Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 41, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Journal of Institue Of Science and Technology
Volume 41, Issue 1, 2025

Linyit Sahalarının Çevresel Etkileri: Termik Santral Etkileri Üzerine Bir İnceleme

Müslim Ekinci*[1], Doç. Dr. Şükrü Taner Azgın*[2]

[1]Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye
[2*]Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği, Kayseri

(Alınış / Received: 11.03.2025, Kabul / Accepted: 16.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler
Linyit Madenciliği,
Termik Santral,
Hava Kirliliği,
Çevresel Gürültü,
Su Kirliliği,
Maden Drenaj Suyu

Öz: Termik santraller, yerli yakıt kullanımıyla elektrik üretiminde önemli bir rol oynamakta olup, bu santrallerin doğrudan çevresel etkilerinin yanı sıra, yakıt olarak kullanılan kömürün üretim süreçleri de ciddi çevresel baskılara neden olmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde açık ocak yöntemiyle işletilen bir linyit maden ocağının çevresel etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Araştırma, madene yakın iki yerleşim yerinde hava kalitesi (PM_{10}, $PM_{2.5}$, nem, sıcaklık, rüzgâr hızı ve yönü) ile gürültü (dBA) ölçümlerini içermektedir. Ayrıca, maden drenaj sularındaki çevresel parametreler (pH, sıcaklık, çözünmüş oksijen, askıda katı madde (AKM), biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), yağ-gres, fenol, sülfat, arsenik, bakır, demir, cıva, çinko, kadmiyum, krom (+6), kurşun, nikel ve toplam siyanür) aylık olarak izlenmiştir. Çeşitli çevresel parametreler üzerinde yapılan kapsamlı analizler, araştırmanın temelini oluşturmuş, ancak bu özetin sınırları nedeniyle yalnızca en önemli bulgulara yer verilmiştir. Hava kalitesi ölçüm sonuçlarına göre, A köyünde PM_{10} konsantrasyonunun altı yıllık ortalama değeri 16,92 $\mu g/m^3$, B köyünde ise 25,37 $\mu g/m^3$ olarak bulunmuştur. Yıllık değişimler incelendiğinde, 2017–2018 yıllarında PM_{10} seviyesinin en yüksek olduğu ve A köyünde dört, B köyünde ise 33 kez sınır değerin aşıldığı tespit edilmiştir. Maden drenaj suyu analiz sonuçlarına göre askıda katı madde parametresinin bir kez, sülfat parametresinin ise yedi kez sınır değeri aştığı gözlemlenmiş; demir konsantrasyonunda ise dalgalanmalara rağmen sınır değerin aşılmadığı belirlenmiştir. Gürültü seviyelerinin özellikle Nisan ayında önemli dalgalanmalar gösterdiği, bunun yağmur gibi olumsuz hava koşullarının etkisiyle elektronik cihazları koruyan sundurmaya çarpan damlaların oluşturduğu seslerden kaynaklandığı düşünülmüştür. Bu bulgular, linyit madenciliği ve termik santral faaliyetlerinin çevresel etkilerini etkili bir şekilde yönetebilmek için stratejik önlemlerin alınmasının önemini vurgulamaktadır. Araştırmanın sonuçları, çevresel riskleri azaltmaya yönelik politikaların geliştirilmesi ve uygulamaların güçlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, açık ocak linyit madenciliğinin yakın yerleşim alanları üzerindeki uzun dönemli ve çok yönlü çevresel etkilerinin değerlendirilmesi bakımından önemli bir yere sahiptir.

Environmental Impacts of Lignite Mines: A Thermal Power Plant Perspective

Keywords
Thermal Power Plant,
Lignite Mining,
Air Pollution,
Environmental Noise,
Water Pollution,
Mining Drainage Waters

Abstract: Thermal power plants play a crucial role in electricity generation using domestic fuel sources. In addition to their direct environmental impacts, the coal extraction process also contributes to various environmental pressures. This study evaluates the environmental impacts of a lignite mine operating with an open-pit method in Turkey's Central Anatolia Region. Within the scope of the research, air quality (PM_{10}, $PM_{2.5}$, humidity, temperature, wind speed, and wind direction) and noise (dBA) measurements were conducted in two settlements near the mine. Additionally, monthly monitoring of mine drainage water was performed for parameters including pH, temperature, dissolved oxygen, suspended solids,

biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), oil and grease, phenol, sulfate, arsenic, copper, iron, mercury, zinc, cadmium, chromium (+6), lead, nickel, and total cyanide. The air quality analysis revealed that the six-year average PM_{10} concentration was 16.92 μg/m^3 in Village A and 25.37 μg/m^3 in Village B. Examining annual variations, PM_{10} levels exceeded the limit values four times in Village A and 33 times in Village B during 2017-2018, the period with the highest recorded concentrations. The mine drainage water analysis indicated that suspended solids exceeded the limit once, while sulfate concentrations exceeded the threshold seven times. Although iron levels remained within regulatory limits, significant fluctuations were observed. Furthermore, noise levels exhibited noticeable variations, particularly during April. These findings emphasize the importance of implementing strategic measures to mitigate the environmental impacts of lignite mining. This study has an important role in assessing the long-term and multifaceted environmental impacts of open-pit lignite mining on nearby settlements.

---

*İlgili Yazar, email: stazgin@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Günümüzde enerji ihtiyacı, küresel ölçekte hızla artış göstermektedir. Ekonomik ve sosyal hayatın temel dinamiklerinden biri olan enerji, bireysel ve toplumsal yaşamın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Nüfus artışı, sanayileşme, kentleşme ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda enerjiye duyulan gereksinim giderek artmakta ve enerji politikalarının sürdürülebilir bir çerçevede ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Enerji kaynakları incelendiğinde, petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtların birincil enerji arzındaki önemini koruduğu görülmektedir [1]. Giderek artan enerji ihtiyacını karşılamak ve dışa bağımlılığı azaltmak için son yıllarda yerli yakıt kullanan termik santrallerin yapımına hız verilmiştir [2]. Enerji üretim süreçlerinde verimlilik, hammaddeye erişim kolaylığı ve mevcut altyapı dikkate alındığında, fosil yakıtların yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. 1998 verilerine göre kömür rezervlerinin ömrü, petrol ve doğal gaz rezervlerinin yaklaşık 3,4 katı olup [3] bu durum kömürün enerji arzında stratejik bir konumda olmasını sağlamaktadır. Türkiye, dünya ölçeğinde gerek rezerv gerekse üretim miktarı bakımından linyitte orta düzeyde yer almaktadır [4]. Türkiye'de yaklaşık 19 milyar ton linyit rezervi bulunmaktadır [5]. Artan enerji talebi, teknik altyapısının gelişmiş olması, kurulumunun görece kolaylığı ve hammaddeye yakınlığı gibi avantajlar nedeniyle fosil yakıtlı termik santrallerin öncelikli enerji üretim seçenekleri arasında yer aldığını göstermektedir. Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılamak ve enerji arz güvenliğini sağlamak amacıyla, yerli kaynaklara dayalı bir enerji politikasının oluşturulması büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, maliyet ve kaynak erişilebilirliği açısından avantajlı olması sebebiyle kömür yakıtlı termik santrallerin önümüzdeki yıllarda da enerji üretiminde kritik bir rol üstlenmeye devam edeceği öngörülmektedir.

Türkiye'de taş kömürü tüketiminde elektrik santrallerinin payı giderek artmaktadır. On yıl önce %20 seviyelerinde olan bu oran, 2018 yılı itibariyle %60'lara yaklaşmıştır. Ülkemizde üretilen linyit kömürleri; elektrik üretimi, sanayi ve ısınma gibi çeşitli alanlarda tüketilmektedir. Linyitin elektrik üretimindeki tüketim payı, 1970'li yılların başında ısıl değer bazında %20'ler düzeyindeyken, bu tarihten itibaren artmaya başlamış ve 2001 yılında %80 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır [6].

Uluslararası Enerji Ajansı (UEA) Raporuna göre 2018 yılı dünya genelinde linyit tüketimi toplam 803,2 milyon ton, Türkiye'nin linyit tüketimi ise 85,2 milyon ton olarak gerçekleşmiştir [6]. Günümüzde dünya maden üretiminin yaklaşık %70'i açık ocak işletmeciliği yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir. Metalik cevherlerin yarısı, kömürün üçte biri ve metal dışı yapı malzemelerinin tamamı açık ocak işletmeciliği ile üretilmektedir [7]. Bu veriler doğrultusunda, Türkiye'de yıllık yaklaşık 28 milyon ton kömür üretiminin açık ocak işletmeciliği yöntemiyle gerçekleştirildiği söylenebilir.

