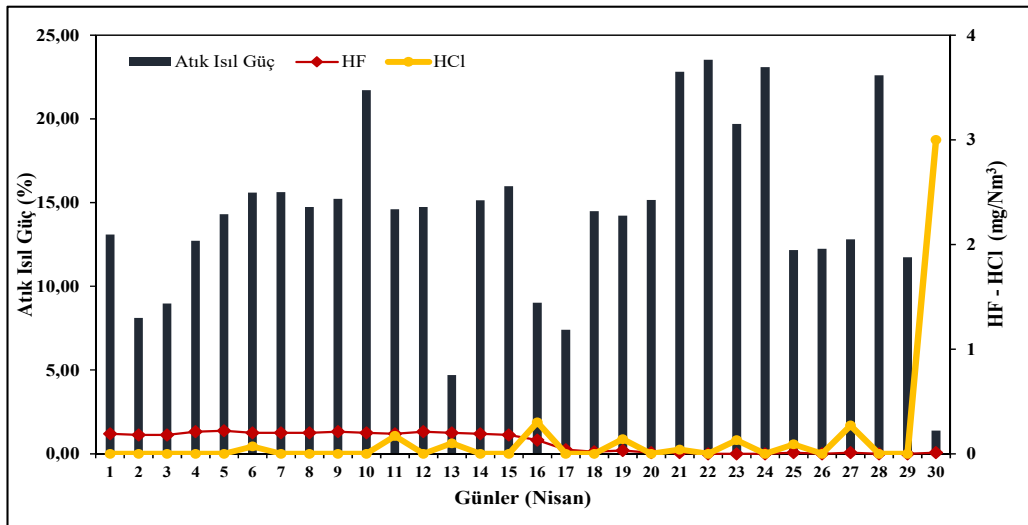
Tablo 6.1 ve Tablo 6.14'dan elde edilen veriler ile Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos aylarına ait HF – HCl emisyonlarının atık ısıl yer değiştirme oranları ile ilişkisi sırasıyla Şekil 6.55, Şekil 6.56, Şekil 6.57 ve Şekil 6.58 ile gösterilmiştir.



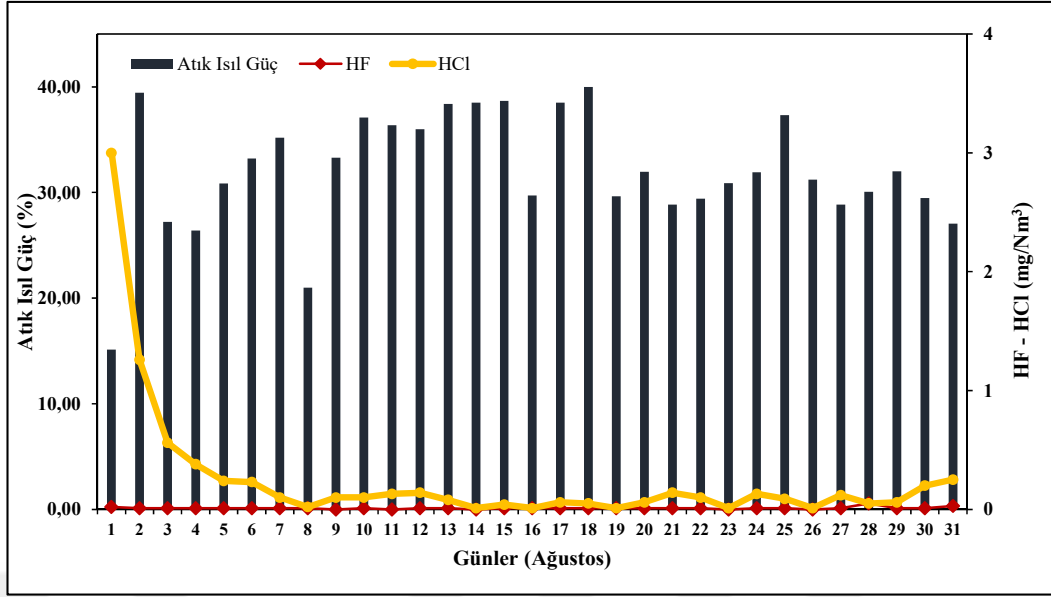
Şekil 6.55. Ocak ayı atık ısıl güç ve HF-HCl emisyonları arasındaki ilişki



Şekil 6.56. Şubat ayı atık ısıl güç ve HF- HCl emisyonları arasındaki ilişki



Şekil 6.57. Nisan ayı atık ısıl güç ve HF - HCl emisyonları arasındaki ilişki



Şekil 6.58. Ağustos ayı atık ısıl güç ve HF - HCl emisyonları arasındaki ilişki

Tablo 6.1’de verilen kullanımlar ve Tablo 6.2 ve Tablo 6.12’de verilen emisyonlar çerçevesinde değerlendirmeler öncelikli olarak atık yakılmayan dönemin kendi arasında kıyaslanması ile yapılmıştır.

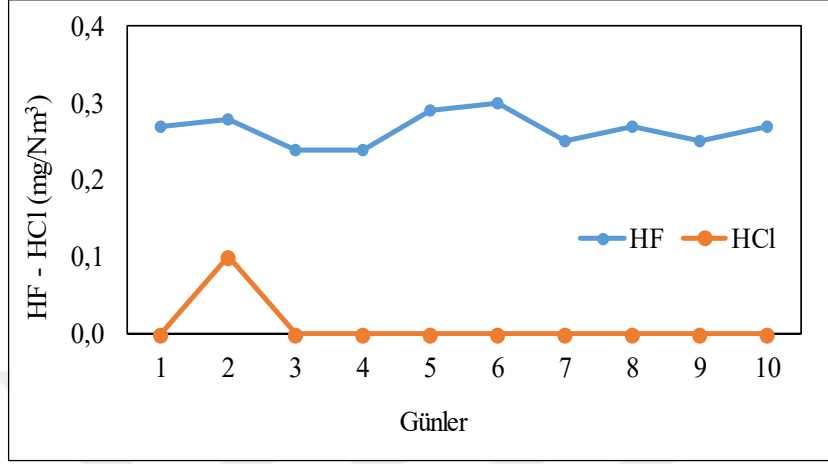
Fırının kendi özgün şartlarında yalnızca konvansiyonel yakıt kullanımı ile fırın koşulları ve emisyonlarının değişkenliği atık yakılan dönemin kıyaslanmasında değişimlerin atık kaynaklı mı yoksa yakıt kaynaklı mı olduğuna dair bilgi vermektedir.

6.5.1. Atık yakılmayan dönem HF- HCl emisyonları

Çalışmada seçilen fabrikada Ocak ayının ilk dokuz günü ile 5 Şubat günü atık kullanımı gerçekleşmemiştir. Çalışmanın bu noktasında atık kullanımı olmayan dönemde HF – HCl emisyonları incelenmiştir ve elde edilen değişimler Şekil 6.59 ile gösterilmiştir.

Atık yakılmayan dönemde fırın tonajı 155-160 ton/gün arasında, oksijen yüzde 10,8 ila 11 arasında değişmiş ve sıcaklık 76°C olarak belirlenmiştir. Atık yakılmayan dönemde, yalnızca birincil yakıt kullanımı ile HF ve HCl emisyonları 0 ila 0,3 mg/Nm³ arasında değişmiştir. HF emisyonları 0,3 mg/Nm³ değerinde sabit kalırken HCl emisyonu yalnızca bir değerde 0,1 mg/Nm³ değerini görmüş ancak diğer bütün günlerde 0 mg/Nm³ değerinde kalmıştır. Tüm şartlar aynı olmasına rağmen HCl

emisyonu 2 Ocak günü 0,1 mg/Nm³ değerinde ölçülmüştür. HF emisyonu ise aynı gün 0,3 mg/Nm³ değerinde ölçülmüştür. Atık yakılmayan dönemin HF emisyonları ortalaması 0,3 ve HCl emisyonları da 0 mg/Nm³ olarak hesaplanmıştır.



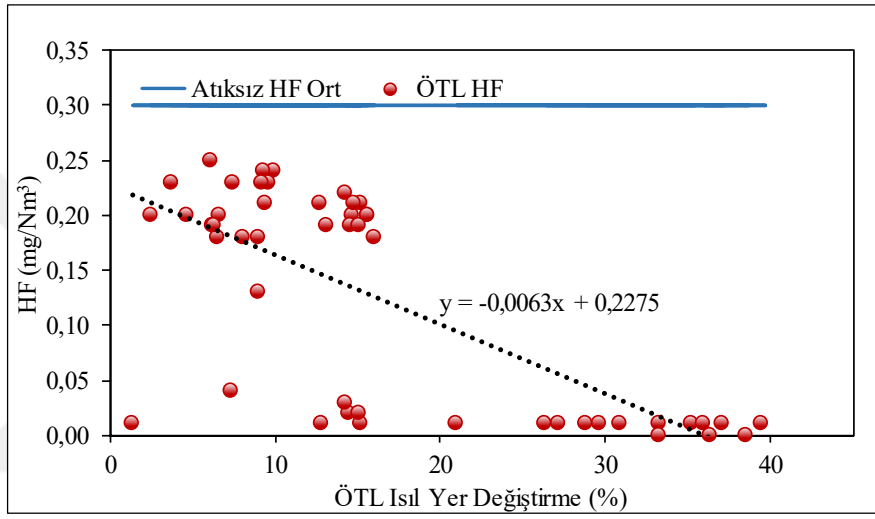
Şekil 6.59. Atık yakılmayan dönem HF – HCl emisyonları

HCl, yakıt içerisinde organik bağlı klor yanması sırasında ya da inorganik klor tuzlarının yanması ile oluşur. Kullanılan farklı yakıtların farklı kompozisyonları ve farklı klor içerikleri vardır. Kömür hem organik bağlı hem de inorganik bağlı klor içerebilir. Çimentoda alternatif yakıt kullanımı giderek artmaktadır. Alternatif yakıtlar organik ve inorganik bağlı klor bileşikleri içerir. Klor içeriği alternatif yakıtın tipine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Stabil yanma koşulları altında fırında bulunan florürün %90-95 oranı klinker içerisine bağlanır geri kalan kısım ise toz içerisine CaF₂ formunda bağlanır. Kalsiyum zenginliği gaz halindeki florür bileşiklerinin ve hidrojen florürün oluşmasına pek olanak vermez. Çok ince toz kısımları filtreden geçerek çok düşük florür bileşiklerinin görülmesine neden olabilir. Minor miktarda florür fırın tozu ile birlikte sistemi terk eder [50]. Alternatif yakıt kullanımının artması fırın sistemine klor girmesine neden olabilir. Döner fırınlar alkali ortama sahip olduklarından klor ve flor, HCl ve HF yerine çoğunlukla tuzlar halinde bulunurlar. Bu nedenle atık yakma tesislerine göre çimento fırınlarından kaynaklanan HF ve HCl ihmal edilebilir düzeydedir [165].

6.5.2. Ömrünü tamamlamış lastik kullanımı ve HF- HCl emisyonları ilişkisi

Atık yakılan dönemlerde en çok kullanılan atık olan ÖTL, 120 günlük veri seti içerisinde 49 gün boyunca tek başına kullanılmıştır. Bütün ve parçalanmış halde de

olsalar ÖTL'ler aynı besleme noktasından fırına beslenmiştir. Şekil 6.55, Şekil 6.56, Şekil 6.57 ve Şekil 6.58'den görülebileceği üzere HF ve HCl emisyonları ısıl yer değiştirme oranları ile paralel olarak değişim göstermemiştir. HF emisyonları ÖTL kullanımını ile düşüş göstermiş ve ortalama değer olarak 0,12 mg/Nm³ olmuş ve %59,5 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Özellikle ÖTLK kullanılan Ağustos ayında HF emisyonlarının tümü 0 – 0,01 mg/Nm³ olarak gerçekleşmiştir. Şekil 6.60 yalnızca ÖTL kullanılan dönemin HF emisyonlarının dağılımını ve atıksız ortalama değerleri ile karşılaştırmasını göstermektedir.

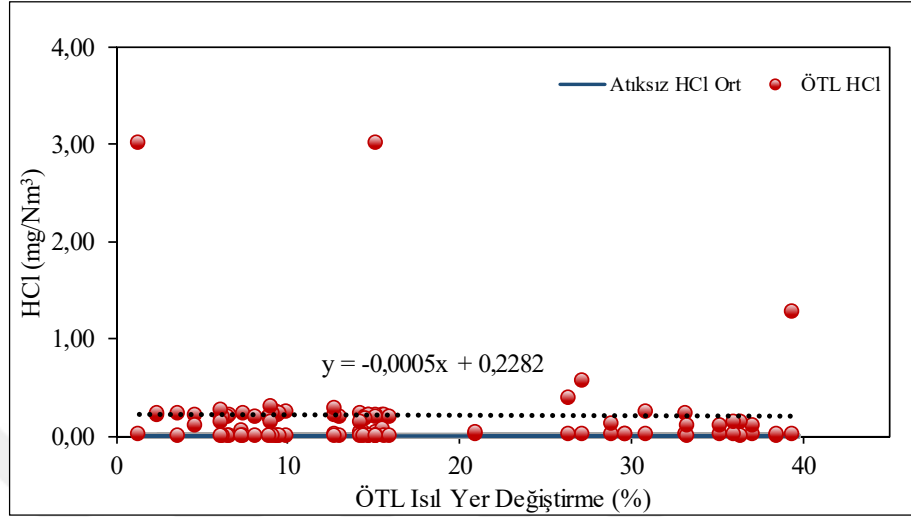


Şekil 6.60. ÖTL kullanımı ile HF emisyonları

Şekil 6.60'dan görüleceği üzere ÖTL kullanımı gerçekleşen tüm günlerin HF emisyonu atıksız HF emisyon ortalamasının altında kalmıştır. HCl emisyonları ise ÖTL kullanımı ile yükselmiş ve ortalama değer olarak 0,22 mg/Nm³ olmuştur. HCl emisyonlarının 3 mg/Nm³ değerine yükseldiği iki gün bulunmaktadır. HCl emisyon sınır değerinin 10 mg/Nm³ olduğu düşünüldüğünde ÖTL kullanımının HCl emisyonlarının yükselmesine yüksek oranda katkı sunduğu Şekil 6.61'den de görülebilir.

ÖTL kullanılan 49 günün, 25 adetinde HCl emisyonları 0 mg/Nm³ değerinde kalmasına rağmen ÖTLK kullanımı ile Ağustos ayı içerisinde yaşanan yükselmeler ortalama değer de yükselmesine neden olmuştur. Çalışmaya esas fabrikada intikalden beslenen ÖTLK ısıl yer değiştirme oranı %9'a kadar olduğundan yalnızca ÖTL beslemesi yapılarak HF emisyonları 0 mg/Nm³ seviyesinde HCl emisyonları ise 0,01 mg/Nm³ seviyesinde tutulabilmektedir. 0,01 mg/Nm³ ihmal edilebilir bir

artış olarak sayılabilir. Bu durumda en uygun besleme şekli %28,86 ÖTLB ve %9,62 oranında ÖTLK toplamını %10,4 oksijen, 93,7°C baca gazı sıcaklığında ve 160 tondaki fırına vermek olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.61. ÖTL kullanımı ile HCl emisyonları

Çalışmadan elde edilen sonuçlar Conesa ve diğ., 2008 yılında yaptıkları çalışma ile benzerlik göstermiştir. Conesa ve diğ., 2008 yılında döner fırına arıtma çamuru besleyerek PCDD/F, PAH ve HF-HCl parametrelerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada arıtma çamurunun HCL emisyonlarını bir miktar yükselttiği ancak yine oldukça düşük değerlerin ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

6.5.3. Karışık endüstriyel atık kullanımı ile HF – HCl emisyonları ilişkisi

Çalışmaya konu fabrikada Ocak, Şubat, Nisan ve Ağustos aylarında toplamda 210,54 ton KEA kullanımı olmuştur. Karışık endüstriyel atık çalışmaya konu olan 120 gün içerisinde yalnızca 28 Ocak tarihinde tek başına kullanılmıştır. 28 Ocak tarihinde %1,63 ısıl yer değişirme oranına ulaşmak için 15 ton KEA beslemesi yapılmıştır. Bu sırada fırında %10,5 oksijen varken baca gazı çıkış sıcaklığı da 75,6°C olarak oluşmuştur.

Tüm bu fırın koşullarında ve kaloride HF emisyonu 0,23 mg/Nm³ olarak okunmuştur. Ocak ayı atık yakılmayan günlerin ortalaması 0,3 mg/Nm³ olarak gerçekleştiğinden %23,3 oranında bir azalma meydana geldiği söylenebilir.

Tüm bu fırın koşullarında ve kaloride ise HCl emisyonu 0 mg/Nm³ olarak okunmuştur. Ocak ayı atık yakılmayan günlerin ortalaması da 0 mg/Nm³ olarak gerçekleştiğinden KEA'nın %1 oranında tek başına kullanımını HCl emisyonlarında bir değişim meydana getirmediği söylenebilir.

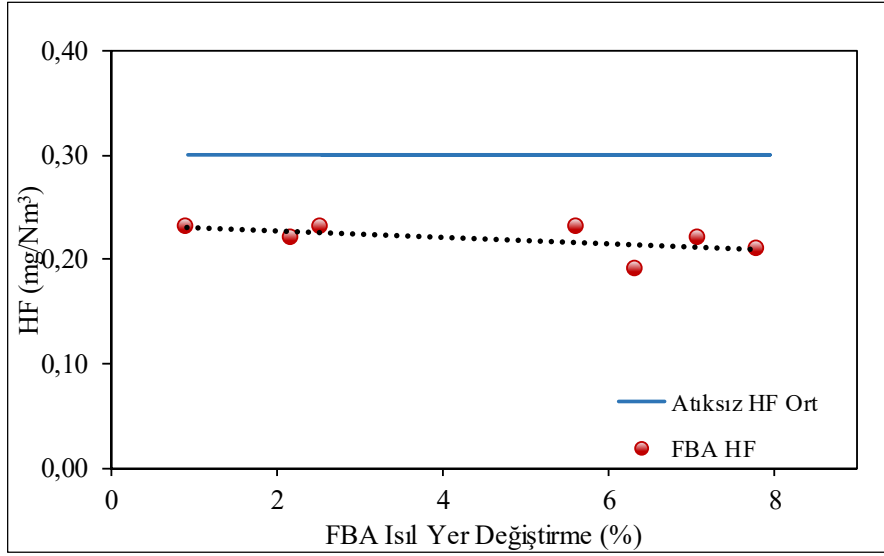
Bu atık özelinde çalışmada bu veri yalnızca bir tane olduğundan ve sadece Ocak ayı içerisinde kullanıldığından yalnızca Ocak ayı dinamikleri arasında değerlendirilmesi daha doğru olarak görülmüş ancak her iki veri de birbirine yakın olduğundan HF emisyonlarında %23,3 oranındaki azalış, HCl emisyonlarında da herhangi bir etki görülmediği söylenebilir.

28 Ocak günü dışında KEA'nın tüm kullanımları ÖTL ve/veya FBA ile birlikte olmuştur. Bu nedenle bu başlıkta tek bir değer verilebilmiştir. Ancak, atıkların karışık kullanımları 6.2.5 başlığında ayrıca değerlendirilecektir. KEA yapılan hiçbir çalışmada kullanılan bir atık olmadığından literatür karşılaştırması yapılamamıştır.

6.5.4. Fosil bazlı atık kullanımı ile HF – HCl emisyonları ilişkisi

Fosil bazlı atık çalışmaya konu fabrikada Ocak, Şubat ve Ağustos aylarında toplam olarak 576 ton kullanılmıştır. Nisan ayında fosil bazlı atık kullanımı gerçekleşmemiştir. Fosil bazlı atık Ocak ayında 22 Ocak, 23 Ocak, 24 Ocak ve 26 Ocak tarihleri olmak üzere 4 gün Şubat ayında ise 2 Şubat, 3 Şubat ve 4 Şubat tarihleri olmak üzere 3 gün toplamda da 7 gün tek başına kullanılmıştır. Şubat ayında da kullanım olduğundan HF ve HCl emisyonları Şubat ayı atık yakılmayan dönemi de göz önüne alınarak değerlendirilmiş ve atıksız ortalama değerler baz alınarak incelenmiştir. Ağustos ayında FBA kullanılmış ancak tek başına bir kullanımı olmamıştır.

Ocak ayında %0,9 ila %7,8 oranlarında değişen atık ısı yer değiştirme mevcuttur. Şubat ayında ise %2,5, %5,6 ve %7,08 oranlarında ısı yer değiştirmeye ulaşılmıştır. Ocak ayında %0,9 yer değiştirmede 0,23 mg/Nm³ HF değeri, %7,8 oranında ise 0,21 mg/Nm³ HF değeri görülmüştür. Şubat ayında da HF emisyonları 0,2 civarında kalmış fazla değişim göstermemiştir. Ocak ve Şubat aylarında yalnızca FBA kullanılan dönemlere ait HF değerlerinin atık yakılmayan günlere ait HF ortalaması ile karşılaştırılması Şekil 6.62 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.62. FBA kullanımı HF değerleri ve atık yakılmayan dönem HF ortalama değeri karşılaştırması

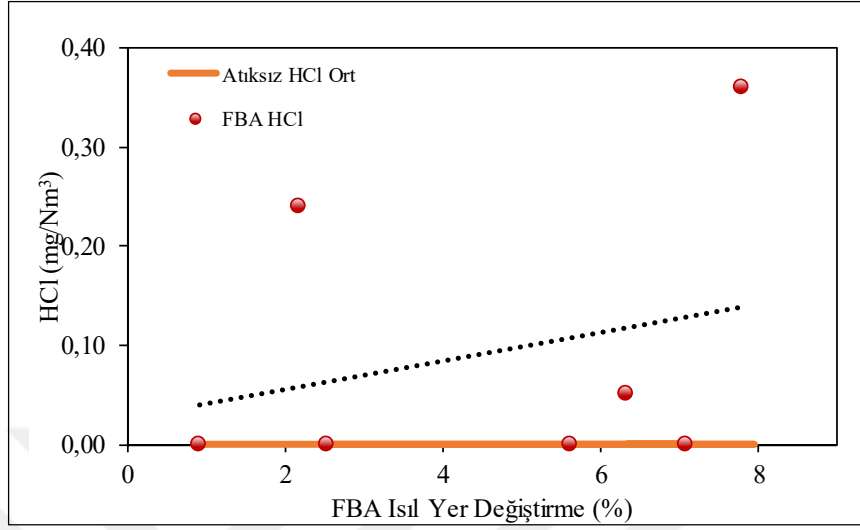
Şekil 6.62'den görüleceği üzere fosil bazlı atık kullanımı ile oluşan HF emisyonları yalnızca petrokok kullanılan HF emisyon değerlerinin altında gerçekleşmiştir ve %27 oranında bir azalış meydana gelmiştir.

Ocak ve Şubat aylarında FBA'nın tek başına kullanıldığı dönemde fırın koşulları birbirini ile aynıdır. Atıksız günler dikkate alındığında aynı tonaj ve sıcaklık değerinde FBA kullanılan %6,3 oranında ısı yer değiştirme yüzdesinde 0,19 mg/Nm³ HF emisyonuna %10,2 oksijen değeri ve 73,5°C baca gazı sıcaklığında ulaşılmıştır. FBA özelinde % 6,3'lük ısı yer değiştirme oranının uygulanabilecek en uygun oran olduğu çalışmadaki fabrika için ve bu fabrikaya benzer intikalden fosil bazlı atık besleyen fabrikalar için söylenebilir.

Ocak ayında %2,1 ve %7,79 oranlarında FBA beslendiği günlerde HCl emisyonları 0,23 ve 0,36 mg/Nm³ değerlerine ulaşmıştır. Ocak ve Şubat aylarında FBA beslenen diğer günlerde HCl emisyonu 0 mg/Nm³ değerinde olmuştur. Ocak ve Şubat aylarında yalnızca FBA kullanılan dönemlere ait HCl değerlerinin atık yakılmayan günlere ait HCl ortalaması ile karşılaştırılması Şekil 6.63 ile gösterilmiştir.

Şekil 6.63'den görüleceği üzere fosil bazlı atık kullanımı ile oluşan HCl emisyonlarının 3 günü yalnızca petrokok kullanılan HCl emisyon değerlerinin üstünde gerçekleşmiştir. FBA kullanımı ile elde edilen ortalama HCl emisyonu 0,1 mg/Nm³ olarak gerçekleşmiştir. Alev borusundan beslenen organik ve inorganik bağlı

klor bileşiği içerme olasılığı bulunan FBA'nın HCl emisyonlarını arttırdığı ancak etkisinin çok ysek olmadığı söylenebilir.



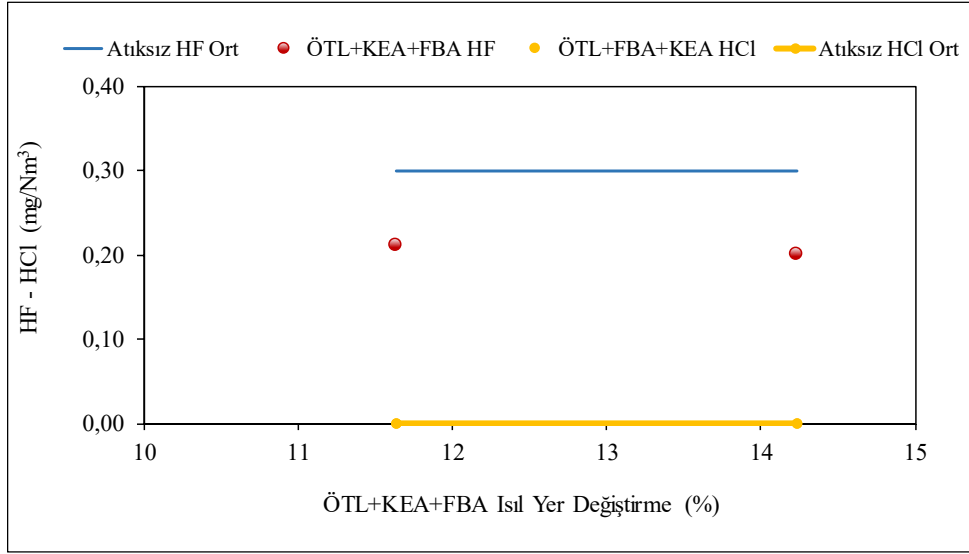
Şekil 6.63. FBA kullanımı HCl değerleri ve atık yakılmayan dönem HCl ortalama değeri karşılaştırması

Ocak ve Şubat aylarında FBA'nın tek başına kullanıldığı dönemde fırın koşulları birbirini ile aynıdır. Atıksız günler dikkate alındığında aynı tonaj ve sıcaklık değerinde FBA kullanılan %6,3 oranında ısıl yer değiştirme yüzdesinde 0,19 mg/Nm³ HF emisyonuna ve 0,05 mg/Nm³ HCl emisyonuna, %10,2 oksijen değeri ve 73,5°C baca gazı sıcaklığında ulaşılmıştır. FBA özelinde bakıldığında HF ve HCl emisyonları açısından % 6,3'lük ısıl yer değiştirme oranının uygulanabilecek en uygun oran olduğu çalışmadaki fabrika için ve bu fabrikaya benzer intikalden fosil bazlı atık besleyen fabrikalar için söylenebilir.

6.5.5. Karışık atık kullanımı ile HF – HCl emisyonları ilişkisi

Çalışmaya esas fabrikada 120 günlük veri seti içerisinde 55 gün boyunca atıklar ÖTL+KEA, ÖTL+FBA, KEA+FBA ve ÖTL+KEA+FBA karışımı olarak kullanılmıştır.

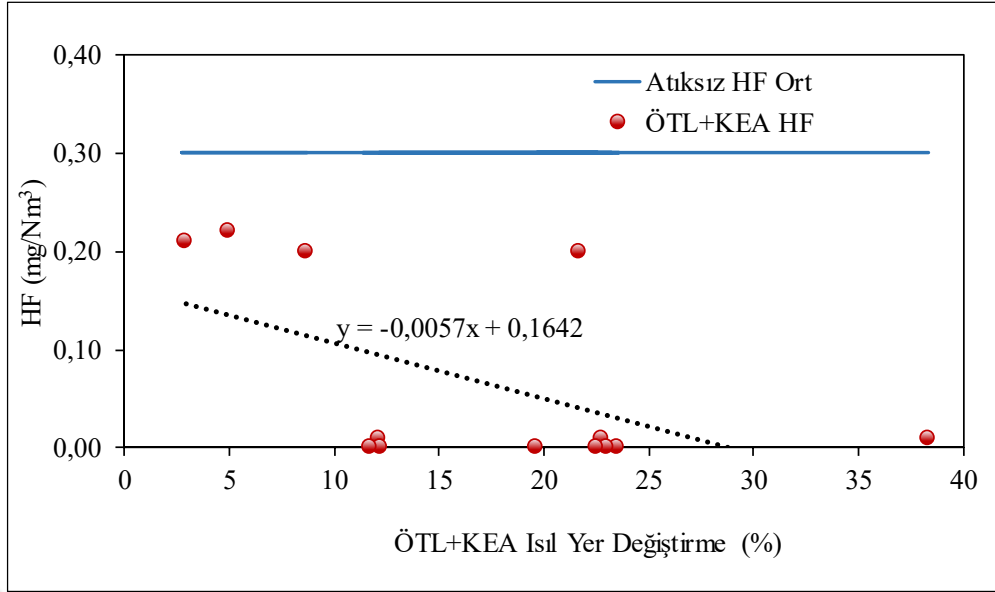
Her üç atığın birlikte kullanımı fırında yalnızca iki gün boyunca 13 ve 14 Şubat tarihlerinde gerçekleşmiştir. Her iki günün HF emisyonları atıksız HF emisyonları ortalamasından düşük gerçekleşmiştir. HCl emisyonları ise 0 mg/Nm³ olarak sabit kalmıştır.



