



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme İşlemlerinde Numune Türüne Bağlı Partikül Madde Salınım Analizi

Zekeriya DURAN¹ Tuğba DOĞAN² Güler BAYAR^{*3}

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

^{*3}Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

*Sorumlu yazar e-posta: gbayar@cumhuriyet.edu.tr

Öz: Bu çalışmada, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarı'nda hematit, barit ve linyit numunelerinin boyut küçültme, öğütme ve zenginleştirme sırasında açığa çıkan partikül madde salınımları (PM) (TAPM, PM₁₀, PM_{2.5} ve PM₁) ayrıntılı biçimde araştırılmıştır. PM salınımları numune ve ekipman tipine bağlı olarak değişmektedir. Özellikle boyut küçültme ekipmanları (çekirli kırıcı) ve değirmen gibi yüksek mekanik enerjiye sahip cihazlar en yüksek PM seviyelerini üretirken; sallantılı masa sistemi akışkan bir ortamda (su) ve besleme pülp şeklinde olduğu için en düşük PM salınımlarını göstermiştir. İstatistiksel analizlerde, ölçüm verilerinin geniş saçınımlı ve heterojen bir dağılıma sahip olduğunu ortaya koymuş; bu nedenle eşdeğer sürekli konsantrasyon değeri (L_{eq(PM)}) yerine, aritmetik ortalama ve dağılım karakteristiklerini yansıtan histogramlar kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuç olarak, cevher hazırlama süreçlerinin PM üretim potansiyeli bakımından ciddi riskler içerdiği, bu nedenle ekipman yerleşiminin optimize edilmesi ve işlem sıralamasının uygun şekilde planlanması, daha güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamı oluşturulmasına doğrudan katkı sunacaktır.

Anahtar Kelimeler: Laboratuvar hava kalitesi, PM salınımı, PM maruziyeti, Kaba PM, İnce PM

Particulate Matter Emission Analysis Based on Sample Type in Ore Preparation and Enrichment Processes

Abstract: In this study, particulate matter (PM) emissions (TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁) released during size reduction, grinding, and enrichment of hematite, barite, and lignite samples were investigated in detail at the Ore Preparation Laboratory of the Department of Mining Engineering at Sivas Cumhuriyet University. PM emissions vary depending on the sample and equipment type. In particular, devices with high mechanical energy, such as size reduction equipment (hammer crusher) and mills, produced the highest PM levels, while the shaking table system showed the lowest PM emissions because it was in a fluid media (water) and the feed was in the form of pulp. Statistical analyses revealed that the measurement data exhibited a wide and heterogeneous distribution; therefore, instead of using the equivalent continuous concentration value (L_{eq(PM)}), evaluations were conducted using histograms that reflect the arithmetic mean and distribution characteristics. In conclusion, ore preparation processes pose serious risks in terms of PM production potential. Therefore, optimizing equipment location and appropriately planning process sequences will directly contribute to creating a safer and healthier working environment.

Keywords: Laboratory air quality, PM emission, PM exposure, Coarse PM, Fine PM

Gönderilme Tarihi: 12.08.2025

Kabul Tarihi: 24.11.2025

Nasıl atıf yapılır: Duran, Z., Doğan, T., & Bayar, G. (2025). Cevher hazırlama ve zenginleştirme işlemlerinde numune türüne bağlı partikül madde salınım analizi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(3), 1082-1102 <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1763371>

1. Giriş

Laboratuvar terimi Latince’de “çalışmak” anlamındaki “laborare” kelimesinden gelmektedir. Laboratuvarlar bilimsel ve teknik araştırma ve deneylerin yanı sıra üretimin de yapıldığı ve bu çalışmaları yapmak için gerekli aletlerin bulunduğu; iş sağlığı ve güvenliği literatüründe tehlikeli veya çok tehlikeli iş yerleri grubuna dahil olan denetimli birim veya binalardır. İlk yıllarda laboratuvarlar sadece fizik ve kimya deneylerini yürütme olanağı veren araç ve gereçlerin toplandığı yer anlamına geliyordu. İlerleyen yıllarda deneysel bilimlerin gelişme göstermesiyle biyoloji, genetik vb. laboratuvarları kurulmaya başlandı. Bu arada fizik laboratuvarları da; optik, elektrik ve nükleer fizik gibi alt bilimlere ait uzmanlaşmış laboratuvar türlerine ayrıldı. Böylece tüm bilim dallarına ait çalışmaların yapıldığı laboratuvarlarda genel bir düzen ve disiplin sağlandı. Bu gelişmelerin sonucunda yapılan çalışmalardan daha iyi sonuç alabilmek adına laboratuvarların kendi arasında sınıflandırılması kaçınılmaz olmuştur (Girice, 2018).

Cevher hazırlama temel olarak, kıymetli mineralleri cevherden ayırma işlemidir. Endüstriyel ölçekli cevher hazırlama işlemleri birçok aşamadan oluşmaktadır. Cevher temelde fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal özelliklerinden oluşan farklılara göre ayrılmaktadır. Cevher hazırlama genel olarak dört aşamadan oluşur. Bunlar, boyut küçültme, sınıflandırma, zenginleştirme ve susuzlandırma. Bu işlemlerin küçük ölçekle yapıldığı laboratuvarlarda da benzer iş sağlığı ve güvenliği kurallarının uygulanması esas teşkil etmektedir. İş güvenliği, işyerlerinde mevcut olan ya da işin yürütülmesi sırasında ortaya çıkabilecek tehlikelerin çalışan sağlığına zarar vermesini önlemeye yönelik sistemli ve bilimsel çalışmalar bütünüdür. İş kazalarını ve meslek hastalıklarını en aza indirmeyi amaçlar. Laboratuvarlar da birer çalışma ortamı olduğundan, iş güvenliği uygulamaları burada da büyük önem taşır.

Laboratuvarlarda yapılan çalışmalarda karşılaşılabilecek tehlikelerin ve risklerin tespitine yönelik ülkemizde birçok çalışma yapılmıştır. Mühendislik fakültesi laboratuvarlarında sahaya dayalı risk gözlemleri yapılmış; iş kazalarının önlenmesi için ortam düzenlemesi, yangın önlemleri, atık yönetimi, kişisel koruyucu donanım kullanımı, acil çıkış düzenlemeleri gibi çok sayıda İSG kriteri değerlendirilmiştir. Özellikle kimya laboratuvarlarında kimyasal maddelerin etiketlenmesi, malzeme güvenlik bilgi formlarının (MSDS) eksiksiz bulunması ve yangın tatbikatlarının eksikliği gibi bulgulara yer verilmiş, ergonomik ve psikososyal risk faktörleri de göz önüne alınarak kapsamlı bir çözüm önerisi geliştirilmiştir (Girice, 2018). Benzer bir çalışmayı da Üstün Şahin (2018), orta öğretim kurumlarında, laboratuvar ortamlarında iş sağlığı ve güvenliğinin uygulanmasına dair kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır. Laboratuvarlarda güvenli ve sağlıklı çalışma kurallarına uyulması, deney sırasında kullanılacak kişisel koruyucu donanımların seçimi, yaşanabilecek olası kazalar ve bu kazaların önlenmesine yönelik alınacak önlemlerle birlikte, kaza sonrası uygulanması gereken ilkyardım süreçlerini ele almıştır. Laboratuvarların fotoğrafları çekerek, öğretmenler ve öğrencilerin bu alanlara dışarıdan, daha eleştirel ve bilinçli bir gözle bakmalarına teşvik etmiştir. Ayrıca, malzeme güvenlik bilgi formlarının ve kimyasal etiketlemenin önemi vurgulanmış; laboratuvar düzeni, uygunluk düzeyi ve eksiklikleri analiz edilerek dikkat çekilmesi gereken noktalar ortaya konmuştur. Çalışmada, fotoğraflar üzerinden risk analizi yapılmış ve güvenliği artırmaya yönelik çeşitli öneriler geliştirilmiştir. Ordu & Bilir (2018), üniversite laboratuvarlarında iş sağlığı ve güvenliği kapsamında yapılan yeniden yapılandırma çalışmaları, 6331 Sayılı Kanun doğrultusunda değerlendirilmiştir. Fiziksel, biyolojik, ergonomik, kimyasal ve elektriksel risklere karşı alınması gereken önlemler detaylandırılmış; laboratuvarların güvenli tasarımı vurgulanmıştır. Yapısal elemanlar, havalandırma, aydınlatma, elektrik sistemleri ve acil müdahale ekipmanlarının mevzuata uygun yerleşimi önerilmiştir. Ayrıca uluslararası iyi uygulama örnekleriyle karşılaştırmalı analiz yapılmış; güvenliğin sürdürülebilirliği için kullanıcı farkındalığı ve eğitimin önemi vurgulanmıştır. Fırat (2020), İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında Fine-Kinney yöntemiyle risk analizi yapmıştır. Gürültü ölçümleriyle laboratuvarın gürültü haritası çıkarılmış; en düşük düzey 70 dB(A) ile elek sarsma cihazında, en yüksek düzey ise 83 dB(A) ile çeneli kırıcıda ölçülmüştür. Cevher Hazırlama/Zenginleştirme Laboratuvarlarında esaslı risk sınıfına giren tehlikelerin elektriksel problemler ve kimyasal maddelerden kaynaklandığı belirlenmiştir. Ağaçaayak ve ark. (2017) ise, Maden Mühendisliği laboratuvarlarında potansiyel tehlikeleri belirleyerek L tipi (5x5) karar matrisi ile sistematik bir risk analizi yapmıştır. Kimyasalların kullanım ve saklama koşulları yüksek risk grubunda değerlendirilmiş; gürültü, toz ve titreşim gibi fiziksel etmenlerin yanı sıra makine ve ekipmanların dönen parçaları ile keskin yüzeylerinin ciddi yaralanma riski taşıdığı

vurgulanmıştır. [Gökdere \(2017\)](#), çevre laboratuvarlarında karşılaşılabilecek tehlikeleri belirlemek amacıyla L tipi (5x5) matris yöntemiyle kapsamlı bir risk analizi gerçekleştirmiştir. Yerinde gözlemlerle öncelikli tehlikeleri tespit etmiş, her bir tehlikeyi olasılık ve şiddet düzeyine göre sayısal olarak değerlendirmiştir. Elde edilen risk skorlarına göre tehlikeleri sıralayarak bir analiz tablosu oluşturmuş; yüksek riskli durumların azaltılması veya ortadan kaldırılması için çeşitli öneriler sunmuştur.

Laboratuvarlardaki İSG risklerinin sistematik biçimde analiz edilebilmesi için iki basamaklı, yenilikçi bir yöntem geliştirilmiştir. Farklı laboratuvar türlerine uygulanabilen bu standart yaklaşımın ilk basamağında, kontrol listeleriyle sahada tehlikeler belirlenmiş; “hayır” ve “uygun değil” olarak işaretlenen unsurlar ikinci basamağa aktarılmıştır. İkinci basamakta, bu eksikliklerin olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik düzeyleri FMEA yöntemiyle değerlendirilerek Risk Öncelik Puanları (RÖP) hesaplanmış; riskler dört düzeyde sınıflandırılmıştır. Yöntem, sekiz farklı laboratuvarda test edilmiş, 287 gereklilik değerlendirilmiş ve hem zaman kazandırdığı hem de tehlikeleri düzenli biçimde ortaya koyduğu görülmüştür. Bu yaklaşımın, sürdürülebilir güvenlik kültürüne katkı sağladığı ve sürece akademisyenler ile teknik personelin dahil edilmesinin önemli olduğu vurgulanmıştır ([Güler, 2020](#)).

[Yalım \(2020\)](#), cevher hazırlama sürecinde özellikle boyut küçültme aşamasında değirmenden bunkere dökülen madenin, gürültü ve toz açısından iş güvenliği riski taşıdığını belirtmiştir. Oluşan tozun meslek hastalıklarına yol açabileceği ve gürültünün benzer riskler oluşturduğunu vurgulamıştır. Çalışmada, cevher işleme sürecindeki riskler ile bunların azaltılmasına yönelik yöntemler açıklanmış; kimyasal madde kullanımı ve kişisel koruyucu donanımların önemi üzerinde durulmuştur. Üniversitelerin mühendislik fakültelerindeki laboratuvarlarda iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamaları incelenmiştir. Yapılan çalışmada, teknolojik gelişmelerle artan iş kazaları ve meslek hastalıklarına dikkat çekilerek, laboratuvarların risk açısından değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Eğitim, araştırma/üretim, kimya ve biyoloji laboratuvarları sınıflandırılmış; özellikle kimya ve biyoloji laboratuvarlarının yüksek risk taşıdığı belirtilmiştir. Fiziksel (gürültü, sıcaklık, aydınlatma, titreşim), kimyasal, biyolojik, ergonomik ve psikososyal riskler detaylandırılmış; santrifüj, mikser ve otoklav gibi cihazların 85 dB(A) üzerindeki gürültü düzeylerinin işitme sağlığı açısından tehlikeli olabileceği ifade edilmiştir. Termal konfor, havalandırma ve aydınlatma gibi fiziksel koşulların çalışan sağlığı ve verimliliği için kritik olduğu vurgulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, laboratuvar güvenliği için İSG bilincinin artırılması, güvenlik kültürünün yerleştirilmesi ve teknik önlemlerin titizlikle uygulanması gerektiği belirtilmiştir ([Yılmaz & Bilici, 2020](#)).