(Perinçel, 2000) çalışmalarında; sanayi ve çevre ilişkisi bağlamında kömürle çalışan termik santrallerin çevresel etkilerini ele almış ve Çatalağzı Termik Santrali'nin çevresel etkilerini incelemiştir. Çalışmada, santralin çevresel etkilerinin en fazla hissedildiği birimler ve kül atık alanlarına yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Uygulama aşamasında, denizden 14 farklı noktadan su örnekleri alınmış, ayrıca bacadan yayılan uçucu küller üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen örnekler, Erdemir laboratuvarlarında analiz edilerek sonuçlar değerlendirilmiş ve örnek alma-saklama süreçlerine ilişkin genel hususlar açıklanmıştır [8].

(Ertuğrul, 2010) çalışmalarında; madencilik faaliyetlerinin çevresel etkileri ve doğa onarım süreçleri Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) kullanılarak belirlenmiş ve modellenmiştir. Madencilik faaliyetlerinin gerek işletme sürecinde gerekse sonrasında hem fiziksel hem de hukuksal açıdan önemli çevresel etkiler yarattığı vurgulanmış; bu bağlamda doğa onarım çalışmalarının gerekliliğine dikkat çekilmiştir. Uzaktan algılama teknolojilerinin kullanıldığı çalışmada, doğa onarım süreçlerinin etkinliğini artırmaya yönelik yöntemler geliştirilmiş ve arazi kullanımına ilişkin en uygun uygulama yöntemleri belirlenmiştir [9].

(Delibalta vd, 2016) çalışmalarında; TKİ–GLİ Ilgın Linyit İşletmeleri'ne ait beş farklı gölette asit maden drenajı (AMD) ve rehabilitasyon süreçleri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, su karakterizasyonu izlenmiş ve göletlerdeki ortalama pH değerleri 6,49–7,81 arasında değişirken, bulanıklık 0,12-63,6 NTU, sülfat içeriği 0,05-2,67 mg SO_4/L, kimyasal oksijen ihtiyacı 4-136 mg O_2/L ve elektriksel iletkenlik 285 µS/cm-4,68 mS/cm arasında ölçülmüştür. Ayrıca, en yüksek ağır metal içerikleri 1839 ppb Mn ve 9777 ppb Fe olarak tespit edilmiştir. Analizler üç aylık periyotlarla gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular yasal düzenlemeler çerçevesinde değerlendirilmiştir [10].

(Çelik, 2018) çalışmalarında; açık maden ocaklarında oluşan toz emisyonlarının ekolojik etkileri ele alınmış ve bu emisyonların kontrol altına alınmasına yönelik yöntemler incelenmiştir. Çalışmada, açık maden ocaklarının işletilmesi sürecinde atmosfere yayılan toz emisyonlarının insan ve çevre sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri değerlendirilmiş, hava kirliliğinden kaynaklanan tehlikelerin önlenmesine yönelik öneriler sunulmuştur. Ayrıca, toz emisyonlarının kaynakları belirlenerek, bu etkilerin azaltılmasına yönelik stratejiler geliştirilmiştir [11].

(Drebenstedt vd, 2019) çalışmalarında; Almanya'daki linyit madenlerinde asit maden drenajının su kalitesine olan olumsuz etkilerinin azaltılmasına yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunulmuştur. Çalışmada, AMD'nin olumsuz etkilerini en aza indirmek amacıyla geliştirilen yeni bir yöntemin başarılı bir şekilde uygulandığı vurgulanmıştır. Önerilen çözüm yöntemleri arasında asidik bileşenleri tamponlayacak malzemeler ile birleştirme veya asit üreten materyallerin oksijenle temasını kesme stratejileri yer almaktadır [12].

(Ercan vd, 2020) çalışmalarında; Bolu Göynük bölgesinde faaliyet gösteren linyit yakıtlı termik santralin çevresel etkilerini izlemek amacıyla yapılan çalışmada 2013-2019 yılları arasında dört ayrı noktada PM_{10} ve biriken toz parametreleri aylık olarak izlenmiştir. Çalışma sonucunda ortalama PM_{10} ölçümleri 36,48 ± 0,73; 37,61 ± 0,75; 42,70 ± 0,85 ve 38,72 ± 0,77 µg/m3 olarak elde edilmiş, çöken tozun ortalama değerleri 70,81 ± 2,12; 35,55 ± 1,07; 79,50 ± 2,39 ve 29,38 ± 0,88 mg/m^2/gün olarak bulunmuştur. Faaliyet sonucu oluşan toz emisyonlarının meteorolojik koşullara göre farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. [13]

(Wang vd, 2022) çalışmalarında; Suzhou güney kömür madenciliği alanında ağır metal kirliliği üzerine yapılan çalışmada, AS, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb ve Zn elementleri analiz edilmiştir. İçerik sıralaması Fe > Mn > Cr > Cu > Pb > Zn > As şeklinde tespit edilmiş olup Fe oranını %43 olarak kaydetmişlerdir. Bölgede Fe, Mn ve Cr elementinin yakından izlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. [14]

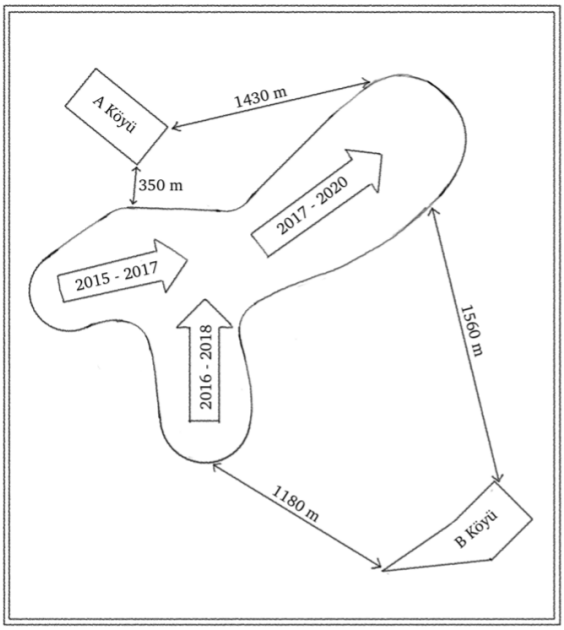
Yapılan literatür değerlendirmesi sonucunda çalışmaların genel olarak şu konular etrafında yoğunlaştığı görülmüştür: Termik santrallerin neden olduğu çevresel etkiler, bu olumsuz etkilerin insan sağlığı üzerindeki bozucu sonuçları, toz emisyonlarının ekosistem üzerindeki etkileri, maden zenginleştirme süreçlerinin çevresel boyutları, atık oluşumunun ekolojik sonuçları, madencilik faaliyetlerinin yüzey sularına etkileri, madenciliğin çalışanlar üzerindeki sağlık ve güvenlik riskleri, kömür madenciliğinde asit maden drenajı sorunu ve madencilik faaliyetlerinin toplum algısı üzerindeki etkileri.

Bu çalışmada literatürdeki önceki yapılan araştırmalardan farklı olarak, açık ocak yöntemi ile işletilen ve İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan bir termik santrale ait linyit üretim sahasının yakınındaki yerleşim yerleri üzerinde yarattığı çevresel etkiler 2015-2020 dönemini kapsayacak şekilde yerinde aylık bazda tespit edilmiştir. Hava kalitesi değerlendirmesi kapsamında çöken toz ve partikül madde fraksiyonları (PM_{10} ve $PM_{2.5}$), gürültü seviyeleri; ortalama desibel değerleri üzerinden analiz edilmiştir. Ayrıca meteorolojik veriler; sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü parametreleri çerçevesinde incelenmiştir.

Bunlara ek olarak, aynı döneme ait maden sahasında etkileşim halinde bulunan yüzeysel ve yeraltı sularının kalite değişimi de 19 farklı fizikokimyasal parametreler üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda maden sahasının neden olduğu çevresel etkiler, yürürlükteki mevzuat sınır değerleri çerçevesinde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, yasal gereklilikleri yerine getiren bir maden sahasında uygulanan çevresel önlemlerin etkinliğini değerlendirmek açsından önemli bir katkı sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Çalışma alanı, İç Anadolu Bölgesi'nde yer almakta olup, deniz seviyesinden yüksekliği 1200 m ile 1600 m arasında değişen, toplam 2200 hektarlık bir linyit havzasını kapsamaktadır. Sahada, yılda tam kapasiteyle gerçekleştirilen kömür ve üst örtü toprağının hareket hacmi 10 milyon m^3 ile 15 milyon m^3 arasında değişim göstermektedir. Kazılan kömürün nem içeriği %46 seviyesindedir. Açık ocak madenciliği, haftanın her günü üç vardiya halinde, patlatma yapılmadan basamak oluşturularak yürütülmektedir. Şekil 1'de çalışma sahasının genel görünümüne dair pafta sunulmaktadır.



