

**TOZ TUTMA AMACIYLA TRİBOELEKROSTATİK  
KULLANIMI**

**THE USE OF TRIBOELECTROSTATIC FOR DUST  
COLLECTION**

**GÖZDE AYDIN**

**PROF. DR. ÖZCAN YILDIRIM GÜLSOY**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

# ÖZET

## TOZ TUTMA AMACIYLA TRİBOELEKTROSTATİK KULLANIMI

**Gözde AYDIN**

**Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özcan Yıldırım GÜLSOY**

**Ocak 2024, 111 sayfa**

Bu tez kapsamında mikronize boyutlu partikül maddelerin yakalanması için bir triboelektrik güç kaynaklı toz tutma ünitesi tasarımı ve bu düzeneğe ilişkin parametrelerin toz tutulma performansına etkileri incelenmiştir.

Çok ince boylu partikül maddelerin havada asılı kalması endüstriyel ölçekli birçok tesiste yaşanan oldukça önemli bir sorundur. Açığa çıkan ince boylardaki toz uzun vadeli ciddi sağlık sorunlarına sebep olmasının yanı sıra önemli çevre sorunlarından biridir. Bu sebeple oluşan bu tozun havadan ayrılması için özel filtreleme sistemleri kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan sistem havadaki tozun elektrostatik olarak yakalanmasını sağlayan elektrostatik filtrelerdir. Elektrostatik toz tutucu filtreler yapısında bulunan elektrotların statik elektrikle yüklemesi sonucunda, bu yüklü plakalar arasından geçen havanın içindeki partikül maddelerin elektriksel çekim kuvvetleri ile plakalara tutunması prensibi ile çalışmaktadır. Elektrostatik filtrelerin güç kaynakları bir

yüksek gerilim kaynağından karşılanır. Elektrotların yüklenebilmesi için alternatif akımı doğru akıma çeviren büyük ve güçlü trafolar kullanılmaktadır. Bu trafoların güç tüketimleri oldukça yüksek olup, çalışma esnasına ortaya çıkan ısının düzenli olarak düşürülmesi için soğutma sistemi gereksinimi ve tehlikeli bir çalışma ortamı oluşturması yüksek gerilim trafoları kullanılan toz tutma ünitelerinin dezavantajları arasında yer almaktadır. Bu tez kapsamında yüksek gerilim kullanılan toz tutma ünitelerinde özel bir güç kaynağı ile yüksek voltajlı statik elektrik yükü üreten büyük trafoların kullanıldığı bir sistem yerine yüksek statik yükün sürtünme ile üretildiği, daha güvenli ve ucuz olabileceği düşünülen toz tutucu elektrostatik filtre tasarımı amaçlanmıştır. Sürtünme ile üretilen gücün daha güvenilir olması ve stabil olması sebebiyle elektrostatik filtrelerin performansını artırıcı ve daha düşük maliyetli bir alternatif olarak kullanılabilirliği detaylı olarak araştırılmıştır.

Toz tutma ünitesinin ihtiyaç duyduğu yüksek potansiyelin sürtünme sonucu statik elektrik üretilmesi ve üretilen statik yükü plakalar yüklenerek hava ortamından tozun plakalar ile yakalanması bu tezin temel hedefi ve özgün değeridir. Bu amaçla, özel bir toz tutma ünitesinin tasarımı yapılmış ve laboratuvarında bir düzenek kurulmuştur. Bu düzeneğin toz tutma performansı üzerinde deneysel süreç yürütülmüştür. Toz tutma sisteminin mevcut toz tutma ünitelerinden en büyük ve belirgin farkı sürtünme ile gücünün üretilmesidir.

Hacettepe Üniversite Maden Mühendisliği Bölümü'nde kurulmuş olan bu düzenek, pozitif veya negatif yük üretebilmektedir ve üretilen yükün büyüklüğü 80 kV değerine ulaşabilmektedir. Bu toz tutma yöntemi kuru ortamda gerçekleştirilmiş olup, herhangi bir kimyasal kullanımına ihtiyaç duyulmamıştır.

Çalışma kapsamında sürtünme ile statik elektriğin üretilmesi için kullanılan malzemeler triboelektrik seriden seçilmiştir. İçlerinde en yük voltaj değerinin alındığı teflon rulo / yün bant kombinasyonu toz tutma deneylerinde kullanılmıştır. Sürtünme ile oluşan yük iletken kablolar ile mevcut toz tutma ünitelerinde kullanılanlara benzer sabit bir elektrota grubuna yüklenmiş ve bu elektrotların toz tutma gücü incelenmiştir. Ayrıca daha yüksek statik yük değerlerine ulaşabilmek amacıyla tuzlu su çözeltisinde statik elektriğin depolanabilirliği de araştırılmıştır.

Bu tez kapsamında yürütülen deneysel süreçte kullanılan numuneler farklı malzemelerden laboratuvarında öğütülerek hazırlanmıştır. Bu hazırlanan numuneler ile kurulan sistemin toz tutma performansı incelenmiştir. Hazırlanan numuneler arasında

metalik cevherlerden endüstriyel hammaddelere kadar çok farklı yelpazede malzemeler kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrostatik filtre, partikül madde, triboelektriklenme, elektrostatik, elektrot

## **ABSTRACT**

### **THE USE OF TRIBOELECTROSTATIC FOR DUST COLLECTION**

**Gözde AYDIN**

**Master of Science, Department of Mining Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Özcan Yıldırım GÜLSOY**

**Ocak 2024, 111 pages**

In this thesis, the design of a triboelectric power sourced dust collection for capturing micronized sized particulate matter and the effects of the parameters of this device on dust retention performance were examined.

The suspension of very fine particulate matter in the air is a very important problem experienced in many industrial-scale facilities. The fine dust released is one of the important environmental problems as well as causing serious long-term health problems. Special filtering systems are used to separate this dust from the air. The most commonly used system is electrostatic filters, which enable the electrostatic capture of dust in the air. Electrostatic dust collector filters work on the principle that as a result of the electrodes in their structure being charged with static electricity, the particulate matter in the air passing between these charged plates clings to the plates with electrical attraction forces. The power supplies of electrostatic filters are supplied from a high voltage source. Large and powerful transformers that convert alternating current into direct current are used to charge the electrodes.

The power consumption of these transformers is quite high, and the need for a cooling system to reduce the heat generated during operation and creating a dangerous working environment are among the disadvantages of dust collection units using high voltage transformers. Within the scope of this thesis, the aim is to design a dust collector electrostatic filter, which is thought to be safer and cheaper, in which the high static charge is produced by friction, instead of a system in which large transformers that produce high voltage static electric charge are used with a special power supply in dust collection units using high voltage. Since the power produced by friction is more reliable and stable, the usability of electrostatic filters as a performance-enhancing and lower-cost alternative has been investigated in detail.

The main goal and unique value of this thesis is the production of static electricity as a result of friction of the high potential required by the dust collection unit and the capture of dust from the air by the plates by charging the plates with the static charge produced. A special dust collection unit was designed and a mechanism was established in the laboratory. An experimental process was carried out on the dust collection performance of this device. The biggest difference of the dust collection system from existing dust collection units is that its power is produced by friction.

This mechanism, established at Hacettepe University Mining Engineering Department, can produce positive or negative charge and the magnitude of the generated charge can reach 80 kV. This dust collection method was carried out in a dry environment and there was no need to use any chemicals.

In this study, the materials used to produce static electricity by friction were selected from the triboelectric series. Teflon roll / wool tape combination, in which the highest voltage value was obtained, was used in dust retention experiments. The load generated by friction was loaded with conductive cables onto a fixed electrode group similar to those used in existing dust collection units, and the dust holding power of these electrodes was examined. The storability of static electricity in salt water solution was also investigated in order to reach higher static load values.

The samples used in the experimental process carried out within the scope of this thesis were prepared by grinding different materials in the laboratory. The dust retention performance of the installed system was examined with these prepared samples. A wide range of materials, from metallic ores to industrial raw materials, were used in the prepared samples.

**Keywords:** Electrostatic filter, particle matter, triboelectric, electrostatic, electrot

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım ve yüksek lisans öğrenim hayatım sürecinde desteğini esirgemeyen ve sabırla yol gösteren danışmanım Sayın Prof. Dr. Özcan Yıldırım Gülsoy'a, deneysel çalışmalarım sürecinde deneyimlerini paylaşan ve destek olan hocam Sayın Doç. Dr. Ergin Gülcan'a,

Tez çalışmalarımın her aşamasında yardım, emek ve desteğini sağlayan Sayın Mert Onur Konuk'a, deneysel süreçlerde yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım, Özgün Cem Özgür, Caner Kavak, Peyami Kaan Ayman'a, Tolga Sert'e

Hayatımın her aşamasında beni sonsuz destekleyen ve sevgilerini eksik etmeyen babam Haluk Aydın, annem Nejla Aydın, halam Handan Aydın'a,

Öğrenim hayatım boyunca eşsiz örnekler olarak yoluma ışık tutan abilerim Orhun Aydın ve Sezai Aydın'a,

En içten duygularım ile sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvar imkanlarından yararlanarak tez çalışmalarımı tamamlamamı sağlayan Bölüm Başkanlığı'na teşekkürü bir borç bilirim.



# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
ÇİZELGELER .....	x
ŞEKİLLER.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xv
1.GİRİŞ.....	1
2. PARTİKÜL MADDE .....	4
3. ELEKTROSTATİK KUVVETLER VE TRİBOELEKTRİK .....	11
3.1. Elektrostatik .....	11
3.1.1. Elektrostatik Yük .....	11
3.1.2. Elektrostatik Kuvvetler .....	12
3.1.3. Elektrostatik Ayırma.....	13
3.2. Triboelektrik.....	14
3.2.1. Triboelektrik ile Yüklenme.....	14
4. ELEKTROSTATİK FİLTRE .....	18
4.1. Konvansiyonel Elektrostatik Filtreler .....	18
4.2. Elektrostatik Çöktürücüler (ESP).....	19
4.2.2. Elektrostatik Çöktürücülerin Parametreleri .....	24
4.2.2.1. Elektriksel Çalışma Noktası.....	24
4.2.2.2. Partikül Yüklenmesi .....	26
4.2.2.3. Partiküllerin Toplanması.....	29
4.2.3. Elektrostatik Çöktürücülerin Tipleri .....	30
4.2.3.1. Levha-Tel Tipli Elektrostatik Çöktürücüler .....	30
4.2.3.2. Levha Tipli Elektrostatik Çöktürücüler.....	32

4.2.3.3. Boru Tipli Elektrostatik Çöktürücüler .....	33
4.2.3.4. Yaş Elektrostatik Çöktürücüler.....	34
4.2.3.5. İki Kademeli Elektrostatik Çöktürücüler .....	35
5.DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	36
5.1. Triboelektostatik Toz Tutucu Filtrenin Tasarımı ve Kurulumu.....	36
5.1.1. Triboelektrik Statik Yükün Oluşturulması.....	36
5.1.2. Toz Tutucu Hazne .....	39
5.2. Yük Ölçüm ve Toz Tutma Testleri .....	43
5.2.1. Statik Yük Ölçümleri .....	43
5.2.2. Statik Yükün Korunması ve Yük Miktarının Arttırılması .....	47
5.2.2.1. Tuzlu Su Çözeltisi ile Statik Yük Ölçümleri .....	47
5.2.2.2. Üretilen Statik Yükün Korunması .....	54
5.3. Triboelektostatik Filtre Toz Tutma Testleri.....	58
5.3.1. Numune Hazırlama .....	58
5.3.2. Toz Tutma Testleri.....	63
5.3.2.1. Besleme Miktarının Toz Tutma Kapasitesine Etkisi .....	64
5.4. Toz Tutma Sisteminin Kapasitesinin Mevcut Toz Tutucuların Kapasitesi ile Karşılaştırılması .....	85
5.5. Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	86
6.SONUÇ VE TARTIŞMA .....	88
KAYNAKLAR .....	90
EKLER.....	93
ÖZGEÇMİŞ .....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>

## ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. EPA hava kalitesi indeksi değer aralıkları ve ilişkili anlamları .....	5
Çizelge 2.2. Ulusal ve Avrupa ülkeleri için PM10 sınır değerleri .....	6
Çizelge 2.3. Hava kalitesi değerlendirme ve yönetimi genelgesi .....	7
Çizelge 2.4. İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliğine göre farklı madde tozlarının izin verilen maruz kalma sınırları .....	7
Çizelge 2.5. Yıllar itibariyle üniteler ve unvanlar bazında yapılan çimento tozu ölçüm sonuçları ve ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması .....	8
Çizelge 4.1. Levha tipli elektrofiltrenin toplayıcı plakalarının genel özellikleri.....	30
Çizelge 5- 1: Naylon bant/ teflon rulo ve yünlü bant/ rulo kullanılarak yapılan ölçümler .....	44
Çizelge 5.2. Alüminyum rulo/ yün bant kombinasyonu ile ölçülen statik yük değerleri	46
Çizelge 5.3. Farklı hacimlerde ağırlıkça %3,6 NaCl + Saf Su çözeltisi kullanılarak yapılan voltaj ölçümleri ve Susuz ölçümle karşılaştırılması .....	48
Çizelge 5- 4. Ağırlıkları %10 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı voltaj ölçümleri .....	49
Çizelge 5.5. Ağırlıkça %20 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı voltaj ölçümleri .....	50
Çizelge 5.6. Ağırlıkça %30 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı voltaj ölçümleri .....	51
Çizelge 5.7. Ağırlıkça %30 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı pozitif voltaj ölçümleri.....	53
Çizelge 5.8. Statik yük yükleme hızı deneyi (Negatif yük).....	55
Çizelge 5.9. Statik yük yükleme hızı deneyi (Pozitif yük) .....	56
Çizelge 5.10. Test numuneleri ve Özgül ağırlıkları testi .....	62
Çizelge 5.11. Hazırlanan toz numunelerinin d80 değerleri .....	63
Çizelge 5.12. Pozitif yüklü düz plaka ile yakalanan toz miktarları .....	65
Çizelge 5.13. Pozitif yüklü düz plakaların artan besleme miktarlarına göre tutulan toz miktarı (%).....	66
Çizelge 5.14. Besleme miktarındaki artışa bağlı olarak pozitif yüklü düz plaka ile birim alan başına tutulan toz miktarı .....	66

Çizelge 5.15. Negatif yüklü düz plakanın yakaladığı toz miktarları .....	67
Çizelge 5.16. Negatif yüklü düz plakaların artan besleme miktarlarına göre tutulan toz miktarı (%).....	68
Çizelge 5.17. Besleme miktarındaki artışa bağlı olarak negatif yüklü düz plaka ile birim alan başına tutulan toz miktarı .....	68
Çizelge 5.18. Pozitif yüklü gözenekli plaka ile yakalanan toz miktarları (g).....	69
Çizelge 5.19. Pozitif yüklü gözenekli plakaların artan besleme miktarlarına göre tutulan toz miktarı (%).....	70
Çizelge 5.20. Besleme miktarındaki artışa bağlı olarak pozitif yükü gözenekli plaka ile birim alan başına tutulan toz miktarı .....	70
Çizelge 5.21. Negatif yüklü gözenekli plakanın tuttuğu toz miktarı .....	71
Çizelge 5.22. Negatif yüklü gözenekli plakaların artan besleme miktarlarına göre tutulan toz miktarı (%).....	72
Çizelge 5.23. Besleme miktarındaki artışa bağlı olarak negatif yüklü gözenekli plaka ile birim alan başına tutulan toz miktarı .....	72
Çizelge 5.24. Değişen besleme süresinde tutulan toz miktarı (Sabit miktarda besleme, 6 g).....	84

## ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Partikül madde boyları ve örnekleri .....	4
Şekil 2.2. Partikül maddelerin farklı tane boylarının etkilediği solunum yolu.....	9
Şekil 3.1. Elektrostatik yüklenme mekanizmaları .....	11
Şekil 3.2. İtme ve çekme mekanizmaları .....	12
Şekil 3.3. Moleküller arasında oluşan elektrokimyasal bağ sonucunda oluşan yüklenme mekanizması .....	14
Şekil 3.4. Triboelektrik seri .....	16
Şekil 4.1. Konvansiyonel elektrostatik filtre .....	19
Şekil 4.2. Elektrostatik filtrelere giren kirli havanın, partiküllerden arındırılarak temizlenme aşamaları .....	19
Şekil 4.3. Elektrostatik çöktürücülerin temel prosesi .....	20
Şekil 4.4. Elektrostatik çöktürücünün bileşenleri .....	21
Şekil 4.5. Elektrostatik çöktürücülerin toplayıcı plakaları çırpma sistemi .....	23
Şekil 4.6. Levha-tel tipli elektrostatik çöktürücünün bileşenleri .....	31
Şekil 4.7. Levha- tel tipli elektrostatik çöktürücülerin çalışma mekanizması .....	31
Şekil 4.8. Levha tipli elektrostatik çöktürücünün bileşenleri .....	33
Şekil 4.9. Boru tipli elektrostatik çöktürücü .....	33
Şekil 4.10. Yaş elektrostatik çöktürücü .....	34
Şekil 4.11. İki kademeli elektrostatik çöktürücü.....	35
Şekil 5.1. Statik elektrik yükünün oluşturulduğu ünite .....	37
Şekil 5.2. Statik elektrik üretim ünitesinin şeması.....	38
Şekil 5.3. Statik yük üretim birimindeki teflon rulo, yün bant ve toplayıcı bakır fırçanın genel görünümü .....	38
Şekil 5.4. Tuzlu su haznesi eklenmiş statik yük üretim ünitesi .....	39
Şekil 5.5. Toz tutma haznesinin önden ve yandan şematik gösterimi .....	40
Şekil 5.6. Toz tutucu haznede kullanılan düz ve gözenekli plaka elektrotları.....	41
Şekil 5.7. Toz tutma üstten görünüşü .....	41
Şekil 5.8. Toz tutma ünitesi ve güç üretim ünitesinin genel şematik görünümü.....	42
Şekil 5.9. Deney düzeneği genel görünümü .....	43

Şekil 5.10 Naylon bant/rulo ve yün bant/rulo kombinasyonları ile üretilen statik yükün yükleme süresi ile değişimi.....	45
Şekil 5.11. Alüminyum rulo/ yün bant ile yapılan ölçümler .....	46
Şekil 5.12. Statik yükün arttırılması amacıyla kullanılan tuzlu su bağlantısı.....	47
Şekil 5.13. Ağırlıkça %3,6 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan voltaj ölçümleri .....	48
Şekil 5.14. Ağırlıkça %10 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı voltaj ölçümleri .....	50
Şekil 5.15. Ağırlıkça %20 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı voltaj ölçümleri .....	51
Şekil 5.16. Ağırlıkça %30 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı voltaj ölçümleri .....	52
Şekil 5.17. Ağırlıkça %30 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı pozitif voltaj ölçümleri.....	53
Şekil 5.18. Statik yük yükleme hızı deneyi (Negatif yük).....	56
Şekil 5.19. Statik yük yükleme hızı deneyi (Pozitif yük) .....	57
Şekil 5.20. Tüvenan manyetit ve hematit numuneleri hazırlama sürecindeki akım şeması .....	59
Şekil 5.21. Kalsit numunesinin hazırlama sürecindeki akım şeması .....	60
Şekil 5.22. Toz numunelerinin tane boyu dağılımı.....	62
Şekil 5.23. Pozitif yüklü düz plakalar ile tutulan toz miktarları .....	65
Şekil 5.24. Negatif yüklü plakaların yakaladığı toz miktarları (g) .....	67
Şekil 5.25. Pozitif yüklü gözenekli plakalar ile yakalanan toz numuneleri.....	69
Şekil 5.26. Negatif yüklü gözenekli plakaların tuttuğu toz miktarı .....	71
Şekil 5.27. Pozitif yüklü düz ve gözenekli plakaların kuvars tozunu yakalama miktarı	73
Şekil 5.28. Pozitif yüklü düz ve gözenekli plaka kaolin tozunu yakalama miktarı .....	73
Şekil 5.29. Pozitif yüklü düz ve gözenekli plaka feldspat tozunu yakalama miktarı .....	74
Şekil 5.30. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların bor tozunu yakalama miktarı .....	74
Şekil 5.31. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların kalsit tozunu yakalama miktarı ...	75
Şekil 5.32. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların manyetit tozunu yakalama miktarı .....	75
Şekil 5.33. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların hematit tozunu yakalama miktarı	76
Şekil 5.34. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların kurşun-çinko tozunu yakalama miktarı.....	76

Şekil 5.35. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların demir cevher içerikli cevher tozunu yakalama miktarı.....	77
Şekil 5.36. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların karma tozu yakalama miktarı.....	77
Şekil 5.37. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların kuvars tozu yakalama miktarı....	78
Şekil 5.38. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların kaolin tozu yakalama miktarı ....	78
Şekil 5.39. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların feldspat tozu yakalama miktarı..	79
Şekil 5.40. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların bor tozu yakalama miktarı .....	79
Şekil 5.41. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların kalsit tozu yakalama miktarı.....	80
Şekil 5.42. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların manyetit tozu yakalama miktarı	80
Şekil 5.43. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların hematit tozu yakalama miktarı ..	81
Şekil 5.44. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların kurşun-çinko tozu yakalama miktarı .....	81
Şekil 5.45. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların demir içeren cevher tozu yakalama miktarı.....	82
Şekil 5.46. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların karma numune tozu yakalama miktarı.....	82
Şekil 5.47. Besleme süresine göre tutulan karma toz numunesinin miktarı .....	84

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

°C	Santigrat
°F	Fahrenheit
μ	Mikron
ρ	Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )
e	Elektron Yüğü
E	Elektrik Alanı (V/m)
F	Kuvvet (N)
k	Coulumb Sabiti
kV	Kilovolt
V	Volt

### Kısaltmalar

DC	Doğru Akım
gr	Gram
cm	Santimetre
m	Metre
s	Saat
ml	Mililitre
PM	Partikül Madde
WHO	Dünya Sağlık Örgütü



# 1.GİRİŞ

Elektrostatik filtreler, çeşitli endüstriyel faaliyetler sırasında açığa çıkan havada uçabilecek kadar küçük partikül maddeleri havadan ayırmak için kullanılmaktadır. Partikül madde olarak adlandırılan ve havada asılı durumda kalabilen toz parçacıklarına günlük yaşamın ve endüstri yaşamının içinde oldukça sık rastlanmakta ve bu endüstriyel çalışma ortamlarındaki yoğun hareket nedeniyle çok daha büyük bir sorun yaratmaktadır. Bu sorun genel olarak toz tutucu filtreler kullanılarak çözülmeye çalışılmaktadır. Bu amaçla kullanılan filtrelerin birçoğu da elektriksel çekime dayalı elektrostatik toz tutucu filtrelerdir.

Günümüzde var olan elektrostatik filtrelerin çalışma prensibinin temelini havanın statik elektrik yüklü elektrotların arasında geçmesi sırasında, havanın içerisinde bulunan partikül maddelerin bu yüklü elektrot veya elektrotlar tarafından elektriksel çekim kuvveti ile çekilerek hava ortamından ayrılması oluşturmaktadır. Elektrotların güç ihtiyacı bir trafo ile karşılanmaktadır. Burada elektrik doğru akıma (DC) çevrilmekte ve transformatör-redresör sistemi ile yüksek gerilim yaratılmaktadır. Konvansiyonel elektrostatik filtrelerin yüksek gerilime ve dönüştürücü bir ek sisteme de gereksinim duyması nedeniyle operasyonel maliyetleri oldukça yüksektir.

Bu tezin amacı, elektrostatik filtrelerin ihtiyaç duyduğu elektriksel gücün sürtünme kuvveti ile üretilen (triboelektrik) bir sistem tarafından karşılanıp karşılanamayacağını araştırılmasıdır. Bu kapsamda triboelektrik serisinde farklı uçlarda (pozitif ve negatif uçlarda) bulunan farklı malzemelerin birbirlerine sürtünmesi sonucunda açığa çıkan yükün, toz tutma ünitesinde bulunan elektrotların üzerinde toplanması ve toplanan yük ile mikronize boyuttaki tanelerin havadan ayrılabilirliği incelenmiştir. Bunun için triboelektriklenme ile üretilen gücün toplandığı ve mevcut elektrostatik toz tutma sistemlerine benzer olarak içerisinde birbirlerine temas etmeyen durumda yer alan elektrotların bulunduğu bir toz tutma ünitesinin tasarımı yapılmıştır. Triboelektrik ayırma denildiğinde genel olarak tanelerin sürtünmesi ile statik elektrik yükü kazanması konusu anlaşılacakla birlikte bu tez kapsamında triboelektrik seriden seçilen iki farklı malzemenin sürtünmesi sonucu ortaya çıkan statik yükün ayırıcı kuvveti oluşturma için kullanılması önemli bir farklılık yaratmaktadır.

Elektrostatik toz tutucu filtrelerde plakalar arasına giren havanın içerisinde bulunan partiküler boyutlu tanelerin yüzey yüklerinin plakalar tarafından manipüle edilmesi sonucunda bu taneler pozitif veya negatif yüklü plakalara doğru çekilirler. Böylece bu taneler havadan ayrılarak, toz tutma plakaları üzerinde toplanırlar. Toplanan bu taneler belirli aralıklarla özel torbalara boşaltılarak havadan ayrılmış olurlar. Bu tip hava filtrelerinde, hava akışının içinde bulunan partikül maddelerin öncelikle bir yükleyici elektrot ile yüklenerek toplayıcı elektrotlara ulaştıklarında kazandıkları yükey yüküne göre yakalanıp havadan ayrılması prensibi esastır. Havadaki asılı tanelerin bu şekilde statik yüklenmesi toplama verimini de artırmaktadır. Toplayıcı plakaların periyodik olarak temizlenmesi gerekmektedir. Plakaların yüzeyindeki toplanan tozlar elektriksel gücü etkileyerek, sistemin genel verimini düşürmektedir. Plakaların ihtiyaç duyduğu yüksek gerilim trafolar ve tranformatör-redresör sistemleri ile karşılanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, elektrostatik filtrelerin gereksinimi olan yüksek statik elektrik yükünü karşılamak için sürtünmeyle statik yük üreten bir düzenek ve yakalayıcı elektrotların bulunduğu toz tutma ünitesi kurulmuştur. Bunun sonucunda partikül maddelerin triboelektriklenme ile üretilen statik yük ile plakalar tarafından yakalanması sağlanmıştır. Elektrostatik filtrenin güç kaynağının sürtünme ile üretilmesi, var olan diğer hava filtreleri ile arasında önemli bir farka sahip olduğunu göstermektedir.

Triboelektrik serisinde yer alan iki farklı uçtaki malzemeler sürtünme kuvvetinin etkisiyle statik yük oluşturmaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmada dizayn edilmiş olan triboelektrostatik güç üretim sistemi, bu çalışma sırasında elektrofiltrenin içerisindeki plakaların statik yüklenebilmesi için kullanılmıştır [1]. Triboelektrostatik güç üretim sisteminin ana yapısını, triboelektrik seriden seçilmiş iki tane rulonun arasında yine triboelektrik seriden seçilmiş olan bir bandın döndüğü bir düzenek oluşturmaktadır. Sürtünme sisteminin kolay olması nedeniyle bu düzenek tasarlanmıştır. Ayrıca bu düzenek dönen motorların bulunduğu her tesise ilave bir sürücü güç kaynağı olmadan kolaylıkla adapte edilebilir. Bu çalışma kapsamında toz ünitesinin tasarımına ek olarak toz tutma verimini arttırabilecek parametreler de incelenmiştir. Hazne içerisinde toz tutucu plaka olarak, düz yüzeyli alüminyum plakalar kullanılarak ilk testler tamamlanmıştır. Yine aynı sayıda ve boyutlara sahip gözenekli alüminyum plakalar da

sistemin ikinci test aşamasında kullanılarak, gözenekli plakaların da düz yüzeyli plakaların da toz tutma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Triboelektrik ile güç üretim ünitesinin ürettiği statik yükün büyüklüğünün artırılması için sisteme elektroliz bir sıvı özelliğine sahip olan tuzlu su güç üretim ünitesinin yükünün toplandığı sabit plakaya bağlanmıştır. Tuzlu suyun bir nevi pil işlevi gördüğü statik yükün büyüklüğünü ve statik yükün korunabilirliği üzerindeki etkisi üzerine deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu testler sırasında denenen parametreler; statik yükün türü (pozitif ve negatif yük üretilmiştir), yükün elektrotlarda ne kadar süre korunabildiği, besleme miktarının toz tutma verimi üzerindeki etkisi, besleme miktarı, besleme hızı ve statik yük büyüklüğünün arttırılabilmesi için yapılan tuzlu suyun hacmine ve derişimine göre statik yük büyüklüğü olarak incelenmiştir.

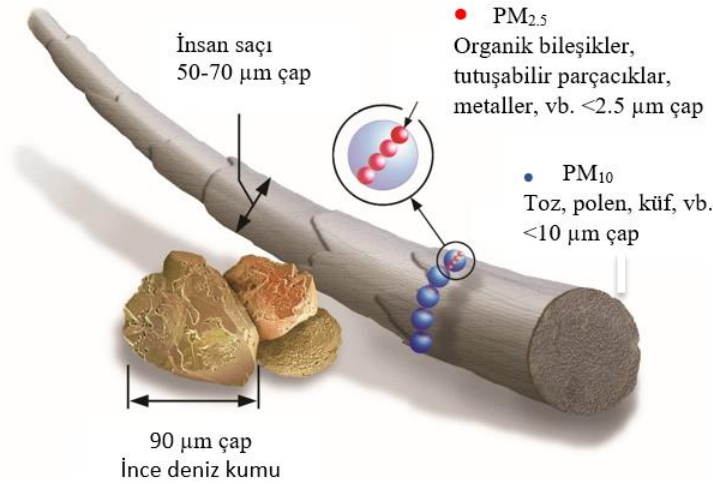
Farklı özelliklerdeki tozların denenebilmesi ve geliştirilen yeni yöntemde parametre kontrollerinin düzenli bir şekilde yapılabilmesi amacıyla laboratuvarında farklı özelliklerdeki malzemeler özel olarak hazırlanmış ve bu şekilde yapay olarak hazırlanmış toz numuneleri kullanılmıştır.

Farklı özelliklere sahip numuneler 38 mikronun altına öğütülmüş ve ayrı ayrı torbalanmıştır. Kullanılan numuneler kendi alanımızdaki endüstriyel tesislerde ortaya çıkan tozları temsil etmesi amacıyla seçilmiş tüvenan, atıklar, proses akışlarından malzemeler gibi özelliklere sahip malzemelerden seçilerek hazırlanmıştır. Bu malzemeler genel olarak kuvars, kaolin, feldspar, bor, kalsit, manyetit, hematit, kurşun-çinko cevheri, demir cevheri ve cevher hazırlama laboratuvarının havalandırma sisteminden alınmış çeşitli malzemelerdir.

Bu kapsamda seçilen numuneler havada uçabilecek toz boyutuna öğütülmüş, kurulan düzeneden belirli bir sistematik doğrultusunda geçirilmiş ve kurulan düzeneğin üzerinden geçen tozları tutma kapasitesi ölçülmüştür. Bu sayede geliştirilen sistemin farklı niteliklerdeki tozları yakalayabilme kabiliyeti ortaya konulmaya çalışılmıştır.

## 2. PARTİKÜL MADDE

Toz, partikül büyüklüğü 100 mikrometreden daha az olan havada asılı kalabilen parçacıkların genel adıdır. Partikül maddeler, organik veya inorganik maddelerin çeşitli etkilere maruz kalarak çok küçük ve havada asılı kalabilen katı parçacıklar haline gelmesi ile oluşur. 500 mikrondan daha büyük parçacıklar havada asılı durumda kalamazlar, ağırlıkları sebebiyle çökerler. Solunabilir parçacıklar genellikle 10 mikron veya daha küçük çaptaki partiküllerdir. Partikül maddeler mikroskobik boyutlarda katı veya sıvı taneler içerirler ve solunabilir oldukları için insan sağlığını olumsuz yönde etkileyebilirler. Örneğin, ortalama insan saçının boyutu 70 mikrondur ve en ince parçacıktan 30 kat daha büyüktür (Şekil 2.1). 10 mikron tane boyutundan daha küçük partiküller ciğerlerin derinlerine ulaşarak yerleşebilmelerinin yanı sıra kan akışına da karışabilirler. Bu partikül maddeler 2,5 mikron çapında veya daha küçük boyutlardaki tanelerdir. Bu sebeple insan sağlığını oldukça olumsuz yönde etkileyerek kısa veya uzun süreli sağlık sorunlarında sebep olabilirler [2].



Şekil 2.1. Partikül madde boyları ve örnekleri [2]

Nüfusun artması ve sanayi endüstrisinin gelişmesi gibi sebepler sonucunda atmosferik kirleticilerden olan partikül maddelerin (PM) artan konstrasyonları sonucunda temiz hava kalitesi her geçen gün zayıflamaktadır. Özellikle madencilik, inşaat ve makine gibi endüstrilerin işyerleri toz oluşumu ve bu oluşan tozların havada asılı kalması durumuna eğilimlidir [3].

İnsanların bulunduğu ortamdaki istenmeyen toz görüş mesafesini azaltabilir; iş güvenliği açısından tehlikeli durumlara sebebiyet verebilir. Bunun yanı sıra bu iş yeri tozları meslek hastalıklarına sebep olabilmektedir.

Endüstriyel ölçekli yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan tozun düzenli olarak çalışma ortamında ölçülmesi gerekir. Bu ölçümlerin yapılması için çeşitli cihazlar kullanılmaktadır. Bunlar; konimetre, yüzeysel toz ölçüm cihazları (toz kovaları), gravimetrik ölçüm yöntemi olarak sıralanabilmektedir.

Yukarıda sıralanan yöntemler ile kaydedilen hava kirleticilerin değerleri; mg/m<sup>3</sup> cinsinden miktarları ve bu miktarlarda bulunan partikül maddelerin boyutları ham veri olarak elde edilir. Bu elde edilen ham ölçüm sonuçları daha sonrasında hava kitlesi indeksine dönüştürülmektedir. Ölçümlerde elde edilen kirletici değerlerine göre bu indeks değeri ayrı ayrı hesaplanmaktadır [2] [4].

Aşağıda yer alan Çizelge 2.1' de EPA hava kalitesi indeksinin değer aralıkları ve bu değerlere göre olan sağlık tehlike düzeyleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. EPA hava kalitesi indeksi değer aralıkları ve ilişkili anlamları [2] [4]

<b>Hava Kalitesi İndeksi (AQI) Değer Aralıkları</b>	<b>Sağlık Endişe Seviyeleri</b>	<b>Anlamı</b>
<b>0-50</b>	<i>İyi</i>	Hava kalitesi memnun edici ve hava kirliliği az riskli veya hava kirliliği hiç yok.
<b>51-100</b>	<i>Orta</i>	Hava kalitesi uygun fakat hava kirliliğine hassas kişiler için orta düzeyde sağlık riski oluşturabilir.
<b>101-150</b>	<i>Hassas</i>	Hassas kişiler için sağlık riski oluşturabilir. Genel olarak kamunun etkilenmesi olası değildir.

<b>151-200</b>	<b><i>Sağlıksız</i></b>	Herkes sağlık etkileri yaşamaya başlayabilir, hassas gruplar için ciddi sağlık etkileri söz konusu olabilir.
<b>201-300</b>	<b><i>Kötü</i></b>	Sağlık açısından acil durum oluşturabilir. Nüfusun tamamının etkilenme olasılığı yüksektir.
<b>301-500</b>	<b><i>Tehlikeli</i></b>	Herkes daha ciddi sağlık etkileri ile karşılaşabilir.

Ülkemizde 2013/37 numaralı Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Genelgesi'ne göre hava kirleticilerinin sınır değerleri belirtilmiştir (Çizelge 2-3). PM10 tane boyutundaki maddelerin endüstriyel faaliyetlerde (kırma, ufalama vb.) daha fazla meydana geldiği görülmüştür. Bu tespit çerçevesinde bu genelge ışığında 10 mikron boyutlu partikül madde için sınır değer Avrupa standartlarına uygun olarak belirlenmiştir [4] [5].

Ulusal Hava Kalitesi İndeksi Kesme Noktasına göre PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) değerlerinin sağlık açısından değerlendirilmesi için 24 saatlik ortalama alınır. Ortalamadan elde edilen veriye göre hava kalitesi indeksinin değeri belirlenir. Çizelge 2.2 'de Ulusal ve Avrupa ülkeleri için sınır değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.2. Ulusal ve Avrupa ülkeleri için PM10 sınır değerleri [4]

Parametre	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
	24 Saatlik Ortalama
<b>Ulusal Sınır Değer</b>	50
<b>AB Üye Ülkeleri Sınır Değeri</b>	50

Çizelge 2.3. Hava kalitesi değerlendirme ve yönetimi genelgesi [5]

<b>Kirletici</b>	<b>Ortalama Süre</b>	<b>Limit Değer</b>	<b>Üst Değerlendirme Eşiği</b>	<b>Alt Değerlendirme Eşiği</b>
<b>PM10</b>	24 Saatlik	50	30	20
	Yıllık	40	14	10

Havadaki partikül madde (PM) miktarının oranı kütle cinsinden veya belirli bir hava hacmindeki partikül sayısı olarak belirlenir. Kütle birimi olarak, örneklenen havanın metreküpü başına miligram ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) veya örneklenen havanın metreküpü başına mikrogramdır ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). ( $1 \text{ mg}/\text{m}^3=1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Kütle birimleri genellikle endüstriyel ortamlarda çeşitli işlemler sonucu açığa çıkan partikül madde miktarını belirlemek için kullanılır [6].

İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliğine göre belirlenen toz maruziyet sınırı aşağıdaki Çizelge 2.4' de verilmiştir.

