



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**MUĞLA İLİNDE BULUNAN YATAĞAN, YENİKÖY
VE KEMERKÖY TERMİK SANTRALLERİ
ÇEVRESİNDEKİ CIVA EMİSYONLARININ TAYİN
EDİLMESİ VE SAĞLIK SONUÇLARININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Funda GACAL

Çevre Bilimleri Anabilim Dalı

İzmir
2024

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**MUĞLA İLİNDE BULUNAN YATAĞAN,
YENİKÖY VE KEMERKÖY TERMİK
SANTRALLERİ ÇEVRESİNDEKİ CIVA
EMİSYONLARININ TAYİN EDİLMESİ VE
SAĞLIK SONUÇLARININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Funda GACAL

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nur AKSUNER

Çevre Bilimleri Anabilim Dalı
Çevre Bilimleri Tezli Yüksek Lisans Programı

İzmir
2024

Funda Gacal tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Muğla İlinde Bulunan Yatağan, Yeniköy Ve Kemerköy Termik Santralleri Çevresindeki Cıva Emisyonlarının Tayin Edilmesi Ve Sağlık Sonuçlarının Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 27.08.2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Nur AKSUNER

.....

Raportör Üye : Prof. Dr. Armağan KINAL

.....

Üye : Prof. Dr. Nüket TİRTOM

.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kömür Yakıtlı Elektrik Santrallerinde Cıva Kirliliği, Sağlık Etkileri Ve Muğla’daki Santrallerin Cıva Kirliliği Bakımından Değerlendirilmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

27 / 08 / 2024

Funda Gacal

ÖZET**MUĞLA İLİNDE BULUNAN YATAĞAN, YENİKÖY VE
KEMERKÖY TERMİK SANTRALLERİ ÇEVRESİNDEKİ CIVA
EMİSYONLARININ TAYİN EDİLMESİ VE SAĞLIK
SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

GACAL, Funda

Yüksek Lisans Tezi, Çevre Bilimleri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nur AKSUNER

Ağustos 2024, 70 sayfa

Cıva çevrede doğal olarak bulunan, özellikle kayalarda depolanan bir elementtir. Ancak insan eliyle açığa çıkarıldığında, cıva döngüsüne girip çevresel ortamlarda 3.000 yıl kalabilen bir ağır metaldir. Cıvanın farklı formları insan sağlığını, özellikle çocukların bilişsel sağlığı tehdit etmektedir. Dünya ve ülkemizdeki cıva emisyonlarının en büyük ikinci kaynağı kömür yakıtlı elektrik santralleridir. Türkiye’de kömür yakıtlı elektrik santrallerin yılda 6,5 ton cıva emisyonuna neden olduğu, bunun da toplam cıva emisyonlarının yaklaşık %32’sini oluşturduğu tahmin edilmektedir.

Bu tez kapsamında Muğla’da bulunan Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy kömür yakıtlı elektrik santrallerinin bacalarından açığa çıkan cıva emisyonları kütle-denge yöntemiyle tahmin edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre elektrik üretiminin %8,2’sini karşılayan bu üç santralin bacalarından, yılda yaklaşık 1-1,04 ton cıva atmosfere salınmaktadır. Bu emisyonların da yıllık 1.361- 1.415 IQ puan kaybına ve 2 milyar 117 bin – 2 milyar 202 bin dolar ekonomik maliyete neden olduğu tahmin edilmektedir. Santrallerin çevresinden su ve sediment örnekleri alınmış, su örneklerinde cıva miktarı ölçülebilir sınır değerlerin altında kalırken, sediment örneklerinin bazılarında cıva kirliliği çok yüksek miktardadır.

Anahtar sözcükler: Cıva emisyonları, kömür kaynaklı cıva emisyonları, kömür yakıtlı termik santraller, kömür yakıtlı santrallerin cıva kirliliği, cıva kirliliğinin sağlık etkisi, cıva kirliliğinin tarihçesi, cıva kirliliğinin ekonomik maliyeti, Yeniköy termik santrali, Kemerköy termik santrali, Yatağan termik santrali



ABSTRACT**DETERMINATION OF MERCURY EMISSIONS AROUND
YATAĞAN, YENİKÖY, AND KEMERKÖY COAL POWER
PLANTS IN MUĞLA PROVINCE AND ESTIMATING THE
HEALTH BURDEN**

GACAL, Funda

MSc in Environmental Sciences

Supervisor: Prof. Dr. Nur AKSUNER

June 2024, 70 pages

Mercury is a naturally occurring element but when released by human activities, mercury enters the cycle and can persist in the environment for up to 3,000 years. Different forms of mercury pose threats to human health, particularly to the cognitive health of children. The second largest source of mercury emissions worldwide and in Türkiye is coal-fired power plants. It is estimated that coal-fired power plants in Türkiye contribute to 6.5 tons of mercury emissions annually, accounting for approximately 32% of the total mercury emissions.

In this thesis, mercury amounts at stacks of the Yatağan, Yeniköy, and Kemerköy coal-fired power plants in Muğla city of Türkiye have been estimated using the mass-balance method. According to the analysis, approximately 1-1.04 tons of mercury are emitted into the atmosphere annually. These emissions are estimated to cause an annual loss of 1,361-1,415 IQ points and an economic cost ranging from 2,117,000 to 2,202,000 US dollars. Water and sediment samples were taken from around the power plants. While mercury levels in water samples remained below measurable limit values, some sediment samples showed very high levels of mercury pollution.

Keywords: Mercury emissions, coal-based mercury emissions, coal-fired thermal power plants, mercury pollution from coal-fired power plants, health effects of mercury pollution, history of mercury pollution, economic cost of mercury pollution, Yeniköy thermal power plant, Kemerköy thermal power plant, Yatağan thermal power plant.

ÖNSÖZ

Çevre bilimleri alanının, dünyayı ve türümüzü anlamada temel bir basamak olduğunu düşünüyorum. Ancak nesillerdir köylü bir ailenin yüksek eğitimi alma şansına erişen ilk ferdi olarak, bu tezin konusunun bende çok daha özel bir yeri var. Çevre bilimleri yüksek lisansına başlamadan önce, şehir ve bölge planlaması lisansım ile on seneyi aşkın süredir iklim değişikliği, enerji üretimi ve çevre sağlığı alanında çalışmaktayım. Projeksiyonlar, analizler ve özellikle çevre üretiminin dışsal yani çevre ve sağlık üzerine ekonomik etkilerine odaklanan bilimsel çalışmalar yaptığım bu sürede; enerji üretiminin günlük yaşamamız, sağlığımız ve kalkınmamız üzerinde ne kadar etkili olduğunu gözlemledim. Diğer yandan cıva kirliliği, ailemin köyünde cıva madenciliği sonrası artan sağlık sorunları gözlemleri nedeniyle, üzerine eğilmek istediğim bir konuydu.

Tezimi yazma sürecimde, hem otuz yılı aşkın süredir şahit olduğum bu etkileşimi dile getirme, hem de düşüncelerimi sağaltma fırsatı bulduğumu düşünüyorum. Umarım siz de okurken bu etkileşimden keyif alır ve faydalı bulursunuz.

İzmir
27 / 08/ 2024

Funda Gacal



İÇİNDEKİLER DİZİNİSayfa

İÇ KAPAK.....	ii
KABUL VE ONAY SAYFASI.....	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
TABLolar DİZİNİ.....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxi
1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Cıva Miktarı Ve Kaynakları.....	3
2.2. Cıvanın Formları Ve Sağlık Etkileri.....	8
2.2.1. Elemental Cıva.....	8
2.2.2. İnorganik Cıva.....	9
2.2.3. Organik Cıva.....	10
2.2.4. Cıva Maruziyet Limitleri.....	10

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devamı)

Sayfa

2.3. Tarihte Cıva Kullanımı Ve Cıva Felaketleri.....	13
2.4. Minamata Sözleşmesi.....	17
2.5. Kömür Yakıtlı Santrallerde Cıva.....	18
2.5.1. Santrallerde Cıva Kaynakları.....	19
2.5.2. Cıvanın Açığa Çıktığı Prosesler.....	19
2.6. Santrallerde Cıva Azaltım Teknolojileri.....	21
2.7. Santrallerde Cıva Sınır Değerleri, Sağlık Ve Ekonomik Etkileri.....	24
2.8. Cıva Analizinde Örneklem Ve Analiz Teknikleri.....	27
2.8.1. Doğrudan Ölçümlerde Kullanılan Örneklem Ve Analiz Teknikleri.....	27
2.8.2. Tahmin Ve Mühendislik Yöntemleri.....	35
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	37
3.1. Muğla'daki Santrallerin İncelenmesi Ve Cıva Emisyonlarının Tahmini.....	37
3.2. Çevre Örnekleri.....	44
3.2.1. Örneklerin Toplanması İzlenecek Yöntem.....	44
3.2.2. Çevre Örneklerinin Toplanması.....	44
4. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	50
4.1. Düşük Cıva Konsantrasyonlarının Değerlendirilmesi.....	51
4.2. Yüksek Cıva Konsantrasyonlarının Değerlendirilmesi.....	52

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devamı)Sayfa

4.3. Sağlık Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	54
5.ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	57
TEŞEKKÜR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	70
EKLER.....	



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1-1 Cıva döngüsü, kaynakları ve birikim alanları	4
2.3-1 İtalya, Toskana'dan zincifre	14
2.3-2 Açık ocakta zincifre cevherinden cıva çıkarımı tasviri.	15
2.3-3 Minamata Körfezi'ndeki ve Chisso firmasının asetaldehit üretimi, metil cıva deşarjı ve emisyonları.	16
2.5.2-1 Santral bacalarından çıkan cıvanın kimyasal formları	20
2.6-1 Santral hava kirletici ve cıva azaltım sistemleri	22
2.8.1-1 AAS süreci	33
2.8.1-2 ICP-MS çalışma prensibi akış şeması.	34
3.1-1 Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy santrallerinin konumu	37
3.1-2 Pulverize kömür kazanı, ESF ve WFDG kombinasyonun sağlayabileceği cıva azaltımı.....	41
3.1-3 Muğla'daki Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy santrallerinden kaynaklı cıva emisyonlarının dağılımı.	43
3.3.2-1 Örnek 1.1.'in konumu	47
3.3.2-2 Örnek 1.2., 2.1. ve 2.2'nin konumu.....	48
3.3.2-3 Örnek 3.1'in konumu	48
3.3.2-4 Örnek 3.2'nin konumu	49

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)ŞekilSayfa

4-1	Örnek 1.2'nin, daha yüksek rakımdaki su deposunun ve Yeniköy TES'in konumu	54
-----	--	----



TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1-1 Sektörlere göre 2015 yılında insan kaynaklı atmosferdeki toplam cıva emisyonları	5
2.1-2 Alt sektörlere göre 2015 yılında Türkiye'nin cıva emisyonları	6
2.2.4-1 Cıva maruziyeti için kılavuz değerler.....	11
2.5-1 2015 yılında Türkiye'deki kömür santrallerinden kaynaklı cıva emisyonları.	18
2.5.1-1 Kömür türleri, kalorifik değeri ve başlıca özellikleri.	19
2.6-1 Santrallerin yakma ve baca gazı arıtma sistemlerine göre ortalama cıva giderim verimleri.	24
2.7-1 Kömür yakıtlı santrallerde temel hava kirletici ve cıva sınır değerleri. ..	25
2.8.1-1 Kömür yakıtlı elektrik santrallerinde cıva analizi için kullanılabilecek analiz yöntemleri	28
3.1-1 Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy TES temel bilgiler.....	38
3.1-2 Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy TES kömür tüketimleri ve cıva içerikleri	39
3.1-3 Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy TES baca gazı arıtma sistemleri.	40
3.1-4 Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy santrallerinin cıva emisyonları hesaplaması.....	42
3.2.2-1 Örnek alınan noktaların detayları	46

TABLÖLAR DİZİNİ (devamı)TabloSayfa

4-1	Sedimentte cıva analizi sonuçları.....	50
-----	--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$	Saatte santimetrekare başına
cm	Santimentre
Hg^0	Elemental cıva
Hg^{2+}	Reaktif cıva (oksitlenmiş cıva buharı)
Hg_p	Partikül cıva
μg	Mikrogram
mg	Miligram
mL	Mililitre
ppm	Milyonda bir parçacık
ppb	Milyarda bir parçacık
CO_2	Karbondioksit
SO_2	Kükürtdioksit
NO_x	Azot oksitler

Kısaltmalar

AAS	Atomik absorpsiyon spektrometrisi
AÇA	Avrupa Çevre Ajansı
AB	Avrupa Birliği

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar

ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry)
AFS	Atomik floresans spektrometrisi
BGAA	Baca gazı azot arıtma sistemleri
BGKA	Baca gazı kükürt arıtma sistemleri
CREA	Center for Research on Energy and Clean Air
CVAAS	Soğuk buhar atomik absorpsiyon spektroskopisi
CVAFS	Soğuk buhar atomik floresans spektroskopisi
ÇŞİDB	Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
DSÖ	Dünya Sağlık Örgütü
DOAS	Diferansiyel optik absorpsiyon spektroskopisi
EBC	Europe Beyond Coal
EEB	European Environmental Bureau
EPA	United States Environmental Protection Agency
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
E-PRTR	Avrupa Kirletici Salım ve Taşıma Kaydı
ESF	Elektrostatik filtreler
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
ICP-MS	İndüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometresi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)Kısaltmalar

ICP-OES	İndüktif Eşleşmiş Plazma Atomik Emisyon Spektroskopisi
IPCS	International Programme on Chemical Safety)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UNEP	United Nations Environment Programme
UÇÖ	Uluslararası Çalışma Örgütü



1. GİRİŞ VE AMAÇ

Elektrik üretimi, 1850’lerde başlayan Sanayi Devrimi ile modern toplumun temel ihtiyaçlarından biri haline gelmiştir. Kömür yakıtlı elektrik santralleri (kömürlü termik santraller [TES] kömürlü santraller) düşük maliyet, kontrollü enerji üretimi ve arz güvenliği nedeniyle elektrik üretiminde önemli bir yer tutar. 2023’de dünya genelinde yaklaşık 3.000 terawatt saat (TWh) elektrik üretilmiş ve bunun yaklaşık üçte biri kömürden elde edilmiştir (Ember, 2024). Ancak, kömürlü elektrik santralleri çevre kirliliği açısından ciddi sorunlar yaratır. Bu santrallerden salınan karbon dioksit (CO_2) ve diğer sera gazları, iklim değişikliğine katkıda bulunur. Ayrıca, kükürt dioksit (SO_2), azot oksitler (NO_x ve partikül maddeler (PM) gibi kirleticiler hava kalitesini düşürerek insan sağlığına zarar verir. Cıva gibi ağır metallerin salınımı, ekosistemlerde toksik etkilere neden olabilir.

Cıva havada, suda ve toprakta doğal olarak bulunan bir elementtir ve gezegendeki miktarı sabittir. Doğada bulunan, zincifre (bir cıva madeni) gibi minerallerin içinde güvenli bir şekilde saklanabilir. Ancak insanlar tarafından doğadan çıkartıldığında farklı formlara dönüşerek toksik hale gelebilir. Cıva bir kez açığa çıktığında, diğer mikroorganizma ve elementlerle tepkimeye girer, kıtalar ötesi taşınır ve “küresel cıva döngüsü” denilen bir çevrime girerek farklı canlı popülasyonları üzerinde farklı sağlık sorunları yaratır. Cıvanın toksik etkileri milattan önce bilinir olsa da toksik etkileri ancak 18. Yüzyıldaki bazı çevresel felaketlerden sonra araştırılmaya başlanmıştır. Minamata Sözleşmesi gibi uluslararası cıva azaltım çabalarına rağmen, günümüzde cıvanın güvenli maruziyet değeri ve cıvanın azaltılmasına ilişkin yönetmeliklerde boşluklar vardır. Ayrıca azaltım çabalarına rağmen, cıva kirliliği büyüyen bir sorundur, BM’nin aynı raporuna göre, 2010 yılına kıyasla 2015 yılında atmosferdeki cıva miktarı %20 artmıştır; sanayi öncesi dönemlerden çıkartılan cıva bugün hala atmosferde, suda ve karada çevrim halindedir (UNEP, 2019a).

Kömür yakıtlı elektrik santrallerinin neden olduğu cıva emisyonları ise, diğer hava kirleticilere göre geç fark edilmiş bir sorundur. Halbuki kömür yakıtlı santrallerde kömür madenciliğinden, yakım sonrası külün depolanmasına kadar her adımda cıva emisyonu açığa çıkmaktadır. En modern teknolojilerle dahi, bu cıva kirliliğini sıfıra indirmek mümkün değildir. Türkiye Paris İklim Anlaşması’nı Kasım 2021’de onaylamış ve ayrıca 2053 net sıfır hedefi açıklamıştır. Net sıfır hedefi kapsamında emisyon azaltım hedefi, kömür yakıtlı elektrik üretim santrallerini de etkileyecek bu santrallerdeki elektrik üretimi azaldıkça santrallerin

yarattı cıva kirliliği ve diğer çevresel kirlilikler azalacaktır. 2023 yılında Türkiye’de toplam 21,8 GW kurulu gücünde kömür yakıtlı elektrik santrali bulunmaktadır (ETKB, 2024). Toplam elektrik üretiminin %36’sını kömür yakıtlı santraller sağlamış olup, bu santraller yaklaşık 118 teravatsaat (TWh) elektrik üretmiştir (Ember, 2024). Muğla’daki Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy santralleri, Türkiye’deki toplam kurulu kömür kapasitesinin %7,7’sini oluşturur ve kömür yakıtlı elektrik üretiminin yaklaşık %8,2’sini sağlar.

Bu tezin konusu, küresel ölçekte atmosferdeki cıva emisyonlarının ikinci en büyük kaynağı olan kömür yakıtlı elektrik santrallerinin incelenmesi ve ülkemizden örnekler verilmesidir. Türkiye’de 50 MW ve üstü kapasitede 30 adet kömür yakıtlı santral bulunmaktadır (Gacal vd., 2021) Muğla ilinde bulunan ve yerli linyit kömürüyle çalışan üç adet kömür yakıtlı elektrik santral bulunmaktadır. Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy santralleri ve çevrelerindeki cıva emisyonları bu kapsamda incelenecektir.

2. GENEL BİLGİLER

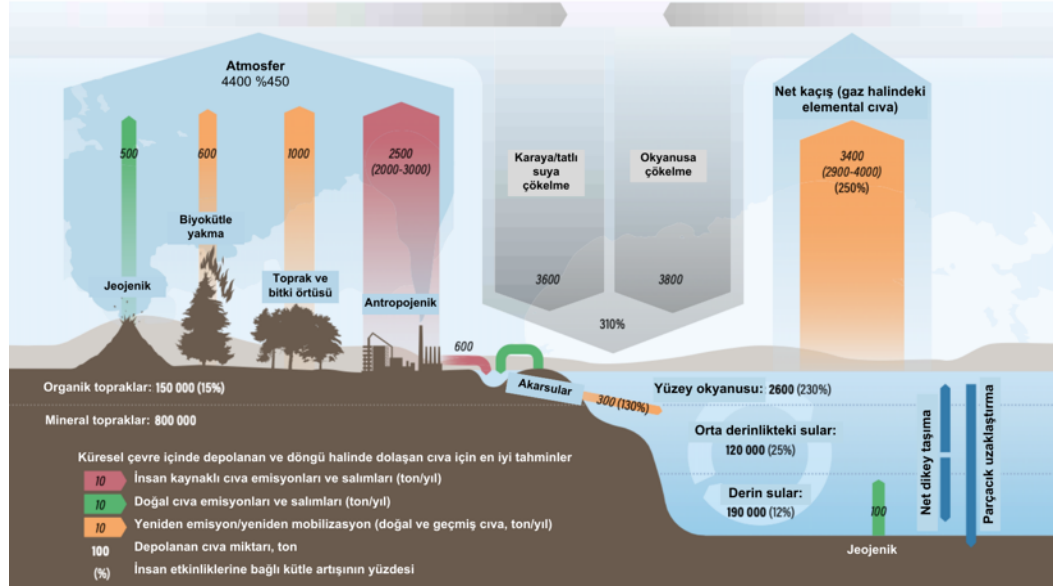
Cıva en genel tanımıyla oda sıcaklığında sıvı halde bulunan ve diğer metallere göre daha kolay buharlaşan bir metal olarak bilinir (Tresca et al., 2022). Cıvanın en yaygın kullanım alanları termometre, barometre, floresan lambalardır. Cıva çevresel ortamlarda üç kimyasal formda bulunur; elemental cıva, inorganik cıva ve organik cıva. Her bir türün görünümü, kimyasal özellikleri ve sağlık etkileri farklıdır. Kömür yakıtlı elektrik santrallerinde farklı prosesler sırasında, farklı kimyasal formda cıva emisyonu oluşur. Bu bölümde cıvanın karakteristiği, dağılımını, sağlık etkileri, kömür yakıtlı elektrik santrallerde cıvanın açığa çıktığı prosesler ve azaltım çabaları incelenecektir.

2.1. Cıva Miktarı ve Kaynakları

Cıva kaynakları ve birikimi konusundaki en geniş kapsamlı kaynak Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın yayımladığı Küresel Cıva Değerlendirmesi raporudur (UNEP, 2019a). Bu rapora göre, atmosferdeki antropojenik cıva konsantrasyonu son yüzyılda %300 ila %500 arasında artmış, 200 metre derinlikten daha az derinliğe sahip yüzey sularında cıva miktarı yaklaşık üç katına çıkmıştır (UNEP, 2019a).

Şekil 2.2.1'de küresel cıva kaynakları ve döngüsü verilmiştir olup, buradaki rakamlar 2015 yılındaki cıva emisyonlarını göstermektedir (UNEP (2019)). Bu verilere göre:

- Volkanik aktiviteler ve deniz tabanındaki jeojenik aktiviteler gibi doğal kaynaklar 600 ton cıva emisyonuna neden olmuştur.
- İnsan faaliyetleri 2.500 tonu atmosfere, 600 tonu akarsulara salınmak üzere toplam 3.100 ton cıva emisyonuna neden olmuştur.
- Cıva döngüsü yani doğal ve antropojenik nedenlerle daha önce açığa çıkmış cıvanın geçici depolandığı yerden mobilize olarak tekrar döngüye girmesi ise 5.300 ton cıva emisyonuna neden olmuştur.



Şekil 2.1-1 Cıva döngüsü, kaynakları ve birikim alanları (UNEP, 2019a).

Cıva döngüsünden kaynaklı cıvanın, antropojenik emisyonların iki katından fazla olması endişe vericidir. Cıva döngüsü şöyle özetlenebilir. Açığa çıkan cıva partikül madde veya cıva buharı formunda atmosferde dolaşarak küresel olarak yayılır (ANAP and UNEP, 2019). Özellikle cıva buharı yaklaşık bir yıl boyunca atmosferde dolaşır, kuru ve yağ çökeltme yoluyla yeryüzüne ulaşır. Yeryüzüne ulaşan cıva, anaerobik organizmalar tarafından metil cıvaya dönüşür. Cıva bu döngü yoluyla çevrede yaklaşık 3.000 yıl kalabilir (AÇA, 2018a). İnsan kaynaklı cıva emisyonları bugün dursa dahi cıvanın ekosistemden tamamen temizlenmesinin yüzyıllar yıl alacaktır.

Çizelge 2.1-1’de atmosferdeki antropojenik cıva emisyonları kaynaklarına göre sınıflandırılmıştır. En fazla cıva emisyonuna neden olan üç sektör sırasıyla; küçük ölçekli ve zanaat için altın madenciliği (%37,69), kömürlü elektrik santraller (%13,13) ve çimento üretimidir (%10,48) (UNEP, 2019a). Enerji sektörü, elektrik, sanayi, ısınma ve ulaşım sektörlerini kapsamaktadır ve enerji sektöründe kömür kullanımı küresel cıva emisyonlarının %21,31’inden sorumludur.

Çizelge 2.1-1 Sektörlere göre 2015 yılında insan kaynaklı atmosferdeki toplam cıva emisyonları
(UNEP, 2019a).

