

**T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**

**TERMİK SANTRALLERDE ELEKTROSTATİK
FİLTRE UYGULAMALARI VE VERİM ARTIRICI
YÖNTEMLER**

Yüksek Lisans Tezi

BARAN KURT

İSTANBUL, 2016

**T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ VE ÇEVRE YÖNETİMİ**

**TERMİK SANTRALLERDE ELEKTROSTATİK
FİLTRE UYGULAMALARI VE VERİM ARTIRICI
YÖNTEMLER**

Yüksek Lisans Tezi

BARAN KURT

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Hüseyin ÖZDEMİR

İSTANBUL, 2016

T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ VE ÇEVRE YÖNETİMİ

Tezin Adı: Termik Santrallerde Elektrostatik Filtre Uygulamaları ve Verim Artırıcı Yöntemler

Öğrencinin Adı Soyadı: Baran Kurt

Tez Savunma Tarihi: 26.05.2016

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğu Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanmıştır.

Doç.Dr. Nafiz ARICA
Enstitü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğunu onaylarım.

Yrd.Doç.Dr. Fehmi Görkem ÜÇTUĞ
Program Koordinatörü

Bu Tez tarafımızca okunmuş, nitelik ve içerik açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak yeterli görülmüş ve kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmzalar

Tez Danışmanı
Yrd.Doç.Dr. Hüseyin ÖZDEMİR

Üye
Yrd.Doç.Dr. Ömer Lütfi UYANIK

Üye
Doç.Dr. Hüseyin Kurtuluş ÖZCAN

Eşim Yasemin Cansuz Kurt ve doğacak yeğenim Zeynep Aren'e



TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca destek ve katkılarından dolayı danışmanım Yrd.Doç.Dr. Hüseyin ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Tez konusunu seçmem ile başlayan sürecin en başından itibaren desteğini her zaman yanımda hissettiğim, süreç içerisinde sayısız kere beni bilgi ve deneyimi ile yönlendiren, iş hayatı içerisinde aynı takımın parçası olmaktan gurur duyduğum Dr. Manfred Schmoch'a müteşekkirim.

Çalışmam boyunca beni destekleyen ve her zaman anlayış gösteren müdürüm Serhat Can'a ve iş paylaşımını konusunda desteklerini hep hissettiğim iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ortaokuldan itibaren her zaman yanımda olan, sadece tez çalışması sırasında değil her zaman yorumlarıyla, fikirleriyle bana destek olan ve yanımda yer alan Mert Ozan Tulaz'a ve manevi desteğini her zaman hissettiğim Mehmet Tanrıaşığı'na teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden hiç esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Hayatımda olduğu gibi burda da ayrı bir paragraf açmam gereken, onsuz bir hayatı düşünemediğim hayat arkadaşım Yasemin Cansuz Kurt'a, desteği ve sevgisi için teşekkür ederim.

İstanbul, 2016

Baran Kurt

ÖZET

TERMİK SANTRALLERDE ELEKTROSTATİK FİLTRE UYGULAMALARI VE VERİM ARTIRICI YÖNTEMLER

Baran Kurt

Enerji ve Çevre Yönetimi

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Hüseyin Özdemir

Mayıs 2016, 137 sayfa

Hava kirliliği, su kalitesi ve küresel ısınma konularında özellikle son zamanlarda gelişen toplumsal kaygı, fosil yakıt ile çalışan veya hava kirliliğine yol açan süreçlere sahip tesislerin sağlanması gereken çevresel kısıtlar konusunda baskı oluşmasına sebep olmaktadır. Fosil yakıt kullanan santrallerin doğaya yaydığı emisyonların başında gelen partiküler maddeler boyutuna göre sınıflandırılmakta ve genel olarak iki tip olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu parçacıkların kömür santrallerinde elektrostatik filtreler vasıtası ile tutularak atmosfere salımını engellenmektedir. Bu tez kapsamında bu filtreler incelenerek verimlilik artışı sağlamak amacı ile farklı operasyonel koşullar irdelenmiştir. İthal kömürü ile çalışan termik santral incelemesinde öncelikle farklı kömür kaynaklarının santral sistemine girişinin elektrostatik filtre performansı üzerindeki etkilerini görebilmek amacı ile farklı kömür ve kül analizi değerlerine sahip üç kaynak incelenmiş, elektrostatik filtre performansını toz direnci değeri üzerinden etkileyecek bir diğer parametre olan uçucu gaz sıcaklık değeri senaryo analizlerinde kullanılarak, bunların elektrostatik performansı üzerindeki etkisi gözlenmek istenmiştir. Hava ön ısıtıcısı tez kapsamında incelenen bir diğer sistem olmuştur. Bu sistem aracılığıyla uçucu gaza etki eden kaçak hava oranı için farklı operasyonel koşullar seçilerek, bu koşulların toplama verimi üzerindeki sonucu hesaplanmıştır. Yaratılan bu senaryolara ek olarak elektrostatik filtre içerisindeki koşullarda yaşanacak değişikliğin toplama verimi üzerindeki etkisini gözlemek amacı ile sırasıyla elektriksel alanlar devre dışı bırakılarak, temiz gaz toz konsantrasyonu değeri hesaplanmıştır. Elektriksel

alanların devre dışı kalması durumunda da incelenmiş olan yönetmeliklerin belirlediği limitler dahilinde toz konsantrasyonuna sahip olan senaryolar, santral enerji optimizasyonu açısından yorumlanarak, ileride yapılabilecek çalışmalara temel oluşturması amaçlanmıştır. Senaryolar sonucunda elde edilen tüm sonuçlar, ilgili ulusal ve uluslarası yönetmelikler çerçevesinde incelenerek uygunlukları gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Büyük Yakma Tesisleri, Elektrostatik Filtre, Uucu Gaz Sıcaklığı, Hava n Isıtıcı Kaağı



ABSTRACT

ELECTROSTATIC FILTER APPLICATIONS AND PERFORMANCE BOOSTER METHODS

Baran Kurt

Energy and Environment Management

Thesis Supervisor: Assistant Prof. Hüseyin Özdemir

May 2016, 137 pages

Social anxiety that recently developed, on air pollution, water quality and global warming; increase the pressure on thermal power plants or industrial facilities that cause air pollution to obey the environmental limitations. Particular matter that is one of the main emission supplied to the environment by thermal power plants, are grouped according to their size and they are categorized in two groups. At coal fired power plants, particular matter is kept by electrostatic filters and its dispersion to atmosphere is omitted. This thesis performs efficiency calculations for electrostatic filter and investigate different operational conditions. Different coal types for imported coal fired power plant, are firstly investigated in this thesis to observe different sources' effect on electrostatic precipitator by considering their coal and ash analysis results. Different flue gas temperatures that affect the electrostatic precipitator performance through different dust resistivity values, are selected as another operational data to create case studies. Air preheater system is selected as last operational data that can have different air leakage values for different operational regimes. In addition to these case studies, electrostatic filter inside effects are considered and possible electrical field outages are studied to see their effect on clean gas dust concentration. The cases that are still below the limits specified by related regulations, are considered as future study materials that may focus

on power plant optimization. All results are reviewed and challenged by both national and international regulations and their suitability is shown.

Keywords: Large Combustion Plants, Electrostatic Filter, Flue Gas Temperature, Air Pre-Heater Leakage



İÇİNDEKİLER

TABLolar	x
ŞEKİLLER	xiv
KISALTMALAR	xvii
SEMBOLLER	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1 PARTİKÜLER MADDE	6
1.2 ELEKTROSTATİK FİLTRE	11
1.2.1 Elektrostatik Filtre Operasyonu	11
1.2.1.1 Partikül yüklenmesi	11
1.2.1.1.1 Korona deşarjı	12
1.2.1.1.2 Gaz moleküllerinin iyonlaşması	13
1.2.1.1.3 Yüklenme	13
1.2.1.1.4 Elektriksel alan gücü	13
1.2.1.2 Partiküllerin toplanması	14
1.2.1.3 Partiküllerin kaldırılması	14
1.2.2 Elektrostatik Filtre Tipleri	15
1.3 TEZİN AMACI	23
2. LİTERATÜR TARAMASI	27
2.1 LİTERATÜR	27
2.2 YÖNETMELİKLER	35
3. METOD	43
3.1 ÇALIŞMA ALANI	43
3.2 ELEKTROSTATİK FİLTRE PERFORMANSI	52
3.2.1 Operasyonel Sabitler	54
3.2.2 Operasyonel Değişkenler	57
3.2.2.1 Yakıt bilgileri	57

3.2.2.2	Kül bilgileri	58
3.2.2.3	Diğer operasyonel değişkenler.....	59
3.2.3	Metodoloji ve Hesaplamalar	60
4.	BULGULAR.....	70
5.	SONUÇ.....	110
	KAYNAKÇA.....	112



TABLolar

Tablo 1.1: Avrupa Birliği ve Dünya Sağlık Örgütü partiküler madde seviyesi standart ve tavsiyerleri, Türkiye mevcut durumu.....	3
Tablo 1.2: Santral tipleri	5
Tablo 1.7: Fabrik filtre, elektrostatik toz tutucu farkları.....	10
Tablo 1.8: Sektörel kömür kullanımı	25
Tablo 2.1: Santral tip ve yakıtına göre emisyon seviyeleri	37
Tablo 2.2: Katı veya sıvı yakıt kullanan gaz türbini ve gaz makinası harici yakma tesisleri için emisyon değerleri (mg/Nm ³)	38
Tablo 2.3: Gaz türbini ve gaz makinası harici gaz yakıtı ile çalışan tesisler için emisyon değerleri (mg/Nm ³).....	38
Tablo 2.4: Katı veya sıvı yakıt kullanan gaz türbini ve gaz makinası harici yakma tesisleri için emisyon değerleri.....	39
Tablo 2.5: Gaz türbini ve gaz makinası harici gaz yakıtı ile çalışan tesisler için emisyon değerleri	39
Tablo 2.6: Taslak yönetmeliğe göre farklı santral tipleri için emisyon değerleri	40
Tablo 2.7: Katı yakıt kullanan yeni tesisler için emisyon değerleri	42
Tablo 2.8: Katı yakıt kullanan mevcut tesisler için emisyon değerleri.....	42
Tablo 3.1: Elektrostatik filtre teknik bilgileri	46
Tablo 3.2: Referans kömür özellikleri	56
Tablo 3.3: Zonguldak ili aylık ortalama sıcaklık değerleri	57
Tablo 3.4: Santral teknik bilgileri	57
Tablo 3.5: Yakıt bilgileri.....	58
Tablo 3.6: Kül bilgileri.....	59
Tablo 3.7: Toz direncinin elektrostatik filtre üzerindeki etkileri	63
Tablo 4.1: Senaryo analizleri operasyonel farklılıklar	70
Tablo 4.2: Sabit sıcaklık (120 °C) durumunda performans değerleri	71
Tablo 4.3: Sabit sıcaklık (125 °C) durumunda performans değerleri	72
Tablo 4.4: Sabit sıcaklık (130 °C) durumunda performans değerleri	72

Tablo 4.5: Sabit sıcaklık (135 °C) durumunda performans değerleri	73
Tablo 4.6: Sabit sıcaklık (140 °C) durumunda performans değerleri	74
Tablo 4.7: Sabit sıcaklık (120 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	75
Tablo 4.8: Sabit sıcaklık (125 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	76
Tablo 4.9: Sabit sıcaklık (130 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	77
Tablo 4.10: Sabit sıcaklık (135 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	78
Tablo 4.11: Sabit sıcaklık (140 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	79
Tablo 4.12: Sabit sıcaklık (120 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	80
Tablo 4.13: Sabit sıcaklık (125 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	81
Tablo 4.14: Sabit sıcaklık (130 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	82
Tablo 4.15: Sabit sıcaklık (135 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	83
Tablo 4.16: Sabit sıcaklık (140 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	84
Tablo 4.17: Sabit sıcaklık (120 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	85
Tablo 4.18: Sabit sıcaklık (125 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	86
Tablo 4.19: Sabit sıcaklık (130 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	87
Tablo 4.20: Sabit sıcaklık (135 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	88

Tablo 4.21: Sabit sıcaklık (140 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	89
Tablo 4.22: Kül yapısının toz direncine etkileri.....	91
Tablo 4.23: Referans dokümanlara göre uyulması gereken temiz hava toz emisyon değeri [mg/Nm ³].....	97
Tablo 4.24: “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterlerine göre normal çalışma şartları altında	98
Tablo 4.25: Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine göre normal çalışma şartları altında.....	99
Tablo 4.26: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre normal çalışma şartları altında	100
Tablo 4.27: “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterlerine göre bir elektriksel alanın devre dışı kalması durumu.....	101
Tablo 4.28: Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine göre bir elektriksel alanın devre dışı kalması durumu	102
Tablo 4.29: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre bir elektriksel alanın devre dışı kalması durumu	103
Tablo 4.30: “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterlerine göre iki elektriksel alanın devre dışı kalması durumu.....	104
Tablo 4.31: Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine göre iki elektriksel alanın devre dışı kalması durumu	105

Tablo 4.32: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre iki elektriksel alanın devre dışı kalması durumu.....	106
Tablo 4.33: “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterlerine göre iki farklı bölümde birer elektriksel alanın devre dışı kalması durumu	107
Tablo 4.34: Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine göre iki farklı bölümde birer elektriksel alanın devre dışı kalması durumu	108
Tablo 4.35: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre iki farklı bölümde birer elektriksel alanın devre dışı kalması durumu	109

ŞEKİLLER

Şekil 1.1: Kömür yakıtlı santral çalışma prensibi	6
Şekil 1.2: Partiküler madde boyutunun referanslara göre kıyaslanması	7
Şekil 1.3: Kuzey Amerika Ülkeleri emisyon bilgileri.....	9
Şekil 1.12: Boru tipi elektrostatik filtre.....	16
Şekil 1.13: Toplama plakaları ve deşarj elektrotları	17
Şekil 1.14: Elektrot tipleri	18
Şekil 1.16: Soğuk taraflı elektrostatik filtreler	20
Şekil 1.17: Sıcak taraflı elektrostatik filtreler	21
Şekil 1.18: Islak tip elektrostatik filtre	22
Şekil 1.19: Kuru tip elektrostatik filtreler	23
Şekil 1.20: Emisyon kaynağı özelinde karbondioksit eşlenik emisyon değerleri.....	24
Şekil 2.1: Elektrostatik filtre patent başvurusu	28
Şekil 3.3: Baca gazı sistemi	45
Şekil 3.4: Elektrostatik filtre üç boyut dizaynı.....	45
Şekil 3.5: Çekiçleme sistemi	47
Şekil 3.6: Toplama elektrodu sabitleme sistemi	47
Şekil 3.7: Deşarj elektrodu.....	48
Şekil 3.8: Çekiçleme şaftı	49
Şekil 3.9: Giriş kanalı.....	49
Şekil 3.10: Girişteki delikli plaka.....	50
Şekil 3.11: Yönlendirme plakaları	51
Şekil 3.12: Bunkerler	51
Şekil 3.13: Çıkış kapağı	52
Şekil 3.14: Zonguldak ili ortalama bağıl nem değeri.....	56
Şekil 3.15: Elektrostatik filtre boyutlandırması	67
Şekil 3.16: Elektrostatik filtre boyutlandırma diyagram gösterimi.....	68
Şekil 4.1: Sabit sıcaklık (120 °C) durumunda performans değerleri	71
Şekil 4.2: Sabit sıcaklık (125 °C) durumunda performans değerleri	72

Şekil 4.3: Sabit sıcaklık (130 °C) durumunda performans değerleri	73
Şekil 4.4: Sabit sıcaklık (135 °C) durumunda performans değerleri	74
Şekil 4.5: Sabit sıcaklık (140 °C) durumunda performans değerleri	75
Şekil 4.6: Sabit sıcaklık (120 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	76
Şekil 4.7: Sabit sıcaklık (125 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	77
Şekil 4.8: Sabit sıcaklık (130 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	78
Şekil 4.9: Sabit sıcaklık (135 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	79
Şekil 4.10: Sabit sıcaklık (140 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	80
Şekil 4.11: Sabit sıcaklık (120 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	81
Şekil 4.12: Sabit sıcaklık (125 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	82
Şekil 4.13: Sabit sıcaklık (130 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	83
Şekil 4.14: Sabit sıcaklık (135 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	84
Şekil 4.15: Sabit sıcaklık (140 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	85
Şekil 4.16: Sabit sıcaklık (120 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	86
Şekil 4.17: Sabit sıcaklık (125 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	87
Şekil 4.18: Sabit sıcaklık (130 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	88
Şekil 4.19: Sabit sıcaklık (135 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	89

Şekil 4.20: Sabit sıcaklık (140 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri	90
Şekil 4.21: Farklı hava ön ısıtıcı kaçağı değeri durumlarında	94
Şekil 4.24: Toz direnci-kükürt ilişkisi.....	96



KISALTMALAR

CEC	: Commission for Environmental Cooperation
DE	: Deşarj elektrodu
DeNO _x	: Azot oksit indirgeme tesisi
GW	: Gigavat
K	: Kelvin
Kg	: Kilogram
kJ	: Kilojul
kPA	: Kilopaskal
kV	: Kilovolt
kVA	: Kilovolt amper
mA	: Miliamper
MW	: Megavat
PM	: Partiküler madde
PM _{2,5}	: Partiküler madde 2,5
PM ₁₀	: Partiküler madde 10
SCA	: Özgöl toplama alanı
SCR	: Seçkili tezgensel indirgeme
SNCR	: Seçkili tezgensiz indirgeme
TEP	: Ton eşdeğer petrol
WPCA	: Worldwide Pollution Control Association

SEMBOLLER

Akım yoğunluğu	: J
Alan gücü	: E
Alan yüklemesi için zaman sabiti	: t
Alçak basınç türbini güç değeri	: W_{ABT}
Alt ısı değer	: H_u ve LHV
Azotoksitler	: NO_X
Bağıl gaz yoğunluğu	: dr
Besleme suyu pompası güç değeri	: W_{bs}
Cunningham düzeltme sayısı	: Cm
Deşarj elektrodu ile toplama elektrodu arasındaki mesafe	: b
Doyma süresi	: t
Doyma yükü	: q^∞
Elektrik akımı	: I
Elektriksel kuvvet	: E
Elektrod çapı	: rw
Elektrot ile toplama plakası arasındaki en kısa mesafe	: L
Elektrod yüzeyi korona başlama bölgesi	: E_c
Gaz akış oranı	: Q
Gaz basıncı	: P
Gaz hızı	: v_0
Gaz molekülleri ortalama serbest mesafesi	: λ
İyon mobilitesi	: μ
Karbondioksit	: CO_2
Karbonmonoksit	: CO
Kıvılcım alan gücü	: Es
Kolomb kuvveti	: F
Kondensat pompası güç değeri	: W_k
Korona başlangıç voltajı	: V_c

Kömür enerjisi	: $E_{kömür}$
Kömür tüketimi	: m
Kükürtdioksit	: SO _x
Maksimum akım yoğunluğu	: J
Migrasyon hızı	: $w\epsilon$
Mutlak sıcaklık	: T
Orta basınç türbini güç değeri	: W_{OBT}
Özgül geçirgenlik	: ϵ_s
Özgül toplama alanı	: f
Partikül çapı	: D
Pozitif yük	: q
Santral gücü	: P
Santral verimliliği	: $\eta_{santral}$
Türbinden gelen net mekanik güç	: W_{net}
Toplama elektrodu alanı	: A
Toplama verimliliği	: n
Toplayıcı yakınındaki yerel elektriksel alan	: E_p
Vakum geçirgenliği	: ϵ_0
Viskosite	: μ
Voltaaj	: V
Yanmamış karbon	: UC
Yükleci yakınındaki yerel elektriksel alan	: E_0
Yüksek basınç türbini güç değeri	: W_{YBT}

1. GİRİŞ

Hava kirliliği, su kalitesi ve küresel ısınma konularında özellikle son zamanlarda gelişen toplumsal kaygı, fosil yakıt ile çalışan veya hava kirliliğine yol açan süreçlere sahip tesislerin sağlanması gereken çevresel kısıtlar konusunda baskı oluşmasına sebep olmaktadır. Ülkelerin gelişmişlik seviyelerinin önemli göstergelerinden birisi olan kişi başına düşen enerji tüketim miktarı yükseltilmeye çalışılırken bu enerjinin ortaya çıkması sürecinde kullanılan enerji tesislerinin ortaya çıkardığı hava kirliliğine sebep olan atıklar azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu kapsamda enerji üretim tesisleri içerisinde çok önemli bir yere sahip olan fosil yakıt temelli enerji santralleri atıkları birincil sırada dikkate ve öneme sahip durumdadırlar.

International Energy Agency¹'nin yayınlamış olduğu 2014 tarihli “Key World Energy Statistics” raporuna göre 2012 yılında Dünya’daki birincil enerji tedariği olarak kömür yüzde 29, petrol yüzde 31, doğalgaz yüzde 21, nükleer yüzde 5 oranında pay alırken hidroelektrik yüzde 2, biyoyakıt ve atıklar yüzde 10, jeotermal, güneş, rüzgar gibi yenilenebilir enerji grubunda yer alan tesisler ise sadece yüzde 1 oranında pay almaktadır.

Enerji üretim tesisleri özelinde ise birincil yakıt tüketimi son 20 yıl içerisinde Dünya genelinde değişiklik arz etmektedir. Her ne kadar kömür en yaygın kullanılan kaynak olsa da, 1970 ile 1980 arası nükleer enerji tesisi kullanımı; 1980 ile 1990 arasında da doğalgaz kaynaklı üretim tesisi kullanımı büyük oranlarda artmıştır. Siyasi etkiler sebebiyle oluşan konjonktür dolayısıyla petrolün enerji üretim alanındaki kullanımı 1970’lerden itibaren pay kaybetmiş durumdadır. 2005 yılında Dünya enerji üretim tesisleri arasında yüzde 41 paya sahip olan kömürün aynı oranı 2030 yılında yüzde 46’ya çıkarması beklenmektedir. Bunun sebepleri arasında petrol ve doğalgazın yüksek fiyatı ve kömür zengini olan ülkelerin sayısındaki çoğunluk sayılabilir (Vardar ve Yumurtacı 2010, ss.243-252).

¹ Key World Energy Statistics. 2014.

http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2014.pdf [18, 04, 2016]

Bu oranlardan da anlaşılacağı üzere havadaki ana kirlilik kaynaklarından biri olan fosil yakıtlı tesisler hali hazırda enerji tedariki kapsamında çok baskın oranda kullanılmaktadır. Bu sebeple bu tesislerde kullanılan çevre kirliliğini azaltıcı öneme sahip alt tesislerin gelişimi ve kullanımı konusunda yoğun bir mesai harcanmakta ve bu tesislerin kullanımı sadece bilinçlenme üzerinden değil, yasalar nezdinde de zorunlu kılınmaktadır.

Fosil yakıt kullanan tesislerin insan sağlığı üzerindeki etkileri ile ilgili yapılan çalışmalar neticesinde, bu tesislerden yayılan kirleticilerin akciğer kanseri başta olmak üzere kanser, romatizma, bronşit, raşitizm, kalp hastalıkları, göz ile ilgili problemler, nefes darlığı, kan zehirlenmesi ve iştahsızlık gibi olumsuzlara yol açtığı görülmüştür (İlkılıç ve Behçet 2006, ss.66-72).

Hava kirliliğini oluşturan başlıca kirleticiler arasında karbondioksit (CO₂), karbonmonoksit (CO), kükürtoksitler (SO_x), azotoksitler (NO_x), partiküler madde (PM₁₀-PM_{2,5}), ağır metaller, uçucu organik karbonlar, kloroflorokarbonlar ve diğer kirleticiler yer almaktadır. Bu kirleticilerin yayımına sebep olan tesis veya kaynaklar üçe ayrılmaktadır;

- a. Enerji üretim tesislerini de içine alacak şekilde tek başına oldukça fazla kirliliğe sebep olan nokta kaynaklar
- b. Karayolları gibi ulaşım alternatiflerini içerecek şekilde çizgi kaynaklar ve
- c. Yaşam alanlarını içerecek şekilde alan kaynaklar.

Bu kaynakların yaymış olduğu kirlilik sebebi ile Dünya genelinde 7 milyon kişi erken ölüme maruz kalmaktadır, aynı rakam Avrupa Birliği ülkeleri için 400.000 kişi civarındadır. Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü'nün yapmış olduğu çalışmaya göre 2050 yılında dış ortam hava kirliliği, çevresel kaynaklı ölümlerin birincil nedenini oluşturacaktır². Aynı çalışma içerisinde yer alan oranlara göre Türkiye Avrupa Birliği seviyesi ve Dünya Sağlık Örgütü standart ve tavsiyelerini PM seviyesi açısından

² Sağlık ve Çevre Birliği. 2015. *Türkiye'de Hava Kirliliği ve Sağlık*. Şubat. Belçika.

tutturamamaktadır. Bu seviyeler Tablo 1.1’de özetlenmiştir (birimler ug/m³ cinsindedir).

Tablo 1.1: Avrupa Birliği ve Dünya Sağlık Örgütü partiküler madde seviyesi standart ve tavsiyeleri, Türkiye mevcut durumu

	PM _{2,5}	PM ₁₀
Türkiye	39	58
Avrupa Birliği	25	40
Dünya Sağlık Örgütü tavsiyesi	10	20

Kaynak: Türkiye’de Hava Kirliliği ve Sağlık raporu, 2015

Kömürün enerji üretim santrallerinde kullanımı sonucunda ortaya çıkan etkenlerin insan sağlığı üzerinde yarattığı etkilerin yanında, maden olarak topraktan çıkarımı ile başlayan ve en son santrallerde kullanımına kadar olan süreçte de doğaya ve canlılara önemli ölçüde olumsuz etkileri olmaktadır.

Kömür endüstrisinin çevrede yol açtığı etkiler toprak, su, atık ve hava etkileri ana başlıkları altında incelenebilir. Toprak altından kömür çıkarımı sırasında doğal çevre oldukça değişmekte ve bozulmakta, tarımsal alan olarak kullanılan bazı kömür bölgelerinde tarım yapılamamakta, bu çevrede yaşayan canlılar kömür madenciliğinin olumsuz etkilerine maruz kalmaktadırlar. Bu olumsuz örneklerden bir tanesi yakın tarihte Almanya’nın Kuzey Rhine-Westphalia bölgesinde yaşanmıştır. Bölgedeki yer altı madenciliğinin bir sonucu olarak maden çevresi bölgelerde çökme ve Richter ölçeğine göre 4 şiddetinde deprem çevre halk tarafından hissedilmiştir. Kömür kullanım sürecinin su üzerindeki etkisi de kömür hazırlama sürecinde kullanılan su kaynakları üzerinde özellikle görülmektedir. Açık tip maden işletmelerinde yüksek oranlarda su tüketimi gerekmektedir ve bu su, yüzeyden veya toprak altından tedarik edilmektedir. Madenlerde kullanılan su doğaya çok nadir ve küçük oranlarda geri dönüşüm gösterdiği için çevreye kalıcı etkisi olmaktadır. Kömür kullanımının çevrede oluşturduğu bir diğer olumsuz etki atık yönetimi sırasında ortaya çıkmaktadır. Her ne kadar bu atıklar farklı

endüstrilerde girdi olarak kullanılıyor olsada ve gelişen teknolojiler sayesinde miktarı azaltılmaya çalışılsa da, uçucu kül gibi kömür atığı maddelerin depolanmasında boş araziler kullanılmakta, bu da çevreyi olumsuz olarak etkilemektedir. Kömür kullanımının parçacık düzeyinde havaya olan etkisi yukarıdaki bölümde incelenmiş olmakla birlikte kümülatif olarak kömür atıklarının havaya olan en büyük etkisi küresel ısınma olarak belirtilebilir. Etkileri uzun vadede hissedilecek olan küresel ısınma, toplum sağlığı karşısında en büyük tehditlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün öngörülerine göre yılda 150.000 ölüm küresel ısınma kaynaklı gerçekleşmekte ve su baskınları-kuraklık gibi su temelli felaketlere yol açmaktadır.

Nokta kaynakların önemli bölümünü teşkil eden fosil yakıt temelli santraller enerji üretim tesisleri grubunun alt başlıklarından birisini oluşturmaktadır ve itici güç olarak buharı kullanan tesislerdir. Enerji üretim tesisleri farklı kriterlere göre sınıflandırılmaktadırlar. Bu kriterler;

- a. Durum
- b. Yakıt türü
- c. Kapasite
- d. Operasyon türü
- e. İtici güçtür.

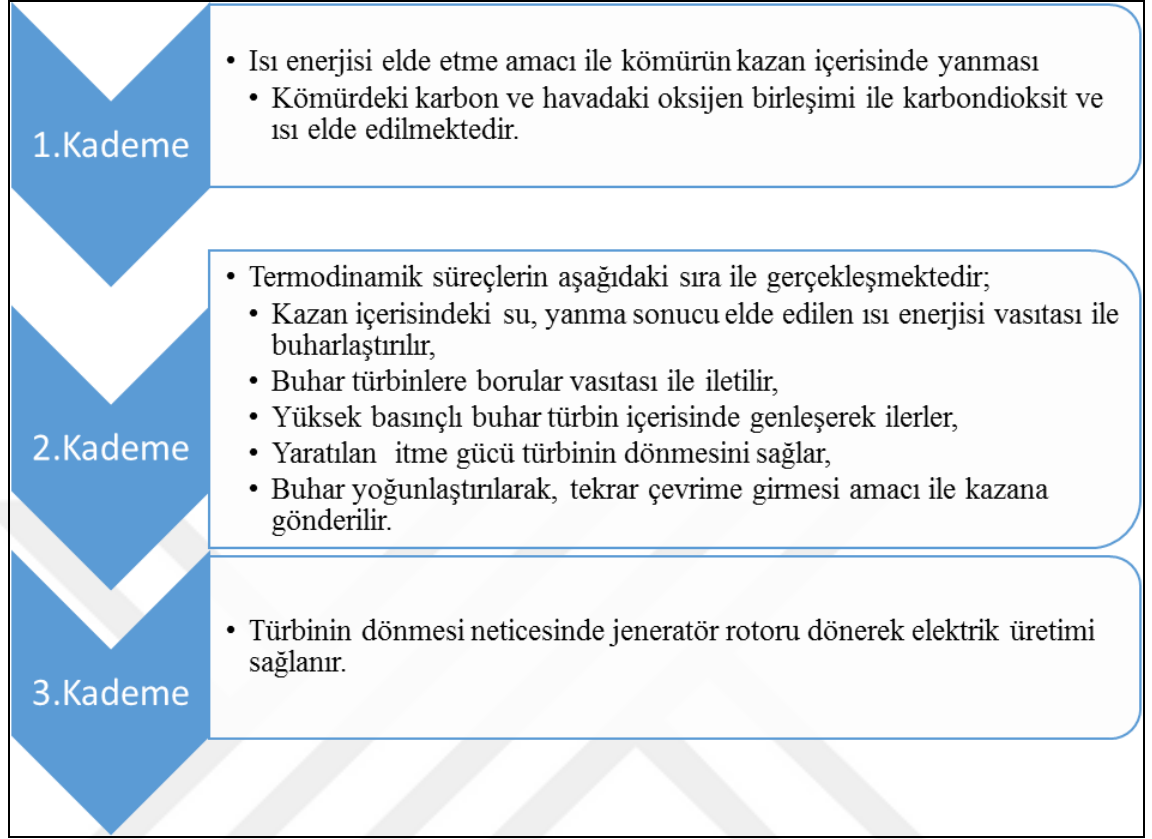
Bu sınıflandırmalara göre santraller Tablo 1.2'da gösterilmiştir.

Tablo 1.2: Santral tipleri

Santral Tipine göre			
Konvansiyonel		Konvansiyonel olmayan	
Buhar türbinli santrali		Rüzgar santrali	
Dizel santrali		Jeotermal santrali	
Buhar makinalı santral		Okyanus termik santrali	
Gaz türbinli santral		Dalga ve Gel-git santrali	
Hidroelektrik santrali		Güneş enerjisi santrali	
Nükleer santral		Biyogaz ve biyokütle enerji santrali	
Yakıt türüne göre santraller		Kapasitesine göre santraller	
Termik makina yakıtlı		Küçük santraller (< 5 MW)	
Nükleer yakıtlı		Orta ölçekli santraller (5-100 MW)	
Fosil yakıtlı		Büyük ölçekli santraller (101-1.000 MW)	
Jeotermal yakıtlı		Süper ölçekli santraller (> 1.000 MW)	
Yenilenebilir			
Operasyon türüne göre santraller		İtici gücüne göre santraller	
Baz yük santrali		Buhar türbini	Rüzgar türbini
Azami yük santrali		Gaz türbini	Kombine çevrim
Orta yük santrali		Su türbini	Termik makina

Yukarıda bahsedilen çevre kirliliğın ana sebeplerinden olan fosil yakıtlı santraller içerisinde konvansiyonel-fosil yakıt tipli enerji santrali sınıfında yer alan kömür santralleri bu tezin ana konusunu oluşturmaktadır. Bu amaçla öncelikle kömür yakıtı ile çalışan santrallerin çalışma prensibini incelenmek amacı ile Şekil 1.1 oluşturulmuştur.

Şekil 1.1: Kömür yakıtlı santral çalışma prensibi



Bu süreç sonucunda elde edilen atıklar, yukarıda da atıfta bulunduğu üzere gerek çevreye gerekse de canlı sağlığına etkisi sebebi ile önem arz etmektedir. Bu süreç sonucunda elde edilen atıklar, bunların kaynakları, etkileri ve kontrol altına alma esnasında kullanılan teknolojiler bölüm 1.1 ve 1.2’de verilmiştir.

1.1 PARTİKÜLER MADDE

Genel olarak gaz akışı içerisinde katı ve sıvı damlacıklara referans verilerek tanımlanıyor olsa da kömür temelli santrallerde en dikkat edilen atıkların başında gelen katı kül parçacıkları partiküler madde olarak değerlendirilmektedir.

Yakıtın yanması ile birlikte, yakıt içindeki inert mineral maddecikler küle çevrilmekte ve kazandan atık gaz ile dışarı atılmaktadır. Bu gaz eğer bir sistem vasıtası ile

yakalanmıyor ise atmosfere salınmaktadır. Kazan içerisinde yanmayan karbon da miktar olarak az olsa da bu madde içerisinde bulunmaktadır.

