

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROSTATİK FİLTRE VERİMİNİ
ARTIRICI ÇÖZÜMLERİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Yusuf Erkan BALGÜN**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

HAZİRAN 2009

**ELEKTROSTATİK FİLTRE VERİMİNİ
ARTIRICI ÇÖZÜMLERİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Yusuf Erkan BALGÜN
(504061024)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Haziran 2009**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN (İTÜ)
Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN
(İTÜ Kontrol Mühendisliği Bölümü)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Gün geçtikçe artan çevresel duyarlılıklar, özellikle çevresel kirlenmenin en büyük kaynağı olan sanayi tesislerini yakından ilgilendirmektedir. Sanayi tesislerinde, üretim vb. amaçla kullanılan hava, belli noktalarda atmosfere atılmakta ve uygun filtreleme olmaması durumunda hava kirliliğine yol açmaktadır.

Bu çalışmada, sanayide sık kullanılan elektrostatik filtrelerin yapıları incelenmiş ve yenilikler araştırılmıştır. Elektrostatik filtrelerde yapısal özelliklerin yaklaşık aynı kalmış olmasına rağmen, özellikle yüksek gerilim beslemesinin darbeli ve yüksek frekanslı olması, yeni kontrol sistemleriyle birlikte filtre veriminin artmasını sağlamaktadır. Bu bakımdan, elektrostatik filtrelerde yeni eğilimler ve elektrotların yapısal özellikleri araştırılmış, uygulama olarak da sonlu elemanlar yöntemiyle farklı durumlarda elektrik alan dağılımlarını incelemek amacıyla elektrik alan analizleri yapılmıştır.

Zorlu çalışma döneminin ardından tamamladığım yüksek lisans tez çalışmam sırasında bana destek olan başta Ailem ve Bitaneme, her aşamada ve durumda yardımlarını esirgemeyen değerli tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Özcan Kalenderli Hocama, başından beri desteklerini esirgemeyen Bolu Çimento Sanayi A.Ş. firmasına ve amirlerime teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2009

Yusuf Erkan BALGÜN

Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgi.....	1
1.2 Toz Emisyonlarının Önlenmesi ve Kontrolü	5
1.3 Toz Kontrol Sistemleri	7
1.4 Parçacık Kontrol Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları	8
1.4.1 Siklon Ayırıcılar	8
1.4.2 Islak Çöktürücüler	8
1.4.3 Torba Filtreler	9
1.4.4 Elektrostatik Filtreler	9
2. ELEKTROSTATİK FİLTRELER.....	11
2.1 Çalışma İlkesi.....	11
2.2 Parçacık Yükleme Sistemi	12
2.3 Elektrik Alanı.....	13
2.4 Korona Boşalması	14
2.5 Yükleme Mekanizmaları.....	19
2.6 Göç Hızı.....	21
2.7 Toplama Verimi	22
2.8 Yapısal Özellikler.....	22
2.9 Güç Besleme Sistemi.....	38
2.10 Geri Koronanın Özellikleri	44
2.11 Elektrostatik Filtre Verimine Etki Eden Etkenler	45
3. ELEKTROSTATİK FİLTRELERDE VE TOZ TUTMA SİSTEMLERİNDE YENİ EĞİLİMLER.....	51
3.1 Elektrostatik Filtrelerde Gelişmeler ve Yenilik Araştırmaları.....	51
3.2 Darbeli Güç Besleme Sistemi	52
3.3 Yüksek Frekanslı Güç Besleme Sistemleri.....	53
3.4 Islak Elektrostatik Filtreler	65
3.5 Torbalı Filtreler	66
4. ELEKTROSTATİK FİLTRENİN FARKLI KORONA ELEKTROT ŞEKİLLERİ İÇİN VE FARKLI YÜKLERDEKİ ELEKTRİK ALANININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ.....	71
4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	72
4.2 Modelleme Parametreleri ve Modellemenin Oluşturulması	73

4.3 Elektrostatik Filtre İçindeki Korona Elektrot Yapısının ve Farklı Malzemelerin Davranışının İncelenmesi	81
4.3.1 Korona elektrot sayısının artırılması.....	81
4.3.2 Korona elektrotlarındaki iğnelerin farklı şekillerde incelenmesi	82
4.3.3 Farklı besleme gerilimlerinde elektrik alanının incelenmesi.....	85
4.3.4 Su damlasının (nemin) hareketiyle elektrik alanının incelenmesi	88
4.3.5 Farin tozunun hareketiyle elektrik alanının incelenmesi.....	94
4.3.6 Farklı geometrik yapılardaki korona elektrotunun incelenmesi	100
4.3.7 Sonuçlar	107
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	109
KAYNAKLAR.....	112
EKLER	115

KISALTMALAR

ESP	: Elektrostatik filtre (Electrostatic precipitator)
T-R	: Transformatör ve doğrultucu seti (Transformer and rectifier)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Atmosfere bırakılan yıllık SO ₂ ve parçacıklar [2].	3
Çizelge 3.1 : Rezonans ve sert anahtarlama sistemlerinin karşılaştırılması.	62
Çizelge 4.1 : Farklı korona elektrotu yapılarında E _{max} değerleri.	85
Çizelge 4.2 : Farklı besleme gerilimleri için bulunan E _{max} değerleri.	87
Çizelge 4.3 : Su taneciğinin hareketi sırasında E _{max} değerleri.	94
Çizelge 4.4 : Farin tozunun hareketi sırasında E _{max} değerleri.	100
Çizelge 4.5 : Farklı korona elektrot tipleri için E _{max} değerleri.	106

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : NO ₂ kirlilik haritası.....	3
Şekil 2.1 : Elektrostatik filtrenin yapısı	11
Şekil 2.2 : Elektrostatik filtrenin çalışma ilkesi	12
Şekil 2.3 : Elektriksel boşalma ve toplama sistemi.	12
Şekil 2.4 : Hava yoğunluğuna göre korona başlangıç gerilimi.	16
Şekil 2.5 : Elektrot yapılarına göre korona akım-gerilim karakteristikleri I _c -V.	17
Şekil 2.6 : İki polaritede farklı hava yoğunluğunda atlama gerilimleri.....	18
Şekil 2.7 : Elektrostatik filtre altındaki toplama hazneleri.	24
Şekil 2.8 : İnceleme kapakları.....	25
Şekil 2.9 : Korona elektrot tipleri.....	26
Şekil 2.10 : Korona ve toplama elektrotlarının üstten görünüşü.....	27
Şekil 2.11 : Korona ve toplama elektrotlarının alttan görünüşü.	27
Şekil 2.12 : Korona elektrotu yüksek gerilim bağlantı bölümü ve teknik resimi	28
Şekil 2.13 : Göç hızı bakımından incelenen elektrot tipleri.	28
Şekil 2.14 : Korona elektrotundaki farklı iğne uzunluklarında akım-gerilim eğrisi.	29
Şekil 2.15 : Farklı iğne uzunluğu için oransal verimlilikler.	31
Şekil 2.16 : Korona elektrotlarındaki farklı geometrik yapılar.	32
Şekil 2.17 : Farklı iğne mesafelerinde akım-gerilim karakteristiği.....	32
Şekil 2.18 : Elektrostatik filtre girişindeki delikli plaka.....	33
Şekil 2.19 : Mekanik çekiçleme sistemi.	35
Şekil 2.20 : Çekiçlemelerin plakalara vuruşu.	35
Şekil 2.21 : Toplama elektrotu çekiçleme tahrik motorları.	35
Şekil 2.22 : Korona elektrotu çekiçleme sisteminin tahrik bölümü.	36
Şekil 2.23 : Korona elektrotu çekiçleme sistemi.....	36
Şekil 2.24 : Elektrostatik filtre altı helezon sistemi.....	37
Şekil 2.25 : Elektrostatik filtrede otomatik kontrol sisteminin elemanları.	38
Şekil 2.26 : Elektrostatik filtre modelinin blok diyagramı.	42
Şekil 2.27 : Geri korona ile çalışma durumunda akım-gerilim karakteristiği.	44
Şekil 2.28 : Parçacık çapı ile tutma verimi eğrisi.....	46
Şekil 2.29 : Farklı sanayi tozları için sıcaklık-direnç eğrisi.	47
Şekil 2.30 : Çimento fabrikasındaki elektrostatik filtre için sıcaklık-verim eğrisi.	47
Şekil 2.31 : Elektrostatik filtrede nemin sıcaklık-direnç ile ilişkisi.	48
Şekil 2.32 : Atlama gerilimi ve tel-plaka aralığı eğrisi.....	49
Şekil 3.1 : Darbeli güç besleme sistemi.....	53
Şekil 3.2 : Yeni ve klasik besleme sistemleri.	55
Şekil 3.3 : Klasik ve yeni sistem arasındaki farklar	55
Şekil 3.4 : Yeni sistemin iç yapısı.	56
Şekil 3.5 : Yeni sistemin elektrostatik filtre üzerine kurulumu.	57
Şekil 3.6 : Klasik ve yeni sistemdeki gerilim değerleri.....	57
Şekil 3.7 : Korona elektrotu gerilim besleme ilkesi.	58

Şekil 3.8 : Sistemlerdeki güç besleme yapısı.	58
Şekil 3.9 : Bütünleşik sistemin haberleşme ve kontrol sistemi.	59
Şekil 3.10 : Geleneksel sistem ve yeni sistem için akım gerilim kıyaslaması.	61
Şekil 3.11 : IGBT evirici devreleri.	62
Şekil 3.12 : IGBT güç modülü.	64
Şekil 3.13 : IGBT gerilim bağlantı kondansatörlü evirici ve kontrol devresi.	64
Şekil 3.14 : SCR ve IGBT eviriciyle maksimum filtre gerilimleri.	65
Şekil 3.15 : Evirici çıkış akımı.	65
Şekil 3.16 : Torbalı filtre.	67
Şekil 3.17 : Torbalı filtrenin iç yapısı.	69
Şekil 4.1 : Korona ve toplama elektrotları.	71
Şekil 4.2 : Korona elektrotu.	71
Şekil 4.3 : Toplama elektrotunun orijinal teknik resimleri.	72
Şekil 4.4 : Korona elektrotunun geometrik yapısı ve ölçüleri.	72
Şekil 4.5 : Bir sonlu elemanlar ağında elemanlar ve düğüm noktaları.	73
Şekil 4.6 : Problem tanımlamaları.	74
Şekil 4.7 : FEMM’de gerçek ölçülerde çizilmiş korona elektrotu ve plakalar.	74
Şekil 4.8 : Toplama elektrotunun (plakasının) çizimi.	75
Şekil 4.9 : Korona elektrotunun yakından görünümü.	75
Şekil 4.10 : Toplama elektrotu çiziminde malzeme tanımları.	76
Şekil 4.11 : Hava ortamı için ağ değeri seçimi.	76
Şekil 4.12 : Korona elektrotu yüzeyi için ağ değerlerinin seçimi.	77
Şekil 4.13 : Modelde kullanılan malzemelerin tanımlanan değerleri.	78
Şekil 4.14 : Korona ve toplama elektrotu sistemi için oluşturulmuş ağ yapısı.	79
Şekil 4.15 : Korona elektrotu çevresinde yoğunlaşmış ağ yapısı.	79
Şekil 4.16 : Korona elektrodu çevresindeki potansiyel dağılımı.	80
Şekil 4.17 : Sistemin elektrik alan dağılımı.	80
Şekil 4.18 : Korona elektrodu çevresindeki elektrik alan dağılımı.	81
Şekil 4.19 : İki korona elektrotlu model.	81
Şekil 4.20 : Korona elektrotundaki iğnelerin yatayda iki kat uzaması.	82
Şekil 4.21 : Korona elektrotundaki iğnelerin düşeyde uzaması.	83
Şekil 4.22 : Korona elektrotundaki yatay doğrultudaki iğneler.	84
Şekil 4.23 : Korona elektrotuna farklı seviyede gerilimler uygulanması durumunda elektrik alan dağılımları.	86
Şekil 4.24 : Su damlasının 1. konumdaki durumu.	89
Şekil 4.25 : Su damlasının 2. konumdaki durumu.	90
Şekil 4.26 : Su damlasının 3. konumdaki durumu.	91
Şekil 4.27 : Su damlasının 4. konumdaki durumu.	92
Şekil 4.28 : Su damlasının 5. konumdaki durumu.	93
Şekil 4.29 : Su damlasının 3. konumdaki yakın görünümü.	94
Şekil 4.30 : Farin tozunun 1. konumdaki durumu.	95
Şekil 4.31 : Farin tozunun 2. konumdaki durumu.	96
Şekil 4.32 : Farin tozunun 3. konumdaki durumu.	97
Şekil 4.33 : Farin tozunun 4. konumdaki durumu.	98
Şekil 4.34 : Farin tozunun 5. konumdaki durumu.	99
Şekil 4.35 : Farin tozunun 3. konumdaki yakın görünümü.	100
Şekil 4.36 : Farklı tip korona elektrotları.	101
Şekil 4.37 : 1 Numaralı korona elektrotu.	101
Şekil 4.38 : 2 Numaralı korona elektrotu.	102
Şekil 4.39 : 3 Numaralı korona elektrotu.	103

Şekil 4.40 : 4 Numaralı korona elektrotu.....	104
Şekil 4.41 : 5 Numaralı korona elektrotu.....	105
Şekil 4.42 : 6 Numaralı korona elektrotu	106

ELEKTROSTATİK FİLTRE VERİMİNİ ARTIRICI ÇÖZÜMLERİN İNCELENMESİ

ÖZET

Yaşadığımız yüzyıla kadar, sanayileşme sürecinin insanlığa sunduğu olanaklar çevreye yönelik duyarlılıkların ikinci plana atılmasına neden olmaktaydı. Gün geçtikçe insan, hava, su, bitki ve hayvanlarda oluşan tahribatlar, eksiklikler ve hastalıklar, çevre duyarlılığının, ülkelerin politikalarının merkezine kaymasına neden olmuştur. Ülkelerin olduğu gibi büyük şirketlerin ve sanayi tesislerinin de çevre konusundaki duyarlılıkları artmıştır. Sanayi tesislerinde, çevreyle ilgili yönetim sistemleri oluşturulmuş ve çevreye en az zarar verecek donanımların kullanımı ön plana çıkmıştır. Bu bakımdan, sanayi tesislerinde, üretim vb. amaçla kullanılan havanın filtrelenerek dışarıya atılması da önemli hale gelmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, çevresel duyarlılıklar, emisyon ölçüm şekilleri, toz tutma sistemleri incelenmiştir.

Endüstriyel tesislerde parçacıkların tutulması için çoğunlukla elektrostatik filtreler veya torba filtreler kullanılır. Bu amaçla bu yüksek lisans tezinde sanayi tesislerinde çoğunlukla kullanılan, sürekli işletim özelliğine sahip, farklı işlem süreci şartlarında çalışabilen, düşük işlem maliyeti ve yüksek verim sağlayan elektrostatik filtreler incelenmiş ve verimlilik çözümleri araştırılmıştır. Elektrostatik filtrelerin temel çalışma ilkesi, filtre içinden geçen havadaki toz parçacıklarının, yüksek gerilim uygulanmış korona elektrotu ile yüklü hale getirilmesi ve parçacıkların toplama elektrotuna doğru ilerleyerek bu elektrot üzerinde toplanmasıdır. Elektrostatik filtrenin en önemli iki elemanı korona ve toplama elektrotlarıdır. Korona elektrotunun yapısı ve meydana getirdiği korona boşalması elektrostatik filtre verimini çok büyük ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada, elektrik alan ve korona boşalmasına etki eden faktörler ve denklikler araştırılmış ve korona elektrotunun yapısıyla ilgili deneyler ve yükleme mekanizmaları incelenmiştir. Özellikle farklı kaynaklardan, korona elektrotunda bulunan iğnelerin, korona boşalmasının erken başlamasını sağladığı görülmüştür. Bu durumda elektrostatik filtre verimi artmaktadır.

Elektrostatik filtrelerde, temel çalışma ilkesi değişmese de, özellikle yüksek gerilim beslemesinde yeni sistemler kullanılarak verimlilik artırılmaktadır. Bu yeni sistemler, darbeli ve yüksek frekanslı güç beslemesi olarak sayılabilir. Üstün kontrol sistemleri desteğiyle elektrotu uygulanan bu tür gerilim beslemeleri, özellikle geri korona etkisini azaltarak filtre verimini artırmaktadır.

Uygulama bölümünde ise, sonlu elemanlar yöntemiyle, korona elektrotunun farklı geometrik yapılarda ve dizilimlerdeki elektrik alan dağılımı incelenmiştir. Ayrıca filtre içinden geçen malzemenin elektrik alan şiddetini nasıl etkilediği araştırılmış ve nemin, maksimum elektrik alan şiddetini artırarak, olumsuz etki yaratan gerilim atlamalarının oluşmasını hızlandıracak görülmüştür.

INVESTIGATION OF SOLUTIONS ON IMPROVING ELECTROSTATIC PRECIPITATOR PERFORMANCE

SUMMARY

Until our century, the facilities, which were offered by process of industrialization, made people less sensitive to environment. Day by day the damage of air, water, plants and animals; diseases made the environment sensibility move to the center of the politics of countries. Besides countries, the environment sensibility became important for industrial plants. Industrial plants developed environmental management systems and started to use some equipment, which are the most harmless to environment. So, for industrial plants, filtering the air, which is used in production etc., became important. In the first part of this thesis, environment sensibility, measuring of emission, the systems of collecting the dust were examined.

Electrostatic precipitator and bag filter are usually used for collecting particles in industrial plants. So in this thesis, electrostatic precipitator, which is used mostly in the industrial buildings, which has the durable process, ability of working in various process parameters and providing both least expenditure and the highest performance were examined and the solution for the efficiency was researched. The basic principle of this electrostatic precipitator is to charge dust particles in the air, which goes through the filter by discharge electrode, which supplies with the high voltage, and to collect these particles on the collector electrode by moving to this electrode. The most important elements of these electrostatic precipitators are discharge and collector electrodes. The structures of corona electrode and corona discharge formed by it have a deep influence on electrostatic precipitator performance. In this study, the factors and equivalence, which affect corona discharge, have been researched and the experiments about the structure of corona electrode and charge systems were examined. Especially from different sources, it was observed that the barbed corona electrode makes corona discharge earlier. Therefore, the performance of electrostatic precipitator increases.

Although the basic principle in electrostatic precipitator does not change, the efficiency can be increased by using new systems especially high voltage supply. These new systems can be accepted as pulse power supply and the high frequency supply voltage. With the support of supreme control systems, this kind of power supplies practiced on the electrodes increase the efficiency of precipitator by decreasing the effect of the back corona.

In the application part, the electrical field intensity in the different geometric structures and designs of corona electrode was examined using the finite element method. How the material going through the precipitator affected the electric field intensity was observed that moisture would increase maximum electrical field intensity and accelerate existing of spark, which has a negative effect on the precipitator performance.

1. GİRİŞ

1.1 Genel Bilgi

Gün geçtikçe artan teknolojik gelişmeler ve yeni üretim alanları, bir ülke için ekonomik ve sosyolojik açıdan gelişmişliğin göstergelerindendir. İnsanların yaşam standardını düşüren çevresel etkenler, gelişmişliğin yanında çevre bilincinde gelişmiş olmasını gerektirmektedir. İnsan yaşamında, gün geçtikçe önemi artan ve yaşam standardını yüksek tutan en önemli etkenlerden biri de her an soluduğumuz havadır.

Hava, insan ve canlıların için yaşamsal öneme sahiptir. Yerküreyi saran gaz kütleyle atmosfer adı verilmektedir. Atmosferdeki hava tabakasının kalınlığı 150 km'dir. Bunun sadece 12 km'si canlıların yaşamasına elverişlidir [1]. Hacim olarak % 78,09 azot, % 20,95 oksijen, % 0,93 argon ve % 0,03 karbondioksit bulunan havada, çok küçük oranlarda diğer gazlar da bulunmaktadır [2].

Hava kirliliği; havada katı, sıvı ve gaz şeklindeki yabancı maddelerin insan sağlığına, canlı yaşamına ve ekolojik dengeye zarar verecek miktar, yoğunluk ve sürede atmosferde bulunmasıdır. İnsanların, çeşitli nedenlerle yaptıkları üretim ve tüketim etkinlikleri sırasında ortaya çıkan atıklarla hava tabakası kirlenerek, yeryüzündeki canlı yaşamını olumsuz yönde etkilemektedir.

Fosil kökenli yakıt kullanan enerji üretim tesislerinden kaynaklanan hava kirliliğinin insan sağlığına etkileri; akciğer kanseri, bronşit, kronel bronşit, raşitizm, eklem romatizması, kalp hastalıkları, göz yanmaları, nefes darlığı, tozların vücuttaki birikiminden doğan iştahsızlık, aşırı derecede ihtiyarlama belirtileri görülmesi, romatizma, sinirlilik, ruhsal bozukluklar, kan zehirlenmesi, tozların deri dokusunun üzerindeki delikleri terle birleşip kapamasıyla deri solunumuna engel olması olarak sayılabilir [3].

Hava kirliliğini kaynaklarına göre üçe ayırabiliriz;

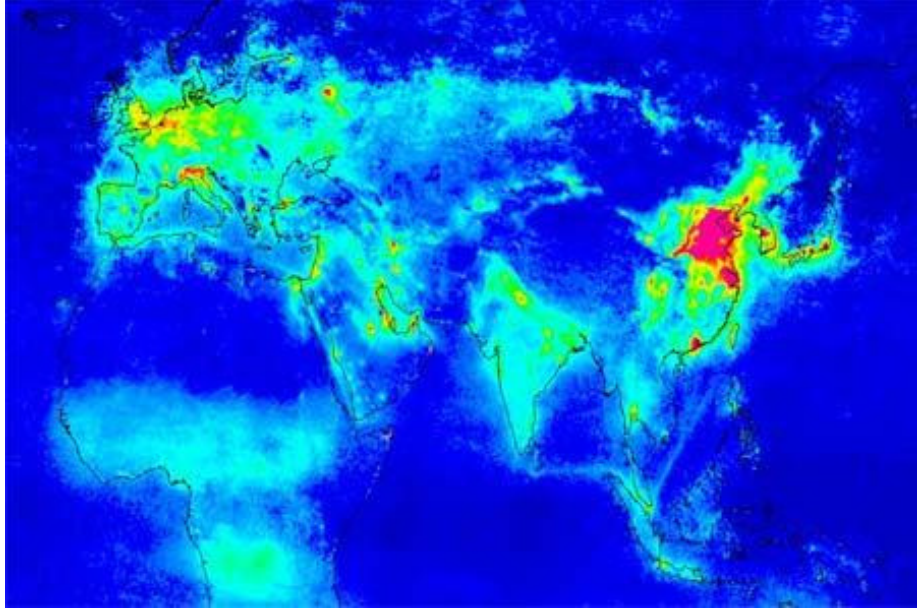
1) Isınmadan Kaynaklanan Bölgesel Kirlenme (Alan Kaynak): Özellikle ısınma amaçlı, düşük kalorili ve kükürt oranı yüksek kömürlerin yaygın olarak kullanılması ve yanlış yakma tekniklerinin uygulanması hava kirliliğine yol açmaktadır.

2) Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Kirlenme (Çizgi Kaynak): Nüfus artışı ve gelir düzeyinin yükselmesine paralel olarak, sayısı hızla artan motorlu taşıtlardan çıkan egzoz gazları, hava kirliliğinde önemli bir faktör oluşturmaktadır.

3) Sanayiden Kaynaklanan Kirlenme (Nokta Kaynak): Sanayi tesislerinin kuruluşunda yanlış yer seçimi, çevre korunması açısından gerekli önlemlerin alınmaması (baca filtresi, arıtma tesisi olmaması vb.), uygun teknolojilerin kullanılmaması, enerji üreten yakma ünitelerinde vasıfsız ve yüksek kükürtlü yakıtların kullanılması, hava kirliliğine neden olan etkenlerin başında gelmektedir.

Kirli hava, insanlarda solunum yolu hastalıklarının artmasına sebep olmaktadır. Örneğin; kurşunun kan hücrelerinin gelişmesini ve olgunlaşmasını engellediği, kanda ve idrarda birikerek sağlığı olumsuz yönde etkilediği, karbon monoksit (CO)'in ise, kandaki hemoglobin ile birleşerek oksijen taşınmasını aksattığı bilinmektedir. Bununla birlikte kükürt dioksit (SO₂)'nin, üst solunum yollarında keskin, boğucu ve tahriş edici etkileri vardır. Özellikle duman akciğerden alveollere kadar girerek olumsuz etki yapmaktadır. Ayrıca kükürt dioksit ve ozon bitkiler için zararlı olup; özellikle ozon, ürün kayıplarına sebep olmakta ve ormanlara zarar vermektedir [4].

Daha çok enerji santrallerinden ve motorlu araçların egzoz borularından yayılan azot dioksit (NO₂) akciğer kanseri ve solunum rahatsızlıklarına neden olan, insan faaliyetleri sonucu oluşan bir gazdır. Şekil 1.1'de Avrupa Uzay Dairesi'nin (ESA) uydusu Envisat tarafından çekilen 2006 yılı için NO₂ kirlilik haritası görülmektedir [5].



Şekil 1.1 : NO₂ kirlilik haritası [5].

Türkiye'de kirlетici potansiyeli olan endüstrilerden atmosfere atılan yıllık SO₂ ve parçacıkların madde değeri Çizelge 1.1'de görölmektedir. Çizelge 1.1'de görölen emisyon değeri, genel endüstri türleri için elde edilmiş değeri olduğundan içeriğindeki belirsizlikler oldukça yüksektir. Emisyon değeri hakkında bir fikir verme açısından yararlı olmakla birlikte daha doğru emisyon değeri elde edilmesi için çok daha detaylı çalışmalar gerekmektedir [2].

Çizelge 1.1 : Atmosfere bırakılan yıllık SO₂ ve parçacıklar [2].

Endüstri	Parçacık (ton/yıl)	SO ₂ (ton/yıl)
Güç Santralleri	3.940.000	1.430.000
Demir Çelik	3.330.000	
Çimento	2.270.000	32.000
Şeker	290.000	49.000
Metal	5.200	30.000
Gübre	14.000	30.000

Sanayi, endüstri ve ısınmada kullanılan fosil yakıtlar ile ormanların tahribi ve arazi değışmesi sonucu, atmosferdeki karbondioksit miktarının %5 oranında arttığı saptanmıştır. Bunun ise, küresel ısınmaya yol açabileceği öngörülmektedir [4].

Endüstriyel kirlетiciler için hava kalitesi yasal zorunluluklarla kontrol altında tutulmaya çalışılmaktadır. Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'ne göre, işletmeler Yönetmelikte belirtilen sürelerde emisyon kontrolü için masrafları tesisi işleten tarafından karşılanan ölçümler yapmalıdır [6].

Parçacıklar, hava kirleticiler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Parçacıklar, tanım olarak, atmosferde standart koşullarda katı ya da sıvı olarak bulunan birleşmemiş su dışındaki maddelere denir. Bunlar, 0,1 ile 100 µm arasında değişen boyutlarda bulunurlar. Parçacıkların başlıca kaynaklarını çimento fabrikaları, metal endüstrisi ile araçlar oluşturur [7].

Emisyon, yakıt ve benzerlerinin yakılmasıyla; sentez, ayrışma, buharlaşma ve benzeri işlemlerle; maddelerin yığılması, ayrılması, taşınması ve diğer mekanik işlemler sonucu bir tesisten atmosfere yayılan hava kirleticileri olarak tanımlanır. Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'ne göre, emisyon kontrolünün uygun şekilde yapılması için kapsamındaki bazı işletmelerden, ölçümlerin kayıt cihazlı ölçüm aletleriyle sürekli olarak yapılması istenebilir.

Enerji kesilmesi ve dalgalanmaları, ani karbon monoksit yükselmeleri ile ilk ateşleme gibi zorunlu haller dışında, tesisler filtreler devre dışı iken çalıştırılmayacaktır. Değerlendirmelerde, elde olmayan ve önceden müdahalesi mümkün olmayan sebeplerden dolayı oluşan duruşlardan sonra bu durumlar aylık raporlar halinde belgelendirilecektir. Ayrıca işletmelerin İl Çevre ve Orman Müdürlükleri ile Çevre ve Orman Bakanlığına anlık emisyon değerleri için çevrimiçi bağlantısı gündemdedir. Yani filtreleme verimsizliliği ve toz tutma kapasitelerinin azalması direk olarak yetkili makamlarca izlenecektir. Böylece, emisyon kontrolünün sürekli kontrol altında kalması sağlanacak, aynı zamanda sürekli izleme yapıldığından fabrikalara idari para cezalarının gelmesine yol açacaktır [6].

Emisyon ölçümlerinde, kütsel debi ve toz yoğunluğu kullanılır. Kütsel debi ölçümünde, kütsel yoğunluk ve bacadaki debi ölçümü yapılır. Kütsel debi, birim zamanda yayılan hava kirleticinin kütselidir. Elde edilen kütsel debi ölçümünün normal işletme koşullarında 15 kg/saat değerini geçmemesi gerekir [6]. Kütsel debi ölçümünde yapılan hesaplama aşağıdaki gibidir.

$$\text{Kütsel Debi} = \text{Debi} \times \text{Kütsel Yoğunluk} \quad (1.1)$$

Kütsel Debi: Birim zamanda yayılan hava kirleticinin kütseli (kg/saat, g/saat, mg/saat)

Debi: Herhangi bir kesitten birim zamanda geçen akışkan hacmi (Nm³/saat)

Kütlesel Yoğunluk: Atık gazın birim hacmi başına yayılan hava kirleticinin kütlesi (mg/Nm³) [8].

Toz yoğunluğu ölçümünde ise aşağıdaki formül geçerlidir. Toz yoğunluğu atık gazın birim hacmi başına yayılan hava kirleticinin kütlesidir. Toz yoğunluğu, örnek olarak çimento sanayi için 50 mg/Nm³'ü aşmamalıdır [6]. Koyoto protokolüne taraf olunmasıyla, ileriki zaman diliminde, atık yakmak isteyen işletmeler için limit değer olarak 30 mg/Nm³ toz yoğunluğu şart koşulacaktır.

$$\text{Toz Yoğunluğu} = \frac{m_2 - m_1}{V_2 - V_1} \quad (1.2)$$

m₂: Örnekleme sonrası tartılan filtre (mg)

m₁: Örnekleme öncesi tartılan filtre (mg)

V₂: Örnekleme sonrası sayaçta okunan kuru hacim (m³)

V₁: Örnekleme öncesi sayaçta okunan kuru hacim (m³)

Ölçülen değerler, sınır değerlerle karşılaştırmak için kuru bazda ve normalize edilmiş olarak, mg/Nm³ cinsinden ölçüm sayısının ortalaması alınarak doğrudan verilir. O₂ düzeltilmesi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\text{Düzeltilmiş değer} = \frac{21 - \text{ref}\%O_2}{21 - \text{ölçülen}\%O_2} \times \text{Ölçülen değer} \quad (1.3)$$

Düzeltilmiş değer: Düzeltilmiş kütle yoğunluğu (mg/Nm³)

Ref %O₂: Referans alınan oksijen yüzdesi

Ölçülen %O₂: Baca gazında ölçülen oksijen yüzdesi

Ölçülen değer: Baca gazında ölçülen kütle yoğunluğu (mg/Nm³) [6, 8].

1.2 Toz Emisyonlarının Önlenmesi ve Kontrolü

Tozlar fiziksel olarak kütle yoğunluğu ve büyüklük olarak karakterize edilirler. 2,5 mikrondan büyük olan parçacıklar genellikle kaba parçacık olarak, 2,5 mikrondan küçük olanlar ise ince parçacıklar olarak adlandırılırlar.

İşletmede yönetimsel olarak geliştirilmiş süreç tasarımı, bakım, işletme içi önlemler gibi diğer yönetim önlemleriyle emisyonlar azaltılabilir. Yakma sisteminin veriminin artırılması ile tamamlanmayan yanma sonucunda oluşan yan ürünlerin ve tozun miktarı önemli ölçüde azaltılabilir. Uygun yakıt yakma teknikleri ve yanma bölümünün yapısı yan ürün miktarını azaltır.

Yakıt seçimi açısından, atmosferik toz emisyonları daha temiz yakıtların seçimi ile azaltılabilir. Yakıt olarak doğalgaz kullanımı daha az miktarda katı parçacık oluşumuna neden olur. Yağ bazlı sistemler kömür kullanılan yakma tesislerine göre de daha az toz oluşumuna neden olurlar. Düşük küllü fosil yakıtlar daha az yan ürün içerirler. Görüldüğü gibi yakıt seçimi ekonomik olduğu kadar ekolojik anlamda da etkileri olan önemli bir konudur.

Yakıt temizliği ile kül oranının azaltılması toz emisyonlarını azaltmaya yardımcı olur. Kömürün fiziksel olarak yıkanarak temizlenmesi kül ve kükürt içeriğinin azalmasını sağlar. Fakat oluşan katı ve sıvı atıklar da unutulmamalıdır. Kömür yıkamaya alternatif olarak kömürün yüksek ve düşük içerikli olarak yardımcı yakma işlemidir. Düşük miktarda toz emisyonunun oluşmasına ek olarak düşük kül oranlı kömürler kazan performansının artmasına ve bakım için gereken maliyet ve zamandan da tasarruf edilmesine yardımcı olur. Örneğin; Doğu Asya'da kömür yıkama için yapılan yatırımın %26'sı geri kazanılmıştır.

Daha verimli teknolojilerin seçimi veya işlem değişiklikleri emisyonların azaltılmasına yardımcı olur. İleri kömür yakma teknikleri emisyon oluşumunu %10 oranında azaltabilir. Kapalı sistemli kömür kırıcıları ve sıkıştırıcıları da emisyonları büyük oranda azaltır [9]. Toz tutucuda, işlem değişkenlerinin etkisi incelenerek uygun tasarım yapılmalı veya işlem sürecinde yapılacak kalıcı veya duruma dayalı değişikliklerle verim sağlanmalıdır. Tasarımda hızlı parçacıkların yakalanması ve küçük boyutta toz tutucu oluşturulması incelenmelidir. Yakalanan toz parçacığının sınırlayıcı etken olması nedeniyle elektriksel çalışmanın tahmin edilip toz tutucudaki geometrik şekillerin tasarlanması ve uygulanacak gerilim düzeyinin belirlenmesi gerekmektedir.

1.3 Toz Kontrol Sistemleri

Parçacık giderme teknikleri açısından, pek çok türde ve farklı fiziksel ve ekonomik özellikleri ile ayırt edilen sistemler mevcuttur.

Ayırıcılar (seperatörler), taşıyıcı gaz akımı içerisindeki tozun ayrılması için iyi bir yöntemdir. Ataletli ayırıcılar orta ve büyük çaplı parçacıkların ayrılması için etkilidir. Bunlar çöktürme odalarını ve santrifüj siklonlarını içerirler. Siklonlar, düşük maliyetli ve düşük bakım gerektirir. Siklonlarla ince tozların giderme verimi %70'den düşüktür. Bu nedenle ince tozların tutulması için elektrostatik çöktürücüler ve torba filtreler önerilir. Siklonlar, genel olarak toz artımı için birincil arıtma görevi görürler. Tipik maliyetleri m³/dak debi başına 35 USD'dir.

Elektrostatik çöktürücüler, elektrostatik bir alanda toz parçacıklarının elektrotlara yapışması suretiyle çalışırlar. İyi tasarlanmış ve iyi işletilen sistemlerde, %99,9 oranında ince tozların giderildiği görülmüştür. Elektrostatik çöktürücüler özellikle ince tozların giderilmesinde oldukça verimlidir. Yüksek sıcaklıklarda torba filtrelere göre daha az duyarlıdır ve düşük basınçlarda çalışırlar. Elektrostatik çöktürücüler özellikle çimento geri kazanımında kullanılabilirler. Maliyeti yeni bir endüstriyel tesis için kapital maliyetin %12'si kadardır.