Sektör	Emisyon (yaklaşık ton)	Emisyon aralığı (ton)	Sektörel emisyon /
Küçük ölçekli ve zanaat için altın madenciliği	838	675-1.000	%37,69
Kömür (elektrik santralleri) ile sabit yanma*	292,00	255 - 346	%13,13
Çimento üretimi (hammadde ve kömür hariç yakıt)	233,00	117 - 782	%10,48
Bakır, kurşun, çinko (Al, Cu, Pb, Zn) üretimi	228,00	154 - 338	%10,25
Atık (diğer atıklar)	147,00	120 - 223	%6,61
Kömür (endüstriyel) ile sabit yanma*	126,00	106 - 146	%5,67
Büyük ölçekli altın üretimi	84,50	72,30 - 97,40	%3,80
Vinil-klorür monomeri (cıva katalizörü)	58,20	28 - 88,80	%2,62
Kömür (ısınma, ulaşım)*	55,80	36,70 - 69,40	%2,51
Biyokütle yakımı (evsel, endüstriyel ve enerji santralleri)	51,90	44,30 - 62,10	%2,33
Dökme demir ve çelik üretimi (birincil)	29,80	19,10 - 76	%1,34
Klor-alkali üretimi (cıva işlemi)	15,10	12,20 - 18,30	%0,68
Atık yakma (kontrollü yakma)	15,00	8,90 - 32,30	%0,67
Petrol rafinasyonu	14,40	11,50 - 17,20	%0,65
Cıva üretimi	13,80	7,90 - 19,70	%0,62
İkincil çelik üretimi	10,10	7,65 - 18,10	%0,45
Kremasyon (ölü yakma)	3,77	3,51 - 4,02	%0,17
Petrol(evsel, ulaşım) ile sabit yanma	2,70	2,33 - 3,21	%0,12
Petrol (enerji santralleri) ile sabit yanma	2,45	2,17 - 2,84	%0,11
Petrol (endüstriyel) ile sabit yanma	1,40	1,18 - 1,69	%0,06
Gaz (enerji santralleri) ile sabit yanma	0,35	0,28 - 0,43	%0,02
Gaz (evsel, ulaşım) ile sabit yanma	0,16	0,13-0,22	%0,01
Gaz (endüstriyel) ile sabit yanma	0,12	0,10 - 0,15	%0,01
Toplam	2.223,55	2.000 - 2.820	%100,00
* Kömür kullanarak enerji üreten tüm sektörler (elektrik, sanayi, ısınma, ulaşım).			

Çizelge 2.1-2’de Türkiye’nin cıva emisyonları alt sektörlere göre ve kilogram cinsinden verilmiştir (ANAP and UNEP, 2019). Buna göre Türkiye 2015 yılında atmosfere 20,35 ton cıva salmıştır. Türkiye’deki kömür yakıtlı termik santraller (linyit, bitümlü taş kömür ve taş kömür toplam) 6,5 ton cıvaya neden olmuştur (Bkz. Çizelge 2.1-2 son satır). Türkiye’de kömür yakıtlı elektrik santrallerin neden olduğu cıva emisyonları, toplam cıva emisyonlarının yaklaşık %32’sini oluşturur. Dünya genelinde bu ortalama %13,13 (Çizelge 2.1-1) olup, Türkiye bu ortalamanın çok üzerindedir. Ayrıca ülkemizde enerji sektöründe kömür kullanımı toplam cıva emisyonlarının %44.54’ünden sorumludur (Çizelge 2.1-2).

Çizelge 2.1-2 Alt sektörlere göre 2015 yılında Türkiye’nin cıva emisyonları (ANAP and UNEP, 2019).

Sektör	Alt sektör	Emisyon (yaklaşık kg)	Emisyon aralığı (kg)	Sektörel emisyon / toplam emisyon
Çimento üretimi (hammadde ve yakıt, kömür hariç)	Çimento üretimi (hammadde ve yakıt, kömür hariç)	6.790,52	2396,65 - 35162,34	%33,38
Sabit kömür yakma (enerji santralleri)	Kahverengi (linyit)	4.853,74	2.997,18 - 15.289,27	%23,86
Diğer atık	Diğer atık	2.089,88	626,96 - 6.269,64	%10,27
Sabit kömür yakma (enerji santralleri)	Taş kömürü (bitümlü)	1.597,12	910,36 - 3.633,44	%7,85
Sabit kömür yakma (evsel/endüstriyel, taşımacılık)	Taş kömürü	1.010,85	576,19 - 2299,68	%4,97
Büyük ölçekli altın üretimi	Büyük ölçekli altın üretimi	990	346,50 - 1930,50	%4,87
Birincil ham demir ve çelik üretimi	Ham demir ve çelik üretimi (birincil)	516,19	180,95 - 2732,12	%2,54
Sabit kömür yakma (evsel/endüstriyel, taşımacılık)	Linyit	470,4	268,13 - 1070,16	%2,31
Sabit kömür yakma (endüstriyel)	Taş kömürü (çimento endüstrisi)	396,84	226,20 - 902,81	%1,95
Sabit kömür yakma (endüstriyel)	Linyit (diğer endüstri)	333,67	190,19 - 759,09	%1,64
İkincil çelik üretimi	İkincil çelik üretimi	323,03	113,06 - 629,9	%1,59
Demir dışı metal üretimi (birincil bakır)	Bakır (toplam üretim)	285,9	102,04 - 1632,28	%1,41
Sabit kömür yakma (endüstriyel)	Linyit (çimento endüstrisi)	168,72	96,17 - 383,84	%0,83

Biyokütle yakma (evsel, endüstriyel ve enerji santralleri)	Evsel biyokütle yakma	147,05	34,92 - 270,2	%0,72
Sabit kömür yakma (endüstriyel)	Taş kömürü (diğer endüstri)	119,25	67,97 - 271,29	%0,59
Atık yakma (kontrollü yakma)	Atık yakma (kontrollü yakma)	60,89	18,27 - 182,67	%0,30
Sabit kömür yakma (enerji santralleri)	Kahverengi (alt bitümlü)	57,56	32,81 - 130,96	%0,28
Sabit kömür yakma (endüstriyel)	Taş kömürü (demir metal endüstrisi)	45,68	26,04 - 103,91	%0,22
Sabit petrol yakma (evsel/endüstriyel, taşımacılık)	Hafif yakıt	38,56	9,16 - 70,85	%0,19
Petrol rafinerileri	Petrol rafinerileri	9,63	4,58 - 15,17	%0,05
Sabit petrol yakma (enerji santralleri)	Ağır yakıt	9,02	2,14 - 16,57	%0,04
Demir dışı metal üretimi (birincil alüminyum)	Alüminyum (birincil üretim)	7,75	2,71 - 15,11	%0,04
Sabit petrol yakma (evsel/endüstriyel, taşımacılık)	Ağır yakıt	4,96	1,18 - 9,11	%0,02
Sabit petrol yakma (endüstriyel)	Ağır yakıt	4,92	1,17 - 9,04	%0,02
Sabit gaz yakma (enerji santralleri)	Doğal gaz	4,28	1,02 - 7,86	%0,02
Sabit gaz yakma (evsel/endüstriyel, taşımacılık)	Doğal gaz	2,82	0,67 - 5,18	%0,01
Sabit gaz yakma (endüstriyel)	Doğal gaz	1,96	0,47 - 3,61	%0,01
Biyokütle yakma (evsel, endüstriyel ve enerji santralleri)	Enerji santralleri	1,78	0,42 - 3,27	%0,01
Sabit petrol yakma (endüstriyel)	Hafif yakıt	1,16	0,28 - 2,13	%0,01
Sabit kömür yakma (endüstriyel)	Taş kömürü (demir dışı metal endüstrisi)	1,01	0,58 - 2,30	%0,00
Sabit petrol yakma (enerji santralleri)	Hafif yakıt	0,34	0,08 - 0,62	%0,00
Kremasyon emisyonları	Kremasyon emisyonları	0,3	0,23 - 0,36	%0,00
Toplam		20.345,77	9.235,26 - 7.3815,31	%100,00
Alt toplam: Enerji sektöründe kömür kullanımı		9.062,88	5.393,72 - 2.4861,55	%44,54
Alt toplam: Kömür yakıtlı elektrik santralleri		6.508,42	3.940,35 - 19.053,67	%31,99

BM raporunda verilen emisyonlar, modelleme ve simülasyonlara dayanır. Öte yandan Birleşmiş Milletler tarafından yürütülen Uzun Menzilli Sınırlar Ötesi Hava Kirlenmesi Sözleşmesi'ne (UMSHAK) taraf olan ülkeler cıva emisyonlarını raporlamaktadır. Bu iki veri seti arasında her ülkede farklılıklar gözlemlenmektedir. Bu farklılığın nedeni ülkelerin eksik veri raporlaması, emisyon hesaplaması yapılırken farklı metodolojiler kullanması veya farklı tarihlerde raporlama yapması olarak gösterilmiştir (ANAP and UNEP, 2019). Türkiye'nin UMSHAK'a raporladığı cıva emisyonları, Çizelge 2.1-2'de yer alan BM verilerinden farklıdır. UMSHAK'a raporlanan verilere göre Türkiye, 2015 yılında 26,38 ton cıvayı atmosfere salmıştır ve bunun neredeyse tamamı atık sektöründen kaynaklanmıştır (AÇA, 2024). Bu raporlamaya göre Türkiye'nin cıva emisyonları yıllara göre artmaktadır ve 2021 yılında 31,51 ton cıvayı atmosfere salmıştır.

2.2. Cıvanın Formları ve Sağlık Etkileri

Dünya Sağlık Örgütü cıvayı, önemli halk sağlığı riski oluşturan on kimyasaldan biri olarak kabul etmektedir (DSÖ, 2017a). Genel olarak cıva sinir, sindirim ve bağışıklık sistemleri üzerinde, akciğerlerde, böbreklerde, ciltte ve gözlerde toksik etkilere sahiptir. Özellikle anne karnındaki ve erken yaşlardaki çocukların beyin gelişimi üzerinde geri dönüşü olmayan sorunlara yol açar. Cıva üç kimyasal formda bulunur; elemental cıva, inorganik cıva ve organik cıva. Farklı kimyasal formları farklı toksik etkiler göstermektedir. Bu bölümde her bir formunun kimyasal özellikleri, sağlık etkileri incelenecek ve güvenli maruziyet değerleri hakkında bilgi verilecektir.

2.2.1. Elemental cıva

Elemental (metalik) cıva, cıvanın henüz diğer maddelerle tepkimeye girmemiş, saf halidir. Kimyasal simgesi Hg^0 'dir. Periyodik tabloda 6. periyodunun 12. grubunda yer alır ve atom numarası 80'dir. Gümüş renkli bir geçiş metali olan elemental cıvanın donma noktası $-38,8^{\circ}C$ ve kaynama noktası $356,58^{\circ}C$ 'dir (DSÖ and UÇÖ, 2019). Elemental cıva tüm sıvılar içinde en yüksek yüzey gerilimine sahiptir, emici malzemeler tarafından zor absorbe edilir, soğutulduğunda veya ısıtıldığında düzgün bir şekilde genişler ve büzülür (Tresca et al., 2022). Elemental cıva elektriği iyi iletir, süper iletkenidir, ancak ısıyı kötü iletir. Ayrıca yüksek yoğunluğa sahiptir ve kurşun veya bakır gibi metaller üzerinde yüzer. Elemental cıva oda sıcaklığında buharlaşır, kokusuz, renksiz ancak toksik cıva buharına dönüşür (DSÖ and UÇÖ, 2019). 2008'de yapılan bir araştırma, $20^{\circ}C$ 'de elemental cıvanın saatte santimetrekare başına 50 mikrogram buharlaştığını ($50 \mu g/c \text{ m}^2/h$)

bulmuştur (Bigham et al., 2008). Elemental cıva diğer formlara dönüşene kadar atmosferde 6-12 ay kalabilir, atmosferdeki bir takım oksidasyon ve indirgeme tepkimelerinden sonra yağış yoluyla santralin çok uzaklarına çökebilir (Tchounwou et al., 2003). Kömür yakıtlı santrallerin özellikle bacalarından çıkan buhar formundaki elemental cıva en büyük çevre ve sağlık sorunlarından biridir.

Elemental cıva yağda çözünür bu nedenle yağ bakımından zengin beyin ve sinir sistemi üzerinde toksik etkileri vardır. Kan-beyin bariyerini geçebilir ancak oral yoldan maruz kalındığında %0.01 gibi zayıf bir biyoyararlanıma sahiptir (Park and Zheng, 2012). Elemental cıvanın suda çok az çözünür, bu nedenle suda uzun mesafeli taşınabilir. Oral yoldan maruz kalımı nadiren toksik etki gösterse de, bazı çalışmalar elemental cıvanın bağırsak mukozasının birincil fonksiyonlarını etkileyebileceğini ve bağırsak florasındaki bakterilerle tepkimeye girebileceğini göstermektedir (Pilar et al., 2022). El cilt ve göz ile temas halinde emilim hızı çok düşüktür ancak tahrişe ve dermatite neden olabilir (ATSDR, 2022). Elemental cıvanın çevre ve insan sağlığını asıl riske eden formu cıva buharıdır. Solunan cıva buharı akciğerler tarafından %80 oranında emilerek kan dolaşımına girer (ATSDR, 2022). Cıva buharı havadan daha ağır olduğu için alçak bölgelerde ve kötü havalandırılmış ortamlarda birikme eğilimindedir. Çocuklar yetişkinlere göre cıva buharına daha fazla maruz kalır ve akciğer yüzeyleri vücut ağırlıklarına kıyasla daha geniş olduğundan cıva buharını daha çok absorbe ederler. Buhar formunda elemental cıva kan dolaşımına girdikten sonra özellikle böbreklerde birikir, kan beyin bariyerini aşarak beyinde ve sinir sisteminde tahribat yaratır (Kari, 2019). Elemental cıva buharının acil yaşam tehdidi oluşturan miktarı 10 mg/m^3 'tür (Akçan ve Dursun, 2008). Aşırı sinirlilik, unutkanlık, güçsüzlük, görme bozuklukları, el, kol, bacaklar ve başta titremeler gibi merkezi sinir sistemi sorunlarının gelişmesine neden olur (Özbolat ve Tuli, 2016).

2.2.2. İnorganik cıva

İnorganik cıva, cıvanın kükürt, klor veya oksijen gibi anorganik (karbon içermeyen) iyonlarla bağlandığı bileşiklere denir (CDC, 2009). Cıva (II) oksit (HgO), cıva cevheri ve zincifre olarak da bilinen cıva sülfür (HgS) inorganik cıva birleşiklerine örnektir. Cıva(II) klorür (HgCl_2) ve cıva(II) nitrat ($\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$) ise inorganik cıva tuzlarına örnektir. Cıva tuzları, diğer metal tuzlarına göre daha düşük erime ve kaynama noktalarına sahiptir ve inorganik cıva bileşikleri ısıtıldığında ayrışma eğilimi gösterir (IPCS, 2003). Kömür yakıtlı santrallerin bacalarından açığa çıkan inorganik cıva bileşiklerinden en bilineni cıva(II) klorürdür (Meij et al., 2002)

İnorganik cıva bileşikleri suda çözünür, yağda çözünmez; yutulduktan sonra, elemental cıvaya göre çok daha yüksek (%2 - %38) bir biyoyararlanıma sahiptir (Park and Zheng, 2012). Oral yolla alındıklarında 0,5-2 gramı öldürücüdür (Akçan ve Dursun, 2008). Oral yolla alındığında kan-beyin bariyerini aşmada sınırlı bir kapasiteye sahip olsalar da anne sütü yoluyla bebeğe ulaşabilir (ATSDR, 2022). Ayrıca salgı bezleri ve merkezi sinir sisteminde birikir, nörolojik hasara yol açarlar (Park and Zheng, 2012). İnorganik cıvanın eliminasyon yarı ömrü 49 ile 96 gün arasındadır. Yutulan inorganik cıvanın yaklaşık %85'i iki gün içinde dışkıda atılır kalan miktarı birkaç haftadan birkaç aya değişen süreler sonunda idrar yoluyla atılır (Keating, 1997).

2.2.3. Organik cıva

Organik cıva, metil (CH_3Hg), etil ($\text{C}_2\text{H}_5\text{Hg}^+$) ve fenil olarak üç bileşik halinde sınıflandırılır. Metil cıva, geçmişte fungusit ve herbisit olarak kullanılmıştır ve çevrede en çok bulunan organik cıva bileşiğidir (Gupta et al. 2005). Metil cıva elemental cıvanın dönüşüme uğraması ve organik cıvanın metillenmesi sonucunda ortaya çıkar (Özbolat ve Tuli, 2016). Metil cıvaya solunum ya da oral yoldan maruz kalındığında ise vücutta %95 oranında emilir (Genchi et al., 2012; Park and Zheng, 2012). Organik cıvanın öldürücü miktarı 10–60 mg/kg'dır (Akçan ve Dursun, 2008). Bu emilen metil cıvanın %1 ila %10'u kan dolaşım sistemine girer, yağ dokuda çözünür ve burada birikerek toksik etkiye sebep olur (ATSDR, 2022). Metil cıva beyin ve plasenta bariyerlerini geçerek bebeği ve anne sütünü etkiler. Metil cıvanın eliminasyon yarı ömrü 45 ile 90 gün arasındadır; yaklaşık %90'ı inorganik cıva formunda dışkıda atılır (Keating, 1997). Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı (IARC) metil cıvayı insanlar için olası kanserojen (Grup 2B) olarak tanımlanmıştır (Erkekoğlu and Kadioğlu, 2013). Bir diğer organik cıva bileşiği olan dimetil cıvanın ise LD50 (ölümcül doz 50) değeri çok düşüktür, dermal maruziyette birkaç mikrogramı ölümcül olabilir (Gochfield, 2003).

2.2.4. Cıva maruziyet limitleri

İnsanlarda cıvaya maruziyet idrar, kan ve saç (özellikle metil cıvanın belirlenmesi için) analiziyle belirlenebilir (UNEP, 2019b). Kandaki cıva miktarı ortalama 0,002 mg/litredir (Nordberg et al., 1992). 1 mg/m³ cıva buharına günde 8 saat maruz kalmanın, kandaki cıva miktarını 0,48 mg/litre arttıracak tahmin edilmektedir (DSÖ, 2003). Bu nedenle cıvaya maruziyet limitlerini belirlemek son derece önemlidir. Öte yandan, cıvanın her formunun farklı toksisite düzeyleri ve sağlık etkileri vardır ve bu, farklı nüfus gruplarını farklı şekillerde etkiler. Bu

zorluklara rağmen, Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), Avrupa Komisyonu ve ABD Çevre Örgütü başta olmak üzere düzenleyici kurumlar kılavuzlar ve standartlar belirlemek için bilimsel araştırmalar ve risk değerlendirmeleri yapmaktadır. Bu kılavuzlar Çizelge 2.2.4-1’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2.4-1 Cıva maruziyeti için kılavuz değerler (AB, 2000; AÇA, 2018b; AÇA, 2020; Codex Alimentarius Commission, 2018; Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2013; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2010; ÇŞİDB, 2004; DSÖ, 2003; DSÖ, 2017b; (DSÖ, 2021; European Commission, 2011; EPA, 2002a; EPA, 2002b; EPA, 2020; NIOSH, 2019; OSHA, 2006; Sağlık Bakanlığı, 2005; Türk Gıda Kodeksi, 2018; Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu, 2023).

	DSÖ Kılavuzları	AÇA Kılavuzları	EPA Kılavuzları	AB Kılavuzları	Türkiye Kılavuzları	Diğer (FAO/Codex / OSHA/NIOSH Kılavuzları)
Hava	1 µg/m ³ (cıva buharı, yıllık) 0.2 µg/m ³ (cıva buharı, uzun süreli maruziyette günlük)	AB direktiflerin e referans	0,3 µg/m ³ (cıva buharı için RfC)	Ağır metaller için genel kılavuzlara referans	-	-
Su (içme suyu / akarsular)	6 µg/L (tolere edilebilir, günlük düzey inorganik cıva) 1 µg/L (tolere edilebilir, haftalık ortalama düzey inorganik cıva)	AB Su Çerçeve Direktifi’ne referans	2 µg/L (içme suyunda inorganik cıva)	0,07 µg/L (yüzey sularında)	1 µg/L (içme suyunda) 0,3µg/L (deşarjdan etkilenen iç yüzey suları, bir yıl ortalaması) 1 µg/L (deşarjdan etkilenen yüzey suları, bir yıl ortalaması)	-
Tarım Toprakları	Ulusal/bölgesel kılavuzlara referans	Kirlenme seviyeleri hakkında bilgiler verilmiştir	0,1 mg/kg (metil cıva için)	Üye ülkelerin kendi yönetmelikleri	1 mg/kg (pH 5-6 topraklar için) 1,5 mg/kg (pH >6 topraklar için)	-

Toprak (Diğer)	Ulusal/bölgesel kılavuzlara referans	Kirlenme seviyeleri hakkında bilgiler verilmiştir	23 mg/kg (konut), 310 mg/kg (endüstriyel)	Üye ülkelerin kendi yönetmelikleri	3 mg/kg (Uçucu maddelerin dış ortamda solunması) 23 mg/kg (Toprağın yutulması ve deri teması yoluyla emilim)	-
Gıda	Codex'e referans	-	Balıklarda metil cıva için 1 mg/kg	Deniz ürünleri için 0,5 mg/kg	Gıda için 0,5 mg/kg Balık için 0,3 mg/kg	Balıktaki metil cıva için 0,5 mg/kg (Codex)
Tüketici Ürünleri	Ulusal düzenlemelere referans	-	Kozmetik ve diş amalgamları için özel limitler	Piller, kozmetikler ve diğer tüketici ürünleri için özel limitler	Kozmetik ve pillerde için özel limitler	Spesifik ürün kategorileri için özel limitler
Çalışma Alanları	Mesleki kılavuzlara referans	-	-	-	0,02 mg/m ³ (ZOA, cıva oksit ve cıva klorür dahil cıva ve iki değerlikli inorganik cıva bileşikleri)	OSHA: 0,1 mg/m ³ (ZAO), NIOSH: 0,05 mg/m ³ (ÖMS), EU-OSHA: 0,02 mg/m ³ (cıva buharı)
ZOA: Zaman ağırlık ortalamayı ifade eder. Bu, 8 saatlik bir çalışma günü boyunca havadaki cıva buharı konsantrasyonunun ortalama olarak 0.1 mg/m ³ 'ü aşmaması gerektiği anlamına gelir.						
ÖMS: Önerilen maruziyet sınırı anlamına gelir. Bu, 10 saatlik bir çalışma günü boyunca cıva buharı konsantrasyonunun 0.05 mg/m ³ 'ü aşmaması gerektiği anlamına gelir.						

DSÖ ve EPA gibi kurumlar Çizelge 2.2.4-1'de görülen maruziyet sınır değerlerini belirlerken, laboratuvar ve sahada yapılan çalışmaları değerlendirir. Örneğin DSÖ havadaki sınır değeri belirlerken, solunum yoluyla tolere edilebilecek değerleri belirlerken, insanlarda tolere edilebilir limitin “günde vücut ağırlığı başına 2 µg/kg olduğu bilgisinden yola çıkarak hesaplamıştır (IPCS, 2003). Tolerasyon limitlerine ilişkin bu bilimsel çalışmalar sayesinde bugün etki – maruziyet kayıpları yapılabilmektedir. Kanda 5,8 µg/L seviyesinin üzerindeki metil cıva, IQ kaybı ile ilişkilendirilmektedir (Trasande et al, 2005). Çocuğun erken yaşta cıva maruziyeti, hayat boyunca devam etmekte, bilişsel kapasiteye zarar vermekte, kalıcı bir sağlık sorunu olarak iş gücünü, yaratım becerisini dolayısıyla ekonomiyi etkilemektedir.

Cıvaya ilişkin sınır değerler Türkiye'deki pek çok yönetmelikte iyi düzenlenmiştir. Örneğin Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde kimya sanayi ve madencilikten kaynaklı deşarj sularına ilişkin cıva sınır değerleri de verilmiştir (ÇŞİDB, 2004). Çizelge 2.2.4-1'de yer verilemeyen, ülkeler özelinde de kılavuz değerler ve tavsiyeler de bulunmaktadır. Örneğin İngiltere Çevre Ajansı'nın (2009) kılavuzuna göre konut alanındaki toprakta elemental cıva 1 mg/kg'ı geçmemelidir (IPEN, 2016). İrlanda Gıda Bakanlığı, hamile ve emziren kadınlara haftada iki kutudan fazla konserve ton balığı tüketmemesi konusunda tavsiyede bulunmaktadır (AÇA, 2018a). Ayrıca tabloda görüldüğü gibi bazı kuruluşlarda henüz cıva limitlerinin belirleyememiş ya da diğer kuruluşlarla fikir birliğine varamamıştır. Bu durum, cıva konusunun ne kadar karmaşık ve çok boyutlu olduğunu göstermektedir.

2.3. Tarihte Cıva Kullanımı ve Cıva Felaketleri

Cıvanın en bilinen kullanım alanları barometreler, tansiyon aletleri, amalgam dolgular, floresan lambalar, piller ve bilgisayarlar olarak sıralanabilir (Gupta et al. 2005; Goldwater, 1972). Ancak cıva kullanımının 5000 yıllık bir tarihi vardır ve cıvanın atmosfere salınan cıvanın en büyük cıva kaynağı olması bunu destekler niteliktedir (Bkz. Şekil 2.3-1). Cıva kullanımının tarihçesi ve ilk sağlık kayıtları cıva konusunda bilginin ne kadar taze olduğuna ışık tutar.