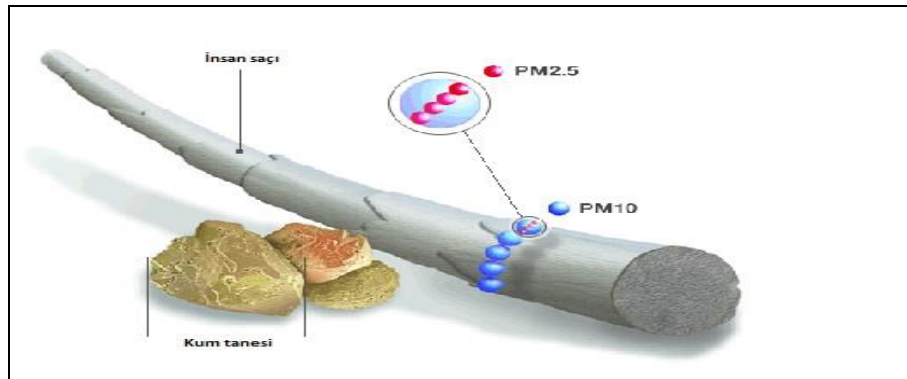
Doğalgaz harici tüm fosil yakıtların yanması sonucu belli miktarda ortaya çıkan partiküler madde, bu sebeple oldukça önem arz etmektedir. Partiküler madde etkisi konsantrasyonuna bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Işığın saçılımına neden olarak görüş alanında azalmaya, bina gibi yapıların görüntüsünde belli bir süre sonra değişikliğe veya yukarıdaki bölümde detaylandırıldığı üzere çeşitli hastalıklara neden olduğu bilinmektedir.

Dünya atmosferinde bulunan mikroskopik boyuttaki katı veya sıvı maddelerin arasında bulunan partiküler madde, volkan, toz fırtınası, orman yangınları gibi doğal olayların sonucunda oluşmakla birlikte fosil yakıtların yakılması sonucunda da elde edilebilmektedir. Boyutuna göre sınıflandırılan partiküler madde iki tip olarak karşımıza çıkmaktadır. Parçacığın çapının ölçüsüne göre değişen bu iki tip;

- a. $PM_{2,5}$
- b. PM_{10} 'dir.

Çapı 2,5 ile 10 mikrometre arasında değişen parçacıklar PM_{10} sınıfında değerlendirilirken, çapı 2,5 mikrometreden küçük olan parçacıklar $PM_{2,5}$ sınıfında değerlendirilir. Bu parçacıkların insan saçı ve kum tanesi referanslarına göre boyutlarının gösterimi Şekil 1.2'de yapılmıştır.

Şekil 1.2: Partiküler madde boyutunun referanslara göre kıyaslanması



Kaynak: United States Environmental Protection Agency, 2016

Bu parçacıklardan PM₁₀ genel olarak ezme veya taşlama/aşındırma faaliyetleri sırasında oluşan havada, araçlardan ve yoldan çıkan tozlar arasında yaygın olarak görülürken, PM_{2,5} her tür yakma faaliyetinden, motorlu araçlardan, santrallerden, odun yakma tesislerinden, orman yangınlarından, tarımsal yakma faaliyetlerinden ve bazı endüstriyel süreçlerden elde edilir.

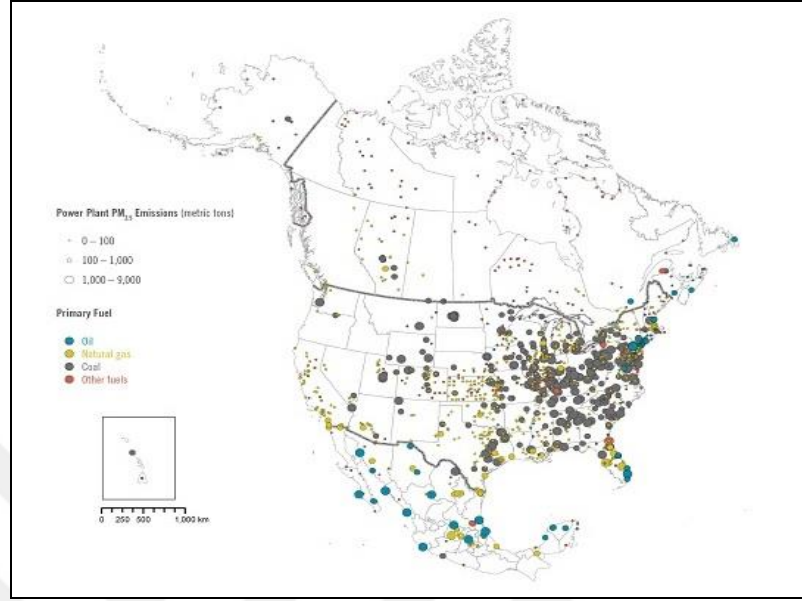
Hava kalite indeksi çevrimine göre etkisi PM₁₀'dan yüksek olan PM_{2,5} Dünya Sağlık Örgütü başta olmak üzere sağlık kurumlarının ve yasa düzenleyicilerinin partiküler madde açısından temel odak noktasını oluşturmakla birlikte, kirleticilerin etkisini düşürücü etkisi olacağından dolayı, genelde yanmamış kaynaklardan elde edilen PM₁₀ da hava kirletici arasında yerini korumaktadır.

“Commission for Environmental Cooperation” (CEC) komisyonunun yayınlamış olduğu 2005 yılı Kuzey Amerika’da yer alan ülkelerin yaymakta olduğu partiküler madde miktarları (PM_{2,5} ve PM₁₀ için ayrı olacak şekilde) ve bu maddelerin oluşmasına neden olan enerji üretim tesislerinin tipini gösteren Şekil 1.3’den de anlaşılacağı üzere kömür santralleri partiküler madde salınımında birincil kaynak olarak görülmektedir³. Bu örnekleme Dünya’nın geri kalan ülkelerinin birçoğu içinde geçerlidir.

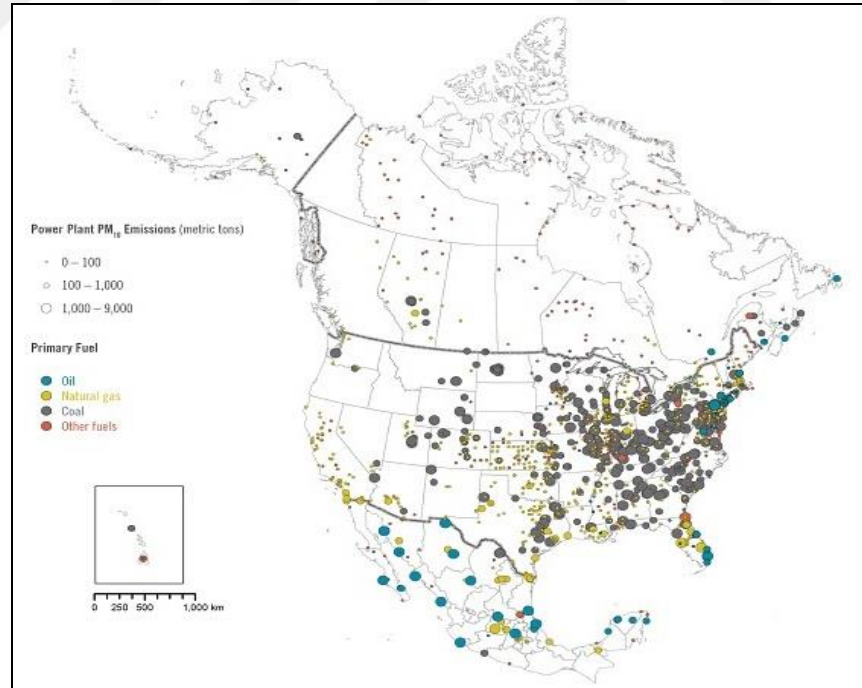
³ *Particular Matter Emission.* <http://www2.cec.org/site/PPE/content/particulate-matter-emissions-0>
[18.04.2016]

Şekil 1.3: Kuzey Amerika Ülkeleri emisyon bilgileri

a) PM_{2,5}



b) PM₁₀



Kaynak: Commission for Environmental Cooperation, 2005

PM emisyonu günümüzde kömür santralleri başta olmak üzere enerji üretim ve sanayi tesisleri özelinde iki metod kullanılarak engellenmektedir. Bu yöntemler;

- a. Fabrik filtreler ve
- b. Elektrostatik filtreler (toz tutucular).

Bu metodların ana karşılaştırma kriterlerine göre kıyası Tablo 1.3’de verilmiştir⁴;

Tablo 1.3: Fabrik filtre, elektrostatik toz tutucu farkları

	Fabrik Filtreler	Elektrostatik Filtreler
Metod	PM’in filtrelemesi	PM’in elektrostatik alan yardımı ile tutulması
Verimlilik	En yüksek yakalama verimi	Yüksek yakalama verimi
Reaksiyon maddesi	Kullanılmıyor	Kullanılmıyor
Tipik yakıt türü	Gaz yakıtlar	Katı yakıtlar
Yatırım miktarı	Yüksek	Yüksek

Kaynak: Control technologies to reduce conventional and hazardous air pollutants from coal-fired power plants, 2011

Fabrik filtreler veya diğer adıyla torba filtreler atık gaz içerisindeki maddeleri bacadan çıkmadan önce hapsederek emisyonu engellemektedir. Bu filtreler dokuma veya keçeli maddeden yapılmaktadırlar. Silindirik veya düz şekle sahip olan tipleri mevcuttur. Fabrik filtre sistemini tamamlayıcı özellikte olacak şekilde toz toplama bunkerleri ve toplanan tozu periyodik olarak temizleme mekanizmaları mevcuttur.

Fabrik filtrelerin kömür santrallerinden çıkan partiküler maddelerin toplamının yüzde 99,9’unu, PM_{2,5}’ün ise yüzde 99 ile yüzde 99,8 arasında değişen kısmını toplama kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir.

⁴ Staudt, E., J., 2011. *Control technologies to reduce conventional and hazardous air pollutants from coal-fired power plants*. Boston: USA.

1.2 ELEKTROSTATİK FİLTRE

Elektrostatik filtreler kazan vasıtası ile fosil yakıt kullanarak elektrik üreten tesislerin ve endüstriyel bazı tesislerin yaymakta olduğu partiküler madde tutumu esnasında yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Bu ekipmanlar yüksek gaz hacimleri içeren süreçlerde farklı giriş sıcaklığı, basınç değerleri, toz kütleleri ve asit gaz şartlarında verimli şekilde partiküler madde tutumu için kullanılmaktadırlar. Kuru veya ıslak durumdaki ve farklı boyuttaki partiküler maddeler elektrostatik filtre tipinin uygunluğuna göre verimli bir şekilde tutulmakta ve atmosfere yayımı engellenmektedir.

İlk elektrostatik filtre, fiziksel kimya profesörü Dr.Frederick Cottrell tarafından 1906 yılında ortaya çıkarılmıştır⁵. 11 Ağustos 1908 yılında ekipmanının patentini alarak, elektriksel alan içerisinde geçen hava içerisindeki yüklü partiküler madde (toz) parçacıklarını toplayarak ilk tanıtımını gerçekleştirmiştir. Bu süreçte ortaya atılan elektrostatik filtrelerin temelini oluşturan teori günümüzde de kullanılmaktadır.

1.2.1 Elektrostatik Filtre Operasyonu

1.2.1.1 Partikül yüklenmesi

Elektrostatik filtreler akış yönü içerisindeki tozu elektriksel güç kullanarak toplamaktadır. Gaz içindeki partiküller, elektrik yükü ile yüklenerek gaz iyonlarının akış içerisinde olduğu koronadan geçmektedirler. Yüklü parçacıkları kenarlarda bulunan duvarlara yönlendiren elektriksel alan, yüksek voltaj bulunduran akışın merkezinden gelmektedir.

Elektriksel alan içerisine giren toz parçacıkları negatif yük ile yüklenerek deşarj elektrotlarından toplama plakalarına doğru hareket etmektedir. Toplama plakalarına ulaşan yüklü toz parçacıkları nötralize olarak kül kümeleri oluşturmaktadır. Yüklü parçacıkların hareket ve toplanma süreçleri, partiküllerin direnci ve iki elektrod arasındaki elektriksel yüke bağlı olarak değişmektedir. Toplama plakalarında biriken

⁵ Purse, B. & Zbacnik, R. Power-eng. *Upgrading electrostatic precipitators.*

kül kümeleri mekanik çekiçler vasıtası ile periyodik olarak plakalardan ayrıştırılarak toplanmaktadır.

Deşarj elektrotları, toplama plakaları arasına her iki plakaya da eşit mesafede olacak şekilde yerleştirilmektedir. Toplama plakaları topraklanmış durumdadırlar. Negatif, yüksek voltajlı, titreşimli, direk akım; deşarj elektrotlarına uygulanarak negatif elektriksel alan oluşumu sağlanmaktadır. Bu elektriksel alan orta kısımda en güçlü seviyede iken plakalara doğru gidildikçe güç bakımından zayıflamaktadır. Bu sebeple deşarj elektrodu çevresinde partikül yüklenmesi en üst seviyededir⁶.

1.2.1.1.1 Korona deşarjı

Deşarj elektrotları çevresinde milisaniye süre aralığında birçok olay gerçekleşmektedir ve bu çevrede mavi renkli olarak görülen “korona deşarjı”, uygulanan voltajın artırılmasının bir sonucudur.

Bu korona tarafından yaratılan serbest elektronlar, negatif yüklü elektrik alanına doğru hızlıca yönelmektedirler. Deşarj elektrotundan uzaklaştıkça hızları artmakta ve hız artışı gaz moleküllerine çarpmalarına sebep olmaktadır. Bu çarpma sonucunda, elektronlarını kaybeden gaz molekülleri pozitif yük ile yüklenerek pozitif iyon halini almaktadırlar. Bu olay deşarj elektrodu çevresinde defalarca tekrarlanarak, daha fazla serbest elektron ve pozitif yüklü iyon oluşmasına neden olmaktadır. Bu elektron üretim aktivitesine çığ çarpımı denmektedir.

Elektronlar gaz moleküllerine çarparak ek iyonlaşmış moleküller oluşturmaktadırlar. Pozitif iyonlar ise negatif deşarj elektrotlarına doğru geri çekilmektedirler. Bu moleküller elektronlardan katlarca büyük boyuta sahiptirler ve bunun sonucu olarak yavaş hareket etmekle birlikte zamanla hızlanmaktadırlar. Aslında, bunların çoğu metal deşarj elektrotlarına veya kablo etrafındaki gaz boşluğuna çarparak ek elektronların kopmasına neden olmaktadır. Bu fenomene ikincil emisyon denmektedir.

⁶ Electrostatic precipitator operation.
[https://www.neundorfer.com/FileUploads/CMSFiles/ESP%20Operation\[0\].pdf](https://www.neundorfer.com/FileUploads/CMSFiles/ESP%20Operation[0].pdf) [12.04.2016]

1.2.1.1.2 Gaz moleküllerinin iyonlaşması

Deşarj elektrotları çevresindeki güçlü elektriksel alanı terk eden elektronlar, hız kaybetmektedirler. Ara elektrot alanı olarak tanımlanan bu bölgede, deşarj elektrotları tarafından itilen elektronların yanında gaz molekülleri de bulunmaktadır. Elektronlar ile ilk alandakine benzer şekilde çarpışma yerine, onları ele geçirerek; gaz moleküllerinin negatif yük ile yüklenmesine ve negatif gaz iyonları oluşmasına neden olmaktadır. Negatif yüklü iyonlarda güçlü elektriksel alandan uzaklaşmaya çalışmaktadırlar. Bu sayede deşarj elektrotları çevresinde ve ara elektrot alanında iyonlaşan gaz molekülleri bulunmaktadır. Fakat deşarj elektrodu yakınındaki iyonlar pozitif yüklü ve o alanda kalmaya meyilli iken; ara bölümdeki iyonlar negatif yüklü ve toplama elektrotlarına doğru yönelmektedirler.

1.2.1.1.3 Yükleme

Negatif gaz iyonları toz parçacıklarının toplanmasında kilit rol oynamaktadırlar. Toz parçacıklarının toplanmasından önce negatif yük ile yüklenmeleri gerekmektedir. Toz parçacıklarının izledikleri yol üzerinde karşılaştıkları negatif yüklü iyonlar, bu parçacıklara yapışarak boyutları arasında çok fazla fark olmasına rağmen bir süre sonra bu parçacıkların negatif yük ile yüklenmesine neden olmaktadır. Yeteri kadar negatif yük ile yüklenen parçacık daha fazla negatif iyonu bünyesine katamadığında doyma yükü'ne erişmekte ve elektrostatik alanın ilgisine doğru çekilmektedir.

1.2.1.1.4 Elektriksel alan gücü

Ara elektrot bölgesinde, negatif gaz iyonları, topraklanmış toplama elektrotlarına doğru yönelmektedirler. Negatif gaz iyonlarının sabit konsantrasyonundan oluşan boşluk yüklenmesi, elektrostatik filtreye uygulanan yüksek elektrik alan neticesinde ara elektrot bölgesinde oluşmaktadır.

Uygulanan voltajın artırılması alan gücünü ve iyon oluşumunu artırmaktadır. Bu artış kıvılcım oluşuna kadar devam etmektedir. Deşarj elektrotu ile toplama elektrodu arasında gerçekleşen bu olay iki elektrot arasında aniden oluşan elektriksel akımı ifade

etmektedir. Kıvılcım oluşması elektriksel alanın kısa süreli çökmesi anlamına gelmektedir.

Elektrostatik filtre kıvılcım oluşmasına neden olacak kadar yüksek voltaj değerlerinde çalışmalıdır. Ancak bu kıvılcımların sıklığının sürekli olmasının yanında, elektriksel alanın düzenli olarak çökmesi anlamına gelecek sıklıkta da olması engellenmelidir. Her durum özelinde değişmekle birlikte optimum kıvılcım oluşum sayısı dakikada 50 ile 100 arasında olmalıdır. Bu kıvılcımların oluşturduğu yüksek voltajın yarattığı verimlilik artışı, elektriksel alanın zaman zaman çökmesi sonucu gaz iyonlaşmasındaki azalışı kompanse edebilmektedir.

1.2.1.2 Partiküllerin toplanması

Yüklü partiküllerin topraklanmış toplama elektroduna temas etmesi ile parçacıklar kısmi olarak deşarj olmaktadır. Yük akışı yavaş bir şekilde topraklanmış toplama plakası üzerinden gerçekleşmektedir. Partikül üzerinde kalan kısmı yük ara moleküler adhesif ve kohesif güçlere katkıda bulunarak partiküllerin plaka üzerinde kalmasına yardımcı olmaktadır. Adhesif yükler partiküllerin birbirine fiziksel olarak tutunmasını sağlarken, kohesif yüklerde yeni parçacıkların toplama plakalarına yapışmasına yardımcı olmaktadır.

1.2.1.3 Partiküllerin kaldırılması

Toplama elektrodu üzerinde belli kalınlığa ulaşan toz kümesinin toplama elektroduna bağlı olacak şekilde belli proseslerden geçerek kaldırılması sağlanır. Tüp şeklindeki toplama elektrotları genelde su spreyi yöntemi ile temizlenirken, plaka şeklinde olanlarda ise benzer yöntem veya çekiçleme yöntemine başvurulur tozdan arındırılma yapılmaktadır.

Çekiçleme yönteminde kuru partiküller, toplama elektrotlarından plakalara gönderilen mekanik sinyal veya titreşim vasıtası ile kaldırılır. Periyodik olarak çekiçlenen plakalar elektrostatik filtre çalışır durumda iken plakaları tozdan arındırmaktadır. Bu çekiçleme

frekansı, baca gazı içerisindeki toz konsantrasyonuna göre değişmektedir. Yöntemden de anlaşılacağı üzere yüksek konsantrasyonlu baca gazı daha sık çekilenmelidir.

Yerinden oynatılan/düşürülen toz kümesi bunker adı verilen depolara düşerek, konveyörler vasıtasıyla taşınmaktadır.

Spreyleme yöntemi ile toz temizleme sistemine ait filtrelerde sulama sonucu oluşan çamurumsu yapı, alt kısımda bulunan depoda biriktirilerek daha sonra uygun arıtma işlemlerinden geçeceği ünitelere aktarılır.

1.2.2 Elektrostatik Filtre Tipleri

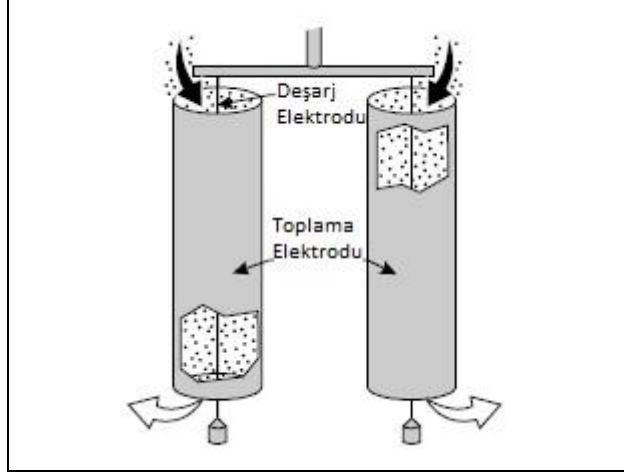
Birçok farklı kaynaktan benzer şekillerde sınıflandırılan elektrostatik filtreler; farklı gruplara göre kategorilere ayrılmaktadır;

- a. Yapısal dizayn ve deşarj elektrotlarına göre
- b. Yükleme metodlarına göre
- c. Operasyon sıcaklıklarına göre
- d. Toplama plakalarından partikül ayrıştırma yöntemlerine göre.

1. Boru ve plaka tipi elektrostatik filtreler

Boru tipi elektrostatik filtreler silindirik şekilde toplama elektrotları ve bu silindirlerin merkezinde yer alan deşarj elektrotlarından oluşmaktadır. Partikül içeren kirli hava, boruların içinden geçerken yüklenmekte ve boruların iç yüzeyindeki duvarlar tarafından tutulmaktadır. Bu duvarlarda tutulan toz partikülleri boruların yukarısında yer alan spreylili su sistemi ile yıkanarak toplanmaktadır. Şekil 1.4'de gösterilen boru tipi elektrostatik filtreler silindirik şekillerinin yanında kare, altıgen şeklinde de bulunmaktadır.

Şekil 1.4: Boru tipi elektrostatik filtre

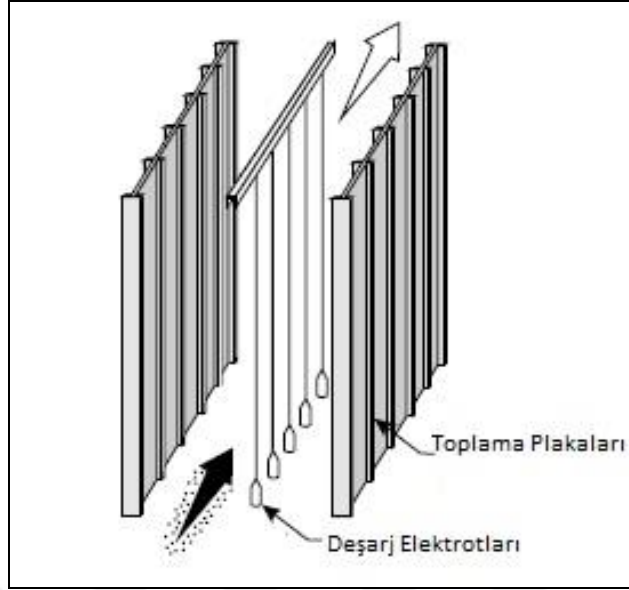


Kaynak: Elektrostatik filtre tipleri

Boru tipi elektrostatik filtreler genelde sis veya duman esnasında, toplanan partikülün nemli veya yapışkan olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Kullanıldığı sektörler arasında; sülfürik asit santralleri, pişirme fırınları, demir ve çelik sinter santralleri yer almaktadır.

Plaka tipi elektrostatik filtreler ise genel olarak kuru partikülleri toplama da kullanılmaktadırlar ve boru şeklindeki filtrelere göre daha yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Plaka tipi elektrostatik filtreler kablo, esnek olmayan çerçeve veya plaka tipi deşarj elektrotlarına sahip olurlar. Plaka tipi elektrostatik filtrelerde kirli hava sıralı şekilde, eşit mesafelerle dizilmiş deşarj elektrotlarının olduğu bölüme girerler ve elektriksel alanda yüklendikten sonra belli aralıklarla temizlendikleri toplama plakalarına yönelirler. Bu plakalar ve deşarj elektrotları Şekil 1.5’de gösterilmiştir.

Şekil 1.5: Toplama plakaları ve deşarj elektrotları



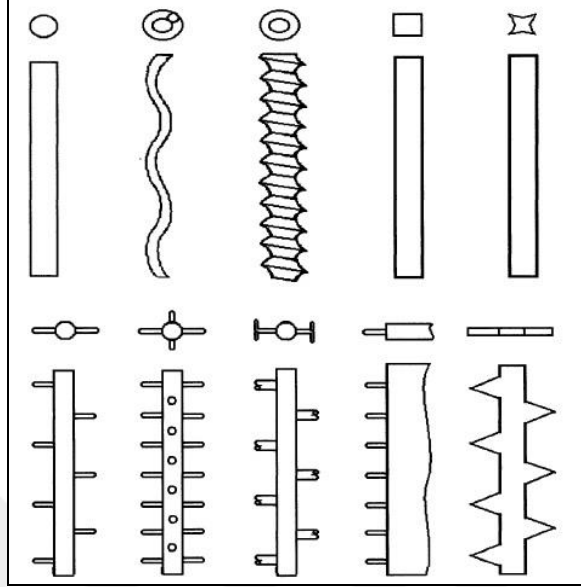
Kaynak: Elektrostatik filtre tipleri

Plaka tipi elektrostatik filtrelerde kullanılan deşarj elektrodu tipleri “Electrode Geometry Effects on the Collection Efficiency of Submicron and Ultrafine Dust Particles in Wire-Plate Electrostatic Precipitators” makalesinde aşağıdaki Şekil 1.6’daki gibi özetlenmiştir⁷.

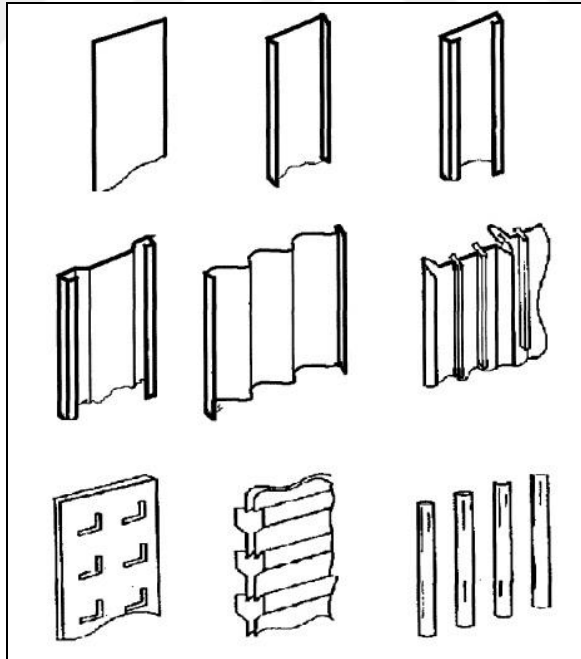
⁷ Brocilo, D., (2003). Electrode geometry effects on the collection efficiency of submicron and ultrafine dust particles in wire-plate electrostatic precipitators. *Thesis for PhD Degree*. Canada: McMaster University

Şekil 1.6: Elektrot tipleri

a. Deşarj



b. Toplama



Kaynak: Electrode Geometry Effects on the Collection Efficiency of Submicron and Ultrafine Dust Particles in Wire-Plate Electrostatic Precipitators, 2003

Plaka tipi elektrostatik filtreler genel olarak endüstriyel tesislerde uçucu külü toplama amacı ile kullanılmaktadırlar.

2. Tek ve çift kademeli elektrostatik filtreler

Gaz akışı içerisinde partikülleri ayırmak için yapılan yükleme ve ayırma işlemleri sırasında kullanılan kademe sayısı da filtreleri gruplamada kullanılan bir diğer yöntemdir. Tek kademeli filtreler yüksek voltaj kullanarak partikülleri yüklerken aynı hazne içerisinde ters yük sayesinde partikülleri toplama plakalarında toplayabilmektedir. İki kademeli filtrelerde ise bir hazne içerisinde partiküller düşük voltaj ile yüklenirken, ters yük ile yüklü ikincil bir haznede toplanmaktadırlar.

Kazan ve endüstriyel tesislerde partikül emisyonunda kullanılan birçok filtre tek kademeli elektrostatik filtre kategorisindedir. Bu tip filtreler oldukça yüksek voltaj değerleri kullanarak partikülleri yüklemektedirler (50-70 kV). Yüklenen partikül, gaz akış yönüne dik olacak şekilde harekete geçerek ters yük ile yüklü toplama yüzeyine yönelmektedir. Bu yüzey plaka veya boru tipi olabilmektedir. Partiküllerin yüklenmesi ve toplanması aynı hazne içerisinde tek seferde gerçekleştiğinden, bu tip filtrelere tek kademeli elektrostatik filtre adı verilmektedir.

İki kademeli elektrostatik filtreler ise dizayn ve kullanılan voltaj yükü açısından tek kademeli elektrostatik filtrelerden oldukça farklı bir yapıya sahiptir. İki kademeli elektrostatik filtreler birbirinden ayrı partikül yükleme ve toplama kademelerine sahiptirler. İyonlaşma aşaması seri şekilde birbirine bağlı, pozitif yüklenmiş eşit aralıklara sahip kablolardan oluşmaktadır. Her bir kablo ve onunla bağlantılı tüp arasında meydana gelen korona deşarjı, partikülün yüklenmesini sağlamaktadır. Kablolara uygulanan direk akım değeri 12 ile 13 kV arasında değişmektedir.

İkinci kademe ise paralel olarak yerleştirilmiş bir çok metal plakadan oluşmaktadır. Pozitif yük ile yüklenen parçacıklar bu kademedeki negatif yüklü plakalar tarafından tutulmaktadır.

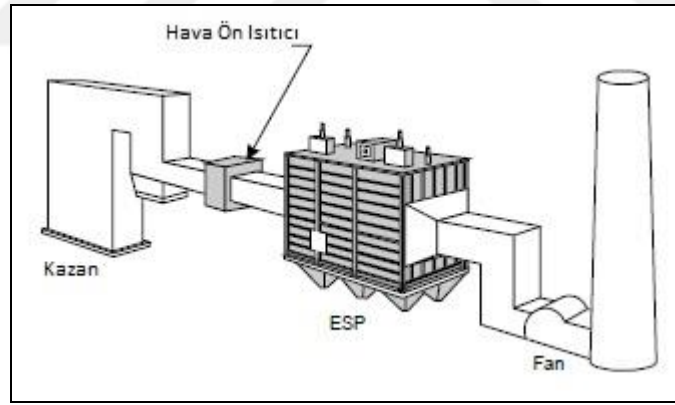
İki kademeli elektrostatik filtreler genel olarak hava arıtım tesislerinde kullanılmaktadır.

3. Soğuk ve sıcak taraflı elektrostatik filtreler

Elektrostatik filtreye giriş yapan gazın sıcaklığına göre de gruplandırılan filtreler; 204°C ve altı giriş gaz sıcaklığına sahiplerse soğuk; 300 °C ve üstü giriş sıcaklığına sahiplerse sıcak taraflı elektrostatik filtre olarak değerlendirilmektedirler. Sıcak ve soğuk taraflı filtreleri bir diğer kıyaslama şekli de hava ön ısıtıcı konumudur. Soğuk taraflı filtreler hava ön ısıtıcının arkasına yerleştirilirken, sıcak taraflı filtreler hava ön ısıtıcının ön kısmına yerleştirilmektedirler.

Soğuk taraflı elektrostatik filtreler 50 yılı aşkın bir süredir endüstriyel tesislerde kullanılmaktadır ve genel olarak partikülleri toplama amacıyla plakaları kullanılmaktadırlar. Sıcak taraflı elektrostatik filtrelere göre daha yüksek sıcaklıklarda kullanıldıklarından dolayı içlerinden geçen gaz miktarı daha düşük hacimdedir. Bu da kullanılan elektrostatik filtrenin görece olarak daha küçük olmasına yol açmaktadır. Sıcak ve soğuk taraflı filtre tipleri Şekil 1.7 ve Şekil 1.8’de gösterilmiştir.

Şekil 1.7: Soğuk taraflı elektrostatik filtreler

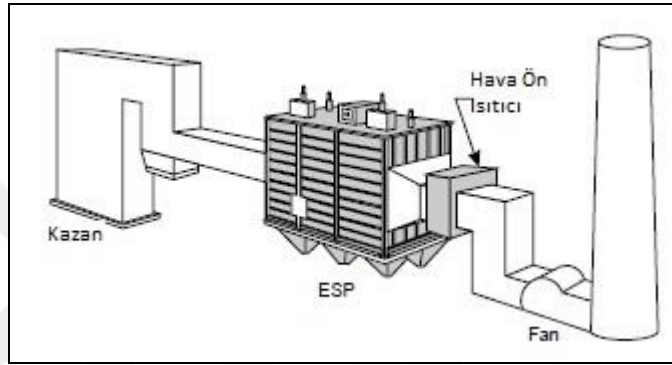


Kaynak: ESP

Sıcak taraflı elektrostatik filtrelerde ise toplama elektrotları boru veya plaka şeklinde olabilmektedir. Bu tip filtreler çimento fabrikaları veya kazan tipi yüksek sıcaklıkta gerçekleşen uygulamalarda tercih edilmektedirler. Bu tip filtreler hava ön ısıtıcıdan önce kullanılmaktadırlar ve içlerinden geçen hava yaklaşık olarak 320 ile 420 °C arasındadır.