Filtreler ve toz toplayıcılar (kolektörler) (torba filtreler), akışkan gaz içerisinde bulunan tozun kumaş bir filtreden tutulması ilkesiyle çalışırlar. En çok kullanılan türü torba şeklindeki filtrelerdir.

Torba filtrelerde kumaş türünün seçimi gaz sıcaklığına bağlı olarak değişiklik gösterir. Parçacıklar mekanik olarak çalkalama, gaz akımında dönme veya yüksek basınçlı hava akımı olarak giderilir.

Kumaş filtrelerde verim %99,9 civarındadır. Arsenik, kadmiyum, krom, kurşun ve nikel giderme verimi de %99'dan büyüktür.

Islak çöktürücüler, akışkan gazdaki toz emisyonlarını sıvı püskürterek tutulması ilkesine göre çalışır. Bu filtreler özellikle gaz emisyonların giderilmesinde kullanılır ve parçacıklar ikincil olarak giderilmiş olur. En önemli türleri, venturi yıkayıcılar, jet yıkayıcılar, püskürtme (sprey) kuleleri veya odalarıdır. Venturi yıkayıcılar yüksek miktarda su tüketimine neden olurlar.

Endüstriyel tesislerde 10 mikron çapındaki parçacıkların kontrolü için elektrostatik çöktürücüler veya torba filtreler önerilir. Bu donanımlar tasarlandıkları verimliliklerde işletilmelidir. Özel emisyonların varlığında maksimum 50 mg/Nm³ değerine ulaşılabilir. Çözünmüş zehirli maddeler içeren gazlar için ve gaz akımı 3000 m³/dak'dan düşük olan tesisler için ıslak filtreler (tutucular) kullanılabilir. Siklonlar ve mekanik ayırıcılar sadece ön temizleme olarak kullanılmalıdır [9].

1.4 Parçacık Kontrol Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

1.4.1 Siklon Ayırıcılar

Avantajlar;

- Düşük yatırım maliyeti,
- Daha basit ve az işletme problemleri,
- Düşük işletme basıncında çalışma (515 cm su kolonu),
- Kuru toplama ve depolama,
- Daha küçük alan ihtiyacı gereksinimidir.

Dezavantajlar;

- 10 mm den düşük çaptaki parçacıkların tutulmasında düşük verim,
- Yapışkan parçacıkların giderilmesinde yetersizliktir.

1.4.2 Islak Çöktürücüler

Avantajlar;

- İkincil toz kaynaklarına gerek olmaması,
- Daha az alan gereksinimi,
- Gaz ve parçacıklı maddelerin ve özellikle yapışkan olanlarının tutulabilmesi,
- Yüksek sıcaklıkta ve yüksek nemlilikte gaz akımlarına uygun olması,
- Düşük yatırım maliyeti (eğer arıtma tesisleri gerekli değilse),
- İnce parçacıklarda yüksek tutma verimidir.

Dezavantajlar;

- Potansiyel atık su arıtımı problemi,
- Korozyon problemi (özellikle kuru sistemlerde büyük problem),
- Yüksek basınçta damlama (25 cm su kolonu),

- Islak kuru fazında potansiyel katı birikmesi,
- Yüksek bakım maliyetleridir.

1.4.3 Torba Filtreler

Avantajlar;

- Kaba ve ince parçacıkları yüksek verimde tutma özelliği (%99,9),
- Gaz akımındaki değişiklikler için uygunluk,
- Filtre çıkış havasının dolaşımı,
- Tutulan malzemenin kuru olarak toplanıp depolanması,
- Yüksek gerilimde tozların varlığında basit bakım,
- Filtreler için değişik özellikler ve yapıların olması,
- Basit işletim gerektirmesidir.

Dezavantajlar;

- Maliyeti yüksek olan mineral veya metalik filtre ihtiyacı (290°C'den yüksek sıcaklıklar için),
- Toplanan tozun giderilmesi için filtre değişimi,
- Yüksek bakım maliyetleri,
- Asitli ortamda bulunan tozların patlama ve yangın riski,
- Filtre değişimlerinde koruyucu donanım ihtiyacı,
- Filtre ömrünün asidik veya alkali özellik taşıyan parçacıkların varlığında kısa olmasıdır.

1.4.4 Elektrostatik Filtreler

Avantajlar;

- Orta ve büyük çaplı parçacıklar için %99,9'dan yüksek tutma verimi ve düşük enerji maliyeti,
- Tozların kuru olarak toplanması ve uzaklaştırılması,
- En az bakımla sürekli işletilebilmesi,
- Düşük işletim maliyeti,
- Yüksek sıcaklık (700°C den fazla) ve yüksek basınç (10 atm den fazla) ve vakumda çalışabilme,
- Geniş aralıktaki akışlar için uygunluktur.

Dezavantajlar;

- Yüksek yatırım maliyeti,
- Gaz akımındaki değişimlere duyarlılık,
- Yüksek veya düşük dayanımlı tozların tutulmasında güçlük,
- İnşa için fazla alan gereksinimi,
- Yanma gazlarından dolayı patlama riski,
- Eğitimli personel ihtiyacıdır [9].

Karşılaştırmada görüldüğü gibi, torbalı filtreler ve elektrostatik filtreler verimlilik açısından diğerlerine göre üstündürler. Fakat genel kullanım, bakım ve ekonomik durum açısından elektrostatik filtre daha üstün özelliklere sahiptir. Pratik deneyim, elektrostatik toz tutucunun değişen sıcaklık ve basınç koşulları altında üstün temizleme verimi ile çalışabilen en uygun mevcut filtreleme sistemi olduğunu göstermiştir [10]. Elektrostatik filtreler endüstride yaygın bir şekilde kullanılmakta ve çevresel korumada önemli bir rol oynamaktadır. Elektrostatik filtreler yüksek toplama verimi ve düşük basınç düşümü ile işletilebilmektedir [11].

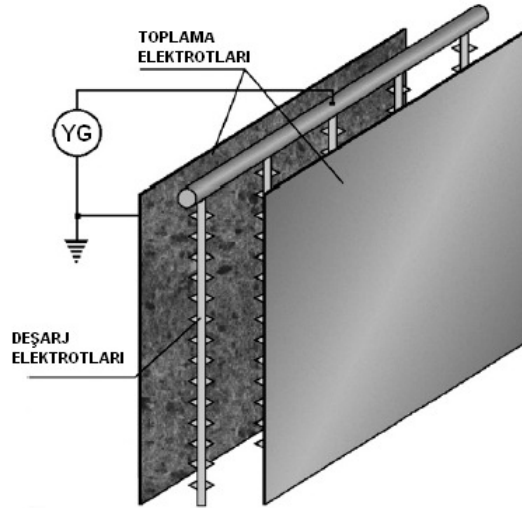
Elektrostatik filtrede, tutulan tozun çamurlaşmamış ve kuru olması avantajdır [12]. Böylece eğer tutulan malzeme tekrar kullanılabilirse (örneğin çimento fabrikalarındaki çimento ya da çimento hammaddesi gibi) bu malzeme sisteme geri verilerek tekrar işlenebilmekte ve verimlilik sağlanabilmektedir. Ayrıca proses çalışmasının sürekli olabilmesi, filtre içindeki basınç ve sıcaklık düşümünün az olması, büyük hacimli gazlarda ayırıştırma yapabilmesi ve temel olarak basit bir iç yapıya sahip olması olumlu özellikleridir [12].

Bu tezde, daha önceden yayınlanmış araştırmalar incelenip elektrostatik filtrelerde farklı çalışma koşullarında korona boşalması, yük taşıma ve parçacık toplanmasının modelleri incelenmiştir. Ayrıca elektrostatik filtreler için yeni teknolojiler, son gelişmeler, gelecekte beklenen eğilimler ve verim artırıcı çözümler incelenmiştir. Elektrostatik filtrelerde yükleme elektrotlarının değişik geometrik yapılarda olması durumunda korona boşalması açısından elektrik alan dağılımı sonlu elemanlar yöntemi ile uygulamalı olarak incelenmiştir.

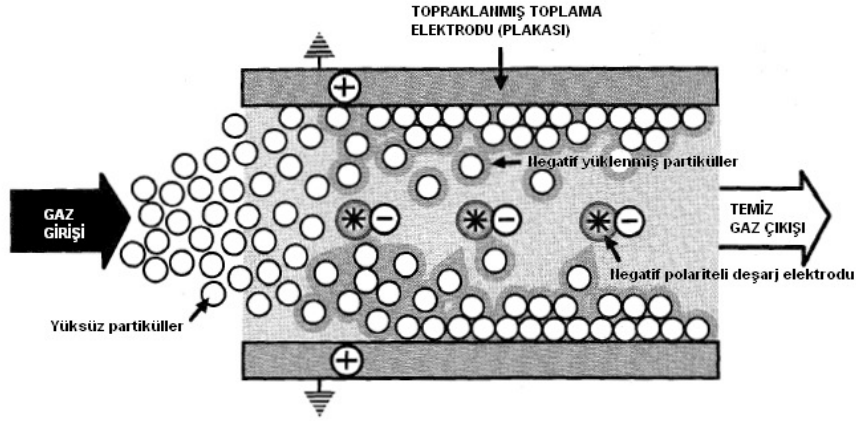
2. ELEKTROSTATİK FİLTRELER

2.1 Çalışma İlkesi

Elektrostatik filtrelerin çalışma ilkesi birçok kaynakta ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi elektrostatik filtreler, sivri şekillerde korona ve yumuşak yüzeylerde toplama elektrotlarından kuruludur. Yüksek doğru gerilim korona elektrotlarına uygulandığında bir korona boşalması meydana gelir. İyonlar ve elektronlar bu korona noktasında oluşturulur ve iyonik akım boşluğa doğru akar. İyon polaritesi pozitif ve negatif olabilir. Bu iyonlar askıdaki veya havadaki katı parçacıkları yükler. Elektriksel olarak yüklenmiş bu parçacıklar Coulomb kuvvetinin etkisiyle toplama elektrotuna doğru hareket eder ve bu elektrot üzerinde toplanır (Şekil 2.2). Elektrotlarda toplanan katı parçacıkların kalınlığı önceden belirlenmiş düzeye ulaştığında, toplama ve korona elektrotları mekaniksel çekiçlemeler gibi donanımlar ile silkenir. Silkeleme sonucu dökülen toz parçacıklarının, filtre altında bulunan haznelere dökülmesi sağlanır ve bu parçacıklar filtre dışına taşınır [11].



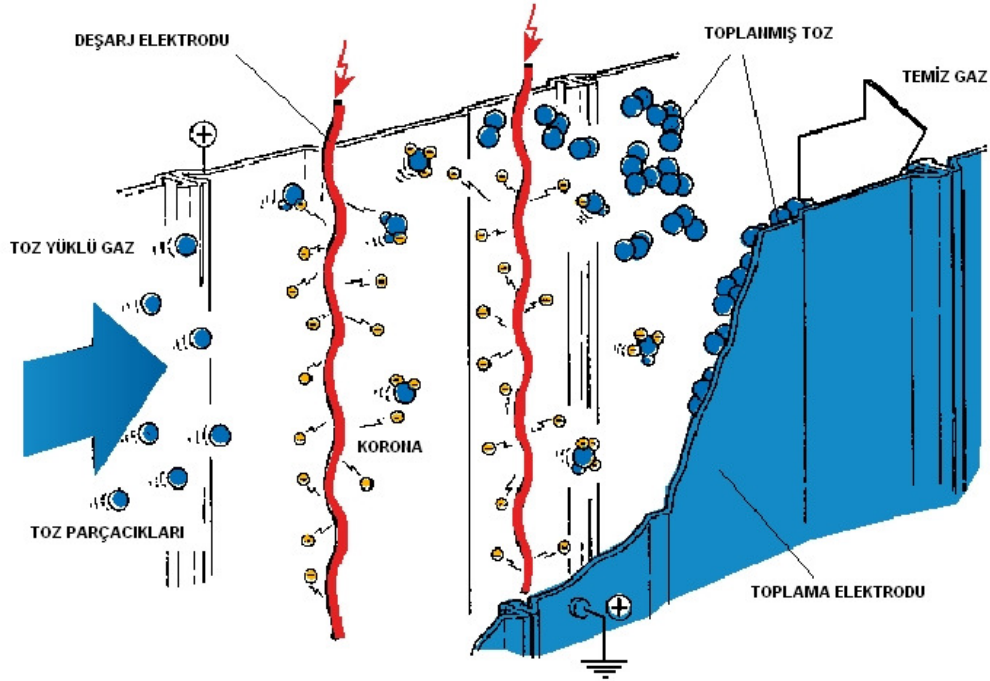
Şekil 2.1 : Elektrostatik filtrenin yapısı [13].



Şekil 2.2 : Elektrostatik filtrenin çalışma ilkesi [14].

2.2 Parçacık Yükleme Sistemi

Elektrostatik filtrelerin temelinde parçacıkların elektriksel yüklenmesi en büyük yeri tutar. Toz parçacıklarının elektrik yükünü taşıdıkları geçmişten beri bilinmektedir. Bu şekilde doğal olarak yüklenmiş parçacıkların çekim kuvveti büyük ölçekteki filtreler için yetersiz kalmaktadır. Bu parçacıklar, korona teli tarafından oluşturulmuş iyonize alandan geçerek yüklü hale gelir (Şekil 2.3) [12, 15].



Şekil 2.3 : Elektriksel boşalma ve toplama sistemi [15].

2.3 Elektrik Alanı

Elektrostatik filtrenin performansını tahmin etmeden önce elektrik alan şiddetinin hesaplanması gerekir. Mc Donald [16] tarafından oluşturulan sayısal yöntem ve verilen denklemler, uzay yükünde, elektrik alan şiddetini elde etmek için uygulanır. Elektrik potansiyeli ve uzay yük yoğunluğu dağılımı kullanarak oluşturulmuş eşitlikler şu şekildedir.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_e}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

ve

$$\rho_e^2 = \epsilon_0 (\nabla V) \cdot (\nabla \rho_e) \quad (2.2)$$

Burada V elektrik potansiyeli, ρ_e uzay yük yoğunluğu ve ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitidir. Bu eşitlikleri çözmek için şu sınır koşulları kullanılmıştır:

- i. Korona elektrotunda $V = V_0$ ya da $\rho_e = \rho_{ew}$
- ii. Toplama elektrodu boyunca $V = 0$;
- iii. Tüm simetrik düzlemler boyunca $\nabla V = 0$;
- iv. Toplama elektrodu yakınında $\rho_e = j_p [b(-\partial V / \partial y)]^{-1}$.

Burada V_0 uygulanan gerilim, ρ_{ew} korona elektrodu yakınında uzay yük yoğunluğu, j_p toplama elektrotunda parçacıklar dışında ortalama akım yoğunluğu, b yüklenmiş parçacıkların hareketliliği ve y korona elektrodu merkezli toplama elektrotuna göre ölçülmüş konum koordinatıdır [17]. Yukarıda verilmiş olan (2.1) ve (2.2) formülleri göz önüne alınarak E elektrik alanı ve J akım yoğunluğu aşağıdaki denklemlerle elde edilebilir.

$$E = -\nabla V \quad (2.3)$$

ve

$$J = \rho_c B_g E \quad (2.4)$$

Burada, B_g gaz iyonlarının elektriksel hareketliliğini ($m^2/V.s$), ρ_c uzay yük yoğunluğunu ($C.m^{-3}$) belirtmektedir. Buradaki lineer olmayan düzlem için sonlu farklar yöntemi gibi bazı sayısal yöntemlere ihtiyaç vardır [18]. Korona elektrodu yakınında uzay yük yoğunluğu ρ_{ew} tüm akımlar için şu şekildedir.

$$\rho_{ew} = \frac{Sj_p}{\pi b a f (30\delta + 0,9(\delta/a)^{1/2})} \cdot 10^{-5} \quad (2.5)$$

Burada S korona elektrotları arasındaki uzaklık, b yüklü parçacıkların hareketliliği, a korona elektrotunun yarıçapı, f pürüzlülük faktörü, δ ise T_0P/TP_0 , P_0 1 atm, T_0 293 K ve P ve T işletme basınç ve sıcaklıklarıdır [17].

2.4 Korona Boşalması

Parçacık yüklemeye en uygun uygulama korona boşalmasıdır. Elektronların elektrotlardan ayrılması sırasında, bir ışın yayılması meydana gelir. Eğrilik yarıçapı küçük olan elektrotlarda oluşan ve kendi kendini besleyen bu olaya korona denir. Elektrotlara bir gerilim uygulanıp artırılırsa, elektrot üzerindeki ve çevresindeki elektrik alan şiddeti de artar ve iletken çevresinde mor renkli bir boşalma (korona) halkası oluşur.

İletken yüzeyindeki kir ve pürüzler ön boşalmaların kaynağını oluştururlar. İletken çevresindeki hava iyonlaşarak alan şiddeti havanın delinme değerinin altında olduğu noktaya doğru yayılır. İletkenler birbirine çok yakın ve alan şiddeti düzgün ise boşalma olayı bir iletkeniden diğerine uzanacak ve bu durum bir atlamaya sebep olacaktır. Koronanın olduğu ortamda karakteristik bir ozon kokusu hissedilir. Hava, oksijen ile azotun bir karışımıdır. Hava elektrikle zorlandığında, oksijen molekülü oksijen atomlarına ayrılır ve bunlar kimyasal olarak çok aktiftir. Bu yüzden kararlı değildirler. Eğer ortamda oksijenle birleşecek bir metal veya organik maddeler varsa ozon kolaylıkla O_2 ve O 'e ayrılır. Elektriksel zorlanma çok yüksekse oksijen azotla oksitler oluşturmak üzere kimyasal bileşimlere girer.

Korona için enerji harcaması, iyonizasyon, ısı, kimyasal tepkimeler, ışıma, parazit gibi olaylardan kaynaklanır. Koronayı başlatan gerilim, korona elektrotunun yapısına ve boyutlarına bağlıdır ve bu gerilimin düşük olması istenir. Korona düzgün alanda

oluşmaz ve sıralı elektrotlar, eğer sadece parçacıklar önceden yüklü ise uygun filtreleme yapar [12, 19].

Deneysel incelemeler, basınç ve sıcaklığın korona başlangıç ark eşik gerilimlerini, etkili iyon hareketliliklerini, gaz yoğunluğunu ve gerilim-akım özelliklerini değiştirdiğini göstermektedir [20].

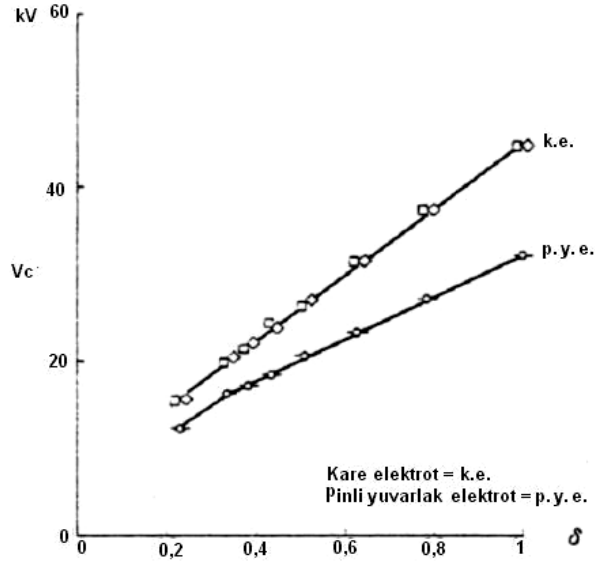
Korona boşalmasının akım-gerilim karakteristiği aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$I = AV(V - V_c) \quad (2.6)$$

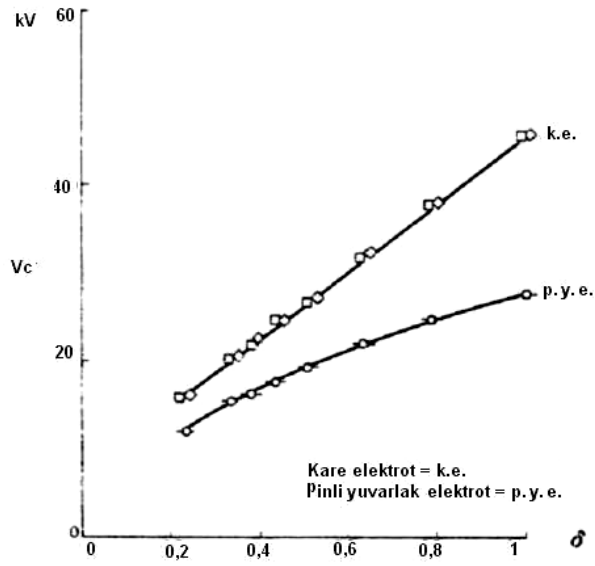
Burada A bir sabit, V_c korona başlangıç gerilimi, I elektrik akımı, V elektroda uygulanan gerilimdir [11].

Elektrostatik filtre verimi, korona elektroduna uygulanan gerilim yükseldikçe artmaktadır. Bu nedenle yüksek atlama geriliminden dolayı geniş işlem aralığı sağlaması nedeniyle genellikle negatif polarite kullanılır. Elektrodun $d > 5 \times 10^{-2}$ m için dağılımında, -15 kV için atlama gerilimi pozitif koronada negatif koronanın yarısı kadardır. Pozitif korona, düşük ozon oluşumunu sağladığı için kapalı alanlarda hava temizliği için kullanılır [11].

Korona başlangıç gerilimi farklı hava yoğunlukları için Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bu grafiklerde, üzerinde pin bulunan yuvarlak (p.y.e.) ve kare şeklinde (k.e) korona elektrotları kullanılarak korona başlangıç gerilimleri karşılaştırılmıştır. Burada korona elektrotu için, ilk grafik pozitif gerilimle, ikinci grafik ise negatif gerilimle beslenildiği durumu göstermektedir.



(a)



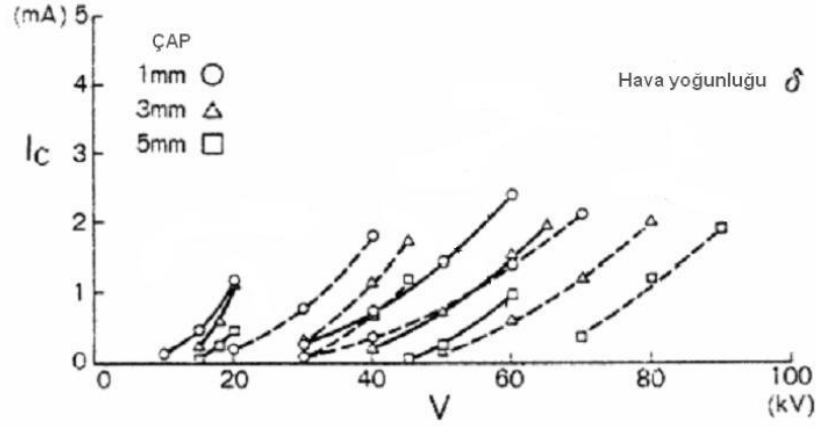
(b)

Şekil 2.4 : Hava yoğunluğuna göre korona başlangıç gerilimi
(a) pozitif besleme (b) negatif besleme [21].

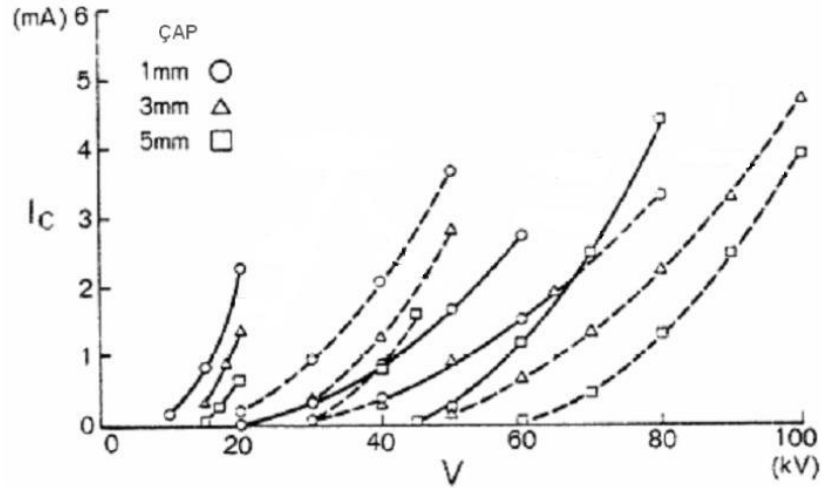
En yüksek korona başlangıç gerilimi her iki polarite için 5 mm çaplı dairesel kesitli elektrotta elde edilmektedir. Pozitif polaritede en düşük değer 1 mm çaplı dairesel kesitli elektrotla, negatif polaritede ise eklenmiş pinler bulunan elektrotta elde edilmiştir [21]. Bu grafiklerde görüldüğü gibi, aynı şartlarda pin eklenmiş yuvarlak şekilli korona elektrotuyla, kare şekiline sahip olan karşılaştırıldığında, yuvarlak elektrotun daha düşük gerilimlerde korona boşalmasını başlattığı açıkça

görülmektedir. Daha düşük gerilimlerde korona oluşumu daha önce bahsedildiği gibi parçacık yüklenmesini olumlu yönde etkilemektedir. Bu deneyde ayrıca, daha küçük çaplı yuvarlak korona elektrotları ile daha düşük korona başlangıç gerilimi (V_c) elde edildiği görülmüştür.

Elektrot yapılarına göre korona akım-gerilim karakteristikleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir [21].



(a)

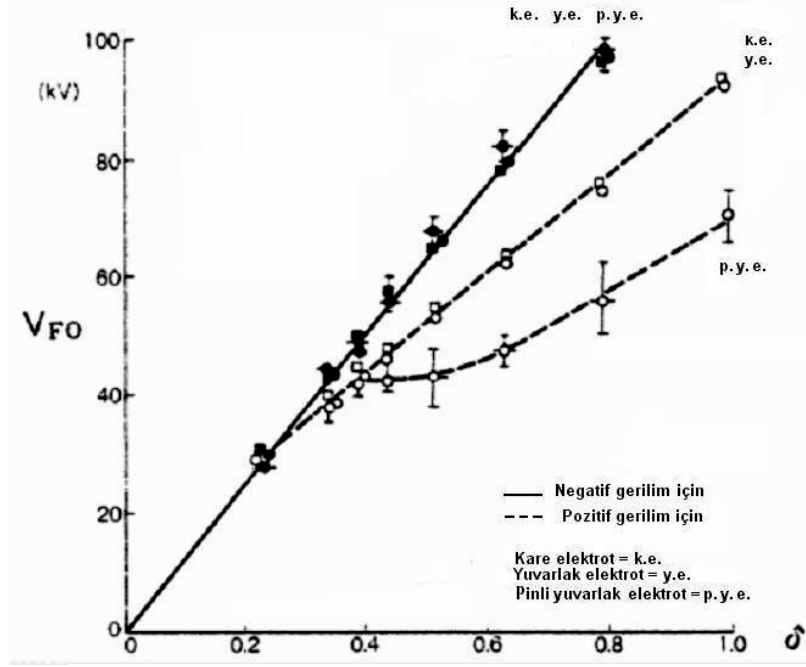


(b)

Şekil 2.5 : Elektrot yapılarına göre korona akım-gerilim karakteristikleri I_c - V
(a) pozitif besleme (b) negatif besleme [21].

Bütün polariteler de korona başlangıç gerilimi (V_c), havanın yapısı ve yoğunluğuyla artar. Bu grafiklerde, negatif gerilimli beslemede daha yüksek akım-gerilim karakteristiğinin oluştuğu açık şekilde görülebilmektedir.

V_{FO} atlama gerilimi V_c ile aynı şekilde ölçülür. Her polarite için atlama geriliminin artış grafiği Şekil 2.6’da görülmektedir [21]. Aşağıdaki grafiklerde, pozitif ve negatif polariteli besleme gerilimlerinde, kare elektrot (k.e.), yuvarlak elektrot (y.e.) ve pinli yuvarlak elektrot (p.y.e.) için atlama gerilimlerinin hava yoğunluğuyla değişimi incelenmiştir.



Şekil 2.6 : İki polaritede farklı hava yoğunluğunda atlama gerilimleri [21].

Burada negatif polaritede, V_{FO} atlama gerilimi açık olarak hava yoğunluğuyla orantılı olarak artmakta ve elektrot tipine göre aynı değerleri almaktadır. Pozitif polaritede V_{FO} atlama gerilimi hava yoğunluğuyla artmakta fakat bu artış orantılı olmamakta ve negatif polariteye göre düşük değerlerde olmaktadır. Her hava yoğunluğunda atlama gerilimi, kare ve daire kesitli elektrot tipinde birbiri ile uyumludur. Elektrotlara eklenmiş pinlerle atlama gerilimi azalmaktadır [21]. Bu grafikten, hava yoğunluğunun artışıyla, negatif gerilim beslemesinde daha yüksek atlama gerilimlerinin oluştuğu sonucu çıkarılabilir. Bu durumda, elektrostatik filtrede daha yüksek gerilim seviyelerinde çalışılması sağlanacak ve parçacık yüklenmesi daha yüksek değerlerde olacaktır. Bu bakımdan, elektrostatik filtrelerde, negatif besleme gerilimi kullanımının daha uygun olduğu görülebilmektedir.

2.5 Yükleme Mekanizmaları

İyonize olmuş gaz molekülleri ile toz parçacıkları arasındaki çarpışma iki ayrı yöntemle incelenir. Bunlar alan etkisiyle yüklenme (bombardıman yüklemesi) ve iyon difüzyon yüklemesidir. Bombardıman yüklemesi 0,5 μm 'den büyük, difüzyon yüklemesi ise 0,2 μm 'den küçük parçacıklara etkir [22].

Bombardıman (alan) yüklemesinde gaz iyonları toz parçacıklarına çarpar ve onlara yapışırlar. Kazanılan bu yük, alan şiddetine, yüzey alanına, parçacıkların dielektrik özelliklerine ve zamana bağlıdır. Elektrottan ayrılan elektronlar, gaz molekülleriyle çarpışarak gazı iyonize eder ve yeni elektron oluşumunu sağlarlar. Böylece oluşmuş olan elektronlar parçacıklara çarpar ve yapışırlar. Parçacık yüklenmesi aşağıdaki formüllerle tanımlanmıştır.

$$q(t) = q_{\infty} \frac{t / \tau}{1 + t / \tau} \quad (2.7)$$

$$q_{\infty} = \pi \epsilon_0 \frac{3\epsilon_s}{\epsilon_s + 2} d_p^2 E \quad (2.8)$$

ve

$$\tau = 4 \frac{\epsilon_0 E}{J} \quad (2.9)$$

Bu formüllerde bulunan q_{∞} doyum yükünü (C), t yüklenme süresini (s), τ alan yüklenme zaman sabitini (s), ϵ_0 boşluğun (vakumun) dielektrik sabitini ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m), ϵ_s parçacık bağıl dielektrik katsayısını, d_p parçacık çapını (m), E elektrik alan şiddetini (V/m) ve J akım yoğunluğunu (A/m^2) temsil etmektedir. Doyum yükü q_{∞} elektrik alan şiddetiyle doğru orantılıdır. τ zaman sabiti ise J iyonik akım yoğunluğu ile ters orantılıdır. Bu yüzden yüksek yüklenme için E ve J 'nin yüksek değerde olması gerekir [11]. Bombardıman (alan) yüklemesinde doyma yükü q_{∞} alan şiddetiyle ve parçacığın yüzey alanıyla doğru orantılıdır.

İyon difüzyon yüklemesinde, iyonların ısı hareketleri, gazların yayılmasına sebep olur. Parçacıkların yüklenmesi elektrik alanına bağlı olmaksızın çarpışma ile olur. Bu, parçacıkların boyutlarına, gazın özelliklerine, gaz sıcaklığına ve yükleme için geçen süreye bağlıdır. İyon difüzyonu, çapı 0,2 mikrondan daha küçük parçacıklar

için önemlidir. Bu boyuttaki tozlar, küçük bir oranda olduğundan filtre hesapları, bombardıman yüklemesi yöntemine dayandırılır. İyon bombardımanında, toz parçacıkları çarpma yolu ile iyonların yüklerini alırlar. Burada parçacık üzerinde yük, sınır bir değere erişene kadar artar [12]. İyon difüzyonu aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$q_d(t) = q^* \ell n(1 + t / \tau^*) \quad (2.10)$$

$$q^* = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p \cdot k \cdot T}{e} \quad (2.11)$$

ve

$$\tau^* = \frac{8\epsilon_0 \cdot k \cdot T}{d_p \cdot C_i \cdot n_i \cdot e^2} \quad (2.12)$$

Yine aynı terim şu şekilde gösterilebilir.

$$= 8\epsilon_0 \left(\frac{m_i \cdot k \cdot T}{3} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu_i \cdot E}{d_p \cdot J \cdot e} \right) \quad (2.13)$$

Burada, q^* yük sabitini (C), τ^* difüzyon yükünün zaman sabitini, k Boltzman sabitini ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K, T sıcaklığı (K), e elektronların yükünü ($1,6 \times 10^{-19}$ C) (C), C_i iyonun ısı hızını (m/s), n_i boşluktaki iyonların yoğunluğunu (m^{-3}), m_i iyon kütesini (kg), μ_i iyon hareketliliğini ($V.m/s^2$) temsil etmektedir [11]. Difüzyon yükünde doyma yükü yoktur. Difüzyon yükü parçacık çapıyla orantılı, bombardıman yükü ise parçacık çapının karesiyle orantılıdır. Bir parçacıkta iyi bir toplam yük elde etmek için bu iki yükleme mekanizmasından da yararlanılmalıdır.

Etkin parçacık yükleme, korona ile en fazla sayıda iyon üretilmesine ve bu iyonların parçacıkları etkin bir şekilde yüklemesine bağlıdır. Bir parçacık tarafından taşınan maksimum yük, parçacığın yüzey alanı ve yükleme alan şiddetiyle doğru orantılıdır. Yüklemin zamana göre değişimi, yük sayısı ile azalır. Yükleme hızı, sıcaklıkla arttığından iyon difüzyonunun yüksek sıcaklıklı gazlarda daha etkili olduğu görülür [12]. Parçacığın teorik yükü difüzyon yüklemesi ve iyon bombardımanı yüklemesi değerlerinin toplamı olmakla beraber uygulamada korona sönümlenmesi, düzensiz akım dağılımı, geri korona ve toz dirençleri bu değere ulaşılmasını engeller.

2.6 Göç Hızı

Elektriksel olarak yüklenmiş parçacıklar, elektrik alan içinde bir kuvvete maruz kalarak toplama elektroduna doğru göç hızıyla ilerler. Elektrik alan içinde asılı duran parçacık üzerine etkiyen Coulomb kuvveti aşağıdaki formülde verilmiştir.

$$F = q.E \quad (2.14)$$

Burada F Coulomb kuvvetini (N), q parçacık yükünü (C) ve E elektrik alanını (V/m) temsil etmektedir. Hareketli parçacıktaki viskoz (birim zaman ve birim alana uygulanan) kuvvet aşağıdaki formülde verilmiştir.

$$F_s = \frac{3\pi.\mu.d_p.w_c}{C_m} \quad (2.15)$$

Parçacıklar toplama elektroduna doğru w_e hızıyla hareket eder.

$$w_e = \frac{q.E.C_m}{3\pi.\mu.d_p} \quad (2.16)$$

$$C_m = 1 + 2,54 \left(\frac{\lambda}{d_p} \right) + 0,8 \left(\frac{\lambda}{d_p} \right) \cdot \exp \left(\frac{-0,55 d_p}{\lambda} \right) \quad (2.17)$$

ve

$$\lambda = 6,61.10^{-8} \left(\frac{T}{293} \right) \left(\frac{101,3.10^3}{P} \right) \quad (2.18)$$

Burada w_e göç hızını (m/s), μ viskoziteyi (Pa.s), d_p parçacık çapını (m), C_m Cunningham düzeltme faktörünü, λ gaz molekülünün ortalama serbest yolunu (m), T sıcaklığı (K) ve P basıncı (Pa) temsil etmektedir. Atmosferik basınçta ve oda sıcaklığında (300 K) $\lambda = 0,07 \mu\text{m}$ 'dir. C_m düzeltme faktörünün, viskoziteden dolayı $1 \mu\text{m}$ 'ye eşit ve küçük olan parçacıklarda kullanılması gereklidir. Alan yükü uygunabilir olduğunda göç hızı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$w_e = \frac{q.E}{3\pi.\mu.d_p} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{\mu(\epsilon_s + 2)} d_p . E^2 \quad (2.19)$$

Burada görüldüğü gibi göç hızı parçacık çapı (d_p) ile doğru orantılı ve elektrik alan şiddetinin karesi (E^2) ile orantılıdır [11].