Bilinen ilk cıva kullanımı, M.Ö. 3000'de Antik Mısır'da, cıvanın kozmetik ürünlerde ve ritüellerde kullanılmasıyla gerçekleşmiştir (Nriagu, 1983). Cıvanın periyodik tablodaki sembolü Hg Latince'de sıvı gümüş anlamında gelen "Hydrargyrum" sözcüğünden türemiştir (Holbach, 2011). Cıva kelimesinin İngilizce karşılığı "mercury" ve "quicksilver" (hızlı gümüş) kelimeleridir. "Mercury" hem güneşe en yakın Merkür gezegenine, hem de Roma mitolojisinde mesaj göndermek, hız ve ticaretle özdeşmiş tanrının adıdır. Yunan mitolojisinde Merkür tanrısı, iyileştirici tanrı olarak bilinir (Parsons and Percival, 2005). Bu mitlerden etkilenen Yunan, Roman, Çin, Arap ve Hint uygarlıkları cıvayı cilt hastalıklarının, frenginin tedavisinde ve antiseptik olarak kullanmışlardır (Goldwater, 1972). Kırmızı rengiyle gösterişli bir cıva kaynağı olan zincifreyi (Şekil 2.3-2) Çinliler kırmızı mürekkep (Çin kırmızısı, vermilyon rengi) yapımında; Mısır ve Roma uygarlıkları villaların dekorasyonunda ve kozmetik ürünlerde kullanmışlardır (Bennett, 1948; Putman, 1972). Simyacılar metalleri altına dönüştürmeyi ve ölümsüzlüğü vadeden felsefe taşını cıva kullanarak aramışlardır

(Ragai, 1192). Bu arayış temel amalgamasyon prensiplerinin bulunmasını sağlamıştır.



Şekil 2.3-3 İtalya, Toskana'dan zincifre. Paris'teki Fransız Ulusal Doğa Tarihi Müzesi Mineraloji ve Jeoloji Galerisi. C: Marie-Lan Taý Pamart, (Arkeofili, 17 Kasım 2021).

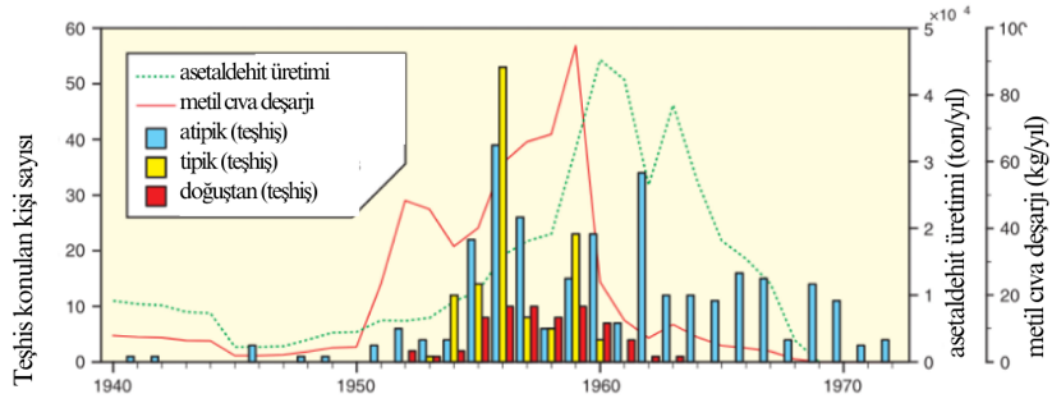
Zincifreden cıva eldesi ve cıvayla amalgam oluşturarak altın ve gümüş madenciliği tekniklerine ilişkin bilinen en eski belge, MÖ 1. yüzyılda Romalılara aittir (Farrar and Williams 1977). Şekil 2.3-2'de verilen bu tekniğe göre ezilmiş zincifre cevheri küp şeklindeki toprak kaplara yerleştirilir (F). Ardından bu küpler yosunla kapatılır ve yer altına gömülmüş düz tabanlı kapların (G) üzerine ters şekilde yerleştirilir. Kapların üstüne odun konularak açık ateşte ısıtılır, bu da buharlaşan cıvanın üst kaplarda yoğunlaşmasını, ardından alt kaplara akarak burada birikmesini sağlar (Parsons and Percival, 2005). Bu tekniklerin yaygınlaşması, sanayi öncesi dönemlerde atmosferdeki cıva birikimini başlamıştır (Goldwater, 1972). Cıvanın sağlık etkilerine ilişkin ilk kayıtlar yine antik Romalı döneminde karşımıza çıkmaktadır. Romalılar cıva buharının açığa çıktığı zincifre işlenmesi ve amalgamasyon işlerinde mahkum ve köleleri kullanılmıştır. Hill (1946) ve D'Itri'nin (1977) araştırmalarında, bu madenlerde çalışanların ortalama yaşam süresinin 3 yıl olduğu kayıtlara geçmiştir (Parsons and Percival, 2005).



Şekil 2.3-2 Açık ocakta zincifre cevherinden cıva çıkarımı tasviri (Parsons and Percival, 2005).

Cıvanın zehirli olduğu, Antik Roma'dan beri bilinse de cıva zehirlenmesine ilişkin modern tıp kayıtları ilk defa 16. yüzyılda tutulmuştur, Avrupa ve Amerika'da cıva madenciliğine bağlı zehirlenmeler rapor edilmiştir (Parsons and Percival, 2005). Elemental cıva buharının toksisitesine ilişkin ilk teşhis ise 19. yüzyılda kayıt altına alınmıştır. 19. yüzyıl şapka modasına Fransızların yön verdiği dönemde, oral yoldan cıva alımıyla frengi tedavisi gören bir şapkacı, yüksek ısıнын kullanıldığı kürk keçeleştirme prosesinde idrarını kullanmış ve başarılı olmuştur (Goldwater, 1972). Bu buluşla beraber, şapka endüstrisi cıva nitrati "havuçlama" diye tabir edilen işlemde kullanmaya başlamıştır. Böylece önce Fransa sonra da tüm Avrupa ve Amerika "Deli Şapkacı Sendromu" bugün bilinen adıyla "eretizm" ile tanışmıştır. Tıp doktoru Freeman, 1860'ta New Jersey Tıp Derneği Dergisi'ndeki yazısında eretizm semptomundan ve kapalı alanlarda kronik cıva maruziyetinin sinirlilik, utangaçlık, titreme ve halüsinasyon gibi belirtilere neden olduğundan bahsetmiştir (Wedeen, R.P. (1989). Bu yazıdan 60 yıl sonra, 1920'lerde Harvard Üniversitesi'nden Alice Hamilton ABD'deki şapka fabrikası işçileri üzerindeki bir çalışmada her 100 şapkacıdan 43'ünün "eretizm semptomları" gösterdiğini, cıva buharına bir seneden kısa süre maruz kalan genç işçilerde bile el titremesi görüldüğünü raporlamıştır (Hayhurst ER, Dysart NC., 1925). Tıp dünyasının bu uğraşları sonucu, cıva kullanımı bir sektörde ilk defa yasaklanmış oldu. 1941 yılında ABD'de şapka yapımında cıva kullanımı bazı eyaletlerde yasaklandı (Lerman, 2014).

Japonya Minamata Körfezi'nde 1950'lerde meydana gelen zehirlenme salgını, metil cıvanın biyomagnifikasyona uğradığını dünya çapında kanıtlayan ilk örnek olmuştur. 1908 yılında Japonya Minamata'da kurulan Chisso kimya fabrikası, plastik üretiminde kullanılan asetaldehit üretimini cıva kullanarak yapmaktaydı. (Aoyama, 2016). Kayıtlara göre 1932 yılında fabrika inorganik ve organik cıva içeren atık suyunu deşarj etmeye başladı. Fabrikanın 2. Dünya Savaşı ve 1945 yılında Minamata'ya yakın konumdaki Nagasaki'ye atılan atom bombası felaketinden sonra istihdam sağlaması, Minamata'yı balıkçı kasabasından kalabalık bir işçi şehri haline getirdi (Aoyama, 2016). 1954'te Minamata'daki kedilerde gözlemlenen hiperaktivite ve kas titremesi semptomları felaketin erken uyarılarıydı. Mayıs 1956'da Minamata'daki insan nüfusunda zihinsel gerilik, nöbetler ve motor gelişiminde bozukluklar gibi semptomlara kayıtlara geçti (Barrett, 2010). İnorganik cıvanın, metil yani organik cıvaya dönüşebileceği raporlandı (Yokoyama, 2018). Şekil 2.3-3'te Nishimura ve Okamoto'nun (2001) kayıtlarındaki asetaldehit üretimi, metil cıva deşarjı ve hastalık teşhisleri grafiği yıllara göre verilmiştir (Yokoyama, 2018). Daha sonra, 1970'lerde hastalık üç farklı teşhişle tanımlandı. Atipik tanıda aynı anda birden fazla nörolojik sorun gözlemlenirken, tipik tanıda hastalıkla özdeşleşen semptomlardan sadece bir tanesi gözlemlenmekteydi.



Şekil 2.3-3 Minamata Körfezi'ndeki ve Chisso firmasının asetaldehit üretimi, metil cıva deşarjı ve emisyonları (Yokoyama, 2018).

Biyobirikim, organizmaların toksik maddeleri vücutlarında biriktirmesi; biyomagnifikasyon, bir besin zinciri boyunca toksik maddelerin vücuttaki konsantrasyonunun artması olarak tanımlanmaktadır. Biyobirikim bireysel organizmaları etkilerken, biyomagnifikasyon besin zincirindeki bütün organizmaları etkilemekte ve en üst trofik seviyedeki türlerde en yüksek toksik madde miktarı görülmektedir (Al-Sulaiti et al., 2022). Metil cıvanın biyomagnifikasyona uğradığını kanıtlayan ilk bilimsel çalışmalar, 1960'larda Minamata Körfezi'ndeki

araştırmalar olmuştur (Yokoyama, 2018). Chisso şirketi, sağlık bulgularına rağmen 1968'e kadar faaliyetlerine devam etmiştir. Şirket 1961'de Minamata Körfezi'nde cıva temizleme çalışmalarına başlasa da, güncel çalışmalar körfezdeki sedimentlerin hala %2 ile %4 arasında cıva emisyonu içerdiğini göstermektedir (Harada et al., 2014).

Metil cıvanın insektisit, herbisit, fungusit ve bakterisit olarak kullanımı tarihte cıva ile gıda zehirlenmelerine yol açmıştır (Goldwater, 1972). 1950-1960 arasında Kuzey Irak'ta metil cıva içeren fungusitlerle işlenmiş tahıl tohumları, yanlışlıkla ekmek yapımında kullanılmış ve yüzlerce ölümle sonuçlanmıştır (Bakir et al. 1973, Gupta et al. 2005). Bir organik cıva birleşimi olan dimetil cıvanın sağlık etkilerine ilişkin en bilinen vaka ise 1998'de kayıtlara geçmiştir. Lateks eldiveninin üstüne birkaç damla dimetil cıva dökülen bilim insanı Karen Wetterhahn, kazadan altı ay içinde konuşmakta zorlanmaya başlamış ve kazadan 298 gün sonra 1998'de hayatını kaybetmiştir (Nierenberg et al., 1998).

2.4. Minamata Sözleşmesi

Cıvanın sağlık etkileri kanıtlandıktan sonra, cıva da dahil ağır metal salımını ve sınır ötesi kirliliği azaltmayı amaçlayan Aarhus Protokolü 2001 yılında yürürlüğe girmiştir. İnsan kaynaklı cıva emisyonlarını azaltmayı hedefleyen Minamata Sözleşmesi, 2013'te tanıtılmış ve 2017'de yürürlüğe girmiştir (UNEP, 2023). Sözleşmeye şimdiye kadar 148 parti taraf olmuş ve tarafların %98'inin raporlama yapıldığı bildirilmiştir. Sözleşme 2017'de yürürlüğe girdiğinden beri taraflar her sene taraflar konferansında toplanarak cıva emisyonu neden olan sektörler hakkında bir dizi kararlar alır. Örneğin 2018'deki ilk toplantıda asetaldehit üretiminde cıva kullanımının sona ermesi, 2023'teki toplantıda Nisan 2025'ten itibaren cıva içeren pillerin kullanımdan kaldırılması kararlaştırılmıştır. (UNEP, 2023).

Minamata Sözleşmesi'nin altında cıvaya ilişkin sınır değerler doğrudan verilmemiştir. Ancak Minamata Sözleşmesi'nin En İyi Mevcut Teknikler (Best Available Techniques- BAT) ve En İyi Çevresel Uygulamalar (Best Environmental Practices - BEP) eklerinde, cıva azaltım için uygulanabilecek yöntemler sıralanmıştır. Sözleşmeye taraf ülkelerin bu kılavuzları uygulaması beklenmektedir (UNEP, 2019b).

Türkiye Eylül 2014 tarihinde Minamata Sözleşmesi'ni imzalamış ve Ağustos 2022 tarihinde sözleşmeye taraf olmuştur. Minamata Sözleşmesi kapsamında

tarafların yaptığı son raporlama Aralık 2023 tarihinde olup Türkiye henüz raporlama yapmamıştır. Minamata Sözleşmesi'nin ulusal düzeyde uygulanmasına yönelik olarak Cıva Hakkında Taslak Yönetmelik henüz ilgili bakanlık tarafından duyurulmamıştır (Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2022) . Ancak Sözleşme gereği taraf olunan süreden 4 yıl içerisinde bir uygulama planı sunulmalıdır.

2.5. Kömür Yakıtlı Santrallerde Cıva

Kömür yakıtlı santraller, atmosferdeki antropojenik cıva emisyonlarının en büyük ikinci kaynağıdır. 2015 yılında küresel ölçekte kömür yakıtlı santraller 292 ton cıvayı atmosfere salmıştır (ANAP and UNEP, 2019). Bu atmosferdeki emisyonların yaklaşık %13'üne karşılık gelir. Türkiye'deki kömür yakıtlı termik santraller ise 6,5 ton cıvaya neden olmuştur (Bkz. Çizelge 2.5-1) ve bu toplam ulusal cıva emisyonlarının yaklaşık %32'sini denk gelmektedir.

Çizelge 2.5-1 2015 yılında Türkiye'deki kömür santrallerinden kaynaklı cıva emisyonları (ANAP and UNEP, 2019).

Sektör	Alt sektör	Emisyon (yaklaşık kg)	Emisyon aralığı (kg)	Sektörel emisyon / toplam emisyon
Sabit kömür yakma (enerji santralleri)	Taş kömürü (bitümlü)	4.853,74	2.997,18 - 15.289,27	%23,86
Sabit kömür yakma (enerji santralleri)	Taş kömürü (bitümlü)	1.597,12	910,36 - 3.633,44	%7,85
Sabit kömür yakma (enerji santralleri)	Kahverengi (alt bitümlü)	57,56	32,81 - 130,96	%0,28

1990-2020 yılları arasında Türkiye'de kömüre dayalı elektrik üretimi yaklaşık 5 katına çıkmıştır (EBC et al., 2021). Özellikle yerli linyit kömürümüzün düşük kalori ve yüksek kül içeriği göz önünde bulundurulduğunda bu da daha fazla cıva kirliliği anlamına gelmektedir. TÜİK katı yakıt istatistiklerine göre (2022), 2022 yılında 7 milyon 800 bin ton linyit kömürü çıkartılmış, bunun 6 milyon 500 bin tonu elektrik santrallerinde kullanılmıştır. Elektrik santrallerinde ayrıca yaklaşık 2 milyon taş kömürü kullanılmıştır.

Kömür yakıtlı elektrik santrallerinde cıva emisyonları, santralin döngüsünde çeşitli aşamalarda ortaya çıkar ve açığa çıkacak cıva miktarını birden çok unsur belirler. Bunlar aşağıda özetlenmiştir.

2.5.1. Santrallerde cıva kaynakları

Santrallerde açığa çıkacak cıva emisyonlarını etkilen faktörlerden birincisi kullanılan kömürün kalorifik değeri, nem, karbon ve cıva içeriğidir (UNEP, 2019b). Yüksek elektrik gücü çıktısı için, yüksek kalorifik değere ihtiyaç vardır. Çizelge 2.5.1-1’de görüldüğü gibi linyit kömürü gibi en düşük kalorifik değere sahip kömür türüdür. Linyit kömürünün kullanıldığı durumlarda, yüksek enerji eldesi için daha çok kömür kullanılmak zorundadır, bu da daha kömürün içeriğine bağlı olarak çok cıva ve hava kirletici emisyonu çıktısı yaratır. Muğla’daki üç santralin tamamı yakıt olarak linyit kömürü kullanmaktadır. Ayrıca genel olarak kömürün cıva ve sülfür içeriği arasında doğrusal bir orantı bulunmaktadır (Yudovich and Ketris, 2005). Muğla’da bulunan kömür yakıtlı üç termik santralin üçü de linyit kullanmaktadır ve linyit kömürü genel olarak sülfür bakımından zengindir (EEB, 2021).

Çizelge 2.5.1-1 Kömür türleri, kalorifik değeri ve başlıca özellikleri (UNEP, 2019b).

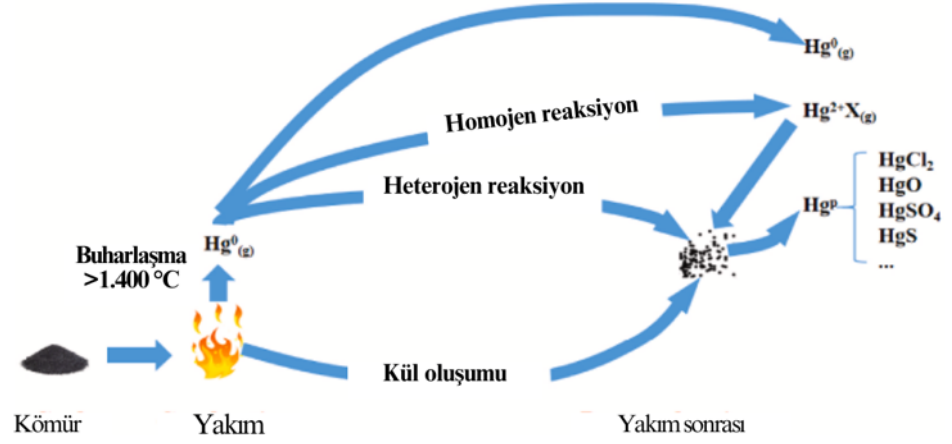
Kömür Türü	Sabit Karbon (%)	Brüt Kalori (MJ/kg)	Nem İçeriği	Notlar
Linyit (alt bitümlü)	%25- %35	< 9,26	Yüksek	Depolanma esnasında kaza ile yanmaya hassastır. Küresel ölçekte elektrik üretiminde kullanılır
Kahverengi (alt bitümlü)	%35- %45	19,26 – 26,80	Orta	Küresel ölçekte elektrik üretiminde kullanılır
Taş kömürü (bitümlü)	%45- %86	26,80 - 32,66	Düşük	Küresel ölçekte elektrik üretiminde kullanılır
Antrasit Kömürü	%86- %97	> 32,66	Çok düşük	Küresel ölçekte elektrik üretiminde ve ısınmada kullanılır

Kömür yakıtlı termik santrallerden açığa çıkan cıva emisyonlarının miktarı ayrıca santralin yakma teknolojisine, santralin arıtma ekipmanlarına ve bunların verimliliğine, aktif karbon enjeksiyonu gibi cıva emisyonu azaltım sistemlerinin olup olmadığına bağlı olarak değişkenlik gösterir (UNEP, 2019b).

2.5.2. Cıvanın açığa çıktığı prosesler

Kömür yakıtlı santral proseslerinde, cıvanın yaklaşık %90’ı yüksek uçuculuğu sebebiyle santral bacalarından açığa çıkar (EPA, 2011a). Cıvanın %2’sinden daha az miktarı ise taban külünde kalmaktadır (Meij, 1991). Bacadan çıkan cıva üç farklı kimyasal formda sınıflandırılır (EPA, 2011a). Bunlar elementel cıva (Hg^0), reaktif cıva (diğer bir deyişle oksitlenmiş cıva buharı) (Hg^{2+}), ve partiküler cıvadır (Hg_p) (Şekil 2.5.2-1). Herhangi bir baca gazı ve ek cıva arıtma sistemine sahip olmayan santralde ortalama olarak, elemental cıvanın %53’ü, reaktif cıvanın %42’si ve partiküler cıvanın %5’i bacadan çıkar (Cohen et al.,

2007). Günümüz teknolojisiyle bu oranlar muhtemelen iyileşmiş olsa da partiküler cıva diğer cıva türlerine göre yakma ve filtre sistemlerinde daha yüksek oranda arıtılır.



Şekil 2.5.2-1 Santral bacalarından çıkan cıvanın kimyasal formları (Li et al., 2022).

- Elemental cıva (Hg^0), buhar formunda bulunduğu için azaltım ve kontrolü son derece zordur (Prestbo and Bloom, 1995). Buhar formundaki elemental cıva maruziyetinin %97,4'ü santrallerin etrafında kirli havanın solunması yoluyla gerçekleşir (Hursh et al., 1989). Geri kalan %2,6'sı ise dermal yolla cıva maruziyetidir.
- Reaktif cıva (oksitlenmiş cıva buharı), termik santrallerde özellikle ıslak prosesler içeren arıtma sistemlerinde veya kömürün içeriğindeki suyun buharında, Hg^0 'ın çözünmesiyle açığa çıkar (Li et al., 2022). Diğer bir dönüşüm ise yanmamış karbon ya da uçucu külün, toz tutma sistemlerinde Hg^0 'ı Hg^{2+} 'a kataliz etmesiyle gerçekleşir. Reaktif cıva (oksitlenmiş cıva), elemental cıvaya göre daha az uçucudur, suda çözünebilir olduğu için arıtma sistemlerinde daha iyi tutulur. Reaktif cıvanın (Hg^{2+}), yaklaşık yarısı, santralin 480 km (300 mil) çapındaki alanda birikir. Bu teorik olarak bacadan çıkan cıva emisyonlarının yaklaşık %20'sinin santralin 480 km yakınında karada ve suda biriktirildiği ve en büyük birikim yüzdesinin tesise yakın bölgeler olduğu anlamına gelir (Cohen et al., 2007). Geri kalanını ise santralin 2.400 km (1.500 mil) çapındaki alana çökelir. Reaktif cıvaya maruziyet daha çok santralin etrafındaki kirlenmiş toprak veya suların tüketilmesi yoluyla gerçekleşir (ATSDR, 2022).

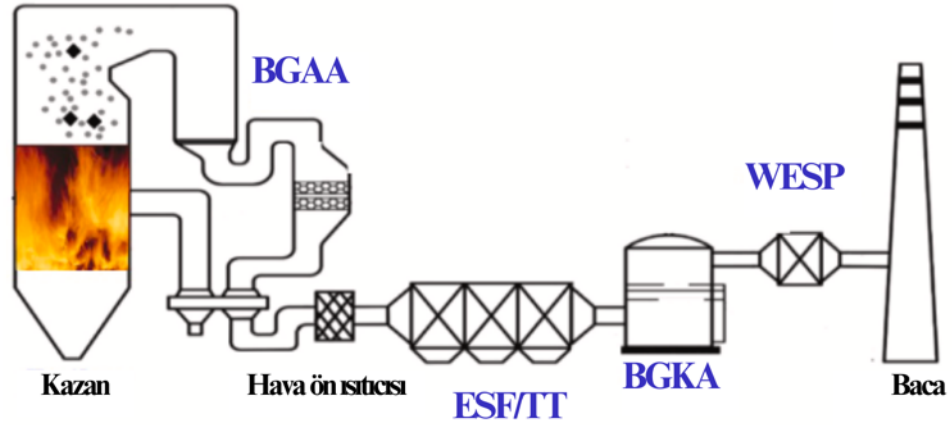
- Partiküler cıva (Hg_p), baca gazında bulunan karbon partiküllerinde adsorbe olan, partiküllere bağlı cıvadır. Partiküler cıvanın büyük bölümü toz filtreler ve elektrostatik filtreler gibi hava kirliliği kontrol ekipmanları tarafından uzaklaştırılır (Pacyna and Münch, 1991). Bu nedenle santral bacalarında az miktarda (%5) partiküler cıva açığa çıkar (Cohen et al., 2007).

2.6. Santrallerde Cıva Azaltım Teknolojileri

Kömür yakıtlı santrallerde cıva giderimi için farklı yöntemler bulunmaktadır. Santrallerde bu teknolojilerin uygulanmasının yanı sıra, sistemin bakımı ve verimliliği de önemlidir. Aşağıda bu teknolojilerin bir özeti sunulmuştur.

Kömür yıkanması, seçimi veya karıştırılması gibi kömürün yanma veriminin artırılması ve kirleticilerden arındırılmasını sağlayan önlemlere yakma öncesi önlemler denir. Bu adımda yıkama, flotasyon, santrifüjleme, elektrostatik temizleme, manyetik temizleme gibi yaş ve kuru fiziksel yöntemlerin yanı sıra kimyasal yöntemler de kullanılabilir (Aytaç, 2018a). Kömür yıkanması yöntemi, kömürün cıva içeriğini %30'a varan oranında azaltabilir ((Tang et al., 2007; Streets et al., 2005; Ancora et al., 2016) Bu yöntemler çok düşük maliyetli olup, çoğu linyit ve kahverengi kömür yıkanmaya uygun değildir.

Kömür yakıtlı santrallerin kullandığı yakma (kazan) ve baca gazı arıtma sistemleri cıva emisyonlarının azaltımında büyük rol oynamaktadır (UNEP, 2019b). Bu sistemler Şekil 2.6-1'de verilmiştir. Detayları ve baca gazındaki cıva emisyonlarını azaltım oranları aşağıda özetlenmiştir.



