



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

**ÇANAKKALE İLİ TERMİK SANTRALLERİNİN
UÇUCU KÜL KARAKTERİZASYONUNUN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ AY

Tez Danışmanı

DOÇ. DR. DENİZ ŞANLIYÜKSEL YÜCEL

ÇANAKKALE – 2022



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

ÇANAKKALE İLİ TERMİK SANTRALLERİNİN
UÇUCU KÜL KARAKTERİZASYONUNUN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DENİZ AY

Tez Danışmanı

DOÇ. DR. DENİZ ŞANLIYÜKSEL YÜCEL

ÇANAKKALE – 2022



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Deniz AY tarafından Doç. Dr. Deniz ŞANLIYÜKSEL YÜCEL yönetiminde hazırlanan ve **24/01/2022** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Çanakkale İli Termik Santrallerinin Uçucu Kül Karakterizasyonunun Belirlenmesi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	İmza
(Danışman)
Jüri
Jüri

Tez No :

Tez Savunma Tarihi : 24/01/2022

Enstitü Müdürü

.../.../2022

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Deniz AY
24/01/2022

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Deniz şanlıyüksel Yücel'e, "Termik Santral Kül Depolama Sahasının Zamana Bağlı Alansal Değişiminin Uydu Görüntüleri ile Belirlenmesi" başlıklı ÇOMÜ-BAP projesi kapsamında 18 Mart an termik santrali uçucu küllerinin fiziksel, kimyasal ve mineralojik analiz sonuçlarını paylaşan Doç. Dr. Mehmet Ali Yücel'e, yazım aşamasında bana destek olan Ayetullah Erçel, Faruk Biek, Sevdener Varlık'a, pandemi öncesi bana kütüphane arkadaşlığı yapan, iyi dileklerini ve yardımlarını hiç eksik etmeyen Arbreisha, Nejma, Xhenneta, Adela, Saima, Esmaya, moral ve motivasyonumu sürekli yükselten ilkokul arkadaşlarım Emre, Özge, Ufuk, Ezgi, Erdem, Büşra, Aybars, Tugay'a, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen, hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Deniz AY
anakkale, Ocak 2022

ÖZET

ÇANAKKALE İLİ TERMİK SANTRALLERİNİN UÇUCU KÜL KARAKTERİZASYONUNUN BELİRLENMESİ

Deniz AY

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Deniz ŞANLIYÜKSEL YÜCEL

24/01/2022, 52

Artan enerji ihtiyacına bağlı olarak, Türkiye'deki termik santrallerin sayısı hızlı olarak artmaktadır. Termik santral atığı olan uçucu küller, genellikle herhangi bir önlem alınmadan santralin çevresinde depolanarak olumsuz çevresel etkilere sebep olabilmektedir. Bu yüksek lisans tezi kapsamında yakma teknolojileri ve kullandıkları kömür farklı olan 3 termik santralin uçucu küllerinin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin ve liç karakterizasyonunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç ile Çanakkale ilindeki dolaşımli akışkan yatak teknolojisi kullanan 18 Mart Çan, pulverize kömür yakma teknolojisi (kritik altı) kullanan Çan 2 ve pulverize kömür yakma teknolojisi (süper kritik) kullanan Bekirli termik santrallerinden uçucu kül örnekleri alınmıştır. 18 Mart Çan termik santralinde Çan linyitleri, Çan 2 termik santralinde Çan, Soma ve Malkara linyitleri paçal yapılarak kullanılmaktadır. Bekirli termik santralinde kullanılan kömür ise ithaldir. Santrallerin farklı yakma teknolojileri ve kullandıkları kömürlerin farklılığı yanma sonrası ürünlerinin özelliklerinde farklılığına sebep olmaktadır. Uçucu küllerinin özellikleri ICP-MS, XRD, SEM-EDX, BET, mastersizer analizleri ile belirlenmiş, kimyasal özellikleri Çan linyitleri, Türkiye ve dünya kömür ortalama değerleri ile karşılaştırılmıştır. Liç testleri sonucunda uçucu kül liçlerinin zaman bağlı olarak pH değerlerinin azaldığı, elektriksel iletkenlik değerlerinin ve iyon konsantrasyonunun arttığı saptanmıştır. Ayrıca uçucu kül liçlerinin Al, As, Se ve SO₄⁻² konsantrasyonunun İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik limit değerlerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu Kül, Termik Santral, Karakterizasyon, Çevresel Etki, Çanakkale

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF FLY ASH FROM THERMAL POWER PLANTS IN ÇANAKKALE PROVINCE

Deniz AY

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Energy Resources and Management

Advisor: Assoc. Prof. Deniz ŞANLIYÜKSEL YÜCEL

01/24/2022, 52

The number of thermal power plants in Turkey has rapidly increased linked to increasing energy demands. Fly ash, a type of by-product from thermal power plants, generally causes negative environmental effects by being stored around the power plant without any precautions. Within the scope of this master thesis, the aim was to determine the physical, chemical and mineralogical properties and leach characterization of fly ash from 3 thermal power plants using different coal and combustion technologies. With this aim, fly ash samples were obtained from the 18 Mart Çan thermal power plant using circulating fluidized bed technology, Çan 2 thermal power plant using pulverized coal combustion technology (subcritical) and Bekirli thermal power plant using pulverized coal combustion technology (supercritical) located within Çanakkale province. The 18 Mart Çan thermal power plant uses Çan lignite, while Çan 2 thermal power plant blends Çan, Soma and Malkara lignites. The coal used in Bekirli thermal power plant is imported. The different combustion technologies and differences in the coals used in the power plants caused differences in the properties of the by-products. The properties of fly ash samples were determined with ICP-MS, XRD, SEM-EDX, BET and mastersizer analyses, while chemical properties were compared with average values for Can lignites, Turkey and world coals. As a result of batch experiments, the pH values of fly ash leachate reduced linked to time, while electrical conductivity values and ion concentrations were identified to increase. Additionally, the Al, As, Se and SO_4^{-2} concentrations of fly ash leachate were identified to be higher than the limit values in the Regulation about Water Intended for Human Consumption.

Keywords: Fly ash, Thermal power plant, Characterization, Environmental effect, Çanakkale



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1

1.1. Enerji.....	1
1.2. Kömür.....	4
1.2.1. Kömür Türleri.....	5
Turba.....	5
Linyit.....	6
Alt bitümlü kömür.....	6
Taş kömürü.....	6
Antrasit.....	6
Asfaltit.....	7
1.2.2. Dünyada ve Türkiye'de Kömür Rezervleri.....	7
1.3. Termik Santraller.....	10
1.3.1. Kömür Yakıtlı Termik Santraller.....	11
Pulverize Kömür Yakma Teknolojileri.....	13
Akışkan Yatakta Yakma Teknolojileri.....	14
1.3.2. Türkiye'deki Termik Santraller.....	15
1.3.3. Çanakkale İli'ndeki Termik Santraller.....	16
1.4. Uçucu Küller.....	18
1.4.1. Uçucu Küllerin Karakterizasyonu.....	19
Fiziksel Özellikler.....	19

Kimyasal ve Mineralojik Bileşim.....	19
1.4.2. Uçucu Küllerin Kullanımı.....	22
1.4.3. Uçucu Küllerin Depolanması.....	24
1.5. Çalışmanın Amacı.....	25
İKİNCİ BÖLÜM	
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	
2.1. Türkiye'de Uçucu Küllerin Çevresel Etkileri Hakkında Yapılan Çalışmalar...	26
2.2. Çanakkale İli'nde Uçucu Küller Kullanılarak Yapılan Çalışmalar.....	27
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	
MATERYAL YÖNTEM	
3.1. Literatür Tarama.....	30
3.2. Arazi Çalışmaları.....	30
3.3. Laboratuvar Çalışmaları.....	31
3.3.1. Uçucu Küllerin Karakterizasyonu.....	31
3.3.2. Liç Testleri.....	31
3.4. Büro Çalışmaları.....	32
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	
ARAŞTIRMA BULGULARI	
4.1. Uçucu Küllerin Fiziksel, Kimyasal ve Mineralojik Karakterizasyonu.....	33
4.2. Uçucu Küllerin Liç Karakterizasyonu.....	38
BEŞİNCİ BÖLÜM	
SONUÇ ve ÖNERİLER	
5.1. Sonuçlar.....	41
5.2. Öneriler.....	42
KAYNAKÇA.....	44
ÖZGEÇMİŞ	I

SİMGELER VE KISALTMALAR

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society For Testing and Materials
AZ	Ateşte Zayıt
BET	Brunauer-Emmet-Teller
BP	British Petroleum
cm ² /g	Santimetrekare/gram
Covid-19	Korona virüs 2019
CSB	Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
ÇED	Çevresel Etki Değerlendirme
D ₅₀	Ortalama partikül çapı
EMO	Elektrik Mühendisleri Odası
FTIR	Fourier-Transform Infrared Spectroscopy
g/cm ³	Gram/santimetreküp
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
IEA	International Energy Agency
Kcal/kg	Kilokalori/kilogram
KD	Kuzey Doğu
kHz	Kilohertz
mg/l	Miligram/litre
MMO	Makine Mühendisleri Odası
Mt	Milyon Ton
MTA	Maden Teknik Arama
Mtep	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
MW	Mega Watt
MWe	Mega Watt Elektrik Gücü
rpm	Revolutions Per Minute
SEM-EDX	Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray
TKİ	Türkiye Kömür İşletmeleri
TS EN	Türk Standartları Enstitüsü
TS	Türk Standartları

TTK	Türkiye Taşkömürü Kurumu
TWh	Tetawatt Saat
vb	Ve Benzeri
vd	Ve Diğerleri
WHO	World Health Organization
wt	Weigth
XRD	X-ray Diffraction
XRF	X-ray Fluorescence
°C	Santigrat derece
µm	Mikrometre
%	Yüzde



TABLULAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	2020 yılı dünyada kömür rezervleri	8
Tablo 2	Dünyada en fazla kömür üretimi yapan ülkeler	9
Tablo 3	Çanakkale ili aktif termik santralleri	16
Tablo 4	Kömür türüne göre uçucu külün kimyasal bileşim aralığı	20
Tablo 5	Uçucu küllerde bulunan mineraller	21
Tablo 6	Ülkelere göre 2016 yılında kömür yakma ürünlerinin yıllık üretim ve kullanım oranları	22
Tablo 7	Uçucu küllerin mineralojik bileşimi	34
Tablo 8	Uçucu küllerin majör bileşenlerinin ortalama, Çan linyitleri ve Türkiye kömürleri majör bileşenlerinin minimum ve maksimum değerleri (%)	35
Tablo 9	Uçucu küllerin ve dünya kömür element içeriğinin ortalama, Çan linyitleri ve Türkiye kömürleri element içeriğinin minimum ve maksimum değerleri (mg/kg)	35
Tablo 10	Uçucu küllerin Ward vd. (2010) yöntemine göre uygulanan liç testi sonuçları	40

ŞEKİLLER DİZİNİ

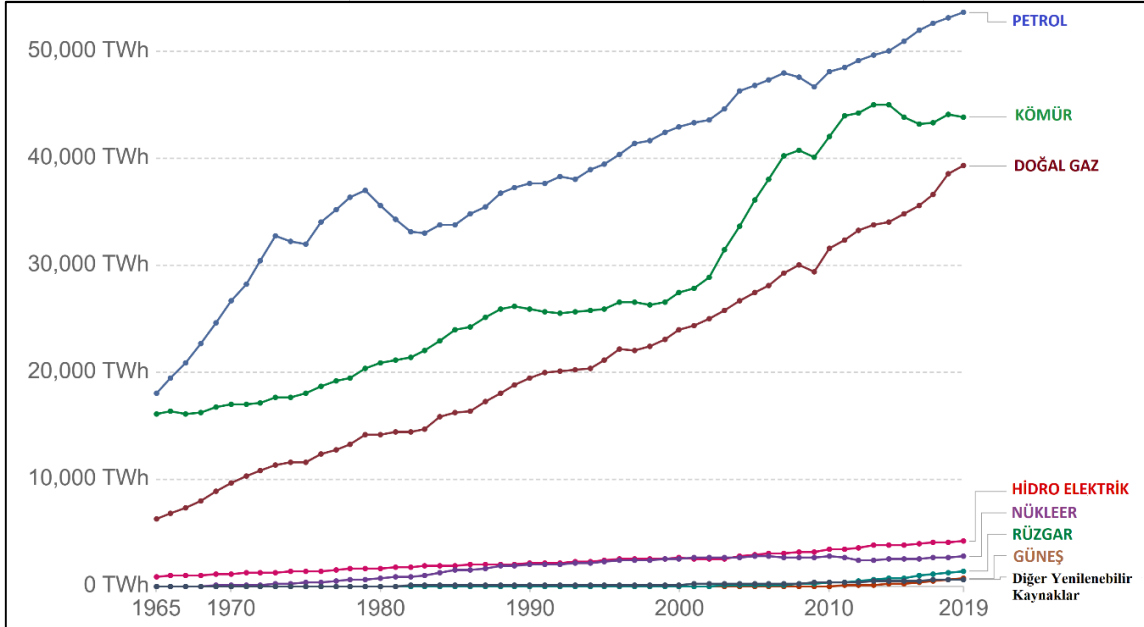
Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Dünyada birincil kaynaklara göre enerji tüketimi	1
Şekil 2	1978-2018 yılları arasında dünyada kaynaklara göre birincil enerji tüketimi	2
Şekil 3	Dünyada birincil enerji talebinin gelişimi ve IEA'nın mevcut politikalar öngörüsü	3
Şekil 4	2020 ve 2021 yıllarında Türkiye'deki birincil enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi	4
Şekil 5	Türkiye'deki önemli kömür sahaları	10
Şekil 6	Termik santralin çalışma prensibi	11
Şekil 7	Dünyadaki kömür yakıtlı termik santrallerin konumu	12
Şekil 8	Türkiye'deki kömür yakıtlı termik santrallerin konumu	15
Şekil 9	Çanakkale ilindeki termik santrallerin konumu	17
Şekil 10	18 Mart Çan, b) Çan 2 ve c) Bekirli termik santrallerinden görünüm	30
Şekil 11	Liç testleri için orbital çalkalayıcıda örneklerin karıştırılması	32
Şekil 12	1 no'lu örnek 18 Mart Çan, 2 no'lu örnek Çan 2 ve 3 no'lu örnek Bekirli termik santralleri uçucu küllerinin görünümü	34
Şekil 13	a. 18 Mart Çan termik santrali uçucu küllerindeki düzensiz şekilli, köşeli tanecikler b. Uçucu küldeki mikro gözenekler	36
Şekil 14	Çan 2 termik santrali uçucu küllerindeki küresel tanecikler	37
Şekil 15	Bekirli termik santrali uçucu küllerinde a. küresel tanecikler b. yanmamış karbon	37

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

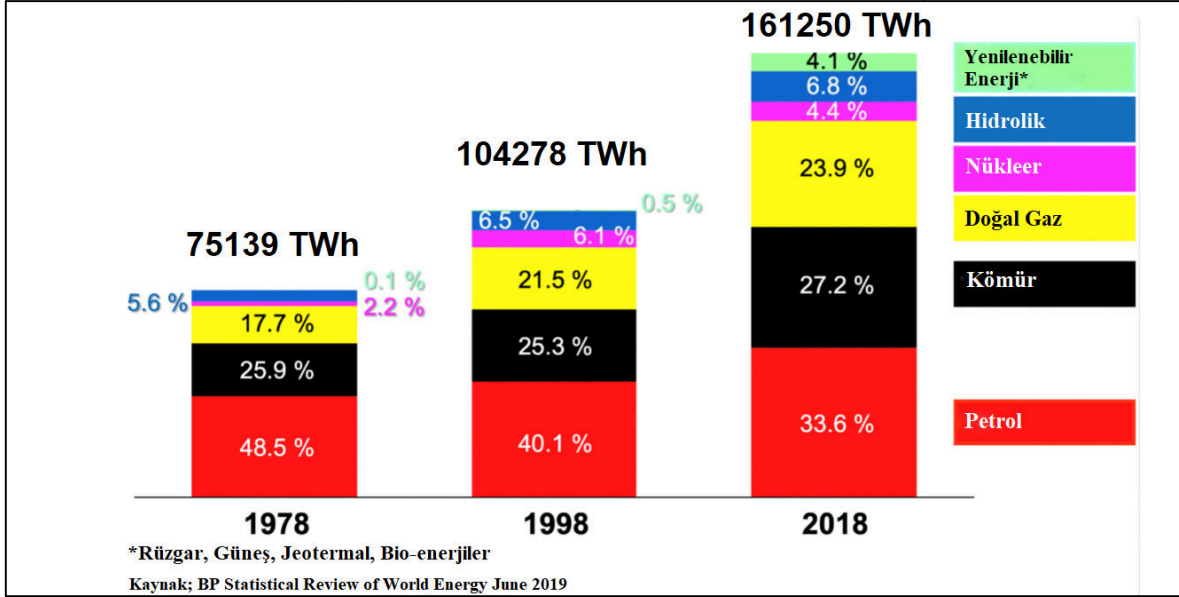
1.1. Enerji

Artan nüfus, sanayileşme, teknolojik gelişmeler ve yaşam standartlarının yükselmesi nedeniyle artan enerji gereksinimi dünyanın kısıtlı kaynaklarıyla karşılanamamakta, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki açık büyümektedir (Kumbur vd., 2005). Enerji, mekanik, ısı, elektrik, kimyasal ve nükleer gibi değişik türlerde bulunabilmekte, uygun yöntemlerle bir türden diğerine dönüşebilmektedir (Koç ve Kaya, 2015). Enerjinin herhangi bir değişim ya da dönüşüme uğramamış şekli birincil enerji olarak tanımlanmaktadır. Birincil enerji kaynakları, petrol, kömür, doğal gaz, nükleer, hidrolik, biyokütle, dalga-gelgit, güneş ve rüzgârdır. Günümüzde mevcut enerji ihtiyacının büyük bir bölümü fosil yakıtlar ile karşılanmaktadır (Şekil 1). Covid-19 salgını küresel enerji talebini etkilemiştir. Dünyadaki birincil enerji tüketiminde 1945 yılından bu yana en büyük azalma 2020 yılında tespit edilmiş olup, bu azalma % 4,5 olarak saptanmıştır (BP, 2021).



Şekil 1. Dünyada birincil kaynaklara göre enerji tüketimi (BP, 2019)

1978 ile 2018 yılları arasında kömürün payı % 25,9'dan % 27,2'ye, doğal gaz % 17,7'den % 23,9'a, hidrolik % 5,6'dan 6,8'e, nükleer % 2,2'den % 4,4'e, diğer yenilenebilir enerjiler ise % 0,1'den % 4,1'e yükselmiş olup, petrol % 48,5'ten % 33,6'ya azalmıştır (BP, 2019; Kober vd., 2020). 1978 yılında dünyadaki kurulu güç 75139 TWh olup, 2018 yılında yaklaşık 2,2 kat artarak 161250 TWh'e yükselmiştir (Şekil 2).