2.7 Toplama Verimi

Deutch [23] tarafından elektrostatik filtre için toplama verimi şu şekilde verilmiştir.

$$\eta = 1 - \exp(-w_e f) = 1 - \exp\left(\frac{-w_e \cdot A}{Q}\right) \quad (2.20)$$

Burada $f = A/Q$ özgül toplama alanını (s/m), A toplama elektrot alanını (m^2) ve Q gaz akış oranını (m^3/s) temsil etmektedir. Gerçekte, toplama verimi, elektrot geometrisi, toz parçacığının karakteristikleri gibi birçok faktörden etkilenir. Teorik toplama verimini düzeltmek için pek çok rapor bulunmaktadır. Bunun bir örneği olarak aşağıdaki formül gösterilebilir.

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-w_e \cdot L \cdot K}{v_0 \cdot b}\right) \quad (2.21)$$

Burada L gaz akışı boyunca toplama elektrotu uzunluğunu (m), v_0 gaz hızını (m/s), b korona ve toplama elektrodu arasındaki ayrımı (m) ve K gerçek ölçümlere göre hesaplanmış düzeltme faktörünü temsil etmektedir [11].

Tel-levha tipinde elektrostatik filtreler için geometrik yapının doğrusal olmayışından dolayı tam çözümler mümkün olmamakta, modelleme yapılabilmesi için uzay yükü ve elektrik alanı dağılımında basitleştirme yapılmaktadır.

2.8 Yapısal Özellikler

Elektrostatik filtreleme işleminde; gaz içindeki parçacıkları, elektriksel olarak yüklemek (veya transfer etmek) için yüksek doğru gerilim kullanılır. Boşlukta, korona ve toplama elektrotları arasında elektrik alan oluşturulmasıyla, negatif yüklenmiş iyon ve parçacıklar toplama elektrotuna doğru itilir ve silkeleme (çekileme) sistemiyle (ıslak toplayıcılarda su fışkırtma ile) toplanmış parçacıkların sistemden ayırımı yapılır [24].

Elektrostatik filtreleme işlemi ek olarak diğer bölümlerden meydana gelir. Yüksek gerilim transformatörü (besleme gerilimini yükseltmek için) ve doğrultucu (alternatif

gerilimi doğru gerilime çevirmek için) elektrostatik filtrenin güç girişini sağlamak için kullanılır. Filtreleme bölümü metal, kiremit ya da fiberglas (cam elyaf) destekli plastik kaplamaya sahiptir. Askıdaki toplama elektrotları (çoğunlukla plakalar) destekleyici yapının çelik iskeletiyle toprağa bağlıdır [24]. Korona elektrotlarının yapısı, geometrik şekli ve elektrotlarla olan uzaklığı, minimum korona başlangıç gerilimini etkilemektedir.

Toplama elektrotları arasında asılı duran korona elektrotu, topraktan yalıtılır ve negatif kutuplu 20-100 kV arasındaki doğru gerilim uygulanır. Parçacıklar elektrostatik filtre içinde toplanmadan (yapışmadan) ya da ikinci defa toplanmadan önce bir miktar yol kat edebilir. Bazı parçacıklar toplandıktan hemen sonra yüklerini hızlıca yitirirler ve gaz akışında tekrar işleme maruz kalırlar.

Filtreleme işleminin son bölümünde, toplanan parçacıkları, toplama elektrotundan ayırmak gerekir. Kuru elektrostatik filtrelerde bu ayırma işlemi, korona ve toplama elektrotlarına, selenoid, basınçlı hava, mekanik olarak sıralı çekiçler veya vibratörlerle periyodik olarak vuruşlar yapılarak gerçekleştirilir [24]. Korona elektrotlarında da toz birikimi olmaktadır. Bu yüzden korona elektrotlarında da silkeleme sistemleri mevcuttur.

Silkeleme sonucu elektrostatik filtre elektrotlarından dökülen parçacıklar haznelere toplanır, biriktirilir veya atılır. Islak elektrostatik filtrelerde parçacıklar ara ara veya sürekli akan su veya başka iletim sıvılarıyla toplama elektrotundan aşağıya haznelere doğru akar. Filtre altındaki hazneler Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7 : Elektrostatik filtre altındaki toplama hazneleri.

Elektrostatik filtrede gerekli toplama alanı hesaplandıktan sonra en başta gelen yapısal parametre filtre uzunluğudur. Bu korona elektrodu sayısına göre oluşturulur. Elektrostatik filtre üreticileri, toplama elektrotu (plaka) alanını farklı türden tozlarda elde edilen deneyimlerle, filtre içindeki hız dağılımı ve plaka tipine göre belirler. Plaka yüksekliği seçiminde, gerekli işlem hızı ve uygun en boy oranı ve yapısal denge ve genel tasarım ölçütlerine bakılmalıdır. Korona elektrotunun toplam sayısı, elektrostatik filtredeki gözlerin uzunluğunu belirler. Gaz akışına karşı mekanik paralel bölmeleme, elektrostatik filtreyi gözlerle ayırmakta ve her birisi diğerinden ayırabilmektedir. Mekanik seri bölünme, gaz akışında elektrostatik filtreyi alanlara ayırmaktadır. Elektrostatik filtre iskeleti ve kaplaması gaz ve hava sızdırmazlıdır.

Elektrostatik filtrede, giriş çıkış bağlantıları, yapı iskeleti, hazneler, inceleme kapakları ve yalıtkan gövde ana kısımları oluşturmaktadır. İnsan sağlığını korumak amacıyla yüksek gerilim bulunan kısımları kapsayan yapı iskeleti ve yalıtkan gövde çelik iskeletle tamamen toprağa bağlanmıştır. Elektrostatik filtre altındaki hazneler, tutulmuş toz parçacıklarını toplayan, genellikle piramit şeklinde olan bölümlerdir [24]. Haznelerde ve bölmelerde bulunan inceleme kapakları Şekil 2.8’de görülmektedir. Bu kapaklardan gerekli kontroller ya da bakım, değişim gibi işlemler yapılabilir. Ayrıca elektrostatik filtre üzerinde, yine aynı amaçla kullanılmak üzere giriş kapakları bulunmaktadır.



(a)



(b)



(c)

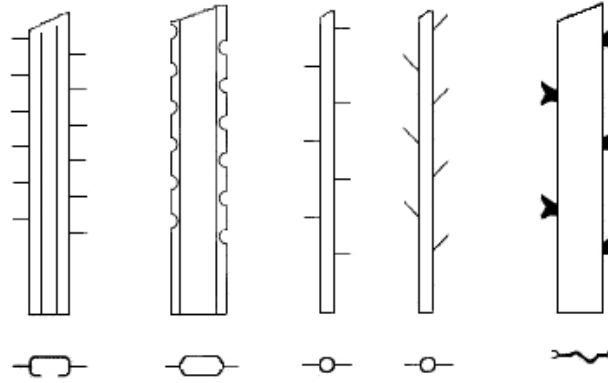
Şekil 2.8 : İnceleme kapakları (a) bölme kapakları (b) toplama hazne kapakları (c) filtre üstü kapaklar.

Yükli halde bulunan toz parçacıklarının yapıştığı toplama elektrotlarında, silkeleme veya çekiçlemeden etkilenmemesi için destekleyiciler sağlam yapıda olmalıdır. Tüm elektrostatik filtre yapısında vibrasyon ve çekiçleme olacağından kaynak bölgelerinin iyi montaj edilmesi gerekir. Eğer elektrostatik filtre uygun şekilde montajlanmış ise toplama elektrotları (plakalar) işletme koşullarında bakım gerektirmez. Plakaların değişim ve bakımı zaman alıcı ve pahalı bir görevdir. Montaj aşamasında plakaların uygun bir şekilde montaja hazırlanması gerekir. Birçok plaka hasarı, montaja hazırlanırken meydana gelmektedir [24]. Yapılan deneylerde, toplama alanının yüksek olmasının, elektrostatik filtre verimini olumlu şekilde etkilediği görülmüştür [26].

Metal yapıda olan korona elektrotlarının biçimleri gaz akışına göre belirlenmektedir. Korona elektrotları silindir, kare, iğneli gibi farklı geometrik şekillerde veya şekil verilmiş şerit olarak farklı tiplerde olabilmektedir [24].

Sivri kısımlarda korona daha küçük gerilim değerlerinde oluşabilmekte bu yüzden korona elektrotları sivri kısımlara sahip olabilmektedir. Korona elektrotunun şekli akım-gerilim karakteristiğini oluşturur, küçük tel veya sivri yüzeyli olanlar verilen gerilimde daha yüksek akım değerine sahiptir. Korona elektrotları farklı şekillerde monte edilmektedir. Korona elektrotları, ağırlıklara bağlı olarak veya her iki ucu metal çerçeveye sabit olarak montaj edilebilmektedir [24].

Herhangi bir elektrostatik filtrenin performansı, korona ve toplama elektrotu arasında elektrik alanının maksimum olmasına bağlıdır. Sistemin mekanik bütünlüğünde bir hasar ve değişiklik olması toplama veriminde önemli bir düşüşe neden olacaktır. Eski elektrostatik fitrelerde sözü edilen büyük problemleri (gerilmiş formdaki telin kopmasını) önlemek için, korona elektrotunu kesiti daha büyük, sabit ve katı şekilde birleştirmeye yönelinmiştir (Şekil 2.9). Böylece korona elektrotlarında daha iyi çekiçleme ve daha yüksek kararlılık sağlanır [25].



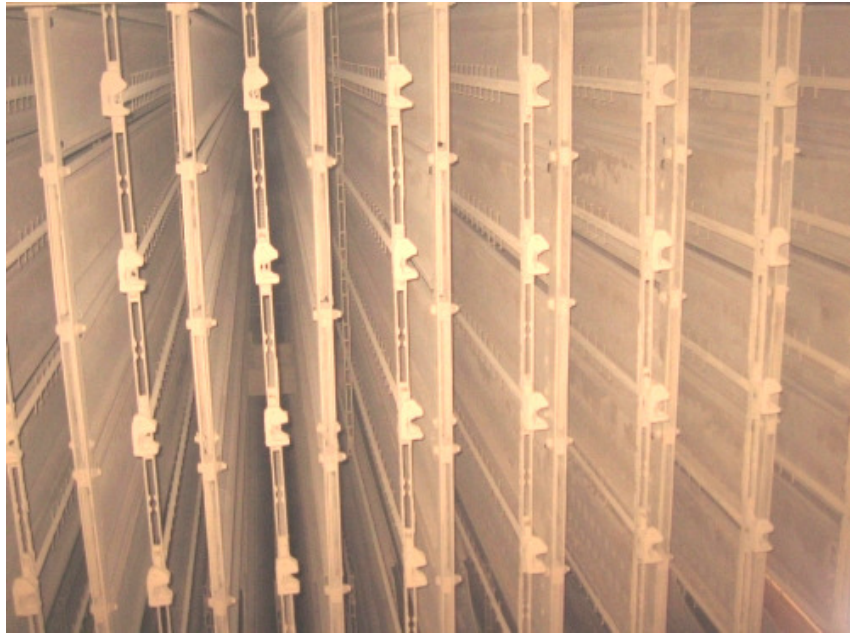
Şekil 2.9 : Korona elektrot tipleri [25].

İki ucu sabit sistemin ağırlıklı sisteme göre avantajı, tel kırılma ve toplama elektrotlarına değerek kısa devre olma olasılığının daha az olmasıdır. Ağırlıklı korona elektrotlarının gaz akışından sallanmasının engellenmesi ve sabit olması gereklidir. Ağırlıklı sistem ve sabit çerçeve sisteminin uygun şekilde tasarımı ile her ikisinde de üstün toz toplama kapasitesi oluşmaktadır. Ağırlıklı korona elektrotu sisteminin kurulum maliyeti az olmakta fakat tel kırılmasından dolayı yüksek bakım maliyeti bu değeri genellikle dengelemektedir. İki ucu sabit korona elektrot sisteminde ise yüksek kurulum maliyeti bakım maliyetiyle dengelenmektedir. Genellikle iki ucu sabit tipteki korona elektrotu, toplama elektrotuna olan daha geniş ve sabit alan sayesinde daha yüksek gerilimde daha düşük akım yoğunluğunda çalışmaktadır. Bu tür bir çalışma yüksek dirençli tozlarda daha iyi bir akım gerilim

karakteristiği sağlayabilmektedir. Transformatör-doğrultucu özellikleri elektrostatik filtre yüküne uygun olmalıdır ve otomatik atlama kontrolü ile gerilim, atlama seviyesine yakın olmalıdır [24]. Filtre kapasitesine göre elektrot sayıları değişmektedir. Korona ve toplama elektrotlarının elektrostatik filtre üstünden görünümü Şekil 2.10’da, elektrostatik filtrenin altındaki hazne bölümünden görünüşü ise Şekil 2.11’de bulunmaktadır.



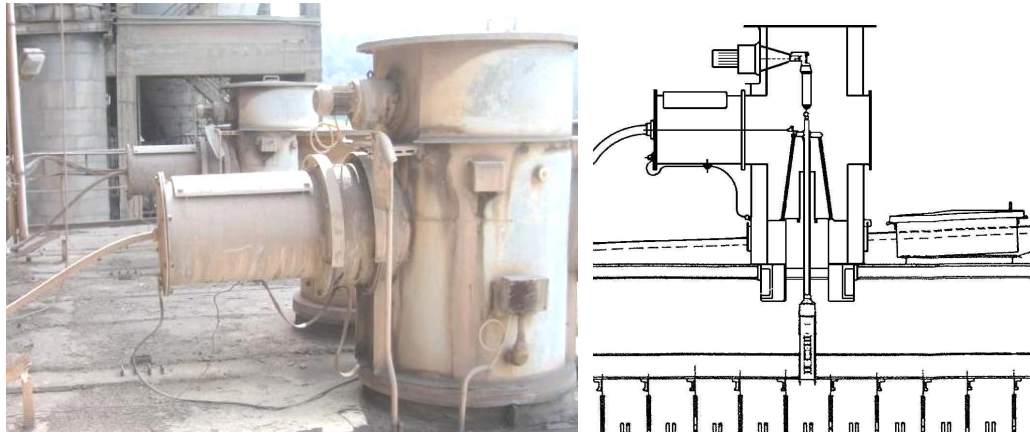
Şekil 2.10 : Korona ve toplama elektrotlarının üstten görünüşü.



Şekil 2.11 : Korona ve toplama elektrotlarının alttan görünüşü.

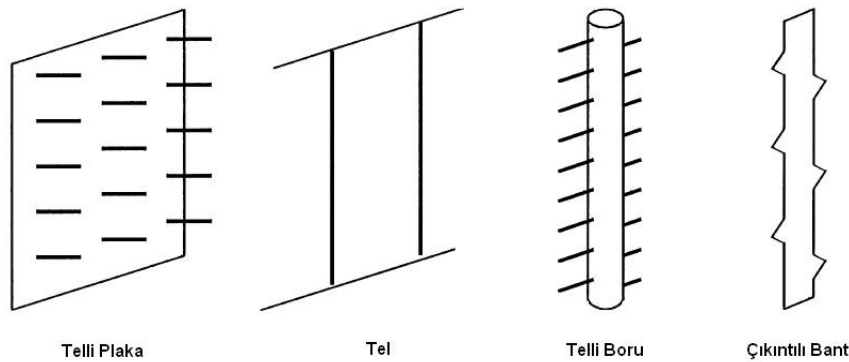
Tasarım aşamasında, korona elektrotlarında, güvenilirlik ölçütü, dayanıklı tasarım, özel uygulama şekilleri ve akım-gerilim karakteristikleri, toplama elektrotlarında ise verimli temizleme sistemi ve kolay kurulum ön plandadır [26].

Elektrostatik filtrede, korona elektrotunu yüksek gerilimle beslemek amacıyla kullanılan boru şeklinde kanallar mevcuttur. Transformatör doğrultucu sisteminden gelen yüksek gerilim, bu bölüm üzerinden korona elektrotunu beslemektedir. Burada, ilerde söz edilecek olan korona elektrotunun çekiçleme sisteminin tahrik motoru da bulunmaktadır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 : Korona elektrotu yüksek gerilim bağlantı bölümü ve teknik resimi.

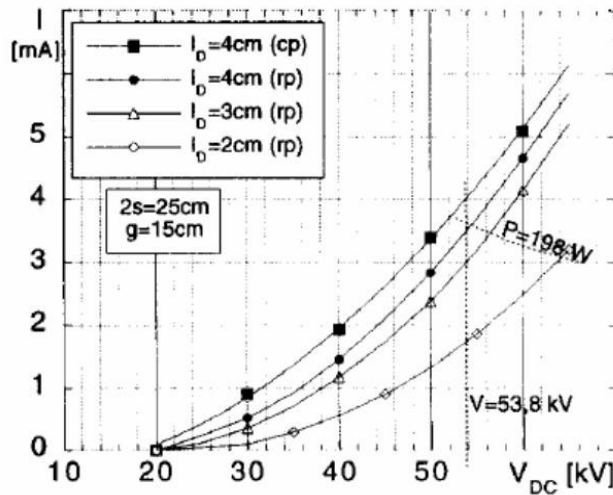
Bir elektrostatik filtrenin verimi, büyük ölçüde korona elektrotunun geometrik yapısına bağlıdır. Değişik geometrik yapıdaki korona elektrotlarını karşılaştırmada, göç hızı kullanılarak gerçeğe yakın bir araştırma yapılmıştır. 20-35 kV seviyelerinde farklı gerilim ve 20-120 μm boyutları aralığındaki farklı parçacıklar kullanılarak şekildeki elektrot tiplerinin etkinliği göç hızına bakılarak gözlenmiştir. Şekil 2.13’de göç hızı bakımından incelenen elektrot tipleri görülmektedir.



Şekil 2.13 : Göç hızı bakımından incelenen elektrot tipleri [27].

Elektrostatik filtre modelini kullanarak, farklı korona elektrotlarının göç hızında etkisi araştırmasının sonucunda, katı parçacıkların toplama elektrotuna doğru taşınması bakımından, üzerinde tel bulunan boru şeklindeki elektrot tipinin en etkin ve kullanışlı elektrot olduğu ortaya çıkmaktadır [27].

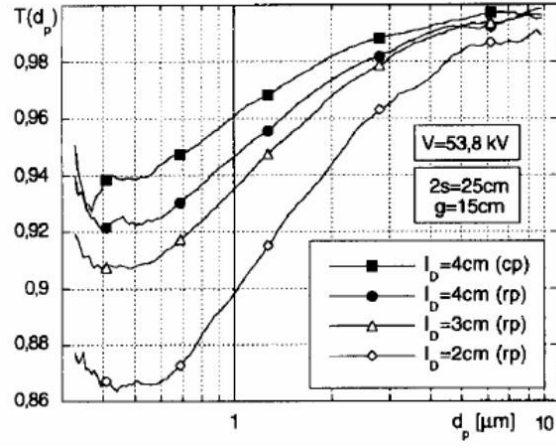
Elektrostatik filtrelerin temel ilkesi basit olmasına rağmen, toplam süreç, birçok etkileyici nicelikler, etkileşimler ve karşılıklı bağlantılar ile karmaşılaşmaktadır. Parçacık toplama verimliliği tam olarak filtredeki seçilmiş akım gerilim eğrisinde elektriksel işlem parametreleriyle hesaplanır. Tozlu gazın, sabit sıcaklık, sabit basınç ve sabit kimyasal özelliklerde olduğu varsayılırsa, akım gerilim eğrisi tamamen korona ve toplama elektrotlarının tasarım ve sırasına bağlıdır. İnce toz toplamada, korona elektrotu üzerinde bulunan iğnelerin (tel çıkıntıların) uzunluğu ve aralarındaki uzaklık incelenmiştir. Optimum elektrot şeklini bulmak için, farklı geometrik ve elektriksel parametre ayarları için çok sayıda verimlilik ölçümleri yapılmıştır. Deneyde gaz sıcaklığı 30°C derece tutulmuş ve sıcaklık bilgisayar tarafından kontrol edilmiş ve çiğlenme noktası 15°C olarak sabitlenmiştir. Deney sırasında, yüksek dirençli, ortalama 6 µm çapında kireçtaşı gaza eklenmiştir. Bütün deneyler negatif doğru gerilimde gerçekleştirilmiştir. İğne uzunluğunun etkisini incelemek için korona elektrotlarındaki 2 cm, 3 cm ve 4 cm uzunluğunda (I_D) teller elektrostatik filtre laboratuvarında birleştirilmiştir [28]. Burada cp eğimli profili temsil etmektedir.



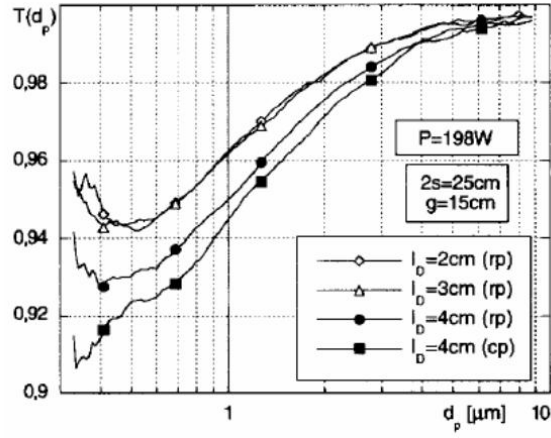
Şekil 2.14 : Korona elektrotundaki farklı iğne uzunluklarında akım-gerilim eğrisi [28].

Şekil 2.14'te oluşturulan eğri için tel genişliği $2s = 25$ cm, elektrot açıklığı 15 cm'dir [28]. Şekil 2.14'te umulduğu gibi uzun iğnenin akımı, kısa olanlara göre önemli ölçüde yüksektir.

Oransal verimlilik ölçümleri, 53,8 kV sabit gerilim ve 198 W sabit elektrik gücünde yapılmıştır. İlk olarak en iyi elektrostatik filtre performansı uzun iğneler ile elde edilmiştir. Bu ayarlarla aynı elektrik alan şiddetinde daha yüksek akımlar elde etmiştir. Sabit elektrik gücünde, kısa iğneler daha avantajlıdır. Bu durumda, yüksek işlem gerilimiyle yüksek elektrik alan, düşük akımlarla sonuçlanan düşük parçacık yükleme ile dengelenir. Bu davranışı anlamak için, mikron ve mikrondan küçük boyut aralığındaki parçacıkların tercihen ortalama difüzyon yüklemesiyle yüklendiği hesaba katılır. Basit olarak, bu yükleme mekanizması, parçacık yüklemesinin sadece yükleme yoğunluğuyla logaritmik olarak artmasıyla etkir. Öte yandan, alan kuvvetleri, elektrik alan ile doğrusal olarak artar [28]. Alttaki grafiklerde cp eğimli profil, rp yuvarlak profili temsil etmektedir (Şekil 2.15).



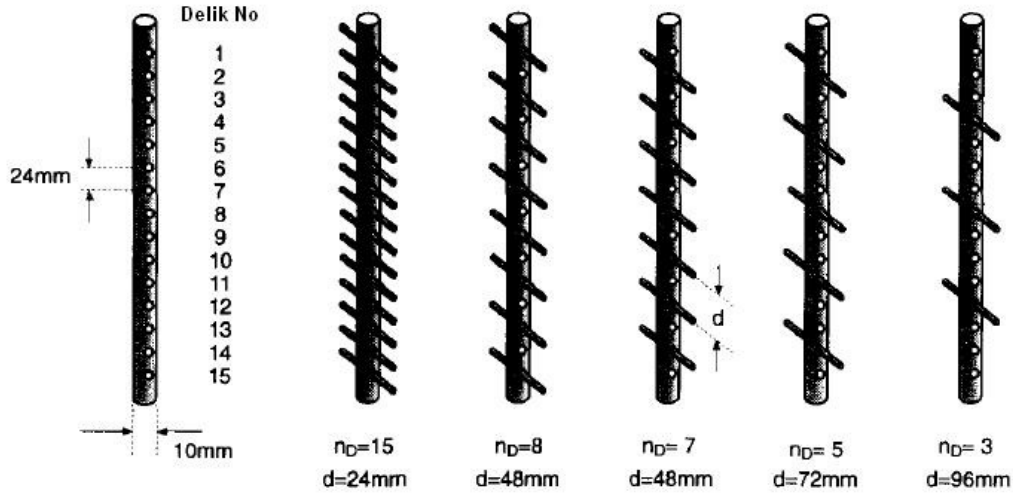
(a)



(b)

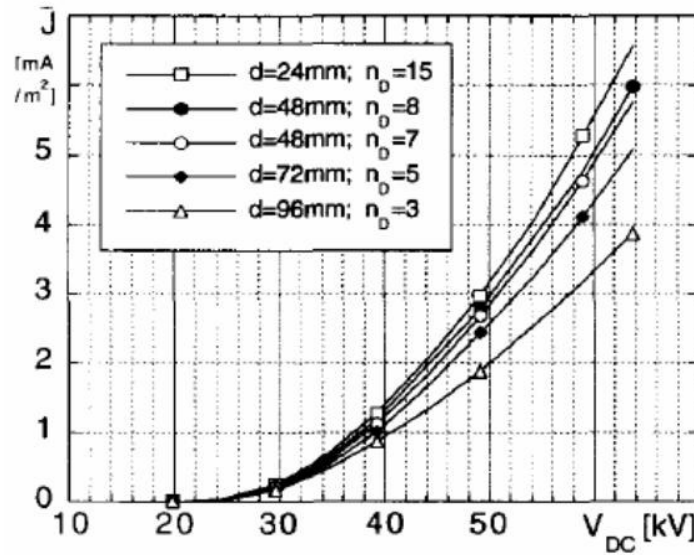
Şekil 2.15 : Farklı iğne uzunluğu için oransal verimlilikler
(a) sabit gerilim (b) sabit güç [28].

Her korona elektrotu üzerinde iğne sayısı artışı, toplam filtre akımında artışa neden olur. Farklı geometrik yapıdaki korona elektrotları yapıları Şekil 2.16'da görülmektedir.



Şekil 2.16 : Korona elektrotlarındaki farklı geometrik yapılar [28].

Her elektrottaki iğne sayısı artışı, toplam filtre akımının artmasına neden olur. Korona elektrotunda, örnek olarak 15 iğneli ve 3 iğneli sıralama karşılaştırıldığında, akım yoğunluğu bakımından, 15 iğneli sıralama, 3 iğneliye kıyasla %50'si kadar daha fazla değer sağlar. Bununla beraber, iğne yüzeyindeki alan kuvvetini azaltan elektrik alanının düzgünlüğünden dolayı akım artışı, kısa iğne uzunlukları ile yavaşlar. Bu etki, toplam akım ve toplam iğne sayısı ile, her iğnenin ortalama akımı hesaplanarak gösterilebilir. Toplam akım, korona elektrotundaki iğne sayısı artışıyla artarken, her iğnedeki ortalama akım önemli ölçüde azalır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 : Farklı iğne mesafelerinde akım-gerilim karakteristiği [28].

Sonuçlar, filtrenin minimum parçacık büyüklük aralığında, korona elektrotundaki iğnelerin uygun olarak yerleştirilmesiyle ince tozların tutulma verimliliğinde iyileştirme olduğunu göstermiştir. Optimum toz performansı, iğne aralarındaki küçük mesafe ve korona elektrotları arasındaki küçük açıklık olmasıyla elde edilmektedir.

Burada tüm yapılardan, yüksek akım akmaz. Genelde iğne ve korona elektrotlarında akımlar düşüktür. Böylece, optimum geometrik ayarlar, toplama elektrotlarında, düşük akım genliklerinde düzenli akım yoğunluğu dağılımlarına yol açar. Halbuki, bu araştırmada yalnızca elektrostatik filtrenin geometrik parametrelerinin etkisine odaklanılmıştır, fakat bilerek geçersiz kılınan geri korona olgusu ya da çekiçlemeden dolayı yeniden işleme durumu, ölçümler sırasında gözlenmiştir [28].

Elektrostatik filtrenin verimi açısından, tozlu gazın akış yönünde filtre içindeki dağılımı çok önemlidir. Yüksek performans için, tozlu gazın eşit ve uygun şekilde dağıtılması, filtre içinde belli bölgelerde daha yoğun olmasının ya da buralarda birikmesinin engellenmesi gerekmektedir. Elektrostatik filtre girişlerinde, gaz dağılımını uygun olarak gerçekleştirmek için, filtre girişlerinde orantılı deliklere sahip plakalar akış yönüne dik olarak inşa edilmektedir. Elektrostatik filtrede optimum filtre performansı için uygun gaz akış dağılımı kritik bir değerdir. Döner vanalar, dağıtıcılar, set ve delikli plakalar gibi düzenler gaz akışının dağılımını sürdürür ve geliştirir. Şekil 2.18’de elektrostatik filtre girişindeki eşit boyutta deliklere sahip olan ve gaz akışına uygun plaka görülmektedir.



Şekil 2.18 : Elektrostatik filtre girişindeki delikli plaka.

Elektrostatik filtrenin yapısındaki yalıtkan kısımlar ve gövde, büyük mekanik yük ve darbelere ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmalıdır. Çalışma koşullarında yüksek

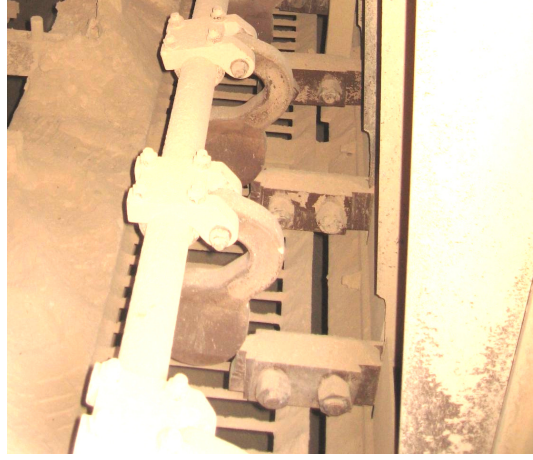
elektriksel dayanım göstermeli, sıcaklık arttıkça elektriksel ve mekanik zorlanmalardan dolayı güçlük çıkarmamalıdır. Ayrıca tutucu mesnetlerin, tozların geçişini engellemeyecek kalınlıklarda olması gereklidir [19].

Silkeleme sistemleri ağırlıklı ve her iki ucu sabit sistemlerdeki kullanımlarına göre kategorilere ayrılır. Silkeleme boyutu ve silkeleme frekansı üreticiye ve tozun özelliklerine göre değişir. Silkelemenin optimum frekans ve yoğunlukta olması için elektriksel kontrol kullanılarak silkemeler farklı gruplara ayrılabilir ve bağımsız olarak düzenlenebilir. Ayrıca, kontrol sistemi el durumunda düzenlenebilir böylece tozun toplama elektrotundan yeterli olarak dökülmesi sağlanabilir ve aynı zamanda bacadan istenmeyen ani toz çıkışı engellenebilir. İki ucu sabit olan korona elektrotu sistemi genel olarak mekanik çekiçlemelere sahiptir. Her kısım, mil üzerine bağlı çekiçler ile silkenir. Düşük hızlı bir motor, çekiçleme miline bağlantı grupları ile bağlıdır. Çekiçleme sertliği çekiç ağırlığına göre, çekiçleme frekansı ise milin dönüşüne göre düzenlenir [24].

Şekil 2.19’da görüldüğü gibi, çekiçler mil döndükçe ağırlıkları nedeniyle aniden aşağıya düşüp toplama elektrotlarına vurmaktadır. Çekiçler farklı açılarla mile monte edilmiştir. Böylece çekiçlerin aynı anda plakalarda silkeleme yapması engellenir ve farklı zaman aralıklarında yapılan çekiçleme ile ani toz oluşumları engellenir. Bu sağlanarak bacadan çıkan tozun ani artışı engellenmiş olur. Şekil 2.20’de çekiçlerin vuruş yaptığı kısım görülmektedir. Silkeleme darbelerinin sıklığı plakalarda toplanan tozun miktarı ile ilgiliyken, darbelerin şiddeti filtredeki gaz hızına ve toz parçacıklarının yapışma özelliklerine bağlıdır. Darbeler toplama elektrotlarına alttan uygulanır. Toplama elektrotu çekiçleme sistemi, redüktörlü bir elektrik motoru yardımıyla düşük devirde, kontrol sisteminde belirlenmiş süreye göre çalışmaktadır. Plaka çekiçleme sistemini tahrik eden redüktörlü motor Şekil 2.21’de görülmektedir.



Şekil 2.19 : Mekanik çekişleme sistemi.

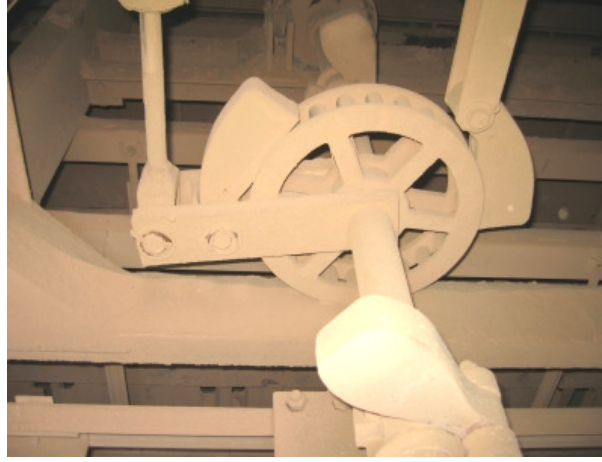


Şekil 2.20 : Çekişlemelerin plakalara vuruşu.



Şekil 2.21 : Toplama elektrotu çekişleme tahrik motorları.

Elektrostatik filtrede, toplama elektrotlarında olduğu gibi korona elektrotlarına da pozitif yüklü toz parçacıkları yapışabilmektedir. Korona elektrotunun girintilerine ve yüzeyine toz yapışması, toplama verimliliğini büyük ölçüde etkiler ve korona oluşumu için uygun değildir. Bunu için korona elektrotlarının da silkeleme sistemine sahip olması gerekir. Şekil 2.22’de korona elektrotlarının çekikleme sistemi görülmektedir. Silkeleme işlemi, fitrenin üst tarafında bulunan ve korona elektrotlarının sabitlendiğı beşiğe, yine çekik darbelerinin vurulmasıyla oluşturulur (Şekil 2.23).



Şekil 2.22 : Korona elektrotu çekikleme sisteminin tahrik bölümü.



Şekil 2.23 : Korona elektrotu çekikleme sistemi.

Elektrostatik filtreden parçacık ayırma sistemlerindeki inşa malzemesinin seçimi çok önemlidir. Geniş boyutlu sistemlerde, toplanmış olan toz parçacıkları, elektrostatik filtreden basınç veya vakum sistemleri ile ayrılabilir. Küçük sanayi uygulamalarında ise helezon bu amaç için kullanılabilir. Toz ayırma sisteminde, toz ve toz ayırma havasının kimyasal bileşikleri değişik sıcaklık noktalarında tanımlanmış olmalıdır.

Elektrostatik filtre altındaki haznelerden toz ayrımını yapan helezon sistemi Şekil 2.24'te görülmektedir [24].



Şekil 2.24 : Elektrostatik filtre altı helezon sistemi.