Çizelge 2.4. İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliğine göre farklı madde tozlarının izin verilen maruz kalma sınırları [7]

<b>Madde</b>	<b>İzin Verilen Maruz Kalma Sınırı (<math>\text{mg}/\text{m}^3</math>)</b>
Kadmiyum	0,05
Manganez Dumanı	1
Paris Alçısı ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ )	10
Zımpara Tozu	10
Tahıl Tozu	10
Kristalize Silika (Kuvars)	10
Asbest	0,1
Ortamdaki Toplam Toz	15
Solunabilir Toz	5

Endüstriyel ortamlarda sıklıkla bulunan havada asılı kalabilen toz partiküllerinden birisi de kristalize silikadır. Özellikle çimento endüstrisindeki faaliyetler sonucunda solunabilir çimento tozuyla birlikte solunabilir kristalize silika da ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple

endüstriyel ortamlarda havada asılı kalan tozun oranı hakkında bilgi almak için çimento sektörü için hazırlanan bir rehberden yararlanılmıştır. Çimento fabrikalarında özellikle hammaddenin bulunduğu ve hammaddenin işlendiği ünitelerde kristal silikanın (kuvars) bulunma ihtimali diğer bölümlere göre daha yüksektir [7] [8]. Özellikle kırıcı ve farin değirmen ünitelerinde kristal silikaya maruziyet daha fazla olmaktadır.

Türkiye’deki çimento fabrikasından birisine ait çalışma ortamına toz yayılan bölümler ve toz oranları Çizelge 2.5’ de verilmiştir. Ortamda bulunan solunabilir çimento tozunun (inert toz) oranı  $5 \text{ mg/m}^3$  ve kuvars (kristal silika) oranı  $10 \text{ mg/m}^3$  ‘tür [8].

Çizelge 2.5. Yıllar itibariyle üniteler ve unvanlar bazında yapılan çimento tozu ölçüm sonuçları ve ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması [8]

Ünite ve Görev Unvanları	PM ( $\text{mg/m}^3$ )		Yıllara Göre Ortalama PM ( $\text{mg/m}^3$ )
	2010	2013	
Çimento Değirmeni	4,26	2,77	3,52
Döner Fırın	0,14	2,08	1,11
Elektrik Bakımcı	1,05	1,59	1,32
Farin Değirmeni	3,25	2,21	2,73
Kırıcı	0,56	2,61	1,59
Kömür Değirmeni	11,26	2,5	6,88
Numuneci	0,74	2,42	1,58
Paketleme	12,15	1,97	7,06

Çizelge 2.5’te de görüldüğü üzere “farin değirmen” aşamasında kristalin silika yüzdesinin en yüksek değere ulaşmıştır. “Paketleme”, “kırıcı”, “çimento değirmeni” bölümlerindeki çalışanlar ile “makine bakımcılar” solunabilir toza en fazla maruz kalan çalışan kesimi olduğu yapılmış olan bu araştırma da görülmüştür. Kristal silika içeren solunabilir toza ise en çok “farin değirmeni”, “kırıcı” ve “döner fırın” çalışanlarının maruz kaldığı görülmüştür [8].

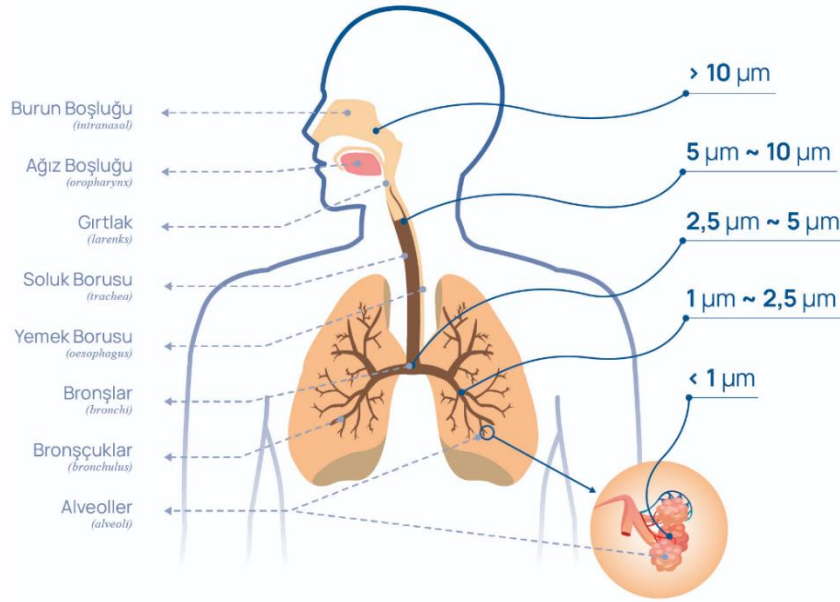
Silika kristalinin yer kabuğunda yaygın bir şekilde bulunmasından dolayı hem çalışma ortamlarında hem de çalışma ortamları dışında bulunabilmektedir. Bulunabilirliği fazla olması silikozis hastalığına sebep olmaktadır. Silika minerallerini mikron altı ve nano



partiküllerinin önemli miktarda havada asılı kalması ile hastalıklara sebep olmaktadır. [8] [9]. Bu tip minerallerin insan sağlığına olan olumsuz etkisi Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından da vurgulanmıştır.

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) 'nün yayınladığı 'Hava Kalitesi Yönergesi" inde de mikron altı, nano partiküllerin kısa ve uzun vadede kanser, kardiyovasküler rahatsızlıklar, akciğer rahatsızlıkları gibi pek çok ciddi sağlık sıkıntılarına sebep olduğu göz ardı edilemez durumda olduğunu görmüştür. Dünya Sağlık Örgütü'nün raporuna göre, dünyada her 10 kişiden 9'u kirli hava solumakta ve yılda 7 milyar insan hava kirliliğinin sebep olduğu hastalıklar yüzünden hayatını kaybetmektedir. Hava kirliliği sebeplerinden olan partikül maddelerin varlığının artması insan sağlığının üstündeki olumsuz etkisi açıkça görülmektedir [9] [10] [11].

Partikül maddelerin farklı boyutlarda, insan vücudunun farklı organlarını etkileyerek bir dizi sağlık sorununun önü açar (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Partikül maddelerin farklı tane boylarının etkilediği solunum yolu

Partikül maddelerin havadan temizlenmesi için havalandırma sistemleri kullanılmaktadır. Ancak çıkan toz tanelerinin havadan ayrılması için endüstriyel tesislerde havalandırma sistemi bulunsa bile çoğu zaman yeterli hava kalitesine ulaşamamaktadır. Günümüzde havalandırma sistemine ek olarak toz tutucu elektrofiltrelerin kullanıldığı bilinmektedir [11]. Elektrofiltre sistemleri, statik yüklere sahip elektrotlar arasından geçen ortam

havasının içinde bulunan toz parçacıklarının elektriksel çekim kuvvetlerden etkilenecek elektrotlara tutunması prensibini temel alarak çalışır.

Endüstride kullanılmakta olan havalandırma sistemlerinin temel çalışma prensibini çalışma alanında biriken kirli havayı absorbe edip temiz havaya çevirmek oluşturmaktadır. Bu havalandırma sistemlerinin, aynı zamanda ortamda bulunan tozu toplama özelliğine sahip olan versiyonları da bulunmaktadır. Bu havalandırma sistemleri fiber tipli veya elektrofiltreler olabilmektedir. Genellikle elektrofiltreler endüstriyel tesislerin genelinde bulunmaktadır. Bu filtreler havada asılı duruma kalabilen mikronize boyutlu (PM) taneleri yakalamak için kullanılmaktadır [12].

Elektrofiltrelerde temel olarak bir doğru akım güç kaynağına bağlı olarak üretilen statik yük kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında statik yükün sürtünme (triboelektrik) ile oluşması nedeniyle bu şekilde oluşan statik elektrik yükünün toz tutma sistemlerinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Aşağıdaki bölümde toz tutucularda kullanılan statik yük ve bunun üretilmesine yönelik bilgiler verilmektedir.

### 3. ELEKTROSTATİK KUVVETLER VE TRİBOELEKTRİK

#### 3.1. Elektrostatik

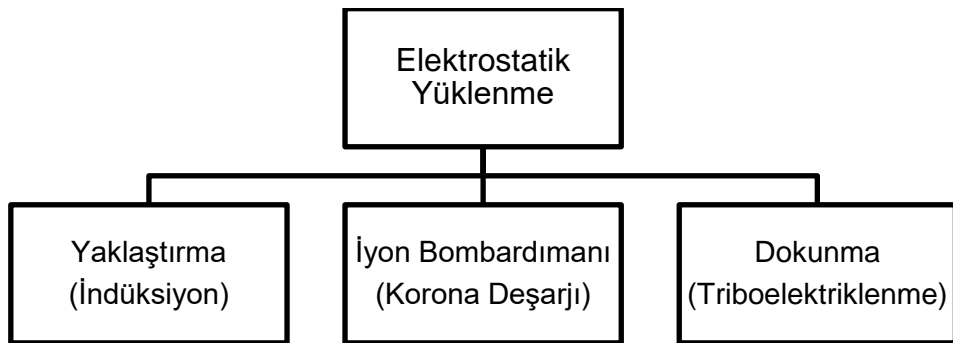
##### 3.1.1. Elektrostatik Yük

Tane yüzeyinde elektron fazlalığı veya eksikliği olması durumu elektrostatik yük olarak ifade edilebilir. Elektrostatik yükün oluşma mekanizmalarına aşağıdaki Şekil 3.1’ de yer verilmiştir.

Yaklaştırma ile yüklenmede parçacıkların polarize olması elektrik alana maruz kaldıklarında gerçekleşmektedir. Parçacıklar yüklü elektrotlara temas etmeden etki altında kalarak yük kazanmaktadır [13].

İyon bombardımanı ile yüklenmede gaz ortamında bulunan elektrotlar iki elektrot arasında uygulanan yüksek gerilim sonucunda iyonize olarak korona deşarjı oluştururlar. Oluşan bu korona iyon akışı bombardımanına uğrar ve parçacıklar yük kazanırlar [13].

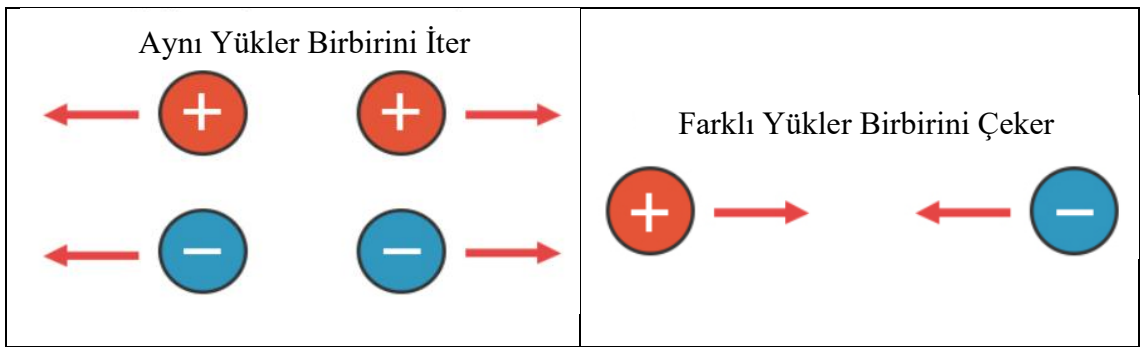
Triboelektriklenme ile yüklenme mekanizmasında birbirinden farklı yüklere sahip olan maddelerin birbirine sürtünerek veya dokunarak elektron aktarması sonucunda gerçekleşir. Günlük hayatta meydana gelen statik elektriklenme çoğunlukla triboelektrik kuvvet sonucunda gerçekleşmektedir [13]. Triboelektriklenme ile yüklenme mekanizması hakkındaki detaylı bilgiye aşağıdaki “Triboelektrik ile Yüklenme” bölümünde yer verilmiştir.



Şekil 3.1. Elektrostatik yüklenme mekanizmaları [12]

### 3.1.2. Elektrostatik Kuvvetler

Elektrostatik kuvvet aynı zamanda Coulomb kuvveti ve Coulomb etkileşimi olarak da bilinmektedir. Elektrostatik kuvvetler temas etmeden etki edilen objenin hareketinin nasıl olacağını etkileyen kuvvetlerdir [13]. Yüklü parçacıklar arasındaki etkileşim sonucunda elektrostatik kuvvet açığa çıkar. Pozitif ve negatif olmak üzere iki tür yük bulunmaktadır. Eğer iki madde birbirleriyle aynı yüke sahipler ise birbirlerini itme kuvveti uygularlar (Şekil 3.2). Eğer iki madde birbirlerinden farklı yüklere sahiplerse birbirlerini çekme kuvveti uygularlar [14].



Şekil 3.2. İtme ve çekme mekanizmaları [14]

İki yüklü madde arasındaki elektrostatik kuvvetin miktarını ölçmek için Coulomb bir formül geliştirmiştir. Bu formül Coulomb yasası olarak bilinmektedir. Bu yasaya göre, elektrostatik kuvvet iki yüklü maddenin yüklerinin çarpımı ile doğru orantılı olurken; aralarındaki mesafenin karesiyle ters orantılıdır [13].

$$F = \frac{k \times (Q_1 \times Q_2)}{r^2} \quad \text{Eşitlik 3-1}$$

Formüldeki “F” iki obje arasındaki kuvveti;  $Q_1$  ve  $Q_2$  iki maddenin yüklerini ve  $r$  bu iki tane arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Coulomb sabiti olarak formülde yer alan “k” yüklü maddelerin bulunduğu ortama göre değişmektedir. Örneğin vakum ortamındaki  $k$  sabiti değeri yaklaşık olarak  $8,9875517923 (14) \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-4} \cdot \text{A}^{-2}$  ‘dir [14].

Yukarıda özetlendiği üzere elektrik yüklü taneciklerin birbirleri ile etkileşimleri ve yüklerinin değerlerine bağlı olarak birbirlerini veya farklı yükte olan bir malzeme

tarafından çekilmeyebilmelerini açıklamak mümkün olmaktadır. İşte bu çekim kuvveti sayesinde ortamlarda bulunan hava içindeki tozun bir yüzey, plaka veya özel olarak hazırlanmış bir toplama elektrodu üzerinde toplanması mümkün olmaktadır. Bu uçucu tozların sayede havadan ayrılması ve havanın temizlenmesi mümkün olmaktadır. Aynı zamanda elektriksel çekim farklı iletkenlikteki tanelerin de birbirinden ayrılmasında da uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir.

### **3.1.3. Elektrostatik Ayırma**

Elektrostatik ayırma ile malzemelerin zenginleştirilmesi 140 yılı aşkın bir süredir araştırılmakta olup, ilk elektrostatik ayırıcı patenti 1800'lü yılların sonunda alınmıştır. Thomas Edison 1890'ların sonlarında, su yokluğunda manyetik olmayan demir cevherini kum benzeri parçacıklardan ayırmak için bir makine tasarlamıştır. Tasarladığı bu ayırıcıyı geliştirerek, 1900'lerde Ortiz Dağları'ndaki (New Mexico) "Altına Hücum" sırasında altını kumdan ayırmak için kullanmıştır. Elektrostatik prensipleri kullanan ilk altın ayırıcısının patentini almasıyla sonuçlanmıştır. Böylelikle 1900'lü yılların başlarında elektrostatik ayırma ile zenginleştirme popüler bir hale gelmiştir [15] [16].

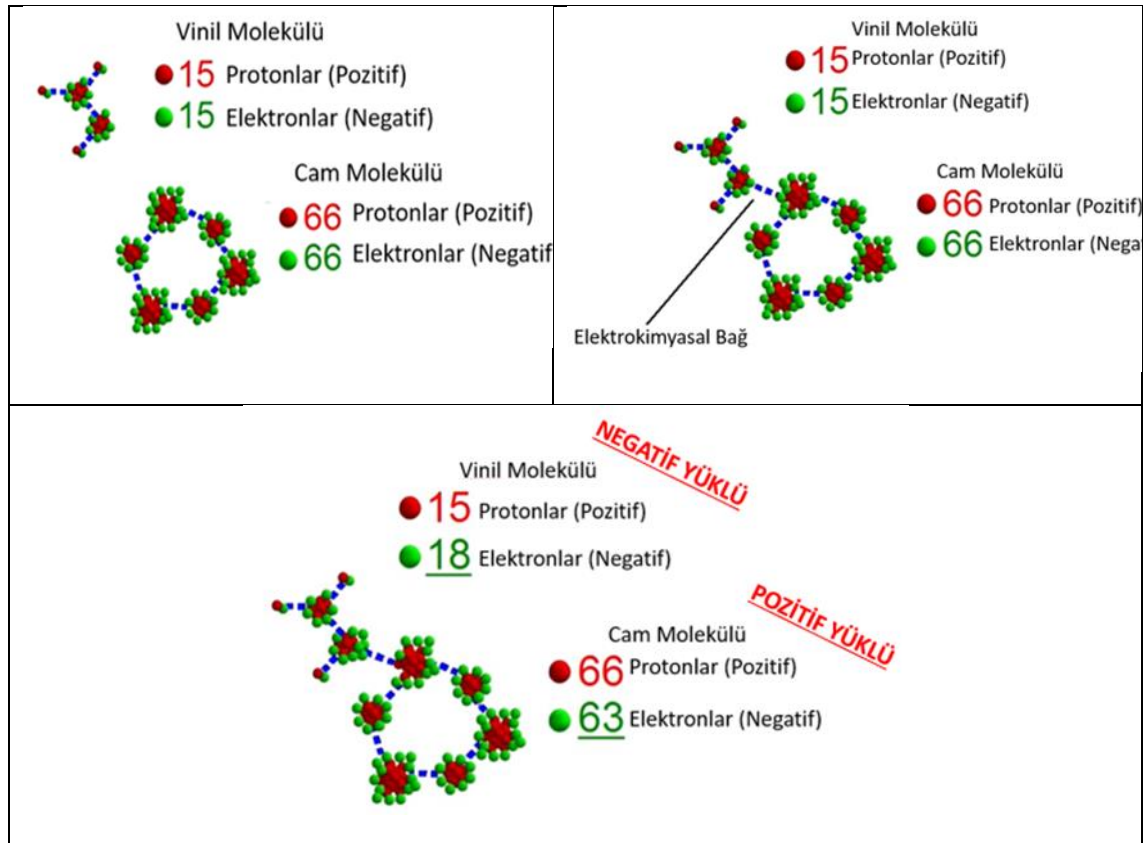
Elektrostatik kuvvet elektrik yüklerinin birbirine kuvvet uygulaması sonucu doğar, Coulomb yasası ve Gauss yasası ile incelenir [14]. Elektrostatik kuvvet, parçacıkları kontrol etmek için yaygın olarak kullanılır. Parçacıkların elektrik iletimine verdiği tepki elektriksel direnç olarak adlandırılmaktadır. Elektriği kolay ileten parçacıkların elektriksel direnci düşük olurken, elektriği zor ileten parçacıkların elektriksel direnci yüksek olmaktadır [13] [14]. İletkenlikteki bu farklılık tanelerin farklı şekilde statik yük kazanmasını sağlar ve bu şekilde tanelerin birbirinden ayrılması mümkün olur. Yük alışverişi parçacıkların yüzeylerinin birbirine her temas edişinde gerçekleşmesine rağmen, bu alışverişin etkisi sadece parçacıklardan birinin daha yüksek elektrik direnci olduğu durumlarda gözlenmektedir. Bu özellik parçacıkların iletken, yarı iletken veya yalıtkan olmalarına sebep olan özelliktir. İşte bu temel özellik hem taneleri birbirinden ayırmakta hem de buldukları hava ortamlarından çekerek bir yüzeyde toplanıp uçuşma özelliklerini, dolayısı ile havayı kirletmelerini engellemek amacıyla kullanılabilir. Taneleri birbirlerinden ayırmak amacıyla elektrostatik ayırıcılar kullanılırken, toz içeren havaların temizlenmesi amacıyla da elektrostatik filtreler geliştirilmiştir. Tanelerin elektrikle yüklenmesi bir elektrik alanındaki elektron bombardımanı, elektrik yüklü bir yüzeye sürtünme veya birbirlerine/farklı bir malzemeye sürtünme ile mümkün olurken, yüklemeyi yapmak amacıyla statik yük oluşturan, özel bir güç ünitesi ve trafo sistemi

gerektiren bir elektrik kaynağı kullanılmaktadır. Diğer taraftan bu çalışmanın ana konusunu teşkil eden sürtünme ile de ihtiyaç duyulan statik yükün oluşturulması mümkündür.

### 3.2. Triboelektrik

#### 3.2.1. Triboelektrik ile Yükleme

Tribo-yükleme (tribocharging) etkisiyle, tanelerin doğal yüzey yükleri değişmektedir [16] [17]. Taneler birbirlerine dokunduğunda moleküler büyüklükte kimyasal bağ açığa çıkmaktadır. Oluşan kimyasal bağ koparıldığında tanelerin sahip oldukları moleküller arasında elektron alışverişi olmaktadır [18] [19]. Moleküller arasında oluşan elektrokimyasal bağ sonucunda oluşan statik yük için örnek olarak vinil ve cam molekülleri aşağıdaki yer alan Şekil 3.3' te verilmiştir.



Şekil 3.3. Moleküller arasında oluşan elektrokimyasal bağ sonucunda oluşan yükleme mekanizması

Tribo-yüklenmeyi etkileyen dört temel faktörden sözedilebilir. Bunlar yüzey temasının etkisi, elektronegativite, geri yüklenme ve gaz/hava dağılımı olarak sıralanmaktadır [20]. Elektronegatiflik, malzemenin serbest halde olan elektron yakalayabilme yatkınlığıdır.

Malzemenin elektronegatifliği arttıka elektron verme eğilimi azalacaktır. Düşük elektronegatifliğe sahip malzemelerin elektron verme eğilimi daha fazla olduğu için pozitif yükü yüklenmektedirler. Dolayısıyla yüksek elektronegatifliğe sahip malzemeler düşük olandan elektron kopartma eğiliminde olacaktadırlar. Yüzeylerin ayrılması sonucunda bağlar kopar ve asimetrik bağlar ise dengesiz yükler bırakır. Temasların kesilmesi sonrasında oluşan yükler sebebiyle yük dengesizlik durumu yaşanır ve malzemeler ilk duruma tekrar dönme eğilimi sergilerler. Bu duruma geri yüklenme denir. Bu eğilim tribo-yüklenme de istenmeyen bir durum olarak sınıflandırılabilir çünkü oluşan yükleri düşürmektedir. Tanelerin yüzeylerinde genelde mikroskobik çukur ve tepeler bulunmaktadır. Bu çukur ve tepelerin arasında sıkışan hava yalıtkan bir ortam yaratabilir. Gaz/hava dağılımı tribo yüklenmeyi etkiler, sıkışan gazın basıncı ve sıkıştığı alanın büyüklüğüne göre elektrik yüklenmesi değişmektedir [20] [21].

Triboelektrik efekt veya sürtünme ile elektriklenme evrensel niteliğe sahiptir ve son yıllarda bir çok çalışmanın konu başlığı olmuştur. Son yıllarda yapılan triboelektrik nanogeneratörler, iki yüzeyin sürtünmesi sonucunda ortaya çıkan potansiyel fark sonucu mekanik/termal enerjiyi elektriğe dönüştüren bir teknoloji türüdür [21].

### **3.2.2. Triboelektrik Seri**

Triboelektrik seri, farklı polimer yapıları, mineraller, metaller ve günlük hayatta kullandığımız çeşitli malzemelerin birbirlerine temas ettiklerinde nasıl yüklenmelerine ilişkin genel bilgi sağlar. Triboelektrik serisi malzemelerin elektron kazanma veya kaybetme eğilimlerine göre sıralama yapan bir listedir (Şekil 3.4). Johan Carl Wilcke, statik yüklerin listelenmesi üzerine yazılan makalenin ilkinin yazarıdır ve makaleyi 1757 de yayınlamıştır [18]. Malzemeler başka bir nesneye temas ettiklerinde yük ayrımının polaritesine göre listelenir. Temas sonucunda malzemelerin birbirlerini pozitif veya negatif yükleme durumları ve yüklenme kuvvetleri bu liste ışığında genel anlamda anlaşılabilir. Serinin pozitif tarafında bulunan bir malzeme, serinin negatif tarafında bulunan bir malzemeye temas ettirildiğinde/sürtüldüğünde pozitif yüklenir diğer malzemesi ise negatif yüklenir [1] [22].



Şekil 3.4. Triboelektrik seri [18]

Sürtünme ile oluşan statik yükün kullanımına yönelik yapılmış olan bir çalışma mevcuttur [1]. Bu çalışma triboelektrik serisinin her iki ucundan seçilmiş olan çok sayıdaki farklı malzeme ile statik yük toplanmış ve ayırma amaçlı kullanılmıştır. Bu çalışmada serinin farklı taraflarından seçilen malzemeler ile hem toplanan yükün şiddeti hem de işareti değiştirilebildiği ortaya konulmuştur. Bu da sürtünme ile elde edilen statik yükün amaca bağlı olarak farklı alanlarda kullanılabileceğinin önemli bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

Metallerin sürtünme sonucu elde edilen şarj polimerlerden daha kolay anlaşılabilir. Ancak bu malzemelerin tutarlı olarak gözlemlenebildiği bir şarj modeli bulunmaktadır. Özellikle yalıtkanlar ve organik polimer malzemeleri, örneğin naylon gibi en pozitif yüklü olanlardan halojenli polimerler gibi en negatif yüklü olanlara kadar elde edilen temas yükünün polaritesi hakkındaki triboelektrik seri Diaza ve Felix-Navarro tarafından düzenlenmiştir. Bu triboelektrik seriye göre, seride daha yüksek konumdaki malzemeler ile, seri boyunca daha düşük konumdaki bir malzeme ile temas ettiklerinde pozitif yüklenme söz konusu olacaktır [18].

Triboelektrik serinin en pozitif yüklü olan malzemeler saç, naylon ve camdır; en negatif yüklü olan malzemeler ise sert kauçuk (ebonit), silikon lastik ve teflondur. Triboelektrik



seride yer alan iki malzeme arasındaki mesafe ne kadar artarsa elektron alışverişinin de o kadar fazla olacağı tahmin edilmektedir [20].

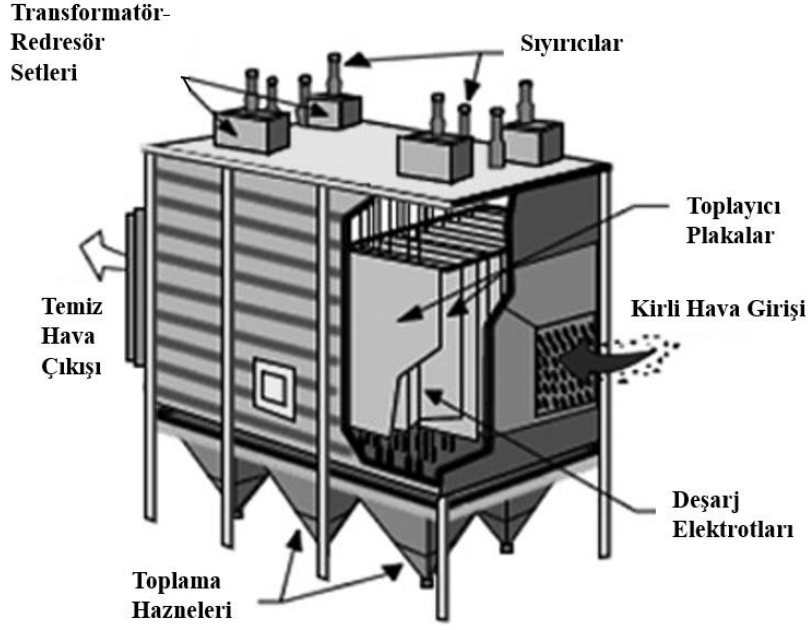
## 4. ELEKTROSTATİK FİLTRE

### 4.1. Konvansiyonel Elektrostatik Filtreler

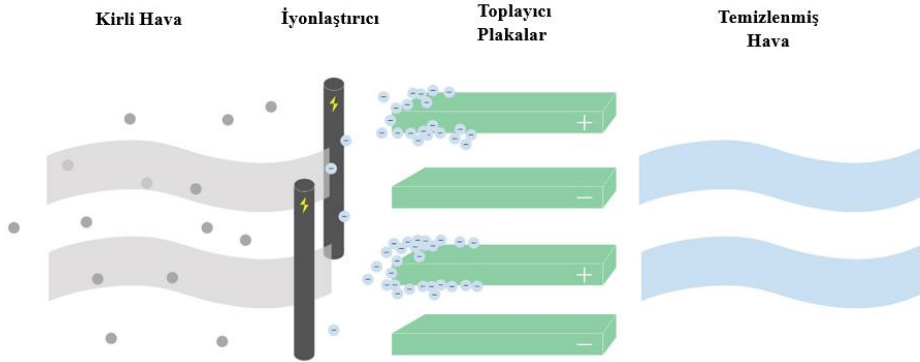
Partiküler maddelerin havada asılı kalması, endüstriyel tesislerin bir çoğunda önemli bir sorun teşkil etmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ‘nün yayınladığı ‘Hava Kalitesi Yönergesi’ inde de mikron altı, nano partiküllerin kısa ve uzun vadede kanser, kardiyovasküler rahatsızlıklar, akciğer rahatsızlıkları gibi pek çok ciddi sağlık sıkıntılarına sebep olduğu göz ardı edilemez durumda olduğunu görülmüştür. Dünya Sağlık Örgütü’nün raporuna göre, dünyada her 10 kişiden 9’u kirli hava soluyor ve yılda 7 milyar insan hava kirliliğinin sebep olduğu hastalıklar yüzünden hayatını kaybetmektedir. Hava kirliliği sebeplerinden olan partikül maddelerin varlığının artması insan sağlığının üstündeki olumsuz etkisi açıkça görülmektedir [9] [10] [11].

Açığa çıkan bu toz tanelerinin havadan ayrılması için endüstriyel tesislerde yer alan konvansiyonel havalandırma yetersiz kalmaktadır ve bu sebepten ötürü elektrostatik filtreler ihtiyacı duyulmaktadır. Elektrostatik filtre teorisi, 19. yüzyılda klasik filtreleme teoreminden geliştirilmiştir. Bitki bilimci Brown tarafından 19. y.y. başlarında ince tanelerin sıvı ortam içerisindeki hareketleri keşfedilmiş, sıvı ortamda asılı kaldıkları gözlemlenmiştir ve bu hareket Brownian hareketi olarak tanımlanmıştır. Bu keşif ardından ince tanelerin varlığında ve hava ortamında da sıvı da oldukları gibi asılı kaldıkları yapılan birçok çalışmada görülmüştür [11].

Elektrostatik filtrelerde (Şekil 4.1), elektrotlar arasında giren havanın içerisinde bulunan partiküler boyutlu tanelerin yüzey yüklerinin elektrotlar tarafından manipüle edilmesi sonucunda pozitif veya negatif yüklü elektrota doğru çekilmesi sonucunda havadan ayrılarak, yakalanmaktadır (Şekil 4.2). Elektrostatik filtreler ortamdaki havanın içerisinde bulunan mikronize boyutlu parçacıkların yakalanması için kullanılmasının yanı sıra termik santrallerin baca çıkışlarında kullanılmaktadır. Kül tutucu olarak kullanılan tellerden çıkan negatif elektronlar nötr durumda olan toz tanelerine çarparak onları negatif iyon haline getirir. Böylelikle negatif yüklemiş olan toz taneleri, pozitif yüklü olan sac elektrotu tarafından çekilirler, levha yüzeyine yapışırlar ve gazdan ayrılırlar. Levhaların temizlenmesi için otomatik bir silkme sistemi kullanılır ve belli periyotlarla levha yüzeyleri tozdan arındırılır. Levhalar tarafından yakalanan kömür külleri, çimento endüstrisinde fırınlarda tekrardan kullanılabilir [23] .



Şekil 4.1. Konvansiyonel elektrostatik filtre [24]



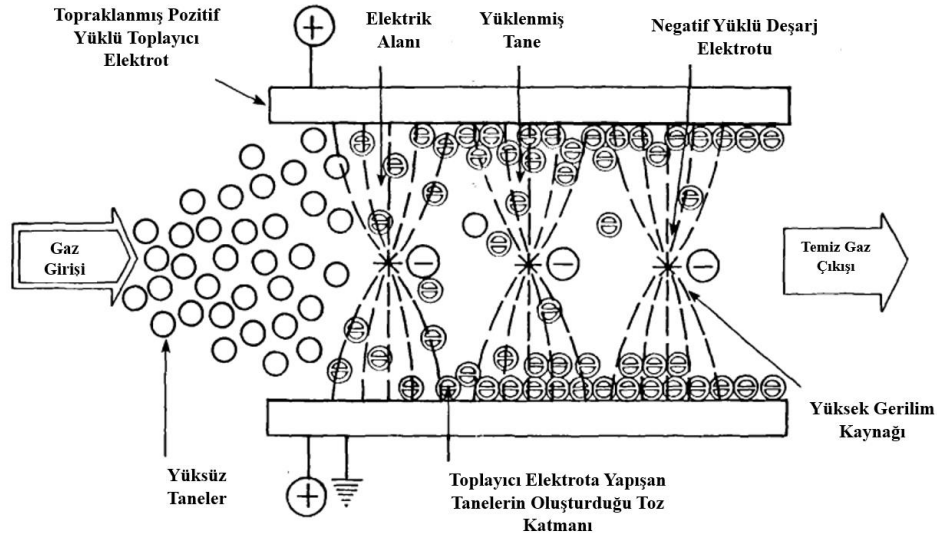
Şekil 4.2. Elektrostatik filtrelere giren kirli havanın, partiküllerden arındırılarak temizlenme aşamaları

#### 4.2. Elektrostatik Çöktürücüler (ESP)

Elektrostatik çöktürücüler (ESP), elektrofiltrelerin bir türü olarak değerlendirilmektedir. Endüstriyel ortamlarda bulunan partikül maddenin havadan yüksek bir verimle gidermesinden ötürü endüstride sıklıkla tercih edilmektedir. Elektrostatik çöktürücüler ince parçalar için yüksek yakalama verimine sahiptir [24].

Bu cihazlar gaz akışı içerisinde bulunan partikülleri, elektrik enerji kullanarak yükler ve gaz ortamından temizler. Yüklenen parçacıklar zıt yüklü toplayıcı elektrot tarafından tutulur

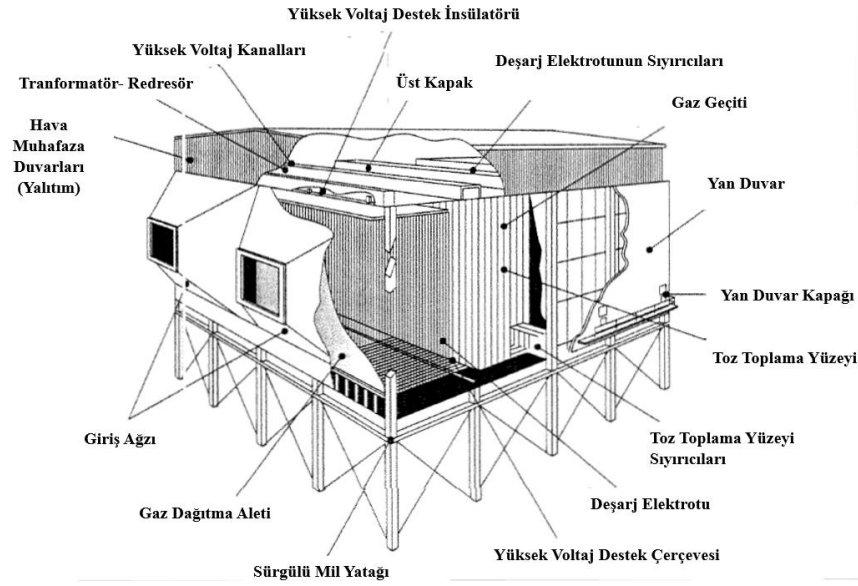
(Şekil 4.3) . Partiküler maddeler kuru ya da yaş olarak kullanılabilir. Kuru elektrostatik çöktürücülerin toz toplama plakaları çırpma sistemleri ile temizlenirken; yaş elektrostatik çöktürücülerin toplayıcı plakaları, elektrot yıkama çözeltileriyle temizlenir. [25].



Şekil 4.3. Elektrostatik çöktürücülerin temel prosesi [13]

Elektrostatik çöktürücüler temel olarak dört bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; gaz dağıtım plakaları, deşarj elektrotları, toplama yüzeyleri (plaka veya boru şeklinde olabilmektedir) ve sıyırıcı olarak sayılabilmektedir [26].

Gaz dağıtım plakaları bir çok delikli plakalardan oluşur ve düzgün akış dağılımı sağlamak için kullanılır. Deşarj elektrotları çöktürücü içerisinde alanlara ayrılmıştır. Genellikle elektrostatik çöktürücülerde üç veya dört alan serisi yer almaktadır. Ancak büyük yapılar çöktürücülerde on dört alan serisine kadar bulunabilmektedir. Deşarj elektrotunun güç ihtiyacı transformatör-redresör (T-R) ile karşılanmaktadır [27]. Yüklenen elektrotlar iyon bulutu oluşturarak gas akışının içerisinde yer alan parçacıkların yüzey yüklerini etkileyerek (elektron bombardımanı) elektriksel yük kazanmalarını sağlamaktadır. Yakalama plakaları veya boruları tarafından yakalanan parçacıklar bir toplama sistemi ile sistemden uzaklaştırılır. Sıyırıcı sistem parçacıkların toplandığı birikme zonunu temizleyerek, yakalanan taneleri sistemden uzaklaştırır (Şekil 4.4) [25] [26].



Şekil 4.4. Elektrostatik çöktürücünün bileşenleri [26]

#### 4.2.1. Elektrostatik Çöktürücülerin Bileşenleri

Elektrostatik çöktürücüler temel olarak aşağıda yer alan birincil bileşenlerden oluşur.

##### 4.2.1.1. Deşarj Elektrotları

Deşarj elektrotu, elektrostatik çöktürücülerin elektriksel karakteristiğini belirlediği için oldukça önemli bir bileşendir. Korona üretimi için kullanılan bu elektrotlar genellikle düşük voltaja ihtiyaç duyarlar. Genellikle dairesel tel formunda deşarj elektrotları elektrostatik çöktürücülerde tercih edilmektedir. Deşarj telleri dik olarak asılır ve mekanik streslere dayanıklı olarak tasarlanır [26]. Bu teller genellikle paslanmaz çelik, alüminyum, bakır ve titanyum alaşımı ile kaplanır. Son yıllarda üretilen elektrostatik çöktürücülerde rijit tipli deşarj elektrotları kullanılmaktadır [28].