Şekil 6.64. ÖTL+KEA+FBA beraber kullanımı ile HF ve HCl emisyonları

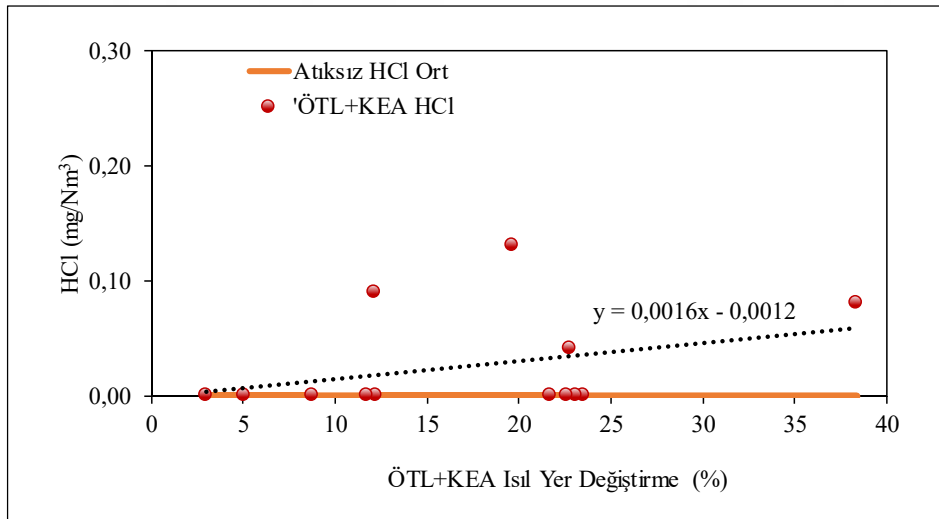
13 ve 14 Şubat tarihlerinde ÖTL ve FBA ısıl yer değiştirme yüzdeleri, oksijen seviyesi, baca gazı sıcaklığı ve CO emisyonları aynıdır. Değişkenlik gösteren tek parametre KEA yüzdesinin azalmasıdır. Bu durumda üç atık birlikte kullanılması durumunda KEA'nın karışım içindeki yüzdesinin düşürülmesinin HF ve HCl emisyonları üzerinde bir etkisinin olmadığı Şekil 6.64 ile de görülebilmektedir. KEA'nın tek başına kullanıldığı durumda da HCl emisyonlarında bir etkisinin olmadığı ama HF emisyonunda %23 azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte hem ÖTL hem de FBA, HF emisyonları üzerinde azalma meydana getirmiştir. ÖTL ve FBA, HCl üzerinde artış etkisi yaparken KEA kullanımı HCl emisyonlarında etkisiz kalmıştır. Ancak, bu üç atık birlikte kullanıldığında hem HF hem de HCl emisyonlarında azalma meydana getirmişlerdir. %14 oranına kullanımlar ile HF emisyonu 0,2 mg/Nm³ ve HCl emisyonu 0 mg/Nm³ olmuştur. Bu iki veriye dayanarak %14 oranında karışık atık kullanımının emisyonları artırıcı etkisi olmadığı açıkça söylenebilir.

Çalışmaya esas 120 verinin 13 tanesi ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanıldığı verilerdir. 20-21 ve 29 Ocak, 10, 21-26, 28, 29 Nisan ve 13 Ağustos bu iki atığın birlikte yakıldığı tarihlerdir. Bu iki atığın birlikte kullanılması ile oluşan HF emisyonlarının tamamı atıksız HF ortalama verisinin altında kalmıştır. ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanıldığı günlere ait HF emisyonlarının atıksız HF ortalama değeri ile karşılaştırması Şekil 6.65 ile verilmiştir.



Şekil 6.65. ÖTL+KEA birlikte kullanımı ile oluşan HF emisyonları

ÖTL ve KEA tek başlarına kullanıldığında da HF emisyonlarının azaltıcı etkisi tespit edilmişti, ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanılması da tek başına kullanımları ile aynı etkiyi göstermiştir. ÖTL ve KEA kullanımı ile HF emisyonları ortalaması 0,07 mg/Nm³ değeri ile 0,3 mg/Nm³ değerinden %78 oranında azalmıştır.



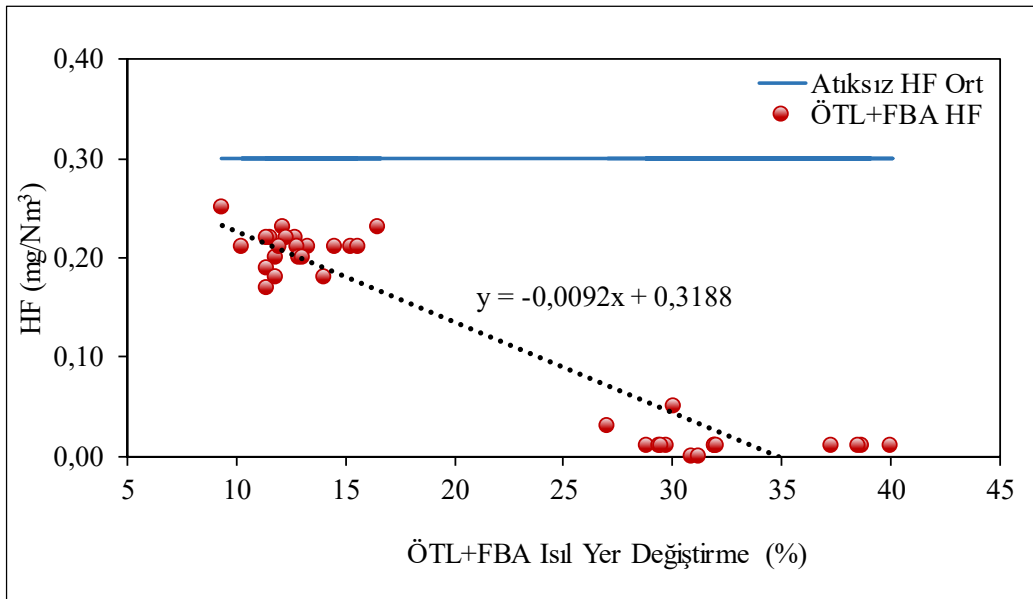
Şekil 6.66. ÖTL+KEA birlikte kullanımı ile oluşan HCl emisyonları

Şekil 6.66'dan görüleceği üzere %2 ila %38 arasında yer değiştirme elde edilen atık karışımının fırında kullanımı ile elde edilen HCl emisyonları ortalama değeri 0,03 mg/Nm³ olmuştur. Bu iki atığın beraber kullanımı ile elde edilen ortalama HCl emisyonundaki değişim ihmal edilebilecek düzeyde olmuştur. Bu durumda HCl emisyonlarının ÖTL ve KEA birlikte kullanımından etkilenmediği söylenebilir.

ÖTL ve KEA birlikte kullanıldığı dönemde fırın tonajı 160-166 ton arasında kalarak büyük değişim göstermemiştir. Oksijen değeri %9,6 ila %10,9 arasında oksijen için geniş aralık sayılabilecek bir düzeyde değişim göstermiştir. Baca gazı sıcaklığı ise 75°C ila 100°C arasında değişmiştir. ÖTL ve KEA kullanımı ile oluşan en yüksek HF emisyonu 0,22 mg/Nm³ ve en yüksek HCl emisyonu da 0,13 mg/Nm³ olmuştur. Her iki değerde ihmal edilebilecek bir değişikliği göstermektedir. ÖTL ve KEA %23 oranında kullanılması ve dağılımın %17 ÖTLB ve %6 KEA olması durumunda fırın koşulları %10,4 oksijen, 80,3°C baca gazı sıcaklığında ve 164,6 ton farin besleme tonajında tutulursa HF ve HCl emisyonları 0 mg/Nm³ olarak oluşacaktır.

ÖTL ve KEA'nın birlikte kullanımı hem ÖTL'nin hem de KEA'nın tek kullanımı ile HF ve HCl emisyon etkisi ile paralellik göstermiş hatta her iki atığın beraber kullanımı ÖTL'nin tek başına HCl emisyonları üzerinde olan etkisini de azaltmış daha düşük emisyonların ölçülmesine olanak sağlamıştır.

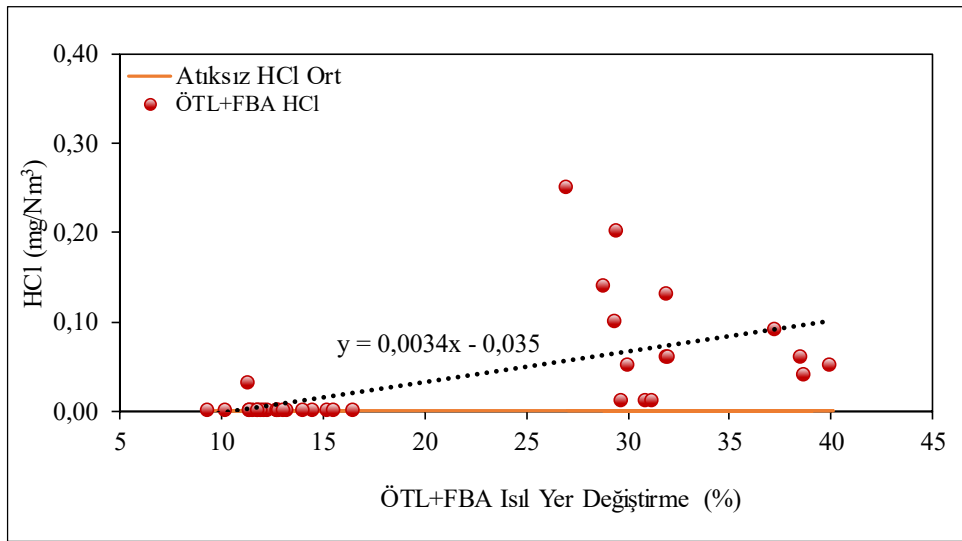
Çalışmaya esas 120 verinin 36 tanesinde ÖTL ve FBA birlikte kullanılmıştır. 1-12 Şubat, 15-28 Şubat, 15-18 Ağustos, 20-26 Ağustos ve 28-31 Ağustos bu iki atığın birlikte yakıldığı tarihlerdir. Bu iki atığın birlikte kullanılması ile oluşan HF emisyonlarının tamamı atıksız HF emisyonlarından düşük gerçekleşmiştir. ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanıldığı günlere ait HF emisyonlarının atıksız HF ortalama değeri ile karşılaştırması Şekil 6.67 ile verilmiştir.



Şekil 6.67. ÖTL ve FBA kullanımı ile HF emisyonları ilişkisi

Bölüm 6.5.2 ÖTL'nin tek başına kullanımını ve bölüm 6.5.4 ise FBA'nın tek başına kullanımının HF emisyonları üzerine etkilerini incelemiştir. ÖTL'nin ve FBA'nın tek başına kullanımlarının HF emisyonlarında azalma meydana getirdiği belirlenmiştir. Özellikle yüksek ısı yer değiştirme oranlarında ÖTLK kullanılmasının HF emisyonlarının sıfırlanmasına neden olduğu çalışmaya esas fabrika verilerinden tespit edilmiştir. FBA atıklarının kullanımı ile de %27 oranında HF emisyonlarının azaltıldığı Bölüm 6.5.4'te anlatılmıştır. ÖTL ve FBA'nın birarada kullanılmasında da HF emisyonlarındaki azalma Şekil 6.67 ile açıkça görülmektedir. Ayrıca, ısı yer değiştirme oranının ÖTLK kullanılarak artırılması ile HF emisyonlarındaki azalma eğilimini de Şekil 6.67 ile desteklemektedir. ÖTL ve FBA birlikte kullanımı ile HF emisyonları 0,13 mg/Nm³ değerine düşmüştür ki bu da emisyonlarda %57 oranında bir azalmaya denk gelmektedir. ÖTL ve FBA'nın %16 oranına denk gelecek şekilde birlikte kullanılması sırasında meydana gelen emisyonlar 0,2 mg/Nm³ seviyesinde gerçekleşmiştir. Ağustos ayı ile birlikte %38 oranına kadar yükselen ısı yer değiştirme oranlarında ise ÖTLK etkisi ile HF emisyonları 0 mg/Nm³ değerine kadar düşmüştür.

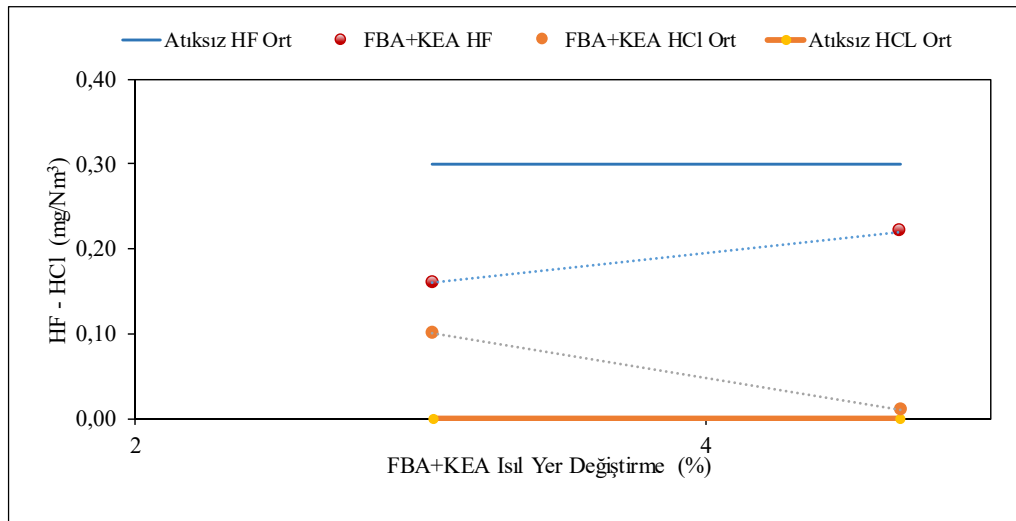
ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanılması ile oluşan HCl emisyonlarının düşük ısı yer değiştirme oranlarında atıksız HCl emisyonları ile benzer kaldığı ancak yüksek ısı yer değiştirme oranları olduğu günlerde HCl emisyonlarının bir miktar yükseldiği görülmüştür. ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanıldığı günlere ait HCl emisyonlarının atıksız HCl ortalama değeri ile karşılaştırması Şekil 6.68 ile verilmiştir.



Şekil 6.68. ÖTL ve FBA kullanımı ile HCl emisyonları ilişkisi

ÖTL'nin ve FBA'nın tek başına kullanımlarının HCl emisyonlarını yükselttiği kendilerine ait başlıklar altında anlatılmıştır. Özellikle yüksek ısı yer değiştirme oranlarında ÖTLK kullanılmasının HCl emisyonlarının yükselmesinde etkisi olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.68, ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanılması durumunda da ÖTLK etkisi ile HCl emisyonlarının yükseldiğini göstermektedir. ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanılması ile elde edilen HCl emisyon ortalaması $0,04 \text{ mg/Nm}^3$ değerine gelmiştir ki bu değer ile aslında HCl emisyonlarında bir değişiklik olmadığı kabul edilebilir. ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanıldığı ve ÖTLK olmayan daha düşük ısı yer değiştirme oranlarında HCl emisyonları 0 mg/Nm^3 değerinde kalmıştır. Ancak, ÖTLK kullanımı ile arttırılan ısı yer değiştirme oranlarında HCl emisyonları $0,1 \text{ mg/Nm}^3$ değerine yükselmiştir. ÖTL ve FBA ayrı ayrı kullanımlarda HCl oluşumunu $0,22$ ve $0,1 \text{ mg/Nm}^3$ seviyelerine yükseltirken ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanımı HCl emisyonundaki yükselmeyi $0,04 \text{ mg/Nm}^3$ seviyesinde tutmuştur. Bu iki atığın ayrı ayrı kullanılması yerine birlikte kullanılması çalışmaya esas fabrika koşulları için önerilebilir.

Çalışmaya esas 120 veri arasında 2 tanesinde FBA ve KEA beraber kullanılmış ve bunların her ikisi de Ocak ayı içerisinde gerçekleşmiştir. Her iki veride atıksız HF emisyon ortalama değerinin altında kalmıştır. HCl emisyonunda ise her iki atığın beraber kullanımı HCl emisyonlarında ufak bir artışa neden olmuştur. Şekil 6.69, FBA ve KEA'nın birlikte kullanıldığı günlerin HF ve HCl emisyonlarını göstermektedir.



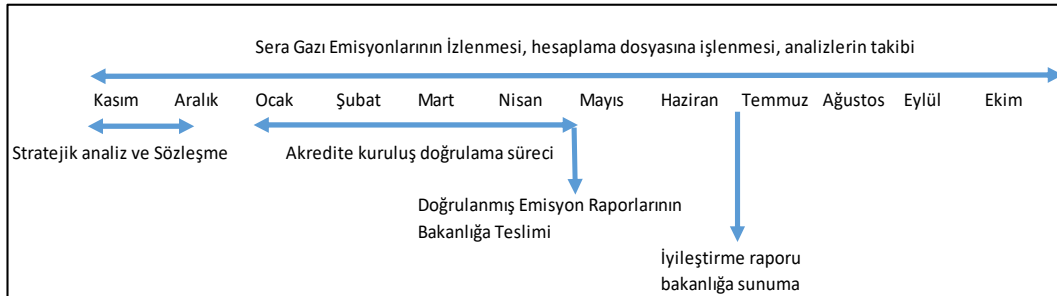
Şekil 6.69. KEA+FBA ısı yer değiştirme HF- HCl emisyonları

FBA ve KEA'nın birlikte kullanılması sırasındaki ısıl yüzde dağılımları 25 Ocak için %1,1 KEA ve %1,9 FBA, 27 Ocak için ise %1,6 KEA ve %3 FBA'dır. KEA'nın %1,1 değerinden %1,6 değerine çıkması HF emisyonlarında artış yaşanmasına neden olmuş ve HF emisyonu 0,16 değerinden 0,22 mg/Nm³ değerine yükselmiştir. Her iki atık ayrı ayrı kullanıldığında HF emisyonlarında düşüş yaşanmışken ikisi birlikte %4 oranında kullanıldığında HF emisyonlarında yükselme yaşanmasına sebebiyet vermiştir. Her ne kadar bir yükselme görülmüş olsa da HF emisyonları atıksız dönem ortalamasının altında kalmıştır. FBA ve KEA'nın birlikte kullanımı ile elde edilen ortalama HF emisyon azaltımı %36,7 civarında gerçekleşmiştir. FBA ve KEA'nın birlikte kullanılması sırasında atıksız ortalama değerden yüksek HCl emisyonları görülmüştür. HF emisyon eğiliminin tersine ısıl yer değiştirme oranı arttıkça HCl emisyonu düşüş göstermiştir. Ancak, her iki değerde atıksız ortalama değer üzerinde gerçekleşmiştir. KEA'nın HCl emisyonları üzerinde bir etkisi olmasa da FBA HCl emisyonlarını arttırmaktadır. %14 oranındaki ısıl yer değiştirmede FBA oranı %11 ısıl yer değiştirmedekine göre yüksektir ancak buna rağmen atıkların tek kullanımlarına oranla ters bir sonuç gerçekleşmiş ve HCl emisyonları düşüş göstermiştir. FBA ve KEA'nın birlikte kullanılmasında %3 oranındaki karışım HF ve HCl emisyonları kısmında kullanılması uygun olan karışım oranı olarak belirlenebilir. Fırın tonajı 164 ton olduğunda %30 oranında ÖTL+FBA beslenmesi ile intikalden %38,49 oranında ÖTL beslenmesi aynı etkiyi göstermektedir. İçerisinde klor içermeyen atığın fırına beslenmesi kömür miktarını da azaltarak yakıttan gelme olasılığı bulunan kloru da azalttığı için fırın emisyonlarına olumlu etki yapmıştır. Ancak, fırın koşulları ve besleme şartları her zaman kontrol altında tutulmalıdır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar Conesa ve diğ., 2008 yılında yaptıkları çalışma ile benzerlik göstermiştir. Conesa ve diğ., 2008 yılında döner fırına arıtma çamuru besleyerek PCDD/F, PAH ve HF-HCl parametrelerini incelemiştir. Yapılan çalışmada arıtma çamurunun HCl emisyonlarını bir miktar yükselttiği ancak yine oldukça düşük değerlerin ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

6.6. Alternatif Yakıt Kullanımının CO₂ Emisyonları Üzerine Etkisi

CO₂ emisyonları, Bölüm 3.9'da anlatıldığı gibi hem farinin kalsinasyonundan ki bu proses emisyonu olarak adlandırılır hem de yakıtın yanmasından kaynaklanır ki bu durumda yakıt emisyonu olarak adlandırılmaktadır. Çalışmada, konvansiyonel yakıt

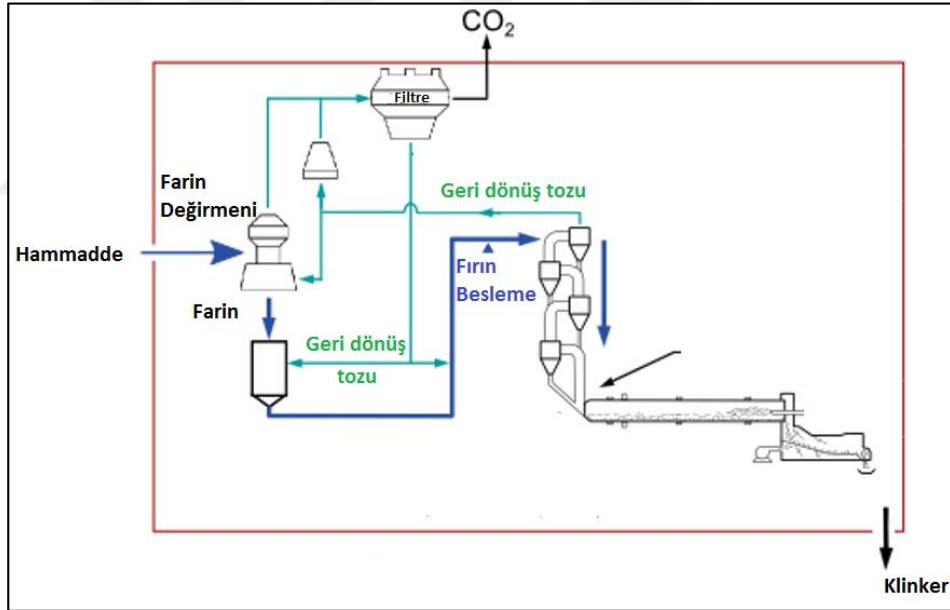
yerine kullanılan alternatif yakıt ile elde edilen CO₂ emisyonları atık kullanılmaması durumu ile karşılaştırılmıştır. İrdeleme sera gazı emisyonu olarak yapılmamıştır. CO₂ emisyonları Türkiye’de çimento fabrikalarında Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ (SGİRT) kapsamında izlenmektedir. Tebliğ kapsamından her fabrika kendisine ait “izleme planı” oluşturur. SGİR Tebliği çimento fabrikalarında iki metod ile karbondioksit emisyonlarının izlenmesine izin verir. Bunlardan ilki “Yöntem A: Girdi Bazlı İzleme” ve ikincisi “Yöntem B: Çıktı Bazlı İzleme” olarak adlandırılmaktadır. Her iki metoddan birini seçerek izleme yapılabilir. Hangi yöntem ile izleme yapılacağı fabrikanın seçtiği yöntemdeki ilgili verilerinin kesinliğini kanıtlayabilmesi üzerine dayalıdır, tercih fabrikalara aittir. Seçilen yönteme ait, emisyon kaynakları, emisyon noktaları ve kaynak akışları belirlenir. Kaynak akışı tebliğde “tüketimi veya üretimi sonucunda bir veya daha fazla emisyon kaynağında sera gazı emisyonlarına sebep olan veya karbon içeren ve kütle dengesi yöntemi ile sera gazı emisyon hesaplarında kullanılan belli bir tür yakıt, hammadde veya ürün” olarak tanımlanmaktadır [187]. Bu noktada, kullanılan hammaddeler veya hammaddelerin öğütülmesi sonucunda elde edilen farin ve kullanılan her türlü konvansiyonel yakıt ve alternatif yakıt karbonsioksite neden olan kaynak akışlarıdır. Her bir kaynak akışı, tüketim miktarları, kalorileri, karbon içerikleri nedeni ile emisyon faktörleri belirlenerek hesaplanmaya katılmaktadır. Yıl boyunca yapılan izleme sonucu oluşturulan emisyon raporu akredite bir kuruluş tarafından yapılan doğrulama sonucunda uygun bulunursa bakanlığa gönderilerek süreç sonlandırılmış olmaktadır. SGİR Tebliği emisyonların izlenmesi ve raporlanması süreçleri Şekil 6.70’de verilmiştir.



Şekil 6.70. SGİR Tebliği kapsamında izleme ve raporlama zamanlama haritası

Çalışmada seçilen fabrika, karbondioksit emisyonlarını Yöntem A ile takip etmektedir. İzleme planında bulunan tüm kaynak akışları belirlenmiş ve iç hesaplama

dosyası oluşturulmuştur. İç hesaplama dosyasında tüketimler için kantar ve sayaç değerleri kullanılmaktadır. Kaynak akışlarına ait net kalorifik değer ve emisyon faktörleri ise ilgili ayda tüketimi yapılan tüm kaynak akışlarının akredite laboratuvara gönderilmesi ve nem, kalori ve karbon içeriği analizlerinin yaptırılması sonucu gelen sonuçlar ile yapılan hesaplamalardan elde edilmektedir. Fabrikada proses emisyonlarının sınırları Şekil 6.71'de gösterilmiştir. Proses emisyonları tüketilen farin üzerinden hesaplanmaktadır. Ama sistem çalıştığı dönemlerde bir miktar toz, farin silosuna geri dönmektedir ve fırına beslenen farin miktarı farin tartım sayacından geçen miktar olmamaktadır. Bu nedenle fabrikalar geri dönüş yükünü hesaplamak için geri dönüş tartımları yapmakta ve hesaplanan geri dönüş toz miktarı fırına beslenen farin miktarından çıkarılarak net farin tüketimini hesaplanmaktadır. Farin ve geri dönüş tozu emisyon faktörlerinin hesaplanması amacıyla akredite laboratuvara analize gönderilmektedir.



Şekil 6.71. Fabrika proses emisyonu sınırları

Emisyonların hesaplanmasında iki önemli tanım bulunmaktadır. Bunlar, Emisyon faktörü (EF) ve Net Kalorifik Değer (NKD) olarak isimlendirilmektedir. Proses emisyonlarında hesaplama tüketim ve emisyon faktörü üzerinden yapılırken, yakıt emisyonları tüketim üzerinden net kalorifik değer ve emisyon faktörü ile hesaplanmaktadır. Çalışmada fabrikalarda kullanılan alternatif yakıtlar ile konvansiyonel yakıt kullanımı yapılmaması sonucu fabrikanın yakıt kaynaklı salımı

yapılacak olan CO₂ emisyonlarının değişimi incelenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan önemli terimlerin açıklamaları aşağıdaki şekildedir.

Tüketim (Faaliyet verisi): Ton olarak aylık tüketilen yakıt/atık miktarıdır. Miktarlar sera gazı emisyon raporlarından alınmıştır. Kuru miktar baz alınarak hesaplama yapıldığından kaloriler de kuru baz olarak alınmıştır.

Net kalorifik Değer: Yakıt veya malzeme içindeki suyun buharlaşma ısısı hariç tutularak, bir yakıtın veya malzemenin standart koşullar altında oksijen ile tam yanmasında açığa çıkan net ısı enerjisidir. Akredite laboratuvar tarafından yapılan analizlerdeki değerler kullanılmıştır. Analiz değerlerin kalorifik değer kcal/kg olarak verilmektedir. Ancak, tebliğ NKD'nin TJ/t biriminde olmasını istemektedir. NKD hesabı için Denklem (6.1) kullanılmıştır.

$$\text{NKD (TJ/t)} = \frac{\text{NKD} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) 4,18}{10^6} \quad (6.1)$$

Karbon İçeriği (%): Yakıt ve atıklar için akredite laboratuvara yaptırılmış olan analizlerdeki %C değeridir.

Emisyon faktörü (EF): Tam yanmanın ve diğer tüm kimyasal reaksiyonların tamamlandığının varsayıldığı bir kaynak akışındaki faaliyet verisine ait sera gazı ortalama emisyon oranıdır. EF'de tCO₂/TJ cinsinden ifade edilmektedir. Denklem (6.2) ile hesaplanmalıdır.

$$\text{EF (tCO}_2\text{/TJ)} = (\%C \ 3,664) / (\text{NKD(kcal/kg)} \ 4,1868 / 10^6) \quad (6.2)$$

Oksidasyon Faktörü (OF): Atmosfere salınan karbonmonoksitin karbondioksit molar eşdeğeri olarak alındığı ve yanma sonucunda karbondioksite yükseltgenen karbonun yakıt içerisinde bulunan ve yakıt kesiri olarak ifade edilen toplam karbona oranını ifade eder. Tebliğ uyarınca 1 (bir) olarak alınmaktadır. İlgili kaynak akışından atmosfere salınan CO₂ emisyonu yukarıdaki tanımlar gereği elde edilen değerler ile Denklem (6.3) uyarınca hesaplanmıştır.

$$\text{CO}_2 \text{ emisyonu (t)} = \text{Tüketim (t)} \text{ NKD (TJ/t)} \text{ EF (tCO}_2\text{/TJ)} \text{ OF} \quad (6.3)$$

Alternatif yakıt kullanımından kaynaklanan emisyonlar, ilgili atık yerine petrokok kullanılması durumunda elde edilecek olan emisyonlar ile karşılaştırılmıştır. CO₂ emisyonlarında proses emisyonu önemli yer tuttuğundan atık tipine göre CO₂ emisyonu hesaplanmış ancak aylar bazında değerlendirme yapılmıştır. Kuru tüketim değerleri sera gazı emisyon raporlarından, EF ve NKD emisyon raporlarına verilerin alındığı analiz raporlarından alınmıştır. Diğer atıklar başlığında değerlendirilen atık “karışık endüstriyel atıklar” olmuştur. Bu atıklar için EF ve NKD değeri “CSI CO₂ excel spread sheet” değeri olarak alınmış olup literatür değeridir. Ayrıca, “CSI CO₂ excel spread sheet” ÖTL’nin %27 oranında biyokütle içerdiğini belirtmektedir. Bu nedenle, ÖTL hesabında oksidasyon faktörü 0,73 olarak alınmıştır.

6.6.1. Ocak ayı alternatif yakıt kullanımı CO₂ emisyonlarına etkisi

Çalışmaya esas fabrikada Ocak ayı içerisinde 356 t ÖTL, 84,66 t KEA ve 64 ton FBA yaş bazda kullanılmıştır. Hesaplamalara esas alınan değerler kuru bazda tüketim ve kuru kalori olmuştur. Analizler, sera gazı izlemesi için yapılan analiz değerlerinden alınmış, hesaplamalar ise ilgili tebliğde belirtilen ve üst bölümde anlatılan denklemler gereği yapılmıştır. Ocak ayına ait atık tüketim miktarları ve CO₂ emisyonları Tablo 6.15 ile verilmiştir.

Tablo 6.15. Ocak ayı AF kullanımı ve CO₂ emisyonları

Ocak	Kuru Tüketim (t)	NKD (TJ/t)	EF (tCO ₂ /TJ)	OF	CO ₂ (t)
ÖTL	355,82	0,04	83,97	0,73	766,90
KEA	84,66	0,02	80,00	1,00	165,93
FBA	62,28	0,02	98,33	1,00	152,50
Toplam	502,76	-	-	-	1.085,33

Öncelikle yaş tüketimler belirlenmiştir daha sonra analiz sonuçlarındaki nem içerikleri kullanılarak miktarlar kuru tüketime çevrilmiştir. Analiz sonucunda belirlenen kcal/kg cinsinden NKD Denklem (6.1) kullanılarak TJ/t cinsine çevrilmiştir. Analiz sonucundan alınan %C (karbon) içeriği öncelikle 3,664 ile çarpılarak tCO₂ cinsinden daha sonrada NKD ile çarpılarak tCO₂/TJ cinsinden EF hesaplanmıştır. CO₂ hesabı da denklem (6.3) gereği tüketimin NKD, EF ve OF ile çarpılması sonucu ton cinsinden ortaya konulmuştur. Fabrikada Ocak ayında 502,76 ton alternatif yakıt kullanarak 1085,33 t CO₂ salımı yapmıştır. Tablo 6.16, bu

miktarda alternatif yakıt kullanımı gerçekleşmeyip bu atıklar yerine de fabrika petrokok kullansaydı bu miktarın ne kadar olacağını göstermektedir. Petrokok eşlenik hesabı Denklem (6.4)'de gösterildiği şekilde yapılmıştır.

$$\text{Eşlenik Petrokok (t)} = \frac{\text{Atık Miktarı (t) NKD(kcal/kg)}}{\text{NKD petrokok (kcal/kg)}} \quad (6.4)$$

Tablo 6.16. Petrokok eşlenik miktar tablosu

Ocak 2018	Tüketim (t)	Petrokok Eşlenik Miktar (t)
ÖTL	355,82	368,32
KEA	84,66	61,06
FBA	62,28	45,66

Denklem (6.4) ile elde edilen petrokok eşleniği ile hesaplanan CO₂ emisyon hesap tablosu Tablo 6.17'de verilmiştir. Petrokok kalorisi, EF ve NKD analiz değerlerinden alınarak petrokok tüketim eşlenik değeri bulunmuş ve bu değerler ortaya çıkardığı CO₂ emisyonu hesaplanmıştır.