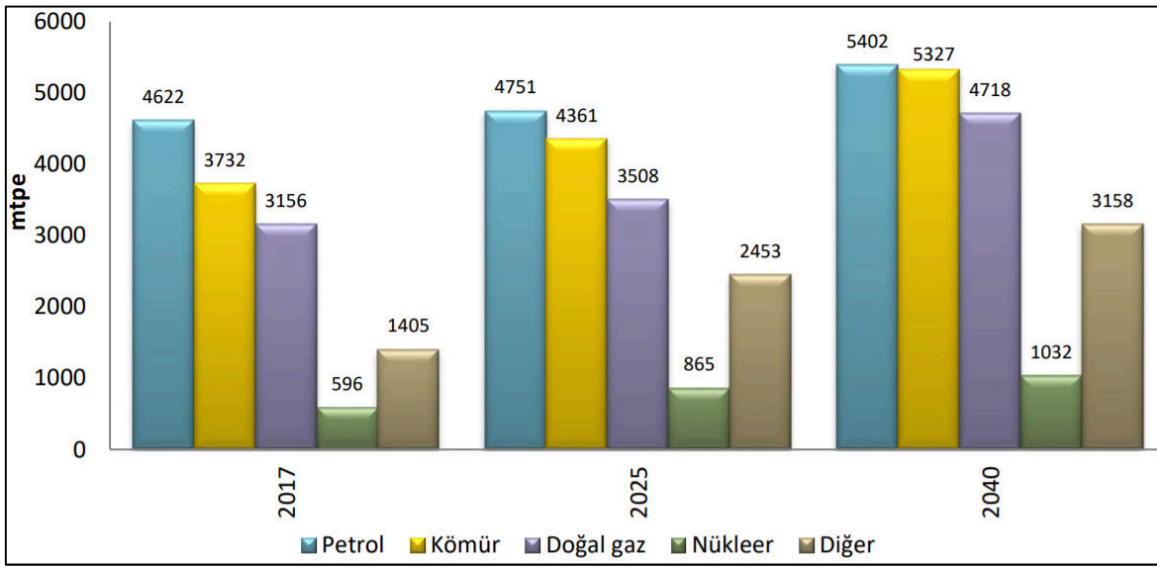


Şekil 2. 1978-2018 yılları arasında dünyada kaynaklara göre birincil enerji tüketimi (BP, 2019; Kober vd., 2020)

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), enerji politikaları bu şekilde değişim göstermeden sürdürülürse, birincil enerji talebinin 2017 yılına göre % 45,3 oranında yükseliş göstererek 2040 yılına gelindiğinde 19.637 mtep seviyelerini bulabileceğini öngörmektedir (Şekil 3). IEA (2020)'nin mevcut politikalar öngörüsünde 2040 yılında kömürün payının % 27,2, petrolün payının % 27,5, doğal gazın % 24, nükleer enerjinin % 5,2 ve diğer enerji kaynaklarının ise % 16,1 olacağı varsayılmaktadır.

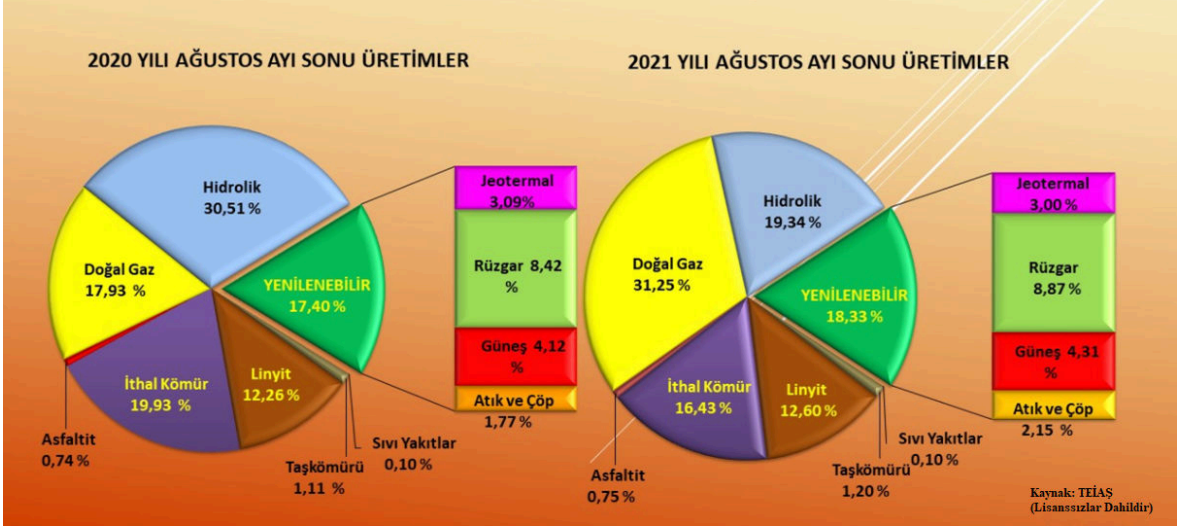
Kömür dünyada en bol bulunan fosil enerji kaynağı olup, kömürün dünya enerji payındaki yerinin önümüzdeki 20 yıl daha önemli konumda kalacaktır (TKİ, 2018). Dünyada üretilen kömürün % 49'u elektrik üretiminde, % 20'si ısınmada, % 15'i demir-çelik sanayisinde, % 5'i çimento sanayisinde ve % 11'i ise diğer sanayi dallarında kullanılmaktadır ("MTA maden serisi kömür", 2022). Kömür dünya enerji gereksiniminin

karşılanmasında büyük paya sahip olmasına karşın önemli çevre sorunlarına neden olmaktadır. Kömürün yanması ile atmosfere karbon dioksit (CO₂), kükürt oksit (SO_x), azot oksit (NO_x) gazları yayılmakta ve bu gazlar küresel ısınmaya neden olmaktadır. CO₂ en önemli sera gazıdır. SO_x ve NO_x gazları ise atmosferdeki su ile birleşip, sülfürik ve nitrik aside dönüşmekte asit yağmurları olarak yeryüzüne inip, çevreyi olumsuz etkilemektedir. Ayrıca kömürün bileşiminde bulunan bir çok iz element (As, Hg, Se vb.) çeşitli sağlık problemlerine neden olmaktadır (Schweinfurth, 2003).



Şekil 3. Dünyada birincil enerji talebinin gelişimi ve IEA'nın mevcut politikalar öngörüsü (IEA, 2020)

2021 yılında Türkiye'deki paylarına göre sırasıyla doğalgaz, hidroelektrik, ithal kömür, taş kömürü, linyit ve asfaltit, rüzgar, güneş, jeotermal, biyokütle, motorin ve fuel-oil gibi sıvı yakıtlar ile elektrik üretimi yapılmaktadır. 2019 yılında elektrik kurulu gücünün tüm kaynaklara göre dağılım toplamı 91.267 MW olup, 2020 yılında ise 95.890,7 MW olarak saptanmıştır (EMO, 2021). 2020 yılındaki Türkiye toplam kurulu gücü 2019 yılına göre yaklaşık % 5 artmıştır. Kömürün (liniyit, ithal kömür, asfaltit ve taş kömürü) Türkiye elektrik enerjisi üretimindeki payı 2020 yılında % 34,04 olup, 2021 yılında % 30,98 olarak saptanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. 2020 ve 2021 yıllarında Türkiye'deki birincil enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi ("Türkiye elektrik enerjisi, 2021")

1.2. Kömür

Kömür bitkisel kökenli organik ve inorganik bileşenlerden oluşan sedimanter kayadır. Ayrıca bu iki bileşenle birlikte su ve gaz da bulunmaktadır. Bitki ve ağaç kalıntılarının bataklık zonlarında üst üste gelerek birikinti oluşturması ve milyonlarca yıl içerisinde zonların basınç ve sıcaklık gibi fiziksel ve kimyasal etkileşimlerle değişim göstermesi sonucunda oluşur (Ünalın, 2013).

Kömürleşme, kömürün farklı kimyasal (dönüşme, bozunma, ısı) ve fiziksel (çökme, birikme, basınç) koşullarda gömülmesi, geçen jeolojik zaman ve tektonik olaylar etkisi sonucunda oluşur. Kömürleşme sürecine neden olan etkenler litostatik basınç, tektonik basınç, jeolojik zaman ve yer sıcaklığıdır. Kömür oluşumu belirli jeolojik zamanlar içerisinde gerçekleşmiştir. Bu jeolojik yaş dağılımına bakıldığında Geç Karbonifer, Permian, Jura, Kretase ve Tersiyer'de yoğunlaştıkları saptanmıştır (Ünalın, 2013).

Kömürleşme derecesine rank denir. En düşük ranktaki ve en genç kömür sınıfı turba, daha yaşlı olan kömürler sırasıyla linyit, alt bitümlü kömür, taş kömürü ve antrasit olarak isimlendirilmektedir. Sertlikleri, ısıl değerleri ve kaliteleri de bu sırayla artmaktadır (Ünalın, 2013).

Kömürün içerisinde 120 çeşit mineral saptamıştır. Kömürde bulunan başlıca mineraller; kuvars (SiO_2), kil mineralleri (kaolinit, illit, montmorillonit, klorit), pirit (FeS_2), kalsit (CaCO_3), siderit (FeCO_3), barit (BaSO_4), kalkopirit (CuFeS), feldspattır ($\text{K,Na,Ca,AlSi}_3\text{O}_8$) (Schweinfurth, 2003).

Kömür içindeki kükürt organik kükürt, sülfütlere ait kükürt ve sülfatlara ait kükürt olmak üzere üç değişik kökenlidir (Ward, 1984). Organik kükürt kömüre dönüşen bitkilerden kaynaklanan kükürttür. Sülfütlere ait kükürdün kömür içinde en yaygın bulunanı pirittir. Pirit dışında markazit (FeS_2), galen (PbS) ve sfalerit (ZnS) de bulunabilir. Sülfatlara ait kükürt örneği ise jipstir (CaSO_4) (Ward, 1984).

Kömürün içerisinde bulunan iz elementler kömürü oluşturan bitkilerden, çökeltme ortamındaki sudan ya da havzaya taşınan kırıntılardan kaynaklanmaktadır. Kömürde 60'dan fazla iz element bulunmaktadır (Schweinfurth, 2003). Kömürün bileşimindeki çevreye duyarlı elementler Sb, As, Ba, Be, B, Cd, Cl, Cr, Co, Cu, F, Pb, Hg, Mn, Ni, Se, Ag, Ta, Th, Sn, V, U ve Zn'dur (Finkelman ve Gross, 1999).

1.2.1. Kömür Türleri

Turba

Nemli ve ılık veya soğuk iklim koşullarında, oksijensiz sulak alanlarda bitki artıklarının depolanmasıyla oluşan, yüksek organik madde içeriğine sahip organik toprak ya da organik çökeldir (Çiftçi, 2003). Biyokimyasal kömürleşmeye uğramış en genç kömür olan ve sertlikleri en az olan turbaların renkleri siyah, sarı veya kahverengi olabilmektedir. Turbaların barındırdığı özellikler oluşum şartlarına, bitki türlerine ve bitkilerin çürüme derecelerine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Kemal vd., 1991; Güldan, 2010; Özcan, 2015; Çolpan, 2019). Turbaların, elle sıkıldığında su kaybetmesi, çıplak gözle bakıldığında şekilleri bozulmamış bitkisel atıkları barındırması, % 75'in üstünde nem oranına sahip olması temel özellikleri arasındadır.

Linyit

Linyitler kırılğan bir yapıya sahip olup, siyah, koyu kahve ve kahve renkli toz halinde ufalanabilen, masif, odunsu veya kilsî dokudadır. Kömürleşme sürecinin ilk aŐamasını temsil eden en düşük ranklı kömürdür. Linyitlerde bitki parŐaları görülebilir. Isıl değeri 4165 kcal/kg'ın altında olup, uÇucu madde miktarı ve nem iŐeriĐi yüksek, düşük karbon ihtiva eden bir kömür türüdür. Linyitlerin karbon oranı % 60-70 arasındadır (Erbilen ve Şahin 2015; Diş, 2020).

Alt bitümlü kömür

Koyu kahve ve siyah renkli k m rl r olup, bazı ülkelerde siyah linyit olarak da adlandırılmaktadır. Alt bitümlü k m rl r kendiliğinden tutuŐmaya elveriŐlidir. Su iŐeriĐi linyitten düşük olup, karbon oranı % 70-80 arasında, kalorifik değeri 4165-5700 kcal/kg arasındadır (Ünalın, 2013).

Taş kömürü

Paleozoyik ve Mesozoyik'in baŐlangıcında oluşan taş kömürleri parlak veya mat siyah bir dış görünüŐe ve sağlam bir yapıya sahiptir (Nakoman, 2012). Turba ve linyitler gibi bitki kalıntılarında meydana gelen taş kömürlerin kırıkları nadiren konkoidal olup genel olarak düzensizdir. Taş kömürünün kalorifik değeri 5700 kcal/kg'den fazladır (Nakoman, 2012). Taş kömürünün % 1-3 nem ile birlikte % 80-90 karbon, % 3-5 oksijen, % 11-34 uÇucu madde ve % 5-6 hidrojen iŐeriĐi bulunmaktadır. Kaliteli taş kömürleri % 10-15 arasında k l iŐermektedir (Nakoman, 2012).

Antrasit

Katı fosil yakıtların iÇinde en yüksek kaliteye sahiptir. Kalorifik değeri 5700 kcal/kg ve üzeri olup, 8600 kcal/kg'a kadar Őıkabilmektedir. Sert, siyah renkli, metalik parlaklığa sahip, yarı konkoidal kırılma yüzeyleri iŐermektedir. Kömür türleri arasında en yüksek dayanıma sahiptir. Sabit karbon oranı % 90'dan fazla, uÇucu madde ve nem oranı ise Çok düşüktür. YavaŐ ve duman yaymadan yanar, uzun süreli yandığı ve toza ve ise

sebeup olmaması nedeni ile ev yakıtı olarak tercih edilir (Şahinoğlu, 2006; Güldan, 2010; etinkaya, 2020).

Asfaltit

Ham petrolün jeolojik zaman içerisinde oksitlenmesi ve uçucu maddelerini kaybederek katılaşması sonucunda oluşan sert ve siyah renkli bir çeşit bitmdr (naln, 2013). Asfaltit maddelerin yerleşimi petrolün göçüne neden olan; hidrostatik basınç, gaz basıncı, kapilarite, gravitasyon ve sıcaklık gibi etkenlerle ilgili olup bunun sonucu olarak hareket eden sıvı, yarı sıvı durumundaki asfalt, çeşitli kırık ve çatlakları izleyerek yzeyeye kadar çıkabilir (MTA, 2020).

1.2.2. Dünyada ve Türkiye'de Kömür Rezervleri

18. yüzyılda Sanayi Devrimi'nin başlamasına neden olan kömür bu tarihten itibaren artan bir hızla önem kazanmıştır. Kömür rezervleri diğer fosil yakıtlara nazaran dünyada daha fazla ülkede bulunmakta ve 50'den fazla ülkede çıkarılmaktadır (Kocaman vd., 2017). Dünyadaki en büyük kömür yatakları ABD, Rusya, Çin, Avustralya, Hindistan, Güney Afrika, Hindistan, Ukrayna ve Kazakistan'da bulunmaktadır (naln, 2013). Dünya işletilebilir kömür rezervi 1,07 trilyon ton olarak belirlenmiştir (BP, 2020; TKİ, 2021). Bu rezervin yaklaşık 753 milyar tonu antrasit ve taş kömürü, yaklaşık 320 milyar tonu ise alt bitümlü kömür ve linyittir (BP, 2021). 2020 yılında dünyadaki kömür rezervleri Tablo 1'de ve dünyada en çok kömür üretimi yapan ülkelerin rezervleri Tablo 2'de gösterilmiştir. BP (2021) verilerine göre dünya toplam kömür rezervinin % 23, 2 ABD'de, %15,1'i Rusya'da, % 14' Avusturalya'da, % 13,3' Çin'de ve % 10,3'u Hindistan'dadır. Dünya kömür rezervinin % 1,1'i Türkiye'de bulunmaktadır. Günümüzde toplam görünür rezervi ve yıllık üretim miktarı dikkate alındığında kömürün dünya için yeterlilik süresi 139 yıldır (BP, 2021).

Tablo 1

2020 yılı dünyada kömür rezervleri (BP, 2021)

Ülkeler	Antrasit ve Taş Kömürü	Alt Bitümlü Kömür ve Linyit	Toplam (Mt)	Toplam İçindeki Payı (%)	Rezerv / Üretim oranı (yıl)
Kanada	4346	2236	6582	0,6	166
Meksika	1160	51	1211	0,1	185
ABD	218938	30003	248941	23,2	> 500
Brezilya	1547	5049	6596	0,6	> 500
Kolombiya	4554	–	4554	0,4	90
Venezuela	731	–	731	0,1	> 500
Bulgaristan	192	2174	2366	0,2	192
Çek Cumhuriyeti	1081	2514	3595	0,3	113
Almanya	–	35900	35900	3,3	334
Yunanistan	–	2876	2876	0,3	205
Macaristan	276	2633	2909	0,3	475
Polonya	22530	5865	28395	2,6	282
Romanya	11	280	291	< 0,05	19
Sırbistan	402	7112	7514	0,7	189
İspanya	868	319	1187	0,1	282
Türkiye	550	10975	11525	1,1	168
Ukrayna	32039	2336	34375	3,2	> 500
Birleşik Krallık	26	–	26	<0,05	16
Diğer Avrupa Ülkeleri	1109	5172	6281	0,6	189
Kazakistan	25605	–	25605	2,4	226
Rusya	71719	90447	162166	15,1	407
Özbekistan	1375	–	1375	0,1	333
Güney Afrika	9893	–	9893	0,9	40
Zimbabve	502	–	502	<0,05	153
Diğer Afrika Ülkeleri	4376	66	4442	0,4	280
Orta Doğu	1203	–	1203	0,1	> 500
Avustralya	73719	76508	150227	14	315
Çin	135069	8128	143197	13,3	37
Hindistan	105979	5073	111052	10,3	147
Endonezya	23141	11728	34869	3,2	62
Japonya	340	10	350	< 0,05	453
Moğolistan	1170	1350	2520	0,2	58
Yeni Zelanda	825	6750	7575	0,7	> 500
Pakistan	207	2857	3064	0,3	396
Güney Kore	326	–	326	< 0,05	320
Tayland	–	1063	1063	0,1	80
Vietnam	3116	244	3360	0,3	69
Diğer Asya Pasifik Ülkeleri	1421	726	2147	0,2	33
Dünya Toplam	753639	320469	1074108	100	139