Sıcak taraflı elektrostatik filtre kullanımı aşınma ve bunker tıkanmasını engellemektedir. Kömür santralleri ve benzer tesislerde kullanılan bu filtrelerin dezavantajlarından bir tanesi yüksek hacimlerdeki gazlar ile uğraşmalarıdır. Bu da kullanılan elektrostatik filtrenin hacim olarak daha büyük olmasına neden olmaktadır. Sıcak gaz kullanımının yol açtığı bir diğer olumsuz yönde yapıda meydana gelen termal genişlemedir.

Şekil 1.8: Sıcak taraflı elektrostatik filtreler



Kaynak: ESP

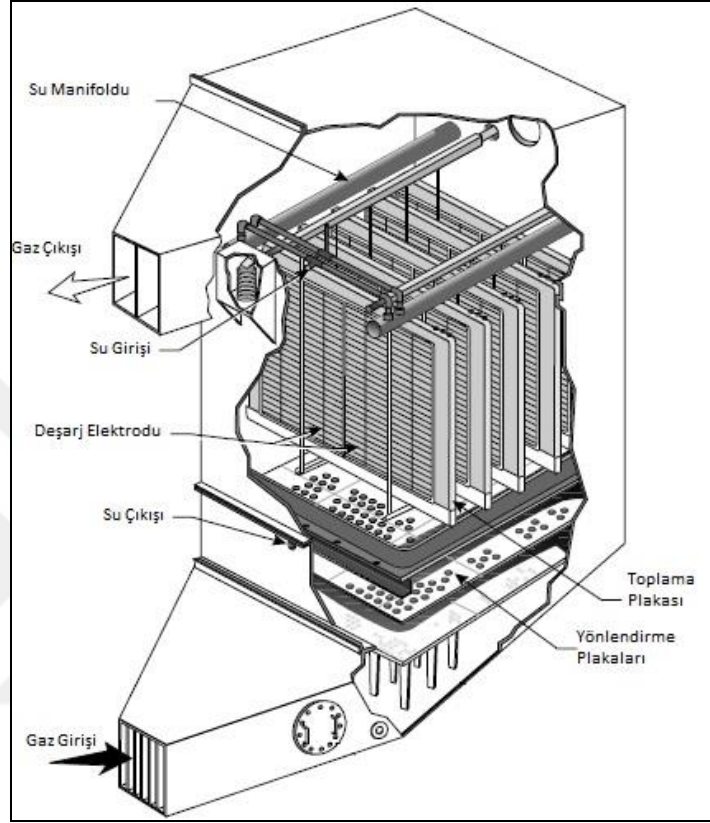
Yüksek sülfür (kükürt) içeren kömür kazanlarında uzun yıllar boyunca kullanılan soğuk taraflı filtreler, düşük sülfür içerikli kömürün kullanılmaya başlanmasıyla 1970'li yıllarda yerini sıcak taraflı filtrelere bırakmıştır. Düşük sülfür içerikli kömürlerin ortaya çıkardığı uçucu gaz yüksek dirence sahip olmakta, bu da onların toplanma işlemini daha zorlaştırmaktadır. Sıcak ortamların dirence olumlu yönde etkisi olduğundan dolayı, sıcak taraflı filtre kullanımı son yıllarda oldukça artmıştır.

4. Islak ve kuru elektrostatik filtreler

Patlama riskinin bulunduğu veya toz partikülünün yapışkan veya yüksek direnç değerine sahip olduğu durumlarda ıslak tip elektrostatik filtre kullanımı yaygındır. Toplama plakalarından tozu temizlemek amacı ile su, sürekli olarak veya belli aralıklar ile kullanılabilir. Bu tip filtrelerin avantajları arasında çekiçleme sisteminin yaratacağı problemlere veya koronaya yol açmaması sayılabilir.

Şekil 1.9’de gösterilen düz plaka tipli ıslak elektrostatik filtrede toplanmış parçacıklar yukardan akıtılan su vasıtası ile eğimli toplama haznesine akmaktadır.

Şekil 1.9: Islak tip elektrostatik filtre



Kaynak: Wikipedia

Kuru tip elektrostatik filtrelerde toplanan partikülleri ayrıştırmak amacı ile çekiçleme sistemi kullanılmaktadır. Kuru tip filtre denmesinin sebebi partiküllerin yüklenme ve toplanması safhaları kuru ortamda gerçekleştiğinden ötürüdür.

Bu tip elektrostatik filtreler kazanlardan, çimento sektörüne ve fosil yakıtlı santrale kadar çok geniş bir kullanım ağına sahiptirler ve çeşitli örnekleri Şekil 1.10’da gösterilmiştir.

Şekil 1.10: Kuru tip elektrostatik filtreler



1.3 TEZİN AMACI

2004 yılında Türkiye tarafından imzalanan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve 2009 yılında imzalanan Kyoto Protokolü ışığında Türkiye’de kömür ile çalışan enerji santralleri başta olmak üzere kirlenici üreten tesisler ile ilgili emisyon yönetmeliklerinde değişikliğe gidilmiştir. Yeni yönetmeliklerin oluşturulmasında tek etken imzalanan ve taraf olunan anlaşmalar değil aynı zamanda kısa sürede artan fosil ve benzeri yakıtların çevreye vermiş olduğu zararın canlı sağlığı üzerindeki etkilerinin toplum nezdinde daha bilinir hale gelmesi ve bunlara karşı bir tepkinin oluşmasıdır.

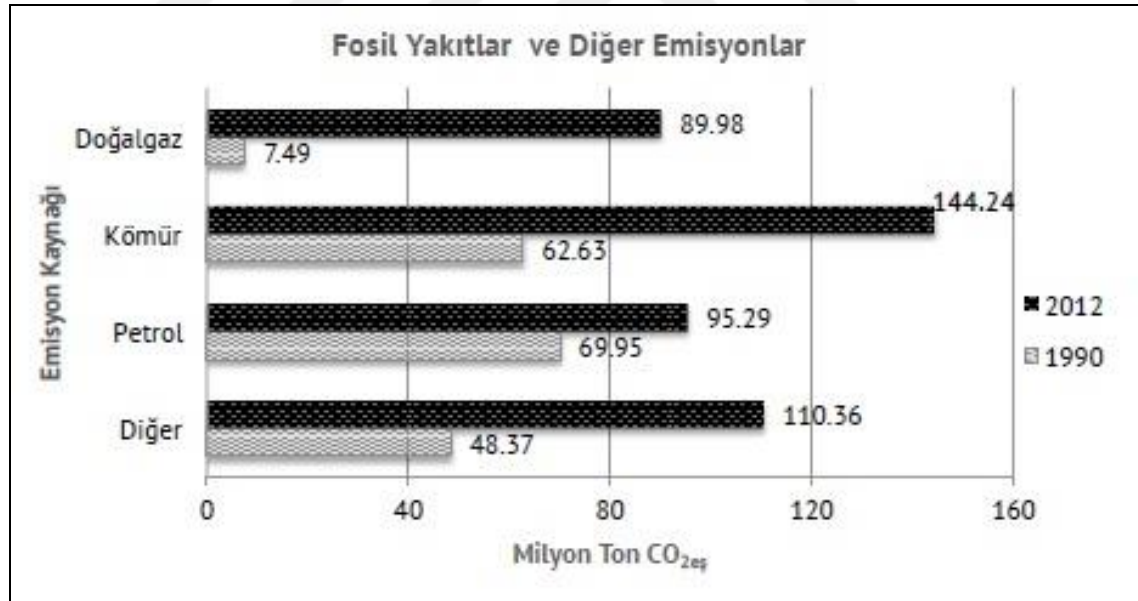
1990 yılında 53 milyon ton eşdeğer petrol (TEP) olan enerji tüketimi 2012 yılında 121 milyon TEP’e yükselmiştir. Bu artışın en önemli sebepleri arasında fosil yakıtların kullanımındaki artış sayılabilir. Yine benzer şekilde 1990 yılında 43,1 milyon TEP olan fosil yakıt kaynaklı enerji tüketimi 2012 yılına gelindiğinde 108 milyon TEP’e

yükselmiştir. Enerji tüketimi bu yıllar arasında yüzde 128 artış gösterirken, fosil yakıtlı enerji tüketimi ise yüzde 152 artış göstermiştir⁸.

Bu enerji artışını karşılamak amacı ile yerli kömüre ek olarak ithal kömür ile çalışan termik santrallerinin sayısı son yıllarda hızla artış göstermiştir. 2012 yılında 3,9 gigavat (GW) olan ithal kömür ile çalışan termik santral kurulu gücü 2014 yılında 6,1 GW'a ulaşmıştır.

Kömür kullanımında görülen bu artışın emisyon değerlerinde kendisini göstermesi de beklenen bir sonuç olmuştur. 1990 yılına kıyaslandığında Türkiye'nin kömür kaynaklı emisyon salınımı 2012 yılında yüzde 130 kat artış göstermiştir. Şekil 1.11'de bahsedilen yıllar için emisyon kaynağı özelinde karbondioksit eşleniğinde emisyon değerleri verilmiştir;

Şekil 1.11: Emisyon kaynağı özelinde karbondioksit eşlenik emisyon değerleri



Kaynak: Kömür sektör raporu, 2012

⁸ Algedik, Ö., 2015. *Kömürü finanse etmek*.

Kömürün kullanıldığı sektörler incelendiğinde de enerji sektörü büyük farkla birinciliği elinde tutmaktadır. 2012 yılı verilerine göre kömürün kullanıldığı ve kömürden elde edilen enerjinin kullanıldığı sektörlerin oranı Tablo 1.4’da verilmiştir;

Tablo 1.4: Sektörel kömür kullanımı

	Milyon ton	Payı [%]	Milyon TEP	Enerji payı [%]
Elektrik santralleri	68	63	17,16	45
Konut ve Hizmetler	19,8	18	10,08	27
Sanayii ve Diğer Sektörler	18,64	17	9,31	25
Kok Fabrikaları ve Kayıp	1,55	1	1,40	4
Genel Toplam	108,802		37,978	

Kaynak: Kömür sektör raporu, 2012

Ülkemizde yürürlükte olan Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği ve 2019 yılında uygulamaya girecek olan Büyük Yakma Tesisleri Yönetmeliği’ne göre enerji üretim santrallerinin emisyon değerleri inceleme altına alınmış ve imzalanan anlaşmalar ışığında da Avrupa Birliği normlarına ulaşmak amaçlanmıştır.

Yukarıda bahsedilen yönetmelikler çerçevesinde sınırlandırılması planlanan kömür emisyonları yıllar içerisinde enerji tüketimindeki artışa paralel olarak artış göstermektedir. Kömür kaynaklı karbondioksit emisyonu 1990 yılından itibaren istisnai birkaç yıl hariç sürekli artış göstermiştir.

Kömür kaynaklı emisyon değerlerini sektörel bazda incelememiz gerekirse; elektrik ve ısı üretimi sonucunda ortaya çıkan kömür kaynaklı emisyon miktarının yine istisnai yıllar haricinde sürekli artış göstererek sanayi ve inşaat veya konut kullanıma kıyasla daha fazla emisyon yaydığını görebilmekteyiz.

Türkiye’de yukarıda verilen bilgiler ışığında son yıllarda oldukça artış gösteren ve yatırımcıların önümüzdeki yıllarda da yöneleceğinin öngörüldüğü ithal kömür tüketerek enerji üretimi sağlayan termik santrallerin son yıllarda yeni yönetmelik çerçevesinde takibi yapılan toz emisyon değerleri bu tez çalışması içerisinde incelenmiştir.

615 megawatt (MW) kurulu güç kapasitesine sahip 2 üniteden oluşan, ithal kömür ile çalışan pulverize kazan kullanarak elektrik üretimi sağlayan kömür santralinde farklı kömür özelliklerine ve farklı elektrostatik filtre operasyon değerlerine göre (farklı elektrostatik filtre gaz giriş sıcaklığı ve farklı hava ön ısıtıcı sızıntı oranları) toz emisyon hesaplamaları yapılarak, farklılık gösteren etkenlerin toz emisyonu üzerinde etkisi bu tez kapsamında incelenerek, söz konusu santralin teorik olarak hesaplanan emisyon değerlerinin yönetmelikler kapsamında uygunluğu irdelenmiştir.

Yapılan tez çalışmasının birinci bölümde partiküler madde ve elektrostatik filtre tipleri incelenirken, operasyonel verimini etkileyen faktörler ve bu faktörlerin etkisi sıralanmıştır. Bu bölümün sonunda tez amacı belirtilmiştir.

Takip eden bölümde literatür taraması yapılarak, elektrostatik filtre çalışma prensibi ile ilgili teorik kaynaklar irdelenmiştir. Fosil yakıt kullanan santrallerin uyması gereken ulusal ve uluslararası yönetmelikler de bu bölümde incelenerek, emisyon limit değerleri sıralanmıştır. Üçüncü bölümde incelenecek olan santral özellikleri, oluşturulan senaryo çalışmalarına temel oluşturan etkenler incelenmiştir. Elektrostatik filtre operasyonunu etkileyen farklı kömür özellikleri, farklı uçucu gaz sıcaklıkları ve farklı hava ön ısıtıcı kaçağı değerleri irdelenerek, bunların elektrostatik filtre toplama verimliliği üzerinde etkileri detaylandırılmıştır.

Dördüncü ve beşinci bölümde oluşturulan senaryo sonuçları sıralanarak, bu sonuçları oluşturan muhtemel etkiler incelenerek, senaryo sonuçlarının yönetmelikler kapsamında uygunluğu ortaya konulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 LİTERATÜR

1907 yılında ticari olarak ilk kez kullanılmaya başlanılan elektrostatik filtreler, Cottrell tarafından kükürt asit santralının baca gazında bulunan asit buharını ayrıştırma görevinde yer almışlardır. Bu tarihten itibaren kömür santrallerinde baca gazı, dökme fabrikalarında bakır, çinko, çimento fabrikalarında baca gazı temizliğinde kullanılmışlardır. Elektrostatik filtre teknolojisi özellikle verimli kullanım odaklı olarak geçmiş yıllarda teknoloji ve uygulama alanı artırıcı birçok çalışmaya konu olmuştur.

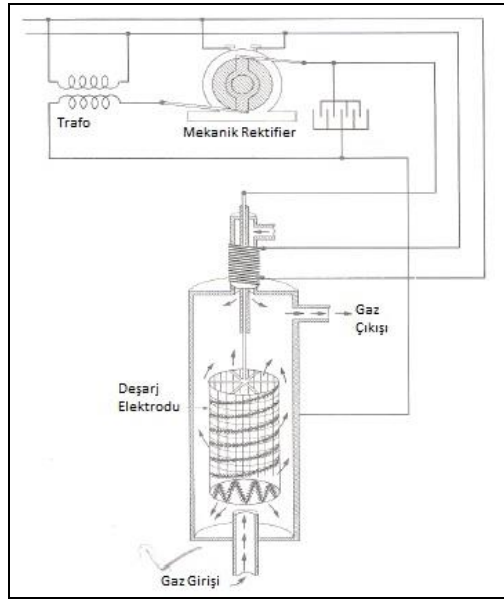
Elektrostatik güç odaklı çalışmalar Coulomb tarafından 1785 ile 1789 yılları arasında yapılan çalışmalara konu olmuştur. Elektrostatikğin temelindeki ters kare kuvvet kanunu Coulomb tarafından keşfedilmiştir. William Gilbert tarafından 1600 yılında yazılan De Magneto çalışması havada bulunan partiküllerin elektriksel çekimine referans verilen ilk çalışma olarak kayıtlara geçmiştir. 1745 yılında Benjamin Franklin tarafından yapılan çalışma da günümüzde kullanılan korona ve keskin noktalardaki saçaklı boşalım konseptlerine ilk örneği oluşturmaktadır. Bu konudaki ilk deneysel çalışma Beccaria tarafından 1772 yılında yapılmıştır.

Hohlfield'in 1824 yılında yaptığı kavanoz içinde elektriklenmiş nokta barındıran deney 1850 yılında Guitard tarafından bardak şeklinde silindirik kap içine tütün dumanı kullanılarak tekrarlanmıştır. Her iki deney de elektrostatik filtre uygulamalarına temel oluşturmadığından günümüzde konu ile alakalı olarak değerlendirilmemektedir ancak Oliver Lodge tarafından 1905 yılında yapılan çalışma daha önce 2 bilim adamı tarafından yapılan çalışma ile birbirlerinden habersiz olmalarına rağmen benzer sonuçlar doğurmuştur. 1878 yılında Nahrwold tarafından yapılan deney elektriksel deşarj ile atmosferik toz tutumu arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarması açısından önem arz etmektedir. Oliver Lodge'nin de araştırmaları ışığında ilk ticari elektrostatik filtre uygulaması takip eden yıllar içerisinde ortaya çıkmıştır.

Cottrell tarafından yapılan çalışmaların kökeninde hava kirliliğine karşı oluşan tepkiler yer almaktadır. Her ne kadar konu ile ilgili yaptığı ilk çalışmalar elektriksel kökenli değilse de gazlardaki elektrik deşarjı ve ani yüksek voltaj oluşumu çalışmalarında oldukça detaylı şekilde yer almaktadır. İlk deneysel çalışmasını küçük boyutlarda gerçekleştiren Cottrell deşarj noktalarının sayısını artırarak filtrelemede daha başarılı olmayı denemiştir. Koronanın noktadan noktaya transferi mümkün iken deşarjın sadece kıvılcım bobininden gelen yetersiz güç sebebi ile bir veya iki nokta üzerinde simültane şekilde ortaya çıkması, Cottrell'in pamuk ile kaplı bir telin sürekli yüzey alanı üzerinde akış verdiğini keşfetmesine yol açmıştır.

Yüksek voltaj değerli elektriksel enerjiye ihtiyacı Cottrell'i 1906 yılında yaptığı çalışmada senkron-mekanik reaktiflere ve yüksek voltajlı, alternatif akım trafosu kullanmaya yöneltmiştir. Yapılan bu deneylerdeki başarı ilk ticari uygulama Berkeley kıyısına bir kaç mil uzaktaki toz fabrikasına montaj edilmesine ön ayak olmuştur. Konu ile ilgili alınan ilk patente ait çalışma Şekil 2.1'de gösterilmiştir;

Şekil 2.1: Elektrostatik filtre patent başvurusu



Kaynak: ABD Patent ve Marka Ofisi, 2016

Uygulanan bu ilk patent uzun yıllar boyunca dakikada 5000 kubik feet gaz alımı ve değerli metal ve sülfürik asit toplanmasında kullanılmıştır.

Dakikada 1.000.000 kubik feet gaz ve günlük 100 ton toz içeriği ile çalışan 400 ile 500 °C'lere çıkan ortamlarda gerekli duyulan elektrostatik filtre dizaynı Cottrell'in öğrencisi olan W.A. Schmitd tarafından 1910 yılında ele alınmıştır. Bugün elektrostatik filtre uygulamalarının temelini oluşturan ve gelişmiş teknolojilerin ortaya çıkmasına yol açan korona deşarj elektrodu konsepti Schmitd tarafından geliştirilmiş ve patentlenmiştir.

Takip eden yıllar içerisinde yapılan çalışmalar elektrostatik filtrelerinin verimliliği üzerine yoğunlaşmıştır. Cooperman (1971) tarafından yeni teori ortaya çıkarılarak, partiküllerin dağınık hareket hızının gazın hızından farklı olduğu belirlenmiştir. Partiküllerin elektrotlar arasındaki net hızının elektrostatik hızdan $1-f$ daha yavaş olduğu saptanmıştır. Burada f tekrar sürüklenme katsayısı olarak belirlenmiştir. Yani yüksek gaz hızlarındaki elektrostatik filtre veriminin elektrostatik hız olan w yerine $81-f \cdot w$ kullanılarak bulunması önerilmiştir.

Grores'in 1980 yılında yaptığı çalışma büyük boyuttaki elektrostatik filtre uygulamalarının dizaynında yüksek verimlilik elde edebilmek için uygulama haznesinde gaz dinamiklerinin dikkate alınması gerekliliğini ortaya koymuştur. Gaz hızlarının düşürülerek, gaz sirkülasyonunun engellenmesi ve yüksek hız olan durumlarda gaz sürüklenmesinin tahmini yapılarak elektrostatik filtre verimliliğinin artışı gösterilmiştir. Aynı yıl içerisinde Leonard (1982) tarafından yapılan teorik çalışmada elektrostatik filtre verimliliğinin gaz akış kalitesinin artırılarak elde edileceği savunulmuş ve türbülansın azaltılması sağlanarak filtre boyutunda oldukça azalmalar elde edileceği öne sürülmüştür.

Vincent'in 1980 yılında yapmış olduğu çalışma Deutsch'in yapmış olduğu çalışmaya ek yapılması gerektiğini ortaya çıkararak partikül ulaşımındaki türbülans içeren akışın elektrostatik filtre içerisinde analizi zorlaştırdığını ve komplike hale getirdiğini ortaya koymuştur. Deutsch denklemi yerine üssel bir versiyonu olan gaz tasfiye zaman

dağılımı fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu yaklaşım filtre performansına gaz türbülansının etkisini ön görme şansı vermiştir.

1981 yılında Yamamoto detaylı deneysel ve teorik çalışmalar yaparak partikül serbest ikincil akış etkileşimi üzerine bulgular elde etmiştir. Laboratuvar ortamında yapılan deneylerde akım yoğunluğu da elektronik manometre kullanılarak ölçülerek elektriksel alan hesabında kullanılmıştır. Bu deneyler sonucunda gerçek toz hızının elektriksel güç ve ana gaz akım hızının tamamen etkisinde olmadığı ayrıca iyonik veya elektrostatik rüzgar nedeni oluşan ikincil akışların da etkisinde olduğunu ortaya koymuştur.

Soldati'nin (2003) takip eden yıllar içerisinde yaptığı çalışmada elektrostatik filtre içerisindeki partikül taşınımında nümerik simülasyon uygulaması yapılmıştır. Bu yaklaşımda partiküllerin geçici ve mekansal olarak değişen türbülans akışları içerisinde taşındığı ve bu taşınım sırasında elektrostatik ve yerçekimsel gücün yanında aerodinamik sürüklenme etkisi altında oldukları varsayımı çalışılmıştır. Daha önce yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen neticelere paralel sonuçlara bu çalışma sonucunda ulaşılmıştır. Khare'nin 1996 yılında yaptığı çalışma pozitif korona modu etkisi altında çalıştırılan elektrostatik filtre verimliliğinin bilgisayar tabanlı simülasyon algoritması ile çözülmesini kapsamaktadır. Filtre toplama verimliliğinin ilgili bölüme giren ve çıkan yüklü uçucu partiküllere göre değişiklik gösterdiği gözlenerek, toplama verimliliğinin deşarj elektrot sayısına değil, toplama alanına bağlı olduğu ortaya konmuştur.

Takip edilen yıllarda yapılan çalışmalarda direk nümerik simülasyon (DNS) kullanılarak elektrohidrokinamik akışların ve türbülansın partikül taşınımı ve toplama verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir (Soldati 2000, ss. 293-305). Farklı boyut ve yükteki partikül tanecikleri iki farklı akışta incelenerek, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Partikül konsantrasyonunun yüksek olduğu duvar kenarlarında elektrohidrokinamik akışın etkisinin yok sayılabilecek seviyede olduğu sonucuna ulaşmıştır. 2001 yılında Kim'in yapmış olduğu çalışmada elektrostatik filtrelerde polidispersite partiküllerinin toplama verimliliği hesaplanmaya çalışılmıştır. Partikül boyutunun elektrostatik filtre

performansı üzerindeki etkisi incelenerek, toplam kütle ve verimliliğin daha büyük geometrik çapa sahip aerosollar için yüksek, geometrik standart sapma için ise düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Talaie (2001) tek aşamalı elektrostatik filtrelerde uygulanabilir yüksek voltaj konfigürasyonunun akım-voltaj karakteristiğini inceleyerek kullanılan modeldeki noktasal gridlerin sayısını düşürmüş ve analiz süresini çok kısaltmıştır. Elde edilen sonuçlar geçmiş deneylerle kıyaslanarak, bulunan sonucun tatmin edici olduğu kanıtlanmıştır.

2002 yılında Varanos tarafından yapılan çalışmada elektrostatik filtre verimliliği hesabı üzerine çalışılarak, tam boyuttaki santral modeli ortaya konmuş ve RANS türbülans modeli ile hesaplamalar yapılmıştır. Bu çalışmadaki amaç toplama verimliliği üzerindeki tekrardan gaz girişi etkisinin minimize edilmesi olmuştur. Akış dağıtım perdeleri konularak akış düzensizliği minimize edilmeye çalışılmıştır.

2005 yılında Nikas tarafından yapılan çalışmada toplama mekanizması ve elektrostatik filtre içindeki süreçlere yoğunlaşmıştır. Elektrostatik güç etkisi ve gaz fazları incelemesi gerçekleştirilerek, toplama plakaları arasındaki homojen akışın toplama verimliliği artırdığı gözlenmiştir. Shah tarafından 2009 yılında yapılan elektrostatik filtre deneyi gerçek bir santraldan alınan datalarla karşılaştırılarak, üç boyutlu elektrostatik filtre modellemesi yapılmış ve FLUENT’de RANS modeli kullanılarak elektrostatik filtre içerisindeki delikli perdelerin toplama verimliliği üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Yukarıda özetlendiği üzere Deutsch ve Cooperman tarafından önerilen klasik numerik modelleme yıllar içerisinde değişim göstermiştir. Günümüzde Farnoosh veya Neimarlija tarafından önerilen ancak ticari olarak kullanımı mümkün olmayan karmaşık sistemler mevcut olmakla birlikte süreç içerisindeki tüm fenomenleri kapsayıcı bütünsel modeller oluşturulması mümkün görülmemektedir. Bu sebeple empirik olarak elde edilmiş bilgiler ışığında sürecin çözümlenmesinin yapılması tercih edilmektedir. Bu sayede sadece elektrostatik filtrenin performansı ile ilgili bir varsayımında bulunulmamakta aynı zamanda süreci etkileyen faktörlerde belirlenebilmektedir. Filtreleme sürecinde

elektrostatik filtre belli bir hız bandında partikül içeren hava akışına maruz kalmaktadır. Ve akabinde toplama plakalarında toplanmalarına sebep olan elektriklenmeye yol açan elektrostatik filtre içindeki elektriksel alandan geçmektedirler. Detayları verilen ve Talaie tarafından yapılan çalışmada bu sürecin 3 ana ayağı olarak elektriksel alan, gaz akışı ve partikül hızı seçilmiştir. Her bir ayakta yer alan etkenlerin birbirleri üzerinde etkileri olduğundan dolayı, elektrostatik filtre modellemesi daha komplike hale gelmektedir.

Benzer şekilde yukarıda detayları verilen ve elektrostatik filtre uygulamalarının temelini oluşturan Deutsch ve Cooperman'ın da yapmış olduğu çalışmalar elektrostatik filtre içindeki süreçleri tam olarak dikkate almadığı ve teknolojik yetersizlik nedeni ile bilgisayar tabanlı modeller yerine basitleştirilmiş modeller içerdiği için her yönden eksiksiz elektrostatik filtre modelleri olarak ele alınmamaktadır.

Günümüzde bilgisayar kullanımının artması elektrostatik filtre içindeki süreçlerin dahil edildiği modellerin yapılmasına yol açmıştır. Bu modellerin birçoğu Talaie'nin önermiş olduğu 3 ana ayağın üzerine kurulmuştur. Adamiak'ın 2013 yılında yaptığı çalışmada elektrostatik filtre içindeki elektriksel alan Poisson denklemleri ile her tür geometri için neredeyse mükemmel doğrulukta çözülmüştür. Yapılan bu modeller, Böttner'in 2013 ve Khare&Sinha'nın 1996 yılında yaptığı çalışmalara paralel olacak şekilde filtrelenmiş partiküllerin yarattığı elektriklenme alanını dikkate almama gibi veya Yamamoto&Sparks'ın 1986 yılında yaptığı çalışmalara paralel olacak şekilde kablo tipi elektrotları noktasal elektrot olarak kabul etme gibi veya Soldati'nin 1993 yılında yaptığı çalışmaya paralel olacak şekilde kısmi diferansiyel denklemleri çözmekte ayna metodunu kullanma gibi basitleştirme örnekleri içermektedir. Talaie'nin çalışmasında belirtmiş olduğu ikinci olgu olan gaz akışı birincil ve ikincil olarak ikiye ayrılmış, birincil akış gazın elektrostatik filtreden içeri girip, ilerlemesini sağlayan akış; ikincil akış ise partiküllerin iyonlaşması sonucunda ortaya çıkan ve modelleri komplike hale getiren akış olarak değerlendirilmiştir. Elektriksel alan ve gaz akışı arasındaki ters ilişki modellemeyi komplike hale getirmekte ve Mizeraczyk'in (2013) çalışmasında belirttiği üzere genellikle elektrohidrodinamik kullanılarak çözümlenmesine yol açmaktadır.

Gaz, iyon ve partiküllerin etkileşimi ile ortaya çıkan akış türbülansı Farnoosh'un 2010'da, Leie'in 2008'de ve Soldati'nin 1993 yılında yaptığı çalışmalarda k-e modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Adamicak 2013 yılında yaptığı çalışmada Soldati'nin 2003 yılında yaptığı çalışmaya göndermede bulunarak en iyi modelleme tekniği olarak Navier-Stokes denklemlerinin kullanımını öne çıkarmıştır. Elektrostatik filtre içinde iletilen ve toplama plakalarında toplanan partikül hesabı için Khare&Sinha, Kim ve Lu&Huang tarafından Eulerion simülasyonu; Adamiak&Atten, Neimarlija ve Soldati tarafından da Lagrangian simülasyonu kullanımı önerilmiştir.

Yukarıda bahsedilen faktörlerin yanında elektrostatik filtre modellemelerini etkileyen başka faktörlerde vardır, deşarj elektrotlarında meydana gelen ve elektrostatik filtre uygulamalarında aradaki boşluklarda iyonlaşmayı ortaya çıkaran korona deşarjı bunlardan bir tanesidir. Elektrot konfigürasyonuna büyük ölçüde bağlı olan korona deşarjı daha basit elektrot kullanımında dahi prosesi karmaşık hale getirmektedir. İyonlaşma tabakasının göz ardı edildiği ve tek sabit bir akışın öngörüldüğü birçok simülasyon Adamiak'ın 2013 yılında yaptığı çalışma da olmak üzere bu konu dahilinde yapılmıştır. Korona deşarjı tarafından serbest bırakılan elektronlar iyonlaşmış gaz molekülleri oluşturmaktadır. Bu moleküller deşarj elektrotlarının tersi yönünde toplama elektrotlarına doğru yönelmektedir. Gaz akış yönünde hareket eden partiküller iyonlaşmış moleküller ile birleşerek daha sonra kendilerine negatif yük sağlayan partiküllere yapışmaktadır. İyonlaşmış moleküller vasıtası ile partikül yüklemesi alan şarjı veya difüzyon şarjı ile sağlanmaktadır. Alan şarjı büyük boyutlu parçacıkların üstesinden gelirken, difüzyon şarjı daha küçük parçacıklar (1µm'den küçük) için kullanılmaktadır. Partikül boyutuna göre farklılık gösteren şarj mekanizmasının Lei'in 2008 yılında yaptığı çalışmada olduğu gibi elektriksel alana göre değiştiği veya Kim'in 2001'de ve Soldati'nin 2003 yılında yaptığı çalışmalarda olduğu gibi partiküllerin elektrostatik filtreye ön yüklemeden geçirilerek girdiği varsayımında bulunulmuştur.

Elektrostatik filtre modellemeleri uzun yıllardır numerik methodlar kullanılarak çalışılmıştır. Bazı durumlarda küçük boyutlu elektrostatik filtreler kullanılarak modellerin değerlendirilmesi yapılmıştır. 2013 yılında Jadedrusik ve Aswierczok'un

yapmış olduğu çalışma bunlara örnektir ancak bu metodun küçük boyutlu filtreler ile endüstriyel alanda yer alan elektrostatik filtreler arasındaki birçok farktan ötürü zayıf noktaları mevcuttur. Küçük boyutlu, laboratuvar ortamında kullanılan bir elektrostatik filtre uygulamasında titreşim, sıcaklık değışiklikleri, ortam nemi, kullanılan malzeme ve fiziksel benzerlik gibi içsel ve dışsal birçok faktör Ortiz'in 2010 yılında yaptığı çalışmada belirttiği üzere elimine edilmiş durumda olmaktadır.

Numerik modellemelerin bir diğer zayıf noktası da partikül boyutu ile alakalıdır. Görece olarak büyük partiküllerin (1µm'den büyük) toplanması dirençleri düşük olduğundan daha kolay olmaktadır. Ancak daha küçük parçacıkların toplanması daha zor olmakta ve yukarıda bahsedilen etkenlerin süreç dahilinde düşünülmesi gerekmektedir. Boyutun yanında partikül şekli de Zhuang'ın 2000 yılında yaptığı çalışmada öngördüğü gibi elektrostatik filtre veriminde önemli etkenlerden bir tanesidir. Partikül boyutu ve şekli elektrostatik filtre verimini direkt etkilediğinden dolayı farklı boyut ve şekilde partikül içeren toz akışlarını modelleme daha karmaşık hale gelmektedir ve bu da birçok modellemede partiküllerin küresel şekle ve ortalama hıza sahip olduğu gibi varsayımlar yapılmasına yol açmaktadır. Elektrostatik filtre şekli de önem arz etmektedir. Mizeraczyk'in 2013 yılında yaptığı çalışmada geometrinin hava akışı ve elektrostatik performansı üzerindeki etkisi çalışılmıştır. Bu da numerik modellerin özel konfigürasyonlarda kullanımını limitleyerek, genel dizayn sürecini zorlaştırmaktadır. Partiküllerin iletimi ile ilgili modellerin neredeyse tamamı partikül ortalama hızını doğru tahmin etmektedir ancak elektrostatik alandan dolayı oluşan hız değışimleri tahminleri genelde yanılmaktadır. Toplama plakaları ile bir defa kontak kuran partiküllerin orada kaldığı varsayımında bulunmaktadır ancak türbülans veya çekiçleme nedeni ile partiküllerin tekrar hava akışına dahil olduğu Adamiak tarafından 2013 yılında yapılan çalışmada belirtilmiştir. Elektrostatik performansını etkileyen bu olgu modellerde genelde göz ardı edilmektedir.