Sıcaklık ve toz yükü dağılımları elektrostatik filtre veriminde önemlidir. Bazı uygulamalarda filtre içinden geçen gazın sıcaklığı sabit kabul edilse de bu doğru değildir. Elektrostatik filtrenin elektriksel karakteristikleri üzerinde gaz sıcaklığının etkisi, toz dağılım modeli gibi tasarım açısından önemlidir [24].

Elektrostatik filtrelerin iç kısımlarında, gerekli bakım ve kontrol çalışmalarının yapılması için bazı ek düzenekler gereklidir. Güvenli ve uygun erişim düzenekleri (yürüyüş yolu, giriş kapakları vb.), enerjinin kesik olduğu durumda, elektrostatik filtreye giriş, bakım servisi ve yardımcı donanım için kullanılır [24]. Korona ve toplama elektrotlarına ve içteki filtre bölümlerinin ayırım plakalarına, enerji kesik durumda temizleme amaçlı ulaşmak önemlidir. Bunun için uygun bölümlerde ulaşım kapağı, yürüme yolu, merdiven, parmaklıklar gerekir. Hazne ulaşım kapakları, hazne içindeki merdivenler ve bakım personelinin korona elektrotunun alt kısmına merdivenle ulaşılmasını sağlamak için yeterince geniş olmalıdır. Elektrostatik filtre içinde bakım yapılmadan önce iletken kısmın topraklanması ve toprağın iletken kısımla sürekli temas halinde olması gerekir. Topraklama değerlerinin de yasal sınırlar içinde olması, değilse gerekli düzeltmelerin yapılması gereklidir.

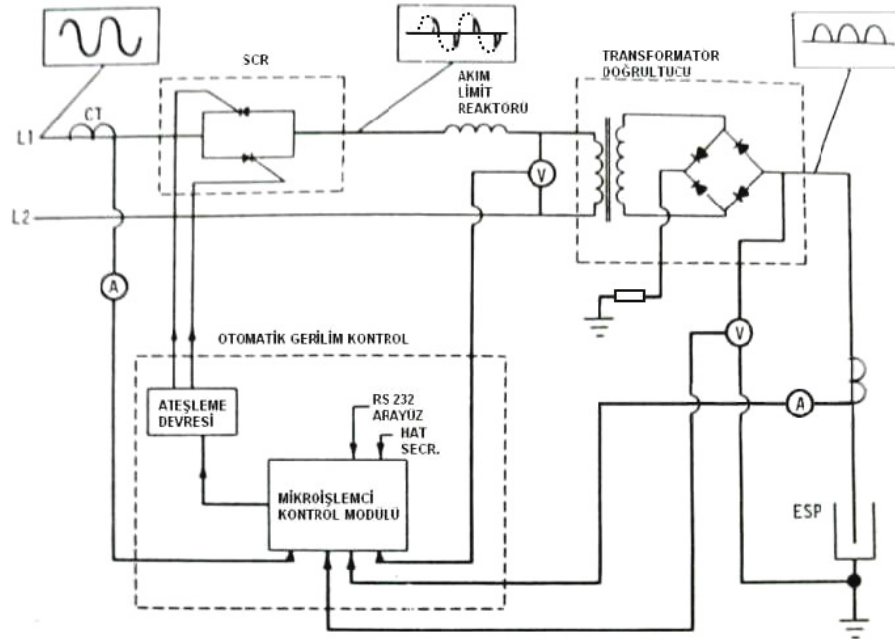
Bir elektrostatik filtrenin yapımı aşamasında, genellikle, çerçeve ve hazneler ilk önce, toplama ve korona elektrotları sonrasında montaj edilir. Elektrostatik filtrenin inşa aşamasında iyi bir kalite kontrol ve inceleme yapılmalıdır. Filtre çerçevesinin doğru şekilde montaj edilmemesi durumunda kurulum aşamasında hatayı düzeltmek

için dengeleyici bazı girişimler, korona ve toplama elektrotlarının zayıf bir şekilde sıralanmasıyla sonuçlanabilir [24]. Bu düzenekler dışında filtre üzerindeki besleme kanalları ve inceleme kapaklarına ulaşmak için merdiven platformu oluşturulmalıdır.

2.9 Güç Besleme Sistemi

Elektrostatik filtre güç beslemesi dört kısımdan oluşur. Bunlar yükseltici transformatör, bir yüksek gerilim doğrultucusu, bir kontrol elemanı ve kontrol sistem sensörüdür. Sistem, korona ve toplama elektrotu arasında atlamaya neden olmayacak en yüksek gerilim seviyesini sağlamak için tasarlanır. Transformatör ve doğrultucu (T-R), düşük alternatif gerilimin, elektrostatik filtreyi enerjilendirmek için uygun yüksek doğru gerilime dönüşümünü sağlar.

Dielektrik sıvıyla dolu tank içinde radyo frekans şok bobini bulunmaktadır. Radyo frekanslı şok bobini, elektrostatik filtredeki silikonlu diyot doğrultucusunun hasara uğramasından dolayı yüksek frekanslı geçici ani gerilim yükselmesini engellemek için tasarlanmışlardır. Otomatik kontrol sistemi, tozun yoğunluğu ve karakteristiğindeki değişikliklere cevap verecek şekilde en uygun gerilim ve akım değerlerini elde etmek için tasarlanmıştır. Şekil 2.25'te, otomatik gerilim kontrol sisteminin elemanları görülmektedir.



Şekil 2.25 : Elektrostatik filtrede otomatik kontrol sisteminin elemanları [24].

Transformatör ve doğrultucu seti, elektrostatik filtre yüküne uymalıdır. Elektrostatik filtre, nominal yükün %70-100 oranında çalıştığı durumda, maksimum devamlı yük geriliminde, koronayı azaltan atlama ve geçici gerilim bozulmalarında en iyi çalışmayı gerçekleştirecektir. Farklı uygulamalarda, gaz sıcaklık ve basıncının geniş değer aralığında, ortalama korona akım yoğunluğu 108-753 mA/1000 m² toplama alanı değerlerinde, pratik işlem gerilimi aralığı 15-80 kV değerlerindedir.

Daha küçük elektriksel bölümler, elektrot dizilimindeki etkileri bölgesel hale getirir ve geri kalan bölümlerde yüksek gerilim kullanımına izin verir. Genel olarak akım oranları girişten çıkışa doğru artar (3-5 kat değerinde olabilir).

Genel olarak, markalı transformatör ve doğrultucular nadiren arıza verir. Problem genel olarak kalite kontrolle ilişkilidir; kusurlu parçalar; uygunsuz sarım pişirme ve vakum tekniklerinden dolayı yağda nem; metal parçalar; pas; tank içinde ince tabakalar halinde dökülmeler; soğutma sıvılarının katı yalıtım malzemeleriyle uyuşmaması; yağın fazla doldurulması ve genişleme alanının yetersiz olması; transformatör sarımlarında ve diğer kısımlarda zayıf mekaniksel bağlantı ve montaj; yetersiz boşluk ve elektriksel alan yoğunluk noktasından dolayı iç atlama olması; taşınmada ve kurulumda dikkatsiz kullanımlar probleme neden olabilmektedir. Silikon kontrollü doğrultucular, uygun ısı alıcılarla tork anahtarı ile üretici tarafından bildirilen değere göre birleştirilip sıkıştırılarak dikkatli bir şekilde montaj edilmelidir. Transformator-doğrultucu ile otomatik gerilim kontrol kabini arasındaki hassas kablolar, ekranlı kablolar olarak kullanılmalı ve korunmalıdır [24].

Elektrostatik filtrede, işlem sürecinin uygun bir şekilde izlenmesi için gereken önemli kısımlar bulundukları bölgeye göre kategoriye ayrılır. Bunlar, transformator-doğrultucu, çekişmeler/vibratörler, alt hazne toz uzaklaştırma sistemi ve dış kısımlardır. Elektrostatik filtre performansında en önemli ölçüm güç ölçümüdür. Bu yüzden elektrostatik filtrede en temel olarak aşağıdaki değerlerin bulunması gerekir.

- 1) Primer akım ölçümü
- 2) Primer gerilim ölçümü
- 3) Sekonder akım ölçümü
- 4) Sekonder gerilim ölçümü
- 5) Atlama oranı ölçümü (isteğe bağlı)

Bu değerler performans değerlendirme ve bakım için göz önünde tutulur. Dijital kontrol sistemlerinde veri kaydediciler, bakımı hızlandırılması ve işlem işçiliğinin azalmasına yardım eder.

Dolu hazne detektörleri, gaz şartlandırma sistemleri, ekilemeler ve gerekli proses hata göstergelerinin her durumda optimum performansa ulaşmak için otomatik kontrol ünitesiyle birleşimi yapılarak geri besleme sinyallerini eviricilerle alınması mümkündür.

Mikroişlemcili teknoloji, yüksek derecede esnek çekiçleme kontrolü ve kolay bakım için uygundur. Örneğin, yeni kontrol sistemleri, her devreyi, filtre enerjilenmeden önce test edebilir; böylece toprak arızasından dolayı kontrol hasarı engellenecektir. Toprak arızası meydana gelirse, kontrol sistemi otomatik olarak topraklama devresine bağlantı yapar ve led ile problemi işaret eder. Bu, problemin erken bulunmasına ve hızlı çözülmesine izin verir. Elektrostatik filtredeki her bölüm için ayrı çekiçleme sistemi oluşturulur. Ağırlıklı korona elektrot sistemi için frekans, yoğunluk ve devir süresi değerlerinin okunması transformatör kontrolü ile birlikte uygun çekiçleme frekans ve yoğunluğunun oluşturulmasını sağlar. İki ucu sabit korona elektrotlu sistem için mekanik ekilemeler, devir süresi ve ite dışta bulunan ekilemelerin frekansı kolayca ölçülebilir.

Elektrostatik filtre altında bulunan toz uzaklaştırma sisteminde, dolu hazneleri tespit etmek için cihazlar sağlanabilir. Seviye detektörleri, gama işinını, kapasiteyi, basınç farkı ve sıcaklığı kullanabilir. Hazneler tamamen dolmadan alarmlar çalışmalıdır. Kontaklar, döner ara bölme ventilleri ve helezonlarda arıza tespit etmek için kullanılır [24].

Elektrostatik filtrede yüksek verim için, yüksek alan kuvveti ve mümkün olan en yüksek uygulama geriliminde sabit bir korona yükleme, ek olarak sistemin, operasyon durumuna göre ark oluşum riskini kabul edebilecek durumda olması gerekir [12].

Korona elektrotuna uygulanan gerilim artış gösterip atlama gerilim seviyesine ulaştığında, korona ve toplama elektrotları arasındaki havanın delinmesi ile bir ark oluşup kısa devre meydana gelir. Havanın delinme gerilimi olan 30 kV/cm değerine ulaşıldığında atlama meydana gelmektedir. Havayla birlikte ilerleyen malzemenin yapısına göre bu kritik gerilim değeri değişebilmektedir. Atlama durumunda

uygulanan gerilim çok kısa bir süreliğine düşer, korona boşalması oluşmaz, böylece partikül yüklemesi gerçekleşemez. Bu olayın meydana gelmesi verimin de düşmesine neden olur. Elektrostatik filtrede en ideal çalışma şekli, elektrotlar arası atlamanın az sayıda olmasıyla sabit halde koronanın oluşturulmasıdır. Korona başlangıç geriliminin düşük değerde olması istenen bir durumdur. Filtrede, verimi azaltmayacak şekilde az sayıda atlama oluşumu otomatik kontrol açısından normaldir.

Korona elektrotu pozitif ve negatif yüksek gerilimle beslenebilmektedir. Pozitif ve negatif yüksek gerilim arasındaki fark negatif beslemenin benzer çalışma koşullarında ark oluşmadan önce daha yüksek potansiyelde çalışabilmesidir. Bu yüzden negatif besleme tercih edilmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi elektrostatik filtre verimi uygulanan gerilime bağlıdır [12].

Negatif iyon oluşum olasılığı gazın özelliklerine bağlıdır, örneğin korona, saf nitrojende oluşmaz, fakat farklı tipteki gazlarda, değişken derecelerde ve toz yokluğunda elektrot geometrisine göre verilmiş gerilim-akım karakteristiğine göre negatif iyon varlığı oluşmaktadır. Böylece korona ve toplama elektrotları arasındaki potansiyel fark, aralarındaki gaz ile iki farklı elektrik bölge oluşturmaktadır.

Elektrostatik filtrenin giriş bölümünde, gazda, tel yüzeyi yakınında yüksek elektrik alan yoğunluğu ve gaz iyonizasyonundan dolayı korona telinden hızlı bir şekilde yayılan koronada bölgesel olarak elektriksel atlama meydana gelebilir. İkinci (orta) yada çıkış bölümünde, elektrotlar arasının büyük çoğunluğu korona teliyle aynı polaritede yoğun gaz iyon bulutu elde edilir ve elektrik alan etkisinde hızlıca toplama elektrotlarına hareket bulunmaktadır. İyonlar tarafından taşınan yükün hareketi elektrostatik filtrenin akımının büyük bölümünü oluşturur [12].

Endüstriyel baca gazı ve duman parçacıklarının yan ürünü olan ısı plazma içindeki ince parçacıkların kontrolü için elektrostatik filtre işletim kodları geliştirilmiş ve algoritma oluşturulmuştur. Elektrostatik filtrenin blok diyagramı Şekil 2.26'da görülmektedir.

IGBT anahtarlama modern güç elektroniği ve tam dijital mikrodeneleyici uygulamaları elektrostatik filtre verimini artırır. Tristörlü güç sistemiyle kıyasla, kesikli ve kısa aralıklı beslemeyle, geri korona durumunda avantaj elde edilebilir.

Bir darbeleri gerilim beslemesi, parçacık yüklenmesini ve yükleme düzgünlüğünü geliştirebilir. Mikro saniye mertebesinde, 10 μ s'de gerilim darbeleri, doğru gerilim üzerine eklenir. Temel devrede, birinci kaynak, parçacıkları transfer ettiren elektrik alanı, sabit bir doğru gerilimle sağlar. Korona boşalması gerekmediğinden akım biraz daha düşüktür. Bu kaynak için, tristörlü güç kaynağı kullanılabilir. İkinci kaynak ise, kısa darbe gerilimlerinin birinci kaynağın üzerine eklenmesiyle oluşur. Tepe gerilimine göre, korona elektrotu etrafında, korona boşalması düzgün halde oluşturulur ve parçacık yükünü ve filtre verimini önemli şekilde artırır.

Elektrostatik filtrenin giriş bölümünde parçacık yoğunluğu fazla ve farklı tiplerdedir. Bu bölümde istenen, en fazla sayıda parçacığın en yüksek düzeyde yüklenmesidir. Yüksek korona akım yoğunluklarıyla bu isteğe ulaşılabilir. Sonraki bölmelerin verimliliklerini giriş bölümü etkiler. Tozun direnci düşük ve orta derece arasındadır ve geri korona seyrek olarak meydana gelir. Giriş bölümündeki gaz yüksek sayıda büyük parçacık içerir. Bu yüzden giriş bölmeleri, kesintisiz gerilim beslemeleriyle, sık atlama oluşumuyla işletilir. Yüksek toz tutulması olduğu için, çekileme sistemi sık kullanılmalıdır.

Orta bölmelerdeki toz yoğunluğu ise girişe göre düşüktür. Sayısı artan ince tozlar tutulur ve toz direnci, giriş bölmesine göre genellikle yüksektir. Bundan dolayı, toplama plakaları üzerinde geri korona oluşum eğilimi artar ve geri korona darbeleri beslemeyle azaltılabilir. Giriş bölmesindeki çekileme sonucunda, orta bölmeye yeniden işleme giren toz parçacıkları gelebilmektedir. IGBT evirici sistemi bu bölme için kullanılabilir.

Çıkış bölmesinde, tutmada sıkıntı yaratan yüksek dirençli, küçük boyutlu parçacıklar bulunabilmektedir. Geri korona oluşumu meydana gelebilmektedir. Elektrostatik filtrede bir darbeleri gerilim, ortalama elektrik alan şiddetini yükseltmeden parçacık yüklenmesini sağlamada önemli olan serbest yük taşıyıcılarını, artırarak parçacık yüklenmesini geliştirir.

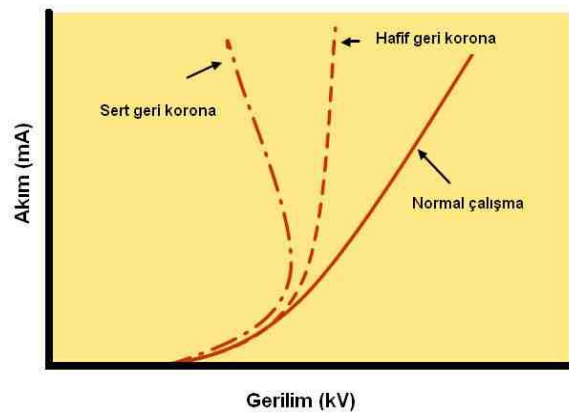
10^{12} ohm.cm değerinin üzerindeki dirençlerde, darbeli gerilim beslemesi, eski tiplerle karşılaştırıldığında, önemli ölçüde yüksek göç hızı sağlamaktadır [30].

2.10 Geri Koronanın Özellikleri

Toplama elektrotu yüksek dirençli toz ile kaplandığında, elektrik akımının neden olduğu önemli bir elektrik alanı oluşumu meydana gelir. Alan 10-20 kV/cm değerini aştığında, toz tabakası içinde küçük yüklenmeler oluşur. Bundan dolayı, büyük sayıda pozitif iyonlar oluşur ve yüksek gerilim elektrotuna doğru kayar. Bu pozitif iyonlar, negatif alanı azaltarak akımda sert bir düşüşü başlatırlar ve diğer yandan parçacıkların negatif yükünü azaltarak, düşük alan kuvvetleri oluşumuna neden olurlar. Bu durumda, atlama geriliminin temiz elektrostatik filtreye göre %50 oranında düşmesine neden olur. Tüm bu etkiler elektrostatik filtre veriminin sert olarak düşüşünü başlatır ve enerji tüketimini artırır.

Toz ve korona elektrotuna bağlı olan toz tabakasının düzensizliği, geri koronanın aynı şekilde oluşmamasına neden olur. Kullanılan elektrot tipine göre toz tabakası farklı şekillerde oluşur. İğneli elektrot tipleriyle, iğnelerin karşısında elips şeklinde yüksek dirençli alanlar oluşur ve düşük dirençli tozlar bu elipsin dışında bulunur. Bu bölgesel karakteristiklerden dolayı, geri korona farklı tiplerde ve yoğunluklarda oluşur [31].

Geri koronanın tespiti özellikle yeni kontrol sistemleri için önemlidir. Şekil 2.27’de geri korona için akım-gerilim karakteristiği görülmektedir [26]. Kontrol sistemi, şekilde bulunan eğimlere göre geri korona gelişimini tespit edip gerekli önlemi alabilir.



Şekil 2.27 : Geri korona ile çalışma durumunda akım-gerilim karakteristiği [26].

Geri korona, yüksek dirençli parçacıklar tutulmak istendiğinde meydana gelir. Akım yoğunluğu ve direnç ile toplama elektrotunda oluşan toz tabakası elektriksel olarak delinebilir. Delinme sonucu, negatif yüklü parçacıklara doğru hareket eden pozitif iyonlar oluşur ve yükler dengelenir [22]. Bu oluşum sonrasında, toplama elektrotunda toplanan tozlar, çıkışa doğru tozun artmasına neden olur. Geri korona ile verimliliğin büyük oranda düştüğü araştırmalarda görülmüştür. Bu verimsizliği düzeltmek amacıyla daha fazla gerilim uygulanması geri koronanın artmasına, gerilim azaltılması da korona oluşumunun azalmasına yol açacaktır. Bu yüzden, besleme gücü olarak doğru akım üzerine eklenmiş darbe gerilimleri kullanılır. Partikül yükleme darbe gerilimiyle oluşturulurken parçacık taşınması doğru gerilim ile elde edilir.

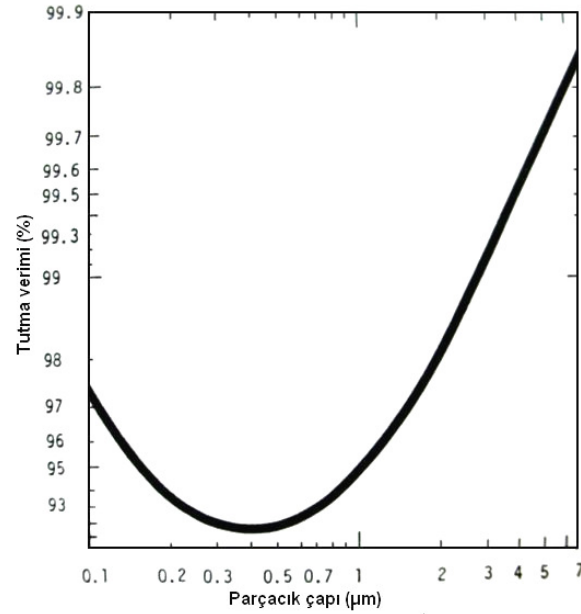
Parçacık tutma işlemi, toplama elemanında geri korona meydana gelirse kesilmektedir. Yüksek dirençli parçacıklar ile, (yüksek akım akışından dolayı) elektrik alanın yüksek olduğu bölgelerde, toplama elektrotlarındaki toz tabakası elektriksel atlamaya neden olabilir. Geri korona, yüksek dirençli olan düşük kükürtlü kömürlerle ilişkilidir. Bu nedenden dolayı bazı ülkelerde elektrostatik filtre yerine torbalı filtre tercih edilmektedir. Geri korona genellikle toplama elektrotundaki toz tabakasının direnci 2×10^{11} ohm-cm değerinden yüksekse meydana gelir. Direnç, sıcaklığın azalmasıyla azaldığından, sıcaklık kontrollü ön yükleme, geri korona problemi için kullanılabilecek bir tekniktir [32].

2.11 Elektrostatik Filtre Verimine Etki Eden Etkenler

Elektrostatik filtre verimini ve çalışma şeklini etkileyen bir çok etken vardır. Bunlar, temel olarak, parçacık boyut dağılımı, parçacık direnci, sıcaklık, gaz akış hızı ve parçacık yoğunluğu olarak sayılabilir.

Elektrostatik filtrede, büyük parçacıklar genel olarak daha kolay tutulur. 0,2-0,4 μm çapı aralığındaki parçacıklar en zor tutulanlardır. Bunun nedeni, küçük parçacıklar için alan yüklemesinin, ısı iyonlarla difüzyon yüklemesine yol açmasıdır. Gaz akışı içindeki küçük parçacıkların ($< 1 \mu\text{m}$) büyük bir kısmı, giriş bölmesinde korona boşalmasını azaltarak yüklenmiş parçacık sayısını azaltır. Elektrostatik filtre kurulumunda, tam kapasite işletme koşulları için parçacık boyutu belirlenerek tasarım yapılmalıdır. Filtre verimi parçacık boyutunun bir fonksiyonudur. İşletme

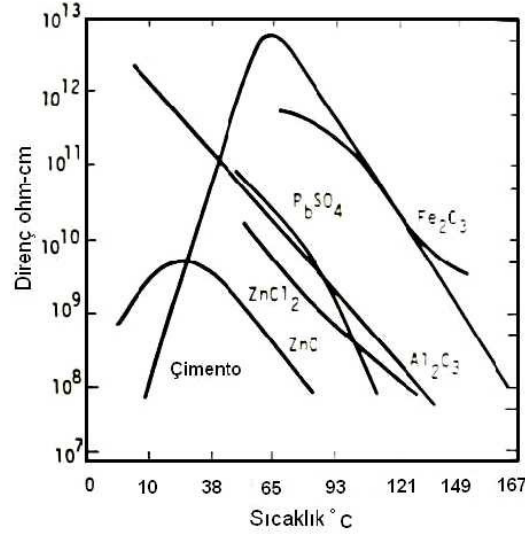
sıcaklığının 155° C olduğu durum için, parçacık boyutu ve elektrostatik filtre verimi Şekil 2.28’de görülmektedir.



Şekil 2.28 : Parçacık çapı ile tutma verimi eğrisi [24].

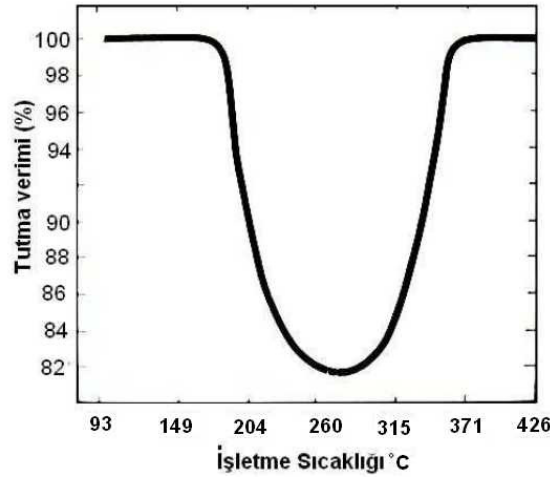
Elektrostatik filtrede, yüksek dirençli parçacıklar yük transferi için uygun değildirler. Parçacık direnci, gazın ve parçacığın kimyasal özelliklerine, gaz akışındaki neme ve sıcaklığa bağlıdır. Direnç değeri elektrostatik filtrenin çalışma aralığı içinde tutulmalıdır. Tercihen 10^8 den 10^{10} ohm-cm aralığında olması uygundur. Islak tipte elektrostatik filtreler için direnç değişkeninin bir önemi yoktur.

Sıcaklığın parçacık direnci üzerinde etkisi önemli boyuttadır. Şekil 2.29’da sanayide kullanılan farklı tozlar için sıcaklıkla direncin değişimi görülmektedir.



Şekil 2.29 : Farklı sanayi tozları için sıcaklık-direnç eğrisi [24].

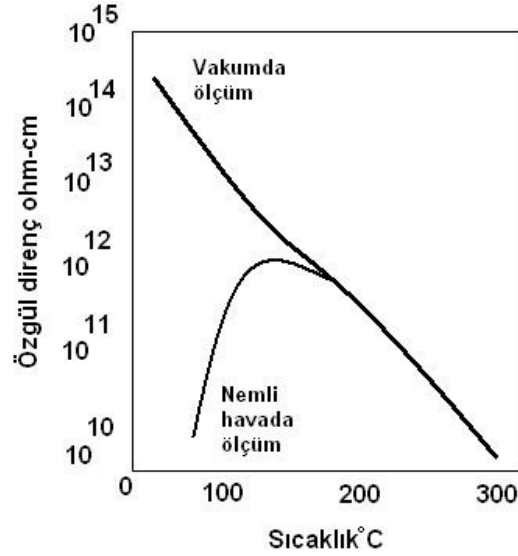
Ayrıca, bir çimento fabrikasındaki fırında, normal gaz akışında ve sıcaklığın su püskürtülerek azaltıldığı durumda, sıcaklığın verime etkisi Şekil 2.30'da görülmektedir. Her işletim sürecinde, tutulacak parçacığın direncinin, sıcaklıkla nasıl değiştiği bilinmelidir [24].



Şekil 2.30 : Çimento fabrikasındaki elektrostatik filtre için sıcaklık-verim eğrisi [24].

Çimento tozu için nemin direnci ne şekilde etkilediği Şekil 2.31'de görülmektedir. Burada toz, vakum içinden geçirildiğinde eğri yaklaşık olarak doğru şeklindedir. Nemli havada yapılan ölçümde ise, düşük sıcaklıklarda direnç oldukça az olmasına rağmen sıcaklık arttıkça iki eğri çıkarır. Bunlara ilave olarak başka bir görüşe göre, bir tesisten çıkan baca tozlarını direnci, içinde bulunan yanmamış karbon miktarına bağlıdır [19]. Kömürde bulunan kükürtteki azalma, genellikle parçacıkların

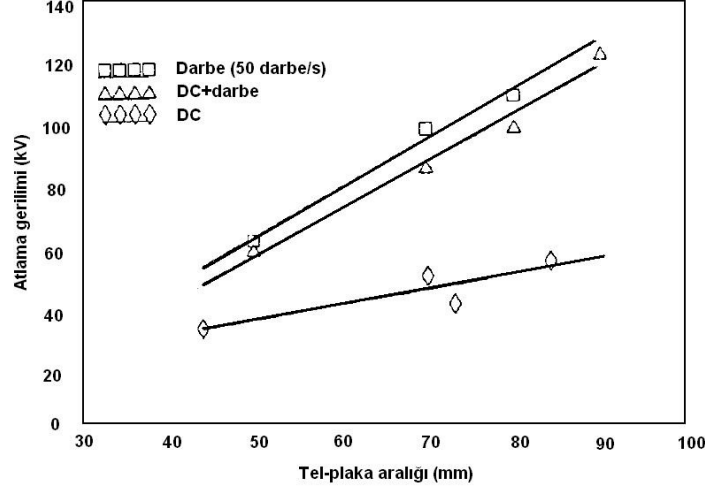
direncinin artmasına ve toplama veriminin azalmasına neden olur. Düşük direncinden dolayı karbon, elektrostatik filtre verimini düşüren bir malzemedir. Karbon iletken bir parçacıktır fakat yükünü çok çabuk kaybeder ve toplanma sonrası tekrar filtre içinde işleme maruz kalır [24].



Şekil 2.31 : Elektrostatik filtrede nemin sıcaklık-direnç ile ilişkisi [19].

Bir elektrostatik filtre, gaz hızının 1 ile 1,7 m/s olduğu aralıkta en iyi işletim özelliğine sahiptir. Tasarımcılar, elektrostatik filtre içinde bölgesel değişiklikleri göz ardı ederek, filtre boyutlarını ve gaz akışını ortalama bir değer olarak varsayıp hesaplama yaparlar. Gaz hızında dikkat edilmesi gereken en önemli kavram, çekişmeler sonrasında tekrar işleme giren toz parçacıklarının minimum olmasını sağlamaktır. Kritik gaz hızı, gaz akışının, plaka düzeninin, filtre boyutunun ve direnç gibi diğer faktörlerin fonksiyonudur [24].

Darbeli ve ön yüklemeli sistemdeki incelemede, elektrostatik filtre verimliliğinin, toz yükünün 2 g/m^3 değerine kadar arttığı sonrasında düşüşe geçtiği gözlenmiştir [33].



Şekil 2.32 : Atlama gerilimi ve tel-plaka aralığı eğrisi [34].

Negatif besleme gerilimi için farklı güç sistemlerinde atlama gerilimi ve tel plaka aralığı arasındaki bağıntı Şekil 2.32’de görülmektedir. Burada, kare şekli saniyede 50 darbe veren güç beslemesini, üçgen şekli DC ve darbe güç beslemesini, yan dönmüş kare şekli ise sadece DC güç beslemesini temsil etmektedir. Darbeli ve DC üzerine eklenmiş darbeli güç beslemelerinin daha yüksek atlama gerilimi sağladığı şekilden görülmektedir [34].

Elektrostatik filtrelerden iyi bir verim elde edebilmek için tozu tutulacak gazlar, belirli fiziksel koşullarda sahip olmalıdır. Bu koşulların en önemlileri gaz sıcaklığı ve nemdir. Bu nedenle, elektrostatik filtrelerin gaz girişinden önce soğutma kuleleri kullanılmaktadır. Bu soğutma kulesinde gazlar, su enjeksiyon sistemi tarafından soğutulur ve şartlandırılır. Soğutma kulesi içindeki gaz akışı düzgün olmalıdır. Bu püskürtme sisteminin verimi için önemli bir özelliktir. Gaz akışının düzgün olması gaz dağıtım plakaları ve levhalar ile sağlanır. Soğutma kulesi çıkışındaki ayarlanmış sıcaklık değerine göre düzenleme yapılır. Soğutma kulesi 300° C’den 150° C’lere kadar soğutabilmektedir. Soğutma kuleleri kullanılarak gaz hacmi azaltımı ve düşük direnç neden olan nemliliğin oluşturulması sağlanır.

Elektrostatik filtreye sevk edilen gazların bileşimdeki karbonmonoksit (CO) gazının oranı hacimsel olarak en fazla %0,6 olmalıdır. Yani elektrostatik filtreye sevk edilen gazın bileşimdeki CO gazı oranı %0,6 ve daha küçük değerlerde ise elektrostatik filtre çalıştırılmalı, daha yüksek değerlerde ise kesinlikle çalıştırılmamalıdır. CO gazı sıcak gaz elde edilmesinde kullanılan yakıtların tam olarak yanmamasından oluşur. CO gazı yanıcı ve zehirli bir gazdır. Filtre elektrotlarına uygulanan yüksek gerilim

nedeniyle elektrotlar arasında kısa süreli atlamalar meydana gelebilir. Bu atlamaların meydana geldiği yerlerde yeteri kadar CO gazı ve CO gazının tutulma ortamı mevcut ise gaz kimyasal reaksiyona girerek hacim genişmesi olur. Gaz hacminin genişmesi filtre içinde ve filtre gövdesinde önemli hasarlara neden olabilir. Bu tür hasarlara neden olmamak için elektrostatik filtreye sevk edilen gazın bileşimindeki CO gaz analiz cihazları ile ölçülmeli ve ölçülen bu değer %0,6 oranına ulaştığında filtrenin otomatik olarak devreden çıkarılması sağlanmalıdır. CO gazının oranı %0,6 değerinin üzerinde olduğu sürece filtrenin devreye alınması elektriksel olarak engellenmeli, değer düştüğünde devreye alınabilmelidir. İşlem sürecinde, elektrostatik filtre girişinde veya çıkışında, basınç sürekli olarak ölçülmelidir ve filtre özelliklerinde belirtilen değerden yüksek değerlere ulaşılmasına izin verilmemelidir. Elektrostatik filtre içinde meydana gelebilecek gaz genişmelerinde, genişen gazın filtre içinde ve gövdesinde hasar oluşturmadan dışarı atılmasını sağlayan emniyet kapakları bulunur ve filtre için tehlikeli olabilecek gaz basıncında açılacak şekilde ayarlanır.

Islak tipteki elektrostatik filtreler, genel olarak patlama riskinin fazla olduğu (çelik sanayisi gibi), parçacığın çok yapışkan olduğu ve yüksek direnç bulunan uygulamalarda kullanılır. Nem, birçok toz ve duman için 121-149° C aşağısında sadece direnci azaltmakla kalmaz aynı zamanda kimyasal düzeltme etkenlerinin de etkisini büyük oranda artırır [24].

3. ELEKTROSTATİK FİLTRELERDE VE TOZ TUTMA SİSTEMLERİNDE YENİ EĞİLİMLER

3.1 Elektrostatik Filtrelerde Gelişmeler ve Yenilik Araştırmaları

Elektrostatik filtrede elektriksel olarak tasarlanmış en son eğilimler, düşük-kükürt/yüksek-dirençte kömürün tutulmasına, enerji tasarrufuna ve yapısal malzemelerden sağlanan maddi getirinin gelişimine odaklanmaktadır. Yenilikler, geniş elektrot aralığı, kesikli besleme, darbeli besleme, ön yükleme ve mikroişlemci ile güç ve silkeleme kontrolü olarak sayılabilir.

Elektrostatik filtrede en yaygın kullanılan yenileme daha geniş elektrot aralığı kullanmaktır. Ağırlıklı elektrot sistemi yerine, sabit korona elektrotu yapılması, daha az toplama elektrotu ve daha uygun yapısal bağlantılar kullanıp daha az bakım gereksinimiyle birlikte maddi tasarruf sağlanmaktadır. Geniş elektrot alanının kullanımının işlem geriliminin artması gibi bir dezavantajı bulunmaktadır. Bu durum yalıtımın yetersiz kalmasına neden olabilir.

Kesikli ve darbe gerilim beslemesi sağlayan mikroişlemcili kontrollerinin kullanımı yeni tasarım değişikliklerindendir. Kesikli besleme, Japonya’da ortaya koyulmuş, gerilimin tam ve yarım dalgalarında kesiklikler oluşturarak maddi getiri sağlayan bir sistemdir. Besleme esnasında gerilimin tepe noktası yüksek, ortalama gerilim ve akım düşüktür. Bu sistemle performanstan ödün vermeyerek, %60 civarında enerji tasarrufu sağlanabilmekte ve geri ödeme süresi 2 yıl olmaktadır.