Endüstriyel boyutlu tesislerde kullanılması tercih edilen elektrostatik çöktürücüler genellikle negatif yüklü korona çalışma marjının geniş olmasından dolayı tercih edilmektedir. Pozitif koronanın ozon üretiminin negatife göre daha düşük olması sebebiyle ofis gibi çalışmalarında tercih edilir [29].

Korona deşarjından üretilen yükle yüklenen toz taneleri, zıt yük toplayıcı plakaların yarattığı elektriksel alanda plakalara yapışlar. Deşarj elektrotlarının ürettiği potansiyel yük toplayıcı plakalarla zıt yüklüdür [30].

Deşarj tellerinin ağırlıkları ayarlanarak toplayıcı plakaların aralarına yerleştirilir. Ağırlıklarının sisteme dengeli olarak yerleştirilmesi tellerin kırılmaması veya besleme hunisine düşmemesi için önemlidir. Bazı üreticiler, deşarj elektrotlarını tel formu yerine düz plaka formunda da üretmektedir [28]. Bunun sebebi, ortalama elektrik alanın yükselmesini sağlamak ve partiküllerin toplanması için ihtiyaç duyulan deşarj ve toplama plakalarının yüzey alanının artırılmasıdır [26].

#### **4.2.1.2. Toplayıcı Plakalar**

Toplayıcı plakalar mümkün olduğunca çok tane toplayarak yüksek toplama verimine ulaşmak için dizayn edilmiştir. Plakalar, meydana gelebilecek korozyonu önlemek için bazı durumlarda paslanmaz çelik veya alaşımlı çelik kullanılarak imal edilmektedir. Bir toplayıcı plakanın kalınlığı 0,05 – 0,2 cm aralığında; plakalar arasındaki boşluk 15 - 30 cm aralığında olmaktadır [26].

#### **4.2.1.3. Yüksek Voltaj Üretim Ekipmanı**

Deşarj elektrotu ve toplama plakası arasındaki elektrik alanı yaratan yüksek gerilim ekipmanı, elektrostatik çöktürücülerin kalbi niteliğindedir. Elektrik alanı (statik yük) üç bileşen kullanılarak elde edilir: yükseltici transformatör, yüksek voltajlı güç kaynağı setleri ve kontrol devresi. Bu güç setleri aynı zamanda transformatör- redresör (T-R) seti olarak da adlandırılmaktadır. Bir T-R setindeki transformatör, gazdaki parçacıkları yükleyen gaz moleküllerini iyonize etmek için voltaj değerinin 400 volttan yaklaşık olarak 50,000 volta yükseltilmesine katkıda bulunur. Yüksek voltajın üretimi korona deşarjı ve toplama elektrotlarında atlamaya neden olmaması için önemlidir [31]. Redresör alternatif akımı direkt akıma çevirir. Modern elektrostatik çöktürücülerin bir çoğu direkt akım kullanmaktadır. Kontrol devresinde elektrik güç girişindeki değişikliği gözlemlemek için sayaçlar bulunur. Bu sayaçlar, birincil voltmetre, ikincil voltmetre, ikincil ampermetre ve kıvılcım ölçer olarak sıranabilmektedir [26].

#### **4.2.1.4. Sıyırıcılar (Çırpıcılar)**

Plakalarda biriken toz tabakasının titreşerek silinmesi işlemi sıyırma işlemi olarak adlandırılır (Şekil 4.5). Toplayıcı elektrotların yüzeyinde biriken tozların çırpılarak sistemden uzaklaştırılması, toz yakalama sürecinin devamlılığını sağlamak için önemlidir [32].



Şekil 4.5. Elektrostatik çöktürücülerin toplayıcı plakaları çırpma sistemi [31]

Elektrotlara iletilen mekanik darbeler ve titreşimlerle toplama ve boşaltma tellerinde biriken toz silkelenerek dökülür. Operasyonel koşullara göre sıyırıcıların çırpma yoğunluğu ve sıklığı ayarlanmaktadır. Toplama plakaları iki yöntemle sıyırılır: çekiçleme veya manyetik darbe ile plakaların çırpılması sözkonusu iken ikinci yöntemde teller için titreşim verici cihazlar kullanılır [26].

#### **4.2.1.5. Besleme Haznesi**

Besleme haznesi, havadaki tozun toplandığı, yan duvarından boşaltma açıklığına serbestçe akmasına izin veren bir kutu şeklindedir. Elektrostatik çöktürücülerin toplama plakalarının bulunduğu kısma besleme sağlayan bu haznelerin yan duvarlarında titreşim cihazları bulunur. Bu sayede hazne duvarlarına yapışmış olan tozun büyük bir çoğunluğunun temizlenmesi ve sisteme girmesi sağlanır [26].

Elektrostatik çöktürücülerin performansları, tanelerin sahip olduğu dirençten etkilenmektedir. Tane direnci, çökme miktarı/hızını ve plakalar tarafından yakalanan tanelerin temizlenmesinde büyük bir rol oynamaktadır. En ideal durum, yakalayıcı plakalara ulaşan yüklü parçacıkların yüklerinin bir kısmını plakaya ulaştıklarında tutulabilecek kadar yüke sahip olmalarıdır. Bunun tersi senaryolarda fazla yüklenen veya yükünü kaybetmeyen tanecikler, yakalayıcı plakaya ulaşmadan birbirlerine bir çekim kuvveti uygulayarak çökebilirler ve bunun sonucunda sistemi terk edemeyip istenmeyen bir toz partikül birikmesine sebep olarak verimi düşürürler. Bu durumun gerçekleşmemesi için tanelerin ılımlı (ortalama) bir dirence sahip olmaları beklenmektedir. Eğer taneler yüksek dirence sahip olursa, yüklerini kaybetmede oldukça yavaş olacaklardır ve bunun sonucunda plakaların zamanla toz yakalama kabiliyetleri düşecektir. Diğer bir taraftan eğer düşük dirence sahip olurlar ise, plakaya

yaklaştıklarında yüklerini çabucak kaybedecekleri için nötr bir forma ulaşacaklarından plakanın sahip olduğu yükü kazanacaklar, bunun sonucunda plaka tarafından iterek hava akışının içerisine geri döneceklerdir [26].

Elektrostatik çöktürücülerin (ESP) başlıca performans göstergeleri şunlar olarak sıralanabilir; partikül madde çıkış konsantrasyonu (bu parametre partikül madde sürekli emisyon izleme sistemi (CEMS) ile kontrol edilebilmektedir), opaklık, ikincil korona gücü, ikincil voltaj (elektrotlar arasındaki voltaj) ve ikincil akım (elektrotlara giden akım) olarak sıralanabilmektedir [31]. Bu parametrelerin yanında ikincil olarak sıralanabilecek parametreler ise şunlardır; elektrik oranı, birincil akım, birincil voltaj, giriş gazı sıcaklığı, gaz akış hızı, sıyıcıların çalışması ve oluşan elektrik alanlarının sayısıdır [26].

Parçacıklar plakalar üzerinde toplandıktan sonra, gaz akışı beslemesi yapılmadan önce yakalayıcı plakalar temizlenmelidir. Bu temizliğin gerçekleştirilebilmesi için plakalar gevşetilir ve toplanan parçacıkların toplayıcı huniye doğru akmasına zaman tanınır. Bazı elektrostatik çöktürücüler de ise yakalanan partiküler maddeler aralıklı veya sürekli su ile yıkanarak sistemden uzaklaştırılır [25] [26].

Aşağıda bahsedilen alt bölümlerde elektrostatik çöktürücülerin elektriksel çalışma noktalarının, parçacık yüklenmenin, parçacık toplamanın hakkında bilgiler verilmiştir.

## 4.2.2. Elektrostatik Çöktürücülerin Parametreleri

### 4.2.2.1. Elektriksel Çalışma Noktası

Bir elektrostatik çöktürücünün elektriksel çalışma noktası, bölümün çalıştığı gerilim ve akımın değeridir. Partiküller elektrotlar tarafından en verimli yakalandığı yer en yüksek gerilime karşılık gelen en yüksek elektrik alanı mevcut olduğunda gerçekleşir [26] [27]. Kabul edilebilir en düşük voltaj, parçacıkları şarj etmek için iyonlar üreten elektriksel deşarj olan bir korona oluşumu için gereken voltaj değeridir [30]. Negatif korona, kozmik bir ışın tarafından üretilen yüksek voltajlı elektrodun yakınında ara sıra serbest bir elektron üretmek için elektrik alanından yeterli enerji kazandığında üretilir. Bu işlemin kendi kendine devam ettiği elektrik alan deneysel olarak belirlenmiştir. Dairesel teller için yüzeysel elektrik alanı şu şekilde yapılır [26]:

$$E_c = 3,126 \times 10^6 d_r \left(1 + 0,0301 \left(\frac{d_r}{r_w}\right)^{0,5}\right) \quad \text{Eşitlik 4-1}$$

$E_c$  = tel yüzeyindeki korona alan kuvveti başlangıç değeri (V/m)



$d_r$  = bağıl gaz yoğunluğu (1 atm basınç ve 20°C değerleri için)(birimsiz)

$r_w$  = telin çapı, metre (m)

Elektriksel alan değerini elde etmek için tele uygulanması gereken gerilim,  $V_c$ , telden gelen elektrik alanın plakaya entegre edilmesiyle bulunur. Alan, silindirik geometride basit bir “1/r” bağımlılığını takip eder. Bu, voltajın elektro boyutlarına logaritmik bir bağımlılığına yol açar. Levha tel geometrisinde, alan bağımlılığı biraz daha karmaşıktır ancak voltaj yine de logaritmik bağımlılık gösterir [26].  $V_c$  yi elde etmek için aşağıda formül uygulanır:

$$V_c = E_c \times r_w \ln \left( \frac{d}{r_w} \right) \quad \text{Eşitlik 4-2}$$

$V_c$  = korona başlangıç voltajı (V)

$d$  = Dış silindir çapı (m)

Gerilim bu değere ulaşıncaya kadar akım akışı gerçekleşmez, ancak bu değer üzerinde gerilimler için akım miktarı hızla artış gösterir [26]. Doğrudan telin altındaki plaka veya silindir üzerindeki maksimum akım yoğunluğu (amper/metrekare) şu şekilde elde edilir:

$$j = \mu \in \frac{V^2}{L^3} \quad \text{Eşitlik 4-3}$$

$j$  = maksimum akım kapasitesi ( $A/m^2$ )

$\mu$  = iyon mobilitesi ( $m^2/Vs$ ) (metrekare/saniyedeki voltaj)

$\in$  = serbest boşluk geçirgenliği ( $8,845 \times 10^{-12}$  F/m) (Farad/metre)

$V$  = uygulanan voltaj (V)

$L$  = tel ve toplama yüzeyi arasındaki en kısa mesafe (m)

Kümelenmiş korona için doğrudan bir tutam altında birkaç yüz volt içinde neredeyse “ $j$  (maksimum akım kapasitesi)” değere sığmadığında, korona başlangıç voltajına ulaşıncaya kadar akım yoğunluğu sıfır olarak kabul edilir [26].

Telin yakınındaki bölge, oradaki iyonların varlığından güçlü bir şekilde etkilenir ve korona başlangıç voltajı büyüklüğü, güçlü uzamsal varyasyonlar gösterebilir. Korona bölgesi dışında oldukça üniform bir karakter gözlemlenir [26].

Tellerden toplayıcı plakalar boyunca en güçlü elektriksel alanın hesabını elde etmek için aşağıdaki formül uygulanabilir:

$$E_{max} = \frac{V}{L} \quad \text{Eşitlik 4-4}$$

$E_{max}$  = maksimum elektriksel alan kuvveti (V/m)

Tel ve plaka arasındaki boşluk boyunca elektrik alanı yeterince güçlü hale geldiğinde, bir kıvılcım oluşur ve ciddi bir kıvılcım oluşmadan voltaj yükseltilemez. Kıvılcımın meydana geldiği alan keskin bir şekilde tanımlanmamıştır fakar şu şekilde makul bir değer verilebilir [26]:

$$E_S = 6,3 \times 10^5 \left(\frac{273}{T} P\right)^{1,65} \quad \text{Eşitlik 4-5}$$

$E_S$  = kıvılcım alanı gücü (V/m)

$T$  = mutlak sıcaklık (K)

$P$  = gaz basıncı (atm)

Örneğin, 149°C sıcaklıkta (300°F) 11,4 santimetrelik (cm) bir levha-tel aralığı için 35.000 Voltluk bir voltaj değerine ulaşacaktır. Elektrostatik çöktürücüler genellikle arkada koronanın var olmadığı durumda bu gerilime yakın çalışacaktır. Bunun sonucunda  $E_{max}$  değeri  $E_S$ 'e eşit veya daha fazla olacaktır [26].

Katmandaki akım akışından kaynaklanan toz katmanındaki elektrik alanı yaklaşık  $1 \times 10^6$  V/m gibi kritik bir değere ulaşırsa kıvılcım çıkartmak yerine ters korona oluşabilir. Koşullara bağlı olarak, ters korona kıvılcımlanmayı arttırılabilir ya da voltajın daha fazla yükselemeyeceği seviyeye kadar çok akım üretebilir. Katmanlarındaki alan şu şekilde elde edilebilir [26]:

$$E_l = j\rho \quad \text{Eşitlik 4-6}$$

$E_l$  = toz katmanındaki elektrik alanı (V/m)

$\rho$  = yakalanan malzemenin sahip olduğu direnç. (ohm-m)

#### 4.2.2.2. Partikül Yüklenmesi

Partiküllerin yüzeylerine iyon bombardımanı yapıldığında partikül yüklenmesi gerçekleşmektedir. Bir iyon parçacığına yaklaştığında, parçacık içerisindeki görüntü yükü nedeniyle sıkıca bağlanır [13]. Görüntü yükü, gerçek bir yük iletken bir yüzeye

yaklaştığında meydana gelen yük bozulmasının bir temsilidir. Bozulma, gerçek yük ne kadar yüzeyin üzerindeyse, yüzeyin bir o kadar altında bulunan gerçek yüke zıt büyüklükteki bir yüke eşdeğerdir [13] [20]. Varsayımsal yük kavramı, aynadaki görüntü kavramına benzetilebilir. Bir parçacık üzerinde daha fazla iyon biriktikçe, toplam yük daha fazla iyonik bombardımanın önüne geçme eğilimine sahiptir [13].

İki temel şarj mekanizması bulunmaktadır. Bunlar: difüzyon şarjı ve alan şarjıdır [13]. Difüzyon yüklenmesi, iyonların termal kinetik enerjisinin parçacık üzerinde bulunan iyonların itme kuvvetinin üstesinden geldiği durumlarda yaşanır. Alan yüklenmesi, elektrik alan çizgilerini takip ettiğinde meydana gelir. Genel olarak, her iki mekanizma da tüm boyutlardaki parçacıklar için çalışır. Yanı sıra, alan şarjı çapı yaklaşık 2 mikrondan büyük parçacıklar için daha fazla bir yük yüzdesi ekler; difüzyon yüklenmesi yaklaşık 0,5 mikrondan küçük parçacıklar için daha büyük bir yüzde ekler [27].

Difüzyon yüklenmesi White tarafından parçacık üzerinde logaritmik olarak artan bir yük seviyesinde üretildiği aşağıda yer alan eşitlik ile elde edilmiştir:

$$q(t) = \left( \frac{rkT}{e} \right) \ln(1 + r) \quad \text{Eşitlik 4-7}$$

$q(t)$  = zaman fonksiyonuna göre tanenin yüklenmesi (saniye)

$r$  = parçacığın çapı (m)

$k$  = Boltzaman sabiti (j/K)

$T$  = mutlak sıcaklık (K)

$e$  = elektron yükü ( $1,67 \times 10^{-19}$  C)

$\tau$  = birimsiz zaman aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\tau = \frac{\pi r v N e^2 \theta}{kT} \quad \text{Eşitlik 4-8}$$

$v$  = iyonların ortalama termal hızı (m/s)

$N$  = parçacıkların yakınındaki iyon sayısının yoğunluğu (No/m<sup>3</sup>)

$\theta$  = gerçek zaman (yüklenme zonundaki maruziyet süresi (s))

Difüzyon yüklenmesi hiçbir zaman sınıra ulaşmaz. Sabit maruz kalma süreleri için bir parçacığın yükü yarıçap ile orantılıdır [26].

Alan şarjı karakteristik bir zamana bağımlılık sergiler. Bunun için aşağıdaki denklem kullanılır:

$$q_s = 12\pi \epsilon r^2 E \quad \text{Eşitlik 4-9}$$

$\epsilon$  = boş alan geçirgenliği

$E$  = parçacığa uygulanan dış elektrik alan (V/m)

Doyma yükü yarıçapın karesiyle doğru orantılıdır; alan yüklenmesinin neden daha büyük parçacıklar için baskın mekanizmaya sahip olduğunu açıklar. Alan şarjı süresi sabiti şu şekilde hesaplanır [26]:

$$r' = \frac{4\epsilon}{Ne\mu} \quad \text{Eşitlik 4-10}$$

$\mu$  = iyon akışkanlığı

Hem difüzyon hem de alan yükleme mekanizmaları sistemde tüm parçacıklar için aynı anda çalışır ve hiçbir mekanizma parçacıklar üzerinde ölçülen yükleri açıklamak için yeterli değildir. Ampirik olarak, ölçülen yük için yapılan en iyi yaklaşıma aşağıdaki eşitlikte yer verilmiştir [26].

$$q_{tot} = q_d(t) + q_f(t) \quad \text{Eşitlik 4-11}$$

$q_{tot}(t)$  = her iki mekanizmaya göre parçacık yükü

$q_d(t)$  = difüzyon yüklemesine göre parçacık yükü

$q_f(t)$  = alan yüklemesine göre parçacık yükü

### 4.2.2.3. Partiküllerin Toplanması

Toplama bölgesindeki elektrik alan, alan büyüklüğü ve yük ile orantılı olarak bir parçacık üzerinde kuvvet üretir:

$$F_e = qE \quad \text{Eşitlik 4-12}$$

$F_e$  = elektrik alana bağlı kuvvet (N)

$q$  = parçacık üzerindeki yük (C)

$E$  = elektrik alan (V/m)

Alan yükleme mekanizması, elektrik alanla orantılı bir nihai yük sağladığından, büyük parçacıklar üzerindeki kuvvet, alanın karesiyle orantılıdır ve mümkün olduğu kadar yüksek bir alanı koruma avantajı gösterir.

Gazın viskoz sürüklenmesi parçacıkların elektrik alanın etkisi altındaki hareketine karşı çıkar. Stokes yasasına göre parçacığın bu durumlardaki hızını elde edebiliriz:

$$v(q, E, r) = \frac{q(E, r) E C(r)}{6\pi \eta r} \quad \text{Eşitlik 4-13}$$

$v(q, E, r)$  = parçacığın hızı (m/s)

$q(E, r)$  = parçacığın yükü (C)

$C(r)$  = Stokes yasasındaki Cunningham sabiti (birimsiz)

$\eta$  = gaz viskozitesi (kg/ms)

Parçacık hızı, parçacığın elektrik alan çizgileri boyunca, yani duvarlara doğru hareket etme hızı olarak tanımlanabilmektedir. Uygulanan bir elektrik alan içersindeki 0,5 mikron çapındaki bir parçacığın hızı minimum seviyededir [2]. Daha küçük parçacıklar üzerine etkiyen yük fazla azalamayacağı için daha hızlı hareket ederler ancak Cunningham faktörü yarıçap düşüğe artmaktadır [26].

Elektrostatik çöktürücülerin, partikülleri toplama verimini hesaplamak için sıklıklar aşağıda yer alan eşitlik kullanılmaktadır [26].

$$Eff (\%) = 100 (1 - p) \quad \text{Eşitlik 4-14}$$

$p$  = etki etme (penetre)

### 4.2.3. Elektrostatik Çöktürücülerin Tipleri

Elektrostatik çöktürücüler kullanım amacına ve ekonomik nedenler göz önünde bulundurularak çeşitlendirilmiştir. Bu tipler şu şekilde sıralanabilmektedir;

- Levha-tel tipli çöktürücüler
- Düz levha tipli çöktürücüler
- Boru tipli çöktürücüler
- Yaş çöktürücüler
- İki aşamalı çöktürücüler

#### 4.2.3.1. Levha-Tel Tipli Elektrostatik Çöktürücüler

Endüstride en çok tercih edilen tek aşamalı elektrostatik çöktürücülerdir [24] [29]. Bu tip çöktürücüler endüstriyel tesislerde, kömür yakıtlı kazanlarda, çimento fırınlarında, katı atık yakma fırınlarında, kağıt üretim fabrikalarında, petrol arıtma katalitik parçalama ünitelerinde, sinter tesislerinde, bazik oksit fırınlarında, cam fırınlarında kullanılan en yaygın elektrostatik çöktürücüdür. Özellikle çimento tesislerinde elektrostatik çöktürücülerin kullanılması havada asılı kalan inert çimento tozu ve solunabilir kriztalize silikanın temizlenmesi için tercih edilmektedir [8].

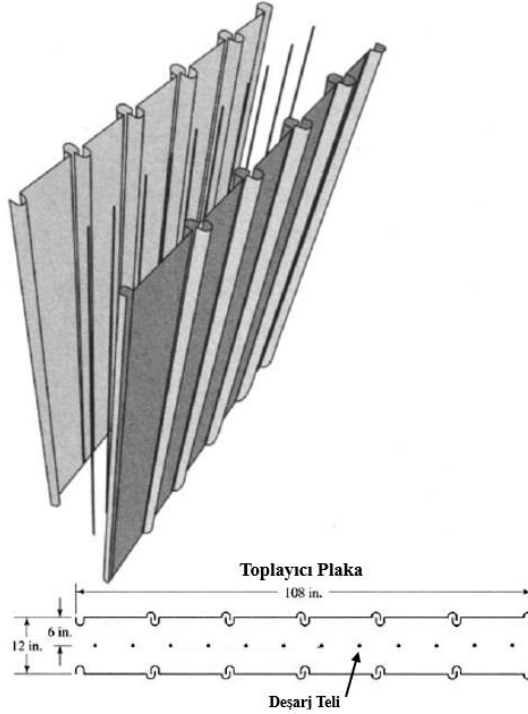
Kullanılan bu elektrostatik çöktürücüler deşarj elektrotları, toplama plakaları, silkeleme sistemleri ve gaz dağıtım sistemlerinden oluşmaktadır. Bir elektrostatik filtrenin en önemli kısmı olan toplama plakaları, 16 metre uzunluğuna kadar tek parça formunda üretilmektedir [28]. Endüstride kullanılan elektrofiltrelerin toplayıcı plakalarının uzunluk ve eni Çizelge 4.1'de verilmiştir [28].

Çizelge 4.1. Levha tipli elektrofiltrenin toplayıcı plakalarının genel özellikleri [28]

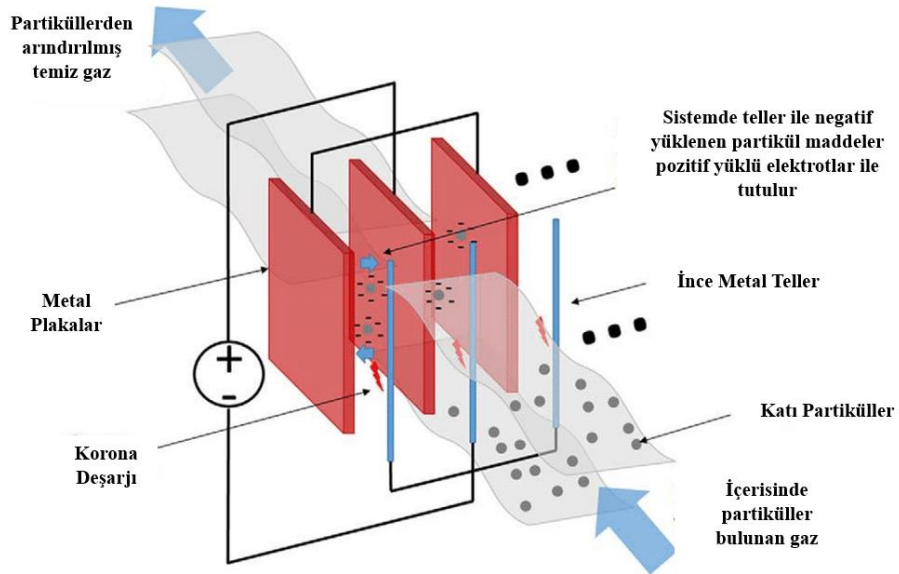
<b>Levha Tipli Elektrofiltrenin Toplayıcı Plakalarının Genel Özellikleri</b>	
<b>Toplayıcı Plakanın Uzunluğu</b>	9-16 m
<b>Toplayıcı Plakanın Eni</b>	5-8 m
<b>Gaz Akış Hızı</b>	1000-50000 m <sup>3</sup> /h

Levha-tel tipli elektrostatik çöktürücülerde (Şekil 4.6), hava akışı ince metalden imal edilmiş ve yüksek voltaja sahip plaka tipli elektrotlara paralel olarak gerçekleşir. Elektrotlar arasında asılı duran dikey teller ile desteklenmiştir. Her bir hava akışı sisteme girdiğinde ünite içerisindeki tellere temas ederek sistemi terk etmektedir. Plaka

şeklindeki elektrotlara yakalanan partikül maddeler, tellere de temas ettiği için teller tarafından da tutulmaktadır ve periyodik olarak plakalar gibi temizlenmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.6. Levha-tel tipli elektrostatik çöktürücünün bileşenleri [26]



Şekil 4.7. Levha-tel tipli elektrostatik çöktürücülerin çalışma mekanizması [28]

Elektrostatik çöktürücülerin güç gereksinimleri alternatif akımı (AC) 220-4802 Volt'u 20000 -100000 Volt arasında direkt akıma (DC) çevirerek karşılanır ve bu güç üretim ünitelerinde bu dönüştürmeyi sağlayan transformatör-redresör sistemi bulunmaktadır [26] [31].

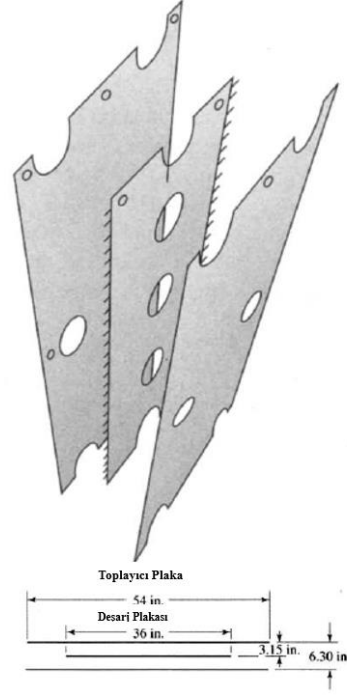
Elektrotlara uygulanan voltaj sonucunda elektrotların arasından geçen hava elektriksel olarak bir kırım yaşar ve buna "korona" denir. Bu elektrotlar genellikle negatif yük özelliği aktarır çünkü negatif korona pozitif koronadan daha yüksek bir voltaj sağlar. Korona da üretilen iyonlar tellerden elektrik alan çizgilerini takip ederek toplayıcı plakalara ulaşırlar. Partiküller yüklenme zonunundan geçerken bazı iyonlarla etkileşim yaşarlar ve tutulabilir forma ulaşırlar. Elektriksel güçler boyutça daha büyük tanelere daha kararlı ve güçlü davranırlar [13] [27].

#### **4.2.3.2. Levha Tipli Elektrostatik Çöktürücüler**

Daha küçük ölçekli çöktürücüler de levha tipi elektrostatik çöktürücüler tercih edilmektedir. Levha tipli çöktürücüler (Şekil 4.8), partiküllerin toplanması için ortalama elektrik alanı artırır aynı zamanda toplayıcı yüzey alanını da artmış olmaktadır. Korona, levha tipli plakalar tarafından üretilmediği için korona üretici elektrotlar toplayıcı levhaların önüne veya arkasına yerleştirilir. Bu elektrotlar, plakaların kenarlarına tutturulmuş sivri uçlu iğnelere veya bağımsız teller olabilir. Levha-tel tipli veya boru tipli elektrostatik çöktürücülerin aksine, bu tasarım negatif ve pozitif polarite ile eşit derecede iyi çalışır [26] [29].

Levha tipli çöktürücülerin yüksek dirence sahip küçük taneler (1-2 mikron) için kullanım alanı daha geniştir. Uçucu kül, bu tip elektrostatik çöktürücüler ile başarılı bir şekilde toplanabilmektedir. Ancak düşük hava akış hızı yüksek çarpma kayıplarından kaçınmak için kritik görünmektedir [26].

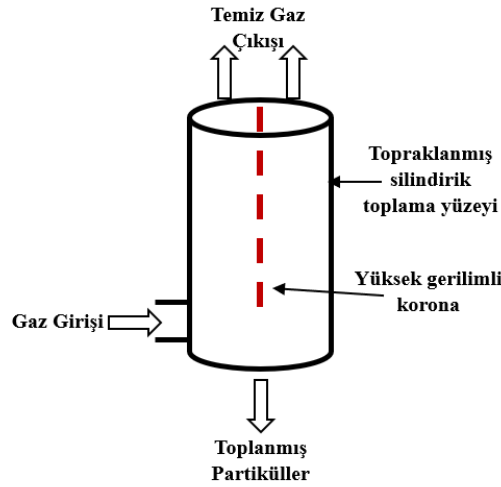




Şekil 4.8. Levha tipli elektrostatik çöktürücünün bileşenleri [26]

#### 4.2.3.3. Boru Tipli Elektrostatik Çöktürücüler

Borulu çöktürücüler (Şekil 4.9) sülfürik katkı tesislerinde, kok fırını yan ürün gaz temizlemede ve son zamanlarda demir ve çelik sinter tesislerinde tipik uygulamalara sahiptir. Bu tür boru biçimli üniteler, artan gaz akışlarını kontrol altında tutabilmek için hala kullanılmaktadır. Tüplerin şekilleri dairesel, kare veya altıgen petek şeklinde olabilir. Boruların uzunluğu istenen şekilde ve uygun toz yakalama verimine göre ayarlanabilmektedir [26].



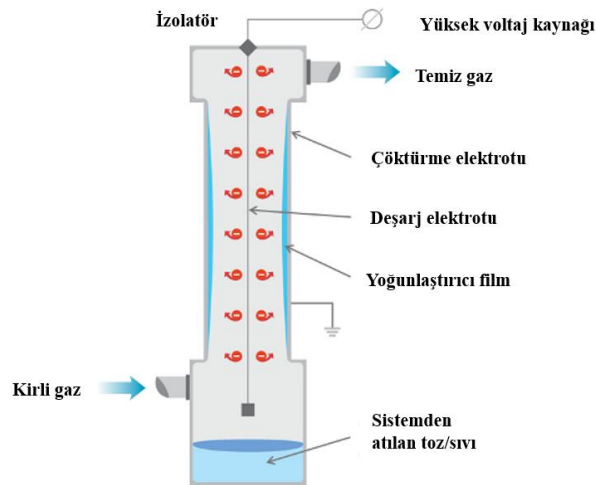
Şekil 4.9. Boru tipli elektrostatik çöktürücü

Boru tipli çöktürücüler esas olarak tek kademeli bir birimdir ve tüm gazın elektrot bölgesinden geçmesi bakımından benzersizdir. Yüksek voltaja sahip elektrot, tüpün tüm uzunluğunu boyunca tek bir voltaj değerinde çalışır ve parçacıklar sistemden uzaklaştıkça akım, borunun boyutuna göre değişir. Toplama bölgesinin etrafında hiçbir kaçak olmaz fakat koronada yaşanan düzensizlikle bazı parçacıkların borunun uzunluğunun önemli bir kısmında yüklenmeden yakalanamamasına ve kaçakların olmasına sebep olabilir [26] [29].

Bu tip elektrostatik çöktürücüler yaygın olarak kullanılmamaktadır ve partiküllerin yağ ve yapışkan olduğu yerlerde kullanımı daha çok tercih edilmektedir. Genellikle su ile temizlikleri sağlanır ancak bu temizlik yaşamasında su ile birlikte fazlaca kayıplar yaşanabilmektedir [26].

#### 4.2.3.4. Yağ Elektrostatik Çöktürücüler

Yukarıda bahsedilen çöktürücülerin herhangi biri, kuru yerine yağ olarak da çalıştırılabilir. Su akışı, toplanan partikülleri sistemden uzaklaştırılmak için bir hazneye belirli periyodlarla yıkanabilir ve bu yıkama işleme aralıklarla veya sürekli olarak gerçekleştirilebilir (Şekil 4.10). Bu çöktürücülerin avantajı, yeniden sürüklenme veya arka koronalar ile ilgili herhangi bir sorun yaşanmamasıdır. Bir diğer avantaj olarak özellikle yapışkan ve ince tane boylarının toplayıcı plakalarından temizlenmesi, ıslak ortamda daha kolay olabilmektedir [33]. Dezavantajı, yıkama işleminin artan karmaşıklığı ve toplanan bulamacın, kuru bir üründen daha dikkatli bir şekilde ele alınması gerekir ve bu total masrafı arttıracaktır [26].



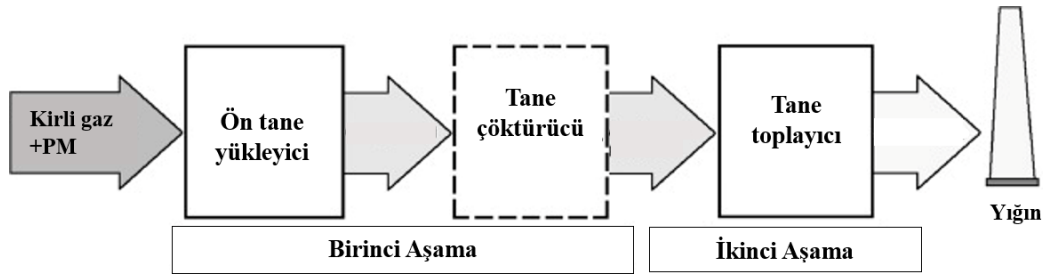
Şekil 4.10. Yağ elektrostatik çöktürücü [26]

#### 4.2.3.5. İki Kademeli Elektrostatik Çöktürücüler

İki kademeli elektrostatik çöktürücüler PM 2.5 boyutundaki tozları, geleneksel elektrostatik çöktürücülere göre daha yüksek verimle tutarlar [34]. Yukarıda bahsedilen bütün elektrostatik çöktürücüler paralel yapıdadır. Yani boşaltma ve toplama elektrotlarını yan yana yer almaktadır (Şekil 4.11). Penney tarafından geliştirilen iki kademeli elektrostatik çöktürücüler, toplayıcı elektrotlardan önce gelen deşarj elektroduna veya iyonlaştırıcıya sahip olan seri dizaynda bir sistemdir. İç mekan uygulamaları için ünite, ozon oluşumunu sınırlandırma için pozitif polarite ile çalıştırılır [26].

Bu seri sistemin avantajları, parçacıkların yüklenmeleri için daha fazla zaman yaratması ve arka korona için daha az eğim olarak sıralanabilir [29]. Bu tür çöktürücüler genellikle 50,000 acfm ve daha az gaz akışı hacimleri için kullanılır ve toplanan parçacıklar üzerinde tutmak için çok az elektrik kuvvetine ihtiyacı olduğundan yağ sisi, duman veya diğer yapışkan parçacıklar yayn mikronize boyutlu malzemelerde kullanılabilir. Bu sistem, mekanik bir ön filtre, iyonlaştırıcı, toplama plakası hücresi, son filtreleme ünitesi ve güç kaynağından oluşur. Gazların ön şartlandırılması normalde sistemin bir parçasını oluşturmaktadır [26].

İki kademeli çöktürücüler, büyük, yüksek gaz hacimli, tek kademeli elektrostatik çöktürücülere kıyasla ayrı ve farklı cihaz türleri arasında kabul edilmektedir [26].



Şekil 4.11. İki kademeli elektrostatik çöktürücü [26]

## 5.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 5.1. Triboelektrostatik Toz Tutucu Filtrenin Tasarımı ve Kurulumu

Kurulumu gerçekleştirilen triboelektrostatik ayırıcı başlıca iki bölümden meydana gelmektedir. İlk bölüm statik elektriğin üretildiği kısım, ikinci bölüm ise toz yakalama işleminin gerçekleşeceği filtre bölümüdür.

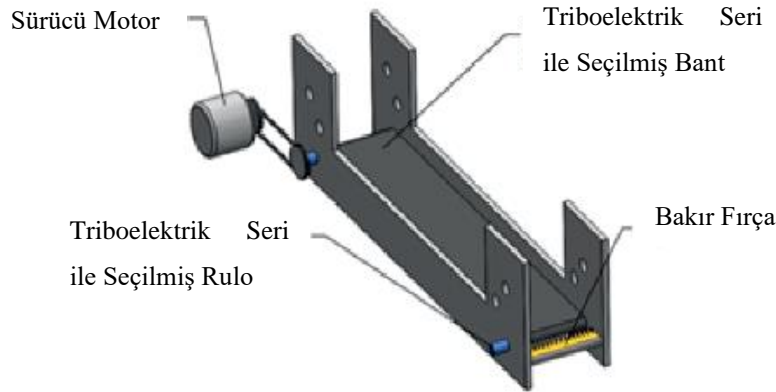
İlk birim birim triboelektrik serinin farklı uçlarından seçilmiş iki farklı malzemenin birbirine sürekli olarak sürtünmesini sağlayan bir hareket mekanizmasına sahip olan birimdir. Üretilen yük buradan bakır fırçalarla toplanmakta ve toz toplam ünitesi elektrotlarına aktarılmaktadır. Düzenegin diğer önemli birimi ise yüklü elektrotların bulunduğu ve toz yakalama işleminin gerçekleştiği yakalama birimidir. Sürtünme ile üretilen elektriksel yükün toz tutma haznesi içerisinde bulunan elektrotlarda toplanması amacına yönelik bir tasarım yapılmıştır. Bu tasarımda, toz tutma ünitesi endüstriyel toz tutuculara benzerlik sağlaması amacıyla 1 mm kalınlıktaki alimünyumdan dikdörtgen şeklinde, 10 adet elektrotun pleksiglas hazne içerisine birbirine paralel olarak yerleştirilmiş olan iki ucu açık bir kutudan oluşmaktadır. Kurulumu gerçekleştirilen bu triboelektrostatik toz tutucu filtrenin tasarımında elektrostatik çöktürücülere benzer bir toz yakalama ünitesi tasarlanması planlanmıştır. Yapılan ön tasarım aşamalarında, tasarımı oluşturan bileşenler hassasiyet ile seçilmiş ve nihai kurulum gerçekleştirilmiştir. İkinci bölümde tasarlanan toz tutucu filtre mevcut elektrostatik çöktürücülerden esinlenerek tasarlanmış olsa da toz tutma parametrelerinde değişiklikler yapılmasına olanak sağlayan bir şekilde oluşturulmuştur.