Yukarıda sayılan nedenlerden ötürü tam bir matematiksel model oluşturma mümkün olmamaktadır. çözülebilir bir matematiksel model oluşturmak için birçok varsayımda bulunularak basitleştirmeler yapılmalıdır. Daniel Toimil'in 2013 yılında detaylandırdığı

data odaklı elektrostatik filtre modellemesi ve optimizasyonu çalışması takip eden bölümlerde aktarılacak olan metodla paralellik göstererek, sayılan nedenlerden ötürü mevcut çalışan elektrostatik filtre uygulamalarından elde edilen verilerin modelleme sırasında kullanımını önermektedir.

2.2 YÖNETMELİKLER

Büyük sanayi kuruluşlarının ve enerji üretim tesislerinin yaygın bir şekilde ortaya çıkmasını takiben hava kirliliği konusunda yapılan çalışmalar ve takip edilmesi gereken yasa/yönetmelikler oluşturulmaya başlanmıştır. Yaşanan teknolojik gelişmeler ve bilimsel çalışmaların ortaya çıkmasının temelinde bu yasa/yönetmeliklerin yattığını düşünmek yanlış olmayacaktır.

18 ve 19'uncu yüzyılda Avrupa'daki kirlilik seviyesi bugün kullanılan emisyon limitlerinin yaklaşık olarak 100 katı değere sahipti. 1983 yılında Almanya Federal Emisyon Kontrol yasasını yürürlüğe sokarak kükürtdioksit seviyesinin 10 yıl içerisinde yüzde 89 oranında azalmasını sağlamıştır. 1980'lerin ilk yıllarında endüstriyel emisyonların kontrol altına alınarak hava kirliliğini azaltmak, önüne geçilemeyecek bir önem arz etmeye başlamıştı. Bu yıllarda bile bazı ülkeler detaylı ve kapsamlı kısıtlamaları uygulamaya halihazırda koymuştu.

84/360/EEC Hava Yönetmeliği makul seviyede yatırım maliyeti ile en iyi teknoloji kullanımını zorunlu kılmaktaydı. 1988 yılına gelindiğinde Batı Almanya 70 büyük endüstriyel tesisinde baca gazı desülfürizasyon ünitesini kullanmaya başlamıştır. Bu rakam ülkedeki toplam kapasitenin yüzde 75'ine denk gelmektedir. Kükürtdioksit emisyonundaki bu dikkate değer azalış yasa/yönetmeliğin başarısını ortaya koymaktadır. Kükürtdioksit emisyonunun yanında azotoksit emisyonları da büyük endüstriyel tesisler açısından takip eden yıllarda önem arz eden konuların başında yer almıştır. Yukarıda bahsedilen 1983 yılındaki Büyük Endüstriyel Tesisler yönetmeliği takip eden yıl içerisinde yürürlüğe giren Hava Yönetmeliği'nin alt başlığını oluşturmuştur. 1988 yılında yürürlüğe giren emisyon limit değerleri içeriğine sahip yönetmelik santrallerin emisyon limitlerini iki farklı kategoride değerlendirerek 1987

yılı öncesi ve sonrasında devreye alınan santraller için 2 farklı emisyon limit değeri ortaya koymuştur.

88/609/EEC yönetmeliği 50 MW ve üstü termik güce sahip enerji üretiminde kullanılan santralleri ve yakma süreci sonucunda ortaya çıkan ürünlerin direk üretim sektöründe kullanımına imkan veren tesisleri kapsamaktadır. Atık yakma tesislerini, petrol, mazot kullanan santraller ile gaz türbini santrallerini ise kapsamamaktadır. Bu yönetmelik ile santral boyutu ve yakıt tipine göre emisyon limitleri belirlenmiş, mevcut santraller için de kademeli bir geçiş sistemi öngörülmüştür. 2001 yılına gelindiğinde Büyük Endüstriyel Yakma Tesisleri yönetmeliği güncellenerek 2001/80/EC yasası yürürlüğe konmuş, teknolojiye kat edilen ilerleme ile gaz türbini ile çalışan santrallerde yönetmeliğe dahil edilmiştir. 2003 yılında bir kez daha güncellenen yönetmelik gaz türbini kullanımının artmasından dolayı yeni emisyon limit değerleri ortaya koymuş ancak mazot, petrol ve gaz motorlarını yine kapsam dışı bırakmıştır.

2001 yılında yürürlüğe giren yönetmeliğin bir diğer dikkat çeken noktası da mevcut santrallerin 30 Haziran 2004 itibari ile 1 Ocak 2008'den sonra 20000 saatten daha fazla çalışmamayı ve 31 Aralık 2015 tarihi itibari ile de devreden çıkmayı taahhüt etmeleri zorunluluğudur. 2006 yılında yürürlüğe sokulan Büyük Yakma Tesisleri yönetmeliği en iyi teknoloji uygulamaları için referans dokümanı olarak kullanılması amacıyla ortaya çıkarılmıştır. Ortaya çıkarılan yönetmelik geçmiş yıllarda yürürlükte olan yasalara paralel olacak şekilde 50 MW ve üstü termik güce sahip santraller için kullanılmaktadır. Bu yönetmelikte konvansiyonel yakıt olarak kategorize edilen kömür, linyit, biyokütle, peat, sıvı ve gaz yakıtlar (hidrojen ve biyogaz) kapsam dahilinde değerlendirilirken atık yakıtlar hariç tutulmuştur. Partiküler madde açısından bu yönetmelik elektrostatik filtre ve torba filtre kullanımını en iyi teknolojiler kategorisinde değerlendirmiş ve Tablo 2.1'de belirtilen emisyon limitlerini santraller için zorunlu kılmıştır.

Tablo 2.1: Santral tip ve yakıtına göre emisyon seviyeleri

Kapasite (MW _{th})	Partiküler Madde Emisyon Seviyesi (mg/Nm ³)						En İyi Teknoloji
	Kömür ve Linyit		Biyokütle ve peat		Sıvı Yakıtlar		
	Yeni Santral	Mevcut Santral	Yeni Santral	Mevcut Santral	Yeni Santral	Mevcut Santral	
50-100	5-20	5-30	5-20	5-30	5-20	5-30	Elektrostatik- Torba Filtre
100-300	5-20	5-25	5-20	5-20	5-20	5-25	Kombine
>300	5-10	5-20	5-20	5-20	5-10	5-20	Elektrostatik filtre ve torba filtre

Kaynak: Büyük Yakma Tesisleri yönetmeliği

Bu yönetmelik günlük ortalama değerler için, standart koşullar altında ve yüzde 6'lık O₂ seviyesi için tipik yük koşulları altında geçerli olarak değerlendirilmiştir. Pik yükler, başlangıç ve kapatma durumları, baca gazı temizleme sistemi arızaları durumunda daha yüksek değerler dikkate alınmalıdır.

24 Kasım 2010 tarihinde yürürlüğe giren 2010/75/EU Avrupa Parlamentosu ve Konseyi Endüstriyel Emisyonlar yönetmeliği santraller için uygulanacak emisyon limitlerini 2 farklı kategoride değerlendirmiştir. İlgili yönetmeliğin 30. Maddesinin 2.bendine göre 7 Ocak 2013 öncesinde izinlerini tamamlayan veya izin başvurularını eksiksiz olarak yapan ve 7 Ocak 2014 tarihinden önce devreye alınacak santraller ve diğer santraller olarak 2 kategori belirlenmiştir. Sırası ile bu kategoriler için toz emisyon değerleri Tablo 2.2-Tablo 2.5 ile gösterildiği gibidir.

1. Birinci Kategori

Tüm emisyon limit değerleri 273,15 Kelvin (K) sıcaklıkta, 101,3 kilopaskal (kPa) basınç altında ve atık gaz içerisindeki su buharı düzeltmeleri yapıldıktan sonra, katı yakıtlar için yüzde 6 O₂, gaz türbini-gaz makinaları ve gaz yakıtları harici yakma tesisleri için yüzde 3 O₂, gaz türbini-gaz makinaları için yüzde 15 O₂ içeriğinde göre hesaplanmıştır. Katı yakıt veya sıvı yakıt kullanan gaz türbini ve gaz makinası harici yakma tesisleri için limit mg/Nm³ cinsinden;

Tablo 2.2: Katı veya sıvı yakıt kullanan gaz türbini ve gaz makinası harici yakma tesisleri için emisyon değerleri (mg/Nm³)

Toplam Termik Güç (MW)	Kömür ve Linyit ve Diğer Katı Yakıtlar	Biyokütle ve Peat	Sıvı Yakıtlar
50-100	30	30	30
100-300	25	20	25
>300	20	20	20

Kaynak: Endüstriyel Emisyonlar yönetmeliği

Benzer şekilde gaz türbini ve gaz makinası harici gaz yakıtı ile çalışan tesisler için limit mg/Nm³ cinsinden;

Tablo 2.3: Gaz türbini ve gaz makinası harici gaz yakıtı ile çalışan tesisler için emisyon değerleri (mg/Nm³)

Genel	5
Yakma Fırın Gazı	10
Çelik Endüstrisinde Ortaya Çıkan Başka Alanda Kullanılan Gaz	30

Kaynak: Endüstriyel Emisyonlar yönetmeliği

2. İkinci Kategori

Tüm emisyon limit değerleri 273,15 K sıcaklıkta, 101,3 kPa basınç altında ve atık gaz içerisindeki su buharı düzeltmeleri yapıldıktan sonra, katı yakıtlar için yüzde 6 O₂, gaz türbini-gaz makinaları ve gaz yakıtları harici yakma tesisleri için yüzde 3 O₂, gaz türbini-gaz makinaları için yüzde 15 O₂ içeriğinde göre hesaplanmıştır. Katı yakıt veya sıvı yakıt kullanan gaz türbini ve gaz makinası harici yakma tesisleri için limit mg/Nm³ cinsinden;

Tablo 2.4: Katı veya sıvı yakıt kullanan gaz türbini ve gaz makinası harici yakma tesisleri için emisyon değerleri

Toplam Termik Güç (MW)	
50-300	20
>300	10 (biyokütle ve peat için 20)

Kaynak: Endüstriyel Emisyonlar yönetmeliği

Benzer şekilde gaz türbini ve gaz makinası harici gaz yakıtı ile çalışan tesisler için limit mg/Nm³ cinsinden;

Tablo 2.5: Gaz türbini ve gaz makinası harici gaz yakıtı ile çalışan tesisler için emisyon değerleri

Genel	5
Yakma Fırın Gazı	10
Çelik Endüstrisinde Ortaya Çıkan Başka Alanda Kullanılan Gaz	30

Kaynak: Endüstriyel Emisyonlar yönetmeliği

Halihazırda taslak olarak hazır bulunan En İyi Teknolojiler Referans Dokümanı olarak adlandırılan yeni Büyük Yakma Tesisleri yönetmeliği kömür ve linyit yakıtlı enerji santralleri de dahil olmak üzere endüstriyel tesisler için güncel emisyon limit değerleri belirleyecektir. Hava kirliliği, termik verimlilik, toprak ve su kirliliği konularını kapsayan bu yönetmelik 2016 yılında yürürlüğe girecektir. Bu yönetmelik ile mevcut kömür santrallerin 2020 yılı itibari ile devre dışı kalması söz konusudur. Bu da santral işletmecilerinin santrallerini yeni yönetmeliğe göre yenileme veya devre dışı bırakma kararına temel oluşturacak yatırım maliyetleri incelemesi sonucunda ortaya çıkacaktır. Yeni yönetmeliğe dahil olan üye ülkeler durum değerlendirmesi yaparak bazı istisnalar uygulayabilecektir. Haziran 2013’de ilk taslak metni yayınlanan ve görüşe açılan bu dokümana göre Tablo 2.6’da verilen emisyon limitleri daimi ölçüm sistemi ile gözlemlenecektir;

Tablo 2.6: Taslak yönetmeliğe göre farklı santral tipleri için emisyon değerleri

Toplam Termik Güç (MW _{th})	Birim	Yeni Santraller	Mevcut Santraller	Yeni Santraller	Mevcut Santraller
		Yıllık Ortalama		Günlük Ortalama	
50-100	mg/NM ³	2-15	2-20	Belirlenmemiş	4-28
100-300		2-10	2-20	Belirlenmemiş	4-25
300-1.000		<5	1-15	Belirlenmemiş	4-20
>1.000		<3	<1-10	4-10	4-20

Kaynak: En İyi Teknolojiler Referans Dokümanı

Türkiye’de ise 20 Aralık 2014 tarihli 29211 sayılı Resmi Gazete’de yayınlayan “Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik” ile 08.06.2010 tarihli ve 27605 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Büyük Yakma Tesisleri Yönetmeliği yürürlükten kaldırılarak Avrupa Birliği uyum yasaları çerçevesinde beklenenden daha erken önemli bir adım atılmıştır. Bu yönetmelik vasıtası ile Büyük Yakma Tesisleri Yönetmeliği emisyon sınır değerleri büyük oranda korunmakla birlikte yukarıda bahsedilen Avrupa Birliği Komisyonu tarafından güncelleme çalışmaları devam eden Büyük Yakma Tesisleri Mevcut En İyi Teknolojiler yönetmeliğine uygunluk açısından bir zemin oluşturulmuştur.

29211 sayılı yönetmelik vasıtası ile sanayi ve enerji üretim tesislerinin faaliyeti sonucu atmosfere yayılan is, duman, toz, gaz, buhar ve aerosal halindeki emisyonları kontrol altına almak, insanı ve çevresini hava alıcı ortamdaki kirlenmelerden doğacak tehlikelerden korumaya, hava kirlenmeleri sebebiyle çevrede ortaya çıkan umuma ve komşuluk münasebetlerine önemli zararlar veren olumsuz etkileri gidermeye ve bu etkilerin ortaya çıkmasını engellemeye ilişkin usul ve esaslar belirlenmektedir. Yönetmelik kapsamında yapılan önemli tanımlardan bazıları şu şekildedir;

A. Büyük Yakma Tesisi: Anma ısı gücü 50 MW ve üzeri olan, yalnızca enerji üretimi için inşa edilen katı, sıvı veya gaz yakıtların kullanıldığı yakma tesisleri,

- B. Emisyon Sınır Değeri:** Sıvı ve gaz yakıtlarda yüzde 3, katı yakıtlarda yüzde 6, gaz türbinlerinde yüzde 15 oranında oksijen olduğu varsayılarak, mg/Nm³ olarak ifade edilen, kütle bölü atık gazın hacmi olarak hesaplanan ve yakma tesisinden havaya verilen atık gazların içinde bir maddenin bulunmasına izin verilen konsantrasyon,
- C. Mevcut Tesis:** Ek-5.A.1 kapsamındaki tesisler için 08.06.2010 tarihinden önce, diğer tesisleri için ise 03.07.2009 tarihinden önce kurulmuş veya Çevresel Etki Değerlendirmesi mevzuatına göre kurulmasına uygun bulunan tesisleri,
- D. Yeni Tesis:** Mevcut tesisler dışında kalan tesisi tanımlamaktadır.

Aynı yönetmelik kapsamında 01.06.1987 tarihinden önce, faaliyet öncesi veya faaliyet sonrası için herhangi bir izin almış ve tesisin 31.07.2011 tarihinden 31.12.2019 tarihinde kadar 20.000 saatten fazla çalıştırmayacağını, 08.06.2011 tarihine kadar yazılı olarak taahhüt etmiş işletmeler, her yıl 31 Ocak gününe kadar Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü'ne tesisin kalan işletme ömrü için izin verilen, çalıştıkları ve çalışmalarını için kalan süreyi belirten kaydı sunmaları koşulu ile Ek-5.A.1.4'te belirtilmiş olan emisyon sınır değerlerine uymaktan 31.12.2019 tarihine kadar muaf tutulmuşlardır.

Birinci grup tesisler içinde yer alan yakma tesisleri içerisindeki Büyük Yakma Tesisleri ısı gücü 50 MW veya daha fazla olan, yalnızca enerji üretimi için inşa edilen, katı, sıvı veya gaz yakıtların kullanıldığı yakma tesislerini kapsamaktadır. Yeni kurulan tesislerde uyulması gereken emisyon değerleri (EK-5.A.1.3.1);

- a.** Katı Yakıtlar için (mg/Nm³ olarak baca gazında yüzde 6 hacimsel oksijen esas alınarak) Tablo 2.7'de belirtildiği şekildedir

Tablo 2.7: Katı yakıt kullanacak yeni tesisler için emisyon değerleri

Yakıt Türü	Yakıt Isıl Gücü	Toz	SO ₂	NO ₂	CO
Katı Yakıt	50 MW<x<100 MW	50	850	400	150
	x>100 MW	30	200	200	200
Petrol Koku	50 MW<x<100 MW	20	400	400	150
	x>100 MW	20	200	200	200
Biyokütle	50 MW<x<100 MW		200	400	
	100 MW<x<300 MW		200	300	
	x>300 MW		200	200	

Kaynak: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik

Benzer limit değerleri sıvı ve gaz yakıtlar için de belirlenmiş olmakla birlikte bu tezin konusu dahilinde olmadıkları için belirtilmemiştir.

Aynı yönetmelik kapsamında mevcut tesisler için belirtilmiş olan emisyon değerleri katı yakıtlar için Tablo 2.8’de gösterildiği şekildedir (EK-5.A.1.4.1);

Tablo 2.8: Katı yakıt kullanan mevcut tesisler için emisyon değerleri

Yakıt Türü	Yakıt Isıl Gücü	Toz	SO ₂	NO ₂	CO
Katı Yakıt	50 MW<x<100 MW	100	2000	600	200
	100 MW<x<500 MW		2000-400		
	x>500 MW	50	400	200	
Petrol Koku	50 MW<x<100 MW	20	400	600	
	x>100 MW			200	

Kaynak: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik

3. METOD

3.1 ÇALIŞMA ALANI

Bu tez kapsamında incelenecek olan kömür santrali Türkiye’de örnekleri bulunan bir enerji üretim santralidir. 2 simetrik üniteden oluşan santralin her bir ünitesi 615 MW üretim kapasitesine sahiptir. Günlük kömür tüketimi 11.000 ton olan santralde, kömür ihtiyacı santral yakınında bulunan liman vasıtası ile karşılanmaktadır. Aynı şekilde santral soğutma suyu olarak da santral yakınında bulunan denizden alınan su kullanılmaktadır. İthal kömür vasıtası ile çalışan santralde süper kritik, tek geçişli ve pulverize teknolojiye sahip kazanlar kullanılmaktadır. Doymuş buhar aşaması kazanda oluşmadığı için dom teknolojisi santralde yer almamaktadır. Kazana beslenen kondens suyu direk olarak kızgın buhar fazına geçerek yüksek basınç ve türbin dönüşünde orta basınç olarak türbine gönderilmektedir. Buhar türbininde iki kademede gönderilen buhar, termal enerjisini türbin kanatlarına bıraktıktan sonra su soğutmalı kondenserde yoğunlaşarak kondens pompaları vasıtasıyla ısıtıcılardan geçirilmekte ve besi suyu tankına gönderilmektedir. Besi suyu tankında O₂ oranı ayarlandıktan sonra besi suyu pompaları ile tekrar ısıtıcılardan geçerek kazanın ekonomizerlerine gönderilmektedirler. Türbinde iş yaparak çift geçişli ve borulu eşanjör tipli kondensere gelen buhar, kondenserde oluşmuş olan vakum sayesinde 30-40 °C'lere kadar yoğunlaştırılmaktadır. Türbinin kademelerinde oluşan mekanik enerji türbin jeneratörü vasıtasıyla elektrik enerjisine çevrilmektedir.

Santraldeki ana üniteler; buhar kazanı, türbini ve jeneratörü, soğutma suyu sistemi, kömür taşıma ve besleme sistemi, su hazırlama ve kazan besleme suyu sistemi, kondensat sistemi ve kül sistemidir. Bu tez kapsamında incelenecek olan toz partiküllerini ve gaz emisyonlarını önlemek amacıyla DeNO_x , baca gazı kükürtünün giderilmesi ve elektrostatik filtre sistemleri yan sistemler olarak hizmet etmektedir.

Kritik nokta olarak kabul edilen 22,11 MPa ve 374,15 C⁰ üzerinde süper kritik bölgede yer alan 24,2 MPa ve 566 C⁰ değerlerinde çalışan kazanın bir ünitesinde yaklaşık olarak saatte 2.100-2.400 ton arasında yanma havası kullanılmaktadır ve yanma işlemi sonucunda 3.600.000 m³ / saat baca gazı meydana gelmektedir. Tek geçişli olarak dizayn edilen kazanda ekonomizer, buharlaştırıcı ve kızdırıcı kısımları kazan içerisinde art arda olacak şekilde sıralanmıştır.

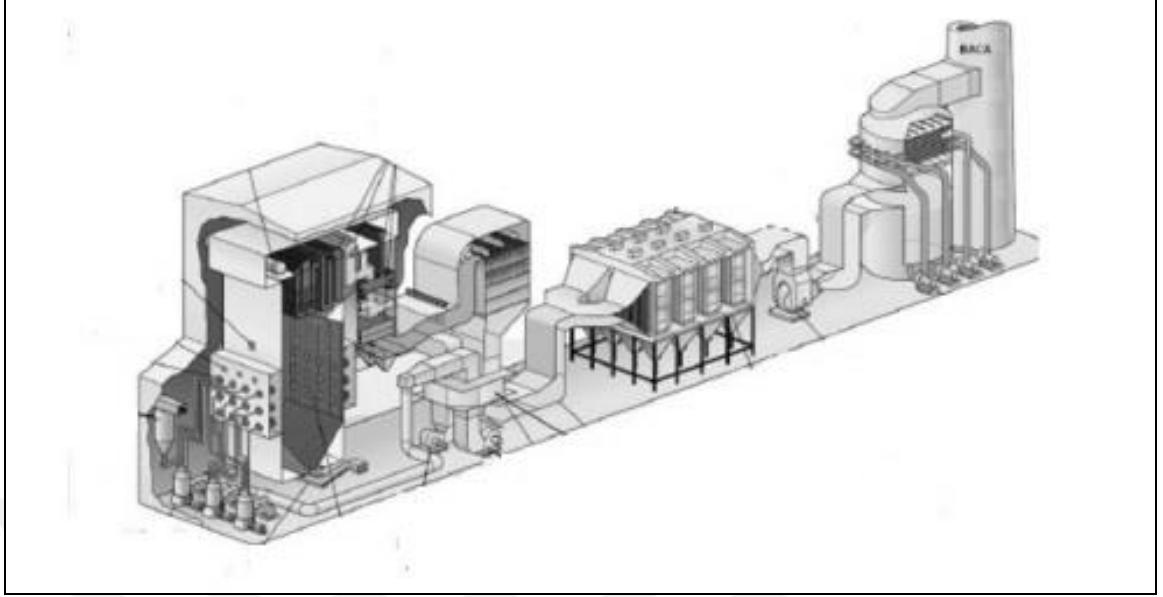
Tez kapsamında dolaylı olarak incelenen kazan hava sistemi, yanma için gerekli olan taze hava tedarikinde, tüketilen kömürün temizlenmesinde ve atık olarak yönlendirilmesinde kullanılmaktadır. Santral hava sistemi şu alt sistemlerden oluşmaktadır;

- a. Birincil hava sistemi
- b. İkincil hava sistemi
- c. Sızdırmazlık hava sistemi ve alev algılayıcı soğutma sistemi

Pulverize hale getirilmiş kömürün taşınması ve kurutulması süreçlerinde kullanılan birincil hava sisteminin yanında; hava ön ısıtıcısına atmosfer havasını filtre ve susturuculardan geçirerek çevrimdeki sıcak hava ile birleştirerek ileten ikincil hava sistemi sistemde kritik bir öneme sahiptir. Hava ön ısıtıcı sistemi, atmosferden çekilen havayı sıcak baca gazları ile etkileşime sokarak kazana verilen yakma havasının ısıtılmasını ve bu sayede verimin artırılmasını, kömürün neminin alınmasını ve taşınmasını sağlamaktadır. Bu ön ısıtıcı sistemi, her üniteye baca gazı çıkışlarında olacak şekilde 2 adet olarak bulunmaktadır.

Tez kapsamında incelenen diğer bir sistem de baca gazı sistemidir. Kazandan çıkan atıkların çevreye olan negatif etkilerini en düşük seviyeye indirmek amacı ile kullanılan bu sistem; DeNO_x sistemi, baca gazı kükürtsüzleştirme sistemi, elektrostatik filtre ve cebri çekiş fan sistemlerinden oluşmaktadır ve Şekil 3.1'de gösterildiği şekilde dizayn edilmiştir.

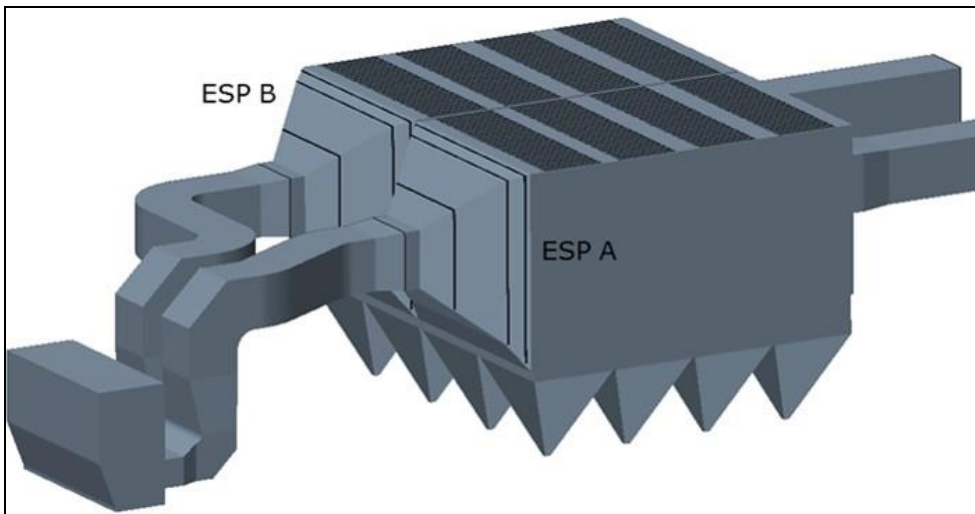
Şekil 3.1: Baca gazı sistemi



Kaynak: Uluslararası Enerji Ajansı, Kömürden Elektrik Üretimi, 2010

Bu sistemin parçası olan elektrostatik filtreler her bir ünite için 2 gövde (casing), gövde başına 4 kabin (cabinet), kabin başına 2 kısım (section)'dan oluşmaktadır. Her bir üniteye ait elektrostatik filtrenin 3 boyutlu modellenmesi yapılmış ve Şekil 3.2'de verilmiştir;

Şekil 3.2: Elektrostatik filtre üç boyut dizaynı



Santralde kullanılan elektrostatik filtre içerisinde yer alan 1 sıra toplama elektrodu 9 adet levhadan oluşmakta ve her bir levha 2 kanca ile asılmaktadır. Bu kancalar özel taşıyıcı kiriş sistemine sabitlenmiş durumdadırlar. 9 adet levhadan oluşan bir sıra, aşağı kısmında ortak çekiçleme sistemine sabitlenmiş durumdadır. Çekiçleme sistemi ile levhalar arasındaki bu sabitleme sistemi 2 vida ve 1 somundan oluşmaktadır. Toplama elektrodları üzerinde toz kaplanmasını önlemek amacı ile her birkaç dakikada bir çekiç ile sisteme vurulmaktadır. İncelenecek olan santralde yapılan çekimlerden elde edilen fotoğraflara göre çekiçleme sistemi Şekil 3.3’de, toplama elektrodu sabitleme sistemi Şekil 3.4’da gösterilmiştir.

Santralde kullanılan elektrostatik filtre teknik bilgileri de Tablo 3.1’de özetlenmiştir;

Tablo 3.1: Elektrostatik filtre teknik bilgileri

	Birim	Değer
Ünite başına gövde (casing)	-	2
Gövde başına kabin (cabinet)	-	4
Kabin başına kısım (section)	-	2
Kısım başına şerit (lane)	-	20
Toplama elektrodları arası mesafe	mm	400
Toplama elektrodları yüksekliği	m	15,05
Kısım uzunluğu	m	4,5
Her bir gövdenin genişliği	m	32
Gövde başına alan	m ²	481,6
Tüm kabin aktif uzunluğu	m	18
Kısım başına toplama yüzeyi	m ²	5.418
Ünite başına toplama yüzeyi	m ²	86.688
Ünite başına trafo sayısı	-	16

Şekil 3.3: Çekişleme sistemi



Şekil 3.4: Toplama elektrodu sabitleme sistemi



Sistemde kullanılan ve Şekil 3.5'de gösterilen deşarj elektrodları (DE) ince metal levhadan üretilmiş ve vida ile sisteme bağlanmış durumdadırlar. Bu elektrodlar düz ve hafif yapıda olmalarından dolayı herhangi bir germe veya başka kuvvete maruz kalmamalıdırlar. Akım yoğunluklu korona oluşturmak amacı ile elektrodlar sivri uçlu çubuklara sahiptirler.

Şekil 3.5: Deşarj elektrodu



Toplama elektrodlarının çekişlenmesi, gövde ve kabin başına bir adet olacak şekilde dizayn edilen şaft üzerine sabitlenen tamburlama tipi çekiçler vasıtası ile gerçekleştirilmektedir. Şaftın dönmesi ile çekiçler, çekiçleme barı (çubuğu) karşısında birer birer hareket etmektedirler. Her bir çekiç, şaft üzerine belirli bir açı ile sabitlenmiştir, açı şaft boyunca yer alan vida sistemi ile belirlenmekte ve çekici, pozisyonunda tutmak için şaft üzerindeki eksen konumu da belirleyici olmaktadır.

Deşarj elektrodları her bir kısımdaki bir şaft tarafından çekişlenmektedir. Her bir kısımda 2 DE çekiçleme şaftı elektrodların yüksekliği boyunca 2 seviyede olacak şekilde yer almaktadır. Şekil 3.6'de gösterilen 2 şaftın yürütme sistemi elektrostatik filtre çatısında yer almaktadır. Tahrik mili, dikey olarak aşağı inmekte ve dönüşü 2 adet dişli zincir çarkı sayesinde gerçekleştirilmekte; hareketi, DE çekiçleme sistemine ait 2 yatay çekiçleme şaftına iletmektedir. Bu ekipmanlar yüksek voltaj şartları altında çalıştığından dolayı, tahrik mili bir adet izole eleman içermektedir; bu izole eleman topraklanmış mili, yüksek voltaj seviyesinde yer alan DE çekiçleme sisteminden ayırmaktadır.

DE çekiçleme sisteminin tek bir çekicinin vuruşunun transferi gaz akışına çapraz şekilde konumlanmış ortak çekiçleme çubuğu tarafından sağlanmakta ve bir kısımdaki tüm DE çerçevelerini bağlayarak, aynı anda DE'lerinin hizalanması sağlanmaktadır.

Şekil 3.6: Çekiçleme şaftı



Yüksek temizleme verimliliği için önemli etkenlerden bir tanesi de elektrostatik filtre boyunca gerçekleşen akış dağılımıdır. Elektrostatik filtre içerisinde eşit olarak dağılım sağlama amacı ile öncelikli olarak giriş kanalında tüm kesite yayılan gaz akışı sağlanmalıdır. Her ne kadar giriş kanalı içerisinde yönlendirme kanatları veya benzeri akış dağılım parçaları monte edilmemiş ise de kanalın kendisi yuvarlak köşelerden oluşmakta, bu da her büküm noktasında resirkülasyondan dolayı oluşan ölü bölgeleri önlemektedir. Giriş kanalı Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

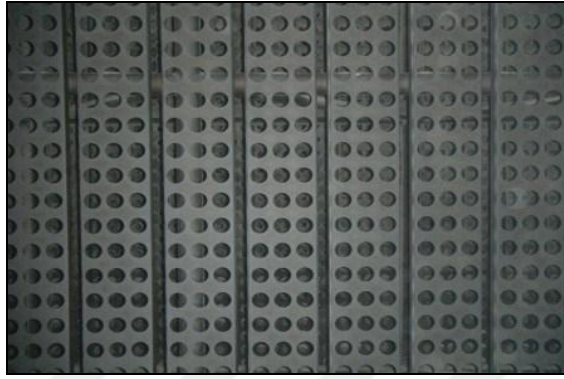
Şekil 3.7: Giriş kanalı



Giriş kanalında sonra gelen giriş kapağı 3 adet delikli plakadan oluşmaktadır. Şekil 3.8’de gösterilen plakaların temel özelliği şekil itibari ile aynı olmalarıdır. Aralarındaki

fark, ilk delikli plakada perdeler arası mesafe üçüncü perdedeki aralığa göre fazla olacak şekilde konumlandırılmış olması ve açık alanın kapalı alana oranının yükseltilmiş olmasıdır. Bu da gaz geçişini kolaylaştırmaktadır.

Şekil 3.8: Girişteki delikli plaka



İkinci ve üçüncü plakalar aynı porozite değerine sahip olmakla birlikte, hesaplanan porozite değerleri (açık alan/toplam alan);

- a. 1. Plaka: Yüzde 38
- b. 2.Plaka: Yüzde 32
- c. 3.Plaka: Yüzde 32 şeklindedir.

İkinci ve üçüncü perdelerde ek olarak -yatay yönde kısa olacak şekilde- yönlendirici kanat veya yönlendirme plakası mevcuttur. Şekil 3.9'de gösterilen bu plakalar 2. plakanın üst kısmında, akışı yukarı doğru çapraz yönden yatay yöne, 3. plakanın aşağı kısmında ise, yönlendirme plakaları akışı aşağı doğru çapraz yönden yatay yöne yönlendirmektedir.

Şekil 3.9: Yönlendirme plakaları



Plakaların aşağı kısmında bulunan yaklaşık 150 ile 200 mm arasındaki boşluk bunkerlere yönelen toz parçacıklarının geçişini kolaylaştırmak ve akış dağılımına pozitif etki yapması amacı ile konumlandırılmıştır.

Sistemin bir diğer parçası olan ve Şekil 3.10'de gösterilen bunkerler toplama elektrodlarından çekiçleme sonucu düşen toz parçacıklarının toplanmasını sağlamaktadırlar. Bunkerlerin sonundaki yönlendirme plakaları da bu görevi üstlenmektedir.