Darbeli besleme, periyodik olarak, 1 μ s ve 1 ms aralığında, -15 kV ve -75 kV aralıktaki genlikle doğru gerilim üzerine eklenerek oluşur [32]. Özellikle kükürtlü kömürün yanmasıyla oluşan yüksek dirençli tozu tutmak amacıyla, toplama elektrotlarının temizlenmesi, ön yükleme ve darbeli besleme gibi çözümler getirilmektedir. Darbe beslemesi, korona ve toplama elektrotları boyunca akım yoğunluğunun benzerliğini artırmaktadır. Darbe gerilim, geri korona durumunda uygun besleme şeklidir.

Ön yükleme sistemi, geri korona etkisini azaltmak için kullanılabilir. Ön yükleme kısmının eklenmesi filtreyi iki kademeli hale getirir. Parçacık yükleme ve toplama kısmına birbirinden bağımsız olarak yaklaşılabılır.

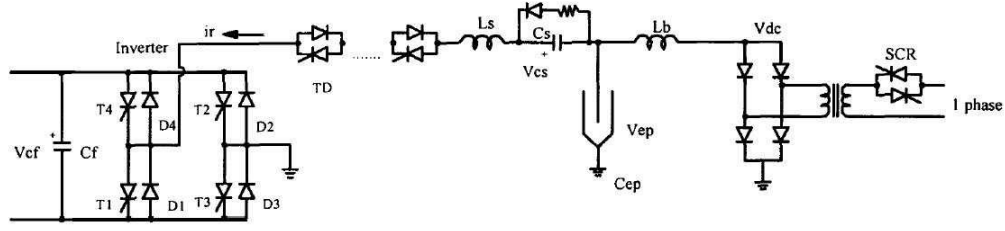
Enerji yönetim sistemiyle ilgili olarak diğer bir yenilik ise, bacada bulunan film ışık geçirgenliği test cihazı (opacity meter) ile parçacık çıkışını görüntülenmesidir. Böylece, parçacık çıkışı sabit olacak şekilde, gücün artırılması ve azaltılması sağlanabilmektedir [32].

3.2 Darbeli Güç Besleme Sistemi

Elektrostatik filtrelerde besleme olarak, tristör tabanlı doğru, kesikli ve anahtarlama darbe gerilimli sistemler geliştirilmiştir. Darbeli sistemin, yüksek dirençli toz toplama verimini arttırmak ve toplama plakasındaki geri korona oluşumunu düşürmek için kullanıldığı bilinir.

Güç beslemesi darbeli ve doğru gerilim kaynağına sahiptir. Filtreye uygulanan gerilim, değişken doğru gerilim beslemesi ve anahtarlama, rezonans endüktansı, kondansatör ve evirici ile üretilen darbeli gerilim ile oluşturulur. Doğru gerilim ve darbeli kaynağın sınıflaması sırasıyla 60 kV, 800 mA ve 70 kV, 400 mA'dır. En yüksek darbe tekrarı her saniyede 200 pps (saniyedeki darbe) ve darbe genişliği 140 μ s'dir. Geleneksel güç beslemesi, tristör çiftinden, transformatörden ve yüksek gerilim diyot doğrultucusundan oluşmaktadır. Bu bir çeşit gerilim düzenleyici kapasitesi olan yüksek gerilim doğrultucusudur. Sayısal kontrol sisteminin kullanılması, çıkıştaki kesikli ve darbe geriliminin düzgünlüğünü sağlar ve sistem verimini düşürmeden enerji tüketimini azaltır.

Şekil 3.1'de darbeli gerilim güç beslemesi görülebilmektedir. Sistem, 60 kV gerilimli, tristörlü değişken doğru akım güç beslemesi ve 5 kV doğru gerilim kaynağına sahip eviriciden, yüksek gerilim yarı iletkenli anahtarlardan, bir LC rezonansından ve tampon endüktansından oluşturulmuş darbeli güç beslemesinden oluşmaktadır.



Şekil 3.1 : Darbeli güç besleme sistemi [35].

Elektrostatik filtre, temel doğru gerilim üstüne eklenen sıralı darbe gerilimiyle beslenmektedir. Uygulama gerilimi, 140 μ s darbe genişliği ve 70 kV tepe gerilimine sahiptir. Sağ taraftaki DC kaynağı elektrostatik filtreye temel gerilim sağlamaktadır. Temel gerilim, alternatif akım kaynağında tek aşamada tristör tarafından kontrol edilebilir. Endüktans darbeleri gerilimin, darbeleri kaynaktan doğru gerilim kaynağına akmasını engeller. Negatif yarım devir sırasında elektrostatik filtreye dağılmayan enerji diyotlar tarafından geri alınır böylece yüksek sistem verimi elde edilir [35].

Darbeleri güç sisteminin diğer yararlı etkileri, gerilim ve akımın bağımsız kontrolünün yapılabilmesi, büyük çaplarda korona tellerinin kullanımıyla düşük aşınma, yüksek parçacık yükleme ve toplamanın oluşturulması, alan yüküyle yüksek toplama alanı oluşturulması ve düşük yükleme süresinin sağlanması olarak sayılabilir [36].

Yapılan incelemelerde, korona akımının darbe genişliğinin doğrusal fonksiyonu olduğu bulunmuştur. Darbeli güç beslemesinde, elektrostatik filtre kondansatörünün darbeleri gerilim seviyelerine tekrar tekrar yüklenmesi için büyük enerji gereklidir. Bu enerjinin sadece küçük bir bölümü parçacık yükleme akımı için gereklidir. Bundan dolayı darbe tekniği kullanan güç kaynağı devreleri, her darbe sonunda kullanılmayan enerjiyi transformatörün primer bölümüne iletip, kondansatörle depolayarak, bir sonraki darbeye tekrar kullanmıştır ve enerji tüketimi sağlamıştır [37].

3.3 Yüksek Frekanslı Güç Besleme Sistemleri

Elektrostatik filtrelerde amaç en iyi toz tutma kapasitesine sahip olunmasıdır. Dolayısıyla, elektrotlara uygulanan yüksek gerilimin genlik ve frekans olarak ayarlanması gerekmektedir. Klasik bir elektrostatik filtre besleme transformatörü, 50 Hz frekanslı 380 V'luk giriş gerilimini, 50 Hz frekanslı 110 kV'luk gerilime yükseltebilmektedir. Elektrostatik filtrelere uygulanan gücün yüksek olması, aynı

zamanda toz tutma verimin de yüksek olması anlamına gelmektedir. Bu yüzden, frekansın yükselmesi, aynı zamanda daha verimli ve daha düzgün bir gerilimin oluşması anlamına gelmektedir. Bu şekildeki gerilimin ortalama değeri yükselmekte ve 1000 kat daha küçük değerlerde dalgalanmalar olacağından çok daha düzgün bir gerilim elde edilmiş olacaktır.

Klasik tip elektrostatik filtre besleme sistemleri iki bölümden oluşur. Bunlar, yüksek gerilim transformatörleri ve kontrol kabinidir. Yeni sistemlerde, transformatör, kontrol kabini ve yüksek gerilim bölümü aynı kabin içinde bulunmaktadır. Burada bulunan transformatörler, hermetik, kapalı, havayla teması, genişleme tankı olmayan ve yağın kendi bünyesinde soğutan tiptedir. Yeni sistemle en düşük enerjiyle en iyi performans sağlanmaktadır ve bütünleşik bir sistem olduğundan boyut ve ağırlık olarak klasik sistemin %15'i civarındadır. Ayrıca bir kontrol odasına gerek duyulmaz. Aynı güçlü klasik transformatörler 1600 kg civarındayken bu bütünleşik sistem 200 kg civarında bir ağırlığa sahiptir (Şekil 3.2).

Bütünleşik sistem elektrostatik filtre üzerine konumlandırılır ve böylece elektrostatik filtreyi besleyen yüksek gerilim kablosu daha kısa olmaktadır (Şekil 3.3). Ayrıca kurulumu çok kolay olduğundan ek kurulum masrafına da gerek kalmamaktadır. Bakımı ve servisi eski sisteme göre daha kolaydır. Eğer bir arıza meydana gelirse, herhangi bir fonksiyon bloğu kolayca yenisiyle değiştirilebilir. Bakım ve arıza süresinin kısılması, sistemin daha erken devreye alınmasını sağlar ve dolayısıyla maddi kaybı ve plansız duruşları azaltır. Aynı zamanda, sistemde problem olduğunda diğer elektrostatik filtre gözleri çalışırken gereken değişimler yapılabilir.

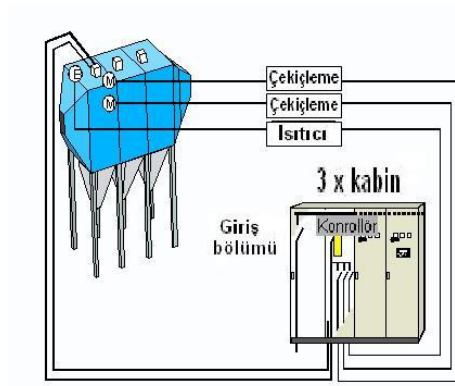
**Yüksek Frekanslı Bütünleşik
Güç Beslemesi**



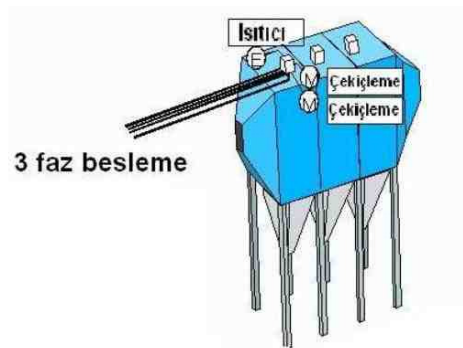
**Alçak Frekanslı
Geleneksel Güç
Beslemesi**



Şekil 3.2 : Yeni ve klasik besleme sistemleri [38].



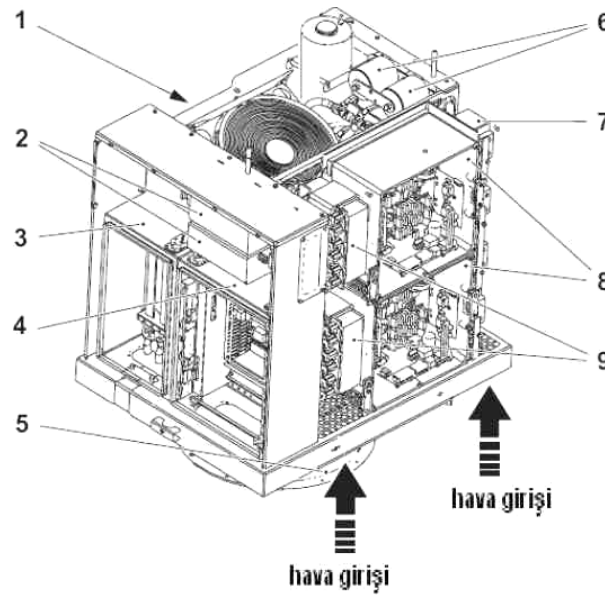
(a)



(b)

**Şekil 3.3 : Klasik ve yeni sistem arasındaki farklar (a) geleneksel sistem
(b) yeni bütünleşik sistem [38].**

Yüksek dirençli tozların çökeltilmesi için çok geniş elektrostatik filtreler kullanmak gerekir. Fakat en uygunu, yüksek gerilimi darbeler şeklinde göndermek ve etkin değeri arttırmaktır. Yeni anahtarlama bütünlük sistemde, transformatörün bulunduğu yüksek gerilim ünitesi, elektronik kontrolün yapıldığı kontrol kabini, IGBT yarı iletkeniyle istenen doğrultma ve evirmelerin gerçekleştiği iki adet güç elektroniği ünitesi (doğrultucu-evrici), elde edilen yüksek gerilimi transformatöre ileten yüksek gerilim kanalı, konvertörlerdeki ve çıkıştaki gerilim ve akım değerlerinin uygun ve parazitsiz olmasını sağlayan kapasite, endüktans ve filtreler bulunmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : Yeni sistemin iç yapısı.

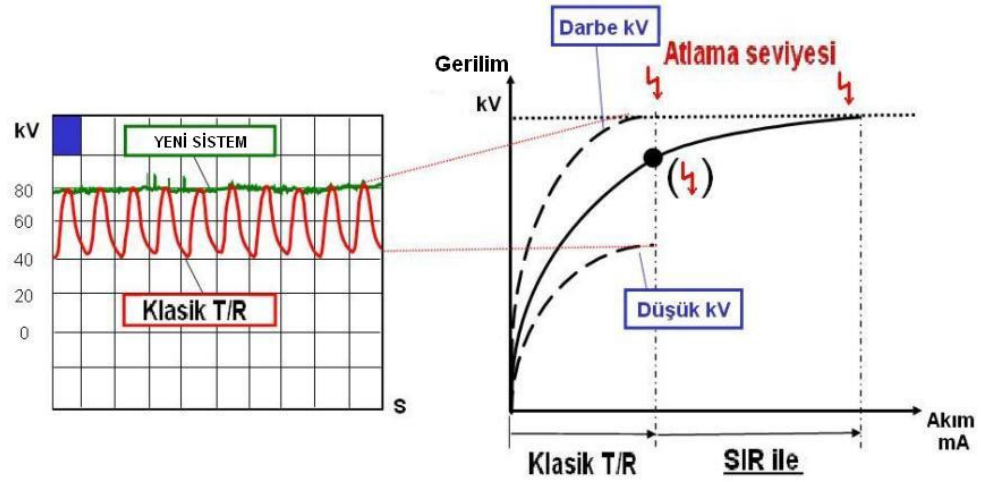
- 1) Yüksek gerilim ünitesi
- 2) EMC filtreleri
- 3) Güç kabini
- 4) Kontrol kabini
- 5) Yüksek gerilim borusu
- 6) Rezonans kapasiteleri
- 7) Rezonans indüktansı
- 8) Güç elektroniği ünitesi
- 9) İndüktanslar

Bütünlük sistemde yüksek frekans çıkışı, elektrostatik filtrede kapasite artımı ve aynı zamanda enerji tasarrufu sağlar. Böylece kablo kesitleri de küçülmektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Yeni sisteminin elektostatik filtre üzerine kurulumu [39].

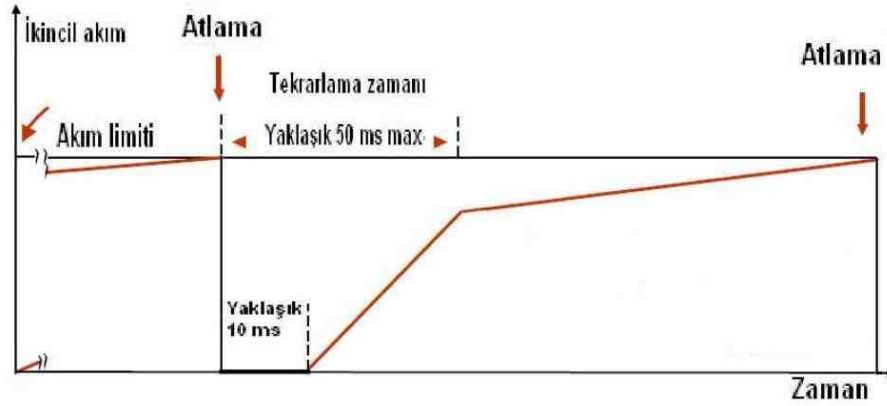
Üç fazlı besleme gerilimiyle, yüksek gerilim çıkışında dalgalanma minimuma indirilir ve maksimum akım alanlara uygulanır. Yüksek güç daha iyi emisyon değerlerine ulaşılmasını sağlar (Şekil 3.6). Bu sistemde verim, % 90 ve $\cos\phi$ değeri yaklaşık 1 civarındadır.



Şekil 3.6 : Klasik ve yeni sistemdeki gerilim değerleri [38].

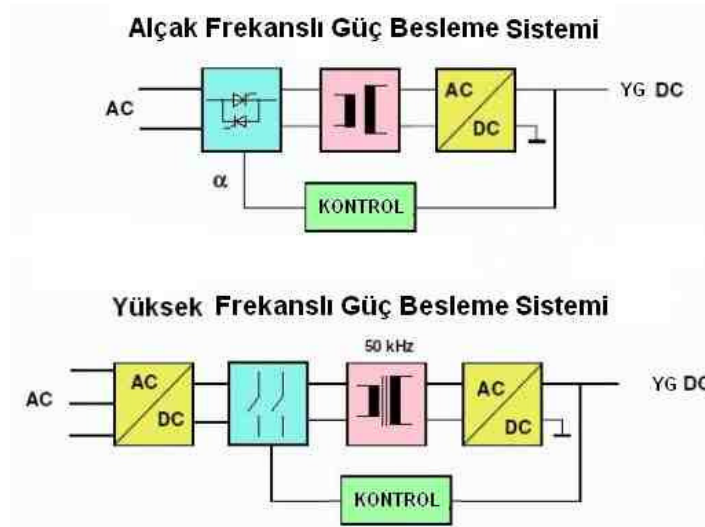
Normal çalışma koşullarında, yüksek gerilimdeki artış, elektostatik filtreler için olumlu etki yaratır fakat yüksek gerilim daha fazla yükseltirse elektrotlar arasında atlama oluşur. Elektostatik filtre beslemesinde genel çalışma mantığı elektrotlar arasında atlama oluncaya kadar gerilimi artırmaktadır (Şekil 3.7). Klasik transformatörler elektostatik filtreleri %30 dalgalanmayla besler. Ortalama gerilim değeri 50 kV civarındadır. Atlamadan hemen önceki gerilim ise 71 kV

değerlerindedir. Fakat bütünleşik sistemde ortalama gerilim değeri 71 kV civarındadır. Bunun nedeni, daha önce belirtildiği gibi yüksek frekans ve dolayısıyla 1000 kat daha düşük dalgalanmalardır. Böylece, etkin gerilim değeri ve elektrostatik filtreye uygulanan güç daha yüksek olmaktadır.



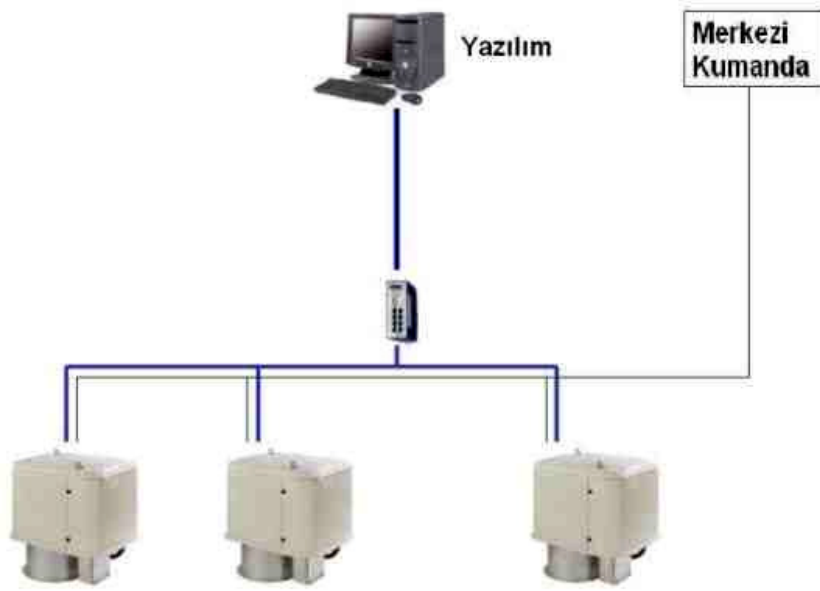
Şekil 3.7 : Korona elektrotu gerilim besleme ilkesi [38].

Klasik transformatörlerde, atlamanın akımı sınırladığı durumlarda bütünleşik sistem akımı 2 katına çıkarabilecek değerler oluşturulabilir. Yani sonuç olarak, klasik elektrostatik filtre beslemesinde tepe gerilimi bütünleşik sistemdeki bulunan ortalama gerilime eşit değerlerdedir denebilir. Sistem, şebeke frekansından bağımsızdır ve darbenin verilme ve kesilme zamanlarını en iyi şekilde seçebilmektedir. Yeni sistemdeki doğrultma ve evirme işlemleri IGBT ve tristörlerle gerçekleştirilir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : Sistemlerdeki güç besleme yapısı [38].

Gelişmiş kontrol programları ile desteklenen sistem, çekişleme zamanlarını da kendisi oluşturabilmektedir. Çünkü elektrostatik filtre gözlerinin çekişleme zamanlarının aynı zaman diliminde olması, toz emisyonunu olumsuz yönde etkiler. Tüm bütünleşik transformatörler birbirlerine bağlanabilir ve merkezi kumanda odasından ya da elektrostatik filtrelere yakın bir noktadan bilgisayar yardımıyla kontrol edilebilir. Sistemde bulunan yazılım en iyi toz tutma için, yüksek gerilim darbelerini analiz eder ve ardından en uygun değeri ayarlar. Klasik transformatörlerin 500 katı hızında bir kontrol IGBT'ler ile sağlanır. Sistem ayarları, operatörler tarafından değiştirilip istenen parametrelerde set edilebilir ayrıca bu sistemde bir internet hattı bağlantısıyla elektrostatik filtre parametrelerini uzaktan kontrol etme olanağı bulunmaktadır. Sistemler birbirlerine ethernet kabloları ile bağlıdır (Şekil 3.9). Çekişleme ve ısıtma düzenekleri için kablolama gerekebilmektedir [38, 39].



Şekil 3.9 : Bütünleşik sistemin haberleşme ve kontrol sistemi [39].

Elektrostatik filtreler için, IGBT (insulated gate bipolar transistors: kapıdan yalıtımlı bipolar transistör) gibi hızlı anahtarlama yapabilecek cihazlar kullanarak evrici esaslı yüksek gerilimli güç kaynağı yapmak mümkündür. Filtre verimliliğini artırmak için, ortalama korona gücü, alışımlı SCR (silicon controlled rectifier: silikon kontrollü doğrultucu) temelli teknolojilere göre önemli oranda artırılabilir. Ayrıca, gerilim atlamaları sırasında hızlı gerilim ayarlama sayesinde IGBT güç eviricileri hızlı akım kontrolüyle, filtre performansını artırır.

IGBT eviricilerin uygun gerilim kontrolü sayesinde düzgün bir doğru gerilim elde edilebilir ve böylelikle sistemin aşırı gerilim kapasitesi, geleneksel tristöre dayalı yüksek gerilim üretim sisteminde olacağından çok daha düşük olur. Bu nedenle, IGBT evirici çözümü, geleneksel sistemi uygulamaktan daha ekonomik ya da daha ucuzdur. Yeni nesil entegre IGBT modüllerinin ortaya çıkmasıyla beraber, 10 kHz'e kadar frekanslarda çalıştırılarak tasarım gerekliliklerini karşılayan çok tümleşik (kompakt) bir IGBT evirici geliştirilmiştir. Yeni IGBT türleri, daha önceki modüllerden daha düşük doyma gerilimlerine sahiptir ve bu da daha az enerji kaybına neden olur.

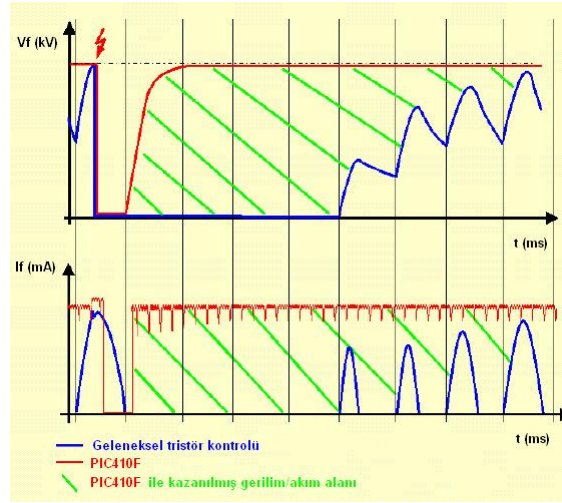
Elektrostatik filtreli güç kaynakları pazarında SCR temelli teknolojiler hakimdir. Sanayi tesislerindeki parçacık emisyonlarıyla ilgili yasal düzenlemelerin daha sıkı hale getirilmesiyle birlikte, elektrostatik filtrelerin daha verimli bir biçimde çalışması gerekmektedir. Daha yüksek verimi elde etmek için, filtrenin mekanik veya elektrik parçası iyileştirilebilir. Uygun olan bütün durumlarda tercih edilen yöntem verimliliği yalnızca elektriksel yollarla geliştirmektir çünkü çok daha az masraflıdır. Otomatik kontrol ve enerji yönetimi daha az enerji tüketimi ve daha yüksek toz toplama kapasitesi sağlar. Günümüzde, enerji tasarrufu ve iklim değişikliği ile ilgili tartışmalarla birlikte, endüstriyel bir filtrenin enerji tüketiminin MW mertebelerinde olmasından dolayı, enerji verimliliği daha da önemli hale gelmektedir. Genelde, bir elektrostatik filtrede parçacık tutma işi daha yüksek bir elektriksel güç kullanılarak arttırılır.

Ayrı güç kaynağı ve kontrolü bulunan 20-40 filtre bölmesinden oluşan büyük endüstriyel filtrelerde, minimum enerji tüketimi ve yeterli gaz temizleme elde edebilmek için, her bir bölmenin güç girişleri prosesin bütününe otomatik olarak adapte edilmelidir. Bu şekilde, bir bölme çok düşük enerji seviyelerinde çalışırken, ayrı bölmelerin bazıları yüksek enerji seviyelerinde çalıştırılabilir. Bu tür bir otomatik düzeltim sistemiyle, bir filtrenin toplam enerji tüketimi minimuma indirilebilir.

Özellikle bir filtre içerisindeki ilk gaz giriş bölmelerinde, parçacıkların elektriksel olarak yüklenmesi için genellikle çok yüksek bir elektrik enerjisi gerekir. Ne var ki, elektrik enerjisi arttığında, ortalama enerjinin düşmesi ve dolayısıyla daha düşük miktarda yüklü parçacık olmasıyla, gaz parçacıklarının yüksek yoğunlukta olması ile birlikte gerilim atlamaları da sıklaşır. SCR temelli güç kaynakları, 50-60 Hz

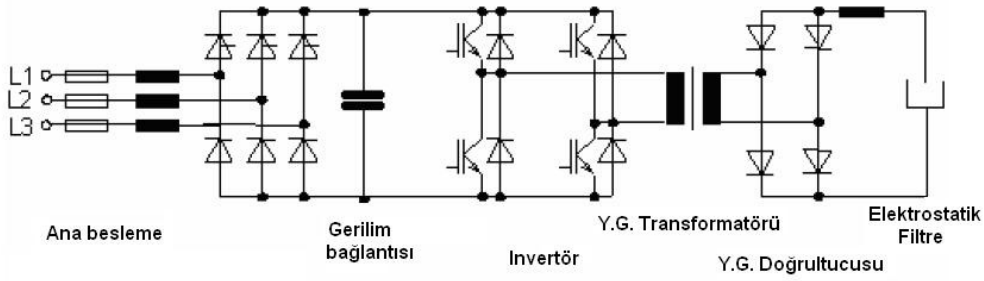
frekansındaki ana gerilimi transformatörün giriş bölümünde anahtarlama için kullanılır. Bu, filtre geriliminde, oldukça yüksek gerilim dalgalanmasına sebep olur.

Şekil 3.10, SCR ve IGBT evirici temelli bir güç kaynağı ile uygulanan düzgün gerilimle elde edilen gerilim ve akım grafiklerini göstermektedir. Atlama olayı genelde maksimum gerilimde meydana gelir, bu nedenle bir SCR kullanıldığında ortalama gerilim atlama geriliminin çok altında olmalıdır. IGBT evirici ile gerilimin tepe ve ortalama değeri neredeyse aynıdır ve önemli ölçüde daha yüksek filtre gerilimleri ile sonuçlanmaktadır. Ayrıca, bir gerilim atlaması veya kıvılcımın düzeltilmesi de çok daha hızlı gerçekleşir ki bu da daha yüksek bir ortalama gerilim sağlamaya yardımcı olur.

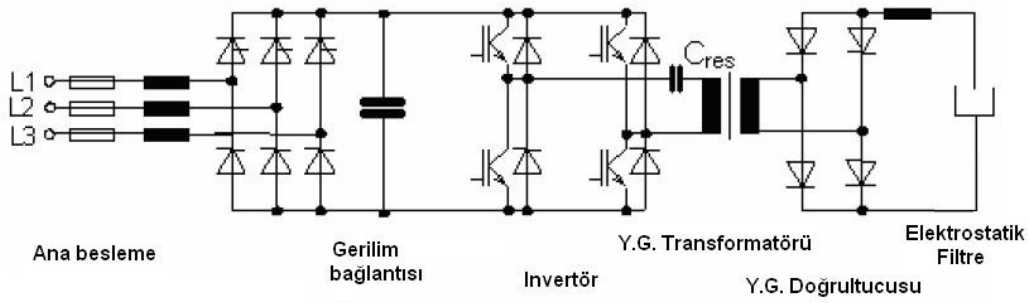


Şekil 3.10 : Geleneksel sistem ve yeni sistem için akım gerilim kıyaslaması [40].

IGBT evirici temelli güç kaynaklarının düşük gerilim bölümü için farklı çözümler bulunmaktadır. Bunların arasında rezonans anahtarlama ve sert anahtarlama sistemleri bulunmaktadır. Şekil 3.11’de görüldüğü gibi rezonans anahtarlama elde etmek için, devreye bir kondansatör (C_{res}) eklenmelidir.



(a)



(b)

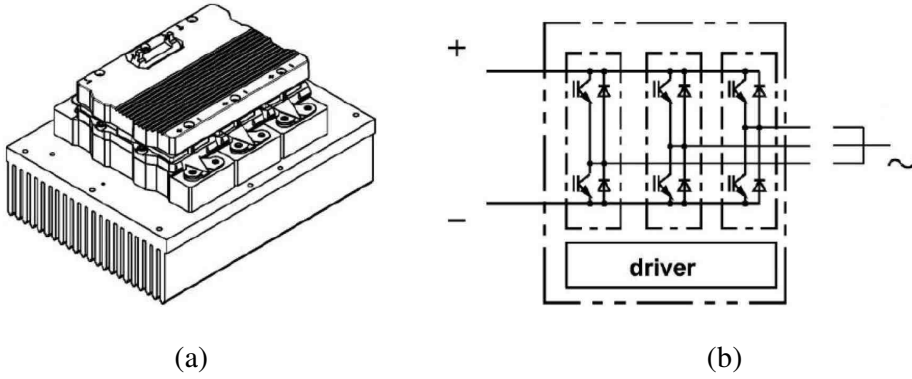
Şekil 3.11 : IGBT evirici devreleri (a) temel IGBT evirici devresi ve sert anahtarlama modeli (b) rezonans anahtarlama modeli [40].

Çizelge 3.1 : Rezonans ve sert anahtarlama sistemlerinin karşılaştırılması.

Özellikler	Rezonans	Sert Anahtarlama
Akım dalga şekli		
Faz	3	3
Cos φ	~ 1	~ 1
İşlem frekansı	Yüksek (50-80 kHz)	Orta (500 Hz-10 kHz)
Anahtarlama kayıpları	Her anahtarlama düşük enerji kaybı fakat yüksek frekans	Her anahtarlama yüksek enerji kaybı fakat düşük frekans
T-R işlem frekansı	50-80 kHz	*500 Hz (uygun) *Standart T-R ile 50-60 Hz
Güç besleme geliştirilmesi	Her zaman evirici ve T-R seti	T-R setine geri kullanabilme
T-R tipi	Düşük kayıplı (Ferrit)	500 Hz veya standart 50-60 Hz
Maksimum güç	100 kW	300 kW
Maksimum gerilim	70 kV (DC)	150 kV (DC)
Maksimum akım	1,4 A	3,3 A
Atlama kesme süresi	40 μ s	50 μ s

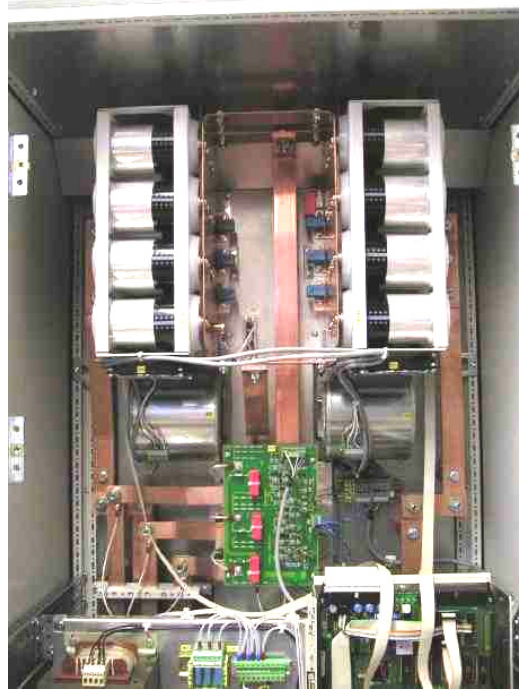
Çizelge 3.1’de rezonans ve sert anahtarlama sistemlerinin farkları görülebilmektedir. Bu iki kavram arasındaki en belirgin fark transformatör tasarımında kullanılan manyetik çekirdeğin türüdür. Rezonans devre, yapısal olarak yüksek akım dalgalanmasına sahiptir, bu nedenle gerilimi düzgünleştirmek, filtrenin elektrik kapasitesine göre sabit bir doğru gerilimi elde edebilmek için yüksek frekans gerekir. Bu yüksek frekanslarda yüksek gerilim yalıtımını sağlamak için büyük boyutlu manyetik çekirdekler oluşturmak çok zordur. Bu yüzden, gerilim ve güç seviyeleri sınırlıdır. Bu durumda, 150 kV’a kadar T-R setiyle 300 kVA’ya kadar güç kapasitesine sahip olan sert anahtarlama tercih edilir. Her iki yapıda filtre performansı iyileştirmeleri gerçekleştirilebilir. Sert anahtarlamanın bir diğer önemli avantajı da mevcut filtrelerin iyileştirilmesinde çok daha fazla esnekliğe sahip olmasıdır. IGBT evirici ve T-R seti daha önceki kurulumlarda kullanıldığı gibi ayrı bir şekilde yerleştirilebilir. Eğer mevcut T-R seti yetersizse, IGBT eviriciler tekrar kullanılabilir ve çalıştırılabilir. 500 Hz tiple karşılaştırıldığında, standart (50-60 Hz) T-R setinin daha yüksek parazit endüktansından kaynaklanan ufak dezavantajları da vardır; örneğin bir atlama tespit edildikten sonra daha yüksek bir akım kesme zamanı oluşur. Ayrıca, evirici yalnızca mevcut T-R setine bağlanacağı için deneme kurulumu basittir. IGBT evirici kontrolü tüm standart kontrol sinyalleri ile kolayca bağlanabilir.

Günümüzde entegre sürücü kartı, koruma ve izleme özelliklerine sahip yüksek güçlü IGBT modülleri mevcuttur. Bunlar üreticisi tarafından uygun soğutucular üzerine monte edilmiş durumdadır. Ayrıca, modüller, bir çıkış akımı ve bir güç çipli sıcaklık sensörü ile donatılmıştır. Şekil 3.12’te bir soğutucu üzerine monte edilmiş sürücülü güç modülü görülmektedir. Üç adet güç ünitesi, devre diyagramında gösterildiği gibi paralel olarak bağlıdır. Yeni nesil IGBT’ler (SPT) (soft punch through) 10 kHz’e kadar ve hatta daha üstündeki yüksek anahtarlama frekansları için uygundur.



Şekil 3.12 : IGBT güç modülü (a) mekanik çizim (b) elektriksel çizim [40].