BGAA: Baca gazı azot antma sistemi (DeNO_x). Örneğin, seçici katalitik indirgeme (SCR)

ESF: Elektrostatik filtre, toz antma sistemi

TT: Torba filtre, toz antma sistemi

WESP: Islak elektrostatik çöktürücü, toz antma sistemi

BGKA: Baca gazı kükürt antma sistemi (DeSO_x). Örneğin ıslak kükürt antma (WFGD)

Şekil 2.6-2 Santral hava kirletici ve cıva azaltım sistemleri (Li et al., 2022).

- Santrallerdeki yakma / kazan sistemleri, cıva emisyonlarının azaltabilir. Örneğin özellikle linyit kömürü yakıtlı santrallerde tercih edilen, akışkan yataklı kazan teknolojisi, kömürdeki cıvayı partiküler cıvaya dönüştürür. Partiküler cıvanın ise toz giderme sistemlerinde (torba filtre, elektrostatik filtre gibi) büyük oranda tutulması beklenir (UNEP, 2019b) Pulverize kömür kazan sisteminde ise ince bir toz halinde getirilen kömür, cıvayı daha iyi absorbe eder. Böylece cıvanın partikül cıvaya dönüştürmesini sağlanır ve partikül cıva da toz filtrelerinde tutulur (Wang et al., 2000; Zhao et al., 2006).
- Toz giderme sistemleri, elektrostatik filtreler (ESF) veya torba filtreler (TF) olabilir. ESF partiküler cıvayı (Hg_p) tutmada son derece etkilidir, tasarım değerlerine göre %98 - %99 oranında Hg_p tutması beklenir. Ancak bacadaki Hg^0 ve Hg^{2+} emisyonlarının azaltımında efektif değildir. ESF'nin tek başına kullanıldığı kömür yakıtlı santrallerde, baca gazı cıva emisyonlarının %11,5 - %59,7 aralığında azaltılabildiği görülmüştür (Li et al., 2022). Pulverize kömür yakma sistemi ve ESF'nin kombine edildiği sistemlerde ise, cıva emisyonu azaltım oranı %74'e kadar çıkabilir (UNEP, 2011).

- Baca gazı kükürt arıtma sistemleri BGKA veya DeSO_x olarak adlandırılır. BGKA sistemleri, ıslak kireçtaşı prosesleri (WFGD), deniz suyunun kullanıldığı yaş prosesler veya aktif karbonun kullanıldığı kuru prosesler olabilir. Santral bacalarından çıkan reaktif cıva, suda kolayca çözünemediğinden, WFGD gibi yaş prosesler cıva arıtımında daha etkindir. ESF ve WFGD'nin kombine kullanıldığı linyit santrallerinde, baca gazındaki cıva emisyonlarının %57'ye varan oranında azaltılabildiği görülmüştür (Li et al., 2022.) Pulverize kömür, ESF ve WFGD'nin kombine kullanıldığı santrallerde ise cıva azaltım oranı, kömürün türüne bağlı olarak %74'e varan oranda azaltılabilir (UNEP, 2011).
- Baca gazı azot arıtma sistemleri BGAA veya DeNO_x olarak adlandırılır. BGAA sistemlerinde, seçici katalitik indirgeme (SCR), veya katalitik olmayan seçici indirgeme (SNCR) seçilebilir. SCR sayesinde baca gazında açığa çıkacak elemental cıva, reaktif cıvaya dönüşür. SCR, ESF ve WFGD'nin kombine kullanıldığı sistemlerde, baca gazındaki cıva emisyonları %66'a kadar azaltılabildiği görülmüştür (Zhao et al., 2017). Ülkemizdeki santraller genel olarak toz giderme ve BGKA sistemlerine sahiptir. Ancak pek çok santral BGAA sistemlerini, yönetmelikteki baca gazı sınır değerlerini karşıladıkları için, devreye almamıştır.

Bunlara ek olarak aktif karbon enjeksiyonu teknolojisi veya krom ve brom ilavesi gibi cıva azaltım yöntemleri uygulanabilir (Wang et al., 2000). Aktif karbon teknolojisi özellikle ABD'de yaygınlaşmış ve baca gazındaki cıva emisyonlarında %85 - %90 oranında azaltım gözlemlenmiştir (UNEP, 2019b). Krom ve brom ilavesi ise baca gazından çıkacak elemental cıvayı, reaktif cıvaya dönüştürür, reaktif cıvanın da baca gazı arıtma sistemlerinde tutulması beklenir (Wang et al., 2009).

Görüldüğü üzere, santrallerin baca gazı arıtma sistemlerinin cıva emisyonlarını azaltma konusunda çok farklı ve çok geniş aralıkta verimliliği bulunmaktadır. Bu nedenle santrallerin kullandığı kömürü, yakma ve arıtma sistemlerini kombine bir şekilde değerlendirmek önemlidir. Çizelge 2.6-1'de 2011 yılında Çin'de incelenen santrallerin yakma ve baca gazı arıtma sistemleri sayesinde cıva emisyonundaki azaltımlar listelenmiştir. Bu çalışma 2011 yılında Çin'deki santrallerin incelenmesine dayanmakta olup, Muğla'daki santrallerin altyapısının cıva emisyonlarının ne oranda azaltılabileceği Bölüm 3.1.'de değerlendirilmiştir.

Çizelge 2.6-1 Santrallerin yakma ve baca gazı arıtma sistemlerine göre ortalama cıva giderim verimleri (UNEP, 2011).

Santrallerin yakma ve baca gazı arıtma sistemleri	Cıva Giderim Verimliliği
Pulverize Kömür Kazanı + Islak Scrubber	22%
Pulverize Kömür Kazanı + ESF	28%
Pulverize Kömür Kazanı + ESF	29%
Pulverize Kömür Kazanı + ESF + WFGD	40%
Pulverize Kömür Kazanı + Sprey Kurutucu Adsorber + Torba Filtre	59%
Pulverize Kömür Kazanı + ESF + WFGD	62%
Pulverize Kömür Kazanı + SCR + ESF + WFGD	66%
Pulverize Kömür Kazanı + TF	67%
Akışkan Yataklı Kazan + ESF	78%
Akışkan Yataklı Kazan + TF	86%
Pulverize Kömür Kazanı + TF + WFGD	90%
Notlar: ESF: Elektrostatik filtreler, SCR: Seçici Katalitik İndirgeme, TF: Torba filtre, WFGD: Islak kireçtaşı prosesleri	

Özetle kömür yakıtlı bir termik santrallerin cıva emisyonları bilinmiyorsa, tahmin yürütmek için ihtiyaç duyulacak veriler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Santralde ne kadar kömür kullanılacağı,
2. Kömürün cıva içeriği,
3. Santralin yakma sistemi ve yakma öncesi işlemler,
4. Toz tutma, BGKA, BGAA gibi baca gazı arıtma sistemleri, verimlilikleri ve ek cıva giderim sistemleri.

2.7. Santrallerde Cıva Sınır Değerleri, Sağlık ve Ekonomik Etkileri

Kömür yakıtlı santrallerin baca gazındaki cıva değerleri konusunda farklı ulusal yaklaşımlar bulunmaktadır. Bunların bir özeti Çizelge 2.7-1’de verilmiştir. Ülkemizde Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY)’de kömür yakıtlı termik santrallerin bacalarından salınan temel hava kirleticilere ilişkin sınır değerler verilmiştir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2009). Bu temel kirleticiler kükürt dioksit (SO₂), azot oksitler (NO_x) ve toz (PM)’dir. İlgili yönetmelikte santraller bacalarından salınan cıvaya ilişkin bir sınır değer bulunmamaktadır.

Çizelge 2.7-1 Kömür yakıtlı santrallerde temel hava kirletici ve cıva sınır değerleri a-(Aytaç, 2018b); b-(CREA, 2021); c-(Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2009).

	Mevcut Santraller				Yeni Santraller			
	Cıva ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ (mg/m^3)	NO _x (mg/m^3)	PM (mg/m^3)	Cıva ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ (mg/m^3)	NO _x (mg/m^3)	PM (mg/m^3)
AB ^a taş kömürlü santraller (2023'ten itibaren) (tüm santrallerde yakıt ısı gücü ≥ 300 MW)	4	130	150	8	2	75	85	5
AB ^a taş kömürlü santraller (2023'ten itibaren) (tüm santrallerde yakıt ısı gücü ≥ 300 MW)	7	130	175	8	4	75	85	5
ABD ^b	1,60	640	640	23	0,50	60	99	13
Türkiye ^c (2019'dan itibaren) (mevcut santrallerde yakıt ısı gücü ≥ 500 MW ve yeni santrallerde yakıt ısı gücü ≥ 100 MW)	-	400	200	50	-	200	200	30
Katı yakıtlı yakma tesislerinde mg/Nm^3 olarak baca gazında %6 hacimsel oksijen (O ₂) esas alınarak emisyon sınır değerleri.								
ABD'deki sınır değerler Hg/Tbtu biriminden çevrilmiştir.								

2017 yılında Yatağan santralının baca gazındaki PM, SO₂ ve NO_x emisyonları izokinetik yöntemlerle (Bkz. Bölüm 3.2.1) iki sene boyunca izlenmiştir (Ersoy et al., 2011). Santralin üç ünitesinden de açığa çıkan üç emisyon da izleme süresinin neredeyse üçte birinde 2019 yılında belirlenen ve Çizelge 2.7-1'de verilen sınır değerlerin üzerindedir.

AB ülkeleri ise Minamata Sözleşmesi BAT ve BEP kılavuzu eklerini uygulamaktadır. Bu ekler cıva emisyonlarına doğrudan bir sınır koymaz ancak cıvanın hangi yöntemlerle azaltılabileceğini belirler. Avrupa Komisyonu tarafından kabul edilen BAT Referans Belgeleri (LCP BREF)'de verilen bu sınır değerler, Çizelge 2.7.1-1'de verilmiştir (AB, 2017).

Santrallerden kaynaklı cıva emisyonlarının sınırlandırılması konusunda ABD daha öncü bir yaklaşım göstermektedir (Çizelge 2.7.1-1). Ayrıca konuyu sağlık açısından ele alarak, fayda – zarar yaklaşımına da değinmektedir. EPA 2005 yılında santraller için belirlediği baca gazındaki cıva limitlerini 2015 yılında azaltmıştır.

Bunu yaparken de yeni sınır değerlerin yan faydalarını araştırmıştır. EPA'nın 2011 çalışmasına göre yeni limitler sayesinde, santral kaynaklı cıva emisyonları eyalet bazında ortalama %72 azalacaktır (Cohen et al., 2007). 2011'de yine EPA tarafından yapılan başka bir çalışma deniz ürünlerindeki metil cıvanın çocuklar üzerine etkisine odaklanmıştır (EPA, 2011b). 2005 yılında ABD'deki kömür yakıtlı santrallerden kaynaklı sudaki metil cıva emisyonları ülke genelinde 240bin çocuğun bilişsel kapasitesini etkilemiş ve 25bin 500 IQ puan kaybına neden olmuştur. Çocuğun cıvaya erken yaşta maruz kaldığı ve sağlık sorunlarının beklenen yaşam süresi boyunca çocuğu etkileyeceği göz önünde tutularak, bu kayıplar ekonomiyi 23 -51 milyar dolar zarara uğratacaktır.

ABD'de her yıl, 317 bin ile 637 bin bebek, göbek kanında 5,8 µg/L değerini aşan cıva miktarıyla doğmaktadır (Trasande et al, 2005). Göbek kanındaki cıva, annenin özellikle metil cıva maruziyetine bağlıdır ve kanda 5,8 µg/L seviyesinin üzerindeki metil cıva, IQ kaybı ile ilişkilendirilmektedir. Trasande ve arkadaşlarının bu çalışmasına göre (2005), ABD'deki her yeni nesil daha hayatının bu maruziyetten dolayı, hayata 8,7 milyar dolar kayıpla (ömür boyu kazançtan, toplam yeni doğan nüfus grubu için) başlamaktadır.

Avrupa Kirleticisi Salım ve Taşıma Kaydı (E-PRTR) 2006'da AB tarafından oluşturulmuş bir tüzüktür. E-PRTR endüstriyel tesislerden kaynaklanan ve hava, su, toprak gibi alıcı ortamlara bırakılan kirleticilerin raporlanmasını ve bu veri setine halkın erişimini sağlar (ÇŞİDB, 2024). Türkiye'nin UMSHAK altında yıllık olarak kirlilik emisyonlarını raporlamaktadır. Bu emisyonlar PM₁₀, PM_{2,5}, SO_x, NO_x gibi hava kirleticilerin yanında cıva, kurşun, kadmiyum gibi ağır metalleri de içerir (CEIP, 2024). Bu raporlamaya göre Türkiye'nin cıva emisyonları yıllara göre artmaktadır ve 2021 yılında 31,51 ton cıvayı atmosfere salmıştır, ancak raporlanan bu cıva emisyonunun kaynakları arasında enerji sektörü yer almamaktadır (Bkz. Bölüm 2.1.) Türkiye E-PRTR altında, tesis bazında hava kirleticileri ve cıva da dahil olmak üzere ağır metal emisyonlarını henüz raporlamamaktadır. Bu da Muğla'daki santraller de dahil olmak üzere, enerji sektöründen kaynaklı emisyonların sağlık etkisini değerlendirmeyi zorlaştırmaktadır.

Bu zorluklara rağmen, santrallerin baca gazındaki hava kirleticileri ve cıva emisyonlarını; santrallerin kapasitesi, kullandıkları kömür içeriği ve santrallerin teknolojisini değerlendiren araştırmalar bulunmaktadır. Gacal ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan bir çalışmaya göre, Türkiye'deki kömür yakıtlı santrallerinin neden olduğu 6,5 ton/yıl cıva emisyonu;

- 8.850 IQ puanı kaybına ve buna bağı 13 milyon 767bin dolar ekonomik maliyete,
- 3.640 kayıp yaşam yılına neden olmaktadır.

Aynı çalışmaya göre, Türkiye’deki kömür yakıtlı santrallerin bacalarından çıkan PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂ emisyonları ve cıva emisyonlarının sağlık üzerindeki etkileri nedeniyle her yıl 4.818 erken ölüm gerçekleşmekte, 1,5 milyon gün işe gidilememekte ve 11 milyon gün hasta geçirilmektedir (Gacal vd., 2021). Tüm bu erken ölüm, hasta geçirilen gün ve diğer hastalık yükleri ise yılda 5,2 – 10,9 milyar Euro maliyete neden olmaktadır.

2.8. Cıva Analizinde Örneklem ve Analiz Teknikleri

Kömür yakıtlı santrallerinin neden olduğı cıva emisyonları farklı şekillerde analiz edilebilir. Doğrudan ölçüm teknikleri cıvanın verici veya alıcı ortamda, aktif veya pasif örnekleme teknikleri ve farklı analiz cihazlarıyla incelenmesini içerir. Tahmin ve mühendislik yöntemleri ise, ölçümün yapılmasına imkan olmadığı ortamlarda veya ölçümün kontrolü amaçlı kullanılmaktadır. Her iki tekniğin de detayları aşağıda verilmiştir.

2.8.1. Doğrudan ölçümlerde kullanılan örnekleme ve analiz teknikleri

Santralin bacasından veya etkilediğı alıcı ortamlardan cıva emisyonunun ölçülebildiğı durumlarda kullanılan tekniklerdir. Çizelge 2.8.1-1’de doğrudan ölçümlerde kullanılan örnekleme, numunenin hazırlanması ve analiz yöntemleri derlenmiş ayrıca uluslararası standartlar ve önemli noktalar verilmiştir.

Çizelge 2.8.1-1 Kömür yakıtlı elektrik santrallerinde cıva analizi için kullanılabilecek analiz yöntemleri (Brinkmann et al., 2018).

EN, ISO veya EPA numune hazırlanma standardı	İzleme sıklığı	Analiz cihazı	Analiz tekniği detayı	Ölçüm aralıkları ve/veya ölçüm limitleri	Önemli ek bilgiler
Cıva (atık su numunelerinde)					
EN ISO 12846:2012	Periyodik	AAS (atomik absorpsiyon spektrometrisi) + soğuk buhar yöntemi (zenginleştirmenin yapılmadığı durumda) dahil edilebilir.	Zenginleştirme olmadan ölçüm için; elemental cıva (Hg^0) ve/veya iki değerlikli cıva (Hg^{2+} organik ve inorganik cıva bileşikleri de dahil) potasyum bromat/potasyum bromür ile oksitlenir ve daha sonra kalay(II) klorür ile elemental cıvaya indirgenir. Elemental cıva daha sonra amalgamasyon için uygun bir adsorban üzerinde yoğunlaştırılır (örn. altın-platin gazlı bez) ve AAS ile ölçülmeden önce hızlı ısıtma ile desorbe edilir.	Zenginleştirme ile ideal ölçüm aralığı: 0,01 µg/l - 1 µg/l. Tespit alt sınırı: zenginleştirme ile: 0,008 µg/l ve zenginleştirme olmadan: 0,024 µg/l	
EN ISO 17852:2008	Periyodik	AFS (Atomik flüoresans spektrometrisi)	EN ISO 12846:2012 yöntemindeki gibi öncelikle cıva bileşikleri potasyum bromat/potasyum bromür ile oksitlenir ve ardından kalay(II) klorür ile elemental cıvaya indirgenir. Elemental cıva sıyrılarak UV ışık ile uyarılır ve yayılan radyasyon ölçülür.	Ölçüm aralığı: 1 ng/l - 100 µg/l. Tespit alt sınırı: 1 ng/l	

EN ISO 17294-2:2016	Periyodik	ICP-MS (İndüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi)	Numune radyo frekans plazmasına girer ve burada enerji transfer süreçleri çözülme, parçalanma, atomizasyon ve elementlerin iyonizasyonuna neden olur. Oluşan iyonlar, entegre iyon optiklerine sahip farklı basınçlı bir vakum arayüzü aracılığıyla çıkarılır, kütle spektrometresi ile kütle-yük oranlarına göre ayrılır.	Tespit alt sınırı: 0,05 µg/l	ICP-MS, en esnek ve hassas çok elementli ölçüm yöntemidir.
EN ISO 11885:2009	Periyodik	ICP-OES (İndüktif Eşleşmiş Plazma Atomik Emisyon Spektroskopisi)	ICP-MS yönteminde olduğu gibi numune radyo frekans plazmasına girer ve burada atom ve iyonların uyarılır. Oluşan karakteristik emisyon spektrumları bir ızgara spektrometresi tarafından dağıtılır ve belirli dalga boylarındaki ışık yoğunlukları bir dedektör tarafından ölçülür.	-	Cıva genellikle ICP-OES ile ölçülmez çünkü bu yöntem genellikle yeterince hassas değildir. Bu nedenle bir ölçüm aralığı verilmemiştir.
Cıva (sediment numunelerinde)					
EPA 6020B	Periyodik	ICP-MS	Toplanan sediment örneklerinin, analize kadar karanlık ve serin bir yerde saklanması önemlidir. Mikrodalga yardımıyla veya asitle cıva açığa çıkarılır, filtrasyondan geçirilir.	Tespit alt sınırı: 0,001 mg/kg	Sedimentte cıva ölçümü için en yaygın standarttır.
TS EN ISO 17294-1,2	Periyodik	ICP-MS	Toplanan sediment örneklerinin, analize kadar karanlık ve serin bir yerde saklanması önemlidir. Kurutulan örnekler, homojen bir toz elde etmek için öğütülür. Mikrodalga fırında sindirme yöntemi kullanarak, örnekler tamamen çözündürülür.	Tespit alt sınırı: 0,001 mg/kg	

Cıva (atık gaz numunelerinde)					
EN 14181:2014	Sürekli	AAS, DOAS (Diferansiyel optik absorpsiyon spektroskopisi)	Elemental cıva haricinde, atık gazdaki diğer cıva birleşikleri analiz öncesi metalik cıvaya indirgenir. Bu, ya ıslak kimyasal indirgeme (örn. kalay klorür çözeltisi ile) veya düşük (~ 250 °C) veya yüksek (~ 700 °C) sıcaklıklarda dönüştürücülerle kuru indirgeme ile sağlanır. Ardından AAS ya da DOAS ile analiz edilir.	Ölçüm aralığı: 0,4 µg/m³ - 1 mg/m³	LCP BREF'te otomatik ölçüm sistemi (Automated monitoring system-AMS) için standart yöntemdir. Ancak bu yöntemde sadece elemental cıva ölçümü yapılabilir. Partiküler cıva ölçümü bu yöntemde yapılamaz.
EN 13211:2001	Periyodik	AAS	Atık gaz izokinetik yöntemlerle (örneğin İmpinger örnekleme) veya toz ve damlacıklardaki cıva içeriği 1 µg/m³'den küçükse izokinetik olmayan yöntemlerle toplanır. Toplanan numune filtreden ve bir absorpsiyon çözeltisinden (çözelti: KMnO ₄ /H ₂ SO ₄ veya K ₂ Cr ₂ O ₇ /HNO ₃) geçirilerek filtrenin gaz içeriğini emmesi sağlanır. Hem filtre hem de absorpsiyon çözeltisi AAS ile analiz edilir. Sonuç olarak atık gaz içinde bulunabilecek cıva tüm formlarıyla (buhar, reaktif, partiküler) analiz edilmiş olur.	Ölçüm aralığı: 1 µg/m³ - 500 µg/m³. Tespit alt sınırı: 2,6 µg/m³ (numune gaz hacmi 0,05 m³)	Toplam cıva ölçümü için AB'de standart referans yöntemidir.
US EPA30B	Periyodik	CVAAS (soğuk buhar atomik absorpsiyon spektroskopisi) ve CVAFS (soğuk buhar atomik floresans spektroskopisi)	Atık gaz sorbent tuzak yöntemiyle toplanır. Tuzaklarda emici malzeme olarak genelde halojenlenmiş karbon kullanılır. Örneklemede kullanılan tuzaklar ya su analizi için geleneksel yöntemlerle ya da termal desorpsiyon (ayırışma) sistemleri ile analiz edilir.		LCP BREF'te diğer izleme yöntemleri ile sorbent tuzakla örnekleme periyodik yapıldığı durumlarda sürekli ölçümlere alternatif olarak kullanılabileceğini öngörmektedir.

EN 1911:2010	Periyodik	Filtrasyon sonrası a) gümüş potansiyometrik titrasyon, b) cıva(II) tiyosiyanat spektrofotometrisi veya c) iyon kromatografisi ile müteakip klorür tayini ile suda absorpsiyon	Atık gaz örneği filtrasyondan geçirilir ve absorpsiyon çözeltisinden (örneğin sudan) geçirilir. Böylece filtrasyon esnasındaki sıcaklıkta uçucu olan ve su ile reaksiyona giren tüm cıva klorür/florür bileşikleri bu yöntemlerle ölçülür.	Ölçüm aralığı: 1 mg/m ³ - 5 000 mg/m ³ . Tespit alt sınırı: ~ 0,2 mg/m ³ (numune gaz hacmi 0,4 m ³ - 0,5 m ³ ; numune alma süresi 2 saat)	Gaz halindeki klorürler ve florürler için AB'de standart referans yöntemidir. Ancak sadece cıva bileşiklerini ölçmede kullanılır.
-----------------	-----------	---	--	--	---

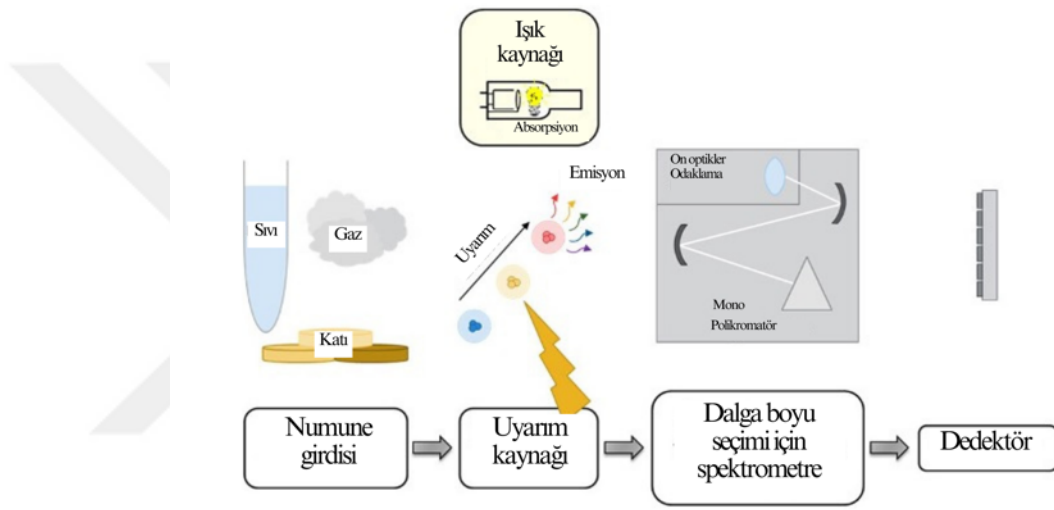
Kömür yakıtlı santrallerin neden olduğu emisyonlar “Sürekli Emisyon Ölçüm Sistemleri” (SEÖS) ile takip edilmektedir. SEÖS cihazları doğrudan santrallerin baca veya gaz kanallarına yerleştirilebilir ya da numune alınıp taşınarak cihazda analiz edilebilir (EPA, 2023). SEÖS ülkemizde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından düzenlenmiştir ve Sürekli Emisyon Ölçüm Sistemleri Tebliği’ne tabidir (ÇŞİDB, 2011). SEÖS Tebliği’ne göre santrallerin bacalarından su buharı, azot oksit (NO_x), kükürt oksit (SO_x), karbon monoksit (CO) ve toz gibi hava kirletici emisyonlar ölçülmektedir. SEÖS Tebliği’ne göre cıva emisyonları henüz ölçülmemektedir ancak dahil edilmesi beklenmektedir (ÇŞİDB, 2022).