#### 5.1.1. Triboelektrik Statik Yükün Oluşturulması

Bu bölümde, daha önceki çalışmalarda başarılı bir şekilde statik yük ürettiği ortaya konulmuş ve detayları literatüre kazandırılmış özel bir düzenek kullanılmıştır [1]. Bu düzende deneysel çalışmalar için en yüksek statik yükü sağlayan kombinasyonlar seçilerek kullanılmıştır. Bu birimde iki rulo arasında dönen bir bant rulolara temas ettiği noktada triboelektriklenmenin etkisiyle statik yük oluşturmaktadır. Tasarlanan bu statik güç üretim toz tutma ünitelerinde kullanılan ve bir trafo sistemi ile statik yükün oluşturulduğu sistemlerden, yatırım maliyetinin düşüklüğü ve daha güvenli çalışma ortamı sağlayacak olması gibi avantajlarla oldukça önemli bir farklılık ortaya çıkartmaktadır. İhtiyaç duyulan potansiyelin üretilmesi için değişik bant ve rulo

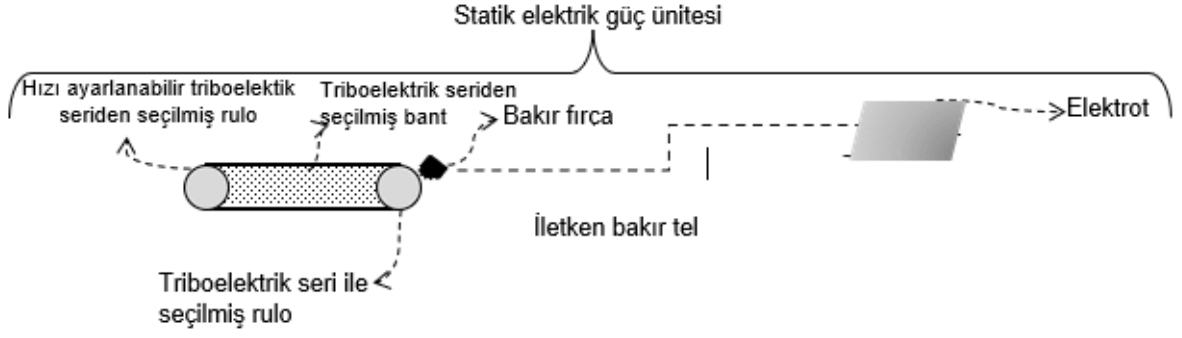
kombinasyonlarının toz yakalamanın verimini artırıcı bir faktör olarak da sınanabilmesi bu çalışma için avantaj oluşturmaktadır. Daha önce yapılan bir tez çalışması kapsamında oluşturulan düzenekte birçok farklı malzeme denenmiştir [1]. Bu denemeler sonucunda elde edilen kombinasyonlardan üretilen statik elektriğin büyüklükleri incelenmiş ve en yüksek değere sahip olan kombinasyon bu tez kapsamında elektrik üretim ünitesinde kullanılmıştır. Statik yükün oluşturulduğu düzenek pleksiglas iskelet üzerinde iki ayrı bilyalı yatağa yerleştirilmiş olan rulolar ve bunların arasında dönen bir sonsuz banttıan oluşmaktadır. Rulolardan birisine yerleştirilmiş olan makara dönüş hızı ayarlanabilen bir motora bağlanmıştır. Böylece bandın dönü hızı istenildiği şekilde ayarlanabilmektedir. Bir bakır bir fırça da rulolara ve banda temas etmeyecek şekilde pleksiglas iskelete eklenmiştir. Bakır fırçalar bandın tam olarak rulo ile temas ettiği ve asıl triboelektriklenmenin olduğu bölgeye en yakın noktaya konumlandırılmıştır. Teflon rulonun banda sürtmesi sonucunda ortaya çıkan yük bu bakır fırça ile toplanarak toz tutma ünitesine iletilmektedir.

Statik yükün oluşturulduğu ünitenin şematik görünümü Şekil 5.1' de verilmiştir.



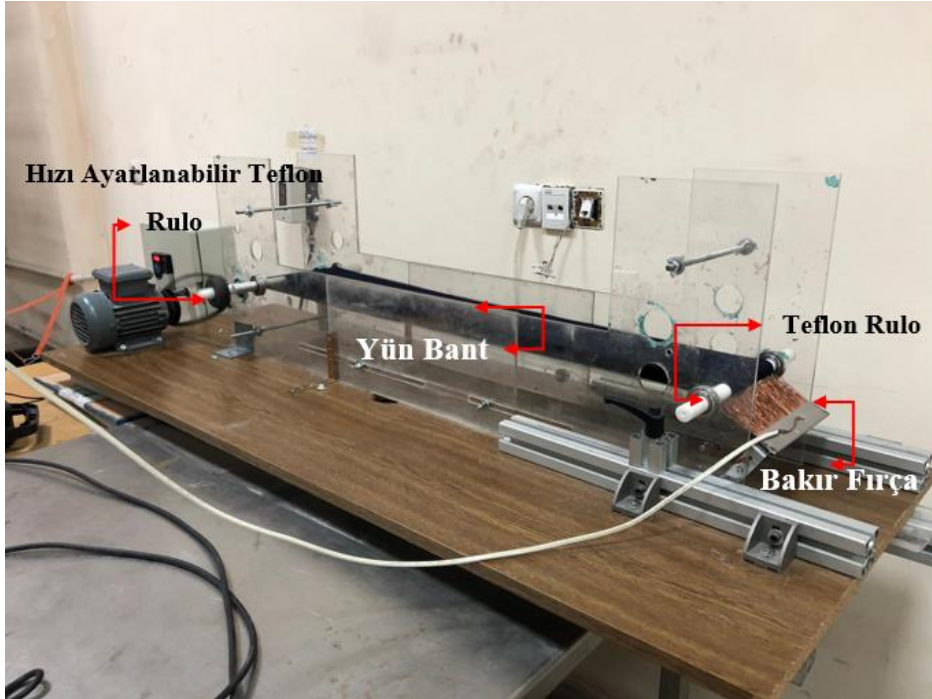
Şekil 5.1. Statik elektrik yükünün oluşturulduğu ünite

Üretilen statik yükün topraklanmasını engellemek ve yükü korumak amacıyla plesiglas levha iskelet olarak kullanılmıştır. Şekilde görülen pleksiglas iskelete bağlı rulolar ve arasına geçirilen bant rulolardan birisine bağlanmış olan hızı ayarlanabilir bir motor ile döndürülmekte ve bu sayede dönen bantın rulolara temas ettiği noktada rulolar ile oluşan temas sürtünme ile elektrikleymeye neden olmaktadır. Bu sürtünme rulo/bant temas noktalarında statik (triboelektrik) yük oluşturmaktadır. Bu noktalara yakın bir şekilde yerleştirilmiş bakır fırçalar bu yükü toplayarak bağlı oldukları iletken kablo sayesinde yükü ayırma birimindeki elektrotlara kadar taşımaktadır. Şekil 5.2'de oluşturulan statik yükün fırça ile toplanarak sabit bir elektrota iletilmesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Statik elektrik üretim ünitesinin şeması

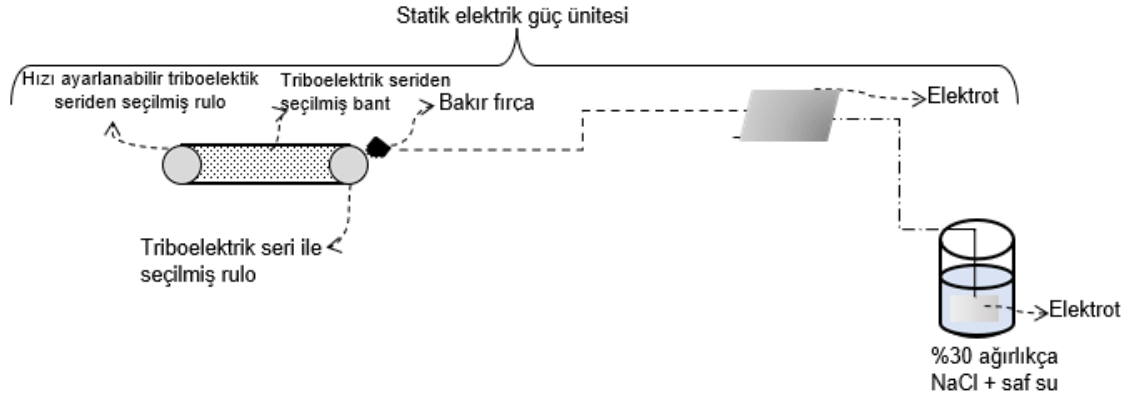
Statik yük elde edilmesi amacıyla teflon rulolar ve yün bant kombinasyonu seçilmiştir. Seçilen kombinasyonun kullanıldığı düzeneğin genel görünümü Şekil 5.3'te verilmektedir.



Şekil 5.3. Statik yük üretim birimindeki teflon rulo, yün bant ve toplayıcı bakır fırçanın genel görünümü

Genel olarak toplanan yükün aktarılmasında sabit elektrot ve toz tutma haznesi arasında iletken bakır tel kullanılmış olmakla birlikte üretilen yükün daha da artırılabilmesi amacıyla toplanan yük bir tuzlu su çözeltisinde depolanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla fırçalar tarafından toplanan yük öncelikle bir tuzlu su çözeltisine aktarılmış oradan da toplama elektrotlarına iletilmiştir (Şekil 5.4). Bu şekilde triboelektrik yük üretim çalışması yapılmış olmakla birlikte bu tez kapsamında triboelektrik yük üretimi ile ilgili

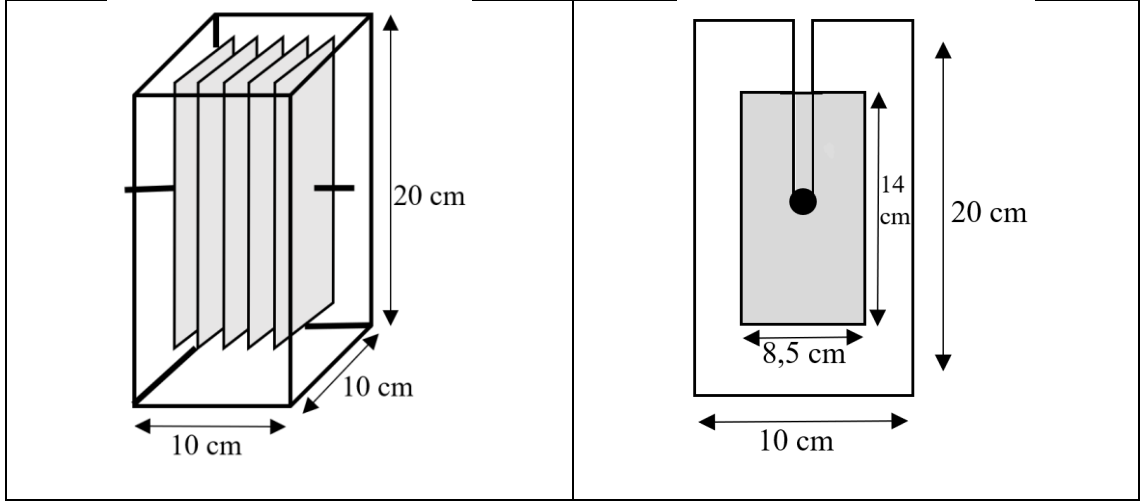
olarak tuzlu suda depolama işlemi ilk kez denemiş bir sistemdir. Tuzlu suyun elektrolize bir çözelti olması sebebiyle güç üretim devresinde statik elektriğin depo edilmesinin yanı sıra gücünün de artacağı yönünde etki sağlaması amaçlanmıştır.



Şekil 5.4. Tuzlu su haznesi eklenmiş statik yük üretim ünitesi

### 5.1.2. Toz Tutucu Hazne

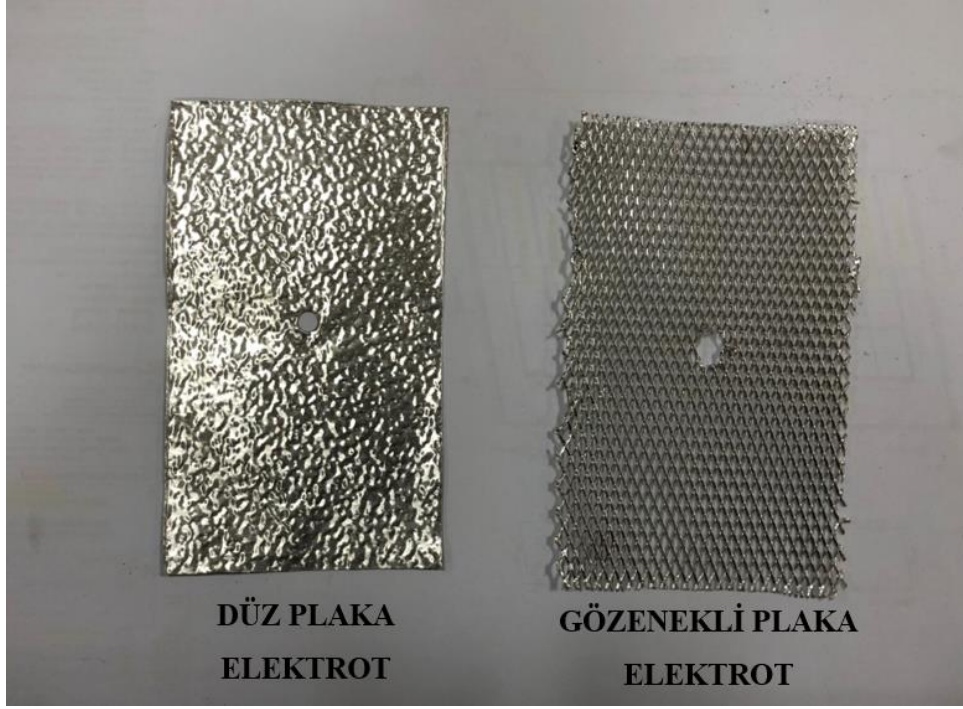
Yapılan literatür taraması sonucunda toz tutucu haznenin tasarımında en kullanışlı ve pratik olarak görülen ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olan levha tipli bir tasarım yapılmasına karar verilmiştir. İçerisinde alüminyum levhaların (elektrotların) bulunduğu pleksiglastan altı ve üstü açık olan bir toz tutma haznesi tasarlanmış ve yapılmıştır. Hazne içerisine 10 adet dikdörtgen levha (elektrot) birbirlerine temas etmeyecek şekilde, sabit aralıkta, paralel olarak yerleştirilmiştir. Bu 10 adet alüminyum plakalar boyu 14 cm ve eni 8,5 cm olacak şekilde alüminyum levhadan kesilmiştir. Kesilen bu elektrotlar tam ortasından delinerek bu delikten bir metal çubuk geçirilmiştir. Levhaların dört köşesine de pleksiglas takozlar yerleştirilerek birbirlerine temasları önlenmiştir. Böylece statik yükün bütün levhalara eşit olarak dağılması sağlanmıştır. Aynı zamanda bu metal çubuk hem levhaları paralel tutulmasını hem de sisteme doğru bir şekilde monte edilmelerini sağlamıştır. Haznedeki elektrotlara yüklenen statik yükün korunması için dış iskelet pleksiglas levhadan imal edilmiştir. Altı ve üstü açık olarak yapılan akrilik dış iskeletin karşılıklı iki duvarına 1 cm genişliğinde kanallar açılmıştır. Bu sayede 10 adet elektrotun sabitlendiği metal çubuk bu kanal sayesinde kolaylıkla çıkabilir bir tasarıma sahip olmuştur. Bu tasarım sayesinde toz tutma haznesinde kullanılan elektrotların değiştirilebilir olması sağlanmıştır. Şekil 5.5' de toz tutma haznesine ait şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 5.5. Toz tutma haznesinin önden ve yandan şematik gösterimi

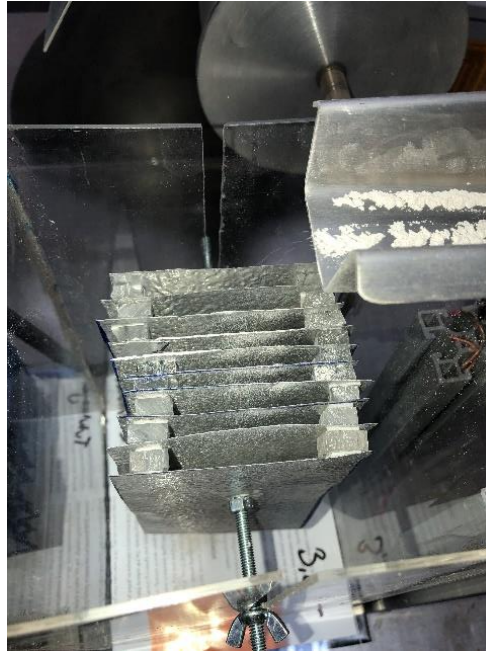
Tasarlanan bu toz tutma haznesinin bileşenleri hazırlanmış ve monte işlemi yapılmıştır. Pleksiglas dış iskelet için 4 adet 20 cm x 10 cm ebatlarında ve 2 mm kalınlığında dikdörtgen pleksiglas levha temin edilmiştir. Bu pleksiglas levhalar statik güç kaybı olmaması veya herhangi bir hava kaçağı durumu yaşanmaması için kloroform ile kenarlarından birbirlerine yapıştırılarak altı ve üstü açık bir kutu elde edilmiştir. Deneysel süreçte toz partiküllerinin beslenmesi için üstü; elektrotlar ile tutulmayan tozların sistemden alınması amacıyla altı açık bırakılmıştır. Pleksiglas iskelet hazırlandıktan sonra alüminyum plakadan kesilen 14 x 8,5 cm ebatlarında ve 0,5 mm kalınlığında 10 adet plakanın orta noktalarından delikler açılmıştır. Deneysel süreçlerde kullanılan alüminyum plakalar düz ve gözenekli plakalar olmak üzere iki tip plaka elektrot kullanılmıştır. İki tip kullanılarak plaka yüzeyinin özelliğinin toz tutma üzerine etkisi incelenmiştir. Kullanılan düz ve gözenekli elektrotlar Şekil 5.6' da verilmiştir.





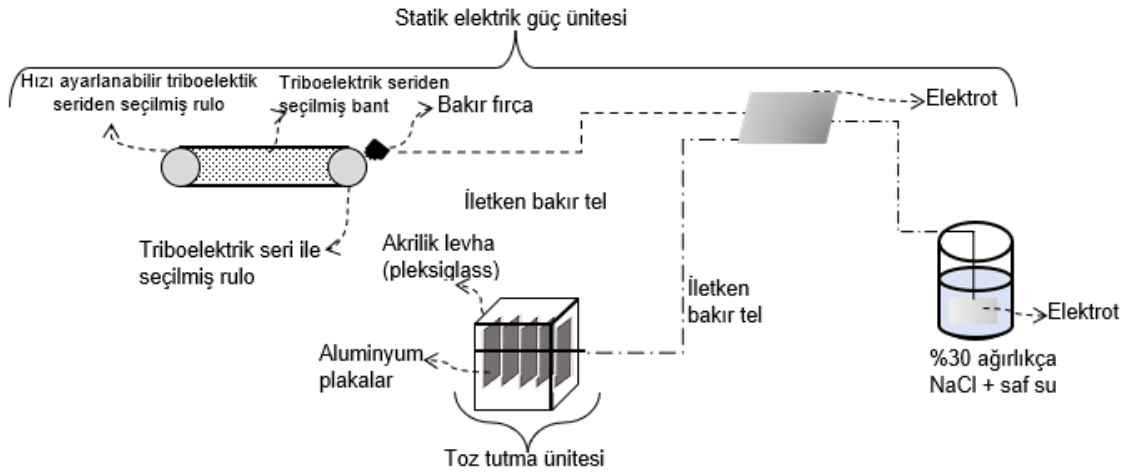
Şekil 5.6. Toz tutucu haznede kullanılan düz ve gözenekli plaka elektrotları

Plakalar sadece orta noktalarından geçirilen metal çubuğa temas etmiştir ve elektrik üretim ünitesinden gelen gücün eşit olarak bütün plakalara dağılması sağlanmıştır. Plakaların monte ediliği bu metal çubuk, pleksiglas iskeletin karşı iki duvarına açılan kanallardan sisteme eklenip kelebek ve somun vidalarla iskelete sabitlenmiştir. Oluşturulan toz tutma düzeneği Şekil 5.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Toz tutma üstten görünüşü

Hazırlanan toz tutma ünitesinin montajının tamamlanmasından sonra güç üretim sistemiyle bağlantısı yapılmıştır. Üretilen statik elektrik yukarıda da bahsedildiği gibi sabit bir elektrotta toplanmıştır. Sabit elektrot ve hazne içerisinde bulunan elektrotların monte edildiği metal çubuk iletken bakır kablo ile Şekil 5.8’ de gösterildiği gibi bağlantı yapılması planlanmıştır. Bunun sonucunda toz tutma haznesine üretilen statik elektriğin iletilmesi sağlanmıştır (Şekil 5.9). Sabit elektrottan düzenli olarak statik elektrik yükü yapılmıştır. Statik yük ölçümlerinde yüzeylerdeki statik elektrik yükü ölçümünde kullanılan standart statikmetre kullanılmıştır. Bunun sayesinde hazne içerisinde bulunan her bir elektrotta verilen voltaj değeri deneysel süreç boyunca kontrol altında tutulabilmektedir.



Şekil 5. 8. Toz tutma ünitesi ve güç üretim ünitesinin genel şematik görünümü



Şekil 5.9. Deney düzeneği genel görünümü

## 5.2. Yük Ölçüm ve Toz Tutma Testleri

### 5.2.1. Statik Yük Ölçümleri

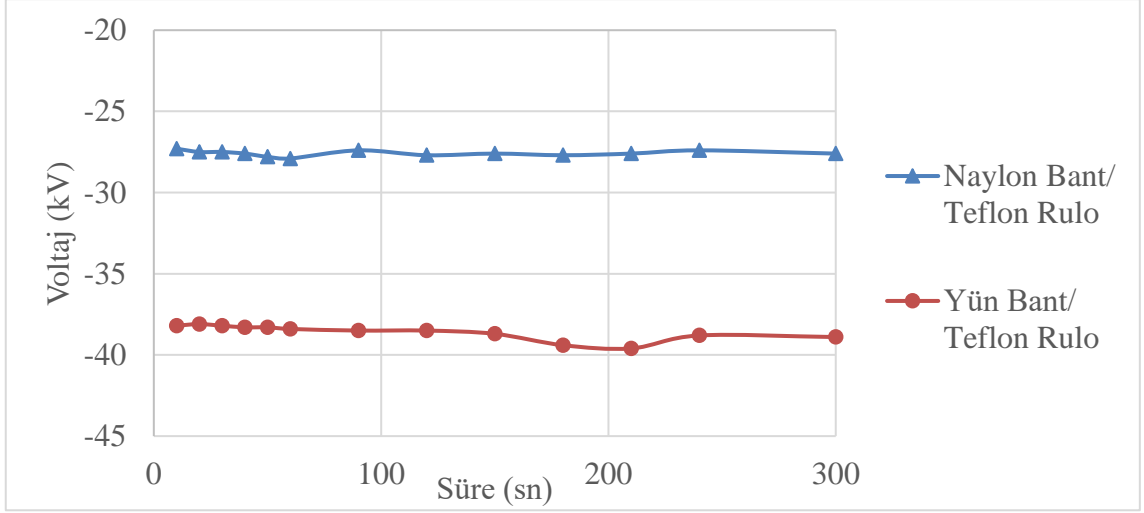
Deney düzeneğinin hazırlanmasının ardından, rulo ve bant temas noktasında oluşan yük iletken bir kablo ile sabit elektrot üzerinde aktarılmıştır. Oluşan negatif ve/veya pozitif yükün ölçülmesi amacıyla Pulselectronic SF 156 serisi statik metre kullanılmıştır. Statik metrenin standart ölçüm yapabilmesi için yüklü plaka yüzeylerine belli bir mesafeden ölçüm yapılmıştır. Bu mesafe her ölçümde sabit tutulmuştur. Daha önce yapılan tez çalışmasında dizayn edilmiş bu elektrik üretim ünitesinde bir çok farklı rulo ve bant kombinasyonu kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelenmiş ve yün bant/teflon rulo veya naylon bant/teflon rulo kombinasyonlarının en yüksek voltaj değerini verdiği görülmüştür. Bu kombinasyonlardan birinin seçilmesi için belli zaman aralığında ölçümler yapılmıştır. Yapılan bu ölçümlerden naylon bant/teflon rulo ve yün bant /teflon rulo ölçümü Çizelge 5.1' de gösterilmiştir.

Yapılan ön testler ışığı altında toz tutma deneyleri için negatif yük ve pozitif yüklerin ayrı ayrı üretilmesine ve sınıanmasına karar verilmiştir. Bu sebeple teflon rulo ve alüminyum rulo kullanılarak ölçüm deneyleri yapılmıştır.

Pleksiglas iskelet üzerinde bulunan rulo yataklarından birisine alüminyum rulo monte edilmiştir. Düzenegin diğer ucunda olduğu gibi bakır bir fırça da alüminyum plakaya temas etmeyecek şekilde plesiglas iskelete monte edilmiştir. Alüminyum rulunun banda sürtmesi sonucunda ortaya çıkan yük bu bakır fırça ile toplanarak toz tutma ünitesi elektroduna yüklenmiştir. Bu yük ölçüldüğünde de diğer malzemeden farklı olarak pozitif statik yükü yüklediği görülmektedir.

Çizelge 5.1. Naylon bant/ teflon rulo ve yünü bant/ rulo kullanılarak yapılan ölçümler

	<b>Naylon bant/ teflon rulo</b>	<b>Yün bant/teflon rulo</b>
<b>Süre (sn)</b>	<b>kV</b>	<b>kV</b>
10	-27,3	-38,2
20	-27,5	-38,1
30	-27,5	-38,2
40	-27,6	-38,3
50	-27,8	-38,3
60	-27,9	-38,4
90	-27,4	-38,5
120	-27,7	-38,5
150	-27,6	-38,7
180	-27,7	-39,4
210	-27,6	-39,6
240	-27,4	-38,8
300	-27,6	-38,9



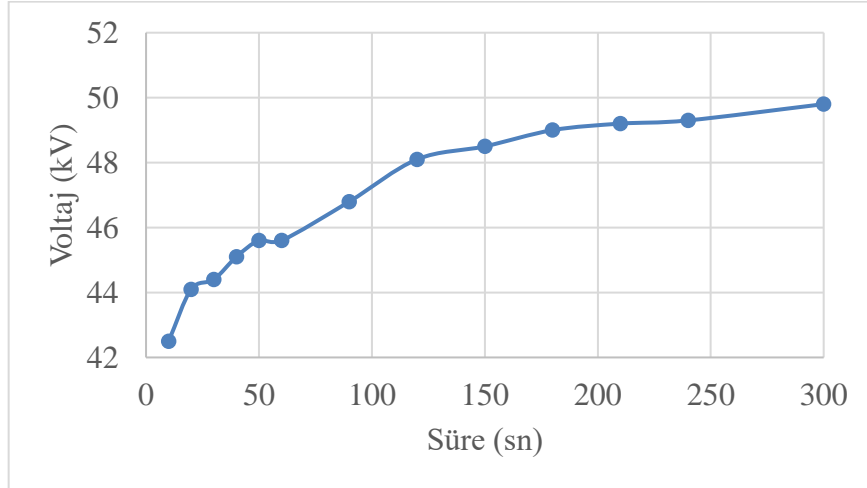
Şekil 5.10 Naylon bant/rulo ve yün bant/rulo kombinasyonları ile üretilen statik yükün yükleme süresi ile değişimi

Şekil 5.10’ da görüldüğü üzere ilk birkaç saniyede gerilimin düşük olduğu görülmüştür. Ancak elde edilen verilerin de gösterdiği üzere yün bant ve teflon rulo kombinasyonu ile yapılan deneylerde daha yüksek bir gerilim değeri alınmaktadır. Yükün uzun süre boyunca sabit kaldığı da anlaşılmaktadır. Bu sebeple daha hızlı yüksek gerilimlerde denge seviyesine ulaşan yün bant ile teflon rulo kombinasyonu negatif statik yük elektrik yükü üretimi amacıyla tercih edilmiştir. Yapılan ön testler sonucunda toz tutma deneyleri sırasında ilk yükleme zamanı olarak 60 saniye bekleme süresi tanınmasına ve toz tutma deneylerinin bundan sonra başlamasına karar verilmiştir.

Malzemelerin triboelektrik seride buldukları yerlere göre pozitif veya negatif yüklü oldukları hakkındaki bilgi bölüm “3.2.2. Triboelektrik Seri” kısmında verilmiştir. Teflon rulunun negatif uçta bulunmasından dolayı yün bant ile sürtünmesi sonucunda negatif yük ortaya çıkmaktadır. Pozitif elde etmek amacıyla rulo seçimi yine triboelektrik seriden ve daha önce yapılan tezden yola çıkılmıştır [1]. Bu kaynaktan alınan veriler ışığında alüminyum rulo kullanılarak pozitif yük elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu nedenle alüminyum rulo seçilmiştir. Alüminyum rulo/ yün bant ile yapılan statik yük ölçümler, Çizelge 5.2’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Alüminyum rulo/ yün bant kombinasyonu ile ölçülen statik yük değerleri

Süre (sn)	kV
10	42,5
20	44,1
30	44,4
40	45,1
50	45,6
60	45,6
90	46,8
120	48,1
150	48,5
180	49
210	49,2
240	49,3
300	49,8



Şekil 5.11. Alüminyum rulo/ yün bant ile yapılan ölçümler

Şekil 5.11’ de görüldüğü gibi 60 saniyeye kadar sabit elektrot üzerindeki yükün hızlıca arttığı ve sabitlendiği görülmüştür. Bu nedenle toz tutma işlemlerine başlanmadan önce tam yüke ulaşmak amacıyla minimum 60 saniye kadar beklenmesine ve toz tutma işlemlerinin bundan sonra başlanmasına karar verilmiştir.

## 5.2.2. Statik Yükün Korunması ve Yük Miktarının Arttırılması

Toz tutucu elektrostatik filtrelerin enerji gereksinimlerinin birkaç on bin volt değerinde olması gerektiği “4.2.3. Elektrostatik Çöktürücüler” bölümünde belirtilmektedir. Tez çalışması için kullanılan güç kaynağının ürettiği statik elektriğin miktarı oldukça yüksek ve stabildir ( $\pm 20$  ile  $\pm 50$  volt). Yapılan bazı gözlemler sonucunda, iyi bir iletken olan suyun daha yüksek değerlerde statik yük elde edilmesine katkı sağladığı belirlenmiş, bu nedenle sisteme bir tuzlu su ünitesi eklenmesi durumunda plakalarda toplanan statik yük üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

### 5.2.2.1. Tuzlu Su Çözeltisi ile Statik Yük Ölçümleri

Teflon rulo ve yün bant kombinasyonundan negatif yük üretildiği Çizelge 5-1 ve Şekil 5-11’ de gösterilmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi deney düzeneğinde üretilen yük sabit bir plakada toplanmaktadır. Sabit plakaya bağlı bir iletken kablo tuzlu su çözeltisi içine daldırılarak plaka üzerine toplanan yükün aynı zamanda çözeltide de toplanması sağlanmıştır. Bağlantı Şekil 5.12’de gösterilmektedir.



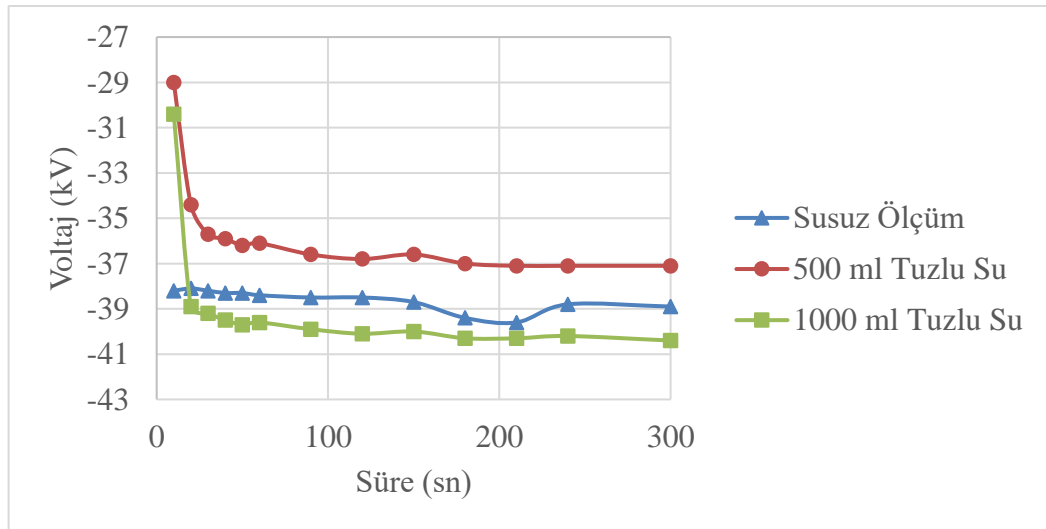
Şekil 5.12. Statik yükün arttırılması amacıyla kullanılan tuzlu su bağlantısı

Sabit plakadan belirli zaman aralıklarında ölçümler alınmıştır. Elektrik yükünü arttırıcı olduğu düşünülen tuzlu suyun sisteme etkisini net olarak görmek için öncelikle yükleme yapılan plaka suya bağlanmadan yük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonraki ölçümlerde tuzlu su plakaya bağlanarak sisteme eklenerek ölçümler tekrarlanmıştır. Aynı zamanda tuzlu su çözeltisinin hacimleri ve tuzlu su oranı da değiştirilerek statik elektrik miktarına etkisi incelenmiştir. Başlangıç çözeltisi ağırlıkça %3,6 NaCl içerecek şekilde Saf su

kullanılarak hazırlanmıştır. Bu tuz derişiminde hacim arttırılarak yapılan deneyler Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Farklı hacimlerde ağırlıkça %3,6 NaCl + Saf Su çözeltisi kullanılarak yapılan voltaj ölçümleri ve Susuz ölçümle karşılaştırılması

		Ağırlıkça %3,6 NaCl+ Saf Su Çözeltisi	
Hacim (ml)	Susuz Ölçüm	500 ml	1000 ml
Süre (sn)	kV	kV	kV
10	-38,2	-29	-30,4
20	-38,1	-34,4	-38,9
30	-38,2	-35,7	-39,2
40	-38,3	-35,9	-39,5
50	-38,3	-36,2	-39,7
60	-38,4	-36,1	-39,6
90	-38,5	-36,6	-39,9
120	-38,5	-36,8	-40,1
150	-38,7	-36,6	-40
180	-39,4	-37	-40,3
210	-39,6	-37,1	-40,3
240	-38,8	-37,1	-40,2
300	-38,9	-37,1	-40,4



Şekil 5.13. Ağırlıkça %3,6 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan voltaj ölçümleri

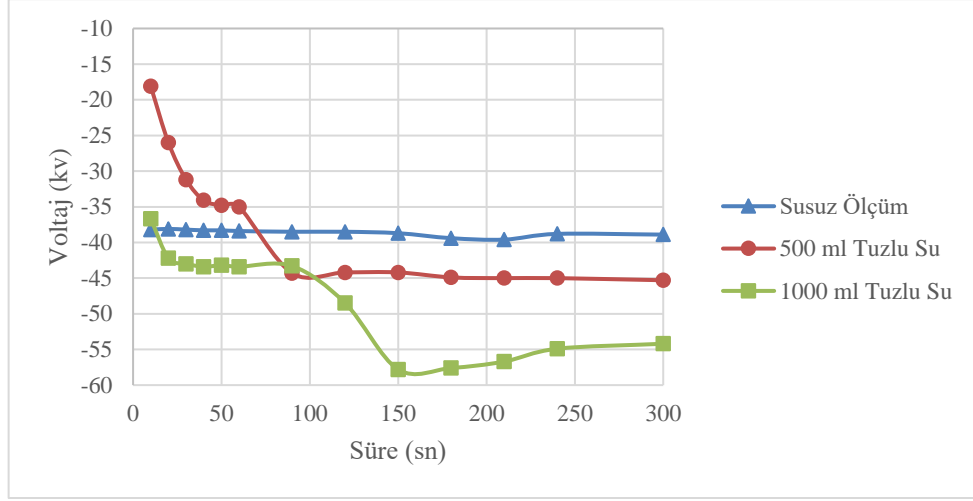


Çizelge 5.3 ve Şekil 5.13’de de görüldüğü kullanılan tuz derişimine bağı bir voltaj artışından bahsetmek mümkün olmamıştır.