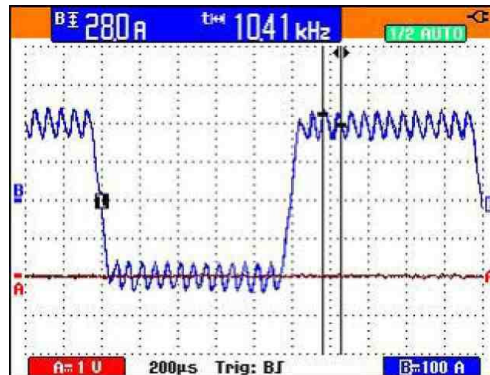
Evirici iki modülden meydana gelmiştir (Şekil 3.13). Gerilim bağlantı kondansatörleri düşük endüktif baralarla doğrudan IGBT modüllerine bağlanır. Kontrol bölümü, kontrol, geri besleme ve durum sinyallerini iletmek için modüllerin her birine şerit veri kablosuyla bağlıdır.



Şekil 3.13 : IGBT gerilim bağlantı kondansatörlü evirici ve kontrol devresi [40].

Yüksek gerilim transformatörü ve doğrultucu maksimum 150 kV'luk bir çıkış gerilimi için oluşturulmuştur. Filtrenin elektrik kapasitesi eviricinin yüksek anahtarlama frekansı ile kullanıldığında, çalışırken doğrultucu için 150 kV'tan fazla gerilim oluşmaz. Ortalama gerilim, gerilimin doğru akım türünden dolayı 150 kV'a

Şekil 3.15'te inverter çıkış akımını göstermektedir. 500 Hz'lik frekanslı oldukça dikdörtgen bir şeklin yaklaşık 10 kHz'lik bir frekansla değiştirildiği görülebilir. Temel frekans transformatöre kolayca adapte edilebilir. Mevcut endüstriyel tesislerde, IGBT inverter türü güç kaynağına dönüştürmek çok kolaydır, çünkü 50 Hz veya 60 Hz dönüştürücüler, eğer iyi bir durumdaysalar, muhafaza edilip kullanılabilir [40].



65

işlemi uygulanan bir yöntemdir ve bu tip filtrelerde temizleme işlemi ilke olarak ağırlık etkisiyle oluşur. Basit bir siklon ile 5 µm çapından daha küçük taneciklerin tutulması çok güçtür. İçinde daha küçük parçacıkların bulunduğu bir gaz, bir yıkama sıvısı içinden geçirilirse, bu parçacıkların kütleleri artacağından, parçacıklar ağırlık etkisi ile kolayca tutulabilir. Pratikte yıkama sıvısı olarak genellikle su kullanılır.

Islak filtrelerde toz tutma verimine etki eden belli başlı hususlar;

- Sıvı damlacıkları ile toz tanelerinin birbirine göre hızları,
- Tozların biçimi, büyüklüğü, gaz içindeki derişikliği ve sıvıyı emebilme özelliği,
- Sıvı damlacıklarının büyüklükleri dağılımları şeklinde sıralanabilir.

Uygulamada basit yıkayıcı, girdaplı ve ventüri etkili olmak üzere çok değişik ıslak filtre tasarımları ile karşılaşılabilir. Bunlarda elektrostatik filtrelerdeki toz tutma verimlerine ulaşılabilir. Bu filtrelerde toz tutma işleminden başka, uygun püskürtme sıvıları kullanılarak kirletici gazların da tutulması sağlanabildiği gibi, gazların soğutulması da gerçekleştirilebilir. İlk yatırım maliyetleri az olmasına karşılık, yıkama sıvısının devri nedeniyle, ıslak filtrelerin işletme masrafları diğer filtrelerden daha fazladır.

Basit yıkayıcılarda, sıvı damlacıkları ile toz tanecikleri arasındaki hız farkı küçük olduğundan, teorik analizlerdeki gibi yüksek toz tutma verimi sağlanamaz. Girdaplı yıkayıcılarda değişken hızlar elde edilebildiğinden verim bir miktar artabilir fakat bu durumda da basınç düşümü ve harcanan enerji artar. Ventüri etkili ıslak filtrelerde, büyük hız farkları nedeniyle oldukça yüksek toz tutma verimi elde edebilir. Zift gibi yapışkan taneciklerin filtrelenmesinde, ıslak filtreler veya yüzeyleri sürekli yıkanan siklon ve elektrostatik filtreler kullanılmalıdır [41]. Islak tip filtrelerde, parçacığın filme yapışması için ya çok hızlı bir biçimde ıslatılması ya da gerekli enerjiye sahip olması istenir. Nemli tip filtrelerde daha küçük parçacıkların çok başarılı bir şekilde toplanması beklenmemelidir [19].

3.5 Torbalı Filtreler

Torbalı filtreler, tozdan arındırma problemlerine getirdiği çözümlerle günümüzde en çok tercih edilen filtre türleri arasında ilk sırayı almaktadır. Torbalı filtrelerin çalışma ilkesi, tozlu gazın keçe esaslı torbanın dışından içine geçirilerek tozundan

arındırılması ve bu esnada torbanın dış yüzeyinde biriken tozun gövde altındaki bunkere düşürülerek toplanmasıdır. Bunkerde toplanan tozlar, toz toplama elemanları vasıtasıyla filtre dışına alınır. Kullanılabilir tozlar taşıma elemanlarıyla sisteme taşınarak, tekrar üretimde kullanılabilirler. Basıncı hava bulunmayan yerlerde tozsuzlaştırma sağlamak üzere tesis edilen torbalı filtrelerde, tutulan tozun silkelmesi mekanik olarak gerçekleştirilmektedir [42]. Şekil 3.16’da bir torbalı filtre görülmektedir.



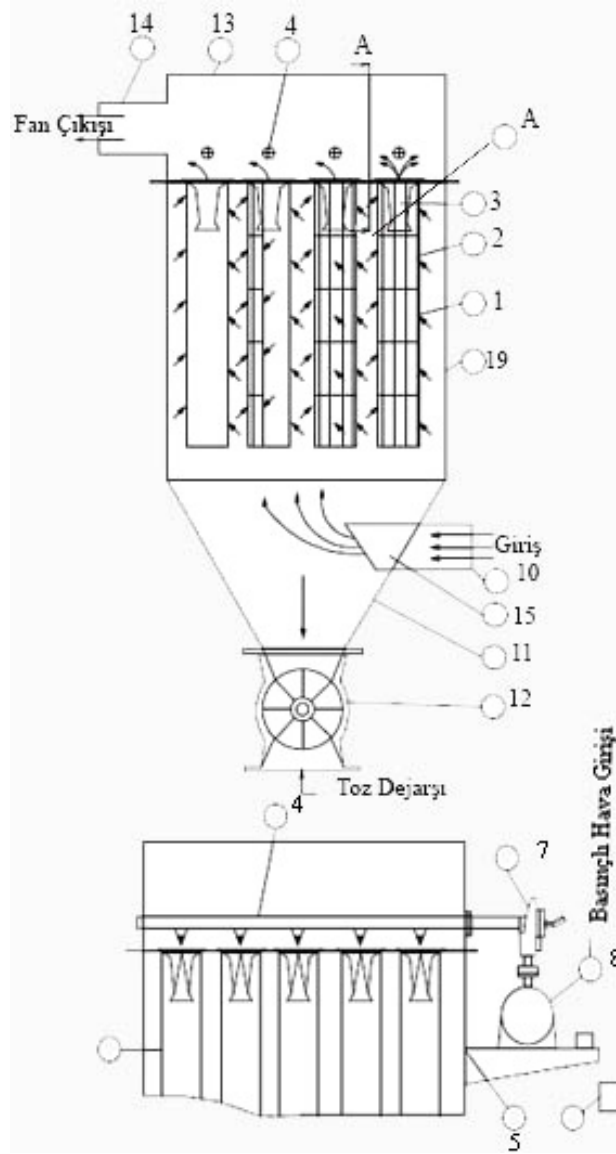
Şekil 3.16 : Torbalı filtre.

Torbalı filtrelerde, tozlu hava veya gaz, basınç veya vakumla filtre gövdesinin altından sisteme girer. Havanın (gazın) hareketi filtre torbaları istikametinde olup, taşınan toz parçacıkları torbanın dış yüzeyinde kalır. Torba kafesinin iç bölümüne geçen temiz hava, ventüri bölümünü geçerek filtrenin temiz bölmesine erişir. Buradan egzoz sistemi sayesinde üniteyi terk eder. Toz tutma emisyonu aşamasında tozlar filtre elemanının dış yüzeyinde toplanırlar, dolayısıyla filtre elemanının geçirgenliği düşer. Filtrenin temiz ve kirli gaz bölümleri arasındaki diferansiyel basınç kontrolü ve artışı izlenir ve basınçlı ters temizleme havası sistemi devreye girerek diferansiyel basınç farkı düşürülür. Böylece, torba geçirgenliği sürekli, istenen sınırlar içinde tutulur. Elektronik zamanlama devresinden gelen periyodik sinyaller ile selenoid valflar 0,1 s gibi ayarlanabilen çok kısa süreler ile enerjilendirilir ve yüksek basınçlı hava darbe valflarıyla üfleme borularına gönderilir. Üfleme boruları üzerindeki deliklerden basınçlı hava çok yüksek hızda ventürlerin içine püskürtülür. Yüksek hızlı basınçlı hava ventürden geçerken, kendi hacimlerinin birkaç misli büyüklükte sekonder bir hava meydana getirir. Diğer bir

deyişle ventüri üzerinden çok yüksek basınç ve hızla püskürtülen basınçlı hava, temiz hava bölmesindeki havayla birlikte torba içine pompalanır. Bu iki hava sisteminin birleşik etkisiyle filtre silindiri temiz bölümü içinde çok ani ve kısa basınç artışı meydana gelir. Bu da, filtre elemanın lifleri arasında ters yönde hava akımı dolayısıyla yeterli temizleme sağlar.

Toplam filtre alanının çok az bir kısmı çok kısa süreli temizleme işlemine maruz kaldığından hesaplanan tasarım debisinin filtre grubundan devamlı geçişi temin edilmiş olur. Torbalı filtrelerin verimliliği, torba üzerinde belirli bir toz keki oluşuktan sonra %99'u geçmektedir. Bu noktadan sonra verimli filtrasyon işlemi torba yüzeyindeki toz keki sağlamaktadır. Torba temizleme işlemi, torba yüzeyindeki ince kek tabakasının temizlenmesine neden olmamalıdır.

Tozlu çalışmaya başlamadan önce, emiş hava kanallarında ve filtre gövdesinde hava kaçaklarının olup olmadığı kontrol edilmeli, elektrik bağlantıları gözden geçirilerek özellikle üfleme havalarının sıralama bağlantıları özel bir dikkatle incelenmelidir. Fan dönüş yönü kontrol edilerek, özellikle elektronik zamanlayıcı bağlantılarının enerji beslemesi ve selenoid valf sayısına göre zamanlayıcı ayarlarının doğru yapıldığı kontrol edilir. Torbalı filtrenin iç yapısı ve bölümleri Şekil 3.17'de gösterilmiştir [43]. Elektrostatik filtrelerdeki gibi yüksek gerilim transformatörleri torbalı filtrede bulunmamakta, bu da güvenli bir çalışma ortamı sunmaktadır. Her bölüme birbirinden bağımsız olarak bakım yapılabilir. Elektrostatik filtrelerde, meydana geldiğinde duruşa neden olan karbonmonoksit artışları torbalı filtrelerde yoktur. Torbalı filtrelerde tozun geri kazanım miktarı fazla ve hızlıdır. Torbalı filtrelerin avantajlarına rağmen, filtre fan motorunun sürekli çalışması ve filtre torbalarının pahalı olması gibi dezavantajları mevcuttur.



Şekil 3.17 : Torbalı filtrenin iç yapısı [43].

- | | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| 1. Filtre Torbası | 9. Filtre Gövdesi |
| 2. Filtre Torba Kafesi | 10. Tozlu Hava Bölümü |
| 3. Venturi | 11. Bunker |
| 4. Üfleme Boruları | 12. Döner Vana (Rotary Valf) |
| 5. Üfleme Delikleri | 13. Filtre Üst Gövdesi |
| 6. Elektronik Program Ünitesi | 14. Temizlenmiş Gaz Egzoz Çıkışı |
| 7. Selenoid Valf | 15. Dağıtıcı [43] |
| 8. Basınçlı Hava Tüpü | |

4. ELEKTROSTATİK FİLTRENİN FARKLI KORONA ELEKTROT ŞEKİLLERİ İÇİN VE FARKLI YÜKLERDEKİ ELEKTRİK ALANININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

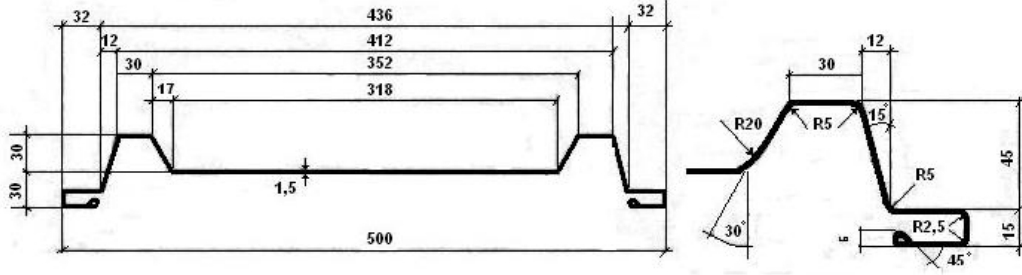
Elektrostatik filtrede verimliliğe etki eden en büyük faktörlerden biri korona elektrotudur. Korona elektrotunun şekli ve yerleşimi, enerji tüketimini, korona oluşumunu, göç hızını ve dolayısıyla toplama verimini etkiler. Bu bölümde, Oyak Bolu Çimento Sanayi A.Ş. bünyesinde bulunan farin tozu elektrostatik filtresinden bir kesit alınarak (2 plaka ve 1 elektrot) farklı geometrik yapıdaki korona elektrotları kullanarak ve filtre içinden su ve toz tanecığının geçişini modelleyerek, filtre içinde oluşan elektrik alan incelenmiştir. Modellemesi yapılan korona elektrotu ve toplama elektrotları (plakaları) Şekil 4.1’de görülmektedir. Şekil 4.2’de ise bir plakası alınmış durumda korona elektrotu ve toplama elektrotu görülmektedir. Çizimler, teknik resimlerine uygun ölçü ve şekillerde yapılmıştır (Şekil 4.3, Şekil 4.4). Korona ve toplama elektrotlarının teknik resimleri Ek-A’da verilmiştir.



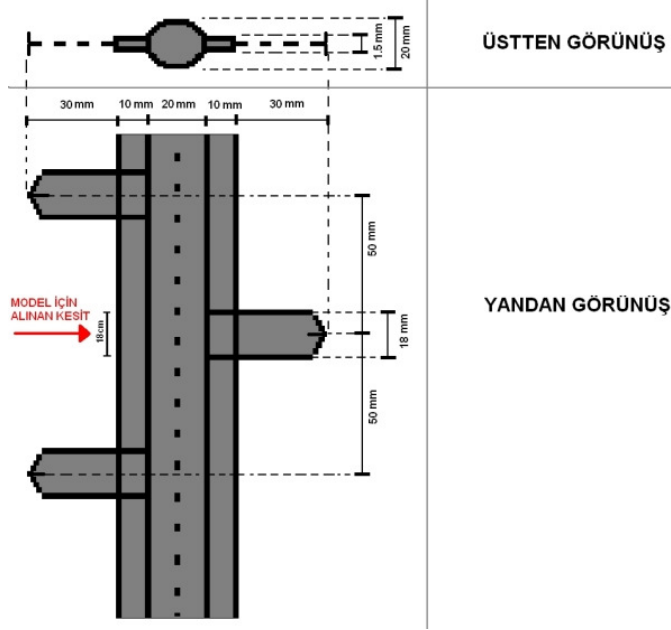
Şekil 4.1 : Korona ve toplama elektrotları.



Şekil 4.2 : Korona elektrotu.



Şekil 4.3 : Toplama elektrotunun orijinal teknik resimleri.



Şekil 4.4 : Korona elektrotunun geometrik yapısı ve ölçüleri.

4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

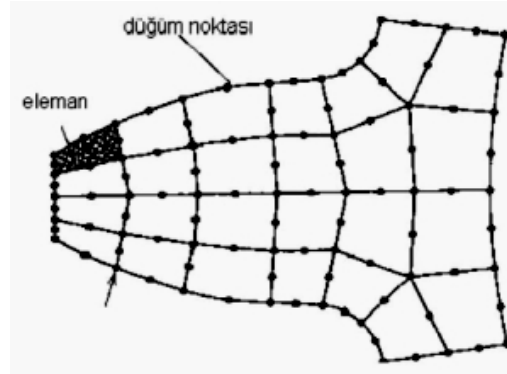
Sonlu elemanlar yönteminde incelemesi yapılacak yapı veya bölge, her birine sonlu eleman adı verilen birçok elemana veya bölgeye bölünür. Elemanlar "düğüm" adı verilen noktalarda birleşirler (Şekil 4.5). Eleman içinde göz önüne alınan yaklaşım işlevleriyle, bilinmeyen düğümler için bir cebirsel denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler düğüm noktalarındaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu büyüklükte bir lineer cebirsel denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılar.

Sonlu elemanlar yönteminde ilke, sürekli fonksiyonlar yerine bölgesel (ayrık) sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) kullanmaktır. Bu sayede bir eleman içinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin deplasmanın) değeri, o elemanın

düğümlemlerindeki değerleri kullanarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle, sonlu elemanlar yönteminde bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler düğümlemlerdeki değerlerdir. Bir varyasyonel ilke (örneğin; enerjinin minimum olması ilkesi) kullanarak alan büyüklüklerinin düğümlemlerdeki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris biçiminde gösterimi;

$$[K].[D] = [R] \quad (4.1)$$

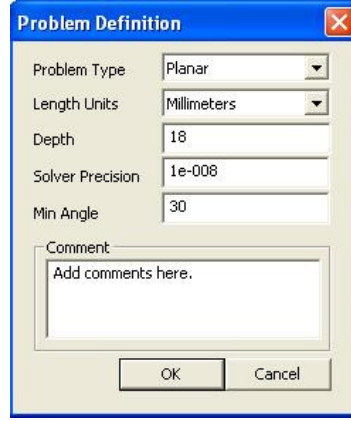
şeklindedir. Burada [D] alan büyüklüklerinin düğümlemlerdeki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör (sütun matris), [R] bilinenler vektörü (sütun matrisi) ve [K] ise bilinen sabitler (katsayılar) matrisidir. Gerilme analizinde [K] rijitlik matrisi olarak bilinmektedir [44].



Şekil 4.5 : Bir sonlu elemanlar ağında elemanlar ve düğüm noktaları [44].

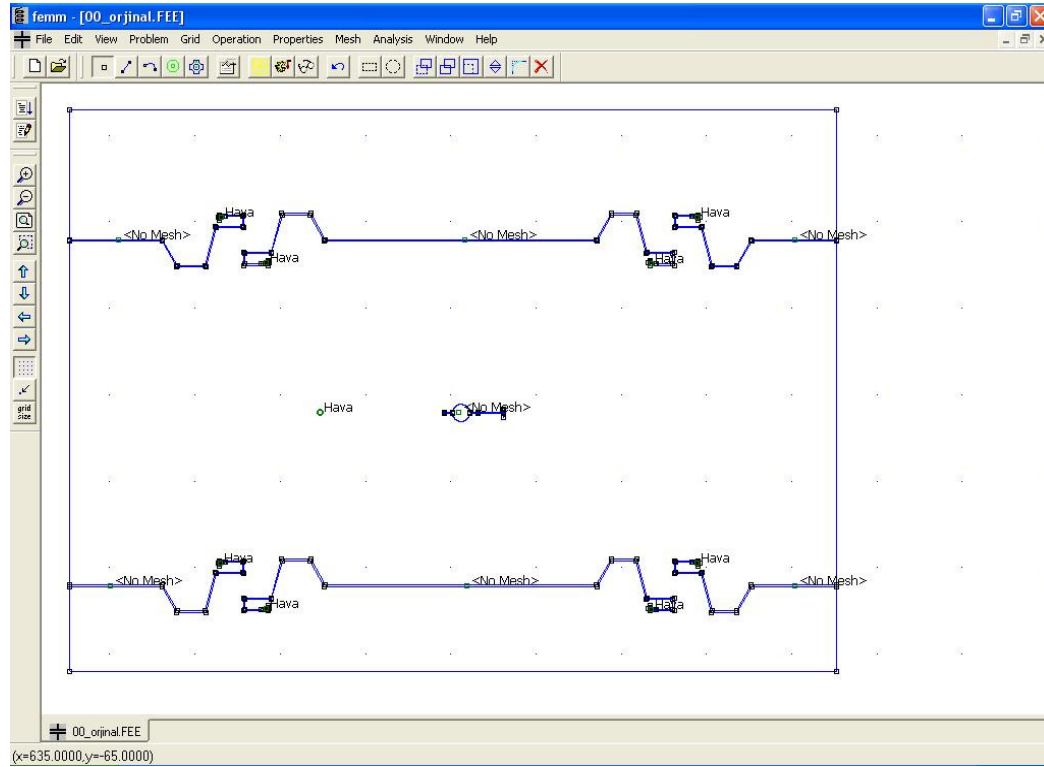
4.2 Modelleme Parametreleri ve Modellemenin Oluşturulması

Çözümlemesi sonlu elemanlar yöntemine dayanan FEMM (Finite Element Method Magnetics) adlı bilgisayar programı ile ilk önce ölçülere göre noktalar oluşturulup, teknik resime göre noktalar düz çizgilerle ve kavisli çizgilerle birleştirilerek problemin şekli çizilmiştir. Filtreye hava girişinin sol taraftan olduğu kabul edilmiştir. Problem tanımlamalarında uzunluk birimi olarak milimetre, derinlik olarak 18 mm ve minimum eleman iç açısı olarak 30 derece seçilmiştir (Şekil 4.6). Derinliğin 18 mm seçilmesinin nedeni, korona elektrotu üzerinde 50 mm arayla bulunan uzantıların boyunun 18 mm olmasıdır (Şekil 4.4).

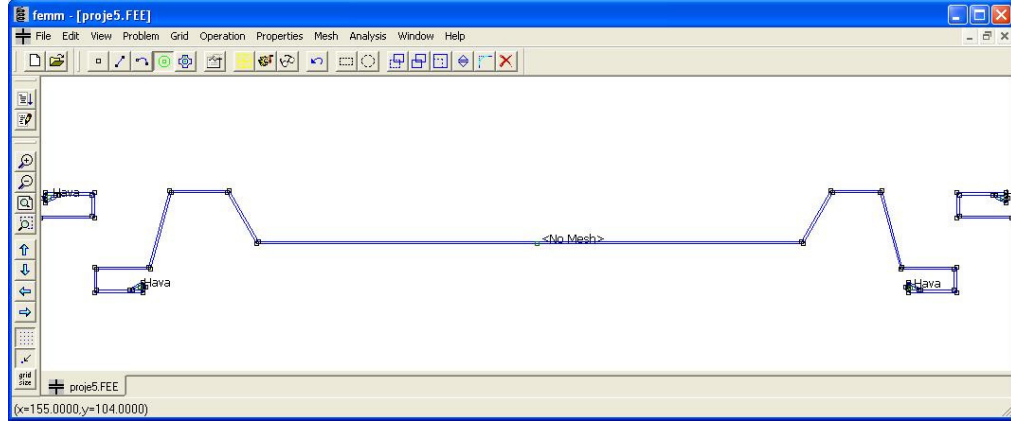


Şekil 4.6 : Problem tanımlamaları.

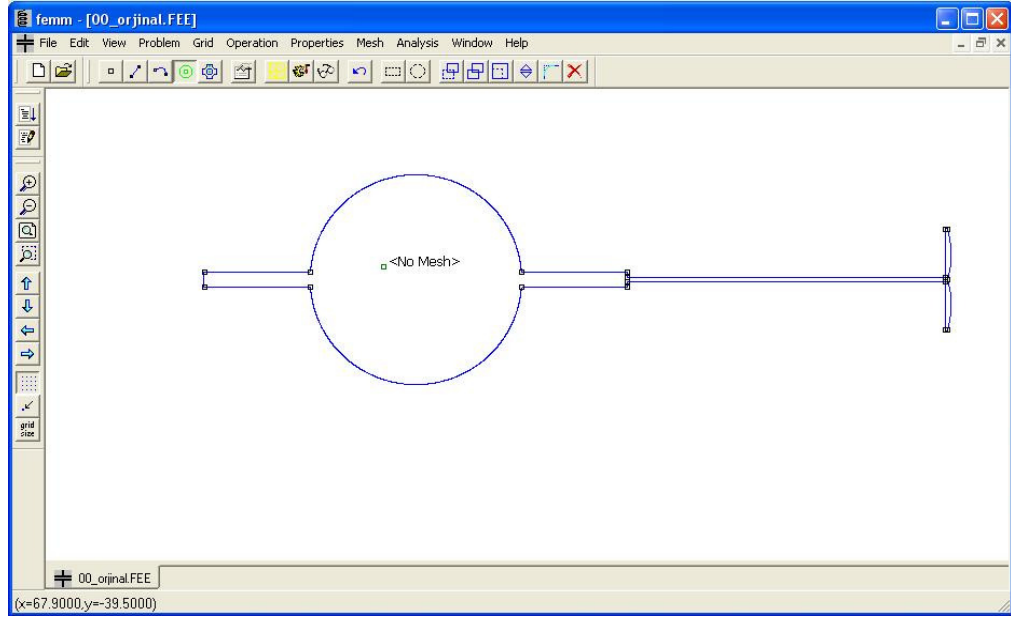
Gerekli yerlerde ağ oluşturulması için bölgelerin tanımlaması yapılmış, iletken ve yalıtkan bölgeler belirlenmiş ve malzeme özellikleri atanmıştır (Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9).



Şekil 4.7 : FEMM’de gerçek ölçülerde çizilmiş korona elektrotu ve plakalar.

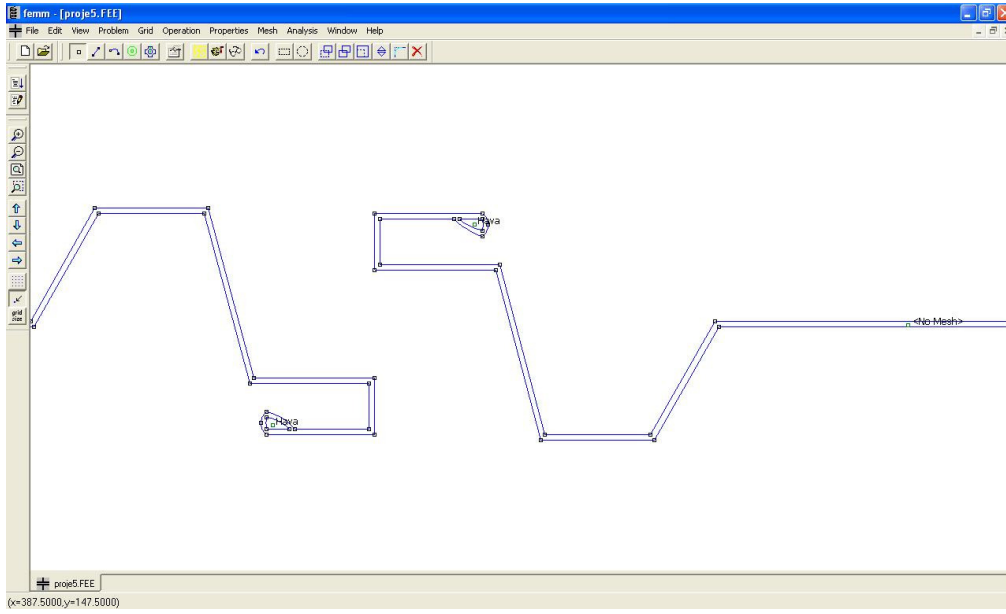


Şekil 4.8 : Toplama elektrotunun (plakasının) çizimi.



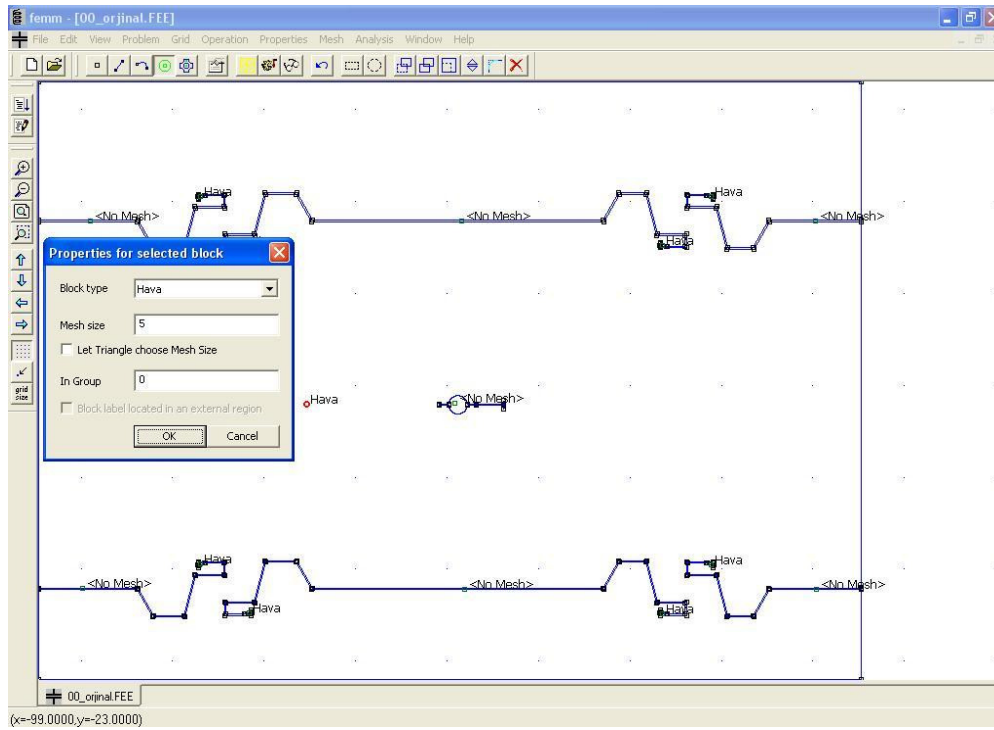
Şekil 4.9 : Korona elektrotunun yakından görünümü.

Şekil 4.10’da görüldüğü gibi toplama elektrotunun çevresindeki malzeme “hava” olarak tanımlanmıştır. Ayrıca iletken içlerinde “No Mesh” seçilerek ağ oluşturulmamıştır.



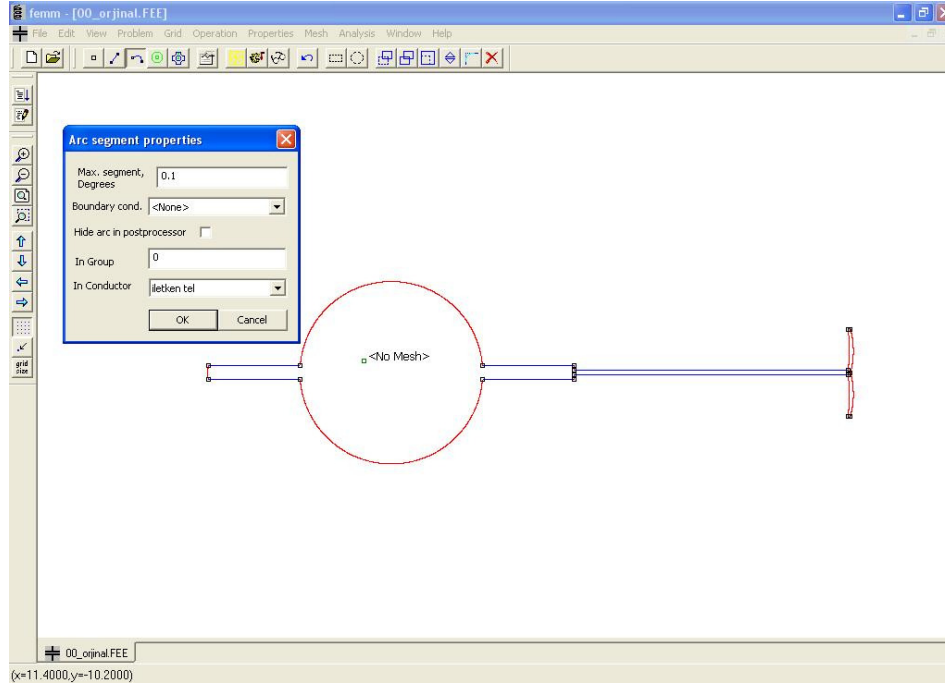
Şekil 4.10 : Toplama elektrotu çiziminde malzeme tanımları.

Sonlu elemanlar yönteminin en önemli adımlarından biri ağ oluşturulmasıdır. Burada hava için ağ değeri 5 seçilmiştir (Şekil 4.11). Böylece daha çok sonlu elemanlı bir analiz gerçekleştirilmiştir.



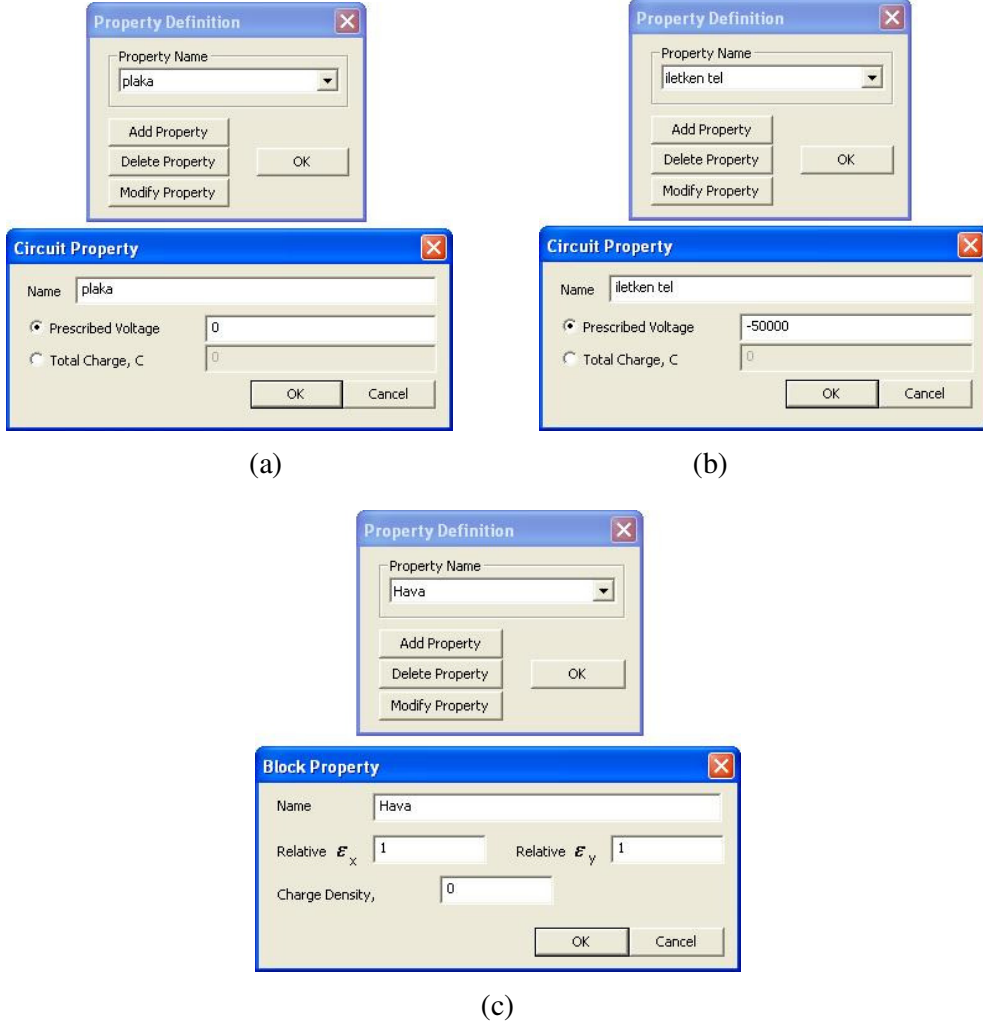
Şekil 4.11 : Hava ortamı için ağ değeri seçimi.