Şekil 3.10: Bunkerler



Sistemin en son elemanlarından biri olarak yer alan ve Şekil 3.11’de gösterilen çıkış kapakları plakadan oluşan duvar ve bunlar arasındaki boşluktan oluşmaktadır. Bu plaka duvarlar, gazın ivmesini çok erken kesmektedir ve altındaki boşluk sayesinde tozun bunkerlere yönelmesini sağlamaktadır.

Şekil 3.11: Çıkış kapağı



Sistemin son elemanı olan çıkış kanallarının, bulunduğu konum itibari ile içerisinde bulunan gazın hızının ve yönünün elektrostatik filtre gaz dağılımına etkisi çok az olsa da konumu çıkış kapağının merkez çizgisinden çok yukarıda veya aşağıda olmamalıdır. Bu alt sistemlerin yanında elektrostatik filtre içerisinde bulunan yüksek gerilim kaynağı sistemleri olan trafolar bu tezin konusunu oluşturmadığından incelenmemiştir.

3.2 ELEKTROSTATİK FİLTRE PERFORMANSI

Yukarıdaki bölümlerde özetlendiği üzere elektrostatik filtre performansını etkileyen faktörleri 3 ana grupta toplayabiliriz, bu gruplar;

- I. Proses Değişkenleri**
 - a. Baca gazı içeriği (SO₃, H₂O, O₂, toz vb.)**

- b. Elektrostatik filtre akış yönünde gerçekleşen sızıntı sebepli ek hacim (hava ön ısıtıcı, kazan vb.)
- c. Uçucu toz içeriği; alkali metaller, yanmamış karbon (gaz özgül direnci)
- d. Baca gazı sıcaklığı
- e. Yerel basınç (santral yükseklik etkisinden oluşan)

II. Elektrostatik Filtre Donanımı

- a. Sınır genişliği
- b. Trafo setleri
- c. Kontrol mekanizması
- d. Akış dağılımı (yönlendirme plakaları vb.)
- e. Gövde (sızıntı vb.)

III. Operasyonel

- a. Çekiçleme stratejisi
- b. Bakım
- c. Yük durumu

Bu ana başlıklar altında toplanabilecek olan elektrostatik filtre performans etkenlerini baz alarak kullanılan değişkenler;

- a. Farklı kömür tipleri
- b. Farklı yük durumları
- c. Çevresel koşullar
- d. Süreç kalitesi
- e. Özgül kömür içeriği
- f. Özgül kül içeriği
- g. Güç çıkışı ve verimlilik temelli yakıt kütleli girdisi
- h. Havanın bağıl nemi
- i. Yanma havası oranı
- j. Gösterge basıncı
- k. Gaz sıcaklığı
- l. Hava ön ısıtıcı sızıntısı

- m. Gövde geometrisi
- n. Aktif bölüm uzunluk ve boy bilgileri
- o. Toplam uzunluk ve boy bilgileridir.

1230 megawatt (MW) kurulu güç kapasite sahip, ithal kömür ile çalışan pulverize kazan kullanarak elektrik üretimi sağlayan kömür santralinde farklı kömür özelliklerine ve farklı elektrostatik filtre dizayn değerlerine göre toz emisyon hesaplamaları yapılarak, farklılık gösteren etkenlerin toz emisyonu üzerinde etkisini incelemek ve bu farklılık gösteren toz emisyonlarının değişen yönetmeliklerin getirdiği limitlere uygunluğunu incelemek amacı ile kullanılan metodoloji ve hesaplama detayları aşağıdaki bölümde verilmiştir.

3.2.1 Operasyonel Sabitler

Elektrostatik filtre toplama verimliliği değerlerini farklı durumlar altında incelemek için öncelikle tüm durumlarda sabit olarak kabul edilecek santral teknik bilgi hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve temel varsayımlarda bulunulmuştur.

Öncelikli olarak santralde tüketilen yakıt miktarını direk, santral emisyon değerlerini de dolaylı olarak etkileyen etmenlerin başında gelen santral verimliliği hesaplanmıştır. Çınar ve Çakır'ın (2015, ss. 108) çalışmasında benzer özelliklere sahip santral için verimlilik değeri türbinden elde edilen mekanik güçten kondensat ve besleme suyu pompaları güçlerinin çıkarılması ve bu güç değerinin santral yakıt girdisinin ortama sağladığı enerjiye bölünmesi ile bulunmuştur.

$$\eta_{santral} = \frac{W_{net}}{E_{kömür}} \quad (3.1)$$

Türbinden gelen net mekanik güç hesaplanması için yukarıdaki paragrafta belirtildiği üzere denklem [3.2] kullanılmıştır;

$$W_{net} = W_{YBT} + W_{OBT} + W_{ABT} - W_k - W_{bs} \quad (3.2)$$

Burada;

W_{YBT} yüksek basınç türbini güç değeri

W_{OBT} orta basınç türbini güç değeri

W_{ABT} alçak basınç türbini güç değeri

W_k kondensat pompası güç değeri

W_{bs} besleme suyu pompası güç değerini temsil etmektedir.

Santral yakıt girdisi için ise;

$$E_{kömür} = m \cdot H_U \quad (3.3)$$

formülü kullanılmıştır. Burada;

m kömür tüketimini

H_u yakıt alt ısı değerini temsil etmektedir.

Bahsi geçen tez çalışması⁹ içerisinde hesaplamalar için kullanılan kömür özellikleri bu tez kapsamında kullanılan farklı tip kömür özelliklerine benzerlik gösterdiğinden dolayı (bakınız Tablo 3.2&Tablo 3.5), hesaplanan yüzde 41,12 verim değeri santral verimlilik değeri olarak bu tez çalışmasında doğru kabul edilmiş ve konservatif mühendislik yaklaşımı ile emisyon hesapları için yüzde 40'lık verimlilik değeri tüm senaryolarda sabit olarak kullanılmıştır.

⁹ Çınar, B. & Çakır, C. (2015). Eren Enerji Elektrik Üretim A.Ş. Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. Yalova, Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

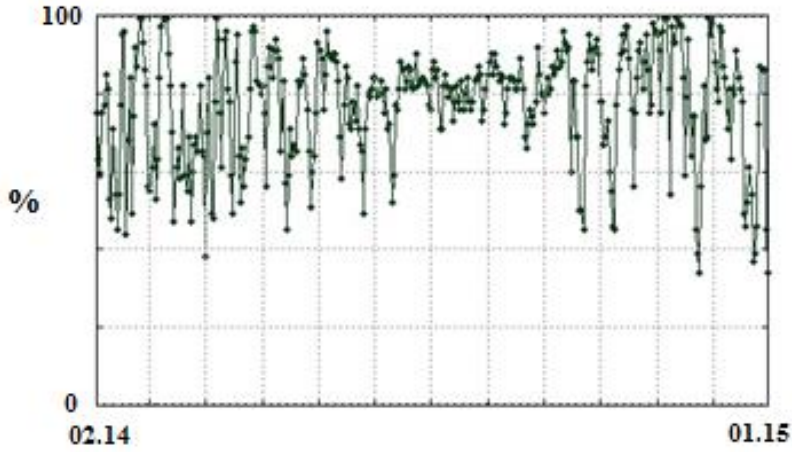
Tablo 3.2: Referans kömür özellikleri

Elementer Analiz	Birim	Referans Kömür
C	%	66,06
H₂		3,66
O₂		4,16
N₂		1,5
S		0,9
Toplam Nem		10
Kül		13,72
Alt Isıl Değer		MJ/kg

Santral elektriksel güç değeri EÜ/369-1/479 numaralı Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu lisans bilgisine göre her bir ünite için 615 MW değerindedir.

Santralin bulunduğu il olan Zonguldak'taki bağıl nem oranı (bakınız Şekil 3.12) için geçmiş meteorolojik bilgiler incelenerek, 1 Şubat 2014 ile 31 Ocak 2015 tarihleri arasında kalan süreç için ortalama değer olan yüzde 75 kullanılmıştır.

Şekil 3.12: Zonguldak ili ortalama bağıl nem değeri



Kaynak: Weather online

Bir diğ er meteorolojik girdi olan ortam sıcaklığı için 1950 ile 2015 yılları arasındaki aylık ortalama sıcaklıklar (bakınız Tablo 3.3) incelenerek, ortam sıcaklığı olarak 13,6 °C kullanılmıştır.

Tablo 3.3: Zonguldak ili aylık ortalama sıcaklık değerleri

Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran
6,2	6,2	7,5	11,4	15,5	19,7
Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
21,9	21,9	18,7	15,1	11,6	8,5

Kaynak: Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü

Oluşturulacak olan senaryo analizlerinde her bir senaryo için sabit olarak kalacak olan santral teknik verileri Tablo 3.4’de belirtildiği gibidir;

Tablo 3.4: Santral teknik bilgileri

Santral verimliliği	%	40
Elektriksel güç	MW	615
Yanmamış karbon oranı	%	0,5
Havanın bağıl (izafi) nemi	%	75
Ortam sıcaklığı	°C	13,6

3.2.2 Operasyonel Değişkenler

3.2.2.1 Yakıt bilgileri

İlk olarak operasyonel santrallerde kullanılan ithal kömür için farklı alternatifler değerlendirmeye alınarak, kül analizleri ile birlikte değerlendirilmiştir. İthal kömür santrallerinde karşılaşılabilecek problemlerden birisi olan yakıt tedariği probleminin yol açabileceği sorunları görebilmek ve kömürün ekonomik değerinde değişiklik olması durumunda alternatif yakıtların santral performansında yaratacağı etki gözlemlenmek istenmiştir.

Ülkemizde kullanılan ithal kömür santralleri ile ilgili yönetmelik bazında bazı kısıtlamaların olması gerçekçi senaryolar oluşturmak amacı ile göz önünde bulundurulmuştur. Santral teknolojisinin kullanılan kömür özelliklerine paralel olacak şekilde dizayn ediliyor olması da seçilen alternatiflerin, temelde kullanılan kömür özelliklerinden çok farklı yapıda olmasını engeller nitelik taşımaktadır.

İncelenecek olan santral için oluşturulacak olan farklı senaryoların oluşturulmasında kullanılacak olan yakıt girdileri Tablo 3.5’de gösterildiği şekildedir;

Tablo 3.5: Yakıt bilgileri

Yakıt Türü		Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
Elementel Analiz	Birim			
C	%	64,07	66,32	71,97
H		4,5	3,58	4,5
S		0,64	0,49	0,9
N		1,1	1,56	1,52
O		8,1	5,53	5,47
W		11	8,2	8,93
A		10,6	14,3	6,56
Cl				
Alt Isıl Değeri	MJ/kg	24,987	24,911	28,625

3.2.2.2 Kül bilgileri

Kullanılacak olan kömür tiplerine göre değişen ve toz özgül direnci üzerinde yüksek oranda etkisi olan kül elementel analiz sonuçları seçilen kömür tipleri için Tablo 3.6’da listelenmiştir;

Tablo 3.6: Kül bilgileri

Kül Analizi	Birim	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
Li₂O	%	0	0	0
Na₂O		0,56	0,13	1,3
K₂O		2,07	0,5	2,9
MgO		2,01	1,86	2,1
CaO		2,17	8,64	3,7
Fe₂O₃		8,56	3,57	9,8
Al₂O₃		21,22	30,97	27,9
SiO₂		59,9	48,77	47,2
TiO₂		1,01	1,62	1,2
P₂O₅		0,2	1,76	1,4
SO₃		2,07	2,64	2,3
CaSO₄		0	0	0
CaO		0	0	0

3.2.2.3 Diğer operasyonel değişkenler

Operasyonel koşullardan bir diğeri olan uçucu gaz sıcaklık değerinin de Noda ve Makino'nun (2010) da çalışmalarında değindikleri üzere toz direnci, alkali metal konsantrasyonu ve elektrostatik filtrenin toplama verimliliği üzerinde yüksek oranda etkisi bulunmaktadır. Özellikle sıcaklığın toz direnci üzerindeki etkisi IEEE 548 nolu standart kapsamında direnci sıcaklığa bağlı bir fonksiyon olarak hesaplayarak ortaya konulmuştur.

Bir diğer operasyonel koşul olan hava ön ısıtıcı kaçağı değeri sadece elektrostatik filtre performansı üzerinde değil genel santral performansı üzerinde göz ardı edilmiş bir öneme sahiptir. Yapılan çalışmalar yoğunlaştırıcı ile birlikte hava ön ısıtıcılarının, santral termal verimliliğine etki eden en önemli faktörler arasında yer aldığını ortaya koymaktadır. Engelleme yolunun diğer santral problemlerine göre görece kolay olduğu hava kaçaklarının, düzgün sızdırmazlık elemanları kullanılarak önlenmesi ve santral ısıtıl

kazancını kilovat saat başına 75 btu artırılabilceği bilinmektedir. Hava ön ısıtıcı kaçağı oranı olarak seçilen değerler hali hazırda operasyonel olan santrallerde karşılaşılan değerler olarak belirlenmiştir. Normal operasyonel koşullar altında yüzde 15 hava ön kaçağı değeri kabul edilebilir olarak değerlendirilmektedir. Yüzde 10 hava kaçağı oranı iyimser senaryo oluşturmak amacı ile kullanılacaktır. Operasyonel santrallerin bazılarında karşılaşılan bir değer olan yüzde 25 hava ön ısıtıcı kaçağı değeri de kötümser senaryo için kullanılacaktır.

Oluşturulan bu temel senaryolara ek olarak elektrostatik filtre mekanizmasında gerçekleşecek olası arıza durumlarında elektriksel alanın eksilmesi durumunu gözlemlemek amacı ile ek senaryolar oluşturulmuştur. Bu senaryolar elektrostatik filtre kontrol ünitesi optimizasyon sistemleri ile ilgili ileride yapılabilecek çalışmalara temel oluşturabilme özelliğine sahiptir. Elde edilecek temiz gaz toz konsantrasyonunun uyulması gereken yönetmeliğin şart koştuğu limit değerinden düşük olması durumunda kontrol sisteminin müdahalesi ile elektriksel alan kapatılması neticesinde limit değerine daha yakın bir değere ulaştırılarak, enerji tasarrufu sağlanmasına yol açılabilir.

3.2.3 Metodoloji ve Hesaplamalar

Santralde kullanılan yakıt miktarı girilen kömür özellikleri ve santral teknik bilgileri ışığında denklem [3.4] ;

$$m = \frac{\left(\frac{P}{LHV}\right)}{1 - \frac{UC}{100}} * 100/n \quad (3.4)$$

ile bulunmaktadır. Burada m hesaplanması istenilen yakıt girdi miktarını kg/saniye cinsinden, P santral gücünü MW cinsinden, LHV yakıt alt ısıl değerini, UC yanmamış karbon oranını ve n (n_{santral}) de santral verimliliğini temsil etmektedir. Kullanılan bu bilgiler ışığında sırasıyla aşağıdaki hesaplamalar/düzeltilmeler yapılarak temiz gaz toz konsantrasyonu bulunacaktır;

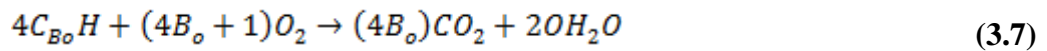
- I. Hacimsel akış miktarı, gaz analizi, toz içeriği
- II. Ham gaz içeriği ve gerekli temiz gaz toz içeriği
- III. Özgül toz direnci
- IV. Elektrostatik filtre boyutlandırılması

Hacimsel akış miktarı, gaz analizi ve toz içeriği hesaplamaları için yapılan incelemelerde, yakıt içerisinde kütle ve mole bölümleri açısından en büyük payı karbonun elinde bulundurduğu gözlenmiştir. Kütle ve mole bölümleri açısından toplam nemden daha küçük paya sahip olan hidrojen, mole bazlı bölümde karbondan sonra en büyük paya sahip olmaktadır. Yanma süreci sırasında toplam nem, su buharı haline geçmektedir. Kullanılan kömürün kül analizinden anlaşılacağı üzere kül çeşitli SiO_2 ve Al_2O_3 gibi oksitlerden oluşmaktadır. Nitrojen, oksijen ve kükürt içeriği birçok teoriksel hesaplamada göz ardı edilmektedir (Xu ve Yuan 2015, ss.366-375).

$$B_0 = \frac{C_{ar}}{12xH_{ar}} \quad (3.5)$$

$$B_1 = \frac{18xC_{ar}}{12xM_t} \quad (3.6)$$

denklemleri ile karbonun mole cinsinden payı hidrojen ve toplam neme bölünerek ilgili katsayılar hesaplanmaktadır. Bu formüllerde sırasıyla, C_{ar} , H_{ar} ve M_t karbon, hidrojen ve toplam nemin kütle ve mole bölümlerini simgelemektedir. Kömürün kimyasal formülü C_{B_0} ile simgelenirse, tüm yanma reaksiyonu;



halini almaktadır. Havanın yaklaşık olarak mole cinsinden karışımı bilinmektedir. Hava yüzde 78,12 nitrojen oksitten ve yüzde 21,88 de oksijenden oluşmaktadır. Denklem [3.7]'ye göre 1 mole havanın katıldığı yanma reaksiyonuna $0.8752/(4B_o + 1)$ mole $C_{B_0}H$ girmektedir. Fazla hava katsayısı olarak bilinen bu değer yanma reaksiyonlarında

pratikte bilinen bir değer olarak kabul görmektedir. İncelenen santral kapsamında bu değer genel kabul gören bir değer olarak 1,18 olarak kabul edilmiştir. Bu havaya rağmen ortamda bulunan karbonun bir kısmı yanmadan reaksiyondan çıkmakta, mekanik tamamlanmamış yanma kaybı (q_4) olarak literatürde yer alan kayba yol açmaktadır. Bir diğer ifade ile C_r olarak tanımlanan $0.8752B_o/(4B_o + 1)(1-q_4)$ mol karbon 1,18 mol fazla hava ile tüketilmektedir. Sonuç olarak, tüm yanma reaksiyonu $C_r + (1/4.H_r)$ mol oksijen tüketme ve kömür içinde bulunan $C_r/((1-q_4)B_1)$ mol toplam nem buharlaşmaktadır.

Kütlesel çevrime göre dominant gazların mol sayıları denklem [3.8] ile [3.10] arasında gösterildiği şekilde olmaktadır;

$$n_{O_2} = 0,2188a - (C_r + \frac{1}{4}H_r) \quad (3.8)$$

$$n_{CO_2} = C_r = \frac{0.8752B_o}{(4B_o + 1)} * (1 - q_4) \quad (3.9)$$

$$n_{H_2O} = \frac{C_r}{(1 - q_4) * B_1} + \frac{1}{2} * H_r \quad (3.10)$$

Bu denklemlerin birleştirilmesi ile uçucu gaz içeriği mol fraksiyonları (bölümleri), [3.11] ile [3.14] arasında gösterilen denklemlerdeki değerlere sahip olmaktadır;

$$r_{O_2} = n_{O_2}/(n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O}) \quad (3.11)$$

$$r_{CO_2} = n_{CO_2}/(n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O}) \quad (3.12)$$

$$r_{N_2} = n_{N_2}/(n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O}) \quad (3.13)$$

$$r_{H_2O} = 1 - (r_{O_2} + r_{CO_2} + r_{N_2}) \quad (3.14)$$

Elektrostatik filtrenin toplama verimliliğini etkileyen en önemli faktörlerden birisi olan uçucu gaz direnci, gazın içeriğinin bulunmasını takip eden adım içerisinde hesaplanmaktadır. Elektrostatik filtrenin boyutlandırılması ve performans gelişimi açısından kritik öneme sahip olan gaz direnci Bickelhaupt tarafından geliştirilmiş olan deneysel metod ile hesaplanmaktadır (1975).

Yukarıdaki paragrafta belirtildiği üzere elektrostatik filtrenin performansını etkileyen gaz akışı, gaz sıcaklığı, gaz içeriği, nem miktarı gibi birçok etken mevcuttur, elektrotlar arası mesafe, elektrot boşluğu ve çekiçleme mekanizması gibi fiziksel olarak performans etken birçok parametre de bulunmaktadır ancak tek başına elektrostatik filtre performansını ve boyutlandırmasını etkileyen toz direnci kadar önemli bir etken yoktur. Yüksek direnç sahibi toz, akım geçerken toplama elektrotları alanında yüksek elektriksel alan oluşturmaktadır. Bu elektriksel alan toz tabakası üzerinden lokal iyonizasyon yaratmaya yetecek kadar güçlüdür ve bu lokal iyonizasyon süreci arka korona (*back corona*) olarak tanımlanmaktadır. Ters kutuplarda yüklenmeye sebep olan bu etken ile, toz tabakasından yayılan pozitif yükler negatif yükleri nötralize ederek filtre performansını bozmaktadır. Nötralize olmuş toz parçacıkları gaz akışı içerisinde toplanmaya maruz kalmadan hareketlerine devam edebilmektedirler. Farklı toz dirençlerinin elektrostatik filtre performansı üzerindeki etkisi Chandra¹⁰'nın çalışmasında Tablo 3.7'deki gibi özetlenmiştir;

Tablo 3.7: Toz direncinin elektrostatik filtre üzerindeki etkileri

Toz Direnci	Tanım	Hıza Etkisi	Toplamaya Etkisi
10^4 - 10^8 ohm-cm	İletken	Düşük migrasyon hızı	Düşük toplama verimi
10^8 - 10^{10} ohm-cm	Normal direnç	Ortalama migrasyon hızı	Ortalama toplama verimi
10^{10} - 10^{11} ohm-cm	Ortalama direnç	Yüksek migrasyon hızı	Yüksek toplama verimi
10^{11} - 10^{13} ohm-cm	Yüksek direnç	Çok düşük migrasyon hızı	Düşük toplama verimi

¹⁰ Chandra, A. *Some Investigations on Fly Ash Resistivity Generated in Indian Power Plants*. Centre for Energy Studies. Indian Institute of Technology

Uçucu gazın direnci kömür ve külün kimyasal içeriğinin yanında santraldeki kazan sonrası ortam özelliklerinden de etkilenmektedir. Bundan dolayı uçucu gaz yanında, gazın sıcaklık ve nem durumu da önem arz etmektedir. Bu amaca hizmet etmesi amacıyla incelenen santralde farklı etken durumlarının elektrostatik filtre performansı üzerindeki etkilerini gözlemek amacı ile farklı gaz sıcaklıkları incelenmiştir.

Bickelhaupt, kömür ve uçucu gaz analizlerinden uçucu gaz direncini hesaplamak amacı ile korelasyonlar önermiştir. Uçucu gaz direncini hacim ve yüzey direnci cinsinden hesaplamayı öneren metodolojide kapsanan hacimsel direnç, yüzeysel direnç ve absorbe asit direnci korelasyonları sırasıyla şu şekildedir;

$$p_v = \exp\left[(-1,8916\ln X - 0,9696\ln Y + 1,237\ln Z + 3,62876) - (0,069078)E + \left(\frac{9980,58}{T}\right)\right] \quad (3.15)$$

$$p_s = \exp\left[27,59774 - 2,233348\ln X - 0,00176W - 0,069078E - 0,00073895W\left(\exp\frac{2303,3}{T}\right)\right] \quad (3.16)$$

$$p_a = \exp\left[59,0677 - 0,85472CSO_3 - \frac{13049,47}{T} - 0,069078E\right] \quad (3.17)$$

Bu formüllerde;

X; Li+Na, yüzdesel atomik konsantrasyonunu,

Y; Fe, yüzdesel atomik konsantrasyonunu,

Z; Mg+Ca, yüzdesel atomik konsantrasyonunu

E; uygulanan elektriksel alanı,

CSO_3 ; CSO_3 konsantrasyonunu,

W; uçucu gazdaki nemi ifade etmektedir.

Bu hesaplamalar neticesinde toplam direnç;

$$\frac{1}{p_{vsa}} = \frac{1}{p_{vs}} + \frac{1}{p_a} \quad (3.18)$$

$$\frac{1}{p_{vs}} = \frac{1}{p_v} + \frac{1}{p_s} \quad (3.19)$$

denklemleri ile bulunmaktadır.

Takip eden hesaplamalar için Bölüm 2’de detaylı olarak incelenen ve elektrostatik filtre sürecinin etkileyen birçok parametre olması nedeni ile verimlilik hesaplamalarının yapılması esnasında literatürde önerilen empirik metod bu tez kapsamında takip edilmiştir.

Partikül boyutu, partiküllerin toplanma eğilimi, bunkerler içerisinde toplanma/kayma ve benzeri tanımlanması güç etkenleri, süreç dahilinde değerlendirme amacı ile uygulama alanları ve temel özellikleri benzer olan elektrostatik filtre bilgileri kullanılarak, yeni tanımlar/hesaplamalar yapmaktan kaçınılmıştır. Literatür taraması bölümünde belirtildiği üzere günümüzde ticari olarak kullanılan ve karşılaştırma yapmadan hesaplama yapılan modeller bulunmamaktadır. İncelenecek olan elektrostatik filtre uygulaması ile mevcut elektrostatik filtre uygulamasını karşılaştırarak, temiz gaz toz konsantrasyonu değeri elde edebilmek amacıyla takip edilen metotta öncelikle; benzer uygulamalarda kullanılan referans filtrenin geometrisi, ayırma verimliliği, gaz sıcaklığı, nem, giriş toz konsantrasyonu, gaz akış hacmi, özgül toz direnci gibi bilgiler elde edilmektedir. Elde edilen bu bilgilerden özgül toplama alanı, Deutsch (18) migrasyon hızı wD , ortalama gaz hızı ve zaman bilgileri alınmaktadır (Adım-0). Elektrostatik filtre içerisindeki kompleks fiziksel süreçleri baypas ederek, yeni tasarlanan elektrostatik filtre hesaplamalarında kullanabilmek amacı ile, mevcut elektrostatik filtre için bilinen hacimsel gaz akışı ve toplama alanı bilgileri yanında ham gaz ve temiz gaz toz konsantrasyonu bilgileri ışığında migrasyon hız değeri hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar denklem [3-20] ile [3.22] arasında süreç olarak verilmiştir (Adım-1).

$$c_{rein} = c_{roh} \cdot e^{-w_{th} \frac{A}{V}} \quad (3.20)$$

$$\eta(d_p) = 1 - e^{-w_{th} \frac{A}{V}} \quad (3.21)$$

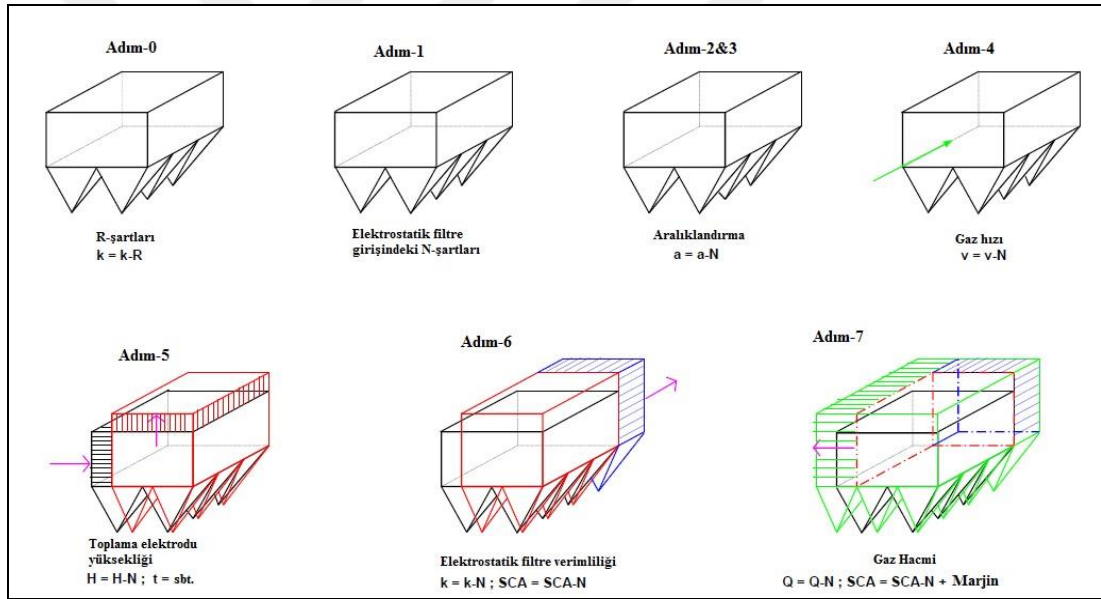
$$c_{rein} = c_{roh} \cdot e^{-(w_k \frac{A}{V})k} \quad (3.22)$$

Burada A, elektrostatik filtre toplam toplama alanını, V ise seçilen operasyon koşulu altındaki hacimsel gaz akış değerini temsil etmektedir. Denklem [3.20]'den elde edilen migrasyon hızı ile elektrostatik filtrenin denklem [3.21]'ye göre operasyonunu devam ettirmesi beklenmektedir. Denklem [3.20] ile elde edilen ve efektif w değeri olarak adlandırılan migrasyon hızı tüm deneysel parametreleri dikkate almaktadır. Deneylerin göstermiş olduğu üzere yeni santralin dizaynı sırasında bu w değeri oldukça hassas sonuçlar vermektedir. Gazın giriş ve çıkış noktalarından geçmesi arasında geçen süreçte partikül boyutu, elektriklenme süreci ve migrasyon hızı birçok değişiklik göstermektedir. Kalan parçacıkların toplanması zorlaşmakta, yüksek toplama verimliliği elde edilebilmesi amacı ile mevcut denklemde değişiklikler yapılması zorunlu kılınmaktadır. Bu sebeple denklem [3.22], denklem [3.20] modifiye edilerek elde edilmiştir. Yeni elektrostatik filtre dizaynı sırasında denklem [3.20] ve [3.22], birçok düzeltme eğrisi ile tamamlanarak; gaz sıcaklığı, toz direnci gibi etkenlerinde süreç içerisinde etkileri göz önünde bulundurulmaktadır (Electrostatic precipitators- Process and waste gas cleaning, VDI 3678).

Yeni santral katsayısı hesaplamasında, toplama elektrotları arasındaki mesafe/boşluk da önem arz ettiğinden dolayı, yeni santral ile mevcut santral arasında mesafe karşılaştırılması yapılması gereği doğmaktadır. Her ne kadar ayırma verimliliği, bu etkenden çok fazla etkilenmiyor olsa da toplama alanına ve migrasyon hızına etkisi olduğundan dikkate alınması gerekmektedir. Mevcut santral ve incelenecek santral bu parametre için aynı değere sahip olduğundan dolayı, bu değer 1 olarak seçilmiştir (Adım-2+3). Benzer akışlar elde edebilmek amacı ile elektrostatik filtre genişliğinde yapılabilecek değişiklikler, ayırma şartlarını değiştirmediklerinden dolayı elektrostatik filtre üzerinde bir etkiye sahip olmayacaktır ancak aynı hız değeri için elektrostatik filtre

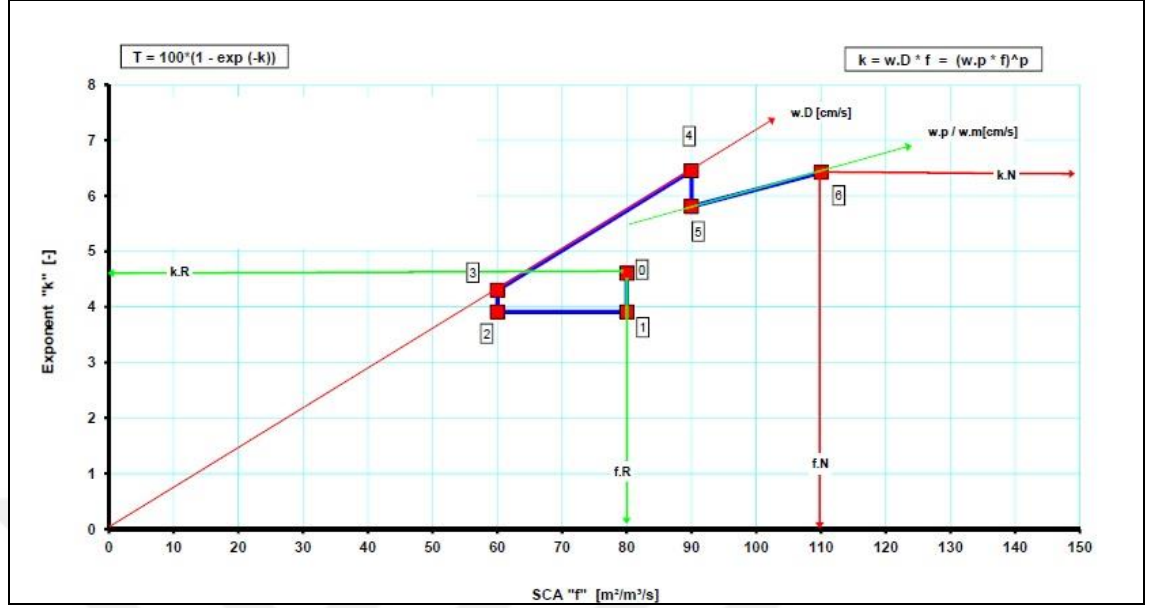
yüksekliğinin artırılması durumunda bunkerlere gidecek olan mesafenin uzaması nedeni ile karşılaştırma değeri değişecektir. Elde edilmek istenen temiz gaz toz konsantrasyonu için toplama alanının hacimsel gaz akışına (SCA) oranını değiştirecek olan uzunluk adaptasyonu yapılmaktadır. İncelenecek olan elektrostatik filtre geometrisi ve akış detayları hesaplanabilir olduğu için yeni elektrostatik filtre dizaynı sürecinde ağırlıklı olarak göz önünde bulundurulmuş bu adımlar kontrol amacı ile kullanılmıştır (Adım-4, Adım-5 ve Adım-6). Son adım olarak, girdisi yapılan mevcut elektrostatik filtre ile dizaynı girilen/hesaplanan kıyaslama yapılmak istenen elektrostatik filtre verilerine göre akış adaptasyonu yapılmaktadır. Yukarıda özetlenen bu adımlar Şekil 3.13’de gösterilmiştir.