Sonraki aşamada tuz oranı periyodik olarak arttırılmıştır. Bu artış yaklaşık olarak geniş bir tuz derişim aralığında sınanmıştır. Ağırlıkça %10’ luk olarak hazırlanan NaCl + Saf su çözeltisi ile yapılan ölçümler Çizelge 5-4’ de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Ağırlıkları %10 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağı voltaj ölçümleri

		<b>Ağırlıkça %10 NaCl + Saf Su Çözeltisi</b>	
<b>Hacim (ml)</b>	<b>Susuz Ölçüm</b>	<b>500 ml</b>	<b>1000 ml</b>
<b>Süre (sn)</b>	<b>kV</b>	<b>kV</b>	<b>kV</b>
10	-38,2	-18,1	-36,7
20	-38,1	-26	-42,2
30	-38,2	-31,2	-43
40	-38,3	-34,1	-43,4
50	-38,3	-34,8	-43,2
60	-38,4	-35	-43,4
90	-38,5	-44,3	-43,3
120	-38,5	-44,2	-48,5
150	-38,7	-44,2	-57,8
180	-39,4	-44,9	-57,6
210	-39,6	-45	-56,7
240	-38,8	-45	-54,9
300	-38,9	-45,3	-54,2



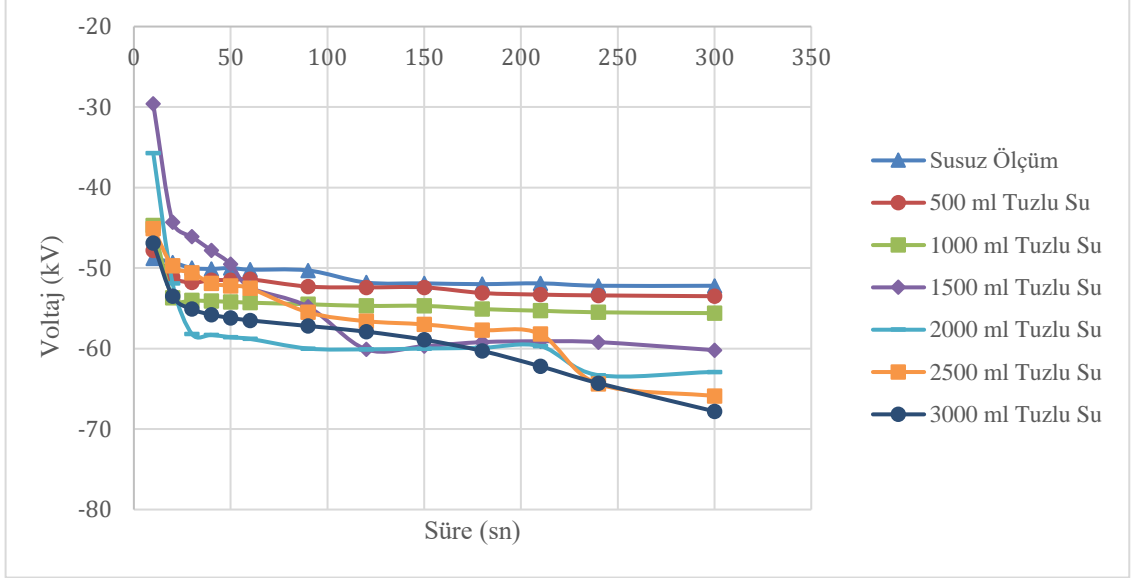
Şekil 5.14. Ağırlıkça %10 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı voltaj ölçümleri

Şekil 5.14’ de de görüldüğü üzere tuzlu su hacminin artırılması sonucunda statik yükte ciddi bir artış olduğu gözlenmektedir. Yapılan bu ön testler ışığında hacim arttıkça ve tuz oranı yükseldikçe elde edilen voltajın arttığı görülmüştür. Bundan sonra yapılan deneylerde tuz oranı artırılmış ve hacim değerleri de giderek artırılarak plaka üzerinde ölçülen voltaj değerleri gözlenmiştir. Çizelge 5.5’ de ağırlıkça %20 oranında hazırlanan tuzlu su ile yapılan ölçümler verilmiştir.

Çizelge 5.5. Ağırlıkça %20 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı voltaj ölçümleri

		Ağırlıkça %20 NaCl +Saf Su çözeltisi					
Hacim (ml)	Susuz Ölçüm	500 ml	1000 ml	1500 ml	2000 ml	2500 ml	3000 ml
Süre (sn)	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV
10	-48,8	-47,8	-44,7	-29,6	-35,7	-45,1	-46,9
20	-49,3	-51,1	-53,7	-44,3	-51,9	-49,7	-53,5
30	-50	-51,8	-54	-46,1	-58,2	-50,6	-55,1
40	-50,1	-51,5	-54,1	-47,8	-58,3	-51,9	-55,8
50	-50	-51,5	-54,2	-49,5	-58,6	-52,2	-56,2
60	-50,2	-51,4	-54,3	-52,4	-58,8	-52,5	-56,5
90	-50,3	-52,3	-54,5	-54,8	-60	-55,5	-57,2
120	-51,8	-52,4	-54,7	-60,1	-60,1	-56,6	-57,9
150	-51,9	-52,4	-54,7	-59,7	-60	-57	-58,9
180	-52	-53,1	-55,1	-59,2	-59,9	-57,7	-60,3

210	-51,9	-53,3	-55,3	-59,1	-59,7	-58,2	-62,2
240	-52,2	-53,4	-55,5	-59,2	-63,3	-64,4	-64,3
300	-52,2	-53,5	-55,6	-60,2	-62,9	-65,9	-67,8



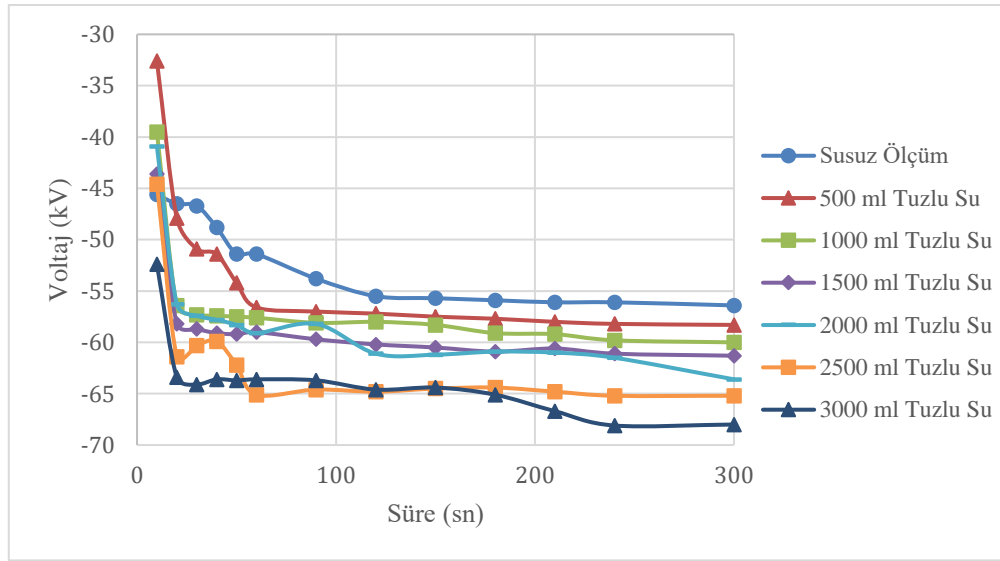
Şekil 5.15. Ağırlıkça %20 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı voltaj ölçümleri

Statik yük depolamak için kullanılan toplam çözelti hacim ve tuz derişimi arttıkça elektriksel yükün arttığı oldukça geniş bir aralıkta net olarak gözlemlenmektedir. Bu nedenle bir üst değer olarak %30' luk çözelti hazırlanarak Çizelge 5.6' daki veriler elde edilmiştir.

Çizelge 5.6. Ağırlıkça %30 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı voltaj ölçümleri

		Ağırlıkça %30 NaCl+ Saf Su Çözeltisi					
Hacim (ml)	Susuz Ölçüm	500 ml	1000 ml	1500 ml	2000 ml	2500 ml	3000 ml
Süre (sn)	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV
10	-45,6	-32,6	-39,5	-43,6	-40,9	-44,6	-52,4
20	-46,5	-47,9	-56,4	-58,2	-56,3	-61,4	-63,4
30	-46,7	-50,9	-57,3	-58,7	-57,4	-60,3	-64,1
40	-48,8	-51,4	-57,4	-59,1	-57,8	-59,9	-63,6
50	-51,4	-54,2	-57,5	-59,2	-58,3	-62,2	-63,7
60	-51,4	-56,6	-57,6	-59	-59,1	-65,1	-63,6

90	-53,8	-57	-58,1	-59,7	-58,2	-64,6	-63,7
120	-55,5	-57,2	-58	-60,2	-61,1	-64,8	-64,6
150	-55,7	-57,5	-58,3	-60,5	-61,2	-64,5	-64,4
180	-55,9	-57,7	-59,1	-60,9	-60,9	-64,4	-65,1
210	-56,1	-58	-59,2	-60,6	-61	-64,8	-66,7
240	-56,1	-58,2	-59,8	-61,1	-61,5	-65,2	-67,1
300	-56,4	-58,3	-60	-61,3	-63,6	-65,2	-67,5



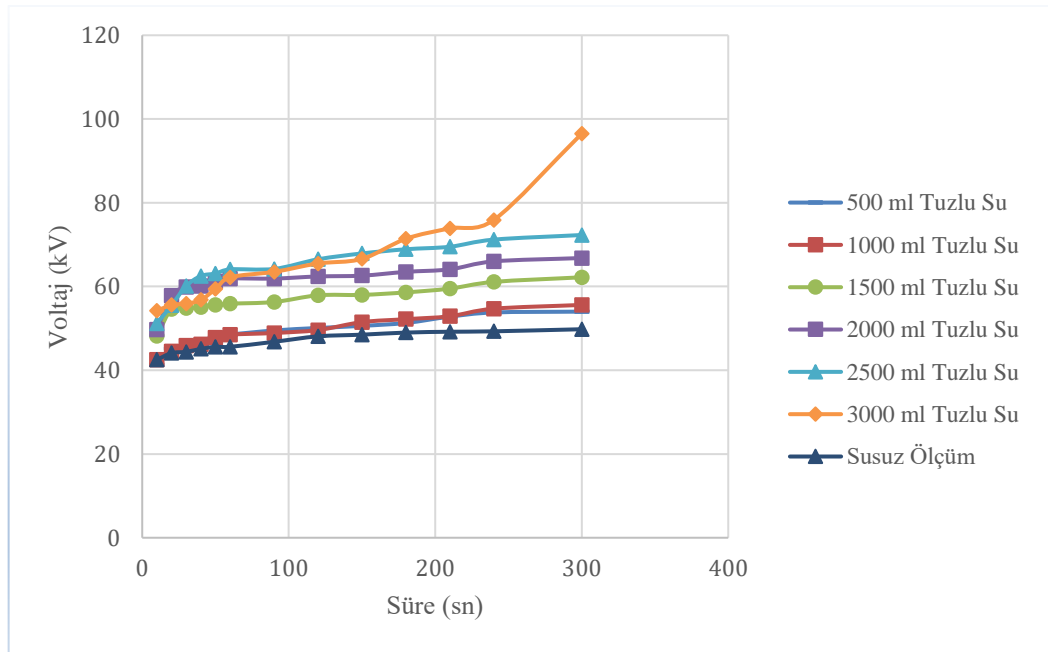
Şekil 5.16. Ağırlıkça %30 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı voltaj ölçümleri

Şekil 5.16’da görüldüğü gibi tuz derişimi plaka üzerinde toplanan statik yükün değerini ciddi ölçüde artırmaktadır. 120 saniyeden sonraki elektriksel gücün daha stabil hale geldiği de belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak toz tutma işlemi sırasında plakaların yüklenmesi amacıyla bir tuzlu su çözeltisi de kullanılabilceği, yüksek tuz derişimi ve büyük çözelti hacimleri ile daha yüksek mutlak değere sahip statik yüklerle çalışılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu sayede dalgalanmaların da minimize edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Yapılan testlerde tuzlu su hacmi ve derişiminin seçilmesi için negatif yük kullanılmıştır. Alüminyum rulo ve yün bant kullanılarak ütilen pozitif yük için de benzer inceleme yapılmıştır. Fakat pozitif yük ile yapılan bu çalışmada tuz derişimi %30 olarak sabit tutulmuş, yalnızca tuzlu çözelti miktarının etkisi incelenmiştir. Çizelge 5.7’ de pozitif yükün zamana bağlı ağırlıkça %30 derişimde tuzlu su çözeltisi ile yapılan ölçümler verilmiştir.

Çizelge 5.7. Ağırlıkça %30 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı pozitif voltaj ölçümleri

		Ağırlıkça %30 NaCl Saf su Çözeltisi (Pozitif Yük)					
Hacim (ml)	Susuz Ölçüm	500 ml	1000 ml	1500 ml	2000 ml	2500 ml	3000 ml
Süre (sn)	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV
10	42,5	41,3	42,5	48,2	49,7	51,2	54,2
20	44,1	45,2	44,5	54,6	57,8	55,5	55,6
30	44,4	45,3	45,9	54,8	59,9	60,1	55,9
40	45,1	46,2	46,2	55,1	60,1	62,5	56,8
50	45,6	47,8	47,8	55,6	61,2	63,1	59,4
60	45,6	48,5	48,5	55,9	61,9	64,1	62,2
90	46,8	49,5	48,9	56,3	61,9	64,2	63,5
120	48,1	50,1	49,6	57,9	62,4	66,5	65,5
150	48,5	50,6	51,5	58	62,6	67,9	66,6
180	49	51,3	52,2	58,6	63,5	68,9	71,4
210	49,2	52,8	52,9	59,5	64,1	69,5	73,9
240	49,3	53,8	54,7	61,1	66	71,2	75,9
300	49,8	54	55,6	62,2	66,8	72,3	96,5



Şekil 5.17. Ağırlıkça %30 NaCl +Saf Su çözeltisi için yapılan farklı hacimlerde süreye bağlı pozitif voltaj ölçümleri

Negatif yüklerde olduğu gibi hacim arttıkça voltaj değerinin arttığı görülmektedir (Şekil 5.17). Yapılan bu çalışmadan elde edilen veriler ışığında triboelektriklenme ile üretilen statik yük değerinin artırılması ve stabilitenin korunması amacıyla tuzlu su çözeltisinin sisteme eklenebileceği sonucuna varılmıştır.

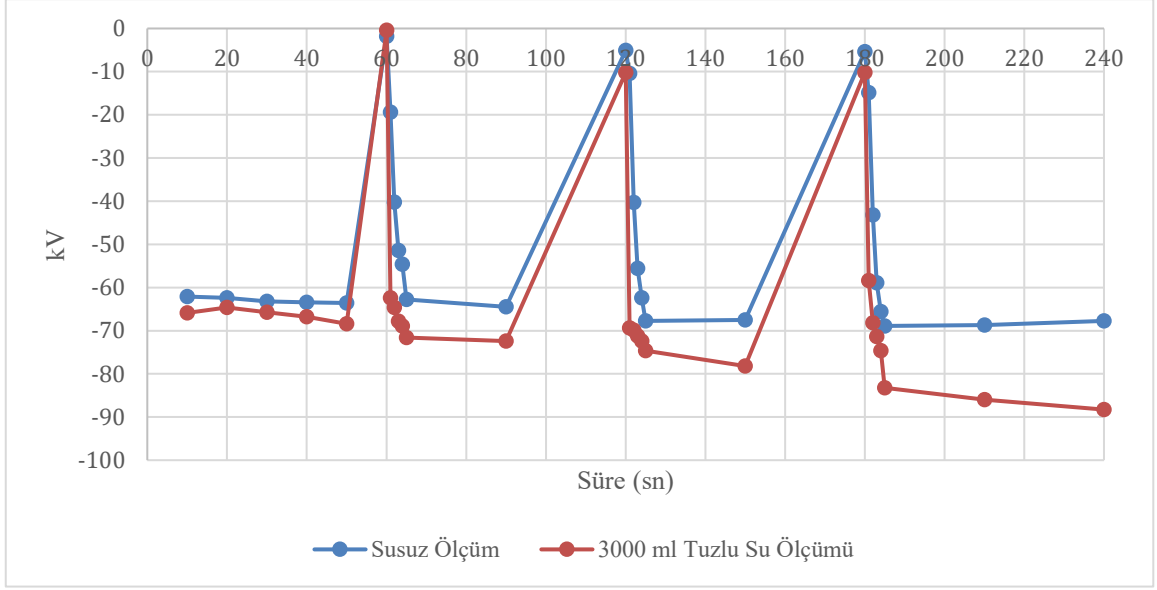
Bu amaçla toz tutucu elektrostatik filtrenin güç kaynağına bağlı bir nevi depo olarak çalışan ağırlıkça %30 tuz içeren 3000 ml hacimdeki tuzlu su çözeltisi deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Negatif ve pozitif yük üretildikten sonra tuzlu su ile güçlendirilen statik yük elektrotlara bağlanmış ve bu şekilde etkili bir elektriksel çekim ve ayırım sağlanmıştır.

#### **5.2.2.2. Üretilen Statik Yükün Korunması**

Yük ölçüm testleri sırasında da yükün stabil olduğu ve tuzlu suyun plakanın yüklenmesini kuvvetlendirdiği gözlemlenmiştir. Statik yükü taşıyan plakalar herhangi bir şekilde topraklandığında veya toprakla teması olan bir şeyin temas etmesi durumunda ani bir boşalmaya maruz kalmaktadır. Bunun nedeni statik yükün bir elektrik trafosundan değil sürtünme ile oluşturulmasından kaynaklanmaktadır. Bu tür sorunların sistem üzerinde yaratabileceği etkileri incelemek amacıyla statik yükün ne hızla geri kazanılabileceğininde araştırılması gerekmektedir. Bu bölümde ani statik yük boşalmasının ne sürede tolere edilebileceği, bunun toz tutma performansı üzerinde nasıl bir etkisi olabileceğini araştırmak amacıyla yük ani olarak topraklanmış ve tekrar başlangıç değerine ulaşılması için geçen süreler ölçülmüştür. Bu çalışmada, belirli zaman aralıklarında ölçümler alınırken 60., 120. ve 180. saniyelerde elektrot kısa süreli topraklanarak sahip olduğu yükü kaybetmesi sağlanmıştır. Bu aşamada triboelektrik yüklenme devam etmiştir. Topraklama kesilerek plaka üzerindeki sistematik yük ölçümüne devam edilmiştir. Tekrar yüklenme sürecinde yükün artışı 5 saniye boyunca her saniyede ölçülmüş ve bu yükle-boşalt işlemi 1 dakika aralıklarla üç kez gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 5 dakika boyunca yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.8' de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Statik yük yükleme hızı deneyi (Negatif yük)

Hacim (ml)	Susuz Ölçüm	3000 ml
Süre (sn)	kV	kV
10	-62,1	-65,9
20	-62,4	-64,6
30	-63,2	-65,7
40	-63,4	-66,8
50	-63,6	-68,4
60	-1,8	-0,4
61	-19,4	-62,4
62	-40,2	-64,6
63	-51,4	-67,8
64	-54,6	-68,9
65	-62,8	-71,6
90	-64,5	-72,4
120	-5,1	-10,2
121	-10,4	-69,4
122	-40,3	-69,9
123	-55,6	-71,2
124	-62,4	-72,4
125	-67,7	-74,6
150	-67,5	-78,2
180	-5,4	-10,2
181	-14,9	-58,4
182	-43,2	-68,2
183	-58,9	-71,4
184	-65,6	-74,6
185	-68,9	-83,2
210	-68,7	-86
240	-67,7	-88,3
300	-68,9	-90



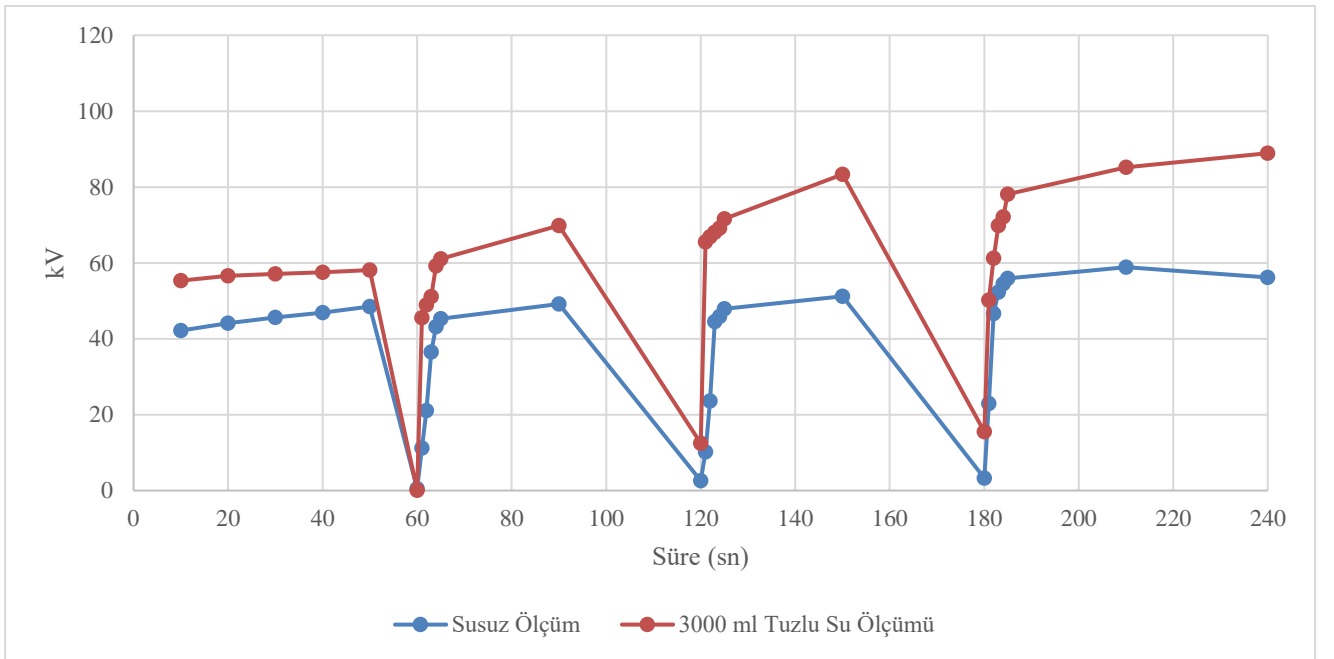
Şekil 5.18. Statik yük yükleme hızı deneyi (Negatif yük)

Çizelge 5.9. Statik yük yükleme hızı deneyi (Pozitif yük)

Hacim (ml)	Susuz Ölçüm	3000 ml
Süre (sn)	kV	kV
10	42,2	55,3
20	44,1	56,6
30	45,6	57,1
40	46,9	57,5
50	48,5	58,1
60	0,5	0,1
61	11,2	45,5
62	21,1	48,9
63	36,5	51,1
64	43,2	59,2
65	45,3	61,1
90	49,2	69,8
120	2,6	12,5
121	10,2	65,5
122	23,6	66,9
123	44,5	68,1
124	45,9	69,2
125	47,9	71,6
150	51,2	83,3



<b>180</b>	3,3	15,5
<b>181</b>	22,9	50,2
<b>182</b>	46,6	61,2
<b>183</b>	52,3	69,8
<b>184</b>	54,5	72,1
<b>185</b>	55,9	78,1
<b>210</b>	58,9	85,2
<b>240</b>	56,2	88,9
<b>300</b>	59,8	96,5



Şekil 5.19. Statik yük yükleme hızı deneyi (Pozitif yük)

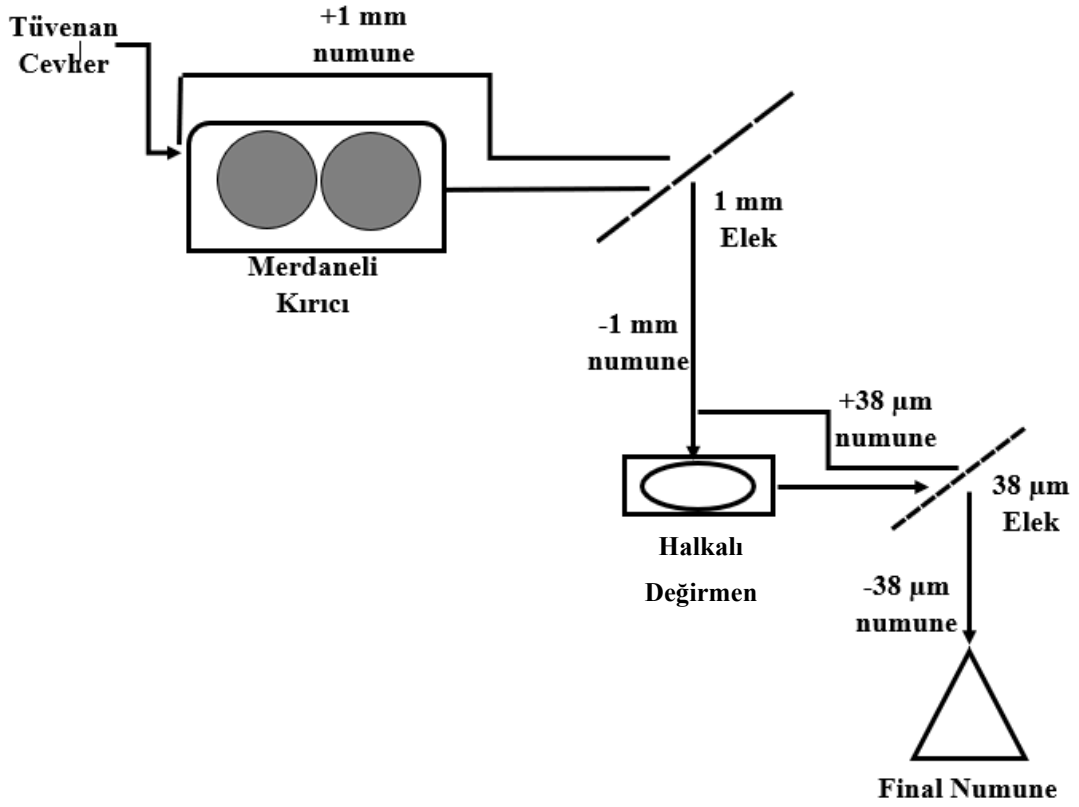
Şekil 5.18 ve Şekil 5.19 'de de görüldüğü üzere tuzlu su ile desteklenen devrede ortamdaki voltaj hem pozitif ve hemde negatif yük için daha hızlı bir şekilde ilk pozisyonuna ulaşmaktadır. Yükün sıfırlanması görece daha uzun zaman alırken tekrar eski değerine ulaşması bir kaç saniye içinde gerçekleşmektedir. İlerleyen dakikalarda yapılan yük boşaltma ve dolum işleminde, elektrotun topraklanmış olsa bile yükünün sıfırlanmadığı görülmüştür. Susuz ölçümlerdeki voltaj değerinin, tuzlu su ortamına göre daha yavaş yükselmesi ve yüklendikten sonraki saniyelerde bazı voltaj düşüşlerinin olduğu görülmüştür. Tuzlu su çözeltisinin yükün korunmasını sağladığı ve daha stabil yük oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

### **5.3. Triboelektrostatik Filtre Toz Tutma Testleri**

Bu çalışmanın öncelikli amacı tasarlanan deney düzeneğinin geliştirilmesi ve geliştirilen düzeneğin toz tutma performansını belirlemektir. Tasarlanan deney düzeneğinin kurulumu Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Daha önce bahsedilen statik yük ölçüm testlerinden yüksek voltaj değerlerinde statik yük oluşumu sağlanmıştır. Triboelektriksel etkileşimler ile üretilen bu statik yük toz tutucu filtrenin güç kaynağı olmuştur. Bunun sonucunda bir sonraki adım olarak düzenek ile toz tutma çalışmalarına geçilmiştir. Deneyler için hazırlanan numuneler Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama laboratuvarında gerçekleştirilen endüstriyel projelerin atıklarından temin edilmiştir. Tüvenan manyetit, kalsit, laboratuvar bünyesindeki değirmenlerin temizlenmesi amacıyla kullanılan saf kuvars, kili yüksek kurşun-çinko, hidrosiklon üst akımından alınan kaolin (kil), feldspat, tüvenan hematit, demir içeren flotasyon atığı ve laboratuvar havalandırma sisteminden alınmış toz numuneleri toz tutma testlerinde kullanılan malzemelerdir. Farklı toz ortamlarını temsil etmesi amacıyla testlerde kullanılacak malzemeler oldukça farklı özelliklere sahip malzemeler arasından seçilmiştir. Deney sürecinde kullanılacak olan numunelerin havada asılı uçabilecek bir boyutta hazırlanması amacıyla gerekli inceliğe öğütülmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tane boyu dağılımı da çok ince boyların dağılımını belirlemek amacıyla “Lazer Tane Okuyucu (Lazer Diffraction Particle Sizer)” ile yapılmıştır. Böylece -38 mikron olarak hazırlanan malzemelerin boyut dağılımları ortaya konulmuştur.

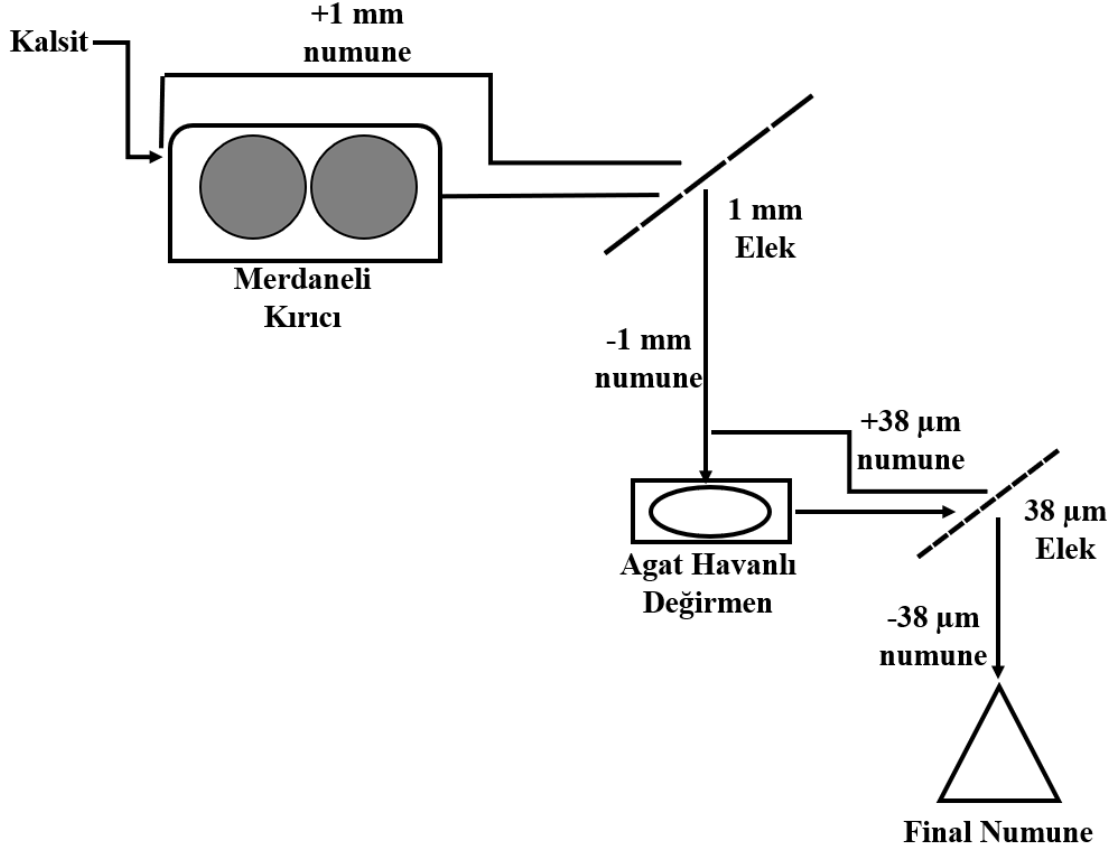
#### **5.3.1. Numune Hazırlama**

Tüvenan olarak temin edilen numuneler manyetit, kalsit ve hematit numuneleridir. Bu numunelerin boyut küçültme işlemleri yapılmıştır. Bu amaçla numuneler merdaneli kırıcı ile kırılmıştır. Kırılan numuneler 1 milimetrelik elekten elenmiş ve elek üstünde kalan numuneler kademeli olarak tekrar kırılmış, numunelerin tamamı 1 mm'nin altına indirilmiş ve tamamı öğütülmüştür. Hematit ve manyetit numuneleri halkalı değirmen kullanılarak öğütülmüştür. Öğütülen bu numuneler 38 mikrondan elenerek elek üstünde kalan numunelere değirmene geri beslenmiş ve tamamı -38 mikron olana kadar öğütme işlemi tekrarlanmıştır. Numune hazırlama sürecinde tüvenan manyetit ve hematit için akım şeması Şekil 5.20' de verilmiştir.



Şekil 5.20. Tüvenan manyetit ve hematit numuneleri hazırlama sürecindeki akım şeması

Kalsit numunesi diğer numunelerden farklı olarak Agat havanlı değirmen kullanılarak öğütülmüştür. Bu numunelerde tüvenan manyetit ve hematit gibi 38 mikrondan elenmiş ve elek üstünde kalan numuneler tükenene kadar yeniden öğütülmüştür. Kalsit numunesinin hazırlanmasında izlenen akım şeması Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21. Kalsit numunesinin hazırlama sürecindeki akım şeması

Bor numunesi -3 milimetre tane boyutuna sahip kolemanit cevherinden hazırlanmıştır. Bu numune de önce 1 mm boyuna kırılmıştır. Bor cevherinin yapısından ötürü boyut indirgeme işlemleri sırasında içerisinde kristal yapıların kırılması sonucu kırılan numuneler nem kazanmıştır. Eleme işlemine geçilmeden önce 40 °C 'de kontrollü olarak kurulmuştur. Cevherin yapısının bozulmaması için 40 °C' nin üstüne çıkılmamaya dikkat edilmiştir. Daha sonra kurutulan numuneler Agat havanda 38 mikronun altına kadar öğütülmüştür.

Saf kuvars, feldspat ve kurşun-çinko numuneleri kırılmaya ihtiyaç duyulmayan boyutlarda olduğundan bunlar doğrudan öğütülmüştür. Kuvars, ve feldspar numuneleri Agat havanda öğütülürken, kurşun-çinko cevheri halkalı değirmende öğütülmüştür. Öğütülen bu numunelerinde 38 mikronluk elekten tamamının geçeceği forma kadar öğütülme işlemi tekrarlanmıştır.

Flotasyon atığı olarak alınan demir içerikli cevher, boyutu -25 mikron olarak temin edilmiştir. Buna ek olarak cevher laboratuvarının havalandırmasından alınan ve içerisinde

birçok numunenin karışık olarak bulunduğu havalandırma tozu numunesi direkt olarak 38 mikronluk elekten geçirilmiştir.

Hazırlanan numunelerin temel özelliklerinden birisi olan özgül ağırlıklarının belirlenmesi için piknometre testleri yapılmıştır. Piknometre testlerinde aşağıda verilen Eşitlik 5-1 kullanılarak özgül ağırlıklar hesaplanmıştır.

$$\rho\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{(W_2 - W_1)}{[(W_2 - W_1) - (W_3 - W_4)]} \quad \text{Eşitlik 5-1}$$

$\rho$  = özgül ağırlık ( $g/cm^3$ )

$W_1$  = Kapak + piknometre ağırlığı

$W_2$  = Kuru numune + piknometre ağırlığı (kapaklı)

$W_3$  = Numune su karışımı + piknometre ağırlığı (kapaklı)

$W_4$  = Su + piknometre ağırlığı (kapaklı)

Piknometre testlerinin yapılma süreci aşağıda verilen sıraya göre gerçekleştirilmiştir.

Bunlar:

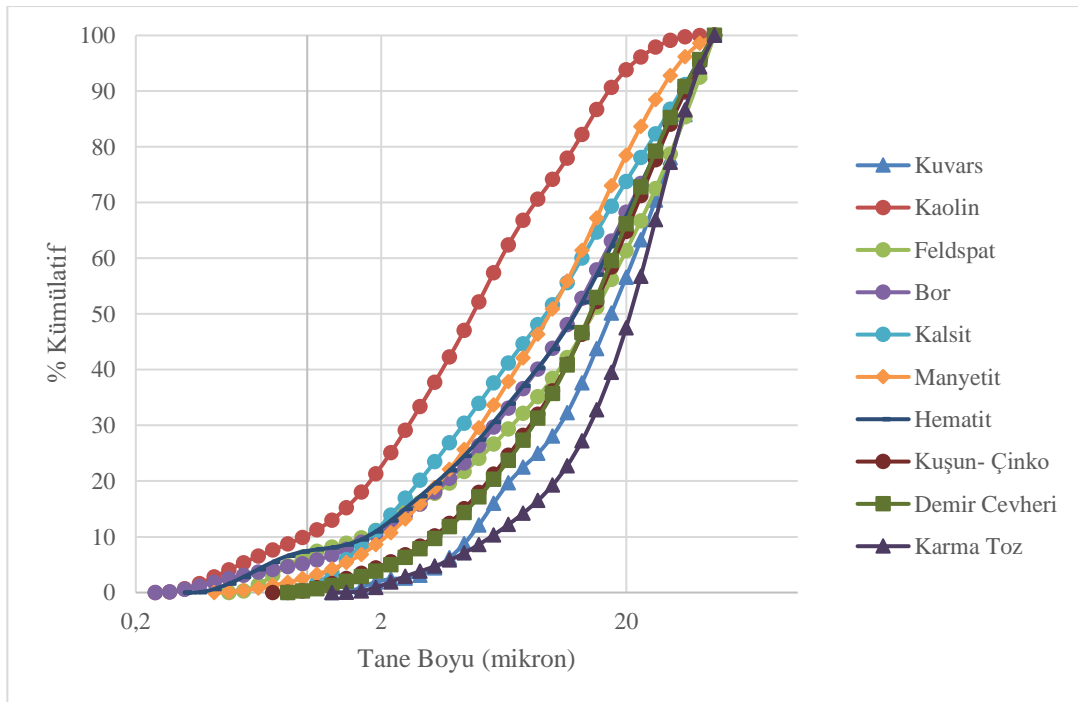
1. Kuru ve temiz olan piknometre şişelerinin kapağıyla beraber boş ölçümü alınmıştır.
2. İçerisinde kuru numune eklenerek kapağı kapatılmış, ağırlığı ölçülmüştür.
3. Piknometre şişesi içerisindeki kuru numuneye su eklenmiş, ve iyice karıştırılmıştır. Karıştırılan şişe içerisindeki malzemenin kapak kapatıldığında kaybedilmemesi için beklenmiş ve iğne delikli kapak boşluk olmadan kapatılmıştır. Bu su ve malzeme karışımının tartımı alınmıştır.
4. Su ve numune tartımı alındıktan sonra içerisindeki karışım dökülmüştür. Bu sefer şişe içerisine sadece su koyularak boşluk kalmayacak şekilde kapatılmıştır. Bu şekilde son tartım alınmıştır. İçerisinde sadece su varken tartımın değişmeyeceği bilindiği için bu tartım değeri yukarıda yer alan Eşitlik 5-2' de sabit tutulmuştur.
5. Eşitlik 5-1' de kullanılan denklem sonucunda elde edilen sonuçlar birbirlerine yakın olana kadar sırasıyla 1,2,3 ve 4. maddeler tekrar yapılmıştır. Her ölçüm en az iki kere tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar yakın görüldüğünde bu değerlerin ortalaması alınarak numunenin özgül ağırlığı belirlenmiştir.