Çizelge 2.8.1-1’de listelenen ve hem atık gaz numuneleri için hem de SEÖS’de kullanılan örnekleme teknikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- **İmpinger örnekleme:** Kömür yakıtlı santrallerin bacalarından veya kanal çıkışlarından gaz örneğinin izokinetik örnekleme (aktif örnekleme tekniği) tekniğiyle impinger tüplerine toplanıp laboratuvar ortamında analiz edilmesine dayanır. Cıva emisyonlarındaki dalgalanmaları yakalamaz, yüksek partikül miktarı içeren gazlar için uygun değildir (Linak, 2001). Ancak bir izokinetik örnekleme metodu olduğu için cıvanın açığa çıkan tüm formlarının (cıva buharı, reaktif, partiküler) ve toplam cıvanın ayrı ayrı ölçümünü sağlar (UNEP, 2019b).
- **Sorbent tuzakla örnekleme:** İmpinger yöntemine göre daha az karmaşıktır, dolayısıyla daha az zaman alır (UNEP, 2019b). Partiküler cıva ölçümünde güvenilirliği düşük bir yöntemdir, esas olarak cıva buharı ölçümü için uygundur.
- **Enstrümantal testler:** Cıva buharı ve reaktif cıvanın ölçümü için kullanılan bu yöntemde, laboratuvara gerek kalmaksızın doğrudan mobil analizörler kullanılır. SEÖS ve sorbent tuzak yönteminin performans testleri için uygundur (UNEP, 2019b).
- **Sorbent tuzakla izleme:** Partikül madde yoğunluğunun düşük olduğu kömür yakıtlı termik santraller için uygundur (UNEP, 2019b). Bu yöntem bazı metotlarla birleştirilerek 14 güne kadar ölçüm sağlayabilir ancak SEÖS yerine kullanılamaz.

Çizelge 2.8.1-1’de listelenen ve kömür yakıtlı santrallerin bacalarından veya çevresinden örnekleme yapıldıktan sonra uygulanan laboratuvar analiz yöntemleri ise aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- **AAS:** Spektroskopi; atomlar, moleküller veya diğer kimyasal maddeler tarafından absorplanmış, dağıtılmış (saçılmış) ve dışarıya yayılmış elektromanyetik radyasyonun (ışınım) ölçümü ve yorumlanmasıdır. AAS, elementlerin belirli dalga boylarındaki ışığı absorplanması üzerine kurulu bir tekniktir (Şekil 2.8.1-1). Örneğin cıva elementi 185.0 nm dalga boyundaki bir kaynakla analiz edilmelidir (Aktaş ve Yağmur, 2024). AAS yöntemi kömür yakıtlı elektrik santrallerinde atık gazda ölçüm yapmak için kullanılır, özellikle düşük konsantrasyonlardaki cıva izleri için idealdir (Brinkmann et al., 2018).

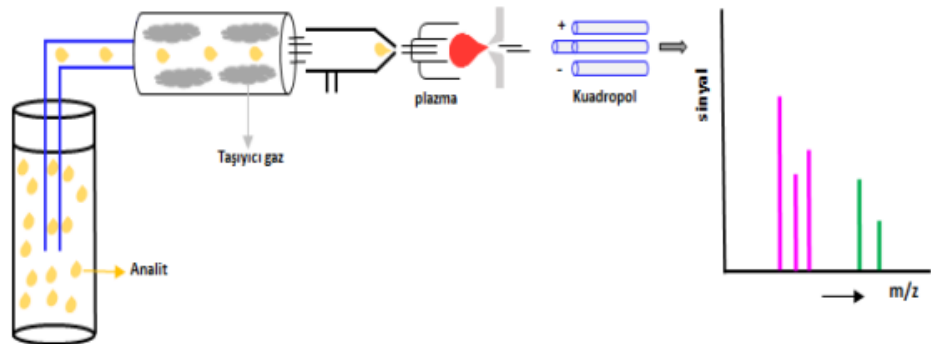


Şekil 2.8.1-1: AAS süreci (Manogna, K. Sai., 2021).

- **CVAAS:** CVAAS kömür yakıtlı elektrik santrallerinde baca gazında elemental ve reaktif cıvanın analizi için kullanılırken; suda göllerden, nehirlerden ve atık sulardan alınan numunelerin analizi için kullanılabilir (Brinkmann et al., 2018).
- **AFS:** Bu yöntem, uyarılmış elementlerden yayılan ışığın (floresans) ölçülmesine dayanır. AFS, AAS'ye göre daha hassastır. AFS yöntemiyle cıva, arsenik, selenyum ve antimon gibi ultra-iz elementlerin daha hassas analizleri yapılabilir. AFS, çevresel izleme, özellikle hava, su ve toprak örneklerinde cıvanın tespiti için yaygın olarak kullanılır. Ayrıca klinik, gıda ve ilaç analizlerinde de kullanılır.
- **CVAFS:** CVAFS, cıva gibi elementlerin ölçümünde kullanılan ve buhar halindeki metalin floresansının ölçüldüğü bir tekniktir. Bu

yöntemde, örneklerin buharlaştırılmasına gerek yoktur, çünkü analiz edilen madde zaten buhar halindedir. CVAAS trilyon başına yaklaşık 2 parça (ppt) tespit limiti sağlarken CVAFS, altın karışımıyla 0,2 ppt veya 0,02 ppt'ye kadar daha düşük tespit limitleri sunar (Teledyne Leeman Labs. 2021). CVAAS ve CVAFS sürekli toprak izleme için kullanılırsa da toprak numuneleri bu yöntemlere uygun hale getirildiğinde sonuç verir (Spectroscopy Online, 2021).

- **ICP-MS ve ICP-OES:** İndüktif eşleşmiş plazma (ICP), bir plazma yani iyonlaşmış gaz oluşturma tekniğidir (Şekil 2.8.1-2) Enerji, elektromanyetik indüksiyonla üretilen 110 voltun altına düşmemesi gereken elektrik akımları tarafından sağlanır (Şanal, 2023). Bu enerji, Argon (Ar) gazı ile etkileştirilerek bir argon plazması oluşturulur. Argon kullanılmasının sebebi birinci iyonlaşma enerjisi düşük olduğu için, hızlı bir şekilde plazma halini alabilmesidir. Her iki teknikte de numuneler iyonlaşmış gaz haline dönüştükten sonra ICP-MS, numuneyi kütle ağırlığına, ICP-OES ise numuneyi karakteristik dalga boyuna göre ayırır. Kömür yakıtlı elektrik santrallerin baca gazı, sediment ve atık sularında cıva analizinde her iki yöntem de kullanılabilir. Ancak ICP-MS, ICP-OES yöntemine göre daha hassas çalışır (Brinkmann et al., 2018).



Şekil 2.8.1-2: ICP-MS çalışma prensibi akış şeması (Bahadır, 2020).

Santrallerin bacaları ve gaz kanallarından doğrudan ölçüm yapılma imkanının olmadığı durumlarda, santralin etrafındaki çevresel ortamlardan yapılabilecek ölçümler Bölüm 3.2.2’de özetlenmiştir. Numune alımından sonra, numunenin türüne göre analiz cihazlarından biri tercih edilebilir.

2.8.2. Tahmin ve mühendislik yöntemleri

Kömür yakıtlı santrallerin bacalarından veya alıcı ortamlarından doğrudan ölçüm yapılma imkanının olmadığı araştırmalarda bir tahmin yöntemi olarak kullanılan sistemlerdir. Bu sistemlere bir örnek, santralin etkilediği bölgeden toplanan numunelerin cıva bakımından incelenmesi olabilir. Bu numuneler toprak, su, sediment veya havadan toplanarak laboratuvar ortamında analiz edilebilir. Laboratuvarda kullanılacak cihaza ve numunenin hazırlanma metodolojisine göre farklı cıva türleri, farklı hassasiyetlerde analiz edilebilir. Ayrıca laboratuvara erişimin olmadığı durumlarda sensörler ve taşınabilir cihazlar, alıcı ortamdaki cıvanın analizi için kullanılabilir (Gustin et al., 2015). Ancak piyasadaki pek çok cihaz düşük konsantrasyonlardaki cıva emisyonlarını ölçememektedir (IPEN, 2016). XRF (X ışını floresansı) kullanan Metorex X-MET 2000 cihazı ve Olympus Delta cihazı; termal dekompozisyon, amalgamasyon ve spektrometre kullanan DMA-80 cihazı; termal dekompozisyon ve atomik absorpsiyon spektrometresi kullanan Lumex RA-915+ cihazı piyasada bulunan cihazlardan bazılarıdır (IPEN, 2016).

Ayrıca uzaktan algılama ve uydu sistemleri de cıva emisyonlarının tahmin edilmesinde kullanılabilir. Ancak düşük cıva emisyonlarının güncel uydu sistemleriyle takibi mümkün olmamaktadır (ANAP and UNEP, 2019). Avrupa’da uzaktan algılama kullanarak yapılan Küresel Cıva Gözlem Sistemi bu yöntemle en güncel örneklerden biridir (GMOS, 2024). Bulgularını 2016’da yayınlanan GMOS projesi, atmosferik cıva modellemesi kurmakta kullanışlı olsa da, bu projede Türkiye yer almamaktadır. Benzer şekilde uçaklar aracılığıyla üst troposfer ve alt stratosferden cıva ölçümleri yapılabilir. Atmosferin bu katmanlarında uçaklar aracılığıyla yapılan ölçümler kömürlü yakıtlı elektrik santrallerinden kaynaklı cıva emisyonlarının UNEP (2019) raporunda tahmin edilenden daha yüksek olabileceğini göstermiştir (ANAP and UNEP, 2019). Biyolojik izlemeler, özellikle kirlilik bölgesindeki maruziyet değerlendirmesinin yapılması, sağlık etkisinin anlaşılması için değerlidir. Örneğin AB’de DEMOCOPHES projesi kapsamında yed, ülkede anne ve çocukların saç örneklerinden metil cıva, idrar örneklerinden kreatinin, kotinin, kadmiyum, ftalat metabolitleri ve bisfenol-A maruziyeti analiz edilmiştir (Schindler et al., 2014).

Mühendislik yöntemleri ise, hem doğrudan izlemelerde hem de alıcı ortamdan cıva emisyonlarının ölçüldüğü yöntemlerde bir kontrol mekanizması olarak önemlidir. Bu tezde kullanılan “kütle denge (mass-balance)” yöntemi, cıva emisyonlarının tahmin edilmesi çalışmalarında sıkça karşımıza çıkmaktadır. Bu

sistem kütlesini koruyarak yasasını temel alır (UNEP, 2019b). Kömür yakıtlı bir santral için bu yöntem aşağıdaki formülle uygulanabilir (UNEP, 2019b).

$$\text{Giren cıva miktarı} = \text{Baca gazındaki cıva miktarı} + \text{Arıtılan cıva miktarı} + \text{Arıtma sistemlerinde tutulan cıva miktarı}.$$

Tahmini emisyon izleme (PEMS), SEÖS veya doğrudan ölçüm sistemlerinden gelen çıktıyı, diğer girdi veya çıktılarla ilişkilendirerek tahmin etmeye yarayan bir yöntemdir. Cıva ve diğer kirleticilerin yanı sıra, karbon emisyonu hesaplamasında da kullanılabilir (Avrupa Komisyonu, 2023).



3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Muğla'daki Santrallerin İncelenmesi ve Cıva Emisyonlarının Tahmini

Isıl kapasitesi 50 MW ve üstündeki kömür yakıtlı santraller büyük yakma tesisleri sınıfındadır ve bu santrallerin çevre mevzuatları daha detaylıdır. Muğla'da bu sınıfa giren üç adet kömür yakıtlı elektrik santrali bulunmaktadır (Şekil 3.1-1). Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy santrallerinin hepsi yakın çevresinde madenciliği yapılan linyit kömürünü kullanmaktadır ve santral tasarımları benzerdir. Türkiye'deki kömür yakıtlı elektrik santrallerin toplam kurulu gücü 21,8 GW olup, bu santraller yılda 118 TWh elektrik üretmektedir (ETKB, 2024). Muğla'daki üç santralin toplam kurulu gücü ise 1,68 GW (toplam kömür kurulu gücünün %7,71'i) ve yıllık toplam nominal üretim kapasiteleri 10,9 TWh'dir. 2023 yılında ülkemizde 322 TWh elektrik üretilmiş, Muğla'daki Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy santralleri 8,148 TWh elektrik üreterek, toplam elektrik üretiminin %2,53'ünü sağlamıştır (Ember, 2024).

Ülkemizdeki diğer kömür yakıtlı santraller gibi, bu üç santralin de cıva emisyonları henüz resmi olarak halka açık şekilde raporlanmamaktadır. Bu nedenle, bu bölümde santrallerin altyapıları incelenmiş, neden olabilecekleri cıva emisyonları hesaplanarak benzer çalışmalarla kıyaslanmıştır.



Şekil 3.1-1 Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy santrallerinin konumu (Google Earth, 2024).

Üç santral için de temel bilgiler Çizelge 3.1-1'de verilmiştir. Bu çizelgedeki “kurulu güç” santralin anlık olarak üretebileceği maksimum elektrik gücünü, “ünite sayısı” santralin kaç ayrı elektrik üretim ünitesinden oluştuğunu, “nominal yıllık üretim kapasitesi” santralin bir yıl içinde üretebileceği maksimum elektrik

miktarını; “kömür tüketimi (tasarım değeri)” santralin belirli bir miktar elektrik üretmek için ne kadar kömür tüketmesinin planlandığını ifade eder. Ayrıca 2023 yılında Yatağan TES 2.289 GWh, Yeniköy TES 2.592 GWh ve Kemerköy TES 3.267 GWh elektrik üretmiştir (EPIAŞ, 2024).

Kömür tüketimi tasarım değeri, kömürün kalorisi, santralin elektrik üretimi ve santralin verimliliğine bağlı olarak hesaplanır. Örneğin Çizelge 3.1-1’de Yılmaz (2017) tarafından hesaplanan kömür tüketimi değerlerine göre, Yatağan santralinde 1kWh elektriği üretmek için 1,099 kilogram kömüre ihtiyaç vardır. Santrallerde üretilen her bir birim elektriğe karşın tüketilen kömür miktarı, açığa çıkan cıva emisyonları konusunda belirleyici olacaktır.

Çizelge 3.1-1 Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy TES temel bilgiler (Yılmaz, 2017).

	Yatağan TES	Yeniköy TES	Kemerköy TES
Şehir	Muğla Yatağan	Muğla Menteşe	Muğla Menteşe
Toplam kurulu güç	630 MW	420 MW	630 MW
Ünite Sayısı ve gücü	3 x 210 MW	2 x 210 MW	3 x 210 MW
Nominal yıllık üretim kapasitesi (MWh)	4.096.000	2.730.000	4.095.000
Ünitelerin devreye alınıp tarihi	1982, 1983, 1984	1986, 1987	1993, 1994, 1995
Kömür Türü	Linyit	Linyit	Linyit
Kömür tüketimi (tasarım değeri)	1,099 kg/kWh	1,352 kg/kWh	1,462 kg/kWh
Kömürün alt ısı değeri (tasarım değeri)	2100 ± 200 kcal/kg	1750 ± 200 kcal/kg	1750 ± 200 kcal/kg

Çizelge 3.1-1’de verilen bilgilerle, aşağıdaki formülü kullanılarak santrallerin tasarlanan kömür tüketimlerini hesaplanabilir:

$$\text{Yıllık kömür tüketimi} = \text{Nominal yıllık üretim kapasitesi (kWh)} \times \text{Kömür tüketimi tasarım değeri (kg/kWh)}$$

Buna göre Yatağan santralinin yıllık kömür tüketimi 4.136.348 ton, Yeniköy santralinin 4.051.307 ton ve Kemerköy santralinin 6.032.308 ton olmalıdır. Öte yandan, 2014 yılında özelleştirilmiş olan üç santralin yıllık tükettikleri kömür miktarı işletmeciler tarafından, tasarım tüketiminden daha yüksek beyan edilmiştir (Çizelge 3.1-2). Bunun nedeni, maden sahalarındaki kömürün azalmasına bağlı olarak, daha düşük kalorifik değere sahip kömürün tüketilmesi olabilir. Santrallerin

cıva emisyonlarının hesaplanmasında beyan edilen kömür tüketimleri kullanılacaktır.

Santrallerdeki yakma prosesleri sonucu oluşacak cıva emisyonunu etkileyen diğer bir önemli unsur da kömürün cıva içeriğidir. 2010’da dünyanın farklı yerlerinden kömür örnekleri alınmış ve cıva da dahil olmak üzere ağır metal içerikleri incelenmiştir (Tewalt et al., 2010). Bu çalışma kapsamında Muğla’dan çıkartılan linyit kömürleri de incelenmiş ve cıva içeriklerinin 0,066 - 0,21 ppm arasında olduğu bulunmuştur. (Tewalt et al., 2010). Bu rakam dünya ortalamasıyla benzerdir. Örneğin ABD’deki linyit kömürünün cıva içeriği 0,08 – 0,13 ppm, Polonya’daki linyit kömürünün cıva içeriği ise 0,11 - 0,37 ppm arasında değişmektedir (EPA, 2002; Glodek and Pacyna, 2009). Tewalt ve arkadaşlarının (2010) çalışmasına göre Yatağan TES’i besleyen Eskihisar, Tınaz, Bağyaka ve Bayır sahalarından çıkartılan kömürün cıva içeriği ortalama 0,18 ppm; Kemerköy ve Yeniköy santrallerini besleyen ve Çakıralan, Alatepe, Berdik, Kultak, Ekizköy, Sekköy ve Hüsamlar sahalarından çıkartılan kömürün cıva içeriği ise ortalama 0,123 ppm’dir.

Çizelge 3.1-2 Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy TES kömür tüketimleri ve cıva içerikleri (Tewalt et al., 2010; YK Enerji, 2024; Yatağan Termik, 2024).

	Yatağan TES	Yeniköy TES	Kemerköy TES
Yıllık kömür kullanımı (hesaplanan)	4.136.348 ton	4.051.307 ton	6.032.308 ton
Yıllık kömür kullanımı (beyan edilen)	5.200.000 ton	4.500.000	7.117.500 ton
Kömürün cıva içeriği	0,18 ppm	0,123 ppm	0,123 ppm

Bölüm 2.8.2’de detayları verilen “kütle denge (mass-balance)” yöntemi, santrallerin cıva emisyonlarının bilinmediği durumlarda devreye giren bir mühendislik tahmin yöntemidir. Buna göre, kazana beslenen kömürün cıva kütlesi bacadan çıkan ve arıtma sistemi tarafından tutulan cıvanın toplam kütlesine eşit olmalıdır. Santrallerdeki yakma sonucu oluşup, arıtma sistemlerine giren cıva miktarı aşağıdaki formülle hesaplanır. Bu formülde gramı kilograma çevirmek için 0,001 ile çarpma işlemi yapılmıştır.

$$\text{Toplam Cıva Miktarı (kg)} = \text{Yıllık Kömür Kullanımı (ton)} \times \text{Kömür Cıva İçeriği (ppm)} \times 0,001$$

Buna göre, üç santralin arıtma sistemine girecek cıva miktarı aşağıdaki gibi hesaplanır:

Yatağan TES: $5.200.000 \text{ ton} \times 0,18 \text{ ppm} \times 0,001 = 936 \text{ kg}$

Yeniköy TES: $4.500.000 \text{ ton} \times 0,123 \text{ ppm} \times 0,001 = 553,5 \text{ kg}$

Kemerköy TES: $7.117.500 \text{ ton} \times 0,123 \text{ ppm} \times 0,001 = 874,8 \text{ kg}$

Buna göre santrallerden yılda toplam 2.364 kg cıva emisyonu önce arıtma sistemlerine girmekte, orada azaltım yapıldıktan sonra bir kısmı atmosfere salınmaktadır. Santrallerin yakma ve hava kirliliği azaltım sistemleri sayesinde cıva emisyonlarının nasıl azalacağı Bölüm 2.6.'da detaylı olarak verilmiştir. Muğla'daki santrallerin cıva emisyonunu etkileyecek arıtma sistemleri ise Çizelge 3.1.-3'te özetlenmiştir.

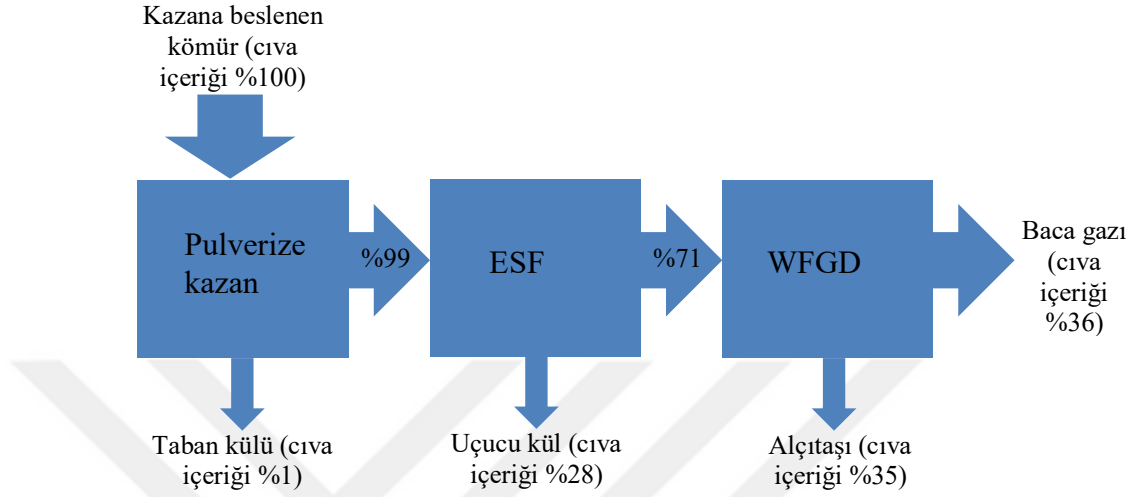
Çizelge 3.1.-3'te görüleceği üzere, her üç santral de pulverize kömür kazan sistemi kullanmaktadır. Her üç santralde de toz giderme sistemi olarak elektrostatik filtreler (ESF) bulunmaktadır. Her üç santralde de baca gazı kükürt arıtma sistemi olarak, ıslak kireç taşı yıkayıcı (WFGD) bulunmaktadır. Azot oksit arıtma sistemi ise hiçbir santralde bulunmamaktadır.

Çizelge 3.1-3 Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy TES baca gazı arıtma sistemleri (Gacal vd., 2021).

	Yatağan TS	Yeniköy TS	Kemerköy TS
Kazan Tipi	Pulverize	Pulverize	Pulverize
Baca gazı toz tutma sistemi	ESF	ESF	ESF
Baca gazı toz tutma sistemi proje verimi	%99 -%98	%99 -%98	%99 -%98
Baca gazı kükürt arıtma sistemi	WFGD	WFGD	WFGD
Baca gazı kükürt arıtma proje verimi	%95	%95	%95
Baca gazı azot arıtma sistemi	Yok	Yok	Yok
Ek cıva giderim sistemleri	Yok	Yok	Yok

Burada verilen baca gazı arıtma sisteminin verimleri, santrallerin tasarımındaki verimler olup, zaman içerisinde azalmış olması muhtemeldir. Üç santralin de altyapısındaki pulverize kömür kazan sistemi, ESF ve WFDG kombinasyonu, baca gazı arıtma sistemlerinin verimliliğine bağlı olarak baca gazı cıva emisyonunu %64 oranında azaltılabilir (UNEP, 2011). Şekil 3.1-2'de görüldüğü gibi cıva emisyonlarının %1'inin taban külünde, %28'inin baca gazları ile taşınan ince taneli uçucu külde, %35'inin ise kükürt dioksitin kireç taşı veya kalsiyum

hidroksit ile reaksiyona girdiği WFGD prosesi sonucu alçıtaşı (kalsiyum sülfat dihidrat) kalması beklenir. Alçıtaşı inşaat sektöründe kullanılması için satılabileceği gibi, taban külü ve ESF'nin tuttuğu küle beraber santrallerin kül sahalarında da depolanabilir.