Şekil 1. Kazı Alanı ve Yerleşim Alanlarına Uzaklıklar

2015 ve 2016 yıllarında çalışmalar, yarım kapasiteyle yürütülmüş olup, 2017 yılından itibaren tam kapasiteye (10 milyon m^3 - 15 milyon m^3) ulaşılmıştır. Çalışmalar, kazıcı ve damperli kamyonlarla kazı-yükleme-boşaltma sistemi ile yürütülmüştür. Maden sahasında üst örtü kazısı ve maden kazısı çalışmaları eş zamanlı olarak yapılmış, çıkarılan kömür damperli kamyonlarla kömür kırma ünitelerine taşınmıştır. Ardından kömür, 2 km uzunluğundaki bant konveyör sistemi ile sahanın kuzey doğusunda yer alan termik santrale sevk edilmiştir. Kırma ve mekanik transfer sırasında oluşan tozun çevreye yayılımı kapalı muhafaza sistemleri ile büyük ölçüde kontrol altına alınmıştır. Ayrıca, Çalışma süresi boyunca sevk ve nakliye yollarının tozumasını önlemek amacıyla su tankerleri ile düzenli nemlendirme işlemi yapılmıştır. Yürürlükteki mevzuat gereklilikleri doğrultusunda çalışma sahasında gerekli diğer çevresel önlemler de alınmıştır. 2015 ve 2016 yıllarında yapılan kazı çalışmalarına ait bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. 2015 ve 2016 Yıllarına Ait Aylık Kazı Miktarları

	Üst Örtü (m^3)	Kömür (m^3)	Üst Örtü (m^3)	Kömür (m^3)
	2015		**2016**	
Ocak	123.837	1.094	178.142	86.260
Şubat	52.434	80.769	219.322	103.186
Mart	126.574	35.439	292.698	112.879
Nisan	165.915	7.251	308.233	115.520
Mayıs	194.490	27.104	447.639	57.399
Haziran	247.293	28.457	394.391	101.764
Temmuz	323.895	58.251	263.721	38.749
Ağustos	311.409	58.454	77.035	256.306
Eylül	325.286	18.452	106.220	239.324
Ekim	250.321	56.345	65.011	349.776
Kasım	236.188	115.412	172.916	343.596
Aralık	215.951	228.304	84.497	297.483

Hava kalitesi ve gürültü ölçümleri, nüfusları sırasıyla 582 ve 243 olan A ve B Köylerinde yapılmıştır. A Köyü çalışma sahasının kuzeybatısında, B Köyü ise güneydoğusunda yer almaktadır. Ölçüm cihazları, söz konusu yerleşim yerlerinin içinde kalacak şekilde, çalışma sahasına yakın noktalarına yerleştirilmiştir. Çalışma sahasının A Köyü'ne

uzaklığı 350 m ile 1430 m arasında değişirken, B Köyü'nün çalışma sahasına uzaklığı ise 1180 m ile 1560 m arasında değişmektedir.

2.1. Hava Kalitesi Ölçümleri

Toz emisyonları fiziksel ve içerik olarak çevreye zararlı olmakla birlikte $PM_{2.5}$ ve PM_{10} partiküller akciğere kolaylıkla ulaşabildiğinden dolayı tespiti ayrıca önem taşımaktadır [15]. Hava kalitesi ölçümleri; partikül madde, çöken toz ve meteorolojik verilerinin izlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ölçümler 2015-2020 yıllarını kapsayacak şekilde A ve B Köylerinde sabit noktalarda yapılmıştır.

Partikül madde (PM_{10} ve $PM_{2.5}$) ve meteorolojik (sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü) ölçümleri, Topas – Turnkey marka online olarak sürekli veri akışı sağlayabilen cihazlarla yapılmıştır. Ölçüm verileri; Partikül madde için $\mu g/m^3$, sıcaklık için (^oC), nem için (%), rüzgâr hızı için (m/s), rüzgâr yönü için (derece) birimleriyle kaydedilmiştir. Veriler 10 dakikalık periyotlarla toplanmış ve bu çalışmada, elde edilen verilerin günlük ortalama değerler üzerinden değerlendirilmiştir.

Çöken toz ölçümleri; TS 2342 standardına uygun olarak akredite laboratuvarlar aracılığıyla aylık periyotlarla mg/m^2.gün birimiyle raporlanmıştır.

2.2. Gürültü Kirliliği Ölçümleri

Gürültü ölçümleri, 2015-2020 yıllarını arasında A ve B Köylerinde sabit noktalarda gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sürecinde çevresel gürültü seviyelerinin sürekli izlenmesi amacıyla SvanTek – SV200 marka, online olarak sürekli veri akışı sağlayabilen cihaz kullanılmıştır. Bu cihaz, gerçek zamanlı veri iletimi sağlayarak, ölçümlerin doğruluğunu ve sürekliliğini temin etmiştir. Ölçüm verileri bir saatlik periyotlarla (dBA_{eq}) birimiyle kaydedilmiş ve bu veriler daha sonra analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen veriler, çevre gürültüsünün zaman içindeki değişimini belirlemek amacıyla günlük ortalama değerler üzerinden değerlendirilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir araştırmada yüksek sese maruz kalındığı için 10 kişiden birinde normal konuşmayı anlayamayacak düzeyde gürültü kaybı yaşandığı bulunmuştur [16]. Bu nedenle yapılan çalışmada, gürültü kirliliğinin seviyelerini anlamak ve yerleşim yerlerindeki yaşam kalitesine olan etkilerini incelemek için kritik bir öneme sahiptir. Gürültü seviyelerinin izlenmesi, çevresel yönetim planları ve halk sağlığı önlemleri için temel veriler sunmaktadır.

2.3. Maden Drenaj Suyu Ölçümleri

Açık ocak ve yeraltı madenciliğinde kazılar su tablasının altına kadar uzandığından dolayı genellikle susuzlaştırma gerekliliği ortaya çıkmaktadır [17]. Bu çalışmada maden drenaj suyunun ölçümleri, 2015-2020 yılları arasında madencilik faaliyetlerinden kaynaklı ortaya çıkan drenaj sularının analiz edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Numune alma ve analiz işlemleri, çevresel su kalitesine ilişkin standartlara uygun akredite laboratuvarlar tarafından yürütülmüştür. Drenaj işlemleri, 2016 yılı Ağustos ayına kadar sondaj kuyuları aracılığıyla başlatılmış olup, kazı faaliyetlerinin ilerlemesiyle birlikte maden sahasına giren yeraltı ve yüzey sularının pompalar yardımıyla tahliye edilmesiyle devam etmiştir.

Maden çukuruna giren yeraltı ve yüzey sularının kontrol altına alınması amacıyla maden basamaklarında doğal toplama ve iletim kanalları oluşturulmuş ve bu kanallar aracılığıyla gelen sular maden çukurunun dip noktalarında oluşturulan 2-3 kademeleri doğal havuzlarda biriktirilmiştir. Biriken sular, havuzlarda bulunan pompaları aracılığıyla sürekli olarak maden sahasının dışına tahliye edilmiştir. Mevsimsel şartlara bağlı olarak drenaj debisinde belirgin değişimler gözlenmiş olup, bu değişimler, özellikle yağışlı dönemlerde suyun debisinin arttığı ve kuru dönemlerde azaldığı yönünde bir eğilim gözlenmiştir. Drenaj suyundan numune süreci, bu değişimlerin izlenmesini sağlamak amacıyla dikkatle yapılmış ve görsel olarak Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Maden Drenaj Suyundan Numune Alma

Maden drenaj suyu ölçümleri, akredite laboratuvarlar aracılığıyla aylık periyotlarla pompa borularının çıkış noktasından anlık numuneler alınarak Tablo 2'de yer alan analiz metotlarıyla analizleri yapılmış ve aylık olarak raporlanmıştır.

Tablo 2. Maden Drenaj Suyu Analiz Metotları

PARAMETRE	**ANALİZ METODU**
pH	S.M. 4500-H+B
SICAKLIK	S.M. 2550-B
ÇÖZÜNMÜŞ OKSİJEN	S.M. 4500-O_G
ASKIDA KATI MADDE	S.M. 2540-D
BOİ	S.M. 5210-B
KOİ	SM 5220 B
YAĞ VE GRES	SM 5520 B
ARSENİK	EPA 200.7
BAKIR	EPA 200.7
CİVA	EPA 200.7
ÇİNKO	EPA 200.7
DEMİR	EPA 200.7
FENOL	SM 5530 (B-C)
KADMİYUM	EPA 200.7
KROM (+6)	S.M. 3500-Cr-B
KURŞUN	EPA 200.7
NİKEL	EPA 200.7
SÜLFAT	S.M. 4110-B
TOPLAM SİYANÜR	SM 4500-CN C B SM 4500-CN E