Çizelge 5.10' da hazırlanan numuneler ve bu numunelerin piknometre testi ile belirlenen özgül ağırlık sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.10. Test numuneleri ve Özgül ağırlıkları testi

Hazırlanan Toz Numuneleri	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )
Hematit	3,33
Bor	2,48
Karışık Toz Numunesi	2,66
Kurşun-Çinko	3,12
Kalsit	2,51
Kuvars	2,64
Manyetit	4,09
Feldspat	2,55
Kaolin	2,45
Demir Cevheri	3,69

Hazırlanan toz numunelerinin tane boyu dağılımı çok ince olduğu için “Lazer Tane Okuyucu” ile tane boyu dağılımları yapılmıştır. Şekil 5.22’ de yapılan tane boyu analizlerinin sonucunda elde edilen tane boyu dağılımı grafiği verilmiştir.



Şekil 5.22. Toz numunelerinin tane boyu dağılımı

Şekil 5.22’ de tane boyu dağılımları verilen toz numunelerinin d80 değerleri, aşağıdaki Çizelge 5.11’de verilmiştir.

Çizelge 5.11. Hazırlanan toz numunelerinin d80 değerleri

<b>Toz Numunesi</b>	<b>d80</b>
Kuvars	31,35
Kaolin	12,31
Feldspat	25,36
Bor	27,20
Kalsit	24,47
Manyetit	20,81
Hematit	27,00
Kurşun- Çinko	27,73
Demir İçerikli Num.	16,32
Karma Toz	22,37

### 5.3.2. Toz Tutma Testleri

Toz tutma deneyleri aşağıdaki sistematığe dayalı olarak gerçekleştirilmiştir.

1. Toz tutma ünitesine beslenen numunelerin ağırlıkları 1 gramdan başlanarak 10 grama kadar değiştirilmiştir. Toz numuneleri toz tutucu plakalar arasından hava akışı içinde geçmesini temsilen, belirli bir mesafeden sabit bir hızda dökülmüştür. Böylece normal bir akışla tozların plakalar arasından geçişi sağlanmıştır. Bu çalışma kapsamında yalnızca tozun sistemde yakalanabilirliği incelendiğinden sisteme bir hava akışı beslemesi uygulanmamıştır. Hava akışı ile düzgün ve sabit hızda besleme yapılması mümkün olamadığından besleme sistemi bu aşamada bu şekilde sabitlenmiştir.
2. Numuneler hızı ayarlanabilir bir titreşimli besleyiciye yerleştirilmiş ve test koşullarına bağlı olarak toz tutma ünitesine sabit hızda besleme yapılmıştır. Böylece yüksek toz oranlarındaki geçiş de temsil edilmeye çalışılmıştır.
3. Hem her bir geçişte tutulan toz miktarları ölçülmüş, hem de plakalar tarafından tutulan toz numunelerinin ağırlıkları plakaların alanına oranlanarak birim alanda tutulan miktarlar hesaplanmıştır.
4. Belirlenen besleme miktarı, her bir cevher numunesinde aynı tutulmuştur. Test sonunda tutulmayan tozlar ayrı bir kapta toplanırken, tutulan tozlar statik yük boşaltılarak ayrı bir kapta toplanmıştır. Statik yük kesildiğinde

kendiliğinden dökülmeyen tozlar silkeleme veya bir fırça yardımı ile yapıştığı plakalardan ayrılmıştır.

5. Deneyleerde iki farklı alüminyum plaka kullanılmıştır. Bunlar düz (gözeneksiz) ve gözenekli plakalardır. Her iki farklı plakadan da bütün numuneler geçirilerek test edilmiştir. Düz ve gözenekli plakalara pozitif ve negatif güç verilerek tutulan toz kapasiteleri incelenmiştir.

### 5.3.2.1. Besleme Miktarının Toz Tutma Kapasitesine Etkisi

Titreşimli besleyici kullanılarak kuru toz halindeki cevher numuneleri, tasarlanmış olan toz tutma ünitesine beslenmiştir. Öncelikle toz tutma işlemi pozitif yüklü plakalarla gerçekleştirilmiştir. Besleyicinin ağız genişliğinin 5 cm olması sebebiyle, toz tutucu filtrenin 8,5 cm'lik eninden 5 cm'lik kısmı aktif olarak toz tutma performansı sergilemiştir. Besleyicinin ağız genişliği 6 adet plakaya denk gelmesi sebebiyle 6 adet plaka elektrot toz yakalamıştır. Toz tutucu plaka elektrotlarının alanı aşağıdaki Eşitlik 5-2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Toplam Plaka Alanı} = \text{Plaka Uzunluğu} \times \text{Plaka Eni} \quad \text{Eşitlik 5-2}$$

$$14 \times 5 = 70 \text{ cm}^2 \quad \text{Eşitlik 5-3}$$

$$70 \times 2 = 140 \text{ cm}^2 \quad \text{Eşitlik 5-4}$$

$$140 \times 6 = 840 \text{ cm}^2 \quad \text{Eşitlik 5-5}$$

Bu hesaplamalarda kullanılan her bir plakanın alanı hesaplanmıştır (Eşitlik 5-3). Plakanın her iki yüzeyi ile de toz yakalama gerçekleştirildiği için çıkan alan sayısı iki ile çarpılmıştır (Eşitlik 5-4). Her bir plaka için elde edilen bu değer 6 ile çarpılmıştır (Eşitlik 5-5). Böylelikle toz toplayıcı plaka elektrotlarının alanı 840 cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Plakalar 1 dk statik yüküyle yüklendikten sonra toz tutucu hazne içerisine besleme yapılmıştır. Besleme 120 sn boyunca toz haznesine yapılmıştır.

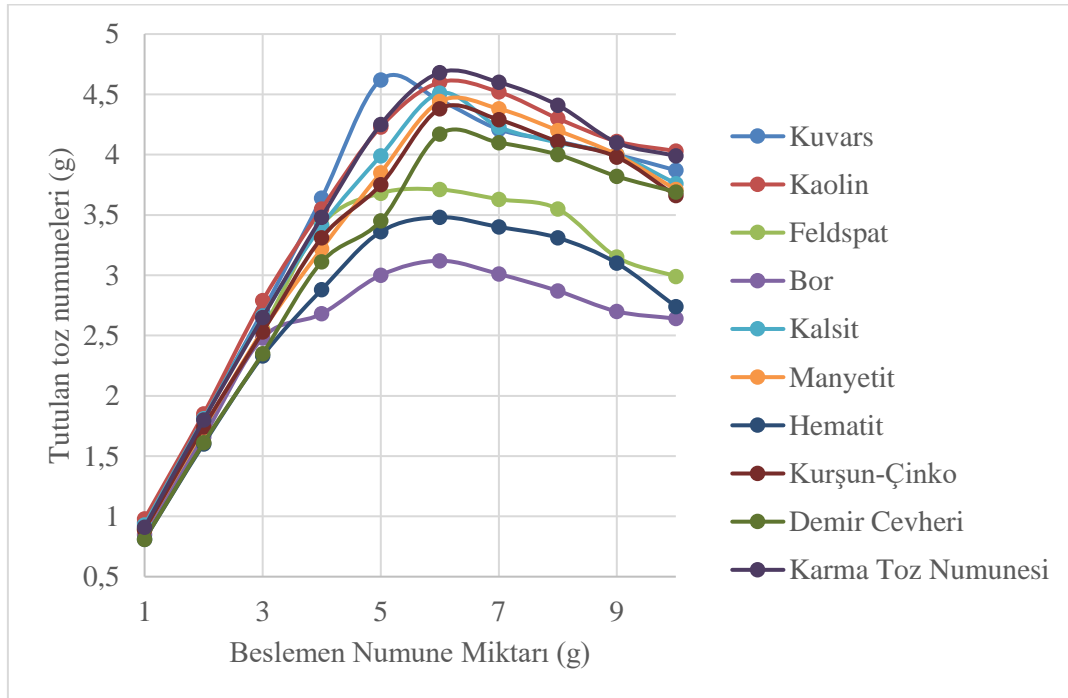
Bu bölümde farklı nitelikteki tozlar, düz plakaların kullanıldığı toz tutma ünitesine ve gözenekli plakaların kullanıldığı toz tutma ünitesine ayrı ayrı beslenmiştir. Besleme işleminde hem negatif yük hem de pozitif yükleme yapılmıştır.

Besleme numunelerin miktarı arttıkça plakalar tarafından tutulan ağırlıkları (g) pozitif yüklü plakalar için Çizelge 5.12' de verilmiştir. Plakaların yakaladığı toz numunelerinin alanına olan oranları hesaplanarak plakaların birim alan başına toz tutma kapasiteleri (g/cm<sup>2</sup>) de Çizelge 5.14' te pozitif yük için verilmiştir.



Çizelge 5.12. Pozitif yüklü düz plaka ile yakalanan toz miktarları

Pozitif Yükte Düz Plaka ile Yakalanan Toz Numunelerinin Miktarları (g)										
Besleme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Kuvars</b>	0,95	1,82	2,70	3,64	4,62	4,45	4,21	4,11	4,00	3,87
<b>Kaolin</b>	0,98	1,85	2,79	3,55	4,23	4,60	4,52	4,3	4,11	4,03
<b>Feldspat</b>	0,90	1,71	2,55	3,42	3,68	3,71	3,63	3,55	3,15	2,99
<b>Bor</b>	0,85	1,66	2,48	2,68	3,00	3,12	3,01	2,87	2,70	2,64
<b>Kalsit</b>	0,93	1,81	2,66	3,41	3,99	4,51	4,23	4,10	4,00	3,76
<b>Manyetit</b>	0,89	1,73	2,54	3,22	3,85	4,44	4,38	4,20	4,00	3,71
<b>Hematit</b>	0,81	1,60	2,33	2,88	3,36	3,48	3,4	3,31	3,10	2,74
<b>Kurşun- Çinko</b>	0,89	1,74	2,53	3,31	3,75	4,38	4,29	4,11	3,98	3,66
<b>Demir C.</b>	0,81	1,61	2,35	3,11	3,45	4,17	4,10	4,00	3,82	3,69
<b>Karma Toz</b>	0,91	1,80	2,65	3,48	4,25	4,68	4,60	4,41	4,10	3,99



Şekil 5.23. Pozitif yüklü düz plakalar ile tutulan toz miktarları

Çizelge 5.13. Pozitif yüklü düz plakaların artan besleme miktarlarına göre tutulan toz miktarı (%)

<b>Pozitif Yüklü Düz Plaka Tutulan Toz Miktarı (%)</b>										
<b>Besleme</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Kuvars</b>	95,0	91,0	90,0	91,0	92,4	74,2	60,1	51,4	44,4	38,7
<b>Kaolin</b>	98,0	92,5	93,0	88,8	84,6	76,7	64,6	53,8	45,7	40,3
<b>Feldspat</b>	90,0	85,5	85,0	85,5	73,6	61,8	51,9	44,4	35,0	29,9
<b>Bor</b>	85,0	83,0	82,7	67,0	60,0	52,0	43,0	35,9	30,0	26,4
<b>Kalsit</b>	93,0	90,5	88,7	85,3	79,8	75,2	60,4	51,3	44,4	37,6
<b>Manyetit</b>	89,0	86,5	84,7	80,5	77,0	74,0	62,6	52,5	44,4	37,1
<b>Hematit</b>	81,0	80,0	77,7	72,0	67,2	58,0	48,6	41,4	34,4	27,4
<b>Kurşun- Çinko</b>	86,0	85,0	79,3	64,0	56,2	57,5	47,6	40,8	35,3	30,9
<b>Demir C.</b>	84,0	83,0	82,7	63,8	53,8	56,8	48,3	41,4	36,0	31,4
<b>Karma Toz</b>	90,0	86,0	83,0	75,5	58,8	58,2	48,7	41,8	36,7	32,2

Pozitif yüklü düz plakalara beslenen farklı toz numunelerinden tutulan miktarlar, beslemeye oranlanarak verimi değerleri elde edilmiştir (Çizelge 5.13). 6 g'dan sonra tutulan toz veriminde düşüş olduğu görülmüştür.

Pozitif yüklü düz plakalar ile tutulan toz miktarlarının tartımları (g), kullanılan plaka alanına oranlanarak  $\text{cm}^2$  başına tutulan g hesaplanmıştır (Çizelge 5.14).

Çizelge 5.14. Besleme miktarındaki artışa bağlı olarak pozitif yüklü düz plaka ile birim alan başına tutulan toz miktarı

<b>Pozitif Yükte Elektrotun Alanına Göre Tuttuğu Numune Oranı (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>										
<b>Besleme</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Kuvars</b>	0,0011	0,0022	0,0032	0,0043	0,0055	0,0053	0,0050	0,0049	0,0048	0,0046
<b>Kaolin</b>	0,0012	0,0022	0,0033	0,0042	0,0050	0,0055	0,0054	0,0051	0,0049	0,0048
<b>Feldspat</b>	0,0011	0,0020	0,0030	0,0041	0,0044	0,0044	0,0043	0,0042	0,0038	0,0036
<b>Bor</b>	0,0010	0,0020	0,0030	0,0032	0,0036	0,0037	0,0036	0,0034	0,0032	0,0031
<b>Kalsit</b>	0,0011	0,0022	0,0032	0,0041	0,0048	0,0054	0,0050	0,0049	0,0048	0,0045
<b>Manyetit</b>	0,0011	0,0021	0,0030	0,0038	0,0046	0,0053	0,0052	0,0050	0,0048	0,0044
<b>Hematit</b>	0,0010	0,0019	0,0028	0,0034	0,0040	0,0041	0,0040	0,0039	0,0037	0,0033
<b>Kurşun- Çinko</b>	0,0011	0,0021	0,0030	0,0039	0,0045	0,0052	0,0051	0,0049	0,0047	0,0044
<b>Demir C.</b>	0,0010	0,0019	0,0028	0,0037	0,0041	0,0050	0,0049	0,0048	0,0045	0,0044
<b>Karma Toz</b>	0,0011	0,0021	0,0032	0,0041	0,0051	0,0056	0,0055	0,0053	0,0049	0,0048

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde plakalar tarafından tutulan toz miktarının beslenen miktardaki artışa bağlı olarak ilk başlarda arttığı, belirli bir değerden sonra nisbeten sabit kaldığı görülmektedir (Şekil 5.23). Genel olarak yakanan miktarlar beslenen malzemenin

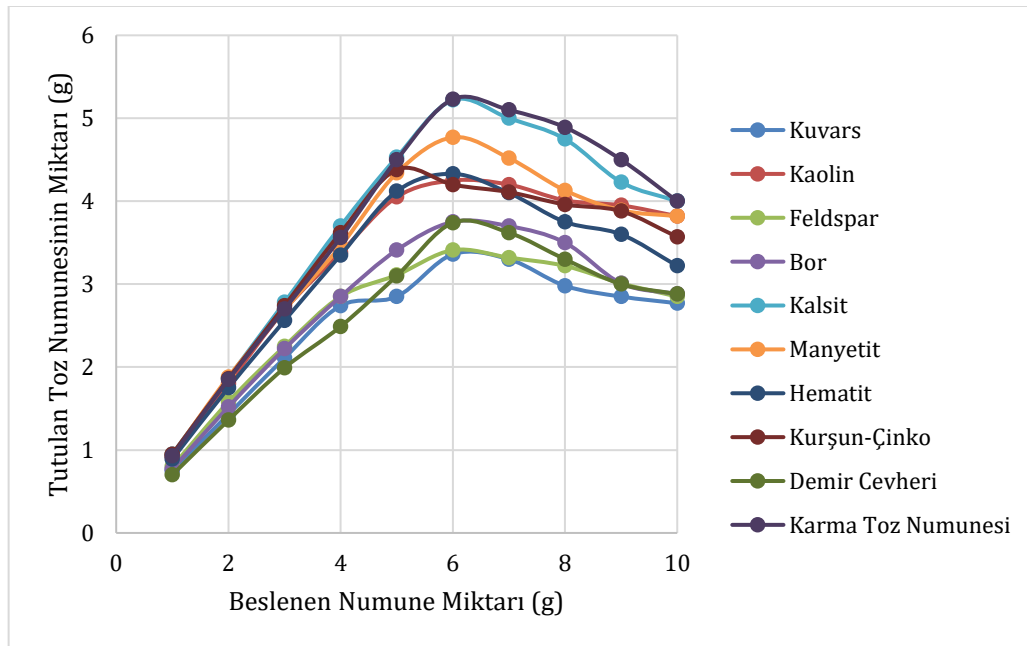
cinsine göre de farklılık göstermekle birlikte birim alan başına tutulan miktar 0.010-0.055 g/cm<sup>2</sup> aralığında olmaktadır.

Benzer çalışma negatif yükleme yapıldıktan sonra da tekrarlanmıştır. Yapılan deneylerin sonucu aşağıda yer alan Çizelge 5.15’de verilmiştir. Düz plakaların tuttuğu numunelerin plaka alanlarına oranı ise Çizelge 5.17’de verilmiştir.

Çizelge 5.15. Negatif yüklü düz plakanın yakaladığı toz miktarları

Negatif Yükle Düzlü Plaka ile Yakalanan Toz Numunelerinin Miktarları (g)										
Besleme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Kuvars</b>	0,75	1,43	2,11	2,74	2,85	3,36	3,30	2,98	2,85	2,77
<b>Kaolin</b>	0,92	1,80	2,69	3,38	4,05	4,25	4,20	4,01	3,95	3,82
<b>Feldspat</b>	0,80	1,58	2,25	2,85	3,11	3,41	3,32	3,22	3,01	2,85
<b>Bor</b>	0,77	1,52	2,22	2,85	3,41	3,75	3,70	3,50	3,01	2,88
<b>Kalsit</b>	0,95	1,87	2,78	3,70	4,53	5,22	5,00	4,75	4,23	4,00
<b>Manyetit</b>	0,94	1,88	2,69	3,46	4,34	4,77	4,52	4,13	3,89	3,82
<b>Hematit</b>	0,89	1,75	2,56	3,35	4,12	4,33	4,10	3,75	3,60	3,22
<b>Kurşun- Çinko</b>	0,95	1,86	2,74	3,62	4,38	4,20	4,11	3,96	3,88	3,57
<b>Demir C.</b>	0,70	1,36	1,99	2,49	3,10	3,74	3,62	3,30	3,00	2,88
<b>Karma Toz</b>	0,93	1,85	2,70	3,56	4,50	5,23	5,10	4,89	4,50	4,00

Şekil 5.24’de de görüldüğü üzere besleme 6 g’ dan sonra plakalar ile tutulan toz miktarları azalmaktadır.



Şekil 5.24. Negatif yüklü plakaların yakaladığı toz miktarları (g)

Çizelge 5.16. Negatif yüklü düz plakaların artan besleme miktarlarına göre tutulan toz miktarı (%)

Negatif Yüklü Düz Plaka Tutulan Toz Miktarı (%)										
Besleme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Kuvars</b>	75,0	71,5	70,3	68,5	57,0	56,0	47,1	37,3	31,7	27,7
<b>Kaolin</b>	92,0	90,0	89,7	84,5	81,0	70,8	60,0	50,1	43,9	38,2
<b>Feldspat</b>	80,0	79,0	75,0	71,3	62,2	56,8	47,4	40,3	33,4	28,5
<b>Bor</b>	77,0	76,0	74,0	71,3	68,2	62,5	52,9	43,8	33,4	28,8
<b>Kalsit</b>	95,0	93,5	92,7	92,5	90,6	87,0	71,4	59,4	47,0	40,0
<b>Manyetit</b>	94,0	94,0	89,7	86,5	86,8	79,5	64,6	51,6	43,2	38,2
<b>Hematit</b>	89,0	87,5	85,3	83,8	82,4	72,2	58,6	46,9	40,0	32,2
<b>Kurşun- Çinko</b>	95,0	93,0	91,3	90,5	87,6	70,0	58,7	49,5	43,1	35,7
<b>Demir C.</b>	70,0	68,0	66,3	62,3	62,0	62,3	51,7	41,3	33,3	28,8
<b>Karma Toz</b>	93,0	92,5	90,0	89,0	90,0	87,2	72,9	61,1	50,0	40,0

Pozitif yüklü düz plakalar için yapılan verim hesabının aynısı negatif yüklü düz plakalar içinde yapılmıştır (Çizelge 5.16). Daha önce elde edilen sonuçlara benzer şekilde 6 g beslemeden sonra verimin düşmeye başladığı görülmüştür.

Pozitif yük ile yapılan çalışmaya benzer olarak besleme miktarındaki artış ile tutulan miktar belirli bir değere kadar artmakta ondan sonra ise sabit kalmaktadır (Şekil 5.24).

Çizelge 5.17. Besleme miktarındaki artışa bağlı olarak negatif yüklü düz plaka ile birim alan başına tutulan toz miktarı

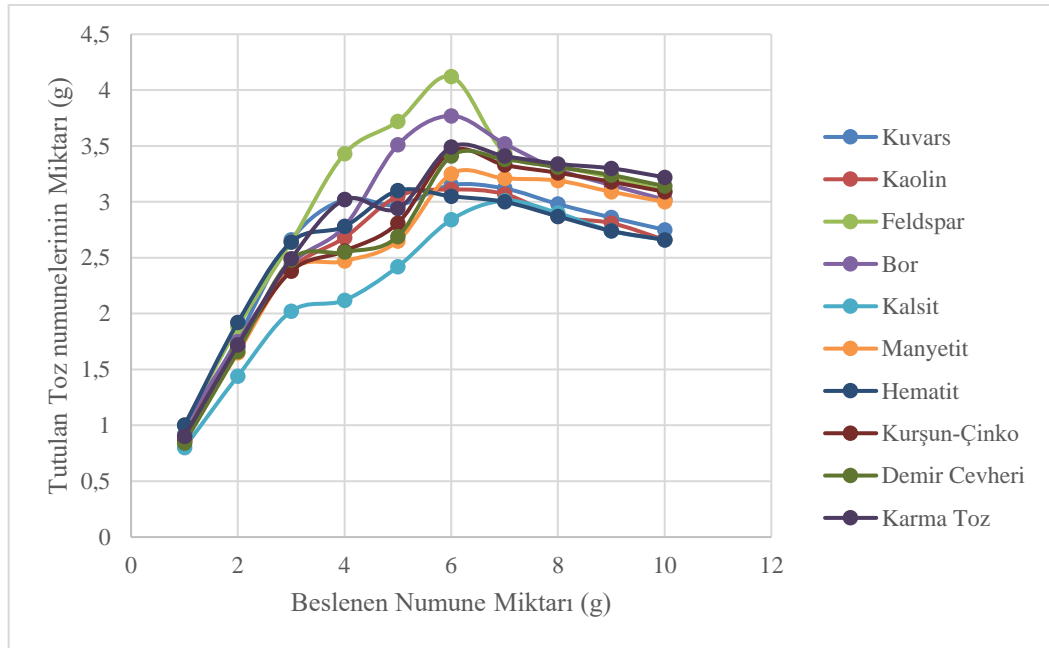
Negatif Yükte Elektrotun Alanına Göre Tuttuğu Numune Oranı (g/cm <sup>3</sup> )										
Besleme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Kuvars</b>	0,0009	0,0017	0,0025	0,0033	0,0034	0,0040	0,0039	0,0035	0,0034	0,0033
<b>Kaolin</b>	0,0011	0,0021	0,0032	0,0040	0,0048	0,0051	0,0050	0,0048	0,0047	0,0045
<b>Feldspat</b>	0,0010	0,0019	0,0027	0,0034	0,0037	0,0041	0,0040	0,0038	0,0036	0,0034
<b>Bor</b>	0,0009	0,0018	0,0026	0,0034	0,0041	0,0045	0,0044	0,0042	0,0036	0,0034
<b>Kalsit</b>	0,0011	0,0022	0,0033	0,0044	0,0054	0,0062	0,0060	0,0057	0,0050	0,0048
<b>Manyetit</b>	0,0011	0,0022	0,0032	0,0041	0,0052	0,0057	0,0054	0,0049	0,0046	0,0045
<b>Hematit</b>	0,0011	0,0021	0,0030	0,0040	0,0049	0,0052	0,0049	0,0045	0,0043	0,0038
<b>Kurşun - Çinko</b>	0,0011	0,0022	0,0033	0,0043	0,0052	0,0050	0,0049	0,0047	0,0046	0,0043
<b>Demir C.</b>	0,0008	0,0016	0,0024	0,0030	0,0037	0,0045	0,0043	0,0039	0,0036	0,0034
<b>Karma Toz</b>	0,0011	0,0022	0,0032	0,0042	0,0054	0,0062	0,0061	0,0058	0,0054	0,0048

Negatif yüklü düz plakalar birim alan başına 0,009-0,062 g/cm<sup>2</sup> aralığında toz tutmuştur (Çizelge 5.17). Çalışma kapsamında gözenekli plakanın etkisini incelemek amacıyla toz tutma ünitesindeki düz plakalar yerine benzer ebatlardaki gözenekli plakalar yerleştirilmiş ve testler tekrarlanmıştır.

Çizelge 5.18 ve Çizelge 5.20’ de gözenekli plaka kullanılarak pozitif ve negatif yük için yapılan toz tutma deneylerin sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.18. Pozitif yüklü gözenekli plaka ile yakalanan toz miktarları (g)

Pozitif Yükte Gözenekli Plaka ile Yakalanan Toz Numunelerinin Miktarları (g)										
Besleme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Kuvars</b>	0,92	1,78	2,66	3,02	2,97	3,15	3,12	2,98	2,86	2,75
<b>Kaolin</b>	0,90	1,75	2,40	2,68	3,05	3,11	3,07	2,87	2,81	2,66
<b>Feldspat</b>	1,00	1,88	2,64	3,43	3,72	4,12	3,44	3,32	3,22	3,10
<b>Bor</b>	0,89	1,75	2,44	2,78	3,51	3,77	3,52	3,29	3,15	3,02
<b>Kalsit</b>	0,80	1,44	2,02	2,12	2,42	2,84	3,01	2,90	2,74	2,66
<b>Manyetit</b>	0,87	1,65	2,39	2,47	2,65	3,25	3,21	3,19	3,09	3,00
<b>Hematit</b>	1,00	1,92	2,64	2,78	3,10	3,05	3,00	2,87	2,74	2,66
<b>Kurşun- Çinko</b>	0,86	1,70	2,38	2,56	2,81	3,45	3,33	3,26	3,18	3,09
<b>Demir C.</b>	0,84	1,66	2,48	2,55	2,69	3,41	3,38	3,31	3,24	3,14
<b>Karma Toz</b>	0,90	1,72	2,49	3,02	2,94	3,49	3,41	3,34	3,30	3,22



Şekil 5.25. Pozitif yüklü gözenekli plakalar ile yakalanan toz numuneleri

Pozitif yüklü gözenekli plakalarla tutulan tozların miktarlar, gözenekli plaka alanlarına oranlanmış ve Çizelge 5.20’ da ki değerler elde edilmiştir. Şekil 5.25’ de görüldüğü üzere 6 g beslemeden sonra tutulan toz ağırlıkları azalmıştır.

Çizelge 5.19. Pozitif yüklü gözenekli plakaların artan besleme miktarlarına göre tutulan toz miktarı (%)

Pozitif Yüklü Gözenekli Plaka Tutulan Toz Miktarı (%)										
Besleme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Kuvars</b>	92,0	89,0	88,7	75,5	59,4	52,5	44,6	37,3	31,8	27,5
<b>Kaolin</b>	90,0	87,5	80,0	67,0	61,0	51,8	43,9	35,9	31,2	26,6
<b>Feldspat</b>	100,0	94,0	88,0	85,8	74,4	68,7	49,1	41,5	35,8	31,0
<b>Bor</b>	100,0	87,5	81,3	69,5	70,2	62,8	50,3	41,1	35,0	30,2
<b>Kalsit</b>	80,0	72,0	67,3	53,0	48,4	47,3	43,0	36,3	30,4	26,6
<b>Manyetit</b>	87,0	82,5	79,7	61,8	53,0	54,2	45,9	39,9	34,3	30,0
<b>Hematit</b>	100,0	96,0	88,0	69,5	62,0	50,8	42,9	35,9	30,4	26,6
<b>Kurşun- Çinko</b>	86,0	85,0	79,3	64,0	56,2	57,5	47,6	40,8	35,3	30,9
<b>Demir C.</b>	84,0	83,0	82,7	63,8	53,8	56,8	48,3	41,4	36,0	31,4
<b>Karma Toz</b>	90,0	86,0	83,0	75,5	58,8	58,2	48,7	41,8	36,7	32,2

Toz tutma haznesine yapılan beslemenin miktarı ve tutulan toz miktarı oranlanarak, plakaların toz tutma verimleri hesaplanmıştır (Çizelge 5.19). Bu sonuçlar ışında 6 g beslemeden sonra tutulan toz veriminin düştüğü görülmüştür.

Çizelge 5.20. Besleme miktarındaki artışa bağlı olarak pozitif yükü gözenekli plaka ile birim alan başına tutulan toz miktarı

Pozitif Yükte Elektrotun Alanına Göre Tuttuğu Numune Oranı (g/cm <sup>2</sup> )										
Besleme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Kuvars</b>	0,0011	0,0021	0,0032	0,0036	0,0035	0,0038	0,0037	0,0035	0,0034	0,0033
<b>Kaolin</b>	0,0011	0,0021	0,0029	0,0032	0,0036	0,0037	0,0037	0,0034	0,0033	0,0032
<b>Feldspat</b>	0,0012	0,0022	0,0031	0,0041	0,0044	0,0049	0,0041	0,0040	0,0038	0,0037
<b>Bor</b>	0,0011	0,0021	0,0029	0,0033	0,0042	0,0045	0,0042	0,0039	0,0038	0,0036
<b>Kalsit</b>	0,0010	0,0017	0,0024	0,0025	0,0029	0,0034	0,0036	0,0035	0,0033	0,0032
<b>Manyetit</b>	0,0010	0,0020	0,0028	0,0029	0,0032	0,0039	0,0038	0,0038	0,0037	0,0036
<b>Hematit</b>	0,0012	0,0023	0,0031	0,0033	0,0037	0,0036	0,0036	0,0034	0,0033	0,0032
<b>Kurşun- Çinko</b>	0,0010	0,0020	0,0028	0,0030	0,0033	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037
<b>Demir C.</b>	0,0010	0,0020	0,0030	0,0030	0,0032	0,0041	0,0040	0,0039	0,0039	0,0037
<b>Karma Toz</b>	0,0011	0,0020	0,0030	0,0036	0,0035	0,0042	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038

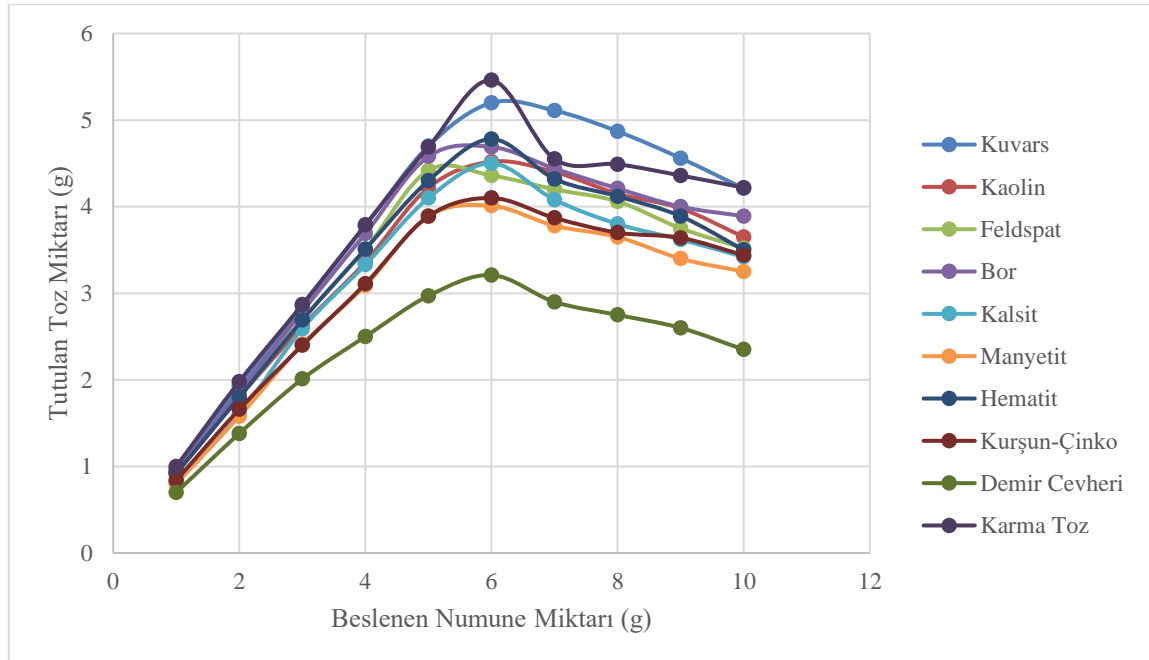
Düz plaka ile yapılan deneylerin sonucuna benzer bir şekilde, beslenen numunenin cinsine göre birim alan başına tutulan miktarın farklılık gösterdiği görülmüştür. Pozitif yüklü gözenekli plakaların 0,011-0,049 g/cm<sup>2</sup> aralığında birim alan başına toz tutmuştur (Çizelge 5.20).

Negatif yükleme yapıldıktan sonra plakalar ile toz tutma işlemi tekrarlanmıştır. Yapılan deneylerin sonuçlarından tutulan toz miktarları Çizelge 5.21’ de; birim alan başına tutulan toz miktarları ise Çizelge 5.23’ de verilmiştir.

Çizelge 5.21. Negatif yüklü gözenekli plakanın tuttuğu toz miktarı

Negatif Yükte Gözenekli Plaka ile Yakalanan Toz Numunelerinin Miktarları (g)										
Besleme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Kuvars</b>	0,97	1,93	2,85	3,78	4,70	5,2	5,11	4,87	4,56	4,21
<b>Kaolin</b>	0,92	1,80	2,62	3,36	4,22	4,52	4,40	4,15	3,98	3,65
<b>Feldspat</b>	0,91	1,82	2,70	3,51	4,42	4,36	4,20	4,06	3,75	3,52
<b>Bor</b>	0,94	1,86	2,79	3,69	4,58	4,69	4,44	4,21	4,00	3,89
<b>Kalsit</b>	0,82	1,60	2,59	3,33	4,10	4,50	4,08	3,80	3,62	3,42
<b>Manyetit</b>	0,80	1,58	2,41	3,09	3,89	4,01	3,78	3,65	3,4	3,25
<b>Hematit</b>	0,92	1,80	2,69	3,51	4,30	4,78	4,32	4,12	3,89	3,50
<b>Kurşun-Çinko</b>	0,84	1,66	2,40	3,11	3,89	4,10	3,87	3,70	3,64	3,44
<b>Demir C.</b>	0,70	1,38	2,01	2,50	2,97	3,21	2,90	2,75	2,60	2,35
<b>Karma Toz</b>	1,00	1,98	2,87	3,79	4,69	5,46	4,55	4,49	4,36	4,22

Plakaların belirli bir miktara ulaştığında tuttuğu toz miktarının azaldığı daha önce yapılan toz tutma deneylerinde elde edilen verilere benzer çıktığı görülmüştür (Şekil 5.26).



Şekil 5.26. Negatif yüklü gözenekli plakaların tuttuğu toz miktarı

Çizelge 5.22. Negatif yüklü gözenekli plakaların artan besleme miktarlarına göre tutulan toz miktarı (%)

Negatif Yüklü Gözenekli Plaka Tutulan Toz Miktarı (%)										
Besleme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Kuvars</b>	97,0	96,5	95,0	94,5	94,0	86,7	73,0	60,9	50,7	42,1
<b>Kaolin</b>	92,0	90,0	87,3	84,0	84,4	75,3	62,9	51,9	44,2	36,5
<b>Feldspat</b>	91,0	91,0	90,0	87,8	88,4	72,7	60,0	50,8	41,7	35,2
<b>Bor</b>	94,0	93,0	93,0	92,3	91,6	78,2	63,4	52,6	44,4	38,9
<b>Kalsit</b>	82,0	80,0	86,3	83,3	82,0	75,0	58,3	47,5	40,2	34,2
<b>Manyetit</b>	80,0	79,0	80,3	77,3	77,8	66,8	54,0	45,6	37,8	32,5
<b>Hematit</b>	92,0	90,0	89,7	87,8	86,0	79,7	61,7	51,5	43,2	35,0
<b>Kurşun- Çinko</b>	84,0	83,0	80,0	77,8	77,8	68,3	55,3	46,3	40,4	34,4
<b>Demir C.</b>	70,0	69,0	67,0	62,5	59,4	53,5	41,4	34,4	28,9	23,5
<b>Karma Toz</b>	100,0	99,0	95,7	94,8	93,8	91,0	65,0	56,1	48,4	42,2

Negatif yüklü gözenekli plakalarda da toz tutma veriminin 6 g' dan sonra düştüğü görülmüştür (Çizelge 5.22). Yapılan pozitif ve negatif toz tutma verimlerinden de 6 g'dan sonra düşüş yaşadığının görülmesi sonucunda, toz tutma kapasitesinin en verimli toz tutma performansını 6 g beslemeye kadar sergilediği görülmüştür.