Toplam Askıda Partikül Madde (TAPM), literatürde farklı çap aralıklarını kapsayacak şekilde tanımlanmaktadır. [Chow & Watson \(1998\)](#) ile [USEPA \(1998\)](#) çalışmalarında TAPM’yi, ≤ 40 μm çapları için kullanırken; [Araújo ve ark. \(2014\)](#), bu terimi 50 μm ’ye kadar olan tüm çaplar için kullanmıştır. [Cao ve ark. \(2013\)](#) ise TAPM’yi 0 ile yaklaşık 30–50 μm arasındaki çapları kapsayacak şekilde tanımlamışlardır. Diğer bazı çalışmalarda ise TAPM, ≤ 30 μm tüm askıda partikülleri içerecek biçimde ele alınmıştır ([Hime ve ark., 2015](#); [NSW EPA, 2015](#)). Diğer taraftan çapı ≤ 10 μm olanlar PM_{10} , ≤ 2.5 μm olanlar $\text{PM}_{2.5}$ ve ≤ 1 μm olanlar ise PM_1 olarak tanımlanmıştır ([WHO, 2006](#); [NSW EPA, 2015](#); [Garcia-Garza ve ark., 2024](#)). Bununla birlikte, çapı 2.5–10 μm arasında olan partiküller kaba partikül, ≤ 2.5 μm olanlar ince partikül ([WHO, 2006](#); [Hime ve ark., 2015](#); [Li ve ark., 2017](#); [EPA, 2025](#)) ve ≤ 0.1 μm çapındaki partiküller ise ultra ince partikül (UİP) olarak adlandırılmaktadır ([WHO, 2006](#); [Hime ve ark., 2015](#)).

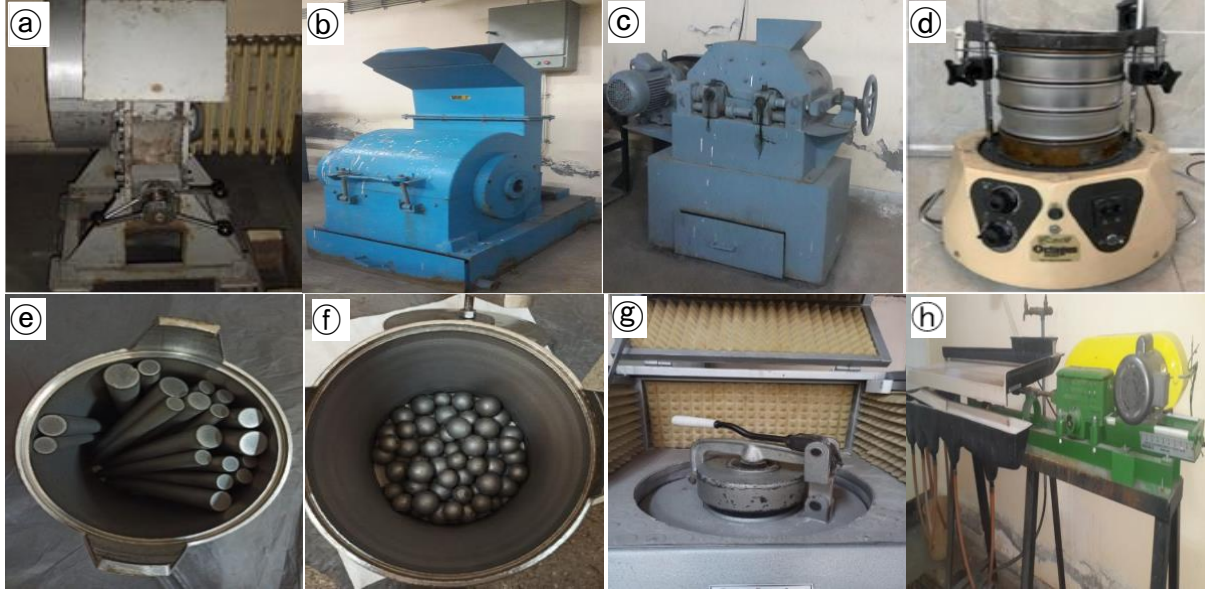
Son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar, çevresel PM’lere kısa ve uzun süreli maruziyetin ciddi sağlık sorunlarıyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle uzun süreli PM maruziyeti, solunum yollarının savunma mekanizmalarını zayıflatarak zararlı maddelerin akciğerlere taşınmasına neden olmaktadır ([ÇEDB, 2004](#); [CAFÉ, 2004](#); [Hime ve ark., 2015](#)). Ayrıca tozlu ortamlarda çalışanların uğradığı zarar; çalışılan süreye, tozun bileşimine, miktarına tane boyutuna ve kişisel hassasiyet gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir ([Ediz ve ark., 2001](#)). PM maruziyeti, ölümcül olmayan kalp krizi, kalp ritim bozukluğu, ağır astım, solunum fonksiyonlarında azalma ve nefes alma zorluğu gibi çeşitli klinik semptomlarla kendini gösterebilmektedir. Bu etkiler, özellikle çocuklar ve yaşlılar gibi duyarlı gruplarda daha belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır ([WHO, 2006](#); [Adams ve ark., 2015](#); [Kim ve ark., 2015](#)). Ayrıca PM’lerin merkezi sinir sistemi üzerinde nörotoksik etkiler yaratabileceği ve doğum oranlarını olumsuz yönde etkileyebileceği yönünde bulgular da mevcuttur ([Hime ve ark., 2015](#)). Bu nedenle PM kirliliği, yalnızca solunum ve kardiyovasküler sistemleri değil, aynı zamanda nörolojik ve üreme sağlığını da tehdit eden çok yönlü bir çevresel risk faktörü olarak değerlendirilmektedir. İşyerlerindeki toz rahatsızlıklarından bahsedildiğinde, genellikle ≥ 20 μm çaplı tozlar akla gelmektedir.

Bu tozlar özellikle yüksek hızlarda hareket ettikleri için gözlere zarar verebilmekte ve görsel algıyı sınırlayabilmektedir (Yiğit, 2007; Çınar & Sensöğüt 2017). Görsel algıyı etkileyen PM boyutları arasında özellikle PM_{2.5} (NSW EPA, 2015) ve çapı 0.3-0.6 µm arasında olan partiküller öne çıkmakta (ÇEDB, 2004), bu partiküller nemli hava koşullarında görüş mesafesini daha belirgin şekilde azaltmaktadır. PM_{2.5}, insan sağlığı açısından en büyük riski oluşturan boyut olarak tanımlanmakta ve bu konuda çok sayıda bilimsel çalışma literatürde yer almaktadır (CAFÉ, 2004; Evyapan ve ark., 2012; Hime ve ark., 2015; Gao ve ark., 2018; Miller & Xu, 2018).

Laboratuvar ortamlarında iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili risklerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu çalışmaların genellikle laboratuvarlarda yapılan saha gözlemleriyle tehlikelerin tespit edilmesi, sistematik risk analiz yöntemlerinin uygulanması ve çözüm önerilerinin geliştirilmesi yönünde benzerlik gösterdiği görülmektedir. Fiziksel (gürültü, aydınlatma, sıcaklık), kimyasal (toksik maddeler, solventler), biyolojik (mikroorganizmalar), ergonomik ve psikososyal risk faktörleri bu çalışmalarda detaylı biçimde ele alınmış; kişisel koruyucu donanım kullanımı, yangın önlemleri, atık yönetimi ve acil durum planlaması gibi temel İSG kriterleri değerlendirilmiştir (Girice, 2018; Üstün Şahin, 2018; Ordu & Bilir, 2018; Yılmaz & Bilici, 2020). Risk analizlerinde sıklıkla Fine-Kinney ve L tipi (5x5) matris gibi kantitatif yöntemler tercih edilmiş; ayrıca FMEA gibi yenilikçi ve iki aşamalı sistematik yaklaşımlar kullanılarak tehlikelerin olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik düzeyleri dikkate alınarak risk öncelik puanları hesaplanmıştır (Firat, 2020; Ağaçayak ve ark., 2017; Gökdere, 2017; Güler, 2020). Ayrıca, laboratuvarların fiziksel düzeni, havalandırma, aydınlatma ve elektrik sistemlerinin mevzuata uygunlukları değerlendirilmiş; uluslararası iyi uygulamalarla karşılaştırmalı analizler yapılmıştır (Ordu & Bilir, 2018). Fotoğraflarla desteklenen saha çalışmaları ile öğretmen ve öğrencilerin riskleri daha bilinçli şekilde fark etmeleri sağlanmış; güvenlik kültürünün geliştirilmesi için eğitim ve farkındalık çalışmalarının önemi vurgulanmıştır (Üstün Şahin, 2018). Diğer taraftan maden mühendisliği laboratuvarlarında ise gürültü, toz, titreşim ve kimyasal maddeler gibi yüksek riskli unsurların meslek hastalıklarına yol açabileceği belirtilmiş ve bu risklerin azaltılmasına yönelik teknik önlemler önerilmiştir (Yalım, 2020; Firat, 2020). Ancak mevcut literatür incelendiğinde, laboratuvar faaliyetleri sırasında açığa çıkan partikül madde (PM) konsantrasyonlarına yönelik kapsamlı çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın amacı, önceki çalışmalardan farklı olarak maden mühendisliği cevher hazırlama laboratuvarlarında gerçekleştirilen boyut küçültme (kıırma ve öğütme) ile zenginleştirme işlemleri sırasında açığa çıkan PM (TAPM, PM₁₀, PM_{2.5} ve PM₁) konsantrasyonlarının incelenmesidir. Literatürde yeterince ele alınmamış olan bu konu hem laboratuvar çalışan sağlığı hem de İSG açısından önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü cevher hazırlama laboratuvarında (6 ayrı oda), cihazların çalışması sırasında ortaya çıkan PM seviyelerinin belirlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında Sivas bölgesinde rezerv potansiyeli yüksek olan hematit, barit ve kömür (linyit) numuneleri seçilmiştir. Laboratuvarında bulunan temel ekipmanlar ayrı ayrı çalıştırılarak bu numunelerinin işlenmesi (kıırma, öğütme ve zenginleştirme) sırasında açığa çıkan PM seviyeleri ölçülmüştür. Ölçümlerde kullanılan cihazlar Şekil 1'de verilmiştir. Deneysel süreçlerde; cevher hazırlama proseslerinin kıırma testlerinde 1000 g, öğütme ve elek sarsma işlemlerinde 500 g ve zenginleştirme işlemlerinden sarsıntılı masada ise 200 g numune kullanılmıştır. Ölçüm süreçlerinde açığa çıkan PM konsantrasyonları doğrudan ortam havasında µg/m³ birimiyle ve gerçek zamanlı 5 sn/veri olacak şekilde ayarlanmıştır. Laboratuvarın farklı bölmelerinde yer alan ekipmanlar ilgili numunelerle çalıştırılarak her işlem sırasında oluşan PM seviyeleri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir.



Şekil 1. Ölçümlerde kullanılan laboratuvar cihazları (a: çeneli kırıcı, b: çekiçli kırıcı, c: merdaneli kırıcı, d: elek sarma cihazı, e: çubuklu değirmen, f: bilyalı değirmen, g: halkalı öğütücü, h: sarsıntılı masa).

PM ölçümü cihazı ve ölçümler sırasındaki cihazın örnek konumları Şekil 2’de verilmiştir. PM ölçer (DUSTMATE), CEN-TR 16013-3 standardına uygun olarak ölçümleri gerçekleştirmekte ve hava içerisindeki PM ve toz konsantrasyonunu belirlemek amacıyla ışık saçılma tekniğini kullanmaktadır. Cihaz, TAPM, PM₁₀, PM_{2.5} ve PM₁ parametrelerini eşzamanlı olarak ölçmekte ve veriler PC bağlantısı aracılığıyla bilgisayara aktarılıp analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. DUSTMATE, aynı zamanda havadaki toz ve duman kaynaklarını düşük salınımlarda (0.1 µg/m³) dahi tespit edebilmekte ve 6000 µg/m³'e kadar ölçüm yapabilmektedir. Ölçüm aralığı 0.5 µm ile 20 µm arasındaki partikülleri kapsamakta olup, 20 µm’den büyük olan tüm partikülleri 20 µm olarak sınıflandırmaktadır (Hwang ve ark., 2014; Dreshaj ve ark., 2017; Anonim 1, 2025; Anonim 2, 2025).

Ölçümü gerçekleştirilen PM verileri, AirQTM yazılımı aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ve istatistiksel analiz için EXCELTM yazılımına gönderilmiştir. İstatistiksel analizlerde Sivas Cumhuriyet Üniversitesi’ne yerleşke lisanslaması yapılan bir istatistiksel analiz paketinden (SPSS, V.23) faydalanılmıştır. Çarpıklık ve basıklık değerlerinin +1.5 ile -1.5 arasında olması durumunda verinin normal dağılıma uygun olduğu kabul edilmektedir (Tabachnick & Fidell, 2013; Erbay & Beydoğan, 2017). Alternatif bir yaklaşıma göre ise bu sınırlar +2.0 ile -2.0 arasında değerlendirilmiştir (George & Mallery, 2010). Bağımsız değişkenler arasındaki ilişkilere bağlı olarak ortaya çıkabilecek çoklu doğrusal bağlantı sorununu belirlemek amacıyla varyans artış faktörü (VIF) değerleri dikkate alınmıştır. Literatürde bazı araştırmacılar, VIF değerinin 10 ve üzeri olması durumunda çoklu doğrusal bağlantı sorununun varlığına işaret etmektedir (Albayrak, 2005; Montgomery ve ark., 2012; Büyükuysal & Öz, 2016; Karabulut, 2019; Ahmad ve ark., 2021). Diğer bazı çalışmalarda ise bu eşik değeri 5 olarak belirtmişlerdir (Bükey & Çetin, 2017; Avcı, 2020; Shrestha, 2020). L_{eq(PM)}, belirli bir zaman diliminde ölçülen partikül madde (PM) konsantrasyonlarının ortalama seviyesini temsil eder. Bu değer hesaplanma yöntemi eşitlik 1’de verilmektedir (Anonim 2, 2025). Diğer taraftan L_{10(PM)}, L_{50(PM)} ve L_{90(PM)}, sırasıyla ölçümlerin %10’unda, %50’sinde ve %90’ında aşılacak PM konsantrasyonlarını temsil etmektedir.

$$L_{eq(PM)} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(10^{\left(\frac{PM_i}{10} \right)} \right) \right] \quad (1)$$

Burada:

L_{eq(PM)}, kabin içindeki eşdeğer sürekli PM konsantrasyonunu,

P_{Mi}, kabin içindeki anlık PM konsantrasyonunu,

N ise toplam ölçüm sayısını ifade eder.