Tablo 6.17. Ocak ayı petrokok eşlenik CO₂ emisyonu

Ocak	Petokok Eşdeğer Tüketim (t)	NKD (TJ/t)	EF (tCO ₂ /TJ)	OF	CO ₂ (t)
ÖTL	368,32	0,03	93,66	1,00	1.172
KEA	78,36	0,03	93,66	1,00	194
FBA	45,66	0,03	93,66	1,00	145
Toplam	492,34	-	-	-	1.511

Tablo 6.18'de alternatif yakıtın kendi eşleniği kadar petrokok kullanımına karşılık tasarruflar görülmektedir.

Tablo 6.18. Ocak ayı CO₂ tasarruf tablosu

Ocak 2018	Tüketim (t)	CO ₂ Emisyonu (t)	Petokok Eşdeğer Tüketim (t)	CO ₂ Emisyonu (t)	CO ₂ Tasarrufu (t)
ÖTL	358,82	766,90	368,32	1.171,79	404,90
KEA	84,66	165,93	78,36	249,29	28,34
FBA	62,28	152,50	45,66	145,27	-7,24
Toplam	502,76	1.085,33	492,34	1.511,33	481,02

Ocak ayında 481,02 ton CO₂ tasarrufu elde edilmiştir. Yalnızca fosil bazlı atık kullanımı petrokok kullanımından fazla emisyon salımına neden olmuştur. Fosil bazlı atığın emisyon faktörü petrokok emisyon faktöründen yüksek olduğundan böyle bir sonuç elde edilmiştir. Ocak ayında ÖTL kullanımı ile %34,55, diğer atıkların kullanımı ile %33,4 CO₂ tasarrufu yapılmışken fosil bazlı atık kullanımı ise %5 daha yüksek CO₂ emisyonuna neden olmuştur. Alternatif yakıt yerine petrokok kullanılırdı 502,76 ton atığa karşılık 492,34 ton petrokok kullanılacaktı. Bu durumda 502,76 ton atık kullanımı ile eşlenik petrokoka denk gelen miktarına oranla CO₂ emisyonu %30,7 azalmaktadır. Bu tasarruf fabrikanın yalnızca alternatif yakıt kullanımına denk gelen petrokok eşlenik tasarrufunu göstermektedir.

Alternatif yakıtın CO₂ üzerindeki etkisi tüm yakıt kaynaklı emisyonlar ele alınarak değerlendirilmelidir. Alternatif yakıt kullanımı gerçekleşse de fabrika yine de petrokok/yakıt kullanmaya devam etmiştir. Bu nedenle, Tablo 6.19 ile fabrikanın Ocak ayı içerisindeki proses kaynaklı ve yakıt kaynaklı CO₂ emisyonları ile alternatif yakıt kullanımı olmasaydı elde edilecek olan toplam yakıt kaynaklı emisyonu ve CO₂ emisyonlarının değişimi gösterilmiştir.

Tablo 6.19. Ocak ayı CO₂ emisyonları

Ocak 2018	AF Kullanımı ile (t)	AF Kullanımı Olmadan (t)	CO ₂ Emisyonu (t)	CO ₂ Tasarrufu (%)
Proses CO ₂	35.617,16	35.617,16	0	0
Yakıt CO ₂	22.292	22.773	481	2,16
Toplam	57.909,16	58.390	481	0,83

Tablo 6.19'dan da görüldüğü gibi alternatif yakıt kullanımı ile proses emisyonları üzerinde azalma sağlanması mümkün değildir. Fabrika, Ocak ayında yakıt olarak petrokok ve alternatif yakıt kullanmıştır, tüm bu tüketimler sonucunda da 22.292 ton CO₂ emisyonunu atmosfere salmıştır. Ancak Ocak ayında alternatif yakıt kullanılmazaydı atmosfere salınacak olan emisyonun 22.773 ton olacağı yapılan hesaplamalar ile bulunmuştur. CO₂ emisyonu tasarrufu 481 tona denk gelmiştir ve bu da %2,16 oranında CO₂ emisyonu azaltımı anlamına gelmektedir. Her ne kadar fosil bazlı yakıt emisyon faktörü petrokoktan yüksek olsa da toplam emisyonlarda %0,83 oranında azaltım sağlamak mümkündür.

6.6.2. Şubat ayı alternatif yakıt kullanımı CO₂ emisyonlarına etkisi

Çalışmaya esas fabrikada Şubat ayı içerisinde 692 t ÖTL, 24,06 t KEA ve 380 ton FBA yaş bazda kullanılmıştır. Hesaplamalara esas alınan değerler kuru bazda tüketim ve kuru kalori olmuştur. Analizler, sera gazı izlemesi için yapılan analiz değerlerinden alınmış, hesaplamalar ise ilgili tebliğde belirtilen ve üst bölümde anlatılan denklemler gereği yapılmıştır. Şubat ayına ait atık tüketim miktarları ve CO₂ emisyonları Tablo 6.20 ile verilmiştir.

Tablo 6.20. Şubat ayı AF kullanımı ve CO₂ emisyonları

Şubat 2018	Kuru Tüketim (t)	NKD (TJ/t)	EF (tCO ₂ /TJ)	OF	CO ₂ (t)
ÖTL	689,23	0,04	84,37	0,73	1.527,15
KEA	23,98	0,02	80,00	1,00	47,00
FBA	377,00	0,03	98,60	1,00	1.119,98
Toplam	1.090,21	-	-	-	2.694,13

Öncelikle yaş tüketimler belirlenmiştir daha sonra analiz sonuçlarındaki nem içerikleri kullanılarak miktarlar kuru tüketime çevrilmiştir. Analiz sonucunda belirlenen kcal/kg cinsinden NKD Denklem (6.1) kullanılarak TJ/t cinsine çevrilmiştir. Analiz sonucundan alınan %C (karbon) içeriği öncelikle 3,664 ile çarpılarak tCO₂ cinsinden daha sonrada NKD ile çarpılarak tCO₂/TJ cinsinden EF hesaplanmıştır. CO₂ hesabı da denklem (6.3) gereği tüketimin NKD, EF ve OF ile çarpılması sonucu ton cinsinden ortaya konulmuştur. Fabrikada Şubat ayında 1090,21 ton alternatif yakıt kullanarak 2.694,12 t CO₂ salımı yapmıştır. Tablo 6.21 bu miktarda alternatif yakıt kullanımı gerçekleşmeyip bu atıklar yerine de Fabrika petrokok kullansaydı bu miktarın ne kadar olacağını göstermektedir. Petrokok eşlenik hesabı Denklem (6.4)'de gösterildiği şekilde yapılmıştır.

Tablo 6.21. Petrokok eşlenik miktar tablosu

Şubat 2018	Tüketim (t)	Petrokok Eşlenik Miktar (t)
ÖTL	689,23	726,07
KEA	23,98	22,08
FBA	377,00	332,58

Denklem (6.4) ile elde edilen petrokok eşleniği ile hesaplanan CO₂ emisyon hesap tablosu Tablo 6.22'de verilmiştir. Petrokok kalorisi, EF ve NKD analiz değerlerinden

alınarak petrokok tüketim eşlenik değeri bulunmuş ve bu değerin ortaya çıkardığı CO₂ emisyonu hesaplanmıştır.

Tablo 6.22. Şubat ayı petrokok eşlenik CO₂ emisyonu

Şubat 2018	Petokok Eşdeğer Tüketim (t)	NKD (TJ/t)	EF (tCO ₂ /TJ)	OF	CO ₂ (t)
ÖTL	726,07	0,03	91,67	1,00	2.272,98
KEA	22,08	0,03	91,67	1,00	69,11
FBA	332,58	0,03	91,67	1,00	1.041,16
Toplam	1.080,73	-	-	-	3.383,25

Tablo 6.23’de alternatif yakıtın kendi eşleniği kadar petrokok kullanımına karşılık tasarruflar görülmektedir.

Tablo 6.23. Şubat ayı CO₂ tasarruf tablosu

Şubat 2018	AF CO ₂ Emisyonu (t)	Petokok Eşlenik CO ₂ Emisyonu (t)	CO ₂ Tasarrufu (t)
ÖTL	1.527,15	2.272,98	745,82
KEA	47,00	69,11	22,11
FBA	1.119,98	1.041,16	-78,82
Toplam	2.694,13	3.383,25	689,11

Şubat ayında 689,11 ton CO₂ tasarrufu elde edilmiştir. Yalnızca fosil bazlı atık kullanımı petrokok kullanımından fazla emisyon salımına neden olmuştur. Fosil bazlı atığın emisyon faktörü petrokok emisyon faktöründen yüksek olduğundan böyle bir sonuç elde edilmiştir. Şubat ayında ÖTL kullanımı ile %32,8, KEA kullanımı ile %31,98 CO₂ tasarrufu yapılmışken fosil bazlı atık kullanımı ise %7,5 daha yüksek CO₂ emisyonu meydana gelmiştir. Alternatif yakıt yerine petrokok kullanılsaydı 1.090,21 ton atığa karşılık 2694,13 ton petrokok kullanılacaktı. Bu durumda 1.090,21 ton atık kullanımı ile eşlenik petrokoka denk gelen miktara oranla CO₂ emisyonu %20,4 oranında azalmaktadır. Bu tasarruf fabrikanın yalnızca alternatif yakıt kullanımına denk gelen petrokok eşlenik tasarrufunu göstermektedir.

Alternatif yakıtın CO₂ üzerindeki etkisi tüm yakıt kaynaklı emisyonlar ele alınarak değerlendirilmelidir. Alternatif yakıt kullanımı gerçekleşse de fabrika yine de petrokok/yakıt kullanmaya devam etmiştir. Bu nedenle, Tablo 6.24 ile fabrikanın Şubat ayı içerisindeki proses kaynaklı ve yakıt kaynaklı CO₂ emisyonları ile alternatif

yakıt kullanımı olmasaydı elde edilecek olan toplam yakıt kaynaklı emisyonu ve CO₂ emisyonlarının değişimi gösterilmiştir.

Tablo 6.24. Şubat ayı CO₂ emisyonları

Şubat 2018	AF Kullanımı ile (t)	AF Kullanımı Olmadan (t)	CO ₂ Emisyonu (t)	CO ₂ Tasarrufu (%)
Proses CO ₂	32.325	32.325	0,00	0,00
Yakıt CO ₂	21.171	21.860	689,11	3,25
Toplam	53.496	54.185	689,11	1,29

Tablo 6.24'den de görüldüğü gibi alternatif yakıt kullanımı ile proses emisyonları üzerinde azalma sağlanması mümkün değildir. Fabrika, Şubat ayında yakıt olarak petrokok ve alternatif yakıt kullanmıştır, tüm bu tüketimler sonucunda da 21.171 ton CO₂ emisyonunu atmosfere salmıştır. Ancak Şubat ayında alternatif yakıt kullanmasaydı atmosfere salacağı emisyonun 21.860 ton olacağı yapılan hesaplamalar ile bulunmuştur. CO₂ emisyonu tasarrufu 689,11 tona denk gelmiştir ve bu da %3,25 oranında CO₂ emisyonu azaltımı anlamına gelmektedir. Her ne kadar fosil bazlı yakıt emisyon faktörü petrokoktan yüksek olsa da toplam emisyonlarda %1,29 oranında azaltım sağlamak mümkündür.

6.6.3. Nisan ayı alternatif yakıt kullanımı CO₂ emisyonlarına etkisi

Çalışmaya esas fabrikada Nisan ayı içerisinde 877 t ÖTL ve 95,82 t KEA yaş bazda kullanılmıştır. Hesaplamalara esas alınan değerler kuru bazda tüketim ve kuru kalori olmuştur. Analizler, sera gazı izlemesi için yapılan analiz değerlerinden alınmış, hesaplamalar ise ilgili tebliğde belirtilen ve üst bölümde anlatılan denklemler gereği yapılmıştır. Nisan ayına ait atık tüketim miktarları ve CO₂ emisyonları Tablo 6.25 ile verilmiştir.

Tablo 6.25. Nisan ayı AF kullanımı ve CO₂ emisyonları

Nisan 2018	Kuru Tüketim (t)	NKD (TJ/t)	EF (tCO ₂ /TJ)	OF	CO ₂ (t)
ÖTL	869,23	0,03	85,16	0,73	1.887,16
KEA	95,82	0,02	80,00	1,00	187,81
Toplam	965,05	-	-	-	2.074,97

Öncelikle yaş tüketimler belirlenmiştir daha sonra analiz sonuçlarındaki nem içerikleri kullanılarak miktarlar kuru tüketime çevrilmiştir. Analiz sonucunda

belirlenen kcal/kg cinsinden NKD Denklem (6.1) kullanılarak TJ/t cinsine çevrilmiştir. Analiz sonucundan alınan %C (karbon) içeriği öncelikle 3,664 ile çarpılarak tCO₂ cinsinden daha sonrada NKD ile çarpılarak tCO₂/TJ cinsinden EF hesaplanmıştır. CO₂ hesabı da denklem (6.3) gereği tüketimin NKD, EF ve OF ile çarpılması sonucu ton cinsinden ortaya konulmuştur. Fabrikada Nisan ayında 965,05 ton alternatif yakıt kullanarak 2.074,97 t CO₂ salımı yapmıştır. Tablo 6.26 bu miktarda alternatif yakıt kullanımı gerçekleşmeyip bu atıklar yerine de fabrika petrokok kullansaydı bu miktarın ne kadar olacağını göstermektedir. Petrokok eşlenik hesabı Denklem (6.4)'de gösterildiği şekilde yapılmıştır.

Tablo 6.26. Petrokok eşlenik miktar tablosu

Nisan 2018	Tüketim (t)	Petrokok Eşlenik Miktar (t)
ÖTL	869,23	893,44
KEA	95,82	70,42

Denklem (6.4) ile elde edilen petrokok eşleniği ile hesaplanan CO₂ emisyon hesap tablosu Tablo 6.27'de verilmiştir. Petrokok kalorisi, EF ve NKD analiz değerlerinden alınarak petrokok tüketim eşlenik değeri bulunmuş ve bu değerler ortaya çıkardığı CO₂ emisyonu hesaplanmıştır.

Tablo 6.27. Nisan ayı petrokok eşlenik CO₂ emisyonu

Nisan 2018	Petrokok Eşdeğer Tüketim (t)	NKD (TJ/t)	EF (tCO ₂ /TJ)	OF	CO ₂ (t)
ÖTL	893,44	0,03	92,18	1,00	2.798,24
KEA	70,42	0,03	92,18	1,00	220,56
Toplam	963,86	-	-	-	3.018,79

Tablo 6.28'de alternatif yakıtın kendi eşleniği kadar petrokok kullanımına karşılık tasarruflar görülmektedir.

Tablo 6.28. Nisan ayı CO₂ tasarruf tablosu

Nisan 2018	AF CO ₂ Emisyonu (t)	Petrokok Eşlenik CO ₂ Emisyonu (t)	CO ₂ Tasarrufu (t)
ÖTL	1.887,16	2.272,98	2.798,24
KEA	187,81	220,56	220,56
Toplam	2.074,97	3.018,79	943,82

Nisan ayında 943,82 ton CO₂ tasarrufu elde edilmiştir. Nisan ayında ÖTL kullanımı ile %32,55, KEA kullanımı ile %14,85 CO₂ tasarrufu yapılmıştır. Alternatif yakıt yerine petrokok kullanılsaydı 965,05 ton atığa karşılık 963,86 ton petrokok kullanılacaktı. Bu durumda 965,05 ton atık kullanımı ile eşlenik petrokoka denk gelen miktara oranla CO₂ emisyonu %31,26 oranında azalmaktadır. Bu tasarruf fabrikanın yalnızca alternatif yakıt kullanımına denk gelen petrokok eşlenik tasarrufunu göstermektedir.

Alternatif yakıtın CO₂ üzerindeki etkisi tüm yakıt kaynaklı emisyonlar ele alınarak değerlendirilmelidir. Alternatif yakıt kullanımı gerçekleşse de fabrika yine de petrokok/yakıt kullanmaya devam etmiştir. Bu nedenle, Tablo 6.29 ile fabrikanın Nisan ayı içerisindeki proses kaynaklı ve yakıt kaynaklı CO₂ emisyonları ile alternatif yakıt kullanımı olmasaydı elde edilecek olan toplam yakıt kaynaklı emisyonu ve CO₂ emisyonlarının değişimi gösterilmiştir.

Tablo 6.29. Nisan ayı CO₂ emisyonları

Nisan 2018	AF Kullanımı ile (t)	AF Kullanımı Olmadan (t)	CO ₂ Emisyonu (t)	CO ₂ Tasarrufu (%)
Proses CO ₂	34.484	34.484	0,00	0,00
Yakıt CO ₂	23.292	24.326	943,82	4,05
Toplam	57.776	58.720	943,82	1,63

Tablo 6.29'dan da görüldüğü gibi alternatif yakıt kullanımı ile proses emisyonları üzerinde azalma sağlanması mümkün değildir. Fabrika, Nisan ayında yakıt olarak petrokok ve alternatif yakıt kullanmıştır, tüm bu tüketimler sonucunda da 23.292 ton CO₂ emisyonunu atmosfere salmıştır. Ancak Nisan ayında alternatif yakıt kullanmasaydı atmosfere salacağı emisyonun 24.326 ton olacağı yapılan hesaplamalar ile bulunmuştur. CO₂ emisyonu tasarrufu 943,82 tona denk gelmiştir ve bu da yanma emisyonlarında %4,05 oranında CO₂ emisyonu azaltımı anlamına gelmektedir. Fabrikanın Nisan ayı içerisinde saldığı toplam CO₂ emisyonlarında ise %1,63 oranında azaltım anlamında gelmektedir.

6.6.4. Ağustos ayı alternatif yakıt kullanımı CO₂ emisyonlarına etkisi

Çalışmaya esas fabrikada Ağustos ayı içerisinde 1.834 t ÖTL, 6 t KEA ve 132 t FBA yaş bazda kullanılmıştır. Hesaplamalara esas alınan değerler kuru bazda tüketim ve

kuru kalori olmuştur. Analizler, sera gazı izlemesi için yapılan analiz değerlerinden alınmış, hesaplamalar ise ilgili tebliğde belirtilen ve üst bölümde anlatılan denklemler gereği yapılmıştır. Ağustos ayına ait atık tüketim miktarları ve CO₂ emisyonları Tablo 6.30 ile verilmiştir.

Tablo 6.30. Ağustos ayı AF kullanımı ve CO₂ emisyonları

Ağustos 2018	Kuru Tüketim (t)	NKD (TJ/t)	EF (tCO ₂ /TJ)	OF	CO ₂ (t)
ÖTL	1.830,00	0,04	83,00	0,73	4.039,63
KEA	5,97	0,02	80,00	1,00	11,70
FBA	130,38	0,03	95,68	1,00	363,25
Toplam	1.966,35	-	-	-	4.414,58

Öncelikle yaş tüketimler belirlenmiştir daha sonra analiz sonuçlarındaki nem içerikleri kullanılarak miktarlar kuru tüketime çevrilmiştir. Analiz sonucunda belirlenen kcal/kg cinsinden NKD Denklem (6.1) kullanılarak TJ/t cinsine çevrilmiştir. Analiz sonucundan alınan %C (karbon) içeriği öncelikle 3,664 ile çarpılarak tCO₂ cinsinden daha sonrada NKD ile çarpılarak tCO₂/TJ cinsinden EF hesaplanmıştır. CO₂ hesabı da denklem (6.3) gereği tüketimin NKD, EF ve OF ile çarpılması sonucu ton cinsinden ortaya konulmuştur. Fabrikada Ağustos ayında 1.966,35 ton alternatif yakıt kullanarak 4.414,58 t CO₂ salımı yapmıştır.

Tablo 6.31 bu miktarda alternatif yakıt kullanımı gerçekleşmeyip bu atıklar yerine de Fabrika petrokok kullansaydı bu miktarın ne kadar olacağını göstermektedir. Petrokok eşlenik hesabı Denklem (6.4)'de gösterildiği şekilde yapılmıştır.

Tablo 6.31. Petrokok eşlenik miktar tablosu

Ağustos 2018	Tüketim (t)	Petrokok Eşlenik Miktar (t)
ÖTL	1.830,00	1.970,14
KEA	5,97	5,36
FBA	130,38	112,19

Denklem (6.4) ile elde edilen petrokok eşleniği ile hesaplanan CO₂ emisyon hesap tablosu Tablo 6.32'de verilmiştir. Petrokok kalorisi, EF ve NKD analiz değerlerinden alınarak petrokok tüketim eşlenik değeri bulunmuş ve bu değer ortaya çıkardığı CO₂ emisyonu hesaplanmıştır.

Tablo 6.32. Ağustos ayı petrokok eşlenik CO₂ emisyonu

Ağustos 2018	Petokok Eşdeğer Tüketim(t)	NKD (TJ/t)	EF (tCO ₂ /TJ)	OF	CO ₂ (t)
ÖTL	1.970,14	0,03	93,44	1,00	6.229,65
KEA	5,36	0,03	93,44	1,00	16,95
FBA	112,19	0,03	93,40		354,73
Toplam	2.087,69	-	-	-	3.018,79

Tablo 6.33'de alternatif yakıtın kendi eşleniği kadar petrokok kullanımına karşılık tasarruflar görülmektedir.

Tablo 6.33. Ağustos ayı CO₂ tasarruf tablosu

Ağustos 2018	AF CO ₂ Emisyonu (t)	Petokok Eşlenik CO ₂ Emisyonu (t)	CO ₂ Tasarrufu (t)
ÖTL	4.039,63	6.229,65	2.190,03
KEA	11,70	16,95	5,25
FBA	363,25	354,73	-8,52
Toplam	4.414,58	6.601,34	2.186,75

Ağustos ayında 1.966,35 ton CO₂ tasarrufu elde edilmiştir. Ağustos ayında ÖTL kullanımı ile %35,15, KEA kullanımı ile %30,97 oranlarında azaltım sağlanırken FBA kullanımı ile %2 oranında daha yüksek CO₂ emisyonu meydana gelmiştir. Alternatif yakıt yerine petrokok kullanılsaydı 1.966,35 ton atığa karşılık 2.087,69 ton petrokok kullanılacaktı. Bu durumda 1.966,35 ton atık kullanımı ile eşlenik petrokoka denk gelen miktara oranla CO₂ emisyonu %33,12 oranında azalmaktadır. Bu tasarruf fabrikanın yalnızca alternatif yakıt kullanımına denk gelen petrokok eşlenik tasarrufunu göstermektedir.

Alternatif yakıtın CO₂ üzerindeki etkisi tüm yakıt kaynaklı emisyonlar ele alınarak değerlendirilmelidir. Alternatif yakıt kullanımı gerçekleşse de fabrika yine de petrokok/yakıt kullanmaya devam etmiştir. Bu nedenle, Tablo 6.34 ile fabrikanın Ağustos ayı içerisindeki proses kaynaklı ve yakıt kaynaklı CO₂ emisyonları ile alternatif yakıt kullanımı olmasaydı elde edilecek olan toplam yakıt kaynaklı emisyonu ve CO₂ emisyonlarının değişimi gösterilmiştir.

Tablo 6.34. Ağustos ayı CO₂ emisyonları

Ağustos 2018	AF Kullanımı ile (t)	AF Kullanımı Olmadan (t)	CO ₂ Emisyonu (t)	CO ₂ Tasarrufu (%)
Proses CO ₂	36.222	36.222	0,00	0,00
Yakıt CO ₂	24.069	26.255	2.186,75	9,09
Toplam	60.291	62.478	2.186,75	3,63

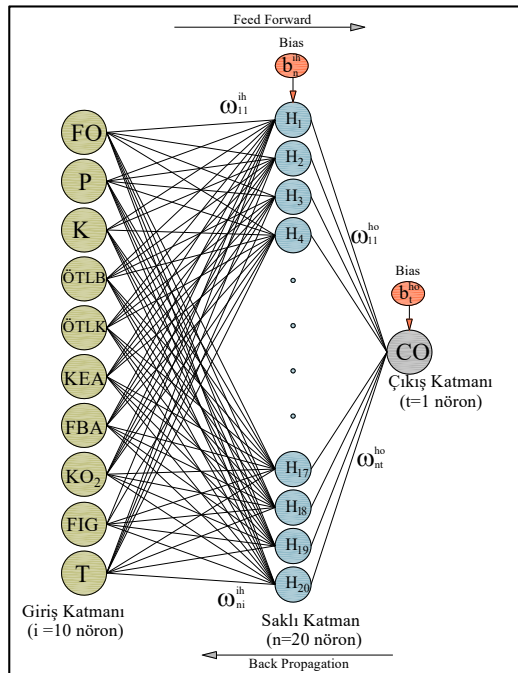
Tablo 6.34'den de görüldüğü gibi alternatif yakıt kullanımı ile proses emisyonları üzerinde azalma sağlanması mümkün değildir. Fabrika, Ağustos ayında yakıt olarak petrokok ve alternatif yakıt kullanmıştır, tüm bu tüketimler sonucunda da 24.069 ton CO₂ emisyonunu atmosfere salmıştır. Ancak Ağustos ayında alternatif yakıt kullanmasaydı atmosfere salacağı emisyonun 26.255 ton olacağı yapılan hesaplamalar ile bulunmuştur. CO₂ emisyonu tasarrufu 2.186,75 tona denk gelmiştir ve bu da yanma emisyonlarında %9,09 oranında CO₂ emisyonu azaltımı anlamına gelmektedir. Fabrikanın Ağustos ayı içerisinde saldığı toplam CO₂ emisyonlarında ise %3,63 oranında azaltım anlamına gelmektedir.

6.7. Yapay Sinir Ağı Tahmin Modelleri

Yapay sinir ağları ile CO, NO_x, SO₂, TOK ve toz parametlerine ait tahmin modelleri oluşturulmuştur. 120 adet verinin kullanılması ile elde edilen tahmin modellerinin değerleridirilmeleri aşağıdaki başlıklarda verilmiştir.

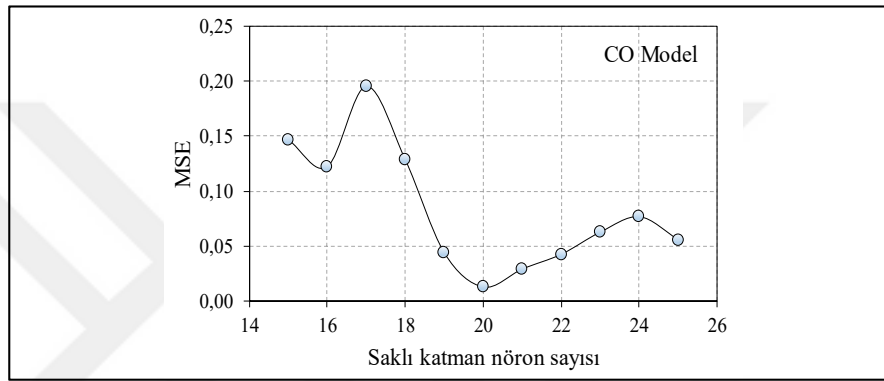
6.7.1. CO tahmin modeli

Bu çalışmada CO değerlerinin tahmin edilmesi için kullanılan ağ yapısı Şekil 6.72'de gösterildiği gibidir. Ağda eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquardt (LM) kullanılmıştır. Ağ yapısı Şekil 6.72 ile verilmiştir.



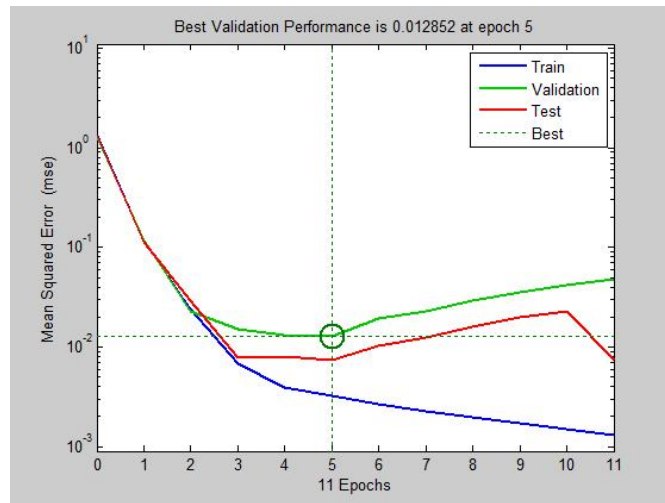
Şekil 6.72. CO ağ yapısı

Ağ, 10 nörondan oluşan giriş katmanı, 20 nörondan oluşan saklı katman ve 1 nörondan oluşan çıkış katmanı olarak tasarlanmıştır. Saklı katmanda kullanılan nöron sayısının 15-25 arasında değişen farklı ağların analizi gerçekleştirilerek deneme yanılma yöntemi ile minimum hatayı veren değer belirlenmiştir. Her bir nöron değeri için 20 kez analiz gerçekleştirilmiş ve bu ağların MSE değerlerinin ortalaması alınarak minimum hata hesaplanmıştır. CO modeline ait nöron sayısı MSE grafiği Şekil 6.73'te verilmiştir. Minimum hata 20 nörondan oluşan saklı katman ağında bulunduğundan CO modeli için saklı katman sayısı 20 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.73. Farklı nöron sayıları için CO saklı katman MSE değerleri

CO modelinin analizi sonucu elde edilen performans değerleri Şekil 6.74'te gösterilmiştir. Ağın eğitimi sonucunda MSE değerinin yüksekte düşük değerlere doğru azalması ağın öğrenmesinin başarılı olduğunun bir göstergesidir. Şekilde eğitim, doğrulama ve test verilerinin performansını gösteren 3 çizgi görülmektedir. Ağın MSE değeri 0,0129 değerine ulaştığında eğitim tamamlanmıştır.