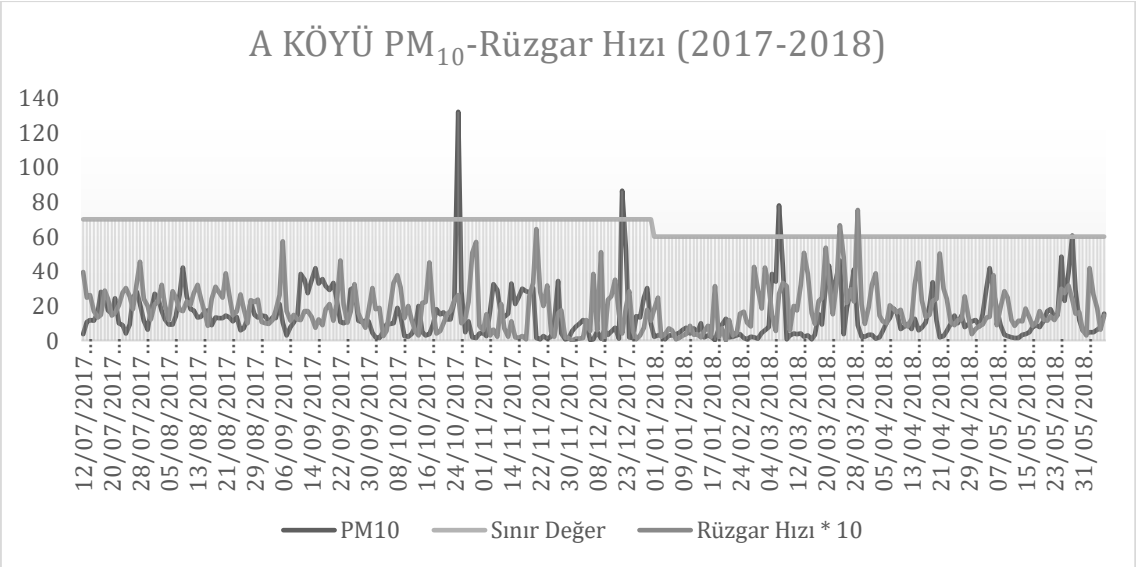
3. Bulgular

3.1 Hava Kalitesi

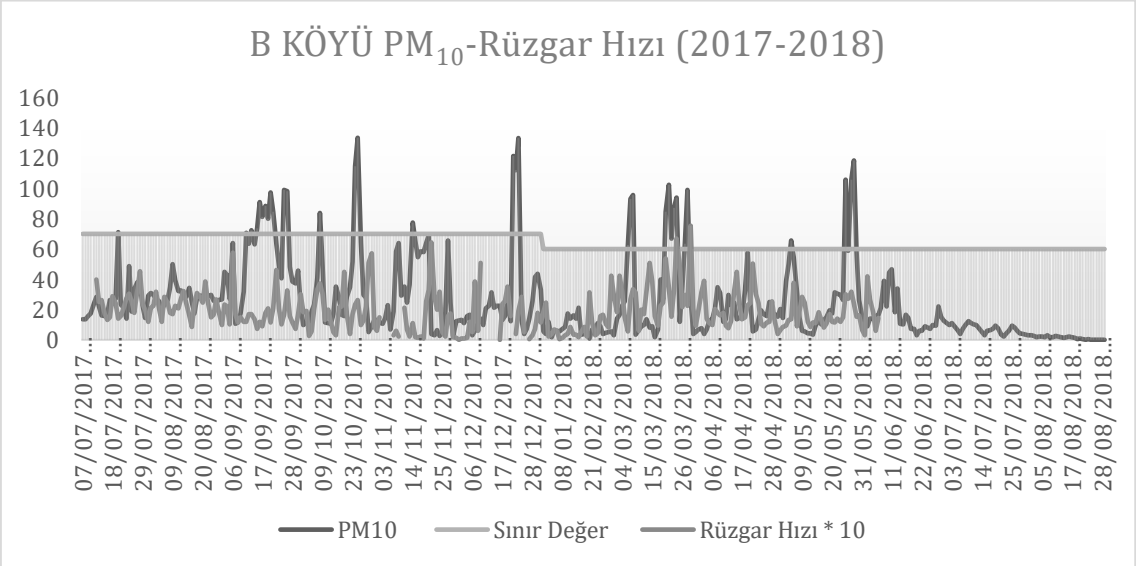
Hava kalitesi ölçümlerine ilişkin yapılan değerlendirmelerde, $PM_{2.5}$ değerlerinde belirgin bir değişim gözlenmezken, PM_{10} değerlerinin her iki yerleşim yerlerinde genellikle 20-60 µg/m³ arasında değiştiği tespit edilmiştir. A Köyü'nde 2015 yılının Mayıs ayındaki PM_{10} ortalaması 49,24 µg/m³ ile en yüksek değer olarak, 2018 yılının Şubat ayında 2,51 µg/m³ ile en düşük değer olarak kaydedilmiştir.

B köyünde ise 2017 yılının Eylül ayında PM_{10} ortalaması 60,56 µg/m³ ile en yüksek seviyeye ulaşırken, 2019 yılının Kasım ayında 1,19 µg/m³ ile en düşük seviyelere gerilemiştir. A ve B Köylerine ait rüzgâr hızı, PM_{10} değerleri ve

bu değerlerin sınır limitlerle karşılaştırmalı değişimi, 2017 ve 2018 yıllarındaki zaman içindeki farklılıkları gösteren grafikler sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te sunulmuştur.

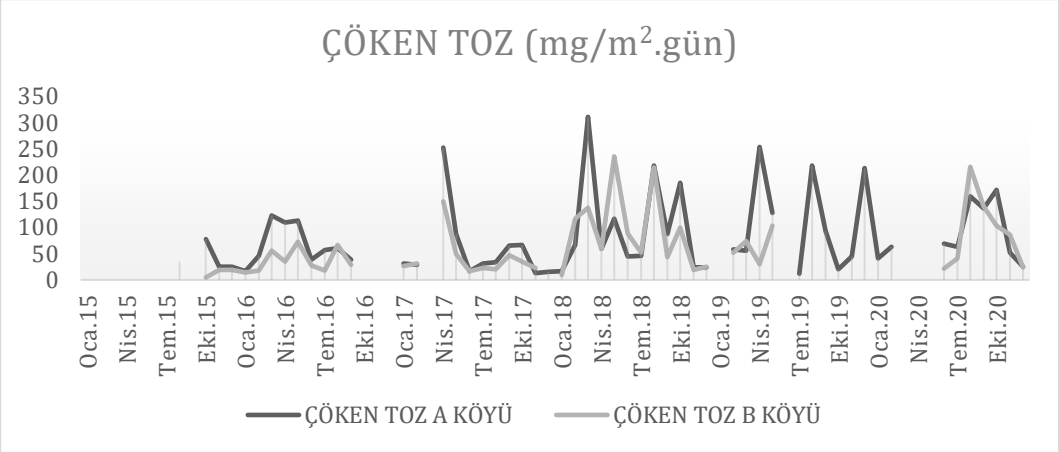


Şekil 3. A Köyü 2017-2018 Yıllarına Ait PM_{10}-Rüzgâr Hızı Ortalamaları



Şekil 4. B Köyü 2017-2018 Yıllarına Ait PM_{10}-Rüzgâr Hızı Ortalamaları

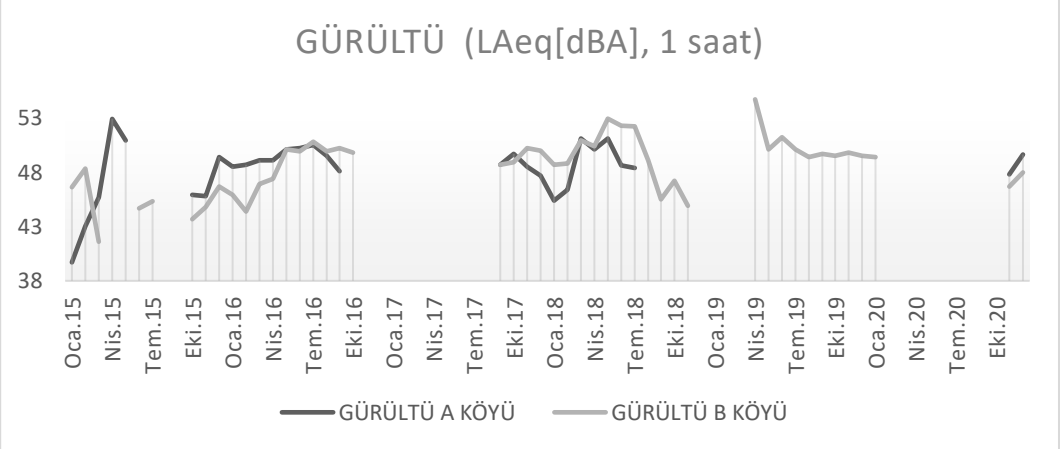
A Köyü'nde 2015-2020 yılları arasındaki çöken toz ölçümleri 11,59 mg/m².gün ile 310,9 mg/m².gün arasında değişim göstermiştir. Bu dönem boyunca elde edilen ortalama çöken toz değeri ise 80,46 mg/m².gün olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, özellikle Nisan, Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarında çöken toz değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenirken diğer aylarda bu değerlerin daha düşük seviyelerde seyrettiği tespit edilmiştir. A ve B Köylerine ait çöken toz ölçümlerinin 2015-2020 yılları arasındaki zaman içindeki değişimini gösteren grafik Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. A ve B Köylerindeki Aylık Çöken Toz Değerleri