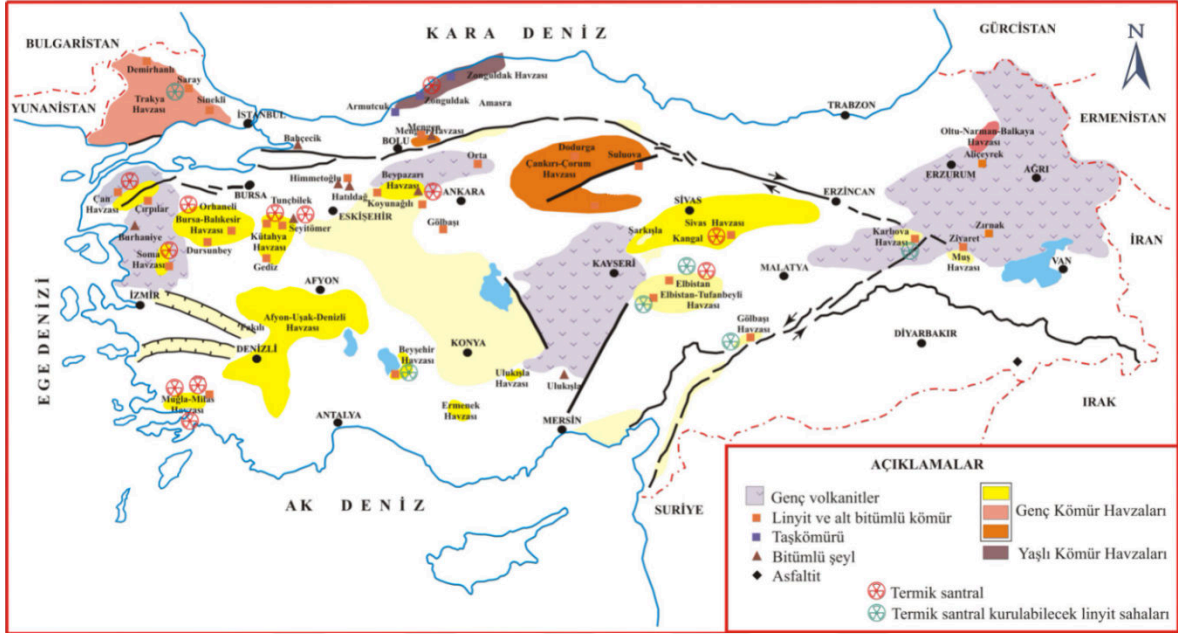
Tablo 2

Dünyada en fazla kömür üretimi yapan ülkeler (IEA, 2020)

Ülkeler	2017 (Mt)	2018 (Mt)	2019 (Mt)	Değişim 2018/2019	Yüzde (%)
Çin	3397	3549	3693	144	4,1
Hindistan	722	776	769	-7	-0,9
ABD	703	686	640	-46	-6,7
Endonezya	495	548	616	68	12,4
Avustralya	499	485	503	18	3,7
Rusya	388	419	418	-1	-0,3
Güney Afrika	257	256	254	-2	-0,8
Almanya	175	169	131	-38	-22,3
Polonya	127	122	112	-10	-8,2
Kazakistan	101	108	105	-3	-2,7
Türkiye	74,1	83,9	90	6,1	7,2

Türkiye'deki linyit, asfaltit ve taşkömürü ile birlikte toplam kömür rezervi yaklaşık 20,84 milyar tondur (TKİ, 2021). Türkiye'de önem taşıyan tek taşkömürü sahası Zonguldak ve çevresindedir (Şekil 5). Karbonifer yaşlı taş kömürleri batıda Ereğli'den başlayarak doğuda Söğütözü'ne kadar uzanan yaklaşık 185 km uzunluğu ve 40 km genişliği olan bir alanı kapsamaktadır (Ünalın, 2013). 736 milyon tonu görünür olmak üzere Türkiye'deki taşkömürü rezervi 1,52 milyar tondur (TTK, 2020). Türkiye'nin önem taşıyan iki asfaltit sahası Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan Şırnak ve Silopi illeri çevresindedir. Türkiye'deki asfaltitlerin toplam rezervi yaklaşık 82 milyon tondur (MTA, 2020). Türkiye'de 120'den fazla linyit sahası bulunmaktadır ve linyitlerin büyük çoğunluğu Eosen, Oligosen, Miyosen ve Pliyosen yaşındadır (Ünalın, 2013). Türkiye dünyada linyit üretiminde ilk 3 ülke içerisinde bulunmaktadır (IEA, 2020). Türkiye'nin 2019 yılı itibariyle toplam linyit rezervi 19,3 milyar tondur (MTA, 2020). Afşin-Elbistan, Trakya havzası, Manisa-Soma, Adana-Tufanbeyli, Muğla-Milas, Yozgat-Sorgun, Kütahya-Tunçbilek, Konya-Karapınar, Ankara-Beyşehir, Eskişehir-Alpu ve Sivas-Kangal Türkiye'deki önemli linyit sahalarıdır. Linyitlerin yaklaşık % 90'ının alt ısı değeri 3000 kcal/kg'ın altındadır

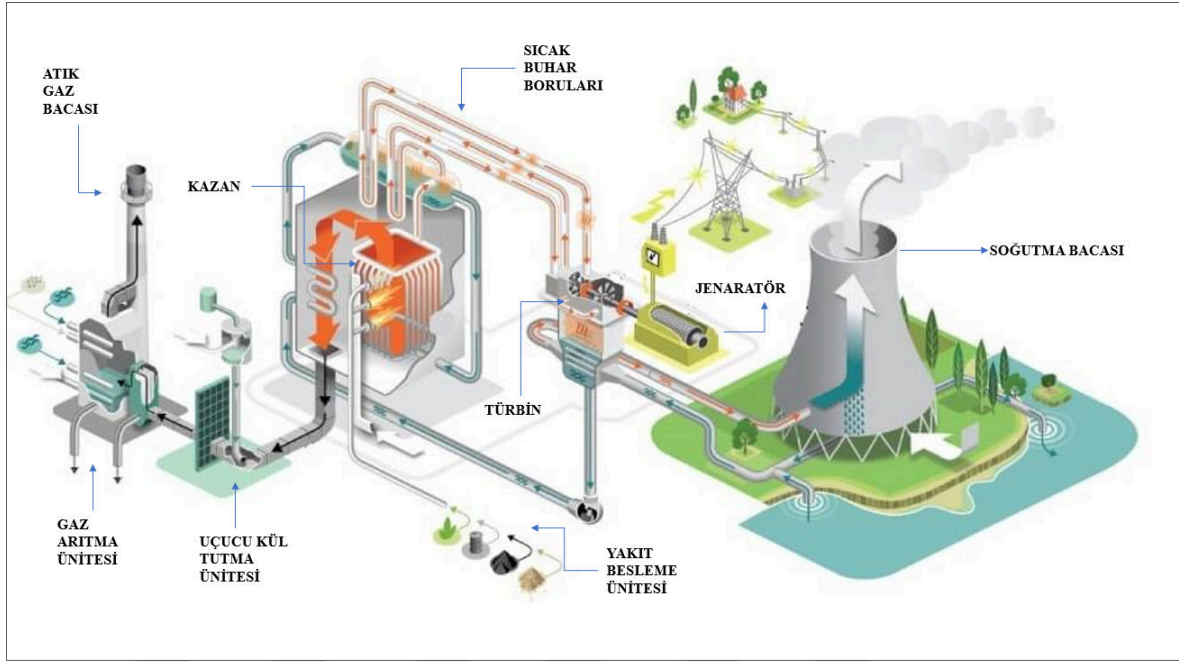
(TKİ, 2021). Linyitin dış ticareti yoktur, üretilen linyit yurt içinde tüketilmekte ve enerji sektörüne katkı sağlamaktadır.



Şekil 5. Türkiye'deki önemli kömür sahaları (“Enerji haritaları”, 2021)

1.3. Termik Santraller

Termik santraller günümüzde dünyanın elektrik enerjisi üretiminin en büyük rolünü üstlenen elektrik üretim tesisleridir. Bunlar katı, sıvı, gaz yakıtlı olabilmekte ve yakıttan elde ettiği enerji farklı enerji çeşitlerine dönüştürerek elektrik enerjisi üretebilmektedir. Termik santrallerin nükleer, çöp, fuel oil, doğalgaz ve kömür gibi yakıtlı olan çeşitleri mevcuttur. Bu üretim sistemlerinin her birinde buhar üretimine bağlı bir enerji üretimi söz konusudur. Termik santrallerde elektrik üretimi, kullanılan yakıttaki kimyasal enerji kazanda yanma ile birlikte ısı enerjisine dönüştürülerek buhara iletilir. Buhara geçen ısı enerjisi türbinlerde mekanik enerjiye dönüşür. Bu mekanik enerji ise son olarak jeneratörde elektrik enerjisine dönüşerek elektrik üretimi sağlanır (Yatarkalmaz, 2020). Termik santralin çalışma prensibi Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Termik santralin çalışma prensibi (“Termik santral nedir”, 2017)

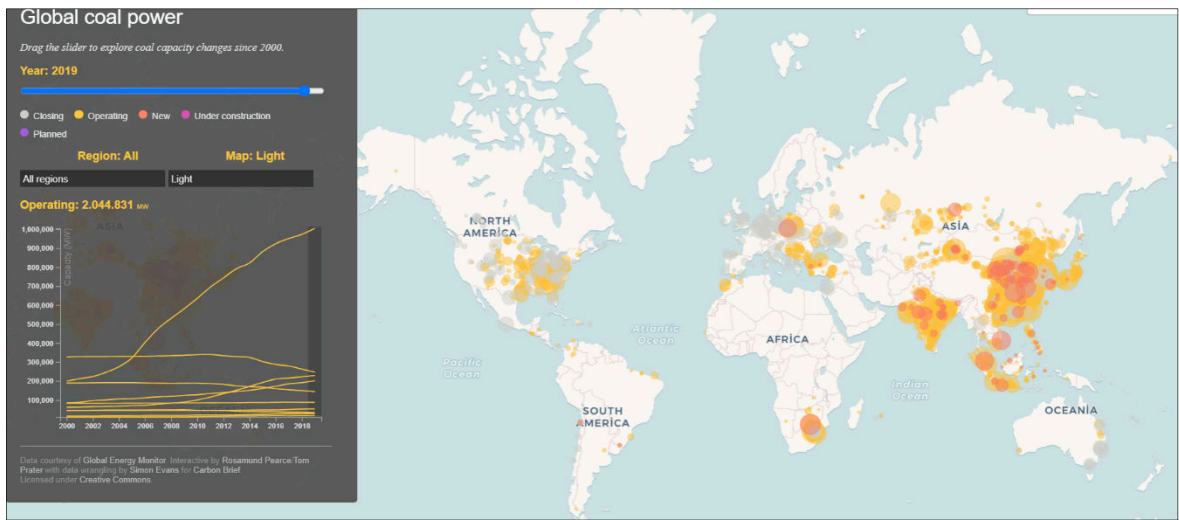
Kazanda su ısıyarak kızgın buhar olup türbinlerden geçerek görevini tamamlar. Daha sonra bu buhar kondenserlerde (yoğuşturucu) yoğunlaştırılıp sıvı faza döner. Sıvı faza döndükten sonra tekrar ısıtma kazanına geri gönderilen sıvı termik santral faaliyet gösterdiği süre boyunca aynı dönüşümü devam ettirir. Kazanda yanıp buharın üretilmesinde kullanılan yakıt yanma gerçekleştiikten sonra baca gazı olarak filtreleme sistemlerinden geçerek dışarı atılır. Yakıtın yandıktan sonra açığa çıkardığı enerjinin % 92'si yüksek basınçlı buhara verilirken % 8'i baca gazı olarak dışarı atılır (Ünal, 2009; Mujumdar, 2015; Karaca, 2019; Yatarkalkmaz, 2020).

1.3.1. Kömür Yakıtlı Termik Santraller

Kömür yakıtlı termik santrallerde teknoloji ve santral tipi seçimi bütünüyle kömürün özelliklerine bağlı olmaktadır. Santralde yakılması planlanan kömür, laboratuvar ölçekli yanma testleri gerçekleştiikten sonra santral özellikleri belirlenerek, bu belirlenen parametrelere göre projelendirilip kurulur. Kömür yakıtlı termik santrallerde akışkan yataklı kazanlar, pulverize kazanlar ve gazlaştırma sistemleri kullanılır. Pulverizasyon kömürün toz haline getirilme işlemidir. Toz haline gelen kömür yüzey alanı arttığı için yanma işlemi kolaylaşır ve yaydığı ısı enerjisi daha yüksek olur. Akışkan yataklı kazan

seçilen santrallerde kül ergime sıcaklığı düşük kömürün tercih edilmesi daha uygun olur. Çünkü akışkan yataklı sistemlerde kazanda yanma sıcaklığı 850 °C'lerdedir. Pulverize kömür yakma sistemlerinde ise sıcaklık 1100 °C'yi geçebilmektedir. (MMO, 2014; Yılmaz vd., 2017). Pulverize kömür yakma teknolojisinin ticari uygulamaları 1920'lerde başlamış, akışkan yatak yakma teknolojisi ise 1980'lerde ticarileşebilmiştir (Yağmur vd., 2016). Pulverize yakma teknolojisi hem dünya genelinde hem de ülkemizde en yaygın olarak kullanılan kömür yakma teknolojisidir (Çakmak vd., 2017).

2019 yılında dünyadaki kömür yakıtlı termik santrallerin kurulu gücü 2.044.831 MW olarak hesaplanmıştır (Şekil 7) (“Carbonbrief”, 2020). Termik santrallerin konumu Asya kıtasında yoğunlaşmıştır. 2017 yılında beri dünyadaki en büyük kömür yakıtlı termik santral Çin'de 6720 MW kurulu güç ile Tuoketuo termik santralidir. Türkiye'deki en büyük kurulu güçlü termik santral ithal kömür kullanılan 2790 MW'lı Zonguldak Eren termik santralidir. Küresel kömür talebi, 2020'de 2. Dünya Savaşı'ndan bu yana en büyük düşüş ile % 4 (220 milyon ton kömür eş değeri) azalmıştır. Düşüşün ana sebebi, Covid-19 kısıtlamaları ve bunun sonucunda ortaya çıkan ekonomik gerileme nedeniyle düşük elektrik talebi olmuştur (“Global Energy Review” IEA, 2021). Bu süreçte rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları hızla büyümeye devam etmiş ve elektrikli araçların satışı artmıştır (“World Energy Outlook” IEA, 2021) .



Şekil 7. Dünyadaki kömür yakıtlı termik santrallerin konumu (“Carbonbrief”, 2020)

Pulverize Kömür Yakma Teknolojileri

Kömür değirmenlerde öğütülerek 74 µm ve daha küçük boyuta getirilir. Öğütmenin amacı yanmanın homojen şekilde sağlanarak verimin artırılmasıdır. Pulverize sistemli termik santrallerde kurutma işlemi kırma ve öğütme işlemleri sırasında olmaktadır. Öğütülüp hava ile kazana taşınan kömür kazanda havada asılı halde yanar. Öğütülen kömürün kararlı bir şekilde yanması için kazanın merkezinde yanması istenmektedir.

Kazanın sıcaklığı yaklaşık olarak 1500 °C olup bu sıcaklık süper ısıtıcılara transfer edilir. Bu ısıtıcıların yönlendirdiği sıcak gazlar kazanın ileri safhasında yerleştirilmiş olan buhar tüpleri arasından geçerek buharı ısıtır. Atmosfere verilmeden önce bu gazlar kül tutuculardan geçer ve sıcak gaz kükürtsüzleştirme işlemine tabi tutulur. Buhar üretme süreci yakma işlemiyle aynı anda gerçekleşir. Yanma esnasında oluşan ısı birincil buhar üretimi ünitelerinde buhar meydana getirir. Buhar kazanında biriken sıcak buhar süper ısıtıcılara gönderilir. Sıcaklığı daha da yükselen buhar yüksek basınç türbinine oradan tekrar ısıtmaya gönderilip düşük basınç türbinine aktarılır. Bu türbinler dönme hareketiyle elektrik üretmekle görevli alternatörü döndürerek elektriği üretir. Üretilen elektrik trafolar yardımıyla yüksek gerilime çevrilerek iletim hatlarına gönderilir. Düşük basınç türbininden çıkan buhar yoğunlaştırıcılara (kondenser) gönderilerek sıvı faza dönüştürülür. Buradan çıkan sıvı soğutma kuleleri yardımıyla soğutulur. Soğutma suyu pompaları ile su sisteme geri gönderilir. Bu kapalı çevrim sürekli devam eder (Akar, 2009).

Ana buhar basınç değerine göre kazan teknolojileri 3 sınıfa ayrılmaktadır. Bu sistemlerin sıcaklık, güç, buhar basıncı ve verim değerleri;

Kritik altı: 130-220 bar, 540°C, 150-660 MWe, net verim % 30-40

Süper kritik: 220-250 bar, 560-600°C, 500-1000 MWe, net verim % 39-41

Ultra süper kritik: >250 bar, >600°C, 500-1100 MWe, net verim > % 42

Buhar parametrelerinin haricinde kritik üstü ve kritik altı kazan teknolojileri arasındaki en büyük ayırt edici özellik "dom"dur. Dom, sıcak su ve buhar içeren boruların birleştiği yarısı su ve yarısı buhar olan tanktır. Bu sistem elemanı genel olarak kritik altı kazanlarda yer alıp kritik üstü kazanlarda bulunmaz. Kritik üstü kazan teknolojilerinde, yüksek yüklerde çalışmazken, çevrimi ve stabil sistem değerlerini sağlamak için, kazanın

çıkışında bulunan ayrıştırıcı daha temel, karışık ekipmanlar barındırmayan ve daha küçük bir sistem elemanıdır (MMO, 2014; Yılmaz vd., 2017).

Akışkan Yatakta Yakma Teknolojileri

Akışkan yataklı yakma sistemlerinde kırma eleme gibi boyut küçültme işlemlerinden sonra kömür tanecikleri hava ile akışkanlaştırılmış olan kum taneciklerinin bulunduğu bir yerde yakma işleminin gerçekleştiği sistemler olarak tanımlanır. Üzerinde basınçlı hava delikleri bulunan yatağın üstündeki tanecikler (yakıt, kül, kum, kireç) basınçlı havaya maruz bırakılır. Böylelikle oluşan kabarcıklar kömürü havada askıda bırakarak akışkanlaştırmayı gerçekleştirmiş olur. Aynı zamanda katı taneciklerin üzerine etkiyen yer çekimi kuvveti ve onları aksi yönde püskürten basınçlı hava kuvveti tanecikleri dengede tutarak yatak oluşumunu gerçekleştirir. Havada askıda kalan kömür yanar. Bu sırada akışkan yatağın içinde bulunan kireç yanma ile açığa çıkan NO_x ve SO_x gazlarını absorbe ederek baca gazının çevresel etkilerini azaltır. Kazanın içinde oluşan ısı sıcak buhar borularını ısıtır. Bu borularda ısınıp basıncı yükseltile buhar türbinleri çevirip alternatörde elektrik enerjisi oluşturur. Soğutulmak için soğutma kulesine gönderilen buhar ısı kaybedip sıvı faza geçer. Daha sonra tekrar aynı çevirime katılmak için su besleme kazanına gönderilir. Akışkan yataklı sistemlerde sıcaklık diğer yakıcı kazan sistemlerine göre daha düşüktür (850-900 °C) (Abacıoğlu, 2012; Arabacı, 2019).

Atmosferik basınçta ve basınçlı faaliyet gösteren olmak üzere akışkan yataklı termik santraller 2 temel sınıfa sahiptir. Ayrıca akışkanlaştırma koşullarına bağlı olarak da 3 ayrı sınıfa ayrılmaktadır, bunlar; kabarcıklı akışkan yatak, dolaşımli akışkan yatak ve basınçlı akışkan yataktır.