Şekil 6.74. CO ağının öğrenme performansı

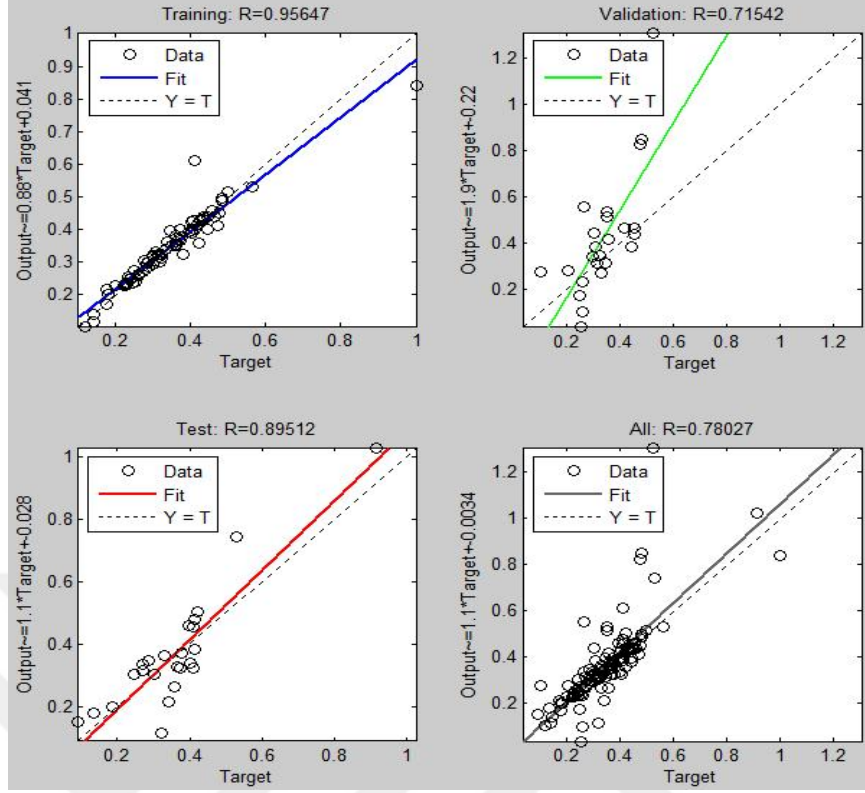
CO ağının analizi sonucunda elde edilen ağırlık ve bias değerleri Tablo 6.35'te verilmiştir.

Tablo 6.35. CO ağı katmanlar arası bağlantı ağırlık ve bias değerleri

Saklı Katman	FO	P	K	ÖTLB	ÖTLK	KEA	FBA	KO ₂	FIG	T	ω_{nt}^{ho}	b_n^{ih}
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(MW)	(t/s)		
	ω_{ni}^{ih}											
1	1,823	0,577	-1,151	1,380	-0,895	-0,342	1,575	0,341	0,178	-1,807	-0,523	-3,945
2	-1,826	-0,349	0,136	-1,656	0,639	0,674	-1,264	-2,109	-1,097	0,647	0,214	3,345
3	0,643	0,585	0,067	-1,346	-0,303	1,606	-0,398	-3,569	3,477	2,310	1,440	-2,792
4	1,105	0,965	0,587	0,434	2,747	0,839	-1,507	0,361	-1,417	0,897	-0,582	-2,894
5	0,780	-0,491	-1,975	0,174	-0,670	0,071	-1,914	1,878	2,030	-1,394	-1,330	-2,058
6	-1,131	0,865	-1,039	-0,912	2,481	0,279	0,151	-0,951	-0,692	-0,319	0,241	1,654
7	-0,618	0,439	-1,013	-1,134	-0,094	-1,488	-1,897	1,163	0,450	2,003	-0,215	1,410
8	1,374	-0,965	0,462	0,311	1,806	2,207	1,518	0,485	0,452	-0,189	0,720	-0,934
9	-0,915	0,325	-0,563	0,884	1,699	1,486	-2,117	2,021	-0,863	1,369	1,519	0,572
10	0,016	0,940	-2,175	1,147	-2,323	-0,773	0,616	-0,868	0,683	-0,509	-0,635	-0,035
11	-0,907	0,465	0,652	-0,910	-0,582	-1,559	1,410	-0,899	0,006	2,359	1,097	-0,516
12	0,021	1,534	0,098	-2,539	-2,708	-0,534	0,301	-1,992	-1,235	0,676	-0,872	1,342
13	0,966	0,859	1,484	-0,814	2,043	1,124	-2,689	1,674	2,939	0,284	-1,396	1,260
14	2,135	0,261	2,005	-2,234	0,896	-0,678	-2,539	1,821	2,081	-2,710	2,013	0,486
15	-1,534	2,045	-0,323	0,326	0,991	-1,753	1,960	-0,101	1,125	-0,898	-1,098	-2,144
16	0,153	0,766	-1,777	-1,797	1,182	1,719	-0,543	0,529	1,107	-1,716	1,171	2,364
17	-0,301	-0,517	-0,766	-0,613	0,275	0,992	1,223	-3,552	-1,059	-0,453	0,942	-2,445
18	-0,555	-1,111	1,533	-1,219	-1,091	-0,261	0,259	-1,728	-1,555	-1,284	0,972	-3,132
19	-1,155	0,181	1,635	-2,846	1,697	-0,681	-0,685	2,206	1,461	1,901	-0,783	-3,434
20	0,562	1,386	0,817	-0,548	2,519	2,426	-0,835	-0,875	-1,149	1,359	-1,957	4,121

Giriş ve saklı katman arasındaki bağlantılara ait ağırlık değerleri ω_{ni}^{ih} , saklı ve çıkış katmanı arasındaki bağlantılara ait ağırlık değerleri ω_{nt}^{ho} ve giriş ile saklı katman arasındaki bias değerleri ise b_n^{ih} ile gösterilmiştir. Ağırlık simgesi ait notasyonlar, “n” saklı katman nöron sayısı, “i” giriş katmanındaki nöron sayısı, “t” ise output nöron sayısı olarak verilmiştir. Saklı katman ile çıkış katmanı arasındaki bias değeri ise $b_t^{ho}=b_1^{ho} = -0,248$ olarak belirlenmiştir. Normalize edilmiş deneysel veriler ve ağırlık analizi sonrasında eğitim, doğrulama ve test verileri için elde edilen çıkış sonuçlarına ait grafikler Şekil 6.75'te verilmiştir.

Eğitim, doğrulama ve test verilerinden elde edilen regresyon değerleri sırasıyla 0,96, 0,72 ve 0,90 olarak belirlenmiştir. Ağırlık toplam regresyon değerinin ise 0,78 olduğu görülmüştür.



Şekil 6.75. CO ağına ait regresyon değerleri

CO modeli kullanılarak ağdan elde edilen tahmin sonuçları ile deneysel verilerden elde edilen CO gerçek değerleri (normalize edilmemiş) Tablo 6.36’da özetlenmiştir.

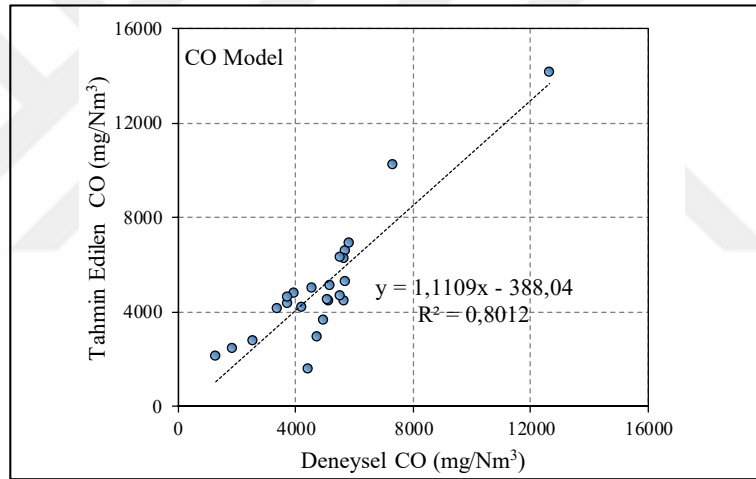
Tablo 6.36. CO ağı deneysel ve tahmin edilen gerçek değerler

Numune No.	Deneysel CO (mg/Nm ³)	Tahmin edilen CO (mg/Nm ³)
1	1.272,7	2.114,0
2	3.731,9	4.378,0
3	5.635,6	4.481,0
4	5.191,1	5.142,9
5	4.442,4	1.604,2
6	3.949,5	4.811,2
7	4.571,5	5.030,3
8	3.367,1	4.168,2
9	2.564,6	2.766,6
10	1.858,0	2.478,7
11	3.710,5	4.643,6
12	4.188,3	4.202,0
13	5.125,2	4.466,0
14	5.687,4	5.311,2
15	4.713,2	2.951,7
16	5.069,1	4.513,4
17	7.308,9	10.254,3
18	5.689,6	6.601,8

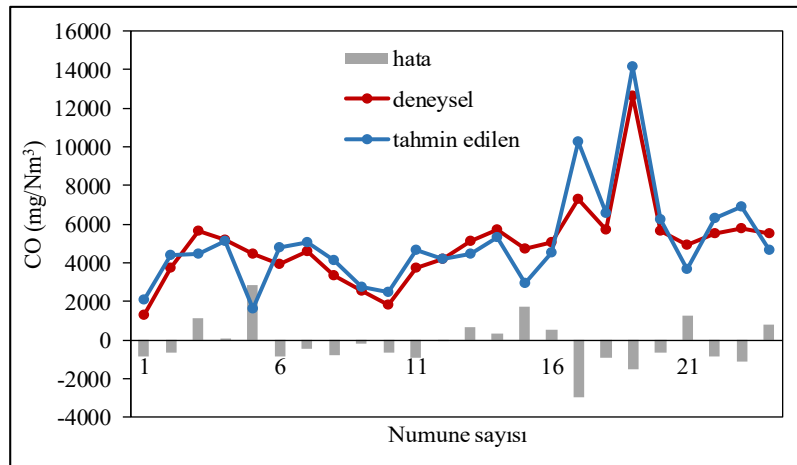
Tablo 6.36. (Devam) CO ağı deneysel ve tahmin edilen gerçek değerler

Numune No.	Deneysel CO (mg/Nm ³)	Tahmin edilen CO (mg/Nm ³)
19	12.634,5	14.147,7
20	5.658,8	6.276,8
21	4.944,8	3.655,2
22	5.501,2	6.327,6
23	5.809,0	6.923,9
24	5.512,8	4.677,0

Normalize edilmemiş 24 adet test verisi kullanılarak belirlenmiş olan deneysel CO değerleri ile ağ tarafından tahmin edilen CO değerlerine ait grafik Şekil 6.76'da verilmiştir. Test verilerinden elde edilen korelasyon katsayısı $R^2=0,80$ olarak bulunmuştur. Deneysel ve tahmin edilen değerler arasındaki farkların yani hataların belirlenmesi amacıyla Şekil 6.77'deki grafik hazırlanmıştır.

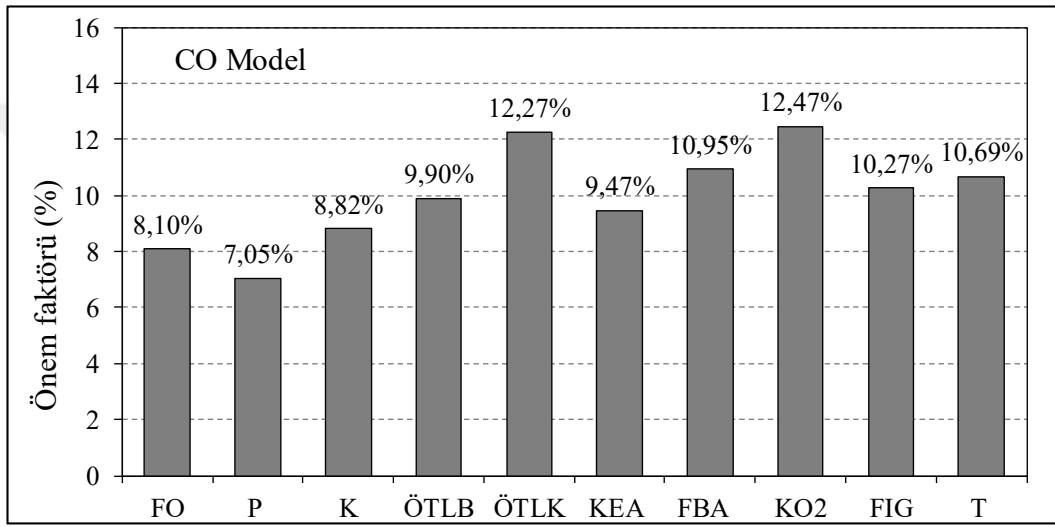


Şekil 6.76. Deneysel ve tahmin edilen CO değerleri ilişkisi



Şekil 6.77. CO hata dağılımı grafiği

Bu çalışma kapsamında oluşturulmuş olan tüm modellerin girdi parametrelerinin çıkış parametresi üzerindeki etkilerini tanımlamak için herbir girişin “önem faktörü” değeri belirlenmiştir. Her girdinin rölatif önemi, 1991 yılında Garson tarafından önerilen ve 1995 yılında Goh tarafından geliştirilmiş olan yaklaşım kullanılarak hesaplanmıştır [205, 206]. Bu yöntemle, girdilerin rölatif önem faktörü değeri; giriş, saklı ve çıkış katmanları arasındaki her bir nöron bağlantısının ağırlıkları kullanılarak hesaplanmıştır. CO modelinde her bir giriş değeri için hesaplanmış olan önem faktörleri Şekil 6.78’de verilmiştir.



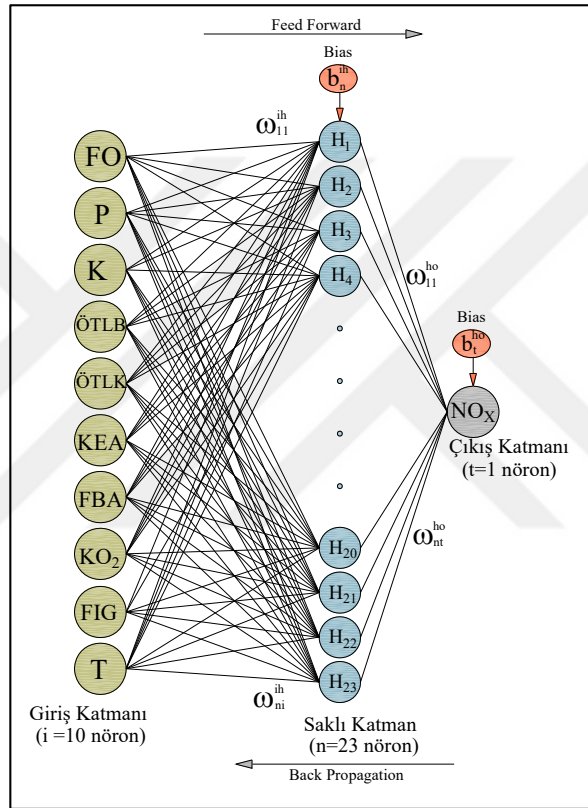
Şekil 6.78. CO modelinde girişlere ait önem faktörleri

CO parametresi üzerinde yanma gereği oksijen parametresi diğer parametrelere oranla öne çıkmıştır. Ayrıca, intikal tarafından beslenen kırılmış lastik besleme noktası itibari ile CO emisyonu üzerinde etkilidir. Bu noktadan kırılmış lastiği düzenli ve sürekli beslemek zor olduğundan yanma sırasında fırında CO piklerine neden olmaktadır. Şekil 6.78 ile kırılmış ömrünü tamamlamış lastik beslenmesinin oksijen ile birlikte önem faktörü olarak diğer parametrelere oranla bir adım öne çıktığını söylemek mümkündür.

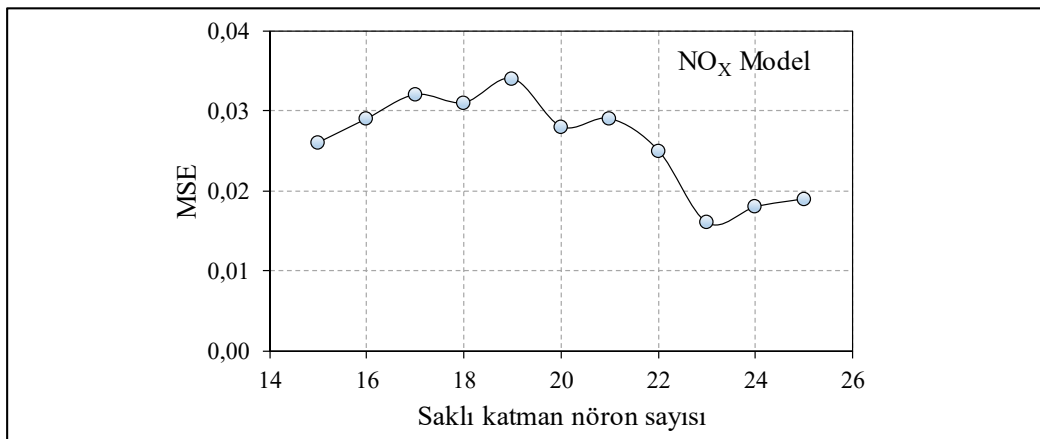
6.7.2. NO_x tahmin modeli

Bu çalışmada NO_x değerlerinin tahmin edilmesi için kullanılan ağ yapısı Şekil 6.79’da gösterildiği gibidir. Ağda eğitim algoritması olarak Scaled Conjugate Gradient (SCG) algoritması kullanılmıştır. Ağ, 10 nöronlu giriş katmanı, 23 nöronlu saklı katman ve 1 nöronlu çıkış katmanı olarak

tasarlanmıştır. Saklı katmanda kullanılan nöron sayısı 15-25 arasında değişen farklı ağların analizi gerçekleştirilerek deneme yanılma yöntemi ile minimum hatayı veren değer belirlenmiştir. Her bir nöron değeri için 20 kez analiz gerçekleştirilmiş ve bu ağların MSE değerlerinin ortalaması alınarak minimum hata hesaplanmıştır. NO_x modeline ait nöron sayısı MSE grafiği Şekil 6.80’de verilmiştir. Minimum hata 23 nörondan oluşan saklı katman ağında bulunduğundan NO_x modeli için saklı katman sayısı 23 olarak belirlenmiştir.

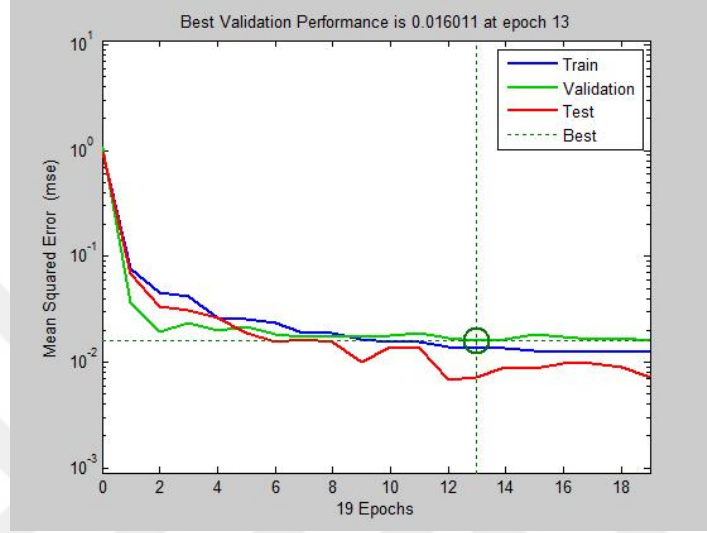


Şekil 6.79. NO_x ağ yapısı



Şekil 6.80. Farklı nöron sayıları için NO_x saklı katman MSE değerleri

NO_x modelinin analizi sonucu elde edilen performans değerleri Şekil 6.81’de gösterilmiştir. Ağın eğitimi sonucunda MSE değerinin yüksekten düşük değerlere doğru azalması ağın öğrenmesinin başarılı olduğunun bir göstergesidir. Şekil 6.81’de eğitim, doğrulama ve test verilerinin performansını gösteren 3 çizgi görülmektedir. Ağın MSE değeri 0,016 değerine ulaştığında eğitim tamamlanmıştır.



Şekil 6.81. NO_x ağının öğrenme performansı

NO_x ağının analizi sonucunda elde edilen ağı a ait ağırlık ve bias değerleri Tablo 6.37’de verilmiştir. Saklı katman ile çıkış katmanı arasındaki bias değeri ise $b_t^{ho} = b_1^{ho} = 0,330$ olarak belirlenmiştir.

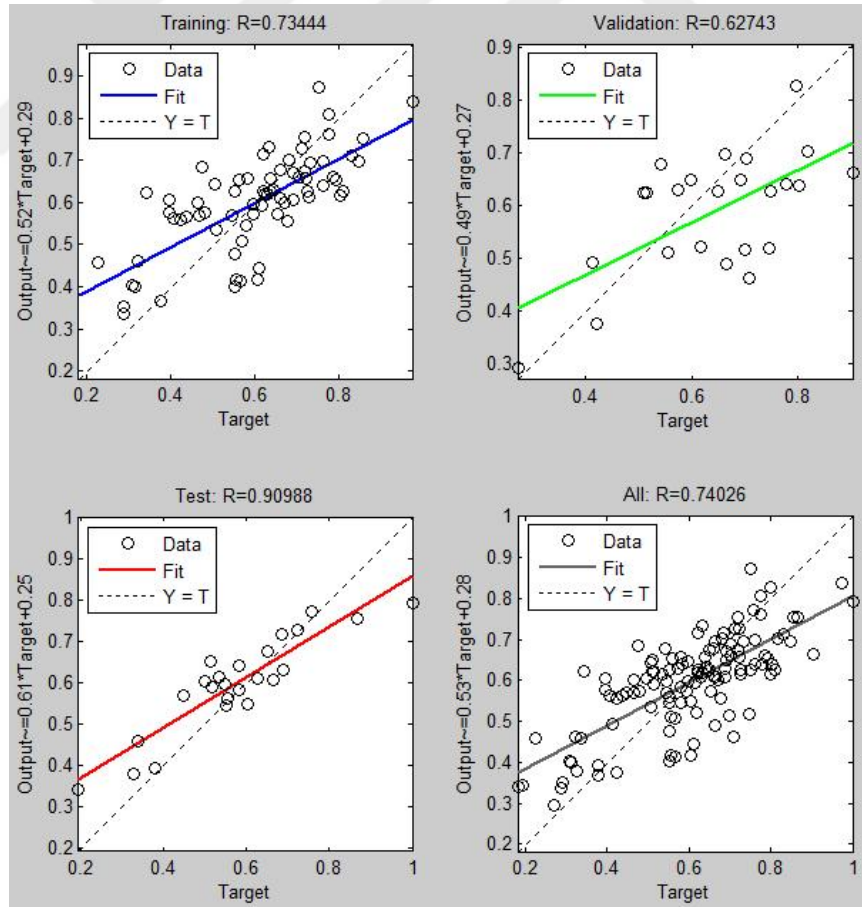
Tablo 6.37. NO_x ağı katmanlar arası bağlantı ağırlık ve bias değerleri

Saklı Katman	FO (%)	P (%)	K (%)	ÖTLB (%)	ÖTLK (%)	KEA (%)	FBA (%)	KO ₂ (%)	FIG (MW)	T (t/s)	ω_{nt}^{ho}	b_n^{ih}
	ω_{ni}^{ih}											
1	-0,180	0,682	-1,787	0,031	-0,548	0,830	1,980	1,726	1,340	-1,086	-0,221	3,834
2	1,303	0,852	0,734	-1,865	-0,756	1,409	-0,676	-0,236	1,850	0,530	0,201	-3,686
3	0,064	1,253	-1,471	0,041	-1,797	-1,544	0,211	1,039	0,516	2,014	-0,142	-3,123
4	0,940	1,599	-1,957	1,212	-0,630	-1,194	0,883	1,144	-0,486	1,587	0,793	-2,710
5	0,537	1,366	-1,455	0,357	1,469	1,108	1,132	-1,499	-0,855	1,594	-0,175	-2,450
6	1,215	1,589	0,219	0,492	0,946	1,552	0,357	-2,054	1,052	1,272	0,809	-2,135
7	1,794	-0,319	1,693	1,280	0,924	1,196	-0,524	0,715	0,171	-1,917	0,918	-1,702
8	-0,343	-2,496	0,961	-0,486	-0,202	0,964	-0,259	-1,112	-1,112	2,025	-0,775	1,256
9	-0,103	1,894	-2,054	0,345	1,140	1,623	0,243	-1,144	0,953	0,601	-0,002	1,032
10	-0,584	-1,259	-0,705	0,097	1,595	-1,640	-1,657	0,937	-1,235	-0,959	0,665	0,736
11	1,385	0,813	-1,035	-0,165	1,626	-0,685	0,759	-2,187	-1,417	-0,521	-0,098	-0,323
12	1,689	0,694	0,633	-0,428	0,422	-0,336	-1,821	-1,754	0,966	1,801	0,728	0,189
13	-1,222	1,076	1,542	-0,261	-1,458	1,253	1,833	0,343	1,580	0,097	0,367	-0,403
14	-0,408	-0,904	1,026	1,940	1,906	-2,161	0,065	0,237	-0,696	-0,934	1,008	-0,753
15	-1,398	1,275	1,681	-1,718	-1,668	0,468	0,306	-0,791	-0,266	1,177	-0,237	-1,080

Tablo 6.37. (Devam) NO_x ağı katmanlar arası bağlantı ağırlık ve bias değerleri

Saklı Katman	FO	P	K	ÖTLB	ÖTLK	KEA	FBA	KO ₂	FIG	T	ω_{nt}^{ho}	b_n^{ih}
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(MW)	(t/s)		
	ω_{ni}^{ih}											
16	0,406	-1,870	-1,300	-1,382	-1,511	0,919	-1,864	-0,239	0,623	0,628	-0,701	1,420
17	0,385	1,739	-0,914	1,641	1,769	1,497	0,830	1,328	0,451	-0,047	0,129	1,722
18	1,738	1,298	-0,528	-0,883	-1,884	1,583	-0,528	0,923	0,367	1,222	0,173	2,090
19	1,319	1,880	1,217	1,242	-0,178	0,129	-1,958	-0,109	1,462	-0,536	-0,352	2,450
20	1,751	-0,052	1,702	0,492	0,988	-1,562	-1,465	-1,077	-1,127	0,128	-0,452	2,912
21	-0,956	1,686	-0,478	1,155	1,757	-1,433	0,629	-1,135	-1,473	-0,363	-0,331	-3,163
22	1,983	0,491	1,299	1,467	0,406	1,311	0,908	0,294	-0,891	1,707	0,092	3,445
23	-1,016	-0,917	2,207	1,489	1,349	-0,374	0,772	-0,610	-0,754	-1,239	-0,745	-3,911

Normalize edilmiş deneysel veriler ve ağın analizi sonrasında eğitim, doğrulama ve test verileri için elde edilen çıkış sonuçlarına ait grafikler Şekil 6.82’de verilmiştir. Eğitim, doğrulama ve test verilerinden elde edilen regresyon değerleri sırasıyla 0,73, 0,63 ve 0,91 olarak belirlenmiştir. Ağın toplam regresyon değerinin ise 0,74 olduğu görülmüştür.



Şekil 6.82. NO_x ağına ait regresyon değerleri

NO_x modeli kullanılarak ağdan elde edilen tahmin sonuçları ile deneysel verilerden elde edilen NO_x gerçek değerleri (normalize edilmemiş) Tablo 6.38’de özetlenmiştir.

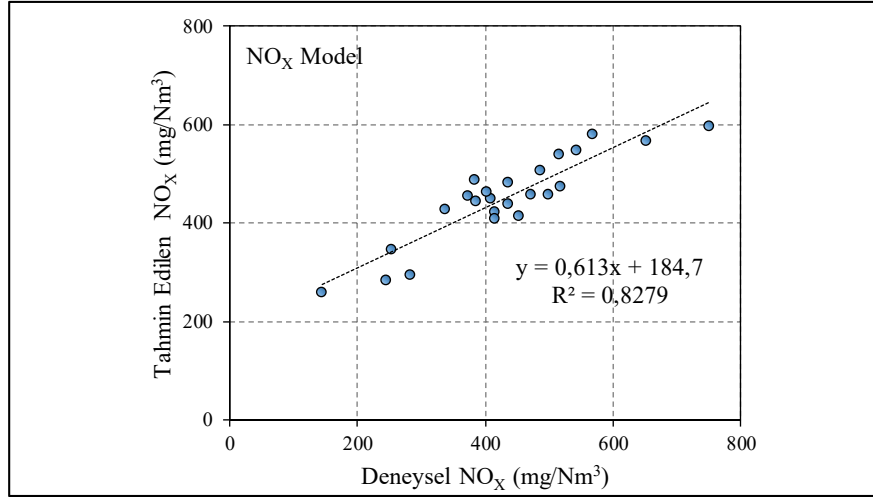
Tablo 6.38. NO_x ağı deneysel ve tahmin edilen gerçek değerler

Numune No.	Deneysel NO _x (mg/Nm ³)	Tahmin edilen NO _x (mg/Nm ³)
1	568,9	580,6
2	751,6	596,2
3	652,0	566,7
4	516,0	538,5
5	374,1	454,8
6	437,6	481,4
7	517,8	474,1
8	437,1	439,4
9	453,7	413,8
10	471,8	458,0
11	416,4	421,7
12	246,3	284,8
13	253,7	345,9
14	283,4	295,5
15	146,1	258,0
16	415,0	409,6
17	544,0	546,7
18	384,4	489,1
19	487,7	507,4
20	499,4	456,9
21	387,1	444,3
22	410,1	449,9
23	337,2	428,6
24	402,1	462,7

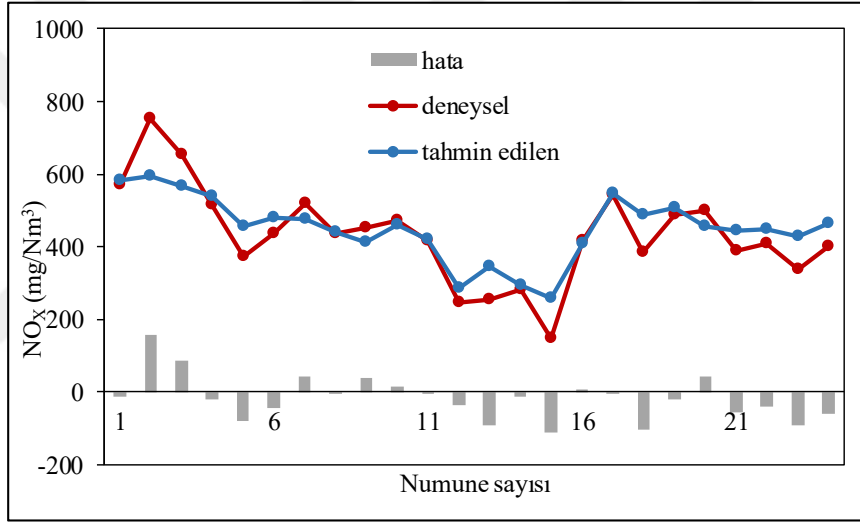
Normalize edilmemiş 24 adet test verisi kullanılarak belirlenmiş olan deneysel NO_x değerleri ile ağ tarafından tahmin edilen NO_x değerlerine ait grafik Şekil 6.83’te verilmiştir. Test verilerinden elde edilen korelasyon katsayısı $R^2=0,83$ olarak bulunmuştur.

Deneysel ve tahmin edilen değerler arasındaki farkların yani hataların belirlenmesi amacıyla Şekil 6.84’teki grafik hazırlanmıştır.