Şekil 2. PM ölçüm cihazı ve ölçümler sırasındaki cihazın örnek konumları.

3. PM Ölçüm Sonuçları

Cevher hazırlama laboratuvarlarındaki çalışmalar sırasında açığa çıkan PM salınımları hem çevresel etkilerin değerlendirilmesi hem de hava kalitesinin değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada hematit, barit ve kömür (linyit) gibi farklı numunelerin temel laboratuvar cihazlarında kırılması, öğütülmesi ve zenginleştirilmesi sırasında açığa çıkan PM salınımları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ölçümler, toplam askıda partikül madde (TAPM) yanı sıra PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve PM_1 parametrelerini içermektedir. Elde edilen veriler, PM salınımlarının numune türleri ve cihazlara bağlı olarak geniş bir dağılım sergilediğini göstermiştir (Çizelge 1). TAPM ve PM_{10} salınımları, 33.40-6527.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında değişmekte olup, ölçüm sonuçları hem numune hem de laboratuvar cihazlarına göre önemli farklılıklar göstermektedir. Daha ince partiküller olan $PM_{2.5}$ ve PM_1 salınımları ise numuneler ve cihazlara bağlı olarak 0.77-652.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında dalgalanmıştır.

Yapılan istatistiksel analizler, ölçülen ham verilerin normal dağılıma uygunluk göstermediğini ortaya koymuştur. PM salınımlarının değerlendirilmesi amacıyla her bir veri setinin aritmetik ortalaması, standart sapması, eşdeğer sürekli konsantrasyon $L_{eq(PM)}$ ve yüzdelik dilim parametreleri $L_{10(PM)}$, $L_{50(PM)}$ ve $L_{90(PM)}$ ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda aritmetik ortalama ve standart sapma değerleri arasındaki belirgin fark, PM salınımlarının oldukça saçılı ve heterojen bir dağılım sergilediğini ortaya koymuştur. $L_{eq(PM)}$ değeri, belirli bir zaman dilimi boyunca ölçülen değişken PM salınımlarını tek bir sabit PM değeri ile temsil eder. Veriler incelendiğinde, geniş bir aralıkta saçılım gösteren PM salınımları nedeniyle $L_{eq(PM)}$ ile verilerin doğrudan karşılaştırılması istatistiksel açıdan sağlıklı değildir. Bunun temel sebebi, $L_{eq(PM)}$ değerlerinin veri setinin heterojenliği nedeniyle aritmetik ortalamadan çok daha yüksek olması ve ölçüm verilerinin maksimum değerlerine yakın bir değerde olmasıdır. Benzer şekilde, yüzdelik dilimler de PM dağılımının zamansal karakteristiğini anlamak açısından kritik role sahiptir. $L_{10(PM)}$, $L_{50(PM)}$ ve $L_{90(PM)}$ parametreleri sırasıyla ölçüm noktalarının %10, %50 ve %90'ında aşılmış PM salınımlarını ifade etmektedir. L_{10} değeri, en yüksek %10'luk dilimde ölçülen PM salınımlarını belirlerken, L_{90} değeri, ortamın sürekli olarak düşük PM seviyesinde kaldığı koşulları ifade eder. L_{50} ise veri setinin ortanca değerini temsil ederek genel dağılım eğilimlerini ortaya koymaktadır. Ölçüm verilerinin geniş aralıkta dağıldığını önemli bir göstergesi de $L_{eq(PM)}$, $L_{10(PM)}$, $L_{50(PM)}$ ve $L_{90(PM)}$ değerleri arasındaki belirgin farklardır. Eğer veri setleri homojen bir dağılım sergileseydi, bu yüzdelik dilimler arasında anlamlı farkların gözlenmemesi beklenirdi. Bu durumları açıklamak için barit numunesinin çubuklu değirmende öğütülmesi sırasında açığa PM salınım verileri örnek olarak Şekil 3'te verilmiştir.

Ölçüm verilerinin saçılı olması, eşdeğer sürekli salınım (L_{eq}) yerine aritmetik ortalama ve ölçüm verilerinin histogramları kullanılarak yorumlama yapılmasının daha doğru ve bilimsel açıdan tutarlı olacağını göstermektedir. Böylece, verilerin genel eğilimi daha sağlıklı bir şekilde değerlendirilebilir.

Ölçüm verilerinin aritmetik ortalamaları üzerinden değerlendirme yapıldığında, laboratuvardaki faaliyetler sırasında açığa çıkan TAPM, PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve PM_1 salınımları numune türüne ve işleme (kırma/öğütme, sınıflandırma ve zenginleştirme) bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Boyut küçültme işleminde en yüksek PM salınımları çekiçli kırıcılar, çeneli kırıcılar ve en düşük seviyede merdaneli kırıcılar şeklinde sıralanmıştır. Özellikle barit, çekiçli ve çeneli kırıcılarda boyut küçültme

işlemlerinde en yüksek PM salınımlarına ulaşmıştır. Kömür, diğer minerallerle kıyaslandığında genellikle daha düşük PM seviyelerine sahip olmasına rağmen merdaneli kırıcıda en yüksek PM salınımlarına sahiptir. Hematit için PM₁₀ ve PM_{2.5} değerleri genellikle orta seviyelerde olsa da, çekiçli kırıcıda 6036.58 µg/m³ gibi oldukça yüksek salınımlar kaydedilmiştir. Sonuç olarak, barit başta olmak üzere hematit ve kömüründe laboratuvar ortamında boyutlarının küçültülmesinde kullanılan kırıcıların çalışması esnasında ortamda yoğun PM salınımı gerçekleştiği ve bunun hava kalitesi üzerinde ciddi etkiler yaratabileceğini ortaya koymuştur.

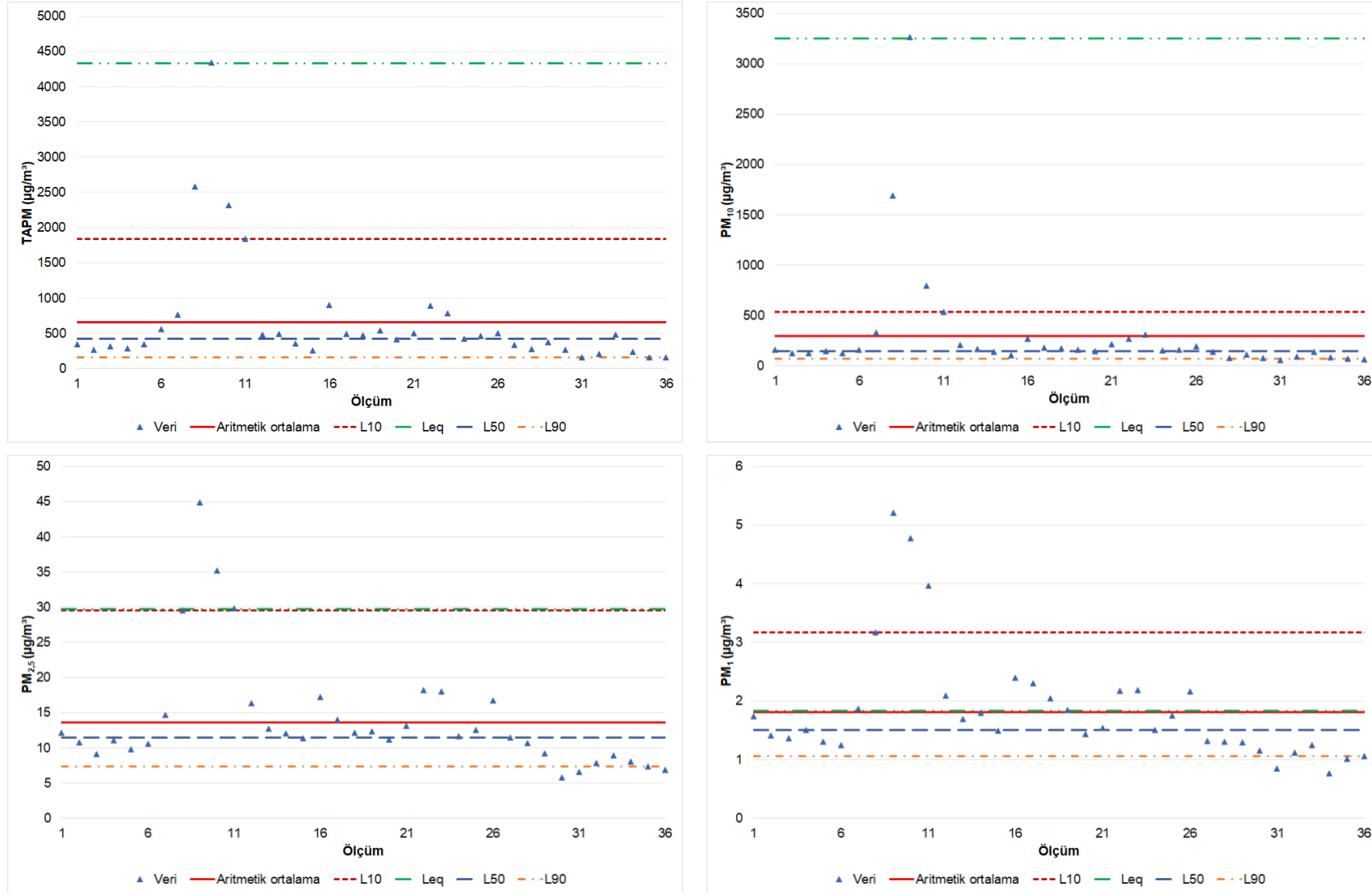
Laboratuvar ortamında bulunan farklı değirmenlerde öğütülen minerallerin öğütme işlemi sırasında açığa çıkan PM salınımlarında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. En yüksek PM salınımları bilyalı ve çubuklu değirmenlerde hematit numunesinde, halkalı öğütücüde ise kömürde görülmüştür. Özellikle halkalı öğütücüde kömür diğer numunelere göre çok daha yüksek PM salınımları gösterdiği hesaplanmıştır. Diğer taraftan öğütme işlemlerinde barit ise en düşük PM seviyelerine sahip olup, özellikle halkalı öğütücüde hematit ve kömüre göre çok daha düşük düzeyde kalmıştır. Dolayısıyla, özellikle hematit ve kömürün öğütülmesi sırasında daha yüksek PM salınımı gerçekleşmektedir. Bu nedenle, özellikle barit olmak üzere çeşitli minerallerin boyut küçültme ve öğütme işlemlerinin hava kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek ve laboratuvar ortamında çalışanların sağlığını korumak adına gerekli önlemlerin alınması kritik bir önem arz etmektedir.

Çizelge 1. Laboratuvar ortamında faaliyetler sırasında numuneye bağlı olarak açığa çıkan PM salınımları