3.2. Gürültü Kirliliği

A ve B köylerinde konumlandırılan gürültü ölçüm cihazlarından elde edilen veriler, 2015-2020 dönemi için değerlendirilmiştir. Elde edilen verilere göre özellikle Nisan aylarında ölçüm değerlerinin diğer aylara kıyasla daha yüksek seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu artışın mevsimsel ve çevresel faktörlerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. A ve B Köylerine ait gürültü ölçümlerinin 2015-2020 yılları arasındaki zaman içindeki değişimini gösteren grafik Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. A ve B Köylerindeki Aylık Gürültü Değerleri

Yağışlı dönemlere denk gelen artışlar, sınır değerler aşılmasa dahi yağışlar ile gürültü düzeyleri arasında anlamlı bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3. A ve B Köylerinde Ölçülen Temel Çevresel Parametrelerin Karşılaştırmalı Özeti (2015-2020)

Parametre	Birim	A Köyü Ortalaması/Değeri	B Köyü Ortalaması/Değeri	Notlar/Gözlemler
Ortalama PM_{10} Konsantrasyonu (6 Yıllık)	$\mu g/m^3$	16,92	25,37	B Köyü daha yüksek
PM_{10} Sınır Değer Aşım Sayısı (2017-2018)	Kez	4	33	B Köyü'nde aşım çok daha sık
Ortalama Çöken Toz Değeri (2015-2020)	mg/m^2.gün	80,46	60,68	A Köyü değeri daha yüksek (Grafik 5 yorumlanmalı)
Ortalama Gürültü Seviyesi (LAeq, genel aralık)	dBA	[~45-50 aralığı]	[~45-50 aralığı]	Genellikle benzer ve limitlerin altında

Gürültüde Gözlenen Maks. Artış Ayı	-	Nisan	Nisan	Yağışla ilişkili olduğu düşünülüyor
Rüzgâra Bağlı PM_{10} Sınır Aşım Oranı (Yaklaşık)	%	~70	~30	A Köyü rüzgâr taşınımından daha fazla etkileniyor

3.3. Maden Drenaj Suyu

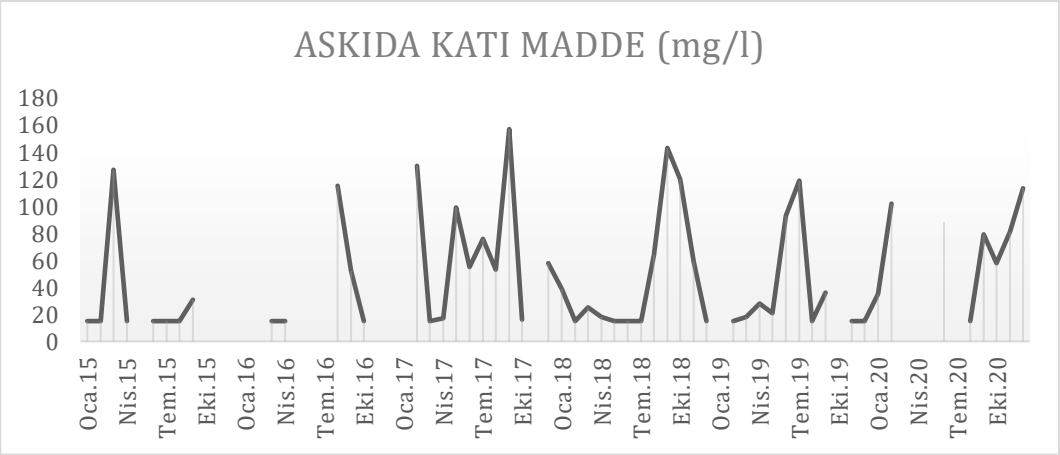
Maden drenaj suyu analiz sonuçlarına bakıldığında, ~~askıda katı madde (~~AKM), demir ve sülfat parametrelerinin belirgin değişiklikler gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu parametrelerin zaman içindeki değişimleri, ilgili grafiklerle desteklenerek daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlanmıştır. Diğer parametrelerin zamanla değişim durumları da dikkate alınarak, her bir parametre sırasıyla ele alınmış ve aşağıdaki paragraflarda detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Maden drenaj suyunun pH değerleri ölçüm dönemi boyunca 6,71 ile 9,15 arasında değişim göstermiştir. Ortalama pH 7,9 olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, pH değerinin 3 farklı dönemde 9'un üzerine çıktığı tespit edilmiş olup bu yüksek pH değerlerinin sonbahar aylarında gerçekleştiği belirlenmiştir. Özellikle 2017 yılında pH değerinin ağırlıklı olarak 8 ile 9 arasında seyrettiği, diğer yıllarda ise 7 ile 8 arasında değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, maden drenaj suyunun pH seviyesindeki mevsimsel dalgalanmaların etkisini göstermektedir.

Maden drenaj suyunun sıcaklık değeri, ölçüm dönemi boyunca 0,7°C ile 33°C arasında değişim göstermiştir. Analiz sonuçları, su sıcaklığının mevsimsel hava koşulları ile paralel olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Soğuk mevsimlerde drenaj suyu sıcaklığı düşerken sıcak mevsimlerde artış gözlenmiştir. Bu değişimler, çevresel koşulların drenaj suyu sıcaklığı üzerindeki etkilerini yansıtmaktadır.

Maden drenaj suyundaki çözünmüş oksijen değerleri, ölçüm dönemi boyunca 3,73 mg/l ile 19,4 mg/l arasında değişim göstermiştir. Ortalama çözünmüş oksijen seviyesi 8,89 mg/l olarak hesaplanmıştır. Veriler incelendiğinde, çözünmüş oksijen seviyelerinin su akış hızının düşük olduğu dönemlerde azaldığı, su akış hızının yüksek olduğu dönemlerde ise arttığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, akış hızının çözünmüş oksijen seviyeleri üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Su akış hızı arttıkça oksijenin çözünme oranı da artmakta, bunun sonucunda çözünmüş oksijen seviyelerinde bir yükselme gözlemlenmektedir.

Maden drenaj suyundaki ~~askıda katı madde (~~AKM) değerleri, ölçüm dönemi boyunca 15 mg/l ile 157 mg/l arasında değişim göstermiştir. Ortalama AKM değeri ise 49,53 mg/l olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları, AKM seviyelerinin özellikle sonbahar ve ilkbahar aylarında arttığını göstermektedir. Bu artışın yağış rejimi ve yüzey akış miktarındaki değişimlerle ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Yağışların yoğun olduğu dönemlerde yüzey akışı artmakta, bu da askıda katı maddelerin miktarını arttırmaktadır. 2015-2020 yılları arasında maden drenaj sularında ölçülen askıda katı madde değerlerinin zaman içindeki değişimini gösteren grafik Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Maden Drenaj Suyundaki Askıda Katı Madde Değerleri

Maden drenaj suyundaki biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) değerleri ölçüm dönemi boyunca 3 mg/l ile 68,5 mg/l arasında değişim göstermiştir. Ortalama BOİ değeri ise 12,4 mg/l olarak hesaplanmıştır. BOİ değerlerindeki

değişim, maden drenaj suyunun organik yükü hakkında bilgi verir ve yüksek BOİ değerlerinin suyun biyolojik olarak kirlenme eğilimini yansıttığı düşünülmektedir.

Maden drenaj suyundaki kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) değerleri, ölçüm dönemi boyunca 4,44 mg/l ile 185 mg/l arasında değişim göstermiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, KOİ değerinin ağırlıklı olarak 50 mg/l'nin altında seyrettiği ve ortalama değerinin 37,3 mg/l olduğu belirlenmiştir. KOİ, suyun kimyasal oksijen tüketimini gösterir ve bu değerlerin düşük olması, suyun oksijen tüketimi açısından daha az kirletici olduğunu göstermektedir.

Maden drenaj suyundaki yağ gres değeri, ölçüm dönemi boyunca 3 mg/l ile 8,8 mg/l arasında değişim göstermiştir. Ortalama yağ gres değeri ise 3,5 mg/l olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, yağ gres değerinin bazı dönemlerde 5 mg/l'nin üzerinde çıktığı gözlemlenmiştir. Yağ gres, genellikle maden tesislerinde kullanılan mekanik araçlar ve pompaların etkisiyle nadiren de olsa tespit edilebilen bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Normal şartlar altında, maden drenaj suyunda bu parametrenin varlığı beklenmeyen bir durumdur.