Şekil 3.1-2 Pulverize kömür kazanı, ESF ve WFDG kombinasyonunun sağlayabileceği cıva azaltımı (UNEP, 2011).

Şekil 3.1-2'deki grafik UNEP (2011) çalışmasında Çin'de incelenen santrallerin ortalamasını gösterir. Cıva azaltım değerler, santralin kullandığı kömür türüne göre önemli ölçüde değişmektedir. UNEP (2011) çalışmasında incelenen santrallerden bu kombinasyona sahip ve linyitle çalışan bir santralde, cıva emisyonlarının %44'ünün bacadan çıktığı, %56'sının ise arıtma sistemlerinde tutulduğu görülmüştür.

Muğla'daki santrallerin baca gazı cıva emisyonları ya da arıtma sistemlerinin güncel verimliliği bilinmemektedir. Bu nedenle Çin'deki örneğe bakarak, Muğla'daki santrallerin arıtma sistemlerine giren toplam 2.364 kg cıvanın kütsel olarak %44'ü'nün (1.040 kg) santrallerin bacalarından atmosfere salınacağını söylemek mümkündür (Çizelge 3.1-4). Baca gazındaki çıkan cıvanın ise %88'inin Hg^0 , %12'sinin Hg^{2+} formunda olması beklenir (UNEP, 2011). WFGD Hg^{2+} emisyonlarını %90'a varan verimlilikle azaltabilse de Hg^{2+} emisyonlarının bir kısmı WFGD sürecinde Hg^0 'ye dönüşmektedir (Li et al., 2013). Cıvanın %56'sı (1.324 kg) ise santrallerin arıtma sistemleriyle tutulacaktır. Şekil 3.1-2'de verilen arıtma sistemlerinin verimliliği, %56 arıtma verimliliğine göre ağırlıklandırılırsa; kömürün cıva içeriğinin %0,9'unun taban külünde, %23,5'inin uçucu külde ve %31,6'sının alçıtaşında kalması beklenir (Çizelge 3.1-4). Ancak Çizelge 3.1-4'te

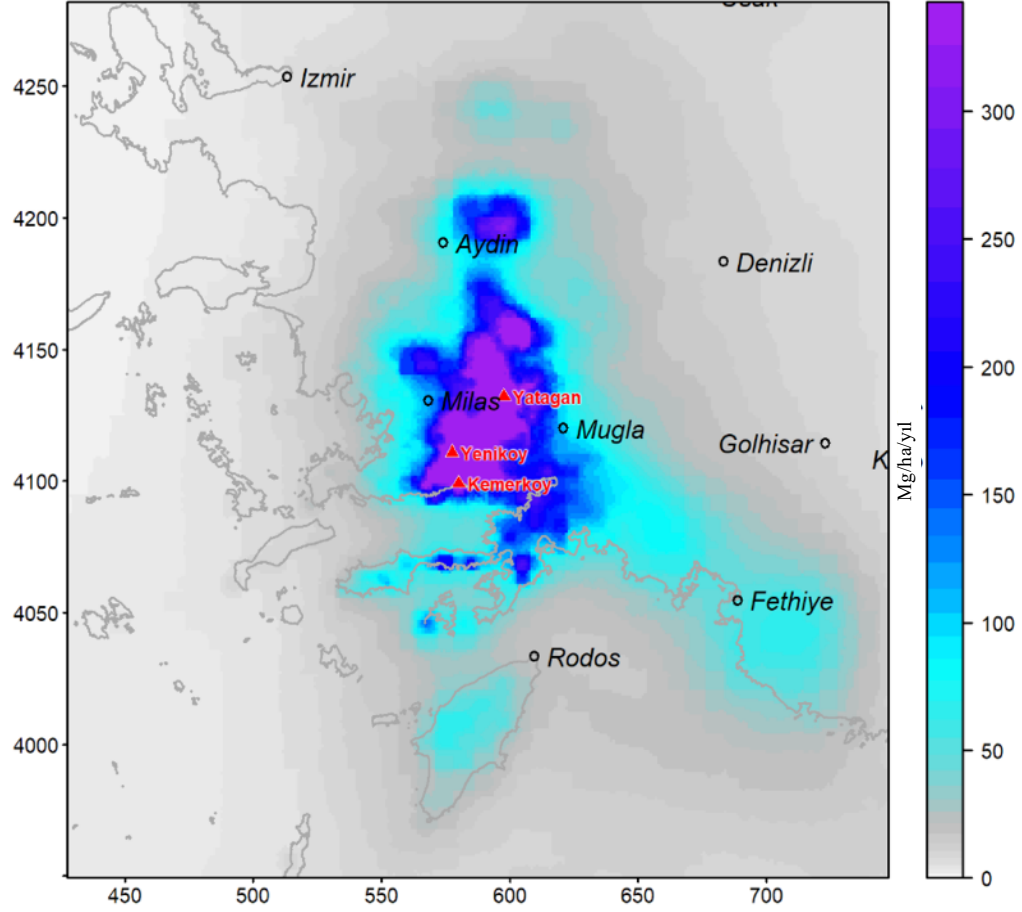
yer alan veriler, aynı altyapılara sahip santralde bile değişiklik gösterebilir. Bu nedenle cıva emisyonlarına ilişkin en doğru sonucu, ancak baca gazının doğrudan ölçümü verebilir.

Çizelge 3.1-4 Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy santrallerinin cıva emisyonları hesaplaması (yıllık).

	Yatağan TS	Yeniköy TS	Kemerköy TS	Toplam kg
Arıtma sistemine giren cıva miktarı (kg /yıl)	936	553,5	874,8	2.364,3
Baca gazından çıkan toplam cıva miktarı (kg/yıl)	411,8	243,5	384,9	1.040,3
Baca gazından çıkan Hg^0 miktarı (%88) (kg/yıl)	362,4	214,3	338,7	915,5
Baca gazından çıkan Hg^{2+} miktarı (%12) (kg/yıl)	49,4	29,2	46,2	124,8
Arıtma sistemleriyle tutulan toplam cıva miktarı (kg/yıl)	524,2	310,0	489,9	1.324,0
Taban külündeki cıva miktarı (%0,9) (kg/yıl)	8,5	5,0	7,9	21,4
Uçucu küldeki cıva miktarı (%23,5) (kg/yıl)	219,8	130,0	205,4	555,2
Alçıtaşıdaki cıva miktarı (%31,6) (kg/yıl)	295,9	175,0	276,5	747,4

Diğer yandan Muğla'daki santrallerden kaynaklı cıva emisyonları için halihazırda bazı tahminler bulunmaktadır. Myllyvirta'nın (2019) çalışmasına göre, Muğla'daki bu üç santralin bacasından yılda toplam 1.100 kg cıva açığa çıktığı tahmin edilmektedir. Bu çalışmada da kütle-denge yöntemi kullanılmıştır ve sonuçlar bu tezin tahminine yakındır. Ancak çalışma, baca gazı arıtma sisteminin güncel verimliliğine dair varsayımlarda bulunarak hesaplama yapmıştır, toplam 960 kg cıva/yıl farklılığının buradan kaynaklandığını söylemek mümkündür. Hava kirliliği dağılım modellemesinin yapıldığı çalışmaya göre cıva emisyonları hakim rüzgar yönü olan kuzeye yayılmakta, 1.100 kg cıvanın %55'i yani 610 kg'ının santrallerin 130 km çapındaki alanda biriktiği ve 80 bin insanı etkilediği tahmin edilmektedir (Şekil 3.1-3). Myllyvirta'nın (2019) modellemesine göre, cıva

santrallere yakın bölgelerde, santralden kaynaklı cıva emisyonlarının 300 mg/yıl/ha yani hektar başına yılda 300 mg olması beklenir.



Şekil 3.1-3 Muğla'daki Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy santrallerinden kaynaklı cıva emisyonlarının dağılımı (Myllyvirta, 2019).

Özetle, 2015 verilerine göre Türkiye'deki kömür yakıtlı santraller yılda 6,5 ton cıva emisyonuna neden olmaktadır (ANAP and UNEP, 2019). Santrallerden yayılan 6,5 ton/yıl cıvanın yılda 8.850 IQ puan kaybına ve 13 milyar 767bin dolar ekonomik maliyete neden olduğu düşünülmektedir (Gacal vd., 2021). Muğla'daki bu üç santral ise 2015 yılında kömürden üretilen elektriğin %15'ini, 2023 yılında %8,2'sini sağlamıştır. Muğla'daki bu üç santralin yılda toplam 1 - 1,04 ton cıva emisyonuna neden olması, ANAP ve UNEP'in (2019) bulgularına uygundur.

Yılda 1 – 1,04 ton cıva emisyonuna neden olan Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy santrallerinin yıllık 1.361- 1.415 IQ puan kaybına ve 2 milyar 117 bin – 2 milyar 202 bin dolar ekonomik maliyete neden olması beklenir. Üç santral de 2063'e kadar EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) üretim lisansına sahiptir

(EPDK, 2024). Bu nedenle santrallerin büyük bir politika değişikliği olmadıkça veya kömür kaynakları tükenmedikçe, 2063'ten önce faaliyetlerini sonlandırmalarının planlanmadığını ve ek bir cıva arıtımı sistemi devreye alınmadığı takdirde, yaklaşık 1 ton cıva emisyonlarını alıcı ortamlara bırakacaklarını söylemek mümkündür.

3.2. Çevre Örnekleri

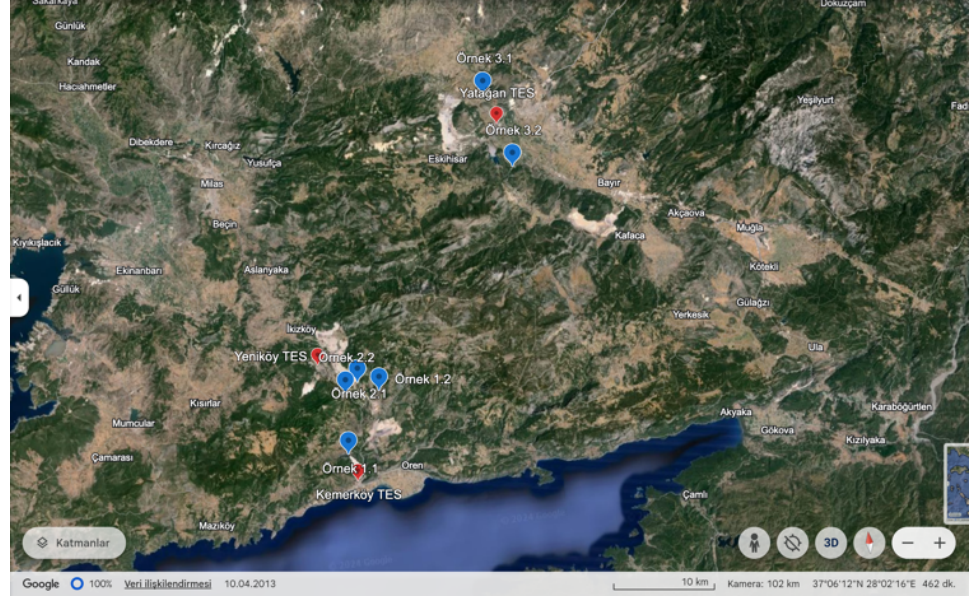
3.2.1. Örneklerin toplanmasında izlenecek yöntem

Myllyvirta (2019) tarafından yapılan ve CAN-Europe tarafından yayımlanan çalışmaya göre, Muğla'daki Yatağan, Kemerköy ve Yeniköy TES'lerden açığa çıkan 1,1 ton/yıl cıvanın %55'inin santrallerin 150 km çapındaki alana çökmesi beklenmektedir. Tezin bulgularına göre ise Muğla'daki üç santralden toplam 1,04 ton/yıl cıvanın açığa çıkması, bunun %88'inin buhar formundaki elemental cıva (Hg^0), %12'sinin ise reaktif cıva (Hg^{2+}) olması beklenmektedir. Santrallerin neden olduğu cıva emisyonu ağırlıklı olarak buhar Hg^0 olsa da havadan cıva ölçümünde gerekli taşınabilir aletlerin eksikliği nedeniyle toprak veya su ortamından örnek alınmasına karar verilmiştir. Ayrıca cıva su ortamında hem çökelediği hem de metillendiği için su ortamından numune alınmasına karar verilmiştir.

Su ve sediment analizleri Türkiye'deki laboratuvarlarda yaygın olarak ICP-MS ve ICP-OES cihazlarıyla yapılmaktadır. Daha düşük konsantrasyonlarda sonuç verebilmesi ICP-MS yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemle toplam cıva emisyonları 0,001 mg/L ve 0,001 mg/kg hassasiyetinde ölçülebilecektir.

3.2.2. Çevre örneklerinin toplanması

Cıva emisyonlarının santrale yaklaştıkça artması beklenmektedir. Bu nedenle santralin olabildiğince yakınındaki halkın erişimine açık gölet, dere, çay gibi su ortamlarından altı alet örnekleme noktası seçilmiştir. Örnek alım noktaları belirlenirken, insan faaliyetlerini etkileyen veya diğer su kaynakları ile etkileşimi kesilmemiş su toplama alanları (örn. göletler) tercih edilmiştir (Şekil 3.2.2-1). Myllyvirta (2019) çalışmasına göre, bu altı örnekleme noktasında havadaki cıva konsantrasyonlarının 300 mg/ha/yıl olması beklenmektedir.



Şekil 3.2.2-1 Numune toplanan alanlar ve santrallerin konumları (Google Earth, 2024).

Çizelge 3.2.2-1’de detayları verilen, seçilmiş altı noktadan su örnekleri doğrudan 400 mL kapasiteli polietilen şişeler içine toplanmıştır. Sediment örneklerinin alınmasında ise 30 x 45 cm’lik polietilen poşetler kullanılmıştır, örnekler 3 metre uzunluğundaki bir uzatma çubuğuna sabitlenmiş 20 gramlık paslanmaz çelik kaşıkla toplanmıştır. Gölet ortamından sediment örnekleri toplanırken göletin mümkün olan en derin noktasından örnekleme yapılmaya özen gösterilmiştir. Örnek alınırken koruyucu ekipman olarak tek kullanımlık nitril eldiven ve kasık çizmesi kullanılmış, sediment örnekleri alınırken her örneğin alınımından sonra ekipmanlar izopropil alkol ile dezenfekte edilmiş, dezenfeksiyon işleminden sonra ekipmanlar distile su ile durulanmış her bir örneğin toplandığı saat ve koordinat kaydedilmiştir.

Su örnekleri mini oto buzdolabına konularak Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi laboratuvarında getirilmiştir. Burada her bir örneğe %1 oranında saf hidroklorik asit katılarak pH değerlerinin 2’ye indirilmesi sağlanmıştır. Su örnekleri analiz sürecine kadar +4°C’lik kapalı ortamda muhafaza edilmiştir. Cıva analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi’nin laboratuvarında ICP-MS cihazında gerçekleştirilmiştir. Sediment örnekleri yine mini oto buzdolabına konularak örnekleme sürecinde taşınmış, soğuk zincir ile analizin yapılacağı özel laboratuvara gönderilmiştir. Sediment analizi Ankara’daki bir özel laboratuvarında, ICP-MS cihazı ve EPA 6020B metodu ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.2.2-1 Örnek alınan noktaların detayları.

	Örnekleme saati	Koordinat	Santral uzaklık (yakın olduğu santraller üstte)	Ortam türü ve adı
Örnek 1.1.	Su örneği: 4 Haziran 2024 12:59 Sediment örneği: 25 Haziran 2024 11:57	37°03'31"K 27°53'39"D	Kemerköy TES'e 2,71 km, Yeniköy TES'e 9,24 km, Yatağan TES'e 35,45 km.	Durağan gölet – Ahmetler göleti
Örnek 1.2.	Su örneği: 4 Haziran 2024 13:51 Sediment örneği: 25 Haziran 2024 13:10	37°06'40"K 27°56'10"D	Yeniköy TES'e 6,52 km, Kemerköy TES'e 9,04 km, Yatağan TES'e 28,53 km.	Su akıntısı – Çakıralan köyü çeşmesi mevki
Örnek 2.1.	Su örneği: 4 Haziran 2024 14:28 Sediment örneği: 25 Haziran 2024 12:25	37°07'14"K 27°54'49"D	Yeniköy TES'e 4,25 km, Kemerköy TES'e 9,59 km, Yatağan TES'e 28,74 km.	Durağan gölet – Sekköy göleti
Örnek 2.2.	Su örneği: 4 Haziran 2024 15:03 Sediment örneği: 25 Haziran 2024 12:45	37°06'43"K 27°53'57"D	Yeniköy TES'e 3,53 km, Kemerköy TES'e 8,57 km, Yatağan TES'e 30, 26 km.	Durağan dere – Milas-Ören yolu batısı isimsiz dere
Örnek 3.1.	Su örneği: 4 Haziran 2024 17:45 Sediment örneği: 25 Haziran 2024 15:39	37°21'28"K 28°05'27"D	Yatağan TES'e 3,06 km, Yeniköy TES'e 30,87 km, Kemerköy TES'e 39,73 km.	Çay – Dipsiz çayı
Örnek 3.2.	Su örneği: 4 Haziran 2024 19:06 Sediment örneği: 25 Haziran 2024 16:02	37°19'53"K 28°06'07"D	Yatağan TES'e 4,51 km, Yeniköy TES'e 27,16 km, Kemerköy TES'e 35,07km.	Çay – Bencik çayı

Örnek 1.1., Kemerköy santralının kuzeyinde yer alan Ahmetler Göleti'nden alınan su ve sediment numuneleridir (Şekil 3.2.2-1). Ahmetler Göleti hem Kemerköy santralının soğutma suyu olarak kullanılmakta hem de Kemerköy santralının kül depolama sahasında bulunan Ahmetler deresi buraya akmaktadır

(Yolcubal, 2022). Gölün etrafında karasal bitkiler ve çok miktarda yusufçuk bulunmaktadır. Ayrıca göl içerisinde balık ve yengeç gözlemlenmiştir.



Şekil 3.2.2-1 Örnek 1.1.'in konumu (Google Earth, 2024).

Örnek 1.2., Kemerköy ile Yeniköy termik santralleri arasında bulunan Çakırköy köy yerleşim alanında, küçükbaş hayvanların ve insanların içme suyu olarak kullandığı çeşmenin yanındaki ince bir su akıntısından ve sedimentinden alınmıştır (Şekil 3.2.2-2). Örneğin alındığı noktanın etrafı çok sayıda yosun ve bitki bulunmaktadır.

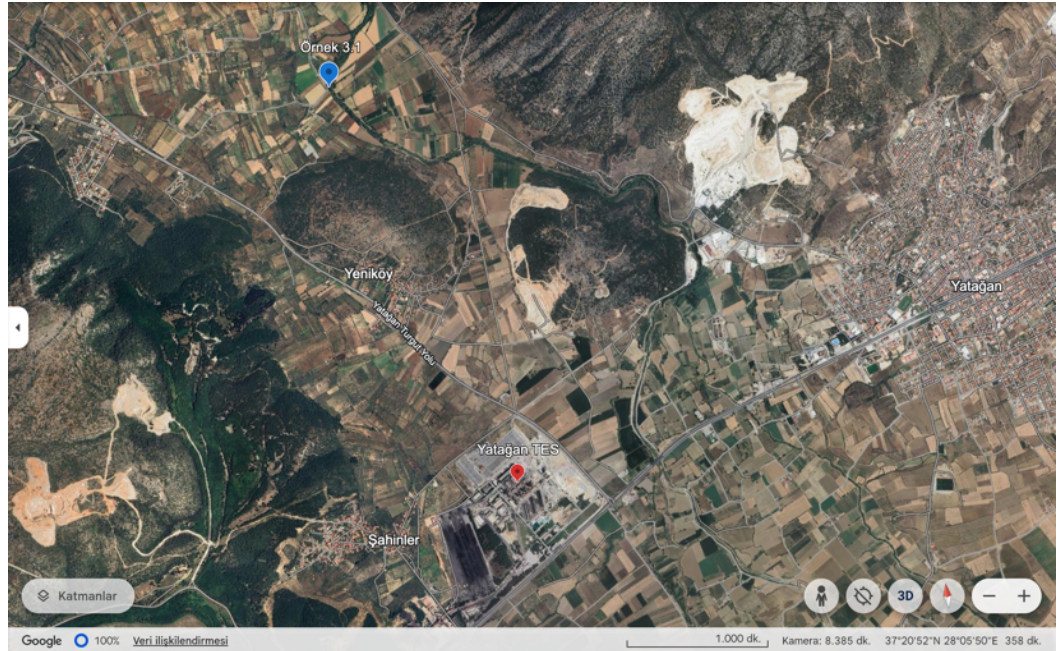
Örnek 2.1., Kemerköy ile Yeniköy termik santralleri arasında bulunan Sekköy yerleşim alanındaki durağan göletten alınmıştır (Şekil 3.2.2-2). Suyun içinde canlılık belirtisi olmayıp gölet kenarında kaplumbağa gözlemlenmiştir.

Örnek 2.2., Kemerköy santralının güneyinden barajın ve küçük isimsiz bir göletin bağlandığı ormana açılan durağan dereden alınmıştır (Şekil 3.2.2-2). Yolcubal'ın (2022) raporundan ve derenin kenarındaki ekipmanlardan bu derenin ve bağlantılı kollarının Kemerköy santralının atık su deşarjı ya da santralle bağlantılı faaliyetlere su alımı için kullanıldığı düşünülmektedir. Dere etrafındaki balçıktan su miktarı azalmış olduğu anlaşıp, su içerisinde çok sayıda kurbağa ve sinek larvası bulunmaktadır.



Şekil 3.2.2-2 Örnek 1.2., 2.1. ve 2.2'nin konumu (Google Earth, 2024).

Örnek 3.1., Yatağan TES'in kuzeyinden, tarım arazilerinin yanında yer alan Dipsiz Çayı'ndan alınmıştır (Şekil 3.2.2-3). Buradaki akarsu (yerel dilde azmak), tarımsal sulamada kullanılmaktadır. Tarım arazilerinde sebze, meyve yetiştirilmektedir ve örnek alanına noktanın etrafında çok sayıda yusufoçuk gözlemlenmiştir.



Şekil 3.3.2-3 Örnek 3.1'in konumu (Google Earth, 2024).

Örnek 3.2. Yatağan TES'in güneyindeki yer alan ve Yatağan TES'in kül barajının döküldüğü su göletine çok yakın olan Bencik Deresi'nden alınmıştır (Şekil 3.2.2-4). Örnekleme noktasında rekreasyon amaçlı kullanılmaktadır, etrafında çok sayıda restoran, çay bahçesi bulunmaktadır. Su içinde yengeç ve etrafında yusufçuk gözlemlenmiştir.



Şekil 3.2.2-4 Örnek 3.2'nin konumu (Google Earth, 2024).

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Sediment analizi Ankara'daki özel bir laboratuvarda ICP-MS cihazı EPA 200.8 ve EPA 3051-A analiz metotlarıyla yapılmıştır. EPA 3051-A, sedimentlerdeki maddelerin mikrodalga destekli asit sindirimini içerir (EPA, 2015). Bu metoda uygun olarak, sediment örnekleri önce mikrodalgada kontrollü bir şekilde kurutulmuş, ardından asitle parçalanarak numune ölçüme hazır hale gelmiştir. EPA 200.8 metodu ise ağırlıklı su ortamlarının yanı sıra sediment ve çamur numunelerinde toplam geri kazanılabilir element konsantrasyonlarının belirlenmesi için de kullanılmaktadır (EPA, 2015b). Su analizi ise İzmir'de bulunan Dokuz Eylül Üniversitesi'nin çevre laboratuvarlarında ICP-MS cihazıyla yapılmıştır.

Sudaki cıva analizinde, tüm örneklerdeki cıva miktarı belirtme sınırı olan 0,001 ppm'in altında kalmıştır. Sediment örneklerinden tayini yapılan cıva konsantrasyonları Çizelge 4-1'inde gösterilmiştir. Burada verilen değerlerde belirsizlik sonucu $\pm\%10,42$ ($\pm 0,1042$)'dir.

Çizelge 4-1 Sedimentte cıva analizi sonuçları.