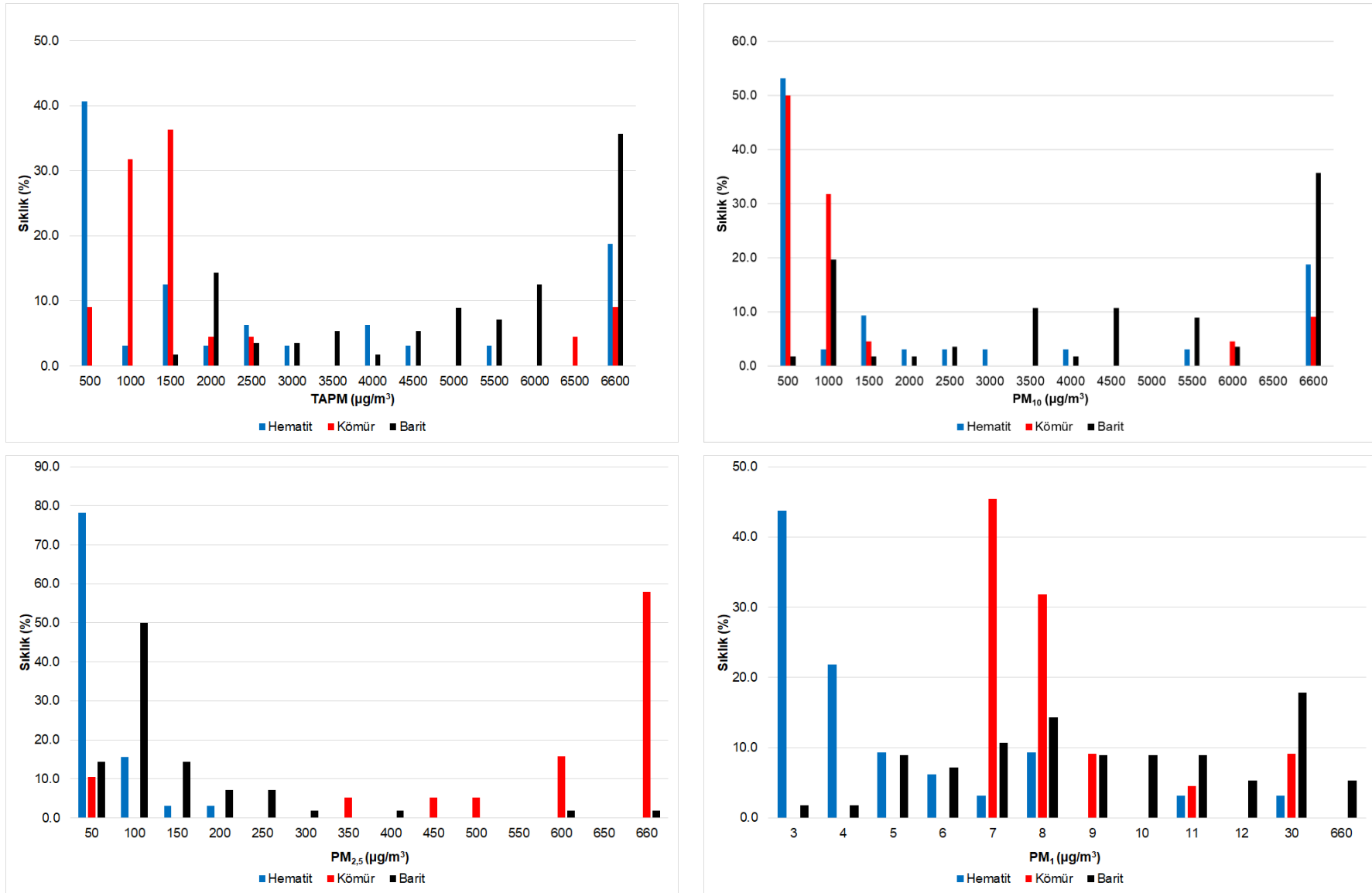
Faaliyet	Mineral	PM salınımı (µg/m ³)	Ortalama ± SD	Ölçüm aralığı (µg/m ³)	L ₅₀ (PM ₁₀) (µg/m ³)	L ₁₀ (PM ₁₀) (µg/m ³)	L ₅₀ (PM _{2.5}) (µg/m ³)	L ₉₀ (PM _{2.5}) (µg/m ³)
Çeneleli kırıcı	Hematit	TAPM	2281.24 ± 2465.46	63.10 – 6527.90	6520.63	6527.90	1073.90	131.46
			1825.82 ± 1919.70	409.20 – 6527.90	6517.49	6411.41	1192.05	494.34
			4770.91 ± 1843.06	1009.10 – 6527.90	6523.43	6517.90	5179.75	1724.88
	Kömür	PM ₁₀	1930.38 ± 2531.20	33.40 – 6527.90	6520.63	6527.90	423.80	69.35
			1302.03 ± 2066.23	242.10 – 6527.90	6517.49	6366.08	492.50	289.91
			4198.84 ± 2306.28	387.70 – 6527.90	6523.43	6527.90	4478.15	706.77
	Barit	PM _{2.5}	31.33 ± 38.11	6.67 – 190.06	175.01	64.55	16.67	7.05
			57.33 ± 24.07	38.35 – 126.18	113.71	112.20	48.77	40.24
			121.72 ± 117.18	24.96 – 652.79	635.31	221.95	85.67	44.59
	Çeneleli Kırıcı	PM ₁	4.46 ± 3.08	2.44 – 17.44	6.48	7.57	3.28	2.55
			7.94 ± 2.31	6.05 – 14.87	8.42	12.77	7.28	6.17
			32.98 ± 110.71	2.87 – 652.79	635.31	21.17	8.49	21.17
Çekiçli kırıcı	Hematit	TAPM	6036.58 ± 1540.53	709.10 – 6527.90	6527.44	6527.90	6527.90	2921.06
			5938.11 ± 1657.47	651.30 – 6527.90	6527.19	6527.90	6527.90	1949.70
			6527.90 ± 0	6527.90 – 6527.90	6527.90	6527.90	6527.90	6527.90
	Kömür	PM ₁₀	6000.98 ± 1650.35	316.90 – 6527.90	6527.44	6527.90	6527.90	2633.33
			5882.42 ± 1778.43	255.30 – 6527.90	6527.19	6527.90	6527.90	1588.90
			6527.90 ± 0	6527.90 – 6527.90	6527.90	6527.90	6527.90	6527.90
	Barit	PM _{2.5}	545.84 ± 190.29	18.49 – 652.79	649.28	652.79	648.57	94.64
			535.07 ± 198.74	33.44 – 652.79	650.42	652.79	652.79	49.22
			590.57 ± 164.00	87.34 – 652.79	652.16	652.79	652.79	195.32
	Çekiçli Kırıcı	PM ₁	421.08 ± 279.60	2.92 – 652.79	648.81	652.79	593.24	11.40
			435.93 ± 277.22	5.21 – 652.79	650.42	652.79	652.79	6.78
			572.05 ± 210.45	8.07 – 652.79	652.16	652.79	652.79	19.65
Merdaneli kırıcı	Hematit	TAPM	1795.63 ± 959.94	1049.50 – 6527.90	6513.13	2334.09	1527.25	1310.71
			6067.07 ± 624.99	4209.90 – 6527.90	6523.92	6527.90	6210.00	4975.50
			173.19 ± 287.73	33.30 – 2011.60	1994.79	317.34	93.65	45.07
	Kömür	PM ₁₀	1099.58 ± 1053.07	649.20 – 6527.90	6513.13	1195.72	843.95	751.73
			5881.64 ± 890.44	3199.00 – 6527.90	6523.92	6527.90	6091.00	4358.92
			96.95 ± 232.19	22.30 – 1651.90	1635.09	131.85	51.00	27.26
	Barit	PM _{2.5}	114.04 ± 52.09	88.44 – 381.90	367.13	115.47	102.35	95.17
			210.17 ± 16.17	182.91 – 234.22	221.23	232.28	210.59	186.60
			9.71 ± 9.99	5.29 – 75.17	58.36	12.72	7.27	5.79
	Çeneleli Kırıcı	PM ₁	20.38 ± 36.15	11.77 – 211.71	196.94	15.21	13.88	12.39
			30.16 ± 4.49	24.79 – 39.28	31.69	38.10	27.54	25.32
			1.38 ± 1.16	1.02 – 3.65	1.59	1.57	1.15	0.96
Sarımsıltı elek	Hematit	TAPM	1103.65 ± 244.40	719.80 – 1661.60	1648.59	1557.86	1026.30	902.07
			2180.69 ± 1053.54	907.00 – 5542.00	5525.87	4174.66	1855.00	1333.44
			3007.46 ± 1982.95	747.00 – 6527.90	6520.91	6527.90	2022.30	1364.18
	Kömür	PM ₁₀	640.68 ± 140.67	449.30 – 919.60	907.55	911.30	600.40	499.50
			1308.26 ± 1087.23	479.60 – 5070.10	5054.03	3352.98	961.60	676.16
			2272.56 ± 2335.73	346.90 – 6527.90	6520.91	6527.90	969.60	523.64
	Barit	PM _{2.5}	67.62 ± 7.98	58.09 – 83.79	75.48	82.89	65.97	59.24
			83.45 ± 15.71	54.68 – 120.21	106.58	107.73	82.99	59.79
			119.98 ± 95.64	31.77 – 410.54	395.10	289.02	79.85	51.22
	Çeneleli Kırıcı	PM ₁	8.63 ± 0.44	7.80 – 9.61	7.91	9.15	8.60	7.91
			11.73 ± 1.77	8.30 – 14.17	11.90	13.81	11.47	9.15
			14.50 ± 9.95	4.22 – 45.51	31.55	31.29	11.12	6.98

Çizelge 1. Laboratuvarda faaliyetler sırasında numuneye bağlı olarak açığa çıkan PM salınımları (devam)

Faaliyet	Mineral	PM salınımı ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ortalama \pm SD	Ölçüm aralığı ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$L_{50(\text{PM})}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$L_{10(\text{PM})}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$L_{50(\text{PM})}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$L_{90(\text{PM})}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Çabuklu değirmen	Hematit Kömür Barit	TAPM	823.84 \pm 654.85	417.70 – 4356.50	4341.06	1201.64	699.10	537.56
			502.41 \pm 791.47	190.80 – 3551.70	3539.40	1157.54	296.80	210.32
			656.19 \pm 808.33	128.30 – 4344.30	4328.39	1836.30	427.30	163.40
	Hematit Kömür Barit	PM ₁₀	494.18 \pm 611.94	240.80 – 3941.60	3926.16	543.06	377.80	307.68
			314.67 \pm 645.09	130.30 – 2816.50	2804.20	724.50	152.60	133.82
			293.72 \pm 561.76	59.90 – 3264.00	3248.09	532.90	146.90	67.80
	Hematit Kömür Barit	PM _{2.5}	42.99 \pm 29.07	20.04 – 194.77	179.33	44.73	37.98	28.65
			26.81 \pm 6.58	23.66 – 51.98	39.82	32.12	25.32	23.71
			13.65 \pm 8.18	5.84 – 44.88	29.72	29.56	11.42	7.32
	Hematit Kömür Barit	PM ₁	6.56 \pm 2.41	4.30 – 19.40	7.97	6.94	6.19	4.95
			5.50 \pm 0.68	5.03 – 8.05	5.56	6.14	5.38	5.09
			1.81 \pm 0.97	0.77 – 5.21	1.83	3.17	1.50	1.06
Bilyalı değirmen	Hematit Kömür Barit	TAPM	1116.31 \pm 502.19	795.90 – 3307.60	3293.13	1617.97	953.00	855.17
			836.21 \pm 213.68	556.30 – 1510.20	1311.18	1231.60	802.50	646.74
			334.94 \pm 80.41	184.00 – 529.90	513.37	540.48	330.90	223.98
	Hematit Kömür Barit	PM ₁₀	715.44 \pm 507.44	504.80 – 3074.20	3059.73	1107.65	565.15	518.89
			439.40 \pm 147.22	324.00 – 1013.90	1000.28	616.64	406.20	335.36
			144.29 \pm 24.84	98.70 – 210.00	193.58	179.70	140.20	115.88
	Hematit Kömür Barit	PM _{2.5}	76.66 \pm 39.86	61.56 – 264.95	250.48	115.09	64.78	62.81
			41.09 \pm 3.75	33.81 – 52.91	40.69	45.67	40.77	37.24
			15.15 \pm 1.71	11.78 – 18.95	15.03	17.59	15.28	12.78
	Hematit Kömür Barit	PM ₁	11.97 \pm 14.28	8.02 – 84.55	70.08	12.70	8.95	8.45
			6.50 \pm 0.33	6.04 – 7.51	5.87	6.87	6.46	6.11
			1.95 \pm 0.28	1.56 – 2.78	1.85	2.42	1.92	1.63
Halkalı öğütücü	Hematit Kömür Barit	TAPM	1792.60 \pm 409.89	1423.80 – 2856.50	2845.36	2665.94	1679.00	1435.16
			3734.21 \pm 1425.16	2210.60 – 6527.90	6518.52	6527.90	3167.15	2363.35
			451.38 \pm 329.46	128.50 – 1525.50	1510.88	959.50	348.30	180.20
	Hematit Kömür Barit	PM ₁₀	985.36 \pm 354.09	798.30 – 2118.10	2106.96	1722.70	859.70	798.90
			2909.69 \pm 1807.50	1322.30 – 6527.90	6518.52	6527.90	2031.10	1350.45
			205.44 \pm 129.03	87.20 – 612.80	598.18	395.60	158.80	96.40
	Hematit Kömür Barit	PM _{2.5}	105.88 \pm 28.09	91.71 – 170.68	161.20	169.35	94.62	91.89
			168.31 \pm 17.73	147.18 – 207.52	194.39	196.60	161.86	149.32
			22.98 \pm 9.32	13.33 – 47.12	35.14	39.65	18.23	15.27
	Hematit Kömür Barit	PM ₁	14.57 \pm 4.67	12.08 – 25.49	17.78	25.15	12.77	12.13
			22.78 \pm 1.94	20.00 – 26.32	22.54	25.94	22.16	20.56
			3.07 \pm 1.19	2.05 – 7.12	3.08	4.75	2.46	2.12
Sallanılı masa	Hematit Kömür Barit	TAPM	766.56 \pm 85.14	590.60 – 973.20	956.67	877.70	768.30	663.52
			506.52 \pm 111.31	343.70 – 785.00	675.18	692.64	478.00	386.46
			339.47 \pm 137.08	95.30 – 720.90	703.66	559.02	324.20	159.42
	Hematit Kömür Barit	PM ₁₀	474.23 \pm 41.11	400.70 – 624.30	607.77	518.98	472.20	423.36
			260.17 \pm 32.78	209.20 – 347.00	276.24	322.00	251.00	230.42
			148.74 \pm 50.21	53.10 – 245.60	231.96	219.68	154.10	82.12
	Hematit Kömür Barit	PM _{2.5}	67.88 \pm 3.40	63.29 – 81.33	69.88	72.41	67.29	64.40
			33.37 \pm 1.56	30.68 – 36.14	32.79	35.59	33.28	30.85
			18.25 \pm 5.30	8.85 – 29.99	21.38	26.29	18.20	11.27
	Hematit Kömür Barit	PM ₁	9.56 \pm 0.35	8.87 – 10.40	9.23	10.02	9.57	9.06
			5.73 \pm 0.26	5.25 – 6.24	5.19	6.08	5.74	5.36
			2.33 \pm 0.63	1.02 – 3.65	2.29	3.26	2.38	1.51



Şekil 3. PM salınımları ve istatistiksel hesaplamaları (barit numunesi / çubuklu değirmen)



Şekil 4. Çeneli kırıcıda ölçülen PM salınım histogramları

Sallantılı masada PM salınımları hematit>kömür>barit şeklinde sıralanmıştır. Ayrıca, sallantılı masada minerallerin PM salınımları arasında çok fazla farklılık gözlenmemiştir. Sallantılı masa ile kırıcılar arasındaki PM seviyelerinde belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Sallantılı masanın çalışma sistemi akışkan bir ortamda (su) ve besleme pülp şeklinde olduğu için kırma işlemine göre TAPM ve PM₁₀ salınımları, PM_{2.5} ve PM₁ salınımlarına göre daha belirgin bir şekilde düşük olduğu hesaplanmıştır.

Sarsıntılı elekte yüksek PM salınım sıralaması barit>kömür>hematit şeklinde gerçekleşmiş olup numunelerin elenmesi sırasında PM salınımları arasında belirgin bir farklılık bulunmamaktadır.

Genel olarak değerlendirme yapıldığında laboratuvaradaki cihazların PM sıralaması kırıcı>değirmen>elek>sallantılı masa şeklinde sıralanmış olup en yüksek PM salınımı çekiçli kırıcıda, en düşük PM salınımı ise sallantılı masada gerçekleşmiştir.