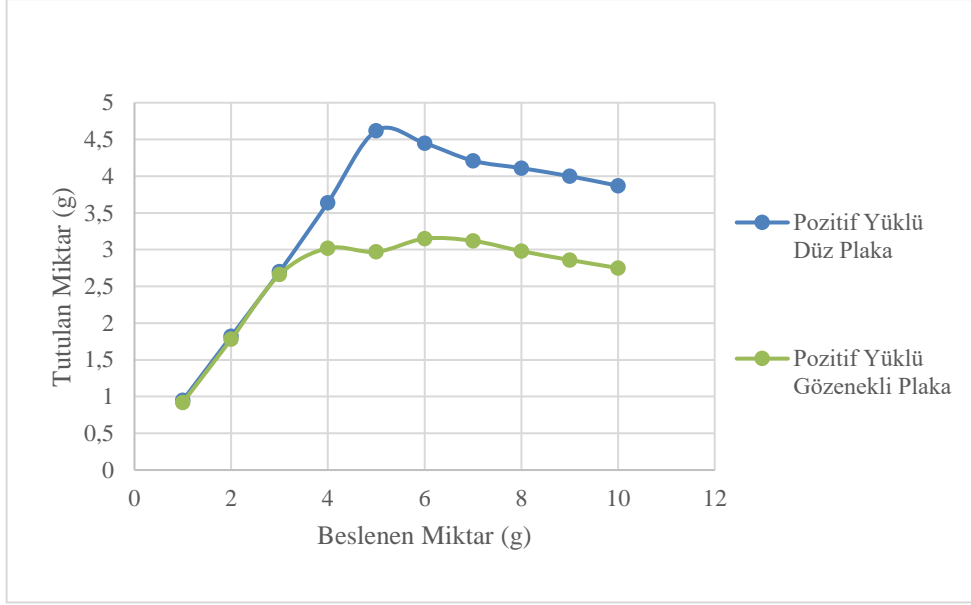
Çizelge 5.23. Besleme miktarındaki artışa bağlı olarak negatif yüklü gözenekli plaka ile birim alan başına tutulan toz miktarı

Negatif Yükle Elektrotun Alanına Göre Tuttuğu Numune Oranı (g/cm <sup>2</sup> )										
Besleme	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Kuvars</b>	0,0012	0,0023	0,0034	0,0045	0,0056	0,0062	0,0061	0,0058	0,0054	0,0050
<b>Kaolin</b>	0,0011	0,0021	0,0031	0,0040	0,0050	0,0054	0,0052	0,0049	0,0047	0,0043
<b>Feldspat</b>	0,0011	0,0022	0,0032	0,0042	0,0053	0,0052	0,0050	0,0048	0,0045	0,0042
<b>Bor</b>	0,0011	0,0022	0,0033	0,0044	0,0055	0,0056	0,0053	0,0050	0,0048	0,0046
<b>Kalsit</b>	0,0010	0,0019	0,0031	0,0040	0,0049	0,0054	0,0049	0,0045	0,0043	0,0041
<b>Manyetit</b>	0,0010	0,0019	0,0029	0,0037	0,0046	0,0048	0,0045	0,0043	0,0040	0,0039
<b>Hematit</b>	0,0011	0,0021	0,0032	0,0042	0,0051	0,0057	0,0051	0,0049	0,0046	0,0042
<b>Kurşun- Çinko</b>	0,0010	0,0020	0,0029	0,0037	0,0046	0,0049	0,0046	0,0044	0,0043	0,0041
<b>Demir C.</b>	0,0008	0,0016	0,0024	0,0030	0,0035	0,0038	0,0035	0,0033	0,0031	0,0028
<b>Karma Toz</b>	0,0012	0,0024	0,0034	0,0045	0,0056	0,0065	0,0054	0,0053	0,0052	0,0050

Negatif yüklü gözenekli plakaların 0,010-0,065 g/cm<sup>2</sup> aralığında birim alan başına toz tutmuştur (Çizelge 5.23).

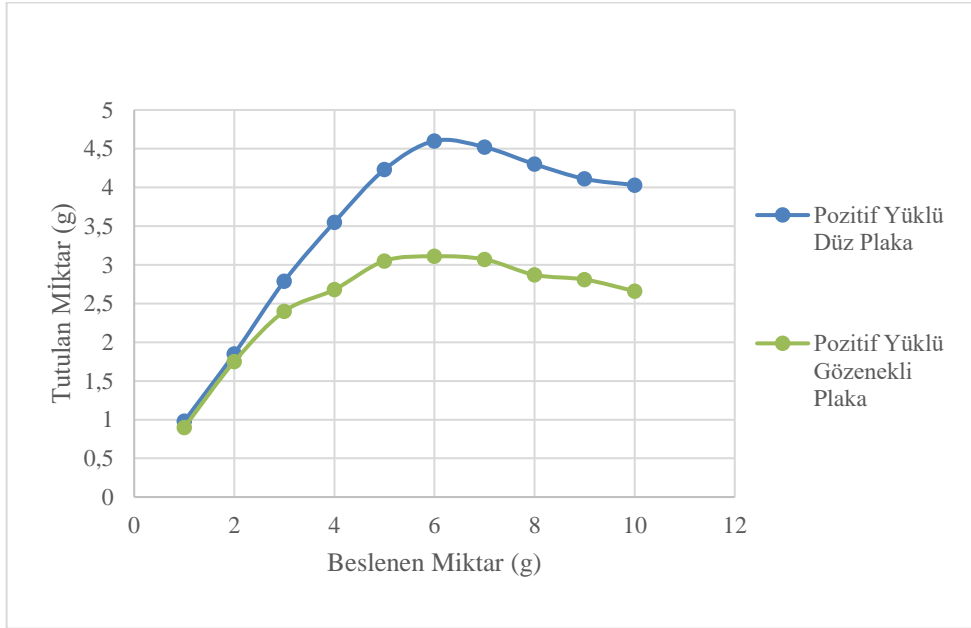
Farklı tozların gözenekli ve düz plaka kullanılması durumunda toz tutucu filtre ile ne oranda yakalandıkların aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Pozitif yüklü düz ve gözenekli plakaların yakaladığı toz oranı aşağıda Şekil 5.27'den Şekil 5.36'ya kadar verilmiştir.





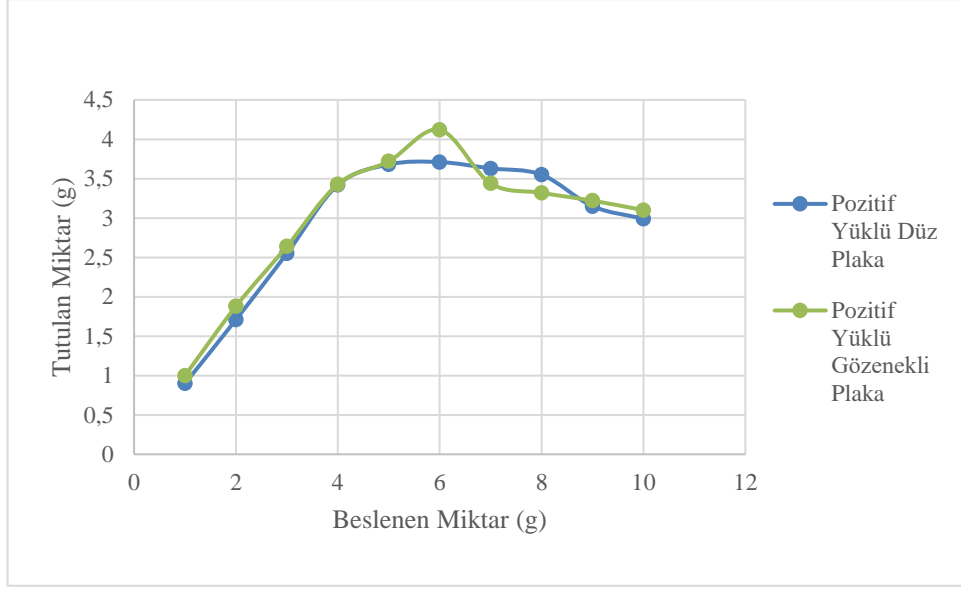
Şekil 5.27. Pozitif yüklü düz ve gözenekli plakaların kuvars tozunu yakalama miktarı

Pozitif yüklü düz plakanın, gözenekli plakaya kıyasla kuvars tozunu daha iyi miktarda yakaladığı görülmüştür (Şekil 5.27).



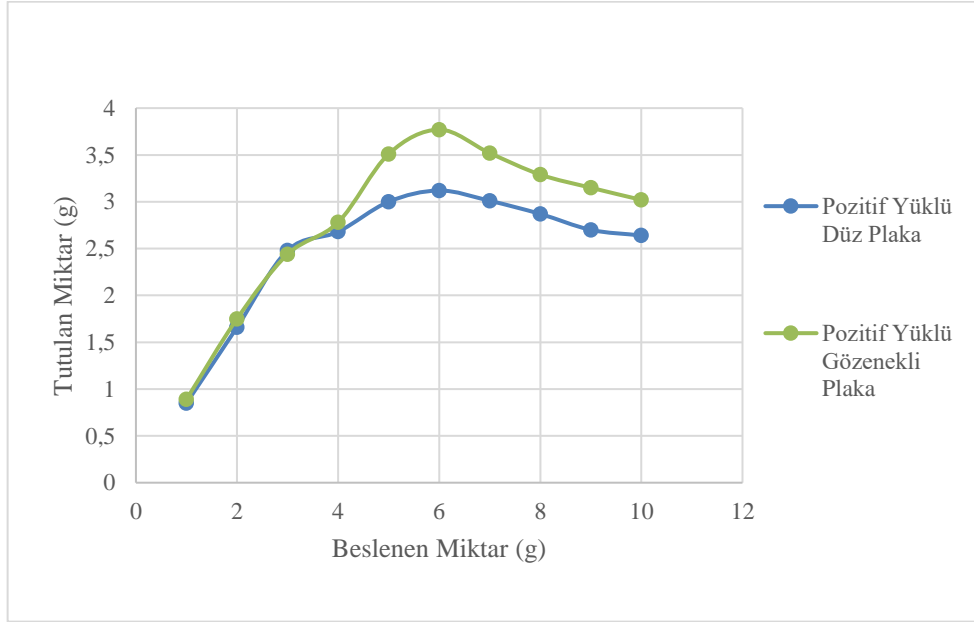
Şekil 5.28. Pozitif yüklü düz ve gözenekli plaka kaolin tozunu yakalama miktarı

Kaolin tozunu pozitif yüklü düz plakanın gözenekli plakaya kıyasla daha fazla tuttuğu Şekil 5.28' de de verildiği gibi görülmüştür.



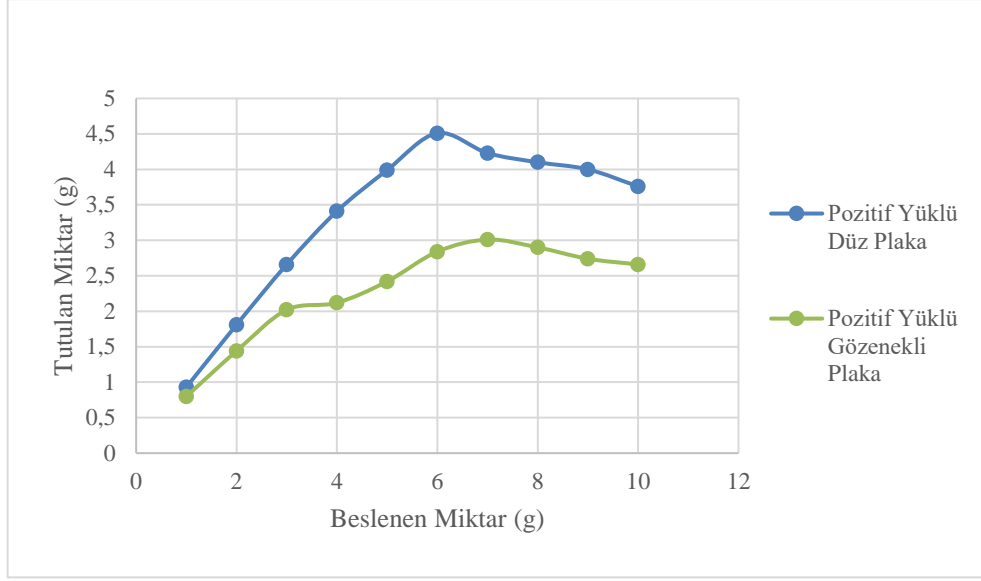
Şekil 5.29. Pozitif yüklü düz ve gözenekli plaka feldspat tozunu yakalama miktarı

Feldspat toz numunesiyle yapılan toz tutma deneylerinde, pozitif yüklü gözenekli plakanın daha fazla toz tuttuğu görülmüştür (Şekil 5.29). Ancak pozitif yükü düz plaka ile yapılan deneylerde de gözenekli plakaya yakın miktarda toz tutulmuştur.



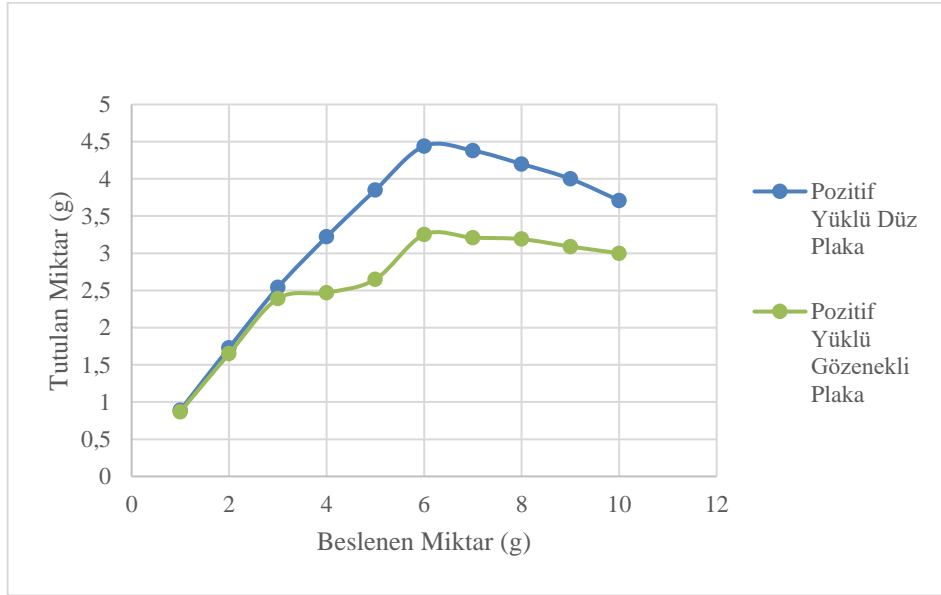
Şekil 5.30. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların bor tozunu yakalama miktarı

Bor tozu pozitif yüklü gözenekli plaka daha fazla tutmuştur (Şekil 5.30). Maksimum plaka kapasitesi olan 6 g' da gözenekli plakanın, düz plakadan yaklaşık 1 g daha fazla toz tuttuğu görülmüştür.



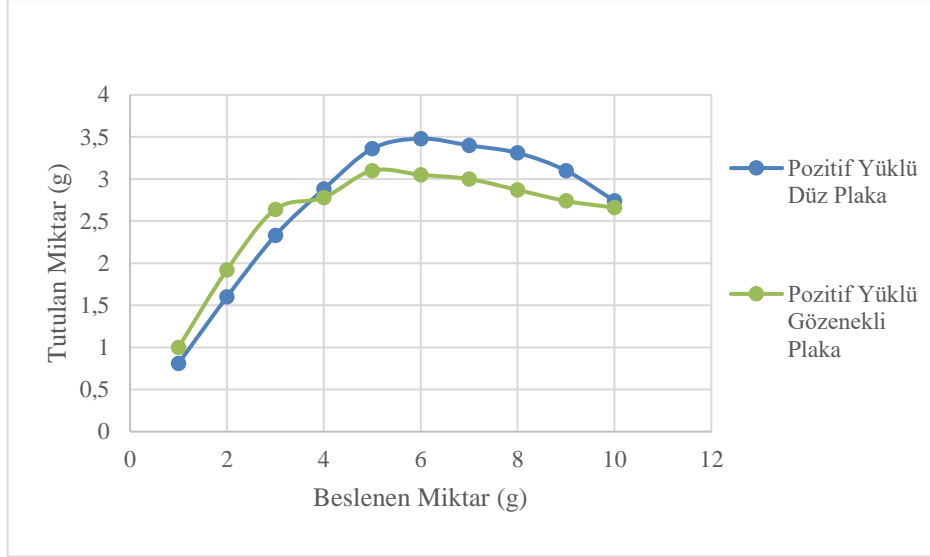
Şekil 5.31. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların kalsit tozunu yakalama miktarı

Kalsit tozu pozitif yüklü düz plaka ile daha fazla miktarda tutulmuştur. Maksimum plaka kapasitesi 6 g' da düz plaka gözenekli plakaya kıyasla 2 g kadar daha fazla toz tutmuştur (Şekil 5.31).



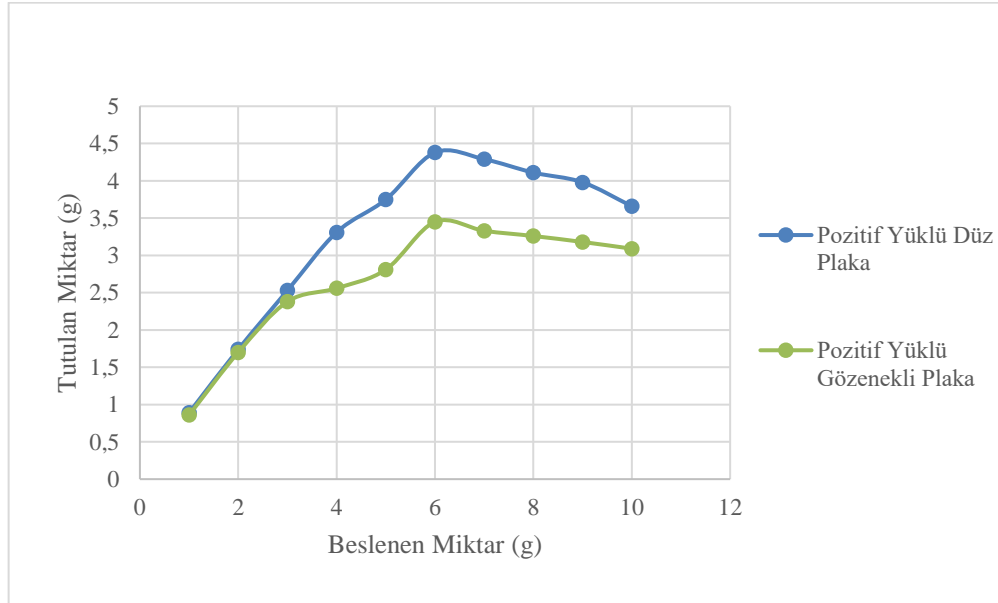
Şekil 5.32. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların manyetit tozunu yakalama miktarı

Manyetit tozu ile yapılan deneylerde pozitif yüklü düz plakanın daha fazla toz tuttuğu görülmüştür (Şekil 5.32). 6 g' da düz plakanın gözenekli plakadan yaklaşık 2 g daha fazla toz tuttuğu görülmüştür.



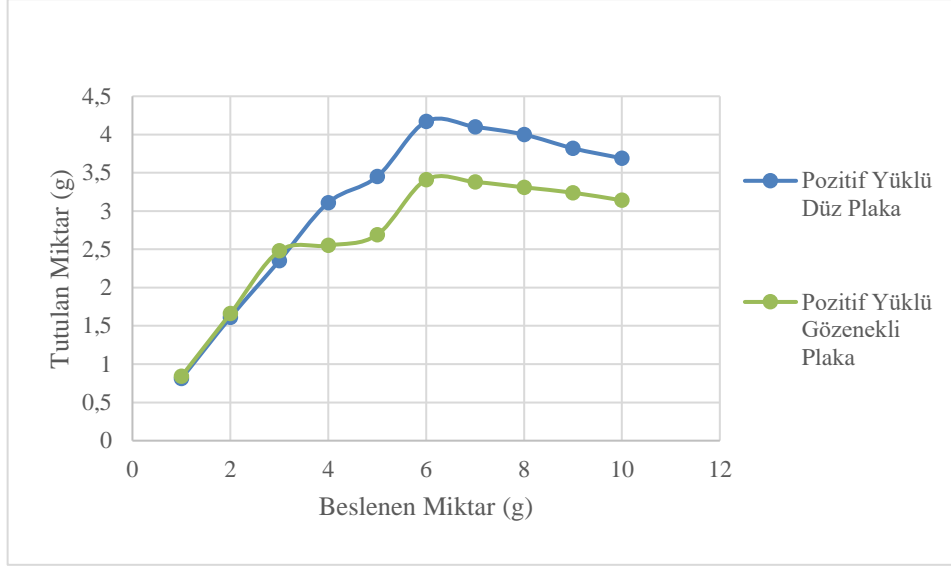
Şekil 5.33. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların hematit tozunu yakalama miktarı

Pozitif yüklü düz plakanın, gözenekli plakadan daha fazla hematit tozu tuttuğu görülmüştür. Ancak pozitif yüklü iki tür plakanın da hematit tozunu yakın miktarlarda tuttuğu görülmüştür (Şekil 5.33).



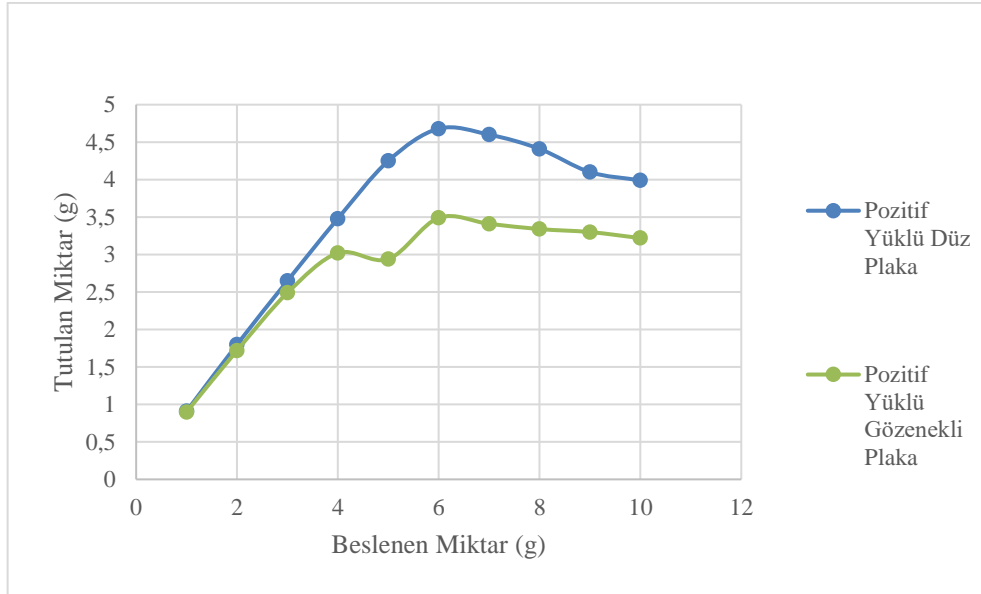
Şekil 5.34. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların kurşun-çinko tozunu yakalama miktarı

Kurşun- çinko tozunun pozitif yüklü düz plaka ile daha fazla tutulmuştur (Şekil 5.34). Pozitif yüklü düz plaka ve gözenekli plakaya yakın miktarda toz tuttuğu görülmüştür.



Şekil 5.35. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların demir cevher içerikli cevher tozunu yakalama miktarı

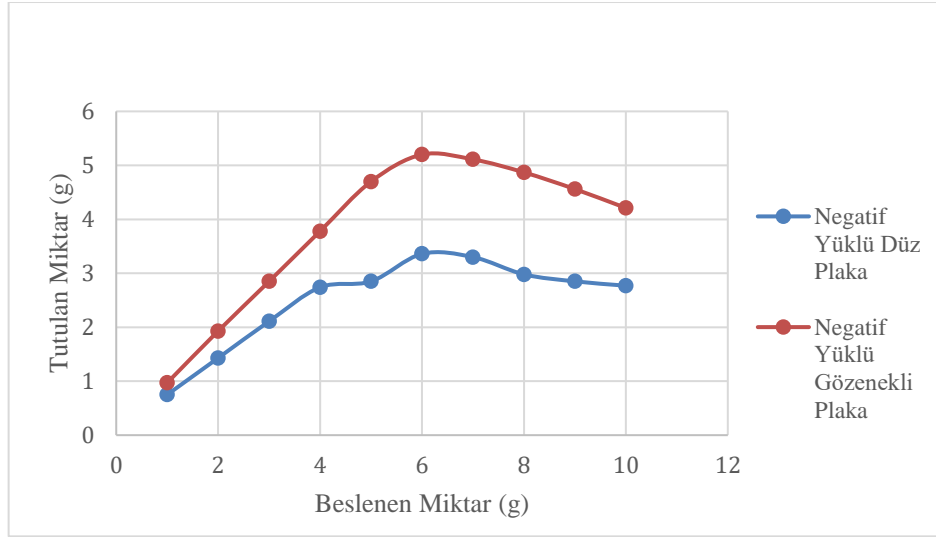
Demir içerikli cevher tozunun pozitif yüklü düz plaka ile daha fazla toz tutulmuştur (Şekil 5.35). Pozitif yüklü düz plaka ve gözenekli plakanın yakın miktarlarda toz tuttuğu görülmüştür.



Şekil 5.36. Pozitif yükü düz ve gözenekli plakaların karma tozu yakalama miktarı

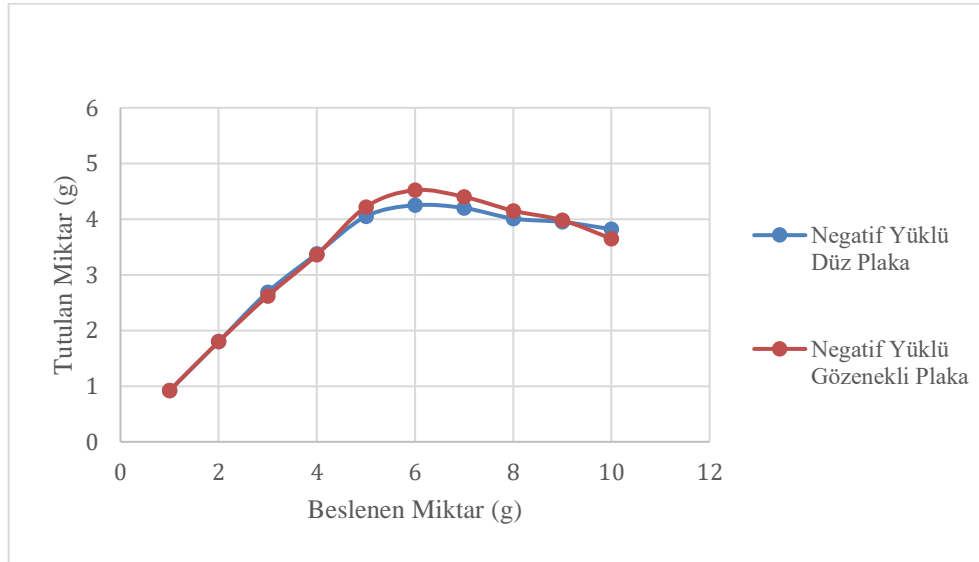
Karma toz numunesi ile yapılan toz tutma deneylerinde pozitif yüklü düz plaka ile daha fazla toz tutulduğu görülmüştür (Şekil 5.36). Karma toz numunesinin pozitif düz ve gözenekli plaka ile yakın miktarlarda tutulmuştur.

Pozitif yükü yapılan deneyler gibi negatif yüklü plakaların toz davranımlarını incelemek için, negatif yük ile de aynı deneyler yapılmıştır. Negatif yükü yapılan düz ve gözenekli plakaların toz yakalama oranları aşağıda verilmiş olan Şekil 5.37' den Şekil 5.46'ya kadar verilmiştir.



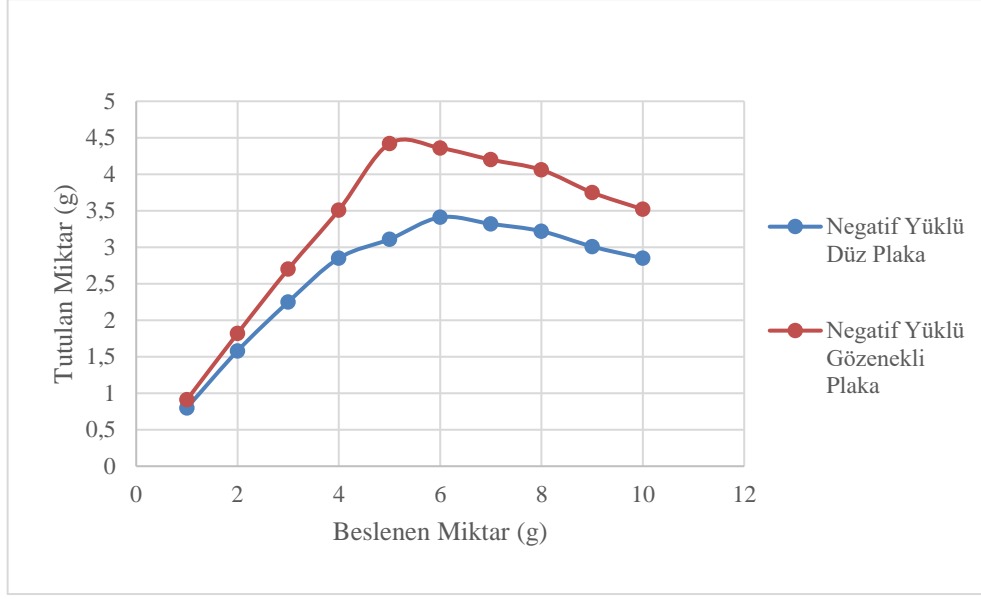
Şekil 5.37. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların kuvars tozu yakalama miktarı

Negatif yüklü gözenekli plakanın kuvars tozunu daha fazla miktarda tutmuştur (Şekil 5.37). Negatif yüklü gözenekli plakanın besleme miktarlarında ortalama olarak 2 g daha fazla toz tuttuğu görülmüştür.



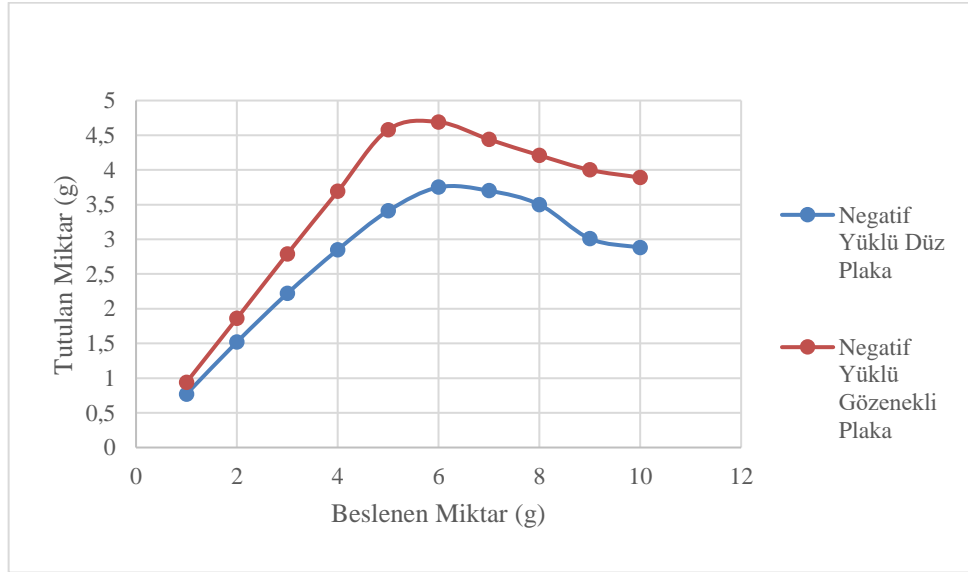
Şekil 5.38. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların kaolin tozu yakalama miktarı

Kaolin tozu negatif yüklü düz plaka ve negatif yüklü gözenekli plaka ile yapılan deneylerde yaklaşık olarak aynı miktar toz tutmuştur (Şekil 5.38).



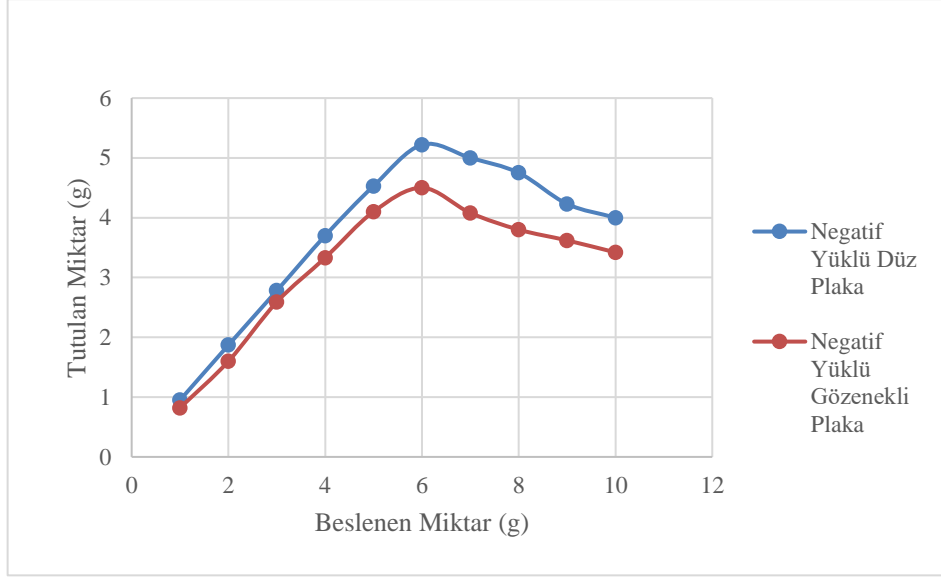
Şekil 5.39. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların feldspat tozu yakalama miktarı

Feldspat tozu negatif yüklü gözenekli plaka ile daha fazla miktarda tutulmuştur (Şekil 5.39). Negatif yüklü gözenekli plakanın düz plakaya kıyasla beslemeden yaklaşık 2 g daha fazla toz numunesi tuttuğu görülmüştür.



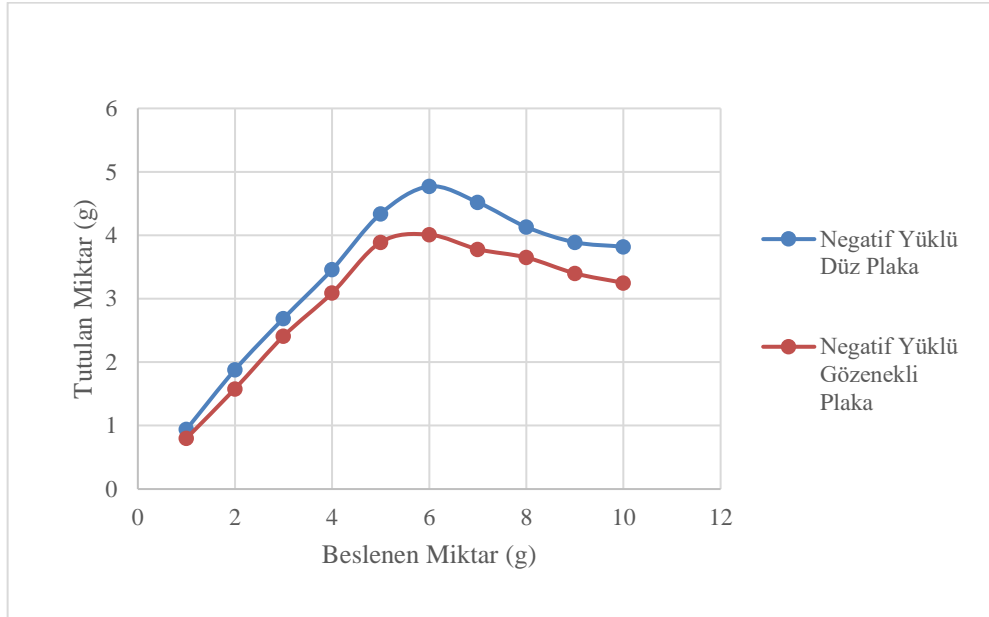
Şekil 5.40. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların bor tozu yakalama miktarı

Bor tozu negatif yüklü gözenekli plaka ile daha fazla tutulmuştur (Şekil 5.40). Negatif yüklü gözenekli plaka ile yaklaşık miktarlarda toz tuttuğu görülse de gözenekli plaka daha fazla tutmuştur.



Şekil 5.41. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların kalsit tozu yakalama miktarı

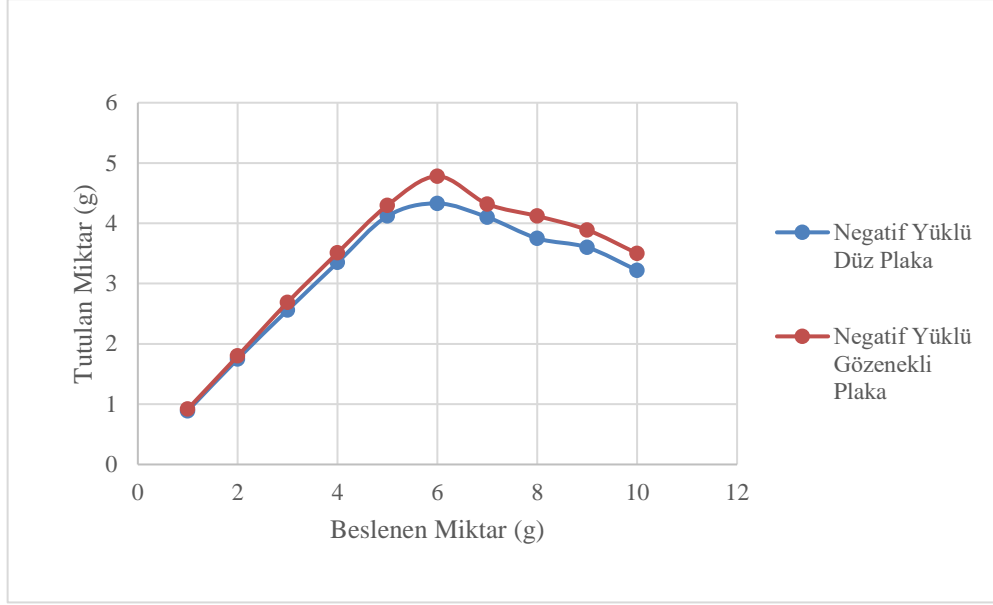
Kalsit tozu negatif yüklü düz plaka ile daha fazla miktarda tutulmuştur (Şekil 5.41). Negatif yüklü gözenekli ve düz plakaların kalsit tozunu yakın miktarda tuttuğu da yapılan deney sonucunda söylenebilmektedir.