Elektrostatik filtrenin en önemli bölümü olan korona elektrotunda, özellikle yüzeydeki yuvarlak kısımlarında maksimum dilim ve açısı olarak 0,1 değeri seçilmiş ve bu bölgelerde daha doğru analizi hedeflenmiştir (Şekil 4.12).



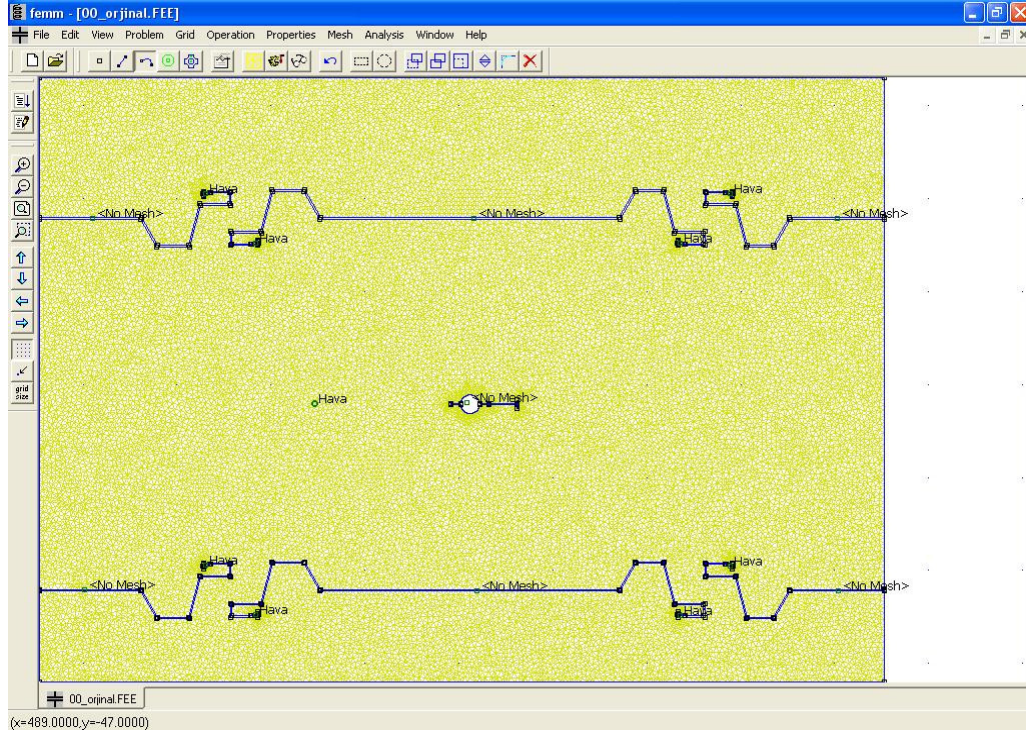
Şekil 4.12 : Korona elektrotu yüzeyi için ağ değerlerinin seçimi.

Şekil 4.13’de elektrostatik filtre modellemesinde bulunan malzemelerin tanımlanan özellikleri görülmektedir. Şekil 13 (a)’da toplama elektrotu (plaka) tanımlanmış ve gerilim değeri olarak 0 V alınmıştır. Şekil 4.13 (b)’de korona elektrotu (iletken tel) tanımlanmış ve gerilim değeri olarak -50.000 V alınmıştır. Şekil 4.13 (c)’de havanın bağıl dielektrik katsayısı 1 olarak tanımlanmış ve yük yoğunluğu 0 olarak seçilmiştir.

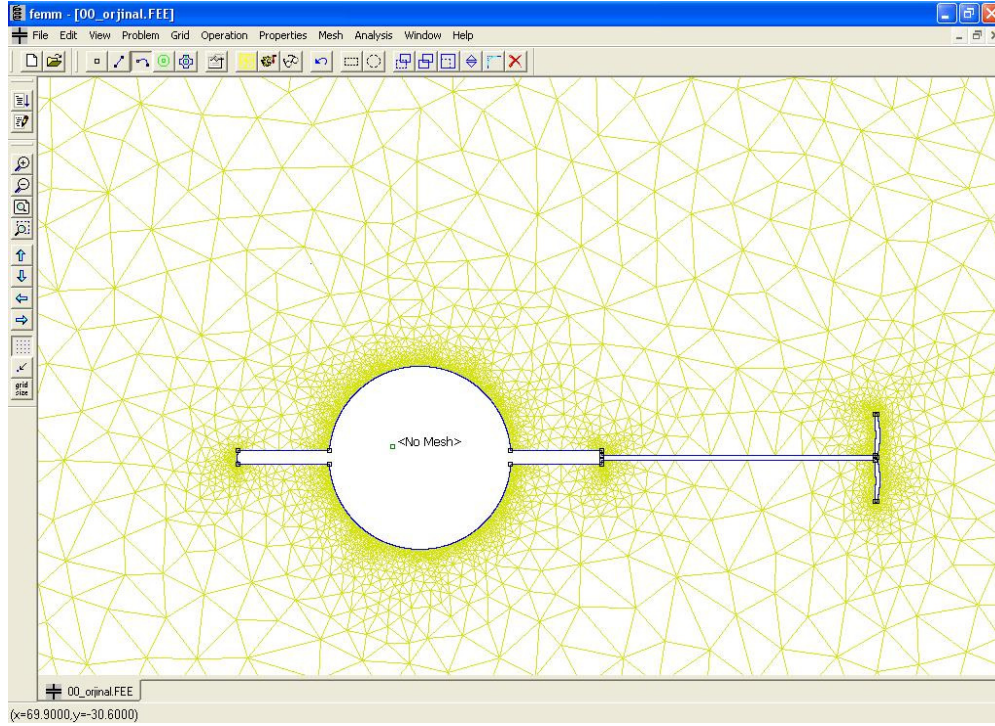


Şekil 4.13 : Modelde kullanılan malzemelerin tanımlanan değerleri
(a) plaka (b) iletken tel (c) hava.

Atanmış olan değerler ile oluşturulmuş ağ yapısı Şekil 4.14'te görülmektedir. Ayrıca korona elektrotunda sivri kısımlardaki yoğunlaşmış ağ yapısı da Şekil 4.15'te görülmektedir.

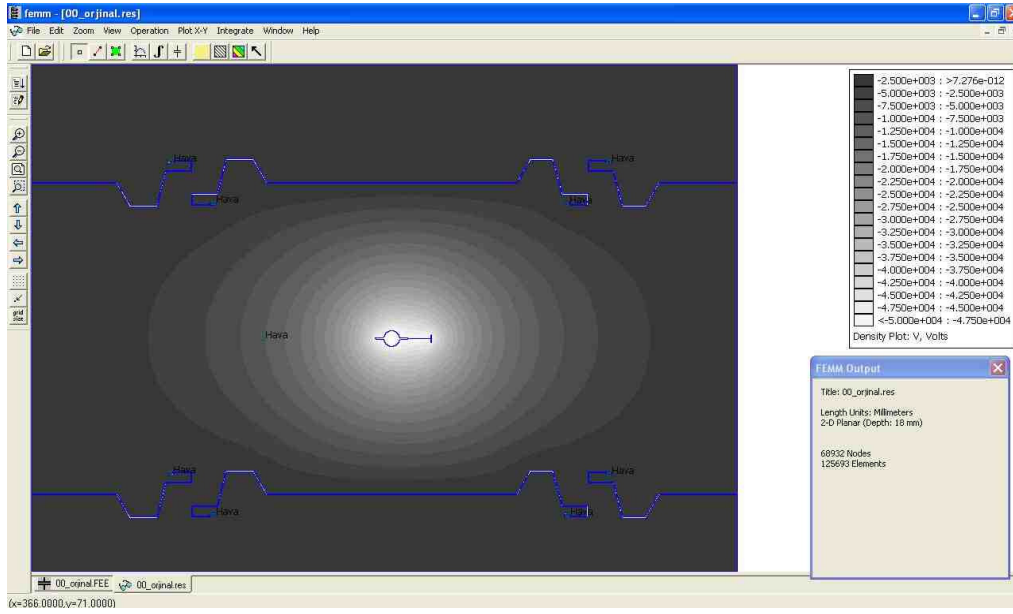


Şekil 4.14 : Korona ve toplama elektrotu sistemi için oluşturulmuş ağ yapısı.



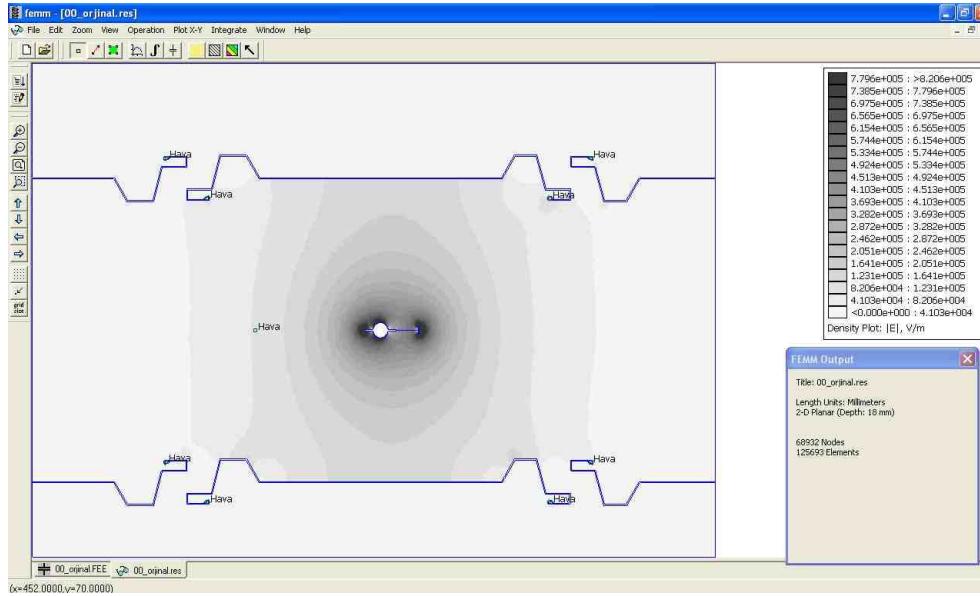
Şekil 4.15 : Korona elektrotu çevresinde yoğunlaşmış ağ yapısı.

Korona elektrotuna uygulanan -50 kV değeri ve gerilimin hava içindeki dağılımı Şekil 4.16’da görülmektedir. Değerler renk kuşağından görülebileceği gibi -50 kV gerilimi açık renk, 0 V değeri ise siyah olarak görülmektedir.

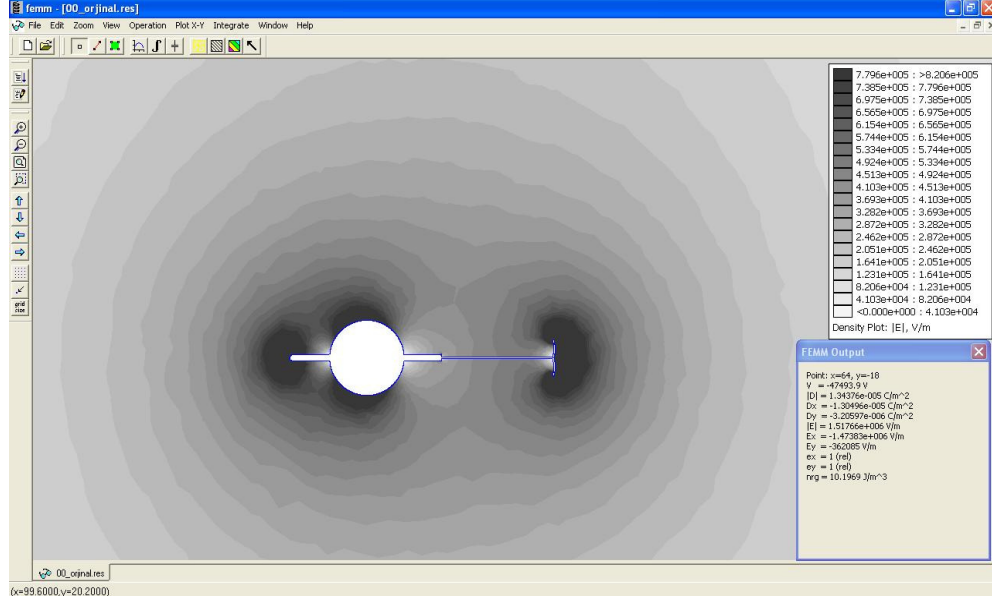


Şekil 4.16 : Korona elektrodu çevresindeki potansiyel dağılımı.

Oluşturulmuş uygulamanın elektrik alan dağılımı Şekil 4.17’de görülmektedir. Korona elektrodunun çevresindeki elektrik alan dağılımı Şekil 4.18’de görülmektedir. Elektrik alanının daha belirgin görülmesi amacıyla, gerilim seviyesinin baremi %10 oranında düşürülmüştür. Burada maksimum elektrik alan değeri 8.206.000 V/m (8,2 kV/cm) olarak görülmektedir.



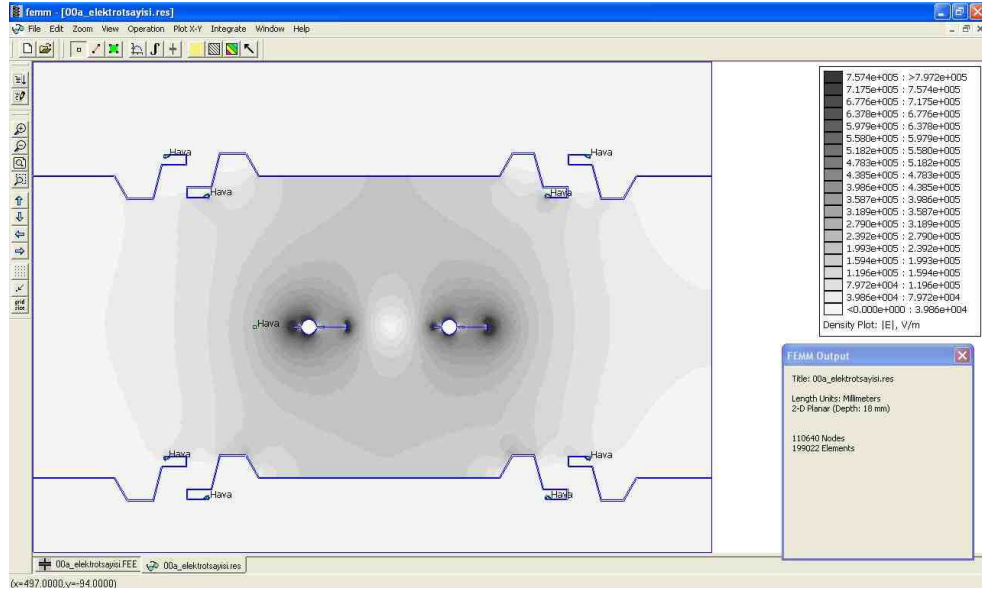
Şekil 4.17 : Sistemin elektrik alan dağılımı.



Şekil 4.18 : Korona elektrodu çevresindeki elektrik alan dağılımı.

4.3 Elektrostatik Filtre İçindeki Korona Elektrot Yapısının ve Farklı Malzemelerin Davranışının İncelenmesi

4.3.1 Korona elektrot sayısının artırılması

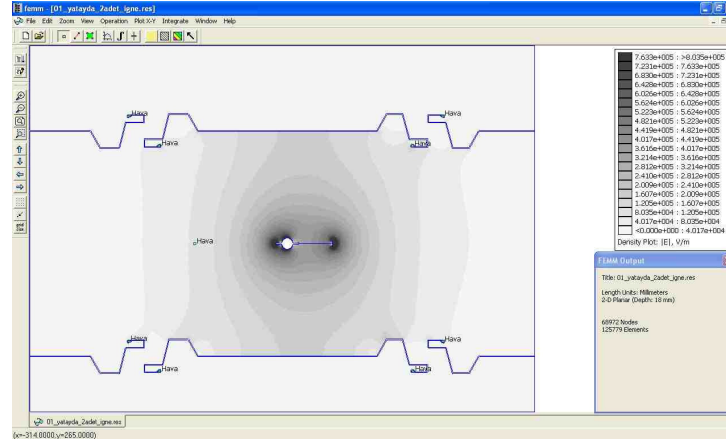


Şekil 4.19 : İki korona elektrotlu model.

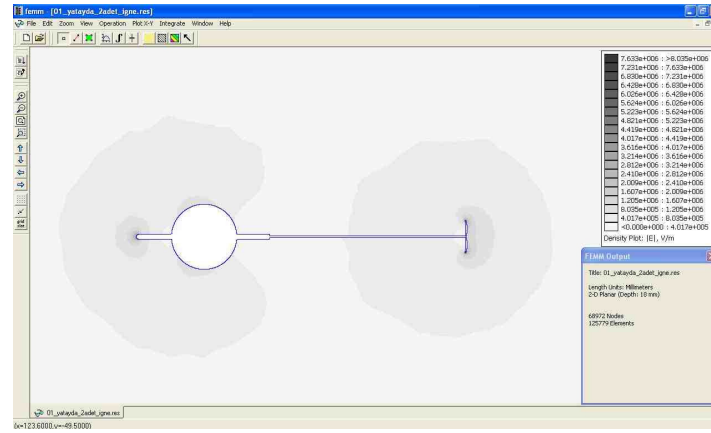
İki adet aynı tip korona elektrotu kullanarak, $E_{\max}$ değeri 7.972.000 V/m olarak elde edilmiştir. Burada amaç korona elektrotlarının yakın diziliminin etkisini incelemektir. Tek korona elektrotlu sistemle karşılaştırıldığında elektrik alanın daha geniş alana yayıldığı ve $E_{\max}$ maksimum elektrik alan şiddeti değerinin daha düşük

değerde olduğu görülmektedir. Şekil 4.19'da iki korona elektrotlu sistemin elektrik alanı görülebilmektedir.

4.3.2 Korona elektrotlarındaki iğnelerin farklı şekillerde incelenmesi



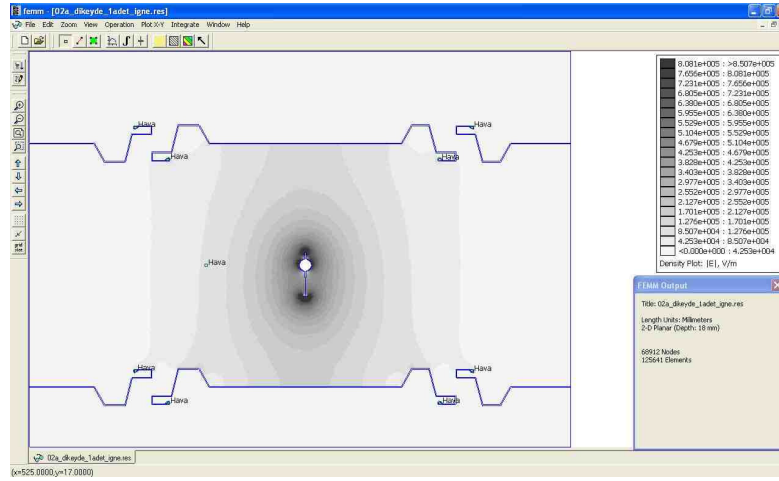
(a)



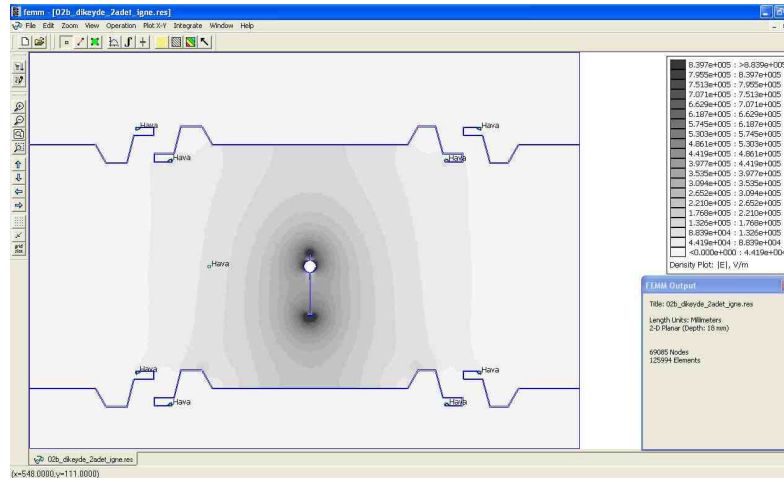
(b)

Şekil 4.20 : Korona elektrotundaki iğnelerin yatayda iki kat uzaması (a) elektrik alanının genel görünümü (b) korona elektrotundaki elektrik alan.

Korona elektrotunda bulunan iğne uzunluğunun yatayda iki katı artırılması ile oluşan E_{max} maksimum elektrik alan şiddeti değeri 8.035.000 V/m olarak görülmektedir (Şekil 4.20). Normal uzunlukta iğne bulunan korona elektrotuyla kıyaslandığında elektrik alanın daha geniş alana yayıldığı ve E_{max} değerinin daha düşük olduğu görülebilmektedir.



(a)

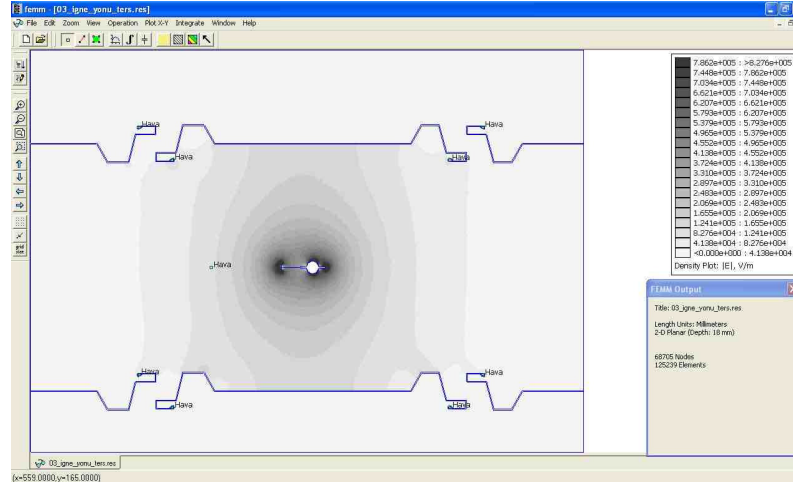


(b)

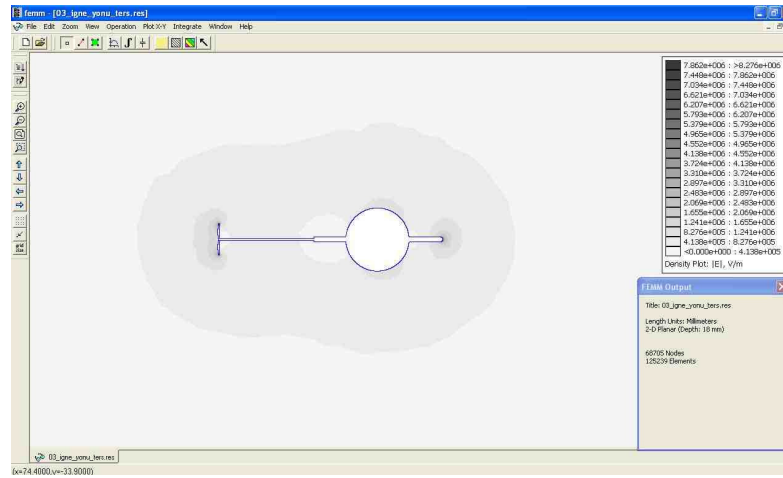
Şekil 4.21 : Korona elektrotundaki iğnelerin düşeyde uzaması (a) normal uzunlukta elektrik alanın genel görünümü (b) iki kat uzunlukta elektrik alanın genel görünümü.

Korona elektrotunda bulunan iğne uzunluğu, düşeyde normal uzunlukta iken E_{max} değeri 8.507.000 V/m, iki katı uzunken E_{max} değeri 8.839.000 V/m olarak görülmektedir. Şekil 4.21’de korona elektrotundaki iğnenin dikeyde aşağıya doğru uzamış şekli görülebilmektedir. Aşağıya doğru uzamış olan elektrot iğneleri, elektrik alanının aşağıya doğru genişlemesini sağlamıştır fakat normal boyuttaki korona elektrotuna göre daha yüksek E_{max} değerlerine sahiptirler. Korona elektrotunun toplama elektrotuna yakın olması oluşabilecek gerilim atlamalarının daha erken oluşmasına neden olabilecektir. Bu geometrik yapıya sahip bir korona elektrotu, tozlu havanın akışını engelleyeceğinden, hava akış dağılımını değiştirip toplaşmaya

neden olacağından ve dolayısıyla kapasite ve verimi azaltacağından bu şekildeki bir yerleşim çok uygun değildir.



(a)



(b)

Şekil 4.22 : Korona elektrotundaki yatay doğrultudaki iğneler (a) elektrik alanının genel görünümü (b) korona elektrotundaki elektrik alan.

Korona elektrotu üzerindeki iğnenin yatay doğrultuda olması durumunda E_{max} değeri 8.276.000 V/m olarak okunmaktadır. Şekil 22’de korona elektrotundaki iğnenin hava akışına ters olduğu durumda elektrik alanlar görülmektedir. Fakat bu yapıdaki bir sistemde, korona elektrotunun iğne çıkıntısının hava akışına ters yönde olmasından dolayı, parçacıkların yüklenmesi biraz daha geç olup, göç hızının daha geç başlamasına neden olmasıyla daha düşük toplama verimi elde edilmesi muhtemeldir.

Çizelge 4.1’de farklı yapılarıdaki korona elektrotunun maksimum elektrik alan şiddeti görülmektedir. Burada en yüksek maksimum elektrik alan şiddetinin, elektrot

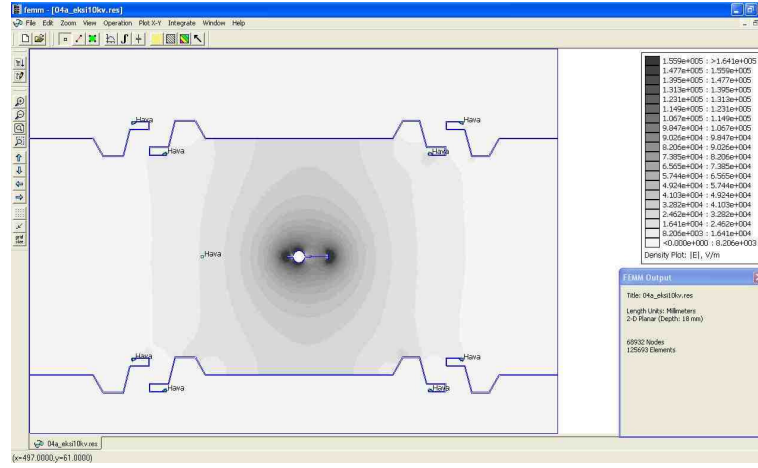
üzerinde düşeyde iki adet iğne bulunması durumunda meydana geldiği görülmektedir. Filtre yapısında iki adet korona elektrotu olması durumunda düşük $E_{\max}$ değeri oluştuğu ve elektrik alanının da diğer yapılara göre daha geniş alana yayıldığı görülmektedir. Aynı şekilde elektrot üzerindeki iğnenin normalin iki katı uzunluğunda olması durumunda $E_{\max}$ düşük olup, elektrik alan dağılımı daha geniş alana yayılmaktadır.

Çizelge 4.1 : Farklı korona elektrotu yapılarında $E_{\max}$ değerleri.

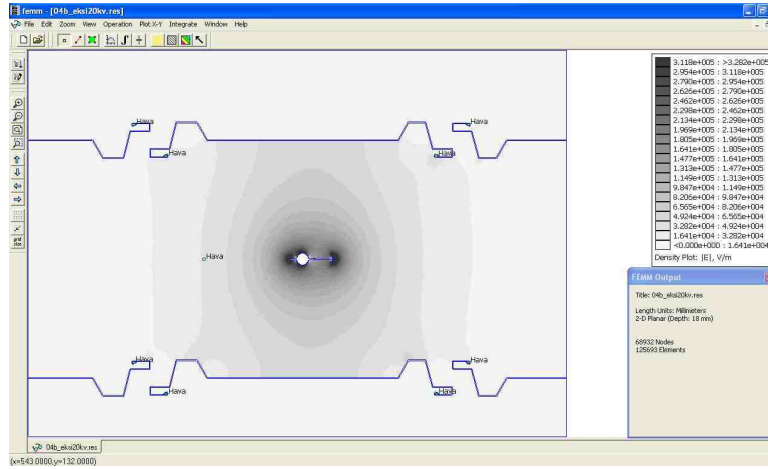
Korona Elektrotunun Yapısı	Maksimum Elektrik Alan Şiddeti ($E_{\max}$) (V/m)
Orijinal yapıdaki elektrot (yatayda bir adet iğne)	8.206.000
Yatayda iki adet korona elektrotu	7.972.000
Elektrotta yatayda iki adet iğne	8.035.000
Elektrotta düşeyde bir adet iğne	8.507.000
Elektrotta düşeyde iki adet iğne	8.839.000
Elektrotta iğne yönü ters	8.276.000

4.3.3 Farklı besleme gerilimlerinde elektrik alanın incelenmesi

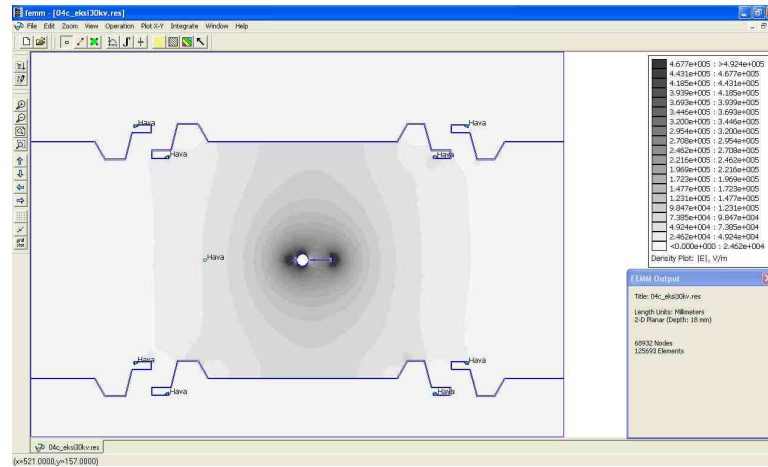
Bu bölümde, korona elektroduna sırasıyla -10 kV, -20 kV, -30 kV, -40 kV ve -50 kV gerilim uygulanması durumunda elektrik alan dağılımları incelenmiştir. Elde edilen elektrik alan dağılımları Şekil 4.23’de görülmektedir.



(a)

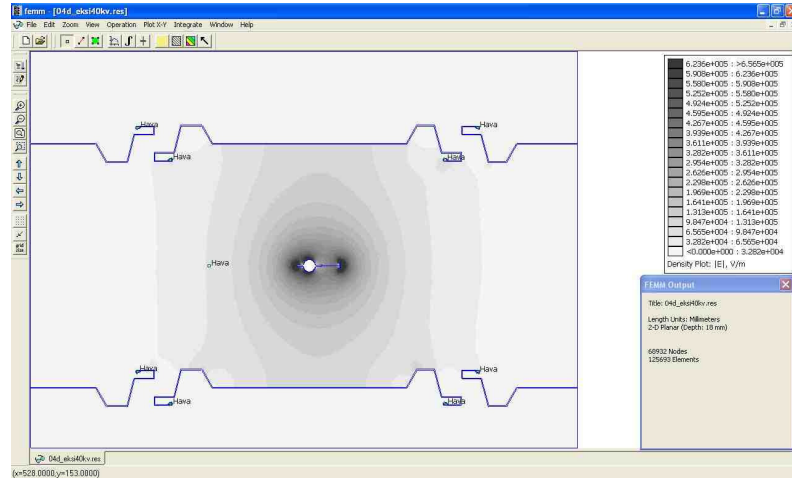


(b)

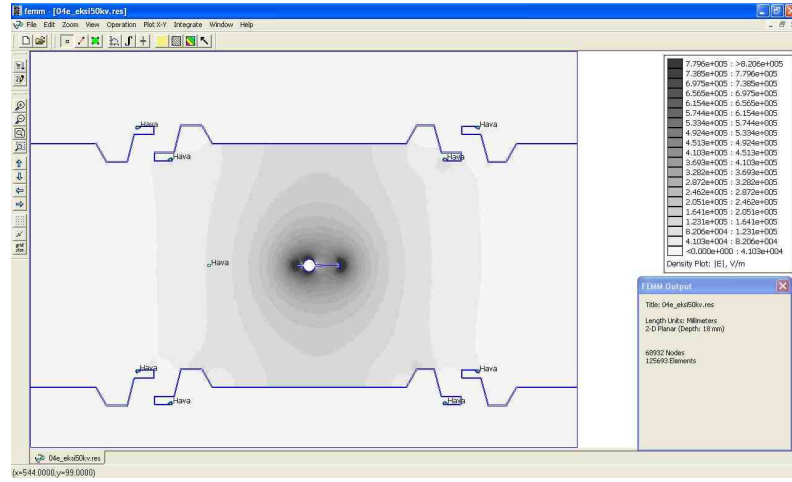


(c)

Şekil 4.23 : Korona elektrotuna farklı seviyede gerilimler uygulanması durumunda elektrik alan dağılımları (a) -10 kV (b) -20 kV (c) -30 kV (d) -40 kV (e) -50 kV.



(d)



(e)

Şekil 4.23 (Devam) : Korona elektrotuna farklı seviyede gerilimler uygulanması durumunda elektrik alan dağılımları (a) -10 kV (b) -20 kV (c) -30 kV (d) -40 kV (e) -50 kV.

Çizelge 4.2 : Farklı besleme gerilimleri için bulunan E_{max} değerleri.