Ölçüm verilerinin histogramları üzerinden değerlendirme yapıldığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Minerallerin laboratuvar ortamında boyutlarının küçültülmesi ve zenginleştirilmesi sürecinde açığa çıkan PM salınımları değişkenlik göstermektedir. Örnek olarak çeneli kırıcıda boyut küçültme sırasında açığa çıkan PM dağılımları Şekil 4'te verilmiştir. Çeneli kırıcıda boyut küçültme işlemine tabi tutulan hematit, barit ve kömür (linyit) numunelerinin TAPM dağılımları incelendiğinde, her bir malzemenin farklı PM salınım eğilimlerine sahip olduğu görülmektedir. Hematit, en geniş TAPM dağılımına sahip olup özellikle <500 µg/m³'ün altındaki salınım seviyesinde yoğun PM salınımı oranı (%40.63) göstermektedir. Bununla birlikte, hematitin yüksek salınım değerinde (>2000 µg/m³) görülme sıklığının hızla düştüğü görülmüştür. Kömürün TAPM salınım verileri incelendiğinde, 1000 µg/m³ ve 1500 µg/m³ seviyelerinde belirgin bir sıklık artışı gözlenmiştir. Barit ise en yüksek TAPM salınım aralığına sahip mineral olup, 2000 µg/m³, 6000 µg/m³ ve >6600 µg/m³ seviyelerinde yüksek frekans değerleri sergileyerek yoğun TAPM salınım eğilimi göstermektedir. Barit mineralinin 1000 µg/m³'ün altında ölçüm verisi bulunmamaktadır.

Genel olarak hematit, kömür ve barite göre düşük TAPM salınımlarıyla daha stabil bir dağılım sergilerken, kömür ve barit daha geniş ve yüksek dağılımlara sahiptir. Özellikle baritin >6600 µg/m³'ün üzerinde %35.7 gibi yüksek bir TAPM seviyesinde veri ölçülmesi, PM'lerin kontrol edilmesi ve hava kalitesinin yönetimi açısından kritik bir bulgu olarak değerlendirilebilir. Çeneli kırıcıda boyut küçültme işlemine tabi tutulan bu üç farklı numunenin PM₁₀ salınımlarına göre sıklık yüzdeleri, minerallerin boyutlarının küçültülmesi sürecinde ortama yayılan PM'lerin yoğunluğunu belirleyerek hava kalitesi ve sağlık riskleri açısından önemli ipuçları sunmaktadır. Hematit mineralinin, PM₁₀ salınımı TAPM salınımı ile benzer salınım özellikleri sergileyerek 500 µg/m³'ün altında %53.13 oranında sıklık göstermektedir. Kömürün, PM₁₀ salınımı hematite benzer olup 500 µg/m³'ün altında en yüksek sıklığa ulaşarak yaklaşık %50'lik bir dağılım göstermektedir. Bu durumda, kömür ve hematit çeneli kırıcıda boyut küçültülmesi sırasında PM₁₀ salınımları arasında benzerlik bulunduğunu işaret etmektedir. Barit ise %35.7 oranı ile 6500 µg/m³ üzerinde en yoğun PM üretme eğilimi gösteren mineral olarak öne çıkmaktadır. PM_{2.5} salınım verileri incelendiğinde, hematit en dar dağılım aralığına (6.67- 190.06 µg/m³) sahiptir. Ölçüm sonuçlarına göre hematitin PM salınımının yaklaşık %78'i 50 µg/m³'ün altında olup, kömür ve barite göre daha düşük bir PM_{2.5} konsantrasyon profili sergilediği söylenebilmektedir. Barit'in PM_{2.5} dağılımı hematite göre daha geniş olup, ölçümlerin %64.3'ü 100 µg/m³'ün altında kalırken, daha yüksek salınımlardaki oranlarda belirgin bir azalma görülmüştür. Bu durum, baritin PM_{2.5} salınımında orta seviyeli bir dağılım sergilediğini ve 100 µg/m³'ün üzerinde salınımının giderek düştüğünü göstermektedir. Kömür ise en yüksek PM_{2.5} salınım aralığına sahip olup, ölçümlerin yaklaşık %58'si 650 µg/m³ üzerinde gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, PM_{2.5} açısından kömür en yüksek konsantrasyon kaynaklarından biri olup ve diğer minerallerle kıyaslandığında çok daha geniş bir salınım aralığına sahiptir. PM₁ salınımında hematit, kömür ve baritin yüzdellik dağılımlarında belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Hematit mineralinin PM₁ seviyesi <3 µg/m³ altında %43.75 oranı en yüksek yüzdellik değere sahiptir. Kömürün, PM₁ salınımı 7 µg/m³ seviyesine geldiğinde %45.5'e yakın bir yüzdellik değere ulaşarak öne çıkmaktadır. Baritin PM₁ salınımı ise hematit ve kömüre göre daha geniş aralıkta olup ölçüm verilerinin %5.4'ü 30 µg/m³'ün üzerindedir.

Çekiçli kırıcıdaki boyut küçültme işlemi sırasında açığa çıkan TAPM ve PM₁₀ salınımlarının 6500 µg/m³'ün üzerinde gerçekleşme sıklıkları, numune türüne bağlı olarak belirgin farklılıklar göstermiştir. Hematit ve kömür için bu oran %90'ın üzerinde olurken, barit için neredeyse %100'e ulaşmaktadır. Daha düşük TAPM ve PM₁₀ seviyelerinde bu minerallerin dağılımı oldukça seyrek olup, sıklık yüzdeleri minimum düzeyde kalmaktadır. Sonuç olarak, çekiçli kırıcıda TAPM ve PM₁₀

salınımları $6500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ün çok üzerinde gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Çekiçli kırıcı çalıştırıldığında, mineral türüne bağlı olarak $\text{PM}_{2.5}$ salınımlarında belirgin farklılıklar ortaya çıkmıştır. Hematit, diğer minerallere göre daha düşük partikül salınımı sergilemiş olup, en dikkat çekici artışı %50 oranında $650\text{-}660 \mu\text{g}/\text{m}^3$ salınım aralığında göstermiştir. Kömür, hem düşük ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) hem de yüksek ($600 \mu\text{g}/\text{m}^3$) salınımlarda sıklık değerleri açısından belirgin (%10-%15) varyasyonlar sunmuş ve $650 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ü aşan seviyelerde %57.9 oranında yoğun PM salınımına ulaşmıştır. Barit, genel olarak düşük sıklık değerlerine sahip olmasına rağmen, $650 \mu\text{g}/\text{m}^3$ üzerindeki salınım seviyelerinde %86.6 oranında partikül madde salınımı gerçekleştirmiştir. Benzer şekilde, PM_1 salınımı $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ün altında olduğunda tüm numuneler için %10'un altında benzer sıklık değerleri göstermiştir. Ancak salınım yükseldikçe, özellikle barit numunesinde belirgin bir artış gözlenmiştir. PM_1 salınımı $650 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ü aştığında, barit için sıklık değeri %87'ye ulaşırken, hematit ve kömür sırasıyla %45 ve %58 seviyelerinde kalmıştır. Bu durum, baritin yüksek PM_1 salınımlarında diğer numunelere kıyasla daha sık görüldüğünü ve potansiyel olarak daha büyük bir çevresel etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Merdaneli kırıcıda, hematit, $1000\text{-}2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyelerinde %87 oranında yoğunluk gösterirken, daha yüksek TAPM seviyelerinde sıklık oranı %6'nın altına düşmektedir. Kömür, yüksek TAPM seviyelerinde baskın bir numune olarak öne çıkmakta ve $4500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'de %6.7, $5500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'de %7, $6000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'de %20, $6500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'de %26.7 ve $6600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'de %40 sıklık oranına ulaşarak yüksek TAPM değerlerinde daha yaygın bir görünüm sergilemektedir. Diğer yandan, barit, $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ün altında %97.9 sıklık oranı ile en yüksek yoğunluğa ulaşmakta, ancak TAPM değeri arttıkça sıklık oranı hızla azalmakta ve $2500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde %2.1'e kadar gerilemektedir. PM_{10} salınımları açısından değerlendirildiğinde, baritin, $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde %98 sıklık oranı görülmüştür. Hematit, $1000\text{-}1500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyelerinde %93.33 sıklık sergilerken, $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde bu oran %3'e kadar düşmektedir. $6600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} seviyesinde ise hematit'in sıklık oranı %3.3 olarak hesaplanmıştır. Kömürün PM_{10} oranları ise yüksek seviyelerde sıklık açısından artış göstermektedir; $3500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'de %6.7, $5500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'de %13.3, $6000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'de %13.3, $6500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'de %26.7 ve $6600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ün üzerinde %40 sıklık oranına ulaşarak PM yoğunluğunda belirgin bir yükseliş göstermektedir. Sonuç olarak, barit $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ün altında TAPM ve PM_{10} salınımlarında baskın numune olarak öne çıkmıştır. Hematit orta seviyedeki PM salınımlarında ($1000\text{-}2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) yüksek yoğunluk sergilemiştir. Kömür ise, $6500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ve üzerindeki daha yoğun PM salınımı gerçekleştirmiş ve en yüksek PM salınım numunesi olmuştur. Hematit numunesinde, $\text{PM}_{2.5}$ salınımı %93.33 oranında $80\text{-}120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında gerçekleşmiştir. Barit numunesi daha düşük salınım bölgelerinde baskın olup, özellikle $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'de %98 oranında ölçüm yapılmıştır. Buna karşılık, kömür numunesinde $\text{PM}_{2.5}$ değerlerinin diğer numunelere kıyasla daha yüksek seviyelerde yoğunlaştığı, %99 sıklıkla $180\text{-}240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında kaydedildiği belirlenmiştir. Hematit, PM_1 partikül ölçümlerinde en yüksek değeri $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde %87 sıklıkla sergilerken; kömür numunesinde salınım aralığı $20\text{-}40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak belirlenmiştir. Barit ise, PM_1 ölçümlerinde %100 sıklıkla $0\text{-}15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında gözlemlenmekte olup, düşük salınımlarda istikrarlı bir dağılım sunmaktadır.

Elek sarsma cihazının çalışması (kuru eleme) şeklinde gerçekleştirilmiştir. Hematit, genel olarak $700\text{-}2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığındaki salınım seviyelerine sahip olup $1500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ civarında %55 sıklık oranı ile yoğun bir PM salını göstermektedir. Kömür, daha geniş bir salınım dağılımı sergileyerek $2000\text{-}2500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında en yüksek (%63.4) PM salını seviyesine ulaşmakta, ayrıca $4500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde %7.3 oranında ek bir artış göstermektedir. Barit, ölçümler içerisinde en yüksek TAPM salınımlarına sahip olup verilerin %62.9'u $1500\text{-}2500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında kaydedilmiş, $6500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ üzerindeki salınımlarda ise %20 sıklık oranı ile veri ölçülmüştür. PM_{10} salınımlarında hematit, $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde %90 sıklıkla en yüksek PM yoğunluğunu sergilerken, kömür $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ salınımlarında %66, barit ise $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde %54 sıklık oranı ile en yüksek değerlerini göstermektedir. Hematit, $\text{PM}_{2.5}$ salınımlarının büyük ölçüde $40\text{-}80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında yoğunlaştığını ve bu aralıkta %85 sıklıkla gözlemlendiğini göstermektedir. Kömür, daha geniş bir salınım aralığında dağılarak $50\text{-}120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyelerinde %97.6 oranında tespit edilmiştir. Barit, $\text{PM}_{2.5}$ açısından $40\text{-}120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında %71.4 sıklıkla gözlemlenmiş olup, diğer numunelere kıyasla genellikle daha yüksek salınım değerleri sergilemektedir. PM_1 salınım yoğunluğu incelendiğinde, hematit, nispeten dar bir dağılım aralığına sahip olup, $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde düşük bir sıklık (%10) sergilerken, $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ salınımlarında %90 oranına ulaşarak en yoğun partikül dağılımını göstermektedir. Kömür, PM_1 salınımları açısından $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ve $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyelerinde %50 oranında sıklık göstermekte olup, PM dağılımının belirli salınım noktalarına toplandığını işaret etmektedir. Barit, diğer numunelere kıyasla daha geniş bir dağılım profiline sahip

olup, PM₁ partikülleri 8-12 µg/m³ aralığında %40 sıklıkla gözlemlenirken, 16 µg/m³ ve 24 µg/m³ seviyelerinde sırasıyla %8.6 ve %5.7 oranında tespit edilmiştir. Daha yüksek salınımlarda ise, 40 µg/m³, 44 µg/m³ ve 48 µg/m³ seviyelerinde sıklık %2.9'a kadar düşmektedir.