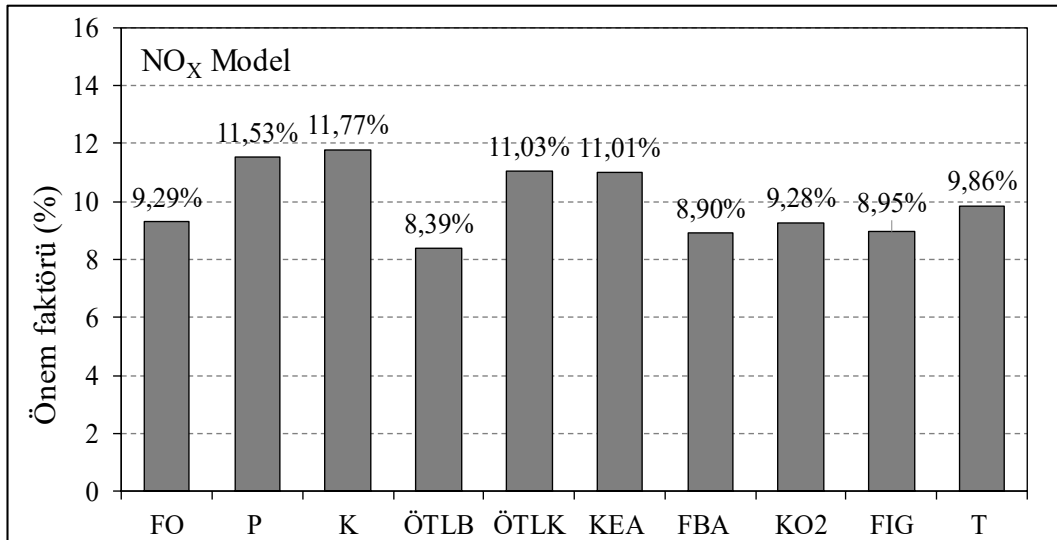
Girdilerin rölatif önem faktörü değeri; giriş, saklı ve çıkış katmanları arasındaki her bir nöron bağlantısının ağırlıkları kullanılarak hesaplanmıştır. NO_x modelinde her bir giriş değeri için hesaplanmış olan önem faktörleri Şekil 6.85’de verilmiştir.



Şekil 6.83 Deneyisel ve tahmin edilen NOX değerleri ilişkisi



Şekil 6.84. NO_x hata dağılımı grafiği

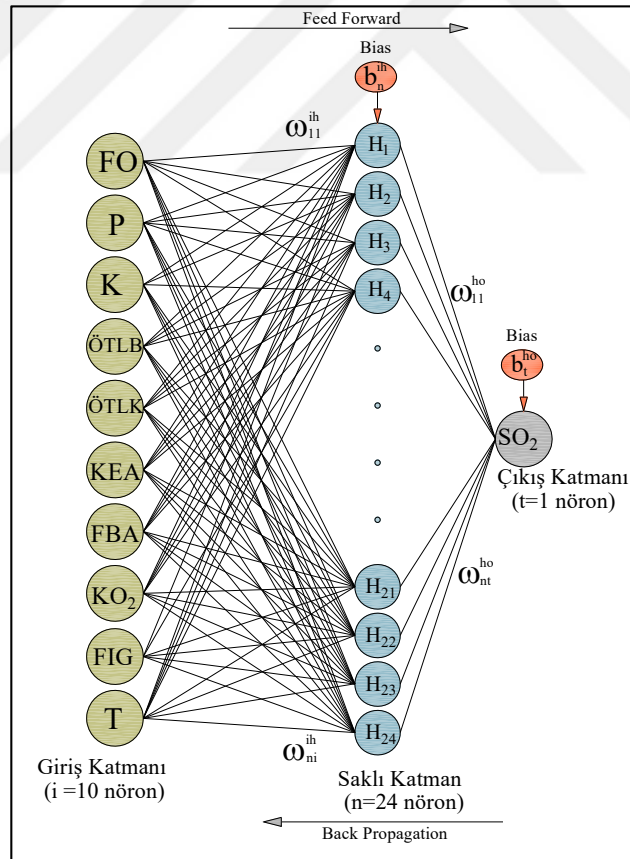


Şekil 6.85. NO_x modelinde girişlere ait önem faktörleri

Döner fırında NO_x emisyonlarının oluşumu alev borusu ile besleme noktasında termal NO_x oluşumu ile görülmektedir. Dolayısıyla yakıtların NO_x emisyonu üzerinde büyük önemleri vardır. Ağustos ayı verileri değerlendirildiğinde yüksek atık ısı yer değiştirme oranlarına ulaşıldığı noktalarda emisyonların düştüğü saptanmıştır. Ayrıca, NO_x oluşumunun kimyasal reaksiyon olarak oksijene ihtiyaç duyduğu da bir gerçektir. Tüm bu parametreler göz önüne alındığı Şekil 6.85 ile gösterilen önem faktörlerinden yakıtlar ile ÖTLK ve KEA diğer parametrelere göre bir miktar öne çıkmıştır denilebilmektedir.

6.7.3. SO_2 tahmin modeli

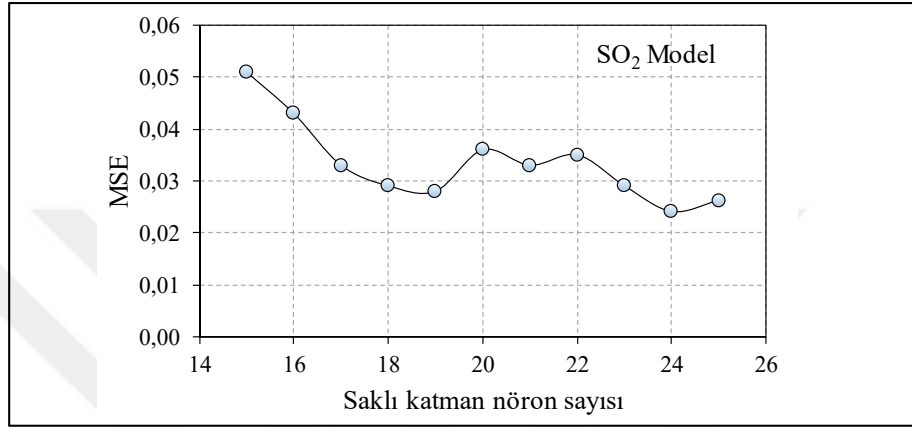
Bu çalışmada SO_2 değerlerinin tahmin edilmesi için kullanılan ağ yapısı Şekil 6.86'da gösterildiği gibidir. Ağda eğitim algoritması olarak Scaled Conjugate Gradient (SCG) algoritması kullanılmıştır.



Şekil 6.86. SO_2 ağ yapısı

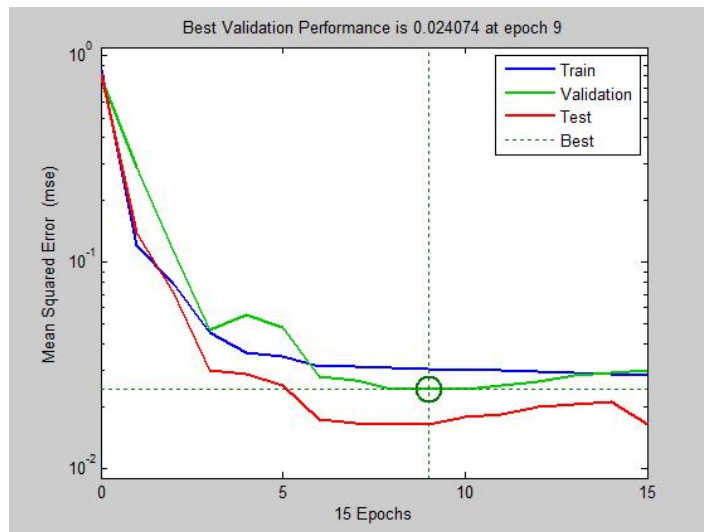
Ağ, 10 nöronlu giriş katmanı, 24 nöronlu saklı katman ve 1 nöronlu çıkış katmanı olarak tasarlanmıştır. Saklı katmanda kullanılan nöron

sayısı 15-25 arasında değişen farklı ağların analizi gerçekleştirilerek deneme yanılma yöntemi ile minimum hatayı veren değer belirlenmiştir. Her bir nöron değeri için 20 kez analiz gerçekleştirilmiş ve bu ağların MSE değerlerinin ortalaması alınarak minimum hata hesaplanmıştır. SO₂ modeline ait nöron sayısı MSE grafiği şekil 6.87’de verilmiştir. Minimum hata 24 nörondan oluşan saklı katman ağında bulunduğundan SO₂ modeli için saklı katman sayısı 24 olarak belirlenmiştir.



şekil 6.87. Farklı nöron sayıları için SO₂ saklı katman MSE değerleri

SO₂ modelinin analizi sonucu elde edilen performans değerleri şekil 6.88’de gösterilmiştir. Ağın eğitimi sonucunda MSE değerinin yüksekten düşük değerlere doğru azalması ağın öğrenmesinin başarılı olduğunun bir göstergesidir. şekilde eğitim, doğrulama ve test verilerinin performansını gösteren 3 çizgi görülmektedir. Ağın MSE değeri 0,024 değerine ulaştığında eğitim tamamlanmıştır.



şekil 6.88. SO₂ ağının öğrenme performansı

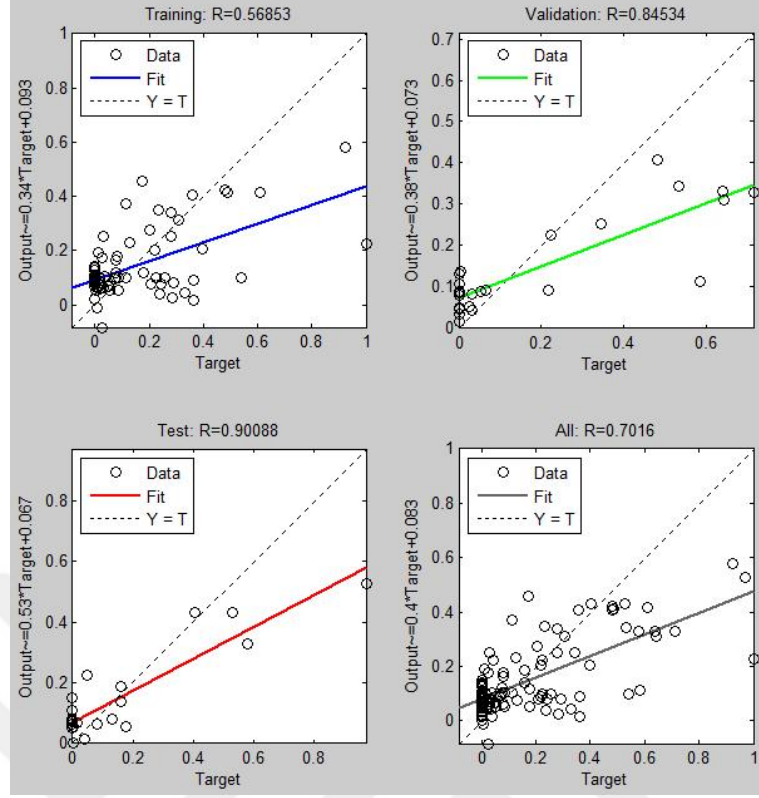
SO₂ ağının analizi sonucunda elde edilen ağa ait ağırlık ve bias değerleri Tablo 6.39’da verilmiştir. Saklı katman ile çıkış katmanları arasındaki bias değeri ise $b_t^{ho}=b_1^{ho} = -0,075$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 6.39. SO₂ ağı katmanlar arası bağlantı ağırlık ve bias değerleri

Saklı Katman	FO	P	K	ÖTLB	ÖTLK	KEA	FBA	KO ₂	FIG	T	ω_{nt}^{ho}	b_n^{ih}
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(MW)	(t/s)		
	ω_{ni}^{ih}											
1	-2,359	1,827	-0,340	0,845	-1,275	-0,092	0,442	-1,360	-0,332	1,155	0,604	3,833
2	-1,567	-0,046	-0,344	1,429	0,760	0,734	-1,267	-1,931	1,734	-0,149	-0,870	3,634
3	1,172	1,666	-1,877	-1,161	0,477	-0,633	-0,775	1,733	0,417	-1,154	0,153	-3,180
4	1,615	-1,600	-1,765	-1,660	-0,789	0,340	1,660	0,151	0,065	-0,499	-0,085	-2,843
5	-0,043	-1,554	0,095	0,422	-0,890	-1,718	-1,682	1,424	-0,963	1,639	-0,208	2,503
6	-1,292	1,533	-0,985	-2,006	1,503	-0,395	0,161	0,051	1,123	1,269	0,297	2,273
7	2,071	1,606	0,511	1,274	1,839	-0,958	-0,352	-0,539	-0,968	0,381	-0,124	-1,894
8	0,545	-1,801	-1,507	-1,299	-1,303	1,774	-0,812	-0,076	-0,284	-1,274	-0,234	-1,500
9	0,623	-1,044	1,328	-1,341	-0,836	1,525	0,309	-0,680	-1,746	-1,775	0,351	-1,161
10	-0,998	-0,974	1,265	0,337	1,578	1,034	1,335	-0,050	-1,512	1,808	-0,420	0,898
11	-1,825	-0,913	1,069	1,145	-1,502	-1,363	0,130	1,845	0,600	0,419	-0,110	0,652
12	-1,721	1,338	-0,655	0,717	-0,888	0,239	-2,142	1,885	-0,335	-0,220	-0,359	0,155
13	0,758	-1,664	1,096	1,819	1,332	-0,424	1,638	-0,868	-0,516	-1,407	1,264	0,213
14	-1,483	-1,184	-0,647	-0,037	0,042	-2,292	-1,594	-1,016	1,190	0,719	0,179	-0,509
15	-0,865	-1,305	-1,216	0,220	-0,239	-0,257	-2,026	1,279	0,741	-2,017	0,427	-0,877
16	-1,294	-0,080	1,026	-0,325	-0,295	-0,154	1,847	-1,114	-1,960	1,802	0,125	-1,224
17	-1,260	-1,413	0,270	1,894	1,244	0,533	-0,418	-0,270	-1,431	-1,746	-0,354	-1,476
18	-0,675	-1,083	1,417	-0,193	0,811	1,927	-1,560	2,011	0,004	-0,358	-0,503	-1,931
19	0,969	1,273	-1,080	0,794	-0,705	1,561	-1,398	-1,398	-1,202	-1,216	0,210	2,296
20	-0,942	-0,519	-0,628	-1,300	1,515	1,528	1,351	-1,635	-1,164	-1,032	-0,504	-2,486
21	-0,794	3,088	1,008	-1,223	-1,468	-0,275	0,084	0,394	0,417	-0,082	-0,379	-2,721
22	-0,584	-2,310	-1,346	-2,001	0,348	0,191	0,640	0,486	1,526	-0,026	-0,064	-3,213
23	1,202	2,245	-1,802	-0,284	-0,774	0,730	-1,069	-0,394	-1,314	-0,460	0,003	3,585
24	1,535	0,869	1,078	0,048	-0,407	-0,201	-0,845	1,770	0,534	-2,323	-0,632	3,919

Normalize edilmiş deneysel veriler ve ağın analizi sonrasında eğitim, doğrulama ve test verileri için elde edilen çıkış sonuçlarına ait grafikler Şekil 6.89’da verilmiştir. Eğitim, doğrulama ve test verilerinden elde edilen regresyon değerleri sırasıyla 0,57, 0,85 ve 0,90 olarak belirlenmiştir. Ağın toplam regresyon değerinin ise 0,70 olduğu görülmüştür.

SO₂ modeli kullanılarak ağdan elde edilen tahmin sonuçları ile deneysel verilerden elde edilen SO₂ gerçek değerleri (normalize edilmemiş) Tablo 6.40’da özetlenmiştir.

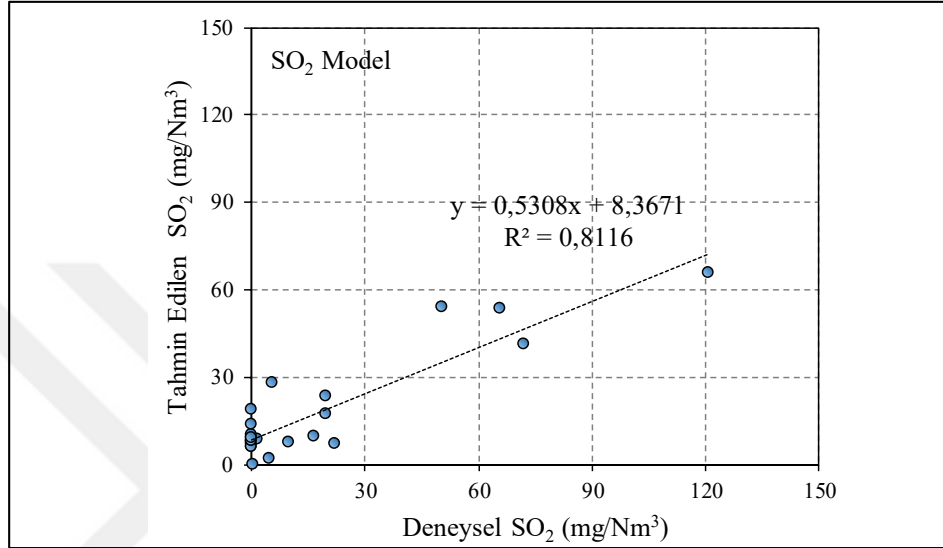


Şekil 6.89. SO₂ ağına ait regresyon değerleri

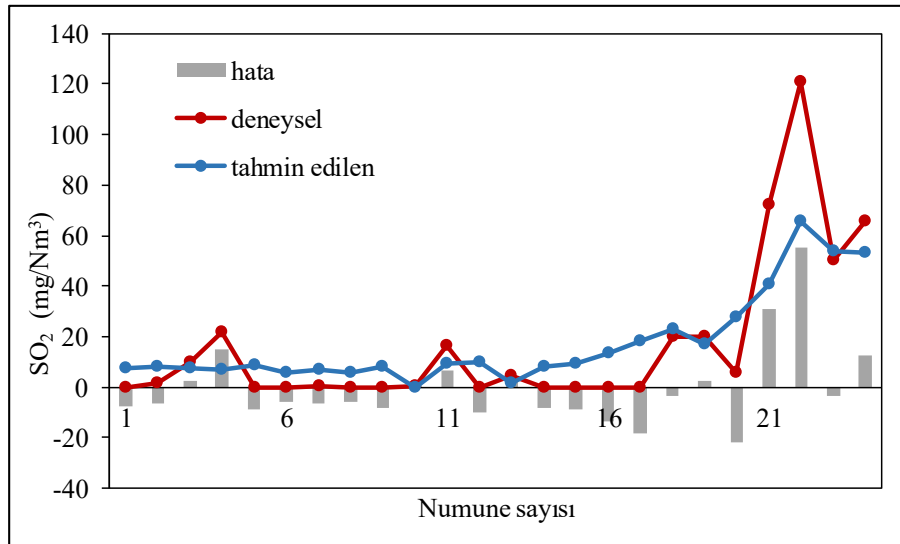
Tablo 6.40. SO₂ ağı deneysel ve tahmin edilen gerçek değerler

Numune No.	Deneysel SO ₂ (mg/Nm ³)	Tahmin edilen SO ₂ (mg/Nm ³)
1	0,00	7,64
2	1,60	8,24
3	9,80	7,63
4	22,00	6,85
5	0,00	8,79
6	0,00	6,02
7	0,20	6,73
8	0,00	5,96
9	0,00	7,96
10	0,40	0,06
11	16,40	9,57
12	0,00	9,81
13	4,80	1,72
14	0,00	7,94
15	0,00	9,06
16	0,00	13,62
17	0,00	18,48
18	19,70	23,10
19	19,70	17,25
20	5,70	27,82
21	71,90	40,94
22	120,60	65,53
23	50,20	53,73
24	65,80	53,38

Normalize edilmemiş 24 adet test verisi kullanılarak belirlenmiş olan deneysel SO₂ değerleri ile ağ tarafından tahmin edilen SO₂ değerlerine ait grafik Şekil 6.90'da verilmiştir. Test verilerinden elde edilen korelasyon katsayısı $R^2=0,81$ olarak bulunmuştur. Deneysel ve tahmin edilen değerler arasındaki farkların yani hataların belirlenmesi amacıyla Şekil 6.91'deki grafik hazırlanmıştır.



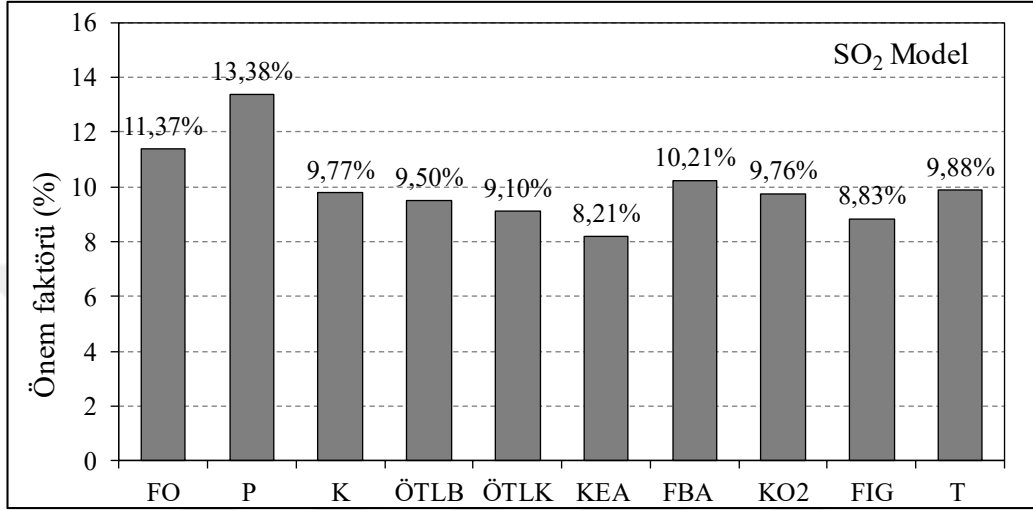
Şekil 6.90. Deneysel ve tahmin edilen SO₂ değerleri ilişkisi



Şekil 6.91. SO₂ hata dağılımı grafiği

Girdilerin rölatif önem faktörü değeri; giriş, saklı ve çıkış katmanları arasındaki her bir nöron bağlantısının ağırlıkları kullanılarak hesaplanmıştır. SO₂ modelinde her bir giriş değeri için hesaplanmış olan önem faktörleri Şekil 6.92'de verilmiştir. Yapılan çalışmada kükürtdioksit parametresinin atık yakmadan değil yakıt ve hammaddeden

kaynaklı değişimlerinin incelenmesi gerekliliği sonucuna varılmıştır. Şekil 6.92, SO₂ emisyonları için petrokok ve fuel oilin önem faktörünün diğerlerine oranla yüksek olduğunu göstermektedir. Petrokok ve fuel oilin kullanılan diğer yakıtlara oranla kükürt içeriklerinin yüksek olması önem faktörü grafiğini doğrulamaya elverişli olarak görünmektedir.



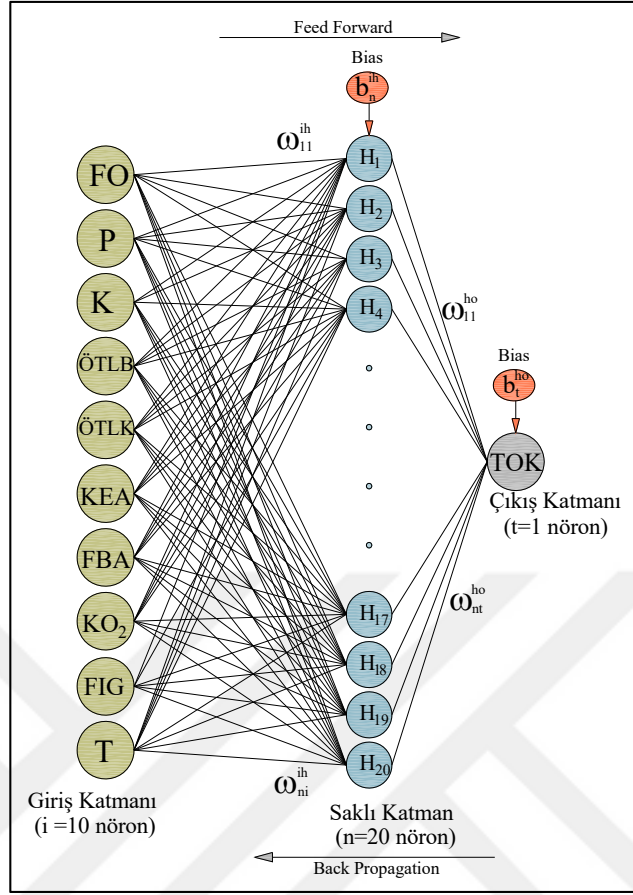
Şekil 6.92. SO₂ modelinde girişlere ait önem faktrleri

6.7.4. TOK tahmin modeli

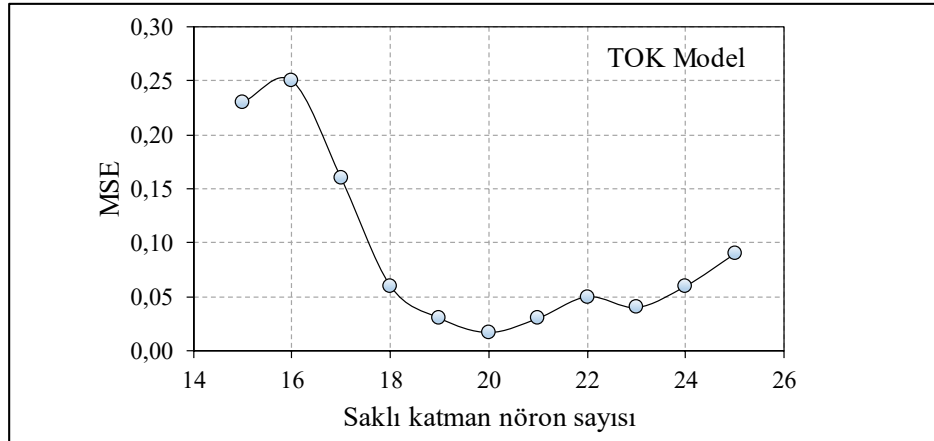
Bu alışmada TOK değerlerinin tahmin edilmesi için kullanılan ağ yapısı Şekil 6.93'te gösterildiği gibidir. Ağda eğitim algoritması olarak Scaled Conjugate Gradient (SCG) algoritması kullanılmıştır.

Ağ, 10 nörondan oluşan giriş katmanı, 20 nörondan oluşan saklı katman ve 1 nörondan oluşan çıkış katmanı olarak tasarlanmıştır. Saklı katmanda kullanılan nöron sayısı 15-25 arasında değişen farklı ağların analizi gerçekleştirilerek deneme yanılma yöntemi ile minimum hatayı veren değer belirlenmiştir. Her bir nöron değeri için 20 kez analiz gerçekleştirilmiş ve bu ağların MSE değerlerinin ortalaması alınarak minimum hata hesaplanmıştır.

TOK modeline ait nöron sayısı MSE grafiği Şekil 6.94'te verilmiştir. Minimum hata 20 nörondan oluşan saklı katman ağında bulunduğundan TOK modeli için saklı katman sayısı 20 olarak belirlenmiştir.

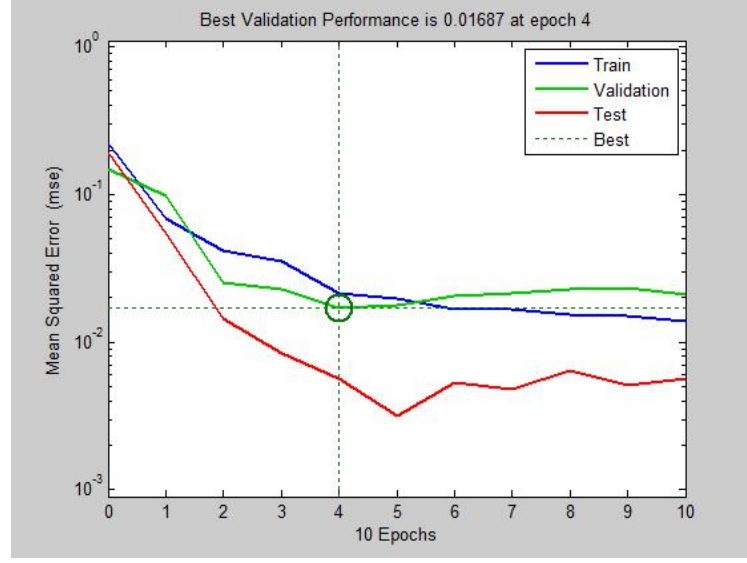


Şekil 6.93. TOK ağ yapısı



Şekil 6.94. Farklı nöron sayıları için TOK saklı katman MSE değerleri

TOK modelinin analizi sonucu elde edilen performans değerleri Şekil 6.95’de gösterilmiştir. Ağın eğitimi sonucunda MSE değerinin yüksekten düşük değerlere doğru azalması ağın öğrenmesinin başarılı olduğunun bir göstergesidir. Şekilde eğitim, doğrulama ve test verilerinin performansını gösteren 3 çizgi görülmektedir. Ağın MSE değeri 0,017 değerine ulaştığında eğitim tamamlanmıştır.



Şekil 6.95. TOK ağının öğrenme performansı

TOK ağının analizi sonucunda elde edilen ağa ait ağırlık ve bias değerleri Tablo 6.41’de verilmiştir. Saklı katman ile çıkış katmanı arasındaki bias değeri ise $b_t^{ho}=b_1^{ho} = 0,631$ olarak belirlenmiştir.