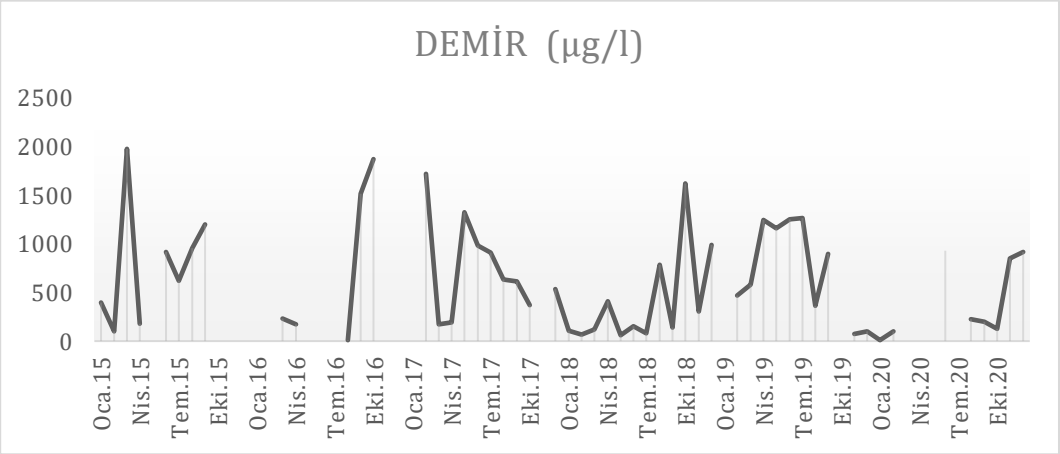
Maden drenaj suyundaki arsenik konsantrasyonları, ölçüm dönemi boyunca 0,2 µg/l ile 50,31 µg/l arasında değişim göstermiştir. Bu iki değer arasındaki farkın da çok yüksek olduğu görülmüştür. Arsenik değerlerinin ortalaması ise 8,18 µg/l olarak hesaplanmıştır. Ancak yapılan değerlendirmelerde, arsenik değerlerinin çoğunlukla 20 µg/l'nin altında kaldığı tespit edilmiştir. Arsenik, toksik etkileri nedeniyle çevre için önemli bir parametre olup bu seviyelerin çevresel risk oluşturup oluşturmadığı ayrıca incelenmelidir.

Maden drenaj suyundaki bakır konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 1 µg/l ile 25,38 µg/l arasında değişim göstermiştir. Bakır değerlerinin ortalaması ise 3,6 µg/l olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları, bakır konsantrasyonlarının büyük bir kısmının 5 µg/l'nin altında kaldığını göstermektedir. Bu durum, maden drenaj suyundaki bakır kirliliğinin sınırlı olduğunu ve suyun çevresel etkilerinin düşük olabileceğini göstermektedir.

Maden drenaj suyundaki cıva konsantrasyonlarının ölçüm dönemi boyunca 0,1 µg/l ile 1,74 µg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması ise 0,18 µg/l olarak hesaplanmıştır. Cıva seviyelerinin üç farklı dönemde 0,5 µg/l'nin üzerine çıktığı, ancak 39 ölçüm sonucunda ise 0,1 µg/l'nin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Cıva, su ekosistemleri üzerinde zararlı etkilere sahip bir metal olduğundan bu parametrenin düzenli izlenmesi çevresel güvenlik açısından önemlidir.

Maden drenaj suyundaki çinko konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 0,2 µg/l ile 454 µg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması ise 106,63 µg/l olarak hesaplanmıştır. Çinko seviyelerinin çoğunlukla 100 µg/l'nin altında kaldığı, ancak bazı dönemlerde bu değerin üzerinde ve hatta 200 µg/l'nin üzerine çıktığı gözlemlenmiştir. Yüksek çinko seviyeleri, su kalitesini olumsuz etkileyebilir ve sucul yaşam için tehdit oluşturabilir. Bu durum, çinko seviyelerinin çevresel düzenlemelere uygunluğunun kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Maden drenaj suyundaki demir konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 10 µg/l ile 1975 µg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması ise 625,44 µg/l olarak hesaplanmıştır. Demir seviyelerinin oldukça değişken olduğu, özellikle ilkbahar ve sonbahar aylarında belirgin bir artış eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu artışlar, maden faaliyetlerinin ve çevresel faktörlerin etkisiyle meydana gelen mevsimsel değişimlerden kaynaklanıyor olabilir. 2015-2020 yılları arasında maden drenaj sularında ölçülen demir değerlerinin zaman içindeki değişimi Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Maden Drenaj Suyundaki Demir Değerleri

Maden drenaj suyunda ölçülen fenol konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 0,02 mg/l ile 3,4 mg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması 0,116 olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, fenol değeri yalnızca bir kez 1 mg/l'yi aşmış ancak 46 ölçümde bu değer 0,1 mg/l'nin altında kalmıştır. Bu durum, maden drenaj suyundaki fenol seviyelerinin genellikle düşük seyrettiğini ve çevresel etkilerinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

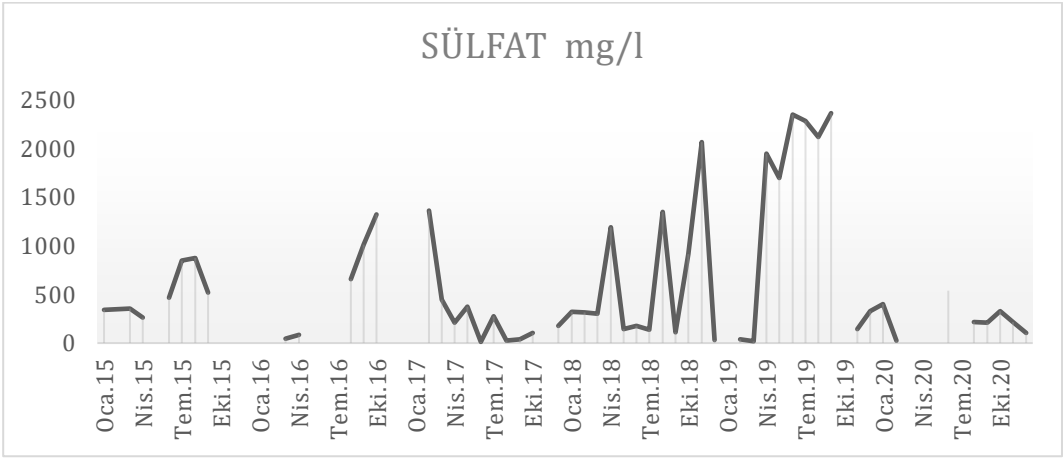
Maden drenaj suyundaki kadmiyum konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 0,5 µg/l ile 10 µg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması 0,83 µg/l olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, kadmiyum değerinin yalnızca bir kez 10 µg/l seviyesine ulaştığı ancak 42 ölçümde 0,5 µg/l'nin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kadmiyum seviyelerinin genellikle düşük olduğunu ve maden drenaj suyunun bu parametre açısından büyük bir kirleticilik göstermediğini işaret etmektedir.

Maden drenaj suyundaki altı değerlikli krom (Cr^{6+}) konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 0,01 µg/l ile 48,75 µg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması 9,03 µg/l olarak hesaplanmıştır. Özellikle 2015 ile 2017 yılları arasında belirgin dalgalanmalar gözlemlenmiş, ancak sonraki yıllarda krom seviyeleri daha stabil bir seyir izlemeye başlamıştır. Bu durum, maden faaliyetlerindeki değişimlerin krom konsantrasyonları üzerinde etkili olduğunu düşündürmektedir.

Maden drenaj suyundaki kurşun konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 0,5 µg/l ile 85,3 µg/l arasında değişim göstermiş ve bu değerlerin ortalaması 7,03 µg/l olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları, dört farklı dönemde kurşun seviyelerinin 20 µg/l'nin üzerine çıktığını ancak diğer tüm ölçümlerde bu değerin altında kaldığı göstermektedir. Bu durum, kurşun seviyelerinin zaman zaman yüksek olabileceğini, ancak genellikle çevresel sınırlar içinde kaldığını ortaya koymaktadır.

Maden drenaj suyundaki nikel konsantrasyonları ölçüm dönemi boyunca 1,2 µg/l ile 73,84 µg/l arasında değişim göstermiş ve ortalama değeri 11,9 µg/l olarak hesaplanmıştır. Analizler, nikel seviyelerinin büyük çoğunlukla 10 µg/l ve altında kaldığını göstermektedir. Bu durum, maden drenaj suyundaki nikel kirletici seviyelerinin genellikle düşük olduğunu ve çevresel etkilerinin sınırlı kaldığını göstermektedir.

Maden drenaj suyundaki sülfat konsantrasyonları 12,35 mg/l ile 2362 mg/l arasında büyük bir değişkenlik göstermiştir. Bu geniş aralıktaki sülfat değerlerinin ortalaması 611,5 mg/l olarak hesaplanmıştır. Özellikle 2018 ve 2019 yıllarında sülfat seviyelerinde önemli bir artış gözlemlenmiştir. 2015-2020 yılları arasında maden drenaj sularındaki sülfatın zamanla değişimini gösteren grafikle (Şekil 9) daha ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 9. Maden Drenaj Suyundaki Sülfat Değerleri

Maden drenaj suyundaki toplam siyanür konsantrasyonlarının 0,01 mg/l'nin altında kaldığı gözlemlenmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Hava kalitesi ölçüm sonuçlarına göre PM_{10} parametresi A köyü için 6 yıllık ortalama 16,92 µg/m^3, B köyü için ise 25,37 µg/m^3 olarak belirlenmiştir. Yıllar içindeki değişimler incelendiğinde, PM_{10} seviyelerindeki en yüksek artış 2017 yılına ait olup her iki köyde de belirgin bir zirve görülmüştür. 2017 yılında üretim miktarının 2015 yılına göre %150 oranında artış göstermesi, bu yılın PM_{10} seviyelerindeki yükselişe katkı sağlamıştır. 2020 yılına kadar tam kapasitede üretime devam edilmiştir. Meteorolojik verileri incelendiğinde, 2017 yılındaki ortalama rüzgâr hızında 2015 yılına kıyasla belirgin değişim gözlenmemiştir. Bu durum, PM_{10} seviyelerindeki artışın esas olarak üretim kapasitesindeki ani artışından kaynaklandığını düşündürmektedir.