Çubuklu değirmende öğütme sürecinde, TAPM salınımı 900 µg/m³ altında hematit için %85.71, barit için %89.50 ve kömür numunesi için %94.1 olarak hesaplanmıştır. Böylece barit numunesi diğer iki örneğe kıyasla daha orta düzey bir TAPM profiline sahip olduğu anlaşılmaktadır. Çalışılan numuneler için, TAPM değerleri arttıkça sıklık yüzdesinde belirgin bir düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. Özellikle 3600 µg/m³ ve 4200 µg/m³ gibi yüksek salınım seviyelerinde ölçüm sıklığı oldukça düşük seyretmektedir. PM₁₀ salınımı açısından hematit, %85.7 sıklık ile 300-600 µg/m³ aralığında yoğunlaşmış olup, PM dağılımında fazla değişim olmadığını göstermiştir. Kömür ve barit örneklerinde PM₁₀ dağılımı hematit örneğine göre daha dar bir salınım aralığında gözlenmiştir. Kömür PM₁₀ salınımı için ölçümlerin büyük çoğunluğu (%94.1) 300 µg/m³ altında yoğunlaşırken, zaman zaman %5.9 sıklık ile 3000 µg/m³ gibi yüksek seviyeler kaydedilmiştir. Bu durum, normal çalışma koşullarında düşük konsantrasyonların baskın olduğunu ancak belirli süreçlerde ani yükselmeler yaşanabileceğini göstermiştir. Barit için ise en sık gözlenen değer %84.6 ile 300 µg/m³ altında olup, ara sıra %3.3 sıklık ile 3300 µg/m³ gibi uç değerlerin ortaya çıkması, sistemdeki işlem değişiklikleri ve malzemenin fiziksel yapısına bağlı farklılıkların varlığına işaret etmektedir. Çubuklu değirmende öğütülen hematit numunesi, PM_{2.5} salınımında %82.86 sıklık oranı ile 30-45 µg/m³ aralığında en yoğun yayılımı göstermiştir. PM₁ salınımında ise %83.0 sıklık oranı ile 5-7 µg/m³ seviyesinde en yüksek birikim gözlenmiştir. Hematite kıyasla kömür PM'leri, daha düşük salınımlarda yayılma eğilimi sergileyerek farklı bir dağılım paterni ortaya koymuştur. PM_{2.5} için en yoğun birikim %94.1 sıklık oranı ile 20-30 µg/m³ aralığında gerçekleşirken, PM₁ salınımında en yüksek yoğunlaşma %94.2 sıklık oranı ile yaklaşık 5 µg/m³ seviyesinde oluşmuştur. Barit numunesi ise diğer iki numuneye kıyasla hem PM_{2.5} hem de PM₁ salınımında daha düşük salınımlar sergilemiştir. PM_{2.5} salınımında en yoğun birikim %89.5 sıklık oranı ile 5-20 µg/m³ aralığında görülürken, PM₁ salınımında en yüksek yığılma %89.7 sıklık oranı ile 1-3 µg/m³ seviyesinde gözlenmiştir. Sonuçta, öğütülen hematit, kömür ve baritin PM salınımları açısından belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. PM_{2.5} ve PM₁ salınım yoğunlukları hematit, kömür ve barit şeklinde sıralamak mümkündür.

Bilyalı değirmenin öğütme sürecinde TAPM için barit, 300-500 µg/m³ salınım aralığında %95.6 gibi oldukça yüksek bir sıklık yüzdesine ulaşırken, kömür ve hematit için 900 µg/m³ seviyesinde sıklık yüzdeleri yaklaşık %40 civarındadır. TAPM salınım değerleri arttıkça, tüm numuneler için sıklık oranlarında belirgin bir azalma görülmektedir. Örneğin, 3500 µg/m³ salınımında hematit ve kömür için sıklık yüzdeleri %10 seviyesine, barit için ise 600 µg/m³ salınımında %2 seviyesine kadar düşmüştür. PM₁₀ açısından değerlendirildiğinde, barit, PM₁₀ salınımı 200 µg/m³ seviyesinde %90'ın üzerine çıkarak en yüksek sıklık yüzdesine sahip numune olarak öne çıkmaktadır. Hematit, en yüksek sıklığını yaklaşık %65 oranında göstermekte ve bu değere 600 µg/m³ salınımında ulaşmaktadır. Kömür ise, en yüksek sıklık yüzdesini %91.3 civarında gösterirken, bu oran 300-500 µg/m³ salınım aralığında gözlemlenmektedir. Sonuç olarak barit, TAPM ve PM₁₀'da düşük salınım seviyelerinde yüksek sıklık gösterirken, hematit ve kömür, barite göre daha yüksek PM salınımlarında belirgin bir dağılım göstermiştir. En yüksek PM salınımı hematit mineralinde görülmüştür. Hematit, PM_{2.5} salınım ölçümlerinde geniş bir dağılım sergileyerek 60-270 µg/m³ aralığında değişirken, Kömür daha dar bir aralıkta, 30-50 µg/m³ seviyelerinde partikül oluşumu göstermektedir. Barit, en düşük PM_{2.5} salınımına sahip olup, ölçülen değerler genellikle 10-20 µg/m³ arasında değişmektedir. PM₁ salınımları açısından değerlendirildiğinde, Hematit için 10 µg/m³ seviyesinde sıklık %85.71 iken, 15 µg/m³ seviyesinde bu oran %10'a düşmektedir. Kömür, PM₁ değeri 10 µg/m³ olduğunda %100 sıklığa sahipken, barit için PM₁ değeri 5 µg/m³ olduğunda sıklık %100 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, farklı minerallerin öğütme sürecinde oluşturdıkları PM seviyelerinin öğütme koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Hematit, PM seviyelerinde geniş bir aralık sunarken, kömür daha dar bir dağılım göstermektedir. Barit ise en düşük PM salınımına sahip olup, öğütme sırasında daha az ince PM oluştuğunu ortaya koymuştur.

Halkalı öğütücüde, barit, 500 µg/m³ altındaki TAPM salınımlarında %70 sıklık oranı ile en düşük PM salınımını gösteren mineral olarak öne çıkmaktadır. 1000 µg/m³ seviyesinde gözlemlenebilir bir yoğunluk gösterse de, daha yüksek salınımlarda (≥1500 µg/m³) belirgin bir salınım değeri kaydedilmemiştir. Hematit, 2000 µg/m³ TAPM seviyesinde %50 sıklık oranı ile en yüksek yoğunluğa ulaşmış olup, bu noktadan itibaren TAPM salınım oranında düşüş gözlemlenmiştir. Kömür ise en geniş

TAPM salınım aralığına sahip olup 2500-3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ salınımlarında %46.2 sıklık ile en yüksek yoğunluğa erişmiştir. Diğer taraftan kömürde genel eğilim olarak 3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ üzerindeki TAPM seviyelerinde sıklık yüzdesi azalmaktadır. PM_{10} salınımlarında ise barit, 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinin altında %100 sıklıkla ölçülerek bu salınımda en yaygın partikül kaynağı olarak öne çıkmıştır. Hematit, 500-1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında yaklaşık %92.31 sıklıkla bulunmakta olup, daha yüksek seviyelerde etkisi önemli oranda düşmüştür. Kömür, 500-2500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında %61.5 sıklık oranı ile belirgin bir katkı sağlarken, 2500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ve üzeri seviyelerde sıklık yüzdesinde azalma görülmüştür. Buna göre en yüksek PM salınımı kömür numunesinde, en düşük PM salınımı ise barit numunesinde gerçekleşmiştir. Halkalı öğütücüde öğütülen kömür, $\text{PM}_{2.5}$ seviyesinde 135-200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ salınım aralığında en yüksek sıklığa (%96.2) ulaşmıştır. Buna karşılık, hematit mineralinde 95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ salınımlarında %85 sıklık oranı gözlenirken, barit için ölçülen tüm değerler 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinin altında kalmaktadır. Bu durum, numunelerin $\text{PM}_{2.5}$ salınım değerlerinin değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. PM_1 seviyesindeki dağılım incelendiğinde, hematit 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ün altındaki salınımlarda en yoğun şekilde (%84.62) bulunmakta, ancak 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesine ulaştığında sıklığı önemli ölçüde (%15.32) azalmaktadır. Bu eğilim, hematitin genellikle düşük PM salınımlarında sıkça görüldüğünü, ancak daha yüksek seviyelere nadiren ulaştığını göstermektedir. Kömür, PM_1 yayılımı açısından daha geniş bir dağılıma sahip olup, 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde nispeten düşük sıklıkla (%3.8) başlamakta, ancak 22-26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında değişen yoğunluklarla (%88.5) daha dengeli bir dağılım sergilemektedir. Barit ise PM_1 salınımı açısından en düşük dağılıma sahip olup, 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde en yüksek sıklığa (86.2) ulaşmaktadır. Ancak 6-8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında ciddi bir düşüş göstererek, PM salınımlarının büyük ölçüde düşük seviyelerde yoğunlaştığını ve yüksek değerlere (<10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) nadiren ulaştığını ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, barit en düşük PM salınımlarında baskın olup yüksek seviyelere ulaşma eğiliminde değildir. PM salınımlarının sıklık oranlarına bakıldığında, barit daha düşük yoğunlukta, hematit orta yoğunlukta ve kömür ise daha geniş yoğunlukta dağılım göstermiştir.

Sallantılı masa ölçümlerinde, hematit 630 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ve üzerindeki TAPM salınım seviyelerinde öne çıkmakta olup, 850 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ civarında yaklaşık %31.11 sıklıkla en yüksek yoğunluğa ulaşmaktadır. Kömür, 420-630 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında yüksek sıklık göstermekte ve 490 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde %34.8 oranında gözlemlenmektedir. Barit ise daha düşük TAPM seviyelerinde (210 - 490 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) baskın olup, 280 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ civarında %26.4 sıklıkla maksimum yoğunluğa ulaşmaktadır. Bu dağılımlar, hematitin yüksek TAPM salınımlarında yoğun olarak bulunduğunu, kömürün orta düzey TAPM seviyelerinde belirginleştiğini ve baritin daha düşük TAPM seviyelerinde daha sık karşılaştığını ortaya koymaktadır. Hematit, çalışma ortamında 450-650 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ arasında değişen PM_{10} salınımı yapmakta olup, özellikle 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde %55 sıklıkla görülmesi, yüksek miktarda partikül yayılımına neden olduğunu göstermektedir. Kömür, PM_{10} yoğunluğunun 250-350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında gerçekleşmiş, kömürün PM_{10} açısından hematite kıyasla daha düşük ancak salınım açısından önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Barit ise en düşük PM_{10} salınımlarına sahip olup 100 - 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında dağılım göstermektedir. Özellikle 200 ve 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyelerinde %30 sıklıkla gözlemlenmesi, baritin diğer numunelere kıyasla hava ortamında daha az PM oluşturduğunu ortaya koymaktadır. $\text{PM}_{2.5}$ salınımlarında kömür, 30-36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında yoğunlaşarak nispeten istikrarlı bir dağılım gösterirken, barit daha geniş bir değişkenlik ile 8-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyelerinde bulunmuştur. Diğer taraftan, hematit 63-81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ile en yüksek $\text{PM}_{2.5}$ salınımlarına sahip olup, PM oluşum eğiliminin daha belirgin olduğu görülmüştür. Sıklık analizine göre, barit %37.7 oranında 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesine ulaşırken, kömür %82.6 oranında 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ve hematit %81.08 oranında 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ değerine erişmiştir. PM_1 açısından değerlendirildiğinde, kömür ve barit düşük salınımlarda (<7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) yayılım gösterirken, hematit için PM_1 salınımı 7-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında olup %70 oranında 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde yoğunlaşmaktadır.

4. Tartışma

Çapı 2.5 μm ile 10 μm arasında olan PM'ler kaba, çapı 2.5 μm 'den küçük olan PM'ler ince ve $\leq 0,1$ μm çapındaki partiküller ise ultra ince partikül (UİP) olarak tanımlanmaktadır (EPA, 1999; USEPA, 2004; WHO, 2006; Evyapan ve ark., 2012; Hime ve ark., 2015; Li ve ark., 2017; EPA, 2025). PM_{10} insan sağlığı için risk oluşturmada (İSGİP, 2015; Tsiouri ve ark., 2015; Patra ve ark., 2016) ve kaba PM'ler madencilik faaliyetleri sırasında oluşmakta ve çalışma ortamına salınmaktadır (WHO, 2006; Hime ve ark., 2015; Sahu ve ark., 2018; Duran, 2022; Pradhan ve ark., 2024). Diğer taraftan insan sağlığı için en büyük riski oluşturan PM boyutu $\text{PM}_{2.5}$ 'tir (Evyapan ve ark., 2012; Hime ve ark., 2015;

Xing ve ark., 2016; Gao ve ark., 2018; Martins & Carrilho da Graça, 2018; Miller & Xu, 2018). Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen kırma, öğütme ve zenginleştirme işlemleri sırasında açığa çıkan PM boyut dağılımı Çizelge 2’de verilmiştir. Ölçüm sonuçları, numune türü ve kullanılan cihazlara bağlı olarak oluşan PM’nin büyük bir kısmının (%90.95’ten fazla) kaba PM’den (>2.5 µm) oluştuğunu göstermektedir. Çekiçli kırıcı ile kömürün boyutu küçültüldüğünde ortaya çıkan PM’nin en düşük oran olan %90.95 kaba PM olarak belirlenmiştir. Öte yandan, çeneli kırıcı kullanılarak hematitin boyutu küçültüldüğünde en yüksek kaba PM oranı (%98.62) tespit edilmiştir. Bu durum sağlık açısından potansiyel sorunlara neden olabilmektedir (Yiğit, 2007; Çınar & Sensöğüt 2017). Elde edilen sonuçlar, laboratuvarıda mineral özelliklerinin ve işlem türünün PM dağılımı üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır.