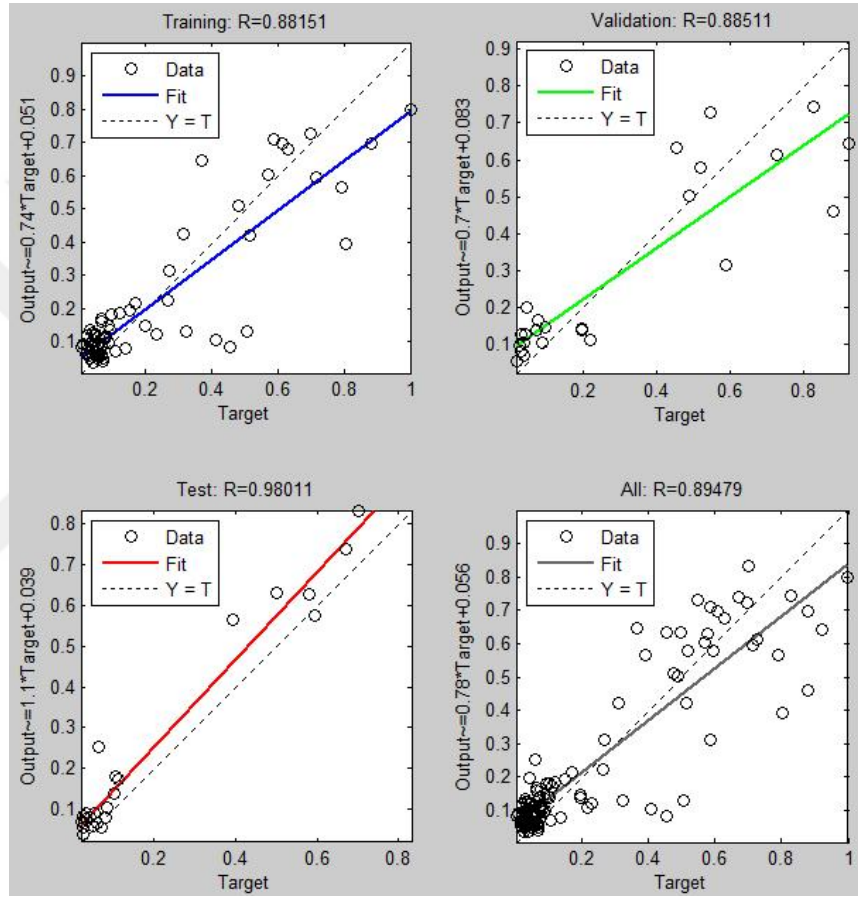
Tablo 6.41. TOK ağı katmanlar arası bağlantı ağırlık ve bias değerleri

Saklı Katman	FO (%)	P (%)	K (%)	ÖTLB (%)	ÖTLK (%)	KEA (%)	FBA (%)	KO ₂ (%)	FIG (MW)	T (t/s)	ω_{nt}^{ho}	b_n^{ih}
	ω_{ni}^{ih}											
1	-1,125	-1,275	1,150	1,403	-1,179	-1,370	-1,619	1,283	-0,311	0,680	-0,251	3,781
2	2,208	0,509	0,710	0,313	0,186	0,100	-0,034	-1,896	1,266	1,817	0,171	-3,377
3	1,461	1,884	1,141	-0,727	-1,156	1,470	1,546	-0,860	0,103	0,352	0,595	-2,990
4	-0,925	-0,820	1,542	-0,516	-0,898	-1,547	-1,080	1,121	1,609	1,212	-0,696	2,712
5	1,732	-1,367	-0,787	1,569	-1,652	1,290	0,714	0,243	-1,037	-0,050	0,798	-2,296
6	-1,485	1,172	-1,608	0,608	0,882	-0,567	-1,126	1,765	0,616	1,372	-0,092	1,790
7	-0,474	0,482	1,392	0,349	-1,758	0,993	0,834	-0,315	-1,846	1,835	-0,569	1,418
8	2,160	0,702	-1,128	-1,905	1,085	-0,461	1,030	-0,903	-0,026	-0,903	0,368	-1,082
9	-0,543	1,646	0,381	-1,501	1,809	-1,297	-1,218	0,763	-1,277	0,493	0,186	0,591
10	-0,020	-1,767	2,106	1,274	1,100	-1,682	0,440	0,488	-0,462	-0,739	0,740	0,159
11	0,970	-0,655	-1,095	1,375	1,625	-1,069	1,790	-0,329	-0,015	1,595	-0,227	0,201
12	-0,463	-1,681	-0,896	0,081	-1,282	1,073	1,464	0,937	-1,686	1,305	0,101	-0,616
13	1,757	-0,612	-0,791	0,762	1,757	-1,568	-1,032	-1,176	1,237	0,259	0,151	0,998
14	1,995	-0,254	1,188	-1,523	-1,749	0,270	-0,564	-0,093	0,616	-1,627	-0,488	1,382
15	-0,854	-1,689	1,542	0,310	-0,358	1,092	-0,403	0,429	-1,906	-1,811	0,940	-1,759
16	1,637	-1,715	0,907	-1,694	0,884	-0,456	0,235	-0,831	-1,480	1,166	0,610	2,086
17	-0,426	-1,445	1,662	0,952	-1,607	1,336	1,792	-0,176	0,752	0,026	-0,788	-2,646
18	-0,348	1,069	0,251	-1,250	1,784	0,689	-1,014	-1,864	1,732	-0,464	0,368	-2,979
19	-2,047	-0,248	0,653	0,563	0,933	1,854	-0,126	-0,742	0,831	1,764	-0,405	-3,473
20	0,851	1,197	-0,014	0,224	1,600	-1,334	0,286	1,579	-1,528	1,615	-0,316	3,797

Normalize edilmiş deneysel veriler ve ağın analizi sonrasında eğitim, doğrulama ve test verileri için elde edilen çıkış sonuçlarına ait grafikler Şekil 6.96’da verilmiştir.

Eğitim, doğrulama ve test verilerinden elde edilen regresyon değerleri sırasıyla 0,88, 0,89 ve 0,98 olarak belirlenmiştir. Ağın toplam regresyon değerinin ise 0,90 olduğu gorulmuştur.

TOK modeli kullanılarak ağdan elde edilen tahmin sonuçları ile deneysel verilerden elde edilen TOK gerçek değerleri (normalize edilmemiş) Tablo 6.42’de özetlenmiştir.



şekil 6.96. TOK ağına ait regresyon değerleri

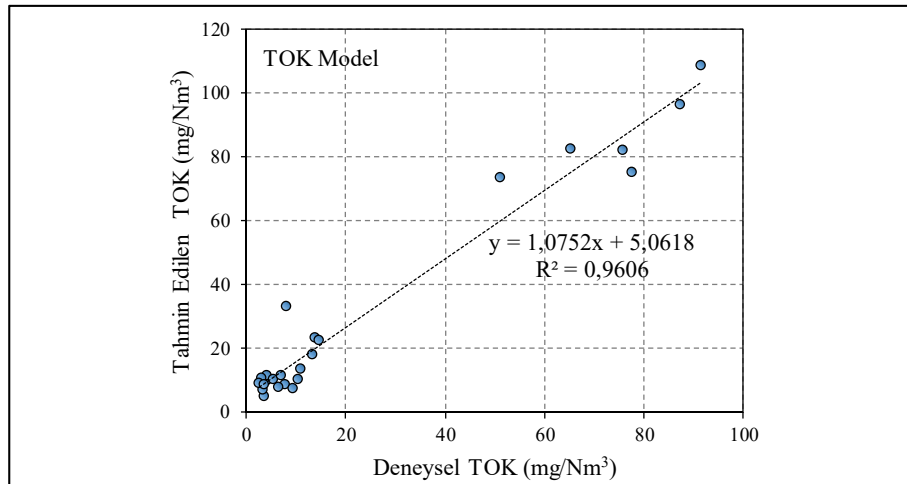
Tablo 6.42. TOK ağı deneysel ve tahmin edilen gerçek değerler

Numune No.	Deneysel TOK (mg/Nm ³)	Tahmin edilen TOK (mg/Nm ³)
1	3,60	4,82
2	4,20	9,88
3	4,20	11,55
4	7,90	8,65
5	9,40	7,30

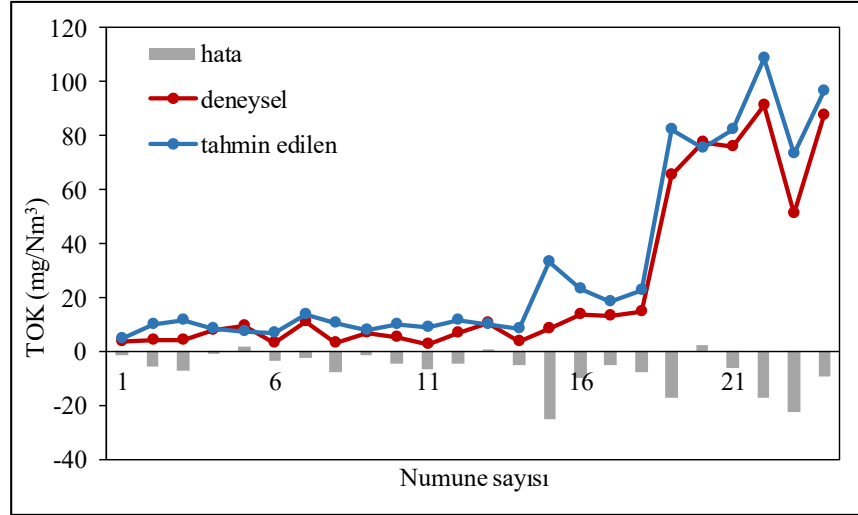
Tablo 6.42. (Devam) TOK ağı deneysel ve tahmin edilen gerçek değerler

Numune No.	Deneysel TOK (mg/Nm ³)	Tahmin edilen TOK (mg/Nm ³)
6	3,40	7,09
7	10,90	13,48
8	3,20	10,73
9	6,60	7,79
10	5,50	10,19
11	2,70	9,20
12	7,10	11,58
13	10,40	10,18
14	3,70	8,66
15	8,20	33,10
16	13,80	23,39
17	13,40	18,23
18	14,70	22,61
19	65,20	82,36
20	77,50	75,18
21	75,70	82,02
22	91,50	108,49
23	51,10	73,55
24	87,40	96,49

Normalize edilmemiş 24 adet test verisi kullanılarak belirlenmiş olan deneysel TOK değerleri ile ağı tarafından tahmin edilen TOK değerlerine ait grafik Şekil 6.97’de verilmiştir. Test verilerinden elde edilen korelasyon katsayısı $R^2=0,96$ olarak bulunmuştur. Deneysel ve tahmin edilen değerler arasındaki farkların yani hataların belirlenmesi amacıyla Şekil 6.98’deki grafik hazırlanmıştır.

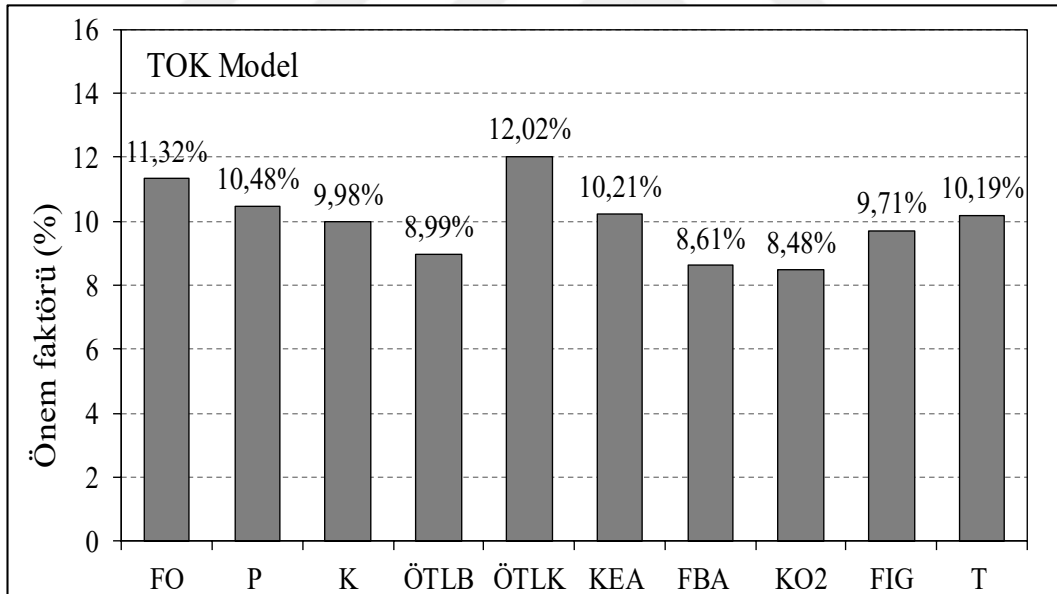


Şekil 6.97. Deneysel ve tahmin edilen TOK değerleri ilişkisi



Şekil 6.98. TOK hata dağılımı grafiği

Girdilerin rölatif önem faktörü değeri; giriş, saklı ve çıkış katmanları arasındaki her bir nöron bağlantısının ağırlıkları kullanılarak hesaplanmıştır. TOK modelinde her bir giriş değeri için hesaplanmış olan önem faktörleri Şekil 6.99'da verilmiştir.



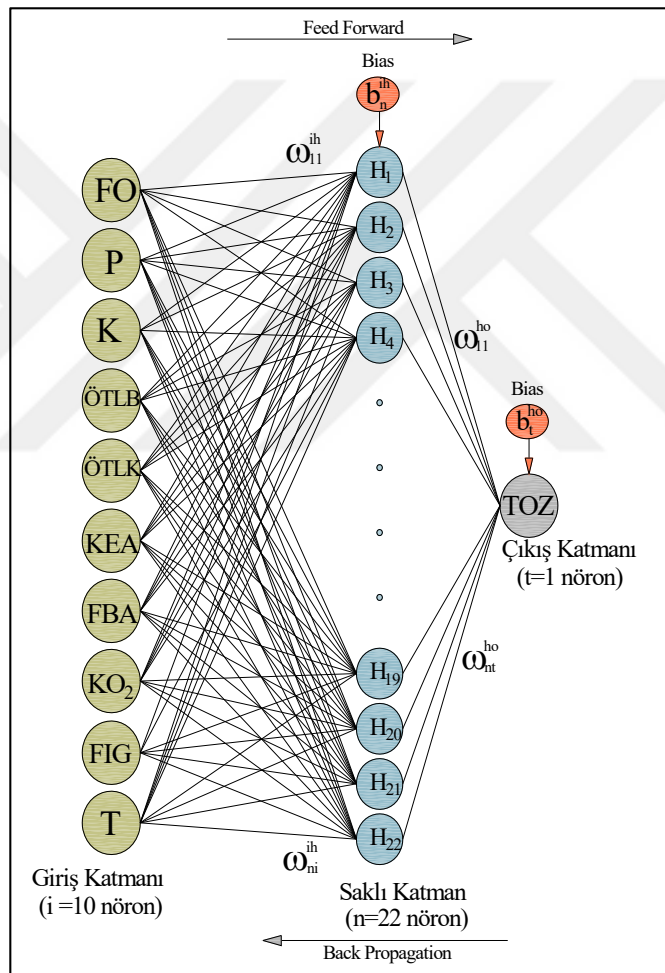
Şekil 6.99. TOK modelinde girişlere ait önem faktörleri

Çalışmanın TOK emisyonlarını incelediği Bölüm 6.1.4'te belirtildiği gibi atık kullanımının doğrudan TOK üzerinde bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılmıştır. Bölüm 6.4.2 yalnızca ÖTL kullanımının TOK emisyonları üzerinde düşük de olsa bir etkisi olduğu yönünde sonuçlar içermekteydi. Şekil 6.99 bu sonuca paralel olarak TOK üzerinde ÖTL'nin önem faktörünün diğer faktörlerden çok farklı olmamakla birlikte öne çıktığını göstermektedir. CO emisyonu sırasında TOK emisyonunun da

az miktarda oluşumunun söz konusu olduğu düşünüldüğünde CO emisyonu üzerindeki önem faktörlerinden olan ÖTLK'ın TOK emisyonunda da önem faktörü olarak öne çıktığı söylenebilir.

6.7.5. Toz tahmin modeli

Bu çalışmada toz değerlerinin tahmin edilmesi için kullanılan ağ yapısı Şekil 6.100'de gösterildiği gibidir. Ağda eğitim algoritması olarak Scaled Conjugate Gradient (SCG) algoritması kullanılmıştır.

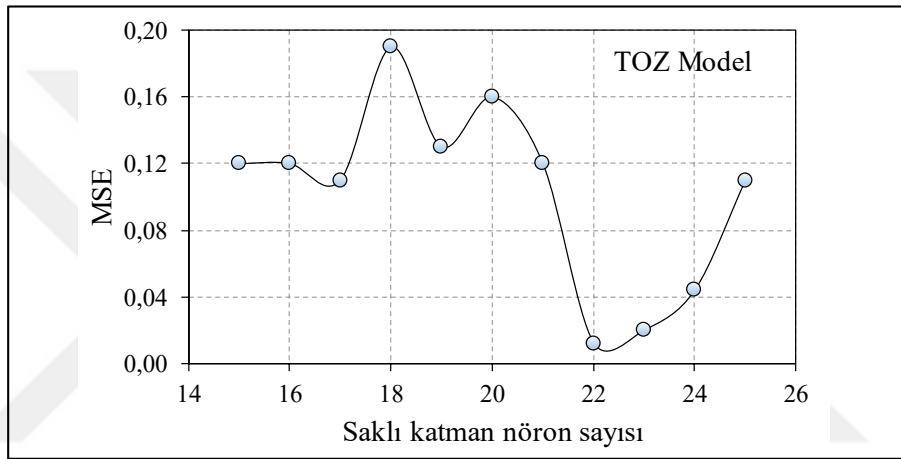


Şekil 6.100. Toz ağ yapısı

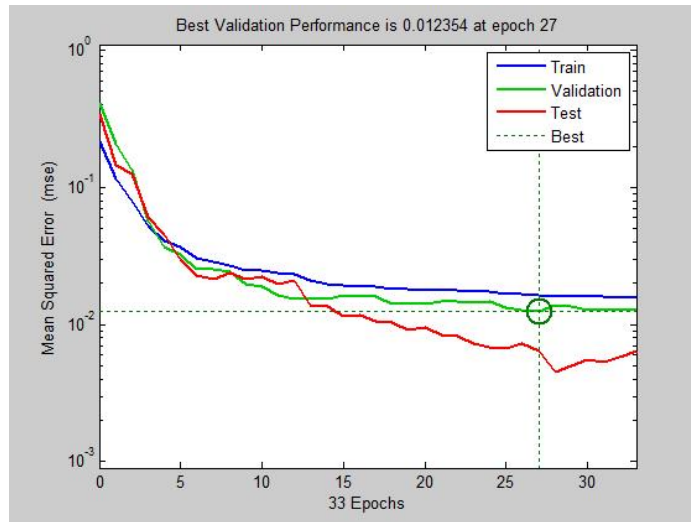
Ağ, 10 nöron dan oluşan giriş katmanı, 22 nöron dan oluşan saklı katman ve 1 nöron dan oluşan çıkış katmanı olarak tasarlanmıştır. Saklı katmanda kullanılan nöron sayısı 15-25 arasında değişen farklı ağların analizi gerçekleştirilerek deneme yanılma yöntemi ile minimum hatayı veren değer belirlenmiştir. Her bir nöron değeri için 20 kez analiz gerçekleştirilmiş ve bu ağların MSE değerlerinin ortalaması alınarak

minimum hata hesaplanmıştır. Toz modeline ait nöron sayısı MSE grafiği Şekil 6.101’de verilmiştir. Minimum hata 22 nörondan oluşan saklı katman ağında bulunduğundan toz modeli için saklı katman sayısı 22 olarak belirlenmiştir.

Toz modelinin analizi sonucu elde edilen performans değerleri Şekil 6.102’de gösterilmiştir. Ağın eğitimi sonucunda MSE değerinin yüksekten düşük değerlere doğru azalması ağın öğrenmesinin başarılı olduğunun bir göstergesidir. Şekilde eğitim, doğrulama ve test verilerinin performansını gösteren 3 çizgi görülmektedir. Ağın MSE değeri 0,012 değerine ulaştığında eğitim tamamlanmıştır.



Şekil 6.101. Farklı nöron sayıları için toz saklı katman MSE değerleri



Şekil 6.102. Toz ağının öğrenme performansı

Toz ağının analizi sonucunda elde edilen ağa ait ağırlık ve bias değerleri Tablo 6.43’te verilmiştir. Saklı katman ile çıkış katmanı arasındaki bias değeri ise $b_t^{ho}=b_1^{ho} =$

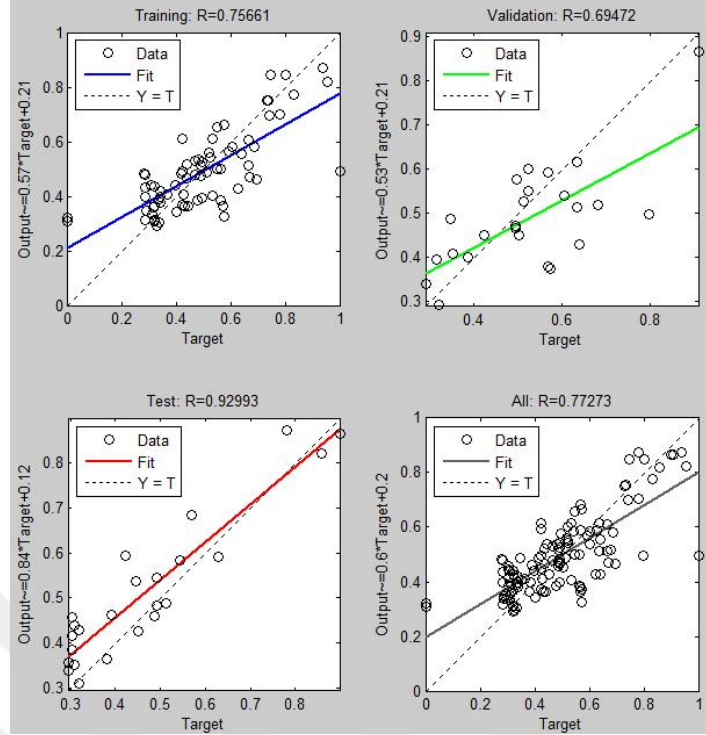
-0,374 olarak belirlenmiştir. Normalize edilmiş deneysel veriler ve ağıın analizi sonrasında eğitim, doğrulama ve test verileri için elde edilen çıkış sonuçlarına ait grafikler Şekil 6.103'te verilmiştir.

Tablo 6.43. Toz ağı katmanlar arası bağlantı ağırlık ve bias değerleri

Saklı Katman	FO	P	K	ÖTLB	ÖTLK	KEA	FBA	KO ₂	FIG	T	ω_{nt}^{ho}	b_n^{ih}
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(MW)	(t/s)		
ω_{ni}^{ih}												
1	0,863	1,439	-1,007	0,783	-0,321	-0,417	-0,888	1,767	-1,358	1,793	-0,101	-3,879
2	1,392	-0,577	-0,504	-0,333	1,424	1,761	1,039	-1,454	1,688	0,874	-0,661	-3,426
3	-0,410	-1,650	-1,814	-0,998	-1,352	0,534	-0,853	-0,376	1,896	0,941	0,823	3,037
4	0,454	1,849	0,605	-0,237	-1,374	0,508	-1,077	-0,385	-1,298	2,398	-0,173	-2,582
5	1,058	0,515	-0,927	-1,895	0,874	-0,623	0,429	1,616	-1,741	-1,047	-0,605	-2,530
6	0,827	-1,317	-1,161	-0,244	0,635	-0,829	-0,802	2,134	1,976	0,366	-0,468	-2,175
7	0,354	-1,844	1,006	0,392	1,259	1,458	-0,935	-1,160	1,987	0,757	-0,777	-1,595
8	0,173	-0,942	0,691	0,351	0,698	1,203	-1,628	2,094	0,264	-2,014	-0,010	-1,351
9	2,213	1,170	-0,063	1,119	1,631	1,108	-1,515	-0,398	-0,100	0,506	0,654	-1,073
10	1,319	-1,285	0,853	1,378	-1,470	0,292	0,919	-0,478	-1,108	-2,001	0,155	-0,767
11	1,673	0,306	-1,690	-1,846	0,029	-0,899	0,900	-1,490	0,449	-1,027	-0,361	-0,264
12	1,047	0,942	0,569	0,052	0,349	-1,484	1,399	1,834	1,989	0,279	-0,138	0,198
13	-0,938	0,705	-1,604	0,690	1,024	1,376	1,391	1,797	1,223	0,727	0,265	-0,555
14	1,559	-1,372	-2,133	0,952	-0,525	0,565	0,098	-1,676	-0,815	-0,121	0,079	1,007
15	1,344	-1,734	0,040	1,223	-0,716	0,449	-2,270	-0,214	1,013	1,243	-0,263	1,232
16	1,569	0,612	-0,916	-1,324	-1,255	-1,450	0,923	-0,462	1,046	-1,525	-0,410	1,639
17	-1,296	1,494	-0,045	0,387	-1,898	0,716	-1,106	1,459	1,396	0,437	-0,296	-2,266
18	-1,676	-1,209	1,813	-0,756	-1,099	-0,288	-0,089	-0,007	-1,502	1,661	-0,092	-2,332
19	-1,715	1,909	-0,134	0,837	1,200	-0,397	-0,885	0,276	1,308	1,803	-0,035	-2,630
20	1,761	0,678	-0,315	-1,173	-0,584	0,369	-1,705	-1,525	2,068	0,215	0,759	3,057
21	-1,276	1,692	1,038	-0,426	1,009	-1,558	-0,762	0,520	-1,421	1,424	0,159	-3,492
22	-2,049	0,474	0,850	1,243	0,314	-1,077	0,324	-1,531	1,530	1,149	-0,356	-3,862

Eğitim, doğrulama ve test verilerinden elde edilen regresyon değerleri sırasıyla 0,76, 0,70 ve 0,93 olarak belirlenmiştir. Ağıın toplam regresyon değerinin ise 0,77 olduğu görülmüştür.

Toz modeli kullanılarak ağıdan elde edilen tahmin sonuçları ile deneysel verilerden elde edilen toz gerçek değerleri (normalize edilmemiş) Tablo 6.45'te özetlenmiştir.

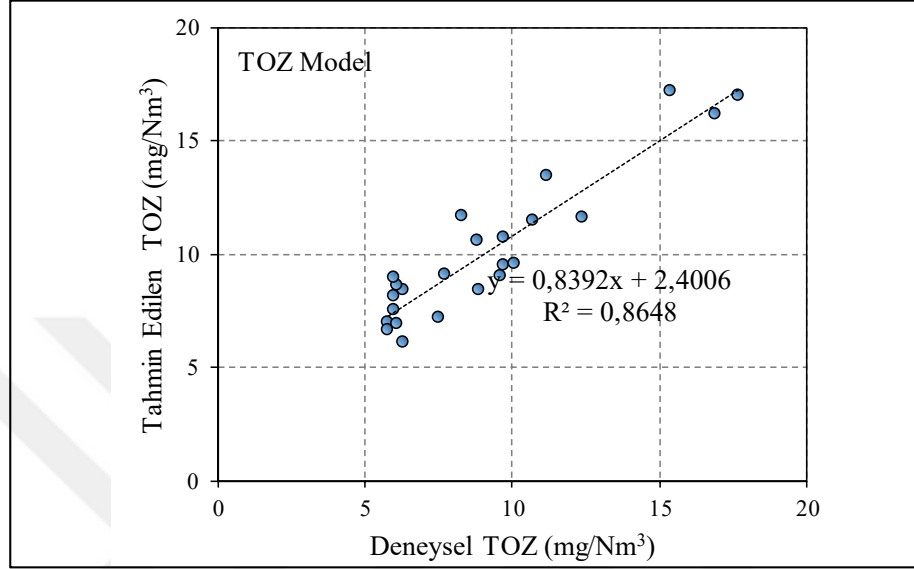


Şekil 6.103. Toz ağına ait regresyon değerleri

Tablo 6.44. Toz ağı deneysel ve tahmin edilen gerçek değerler

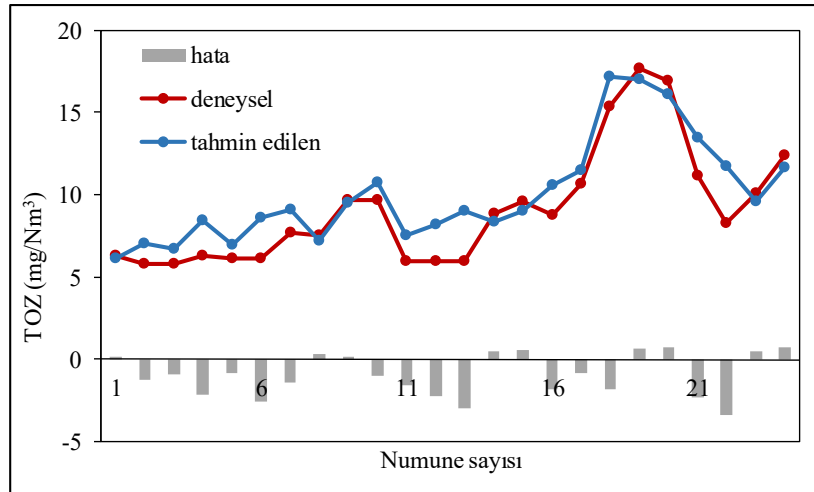
Numune No.	Deneysel Toz (mg/Nm ³)	Tahmin edilen Toz(mg/Nm ³)
1	6,30	6,12
2	5,80	7,01
3	5,80	6,68
4	6,30	8,42
5	6,10	6,93
6	6,10	8,65
7	7,70	9,12
8	7,50	7,18
9	9,70	9,52
10	9,70	10,72
11	6,00	7,57
12	6,00	8,19
13	6,00	8,99
14	8,90	8,40
15	9,60	9,04
16	8,80	10,58
17	10,70	11,51
18	15,40	17,20
19	17,70	17,02
20	16,90	16,15
21	11,20	13,47
22	8,30	11,71
23	10,10	9,61

Normalize edilmemiş 24 adet test verisi kullanılarak belirlenmiş olan deneysel TOZ değerleri ile ağ tarafından tahmin edilen TOZ değerlerine ait grafik Şekil 6.104'te verilmiştir. Test verilerinden elde edilen korelasyon katsayısı $R^2=0,87$ olarak bulunmuştur.



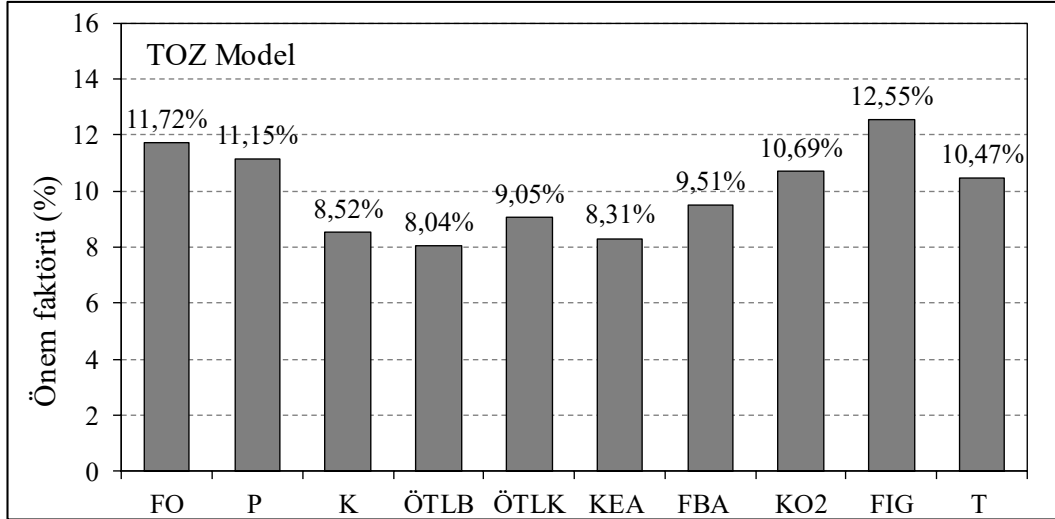
Şekil 6.104. Deneysel ve tahmin edilen toz değerleri ilişkisi

Deneysel ve tahmin edilen değerler arasındaki farkların yani hataların belirlenmesi amacıyla Şekil 6.105'deki grafik hazırlanmıştır.



Şekil 6.105. Toz hata dağılımı grafiği

Girdilerin rölatif önem faktörü değeri; giriş, saklı ve çıkış katmanları arasındaki her bir nöron bağlantısının ağırlıkları kullanılarak hesaplanmıştır. TOZ modelinde her bir giriş değeri için hesaplanmış olan önem faktörleri Şekil 6.106'da verilmiştir.