	Santral uzaklık (yakın olduğu santraller üstte)	Rakım	Ortam türü	Sedimentte toplam cıva miktarı (mg/kg)
Örnek 1.1.	Kemerköy TES'e 2,71 km, Yeniköy TES'e 9,24 km, Yatağan TES'e 35,45 km.	130 m.	Durağan gölet – Ahmetler göleti	$0,547 \pm 0,057$
Örnek 1.2.	Yeniköy TES'e 6,52 km, Kemerköy TES'e 9,04 km, Yatağan TES'e 28,53 km.	293 m.	Durağan su akıntısı – Çakıralan köyü çeşmesi mevki	$0,708 \pm 0,074$
Örnek 2.1.	Yeniköy TES'e 4,25 km, Kemerköy TES'e 9,59 km, Yatağan TES'e 28,74 km.	279 m.	Durağan gölet – Sekköy göleti	$0,029 \pm 0,003$
Örnek 2.2.	Yeniköy TES'e 3,53 km, Kemerköy TES'e 8,57 km, Yatağan TES'e 30, 26 km.	334 m.	Durağan dere – Milas-Ören yolu batısı isimsiz dere	$0,348 \pm 0,036$
Örnek 3.1.	Yatağan TES'e 3,06 km, Yeniköy TES'e 30,87 km, Kemerköy TES'e 39,73 km.	308 m.	Çay – Dipsiz çayı	$0,04 \pm 0,004$
Örnek 3.2.	Yatağan TES'e 4,51 km, Yeniköy TES'e 27,16 km, Kemerköy TES'e 35,07km.	380 m.	Çay – Bencik çayı	$0,092 \pm 0,010$

Cıva döngüsünden dolayı, dünyanın farklı bölgelerinde arka plan cıva emisyonları büyük farklılık göstermektedir. Bu nedenle bir alıcı ortam olan sedimentte uluslararası herhangi bir cıva sınır değeri henüz belirlenmemiştir. Yerkabuğunda 0,08 mg/kg, deniz suyunda 0,00003 mg/kg, havada 0,005–0,06 ng/m³, bitkilerde ise 0,001-0,3 mg/kg ortalama cıva bulunmaktadır, bunlar arka plan emisyonları olarak adlandırılır (NOAA, 1999). Ayrıca alıcı ortamın geçirgenliğine bağlı olarak özellikle su ve toprak ortamındaki arka plan cıva emisyonları farklılık gösterebilir. Tüm bu belirsizliklere rağmen NOAA (1999) sedimentteki cıva miktarı için bazı izleme eşikleri tavsiye etmiştir. Bunlar:

- Arka plan cıva seviyesi: 0,004 mg/kg - 0,051 mg/kg
- Eşik etki seviyesi: 0,174 mg/kg
- Muhtemel etki seviyesi: 0,486 mg/kg ve
- Üst etki eşiği: 0,560 mg/kg olarak belirlenmiştir.

Ayrıca ABD Çevre Koruma Ajansı da sedimentte toplam cıva konsantrasyonu için eşik değeri 0,18 mg/kg olarak belirlemiş, bunun üzerindeki konsantrasyonların insan sağlığını etkileyebileceğini bildirmiştir (EPA, 2006). Buna göre, Ahmetler göletinden alınan örnek 1.1., Çakıralan köyü çeşmesi mevkindeki durağan sudan alınan örnek 1.2. ve Milas-Ören yolu batısındaki isimsiz ve durağan dereden alınan örnek 2.2. NOAA ve EPA tarafından belirlenmiş eşik değerin üzerindedir insan sağlığı için riskli olabilir ve izleme gerekir. Ulusal yönetmeliklerimizde sedimentteki cıvaya ilişkin eşik değerler bulunmasa da, toprak kirliliğine ilişkin yönetmeliğimizde tarım topraklarındaki cıva miktarının 1 mg/kg (pH 5- 6 topraklarda) ile 1,5 mg/kg (pH >6 topraklar için) geçmemesi gerekir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2010). Alınan sediment örneklerinin hiçbirinde, topraklar için belirlenen bu eşik değerin üzerinde toplam cıva emisyonuna rastlanmamıştır.

4.1. Düşük Cıva Konsantrasyonlarının Değerlendirilmesi

Alınan altı numuneden en düşük cıva konsantrasyonlarına sahip noktalar sırasıyla 2.1., 3.1. ve 3.2. numaralı örneklerdir. Örnek 3.1. ve 3.2.'si akarsulardan alınmıştır ve sedimentteki cıva konsantrasyonları sırasıyla 0,04 mg/kg ve 0,092 mg/kg'dır. Akarsulardaki cıva emisyonlarının, durağan sulara kıyasla daha düşük olması yaygın bir durumdur. Akarsu sedimentlerindeki arka plan cıva emisyonları ABD'de 0,05 mg/kg, Kanada'da 0,10 mg/kg olarak tespit edilmiştir (Grosbois, 2001). Buna göre 3.1. ve 3.2. numunelerindeki cıva konsantrasyonlarının,

akarsulardaki arka plan cıva emisyonlarıyla uyumlu olduğu, ek bir kirlilik yükü göstermediğini söylemek mümkündür.

Diğer yandan 2.1. numaralı örnek santralde kullanılan kömür ve kireçtaşının çıkarıldığı bölgeye yakın durağan bir göletten alınmıştır. Meteorolojik koşullar dolayı santralin cıva emisyonları buraya çökmese bile kömür madenciliğinin bölgeyi etkileyebileceği düşünüldüğünde, gölün derin noktalarından örnekleme yapılamaması bir neden olarak düşünülebilir. Cıva yapısı gereği çökme eğilimindedir. Ancak 2.1. numaralı örnekte kıyı sedimentlerinden örnek alınmıştır. 2.1. numaralı örnekleme alanının daha derinlerinden alınacak sediment örneklerinde cıva konsantrasyonları daha yüksek çıkabilir. Diğer bir olasılık da 2.1. numaralı örneğin alındığı sedimentteki kayaçların ve çamurun geçirgenliğinin diğer numune bölgelerinden daha farklı olmasıdır.

4.2. Yüksek Cıva Konsantrasyonlarının Değerlendirilmesi

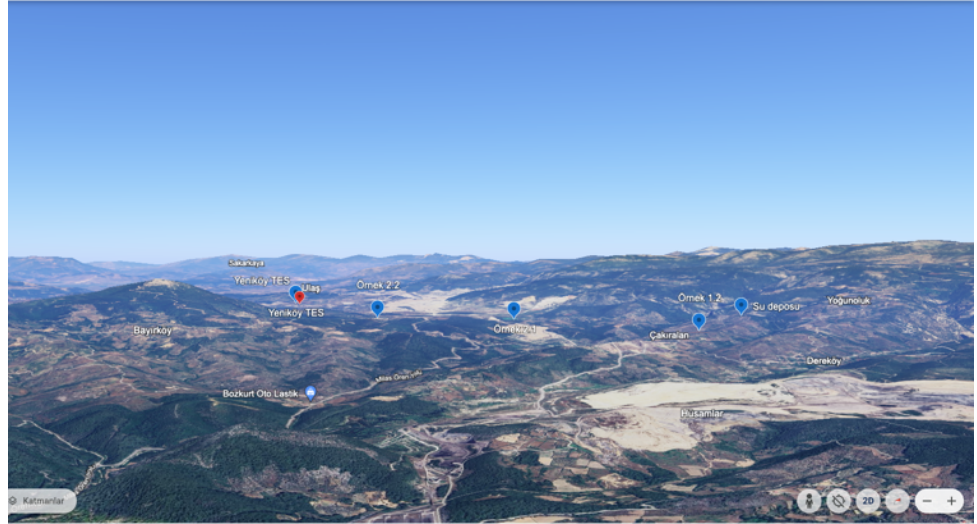
Minamata Körfezi'ndeki cıva felaketinin sonrasında sedimentte cıva temizleme çalışması yürütülmüş ve böylece sudaki cıva emisyonlarının da azaltılması amaçlanmıştır. Bu çalışmalar sonrasında Nakata ve arkadaşları (2007) tarafından bir yapılan bir çalışmada Minamata Körfezi ve Yatsushiro denizinde sedimentteki cıva miktarı ortalama 0,28 mg/kg ve en yüksek cıva miktarı 3,37 mg/kg'dır. Alınan altı numuneden en yüksek cıva kirliliğine sahip noktalar sırasıyla 1.2., 1.1. ve 2.2. numaralı örneklerdir. Bu örneklerdeki cıva miktarı Minamata Körfezi'nde 2020 yılındaki ortalama cıva konsantrasyonlarının üzerindedir.

Bu durum örnek 1.1. ve örnek 2.2.'in santrallerin kül atık sahalarının doğrudan süzüldüğü göletlerden alınmasından kaynaklı olabilir. Örnek 1.1. Yeniköy TES'in kül depolama sahasının içinden doğan Ahmetler deresinin aktığı Ahmetler göletinden alınmıştır, sedimentteki cıva konsantrasyonu 0,547 mg/kg'dır. Örnek 2.2. Kemerköy TES'in kül depolama sahasının yanındaki su toplama barajının yanında isimsiz dereden alınmıştır, cıva konsantrasyonu 0,348 mg/kg'dır ve bu derenin su toplama barajıyla etkileşim halinde olduğu bilinmektedir. Minamata Sözleşmesi'nin taraflarından biri olan Japonya'nın 2019 yılında sunduğu bilgiye göre, kömür yakıtlı santrallerin yakım süreci sonunda açığa çıkan külde 0,1 - 1 mg/kg cıva bulunmaktadır (Minamata Convention, 2019). Ayrıca bu tezin hesaplamalarına göre santralin ıslak yıkayıcılarında, kükürt giderme tesislerinde ve diğer prosesleri sonucu çıkan atık çamurunda 10 mg/kg cıva bulunması beklenmektedir. İncelenen üç santralde de atık çamurun bertaraf edilmesine ilişkin

bilgiye erişilemediğinden, bu bilgiyi doğrular bir analiz yapmak zordur ancak kül barajlarına yakın bu iki noktada sedimentteki cıva miktarı, Japonya'daki bilgiyi doğrular durumdadır.

Örnek 1.2.'deki yüksek konsantrasyonun nedeni ise daha yüksek rakımlarda cıva ile kirlenmiş su kaynağının nihai olarak aktığı bir su ortamı olmasından veya buradaki su miktarının ölçüm yapılan 20 gün içinde dahi çok azalmış olmasından kaynaklanıyor olabilir. Aynı neden örnek 2.2. ile de ilişkilendirilebilir. Toplam cıva emisyonlarının en yüksek çıktığı 1.2. numaralı (0,708 mg/kg) ve 2.2. numaralı (0,348 mg/kg) bölgelerden alınan numuneler, diğer örnekleme noktalarına göre çok daha sığ sulardan toplanmıştır. Numune 1.2.'nin alındığı Çakıralan köyü çeşmesinin hemen yanındaki durağan ince su akıntısının en derin kısmı 10 cm'i, örnek 2.2.'nin alındığı Milas-Ören yolu batısında Kemerköy TES'in kül barajının yakınında kalan isimsiz derenin en derin kısmı 20 cm'i geçmemektedir. Cıva yapısı gereği çökelme eğiliminde olduğundan, bu iki noktada cıva emisyonlarının en yüksek çıkması beklenen yerlerden örnek alınabilmektedir.

Aynı zamanda 1.2. numaralı örnekte cıva konsantrasyonun bu denli yüksek çıkması (0,708 mg/kg) hem örneklenen alanın yapısı hem de insan sağlığı açısından düşündürücüdür. Suyun süzüldüğü bölgede cıva emisyonlarını azaltmak için bir süzgeç görevi gören çok sayıda yosun ve liken bulunmakta ayrıca su akıntısının yanındaki çeşmeden insanlar ve hayvanlar su tüketmektedir. Hem çeşme hem de su akıntısının kaynağı Şekil 4-1'inde gösterilen ve daha yüksek rakımdaki su deposu bölgesi olabilir. Bu bölgede insan yerleşimi bulunmamaktadır ancak 414 metre rakımındaki bu bölge meteorolojik koşullar nedeniyle santrallerdeki cıva kirliliğinin yoğunlaştığı bir nokta olabilir. Myllyvirta'nın (2019) havadaki cıva dağılım modellemesi bu farklılığı görmemize olanak verecek yüksek çözünürlükte bir sonuç sağlamadığından (Şekil 3.1-3) yorum yapmak zordur. Türkiye'de topraktaki cıva emisyonunun üst sınır değeri 1 mg/kg (pH 5-6 topraklar için) olarak belirlenmiştir (Bkz. Çizelge 4.2-1). Özellikle 2.1. numaralı örnekleme noktası gibi cıva konsantrasyonlarının yüksek olduğu bölgelerde daha fazla çalışmaya ihtiyaç bulunmaktadır.



Şekil 4-1 Örnek 1.2'nin, daha yüksek rakımdaki su deposunun ve Yeniköy TES'in konumu (konumu (Google Earth, 2024).

4.3. Sağlık Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu tezin amacı dünyadaki en büyük ikinci antropojenik cıva kaynaklarını, kömür yakıtlı elektrik santrallerini analiz etmek, insan sağlığına etkilerini incelemek ve örneklerle ortaya koymaktır. Kömür yakıtlı santrallerden kaynaklanan cıvanın sağlık etkilerinin hesaplanmasında en çok yaygın olarak kullanılan metodoloji, havadaki elemental cıvanın çocukların bilişsel gelişimindeki etkisidir. Bu tez kapsamında da bu yöntem ülkemizde ilk defa Muğla'da yer alan üç santrale uygulanarak diğer araştırmacılara örnek olması amaçlanmıştır. Ayrıca santrallerin etrafındaki su ve sediment örnekleri incelenerek, alıcı ortamların santrallerden nasıl etkilendiği anlaşılmaya çalışılmıştır.

İşletmecilerin beyanlarına göre Muğla'daki Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy termik santrallerinde elektrik üretimi amaçlı yılda yaklaşık 17 milyar ton kömür kullanılmaktadır. Bu kömürlerin cıva içeriği 0,123 ppm – 0,18 ppm arasında değişmektedir. Bir mühendislik / istatistikî tahmin yöntemi olan kütle- denge yöntemine göre, üç santralde yılda toplam 2,36 ton cıva açığa çıkmakta, bu cıvanın yaklaşık %44'ü santrallerin elektrostatik filtreleri, ıslak kireçtaşı yıkayıcılarında tutulmakta ve pulverize yakma sistemlerine sahip üç santralin dip külünde kalmaktadır. Bu sistemlerde tutulamayan 1,04 ton cıvanın ise atmosfere buhar formundaki elemental cıva ve reaktif cıva olarak salındığı tezin sonuçlarına göre bulunmuştur. Tezin bulguları Myllyvirta'nın (2019) önceki çalışmaları ve cıvanın havadaki dağılım modellerine uygundur.

Santralden çıkacak bu cıva emisyonlarının yaklaşık yarısı santrallerin etrafında, Muğla bölgesinde etki gösterecek, canlılar tarafından solunarak doğrudan sağlık sorunlarına yol açacaktır. Bölgeye çökelen cıva ardından özellikle su ortamında biyolojik tepkimelere girerek metil cıva formuna dönüşecek, su ve gıda alımı yoluyla bir kez daha sağlık sorunlarına yol açacaktır. Cıvaya özellikle küçük yaşta maruz kalan bireyin bilişsel geriliği yaşamı boyunca devam etmektedir. Bu bilişsel kayıp, bireyin maddi kazançtan potansiyel kayıplar yaşamasına neden olmaktadır. Bu ilkeye dayalı fayda-maliyet modeline göre, Muğla'daki üç santralden yılda açığa çıkacak olan 1,04 ton cıva doğrudan sağlık etkileriyle 1.361 IQ puanı ve buna bağlı 2 milyar 117 bin dolar ekonomik kayıp anlamına gelmektedir. Bu fayda-maliyet hesabı, santrallerden çıkan cıvanın organik cıva formuna dönüşüp oral yoldan neden olacağı sağlık maruziyetini içermemektedir. Cıvanın insan sağlığı üzerindeki etkisini değerlendirmek için tüketilen balıktaki cıva miktarı üzerinden çıkarımda bulunan istatistik modeller de bulunmaktadır (Mao et al., 2023). Ancak tez kapsamında örnekleme yapılan alanlarda balıkçılık faaliyetleri olmadığı için, bu hesaplama dahil edilmemiştir.

Cıvanın ölçümü ve kirlilik dağılımı modellemesinin yapılması son derece zordur. Dolayısıyla cıva üzerine fayda-maliyet analizleri de güncel çalışmalardır. Cıva konusundaki araştırmalar arttıkça, sağlık sorunları daha görünür ve hesaplanabilir olacaktır.

5. ÖNERİLER

Cıva, bir kez su ortamına girdiğinde biyolojik süreçler sonucunda, bir nörotoksin olan metil cıvaya dönüşür. Dolayısıyla sedimentteki cıva hem suların hem de insan sağlığının bir göstergesidir. Sedimentteki cıva miktarı ve dağılımı, metil cıva seviyeleri ve biyobirikim potansiyeli ile ölçülerek, insan ve çevre sağlığı üzerine daha fazla bilgi verebilir. Bu nedenle sedimentten ve sudan cıva analizinde mümkünse kirlilik dağılım modellemesinin yapılması kirliliğin takip edilmesinde kolaylık sağlayacaktır. Ayrıca farklı sediment derinliklerinden ve akarsu ortamından yapılacak örneklemelerde akarsuyun farklı kollarından, farklı rüzgar ve yağış karakterlerini gösteren günlerde örnekleme yapılması yine kirliliğin takibi için önemlidir. Ayrıca sediment örnekleme yapılırken (özellikle partiküler cıvanın suda dağılmasını engellemek için) sonraki araştırmacılar silindirik numune kapları kullanmayı göz önünde bulundurabilir.

Kömür yakıtlı santrallerden kaynaklı cıva büyük oranda santral bacalarından atmosfere salınmaktadır. Ayrıca havadaki cıva konsantrasyonunun insan sağlığı üzerine etkilerini değerlendirebileceğimiz metodolojiler hali hazırda bulunmaktadır. Bu nedenle havadan cıva emisyonu ölçümü teknolojilerinin yaygınlaşması, bu tezin ana argümanının doğrudan deneylerle test edilmesini de sağlayacaktır.