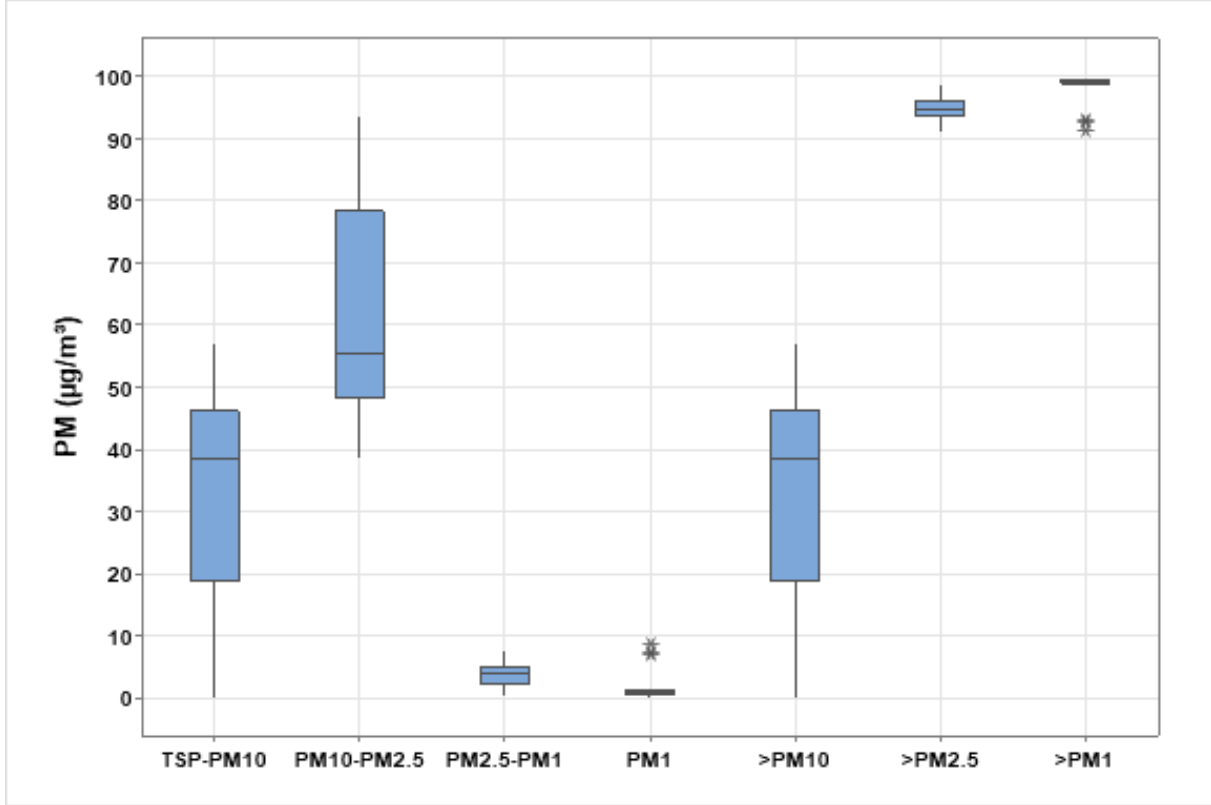
TSP-PM₁₀, PM₁₀-PM_{2.5} ve PM_{2.5}-PM₁ oranları, mineral türüne ve uygulanan kırma, öğütme ve zenginleştirme yöntemlerine ve bu yöntemlerin uygulanması esnasında akışkan ortamın olup olmamasına bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Özellikle çekiçli kırıcı kullanıldığında, tüm numuneler için >PM₁₀ oranı oldukça düşük seviyelerde (%≤0.94) kalmıştır. Laboratuvardaki diğer işlemlerde ise bu oran, numunelere ve işleme yöntemine bağlı olarak %11.99 ile %56.92 arasında değişmiştir. Öte yandan, laboratuvar süreçlerinde PM₁ salınımının genel olarak düşük seviyelerde (%0.2 - %8.76) kaldığı görülmüştür. Bu bulgular, laboratuvar işlemlerinin büyük çaplı PM’leri üretme eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, barit ve kömürün çekiçli kırıcı ile boyut küçültme işlemi sırasında > PM₁ oranının daha düşük olduğu (%91.24 - %92.66) tespit edilmiştir. Bu durum, farklı minerallerin boyut küçültme mekanizmalarına özgün tepkiler verdiğini ve parçalanma süreçlerinin mineralin fiziksel özelliklerine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Çizelge 2. Partikül madde salınımlarının boyut dağılımı

Faaliyet	Mineral	Aralık (%)			Kümülatif (%)				Tüm
		[TSP-PM ₁₀]	[PM ₁₀ -PM _{2.5}]	[PM _{2.5} -PM ₁]	PM ₁	>PM ₁₀	>PM _{2.5}	>PM ₁	
Çeneli kırıcı	Hematit	15.38	83.25	1.18	0.20	15.38	98.62	99.80	100
	Kömür	28.69	68.17	2.71	0.43	28.69	96.86	99.57	100
	Barit	11.99	85.46	1.86	0.69	11.99	96.86	99.31	100
Çekiçli kırıcı	Hematit	0.59	90.37	2.07	6.98	0.59	97.45	93.02	100
	Kömür	0.94	90.05	1.67	7.34	0.94	90.95	92.66	100
	Barit	0.00	90.95	0.28	8.76	0.00	90.99	91.24	100
Merdaneli kırıcı	Hematit	38.76	54.89	5.22	1.13	38.76	90.96	98.87	100
	Kömür	3.06	93.48	2.97	0.50	3.06	93.65	99.50	100
	Barit	44.02	50.37	4.81	0.80	44.02	96.53	99.20	100
Çubuklu değirmen	Hematit	40.02	54.77	4.42	0.80	40.02	94.39	99.20	100
	Kömür	37.37	57.30	4.24	1.09	37.37	94.78	98.91	100
	Barit	55.24	42.48	1.80	0.28	55.24	94.67	99.72	100
Bilyalı değirmen	Hematit	35.91	57.22	5.79	1.07	35.91	93.14	98.93	100
	Kömür	47.45	47.63	4.14	0.78	47.45	95.08	99.22	100
	Barit	56.92	38.56	3.94	0.58	56.92	95.48	99.42	100
Halkalı öğütücü	Hematit	45.03	49.06	5.09	0.81	45.03	94.10	99.19	100
	Kömür	22.08	73.41	3.90	0.61	22.08	95.49	99.39	100
	Barit	54.49	40.42	4.41	0.68	54.49	94.91	99.32	100
Sallantılı masa	Hematit	38.14	53.01	7.61	1.25	38.14	91.14	98.75	100
	Kömür	48.64	44.78	5.46	1.13	48.64	93.41	98.87	100
	Barit	56.18	38.44	4.69	0.69	56.18	94.62	99.31	100
Sarsıntılı elek	Hematit	41.95	51.92	5.34	0.78	41.95	93.88	99.22	100
	Kömür	40.01	56.17	3.29	0.54	40.01	96.17	99.46	100
	Barit	24.44	71.57	3.51	0.48	24.44	96.01	99.52	100

PM salınımlarının partikül boyutuna göre nasıl değiştiğine dair net bir görünüm Şekil 5’te verilmiştir. TSP-PM₁₀, PM₁₀-PM_{2.5} ve >PM₁₀ veri seti homojen olup; PM_{2.5}-PM₁, PM₁,>PM_{2.5} ve >PM₁ bu veri setleri ise heterojen dağılım göstermektedir. TSP-PM₁₀ ve >PM₁₀ veri setleri negatif çarpıklık gösterirken; PM₁₀-PM_{2.5} verisi pozitif çarpıklık göstermektedir. PM₁ ve >PM₁ verilerinin ise aykırı değerleri bulunmaktadır. Şekil, özellikle belirli partikül boyutlarında medyan değerlerin yüksekliğini ve

verideki değişkenliği net bir şekilde ortaya koymaktadır. PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve PM_1 gibi PM'lerin yüksek medyan ve geniş kutu yapıları, ölçülmüş olan bu aralıklarda akciğerlerin derinliklerine kadar ulaşabilen partiküllerin yoğun olduğunu düşündürmektedir. Bu durum, hava kalitesi açısından potansiyel sağlık riskleri anlamına gelmektedir. Diğer yandan, $>PM_{10}$ gibi daha büyük partikül gruplarındaki belirgin yükseklikler, olası bir mekanik faaliyet (örneğin inşaat, taş işleme vb.) sonucu oluşan kaba tozların baskın olabileceğini göstermektedir. TSP- PM_{10} , PM_{10} - $PM_{2.5}$ ve $>PM_{2.5}$ grupları arasında farklılıklar bulunmaktadır. TSP- PM_{10} ve $>PM_{10}$ sonuçlarının ortalamaları arasında ise belirgin bir farklılık bulunmamaktadır.



Şekil 5. PM salınımlarının boyuta göre değişiminin kutu grafiği (box plot).

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, hematit, barit ve kömür (linyit) numuneleri, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarı'nda kırma, öğütme ve zenginleştirme işlemlerine tabi tutulmuştur. Her işlem sırasında ortama salınan partikül madde (PM) seviyeleri (TAPM, PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve PM_1) ayrıntılı biçimde ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları, numune türü ve kullanılan ekipmanların özelliklerine bağlı olarak PM salınım düzeylerinde belirgin farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. Hesaplamalara dayalı olarak elde edilen PM salınım sonuçları aşağıda ayrıntılı şekilde verilmiştir.

- TAPM ve PM_{10} salınımları, $33.40 - 6527.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında değişmekte olup, ölçüm sonuçları hem numune hem de laboratuvar cihazlarına göre önemli farklılıklar göstermiştir. $PM_{2.5}$ ve PM_1 salınımları ise numuneler ve cihazlara bağlı olarak $0.77 - 652.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında dalgalanmıştır.
- PM ölçümleri için yapılan istatistiksel analizler, ölçülen ham verilerin normal dağılıma uygunluk göstermediğini ortaya koymuştur. Her bir veri seti için aritmetik ortalama, standart sapma, eşdeğer sürekli konsantrasyon değeri ($L_{eq(PM)}$) ve yüzdelik dilim değerleri ($L_{10(PM)}$, $L_{50(PM)}$, $L_{90(PM)}$) ayrı ayrı hesaplanmıştır. Aritmetik ortalama ile $L_{eq(PM)}$ değerleri arasında gözlenen belirgin farklar, verilerin geniş saçınımlı ve heterojen bir dağılım gösterdiğini işaret

- etmiştir. Özellikle $L_{eq(PM)}$ değerlerinin aritmetik ortalamalarının üzerinde ve çoğu zaman maksimum değerlerin yakınında değer alması, veri setlerinin istatistiksel açıdan $L_{eq(PM)}$ üzerinden yorumlanabilmesi ve analiz edilmesi yanlış sonuçların elde edilmesine sebebiyet verecektir. Bu nedenle, verilerin değerlendirilmesi aritmetik ortalama ve histogramlar üzerinden yapılmıştır.
- iii. Boyut küçültme işlemleri sırasında ortamda oluşan PM salınımları kullanılan kırıcı türüne ve numunelerin türlerine bağlı olarak belirgin farklılıklar göstermiştir. PM salınım düzeyleri bakımından cihazlar arasında sıralama çekiçli kırıcı > çeneli kırıcı > merdaneli kırıcı şeklindedir. Barit numunesi, özellikle çekiçli ve çeneli kırıcılarla yapılan boyut küçültme işlemlerinde en yüksek PM salınımlarına yol açmıştır. Kömür genellikle düşük PM seviyelerine sahip olmakla birlikte, merdaneli kırıcıda diğer cihazlara kıyasla en yüksek PM salınımı göstermiştir. Hematit için PM_{10} ve $PM_{2.5}$ salınımları genel olarak boyut küçültme işlemlerinde orta seviyelerde ölçülmüşken, çekiçli kırıcı ile yapılan işlemde $6036.58 \mu g/m^3$ gibi oldukça yüksek bir PM salınımı kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, farklı cihazlar ve numune türleri arasında PM oluşumunun ciddi oranda değiştiğini ve özellikle çekiçli kırıcı kullanımının PM açısından daha riskli olduğunu ortaya koymuştur.
 - iv. En yüksek PM salınımları, hematit numunesinin bilyalı ve çubuklu değirmenlerde öğütülmesi sırasında gözlemlenmiştir. Kömür numunesi ise halkalı öğütücüde öğütüldüğünde, diğer numunelere kıyasla çok daha yüksek PM seviyeleri üretmiştir. Barit, genel olarak öğütme işlemleri sırasında en düşük PM salınımına sahip numune olarak öne çıkmış, özellikle halkalı öğütücüde hematit ve kömüre kıyasla oldukça düşük PM değerleri göstermiştir. Bu farklılıklar, öğütme sürecinde numune türü ve ekipman seçiminin PM oluşumunu doğrudan etkilediğini göstermiştir.
 - v. Sallantılı masa ile yapılan zenginleştirme işleminde PM salınım sıralaması hematit > kömür > barit şeklinde gerçekleşmiş olup, genel olarak boyut küçültme ve öğütme işlemlerine göre daha düşük seviyelerde PM salınımları ölçülmüştür. Bu durum, sallantılı masanın su bazlı ve akışkan ortamda çalışması nedeniyle boyut küçültme ve öğütme işlemlerinde kullanılan cihazlara göre daha az PM üretmesinden kaynaklanmaktadır.
 - vi. Sarsıntılı elek kullanımı sırasında PM salınım sıralaması barit > kömür > hematit şeklinde gözlemlenmiştir. Ancak bu ekipmanla yapılan işlemlerde numuneler arası PM salınım farklılıkları belirgin bir seviyede değildir; yani salınımlar birbirine yakın değerlerde seyretmiştir. Temel sebebi eleme işleminin kapalı ortamda gerçekleşmesidir.
 - vii. Çalışma kapsamında elde edilen ölçümlere ve sonuçların değerlendirmesine göre, PM salınımı açısından ekipmanlar kırıcı > değirmen > elek > sallantılı masa şeklinde sıralanmıştır. Bu sıralama, kullanılan laboratuvar ekipmanlarının çalışma sistemleri ile numunelerin fiziksel özellikleri arasındaki ilişkiyi yansıtmaktadır. En yüksek PM salınımı, yoğun darbe ve parçalama kuvveti uygulayan çekiçli kırıcıda gözlemlenmiştir. Buna karşılık, su bazlı ve akışkan bir ortamda çalışan sallantılı masa, en düşük PM salınımını üretmiştir. Bu bulgular, laboratuvar ölçekli işlem basamaklarının hava kalitesi üzerindeki etkilerinin cihaz türü ve kullanılan numunelerin özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymaktadır.