Şekil 3.13: Elektrostatik filtre boyutlandırması



Takip edilen adımlar diyagram üzerinde gösterilecek olursa, Şekil 3.14’deki adımlar takip edilmelidir;

Şekil 3.14: Elektrostatik filtre boyutlandırma diyagram gösterimi



Özgül toplama alanının (SCA) fonksiyonu olacak şekilde gösterilen k üssü, Deutsch migrasyon hızı olan w.D veya adapte edilen migrasyon hızı olan w.p ile ifade edilebilir. Şekil 3.14'ın sağ üst kısmında gösterildiği üzere her iki migrasyon hızı da k üssü hesabında kullanılmaktadır. Şeklin sol üst kısmında ise bu üsse bağlı olarak ayırma verimliliği hesabı olan T bulunmaktadır. Yukarıdaki paragrafta özetlendiği üzere takip edilen adımların sırası ve içeriği şu şekilde de gösterilebilir;

1. Adım-0: Referans elektrostatik filtre

Referans santral katsayısı olarak özetlenebilir. Farklı sıcaklık, nem, toz direncine göre toz katsayısı, k artmakta veya azalmaktadır.

2. Adım-1: Yeni elektrostatik filtre giriş koşullarına göre düzeltme

Boşluklandırma performans üzerinde etkili olmasa da toplama alanını ve dolaylı olarak SCA'yı değiştirebilmektedir.

3. Adım-2&3: Yeni elektrostatik filtre boşluklandırmasına göre düzeltme

Boşluklandırmanın performans üzerinde etkili olduğu durumlarda, k değeri nokta 2'den nokta 3'e geçmektedir.

4. Adım-4: Yeni elektrostatik filtre hızına göre düzeltme (w.D sabit)

Hızın düşmesi halinde, daha uzun elektrostatik müdahale zamanı olacağı için k veya ayırma verimliliği artmaktadır.

5. Adım-5: Yeni elektrostatik filtre toplama elektrodu yüksekliğine göre düzeltme

Toplama elektrodunun boyunun artırılması durumunda, k değeri düşme göstermektedir.

6. Adım-6: Yeni elektrostatik filtre dizayn k değeri hesaplanması.

Toplama verimliliği eğrisi, görece yüksek temiz gaz toz konsantrasyonu beklentisi halinde w.D çizgisini, düşük temiz gaz toz konsantrasyonu talebi olması durumunda ise w.D çizgisinden ziyade w.p çizgisini takip etme eğilimde olmaktadır. Bu metodoloji kapsamında farklı operasyonel etken değerleri ile Microsoft Excel tabanlı hesaplamalar yapılarak aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

4. BULGULAR

Metodoloji bölümünde aktarıldığı üzere, seçilen santralde bulunan elektrostatik filtrenin performansı farklı operasyonel değerlere göre hesaplanarak, bu değerleri içeren senaryolar için temiz hava toz konsantrasyon değerleri bulunmuştur. Bu değerler mevcut ve önümüzdeki dönemlerde yürürlüğe girecek olan yasalar/yönetmelikler kapsamında değerlendirilerek uygunlukları incelenmiştir. İncelenen santralde değişiklik gösteren operasyonel değerler Tablo 4.1’de gösterilmiştir;

Tablo 4.1: Senaryo analizleri operasyonel farklılıklar

Operasyonel Değişkenler	Birim	Operasyonel Değişken Değerleri				
Kömür	-	Bakınız Tablo 3.5: Yakıt bilgileri			-	-
Uçucu gaz sıcaklığı	°C	120	125	130	135	140
Hava ön ısıtıcı kaçağı oranı	%	10	15	25	-	-
Elektriksel alan	-	Alan-1/bölüm 1 kapalı	Alan-1/bölüm 1 &2 kapalı	Alan-1/bölüm 1 & alan 2/bölüm 1 kapalı		

Bu operasyonel değişkenler sayesinde, her bir değişken sırasıyla sabit tutularak, diğer değişkenlerde farklı seçilen değerler kullanılarak senaryolar yaratılmıştır.

Elektrostatik filtre performansı etkileyen faktörler temel olarak mekanik ve operasyonel kısıtlamalar başlığı altında incelenebilir. Creelman¹¹ çalışmasında belirtmiş olduğu gibi partikül ve gaz alt konuları, performans değerlendirme açısından kritik öneme

¹¹ Creelman, R. *The Effect of Blending Coals on Electrostatic Precipitator Performance*. R.A.Creelman and Associates

sahiptir. Bahsi geçen çalışmada yapılan karşılaştırmalarda uçucu gaz özelliklerinin ve bu özellikleri etkileyen toz direncinin toplama direnci üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Toz direncini ve dolaylı olarak da elektrostatik filtre performansını etkileyen operasyonel faktörler bu amaçla ve 3.2.2.3’de özetlenen sebeplerle seçilerek, senaryo çalışmalarının oluşmasında kullanılmıştır.

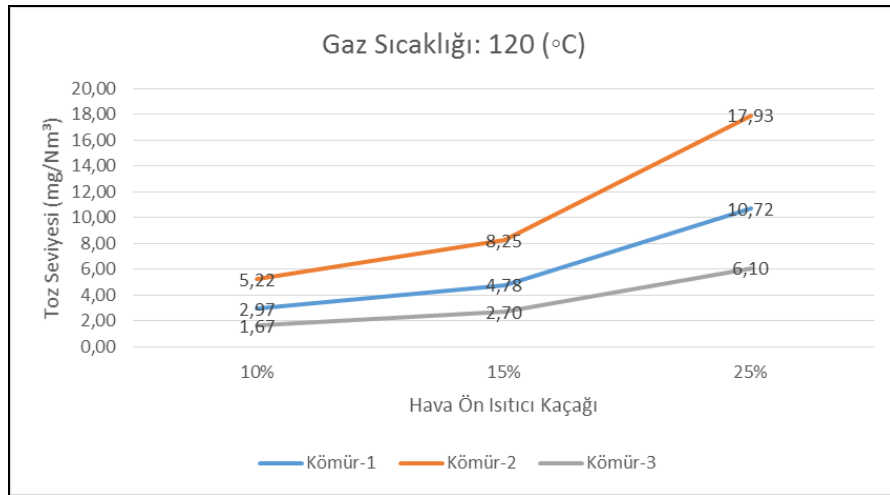
- a. 3 kömür çeşidinin 120 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranına göre performansı Tablo 4.2’de gösterilmiştir;

Tablo 4.2: Sabit sıcaklık (120 °C) durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
120	10%	2,97	5,22	1,67
120	15%	4,78	8,25	2,70
120	25%	10,72	17,93	6,10

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.1’deki gibidir;

Şekil 4.1: Sabit sıcaklık (120 °C) durumunda performans değerleri



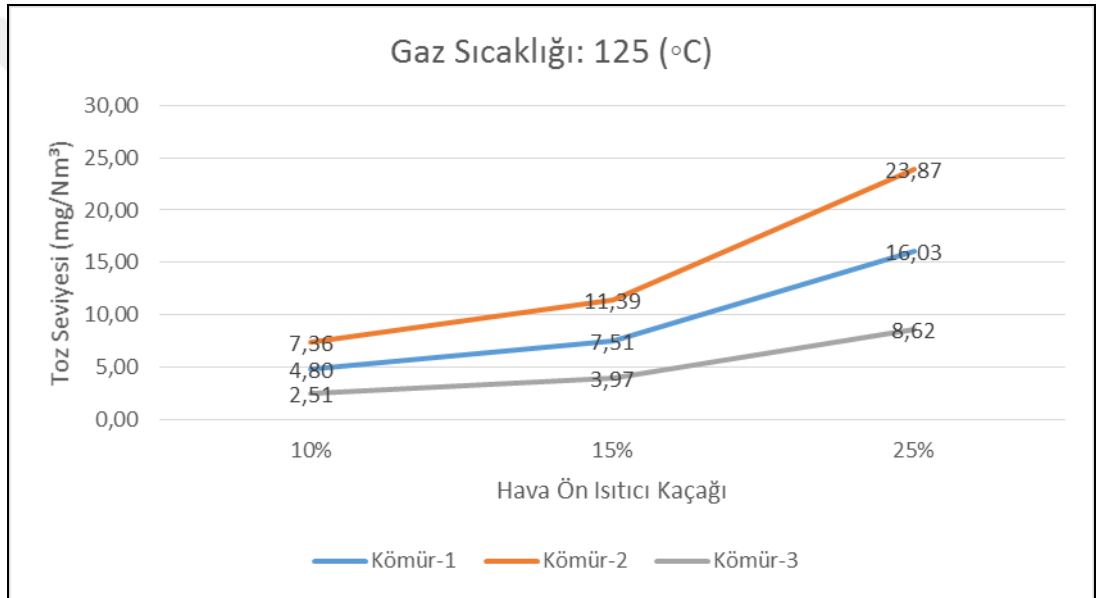
- b. 3 kömür çeşidinin 125 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranına göre performansı Tablo 4.3’de gösterilmiştir;

Tablo 4.3: Sabit sıcaklık (125 °C) durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
125	10%	4,80	7,36	2,51
125	15%	7,51	11,39	3,97
125	25%	16,03	23,87	8,62

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.2'deki gibidir;

Şekil 4.2: Sabit sıcaklık (125 °C) durumunda performans değerleri



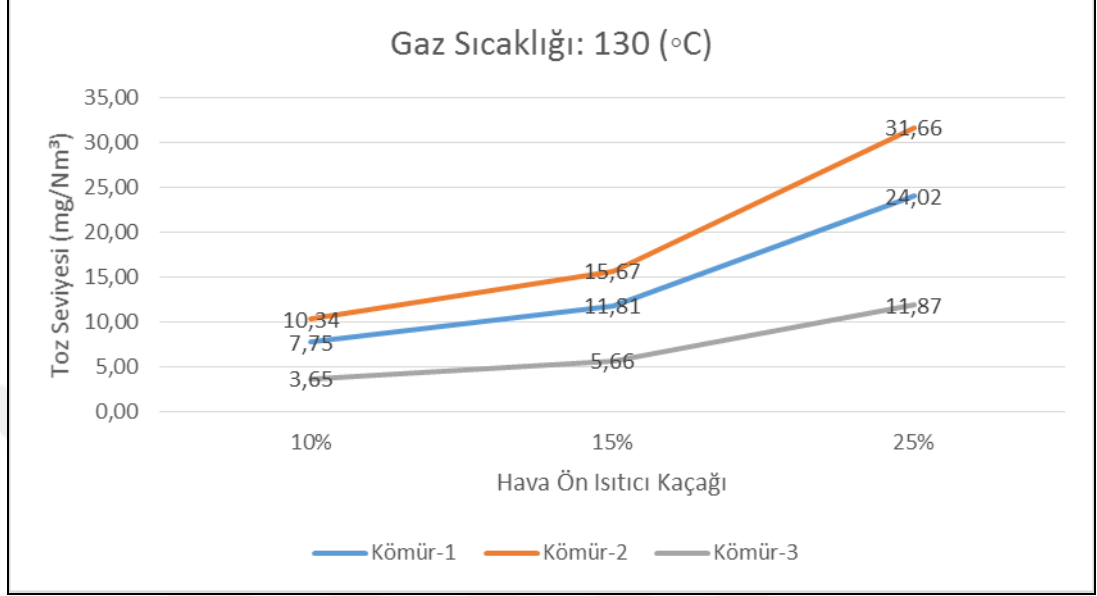
- c. 3 kömür çeşidinin 130 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranına göre performansı Tablo 4.4'de gösterilmiştir;

Tablo 4.4: Sabit sıcaklık (130 °C) durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
130	10%	7,75	10,34	3,65
130	15%	11,81	15,67	5,66
130	25%	24,02	31,66	11,87

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.3'deki gibidir;

Şekil 4.3: Sabit sıcaklık (130 °C) durumunda performans değerleri



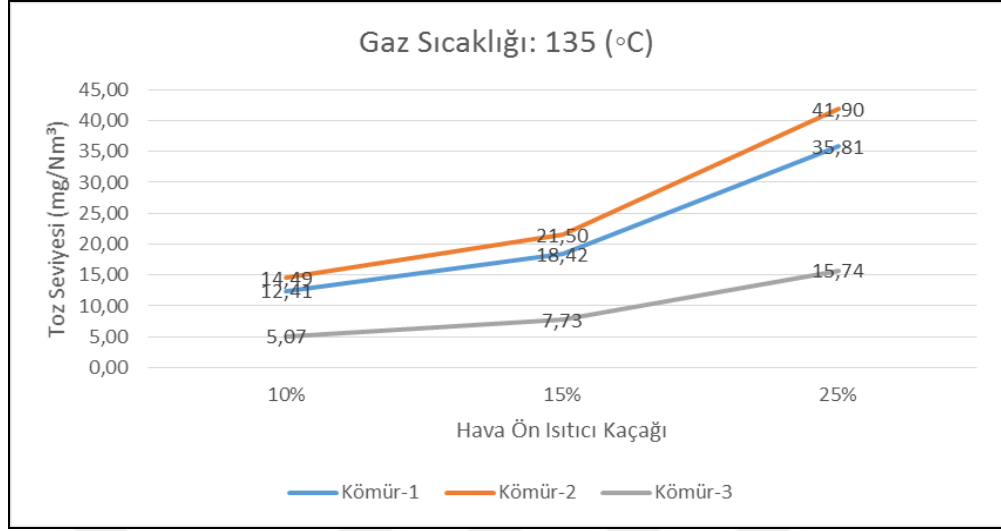
- d. 3 kömür çeşidinin 135 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranına göre performansı Tablo 4.5'de gösterilmiştir;

Tablo 4.5: Sabit sıcaklık (135 °C) durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
135	10%	12,41	14,49	5,07
135	15%	18,42	21,50	7,73
135	25%	35,81	41,90	15,74

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.4'deki gibidir;

Şekil 4.4: Sabit sıcaklık (135 °C) durumunda performans değerleri



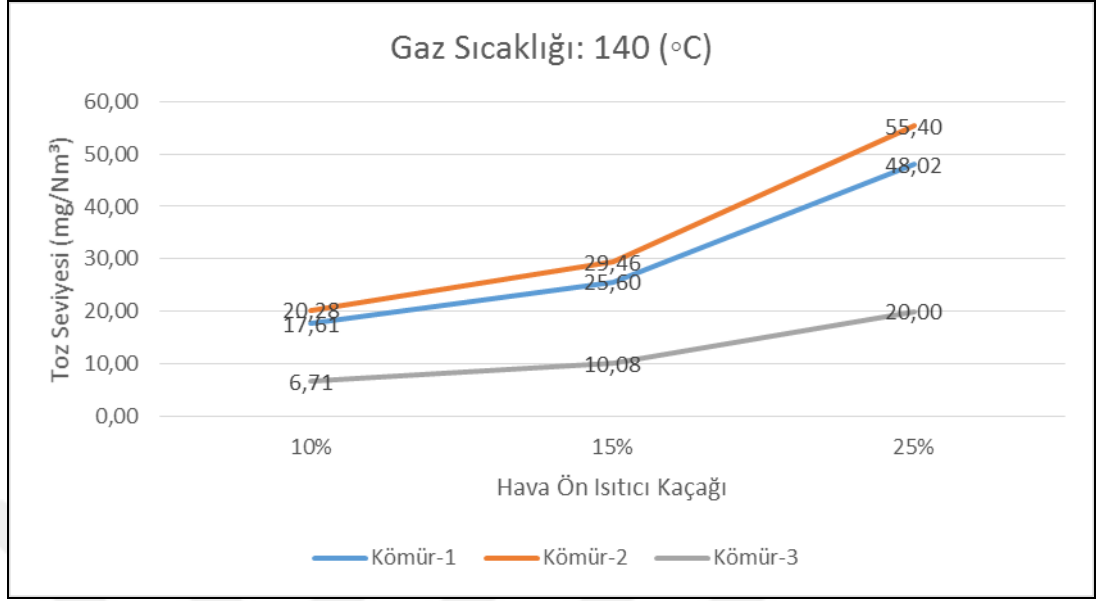
- e. 3 kömür çeşidinin 140 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranına göre performansı Tablo 4.6’da gösterilmiştir;

Tablo 4.6: Sabit sıcaklık (140 °C) durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
140	10%	17,61	20,28	6,71
140	15%	25,60	29,46	10,08
140	25%	48,02	55,40	20,00

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.5’deki gibidir;

Şekil 4.5: Sabit sıcaklık (140 °C) durumunda performans değerleri



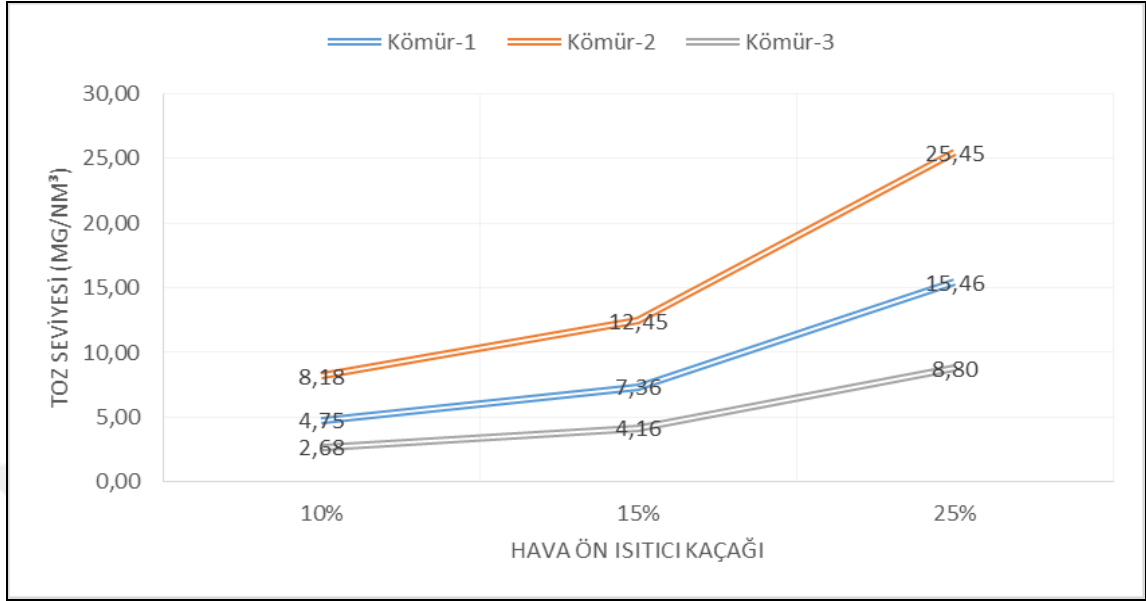
- f. 3 kömür çeşidinin 120 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve bir elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.7’de gösterilmiştir;

Tablo 4.7: Sabit sıcaklık (120 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
120	10%	4,75	8,18	2,68
120	15%	7,36	12,45	4,16
120	25%	15,46	25,45	8,80

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.6’daki gibidir;

Şekil 4.6: Sabit sıcaklık (120 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



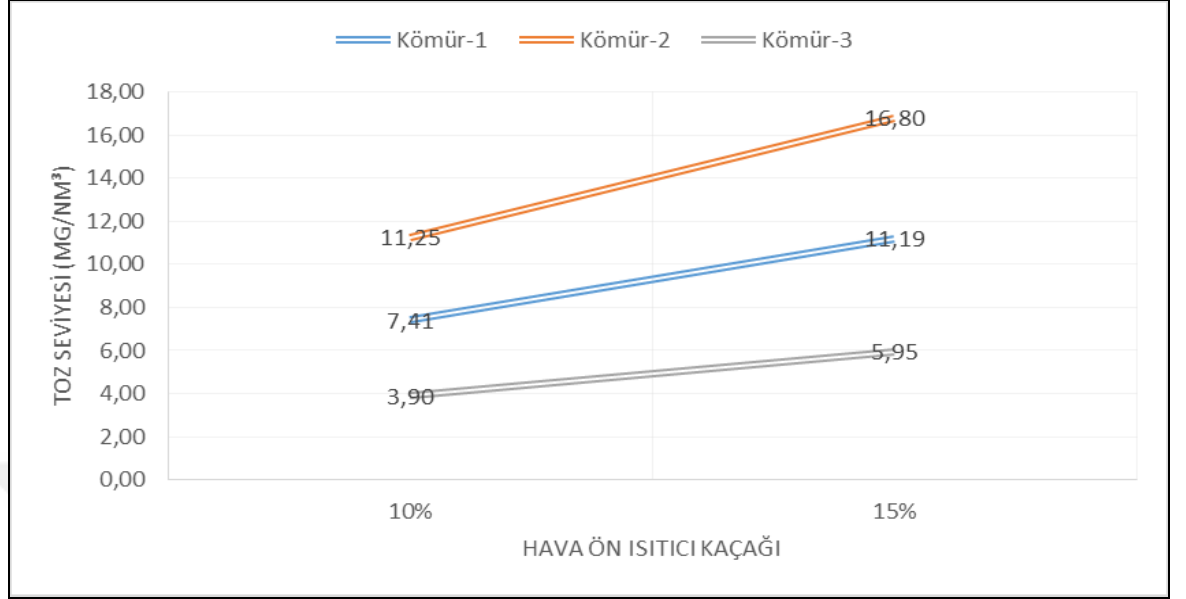
g. 3 kömür çeşidinin 125 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve bir elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.8’de gösterilmiştir;

Tablo 4.8: Sabit sıcaklık (125 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
125	10%	7,41	11,25	3,90
125	15%	11,19	16,80	5,95
125	25%	22,49	33,22	12,14

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.7’deki gibidir;

Şekil 4.7: Sabit sıcaklık (125 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



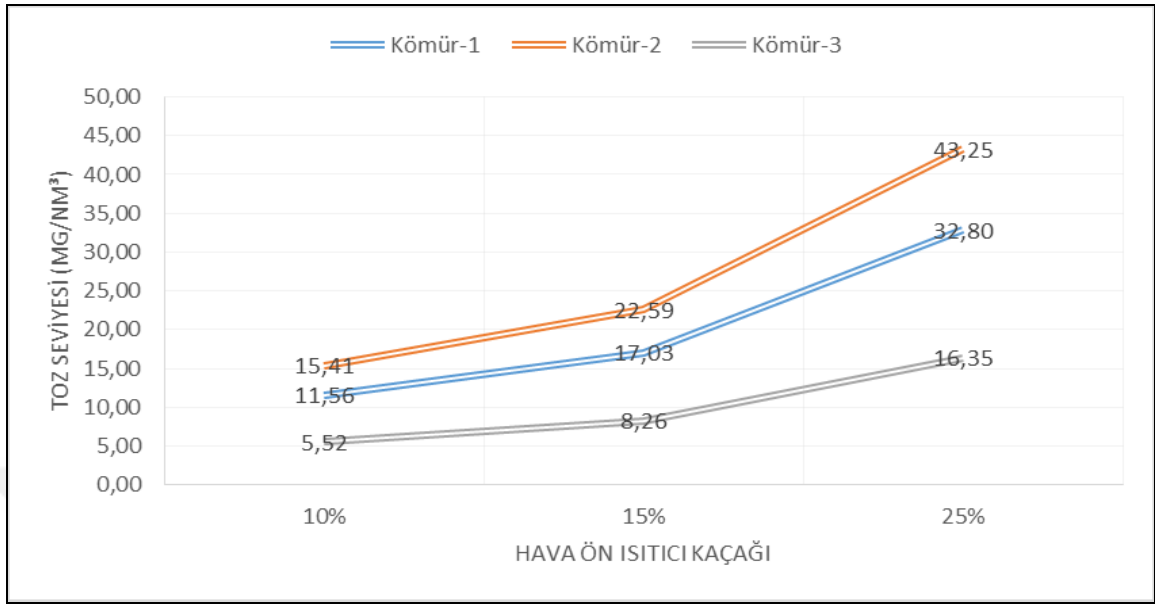
h. 3 kömür çeşidinin 130 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve bir elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.9’da gösterilmiştir;

Tablo 4.9: Sabit sıcaklık (130 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
130	10%	11,56	15,41	5,52
130	15%	17,03	22,59	8,26
130	25%	32,80	43,25	16,35

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.8’deki gibidir;

Şekil 4.8: Sabit sıcaklık (130 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



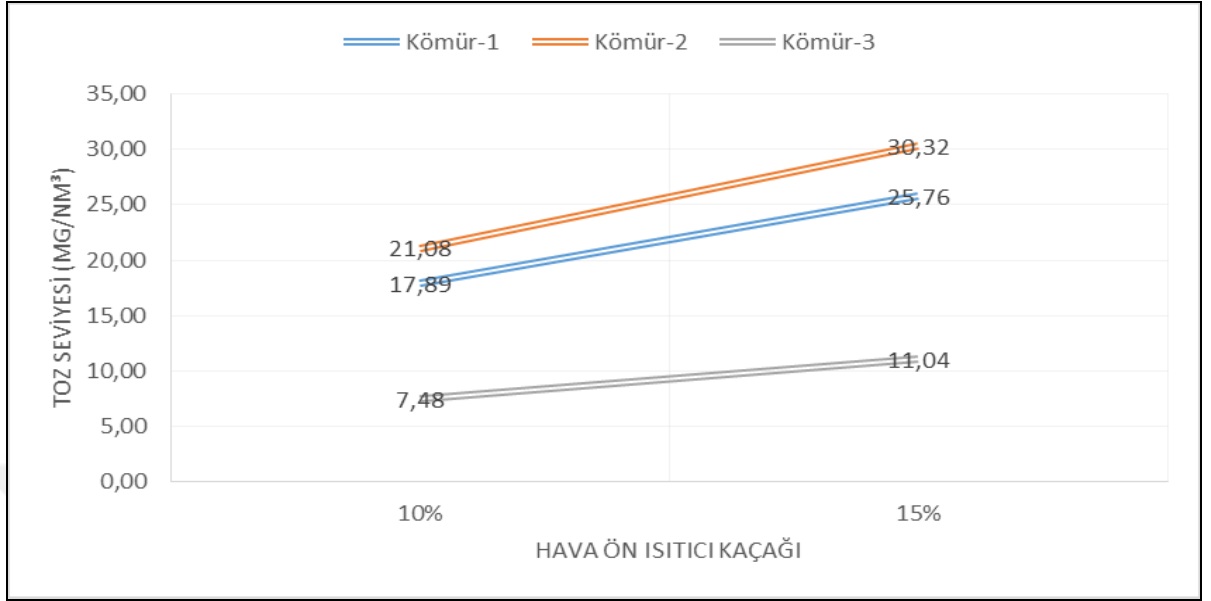
- i. 3 kömür çeşidinin 135 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve bir elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.10'da gösterilmiştir;

Tablo 4.10: Sabit sıcaklık (135 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
135	10%	17,89	21,08	7,48
135	15%	25,76	30,32	11,04
135	25%	47,65	56,20	21,29

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.9'daki gibidir;

Şekil 4.9: Sabit sıcaklık (135 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



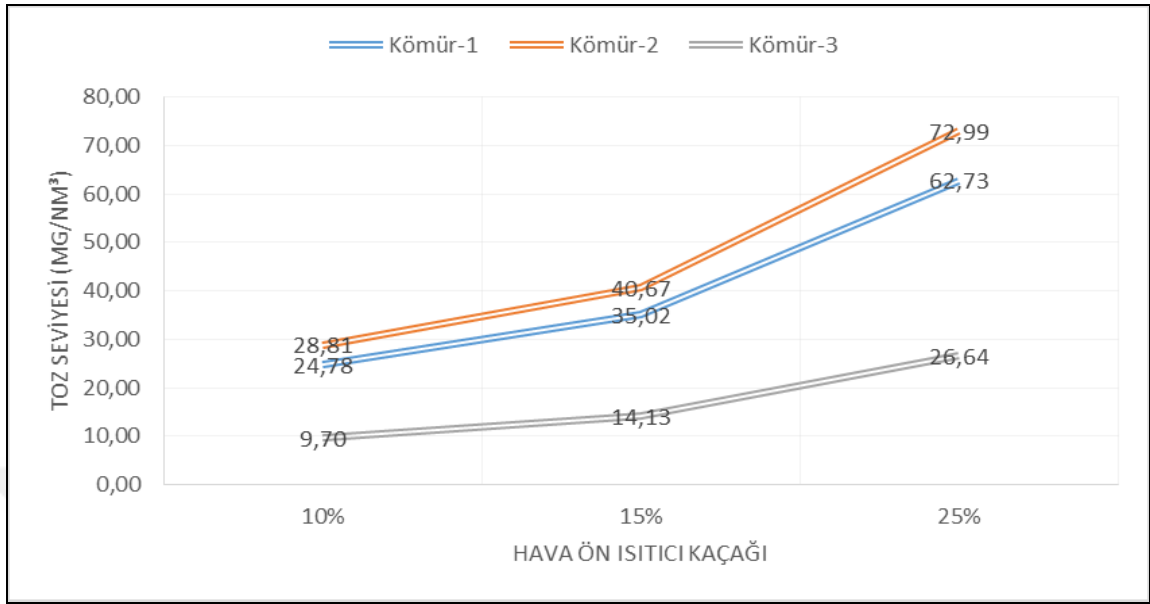
- j. 3 kömür çeşidinin 140 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve bir elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.11’de gösterilmiştir;

Tablo 4.11: Sabit sıcaklık (140 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
140	10%	24,78	28,81	9,70
140	15%	35,02	40,67	14,13
140	25%	62,73	72,99	26,64

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.10’daki gibidir;

Şekil 4.10: Sabit sıcaklık (140 °C) ve 1 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



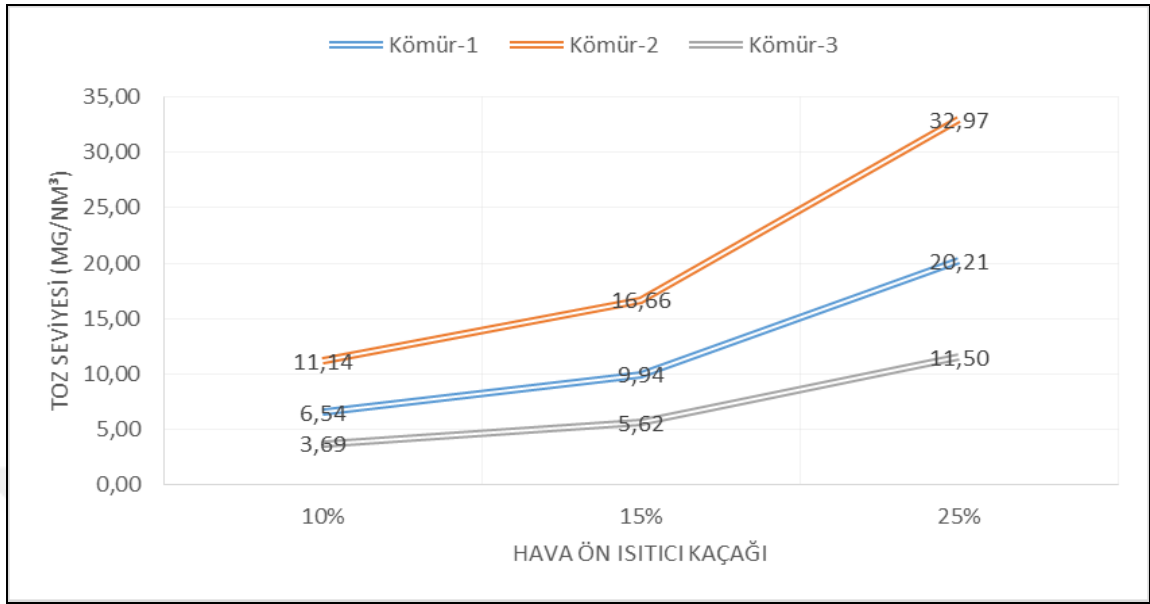
k. 3 kömür çeşidinin 120 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve bir bölümde iki elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.12’de gösterilmiştir;

Tablo 4.12: Sabit sıcaklık (120 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
120	10%	6,54	11,14	3,69
120	15%	9,94	16,66	5,62
120	25%	20,21	32,97	11,50

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.11’deki gibidir;

Şekil 4.11: Sabit sıcaklık (120 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



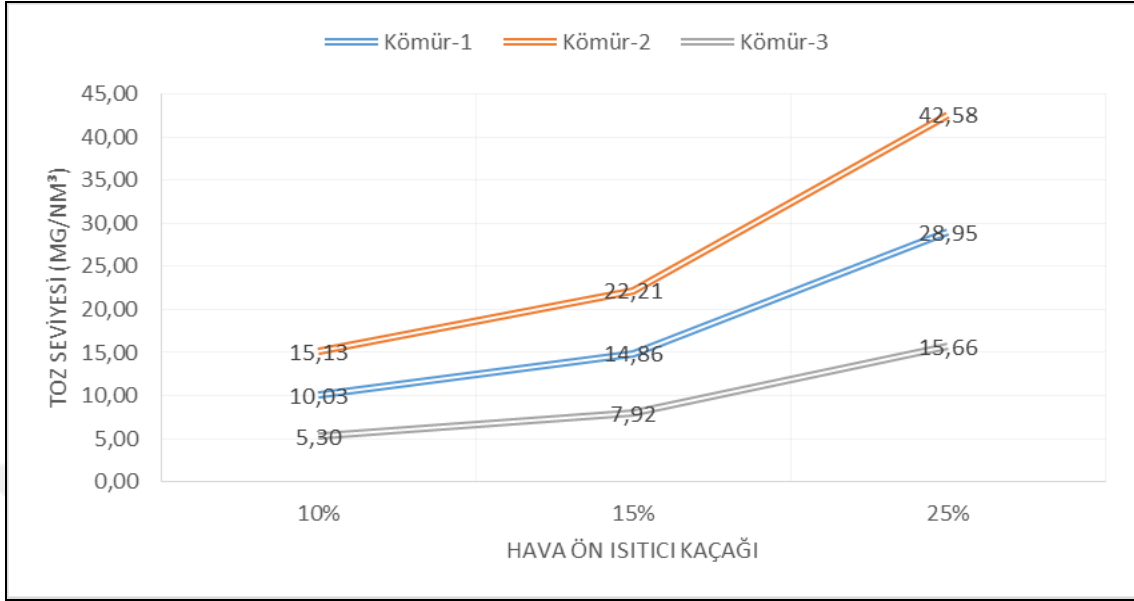
- 3 kömür çeşidinin 125 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve bir bölümde iki elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.13’de gösterilmiştir;

Tablo 4.13: Sabit sıcaklık (125 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
125	10%	10,03	15,13	5,30
125	15%	14,86	22,21	7,92
125	25%	28,95	42,58	15,66