Mevsimsel değişimler, PM_{10} seviyeleri üzerinde belirgin etkiler yarattığı gözlemlenmiştir. Çalışma bölgesinde, bahar ve yaz aylarında partikül madde taşınımının daha fazla olduğu, ancak kış aylarında ise bu taşınımın azaldığı gözlemlenmiştir. A ve B köylerinin 2017-2018 yıllarına ait meteorolojik verileri incelendiğinde, yaz aylarındaki ortalama rüzgâr hızının kış aylarına oranla %92 daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu veriler ışığında, 2017 yılındaki artışın üretim kapasitesindeki değişikliklere bağlı olduğu, mevsimsel artışların ise özellikle kuru ve rüzgârlı havalarda tozuma oranının yükselmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Meteorolojik veriler ile PM fraksiyonlarının arasındaki korelasyonların değerlendirmesi, PM seviyeleri ile üretim kapasitesi, rüzgâr hızı ve sıcaklık arasındaki güçlü etkileşimi ortaya koymaktadır.

PM_{10} değerlerinin en yüksek seviyelere ulaştığı 2017-2018 yıllarındaki 24 saatlik ortalama veriler incelendiğinde, A Köyü'nde 4, B Köyü'nde 33 kez sınır değerlerin aşıldığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, B Köyü'nün özellikle 2017 yılının Eylül ayında 11 kez, 2018 yılının Mart ayında 11 kez, 2019 yılında 14 kez, 2020 yılında ise 7 kez sınır değeri aştığını ortaya koymaktadır. 2019 yılındaki sınır değer aşımlarının Nisan ile Temmuz ayları arasında yoğunlaştığı, 2020 yılında ise Ekim ayında kümelendiği dikkat çekmiştir.

B Köyündeki PM_{10} ölçümlerindeki rüzgâra bağlı sınır değer aşımlarının oranı yaklaşık %30, A Köyünde ise bu değer %70 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, A Köyü'nün rüzgâr kaynaklı partikül madde taşınımından daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Elde edilen veriler, rüzgâr hızının PM_{10} seviyelerini etkileyen önemli bir faktör olduğunu, ancak tek başına belirleyici olmadığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlara bakıldığında özellikle yaz ve bahar aylarında, rüzgârlı ve kuru havalardaki toz taşınımının PM_{10} seviyelerini önemli ölçüde etkilediği anlaşılmaktadır.

A ve B Köylerinde yapılan Çöken Toz ölçümlerinin 03.07.2009 tarih ve 2727 sayılı Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY) kapsamında yapılan değerlendirmesi sonucunda, mevzuatta belirtilen 210 mg/m^2.gün olan UVS (Uzun Vadeli Sınır Değeri) ve 390 mg/m^2.gün olan KVS (Kısa Vadeli Sınır Değeri) limitlerinin aşılmadığı belirlenmiştir. Ancak ölçülen değerlerin sınır değerleri aşmıyor olması, A Köyü'nün B Köyü'ne oranla daha fazla etkilendiği gerçeğini değiştirmemektedir. 2017 yılının Eylül ve Ekim ayında, 2018 yılının Ağustos, Eylül ve Ekim ayında, 2019 yılının Nisan, Mayıs ve Ağustos ayında, 2020 yılının ise Ağustos, Eylül ve Ekim ayında çöken toz seviyelerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir.

Hava kalitesi ölçüm sonuçları, A Köyü'nün Çöken Toz'dan, B Köyü'nün ise PM'den daha fazla etkilendiğini ortaya koymaktadır. Bu farklılığın, A Köyü ile üretim alanı arasında bulunan, doğal bariyer niteliğindeki tepelerin etkisiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Ölçümler, yaz ve bahar aylarında çöken toz seviyelerinin arttığını göstermektedir. Yaz aylarında nakliye yolları su tankerleri ile sulanmasına rağmen, yüksek buharlaşma oranı nedeniyle toz oluşumunun zaman zaman önlenemediği gözlenmiştir. Mevsim geçişlerinde, özellikle hava olaylarının stabil olmaması nedeniyle yüksek tozuma seviyeleri yaşandığı da dikkate değerdir. Kış aylarında ise kar ve yağmur nedeniyle sulama işlemi gerçekleştirilmediği için sıcaklığın sıfırın altına düştüğü ve yağışsız günlerde toz oluşumunun önlenemediği gözlenmiştir. Ancak bu durum uzun süreli olmadığı için ölçüm sonuçlarına yansımamıştır.

Gürültü ölçümleri incelendiğinde, değerlerin genellikle 45-50 dBA arasında olduğu ve önemli dalgalanmaların olmadığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, gürültü kaynaklarının yerleşim alanlarından uzak olması ve arazinin doğal topografyasının gürültü bariyeri görevi görmesidir. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği kapsamında yapılan değerlendirmede, en düşük limit L_{gece} değeri olan 50 dBA'nın altında kaldığı görülmüştür. Özellikle Nisan aylarında gürültü seviyesinin 50 dBA dolaylarında olduğu ve bu artışın, elektronik cihazları koruyan sundurmaya çarpan yağmur damlalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Maden drenaj suyunun analiz sonuçları, mevsimsel koşulların ve maden sahasında biriken suların bekleme süresinin önemli etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Analizlerde dikkat çeken parametreler ise askıda katı madde, sülfat, demir ve çinkodur. Bu parametreler, önceki yüzey suyu ve yeraltı suyu analizlerinde de benzer şekilde ön plana çıkmıştır. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği kapsamında yapılan değerlendirme sonuçlarına göre, pH değeri 6-9 arasında kalırken, askıda katı madde bir kez sınır değeri aşmış, sülfat ise 7 kez sınır değeri aşmıştır. Bu limit değer artışları, özellikle 2019 yılı Mayıs-Eylül dönemi arasında kümelenmiştir.

Askıda Katı Madde (AKM): Maden drenaj suyunda en yüksek dalgalanma gösteren parametredir. Bu dalgalanmaların ana nedeni, yağışlar ve karların erimesi sonucu oluşan yüzey akışlarının, sediment ve askıda partikülleri taşımış olmasıdır. Bu dönemlerde de maden üretiminin aksamaması için suyun hızlıca tahliyesi büyük önem arz etmektedir. Bu durum hidrolik bekletme süresini düşürerek deşarj edilen suda yüksek AKM seviyelerine yol açmaktadır.

Sülfat: Kömürün bünyesinde yüksek oranda sülfür bileşikleri bulunması, maden sahsında biriken suların doğal olarak sülfat içermesi beklenen bir durumdur. Analizler, yaz aylarında sülfat seviyelerinin arttığını göstermektedir. Bu artışın temel nedeni, yaz aylarındaki deşarj oranının kış aylarına göre daha az olması ve bu nedenle yaz aylarında maden çukuruna dolan suların hidrolik bekletme süresinin artmasıdır. Bekleme süresinin uzaması, sülfür bileşiklerinin suya geçişini kolaylaştırarak sülfat konsantrasyonlarını yükseltmektedir. Ayrıca, sülfattan kaynaklı asit maden drenajı riski de bulunmaktadır ancak bu riskin oluşumu; ortamın pH'ı, sıcaklık, oksijen varlığı ve mikroorganizma seviyeleri gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu bağlamda, maden drenaj sularında pH izlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Sonuçlara göre pH değeri mevzuatın belirlediği 6 limitinin altına düşmemiştir. Bu da suyun hızla tahliye edilmesi sayesinde kömür ile temas süresinin kısa tutulduğunu göstermektedir.

Demir: Demir sülfürleri, kömür madenlerinde yaygın olarak bulunan minerallerdir. Analizlerde, demir seviyelerinin 10 µg/l ile 1975 µg/l arasında değiştiği ve ortalamanın 625,44 µg/l olduğu tespit edilmiştir. Deşarj sınır değerleriyle karşılaştırıldığında, bu seviyeler aşılmamıştır. Kıtaiçi Su Kaynaklarının Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri'ne göre yapılan değerlendirmede, demir konsantrasyonlarının I. ve III. Sınıf su kalitesi arasında olduğu, özellikle bahar aylarında III. Sınıf su kalitesinde olduğu gözlemlenmiştir.