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan dolaşımli akışkan yataklı termik santral teknolojisi ekonomik olması nedeniyle tercih edilmektedir. Düşük kalorifik değerlere sahip kömürlerin değerlendirilmesi konusunda akışkan yataklı termik santraller, pulverize termik santrallere nazaran daha çok verim ve daha farklı ısıl aralıkları olan kömürlerin değerlendirilmesinde avantaj sağlamaktadır. Benzer karakterizasyona sahip kömürlerin yakılmasında akışkan yataklı termik santraller pulverize termik santrallere göre % 2-4 daha verimlidir. Parçacık dolaşımı kömüre yanma süresi, kireçtaşına ile kükürdü tutmak için

yanma odasının içinde daha uzun kalma süresi sağlar. Bu termik santral sisteminde kazan boruları yanma odasının duvarlarında ve gaz yolu üzerinde yer almaktadır. Duvarda yer alan kazan boruları ısıyı emerken aynı zamanda sıcaklığı istenilen seviyede tutmaya yardımcı olmaktadır (MMO, 2014).

1.3.2. Türkiye'deki Termik Santraller

Türkiye'de enerji ihtiyacının büyük bir kısmı termik santraller tarafından karşılanmaktadır (CSB, 2016). Türkiye'nin ilk termik santrali 1914 yılında 15 MW güç ile İstanbul'da Silahtarağa semtinde kurulmuş olup, ismi Silahtarağa termik santralidir (EMO, 2008; Aktaş ve Alioğlu, 2012). Bu santral 1983 yılına kadar elektrik üretmeye devam etmiştir (Avcı, 2005). Termik santrallerin ilerleyen yıllarda sayıları artarak enerji ihtiyacını karşılamada önemli rol üstlenmiştir. Türkiye'de farklı yakıtlar (taş kömürü, linyit, asfaltit, fuel-oil, motorin, doğal gaz, sıvılaştırılmış gaz vb.) kullanan birçok termik santral bulunmaktadır. Karakuş vd. (2018) ülkemizde elektrik enerjisinde kurulu gücün yaklaşık % 22'sinin kömür yakıtlı termik santrallerden elde edildiğini ifade etmiştir. Şekil 8'de Türkiye'deki kömür yakıtlı termik santrallerin konumu verilmiştir. 2020 yılında Türkiye'de 100 MW ve üzeri kapasiteye sahip 28 adet kömür yakıtlı termik santral bulunmakta olup, kömür yakıtlı termik santrallerin toplam kurulu gücü 20.323 MW'dır ("Kömür ve linyit yakıtlı termik santraller", 2021).



Şekil 8. Türkiye'deki kömür yakıtlı termik santrallerin konumu ("Kömür ve linyit yakıtlı termik santraller", 2021).

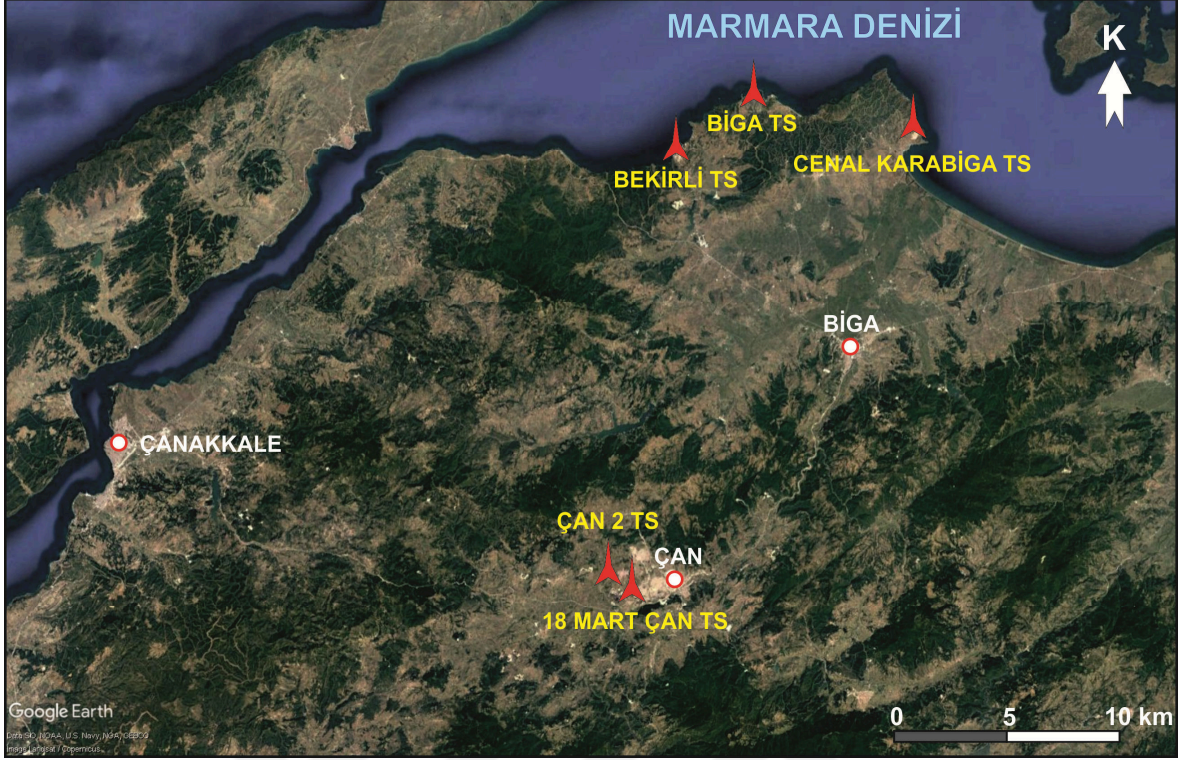
1.3.3. Çanakkale İli'ndeki Termik Santraller

Çanakkale ilinde, 2020 yılı itibariyle aktif olarak çalışan 5 adet kömür yakıtlı termik santral bulunmaktadır (Şekil 9). Farklı kazan teknolojilerine sahip santrallerde yakıt olarak kullanılan kömürler de farklılık göstermektedir (Tablo 3). Günümüzde Çanakkale ilindeki termik santraller toplam 3575 MW kurulu güce sahiptir. ÇED başvurularına ve yapılan çalışmalara göre ilerleyen dönemlerde Çanakkale'deki termik santrallerin sayısının artması beklenmektedir (Akyüz ve Kaynak Tezel, 2017; Gençel ve Tarhan, 2019).

Tablo 3

Çanakkale ili aktif termik santralleri

Termik Santral Adı	Yakıt Tipi	Kurulu Güç (MW)	Kazan Teknolojisi
Cenal Karabiga	İthal kömür	1320	Pulverize kömür yakma teknolojileri (ultra süper kritik)
Bekirli	İthal kömür	1200	Pulverize kömür yakma teknolojileri (süper kritik)
Biga	İthal kömür	405	Akışkan yatakta yakma teknolojileri
Çan 2	Çan, Soma ve Malkara linyitleri	330	Pulverize kömür yakma teknolojileri (kritik altı)
18 Mart Çan	Çan linyitleri	320	Akışkan yatakta yakma teknolojileri



Şekil 9. Çanakkale ilindeki termik santrallerin konumu (Google Earth, 2020)

Erken-Orta Miyosen yaşlı Çan kömür havzası Türkiye'nin kuzeybatısında yer almaktadır. Havzadaki linyitler yüksek kükürt oranı ve düşük kalorifik değeri ile karakteristiktir (Gürdal, 2011). Çan ilçe merkezinde bulunan kömür ocağı 1970'li yıllardan beri açık ocak madenciliği ile Çan Linyitleri İşletme Müdürlüğü tarafından işletilmektedir. Çan linyitleri, 2x160 MW kapasiteli 18 Mart Çan termik santralinde kullanılmaktadır. 2005 yılından beri faaliyet gösteren santral, Türkiye'deki ilk akışkan yataklı termik santraldir. Santralinin yılda yaklaşık olarak ürettiği kül atık miktarı yarım milyon tondur. Uçucu küllerin satışı yoktur, kullanılmamaktadır. Uçucu küller termik santralin yaklaşık 1 km KD'sundaki kül barajında sulu olarak depolanmaktadır (Şanlıyüksel Yücel, 2017). Vadi şeklinde olan depolama alanı zamana bağlı olarak alansal ve hacimsel artmaktadır. Şanlıyüksel Yücel ve Yücel (2018), uydu görüntüleri kullanarak 18 Mart Çan termik santrali uçucu kül depolama alanının 2007 yılının Mart ayında 21,6 ha olduğunu, 2017 yılı Haziran ayında ise alanın yaklaşık 4,5 kat arttığını ve 93,7 ha olduğunu belirtmiştir.

Çan ilçesinde 2018 yılında faaliyete başlayan 330 MW kurulu güce sahip olan Çan 2 termik santralinde Çan, Soma ve Malkara kömür havzalarından alınan linyitler paçal yapıp kullanılmaktadır. Termik santralin kazan teknolojisi kritik altı pulverize kömür

yakma teknolojisidir. Santralin uçucu külleri çimento fabrikasına satılmakta, ihtiyaç fazlası olan küller kül barajında depolanmaktadır.

Bekirli termik santrali Çanakkale ili Biga ilçesine 30 km uzaklıkta Bekirli köyünde kurulmuştur. Birinci ünitesi 2011 yılında, ikinci ünitesi ise 2014 yılında faaliyete başlayan santralde ithal kömür kullanılmakta olup, kömür Kolombiya'dan temin edilmektedir. Termik santralin kazan teknolojisi süperkritik pulverize kömür yakma teknolojisidir. Santralin baca gazı kükürt arıtma ($DESO_x$) ve azot oksitleri giderme ($DENO_x$) üniteleri bulunmaktadır. Santral toplam 2 x 600 MW kapasiteye sahiptir (MMO, 2020; “İçdaş Bekirli Termik Santrali 2. Ünite”, 2021). Santralde yılda üretilen uçucu kül miktarı yaklaşık 200 bin tondur. Uçucu küllerin çok az bir miktarı depolanmakta, küller genellikle hazır beton tesislerine satılmaktadır.

1.4. Uçucu Küller

Enerji talebinin artmasıyla birlikte termik santrallerde kömür tüketiminin de artması ve kömürün yanmasıyla oluşan atık ürünlerinin de artmasına sebep olmaktadır. Termik santrallerinde kullanılan taş kömürlerinin % 10-15'i ve linyitlerin ise % 20-40'ı küldür (Karakuş vd., 2018). Kömürün çok ince bir şekilde öğütülmesinden sonra termik santrallerde yakılmasıyla 3 farklı kül oluşabilmektedir. Bunlar;

- Öznel olarak iri taneli olan ve baca gazlarıyla taşınamayan kazan tabanında olan taban külü,
- Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutularak kömürün külden uzaklaştırılmasıyla meydana gelen ham kül ve
- Baca gazlarıyla taşınabilecek kadar ince taneli olan uçucu küldür.

Uçucu kül, termik santralde kömürü yaktıktan sonra elektrofiltre ve siklonlarda tutulan ince küldür. Uçucu küllerin karakterizasyonu;

- Kömürün yakılmadan önceki pulverizasyon derecesi,
- Uçucu külün kaynağını oluşturan kömürün türü,
- Yakıldığı kazan türü,
- Yakma sıcaklığı ve diğer işletme parametreleri,
- Çevre korunması amacıyla kömüre ilave edilen katkı maddeleri gibi faktörlerden ve

faktörlerin de zamana göre değişebilmelerinden kaynaklanan özellikler ve

- Kül toplama ve uzaklaştırma sistemlerinin özellikleri ve işleyişine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Hyenar, 1983; Kefelioğlu, 1998; Güler vd., 2005).

1.4.1. Uçucu Küllerin Karakterizasyonu

Fiziksel Özellikler

Uçucu külün şeklini ve parçacık boyutunu, kömürün bileşimi, kömürün homojenliği, kömür pulverizasyonunun derecesi, kömürün yakılma sıcaklığı ve kullanılan toz ayıklama yöntemi (mekanik ayırıcılar, elektrostatik çöktürücüler) dolaylı veya doğrudan etkilemektedir (ACI, 2003; Tangüler, 2015). Uçucu küllerin renkleri açık gri, koyu gri ve bazen siyah renklerde değişmektedir. Külün rengi elde edildiği kömüre ve yanma özelliğine bağlıdır, iyi yanma sonucu oluşan uçucu küller daha açık renktedir (Güler vd., 2005). Uçucu küller genellikle alkali karakterdedir. Uçucu küllerin özgül yüzey alanı 1800-5000 cm²/g arasında değişmektedir. Uçucu küllerin boyutları 0,2- 200 µm aralığında olup, küresel veya yarı küresel camsi, düzensiz veya köşeli taneciklerden oluşmaktadır. Mikroskopik incelemelere göre bazı küresel parçacıklar oyukludur ve cenosfer olarak bilinirler. Ayrıca, uçucu küller ferosferler olarak bilinen geniş bir alanda birçok küçük küreyi içerebilir. Uçucu küllerin özgül ağırlığı 1,9 ile 2,8 g/cm³ arasında değişmektedir (Bosbach ve Enders, 1998; Wesche, 2004; Siddique, 2007; Tangüler, 2015).

Kimyasal ve Mineralojik Bileşim

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında kimyasal bileşen yüzdesine göre temel olarak ASTM C 618 standardı (2019) baz alınmaktadır. ASTM C 618 standardına göre uçucu küllerin F ve C olarak iki sınıfı bulunmaktadır.

- F sınıfı küller; bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ oranı % 50'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Bununla birlikte CaO oranı % 18'in altında olduğunda düşük kireçli olarak isimlendirilir. Puzolanik özelliğe sahiptir.
- C sınıfı uçucu küller; linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ oranı % 50'den fazla olan küllerdir. Bununla beraber CaO

oranı % 18'den fazla olduğu için yüksek kireçli kül olarak isimlendirilir. Bu sınıftaki uçucu küller hem puzolanik hem de bağlayıcı özelliğe sahiptir.

Uçucu külün kimyasal bileşimini etkileyen temel etmenler; kömür türü, kömür depolama yöntemi, yakma sistemi, kömür taşıma gibi etmenlerdir. Uçucu külün kömür türüne göre kimyasal bileşimi Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4

Kömür türüne göre uçucu külün kimyasal bileşim aralığı (Ahmaruzzaman, 2009; Tangüler, 2015).

Bileşen (%)	Linyit	Yarı bitümlü kömür	Bitümlü kömür
SiO ₂	15-45	40-60	20-60
Al ₂ O ₃	10-25	20-30	5-35
Fe ₂ O ₃	4-15	4-10	10-40
CaO	15-40	5-30	1-12
MgO	3-10	1-6	0-5
SO ₃	0-10	0-2	0-4
Na ₂ O	0-6	0-2	0-4
K ₂ O	0-4	0-4	0-3
LOI	0-5	0-3	0-15

Uçucu kül içeriğinde asıl olarak bulunan bileşenler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO olup, MgO, SO₃ ve alkali oksitler de yer almaktadır. SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO ana oksitlerin uçucu külde bulunma miktarları külün kireçsi veya silissi olmasına göre bir değişkenlik göstermektedir (Türker vd., 2009). Kömürde olduğu gibi uçucu küllerin bileşiminde de As, Cd, Cr, Co, Hg, Ni, Pb, Se, Zn vb. elementler bulunmakta ve kömürün yanması esnasında Rn, Th ve U gibi radyoaktif elementler açığa çıkmaktadır (Türkmenoğlu vd., 2014).

Uçucu külün mineral faz ve kimyasal bileşimleri kömürde bulunan minerallerle doğrudan ilişkilidir (Benscheidt vd., 2010). Uçucu küllerde en çok bulunan mineraller kuvars, kaolinit, mullit, illit ve siderittir, ayrıca daha az olarak kalsit, pirit ve hematit

mineralleri bulunmaktadır (Ahmaruzzaman, 2010). Kömürde bulunan kil mineralleri ve kuvars uçucu küldeki silis içeriğinin asıl nedenidir. Uçucu küldeki kalsiyum oksit içeriği kömürde bulunan CaCO_3 ve CaSO_4 'tan gelmektedir. Alüminyum içeriği ise kil minerallerinden ve nadiren de olsa kömürde bulunan organik bileşiklerden kaynaklanmaktadır. Demir oksit kömürde bulunan demir içeren minerallerden gelmektedir. SO_3 bulunmasının sebebi, kömürde yer alan pirit ve alçıtaşından kaynaklanmaktadır. Magnezyum oksit kömürdeki organik bileşenler olan smektit, ferromagnezyen mineraller ve dolomitten gelmektedir. Uçucu küldeki alkali içeriklerin bulunmasının nedeni kömürdeki sodyum ve potasyum içeren minerallerin bulunmasıyla ilişkilidir. Uçucu küldeki karbon içeriğinin sebebi ise kömürün tam yanamaması, karbondioksit ve birleşik su barındırmasıdır (ACI, 2003; Tangüler, 2015). Uçucu küllerde bulunan mineraller Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5

Uçucu küllerde bulunan mineraller (Smith, 1999)

Mineral ismi	Kimyasal formülü
F ve C sınıfı uçucu kül için ortak mineraller	
Kuvars	SiO_2
Mullit	$3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$
Manyetit	Fe_3O_4
Hematit	Fe_2O_3
C sınıfı uçucu kül için ek mineraller	
Anhidrit	CaSO_4
Kireç	CaO
Periklaz	MgO
Trikalsiyum alüminat	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$
Melilit (akermanit-gehlenit)	$\text{Ca}_2\text{Mg}_{0,5}\text{AlSiO}_{1,5}\text{O}_7$
Mervinit	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$
Ferrit spinel (manyetit yerine)	$(\text{Fe},\text{Mg})(\text{Fe},\text{Al})_2\text{O}_4$

1.4.2. Uçucu Küllerin Kullanımı

Kömür yakıtlı termik santraller 1920'li yıllarda enerji üretmeye başladığından beri milyonlarca ton kül yan ürün olarak oluşmuştur (Ahmaruzzaman, 2010). 2016 yılında dünya çapında kömür yakma ürünleri veya kömür külü üretimi yaklaşık 1,2 milyar ton olup, dünya kömür yakma ürünü üretimi yapan ve bunların kullanımını sağlayan bazı ülkeler Tablo 6'da gösterilmiştir (VGB Powertech, 2020; Ojha ve Aggarwal, 2021).