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.12’deki gibidir;

Şekil 4.12: Sabit sıcaklık (125 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



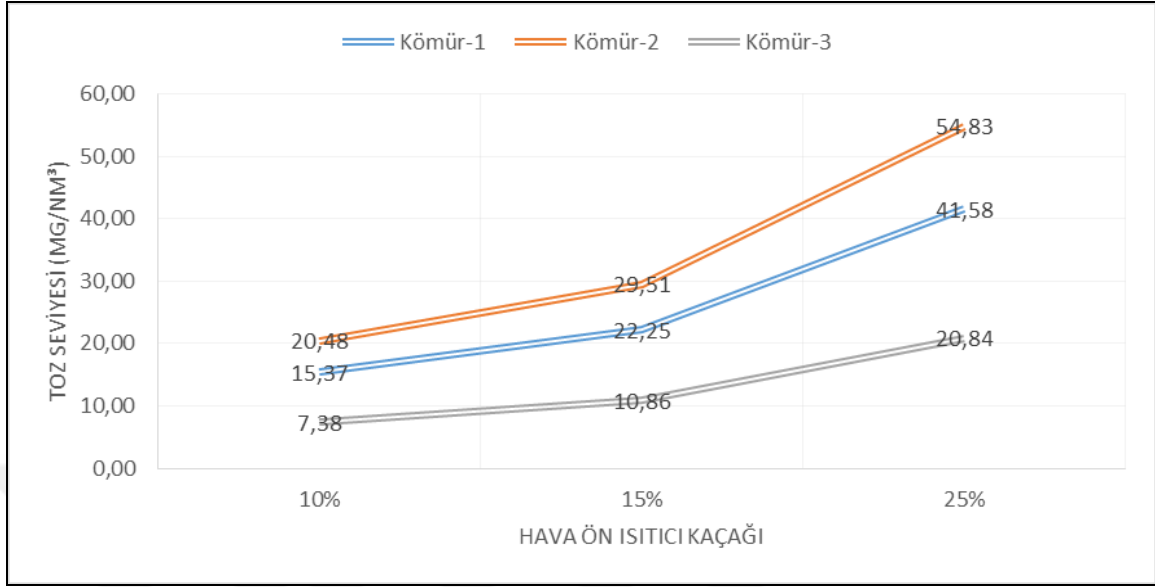
m. 3 kömür çeşidinin 130 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve bir bölümde iki elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.14’de gösterilmiştir;

Tablo 4.14: Sabit sıcaklık (130 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
130	10%	15,37	20,48	7,38
130	15%	22,25	29,51	10,86
130	25%	41,58	54,83	20,84

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.13’deki gibidir;

Şekil 4.13: Sabit sıcaklık (130 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



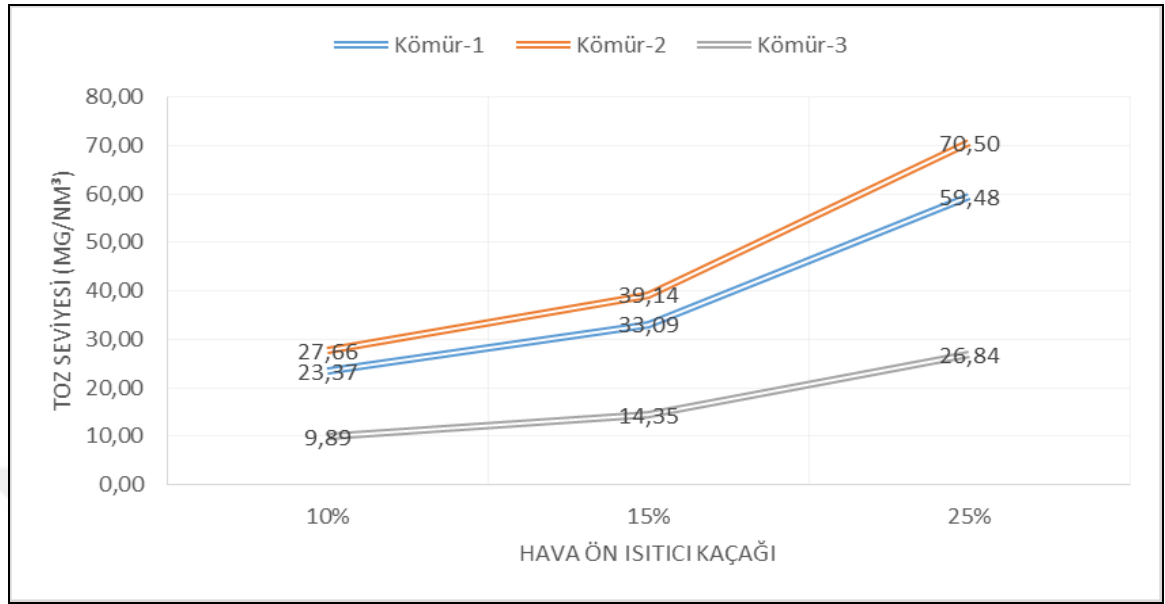
- n. 3 kömür çeşidinin 135 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve bir bölümde iki elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.15’de gösterilmiştir;

Tablo 4.15: Sabit sıcaklık (135 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
135	10%	23,37	27,66	9,89
135	15%	33,09	39,14	14,35
135	25%	59,48	70,50	26,84

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.14’deki gibidir;

Şekil 4.14: Sabit sıcaklık (135 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



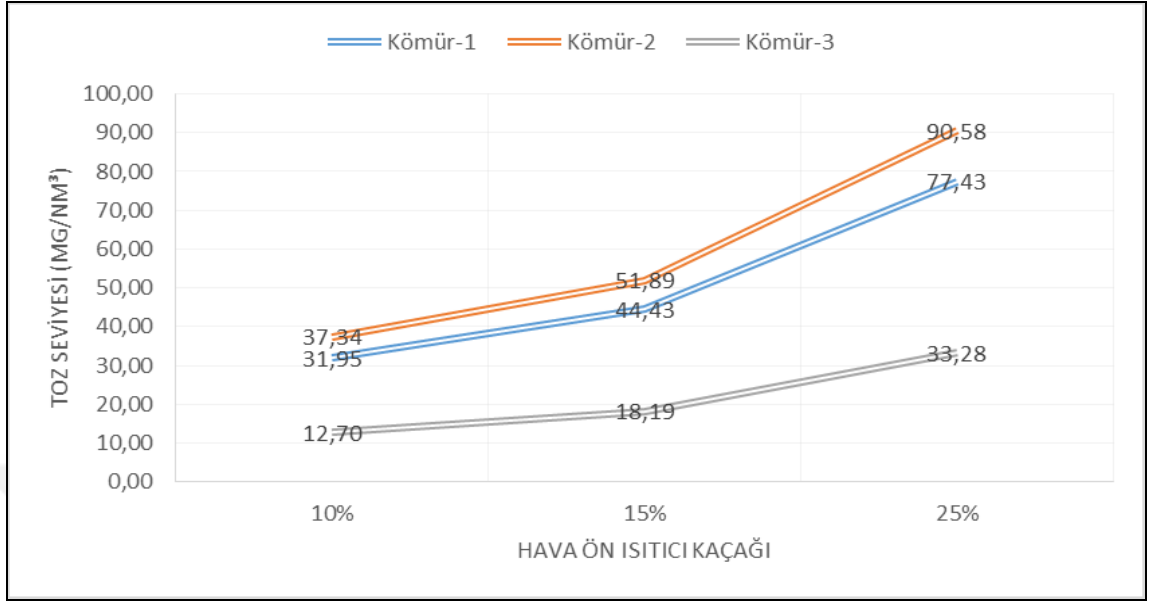
- o. 3 kömür çeşidinin 140 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve bir bölümde iki elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.16’da gösterilmiştir;

Tablo 4.16: Sabit sıcaklık (140 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
140	10%	31,95	37,34	12,70
140	15%	44,43	51,89	18,19
140	25%	77,43	90,58	33,28

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.15’deki gibidir;

Şekil 4.15: Sabit sıcaklık (140 °C) ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



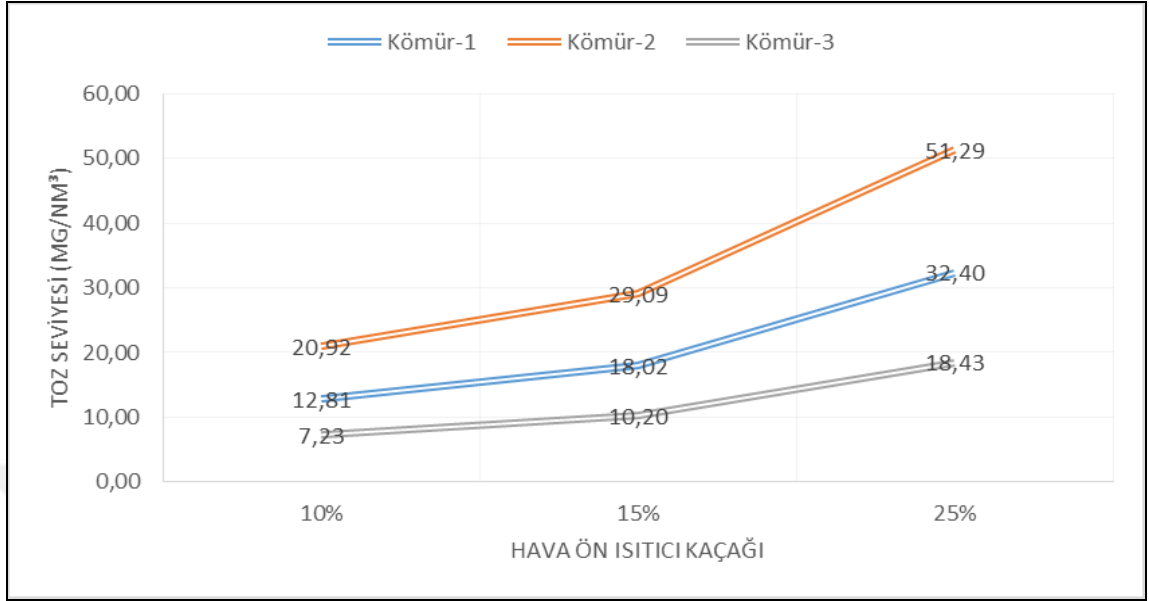
p. 3 kömür çeşidinin 120 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.17’de gösterilmiştir;

Tablo 4.17: Sabit sıcaklık (120 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
120	10%	12,81	20,92	7,23
120	15%	18,02	29,09	10,20
120	25%	32,40	51,29	18,43

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.16’deki gibidir;

Şekil 4.16: Sabit sıcaklık (120 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



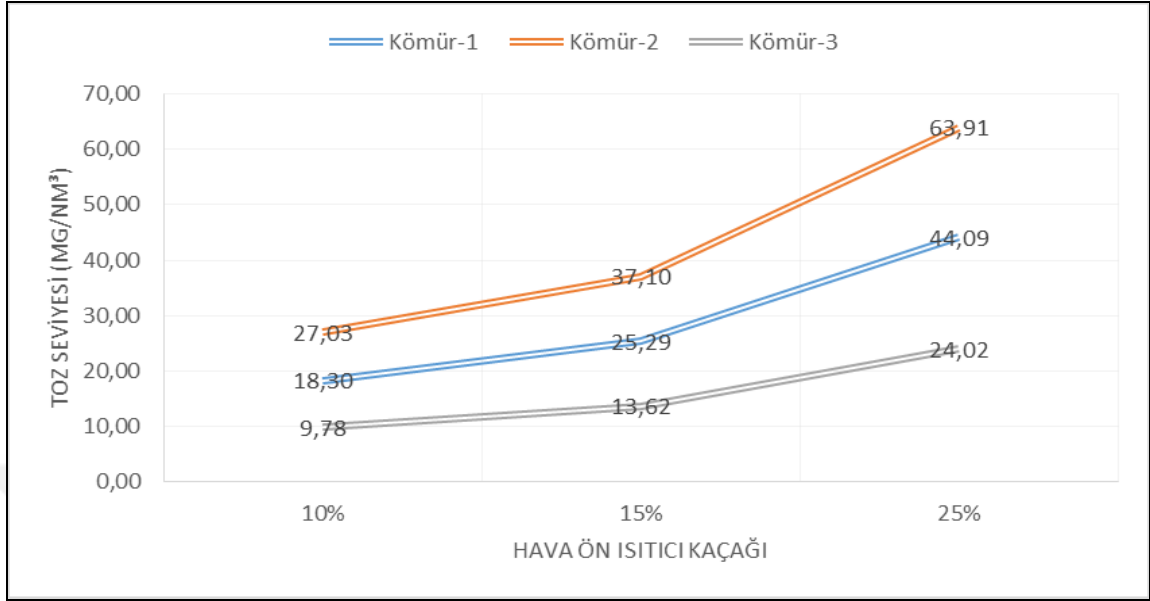
q. 3 kömür çeşidinin 125 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.18’de gösterilmiştir;

Tablo 4.18: Sabit sıcaklık (125 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
125	10%	18,30	27,03	9,78
125	15%	25,29	37,10	13,62
125	25%	44,09	63,91	24,02

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.17’deki gibidir;

Şekil 4.17: Sabit sıcaklık (125 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



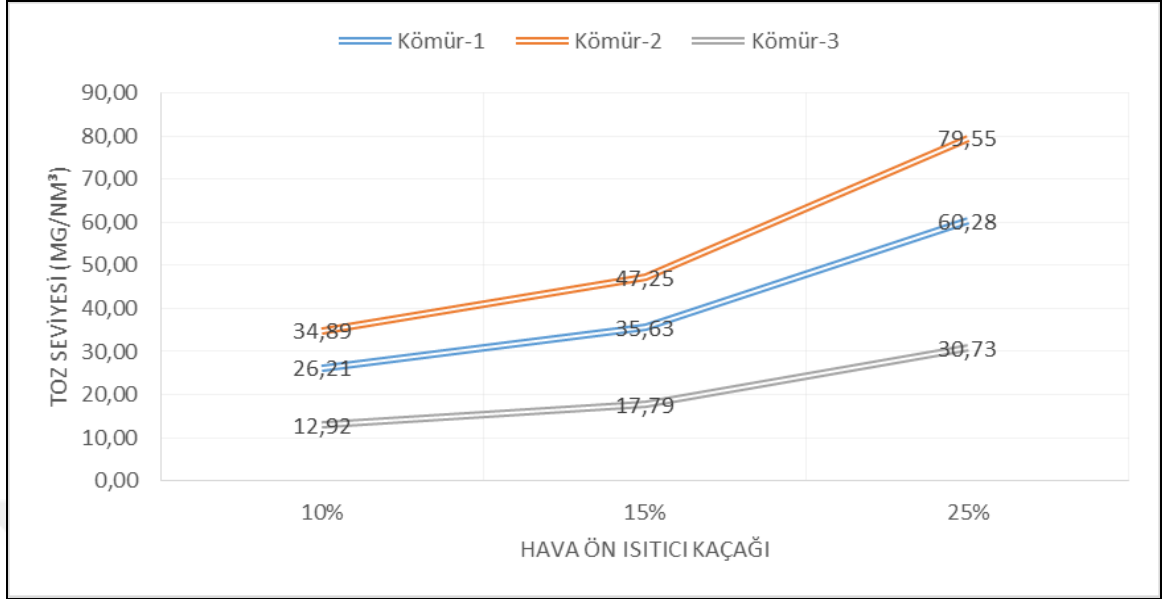
r. 3 kömür çeşidinin 130 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.19’da gösterilmiştir;

Tablo 4.19: Sabit sıcaklık (130 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
130	10%	26,21	34,89	12,92
130	15%	35,63	47,25	17,79
130	25%	60,28	79,55	30,73

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.18’deki gibidir;

Şekil 4.18: Sabit sıcaklık (130 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



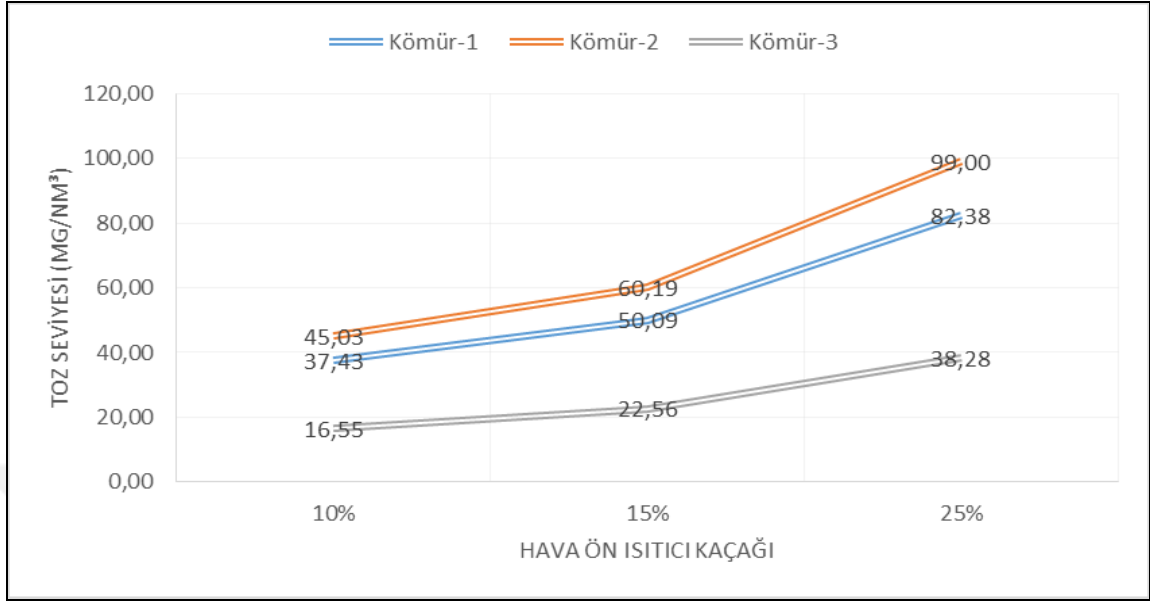
- s. 3 kömür çeşidinin 135 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.20’de gösterilmiştir;

Tablo 4.20: Sabit sıcaklık (135 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
135	10%	37,43	45,03	16,55
135	15%	50,09	60,19	22,56
135	25%	82,38	99,00	38,28

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.19’daki gibidir;

Şekil 4.19: Sabit sıcaklık (135 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



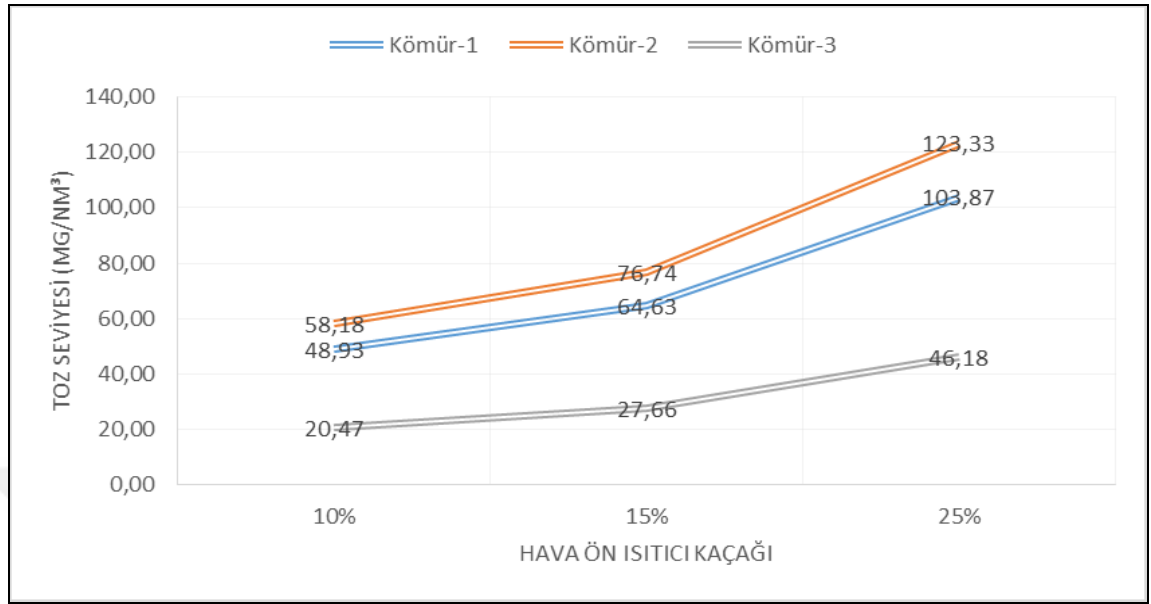
- t. 3 kömür çeşidinin 140 °C uçucu gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 4.21’de gösterilmiştir;

Tablo 4.21: Sabit sıcaklık (140 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri

Toz Seviyesi (mg/Nm³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
140	10%	48,93	58,18	20,47
140	15%	64,63	76,74	27,66
140	25%	103,87	123,33	46,18

Elde edilen sonucun grafiksel gösterimi Şekil 4.20’deki gibidir;

Şekil 4.20: Sabit sıcaklık (140 °C) ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda performans değerleri



Yapılan senaryo çalışmaları sonucunda elde edilen temiz hava toz konsantrasyonu değerleri takip eden alt başlıklar altında değerlendirilmiştir.

1. Sabit sıcaklık değerleri altında değişen hava ön ısıtıcı kaçağı değerleri;

Şekil 4.1 ile Şekil 4.20 arasında gösterildiği üzere her bir kömür için sabit sıcaklık değeri altında artan hava ön ısıtıcı kaçağı değeri karşısında elde edilen toz emisyon değeri de artış göstermiştir.

120 °C'lik uçucu gaz sıcaklık değeri altında incelenen her üç kömür tipinde yüzde 10'luk hava ön ısıtıcı kaçağı durumunda 1,67 ile 5,22 mg/Nm³ arasında değişen oldukça düşük toz emisyon değerleri elde edilmişken, kaçak oranının sırası ile yüzde 15 ve 25 değerlerine artırılması ile elde edilen toz emisyon değerleri aralığı sırası ile 2,7-4,78 mg/Nm³ ve 6,10-17,93 mg/Nm³ arasına yükselmektedir. Benzer oransal artışları her sıcaklık değerinde gözlemlemek mümkündür, özellikle kötümser senaryo olarak ortaya konulan yüzde 25'lik hava ön ısıtıcı kaçağı değeri durumunda bir önceki duruma göre yüksek oranlarda artış dikkat çekmektedir.

Elektrostatik filtrenin performansını etkileyen birincil etkenlerden olan toz direnci değeri öncelikli olarak sabit sıcaklık ve hava ön ısıtıcı kaçağı değeri durumunda incelenmelidir. Toz partikülleri üzerinde bulunan yapıştırıcı güçler bu dirence bağlı olarak değişmektedir. Direncin artması sonucunda elektrotlar üzerinde bulunan tutunma yükleri artmakta, bu da tozların toplama elektrotlarından toplanmasını zorlaştırmaktadır. Tablo 3.7’de gösterildiği üzere farklı toz direnci değerlerinin elektrostrik filtre üzerinde farklı etkileri mevcuttur.

Gazların direnci büyük oranda uçucu külün kimyasal yapısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kül yapısında bulunan silika (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksitler (Fe_2O_3) toz direnci üzerinde etkiye sahiptir. Bu etkiler Chandra’nın çalışmasında Tablo 4.22’deki şekilde özetlenmiştir;

Tablo 4.22: Kül yapısının toz direncine etkileri

Kimyasal Komponent	Özellik	Dirence Etkisi
SiO_2	Yalıtkan	Artırır
Al_2O_3	Yalıtkan	Artırır
CaO	SO_3 yutucu	Artırır
Fe_2O_3	Alkali iyon çözünürlüğü artırıcı	Azaltır
Na_2O	Yük katkıcisi	Azaltır
P_2O_5	Yük katkıcisi	Azaltır
K_2O	Yük katkıcisi	Azaltır
SO_3	Yük katkıcisi	Azaltır
Li_2O_3	Yük katkıcisi	Azaltır
TiO_2	-	-
MgO	-	-

Bickelhaupt’un da çalışmasında incelendiği üzere kimyasal özelliklerin toz direnci üzerine etkisini göstermek adına birçok çalışma yapılmıştır. Silika, alüminyum oksit ve kalsiyum oksidin toz direncini artırdığı, bu çalışmaların neredeyse tamamında

gözlenmiştir. Bu kimyasal yapı etkenlerine ek olarak sıcaklık, nem değeri gibi direnç üzerinde etkisi olan parametreler de vardır. Bu bilgiler ve hesaplama teknikleri ışığında, seçilen mevcut kömürlerin toz direnci incelendiğinde; 3 nolu kömürün düşük silika ve alimünyum oksit değerlerinin de etkisiyle düşük toz direncine sahip olacağı görülmektedir. Elektrostatik filtre performansı üzerinde etkisi olan uçucu gaz miktarı aynı santral parametreleri altında seçilen kömürün özelliğine göre farklılık göstermektedir. Uçucu gazın elektrostatik filtreye girerek yüklendikleri göz önüne alındığında, yavaş hıza sahip partiküllerin, toplanma için daha uygun durumda oldukları gözlenmiştir. Bu da düşük gaz akış hacmine sahip senaryoların daha yüksek elektrostatik filtre toplama verimliliğine sahip olmalarına yol açmıştır. Seçilen kömürler incelendiğinde 3 nolu kömürün en yüksek alt ısıl değerinin katkısı ile düşük hacimsel akışa sahip olduğu hesaplanmıştır. Denklemler [3-5] ile [3-14] yardımı ile yapılan hesaplamalar sonucunda;

i. Yüksek alt ısıl değere sahip olan 3 nolu kömürün 668,52 kg/s

ii. Düşük alt ısıl değere sahip olan 2 nolu kömürün 690,65 kg/s

iii. Orta alt ısıl değere sahip olan 1 nolu kömürün de 687,5 kg/s uçucu gaza 120 °C uçucu gaz sıcaklığı ve yüzde 10'luk hava ön ısıtıcı gaz kaçağı durumu altında sahip olduğu gözlenmiştir. Aynı kömür özellikleri farklı sıcaklık ve gaz kaçağı değerleri altında da benzer davranışlar sergilediğinden dolayı, incelenen sonuçlarda farklı kömür özellikleri benzer trendler göstermektedir. Hava gaz kaçağı oranının veya gaz sıcaklığın sabit tutulduğu her senaryoda yüksek ısıl değer ve düşük toz direncine sahip olan 3 nolu kömür, düşük temiz gaz toz emisyonu değeri yakalamaktadır.

Öncelikle incelenen kömür özelliği etkilerinden sonra senaryo çalışmalarında sabit sıcaklık değeri altında farklı hava ön ısıtıcı kaçağı değeri etkileri gözlenmek istenmiştir. Yüksek basınç değerine sahip olan hava ile düşük basınç değerinde bulunan uçucu gaz arasındaki basınç farkı dolayısıyla oluşan ve santral operasyonunda sıklıkla karşılaşılan bir durum olan ön ısıtıcı hava kaçağı aslında basit ölçümler sayesinde gözlenebilmektedir, havanın yapısında bulunan yaklaşık yüzde 21 oranındaki oksijen elementi üzerinden yapılan aşağıdaki hesaplama sayesinde kaçak yüzdesi bulunmaktadır;

$$\text{Kaçak} = (\text{çıkan O}_2 - \text{giren O}_2) / (20,9 - \text{çıkan O}_2) * 90 \quad (4.1)$$

Benzer hesaplama karbondioksit değeri üzerinden de gerçekleştirilebilmektedir. Hava kaçağı değerinin genel santral performansı üzerindeki etkilerinin yanında kendisinden sonra gelen hava temizleme kontrol üniteleri üzerinde de etkisi vardır. Bu etkilerin başında yardımcı ünitelerin harcadığı enerji, hava ön ısıtıcı verim kaybı, gereksiz fan kapasitesi işgali nedeni ünite yüklenmesi gelmektedir. Düzgün yalıtım ekipmanları sayesinde bu etkilerin ortaya çıkardığı negatif etkilerden büyük oranlarda kazanımlar elde etmek mümkündür.

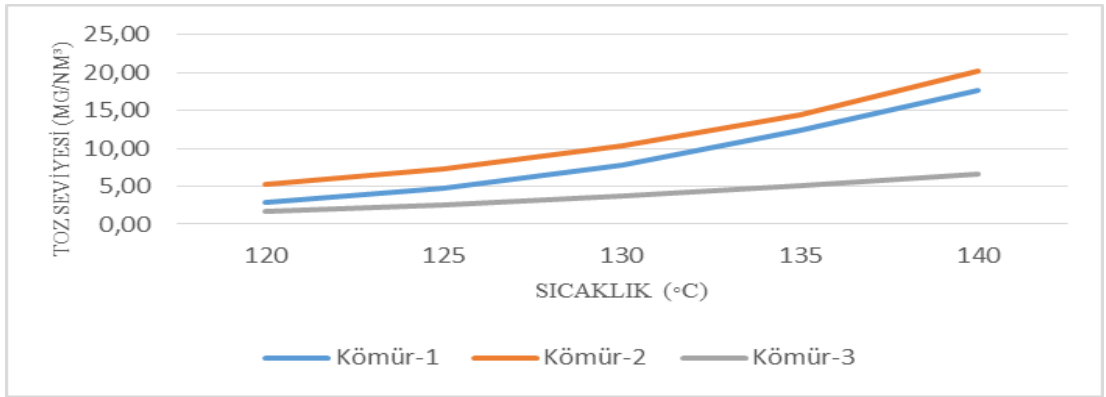
Kömür kazanından çıkan uçucu gaz hava ön ısıtıcıdan geçtikten sonra elektrostatik filtreye girmektedir. Uçucu gaz oranını yükseltici etkisi nedeni ile elektrostatik filtre performansına olumsuz etkisi olan hava ön ısıtıcı kaçağı oranının etkilerini senaryo çalışmaları kapsamında da gözlemlemek mümkündür. Aynı kömür özellikleri için aynı operasyonel sıcaklık değeri altında artan her hava kaçağı yüzdesi değeri karşısında temiz gaz toz konsantrasyonu değeri de artış göstermektedir. Santrallerde çok sık olmamakla birlikte karşılaşılan bir değer olan yüzde 25'lik kaçak durumunda emisyon değerleri yüzde 15'lik kaçak durumuna kıyasla neredeyse iki katı farklılık göstermektedir.