Elde edilen hava kalitesi verileri, Türkiye'deki benzer maden alanlarında yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında anlamlı farklılıklar göstermektedir. Örneğin, (Ercan vd, 2020) tarafından Bolu bölgesinde yürütülen bir çalışmada PM_{10} seviyeleri ortalama 38 µg/m^3, çöken toz değerlerinin ise 53 mg/m^2.gün olarak raporlanmıştır [13]. Bu değerler, çalışmamızda A köyü için belirlenen ortalama değer olan 16,92 µg/m^3'ten oldukça yüksek, 80,46 mg/m^2.gün'den düşük olduğu görülmüştür. Bu fark, çalışma alanındaki madencilik faaliyetlerinin yoğunluğu, kullanılan ekipmanlar ve yerel meteorolojik koşullar gibi etkenlerden kaynaklanıyor olabildiğini göstermektedir.

Drenaj suları açısından değerlendirildiğinde, [Wang, L ve ark., 2022] tarafından Çin Sunan kömür madeninde yapılan çalışmada Fe, Mn ve Cr elementlerine dikkat edilmesi gerektiğine değinilmiştir [14]. Çalışmamızda Fe değerlerinde fazla dalgalanma olduğu görülmüştür. Bu durum, linyit madenciliğine özgü jeokimyasal süreçlerin benzer etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada linyit madenciliği faaliyetlerinin hava kalitesi, gürültü ve maden drenaj suyu üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiş olmakla birlikte, bu çevresel bileşenlerin birbirleriyle etkileşim içinde olduğu da göz önünde bulundurulmaktadır. Örneğin, meteorolojik verilerle desteklenen hava kalitesi analizleri, özellikle rüzgârlı dönemlerde artan partikül madde (PM_{10}) ve çöken toz seviyelerinin, bu tozların yüzey sularına veya doğrudan maden drenaj suyu toplama alanlarına taşınarak su kalitesini (özellikle AKM parametresini) etkileme potansiyeline işaret etmektedir. Benzer şekilde, yağışlı dönemlerde hem maden drenaj suyundaki AKM miktarında yüzey akışına bağlı artışlar gözlenmiş hem de (yağmur damlalarının ölçüm cihazı sundurmasına çarpması nedeniyle) gürültü seviyelerinde kısa süreli yükselmeler tespit edilmiştir; bu durum, aynı meteorolojik olayın farklı çevresel bileşenleri nasıl etkilediğini göstermesi açısından önemlidir. Dolayısıyla, madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerini yönetirken bu tür etkileşimleri dikkate alan bütüncül bir yaklaşımın benimsenmesi, alınacak önlemlerin etkinliğini artıracaktır.

Çalışmada, 2015-2020 dönemi için hava kalitesi, gürültü ve maden drenaj suyu parametrelerine odaklanmış olup, toprak kalitesi veya habitat üzerindeki doğrudan etkiler gibi uzun vadeli birikimli sonuçlar bu çalışmanın kapsamında yer almamaktadır. Ancak, elde edilen bulgular - özellikle belirli dönemlerde sınır değerleri aşan PM_{10} seviyeleri, maden drenaj suyunda gözlemlenen ve zaman zaman sınır değerleri aşan sülfat ve AKM konsantrasyonları - bu etkilerin uzun yıllar devam etmesi durumunda, bölgedeki toprak verimliliği, bitki örtüsü ve sucul ekosistemler üzerinde potansiyel birikimli olumsuz etkiler yaratma riski taşıdığını düşündürmektedir. Örneğin, sürekli toz birikiminin toprak pH'ını veya kimyasal yapısını değiştirmesi, ya da drenaj suyundaki yüksek sülfat seviyelerinin alıcı ortamdaki sucul yaşamı uzun vadede etkilemesi gibi riskler mevcuttur. Bu potansiyel birikimli etkilerin detaylı olarak araştırılması, gelecekteki çalışmalar için önemli bir konu başlığıdır.

4.1 Öneriler

Hava Kalitesi Yönetimi: Özellikle B Köyü'nde sıkça gözlemlenen PM_{10} sınır değer aşımları ve yaz/bahar aylarında artan toz seviyeleri dikkate alınarak; mevcut toz bastırma yöntemlerinin (yol sulama, konveyör sistemlerinin kapalılığı, vb.) etkinliğinin gözden geçirilmesi, rüzgar hızının yüksek olduğu günlerde operasyonel tedbirlerin artırılması ve özellikle hakim rüzgar yönü ve B Köyü'nün konumu göz önüne alınarak ek tedbirlerin (Örneğin; rüzgar perdeleri, bitkilendirme, vb.) fizibilitesinin araştırılması.

Maden Drenaj Suyu Yönetimi: Yağışlı dönemlerde AKM seviyelerindeki artışları kontrol altına almak amacıyla, maden çukurundaki toplama havuzlarının ve/veya deşarj öncesi kullanılan sedimantasyon yapılarının tasarım ve işletme verimliliğinin (bekletme süresi, kapasite, düzenli temizlik vb.) iyileştirilmesi. Özellikle 2019 yılında gözlenen ve sınır değerleri aşan yüksek sülfat konsantrasyonlarının yönetimi için, suyun sahada bekleme süresini

minimize edecek deşarj stratejilerinin geliştirilmesi veya sülfat giderimine yönelik pasif (Örneğin; yapay sulak alanlar) ya da aktif arıtma teknolojilerinin uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi.

Entegre İzleme: Hava, su ve gürültü parametrelerinin izlenmesine devam edilmesi ve bu verilerin, potansiyel etkileşimleri ve birikimli etkileri daha iyi anlamak amacıyla periyodik olarak birlikte değerlendirilmesi.

Teşekkür

Bu makale, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nde 701364 numara ile kayıtlı yüksek lisans tezinin bir bölümünden elde edilen bulgulara dayanmaktadır.

Kaynakça

[1] EÜAŞ 2023. Elektrik Üretimi ve Ticareti Sektör Raporu, 3s.

[2] 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), (2018), 103-116.

[3] Ertürk, F., A. Akkoyunlu ve K. B. Varınca, 2006. Enerji Üretimi ve Çevresel Etkileri, Türkasya Stratejik Araştırma Merkezi, 25s.

[4] Atukalp, M. E., & Kesimal, A., 2023. Türkiye'de Kömür Madenciliğinde Etkinlik Değişimi. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1), (2023), 27-36.

[5] Kaçmaz, Ş., & Demirpolat, H., 2022. Termik Santral Kaynaklı Çevre Kirliliğini Önlemek İçin Baca Gazı Arıtma Teknolojisi: Örnek Çalışma Seyitömer Termik Santrali Uygulaması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (34), (2022), 645-651.

[6] TKİ 2019. Linyit Sektör Raporu, 16s.

[7] Uçurum, Metin. Kalsit Madenciliğinin Geleceğinde Optik Ayırma Teknolojilerinin Yeri ve Önemi, 4.1(2015), 40-46.

[8] Perinçel, S. 2000. Çatalağzı Termik Santralinin Kömür Kullanımından Doğan Çevre Etkilerinin İncelenmesi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81s, Zonguldak.

[9] Ertuğrul, G. 2010. Madencilik Faaliyetlerinin Çevresel Etkilerinin ve Doğa Onarım Çalışmalarının Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ile Belirlenmesi ve Modellenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 167s, İzmir.

[10] Delibalta, M. S., Uzal, N., & Lermi, A. 2015. Ilgın Linyit İşletmeleri Göletlerinde Asit Maden Drenajı ve Rehabilitasyonu. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5.1 (2015), 73-82.

[11] Çelik, A. A. 2018. Açık Maden Ocaklarındaki Toz Emisyonlarının Ekolojik Etkileri. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 72s, Şanlıurfa.

[12] Drebenstedt, C., Sımon, A., Hoth, N., & Jolas, P. 2019. Innovative Approach To Reduce Acid Mine Water Drainage (Amd) And Dump Failures On Example Of German Lignite Mining. Technical Sciences, 4.3 (2019), 313-330.

[13] Ercan, Ö., Dinçer, F., Sarı, D., Ceylan, Ö., & Dİnçer, F. K., 2020. Determination of PM_{10} and deposited dust dispersion on the settlement areas from Aksa Göynük coal (lignite) fueled thermal power plant. Atmospheric Pollution Research, 11(12) 2022, 2126-2132.

[14] Wang, L., Tao, Y., Su, B., Wang, L., & Liu, P., 2022. Environmental and health risks posed by heavy metal contamination of groundwater in the Sunan Coal Mine, China. Toxics, 10(7), 2022, 390.

[15] Atay, B. 2019. Termik santrallerin çevreye olumsuz etkileri ve alınabilecek önlemlerin değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 124s, Isparta.

[16] Ediz, İ. G., Beyhan, S., Akçakoca, H., & Sarı, E., 2002. Madencilikte Gürültü Sorunu Ve Gürültüye Bağlı İşitme Kayıpları. Journal of Science and Technology of Dumlupınar University, (003), (2022), 50-64.

[17] Türkten B. 2023. Yer Altı Ocağı Galerilerinde Oluşan Drenaj Sularının Karakterizasyonu ve Arıtılması. Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 82s, Aksaray.