Tablo 6

Ülkelere göre 2016 yılında kömür yakma ürünlerinin yıllık üretim ve kullanım oranları (VGB Powertech, 2020)

Ülke/Bölge	Kömür yakma ürünü üretimi (Mt)	Kömür yakma ürünü kullanımı (Mt)	Kullanım oranı (%)
Avustralya	12,3	5,4	43,5
Çin	565	396	70,1
Kore	10,3	8,8	85,4
Hindistan	197	132	67,1
Japonya	12,3	12,3	99,3
Diğer Asya ülkeleri	18,2	12,3	67,6
Avrupa birliği ülkeleri	40,3	38	94,3
Orta Doğu ve Afrika	32,2	3,4	10,6
İsrail	1,1	1	90,9
ABD	107,4	60,1	56
Kanada	4,8	2,6	54,2
Rusya	21,3	5,8	27,2
Toplam	1221,9	677,7	63,9

2020 yılında Türkiye'de kurulu gücü 100 MW ve üzeri tüm termik santrallerinde 10 bin tonu tehlikeli olmak üzere toplam 24,4 milyon ton atık oluşmuştur. Toplam tehlikesiz atığın % 79,5'ini kül ve cüruf atıkları, % 20,5'ini ise metal, kâğıt, plastik atıklar, atık su arıtım çamurları ile evsel ve benzeri atıklar oluşturmuştur. Toplam atığın % 85,9'u kül dağı, kül barajı veya düzenli depolama tesislerinde bertaraf edilirken, % 13,2'si lisanslı

tesislere gönderilmiş ve maden/taş ocaklarının geri doldurulmasında kullanılmış, % 0,9'u ise diğer yöntemlerle bertaraf edilmiştir (TÜİK, 2021).

Uçucu küller, çimento ve betonda katkı maddesi, seramik ürünlerinde hammadde, yol yapımı, zemin stabilizasyonu, toprak ıslahı, boya malzemesi üretimi, atık sudan metallerin uzaklaştırılması, atık sudan boya giderimi, zeolit sentezi, maden sahalarının doldurulması ve maden sahalarının rehabilitasyonu gibi farklı sektörlerde değerlendirilme olanaklarına sahiptir. Böyle geniş alanlarda kullanımı olan atık ürünün kullanım alanlarının yaygınlaştırılması olası çevresel etkilerinin azalmasına katkı sağlayacaktır (Ahmaruzzaman, 2010).

Uçucu küller baraj inşaatları sırasında betonda hidrasyon ısısını düşürmek amacı ile kullanılmaktadır. Uçucu küllerin ilk kullanımı ABD'de 1940'lı yıllarda önce Hoover daha sonra Hungry Horse barajlarının yapımındadır. Ayrıca uçucu küller, 171 m yüksekliğe sahip olan Madrid'teki Picasso gökdeleninde, Danimarka'da Great Bell East köprüsünün yapımında, Finlandiya'da Permantokoski hidroelektrik santrali yapımında kullanılmıştır (Ecoba, 2001; Güler, 2005). Avusturya'da yeraltı tünellerinde, İskoçya'da Tornes nükleer enerji santrali yapımında kullanılmıştır. İngiltere'de denize inşa edilmiş BP'ye ait 570000 varil ham petrol depolama kapasitesine sahip depolama tesisinin yapımında, Fransa ve İngiltere'yi birbirine bağlayan 50 km uzunluğundaki hızlı tren hattının tünel inşaatında da uçucu küller kullanılmıştır (Ecoba, 2001; Güler, 2005). Türkiye'de 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk barajları inşaatlarında uçucu küller kullanılmış ve Türk Standartları Enstitüsü uçucu kül (TS 639) ve uçucu küllü çimento (TS 640) standartlarını hazırlayarak yayınlamıştır. Bu standartlar ilerleyen yıllarda kaldırılarak yerine 2002 yılında TS EN 197-1 standardı getirilmiştir. Çimento kalite kontrol parametreleri olarak TS EN 197-1, TS EN 197-2 ve TS EN 196 serisi kullanılmaktadır.

TS EN 197-1'deki değişik çimento tiplerine göre çimentonun bileşen malzemeleri; ana bileşen (portland çimentosu klinkeri), ikinci ana bileşen (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kalker, silis dumanı), minör ilave bileşen (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kalker, doğal puzolan), priz ayarlayıcı (kalsiyum sülfat alçıtaşı) ve kimyasal katkılardır (pigmentler, hava sürükleyici katkıları). Uçucu küller, çimentoya hammadde olarak, klinker ya da alçıtaşı ile birlikte öğütülerek veya mamul çimentoya doğrudan olmak üzere üç

şekilde katılmaktadır (Yeğınobalı, 2003). TS EN 197-1 genel çimentolar standardında, sillissi ve kalkersi uçucu küllerin klinkere ağırlıkça % 6-35 arasında katılabileceği belirtilmiştir. Uçucu küllü çimentoların, istenen mekanik özellikleri sağlayabildikleri takdirde, sülfata dayanıklılık, geçirimsizlik, aşınma direnci ve düşük hidrasyon ısısı gibi olumlu yönde etkilediği saptanmıştır (Yıldırım ve Sümer, 2013).

1.4.3. Uçucu Küllerin Depolanması

Uçucu küller, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın 02.04.2015 tarihli, 29314 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği atık listesinde ısıtılma işleminden kaynaklanan atıklar grubunda olup, 10 01 02 kodu ile değerlendirilmekte ve tehlikeli atık sınıfında yer almamaktadır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın 19 Mart 2021 tarihinde Resmi Gazete'de yayımladığı 31428 sayılı Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmeliğin 5. maddesinin 2. bendinde; "Sıvı atıklar hariç olmak üzere; dışarıdan atık almamak kaydıyla sadece kendi tesisinde oluşun termik santral külleri, proses atıkları ve benzeri atıkların sulu olarak bertaraf edileceği depolama tesisleri için bu Yönetmelik maddelerine ilave olarak Ek-6'da yer alan işlemler uygulanır." ifadesi ile termik santral küllerinin nasıl depolanacağı belirtilmiştir.

EK-6'da sıvı atıklar hariç olmak üzere; dışarıdan atık almamak kaydıyla sadece kendi tesisinde oluşun termik santral külleri, proses atıkları ve benzeri atıkların sulu olarak bertaraf edileceği depolama tesisleri için bu yönetmelik maddelerine ilave olarak;

a. Tesislerin tabanında yeraltı suyu bulunması ya da yeraltı suyunun yükselerek tabanda teşkil edilecek geçirimsizlik sistemine zarar verme olasılığı bulunması durumunda, tabanda yeraltı suyunu drene edecek bir sistem oluşturulur.

b. Yağmur sularının atıkların depolandığı tesislere girişini ve dolayısıyla oluşturacağı hidrolik yükü önlemek amacıyla gerekli yağış hesabı yapılarak kuşaklama kanalları inşa edilir ve depolama tesisinde gerekli hava payı bırakılır.

c. İşletme aşamasında günde en az bir kez, kapatma sonrasında ayda en az bir kez olmak üzere depo gövdesine ve seddelerin duraylılığına ilişkin ölçümler yapılır. Uygun olmaması durumunda il müdürlüğüne 24 saat içerisinde bilgi verilir.

Aynı Yönetmeliğe "Elektrik üretim santralleri atıklarının depolandığı mevcut tesisler" için 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'nun geçici 8. maddesi kapsamında yer alan elektrik üretim santrallerinden kaynaklanan atıkların depolanmış olduğu sahalar için; "deprensellik, duraylılık, çevre kirliliği, tozuma açısından saha özelinde değerlendirmeleri, sahada yapılması gereken iyileştirme çalışmalarını, alınması gereken çevresel önlemleri ve depolama sahasının işletilmesinde uyulması gereken hususları içerecek kurumsal akademik rapor hazırlanarak işletmeciler tarafından Bakanlığa sunulur" olarak ifade edilmiştir (Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelikte Değişiklik Yapılması, 2019).

1.5. Çalışmanın Amacı

Bu yüksek lisans tezi kapsamında Çanakkale ilinde bulunan yakma teknolojileri ve kullandıkları kömür farklı olan 18 Mart Çan, Çan 2 ve Bekirli termik santralleri uçucu küllerinin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca laboratuvar ortamında liç testleri yapılarak uçucu küllerin çevresindeki yüzey ve yeraltı sularına olası etkilerinin saptanması amaçlanmıştır.

18 Mart Çan termik santrali uçucu küllerinin karakterizasyonu Baba vd. (2008; 2010; 2016) ve Şanlıyüksel Yücel (2017) tarafından belirlenmiştir. Bu çalışmada Çan 2 ve Bekirli termik santralleri uçucu küllerinin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin yanı sıra liç karakterizasyonu ilk kez saptanmış ve limit değerler ile karşılaştırılmış, olası çevresel etkileri değerlendirilmiştir.

İKİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Türkiye'de Uçucu Küllerin Çevresel Etkileri Hakkında Yapılan Çalışmalar

Şengül (1999), doktora tezinde Kangal termik santrali atık depolama alanından ve baca çıkışından aldığı uçucu küllerin fiziksel, mineralojik, kimyasal özelliklerini ve çevresel etkilerini değerlendirmiştir. Uçucu küldeki Se ve Sr elementleri konsantrasyonunun yer kabuğu ortalamasından daha yüksek olduğunu saptamıştır. Kolon testleri ile uçucu külden liçe Li, Na, K, Rb, Ca, Mg ve Sr elementlerinin yüksek konsantrasyonda geçtiğini fakat eser elementlerin limit değerini aşmadığını ifade etmiştir. Bu sebeple uçucu küllerin orta ve uzun vadede çevresel açıdan çok büyük bir kirletici olmadığını belirtmiştir.

Baba ve Türkman (2001), Yatağan termik santrali uçucu küllerinin yeraltı sularına olan etkisini araştırmıştır. Bunun için uçucu kül depolama alanındaki 3 adet 20 m derinliğindeki gözlem kuyularından her ay aldığı su numunelerinin kimyasal karakterizasyonunu belirlemiştir. Çoğunlukla sulama suyu ve içme suyu olarak kullanılan bu sularda, Cd ve Pb konsantrasyonunun EPA tarafından içme suları için önerilen 0,005 mg/l ve 0,015 mg/l sınır değerlerini aştığını ifade etmiştir. Ayrıca su örneklerindeki SO_4^{-2} konsantrasyonunun TS 266 standardına göre içme suları için önerilen maksimum sınır değeri aştığını vurgulamıştır.

Demirak vd. (2005), Yatağan termik santrali çevresindeki su kaynaklarından aldıkları su örneklerinin (kömür külü göleti ve içme suyu) iz element içeriklerini belirlemiştir. 3 kuyu, 1 santral yakın içme suyu sahası, 1 atık sahası (kömür külü göleti) seçilmiş ve numuneler düzenli olarak örneklenmiştir. Yeraltı suyunun As, Hg, Cu ve Zn konsantrasyonunun dünya sağlık örgütü (WHO) tarafından belirlenen limit değerlerden düşük olduğu tespit edilmiştir. Bazı yeraltı suyu örneklerinde ise Fe, Pb, Cd ve Mn konsantrasyonunun WHO limit değerlerinden daha yüksek olduğu saptanmıştır. Kömür külü göletindeki iz metal konsantrasyonlarının, Pb hariç, limit değerlerden düşük olduğu görülmüştür. İz metal konsantrasyonları şu an için sorun teşkil etmese de ilerleyen

dönemlerde problem olabilme ihtimaline karşı düzenli örnekleme ve analizlerin yapılması önerilmiştir. Yatağan termik santrali çevresindeki içme suyu kaynaklarını kapsayan daha detaylı araştırmaların yapılması gerekliliği vurgulanmıştır.

Türkmenoğlu vd. (2014), Ege Bölgesi'nde yer alan dört adet termik santralde (Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan) düşük kalorili linyitlerin yakılması sonucu ortaya çıkan uçucu küllerin Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb ve Zn metallerinin liç karakterizasyonu belirlemiş, farklı karakterdeki uçucu küllerin depolandıkları alanın yakın çevresindeki toprak ve yeraltı suyuna kirlilik etkisi değerlendirilmiştir. Uçucu küllerin Co, Cu, Cr, Pb ve Zn konsantrasyonunun yerkabuğu ortalama değerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Seyitömer termik santrali uçucu külünden suya en çok Cr (3,06 mg/l) ve Ni (1,38 mg/l) geçtiği, Tunçbilek termik santralinden suya en çok Cr (3,51 mg/l) geçtiği, Yatağan termik santrali ve Soma termik santrali uçucu küllerinden ise suya; Cu, Mn ve Zn hariç diğer metallerin geçtiği belirlenmiştir. Seri liç işlemlerinde tüm ağır metallerin suya geçişi beşinci günün sonunda tamamlanmış, kül örneklerinden liç çözeltilerine ağır metal geçiş verimlerinde en düşük geçişin Zn olduğu, en yüksek oranların ise Cd olduğu gözlenmiştir. En yüksek oranda Cr, Cu ve Ni içeren Seyitömer termik santrali külünden suya metal liçinin diğer uçucu küllerden düşük olduğu ve uçucu küllerin ağır metal içerikleri ile liç karakteristiklerinin birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir.

Sayılgan ve Kürklü (2018), Seyitömer termik santrali uçucu küllerindeki Fe ve Al elementlerinin farklı liç şartlarında giderim verimleri araştırılmıştır. Farklı asit/baz konsantrasyonları (HCl, HNO₃, CH₃COOH, NaOH), farklı sıcaklıklar (25, 50, 75 °C) ve farklı katı-sıvı oranı (1/5, 1/10, 1/15) Taguchi deneysel tasarımı dikkate alınarak test edilmiş ve değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en etkili reaktant olarak HCl ve HNO₃ olarak tespit edilmiş olup, optimum giderimi 1,5 M HCl konsantrasyonunda, 75 °C sıcaklıkta Fe için % 20 ve Al için ise % 35 olarak saptanmıştır.

2.2. Çanakkale İli'nde Uçucu Küller Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Baba vd. (2008), 18 Mart Çan termik santrali uçucu küllerinin içerdiği metallerin (As, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Se, Zn) farklı pH (3, 5 ve 7) ve sıcaklıkta (10, 20, 30, 40, 50 °C) suya liçini araştırmıştır. pH'ın azalması ve sıcaklığın artmasının külden suya metal geçişini

arttığını ifade etmiştir. Yerleşim yerlerine yakın olan kül depolama sahasının çimento üretimi, zemin stabilizasyonu vb. farklı alanlarda kullanılarak çevresel etkilerinin azaltılması gerekliliği vurgulanmıştır.

Baba vd. (2010), 18 Mart Çan termik santralinden aldıkları uçucu küllerin liç karakterizasyonunda sıcaklık (10, 20, 30, 40 °C) ve pH (3, 5, 7) etkisini incelemiştir. Küldeki maksimum As liçinin pH 3'te olduğunu ve artan sıcaklık ile liçin As konsantrasyonunun da arttığı saptanmıştır. Liçteki maksimum Se konsantrasyonunun pH 3'te ve 30 °C'de olduğu tespit edilmiştir. As ve Se'un küldeki diğer elementlere göre suya daha fazla geçebildiği, sıcaklık ve pH parametrelerinin uçucu küldeki elementlerin liç özelliklerini etkileyen önemli faktörler olduğu belirlenmiştir.

Baba vd. (2016), Çan linyitlerini 600 °C'de kül fırınında yakmış ve bu külleri element içerikleri bakımından 18 Mart Çan termik santrali uçucu külleri ile karşılaştırılmıştır. Kömürün yüksek ısıda yakılması sonucunda içerdiği As, Cu, Co, Cs, Mo, Nb, Sc, Pb, Pr, Th, U, V, Zn ve Zr konsantrasyonunun arttığı, termik santral uçucu küllerinin ise As, Co, Nb, Sc, U ve V konsantrasyonunun arttığı tespit edilmiştir. Özellikle küllerin içerdiği yüksek As ve radyoaktif element konsantrasyonunun çevre üzerinde olumsuz etkilere sebep olabileceği vurgulanmıştır.

Şanlıyüksel Yücel (2017), uçucu külün sentetik sulu çözeltilerdeki ağır metallerin giderimindeki etkinliğini belirlemiştir. 18 Mart Çan termik santrali uçucu küllerini adsorban olarak kullanılarak sentetik sulu çözeltilerdeki bazı metal iyonlarının (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Mn, Pb ve Zn) giderimi için kesikli testleri oda sıcaklığında gerçekleştirmiştir. Uçucu külün nötr pH koşullarında ve düşük dozda kullanılarak sulu çözeltilerden metal iyonları (özellikle Cu ve Cd) gideriminde uygun bir adsorban olarak kullanılabileceğini tespit etmiştir. Yüksek kalsiyum içeriğine sahip uçucu külün yüksek pH değeri ve yüksek adsorpsiyon kapasitesi nedeni ile asit maden drenajının nötralizasyonu ve metal gideriminde etkin bir adsorban olabileceğini vurgulamıştır.

Şanlıyüksel Yücel ve İleri (2018), asit maden drenajının rehabilitasyonunda İçdaş Biga termik santrali uçucu küllerinin etkinliğini araştırmıştır. Uçucu küllerin yüzey alanını arttırmak için küller 30 dakika boyunca 90 Watt'ta düşük frekansta (20 kHz) ultrases cihazı

ile modifiye edilmiştir. Modifikasyonun uçucu küllerde neden olduğu değişiklikler XRF, BET, SEM-EDX, XRD, FTIR ve partikül boyutu analizleri kullanılarak tanımlanmıştır. Modifiye uçucu küllerin daha düşük Si ve Al konsantrasyonuna, daha geniş yüzey alanına ve daha yüksek pH değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Kesikli liç testleri sonucunda asit maden drenajını nötralize etmek ve Al, Fe gibi metallerin giderimi için modifiye uçucu küllerin daha etkin olduğu saptanmıştır.

Şanlıyüksel Yücel ve Yücel (2017), 18 Mart Çan termik santrali kül depolama alanının farklı yıllara ait uydu görüntüleri ile çevre uzunluğu ve alansal değişimini tespit etmiştir. 2007 yılı Mart ayında kül depolama alanının 21,6 ha iken bu alanın yaklaşık 4,5 kat artarak 2017 yılı Haziran ayında 93,7 ha'a ulaştığı saptanmıştır. Zamana bağlı olarak artan kül depolama alanının çevresel risk açısından taşıyabileceği ifade edilmiştir.

Şanlıyüksel Yücel ve İleri (2020), İçdaş Biga termik santrali uçucu küllerinin Çanakkale ili Çan ilçesinde yer alan Etili kömür ocaklarının çevresindeki pasaların sebep olduğu asit maden drenajının nötralizasyonu ve metal giderimindeki etkisi laboratuvar ölçeğinde araştırmıştır. Kimyasal analizler, çamur pH'ı ve asit-baz hesaplama testleri ile maden sahasındaki pasaların efektif olarak asit maden drenajını nötralize etmek için en az % 30 uçucu kül ile karışması gerektiği saptanmıştır. Belirlenmiş olan optimum karışım oranına göre hazırlanan liç testleri sonucunda elektriksel iletkenlik, sülfat ve metal (Al, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn) konsantrasyonunun azaldığı, pH değerinin ise arttığı belirlenmiştir. Uçucu küllerin kullanımı ile asit maden drenajının meydana getirdiği çevresel etkileri minimize edilebileceği vurgulanmıştır.