2. Sabit hava ön ısıtıcı kaçağı değerleri altında değişen sıcaklık değerleri;

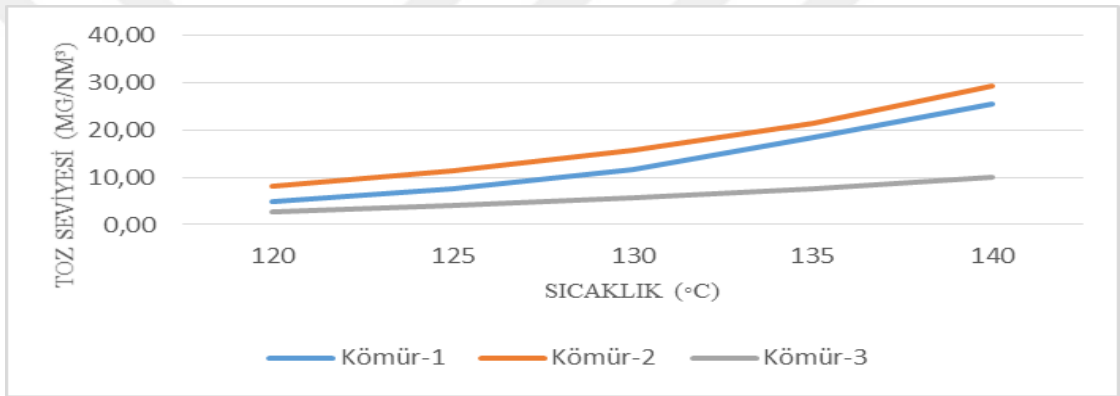
Her bir kömür için hava ön ısıtıcı değeri sabit tutularak gaz sıcaklık değeri artırıldığında elde edilen toz emisyon değerinin arttığı gözlenmiştir. Bu artış farklı kömür özellikleri için Şekil 4.21'de gösterilmiştir;

Şekil 4.21: Farklı hava ön ısıtıcı kaçığı değeri durumlarında

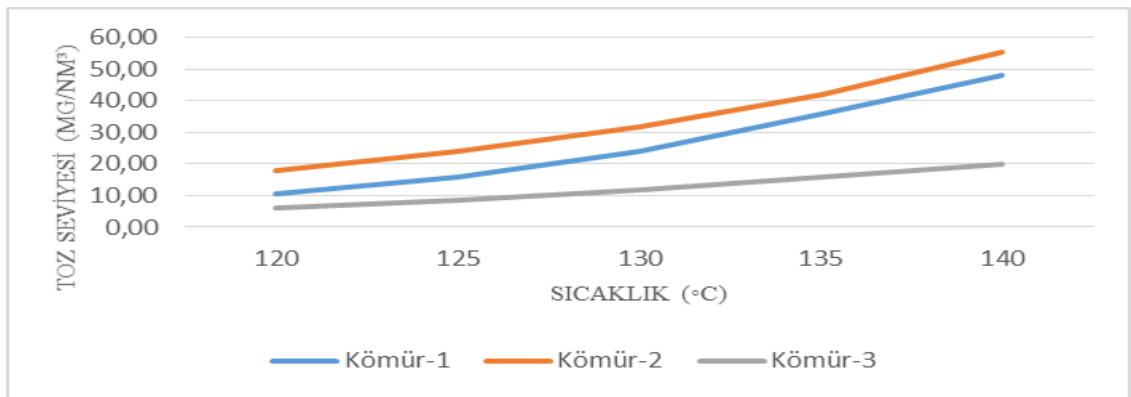
a) Yüzde 10



b) Yüzde 15



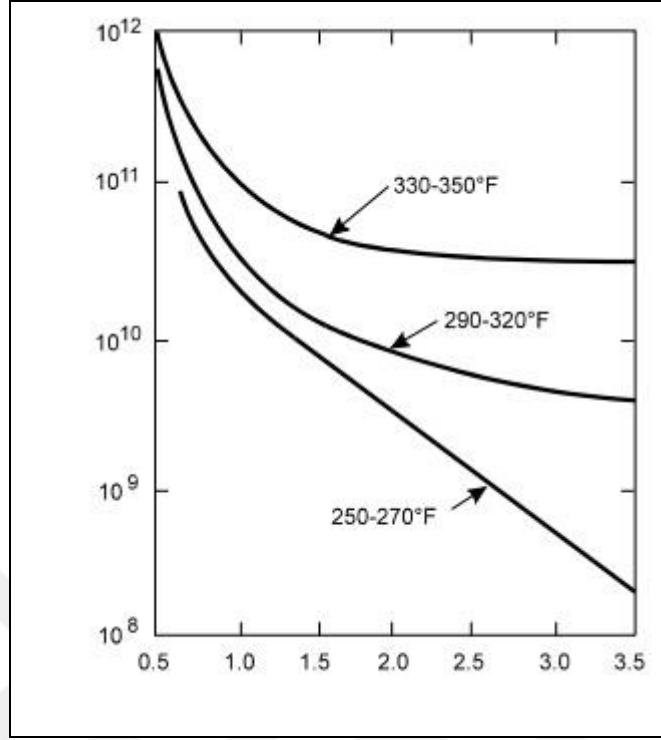
c) Yüzde 25



Sabit hava ön ısıtıcı kaçığı durumlarında incelenen her bir kömür için artan operasyonel kazan sonrası sıcaklığa karşı temiz gaz toz konsantrasyonu değerinin de artış gösterdiği yukarıdaki şekillerde özetlenen senaryo sonuçlarından gözlenmektedir. İncelenen her

kömür tipi için artışlar içerikleri nedeni ile farklı eğilimler gösterse de uçucu gaz sıcaklığının artışı her durumda temiz gaz toz konsantrasyonunun artmasına neden olmaktadır. Yüzde 10'luk kaçak değeri karşısında 120 °C uçucu gaz sıcaklığında 3 nolu kömür 1,67 mg/Nm³ emisyon değeri ortaya koyarken, aynı kömür sıcaklığın 125 °C çıkması durumunda emisyon değeri olarak 2,51 mg/Nm³ oraya koymaktadır. Benzer sıcaklık artışı karşısında diğer iki kömürün sırasıyla verdiği tepkiler emisyon değerlerinin 2,97'den 4,80 mg/Nm³'e ve 5,22'den 7,36 mg/Nm³'a dahilinde olmaktadır. Bunun öncelikli nedeni olarak özgül toz direnci ve artan hava akış oranı gösterilebilir. Her ne kadar toz direnci sıcaklık karşısında lineer artış göstermiyor olsa da seçilen sıcaklık değerleri altında lineer olmayan bölgeye ulaşılmadığından direnç artışı sıcaklık artışına paralel olmuştur. Akım toza 2 yol ile sirayet etmektedir, Bölüm 3.2'de özetlendiği üzere bunlardan ilki hacimsel etki, diğeri de yüzey etkisidir. Malzemenin kendi yapısı dahilinde gerçekleşen hacimsel etki, tozun kimyasal kompozisyonuna bağlı iken, yüzey etkisi partikül tarafından adsorbe edilen gaz veya sıvı vasıtası ile gerçekleşir ve gaz akışının kimyasal özellikleri ile değişiklik gösterir. Hacimsel etki artan sıcaklık etkisi ile artış göstererek emisyon değerleri üzerinde direkt etkiye sahip durumdadır. Yüzey direnci ise kömürün kükürt içeriğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Azalan kükürt içeriği iletken gazların uçucu gaz tarafından azalarak adsorbe edilmesine neden olduğu için yüksek dirence neden olmaktadır. Bu sebeple sabit tutulan operasyonel değerlerin yanında kullanılan kömür içeriğinde bulunan kükürt değerleri bu açıdan denkleme dahil edilmelidir. Bu etki White'ın çalışmasında incelenerek aşağıdaki Şekil 4.22'de gösterilen sonuç elde edilmiştir;

Şekil 4.22: Toz direnci-kükürt ilişkisi



Kullanılan kömürlerin özellikleri incelendiğinde 3 nolu kömürün en yüksek kükürt içeriğinde sahip olduğu bundan dolayı da benzer operasyonel koşullar altında 1 ve 2 nolu kömüre göre daha düşük yüzey direncine sahip olması beklenmektedir.

Bu beklenti sonuçlar ile paralellik göstermektedir. Yüzde 10'luk hava ön ısıtıcı kaçağı durumunda 120°C'lik operasyonel sıcaklık koşulları altında yüksek kükürt içeriğine sahip olan 3 nolu kömür 1,67 mg/Nm³ temiz gaz toz konsantrasyonu değeri ile 1 nolu kömüre ait 2,97 mg/Nm³ ve 2 nolu kömüre ait 5,22 mg/Nm³ emisyon değerlerinden düşük değere sahip olmuştur. Bu ilişki farklı sıcaklık değerleri altında da korunmuştur.

3. Yönetmelik uygunluğu;

Değişen operasyonel durumlara göre elektrostatik performans değerlendirmesi yapılan santrallerin temiz hava toz emisyon değerleri mevcut yönetmelik ve en iyi teknolojiler raporuna göre incelenecektir. Bölüm 2'de detayları verilen söz konusu yönetmelik ve raporlar şu şekildedir;

- a. “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control)
- b. Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP)
- c. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211)

Yukarıda verilen yönetmeliklere göre ünite kapasitesi 615 MW olan mevcut santral Tablo 4.23’de belirtilen temiz hava toz emisyon değerlerini sağlamakla yükümlü olacaktır;

Tablo 4.23: Referans dokümanlara göre uyulması gereken temiz hava toz emisyon değeri [mg/Nm³]

Referans Doküman	Temiz Hava Toz Emisyon Limiti [mg/Nm ³]
a	10
b	20
c	50

Detayları verilen senaryo çalışmalarına göre santral emisyon limit değerleri uygunluğu aşağıdaki Tablo 4.24, Tablo 4.25, Tablo 4.26, Tablo 4.27, Tablo 4.28, Tablo 4.29, Tablo 4.30, Tablo 4.31, Tablo 4.32, Tablo 4.33, Tablo 4.34, Tablo 4.35 verilmiştir;

- a. “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterlerine göre sarı ile işaretli senaryolar normal çalışma şartları altında uygunluk göstermektedir;

Tablo 4.24: “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterlerine göre normal çalışma şartları altında

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)
120	2,97	5,22	1,67	10
120	4,78	8,25	2,70	15
120	10,72	17,93	6,10	25
125	4,80	7,36	2,51	10
125	7,51	11,39	3,97	15
125	16,03	23,87	8,62	25
130	7,75	10,34	3,65	10
130	11,81	15,67	5,66	15
130	24,02	31,66	11,87	25
135	12,41	14,49	5,07	10
135	18,42	21,50	7,73	15
135	35,81	41,90	15,74	25
140	17,61	20,28	6,71	10
140	25,60	29,46	10,08	15
140	48,02	55,40	20,00	25

Tüm elektriksel alanların devrede olması durumunda elde edilen temiz gaz toz konsantrasyon değerleri “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterleri kapsamında incelendiğinde 10 mg/Nm³ olarak seçilen toz limit değerine düşük operasyonel sıcaklık ve düşük hava ön ısıtıcı kaçağı durumlarında genel olarak uygun düşerken, sıcaklık ve gaz kaçağı artışının emisyon değerlerinin yükselmesine neden olarak limit dışı kalmasına yol açtığı gözlenmektedir. 3 nolu kömür düşük toz direnci değeri sayesinde neredeyse tüm operasyonel şartlar altında limit değerleri içerisinde kalırken, 2 nolu kömür tersi özellik göstererek sıcaklığın 5 derece artması sonucunda ek hava ön ısıtıcı kaçağı sebebi ile düşük sıcaklık ve düşük hava ön ısıtıcı kaçağı harici durumlarda limit aralığından çıkmaktadır.

- b.** Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine göre sarı ile işaretli senaryolar normal çalışma şartları altında uygunluk göstermektedir;

Tablo 4.25: Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine göre normal çalışma şartları altında

Gaz Sıcaklığı (°C)	Toz Seviyesi (mg/Nm ³)			Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)
	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3	
120	2,97	5,22	1,67	10
120	4,78	8,25	2,70	15
120	10,72	17,93	6,10	25
125	4,80	7,36	2,51	10
125	7,51	11,39	3,97	15
125	16,03	23,87	8,62	25
130	7,75	10,34	3,65	10
130	11,81	15,67	5,66	15
130	24,02	31,66	11,87	25
135	12,41	14,49	5,07	10
135	18,42	21,50	7,73	15
135	35,81	41,90	15,74	25
140	17,61	20,28	6,71	10
140	25,60	29,46	10,08	15
140	48,02	55,40	20,00	25

Tüm elektriksel alanların devrede olması durumunda elde edilen temiz gaz toz konsantrasyon değerleri Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine kapsamında incelendiğinde 20 mg/Nm³ olarak seçilen toz limit değerine düşük ve orta operasyonel sıcaklık ile düşük ve orta hava ön ısıtıcı kaçağı durumlarında genel olarak uygun düşerken, yüksek sıcaklık ve yüksek gaz kaçağı değerlerinin emisyon değerlerinin yükselmesine neden olarak limit dışı kalmasına yol açtığı gözlenmektedir. 3 nolu kömür düşük toz direnci değeri sayesinde tüm operasyonel şartlar altında limit değerleri içerisinde kalırken, 2 nolu kömür tersi özellik göstererek sıcaklığın 15 derece artması sonucunda ek hava ön ısıtıcı kaçağı sebebi ile limit kapsamından çıkmaktadır.

- c. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre sarı ile işaretli senaryolar normal çalışma şartları altında uygunluk göstermektedir;

Tablo 4.26: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre normal çalışma şartları altında

Gaz Sıcaklığı (°C)	Toz Seviyesi (mg/Nm ³)			Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)
	Kömür- 1	Kömür- 2	Kömür- 3	
120	2,97	5,22	1,67	10
120	4,78	8,25	2,70	15
120	10,72	17,93	6,10	25
125	4,80	7,36	2,51	10
125	7,51	11,39	3,97	15
125	16,03	23,87	8,62	25
130	7,75	10,34	3,65	10
130	11,81	15,67	5,66	15
130	24,02	31,66	11,87	25
135	12,41	14,49	5,07	10
135	18,42	21,50	7,73	15
135	35,81	41,90	15,74	25
140	17,61	20,28	6,71	10
140	25,60	29,46	10,08	15
140	48,02	55,40	20,00	25

Hali hazırda ülkemizde uygulanmakta olan Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre tüm elektriksel alanların devrede olması durumunda elde edilen temiz gaz toz konsantrasyon değerleri incelendiğinde 50 mg/Nm³ olarak seçilen toz limit değerine neredeyse tüm operasyonel sıcaklık ile tüm hava ön ısıtıcı kaçağı durumlarında uygunluk gözlenmektedir. 2 nolu kömür yüksek toz direnci nedeni ile en yüksek sıcaklık ve en yüksek hava kaçağı değeri karşısında sadece limit kapsamından çıkmaktadır.

- d. “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterlerine göre sarı ile işaretli senaryolar bir elektriksel alanın devre dışı kalması durumunda da uygunluk göstermekte iken mavi ile işaretlenen senaryolar bir elektriksel alanın devre dışı kalması ile kriter uygunluğunu kaybetmiştir;

Tablo 4.27: “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterlerine göre bir elektriksel alanın devre dışı kalması durumu

Gaz Sıcaklığı (°C)	Toz Seviyesi (mg/Nm ³)			Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)
	Kömür- 1	Kömür- 2	Kömür- 3	
120	4,75	8,18	2,68	10
120	7,36	12,45	4,16	15
120	15,46	25,45	8,80	25
125	7,41	11,25	3,90	10
125	11,19	16,80	5,95	15
125	22,49	33,22	12,14	25
130	11,56	15,41	5,52	10
130	17,03	22,59	8,26	15
130	32,80	43,25	16,35	25
135	17,89	21,08	7,48	10
135	25,76	30,32	11,04	15
135	47,65	56,20	21,29	25
140	24,78	28,81	9,70	10
140	35,02	40,67	14,13	15
140	62,73	72,99	26,64	25

- e. Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine göre sarı ile işaretli senaryolar bir elektriksel alanın devre dışı kalması durumunda da uygunluk göstermekte iken mavi ile işaretlenen senaryolar bir elektriksel alanın devre dışı kalması ile kriter uygunluğunu kaybetmiştir;

Tablo 4.28: Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine göre bir elektriksel alanın devre dışı kalması durumu

Gaz Sıcaklığı (°C)	Toz Seviyesi (mg/Nm ³)			Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)
	Kömür- 1	Kömür- 2	Kömür- 3	
120	4,75	8,18	2,68	10
120	7,36	12,45	4,16	15
120	15,46	25,45	8,80	25
125	7,41	11,25	3,90	10
125	11,19	16,80	5,95	15
125	22,49	33,22	12,14	25
130	11,56	15,41	5,52	10
130	17,03	22,59	8,26	15
130	32,80	43,25	16,35	25
135	17,89	21,08	7,48	10
135	25,76	30,32	11,04	15
135	47,65	56,20	21,29	25
140	24,78	28,81	9,70	10
140	35,02	40,67	14,13	15
140	62,73	72,99	26,64	25

Bir elektriksel alanın devre dışı bırakılması ve devre dışı kalması nedeni ile ilgili kriterlere uygunluğunu kaybeden senaryolar mavi renk ile işaretlenmiştir. 3 nolu kömürün düşük toz direnci değeri sayesinde elektriksel alan eksikliği durumunda da uygunluğunu her iki yönetmelik kapsamında neredeyse koruduğu gözlenmektedir.

- f. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre sarı ile işaretli senaryolar bir elektriksel alanın devre dışı kalması durumunda da uygunluk göstermekte iken mavi ile işaretlenen senaryolar bir elektriksel alanın devre dışı kalması ile kriter uygunluğunu kaybetmiştir;

Tablo 4.29: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre bir elektriksel alanın devre dışı kalması durumu

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)
120	4,75	8,18	2,68	10
120	7,36	12,45	4,16	15
120	15,46	25,45	8,80	25
125	7,41	11,25	3,90	10
125	11,19	16,80	5,95	15
125	22,49	33,22	12,14	25
130	11,56	15,41	5,52	10
130	17,03	22,59	8,26	15
130	32,80	43,25	16,35	25
135	17,89	21,08	7,48	10
135	25,76	30,32	11,04	15
135	47,65	56,20	21,29	25
140	24,78	28,81	9,70	10
140	35,02	40,67	14,13	15
140	62,73	72,99	26,64	25

İlgili yönetmelik kapsamında konulan limit değerinin görece yüksek tutulmuş olması, her 3 kömürün de bir elektriksel alanın devre dışı olduğu durumlar dahilinde bile kriter uygunluğunu koruduğunu göstermektedir.

- g. “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterlerine göre sarı ile işaretli senaryolar iki elektriksel alanın devre dışı kalması durumunda da uygunluk göstermekte iken kahverengi ile işaretlenen senaryolar iki elektriksel alanın devre dışı kalması ile kriter uygunluğunu kaybetmiştir;

Tablo 4.30: “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterlerine göre iki elektriksel alanın devre dışı kalması durumu

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)
120	6,54	11,14	3,69	10
120	9,94	16,66	5,62	15
120	20,21	32,97	11,50	25
125	10,03	15,13	5,30	10
125	14,86	22,21	7,92	15
125	28,95	42,58	15,66	25
130	15,37	20,48	7,38	10
130	22,25	29,51	10,86	15
130	41,58	54,83	20,84	25
135	23,37	27,66	9,89	10
135	33,09	39,14	14,35	15
135	59,48	70,50	26,84	25
140	31,95	37,34	12,70	10
140	44,43	51,89	18,19	15
140	77,43	90,58	33,28	25

İki elektriksel alanın devre dışı bırakılması ve devre dışı kalması nedeni ile ilgili kriterlere uygunluğunu kaybeden senaryolar kahverengi renk ile işaretlenmiştir. 2 nolu kömürün yüksek toz direnci nedeni ile kriterlere uygunluğunu tüm operasyonel değerler altında kaybettiği gözlemlenirken, 3 nolu kömürün düşük toz direnci değeri sayesinde iki elektriksel alan eksikliği durumunda da uygunluğunu düşük operasyonel değerler altında koruduğu gözlenmektedir.

- h.** Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine göre sarı ile işaretli senaryolar iki elektriksel alanın devre dışı kalması durumunda da uygunluk göstermekte iken kahverengi ile işaretlenen senaryolar iki elektriksel alanın devre dışı kalması ile kriter uygunluğunu kaybetmiştir;

Tablo 4.31: Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine göre iki elektriksel alanın devre dışı kalması durumu

Gaz Sıcaklığı (°C)	Toz Seviyesi (mg/Nm ³)			Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)
	Kömür- 1	Kömür- 2	Kömür- 3	
120	6,54	11,14	3,69	10
120	9,94	16,66	5,62	15
120	20,21	32,97	11,50	25
125	10,03	15,13	5,30	10
125	14,86	22,21	7,92	15
125	28,95	42,58	15,66	25
130	15,37	20,48	7,38	10
130	22,25	29,51	10,86	15
130	41,58	54,83	20,84	25
135	23,37	27,66	9,89	10
135	33,09	39,14	14,35	15
135	59,48	70,50	26,84	25
140	31,95	37,34	12,70	10
140	44,43	51,89	18,19	15
140	77,43	90,58	33,28	25

İki elektriksel alanın devre dışı olduğu durumda bir ve iki nolu kömür örnekleri kriter uygunluğunu devam ettiren hava kaçağı değerinin yüzde 15 seviyelerine çıktığı durumlarda limit harici kaldığını göstermektedir. Çok yüksek operasyonel durumlar harici 3 nolu kömür limit dahilinde kalmaya devam etmektedir.

- i. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre sarı ile işaretli senaryolar iki elektriksel alanın devre dışı kalması durumunda da uygunluk göstermekte iken kahverengi ile işaretlenen senaryolar iki elektriksel alanın devre dışı kalması ile kriter uygunluğunu kaybetmiştir;

Tablo 4.32: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre iki elektriksel alanın devre dışı kalması durumu

Gaz Sıcaklığı (°C)	Toz Seviyesi (mg/Nm ³)			Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)
	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3	
120	6,54	11,14	3,69	10
120	9,94	16,66	5,62	15
120	20,21	32,97	11,50	25
125	10,03	15,13	5,30	10
125	14,86	22,21	7,92	15
125	28,95	42,58	15,66	25
130	15,37	20,48	7,38	10
130	22,25	29,51	10,86	15
130	41,58	54,83	20,84	25
135	23,37	27,66	9,89	10
135	33,09	39,14	14,35	15
135	59,48	70,50	26,84	25
140	31,95	37,34	12,70	10
140	44,43	51,89	18,19	15
140	77,43	90,58	33,28	25

Bir elektriksel alanın devre dışı olduğu durumuna benzer şekilde ilgili yönetmelik kapsamında konulan limit değerlerinin görece yüksek tutulmuş olması, özellikle düşük ve orta değere sahip operasyonel şartlar altında 3 kömürün de kritere uygunluğunu koruduğunu göstermektedir.

- j. “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterlerine göre sarı ile işaretli senaryolar iki farklı bölümde birer elektriksel alanın devre dışı kalması durumunda da uygunluk göstermekte iken yeşil ile işaretlenen senaryolar iki farklı bölümde birer elektriksel alanın devre dışı kalması ile kriter uygunluğunu kaybetmiştir;

Tablo 4.33: “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) kriterlerine göre iki farklı bölümde birer elektriksel alanın devre dışı kalması durumu

Gaz Sıcaklığı (°C)	Toz Seviyesi (mg/Nm ³)			Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)
	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3	
120	12,81	20,92	7,23	10
120	18,02	29,09	10,20	15
120	32,40	51,29	18,43	25
125	18,30	27,03	9,78	10
125	25,29	37,10	13,62	15
125	44,09	63,91	24,02	25
130	26,21	34,89	12,92	10
130	35,63	47,25	17,79	15
130	60,28	79,55	30,73	25
135	37,43	45,03	16,55	10
135	50,09	60,19	22,56	15
135	82,38	99,00	38,28	25
140	48,93	58,18	20,47	10
140	64,63	76,74	27,66	15
140	103,87	123,33	46,18	25

k. Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine göre sarı ile işaretli senaryolar iki farklı bölümde birer elektriksel alanın devre dışı kalması durumunda da uygunluk göstermekte iken yeşil ile işaretlenen senaryolar iki farklı bölümde birer elektriksel alanın devre dışı kalması ile kriter uygunluğunu kaybetmiştir;

Tablo 4.34: Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) kriterlerine göre iki farklı bölümde birer elektriksel alanın devre dışı kalması durumu

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)
120	12,81	20,92	7,23	10
120	18,02	29,09	10,20	15
120	32,40	51,29	18,43	25
125	18,30	27,03	9,78	10
125	25,29	37,10	13,62	15
125	44,09	63,91	24,02	25
130	26,21	34,89	12,92	10
130	35,63	47,25	17,79	15
130	60,28	79,55	30,73	25
135	37,43	45,03	16,55	10
135	50,09	60,19	22,56	15
135	82,38	99,00	38,28	25
140	48,93	58,18	20,47	10
140	64,63	76,74	27,66	15
140	103,87	123,33	46,18	25

İki elektriksel alanın iki farklı bölümde devre dışı bırakılması ve devre dışı kalması nedeni ile ilgili kritere uygunluğunu kaybeden senaryolar yeşil renk ile işaretlenmiştir. Aynı bölüm içerisinde iki elektriksel alanın devre dışı kalmasına kıyasla elektrostatik filtre operasyonunu daha olumsuz etkileyen bu koşul altında 3 nolu kömür harici diğer kömürler ilgili kriterlere uygunluk gösterememektedir. Hava ön ısıtıcı kaçağı değerinin yüzde 15 seviyesine çıkmasına ek olarak sıcaklık artışının da eklenmesi ile düşük toz direncine sahip olan 3 nolu kömür de kriterlere uygunluğunu diğer kömürlere benzer şekilde kaybetmektedir.

- I. Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre sarı ile işaretli senaryolar iki farklı bölümde birer elektriksel alanın devre dışı kalması durumunda da uygunluk göstermekte iken yeşil ile işaretlenen senaryolar iki farklı bölümde birer elektriksel alanın devre dışı kalması ile kriter uygunluğunu kaybetmiştir;

Tablo 4.35: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (Resmi Gazete No: 29211) kriterlerine göre iki farklı bölümde birer elektriksel alanın devre dışı kalması durumu

Toz Seviyesi (mg/Nm ³)				
Gaz Sıcaklığı (°C)	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)
120	12,81	20,92	7,23	10
120	18,02	29,09	10,20	15
120	32,40	51,29	18,43	25
125	18,30	27,03	9,78	10
125	25,29	37,10	13,62	15
125	44,09	63,91	24,02	25
130	26,21	34,89	12,92	10
130	35,63	47,25	17,79	15
130	60,28	79,55	30,73	25
135	37,43	45,03	16,55	10
135	50,09	60,19	22,56	15
135	82,38	99,00	38,28	25
140	48,93	58,18	20,47	10
140	64,63	76,74	27,66	15
140	103,87	123,33	46,18	25

Yukarıda detaylandırılan senaryolara paralel olarak yüksek emisyon limit değeri nedeni ile 3 nolu kömür kriter uygunluğunu iki elektriksel alanın iki farklı bölümde devre dışı kalması durumunda bile korurken, 1 ve 2 nolu kömürler yüksek hava kaçağı değeri ve yüksek sıcaklık değerleri altında sadece bu kritere uygunluğunu yitirmektedir.

5. SONUÇ

Fosil yakıt kullanan tesislerin atmosfere yaymakta olduğu emisyonlar çevresel ve canlı sağlığı açısından çok büyük önem teşkil etmektedir. Bu emisyonların bir tanesi olan partiküler madde ve partiküler madde tutucu olarak santrallerde kullanılan elektrostatik filtreler tez kapsamında incelenerek, elektrostatik filtrelerin farklı operasyonel koşullar altında çalışma verimleri ve süreç sonunda elde edilen temiz gaz toz konsantrasyonu değerleri hesaplanmıştır. Tez kapsamında incelenen santral 615 MW kurulu güce sahip iki adet süper-kritik kazan değerleri altında ünitelerden oluşmaktadır. Ünite başına 2 adet gövdeden oluşan elektrostatik filtre gövde başına 4 kabin, kabin başına 2 kısım ve kısım başına da 20 şeritten oluşmaktadır.

Ulusal ve uluslararası yönetmelikler ile yetkili kuruluşlar tarafından emisyon limit değerleri belirlenerek ve takip edilerek operasyonel santrallerin uygunluğu takip edilmektedir. Farklı operasyonel koşullar altında emisyon değerleri hesaplanan söz konusu santralin bu yönetmeliklere uygunluğu da incelenmiştir. Elektrostatik filtre verimliliğine ve dolaylı olarak temiz gaz toz konsantrasyonu değerine etkisi olan faktörler incelenerek, bu faktörler arasında öncelikli öneme sahip olan toz direnci, kömür ve kül özellikleri, uçucu gaz sıcaklığı, uçucu gaz miktarı etkenlerinin etkisini görebilmek adına farklı senaryolar yaratma amacı ile öncelikle farklı kömür özellikleri altında emisyon hesaplamaları yapılmıştır. Seçilen 3 farklı kömür için farklı uçucu gaz sıcaklıkları ve farklı hava ön ısıtıcı kaçağı değerleri altında toz emisyonları hesaplanarak, bu etkenlerin elektrostatik filtre verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Düşük silika ve alüminyum oksit değeri dolayısıyla düşük toz direncine sahip olan 3 nolu kömür diğer iki kömür numunesine göre daha düşük toz emisyon değerleri elde ederken, bu değerleri elde etmesine yüksek alt ısı değerinden dolayı elde ettiği düşük gaz akış haciminin de katkısı görülmüştür. Benzer ve görece düşük-orta uçucu gaz ve hava ön ısıtıcı kaçağı değerleri altında seçilen her üç kömür de uluslararası

yönetmelikler kapsamında belirlenen emisyon limit değerlerine uygunluk gösterirken, görece yüksek toz direnci nedeni ile 1 ve 2 nolu kömür örnekleri uçucu gaz sıcaklığının 130 °C seviyelerine çıkması ile birlikte yönetmelik uygunluklarını yitirmektedirler. Ülkemizde halihazırda uygulanmakta olan Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği kapsamında belirlenen limit değeri görece yüksek olduğundan (50 mg/Nm³) neredeyse tüm senaryolarda tüm kömürler yönetmelik uygunluklarını korumaktadırlar. Tüm elektriksel alanların devrede olduğu senaryolara ek olarak elektrostatik filtre içerisindeki elektriksel alanların devre dışı kalması durumları da incelenerek, yönetmelik uygunluğu analizi yapılmıştır. Operasyonel sıkıntılardan doğabilecek elektriksel alan devre dışı kalması durumu, santral optimizasyonu yapmak amacı ile santral operatörleri tarafından uygulanabilecek bir durum olduğu için önem arz etmektedir. Bir elektrostatik bölümü içerisinde sırası ile bir ve iki elektriksel alan devre dışı bırakılarak, temiz gaz toz konstrasyonu hesaplanmıştır. Bu senaryolarda düşük toz direncine sahip ve yüksek alt ısıl değere olan 3 nolu kömür düşük ve orta operasyonel değerler altında yönetmelik uygunluğunu korurken, 2 alanın devre dışı bırakılması ile 1 ve 2 nolu kömürler özellikle orta derecedeki operasyonel koşullar altında bile yönetmelik uygunluklarını yitirmektedirler. Beklendiği üzere iki elektriksel alanın devre dışı bırakılması senaryolarında bir elektriksel alanın devre dışı bırakılması senaryolarına kıyasla daha yüksek toz emisyon değerleri elde edilmiştir. Seri şekilde yer alan bölümlerden 2 tanesinde birer elektriksel alan devre dışı bırakıldığında ise en yüksek toz emisyon değerleri elde edilmiştir.

Yukarıda özetlenen sonuçlardan dolayı, santral işletmesinin toz emisyon değerlerini kritik seviyenin altında tutabilmek amacı ile olası elektriksel alan problemlerini de göz önüne alarak, uçucu gaz sıcaklığını ve hava ön ısıtıcı kaçağı değerlerini olabildiğince düşük tutmaları gerekmektedir. Yukarıda bahsedildiği üzere, ileride yapılacak çalışmalarda santral optimizasyonu sağlamak amacı ile elektrostatik filtrelerin kontrol sistemleri üzerinde çalışılarak, hali hazırda yönetmelikler kapsamında belirlenen emisyon limit değerlerinin altında çalışan santrallerin elektriksel alanlarının bazılarını devre dışı bırakarak, tasarruf sağlamaları ve limit değerlerine yakın değerler altında çalışmaları incelenebilir.

KAYNAKÇA

Kitaplar

Mizuno, A., 2000. *Electrostatic Precipitation*. Japonya

Staudt, E., J., 2011. *Control technologies to reduce conventional and hazardous air pollutants from coal-fired power plants*. Boston: USA.



Sürekli Yayınlar

- Adamiak, K., 2013. Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: a review. *Journal of Electrostatics*. **71** (4), ss-673-680
- Bickelhaupt, R.E. 1975. Surface Resistivity and the Chemical Composition of Fly Ash. *Journal of Air Pollution Control Association*. **25**, (248-152)
- Cooperman, G. 1971. A new theory of precipitator efficiency. *Atmos. Environ.* (5) ss. 541-551
- Deutsch, W., 1922. Bewegung und ladung der elektrizitastrager im zylinderkondensator. *Ann Phys.* (68) ss.335-344
- İlkılıç, C. ve Behçet, R., 2006. Hava kirliliğinin insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkisi. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, ss.66-72.
- Jadedrusik, M. & Aswierzok, A. 2013. The correlation between corona current distribution and collection of fine particles in a laboratory-scale electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*. **71** (3), ss-199-203
- Lei, H., Wang, L. & Wu, Z., 2008. EHD turbulent flow and monte-carlo simulation for particle charging and tracing in a wire-plate electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*. **66** (3-4), ss-130-141
- Leonard, G.L. & Mitchner, S.A., 1982. Self, experimental study of the effect of turbulent diffusion on precipitator efficiency. *Aerosol Sci.* (13) ss. 271-285
- Manuzon, R., Zhao, L. And Gecik, C., 2014. An optimized electrostatic precipitator for air cleaning of particulate emissions from poultry facilities. *ASHRAE*. **120** (1), ss.490-503
- Mizeraczyk, J., Podlinski, J., Niewulis, A. & Berendt, A., 2013. Recent progress in experimental studies of electro-hydrodynamic flow in electrostatic precipitators. *Journal of Physics: Conference Series*. **418** (1)
- Noda, N.&Makina, H., 2010. Influence of operating temperature on performance of electrostatic precipitator for pulverized coal combustion boiler. *Advanced Powder Technology* (21), ss. 495-499

- Ortiz, F.G., Navarrete, B. & Caadas, L. 2010. Dimensional analysis for assessing the performance of electrostatic precipitators. *Fuel Processing Technology*. **91** (12), ss.-1783-1793
- Soldati, A., 2003. Cost efficiency analysis of a model wire-palte electrostatic precipitator via DNS based Eulerian particle transport approach. *Aerosol Sci.* (37) ss. 171-182
- Soldati, A., 2000. On the effects of electro-hydrodynamic flows and turbulence on aerosoltransport and collection in wire-plate electrostatic precipitators. *Aerosol Sci.* (31) ss. 293-305
- Talaie, M., Taheri, M., & Fathikaljahi, J. 2001. A new method to evaluate the voltage-current characteristics applicable for a single-stage electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*. **53** (3), ss. 221-233
- Toimil, D., Gomez, A. & Andres, M.S. 2014. Data-driven ESP modelling and optimization. *Journal of Aerosol Science*. **70**, ss-59-66
- Turner, J., Lawless, P., Yamamoto, T. & Coy, D., 1995, Electrostatic precipitators. *Research Triangle Institute*, ss. 5-67
- Vardar, N. ve Yumurtaci Z., 2010. Emissions estimation for lignite-fired power plants in Turkey. *Energy Policy*. 38, ss.243-252
- Xu, L. ve Yuan,J., 2015. Thermodynamic properties calculation of the flue gas based on its composition estimation for coal-fired power plants. *Applied Thermal Engineering*. **90**, ss. 366-375
- Zhuang, Y., Kim, Y.J., Lee, T.G. & Biswas, P. 2000. Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics*. **48** (3-4), ss.-245-260

Diğer Yayınlar

Ahmad, M., (2011). Modeling and simulation of an electrostatic precipitator. *Degree Project*. Sweden: Linaeus University

Algedik, Ö., 2015. Kömürü finanse etmek

Brocilo, D., (2003). Electrode geometry effects on the collection efficiency of submission and ultrafine dust particles in wire-plate electrostatic precipitators. Thesis for PhD Degree. Canada: McMaster University

Çınar, B. & Çakır, C. (2015). Eren Enerji Elektrik Üretim A.Ş. Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Yalova, Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Creelman, R. *The Effect of Blending Coals on Electrostatic Precipitator Performance*. R.A.Creelman and Associates

Chandra, A. *Some Investigations on Fly Ash Resistivity Generated in Indian Power Plants*. Centre for Energy Studies. Indian Institute of Technology

Electrostatic precipitator operation.

[https://www.neundorfer.com/FileUploads/CMSFiles/ESP%20Operation\[0\].pdf](https://www.neundorfer.com/FileUploads/CMSFiles/ESP%20Operation[0].pdf)
[12.04.2016]

Key World Energy Statistics. 2014.

http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2014.pdf [18, 04, 2016]

Miller, L., (2004). Analysis of thermal power generation projects considering current trends in emission policy. *Thesis for the Master Degree*. Canada: Dalhousie University.

Particular Matter Emission. <http://www2.cec.org/site/PPE/content/particulate-matter-emissions-0> [18.04.2016]

Purse, B. & Zbacnik, R. Power-eng. Upgrading electrostatic precipitators.

Sağlık ve Çevre Birliği. 2015. Türkiye’de Hava Kirliliği ve Sağlık. Şubat. Belçika.