Şekil 5.42. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların manyetit tozu yakalama miktarı

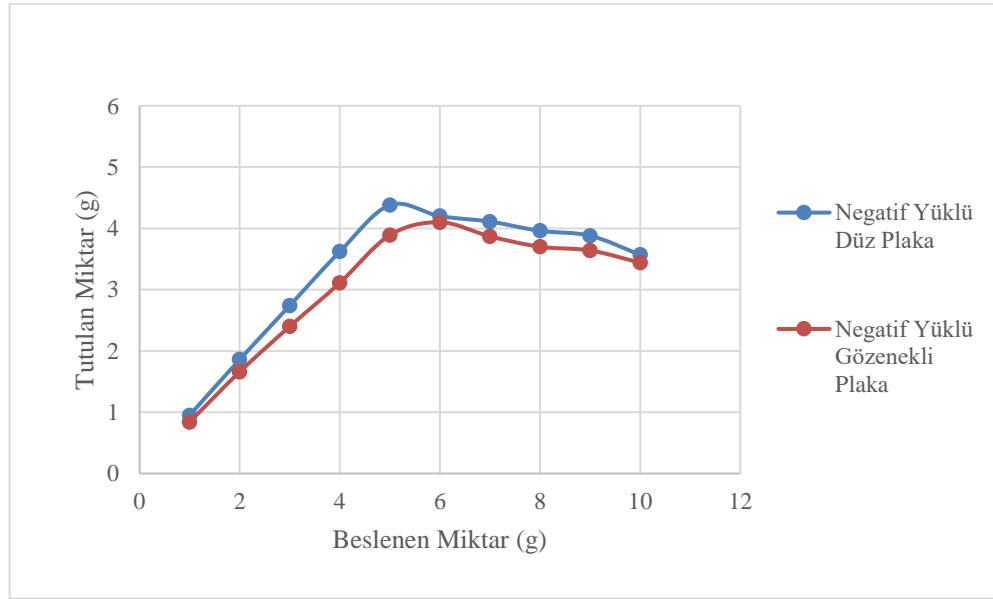
Manyetit tozu negatif yüklü düz plaka ile daha fazla miktarda tutulsa da negatif yüklü gözenekli plaka ile de düz plakaya yakın miktarda toz tutulduğu görülmüştür (Şekil 5.42)





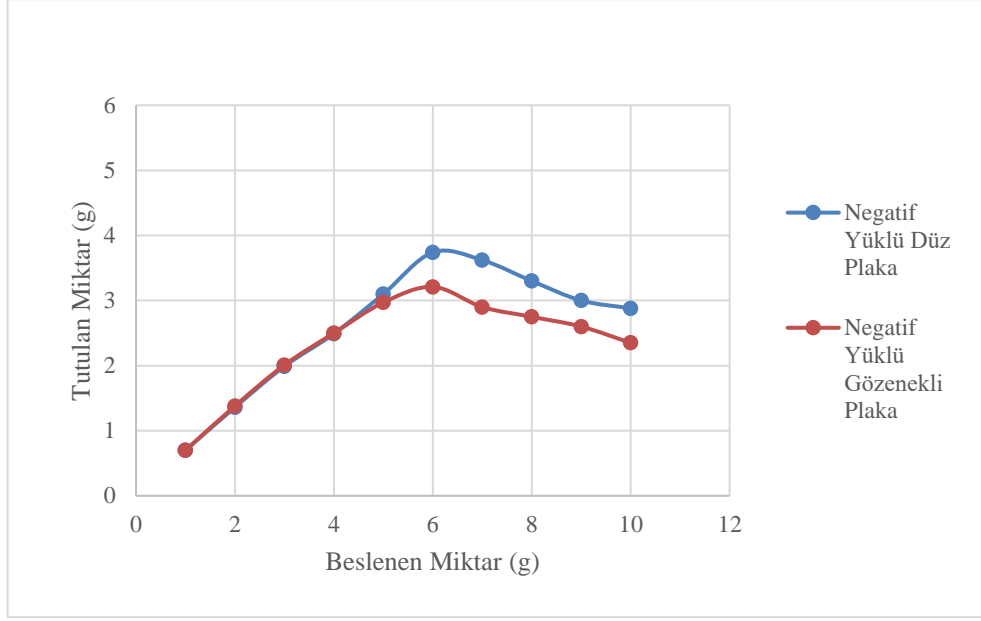
Şekil 5.43. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların hematit tozu yakalama miktarı

Hematit tozu hem negatif yüklü düz plaka hem de negatif yüklü gözenekli plaka ile yakın miktarda tutulmuştur. Ancak negatif yüklü gözenekli plakanın daha yüksek miktarda hematit tozunu tuttuğu görülmüştür (Şekil 5.43).



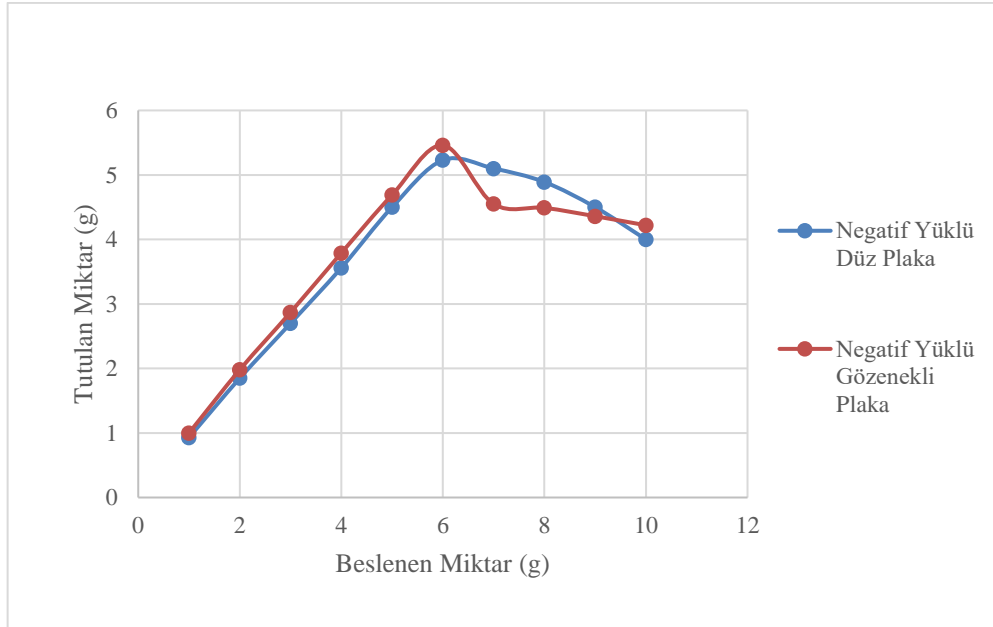
Şekil 5.44. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların kurşun-çinko tozu yakalama miktarı

Kurşun- çinko tozunun negatif yüklü düz ve gözenekli plaka ile neredeyse aynı miktarlarda tutulduğu görülmüştür (Şekil 5.44).



Şekil 5.45. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların demir içeren cevher tozu yakalama miktarı

Demir içeren cevher tozunun negatif yüklü düz plaka ile 6 g beslemeye kadar aynı miktarda toz tuttuğu görülse de 6 g' dan sonra negatif yüklü düz plakanın daha fazla toz tuttuğu görülmüştür (Şekil 5.45).



Şekil 5.46. Negatif yükü düz ve gözenekli plakaların karma numune tozu yakalama miktarı

Karma toz numunesinin negatif yüklü gözenekli plaka ve negatif yüklü düz plaka ile yakın miktarlarda toz tuttuğu görülmüştür. Ancak 6 g besleme miktarına kadar negatif

yüklü gözenekli plakanın daha fazla miktarda toz tuttuğu, 6 g'dan sonra düz plakanın nispeten daha yüksek miktarda karma toz numunesini yakaladığı görülmüştür (Şekil 5.46).

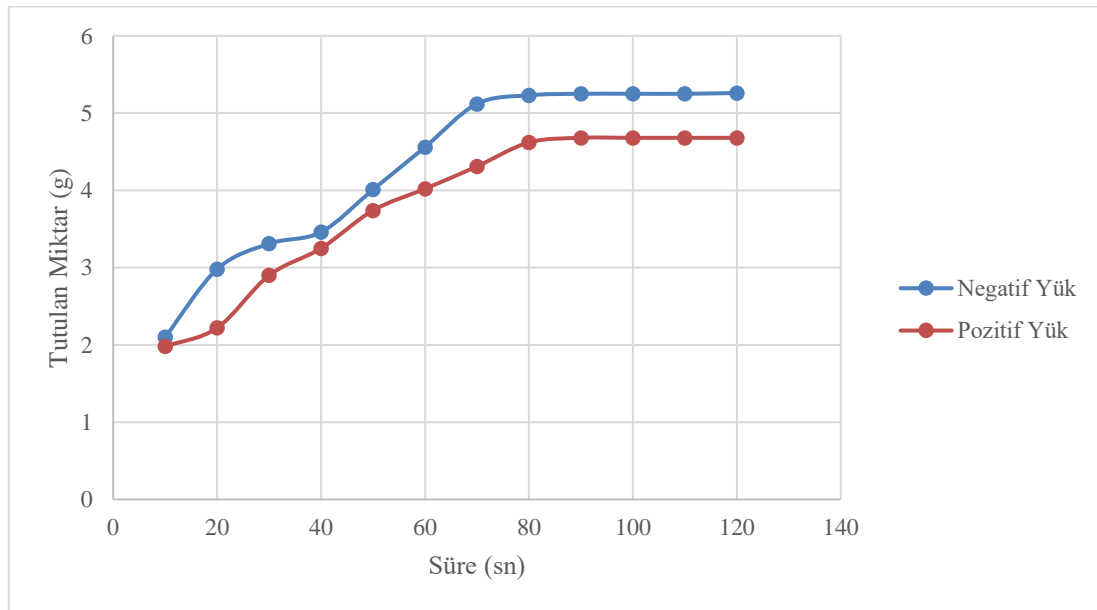
Toz tutmak amacıyla farklı özelliklerdeki iki plaka ile yapılan testlerde beslenen malzemeye bağlı olarak plakalar farklı davranımlar vermiştir. Bu durumda plakanın genel yapısının toz tutma kapasitesi üzerine etkisi hakkında kesin bir yorum yapmak mümkün olmamakla birlikte farklı özelliklerdeki plakalar ile toz tutma işleminin gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bu aşamaya kadar yapılan testlerde besleme malzemesinden bağımsız olarak yapılan testlerde besleme süresi sabit tutulmuştur. Bu durumda besleme akış hızı değişmektedir. Belirli bir miktardaki numuneyi değişen hızlarda besleyerek beslenen miktardaki değişimin etkisini incelemek amacıyla sabit miktardaki besleme değişen sürelerde sisteme beslenerek tutulan miktarlar ölçülmüştür. Bu deneyin beslemesi olarak havalandırmadan alınan karma toz numunesi besleme olarak kullanılmıştır. Bu amaçla besleme süresi değiştirilerek toz tutucunun yakalayabildiği maksimum miktar olan 6 g besleme hazırlanarak değişen hızlarda sisteme beslenmiştir. Bu şekilde maksimum tutma kapasitesinde besleme hızına bağlı olarak değişim olup olmayacağı incelenmiştir. Ayrıca bu sonuçlar endüstriyel bir toz tutma sisteminin toz tutma kapasitesi ile karşılaştırma yapabilmek amacıyla da kullanılmıştır. Toz tutma süresi 10 sn' den başlanarak 10 sn artırılmış ve 120 sn' ye değerine kadar test edilmiştir (Çizelge 5.24).

Çizelge 5.24. Değişen besleme süresinde tutulan toz miktarı (Sabit miktarda besleme, 6 g)

Negatif Yük		Pozitif Yük	
Süre (sn)	Tutulan (g)	Süre (sn)	Tutulan (g)
10	2,1	10	1,98
20	2,98	20	2,22
30	3,31	30	2,9
40	3,46	40	3,25
50	4,01	50	3,74
60	4,56	60	4,02
70	5,12	70	4,31
80	5,23	80	4,62
90	5,25	90	4,68
100	5,25	100	4,68
110	5,25	110	4,68
120	5,26	120	4,68

Çizelge 5.24' de görüldüğü üzere plakaların maksimum toz tutma kapasitesine 90 sn' de ulaştığı ve 90 sn'den sonra tutulan miktarın sabit kaldığı görülmüştür (Şekil 5.47).



Şekil 5.47. Besleme süresine göre tutulan karma toz numunesinin miktarı

#### 5.4. Toz Tutma Sisteminin Kapasitesinin Mevcut Toz Tutucuların Kapasitesi ile Karşılaştırılması

Yukarıdaki çizelgelerde de görüldüğü üzere sabit besleme süresindeki besleme miktarı yaklaşık olarak 6 gramı geçtikten sonra yakalanan miktarın artmadığı bu nedenle daha yüksek miktarda besleme yapılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu da toz tutma ünitesinin belirli bir kapasitede olduğunu, bunun üzerinde toz tutma işleminin gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. Bu durumda mevcut toz tutucularda olduğu gibi belirli zaman aralıklarında toz tutucu plakaların yüklerinin boşaltılarak, tuttukları tozlardan arındırılması gerekliliğini ortaya çıkartmaktadır.

Yapılan çalışmalar triboelektriklenme ile üretilen statik yükün kullanıldığı filtrelerle önemli ölçüde toz tutulumunun yapılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu filtrenin toz tutma kapasitesi mevcut elektrostatik toz tutucuların kapasitesi ile karşılaştırılması amacıyla her iki sisteminde birim toz tutma değerleri hesaplanmış ve birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Yapılan çalışmalarda yaklaşık 6 gramlık numuneler 90 sn'de toz tutucu filtreye beslenmiştir. Bu durumda kullanılan toz tutma sisteminin birim zamandaki toz tutma kapasitesi Eşitlik 5-6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Plaka Elektrotların Toz Kapasitesi} = \frac{\text{Besleme Miktarı}(g)}{\text{Besleme Süresi}(sn)} \quad \text{Eşitlik 5-6}$$

$$\text{Toz Tutma Kapasitesi} = \frac{6 g}{90 sn} = 0,067 g/s \quad \text{Eşitlik 5-7}$$

Plaka elektrotların saniyede yakaladığı tozu (Eşitlik 5-7), saatte yakaladığı toza çevirilirse Eşitlik 5-8' da verilen değer elde edilmiştir.

$$0,067 g/sn \times 3600 sn = 240 g/h \quad \text{Eşitlik 5-8}$$

Yakalama işlemi sırasında Eşitlik 5-4'e göre yapılmış olan toplam elektrot alanı olan 840 cm<sup>2</sup> kullanıldığında birim zamanda, birim alanda tutulan toz miktarı Eşitlik 5-9' da verilmiştir.

$$240 / 840 cm^2 = 0,285 g/cm^2h \quad \text{Eşitlik 5-9}$$

Eşitlik 5-9' da elde edilen değer için toz tutucu filtrelerin birim zamanda, birim alanda 285,71 mg/cm<sup>2</sup>h toz tuttuğu söylenebilmektedir.

Endüstride kullanılan levha tipli elektrostatik toz tutucu filtrelerin toz tutucu plakalarının ebatları Çizelge 4.1' de verilmiştir. Bu bilgi ışığında, triboelektrik filtrenin endüstriyel ölçekli tasarımında 5 m uzunluğuna ve 2 m eninde plakaların kullanılması durumunda 100 m<sup>2</sup> alanında sahip bir toplayıcı plaka imal edilebileceği görülmüştür (Eşitlik 5-10).

$$\begin{aligned} \text{Toplayıcı Plaka Alanı} &= 5 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 10 \text{ m}^2 \times 2 = 20 \text{ m}^2 \quad \text{Eşitlik 5-10} \\ &= 50 \times 20 \text{ m}^2 = 1000 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Bu ebattaki toplayıcı plakalardan 50 tane kullanıldığında, deney verilerinden elde edilen kapasite sonucunda bu tip bir plakanın saatte 2.85 ton/h ağırlığında toz tutabileceği sonucu elde edilmiştir (Eşitlik 5-12).

$$\text{Toz Tutucu Kapasitesi} = 0,285 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2\text{h}} \times 10.000.000 \text{ cm}^2 = 2.850.000 \text{ g/h} \quad \text{Eşitlik 5-11}$$

$$\text{Toz Tutucu Kapasitesi} = 2.850.000 \frac{\text{g}}{\text{h}} / 1.000.000 \text{ g} = 2.85 \text{ ton/h} \quad \text{Eşitlik 5-12}$$

Endüstriyel toz tutucuların kapasiteleri 1000-50000 m<sup>3</sup>/s değerlerinde olabilmektedir. Ortamda izin verilen toz miktarları 10 mg/m<sup>3</sup> değerinden genellikle daha az olmak zorundadır. Buna göre 200 mg/m<sup>3</sup> toz içeren bir ortamda tozun tamamı tutulacaksa dahi 1 saate 10 kg kadar toz tutulması gereklidir. Bu durumda yukarıda yapılmış olan kapasite hesabına göre (Eşitlik 5-11, Eşitlik 5-12) bir triboelektrik toz tutma ünitesi ile gerekli toz tutma işleminin rahatlıkla yapılabileceği anlaşılmaktadır.

### 5.5. Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde kurulan triboelektrik toz tutma ünitesinde belirli oranlarda tozun yakalanabileceği anlaşılmaktadır. Toz tutma amacıyla kullanılan statik yükün sürtünme ile hem pozitif hem de negatif yük değerlerinde 60 kV seviyesinde elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu değerler bir endüstriyel toz tutucuda rahatlıkla kullanılabilecek statik yük değeri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yapılan deneyler sonucunda sabit besleme süresindeki besleme miktarı yaklaşık olarak 6 gramı geçtikten sonra yakalanan miktarın artmadığı bu nedenle daha yüksek miktarda besleme yapılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu da kurulan toz tutma ünitesinin

belirli bir kapasitede olduğunu bunun üzerinde toz tutma işleminin gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. Bu durumda mevcut toz tutucularda olduğu gibi belirli zaman aralıklarında toz tutucu plakaların yüklerinin boşaltılarak, tuttukları tozlardan arındırılması gerekliliğini ortaya çıkartmaktadır.

Toz tutma haznesinde kullanılan gözenekli ve düz plakalarla yapılan deneylerde yakın miktarlarda toz tutulduğu görülmüştür. Örneğin kuvars tozunun pozitif yükte düz plaka ile daha yüksek miktarda tutulduğu görülürken, negatif yükte gözenekli plaka ile daha fazla miktarda tutulduğu görülmüştür. Benzer bir şekilde kaolin tozunun pozitif yüklü düz plakalar ile daha fazla tutulduğu, negatif yükte yüklendiğinde hem düz hemde gözenekli plakalarda nispeten aynı miktarlarda tutulduğu görülmüştür. Bu deneylerden elde edilen bu bilgiler ışığında, farklı özelliklere sahip toz tutma plakalarının da triboelektrik toz tutma ünitelerinde kullanılabileceği ve farklı özelliklerdeki plakaların farklı toz tutma kapasitelerine sahip olabileceği anlaşılmaktadır.

Burada en önemli bulgu sürtünme ile oluşturulan statik yükün (triboelektriklenme) toz tutma amacıyla kullanılabileceğinin belirlenmiş olmasıdır. Çalışma kapsamında gücün artırılmasına yönelik tuzlu su gibi bir ayrı depolama sisteminin kullanılması durumunda da hem daha yüksek statik güç hem de daha stabil bir yük elde edilebileceği belirlenmiştir.

## 6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında elektrostatik çökeltici filtrelerin toz yakalama kuvvetinin oluşması için ihtiyaç duyulan gücün, sürtünme kuvvetiyle üretilen statik yük ile sağlanabileceği belirlenmiştir. Hacettepe Üniversitesi Cevher Hazırlama Laboratuvarında mevcut farklı mineral bileşimlerine sahip malzemeler kullanılarak toz tutma ünitesinin plakalarının yakalama performansına ilişkin çalışmalar yapılmıştır.

Elektrostatik filtrelerde tozların yakalanması amacıyla elektriksel çekim kuvvetleri kullanılmaktadır. Bu amaçla yüksek voltaj değerine sahip statik yüke gereksinim duyulmaktadır. Elektrostatik filtrelerinin güç üretim sistemlerindeki transformatör-redresörün kombinasyonları kullanılmaktadır. Bunlar, elektrik sarfiyatları yüksek ve ürettikleri sürekli akım nedeniyle yüksek güvenlik gerektiren ekipmanlardır. Bu çalışma kapsamında statik yük üretilebilmesi amacıyla sürtünme ile oluşan triboelektrik yük kullanılmıştır. Sürtünme ile üretilen statik yükün rahatlıkla her yerde üretilebilmesi, kolay ve güvenli bir sistem olması, uygulamaya aktarımını da kolaylıkla sağlanabilecek olması önemli bir avantajlardır. Ayrıca çok düşük akım şiddeti nedeniyle oldukça güvenli bir çalışma ortamı sağlaması da mümkündür.

Sürtünme ile statik yük üretmek için triboelektrik seriden bir çok malzemenin seçilmesi ve değişik kombinasyonlarının yapılabilmesi sonucunda 60 bin volt seviyelerinde potansiyel yük oluşturabilmesinin elektrostatik filtrelerin güç kaynağı olabileceğini göstermiştir. Ayrıca üretilen bu yükün pozitif (+) veya negatif (-) olarak da üretilmesi mümkün olmaktadır.

Toz tutma ünitelerinde kullanılacak olan triboelektrik statik yükün elektrot yüzeylerine yüklenmesi bir kaç saniye gibi çok kısa bir sürede gerçekleşmektedir.

Ayrıca tuzlu suyun statik yükü daha yüksek miktarlarda depo edebildiği ve statik yükün korunmasına katkı sağladığı yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir.

Metalik minerallerden, metal içermeyen endüstriyel mineralleri içeren bir çok farklı toz bileşimlerinin geliştirilen triboelektrik toz tutma sistemlerinde başarı ile tutulabildikleri



belirlenmiştir. Aynı zamanda endüstriyel ölçekli olarak çalışan bir laboratuvarın toz çekici ünitesinden alınan toz numunesinin de yüksek oranda tutulabildiği görülmüştür.

Geliştirilen yöntemin uygun toz tutma kapasitesini sağlayacak plaka büyüklüklerinde üretilmesi durumunda endüstriyel olarak kullanılan toz tutucu filtrelerde kullanılması mümkün görünmektedir. Yapılan teorik hesaplamada endüstriyel toz tutucularının kapasitesinde çalışabilecek bir sistem kurulabileceği belirlenmiştir.

Sonuç olarak;

- Sürtünme ile oluşan statik elektrik yükünün (triboelektrik) toz tutma filtrelerinde kullanılabilmesi,
- Sürtünmeyle oluşan statik elektrik yükünün üretilmesi için endüstriyel tesislerde var olan motorlara triboelektrik güç üretim ünitesinin eklenebileceği ve bunun sayesinde ekstra bir güç kaynağına ihtiyaç olunmayacağı,
- Çok farklı tozların yakalanmasını sağlayabileceği,
- Statik yükün hızlı şarj edilmesi ve korunması sayesinde elektstatik filtrelerde yaşanabilecek elektrik yükün kaybedilmesi veya azalması sorunun önüne geçilebileceği,
- Elektrik yükünün sürtünmeyle üretilmesinden dolayı emniyetli ve ucuz bir sistem kurulmasına izin vereceği,
- Konvansiyonel toz tutma ünitelerinin güç kaynağı olarak sürtünme ile üretilen ve yüksek potansiyeli sayesinde kolaylıkla uygulanabileceği,

belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] T.O.Dizdar, Triboelektrostatik Ayırıcı Tasarımı Parametrelerinin Mineral Ayırmada Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2018**
- [2] EPA, Particulate Matter (PM) Basics, <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics> (**Erişim Tarihi: 17 Kasım 2023**)
- [3] K.K. Kalimeri, J.G. Bartsiz, I.A. Sakellaris, E.O. Fernandes, Investigation of the PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> I/O ratios for office and school, *Environmental Research*, p. 179, **2019**
- [4] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Hava Kalitesi İndeksi, <https://egethm.csb.gov.tr/hava-kalitesi-indeksi-i-87403>, (**Erişim Tarihi: 15 Kasım 2023**)
- [5] Hava Kalitesi Değerlendirme Yönetmeliği, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı , **2013**
- [6] M. Owen, Indoor Environmental Health Handbook, ASHRAE Handbook Fundamentals, Atlanta, ASHRAE Inc., Chapter 9, p. 165, **2001**
- [7] Resmi Gazete, Tozla Mücadele Yönetmeliği, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=18989&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>, (**Erişim Tarihi: 11 Aralık 2023**)
- [8] N. Vidinli, E. Karakaya Özkan, A.D. Topçu, Y. Yamurluklu, F.G. Gedikli, E.A. Kürkcü, Çimento Sektöründe Tozla Mücadele Rehberi, Ankara, **2016**
- [9] Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Hazard Prevention and Control in the Work Environment: Airbone Dust, İsviçre, p. 103-105, **1999**
- [10] S. Kumar, S.K. Dwivedi, Impact on Particulate Matters in India's Most Polluted Cities due to Long-Term Restriction on Anthropogenic Activities, p. 200, **2021**
- [11] G. Liu, M. Xiao, X. Zhang, C. Gal, X. Chen, L. Liu, S. Pan, J. Wu, L. Tang, D. Clements-Croome, A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation, *Sustainable Cities and Society*, p. 375-396, **2017**

- [12] N. Mao, Nonwoven fabric filters, İngiltere, Elsevier, **2016**
- [13] J. Finch, B.A. Wills, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, 8<sup>th</sup> edition, Chapter 13, Elsevier, Oxford, **2016**
- [14] G. Mosca, P.A. Tipler, Physics for Scientists and Engineers, 6th edition, Chapter 21-22, W.H. Freeman, **2008**
- [15] N. Rowson, Electrostatic Separation of Minerals, <https://www.bunting-redditch.com/electrostatic-separation-of-minerals/>, (**Erişim Tarihi: 23 Mart 2023**)
- [16] H.T. Baytekin, A.Z. Patashinks, M. Branicki, B. Baytekin, S. Soh, B.A. Grzybowski, The Mosaic of Surface Charge in Contact Electrification, Science, Vol. 333, p. 308-312, **2011**
- [17] R.G. Horn, D.T. Smith, A. Grabbe, Contact electrification induced by monolayer modification of a surface and relation to acid–base interactions, Nature, Vol.366, p. 442-443, **1993**
- [18] R. M. Felix- Navarro, A.F. Diaza, A Semi-Quantitative Tribo-Electric Series for Polymeric Materials: The Influence of Chemical Structure and Properties, Journal of Electrostatic, Vol. 62, p. 277-290, **2004**
- [19] J. Wang, R. Panat, Effects of Triboelectrostatic Charging Between Polymer Surfaces in Manufacturing and Test of Integrated Circuit Packages, IEEE Transactions on Components, Packaging And Manufacturing Technology, Vol. 4, p. 943-946, **2014**
- [20] R. Allen, Triboelectric Generation: Getting Charged Reproduced with Permission, EE-Evaluation Engineering, p. 1-6, **2000**
- [21] C.S. Psomopoulos, P. Papageorgas, K. Kalkanis, D. Piromalis, A. Mouratidis, D.A. Barkas, Sustainable Energy Harvesting through Triboelectric Nano – Generators: A Review of current status and applications, Energy Procedia, Vol. 157, p. 999-1000, **2019**
- [22] J. Kim, High-performance piezoelectric, pyroelectric, and triboelectric nanogenerators based on P(VDF-TrFE) with controlled crystallinity and dipole alignment, Advanced Functional Materials, Vol. 27, **2017**

- [23] Y. Heper, Elektrikport, <https://www.elektrikport.com/makale-detay/termik-santrallerde-elektrofiltrenin-onemi/16760#ad-image-0> (**Erişim Tarihi: 9 Aralık 2023**)
- [24] A.Mizuno, Electrostatic precipitation, IEEE Transactions on Dielectrics, p. 615-627, **2000**
- [25] T.M. Chen, C.J. Tsai, S.Y. Yan, S.N. Li, An efficient wet electrostatic prepipitator for removing nanoparticles, submicron and micron-sized particles, Separation and Purification Technology, **2014**
- [26] D. A. Vallero, Air Pollution Control Technologies, Elsevier, **2019**
- [27] J.H. Turner, Electrostatic Precipitators, EPA, New York, **1999**
- [28] B. Jaroslav, Electostatic Precipitators (Chemical Engineering Monographs), Hollanda Elsevier North , **1982**
- [29] INKWER, Elektrostatik Filtre, <https://www.inkwer.com/toplama-plakalari.html>. (**Erişim Tarihi 1 Aralık 2023**)
- [30] F. Kherbouche, Y. Benmimoun, A. Tilmatine, A. Zouaghi, N. Zouzou, Study of a new electrostatic precipitator with asymmetrical wire-to-cylinder configuration for cement particles collection, Journal of Electrostatics, p. 7-15, **2016**
- [31] Y. E. Balgün, Elektrostatik Filtre Verimini Artırıcı Çözümlerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, **2009**
- [32] H. Engelbrecht, Rapping systems for collecting surfaces in an electrostatic precipitator, Environment International, Vol. 6, p. 297-305, **1981**
- [33] M.M. Badami, R. Tohidi, M. Aldekheel, V.J. Farahani, V. Verma, C. Siouas, Design, optimization, and evaluation of a wet electrostatic precipitator (ESP) for aerosol collection, Atmospheric Environment, Vol. 308, **2023**
- [34] A.Jaworek, A. Marchewicz,, A.T. Sobczyk, A. Krupa, T. Czech, Two-stage electrostatic precipitators for the reduction of PM2.5 particle emission, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 67, p. 206-233, **2018**

## EKLER

EK-1

Toz numunelerine yaptırılan lazer tane boyu analizi detayı

KUVARS		KAOLİN		FELDSPAT	
Tane Boyu	%Küm.	Tane boyu	%Küm	Tane Boyu	%Küm.
0,24	0	0,24	6,9E-15	0,24	0
0,275	0	0,275	0,100271	0,275	0
0,316	0	0,316	0,671814	0,316	0
0,363	0	0,363	1,604332	0,363	0
0,417	0	0,417	2,797553	0,417	0
0,479	0	0,479	4,081019	0,479	3,22E-15
0,55	0	0,55	5,34443	0,55	0,270869
0,631	0	0,631	6,527625	0,631	1,378971
0,724	0	0,724	7,620576	0,724	3,07806
0,832	0	0,832	8,703499	0,832	4,826397
0,955	0	0,955	9,86664	0,955	6,328491
1,096	0	1,096	11,25038	1,096	7,411967
1,259	4,54E-15	1,259	12,98506	1,259	8,150702
1,445	0,090113	1,445	15,21107	1,445	8,840187
1,66	0,901133	1,66	17,9986	1,66	9,775917
1,905	1,892379	1,905	21,31756	1,905	11,10564
2,188	2,420185	2,188	25,07771	2,188	12,7801
2,512	2,574665	2,512	29,10859	2,512	14,47919
2,884	3,089598	2,884	33,34002	2,884	16,10441
3,311	4,389804	3,311	37,73188	3,311	17,77887
3,802	6,243563	3,802	42,28417	3,802	19,65033
4,365	8,753862	4,365	47,05705	4,365	21,71879
5,012	12,1138	5,012	52,15081	5,012	24,05811
5,754	16,01442	5,754	57,39497	5,754	26,61906
6,607	19,65757	6,607	62,39848	6,607	29,32775
7,586	22,47683	7,586	66,80036	7,586	32,15957
8,71	24,96138	8,71	70,59059	8,71	35,13913
10	28,07673	10	74,14018	10	38,38956
11,482	32,27343	11,482	77,93041	11,482	42,13248
13,183	37,61586	13,183	82,20195	13,183	46,39251
15,136	43,74356	15,136	86,66399	15,136	51,14504
17,378	50,12873	17,378	90,67482	17,378	56,14381
19,953	56,59114	19,953	93,8133	19,953	61,33957
22,909	63,29815	22,909	96,11952	22,909	66,70771
26,303	70,42997	26,303	97,86423	26,303	72,46984
30,2	77,99949	30,2	99,07751	30,2	78,69983
34,674	85,77497	34,674	99,71924	34,674	85,37306
39,811	93,293	39,811	99,93984	39,811	92,48953
45,709	100	45,709	100	45,709	100

BOR		KALSİT		MANYETİT	
Tane Boyu	%Küm	Tane Boyu	%Küm.	Tane Boyu	%Küm.
0,24	6,38E-16	0,24	0	0,24	0
0,275	0,069979	0,275	0	0,275	0
0,316	0,536506	0,316	0	0,316	0
0,363	1,131327	0,363	0	0,363	0
0,417	1,819454	0,417	0	0,417	-2,88727E-14
0,479	2,484255	0,479	0	0,479	0,06103764
0,55	3,102403	0,55	0	0,55	0,356052899
0,631	3,638908	0,631	0	0,631	0,793489318
0,724	4,128761	0,724	0	0,724	1,281790437
0,832	4,618614	0,832	1,84E-14	0,832	1,841302136
0,955	5,166783	0,955	0,344666	0,955	2,482197355
1,096	5,843247	1,096	1,644995	1,096	3,275686673
1,259	6,694658	1,259	3,540655	1,259	4,221770092
1,445	7,744343	1,445	5,87498	1,445	5,381485249
1,66	8,992302	1,66	8,412972	1,66	6,815869786
1,905	10,43854	1,905	11,06063	1,905	8,596134283
2,188	12,07138	2,188	13,88062	2,188	10,72227874
2,512	13,86751	2,512	16,91994	2,512	13,16378433
2,884	15,85024	2,884	20,14727	2,884	15,87995931
3,311	18,04292	3,311	23,46859	3,311	18,84028484
3,802	20,49219	3,802	26,85258	3,802	22,09562564
4,365	23,25636	4,365	30,34623	4,365	25,65615463
5,012	26,33543	5,012	33,93389	5,012	29,5422177
5,754	29,65944	5,754	37,58421	5,754	33,65208545
6,607	33,10007	6,607	41,18753	6,607	37,85350966
7,586	36,56403	7,586	44,64985	7,586	42,06510682
8,71	40,08631	8,71	48,04951	8,71	46,34791455
10	43,84185	10	51,62149	10	50,89521872
11,482	48,06391	11,482	55,56948	11,482	55,90030519
13,183	52,7875	13,183	60,00313	13,183	61,40386572
15,136	57,87264	15,136	64,68745	15,136	67,21261445
17,378	63,06275	17,378	69,34044	17,378	72,99084435
19,953	68,21787	19,953	73,77409	19,953	78,49440488
22,909	73,38465	22,909	78,03541	22,909	83,66225839
26,303	78,72638	26,303	82,31239	26,303	88,48423194
30,2	84,25472	30,2	86,71471	30,2	92,76703967
34,674	89,78307	34,674	91,14836	34,674	96,18514751
39,811	95,07814	39,811	95,55068	39,811	98,55544252
45,709	100	45,709	100	45,709	100

HEMATİT		KURŞUN-ÇİNKO		DEMİR CEVHER		KARMA TOZ	
Tane Boyu	%Küm.	Tane Boyu	%Küm.	Tane Boyu	%Küm	Tane Boyu	%Küm.
0,24	0	0,24	0	0,24	0	0,24	0
0,275	0	0,275	0	0,275	0	0,275	0
0,316	2,2E-14	0,316	0	0,316	0	0,316	0
0,363	0,033208	0,363	0	0,363	0	0,363	0
0,417	0,61988	0,417	0	0,417	0	0,417	0
0,479	1,582909	0,479	0	0,479	0	0,479	0
0,55	2,811601	0,55	0	0,55	0	0,55	0
0,631	4,162054	0,631	0	0,631	0	0,631	0
0,724	5,49037	0,724	1,45E-14	0,724	0	0,724	0
0,832	6,58623	0,832	0,02265	0,832	3,22E-15	0,832	0
0,955	7,305734	0,955	0,237826	0,955	0,284158	0,955	0
1,096	7,726367	1,096	0,826727	1,096	0,686716	1,096	0
1,259	8,069515	1,259	1,585504	1,259	1,243192	1,259	-1,9533E-15
1,445	8,589772	1,445	2,480181	1,445	1,965427	1,445	0,026226069
1,66	9,519593	1,66	3,408834	1,66	2,841582	1,66	0,236034618
1,905	10,96967	1,905	4,394111	1,905	3,836135	1,905	0,904799371
2,188	12,88466	2,188	5,469989	2,188	4,996448	2,188	1,888276947
2,512	15,05424	2,512	6,738392	2,512	6,32252	2,512	2,911093627
2,884	17,29024	2,884	8,289921	2,884	7,87355	2,884	3,802779963
3,311	19,54837	3,311	10,16988	3,311	9,685058	3,311	4,720692368
3,802	21,90613	3,802	12,41223	3,802	11,81624	3,802	5,80907422
4,365	24,51849	4,365	15,02831	4,365	14,31447	4,365	7,107264621
5,012	27,44078	5,012	17,98414	5,012	17,15605	5,012	8,615263572
5,754	30,6066	5,754	21,21178	5,754	20,31731	5,754	10,33307107
6,607	33,86097	6,607	24,63194	6,607	23,72721	6,607	12,19512195
7,586	37,07106	7,586	28,19932	7,586	27,35022	7,586	14,21452924
8,71	40,28116	8,71	31,9932	8,71	31,28108	8,71	16,49619722
10	43,71264	10	36,18347	10	35,70921	10	19,26304747
11,482	47,60903	11,482	40,93998	11,482	40,81222	11,482	22,75111461
13,183	52,08103	13,183	46,31937	13,183	46,62562	13,183	27,20954629
15,136	57,01793	15,136	52,20838	15,136	52,97182	15,136	32,75635982
17,378	62,20943	17,378	58,4145	17,378	59,56666	17,378	39,49645948
19,953	67,5559	19,953	64,76784	19,953	66,19702	19,953	47,50852347
22,909	73,09055	22,909	71,20045	22,909	72,75633	22,909	56,75321269
26,303	78,92406	26,303	77,67837	26,303	79,18541	26,303	66,90270129
30,2	84,90148	30,2	84,03171	30,2	85,27113	30,2	77,22265932
34,674	90,74607	34,674	89,98867	34,674	90,80038	34,674	86,65093103
39,811	95,79367	39,811	95,34541	39,811	95,66659	39,811	94,34828219
45,709	100	45,709	100	45,709	100	45,709	100