Şahin vd. (2021), Tuzla jeotermal kaynağından bor gideriminde 18 Mart Çan termik santrali uçucu küllerinin etkinliğini araştırmıştır. Kesikli liç testleri sonucunda oda sıcaklığında pH 4'te 50 ml jeotermal sudan 2,5 g uçucu kül kullanılarak % 88 bor giderimi sağlanmıştır. Uçucu küllerin bor giderimde etkin bir adsorban olduğu, termodinamik sonuçlara göre bor adsorpsiyon sürecinin spontane ve ekzotermik olduğunu ifade etmiştir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Literatür Tarama

Literatür derlemesi çalışma alanıyla ilgili önceki çalışmaların yanı sıra dünyada uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakterizasyonu, kullanım alanları ve liç özellikleri ve çevresel etkileri ile ilgili tüm çalışmaları kapsamaktadır. Önceki çalışmalar ışığında yüksek lisans tezine katkı sağlanarak yüksek lisans tezi hazırlanmıştır.

3.2. Arazi Çalışmaları

Arazi çalışmaları kapsamında Çanakkale ilindeki 18 Mart Çan, Çan 2 ve Bekirli termik santrallerinden uçucu kül örnekleri temin edilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. a) 18 Mart Çan, b) Çan 2 ve c) Bekirli termik santrallerinden görünüm (“Enerji atlası kömür”, 2022; “Odaş enerji üretim”, 2022)

3.3. Laboratuvar Çalışmaları

3.3.1. Uçucu Küllerin Karakterizasyonu

Uçucu kül örneklerinin kimyasal bileşimi (majör oksit, iz element ve nadir toprak element ve % S tayini) ICP-MS (PerkinElmer SCIEX Elan 9000) ve Leco (LECO CS230) cihazları ile Bureau Veritas Laboratuvarı'nda Ankara'da belirlenmiştir. Uçucu küllerin mineralojik bileşimi X-ışını kırınım (XRD) yöntemi (Philips PW 1830) ile MTA Genel Müdürlüğü Mineraloji Petrografi Laboratuvarı'nda Ankara'da yapılmıştır. Uçucu küllerin kristal yapılarını ve elemental içeriğini belirlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu/X-ışını spektroskopisi (SEM/EDX) analizleri (JEOL JSM-7100F/Oxford Instruments X-Max) ve spesifik yüzey alanının belirlenmesi için BET analizleri (Quadrascorb SI, Quantachrome) Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır. Uçucu küllerin partikül boyutu Mastersizer analizi (Malvern Panalytical) ile İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarları Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde belirlenmiştir.

3.3.2. Liç Testleri

Uçucu küllerin liç karakterizasyonunun belirlenmesi için Ward vd. (2010) tarafından önerilen metot kullanılmıştır. Tane boyutu 5 mm'den küçük olan 32 g örnek 112 g saf su (katı:sıvı oranı 1:3,5 olacak şekilde) ile 110 rpm de orbital çalkalayıcıda oda sıcaklığında karıştırılmıştır (Şekil 10). Örneklerde 1, 3 ve 7 günün sonunda liçin pH ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri WTW 340i markalı multiparametre ölçer ile direk olarak ölçülmüş, sonrasında örnekler santrifüjlenerek, 0,22 µm filtre ile filtrelenmiştir. Her deney 3 kez tekrarlanmıştır. Liçin metal analizleri öncesinde pH 2'nin altına indirilmesi için HNO₃ ile asitlendirilmiş ve ICP-MS cihazı (PerkinElmer NexION 2000) ile Bureau Veritas Laboratuvarı'nda analiz edilmiştir. SO₄⁻² analizleri için örnekler asitlendirilmemiş, IC cihazı (Shimadzu LC-20A SP) ile Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde ölçülmüştür.



Şekil 11. Liç testleri için orbital çalkalayıcıda örneklerin karıştırılması

3.4. Büro Çalışmaları

Elde edilen fiziksel, kimyasal ve mineralojik analiz sonuçları birlikte değerlendirilerek uçucu küllerin kimyasal analiz sonuçları Çan linyitleri, Türkiye ve dünya kömürleri ortalama değerleri ile karşılaştırılmıştır. Uçucu küllerin liç karakteristiği ulusal standartlar ile karşılaştırılarak yüzey ve yeraltı sularına olası etkileri değerlendirilmiştir. Yüksek lisans tezi Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü yazım formatına uygun olarak hazırlanmıştır.

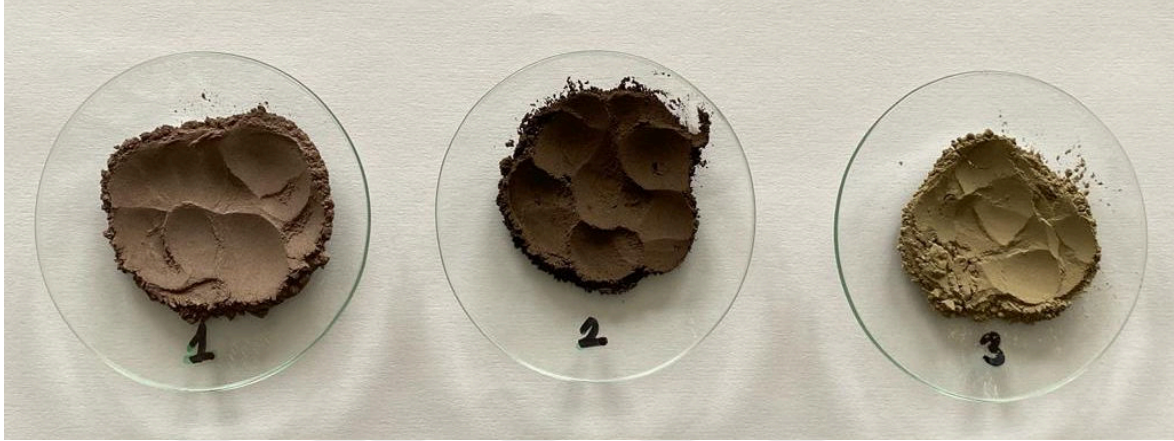
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Uçucu Küllerin Fiziksel, Kimyasal ve Mineralojik Karakterizasyonu

18 Mart Çan termik santrali uçucu külleri koyu gri renktedir (Şekil 12). Uçucu küllerin tane boyutu 0,99-211 µm arasında, D₅₀ değeri 40,9 µm olup, spesifik yüzey alanı ise 14,6 m²/g'dir. Küllerin mineralojik bileşimi anhidrit, kalsit, hematit, manyetit, kuvars, portlandit, kristobalit, kireç, illit ve plajiyoklaz minerallerinden oluşmaktadır (Tablo 7). 18 Mart Çan termik santralinde kullanılan Çan linyitlerinin mineralojik bileşiminde Gürdal (2011) kaolinit, kuvars, mika, pirit, feldspat, jips, zeolit, tridimit ve klorit mineralleri tespit etmiştir. Küllerin SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ toplamı % 59,73, CaO içeriği ise % 21,62 olup, ASTM C618 standardına (2019) göre C sınıfı uçucu küldür (Tablo 8). Linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen C sınıfı uçucu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar (Türker vd., 2009). Küllerin toplam S ve C içeriği sırasıyla % 4,32 ve % 1,82'dir. Uçucu külden bulunan C miktarı kömür tipine ve yakma işlemine göre değişiklikler göstermektedir (Güler vd., 2005). Ateşte zayıt değeri % 8'dir. Küllerin bileşimindeki elementler As> Sr> Ba> Zr> Zn> Cu> Pb> Co> Ni> Mo> Se> Sb> Hg> Cd dizilimindedir (Tablo 9). Uçucu küllerin As, Ba, Co, Cu, Mo, Pb, Sb, Se ve Zn konsantrasyonunun Gürdal (2011) tarafından belirlenen Çan linyitleri element konsantrasyonundan daha yüksek olduğu saptanmıştır. Gürdal (2011) jeokimyasal analiz sonuçlarına göre Çan linyitleri As konsantrasyonunun 1,4 ile 6413 mg/kg arasında değiştiğini, ortalama değerinin 253 mg/kg olduğunu ifade etmiştir. Arsenik, kömürün hem mineral hem de organik bileşenlerine bağlı olarak bulunmaktadır, en çok pirit ile birlikte bulunur ve kömürün pirit yüzdesi arttıkça As oranı da artmaktadır (Ketris ve Yudovich, 2009; Ünal, 2013). Külde saptanan As konsantrasyonu (810,3 mg/kg) Çan linyitleri ortalama As konsantrasyonundan 3 kat daha fazladır. Ayrıca uçucu külün As, Ba, Co, Cu, Mo, Pb, Se ve Zn konsantrasyonu Ketris ve Yudovich (2009) tarafından tespit edilen dünya kömür ortalama değerinin üstünde olduğu saptanmıştır. Çan linyitlerinin ortalama Se konsantrasyonu 1,1 mg/kg'dır (Gürdal, 2011). Selenyumun klostalit (PbSe) ve kruksit [(Cu, Tl, Ag)₂ Se] mineralleri mevcut olup, pirit vb. sülfidler içerisinde değişik oranlarda bulunur (Ünal, 2013). Gürdal (2011) Çan linyitlerindeki As, Cd, Hg, Se, Cu, Mo, Ni, ve Zn elementlerini pirit ile, B, Mo ve Se elementlerini linyitteki organik ve inorganik içeriği ile ilişkilendirmiştir. SEM

görüntülerinde uçucu kül taneleri düzensiz şekilli, köşeli taneli ve mikro gözenekli yapıdadır (Şekil 13 a ve b). EDX analizinde O, C, Si, Al, Fe, Ca, S, Na ve Ti elementleri tespit edilmiştir.



Şekil 12. 1 no'lu örnek 18 Mart Çan, 2 no'lu örnek Çan 2 ve 3 no'lu örnek Bekirli termik santralleri uçucu küllerinin görünümü

Tablo 7

Uçucu küllerin mineralojik bileşimi

18 Mart Çan TS uçucu külü		Çan 2 TS uçucu külü		Bekirli TS uçucu külü	
Mineral İçeriği	Formül	Mineral İçeriği	Formül	Mineral İçeriği	Formül
Anhidrit	CaSO ₄	Hematit	Fe ₂ O ₃	Kuvars	SiO ₂
Kalsit	CaCO ₃	Mullit	3Al ₂ O ₃ 2SiO ₂	Manyetit	Fe ₃ O ₄
Hematit	Fe ₂ O ₃	Manyetit	Fe ₃ O ₄	Hematit	Fe ₂ O ₃
Manyetit	Fe ₃ O ₄	Kuvars	SiO ₂	Mullit	3Al ₂ O ₃ 2SiO ₂
Kuvars	SiO ₂	Anhidrit	CaSO ₄		
Portlandit	Ca(OH) ₂	Kristobalit	SiO ₂		
Kristobalit	SiO ₂				
Kireç	CaO				
İllit	K _{0.65} Al _{2.0} [Al _{0.65} Si _{3.35} O ₁₀](OH) ₂				
Plajiolklaz	NaAlSi ₃ O ₈ - CaAl ₂ Si ₂ O ₈				

Tablo 8

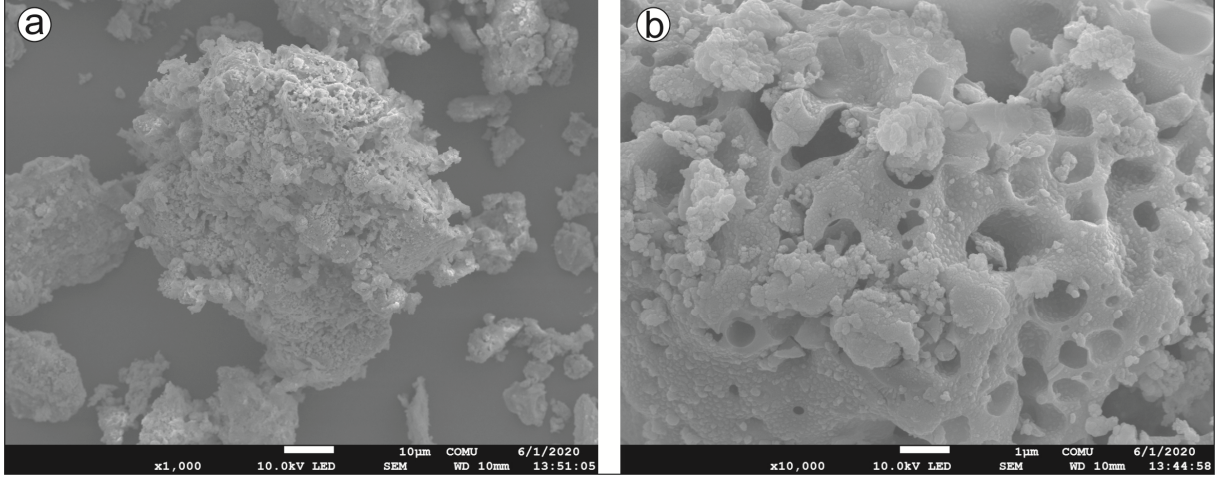
Uçucu küllerin majör bileşenlerinin ortalama, Çan linyitleri ve Türkiye kömürleri majör bileşenlerinin minimum ve maksimum değerleri (%)

Bileşen	18 Mart Çan TS uçucu külü	Çan 2 TS uçucu külü	Bekirli TS uçucu külü	Çan linyitleri (Gürdal, 2011)	Türkiye kömürleri (Palmer vd., 2004)
SiO ₂	31,49	47,57	59,39	0,47-45,23	0,81-36,37
Al ₂ O ₃	18,03	26,06	20,07	0,4-29,55	0,62-12,47
Fe ₂ O ₃	10,21	15,65	7,72	0,05-14,12	0,54-11,58
MgO	0,48	1,26	1,75	0,03-0,47	0,09-3,98
CaO	21,62	3,69	3,4	0,13-1,73	0,07-18,19
Na ₂ O	0,51	0,84	2,36	0,02-1,13	0,01-2,29
K ₂ O	0,37	0,78	1,73	0,04-0,82	0,02-2,05
TiO ₂	0,63	0,86	0,89	0,02-0,83	0,02-0,77
P ₂ O ₅	0,16	0,29	0,17	0,01-0,09	0,03-0,27
MnO	0,09	0,12	0,04	0,01-0,03	0,01-0,08
LOI	8	2,5	1,8	30,1-97,7	-
S	4,32	0,74	0,32	0,21-14,36	0,21-9
C	1,82	0,62	0,31	-	-

Tablo 9

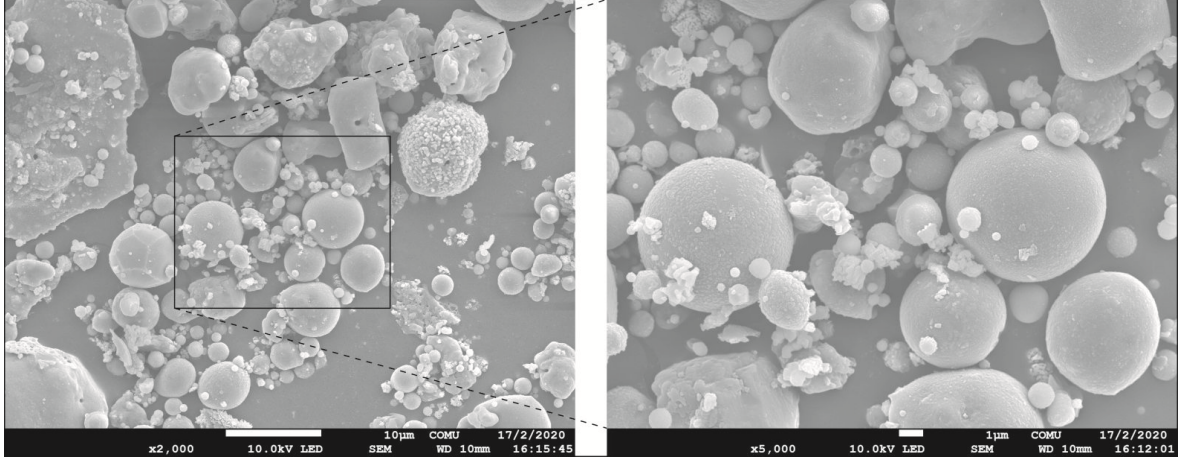
Uçucu küllerin ve dünya kömür element içeriğinin ortalama, Çan linyitleri ve Türkiye kömürleri element içeriğinin minimum ve maksimum değerleri (mg/kg)

Element	18 Mart Çan TS uçucu külü	Çan 2 TS uçucu külü	Bekirli TS uçucu külü	Çan linyitleri (Gürdal, 2011)	Türkiye kömürleri (Palmer vd., 2004)	Dünya kömür ortalama değeri (Ketris ve Yudovich, 2009)
As	810,3	871,7	45,5	1,4-6413,8	1,8-620	83
Ba	351	568	3053	12,2-735	15-590	150
Cd	0,1	0,1	2,2	0,1-2	-	0,22
Co	18,6	27,8	25,8	0,5-74,2	0,87-51	5,1
Cu	36,5	31,4	47,5	1,9-67,5	1,5-100	16
Hg	0,1	0,02	0,13	0,01-0,29	0,03-0,66	0,1
Mo	6,6	9,5	27,6	0,1-41,6	0,43-69	2,2
Ni	10,9	33	39,3	0,8-40,1	3,1-1600	13
Pb	20,8	6,5	14,5	0,7-97	0,95-58	7,8
Sb	0,5	0,8	8,3	0,1-1,5	0,12-41	0,9
Se	1,5	0,7	18,3	0,5-7	0,045-24	1,3
Sr	361,8	673,6	1070,7	-	2,7-1300	-
Zn	51	46	65	3-524	5,8-260	23
Zr	148,3	200,2	235	-	-	-



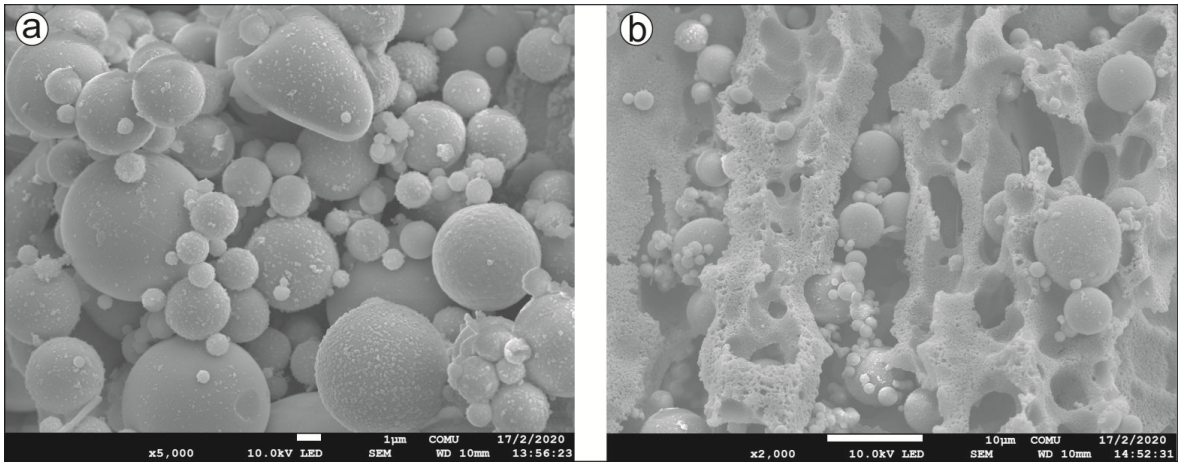
Şekil 13. a. 18 Mart Çan termik santrali uçucu küllerindeki düzensiz şekilli, köşeli tanecikler b. Uçucu küldeki mikro gözenekler

Çan 2 termik santrali uçucu külleri koyu kahverengi renktedir. Küllerin tane boyutu 0,76-272 µm arasında, D₅₀ değeri 45,5 µm olup, spesifik yüzey alanı ise 5,8 m²/g'dır. Küllerin mineralojik bileşimi hematit, mullit, manyetit, kuvars, anhidrit ve kristobalit minerallerinden oluşmaktadır. SiO₂+Al₂O₃+ Fe₂O₃ toplamı % 89,28 ve CaO içeriği ise % 3,69'dur. ASTM C618 standartına (2019) göre F sınıfı uçucu küldür. Külün içerdiği element konsantrasyonu sırasıyla As> Sr> Ba> Zr> Zn> Ni> Cu> Co> Mo> Pb> Sb> Se> Cd> Hg dizilimindedir. Çan 2 termik santrali uçucu külleri As konsantrasyonu 871,7 mg/kg olarak belirlenmiştir Palmer vd. (2004) Türkiye kömürleri As konsantrasyonu ortalama değerinin 65 mg/kg olduğunu saptamıştır. Uçucu küllerin As, Ba, Co, Cu, Mo, Ni ve Zn konsantrasyonu dünya kömür ortalama değerinin üstündedir. Tuncalı vd. (2002), Türkiye Tersiyer kömürlerindeki ortalama As, Cd, Co, Cr, Mn, Ni ve Se konsantrasyonun dünya ortalama değerlerinden yüksek olduğunu tespit etmiştir. SEM görüntülerinde çapı 1 µm ve daha büyük olan düzenli küresel tanecikler ve yer yer düzensiz tanecikler mevcuttur (Şekil 14 a ve b). Uçucu küller, baca gazı akımında maruz kaldıkları yüksek sıcaklıklar ve aniden soğuma nedeni ile düzenli, küresel ve pürüzsüz yüzeylere sahip olmaktadır (Türkmenoğlu vd., 2014). EDX analiz sonuçlarında O, C, Si, Ca, Fe, Al, Mg, Na ve K elementleri tespit edilmiştir.