Ulusal ve uluslararası mevzuatlarda belirtilen limit değerlerin üzerinde çalışma ortamlarında var olabilecek PM'ler ($TAPM$, PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve PM_1) insan sağlığı açısından ciddi riskler barındırmaktadır. Özellikle solunum sistemi hastalıkları ile ilişkili olan yüksek konsantrasyonlu PM salınımları, laboratuvar tasarımlarında çevresel kontrol mekanizmalarının öncelikli olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen ölçüm verileri, cevher hazırlama süreçlerinin PM salınımlarına etkisini ortaya koymuş; laboratuvar içi uygulamaların hava kalitesi ve sağlık üzerindeki olumsuz etkilerinin minimize edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Özellikle yüksek mekanik enerji ile çalışan ekipmanlar (örneğin çekiçli kırıcı ve değirmen) kullanıldığında, işlem sırasında etkin havalandırma sistemleri ile birlikte PM filtreleme mekanizmalarının eş zamanlı ve verimli biçimde devreye alınması kritik önem taşımaktadır. Bu nedenle, makine bazlı emisyon kontrol sistemlerinin kurulumu ve işlem süresince sürekli izleme yapılması, ortam havasının kalitesinin korunmasına doğrudan katkı sağlayacaktır. Verilerin yüksek saçılma karakteristiği göz önüne alındığında, PM ölçüm analizlerinde yalnızca $L_{eq(PM)}$ parametresi yerine aritmetik ortalama ile birlikte dağılım karakteristiklerini

gösteren istatistiksel grafik ve histogramların sunulması önerilmektedir. Böylece verilerin heterojen yapısı daha sağlıklı biçimde yorumlanabilir. PM salınım düzeylerinin işlem türüne göre farklılık gösterdiği göz önünde bulundurularak, laboratuvar ekipmanlarının yerleşim düzeni ve işlem sırasının optimize edilmesi, laboratuvar çalışmalarında doğal ve tali havalandırma düzenlemeleri PM yoğunluğunun kontrolüne katkı sağlayacaktır. Buna ek olarak, yüksek ve düşük PM üretim potansiyeline sahip ekipmanların ayrı bölümlere alınması ve bu ekipmanların ayrı ayrı çalıştırılması laboratuvar ortamının daha sağlıklı ve güvenli olmasına katkı sağlayacaktır. İlave olarak laboratuvar ortamında çalışanların mutlaka solunum ve görme sağlığı açısından koruyucu kişisel donanımların kullanılması da önerilmektedir. İş sağlığı ve güvenliği açısından risk değerlendirmesi yapılırken göz ardı edilen ortam PM konsantrasyon değerlerine önem verilmesi ortam çalışma koşulları için önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yazar katkısı

Bu çalışmada laboratuvar çalışmaları **Zekeriya Duran, Tuğba Doğan ve Güler Bayar** tarafından gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analizler **Zekeriya Duran ve Tuğba Doğan** tarafından yapılmıştır. Makale yazımı ise her üç yazarın ortak katkılarıyla gerçekleştirilmiştir.

Etik beyanı

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Bu makalenin yazarları çalışmalarında araştırma ve yayın etiğine uyduklarını beyan ederler

Yapay Zekâ Kullanımı

Yazarlar, bu makalenin yazımında, görsellerin, grafiklerin, tabloların ya da bunlara karşılık gelen başlıkların oluşturulmasında herhangi bir tür üretken yapay zekâ kullanmadıklarını beyan ederler.

Kaynaklar

- Adams, K., Greenbaum, D. S., Shaikh, R., M. van Erp, A., & Russell, G. A. (2015). Particulate matter components, sources, and health: Systematic approaches to testing effects. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(5), 544-558. <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.1001884>.
- Ağaçayak, T., Özşen, H., & Ağaçayak, Y. (2017). Maden mühendisliği laboratuvarlarında oluşabilecek bazı risklerin belirlenmesi ve çözüm önerileri. *Uluslararası Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu*, 312-325. Adana, Türkiye.
- Ahmad, A.U., Balakrishnan, U.V., & Jha, P.S. (2021). A study of multicollinearity detection and rectification under missing values. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(1S), 399-418.
- Albayrak, A.S. (2005). Çoklu doğrusal bağlantı halinde en küçük kareler tekniğinin alternatifi yanlı tahmin teknikleri ve bir uygulama. *ZKÜ Sosyal Bilimler Dergisi*, 1(1), 106-126.
- Anonim 1. (2025). Turnkey ortam havası portatif toz analizörleri. Erişim tarihi: 03.07.2025. <https://www.econorm.com.tr/tr/urunler/cevre-laboratuvarportatif-analiz-cihazlari/turnkey-ortam-havasi-portatif-toz-analizorleri>
- Anonim 2. (2025). Dustmate. Erişim tarih: 03.07.2025. <https://turnkey-instruments.com/product/dustmate/>

- Araújo P. S. I., Costa B. D., & J. B. de Moraes, R. (2014). Identification and characterization of particulate matter concentrations at construction jobsites. *Sustainability*, 6, 7666-7688. <https://doi.org/10.3390/su6117666>.
- Avcı, T. (2020). The effects of macroeconomic factors and bank loans on inflation: the case of Turkey. *Journal of Corporate Governance, Insurance, and Risk Management*, 7(2), 70-86.
- Bükey, A. M., & Çetin, B. I. (2017). The analysis of the factors influencing income distribution by the least squares method in Turkey, *Research Journal of Public Finance*, 3(1), 103-117.
- Büyüküysal, M. Ç., & Öz, İ. İ. (2016). Çoklu doğrusal bağıntı varlığında en küçük karelere alternatif yaklaşım: Ridge regresyon. *Journal of Düzce University Health Sciences Institute*, 6(2), 110-114.
- CAFÉ. (2004). *Second position paper on particulate matter (p. 231)*. CAFÉ Working Group on Particulate Matter.
- Cao, J., Chow, C. J., Lee, S. C. F., & Watson, G. J. (2013). Evolution of PM_{2.5} measurements and standards in the U.S. and future perspectives for China. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(4), 1197-1211. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.11.0302>.
- Chow, C. J., & Watson J. G. (1998). *Guideline on speciated particulate monitoring* (p. 29). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park.
- ÇEDB. (2004). *Türkiye çevre atlası* (s. 528). T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara.
- Çınar, İ., & Şensöğüt, C. (2017). Mermer fabrikalarında toz koşullarının değerlendirilmesi. *MCBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 23(1), 40-48.
- Dreshaj, A., Millaku, B., Shala, S., Selimaj, A., & Shabani, H. (2017). Sources of air pollution, environmental impacts and exploitation of natural resources in Kosovo, *CBU International Conference on Innovations in Science and Education*, 1275-1280, Prague, Czech Republic.
- Duran, Z. (2022). Bazı açık maden işletmelerinde partikül madde salınım ölçümü ve değişiminin meteorolojik koşullar, malzeme ve iş makinesi özellikleri ile modellenmesi. Doktora Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, Türkiye.
- Ediz, İ. G., Beyhan, İ. S., & Yuvka, Ş. (2001). Madencilikte toz kaynakları ve kontrolü, *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (002), 121-132.
- EPA. (1999). *Sampling of ambient air for total suspended particulate matter (spm) and PM10 using high volume (hv) sampler* (p. 78). U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, USA.
- EPA. (2025). What is PM? U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. Erişim tarihi: 03.07.2025. (<https://www3.epa.gov/region1/airquality/pm-what-is.html>).
- Erbay, Ş., & Beydoğan, H. Ö. (2017). Eğitimcilerin eğitim araştırmalarına yönelik tutumları. *Ahi Evran Üniversitesi Kırşehir Eğitim Fakültesi Dergisi*, 18(3), 246-260.
- Evyapan, F., Mungan, D., Akgün, M., & Arbak, P. (2012). *Hava kalitesi ve sağlık* (s. 72). T.C. Sağlık Bakanlığı and Türk Toraks Derneği, ISBN: 978-1-84984-008-8, Ankara.
- Fırat, C. (2020). Maden mühendisliği bölümü laboratuvarları risk değerlendirmesi üzerine örnek bir çalışma. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye.
- Gao, M., Beig, G., Shaojie, S., Zhang, H., Hu, J., Ying, Q., Liang, F., Liu, Y., Wang, H., Lu, X., Zhu, T., Carmichael, G.R., Nielsen, C.P., & McElroy, M.B. (2018). The impact of power generation emissions on ambient PM_{2.5} pollution and human health in China and India, *Environment International*, 121(1), 259-275. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.09.015>.
- Garcia-Garza, L. A., Tello-Leal, E., Macías-Hernández, B. A., Romero, G., & Hernandez-Resendiz, J. D. (2024). Particulate matter 1µm (PM₁) dataset collected by low-cost sensors in residential and industrial areas at the neighborhood level. *Data in Brief*, 54, 110411. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110411>.
- George, D., & Mallery, M. (2010). *SPSS for Windows step by step: a simple guide and reference* (p. 386), 17.0 update (10th ed.). Allyn & Bacon, Boston, USA.
- Girice, G. (2018). Kamu binalarındaki laboratuvarlarda iş sağlığı ve güvenliğine genel bir bakış: bir devlet üniversitesi örneği. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Gökdere, C. (2017). Çevre laboratuvarlarında risk analizi. Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir, Türkiye.
- Güler, U. (2020). Laboratuvarlar için yeni bir risk analiz yöntemi. Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çanakkale, Türkiye.

- Hime, N., Cowie, C., & Marks, G. (2015). *Review of the health impacts of emission sources, types and levels of particulate matter air pollution in ambient air in NSW* (p. 243). NSW Environment Protection Authority and NSW Ministry of Health, Environmental Health Branch, Australian.
- Hwang, S. Y., Yang, D. N., Kwon, H. J., & Lee, J. Y. (2014). Measurement of PM₁₀ concentration in one dental clinic, *International Journal of Clinical Preventive Dentistry*, 10(4), 273-280. <http://dx.doi.org/10.15236/ijcpd.2014.10.4.273>.
- İSGİP. (2015). *Occupational Diseases and Work-Related Diseases Diagnostic Guide (in Turkish)*, T.R. Ministry of Labor and Social Security Directorate General of Occupational Health and Safety, Ankara.
- Karabulut, C. (2019). Türkiye’de 2000 yılı sonrası e-ticaretin gelişimi. *Yönetim, Ekonomi ve Pazarlama Araştırmaları Dergisi*, 3(5), 192-207. <https://doi.org/10.29226/TR1001.2019.152>.
- Kim, K., Ehsanul Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter, *Environment International*, 74, 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>.
- Li, X., Chen, X., Yuan, X., Zeng, G., León, T., Liang, J., Chen, G., & Yuan, X. (2017). Characteristics of particulate pollution (PM_{2.5} and PM₁₀) and their spacescale-dependent relationships with meteorological elements in China. *Sustainability*, 9(12), 1-14. <https://doi.org/10.3390/su9122330>.
- Martins, N. R., & Carrilho da Graça, G. (2018). Impact of PM_{2.5} in indoor urban environments: a review. *Sustainable Cities and Society*, 42, 259-275. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.011>.
- Miller, L., & Xu, X. (2018). Ambient PM_{2.5} human health effects-findings in China and research directions. *Atmosphere*, 9(11), 1-16. <https://doi.org/10.3390/atmos9110424>.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to linear regression analysis* (p. 679). Wiley, Hoboken, USA.
- NSW EPA. (2015). *NSW coal mining benchmarking study best practice measures for reducing non-road diesel exhaust emissions* (p. 230). NSW Environment Protection Authority (EPA), Sydney, Australian.
- Ordu, K. M., & Bilir, G. Ç. (2018). Restructuring of university laboratories within the scope of occupational health and safety, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı-Special Issue), 34-37. www.ejosat.com ISSN:2148-2683.
- Patra, A. K., Gautam, S., & Kumar, P. (2016). Emissions and human health impact of particulate matter from surface mining operation - A review. *Environmental Technology & Innovation*, 5, 233-249. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2016.04.002>.
- Pradhan, D. S., Patra, A. K., Santra, S., Panchala, A., & Sahu, S. P. (2024). In-cabin particulate matter exposure of heavy earthmoving machinery operators in Indian opencast coal mine, *Aerosol Science and Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s41810-024-00258-0>.
- Sahu, S. P., Patra, A. K., & Kolluru, S. S. R. (2018). Spatial and temporal variation of respirable particles around a surface coal mine in India. *Atmospheric Pollution Research*, 9(4), 662-679. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.01.010>.
- Shrestha, N. (2020). Detecting multicollinearity in regression analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 8(2), 39-42. DOI:10.12691/ajams-8-2-1.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). *Using multivariate statistics* (sixth ed.), Pearson, Boston.
- Tsiouri, V., Kakosimos, K., & Kumar, P. (2015). Concentrations, sources and exposure risks associated with particulate matter in the Middle East Area - a review. *Air Quality Atmosphere & Health*, 8, 67-80. <http://dx.doi.org/10.1007/s11869-014-0277-4>.
- USEPA. (1998). *Particulate matter (PM_{2.5}) speciation guidance document* (p. 97). US Environmental Protection Agency Monitoring and Quality Assurance Group Emissions, Monitoring, and Analysis Division Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, NC 27711, USA.
- USEPA. (2004). *United States Environmental Protection Agency. "Air Quality Criteria for Particulate Matter"; EPA/600/P-99/002aF*; USEPA-United States Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA.
- Üstün Şahin, S. (2018). Eğitim kurumlarında laboratuvarlarda iş sağlığı ve güvenliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

- WHO. (2006). *Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution* (p. 113). World Health Organization, Copenhagen, Denmark.
- Xing, Y-F., Xu, Y-H., Shi, M-H., & Lian, Y-X. (2016). The impact of PM2.5 on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*. 8(1), E69-E74. <https://doi.org/10.3978%2Fj.issn.2072-1439.2016.01.19>.
- Yalım, B. H. (2020). Türkiye’de açık ocak bakır madenciliği, zenginleştirme ve cevher hazırlama tesisinde iş sağlığı ve güvenliği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Rumeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Yılmaz, Ş., & Bilici, M. (2020). Üniversitelerin mühendislik fakülteleri bünyesinde bulunan laboratuvarlarda iş sağlığı ve güvenliği. *OHS Academy*, 3(2), 102-113. <https://doi.org/10.38213/ohsacademy.745723>.
- Yiğit, E. (2007). Açık ocaklarda toz koşullarının istatistiksel analizi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.