Şekil 6.106. Toz modelinde girişlere ait önem faktörleri

Döner fırında toz oluşumu genel olarak devreye ilk giriş dönemlerinde görülmektedir. Atık yakmadan bağımsız bir parametre olabileceği, fırın baca gazı fan gücünün ve kullanılan toz tutma sisteminin atıklardan ya da yakıtlardan daha etkin parametreler olabileceği çalışmada belirtilmiştir. Şekil 6.106, toz için önem faktörlerini fırın ısı gücü ve fuel oil olarak öne çıkarmıştır. Fırın ısı gücünün düşük oluşu fırının devreye girme aşamasında olduğunu göstermekle birlikte fuel oil'de fırın tavlama döneminde ya da fırının duruş sonrasında kalkışlarında fırın soğuk iken kullanılmaktadır. Toz oluşumu bu dönemlerde fırının stabil olduğu dönemlere göre yüksek olabilmektedir. Bu nedenle bu fırın sistemi için önem faktörlerinin doğru belirlenmiş olduğu söylenebilir.

6.7.6. YSA modellerinin değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde CO, NO_x, SO₂, TOK ve toz YSA modellerinin tahmin etmiş olduğu sonuçların deneysel veriler ile yakınlığının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle tüm ağlarda korelasyon katsayısı (R²), kök ortalama kare hatası (RMSE) ve etkinlik katsayısı (E_f) hesaplanmıştır. R², RMSE ve E_f değerleri Denklem (6.5), (6.6) ve (6.7) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R^2 = \left[\frac{[N(\sum_{m=1}^N P_m E_m)] - [(\sum_{m=1}^N P_m)(\sum_{m=1}^N E_m)]}{\sqrt{[N(\sum_{m=1}^N P_m^2) - (\sum_{m=1}^N P_m)^2][N(\sum_{m=1}^N E_m^2) - (\sum_{m=1}^N E_m)^2]}} \right]^2 \quad (6.5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N |P_m - E_m|^2} \quad (6.6)$$

$$E_f = \frac{[\sum_{m=1}^N (E_m - \bar{E})^2 - \sum_{m=1}^N (P_m - E_m)^2]}{[\sum_{m=1}^N (E_m - \bar{E})^2]} \quad (6.7)$$

Burada, N veri sayısını, P tahmin edilen veri değerini, E deneysel veri değerini, \bar{E} deneysel verilerin ortalamasını temsil etmektedir. Modellerden elde edilen istatistiki veriler Tablo 6.46'da verilmiştir.

Tablo 6.45. YSA modellerine ait istatistiki parametreler

YSA Model	R ² (%)	RMSE (mg/Nm ³)	E _f (%)
CO	80,1	1.187,82	67,6
NO _x	82,8	63,56	75,4
SO ₂	81,2	15,92	71,4
TOK	96,1	9,77	89,5
Toz	86,5	1,57	79,0

YSA modellere ait istatistiki verilerin incelendiğinde deneysel verilere en yakın ve yüksek doğrulukla tahmin edilen parametrelerin TOK ve Toz modellerinden elde edildiği görülmektedir. Hata payı en yüksek olan ve tahmin yeterliliği en düşük olan modelin ise CO olduğu belirlenmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak atıkların beraber yakmaya tabi tutulmasının çimento fabrikalarının sürekli emisyon ölçüm cihazı ile ölçülebilen toz ve gaz emisyonları ile hesaplama yöntemi ile elde edilen CO₂ emisyonları üzerine etkilerinin incelenmesi, ayrıca emisyonlar üzerine etkisi olabilecek parametreler ile bir model kurularak emisyonların tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlendiği gibidir.

Çalışmada atık kullanılmayan dönem ile atık kullanılan dönemler atık tipi ve emisyon parametresi kapsamında kendi içlerinde karşılaştırmıştır. Farklı atık tiplerinin karışım olarak kullanıldığı dönemler ile atıkların tekil kullanıldığı dönemler de emisyon üzerindeki etkilerinin görülebilmesi amacıyla irdelenmiştir. Yapılan çalışma ile alternatif yakıt kullanımının çimento fabrikaları toz ve gaz emisyonlarını etkilediği görülmüştür.

120 adet veri setinin toz emisyonları açısından incelenmesi sonucunda ÖTL, KEA ve FBA kullanımının toz emisyonlarında %58, %24 ve %21 oranında artışa neden olduğu saptanmıştır. Her üç atık tipinin beraber beslenmesi ile elde edilen toz emisyonlarının atıksız toz emisyonlarına oranla %70,59 oranında arttığı belirlenmiştir. Ayrıca ÖTL ve KEA birlikte kullanımı ile %64, ÖTL+FBA kullanımı ile %36 ve FBA+KEA kullanımı ile %5,15 oranında artış olduğu görülmüştür. Toz emisyonları açısından FBA ve KEA'nın %3 oranında kullanılması en uygun karışım olarak görülmüştür. Toz emisyonları atıklardan elde edilen ısı gücünün artması ile artış göstermemiştir. ÖTL'nin tek başına kullanıldığı dönemde toz miktarında artış saptanmakla birlikte 160,9 ton fırın besleme tonajında, %10,6 baca çıkış O₂ değerinde, %6,63 oranında bütün ÖTL'nin intikalden beslenmesi ile %16 oranında toz emisyonlarında düşüş olduğu belirlenmiştir. Tüm verilere bakıldığında atık yakılmasının oksijen seviyesini düşürdüğü ve baca gazı çıkış sıcaklığını arttırdığını ve bu nedenle de toz emisyonlarında artış meydana geldiği sonucuna varılabilir. Toz emisyonlarında artış yaşanmaması için yüksek ısı yer değiştirme oranı gerçekleştirirken oksijen seviyesini

%10,2 oranında tutarak yanma şartlarını iyileştirmek ve baca gazı sıcaklığını düşük tutmak gerektiği belirlenmiştir. Baca gazı sıcaklığı artışı torbalı filtre performansında etkili olduğundan toz emisyonu kontrolünde baca gazı sıcaklığını ayarlamamanın önemi ortaya çıkmıştır.

Çalışmada incelenen bir diğer emisyon parametresi NO_x emisyonları olmuştur. Isıl yer değiştirme oranından bağımsız olarak atık kullanımı ile her koşulda NO_x emisyonlarının azaldığı belirlenmiştir. Yalnızca ÖTL kullanımı ile Ocak ayında %26, Nisan ayında %40 ve Ağustos ayında %17 oranında azaltım sağlandığı görülmüştür.

ÖTL'nin alternatif yakıt olarak intikalden %12-%14 oranında ÖTLB halinde kullanılması ile en düşük NO_x emisyonları görülmüştür. En uygun besleme koşulu ise %38,7 NO_x azaltımı sağlanan %28,86 ÖTLB ve %9,62 ÖTLK olmak üzere toplam %38,4 oranında ÖTL'nin intikalden beslenmesi olarak tespit edilmiştir. Bu şartlarda NO_x indirgenmesi sağlanmıştır. Ayrıca, intikalden ÖTL ile alev borusundan FBA beslenmesinin tek başına intikalden ÖTL beslenmesine göre NO_x azaltımında daha etkin olduğu belirlenmiştir. NO_x emisyonları çerçevesinde KEA ve FBA'nın da tek başına kullanımları incelenmiş ve sırasıyla %23 ve %16 oranında azaltım sağladıkları tespit edilmiştir. Bu üç atık içerisinde tek başına kullanımda en fazla azaltımı ÖTL'nin intikalden beslenmesinin sağladığı söylenebilir. Atıkların karışım halinde beslenmesi incelendiğinde ise ÖTL+FBA+KEA karışımı ile %30, ÖTL+KEA karışımı ile %50, ÖTL+FBA karışımı ile %30 ve FBA+KEA karışımı ile %10 oranında NO_x azaltımı sağlamanın mümkün olduğu görülmüştür. Konvansiyonel sistem bir fırında intikalden atık beslenmesi noktasında ÖTL ve KEA'nın karışık beslenmesinin NO_x emisyonlarını azaltıma en yüksek oranda fayda sağlayacağı belirlenmiştir.

SO₂ emisyonları incelendiğinde atık kullanılmadığı dönemlerde de SO₂ yükseldiği tespit edilmiştir. Yalnızca ÖTL kullanımı ile Ocak ayında SO₂ emisyonları 3,2 kat, Nisan ayında 2,5 kat ve Ağustos ayında 6 kat artış göstermiştir. En yüksek SO₂ emisyonları intikalden ÖTLB ve ÖTLK'nın beraber beslendikleri zaman diliminde görülmüştür. Konvansiyonel sistem bir fırında intikalden %35 oranında ÖTL kullanılırken, %24 oranında ÖTLB ve %11 oranında ÖTLK dağılımı ile beslenmesiyle SO₂ emisyonlarının atıksız ortalama ile aynı seviyede tutulabileceği ya da %34 oranında azaltım sağlanabileceği sonucuna varılmıştır. SO₂ emisyonları ile ilgili olarak

KEA ve FBA'nın tek başına kullanımları da incelenmiş ve KEA kullanımında SO₂ emisyonuna rastlanmamış, FBA kullanımı ile de SO₂ emisyonları %58 oranında azalmıştır. Atıkların karışık kullanılması durumunda SO₂ emisyonları atıksız ortalamaya göre %6 oranında artmış, ÖTL ve FBA ve ÖTL ve KEA kullanılması ile birlikte ise 5,4 kat artmıştır. Atık kullanımı ile SO₂ emisyonları artış göstermiş olsa da atık yakılmasının yanı sıra hammadde kaynaklı SO₂ emisyonları da daha sonraki çalışmalarda incelenmelidir. KEA'nın %1,6 kullanımı SO₂ emisyonunu 0 mg/Nm³ yaptığı için kullanılabilir atık tipi ve ısıl yer değiştirme oranı olarak görülebilir. Bunun yanında ÖTL ve FBA birlikte %10 ÖTL ve %5 FBA dağılımı ile toplamda %15 oranında ısıl yer değiştirme oranı ile 0 mg/Nm³ SO₂ emisyonuna ulaşmanın mümkün olduğu yapılan çalışma sonucunda görülmüştür.

Organik bileşikler döner fırında tamamen yok olma potansiyeline sahip olmasına rağmen atık kullanımı ile TOK emisyonları da incelenmiştir. Konvansiyonel sistem bir fırında intikalden ÖTL beslenmesi ile TOK emisyonları Ocak ayında %7,2, Nisan ayında %36,6 ve Ağustos ayında 11,9 kat artmıştır. ÖTL kullanımı ile en yüksek TOK emisyonları ÖTLK'nın intikalden beslendiği periyotta meydana gelmiştir. TOK olarak ölçümü yapılan baca gazı içerisindeki uçucu organik bileşik emisyonları 400 ila 600°C arasında salınırlar. Yüksek sıcaklıklar ve uzun bekleme süreleri organik maddenin tam olarak parçalanmasını sağlar. Bu durumda kırılmış lastik kullanımının sıcaklıkları düşürdüğü ve TOK emisyonlarını arttırdığı sonucuna varılabilir. İntikalden %15 oranında ÖTLB beslenmesi ile konvansiyonel sistem bir fırında TOK emisyonlarının atıksız TOK emisyonları seviyelerinde tutulmasının mümkün olduğu görülmüştür. KEA kullanımı ile TOK emisyonları 4 kat artış göstermiştir. FBA kullanımı ile ise yakıt dalgalanmalarının kontrol altında tutulmasının zorlaştığı bu nedenle FBA kullanımı ile TOK emisyonlarının 3,45 kat arttığı tespit edilmiştir. ÖTL+KEA+FBA'nın %14 oranında beslenmesi ile TOK emisyonlarında %15,8 oranında bir artış görülmüştür. ÖTL+FBA'nın birlikte kullanılmasında %16 oranına kadar ısıl yer değiştirmede ÖTLB ve FBA kullanımı ile TOK emisyonlarında değişim gözlenmemiştir. Ancak, ÖTLK kullanılmaya başlandığında TOK emisyonlarının oldukça yüksek seviyelere vardığı görülmüştür. Bu durumda TOK emisyon mekanizması dikkate alındığında ÖTLK kullanımının yakıtta dalgalanma oluşturduğu

bu nedenle de TOK emisyonlarının arttığı düşünülebilir. Tüm ÖTL ve FBA kullanımına bakılırsa TOK emisyonları 6,5 kat artış göstermiştir.

HF ve HCl emisyonları ile atık yakma arasındaki bağlantı çalışma ile incelenmiştir. ÖTL kullanılması ile HF emisyonlarının %59,5 oranında azaltılabileceği görülmüştür. Ancak, ÖTL kullanımı ile HCl emisyonları 0 mg/Nm³ değerinin üzerinde gerçekleşmiştir. Çalışmaya esas fabrikada intikalden beslenen ÖTLK ısı yer değiştirme oranı %9'a kadar olduğunda yalnızca ÖTL beslemesi yapılarak HF emisyonları 0 mg/Nm³ seviyesinde HCl emisyonları ise 0,01 mg/Nm³ seviyesinde tutulabilmektedir. 0,01 mg/Nm³ ihmal edilebilir bir artış olarak sayılabilir. Bu durumda en uygun besleme şekli %28,86 ÖTLB ve %9,62 oranında ÖTLK toplamını %10,4 oksijen, 93,7°C baca gazı sıcaklığında ve 160 tondaki fırına vermek olarak belirlenebilir. Ön ısıtıcı bir fırına intikalden KEA beslenmesinin HF emisyonlarını %23 azalttığı ve HCl emisyonlarında herhangi bir değişime neden olmadığı tespit edilmiştir. FBA kullanımı ile ise HF emisyonları %27 oranında azaltılmış ancak HCl emisyonları 0 mg/Nm³ değerinden 0,01 mg/Nm³ değerine ulaşmıştır. Bu artış ihmal edilebilir bir artış olduğundan FBA'nın tek kullanımının HCl emisyonlarına etkisi olmadığı söylenebilir. ÖTL+KEA+FBA kullanılmasında %14 ısı yer değiştirme oranında HF emisyonlarında %31,6 oranında azalma olmuş, HCl emisyonlarında ise bir değişiklik gerçekleşmemiştir. ÖTL ve KEA birlikte kullanıldığından HF ve HCl emisyonlarında değişim gözlenmemiştir. ÖTL ve KEA %23 oranında kullanılması ve dağılımın %17 ÖTLB ve %6 KEA olması durumunda fırın koşulları %10,4 oksijen, 80,3°C baca gazı sıcaklığında ve 164,6 ton farin besleme tonajında tutulursa HF ve HCl emisyonları 0 mg/Nm³ olarak oluşmuştur. ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanıldığı durumda ÖTLK kullanımının ve ısı yer değiştirme oranını artması ile HF emisyonları düşüş göstermiştir. %38 oranında ısı yer değiştirme oranında ÖTL ve FBA kullanımı ile HF emisyonları 0 mg/Nm³ olarak gerçekleşmiştir. ÖTL ve FBA ayrı ayrı kullanımlarda HCl oluşumunu 0,22 ve 0,1 mg/Nm³ seviyelerine yükseltirken ÖTL ve FBA'nın birlikte kullanımı HCl emisyonundaki yükselmeyi 0,04 mg/Nm³ seviyesinde tutmuştur. Bu iki atığın ayrı ayrı kullanılması yerine birlikte kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Alternatif yakıt kullanımının, SEÖS ile ölçülen emisyon parametreleri yanında hesaplama yolu ile belirlenen CO₂ emisyonlarına etkisi de incelenmiştir. 502,76 ton

atık kullanımı ile %3 ila %10 arasında ısı yer değiştirme elde edilmesi ile CO₂ emisyonlarının %0,83 oranında azaldığı, 1.090,21 ton atık ile %2 ila %15,5 arasındaki ısı yer değiştirme oranında CO₂ emisyonunun %1,29 oranında azaldığı, 965,05 ton atık kullanımı ile %4 ila %23 ısı yer değiştirme oranında CO₂ azaltımının %1,63 olduğu, 1.966,35 ton atık ile %15 ila %39 oranında ısı yer değiştirme oranında CO₂ emisyonlarında %3,63 oranında azaltım sağlandığı sonucu ortaya çıkmıştır. CO₂ emisyonlarının atık miktarından ziyade atığın emisyon faktörüne diğer bir deyişle kalori ve karbon içeriğine bağlı olduğu sonucu açıkça görölmüştür. Kullanılan atığın emisyon faktörünün kullanılan fosil yakıttan düşük olması alternatif yakıt kullanımı ile CO₂ azaltımını arttırmaktadır. ÖTL kullanımı biyokütle içeriği nedeniyle CO₂ emisyonlarında en etkili atık tipi olmuştur. FBA ise emisyon faktörünün yüksek olması nedeniyle elde edilecek CO₂ salım azaltımını kısıtlayıcı rol oynamıştır.

Sonuç olarak yapılan çalışma ile alternatif yakıt kullanımının çimento fabrikaları toz ve gaz emisyonlarını arttıran bir etkisi olduğu ancak oluşan emisyonların yasal limitlerin altında olduğu görölmüştür. Atıkların kullanımı sırasında besleme noktalarının, birlikte beslendikleri atıkların ve fırın şartlarının emisyonları etkileyen parametreler olarak öne çıktığı söylenebilir. Döner fırınlarda emisyonların oluşması noktasında yanmanın önemli olması nedeniyle iyi işletilen bir fırında tam yanma sonrası organik bileşiklerin tamamen yok olması sağlanabildiğinden atık ya da kullanılan yakıtın tipi ve miktarı kadar tam yanmayı sağlamak olduğu da yapılan çalışma ile ulaşılan bir sonuçtur.

CO₂ emisyonlarının alternatif yakıt kullanımı ile azalması için kullanılan atıkların emisyon faktörlerinin kullanılan konvansiyonel yakıtlardan daha düşük olması sonucu belirlenmiştir. Yalnızca alternatif yakıt kullanımı ile elde edilen CO₂ emisyon azaltımının düşük seviyelerde kaldığı görölmüştür. Bu noktada, CO₂ emisyonlarının azaltılması için emisyon faktörü düşük atıklar ile biyokütle kullanımının arttırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Ancak, bunun yanında yüksek CO₂ tasarrufu için fabrikanın proses emisyonları ile ilgili de bir aksiyon geliştirmesinin fayda sağlayacağı göröldüğünden bundan sonraki çalışmalarda proses CO₂ emisyonları üzerine çalışmak faydalı olacaktır.

CO, NO_x, SO₂, TOK ve Toz parametrelerinin, YSA modelleri ile tahmin edilmesini incelenmek üzere yapılan çalışmalarda ön ısıtıcılı, intikal ve alev borusundan atık beslemesi yapan fırın şartlarında elde edilen veriler ile eğitilen ağırlıklı ilgili parametreler için test edilen verilerden elde ettiği korelasyon katsayıları (R²) ve önem faktörleri irdelenmiştir. CO parametresinde R²=0,80 olarak bulunmuş, aynı parametrede önem faktörlerinin ise kırılmış ÖTL ile kule oksijen seviyesi olabileceği yapılan model ile görülmüştür. NO_x parametresi için R²=0,83 olarak hesaplanırken bu parametrenin önem faktörlerinin petrokok, kömür, kırılmış ÖTL ve karışık endüstriyel atık olabileceği sonucuna varılmıştır. YSA ile SO_x parametresinde yapılan çalışmada R²= 0,81, önem faktörleri ise petrokok ve fuel oil olarak belirlenmiştir. TOK parametresinde R²= 0,96 olurken önem faktörü olarak kırılmış ÖTL diğer parametrelere oranla öne çıkmıştır. Toz parametresinde ise R²= 0,87 hesaplanırken önem faktörlerinin fırın ısıtıcı gücü ve fuel oil olabileceği görülmüştür.

YSA ile çalışılan modelde çalışmaya konu olan fırın tipi ve şartları için, verilerin tahmin edilebileceği görüldükçe, önem faktörlerinin de yalnızca alternatif yakıtla bağlı sonuçlar olmadığı anlaşılmıştır. YSA modellere ait istatistiksel veriler incelendiğinde deneysel verilere en yakın ve yüksek doğrulukla tahmin edilen parametrelerin TOK ve TOZ modellerinden elde edildiği görülmektedir. Hata payı en yüksek olan ve tahmin yeterliliği en düşük olan modelin ise CO olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda, YSA ile elde edilen veriler ile önem faktörleri belirlenerek bu faktörlere göre besleme ve emisyonlar üzerindeki tahmin yeteneğini artırarak daha yüksek alternatif yakıt kullanımı ile daha düşük emisyon değerlerine ulaşmayı sağlayabilir. Lineer değişime sahip olmayan ısıtıcı yer değiştirme ve emisyon değişimlerinin YSA ile modellenebileceği ve elde edilen model ile emisyonların tahmin edilmesinin mümkün olduğu yapılan çalışma ile ortaya konmuştur

Sonuç olarak yapılan çalışma ile alternatif yakıt kullanımının çimento fabrikaları toz ve gaz emisyonlarını etkilediği görülmüştür. Atıkların kullanımları sırasında besleme noktalarının, birlikte beslendikleri atıkların, fırın şartlarının ve seçilen karışım yüzdelerinin emisyonları etkileyen parametreler olarak öne çıktığı görülmüştür. Atıkların kullanımında fırın işletme koşullarının iyi bilinmesi, atıkların besleme noktalarının doğru seçilmesi ve yüksek oranlarda kullanımlarda karışımların, kalorilerin ve karışım oranlarının dikkate alınması, emisyonlar üzerinde olumlu etkiler

oluşturma nedeni ile önerilmektedir. Fırına atıkların beslenmesinden önce oluşabilecek emisyon miktarlarının tahmini ile atık karışımlarını ve oranlarını içeren reçetelerin daha kolaylıkla oluşturulabileceği ve fırında kesintisiz ve çevresel emisyonlara uyumlu olarak çalışmasının muhtemel olduğu yapılan çalışma ile ortaya konmuştur. Bu çalışma şekli ile hem çevresel uyum sağlanmış hem de fırın duruş kalkışları önlenebileceği için maliyet avantajı sağlanmış olabilecektir.



KAYNAKLAR

- [1] Yeğınobalı A., *Çimento “Yeni Bir Çağın Malzemesi”*, TÇMB, Ankara, 2003.
- [2] Aydın M., Kalsiyum Alüminat Çimentosu ile Portland Çimentosunun Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2019, 556399.
- [3] Özdenkoş O., Çimento Fabrikalarında Kalite ve Çevre Yönetimi Sistemleri: Sektörde Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 2010, 253710.
- [4] Mokhtar A., Nasooti M., A Decision Support Tool for Cement Industry to Select Energy Efficiency Measures, *Energy Strategy Reviews*, 2020, **28**, 100458.
- [5] Avami A., Sattari S., Energy Conservation Opportunities: Cement Industry in Iran, *Int. J. Energy*, 2007, **1**(3), 65-71.
- [6] Madlool N.A., Saidur R., Rahim A., Kamalisarvestani M., An Overview of Energy Savings Measures for Cement Industries, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2013, **19**, 18-29.
- [7] Afkhami B., Akbarian B., Beheshti N., Kakaee A.H., Shabani B., Energy Consumption Assessment in A Cement Production Plant, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 2015, **10**, 84-89.
- [8] Fonta P., Getting the Numbers Right: Cement Industry Energy and CO₂ Performance, *World Bus. Counc. Sustain. Dev.-WBCSD*, 2011.
- [9] Sagastume A., Eras J.J.C., Gaviria C.A., Caneghem J.V., Vandecasteele C., Improved Selection of The Functional Unit in Environmental Impact Assessment of Cement, *Journal of Cleaner Production.*, 2017, **168**, 463-473.
- [10] Çankaya S., Çimento Üretiminde Çevresel Sürdürülebilirlik İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2018, 526793.
- [11] EEA, Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories, *European Environment Agency*, 2016, Report No: 21/2016.
- [12] Gürsel A.P., Life Cycle Assessment Concrete: Decision-Support Tool and Case Study Application, PhD Thesis, University of California Berkeley, Civil and Environmental Engineering Department, Berkeley, USA, 2014.

- [13] Ekinci E., Kazancıoğlu Y., Mangla S.K., Kamalisarvestani M., Using System Dynamics to Assess the Environmental Management of Cement Industry in Streaming Data Context, *Science of the Total Environment*, 2020, **715**, 136948.
- [14] Hashem F.S., Taha A.R., Mangla S.K., Mashout H.A., Rubber and Plastic Waste as Alternative Refused Fuel in Cement Industry, *Construction and Building Materials*, 2019, **212**, 275-282.
- [15] Singhi M.K., Bhargava R., Sustainable Indian Cement Industry, *Workshop on International Comparison of Industrial Energy Efficiency*, New Delhi, India, 2010.
- [16] World Cement Association-WCA, <https://www.worldcementassociation.org>, (Ziyaret tarihi: 15 Mart 2019).
- [17] Chinmaya M.P.M., Alternative Fuels in Cement Manufacturing, *Alternative Fuel*, DOI: 10.5772/22319.
- [18] Schindler A.K., Duke S.R., Burch T.E., Davis E.W., Zee R.H., Bransby D.I., Hopkins C.T., Rutherford L., Duan J., Venkatasubramanian V., Giles S., Alternative Fuel for Portland Cement Processing, *Auburn University Final Research Report*, 2012.
- [19] The Pembina Institute and Environmental Defence, Alternative Fuel Use in Cement Manufacturing Implications, Opportunities and Barriers in Ontario, *Workshop on Alternative Fuels in Cement Kilns Updated for Follow up Meeting*, Ontario, Canada, 23 May 2014.
- [20] Global Cement and Concrete Association-GCCA, <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>, (Ziyaret tarihi: 06 Ocak 2020).
- [21] European Cement Association-Cembureau, https://cembureau.eu/media/1713/ceps_handout_final.pdf, (Ziyaret tarihi: 23 Aralık 2018).
- [22] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği-TÇMB, Alternatif Yakıt ve Hammadde Pozisyon Belgesi, https://www.tcma.org.tr/tr/alternatif_yakit_ve_hammaddeler (Ziyaret tarihi: 18 Haziran 2019).
- [23] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği-TÇMB, Türkiye Çimento Sektörü Entegre Çimento Tesisleri Kıyaslama Çalışması Sonuçları, *TÇMB Enerji Komitesi*, 2018.
- [24] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği-TÇMB, Çimento Üretiminin Tarihçesi, www.tcma.org.tr, (Ziyaret tarihi: 27 Haziran 2020).
- [25] CEMEX, History of Cement and Concrete, www.cemex.co.uk/history-of-cement-and-history-of-concrete, (Ziyaret tarihi: 3 Mayıs 2020).

- [26] Kula İ., Bor Endüstri Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 2000, 104321.
- [27] Blanks R., Kennedy H., *The Technology of Cement and Concrete*, 1st ed., John Wiley and Sons, New York, 1955.
- [28] Taylor H.F., *Chemistry of Cement and Concrete*, 2nd ed., Imperial University of London, UK, 1992.
- [29] Engin Y., Tarih Boyunca Çimentonun Gelişimi, www.betonvecimeto/cimento/cimentonun-gelisimi (Ziyaret tarihi: 7 Haziran 2020).
- [30] Urhan.S., Temel Yapı Malzemesi Çimentonun Öyküsü, *Metalurji*, 2000, **24**(124), 32-45.
- [31] Angur G.E., Çimento Esaslı Yapıştırıcı Harçlarda Sepiyolit Katkılı Malzeme Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, Türkiye, 2016, 420299.
- [32] VDZ, History of Cement, www.vdz-online.de/historyofbinder (Ziyaret tarihi: 17 Aralık 2019).
- [33] JK LAKSHMI CEMEN, Brief History of Cement, www.jklakshmicement.com/brief-history-of-cement (Ziyaret tarihi: 16 Kasım 2019).
- [34] Understanding Cement, Cement History, www.understanding-cement.com/history (Ziyaret tarihi: 5 Ocak 2020).
- [35] T.C Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Çimento Sektör Raporu 2019, *Sanayi ve Verimlilik Genel Müdürlüğü*, 2019.
- [36] European Cement Association-Cemberau, Built in concrete made with cement, Activity Report, 2018.
- [37] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği-TÇMB, www.tcma.org.tr, (Ziyaret tarihi: 27 Haziran 2020).
- [38] T.C Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Sektörel Görünüm: İnşaat, Çimento ve Seramik, *Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş.*, 2018.
- [39] Fidan B., A Comparative Analysis of the Recent Cement Grinding Systems with Particle-Based Influences on Cement Properties, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2011, 285682.
- [40] Zhang J., Energy, Environmental and Greenhouse Gas Effects of Using Alternative Fuel in Cement Production, Master Thesis, Columbia University, Earth and Environmental Engineering Department, Columbia, USA, 2013.

- [41] Pieper C., Liedmann B., Wirtz S., Scherer V., Bodendiek N., Schaefer S., Interaction of the Combustion of Refused Derived Fuel with the Clinker Bed in Rotary Cement Kilns: A Numerical Study, *Fuel*, 2020, **266**, 117048.
- [42] Ibrahim R., Technology of Cement Production: Issues and Options for Developing Countries, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Technolgy and Policy Department, Massachusetts, USA, 1986.
- [43] Bye G.C., *Portland Cement*, 3rd ed., London:Thomas Telford Limited, UK, 2011.
- [44] Orhan A.E., Çimento Üretiminden Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarının Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2018, 527208.
- [45] Wang C., Utilization of Refuse Derived Fuel in Cement Industry-A Case Study in China, Master Thesis, Lappeenranta University of Technology, School of Energy Systems, Lappeenranta, Finlandiya, 2017.
- [46] CSI, Guidelines for Co-Processing Fuel and Raw Materials in Cement Manufacturing, *Cement Sustainability Initiative*, 2014.
- [47] Schall, A., Homogenization and Preblending of the Raw Materials, *Lafarge-Process Operator Training Course*, 2016.
- [48] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Çimento Fabrikalarında İş Sağlığı ve Güvenliği Denetim Projesi Genel Değerlendirme Raporu, *İş Teftiş Kurulu Başkanlığı*, 2006.
- [49] Özel A., Çimento Üretiminde ATY(Atıktan Türetilmiş Yakıt) Kullanımı ve Çevresel Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2011, 349704.
- [50] Schorct F., Kourti I., Scalet M., Roudier S., Sancho L.D., Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, *Joint Research Centre*, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU, 2013.
- [51] Uğur O., Ön Isıtıcı ve Kalsinatörlü Çimento Fabrikasına Ait Döner Fırın Prosesi Üzerinde Enerji ve Ekserji Analizlerinin Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, Türkiye, 2018, 515799.
- [52] Söğüt M.Z., Çimento Sektöründe Döner Fırın Prosesinin Eksergoekonomik Optimizasyonu, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye, 2009, 245487.
- [53] Kökipek B., Suni Alçının Çimento Üretiminde Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2010, 266153.