Şekil 14. Çan 2 termik santrali uçucu küllerindeki küresel tanecikler

Bekirli termik santrali uçucu külleri koyu bej renktedir. Küllerin tane boyutu 0,67-144 µm arasında, D_{50} değeri 17 µm olup, spesifik yüzey alanı ise 0,81 m²/g'dır. Küllerin mineralojik bileşimi kuvars, manyetit, hematit ve mullit minerallerinden oluşmaktadır. SiO₂+Al₂O₃+ Fe₂O₃ toplamı % 87,18 ve CaO içeriği ise % 3,4'tür. ASTM C618 standardına (2019) göre F sınıfı uçucu küldür. Külün içerdiği element konsantrasyonu sırasıyla Ba> Sr> Zr> Zn> Cu> As> Ni> Mo> Co> Se> Pb> Sb> Cd> Hg dizilimindedir. Küllerin Ba, Cd, Co, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se ve Zn konsantrasyonu dünya kömür ortalama değerinin üstündedir. SEM görüntülerinde taneler düzenli küresel şekilli ve yanmamış karbon mikro gözenekli yapıdadır (Şekil 15 a ve b). EDX analiz sonuçlarında O, C, Si, Al, Fe, Na, Ca, Mg, K, S ve Ti elementleri tespit edilmiştir.



Şekil 15. Bekirli termik santrali uçucu küllerinde a. küresel tanecikler b. yanmamış karbon

4.2. Uçucu Küllerin Liç Karakterizasyonu

Uçucu kül liçlerinin zamana bağlı olarak pH değerlerinin azaldığı ve EC değerlerinin ise arttığı tespit edilmiştir (Tablo 10). Kül liçleri bazik olup, 18 Mart Çan ve Çan 2 termik santrali kül liçlerin pH değerleri İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (İTASHY, 2016) limit değerlerinin üzerindedir. 18 Mart Çan termik santrali kül liçinin pH değeri 1. günde 12,32, 7. günde ise 9,91 olarak ölçülmüştür. Bu durumun sebebi mineralojik bileşiminde kalsit olan küldeki CaCO_3 'ün hızla çözünmesi ile 1. gün ölçülen pH değeri en yüksek olup, sonrasında ortama yeni giren iyonlar ile birlikte OH^- iyon miktarı değişmiş ve pH değeri azalma eğilimi göstermiştir. Sulardaki çözünmüş toplam iyon konsantrasyonu ile EC değerleri arasında genellikle doğrusal bir ilişki vardır (Eroğlu ve Aksoy, 2007). 7. günde 18 Mart Çan, Çan 2 ve Bekirli termik santralleri uçucu kül liçlerinin EC değerleri sırasıyla 3,84, 2,98 ve 2,55 mS/cm olarak ölçülmüştür. İTASHY (2016)'e göre EC için limit değer 2,5 mS/cm olup, tüm kül liçlerinin EC değerleri limit değeri aşmaktadır.

Tüm uçucu kül liçlerindeki element konsantrasyonunun zamana bağlı olarak arttığı saptanmıştır. 18 Mart Çan termik santrali uçucu kül liçinin Al, As, Se ve SO_4^{2-} konsantrasyonu, Çan 2 termik santrali uçucu kül liçinin Al, As, B, Se ve SO_4^{2-} konsantrasyonu ve Bekirli termik santrali uçucu kül liçinin Al, As, B, Cr, Na, Se ve SO_4^{2-} konsantrasyonu İTASHY (2016) limit değerlerinden yüksektir. En yüksek As konsantrasyonu 7. günün sonunda Çan 2 termik santrali uçucu kül liçinde 2035,9 $\mu\text{g/l}$ olarak tespit edilmiştir. Bu değer limit değerden 203 kat daha yüksektir. İTASHY (2016)'de Se için limit değer 10 $\mu\text{g/l}$ 'dir. Bekirli termik santrali uçucu kül liçinde Se konsantrasyonu 339,2 $\mu\text{g/l}$ olarak tespit edilmiş olup, limit değerden yaklaşık 34 kat daha yüksektir. Ayrıca uçucu kül liçlerindeki Li, Mo ve Sr konsantrasyonunun yüksek olduğu tespit edilmiştir. Tüm uçucu kül liçlerindeki Co, Fe, Ni ve Pb konsantrasyonunun, 18 Mart Çan ve Çan 2 uçucu kül liçlerindeki Cd ve 18 Mart Çan uçucu kül liçlerindeki Mn konsantrasyonunun düşük olması nedeni ile ölçüm değerleri dedeksiyon limitinin altında kalmıştır.

Uçucu küldeki zehirli elementlerin ne kadar alındığı (miktarı), nasıl alındığı (solunarak, yenerek veya içilerek, temas sonucu) ve maruz kalınma sıklığı sağlık etkilerini

belirlemektedir (Bilici Başkan ve Pala, 2009; Zierold ve Odoh, 2020). Arsenik konsantrasyonu yüksek olan suların düzenli ve uzun süreli kullanımında cilt hastalıkları özellikle de pigmentasyon değişiklikleri görülmekte ve cilt kanseri oluşumları bildirilmektedir. Yapılan araştırmalarda yüksek konsantrasyonda As, kansere kadar ulaşabilen solunum yolu, karaciğer ve idrar yollarına ilişkin sağlık sorunları ile şeker hastalığı, kalp-damar ve sinir sistemi hastalıklarına da yol açtığını göstermiştir (Tchounwou vd., 2003). Finkelman ve Tian (2018), Çin'de dünyadaki diğer ülkelerden daha fazla kömür tüketildiğini, kömürün yüksek As, Hg, Se ve F içerdiği için çevre ve sağlık üzerinde olumsuz etkilere sebep olduğunu ifade etmiştir. Finkelman vd. (2002), Çin'in güneyinde Guzhou eyaletinde çıkan kömürlerin yüksek oranda As içerdiğini (ortalama değer 276 mg/kg) ve bu eyalette yaşayan 3000'den fazla kişinin As sebebi ile hastalandığını ifade etmiştir.

Kömürün yanması sırasında yüksek sıcaklığın etkisi ile kömür içindeki Se, SeO_2 'ye dönüşerek buhar olarak atmosfere çıkmakta, soğuma ile yoğunlaşarak uçucu küllere yapışmaktadır (Ünalın, 2013). Vücutta Se fazlalığı saç ve tırnak dökülmelerine neden olmakta ve sinir sistemini etkilemektedir. Çin Hubei eyaletinde 1923 ile 1988 yılları arasında 477 kişide Se fazlalığından kaynaklanan selenozis hastalığı saptanmıştır (Plant vd., 2005).

Yüksek Al konsantrasyonu diyaliz demansı, kemik yumuşaması, mikrositik anemi gibi hastalıklara sebep olabilmektedir. Al toksisitesinin başlıca belirtileri azalan zihinsel işlev, unutkanlık, konsantre olamama, konuşma ve dil bozukluğu, depresyon, görsel veya işitsel halüsinasyon, kırıklı osteomalazi, zayıflık yorgunluk, anemi epileptik nöbetlerdir (Crisponi vd., 2013). Yüksek Al maruziyetinin insanlarda Alzheimer hastalığının gelişimi veya başlangıcının hızlanması için bir risk faktörü olduğu WHO (2017) tarafından belirtilmiştir.

Sülfür bileşikleri çeşitli reaksiyonlar sonunda oluşturdukları tat, koku, toksisite ve korozyon gibi problemleriyle önemli kirletici konumundadırlar (Varol vd., 2008). Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat insanlarda müshil etkisi yaratması nedeni ile SO_4^{2-} için ITASHY (2016)'te 250 mg/l üst sınırla sınırlandırılmıştır.

Tablo 10

Uçucu küllerin Ward vd. (2010) yöntemine göre uygulanan liç testi sonuçları

	Birim	18 Mart Çan termik santrali uçucu kül liçi			Çan 2 termik santrali uçucu kül liçi			Bekirli termik santrali uçucu kül liçi			İTSHY (2016)*
		1. gün	3. gün	7. gün	1. gün	3. gün	7. gün	1. gün	3. gün	7. gün	
pH	-	12,32	10,72	9,91	9,96	9,78	9,34	8,85	8,74	8,67	6,5-9,5
EC	mS/cm	3,18	3,25	3,84	2,75	2,84	2,98	2,48	2,51	2,55	2,5
Al	µg/L	198	236	270	1105	1368	1601	986	1174	1658	200
As		90,5	118,9	132,1	1476	1692	2035,9	30,3	37,1	58,2	10
B		295	310	316	3004	3962	5062	2478	3098	4005	1000
Ba		112	120,4	153,05	50,6	63,8	107,83	101,6	125	204	1000
Br		217	230	246	12	17,5	29	10,8	12,2	17	-
Cd		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,23	0,4	0,74	3
Co		<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	10
Cr		1,2	1,5	1,9	2,3	4,8	10,9	30,8	45	104	20
Cu		3,75	4,1	4,9	1,1	2,8	4,2	0,89	1,22	1,5	20
Fe		<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	200
Li		1004,8	1144	1381,4	1012	1538	1730,9	100,2	150,5	290,5	-
Mn		<0,05	<0,05	<0,05	1,02	3,33	5,69	0,89	1,64	3,91	50
Mo		486	509,1	573,2	605,4	630,1	958,9	1174	1430	1883	-
Ni		<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	20
Pb		<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	-
Se		16,9	22,5	30,6	18,2	30,1	54,5	200,8	255,1	339,2	10
Si		5634	6047	6729	402	521,7	839	189,5	306	435	-
Sr		8961,2	9055	9590,15	1974	2263,1	3847,47	3005	3547,3	4796	-
Zn		2,8	3	3,3	1,8	2,9	7,2	0,55	0,84	1,3	200
Ca ⁺²		mg/L	729,1	775	884,2	364,9	403	598,98	362,1	397	525,8
K ⁺	17,35		18,21	23,09	3,9	4,5	8,77	7,96	12,8	20	-
Mg ⁺²	0,95		0,96	1,02	0,53	0,86	1,73	2,6	4,28	6	-
Na ⁺	74		87	92	104,1	110	143,21	216	244	319	200
SO ₄ ⁻²	1620		1695	1850	755	896	1025	762	915	1078	250

*İTASHY = İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Termik santrallerin farklı yakma teknolojileri ve kullandıkları kömürlerin farklılığı yanma sonrası ürünlerinin de farklılığına sebep olmaktadır. Ayrıca kullanılan kömür aynı havzadan bile olsa kömür damarlarındaki değişkenlik kömürün karakterizasyonunu değiştirebilmektedir. Bu yüksek lisans tezinde Çanakkale ilindeki üç termik santralin uçucu küllerinin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri ve liç karakterizasyonu belirlenmiş, heterojen uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin yanı sıra liç karakteristiğinin de farklı olduğu saptanmıştır.

18 Mart Çan termik santrali külleri CaO içeriği % 21,62 ile ASTM C618 standardına göre C sınıfı uçucu küllerdir. Çan 2 ve Bekirli termik santralleri uçucu külleri ise F sınıfındadır. Ortalama tane boyutu en küçük olan Bekirli termik santrali uçucu külleridir. 18 Mart Çan termik santrali uçucu külleri ise en geniş spesifik yüzey alanına sahiptir. Elektron mikroskobu görüntülerinde 18 Mart Çan termik santrali uçucu külleri düzensiz ve köşeli morfolojide iken diğer uçucu küllerin küresel morfolojide olduğu saptanmıştır. Akışkan yataklı termik santral atığı olan uçucu küllerin mineralojik bileşiminde diğer uçucu küllerden farklı olarak kalsit, kireç ve kalsiyum hidroksit mineralleri tespit edilmiştir. En yüksek S ve C içeriği 18 Mart Çan termik santrali uçucu küllerinde saptanmıştır. Tüm uçucu küllerin Ba, Co, Cu, Mo, Pb, Se ve Zn konsantrasyonunun dünya ortalama kömür değerlerinden yüksek olduğu belirlenmiştir. 18 Mart Çan ve Çan 2 termik santralleri uçucu küllerinin As konsantrasyonunun Çan linyitleri, Türkiye ve dünya kömür ortalama değerlerinden oldukça yüksek olduğu saptanmıştır.

Tüm uçucu kül liçlerinde zamana bağlı olarak pH değeri azalırken, EC değeri ve element konsantrasyonu artmıştır. Tüm uçucu kül liçlerinin Al, As, Se ve SO_4^{-2} konsantrasyonunun limit değerlerden yüksek olduğu saptanmıştır. 18 Mart Çan ve Çan 2 termik santralleri uçucu külleri yüksek konsantrasyonda As içermelerine rağmen

bileşiminde CaCO_3 bulunan ve pH değeri daha yüksek olan 18 Mart Çan termik santrali uçucu kül liçindeki As konsantrasyonunun daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Farklı deney koşullarında (karışım oranı, pH, sıcaklık, karışma hızı ve süre) uçucu küllerin liç özellikleri de farklı olabilir. Ward vd. (2010) tarafından önerilen yöntemle elde edilen sonuçlar ile uçucu kül liçinin içerdiği yüksek element konsantrasyonunun kül depolama alanı ve çevresindeki yüzey ve yeraltı sularını ya da toprağı kirletme riski olduğu saptanmıştır.

5.2. Öneriler

Uçucu küller içerdiği yüksek element konsantrasyonu, yeterli kullanım alanının olmaması ve büyük hacimlerde depolanması nedenleri ile uygun şekilde yönetilmediği ve uygun kontrol önlemleri alınmadan depolandığı zaman çevre üzerinde risk oluşturmaktadır. Dünyada uçucu küller özellikle çimento ve betondaki su ihtiyacını azalttığı ve dayanımı arttırdığı için katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Uçucu küllerin farklı sektörlerde kullanım alanları olmasına rağmen, Türkiye'de uçucu küllerin kullanım oranı düşük olup, kullanım alanlarının artırılması önerilmektedir.

18 Mart Çan termik santrali külleri içerdiği kalsiyum hidroksitinin beton dayanımını azaltması nedeni ile beton üretiminde kullanılamamaktadır. Fakat Çan linyit havzasında önemli bir çevresel sorun teşkil eden asit maden drenajının nötralizasyonu ve toksik element gideriminde yüksek adsorpsiyon kapasitesi, geniş yüzey alanı, yüksek CaO içeriği ve pH değeri ile 18 Mart Çan termik santrali uçucu külleri kullanımının araştırılması önerilir. Şanlıyüksel Yücel ve İleri (2020), uçucu küllerin pasalar ile karıştırıldığında pasaların boşluklarındaki su akışını engelleyerek asit maden drenajı üretiminde azalmaya neden olduğunu ve toksik elementlerin zamanla seyreltiğini ifade etmiştir. Çokça (2001), yüksek CaO içerikli Soma termik santrali uçucu küllerinin C sınıfı küller olduğunu belirtmiş, bu uçucu külleri genişleyen zeminlerin iyileştirilmesi için stabilize edici madde olarak kullanmıştır. Kimyasal bileşim, tane boyutu dağılımı, kıvam limitleri ve serbest şişme testleri sonucunda yüksek kalsiyumlu uçucu küllerin genişleyen zeminleri başarılı bir şekilde stabilize ettiğini saptamıştır.

Farklı deney koşullarında daha uzun süreli liç testleri uygulanarak uçucu kül liçinin pH ve EC değerleri ve element konsantrasyonunun zamana bağlı olarak değişimi saptanabilir. Ayrıca laboratuvar uygulamalarının saha uygulamalarına dönüştürülmesi ile yerleşim yerlerinin yakınında bulunan termik santral kül depolama alanları çevresindeki yüzey ve yeraltı sularından, dere sedimentinden ve topraktan düzenli örnekler alınarak uçucu küllerin çevresel etkilerinin belirlenmelidir. Uçucu kül depolama alanlarının yakın çevresinde yeraltı suyu gözlem kuyuları açılarak düzenli örnekler alınmalı ve limit değeri aşan elementlerin ve özellikle arseniğin yeraltı sularına olası etkileri kontrol edilmelidir.



KAYNAKÇA

- Abacıoğlu, M. (2012). *Mevcut bir termik santralde pülverize kazanın akışkan yataklı kazana dönüşümünün incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 302560).
- ACI, (2003). *Use of Fly Ash in Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- Ahmaruzzaman, M. (2009). "Role of fly ash in the removal of organic pollutants from wastewater". *Energy & Fuels*, 23(3), 1494-1511.
- Ahmaruzzaman, M. (2010). "A review on the utilization of fly ash". *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327-363.
- Akar, G. (2009). *Kül mineral madde içeriğinin yanma prosesindeki etkilerinin incelenmesi*. (Doktora tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 243568).
- Aktaş, E., ve Alioğlu, O. (2012). "Türkiye’de enerji sektörü analizi: Marmara bölgesi termik santraller örneği". *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 281-297.
- Akyüz, E. ve Kaynak Tezel, B. (2017). "Çanakkale’de kurulması planlanan kömür yakıtlı termik santrallerin hava kirliliğine katkısının belirlenmesi", *VII. Ulusal Hava Kirliliği Kontrolü Sempozyumu*, 1-3 Kasım 2017, Akdeniz Üniversitesi, Antalya. 450-465.
- Arabacı, İ. (2019). *Dolaşımli akışkan yataklı termik santrallerde kömür özelliklerinin santral verimine etkileri*. (Yüksek lisans tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 543649).
- ASTM C618, (2019). *Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, 2019 Edition, January 1, 2019.
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (2019, 26 Aralık). *Resmi Gazete* (Sayı: 30990 (Mükerrer)). Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/12/20191226-16.htm>
- Avcı, S. (2005). "Türkiye’de Termik Santraller ve Çevresel Etkileri". *Coğrafya Dergisi*, 4, 1-23.
- Baba, A., and Türkman, A. (2001). "Investigation of geochemical and leaching characteristics of solid wastes from Yeniköy (Muğla-Turkey) Power Plant". *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 25(4), 321-329.