Diğer yandan, santrallerin mühendislik ve istatistik tahmin yöntemlerine ihtiyaç bırakmadan, hava kirleticisi emisyonlarının yanı sıra cıva emisyonlarını da şeffaf olarak raporlaması en iyi çözümdür. Bu sayede fayda – maliyet analizlerinin yapılabilir, ABD örneğindeki gibi cıva sınır değerleri bu fayda – maliyet analizlerine göre tekrar gözden geçirilebilir ve enerji politikalarında sadece işletme maliyetlerinin değil, dışsal maliyetlerin de göz önünde tutulduğu, ayakları yere basan tartışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- AB**, 2017, Establishing best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council, for large combustion plants, 82p.
- AB**, 2000, Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy, Official Journal of the European Communities, 73p.
- AÇA**, 2018, Mercury in Europe's environment A priority for European and global action, 72p.
- AÇA**, 2018, European waters: Assessment of status and pressures 2018, 90p.
- AÇA**, 2020, Air quality in Europe 2020 report, 164p.
- AÇA**, 2024, Air pollutant emissions data viewer <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-pollutant-emissions-data-viewer-5> (Erişim tarihi: 5 Mart 2024).
- Akçan, B. ve Dursun, O.**, 2008, Cıva Zehirlenmeleri, *Güncel Pediatri*, 6(3):72-75s.
- Aktaş, Z. ve Yağmur, E.**, Atomik absorpsiyon spektroskopisi, Ankara Üniversitesi Açık Ders Malzemeleri, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/60967/mod_resource/content/0/AAS.pdf (Erişim tarihi: 3 Mayıs 2024).
- Al-Sulaiti, M.M., Soubra, L., and Al-Ghouti, M.A.**, 2022, The causes and effects of mercury and methylmercury contamination in the marine environment: A review, *SCurr Pollution Rep* 8:249-272p.
- ANAP and UNEP**, 2019. Technical background report for the global mercury assessment 2018. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway/UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch, Geneva, Switzerland, 430p.
- Aoyama, M.**, 2016, Minamata: Disability and the Sea of Sorrow, Occupying Disability: Critical Approaches to Community, Justice, and Decolonizing Disability, P.Block, D.Kasnitz, A.Nishida, and N.Pollard (Eds.), *Springer*, Dordrecht, 31-45p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Arkeofili**, 2021, “Bilinen En Eski Cıva Zehirlenmesi İberya’da Keşfedildi”, <https://arkeofili.com/bilinen-en-eski-civa-zehirlenmesi-iberyada-kesfedildi/> (Erişim tarihi: 10 Ocak 2024).
- ATSDR**, 2022, “Toxicological Profile for Mercury”, <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=115&tid=24> (Erişim tarihi: 10 Ocak 2024).
- Avrupa Komisyonu**, 2023, AB Dışındaki Tesis Operatörleri İçin CBAM Uygulamasına İlişkin Kılavuz Belge.
- Aytaç O.**, 2018, Kömür yakıtlı santrallerde yakma kaynaklı hava kirletici salımların giderilmesi ve azaltımı için genel teknikler, *Makine Mühendisleri Odası, Mühendis ve Makine dergisi*, 11s.
- Aytaç O.**, 2018, Kömür yakıtlı termik santrallerin baca gazındaki kirleticiler, izin verilen salım sınır değerleri, ülkemizdeki santrallerdeki baca gazı arıtma tesislerinin güncel durumu, *Mühendis ve Makine*, 15s.
- Bahadır Z.**, 2020, Atık Su Örneklerinde Bazı Ağır Metallerin İndüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi (ICP-MS) ile Belirlenmesi, *Anadolu Çevre ve Hayvancılık Bilimleri Dergisi*, 5(1): 56-60s.
- Bakir F., Damluji S.F., Amin-Zaki L., Murtadha M., Khalidi A., Al-Rawi N.Y., Tikriti S., Dahahir H.I., Clarkson T.W., Smith J.C., and Doherty R.A.**, 1973, Methylmercury poisoning in Iraq, 181, 230-241p.
- Barrett J. R.**, 2010, An uneven path forward: the history of methylmercury toxicity research, *Environmental Health Perspectives*, 118(8): A352, 1-2p.
- Bennett E.**, 1948, Almadén – world’s greatest mercury mine, *Mining Metallur.*, 29, 6p.
- Bigham G., Wanyu C., Manuel D., and Reza A.**, 2008, Indoor Concentrations of Hg Vapor Following Various Spill Scenarios, *Environmental Forensics*, 9(2-3):187-196p.
- Brinkmann T., Both R., Scalet B. M., Roudier S., and Delgado Sancho L.**, 2018, JRC reference report on monitoring of emissions to air and water from IED installations, European Union, 196p.
- CEIP**, “European Monitoring and Evaluation Programme Data Viewer”, <https://www.ceip.at/data-viewer> (Erişim tarihi: 18 Mart 2024).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cohen, M., Artz, R., and Draxler, R., 2007**, Report to Congress: Mercury Contamination in the Great Lakes, National Oceanic and Atmospheric Administration, 166p.
- CREA, 2021**, “Comparison of Coal Power Plant Emissions Standards”, <https://energyandcleanair.org/comparison-of-coal-power-plant-emissions-standards/> (Erişim tarihi: 23 Nisan 2024).
- Codex Alimentarius Commission, 2018**, General standard for contaminants and toxins in food and feed, CXS 193-1995.
- Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2013**, Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete Tarihi: 12.08.2013 Resmi Gazete Sayısı: 28733.
- ÇŞİDB, 2004** Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Resmi Gazete Tarihi: 31.12.2004, Resmi Gazete Sayısı: 25687.
- ÇŞİDB, 2011**, Sürekli Emisyon Ölçüm Sistemleri Tebliği.
- ÇŞİDB, 2022**, Sürekli Emisyon Ölçüm Sistemleri Tebliği ile ilgili duyuru, <https://webdosya.csb.gov.tr/db/lab/duyurular/seos-duyurusu---01-temmuz-2022-20220701135135.pdf> (Erişim tarihi: 3 Mayıs 2024).
- ÇŞİDB, 2024**, “Avrupa Kirlетici Salınım ve Taşıma Kaydı (E-PRTR)”, <https://webdosya.csb.gov.tr/db/kstk/editordosya/eprtr.pdf> (Erişim tarihi: 18 Mart 2024).
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2009**, Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, Resmi Gazete, 03.07.2009, Sayı: 27277.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2010**, Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik, Resmi Gazete Tarihi: 08.06.2010 Resmi Gazete Sayısı: 27605.
- Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2022**, “Ülkemiz cıvaya ilişkin Minamata Sözleşmesine resmen taraf oldu”, <https://kimyasallar.csb.gov.tr/ulkemiz-civaya-iliskin-minamata-sozlesmesine-resmen-taraf-oldu/361> (Erişim Tarihi: 18 Mart 2024).
- DSÖ, 2003**, Mercury in Drinking-water, Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality, 18p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- DSÖ**, 2017, “Mercury and Health”, <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health> (Erişim 1 Şubat 2024).
- DSÖ**, 2017, Guidelines for drinking-water quality 4th edition, incorporating the 1st addendum, 631p.
- DSÖ**, 2021, Preventing disease through healthy environments: Exposure to mercury: A major public health concern, 5p.
- DSÖ and UÇÖ**, 2019, “International Chemical Safety Cards (ICSCs)”, <https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.home> (Erişim tarihi: 17 Mart 2024).
- EBC, Climate Action Network and SEFIA**, 2021, Karbon Nötr Türkiye Yolunda İlk Adım: Kömürden Çıkış 2030, 43p.
- European Commission**, 2011, Thematic Strategy for Soil Protection, 12p.
- EEB**, 2021, “German government and Green regions are letting the lignite industry decide on air pollution standards for power plants”, <https://eeb.org/german-government-and-green-regions-are-letting-the-lignite-industry-decide-on-air-pollution-standards-for-power-plants/> (Erişim Tarihi: 10 Mart 2024).
- Ember**, “Yearly Electricity Data” <https://ember-climate.org/data-catalogue/yearly-electricity-data/> (Erişim tarihi: 28 Mart 2024)
- Ember**, “Türkiye Electricity Review 2024”, <https://ember-climate.org/tr/analizler/ara%C5%9Ft%C4%B1rma/turkiye-elektrik-gorunumu-2024/> (Erişim tarihi: 23 Mart 2024)
- EPA**, 2000, Guidance for industry: Action levels for poisonous or deleterious substances in human food and animal feed, 20p.
- EPA**, 2002, Control of mercury emissions from coal-fired electric utility boilers, 15p.
- EPA**, 2002, Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites, Office of Emergency and Remedial Response, 187p.
- EPA**, 2006, Freshwater Sediment Screening Benchmarks, Washington DC, 1–6p.
- EPA**, 2015, Method 3051A Microwave Assisted Acid Digestion Of Sediments, Sludges, Soils, And Oils, 30p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- EPA**, 2015, Method 200.8 Determination Of Trace Elements In Waters And Wastes By Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry, Revision 5.4 EMMC Version, 57p.
- EPA**, 2011, Mercury and air toxics standards (MATS) for power plants, United States Environmental Protection Agency.
- EPA**, 2011, Regulatory Impact Analysis for the Final Mercury and Air Toxics Standards, U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 510p.
- EPA**, 2020, National Primary Drinking Water Regulations.
- EPA**, 2023, “EMC- Continuous Emission Monitoring Systems”, <https://www.epa.gov/emc/emc-continuous-emission-monitoring-systems> (Erişim: 10 Mayıs 2024).
- EPDK**, “Elektrik Üretim Lisansları Özet Sorgulama”, <https://www.epdk.gov.tr/> (Erişim: 9 Nisan 2024).
- EPIAŞ**, “Şeffaflık Platformu”, <https://seffaflik.epias.com.tr/home> (Erişim tarihi: 25 Mart 2024).
- Erkekoğlu, P., ve Kadioğlu, E.**, 2013, Cıva zehirlenmesi ve tedavisi, Türk Toksikoloji Derneği, Toksikoloji Bülteni, 37:6-9s.
- Ersoy Ö., Özbay M., Çetinkaya Karafakı F. ve Erol D.**, 2017, The environmental importance of flue gas purification systems; case of Yatağan thermal power station, *Politeknik Dergisi*, 20(3): 571-57 p.
- ETKB**, “Elektrik Bilgi Merkezi”, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (Erişim tarihi: 20 Mart 2024).
- Gacal, F., Gierens, R., Myllyvyrta, L., and Stauffer, A.**, 2021, Chronic Coal Pollution Turkey: The health burden caused by coal power in Turkey and how to stop the coal addiction, Health and Environment Alliance (HEAL), 52p.
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Carocci, A., Lauria, G., and Catalano, A.**, 2012, Mercury Exposure and Heart Diseases, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 44:169-177p.
- Glodek, A., and Pacyna, J. M.**, 2009, Mercury emission from coal-fired power plants in Poland, *Atmospheric Environment*, 43(35), 566-567p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- GMOS**, 2024, “Global Mercury Observation System”, <https://www.gmos.eu/> (Erişim tarihi: 18 Nisan 2024).
- Gochfeld, M.**, 2003, Cases of mercury exposure, bioavailability, and absorption, *Ecotox. Environ. Safety.*, 56:174-179p.
- Goldwater, L.J.**, 1972, Mercury – A history of quicksilver, York Press, Baltimore, Maryland, 318p.
- Google**, 2024, Google Earth, <https://www.google.com/earth/> (Erişim tarihi: 18 Mayıs 2024).
- Grosbois C.A., Horowitz A.J., Smith J.J. and Elrick K.A.**, 2001, The effect of mining and related activities on the sediment trace element geochemistry of Lake Coeur d’Alene, Idaho, USA. Part III. Downstream Effects: The Spokane River Basin, *Hydrol. Process.*, 875:855–875p.
- Gupta, S., Barlow, M., and Donaldson, S.**, 2005, Exposure and human health effects, in mercury: Sources, measurements, cycles, and effects, Mineral Assoc. Canada, Short Course 34, 259-286p.
- Gustin, M. S., Amos, H. M., Huang, J., Miller, M. B., and Heidecorn, K.**, 2015, Measuring and modeling mercury in the atmosphere: A critical review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(10), 5697-5713p.
- Gutierrez, A., and McCurdy, E.**, 2020, “An introduction to ICP-MS”, LabTube. <https://www.labtube.tv/video/MTA3NjMz> (Erişim tarihi 24 Aralık 2023).
- N. Güleç, B. Günal and A. Erler**, 2020, Assessment of soil and water contamination around an ash-disposal site: a case study from the Seyitömer coal-fired power plant in western Turkey, *Springer-Verlag, Environmental Geology* 40 (3): 331-344p.
- Harada, M., Akagi, H., and Fujiki, M.**, 2014, Reevaluation of Minamata Bay, 25 years after the dredging of mercury-polluted sediments, *Marine Pollution Bulletin*, 89 (1-2): 112-120p.
- Hayhurst, E.R., and Dysart, N.C.**, 1925, Industrial hygiene, *American Journal of Public Health*, 15(6):567p.
- Holbach, Paul Henri Dietrich, baron d'**, 2011, Mercure, Mercury, *The Encyclopedia of Diderot & d'Alembert Collaborative Translation Project*. (Çev. M. Greene and R.Marion), Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, 1765, Paris, 10:371–374p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hursh, J.B., Clarkson, T.W., Miles, E.F., and Goldsmith, L.A.,** 1989, Percutaneous absorption of mercury vapor by man, *Archives of Environmental Health*, 44:120-127p.
- IPCS,** 2003, Elemental Mercury and Inorganic Mercury Compounds: Human Health Aspects, Concise International Chemical Assessment Document 50, *WHO Library Cataloguing-in-Publication Data*, ISBN 92 4 153050 2, 1-68p.
- IPEN,** 2016, Guidance on the identification, management and remediation of mercury contaminated sites, 1-80p.
- Kari, P.,** 2019, Amalgam toksikolojisi ve insan sağlığı üzerine etkileri, Ankara Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, 1-12s.
- Lerman-Sinkoff, S. T.,** 2014, Transport and fate of historic mercury pollution from Danbury, CT through the Still and Housatonic rivers, 1-90p.
- Li, Z., Duan, Y., Wang, Y., Huang, Z., Meng, S. and Shen, J.,** 2013, Mercury removal by ESP and WFGD in a 300 MW coal-fired power plant, *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 41(04):491-498p.
- Li, Y., Yu, J., Liu, Y., Huang, R., Wang, Z., and Zhao, Y.,** 2022, A review on removal of mercury from flue gas utilizing existing air pollutant control devices, *Journal of Hazardous Materials*, 427, ISSN 0304-3894, 120-126p.
- Linak, W. P., Ryan, J. V., Ghorishi, B. S., and Wendt, J. O. L,** 2001, Issues related to solution chemistry in mercury sampling impingers, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 51(5):688–698p.
- Manogna, K. Sai.,** 2021, Atomic absorption spectroscopy, Microscopia IWM.
- Mao, L., Ren W., Liu X., He M., Zhang B.T., Lin C. and Ouyang W,** 2023, Mercury contamination in the water and sediments of a typical inland river – Lake basin in China: Occurrence, sources, migration and risk assessment, *Journal of Hazardous Materials*, 446: 4-7p.
- Meij, R.,** 1991, The fate of mercury in coal-fired power plants and the influence of wet flue-gas desulphurization, *Water Air and Soil Pollution*, 56(1): 21-33p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Meij, R., Vredenburg, L.H.J. and Winkel, H.,** 2002, The Fate and Behavior of Mercury in Coal-Fired Power Plants, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52(8):912-917p.
- Minamata Convention,** 2019, Information relevant to thresholds for mercury wastes. 6p.
- Minamata Convention,** “Background levels V. Laperche – BRGM- France”, https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/submission_from_government/Backgroundlevel-ASGM.pdf (Erişim tarihi 10 Temmuz 2024).
- Myllyvirta L.,** 2019, Assessing the air quality, toxic and health impacts of the Mugla coalfired power plants, The real cost of coal Muğla, D.Gümüsel and E.Gündüzyeli (Eds.), CAN-Europe, 18-40p.
- Nakata, H., Shimada, H., Yoshimoto, M., M., Narumi, R., Akimoto, K., Yamashita, T., Matsunaga, T., Nishimura, K., Tanaka, M., Hiraki, K., Shimasaki, H., Takikawa, K.,** 2008, Concentrations and Distribution of Mercury and Other Heavy Metals in Surface Sediments of the Yatsushiro Sea including Minamata Bay, Japan. *Bull Environ Contam Toxicol* 80: 78–84p.
- Nierenberg, D.W., Nordgren, R.E., Chang, M.B., Siegler, R.W., Blayney, M.B., Hochberg, F., Toribara, T.Y., Cernichiari, E., and Clarkson, T.,** 1998, Delayed cerebellar disease and death after accidental exposure to dimethylmercury, *New England Journal of Medicine*, 338: 1672-1676p.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration),** 1999, NOAA SQRTS: Screening Quick Reference Tables, *Hazmat Report*, 1-12p.
- Nordberg, G., Brune, D., Gerhardsson, L., Grandjean, P., Vesterberg, O., and Wester, P. O.,** 1992, The ICOH and IUPAC international programme for establishing reference values of metals, *The Science of the Total Environment*, 120(1-2):17–21p.
- Nriagu, J. O.,** 1983, Lead and Lead Poisoning in Antiquity, *Wiley-Interscience*.
- OSHA,** 2006, Occupational exposure to hazardous chemicals in laboratories.
- Özbolat, G., ve Tuli, A.,** 2016, Ağır Metal Toksisitesinin İnsan Sağlığına Etkileri, *Arşiv Kaynak Tarama Dergisi*, 25(4): 502-521s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pacyna, J.M., and Münch, J.,** 1991, Anthropogenic mercury emission in Europe, *Water Air and Soil Pollution*, 56(1), 51–61p.
- Park, J. D. and Zheng, W.,** 2012, Human exposure and health effects of inorganic and elemental mercury, *J Prev Med Public Health*, 45(6):344-52p.
- Parsons, M., and Percival, J,** 2005, A brief history of mercury and its environmental impact, 3-8p.
- Pavlish, J.H., Sondreal, E.a., Mann, M.D., Olson, E.S., Galbreath, K.C., Laudal, D.L., and Benson, S.A.,** 2003, Status review of mercury control options for coal-fired power plants, *Fuel Processing Technology*, 82, 89–165p.
- Putman, J.J.,** 1972, Quicksilver and slow death, *Natl. Geogr.*, 142: 506-527p.
- Prestbo, E.M., and Bloom, N.S.,** 1995, Mercury speciation adsorption (MESA) method for combustion flue gas: Methodology, artifacts, intercomparison, and atmospheric implications, *Water, Air, and Soil Pollution*, 80(1-4), 145–158p.
- Rodríguez-Viso P., Domene A., Vélez D., Devesa V., Monedero V. and Zúñiga M.,** 2022, Mercury toxic effects on the intestinal mucosa assayed on a bicameral in vitro model: Possible role of inflammatory response and oxidative stress, *Food and Chemical Toxicology* (166)1-12p.
- Sağlık Bakanlığı,** 2005, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete Tarihi: 17.02.2005 Resmi Gazete Sayısı: 25730.
- Schindler, B. K., Esteban, M., Koch, H. M., Castano, A., Koslitz, S., Cañas, A., Casteleyn, et al.,** 2014, The European COPHES/DEMOCOPHES project: towards transnational comparability and reliability of human biomonitoring results, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 217(6), 653-661p.
- Spectroscopy Online,** 2021, “Measurement techniques for mercury”, <https://www.spectroscopyonline.com/view/measurement-techniques-mercury-which-approach-right-you> (Erişim tarihi: 28 Mayıs 2024).
- Şanal, B.,** 2023, “ICP OES tekniği ve uygulama prensipleri”, Lab Akademi Dijital Eğitim Platformu, <https://www.youtube.com/watch?v=16TU7T8x7RQ> (Erişim tarihi 24 Aralık 2023, YouTube).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tchounwou, P. B., Ayensu, W. K., Ninashvili, N., and Sutton, D.,** 2003, Environmental exposure to mercury and its toxicopathologic implications for public health, *Environmental Toxicology*, 18(3):149–175p.
- Teledyne Leeman Labs,** 2021, “What is Cold Vapor Atomic Absorption Spectroscopy”, <https://info.teledyneleemanlabs.com/blog/what-is-cold-vapor-atomic-absorption-cvaa-spectroscopy> (Erişim tarihi: 28 Mayıs 2024).
- Tewalt, S.J., Belkin, H.E., SanFilipo, J.R., Merrill, M.D., Palmer, C.A., Warwick, P.D., Karlsen, A.W., Finkelman, R.B., and Park, A.J.,** 2010, Chemical analyses in the world coal quality Inventory, version 1: U.S. Geological Survey Open-File Report.
- Trasande, L., Landrigan, P. J., and Schechter, C.,** 2005, Public health and economic consequences of methyl mercury toxicity to the developing brain, *Environmental Health Perspectives*, 113(5).
- Tresca, C., Profeta, G., Marini, G., Bachelet, G. B., Sanna, A., Calandra, M. and Boeri, L.,** 2022, Why mercury is a superconductor, *American Physical Society*, 1-6p.
- TÜİK,** 2022, “Kati Yakıtlar Aralık 2022”, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Kati-Yakitlar-Aralik-2022-49693> (Erişim Tarihi: 20 Mart 2024).
- Türk Gıda Kodeksi,** 2018, Gıda Katkı Maddelerinin Spesifikasyonları Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı, Resmi Gazete Tarihi: 12 Haziran 2018, Resmi Gazete Sayısı: 30449.
- Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu,** 2023, Kozmetik Ürünler Yönetmeliği, Resmi Gazete Tarihi: 08.05.2023 Resmi Gazete Sayısı: 32184.
- Ullrich, S.M., Ilyushchenko, M.A., Kamberov, I.M., and Tanton, T.W.,** 2007, Mercury contamination in the vicinity of a derelict chlor-alkali plant. Part I: Sediment and water contamination of Lake Balkyldak and the River Irtysh. *Sci. Total Environ.* 381, 1–16p.
- UNEP,** 2011, Reducing Mercury Emissions from Coal Combustion in the Energy Sector, Prepared for the Ministry of Environment Protection of China and UNEP Chemicals by the Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 10-60p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- UNEP, 2019, Global Mercury Assessment 2018, UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch Geneva, Switzerland, 5-55p.
- UNEP, 2019, Guidance on best available techniques and best environmental practices, 15-180p.
- UNEP, 2023, Minamata Convention on mercury, “Text and annexes”, <https://minamataconvention.org/en/about/timeline> (Erişim Tarihi: 15 Nisan 2024).
- Yatağan Termik Santrali**, “Yatağan Termik Santrali Hakkında”, <https://www.yatagantermik.com.tr/hakkimizda> (Erişim: 12 Haziran 2024).
- Yılmaz, Ş., 2017**, Türkiye’de Termik Santrallerin Detaylı Dökümü (Envanteri) ve Santraller Hakkında Genel Bilgiler, Türkiye’de Termik Santraller A.Orhan (Der.), Makine Mühendisleri Odası Yayınları, 167-195s, ISBN: 978-605-01-1018-0.
- YK Enerji**, “Yeniköy Linyit Maden İşletmesi”, <https://ykenerji.com.tr/yenikoy-lynyit-maden-isletmesi> (Erişim: 12 Haziran 2024).
- YK Enerji**, “Kemerköy Termik Santrali”, <https://ykenerji.com.tr/kemerkoy-termik-santrali> (Erişim: 12 Haziran 2024).
- Yudovich, Y.E., and Ketris, M.P.**, 2005, Mercury in coal: A review. *Geochemistry. International Journal of Coal Geology*, 62, 107–134p.
- Yokoyama, H.**, 2018, Lecture on Methylmercury Poisoning in Minamata, Mercury Pollution in Minamata, *SpringerBriefs in Environmental Science*, 5-51p.
- Yolcubal A.**, 2022, Kömür madenciliği ve termik santrallerin hidrojeolojik etkileri: Milas örneği, TEMA Vakfı, 13-60s.
- Zhao, Y., Wang, S., Duan, L., Lei, Y., and Hao, J.**, 2006, Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: Current status and future prediction, *Atmospheric Environment*, 40(21).
- Zhao S., Duan Y., Chen L., Li Y., Yao T., Liu S., Liu M., Lu J.**, 2017, Study on emission of hazardous trace elements in a 350 MW coal-fired power plant, 229, 863-870p, ISSN 0269-7491.
- Wang, Q., Liu, Z., Zhang, J., and Sun, W.**, 2000, Study on pulverized coal combustion and NO_x emission characteristics in a down-fired boiler, *Energy*, 25(8), 755-770p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wedeen, R.P.**, 1989, Were the hatters of New Jersey mad, *American Journal of Industrial Medicine*, 16: 225-233p.
- Wang, Y., Duan, Y., Yang, L., Zhao, C., Shen, X., Zhang, M., Zhuo, Y., and Chen, C.**, 2009, Experimental study on mercury transformation and removal in coal-fired boiler flue gases, *Fuel Processing Technology*, 90(5), 643-651p, ISSN 0378-3820.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecimin ilk günlerinden tezimin sonuna kadar tüm süreçlerde desteğini esirgemeyen tez danışmanım sevgili Prof. Dr. Nur Aksuner'e öncelikle teşekkür etmek isterim. Prof. Aksuner'in bilgisinin yanı sıra iletişimi ve akademik sürecimdeki desteği bu yüksek lisans tezinin en büyük kazanımlarından biri oldu.

Tezin özellikle deneysel bölümündeki bilimsel tartışmalara katkı veren Muğla Sıtkı Koçman Üniversite'sindeki arkadaşlarıma, Araş. Gör. Dr. İsmail Berat Cantaş'a, Öğr. Gör. Dr. Özcan Birgi'ye, Doç. Dr. Aykut Yozukmaz'a; Dokuz Eylül Üniversite'sinden Doç. Dr. Melik Kara'ya ve kimyager arkadaşım Erdem Özdil'e, teşekkürlerimi sunarım. Numunelerin toplanmasından lojistik sorunların giderilmesine her türlü soruna gülerek destek veren sabırlı arkadaşlarıma, Hasan'a, Rasheedah'a, Serdar'a; tezimi beni her gördüklerinde ilginç sorularla sözel olarak özetletip hatalarımı tespit etmemi sağlayan cin fikirli Neslihan'a, Bora'ya ve Stephanka'ya; yüksek lisansa başlama sürecimdeki motivasyonları için aileme teşekkür ederim.

27/ 08 / 2024

Funda Gacal

ÖZGEÇMİŞ

Funda Gacal uluslararası alanda hava kirliliği, enerji ve sağlık politikaları üzerine çalışan bir şehir plancısıdır. Uzmanlığı enerji üretiminin dışsal maliyetlerini, özellikle kömür yakıtlı santrallerin neden olduğu hava kirliliği emisyonlarını, sağlık etkilerini ve ekonomik maliyetlerini tahmin ve projekte etmektedir.

Lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Şehir ve Bölge Planlama bölümünde 2012 yılında tamamlayan Gacal, en büyük çevre koruma kuruluşlarından biri olan WWF-Dünya Doğal Hayatı Koruma Vakfı'nın Bolivya ve Türkiye ofislerinde çalışmış, sivil toplum kuruluşları ve araştırma kurumlarına enerji ve çevre politikaları üzerine danışmanlık vermiştir. Son olarak yedi sene boyunca HEAL-Sağlık ve Çevre Birliği isimli Belçika merkezli bir sivil toplum kurumunun kıdemli enerji ve sağlık politikaları danışmanlığını yapmış, ekiplerini ve ülke stratejisini yönetmiştir.

Araştırmalarında Bloomberg New Energy Finance, IASS-Potsdam gibi düşünce kuruluşlarıyla beraber çalışmıştır. Lancet, UNFCCC (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi) Climate Action Studio, CNN-Türkiye, Açık Radyo, Hürriyet, Milliyet ve Birgün gibi mecralarda röportajları yer alan Gacal ayrıca bilim iletişimciliği yapmaktadır.

“Kronik Kömürü İyileştirmek”, “Kronik Kömür Kirliliği” ve “Gizli Maliyet: Fosil Yakıt Teşviklerini Sonlandırmanın Sağlık Faydaları” araştırma raporlarının yazarı; “Kara Rapor: Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri”, “Türkiye için Düşük Karbonlu Kalkınma Yolları ve Öncelikleri”, “Türkiye'nin Yenilenebilir Gücü”, “İklim ve Sivil Toplum” raporlarının eş yazarıdır.

EKLER

Bu tez “16. Uluslararası Tıp ve Sağlık Bilimleri Araştırmaları Kongresi” kapsamında sunulmuş ve tam metinler kitabında yer almıştır.



Full Text Book

Tam Metin Kitabı

www.utsakcongress.com

Makale id= 67

Sözlü SunumORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1704-4897>

| 8

Kömür Yakıtlı Elektrik Santrallerinden Kaynaklı Cıva Emisyonlarının Sağlık Etkilerinin İncelenmesi ve Muğla'daki Santrallerin Değerlendirilmesi**Araştırmacı Funda Gacal¹**¹Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri Ana Bilim Dalı (YL öğrencisi- tez aşaması)

Özet: Cıva çevrede doğal olarak bulunan, özellikle kayalarda ve jeolojik formasyonlarda güvenli bir şekilde depolanan bir elementtir. Ancak insan eliyle açığa çıkarıldığında organik formlara ve en sık bilinen elemental formuna dönüşebilir; böylece cıva döngüsüne girip çevresel ortamlarda 3.000 yıl kalarak sağlık riski oluşturabilir. Cıvanın özellikle metil cıva ve buhar fazındaki elemental cıva formları insan sağlığını tehdit etmektedir. Dünyadaki ve ülkemizdeki cıva emisyonlarının en büyük ikinci kaynağı kömür yakıtlı elektrik santralleridir. Türkiye'de toplam elektrik üretiminin %36'sı kömür yakıtlı elektrik santrallerinden kaynaklanmaktadır. Özellikle buhar formundaki elemental cıva, santrallerin arıtma sisteminde düşük oranda tutulmakta, atmosfere karışarak akut ve kronik sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Elemental cıvanın en belirgin sağlık özelliği, bebek ve çocuklarda bilişsel kayıplara yol açmasıdır. Erken yaşta cıva maruziyeti, bireyin hayatı boyunca devam etmekte ve bilişsel kapasitenin düşmesine bağlı ekonomik kayıplara da yol açmaktadır. Kömüre dayalı elektrik üretiminin yılda 6,5 ton cıva emisyonuna neden olduğu tahmin edilmektedir. Bu da Türkiye'nin toplam cıva emisyonlarının %32'sini temsil etmektedir. Muğla'da bulunan üç büyük kömür yakıtlı elektrik üretim santralinin (Yatağan, Yeniköy ve Kemerköy) altyapısı, kömür tüketimi ve kömürün içeriği incelenmiş ve kütle-denge yöntemine dayalı bir model aracılığıyla bacalarından açığa çıkan cıva emisyonları tahmin edilmiştir. Buna göre bu üç santralin neden olduğu cıva emisyonlarının yılda 1.361- 1.415 IQ puan kaybına ve 2 milyar 117 bin – 2 milyar 202 bin dolar ekonomik maliyete neden olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca santrallerin çevresindeki akarsu ve göllerden su ve sediment örneği alınarak modelleme sonuçları test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cıva Emisyonlarının Sağlık ve Ekonomik Etkileri, Kömür Kaynaklı Cıva Emisyonlarının Bilişsel Etkileri, Çevre Kaynaklı Kirlenmelerin Nörolojik Etkileri

Investigation Of The Health Effects Of Mercury Emissions From Coal-Fired Power Plants And Evaluation Of The Power Plants In Muğla

Abstract: Mercury is an element that occurs naturally in the environment and is safely stored in rocks and geological formations. However, when released by human activities, it can transform into organic forms and its most commonly known elemental form. In this way, it can enter the mercury cycle and remain in the environment for up to 3,000 years, posing health risks. Particularly, methyl mercury and vapor-phase elemental mercury forms of mercury threaten human health. Coal-fired power plants are the second largest source of mercury emissions worldwide and in our country. In Turkey, 36% of total electricity production comes from coal-fired power plants. Especially vapor-phase elemental mercury is captured at low rates by the power plants' treatment systems, mixes into the atmosphere, and causes acute and chronic health problems.

The most notable health effect of elemental mercury is its impact on cognitive losses in infants and children. Early exposure to mercury continues throughout an individual's life, leading to economic losses associated with reduced cognitive capacity. It is estimated that coal-based electricity production causes 6.5 tons of mercury emissions per year in Turkey. This represents 32% of Turkey's total mercury emissions. The infrastructure, coal consumption, and coal content of the three large coal-fired power plants (Yatağan, Yeniköy, and Kemerköy) in Muğla were examined, and mercury emissions released from their stacks were estimated using a mass-balance method-based