- [54] Topçu A.D., Çimento Üretim Süreçlerindeki İş Sağlığı ve Güvenliği Risklerinin Tespiti ve Çözüm Önerileri, Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2016.
- [55] İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümü-Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı Çevre Projeleri Grubu-TÜBİTAK MAM Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü, İklim Değişikliği ve Çimento Sektörü, *T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı*, 2014.
- [56] Balcı S., Çimento Üretiminde Toz ve Gürültü Maruziyetinin Değerlendirilmesi, Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2016.
- [57] Yang Z., Xiao H., Zhang L., Feng D., Zhang F., Jiang M., Sui Q., Jia L., Fast Determination of Oxides Content in Cement Raw Meal Using NIR-Spectroscopy and Backward Interval PLS with Genetic Algorithm, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2019, **223**, 117327.
- [58] Plou J., Martinez I., Grasa G., Murillo R., Reactivity of Calcined Cement Raw Meals for Carbonation, *Powder Technology*, 2019, **354**, 338-347.
- [59] Karakaş F., Çimento Hammaddelerinin Öğütülmesinde Enerji Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006, 223829.
- [60] Altınkaynak M., Çimento Fabrikalarında Kullanılan Döner Fırının Termodinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye, 2013, 330859.
- [61] Ali M., Saidur B., Hossain M.S., A Review on Emission Analysis in Cement Industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**, 2252-2261.
- [62] Mikulcic H., Klemes J.J., Vujanovic M., Urbaniec K., Reducing Greenhouse Gasses Emissions by Fostering the Deployment of Alternative Raw Materials and Energy Sources in the Cleaner Cement Manufacturing Process, *Journal of Cleaner Production*, 2016, **136**, 119-132.
- [63] Singh G.V.P., Subramaniam K.V.L., Production and Characterization of Low-Energy Portland Composite Cement from Post-Industrial Waste, *Journal of Cleaner Production*, 2019, **238**, 118024.
- [64] Boesch M.E., Koehler A., Hellweg S., Model for Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Clinker Production, *Environ. Sci. Technol.*, 2019, **43**, 7578-7583.
- [65] Ergüçlü M.E., Alternatif Yakıt Kullanılarak Üretilen Çimentodan Mamul Betonarme Su Yapılarında Eser Element Özütleme Karakteristiklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 2016, 432786.

- [66] Öztürk E., Çimento Sektöründe Alternatif Hammadde ve Alternatif Yakıt Kullanımının Çevresel Yararlarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Tekirdağ, 2016, 43097.
- [67] Caruso H.G., Reduction of CO₂ Emissions from Cement Plants, Master Thesis, University of Waterloo, Chemical Engineering Department, Ontario, Canada, 2006.
- [68] Savaş A.F., Paralel Akışlı Önkalsinasyonlu Çimento Fabrikasında Enerji ve Ekserji Analizi Modellemesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 2004, 152728.
- [69] Wu W.N., Liu X.Y., Hu S., Zhang R., Lu X.Y., Improving the Sustainability of Cement Clinker Calcination Process by Assessing the Heat Lost Through Kiln Shell and Its Influencing Factors: A Case Study in China, *Journal of Cleaner Production*, 2019, **224**, 132-141.
- [70] Telschow S., Clinker Burning Kinetics and Mechanism, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering Combustion and Harmful Emission Control Research Centre, Copenhagen, Denmark, 2012.
- [71] Madlool N.A., Saidur R., Hossain M.S., Rahim N.A., A Critical Review on Energy Use and Savings in the Cement Industries, *Renewable and Sustainability Energy Reviews*, 2011, **15**, 2042-2060.
- [72] Karamarkovic V., Marasevic M., Karamarkovic R., Karamarkovic M., Recuperator for Waste Heat Recovery from Rotary Kilns, *Appl. Therm. Eng.*, 2013, **54**(2), 470-480.
- [73] Nielsen A.R., Combustion of Large Solid Fuels in Cement Rotary Kilns, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering Combustion and Harmful Emission Control Research Centre, Copenhagen, Denmark, 2012.
- [74] Özdöl G., Çimentonun Fiziksel Özelliklerinin Üretilen Standart Harcın Mukavemetine Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2004, 152389.
- [75] Chatterjee A.K., Chemistry and Engineering of the Clinkerization Process – Incremental Advances and Lack Breakthroughs, *Cement and Concrete Research*, 2011, **41**, 624-641.
- [76] Moya J.A., Pardo N., Mercier A., Energy Efficiency and CO₂ Emissions: Prospective Scenarios for the Cement Industry, *Publications Office of the European Union*, Scientific and Technical Research Reports, 2010.
- [77] Kaplan G., Çimento Teknolojisinde Sürfaktanların Kullanımı ile Sürdürülebilir Çimento Üretimi, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, Türkiye, 2018, 497949.

- [78] TSE EN 197-1, Çimento – Bölüm 1: Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikleri ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2012.
- [79] Rahman A., Rasul M.G., Khan M.M.K., Sharma S., Impact of Alternative Fuels on the Cement Manufacturing Plant Performance: An Overview, *Procedia Engineering*, 2013, **56**, 393-400.
- [80] Atmaca A., Kanoğlu M., Reducing Energy Consumption of a Raw Mill in Cement Industry, *Energy*, 2012, **42**, 261-269.
- [81] Salehian S., Simulation of Solar Thermal Application in a Cement Plant, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2020.
- [82] Pedersen M.N., Co-firing of Alternative Fuels in Cement Kiln Burners, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering Combustion and Harmful Emission Control Research Centre, Copenhagen, Denmark, 2018.
- [83] Labahn O., Kohlhaas B., *Cement Engineer's Handbook*, 4th ed., Bauverlag GMBH, Germany, 1983.
- [84] Hewlett P.C., *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4th ed., Bauverlag Butterworth-Heinemann, 1998.
- [85] Greco C., Picciotti G., Greco R., Ferreira G.M., *Innovations in Portland Cement Manufacturing*, PCA, Illinois, 2004.
- [86] Resmi Gazete Sayısı: 2015/2, İthal Katı Yakıtlar Genelgesi, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, 2015.
- [87] Resmi Gazete Sayısı: 30991, Çevrenin Korunması Yönünden Kontrol Altında Tutulan Katı Yakıtların İthalat Denetimi Tebliği (Ürün Güvenliği ve Denetimi 2020/7), *Ticaret Bakanlığı*, Ankara, Resmi Gazete Tarihi: 27.12.2019.
- [88] Kookos I.K., Pontikes Y., Angelopoulos G., Lyberatos G., Classical and Alternative Fuel Mix Optimization in Cement Production Using Mathematical Programming, *Fuel*, 2011, **90**, 1277-1248.
- [89] Huang M., Ying X., Shen D., Feng H., Li N., Zhou Y., Evaluation of Oil Sludge as an Alternative Fuel in the Production of Portland Cement Clinker, *Construction and Building Materials*, 2017, **15**, 226-231.
- [90] GCCA, GCCA Sustainability Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing, *Global Cement and Concrete Association*, London, UK, 2019.

- [91] Ecofys, Market Opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU”, Assessment of drivers and barriers for increased fossil fuel substitution in three EU member states: Greece, Poland and Germany, https://cembureau.eu/media/1231/ecofysreport_wastetoenergy_2016-07-8.pdf (Ziyaret tarihi: 26 Mart 2020).
- [92] IEA, GCCA Energy Technology Perspectives 2015: Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action, *International Energy Agency*, Paris, Fransa, 2015.
- [93] IFC, Increasing the Use of Alternative Fuels at Cement Plants: International Best Practice, *International Finance Corporation*, Washington, USA, 2017.
- [94] Rahman A., Rasul M.G., Khan M.M.K., Sharma S., Recent Development on the Uses of Alternative Fuels in Cement Manufacturing Process, *Fuel*, 2015, **145**, 84-99.
- [95] Mokrzyckia E., Uliasz-Bochenczyk A., Sarna M., Use of Alternative Fuels in the Polish Cement Industry, *Applied Energy*, 2003, **74**(1-2), 101-111.
- [96] WBCSD, Guidelines for the selection and use of fuels and raw materials in the cement manufacturing process, *The World Business Council for Sustainable Development*, Geneva, Switzerland, 2005.
- [97] Lechtenberg D., Diller H., *Alternative Fuels and Raw Materials Handbook for the Cement and Lime Industry*, MVW Lechtenberg & Partner, Germany, 2012.
- [98] Waltisberg J., Weber R., Disposal of Waste-Based Fuels and Raw Materilas in Cement Plants in Germany and Switzerland – What Can Be Learned for Global Co-Incineration Practice and Policy?, *Emerging Contaminants* 6, 2020, **6**, 93-102.
- [99] Genon G., Brizios E., Sarna M., Perspectives and Limits for Cement Kilns as a Destination for RDF, *Waste Management*, 2008, **28**, 2375-2385.
- [100] Beer J., Cihlar J., Hensing 1., Zabeti M., Status and Prospects of Coprocessing of Waste in EU Cement Plants, *Ecofys*, 2017.
- [101] Cemberau, What is Co-Processing, *European Cement Association*, Brussels, Belgium, 2020.
- [102] Bulut İ., Belediye Atıklarının Çimento Sektöründe Evsel ATY Olarak Kullanılması, *Atık Yönetimi Sempozyumu-Atıktan Enerji Oturumu*, Antalya, Türkiye, 26 Şubat-2 Mart 2017.
- [103] Cemberau, Cement, Concrete & the Circular Economy, *European Cement Association*, Brussels, Belgium, 2016.
- [104] Gencil C.D., Çimento sektöründe tehlikeli atıkların alternatif yakıt olarak kullanılması ve AB uygulamaları, *Atık Yönetimi Sempozyumu-Atıktan Enerji Oturumu*, Antalya, Türkiye, 16-21 Nisan 2011.

- [105] Resmi Gazete Sayısı: 30016, Atık Yönetimi Yönetmeliği, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Resmi Gazete Tarihi: 23.03.2017.
- [106] Resmi Gazete Sayısı: 27771, Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Resmi Gazete Tarihi: 07.04.2017.
- [107] Resmi Gazete Sayısı: 29115, Çevre İzin ve Lisans Yönetmeliği, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Resmi Gazete Tarihi: 10.09.2014.
- [108] Resmi Gazete Sayısı: 30037, Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Resmi Gazete Tarihi: 13.04.2017.
- [109] Kaantee U., Zevenhoven R., Backman R., Hupa M., Cement Manufacturing Using Alternative Fuels and the Advantages of Process Modelling, *Fuel*, 2004, **85**, 293-301.
- [110] Tsiliyannis C.A., Alternative Fuels in Cement Manufacturing: Modeling for Process Optimization Under Direct and Compound Operation, *Fuel*, 2012, **99**, 20-39.
- [111] Papanikola K., Papadopoulou K., Tsilliyannis C., Fotinopoulou I., Katsiampoulas A., Chalarakis M., Georgiopoulou M., Rontogianni V., Michalopoulos I., Mathioudakis D., Lytras G.M., Lyberatos G., Food Residue Biomass Product as an Alternative Fuel for the Cement Industry, *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**, 35555-35564.
- [112] Mut M., Norskov L.K., Fradsen F.J., Glarborg P., Dam-Johansen K., Review: Ciculation of Inorganic Elements in Combustion of Alternative Fuels in Cement Plants, *Energy Fuel*, 2015, **29**, 4076-4099.
- [113] Bourtsalas A.C., Zhang J., Castaldi M.J., Themelis N.J., Use of Non-Recycled Plastics and Paper as Alternative Fuel in Cement Production, *Journal of Cleaner Production*, 2018, **181**, 8-16.
- [114] Norskov L.K., Combustion of Solid Alternative Fuels in the Cement Kiln Burner, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering Combustion and Harmful Emission Control Research Centre, Kopenhagen, Denmark, 2018.
- [115] Gendebien A., Leavens A., Blackmore K., Godley A., Lewin K., Whitting K.J., Davis R., Giegrich J., Fehrenbach H., Gromke U., Bufalo N., Hogg D., Refused derived fuel. Current practice and perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3), *European Commission*, 2003, Report No: VO 5087-4.
- [116] Cascarosa E., Gea G., Arauzo J., Thermochemical Processing of Meat Bone Meal: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, **16**(1), 942-957.

- [117] Biagini E., Fantei A., Tognotti L., Effect of the Heating Rate on the Devolatilization of Biomass Residues, *Thermochimica Acta*, 2008, **472**(1-2), 55-63.
- [118] Chen W.H., Du S.W., Tsai C.H., Wang Z.Y., Torrefied Biomasses in a Drop Tube Furnace to Evaluate Their Utility in Blast Furnace, *Bioresource Technology*, 2012, **111**, 433-438.
- [119] Hasanbeigi A., Lu H., Williams C., Price L., International Best Practices for Pre-Processing and co-Processing Municipal Solid Waste and Sewage Sludge in the Cement Industry, eceee 2012 Summer Study on Energy Efficiency in Industry, 11-14 September 2012.
- [120] Hinkel M., Blume S., Hincliffe D., Mustz D., Hengevoss D., Guidelines on Pre- and Co-Processing of Waste in Cement Production, Use of Waste as Alternative Fuel and Raw Material, *Lafarge Holcim and giz Training Course*, 2020.
- [121] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği-TÇMB, Türkiye Çimento Sektörü Entegre Çimento Tesisleri 2018 yılı Verileri, *TÇMB Enerji Meslektaşlar Toplantısı*, 2019.
- [122] Akdağ A.S., Investigation of Fuel Values and Combustion Characteristics of RDF Samples, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2014, 385061.
- [123] Çelik S.Ö., Atıktan Türetilmiş Yakıt: Yasal Çerçeve, Avrupa'daki ve Türkiye'deki Durumu, *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, **1**(2), 63-71.
- [124] Yazıcı R., Evsel Katı Atıklardan Atıktan Türetilmiş Yakıt Elde Edilmesi ve Sanayi Tesislerinde Kullanımının Enerji Tasarrufuna Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu, Türkiye, 2019, 587263.
- [125] Bosmans A., Dobbelaere D.C., Helsen L., Pyrolysis Characteristics of Excavated Waste Material Processed into Refused Derived Fuel, *Fuel*, 2014, **122**, 198-205.
- [126] Piao G., Aono S., Kondohl M., Yamazaki R., Combustion Test of Refused Derived Fuel in a Fluidized Bed, *Waste Management*, 2000, **20**(5-6), 443-447.
- [127] Chatziaras N., Psomopoulos C.S., Themelis N.J., Use of Waste Derived Fuels in Cement Industry: A Review, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2016, **27**(2), 1718-193.
- [128] Chatziaras N., Psomopoulos C.S., Themelis N.J., Use of Alternative Fuels in Cement Industry, *12th International Conference on Protection and Restoration of Environment*, Skiathos, Greece, 29 June-3 July 2014.
- [129] Nakajima Y., Matsuyuki M., Utilization of Waste Tires as Fuel for Cement Production, *Conversion&Recycling*, 1981, **4**(3), 145-151.

- [130] Uson A.A., Lopez-Sabiron A.M., Ferrira G., Sastresa E.L., Uses of Alternative Fuels and Raw Materials in the Cement Industry as Sustainable Waste Management Options, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, **23**, 242-260.
- [131] Asamany E., Gibson M.D., Chem P., Wilson C., Patrick E., Pegg M.J., Use of Tires as an Alternative Fuel Source at the Lafarge Cement Kiln, *Canada Report*, 2015.
- [132] Pipilikaki P., Katsioti M., Papageorgiou D., Fragoulis D., Chaniotakis E., Use of Tire Derived Fuel in Clinker Burning, *Cement&Concrete Composites*, 2005, **27**, 843-847.
- [133] Landreth R.E., Rebers P.A., *Minicipal Solid Wastes:Problems and Solutions*, Lewis Publishers, 1997.
- [134] Giugliano M., Cernuschi S., Ghezzi U., Grosso M., Experimental Evaluation of Waste Tires Utilization in Cement Kilns, *Journal of the Air Waste Management Association*, 1999, **49**, 1405-1414.
- [135] Martinez J.D., Puy N., Murillo R., Garcia T., Navarro M.V., Mastral A.M., Waste Tyre Pyrolysis –A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, **23**, 179-213.
- [136] Ekincioğlu Ö., Gurgun A.P., Engin Y., Tarhan M., Kumbaracıbaşı S., Approches for Sustainable Cement Production – A Case Study from Turkey, *Energy and Buildings*, 2013, **66**, 136-142.
- [137] Resmi Gazete Sayısı: 26357, Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Resmi Gazete Tarihi: 25.11.2006.
- [138] Resmi Gazete Sayısı: 310076, ÇED, İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü Atık İthalatı Genelgesi, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Resmi Gazete Tarihi: 20.12.2019.
- [139] Zsirai I., Sewage Sludge as Renewable Energy, *Journal of Residual Science and Technology*, 2011, **8**(4), 165-179.
- [140] Rodriguez N.H., Martinez-Ramires S., Blanco-Varela M.T., Donatello S., Guillem M., Puig J., Fos C., Larrotcha E., Flores J., The Effect of Using Thermally Dried Sewage Sludge as an Alternative Fuel on Portland Cement Clinker Production, *Journal of Cleaner Production*, 2013, **52**, 94-102.
- [141] Werther J., Ogada T., Sewage Sludge Combustion, *Prog Energy Combust Sci*, 1999, **25**(1), 55-116.
- [142] Holt S.P., Berge N.D., Life-Cycle Assessment of Using Liquid Hazardous Waste as an Alternative Energy Source During Portland Cement Manufacturing: A United States Case Study, *Journal of Cleaner Production*, 2018, **195**, 1057-1068.

- [143] Seyler C., Hellweg S., Monteil M., Hungerbühler K., Life Cycle Inventory for Use of Waste Solvent as Fuel Substitute in the Cement Industry a Multi-Input Allocation Model, *Int. J. Life Cycle Assess*, 2005, **10**(2), 120-130.
- [144] Mlakar T.S., Horvat M., Vuk T., Stergarsek A., Kotnik J., Tratnik J., Mercury Species, Mass Flows and Processes in a Cement Plant, *Fuel*, 2010, **89**(8), 1936-1945.
- [145] Resmi Gazete Sayısı: 30985, Atık Yağların Yönetimi Yönetmeliği, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Resmi Gazete Tarihi: 21.12.2019.
- [146] Sun Y., Chen G., Yan B., Cheng Z., Ma W., Behaviour of Mercury During Co-incineration of Sewage Sludge and Municipal Solid Waste, *Journal of Cleaner Production*, 2020, **253**, 119969.
- [147] Ma W., Wenga T., Fradsen F.J., Yan B., Chen G., The Fate of Chloride During MSW Incineration: Vaporization Transformation, Deposition, Corrosion and Remedies, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2020, **76**, 100789.
- [148] Horsley C., Emmert M., Sakulich A., Influence of Alternative Fuels on Trace Element Content of Ordinary Portland Cement, *Fuel*, 2016, **184**, 481-489.
- [149] Cembureau, Reaching Climate Neutrality Along the Cement and Concrete Value Chain by 2020, *Cementing the European Green Deal*, 2020.
- [150] Rafetti E., Treccani M., Donato F., Cement Plant Emissions and Health Effects in the General Population: A Systematic Review, *Chemosphere*, 2019, **218**, 211-222.
- [151] Resmi Gazete Sayısı: 27277, Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Resmi Gazete Tarihi: 03.07.2009.
- [152] Abdul-Wahab S.A., Impact of Fugitive Dust Emissions from Cement Plants on Nearby Communities, *Ecological Modelling*, 2006, **195**, 338-348.
- [153] Awad N., Using Engineered Fuels as Substitute for Fossil Fuels in Cement Production, Thesis, Columbia University, Earth and Environmental Engineering Department, Columbia, USA, 2015.
- [154] Gupta R.K., Majumdar D., Trivedi J.V., Bhanarkar A.D., Particulate Matter and Elemental Emissions from a Cement Kiln, *Fuel Processing Technology*, 2012, **104**, 343-351.
- [155] Ibrahim H.G., Okasha A.Y., Elatrash M.S., Al-Meshragi M.A., Emissions of SO₂, NO_x and PMs from Cement Plant in Vicinity of Khoms City in Northwestern Libya, *Journal of Environmental Science and Engineering A*, 2012, **1**, 620-628.

- [156] Neuffer B., Laney M., Alternative Control Techniques Document Update-NO_x Emissions from New Cement Kilns, *U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Sector Policies and Programs Division Research Triangle Park*, North Carolina, 2007.
- [157] Cai J., Wu H., Ren Q., Lin L., Zhou T., Lyu Q., Innovative NO_x Reduction from Cement Kiln and Pilot-Scale Experimental Verification, *Fuel Processing Technology*, 2020, **199**, 106306.
- [158] Li S., Ge Y., Wei X., Experiment on NO_x Reduction by Advanced Reburning in Cement Precalciner, *Fuel*, 2018, **224**, 235-240.
- [159] Fan W., Zhu T., Sun Y., Lv D., Effects of Gas Compositions on NO_x Reduction by Selective Non-catalytic Reduction with Ammonia in a Simulated Cement Precalciner Atmosphere, *Chemosphere*, 2014, **113**, 182-187.
- [160] Due L., Jin B.S., Zheng X., Niu M.M., Effect of Reburning Zone Conditions on NO Reduction Efficiency in an Online Precalciner-type Kiln System, *Environ. Prog. Sustain*, 2016, **35**, 439-446.
- [161] Tosun F., Çimento Fabrikalarında Alternatif Yakıt Olarak Katı Atıkların Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006, 180497.
- [162] Moss G., The Fluidised-Bed Desulfurising Gasifier, *2nd Proc. Int. Conf. Fluid. Bed Combustion*, North Caroline, USA, 4-7 October 1970.
- [163] Lin W., Interactions Between SO₂ and NO_x Emissions in Fluidised Bed Combustion of Coal, Ph.D. Thesis, Technical University of Delft, Department of Chemical Process Technology, Delft, Holland, 1981.
- [164] Horkoss S., Reducing the SO₂ Emission from a Cement Kiln, *International Journal of Natural and Social Science*, 2008, **1**(1), 7-15.
- [165] Larsen M.B., Alternative Fuels in Cement Production, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering Combustion and Harmful Emission Control Research Centre, Delft, Holland, 2007.
- [166] Pachitsas S., Control of HCl Emission from Cement Plants, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering Combustion and Harmful Emission Control Research Centre, Delft, Holland, 2018.
- [167] Harkov R., Ross J., Hydrogen Chloride (HCl) Emission from Maryland Utility Boilers, *Maryland Department of Natural Resources*, 1999, Technical Report.
- [168] Chow W., Miller M.J., Torrens I.M., Pathways of Trace Elements in Power Plants: Interim Research Results and Implications, *Fuel Processing Technology*, 1994, **39**, 5-20.

- [169] Kolovos K., Tsvivilis G.S., Kakali G., The Use of Secondary Raw Materials and Fuels in the Cement Industry, *Tech. Chron. Sci. J. TCG*, 2006, **1**(2), 7-17.
- [170] WBCSD, Toward a Sustainable Cement Industry: Environment, Health and Safety Performance Improvement, *World Bus. Counc. Sustain. Dev.*, 2002.
- [171] Wang C., Yang Z., Zhang Y., Zhang Z., Cai Z., PAHs and Heavy Metals in the Surrounding Soil of a Cement Plant Co-Processing Hazardous Waste, *Chemosphere*, 2018, **210**, 247-256.
- [172] Eker G., UV-A Işınlarıyla Topraklardaki poliaromatik Hidrokarbonların (PAH'ların) Gideriminde TiO₂'nin Fotokatalizör Olarak Kullanımı, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2018, **7**(2), 522-531.
- [173] Köşeler M.D., Büyükçekmece Gölü'nde Polisiklik Aromatik Hidrokarbonların (PAH) Konsantrasyonunun Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2008, 246795.
- [174] Orecchio S., Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in Soil of a Natural Reserve (Isola Delle Femmine)(Italy) Located in Front of a Plant for the Production of Cement, *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **173**, 358-368.
- [175] Environmental Protection Agency-EPA, Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Polycyclic Organic Matter, *Office of Air Quality Planning and Standards*, 1998.
- [176] Hişmişoğulları Ş.E., Hişmişoğulları A.A., Kondaş A.T., Dioksin ve Dioksin Benzeri Kimyasalların Toksik Etkileri, *Balıkesir Sağlık Bilimleri Dergisi*, 2012, **1**(1), 23-27.
- [177] Giannopoulos D., Kolaitis D.I., Togkalidou A., Skevis G., Founti M.A., Quantification of Emission from the Co-Incineration of Cutting Oil Emulsions in Cement Plants – Part II: Trace Species, *Fuel*, 2007, **86**, 2491-2501.
- [178] Yang L., Zheng M., Zhao Y., Yang Y., Li C., Liu G., Unintentional Persistent Organic Pollutants in Cement Kiln Co-Firing Solid Wastes, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **182**, 109373.
- [179] Dwyer H., Themelis N., Inventory of U.S. 2012 Dioxin Emissions to Atmosphere, *Waste Management*, 2015, **46**, 242-246.
- [180] Karstensen K., Formation and Release of POPs in the Cement Industry, *World Bus. Counc. Sustain. Dev.-WBCSD*, 2006.
- [181] Lang T.A., Use of Alternative Fuels and Raw Materials at Holcim Cement Plants at Europe, *Cement International*, 2003, **4**, 62-70.
- [182] Pech M., Douillet G., Operation Experience in Co-Incineration of Animal Meals in Cement Kilns, 5th International VDZ Congress, 2002.

- [183] Geng Y., Wang Z., Shen L., Zhao J., Calculating of CO₂ Emission Factors for Chinese Cement Production Based on Inorganic Carbon and Organic Carbon, *Journal of Cleaner Production*, 2019, **217**, 503-509.
- [184] Rolfe A., Huang Y., Haaf M., Pita A., Rezvani S., Dave A., Hewitt N.J., Technical and Environmental Study of Calcium Carbonate Looping Versus Oxy-Fuel Options for Low CO₂ Emission Cement Plants, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, **75**, 85-97.
- [185] Summerbell D.L., Environmental Performance Improvement in the Cement Industry, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, Department of Engineering, Cambridge, UK, 2017.
- [186] Moumin G., Ryssel M., Zhao L., Markewitz P., Sattler C., Robinius M., Stolten D., CO₂ Emission Reduction in the Cement Industry by Using a Solar Calciner, *Renewable Energy*, 2020, **145**, 1578-1596.
- [187] Resmi Gazete Sayısı: 29068, Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Resmi Gazete Tarihi: 22.07.2014.
- [188] Carrasco F., Bredin N., Heitz M., Gaseous Contaminant Emissions as Affected by Burning Scrap Tires in Cement Manufacturing, *J. Environ. Qual.*, 2002, **31**, 1484-1490.
- [189] Prisciandaro M., Mazziotti G., Veglio F., Effect of Burning Supplementary Waste Fuels on the Pollutant Emissions by Cement Plants: A Statistical Analysis of Process Data, *Resources, Conservation and Recycling*, 2003, **39**, 161-184.
- [190] Conesa J.A., Galvez A., Mateos F., Martin-Gullon I., Font R., Organic and Inorganic Pollutants from Cement Kiln Stack Feeding Alternative Fuels, *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **158**, 585-592.
- [191] Arshed F., Tbinda A.B., Raza S.A., Butt A., Yasar A., Comparative Analysis of Air Emission from Cement Plant Using TDF as a Partial Substitute for Coal, *Environmental Research, Engineering and Management*, 2014, **2**(68), 61-68.
- [192] Parlikar U., Bundela P.S., Baidya R., Ghosh S.K., Effect of Variation in the Chemical Constituents of Wastes on the Co-Processing Performance of the Cement Kilns, *Procedia Environmental Sciences*, 2016, **25**, 506-512.
- [193] Lv D., Zhu T., Liu R., Lv Q., Sun Y., Wang H., Liu Y., Zhang F., Effects of co-processing sewage sludge in cement kiln on NO_x, NH₃ and PAHs emissions, *Chemosphere*, 2016, **59**, 595-601.
- [194] Fyffe J.R., Breckel A.C., Townsend A.K., Webber M.E., Use of MRF Residue as Alternative Fuel in Cement Production, *Waste Management*, 2016, **47**, 276-284.

- [195] Richards G., Agranovski I.E., Dioxn-like pcb EmissIons from Cement Kilns During the Use of Alternative Fuels, *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **323**, 698-709.
- [196] Zhang X., Schreifels J., Contionuous Emission Monitoring Systems at Power Plants in China: Improving SO₂ Emission Measurement, *Energy Policy*, 2011, **39**, 7432-7438.
- [197] Resmi Gazete Sayısı: 28082, Sürekli Emisyon Ölçüm Sistemleri Tebliği, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara, Resmi Gazete Tarihi: 12.10.2011.
- [198] Jalal M., Ramezaniapour A.A., Strength enhancement modeling of concrete cylinders confined with CFRP composites using artificial neural networks, *Composites: Part B*, 2012, **43**, 2990-3000.
- [199] Öztemel E., *Yapay Sinir Ağları*, Papatya Yayıncılık, 2003.
- [200] Naderpour H., Kheyroddin A., Amiri G.G., Prediction of FRP-confined Compressive Strength of Concrete Using Artificial Neural Networks, *Composite Structures*, 2010, **92**(12), 2817-2829.
- [201] Alshihri M.M., Azmy A.M., El-Bisy M.S., Neural Networks for Predicting Compressive Strength of Structural Light Weight Concrete, *Construction and Building Materials*, 2009, **23**(6), 2214-2229.
- [202] Bilim C., Atiş C.D., Tanyildizi H., Karahan O., Predicting the compressive Strength of Ground Granulated Blast Furnace Slag Concrete Using Artificial Neural Network, *Advances in Engineering Software*, 2009, **40**(5), 334-340.
- [203] Karakoç M.B., Demirboğa R., Türkmen İ., Can İ., Effect of Expanded Perlite Aggregate on Cyclic Thermal Loading of HSC an Artificial Neural Network Modeling, *Sci. Iran.*, 2012, **19**(1), 41-50.
- [204] Firouzi A., Rahai A., An Integrated ANN-GA for Reliability Based Inspection of Concrete Bridge Decks Considering Extent of Corrosion-Induced Cracks and Life Cycle Costs, *Sci. Iran.*, 2012, **19**(4), 974-981.
- [205] Garson G.D., Interpreting Neural Network Connection Weights, *AI Expert*, 1991, **6**(4), 47-51.
- [206] Goh A., Back-propagation Neural Networks for Modeling Complex Systems, *Artif. Intell. Eng.*, 1995, **9**(3), 143-151.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Arslan A., **Öztürk B.**, Applicability of Fenton and photo-Fenton Processes to Combined Industrial and Domestic Wastewater, *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 2009, **23**(3), 317-322.



ÖZGEÇMİŞ

Betül ÖZTÜRK, ilköğrenimini İstanbul Medine Tayfur Sökmen İlköğretim Okulu, ortaöğrenimini Kadir Has Lisesinde tamamladı. 2003 yılında Cumhuriyet Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2007 yılında Kocaeli Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansını tamamladı ve doktora çalışmasına aynı yıl başladı. 2007 yılında Noba Teknoloji firmasında çevre mühendisi olarak çalıştıktan sonra 2010 yılında Denizli Çimento fabrikasında çevre mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2014 yılında aynı fabrikada çevre ve alternatif yakıt sorumlusu olarak görevine devam etti ve 2017 yılında Denizli Çimento Fabrikası'ndan ayrılarak Votorantim Cimentos Türkiye Grubuna Çevre Sorumlusu olarak başladı. Halen Votorantim Cimentos Türkiye Grubunda Çevre Müdürü olarak çalışmaya devam etmektedir.