- Baba, A., Gürdal, G., Şengunalp, F. and Özay, O. (2008). "Effects of leachant temperature and pH on leachability of metals from fly ash. A case study: Can thermal power plant, province of Canakkale, Turkey". *Environmental Monitoring and Assessment*, 139(1), 287-298.
- Baba, A., Gürdal, G. and Şengunalp, F. (2010). "Leaching characteristics of fly ash from fluidized bed combustion thermal power plant: case study: Çan (Çanakkale-Turkey)". *Fuel Processing Technology*, 91(9), 1073-1080.
- Baba, A., Gürdal, G. and Şanlıyüksel Yücel, D. (2016). "Enrichment of trace element concentrations in coal and its combustion residues and their potential environmental and human health impact: Can coal basin, NW Turkey as a case study". *International Journal of Environmental Technology and Management*, 19(5-6), 455-480.
- Benscheidt, N., vom Berg, W., Feuerborn, H.-J., Heinz, D., Hohberg, I., Hugot, A., Lutze, D., Mengede, M., Pierkes, R., Schneider, E. and Wiens, U. (2010). *Handbook on fly ash in concrete (2nd Ed.)*. Verlag Bau+Technik GmbH: Duesseldorf.
- Bilici Başkan, M. ve Pala, A. (2009). "İçme sularında arsenik kirliliği: ülkemiz açısından bir değerlendirme". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(1), 69-79.
- Bosbach, D., ve Enders, M. (1998). "Microtopography of high-calcium fly ash particle surfaces". *Advances in Cement Research*, 10(1), 17-23.
- BP (2019). BP Dünya Enerjisinin İstatistiksel İncelemesi. Erişim:6 Aralık 2020, https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy_economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf.
- BP (2020). BP Dünya Enerjisinin İstatistiksel İncelemesi. Erişim 17 Aralık 2021, https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy_economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf.
- BP (2021). Dünya enerji istatistikleri raporu özeti. Erişim 8 Ocak 2022, <https://www.dunyaenerji.org.tr/bp-2021-dunya-enerji-istatistikleri-raporu-ozeti/>.
- Carbonbrief Mapped: the world's coal power plants, (2020). Erişim: 29 Aralık 2020, <https://www.carbonbrief.org/mapped-worlds-coal-power-plants>.
- Crisponi, G., Fanni, D., Gerosa, C., Nemolato, S., Nurchi, V. M., Crespo-Alonso, M., Lachowicz, J. I. and Faa, G. (2013). "The meaning of aluminium exposure on human health and aluminium-related diseases". *Biomolecular concepts*, 4(1), 77-87.

- CSB (2016). *Sektörel atık kılavuzları termik santraller*. Erişim: 24 Ocak 2022, https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/Termik_Santraller_Kilavuzu.pdf.
- Çakmak, E. G., Hilmioğlu, B. ve Okutan, H. (2017). “Katı yakıtlı elektrik üretim santrallerinin mevcut durumunun belirlenmesi ve sera gazı emisyonlarının azaltımına yönelik uygulamaların değerlendirilmesi”, *VII. Ulusal Hava Kirliliği Ve Kontrolü Sempozyumu*, 1-3 Kasım 2017, Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya. 153-165.
- Çetinkaya, Z. (2020). *TKİ (Çan) linyitlerinin karakterizasyonu ve kükürt gideriminin araştırılması*. (Doktora tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 625519).
- Çiftçi, E. (2003). *Yer bilimleri teknik terimler sözlüğü*. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını: Trabzon.
- Çokca, E. (2001). “Use of class Cfly ashes for the stabilization of an expansive soil”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7), 568-573.
- Çolpan, S. (2019). *Türkiye kömür işletmeleri (tki) kömürlerinden farklı kalitelere kömür üretim olasılıklarının araştırılması*. (Doktora tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No.576532).
- Demirak, A., Balci, A., Dalman, Ö., Tüfekçi, M. (2005). “Chemical investigation of water resources around the Yatagan thermal power plant of Turkey”. *Water, Air, and Soil Pollution*, 162(1), 171-181.
- Diş, M.K. (2020). *Farklı tuzların linyit kömürünün flotasyonuna olan etkisi*. (Doktora tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 626139).
- Ecoba (2001). *European Coal Combustion Products Association Information Bulletin*. Italy.
- EMO (2008). *Türkiye’deki elektrik enerjisinin tarihsel gelişiminin kısa tarihçesi ve genel üretim bilgileri* (s.1) Erişim 23 Haziran 2021, https://www.emo.org.tr/ekler/0082ac261d74f5a_ek.pdf.
- EMO. (2022, 9 Ocak). Erişim adresi: https://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=88369.
- Enerji atlası kömür (2022, 27 Ocak). Erişim adresi: <https://www.enerjiatlas.com/komur/>.
- Enerji haritaları. (2021, 14 Aralık). Erişim adresi: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/jeotermal-harita>.
- Erbilen, S. Ü., ve Şahin, G. (2015). “Enerji coğrafyası kapsamında Türkiye’de

- linyit". *Doğu Coğrafya Dergisi*, 20(33), 135-160.
- Finkelman, R. B. and Gross, P. M. (1999). "The types of data needed for assessing the environmental and human health impacts of coal". *International Journal of Coal Geology*, 40(2-3), 91-101.
- Finkelman, R. B., Orem, W., Castranova, V., Tatu, C. A., Belkin, H. E., Zheng, B., Lerch, H. E., Maharaj, S. and Bates, A. L. (2002). "Health impacts of coal and coal use: possible solutions". *International Journal of Coal Geology*, 50(1-4), 425-443.
- Finkelman, R. B. and Tian, L. (2018). "The health impacts of coal use in China". *International Geology Review*, 60(5-6), 579-589.
- Gençel, H., ve Tarhan, İ. (2019). "Rüzgar Enerjisinin Önemli Geçiş Yerlerinden Olan Çanakkale Bölgesindeki Bazı Rüzgar Enerji Santralleri için Kapasite Faktörü İncelemesi". *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(1), 120-139.
- Global energy review 2021 (2022, 25 Ocak). Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H. (2005). "Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları". *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005*, 09-12 Haziran 2005, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir. 419-423.
- Güldan, G. (2010). *Zonguldak taş kömürünün kuru zenginleştirilmesi*. (Yüksek lisans tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 291829).
- Gürdal, G. (2011). "Abundances and modes of occurrence of trace elements in the Çan coals (Miocene), Çanakkale-Turkey". *International Journal of Coal Geology*, 87(2), 157-173.
- Hyenar, J. (1983) Reducing harmful influence of power station on the natural environmental by the utilization of fly ashes and slags. UNEP/USSR, Donetok.
- IEA (2020). Kömür Bilgileri Genel Bakış. Erişim;6 Aralık 2020. <https://webstore.iea.org/coal-information-overview-2020-edition>.
- İçdaş Bekirli termik santrali 2. Ünite (2021, 13 Nisan) Erişim adresi: https://www.icdaselektrik.com/pages/16/16/f/tr-TR/icdas_Bekirli_Termik_Santrali_2_Unite.aspx.
- İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (2016, 20 Ekim). *Resmi Gazete* (Sayı: 29863). Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2016/10/20161020-3.htm>.

- Karaca, Z. (2019). *Termik santrallerin çevresel etkileri üzerine bir araştırma*. (Yüksek lisans tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 594104).
- Karakuş, D., Özdoğan, M. V., Turan, G., Konak, G., & Onur, A. H. (2018). “Termik Santral Katı Atık Depolama Sahası Kapasitesinin Arttırılması Olanaklarının Araştırılması: Yatağan Termik Santrali Örneği”. *Yerbilimleri*, 39(2), 103-116.
- Kefelioğlu, S. (1998) Türkiye uçucu küllerinin özellikleri ve kullanılma imkanları. Teknoloji, Ankara.
- Kemal, M., Önal, G., Atesok, G., (1991). “Linyit kömürü değerlendirilmesi ve kullanımında Kömür Özelliklerinin Etkileri”, *Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri*, YMGV, 270- 282.
- Ketris, M.P. ve Yudovich, Y.E. (2009). “Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: World average for trace element contents in black shales and coals”. *International Journal of Coal Geology*, 78, 135–148.
- Kober, T., Schiffer, H. W., Densing, M. and Panos, E. (2020). “Global energy perspectives to 2060–WEC's World Energy Scenarios 2019”. *Energy Strategy Reviews*, 31, 100523.
- Kocaman, R., Ateş, S., Toprak, H. ve Kocaman, B. (2017). “Kömür atıklarının farklı değerlendirilmesi”. *In 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 29-30 Eylül, Bakü, Azerbaycan. 43-52.
- Koç, E. ve Kaya, K. (2015). “Enerji kaynakları–yenilenebilir enerji durumu”. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47.
- Kömür ve linyit yakıtlı termik santraller (2021, 21 Aralık). Erişim adresi: <https://www.enerjiatlası.com/komur/>.
- Kumbur, H., Özer, Z., Özsoy, H. D. ve Avcı, E. D. (2005). “Türkiye’de geleneksel ve yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli ve çevresel etkilerinin karşılaştırılması”. *Yeksem 2005, III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, 19-21 Ekim 2005, Mersin Üniversitesi, Mersin, 19-21.
- MMO (2014). *Enerji ekipmanları yerli üretimi durum değerlendirilmesi ve öneriler*. Erişim: 2 Ocak 2021, https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/2519fa061ea2e00_ek_0.pdf
- MMO (2020). *Türkiye'nin enerji görünümü*. Erişim Tarih:13 Nisan 2021, <https://www.mmo.org.tr/kitaplar/turkiyenin-enerji-gorunumu-2020>
- MTA (2020). MTA Enerji hammadde arama ve araştırmaları. Kömür arama araştırmaları.

- Erişim: 29 Aralık 2020, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/komur-arama-arastirmalari/>.
- MTA maden serisi kömür (2022, 26 Ocak). Erişim adresi: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/komur.pdf>.
- Mujumdar, A. S. (2015). *Handbook of industrial drying*. CRC Press: Boca Raton.
- Nakoman, E. (2012). *Kömür*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:081.
- Odaş enerji üretim (2022, 27 Ocak). Erişim adresi: <https://www.odasenerji.com.tr/uretim>.
- Ojha, A. and Aggarwal, P. (2021). “Fly Ash Based Geopolymer Concrete: a Comprehensive Review”. *Silicon*, 1-20.
- Özcan, N. T., (2015) *Kayseri civarındaki turba zeminlerin jeomekanik karakteristiklerinin ve dinamik davranışlarının arazi, laboratuvar ve sayısal modelleme teknikleriyle araştırılması*. (Doktora tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 413548).
- Palmer, C. A., Tuncalı, E., Dennen, K. O., Coburn, T. C. and Finkelman, R. B. (2004). “Characterization of Turkish coals: a nationwide perspective”. *International Journal of Coal Geology*, 60(2-4), 85-115.
- Plant, J. A., Kinniburgh, D. G., Smedley, P. L., Fordyce, F. M., and Klinck, B. A. (2005). “Arsenic and selenium”. *Environmental Geochemistry*, 9, 17-66.
- Sayılgan, E. ve Kürklü, K. (2018). “Uçucu kül örneğinden demir ve alüminyum gideriminde Taguchi yaklaşımı”. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(3), 133-142.
- Siddique, R. (2007). *Waste materials and by-products in concrete*. Springer Science & Business Media.
- Schweinfurth, S. P. (2003). *Coal--a Complex Natural Resource: An Overview of Factors Affecting Coal Quality and Use in the United States (Vol. 1143)*. Washington: US Department of the Interior.
- Smith, F. (Ed.). (1999). *Industrial applications of X-ray diffraction*. CRC press.
- Şahin, M. O., Bektaş, T. E. and Şanlıyüksel Yücel, D. (2021). “Effectiveness of fly ash in boron removal from Tuzla (Çanakkale) geothermal fluid”. *Environmental Research and Technology*, 4(1) 102-107.
- Şanlıyüksel Yücel, D. (2017). “Removal of heavy metals from aqueous solution using fly ash: çan thermal power plant, nw Turkey as a case study”. *Karaelmas Science &*

Engineering Journal, 7(1) 291-298.

- Şanlıyüksel Yücel, D. ve İleri, B. (2017). "Evaluation of ultrasound-assisted modified fly ash for treatment of acid mine drainage". Akinyemi, S. A. And Gitari, M. W. (ed) *In Coal fly ash beneficiation-treatment of acid mine drainage with coal fly ash*. (pp.53-77) IntechOpen: Croatia.
- Şanlıyüksel Yücel, D. ve Yücel, M. A. (2018). "Environmental monitoring of fly ash storage site, NW Turkey. XXVIII. International Symposium On Modern Technologies, Education and Professional Practice In Geodesy and Related Fields. November 08-09, 2018, Sofia.
- Şanlıyüksel Yücel, D. ve İleri, B. (2020) "Antropojenik kaynaklı metal kirliliğinin çevresel etkilerinin azaltılmasında uçucu kül kullanımı". *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 63(1), 43-56.
- Şahinoğlu, E. (2006). *Müzret (Artvin-Yusufeli) kömürünün yağ aglomerasyonu ile temizlenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 182974).
- Şengül, Ü. (1999). *Kangal termik santrali uçucu küllerinin analitik ve çevresel olarak incelenmesi ve değerlendirilmesi*. (Doktora tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 83756).
- Tangüler, M. (2015). *Characterization of fly ashes from thermal power plants in Turkey*. (Doktora tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 416419).
- Tchounwou, P. B., Patlolla, A. K. and Centeno, J. A. (2003). "Carcinogenic and systemic health effects associated with arsenic exposure--- a critical review". *Society of Toxicologic. Pathology*, 31, 575-88. <https://doi.org/10.1080/01926230390242007>.
- Termik santral nedir? (2021 kasım 30). Erişim adresi: <https://elektrikinfo.com/termik-santral-nedir/>.
- TKİ (2018). *Kömür linyit sektör rapor*. Erişim:27 Mayıs 2021, <https://www.enerjiportali.com/wp-content/uploads/2020/01/TK%C4%B0-2018-K%C3%96M%C3%9CR-L%C4%B0NY%C4%B0T-SEKT%C3%96R-RAPORU.pdf>.
- TKİ (2021). Kaynak ve rezervler. Erişim 17 Aralık 2021, <https://www.tki.gov.tr/istatistikler>, 1.Dünya ve Türkiye Kömür Kaynak ve Rezerv Durumu.
- TS EN 197-1: Çimento-bölüm 1: Genel çimentolar - bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Şubat 2012.

- TS 639: *Uçucu küller-çimentoda kullanılan*, Türk Standartları Enstitüsü, Nisan 1975.
- TS 640: *Çimento-uçucu küllü çimento*, Türk Standartları Enstitüsü, Nisan 1992.
- TTK (2020). *2020 Faaliyet raporu*. Erişim 8 Ocak 2022, http://www.taskomuru.gov.tr/file/2020_faaliyet.pdf.
- Tuncalı, E., Çiftçi, B., Yavuz, N., Toprak, S., Köker, A., Gencer, Z., Ayçık, H. ve Şahin, N. (2002). *Türkiye Tersiyer kömürlerinin kimyasal ve teknolojik özellikleri*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını: Ankara.
- TÜİK (2021). *Atık istatistikleri, 2020*. Erişim: 24 Aralık 2021. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2020-37198>.
- Türkiye elektrik enerjisi üretim istatistikleri. (2021, 30 Kasım). (<https://www.enerjiportali.com/turkiye-elektrik-enerjisi-uretim-istatistikleri-agustos-2021/>).
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinoğlu, A. (2009). *Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri*. TCMB: Ankara.
- Türkmenoğlu, M., Mesut, A. ve Erkuş, F. Ş. (2014). "Ege bölgesindeki termik santrallerden alınan uçucu küllerin liç karakteristiklerinin belirlenmesi". *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 131-140.
- Ünal, F. (2009). *Bir termik santralin ekserji analizi*. (Yüksek lisans tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 268293).
- Ünal, G., (2013). *Kömür Jeolojisi*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Eğitim Serisi-41, İkinci baskı, 543 s.
- Varol, S., Davraz, A., ve Varol, E. (2008). "Yeraltı suyu kimyası ve sağlığa etkisinin tıbbi jeoloji açısından değerlendirilmesi". *TAF Prev Med Bull*, 7(4), 351-356.
- VGP Powertech (2020). *Global aspect on coal combustion products*. Erişim: 14 Nisan 2021. <https://www.vgb.org/vgbmultimedia/PT202010HARRIS-p-16422.pdf>.
- Yağmur, L., Gündoğdu, G., Gündüz, O., Ataş, S., Çelik, A. ve Yaşa, K. (2015). "Yerli linyitlere uygun yakma teknolojisi". *22. ICCI 2016 Enerji ve Çevre Fuarı*, 27-29 Nisan 2016, İstanbul Fuar Merkezi, İstanbul. 81-86.
- Yatarkalkmaz, M. M., (2020). *Termik santrallerde kullanılan kömürün kurutma tekniklerinin araştırılması*. (Doktora tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 642263).
- Yeğinoğlu, A. (2003). "Çimentoda yeni standartlar ve mineral katkıları". *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, 56-64.

- Yıldırım, K. and Sümer, M. (2013). “Effects of sodium chloride and magnesium sulfate concentration on the durability of cement mortar with and without fly ash”. *Composites Part B: Engineering*, 52, 56-61.
- Yılmaz, Ş., Direskeneli, H., Sevinç, C., Başaran, M., Uysal, B. Z., Gökalp, İ., Ersoy, M. ve Kahraman, N. (2017). “Türkiye’deki Termik Santraller” O. Türkyılmaz (ed.). içinde *Enerji Ekipmanları Yerli Üretimi Durum Değerlendirmesi ve Öneriler*, (s49-79). MMO: Ankara.
- WHO, (2017). Guidelines for drinking-water quality: first addendum to the fourth edition World energy Outlook 2021 (2022, 25 Ocak). Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
- Ward C.R., (1984). *Coal Geology and Coal Technology*, Blackwell Scientific Publications, 345 s.
- Ward, C R., French, D., Stephenson, L., Riley, K. and Zhongsheng, L. (2010). Testing of interactions between coal ash leachates and rock materials for mine backfill evaluations. *Coal Combustion and Gasification Products*. 2, 15-27.
- Wesche, K. (Ed). (2004). *Fly ash in Concrete: Properties and Performance*. (Vol. 7). Taylor & Francis: New York.