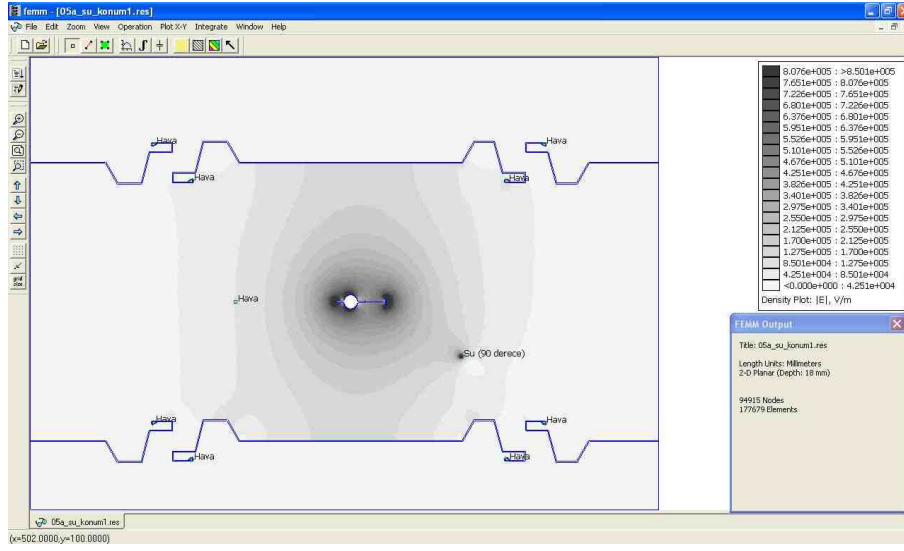
Elektrotunun Besleme Gerilimleri (kV)	Maksimum Elektrik Alan Şiddeti (E_{max}) (V/m)
-10 kV	1.641.000
-20 kV	3.282.000
-30 kV	4.924.000
-40 kV	6.565.000
-50 kV	8.206.000

Burada korona elektrot besleme gerilimleri incelenmiştir. Artan besleme gerilimleriyle elektrik alan şiddetinin de arttığı görülmektedir. Elektrostatik filtrenin toplama verimi, göç hızına, göç hızı da elektrik alana bağlıdır. Çizelge 4.2’de

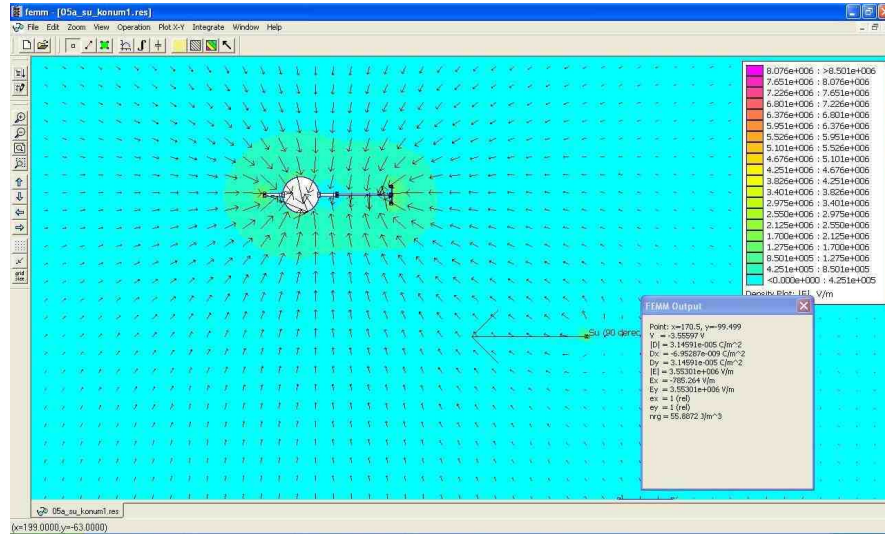
görüldüğü gibi, en yüksek elektrik alan en yüksek gerilimin korona elektrotuna uygulanmasıyla elde edilmektedir. Atlama gerilim seviyesine ulaşmayacak en yüksek gerilimin, korona elektrotuna uygulanması filtre verimi açısından önemlidir.

4.3.4 Su damlasının (nemin) hareketiyle elektrik alanın incelenmesi

Elektrostatik filtre içinden geçen havanın nemli olması durumunda elektrik alanın nasıl etkileneceği bu kısımda incelenecektir. Bu amaçla 1 mm çapında 90°C’de bir su damlacığının elektrostatik filtre içinde beş konumda ilerleyişi incelenecektir. Burada 90°C’deki suyun bağıl dielektrik katsayısı 60 olarak alınmıştır. Şekillerde her konum için genel elektrik alan dağılımı ve vektörlerle alan şiddeti görülmektedir (Şekil 4.24-4.25-4.26-4.27-4.28).

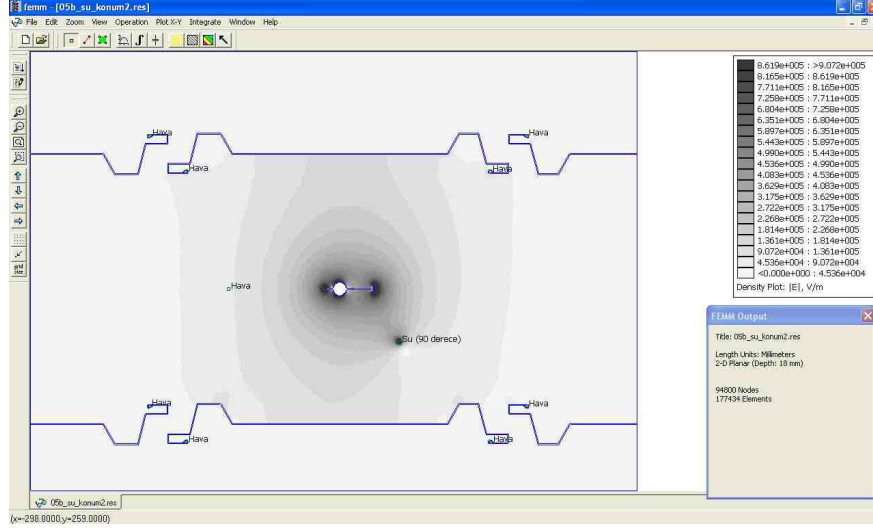


(a)

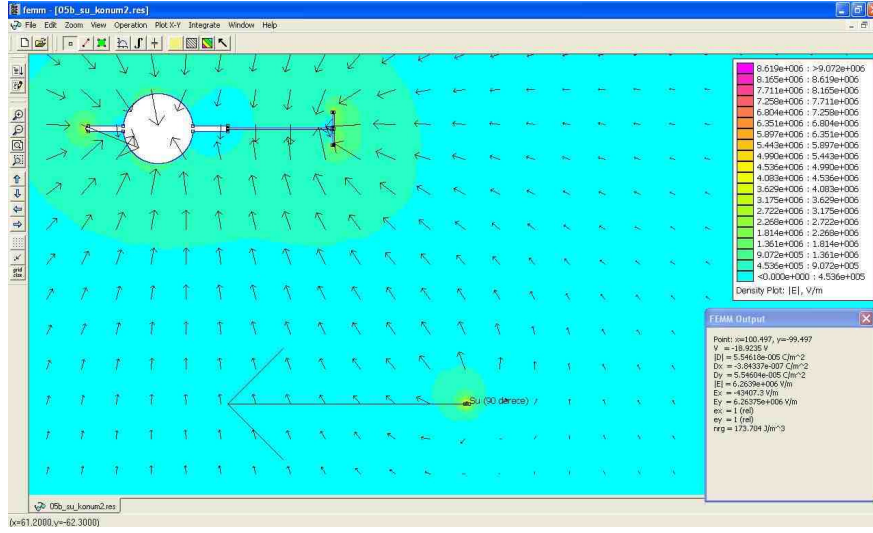


(b)

Şekil 4.24 : Su damlasının 1. konumdaki durumu (a) elektrik alanın genel görünümü
(b) elektrik alan şiddetinin vektörlerle görünümü.



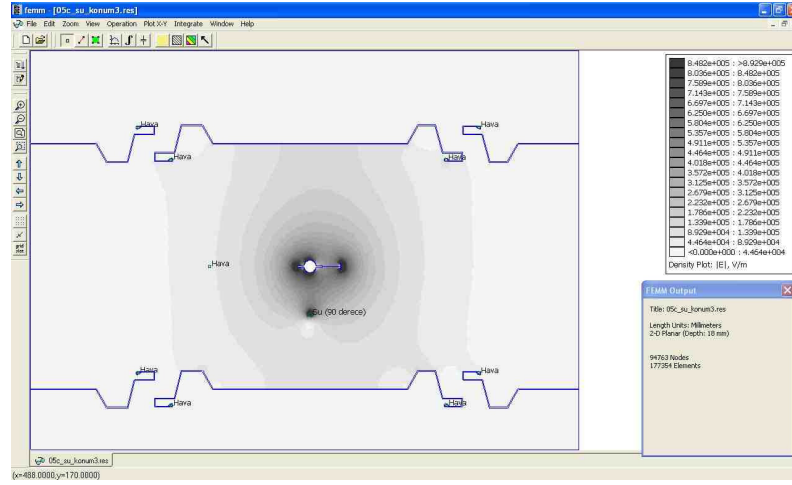
(a)



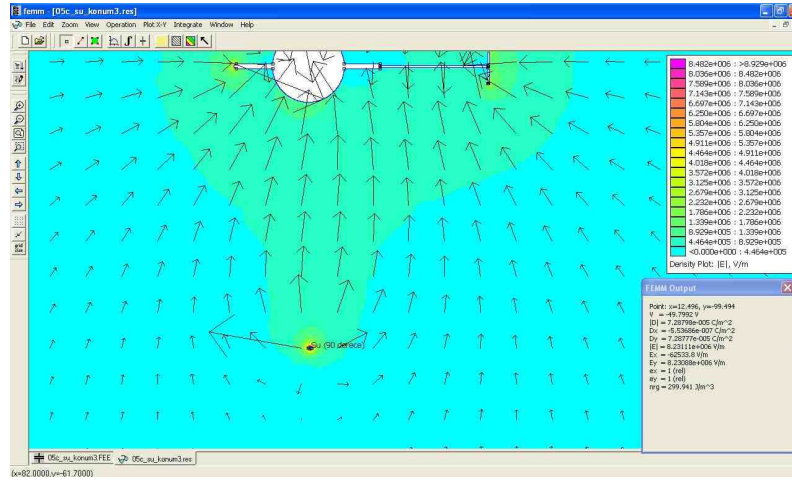
(b)

Şekil 4.25 : Su damlasının 2. konumdaki durumu (a) elektrik alanın genel görünümü
(b) elektrik alan şiddetinin vektörlerle görünümü.

Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de su damlasının elektrostatik filtre çıkışına doğru ilerlediği durumda elektrik alan dağılımı görülmektedir.

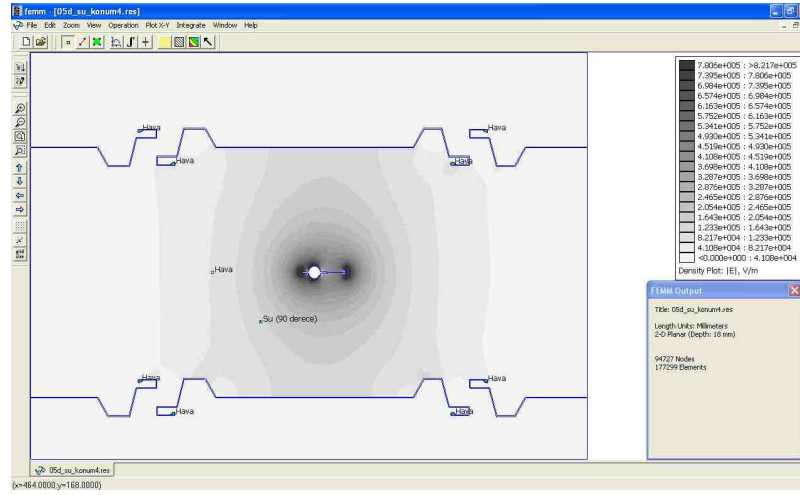


(a)

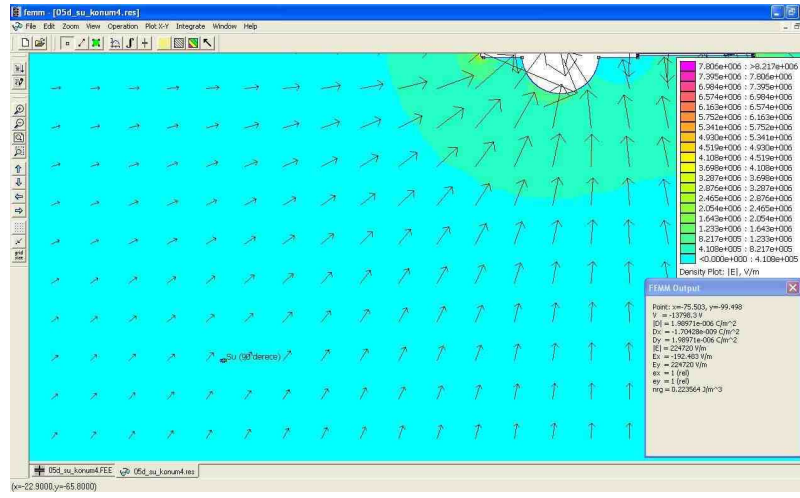


(b)

Şekil 4.26 : Su damlasının 3. konumdaki durumu (a) elektrik alanın genel görünümü
(b) elektrik alan şiddetinin vektörlerle görünümü.

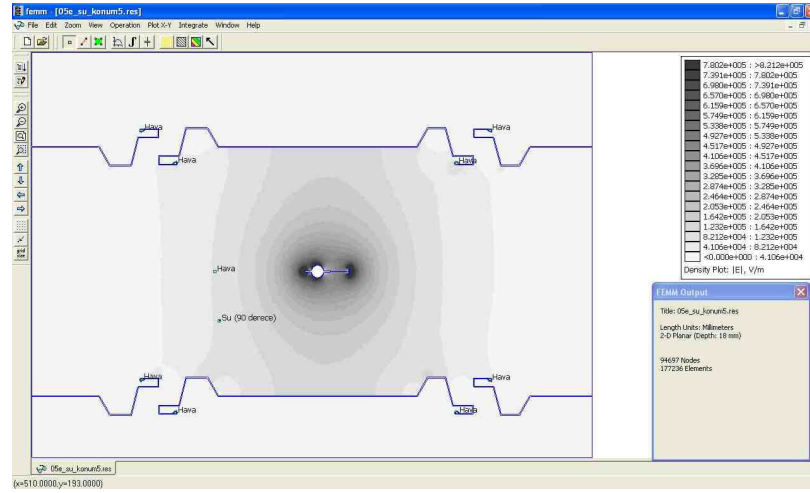


(a)

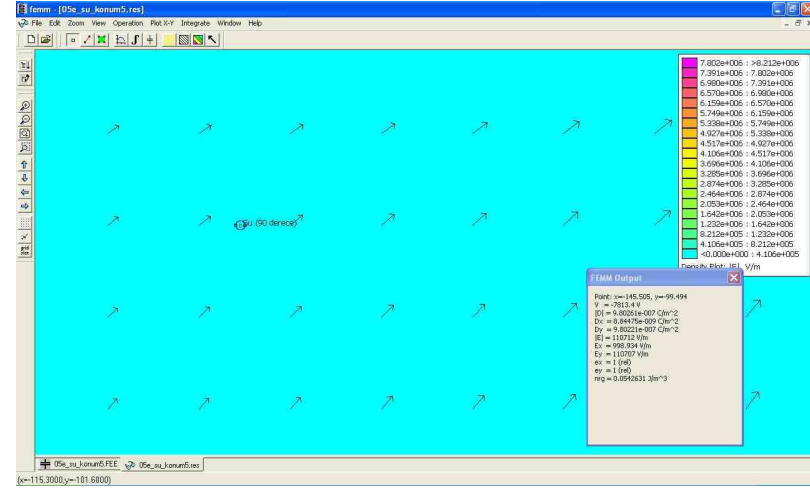


(b)

Şekil 4.27 : Su damlasının 4. konumdaki durumu (a) elektrik alanının genel görünümü
(b) elektrik alan şiddetinin vektörlerle görünümü.

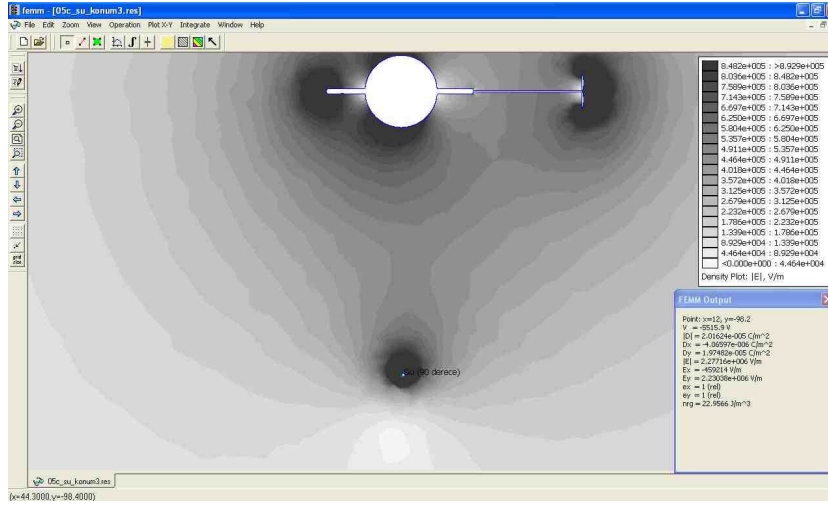


(a)



(b)

Şekil 4.28 : Su damlasının 5. konumdaki durumu (a) elektrik alanın genel görünümü
(b) elektrik alan şiddetinin vektörlerle görünümü.



Şekil 4.29 : Su damlasının 3. konumdaki yakın görünümü.

Çizelge 4.3 : Su taneciğinin hareketi sırasında $E_{\max}$ değerleri.

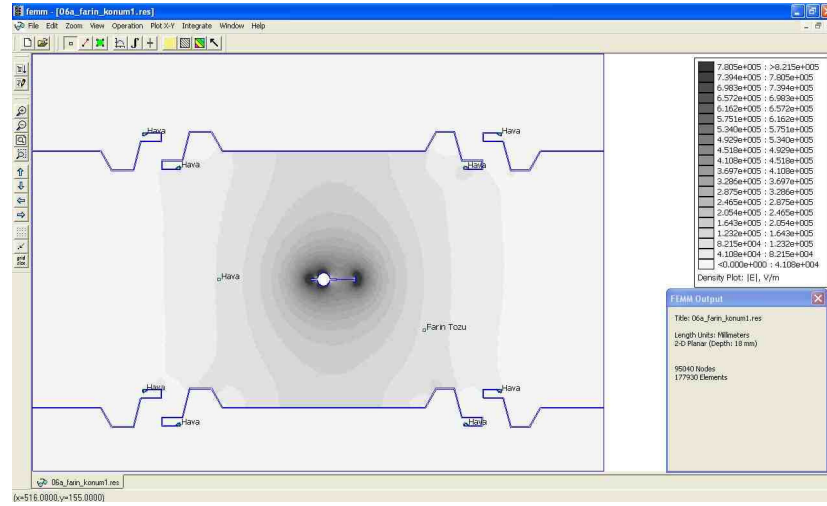
Elektrostatik Filtre İçindeki Su Taneciğinin Konumu	Maksimum Elektrik Alan Şiddeti ($E_{\max}$) (V/m)
1. Konum	8.501.000
2. Konum	9.072.000
3. Konum	8.929.000
4. Konum	8.217.000
5. Konum	8.212.000

Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi elektrostatik filtre içinde ilerleyen su damlası, korona elektrotuna yaklaştıkça maksimum elektrik alan şiddeti artmaktadır. Şekil 4.29'da görülebildiği gibi, su damlacığı elektrik alan dağılımını artırmaktadır. Bu durumda, normal çalışma koşullarında, atlama gerilimine yakın çalışma seviyelerinde, su damlası içeren malzemenin elektrostatik filtre içinden geçişi sırasında maksimum elektrik alanın artması ve dolayısıyla korona elektrotlarından toplama elektrotlarına doğru atlama meydana gelmesi olasıdır. Bu durumda toz tutma verimi düşecek ve atmosfere atılan havanın kirli hava olduğu görülecektir.

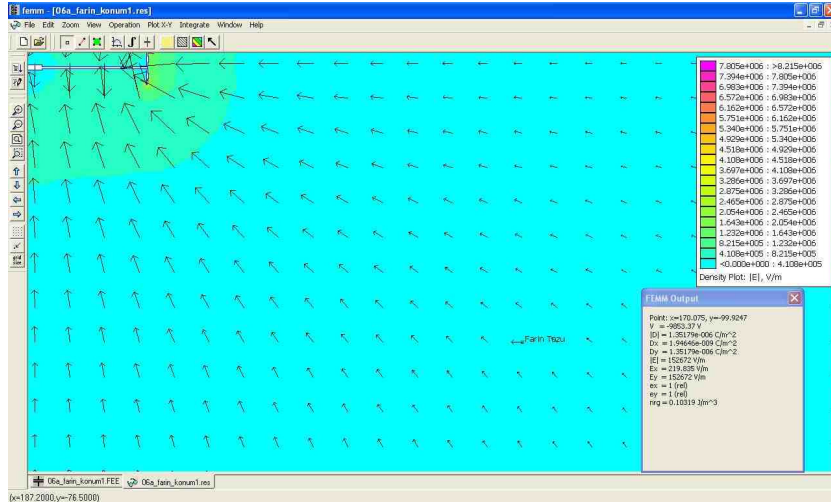
4.3.5 Farin tozunun hareketiyle elektrik alanın incelenmesi

Bu kısımda elektrostatik filtre içinden geçmekte olan havadaki farin tozunun, filtre içinde ilerlemesi durumunda elektrik alanın nasıl etkileneceği incelenecektir. Çimento hammaddesi olan klinkerin üretilmesinde kullanılan farin tozu için bağıl dielektrik katsayısı olarak 10 alınmıştır. Tozun boyutu, işletmeden alınan numunelerin tanecik dağılımı çıkartılarak saptanmış ve yaklaşık en büyük toz çapı

olan 150 μm değeri modellemeye kullanılmıştır. Tane dağılım raporu Ek-B’de bulunmaktadır. Bu raporda en büyük parçacık boyutu olarak 146 μm görülmektedir. Şekillerde her konum için genel elektrik alan dağılımı ve vektörlerle alan şiddeti görülmektedir (Şekil 4.30-4.31-4.32-4.33-4.34).

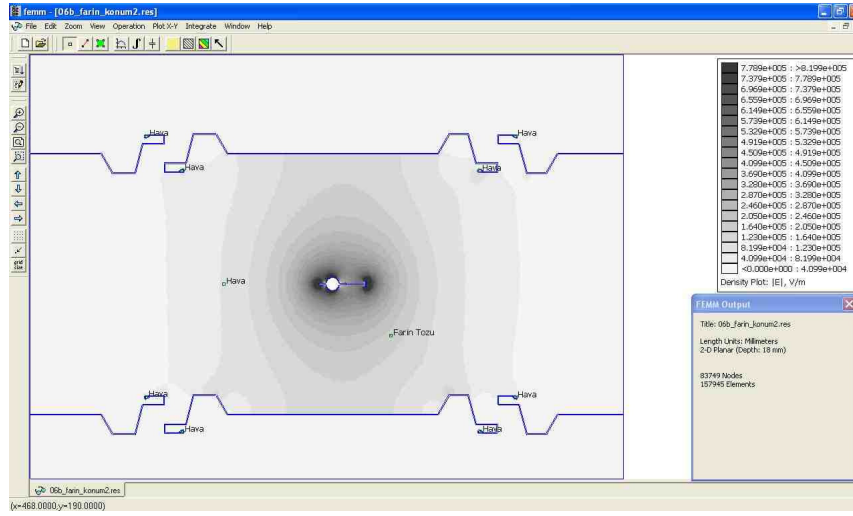


(a)

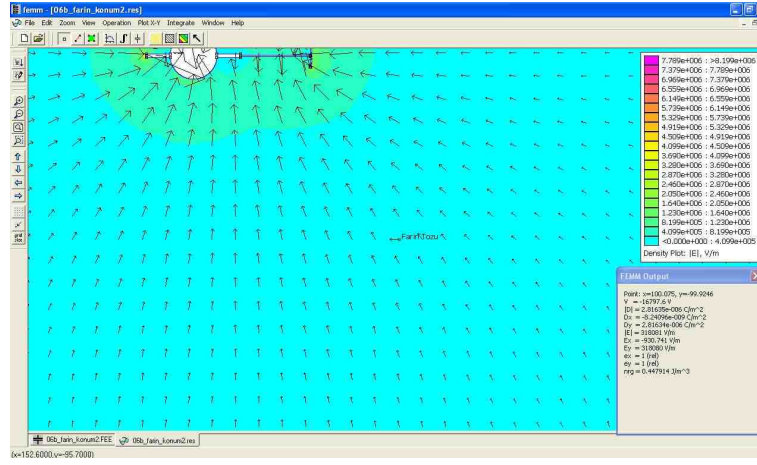


(b)

Şekil 4.30 : Farin tozunun 1. konumdaki durumu (a) elektrik alanının genel görünümü
(b) elektrik alan şiddetinin vektörlerle görünümü.

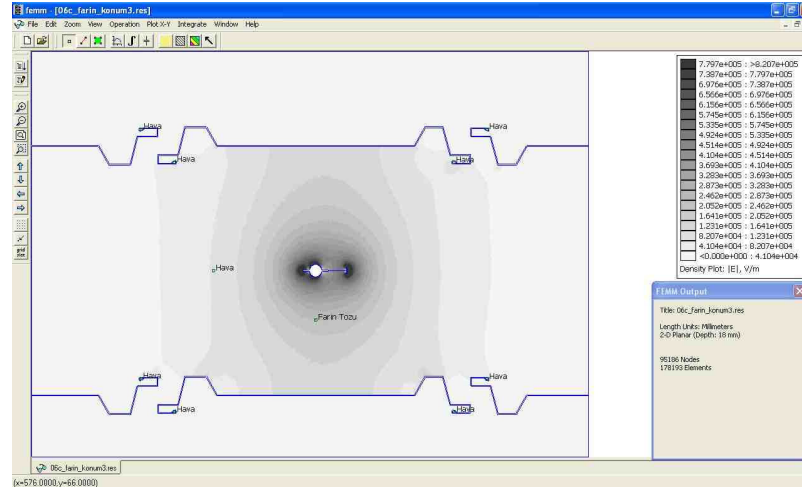


(a)

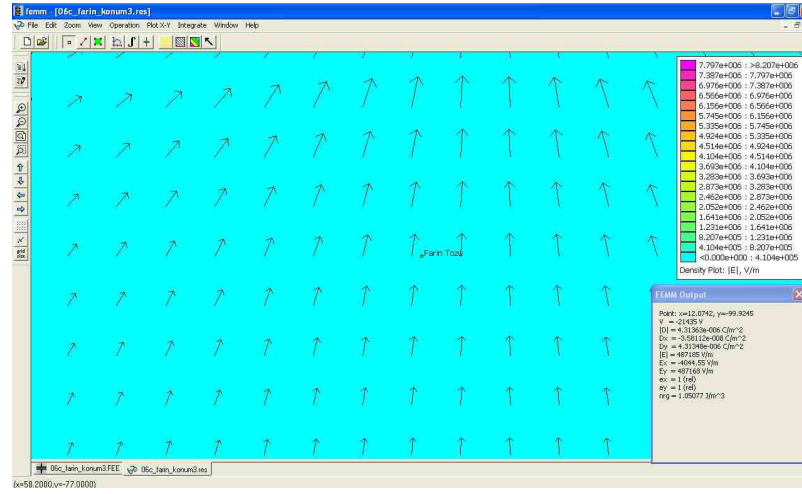


(b)

Şekil 4.31 : Farin tozunun 2. konumdaki durumu (a) elektrik alanın genel görünümü (b) elektrik alan şiddetinin vektörlerle görünümü.

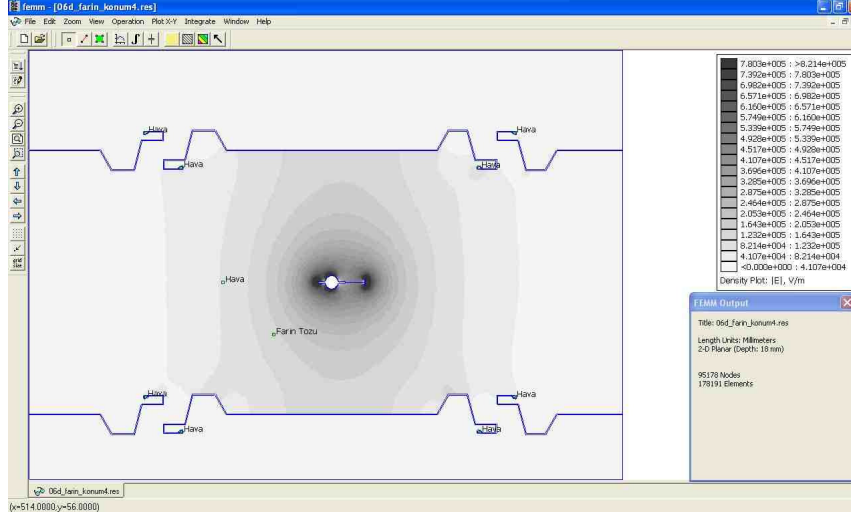


(a)

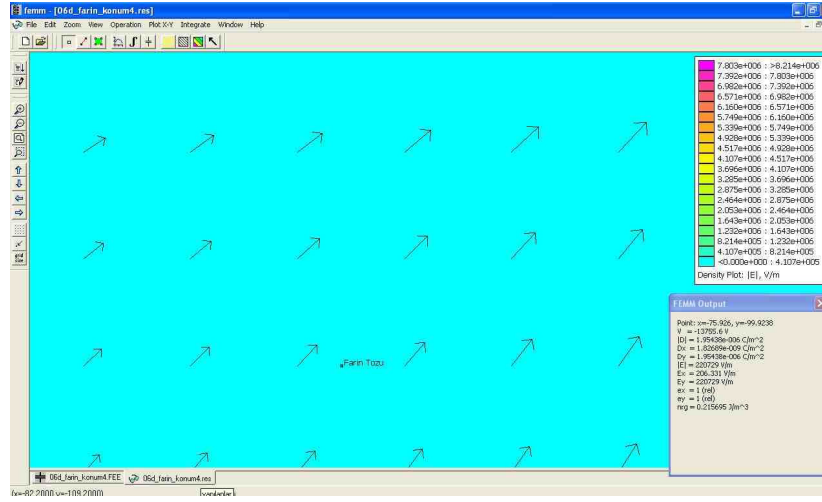


(b)

Şekil 4.32 : Farin tozunun 3. konumdaki durumu (a) elektrik alanın genel görünümü
(b) elektrik alan şiddetinin vektörlerle görünümü.



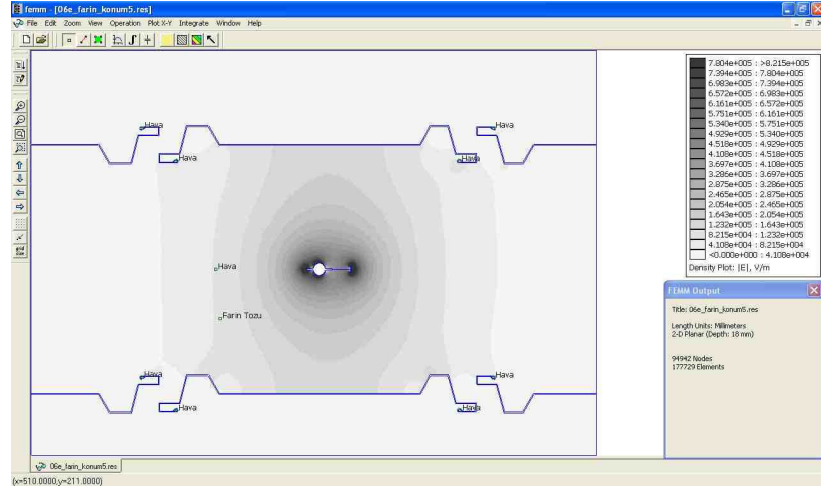
(a)



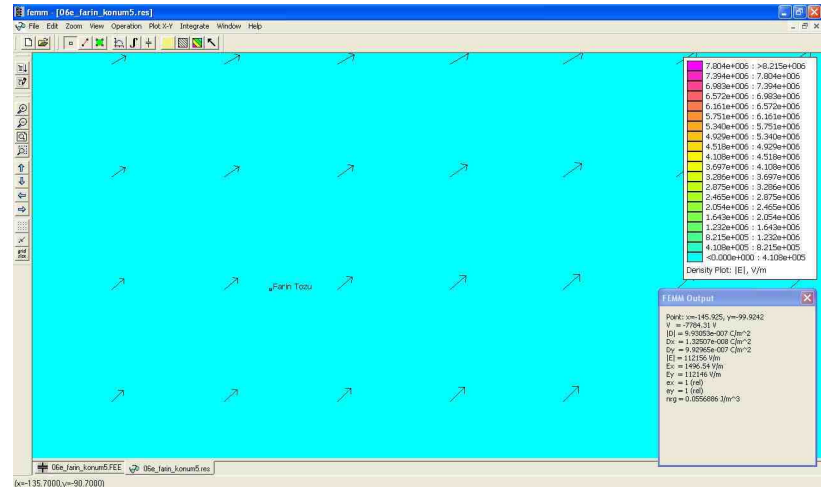
(b)

Şekil 4.33 : Farin tozunun 4. konumdaki durumu (a) elektrik alanın genel görünümü
(b) elektrik alan şiddetinin vektörlerle görünümü.

Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te farin tozunun elektrostatik filtre çıkışına doğru ilerlediği durumda elektrik alan dağılımı görülmektedir.

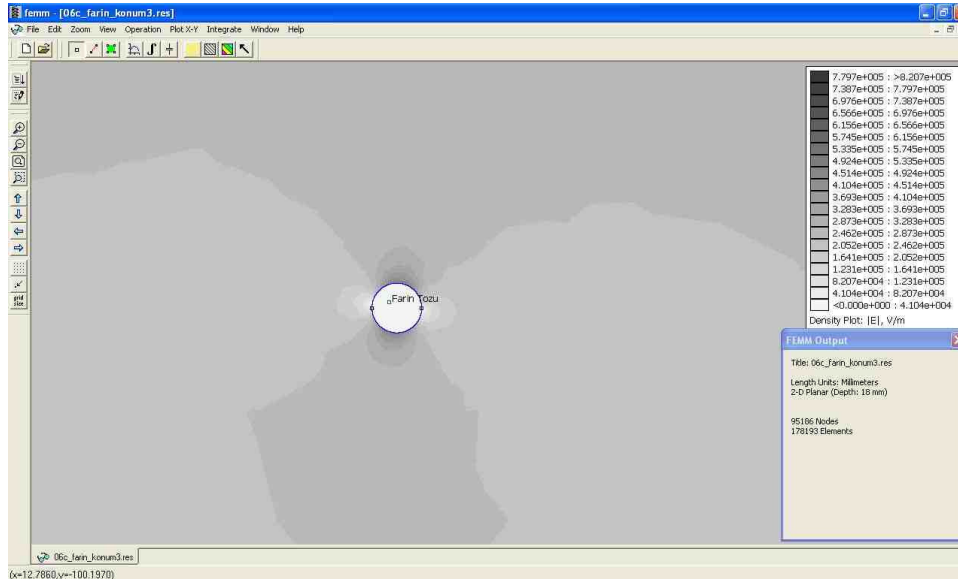


(a)



(b)

Şekil 4.34 : Farin tozunun 5. konumdaki durumu (a) elektrik alanın genel görünümü
(b) elektrik alan şiddetinin vektörlerle görünümü.



Şekil 4.35 : Farin tozunun 3. konumdaki yakın görünümü.

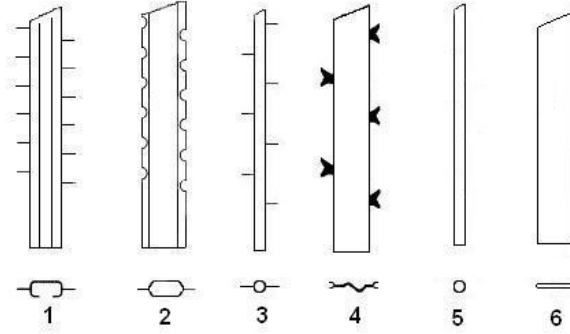
Çizelge 4.4 : Farin tozunun hareketi sırasında E_{max} değerleri.

Elektrostatik Filtre İçindeki Farin Tozunun Konumu	Maksimum Elektrik Alan Şiddeti (E_{max}) (V/m)
1. Konum	8.215.000
2. Konum	8.199.000
3. Konum	8.207.000
4. Konum	8.214.000
5. Konum	8.215.000

Şekil 4.35'te farin tozunun filtre ortasındaki görünümü bulunmaktadır. Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi elektrostatik filtre içinde ilerleyen farin tozu, korona elektrotuna yaklaştıkça maksimum elektrik alan şiddeti çok azda olsa azalmaktadır. Farin tozunun, genel olarak filtre içinde çok büyük değişimlere neden olmadığı ve elektrik alan dağılımını çok az arttırdığı görülmektedir. Elektrostatik filtrede en önemli problemlerden biri, iyi bir silkeleme sistemi olmamasından dolayı, filtrelenecek malzemenin korona elektrotunu kaplaması ve korona boşalmasını azaltmasıdır.

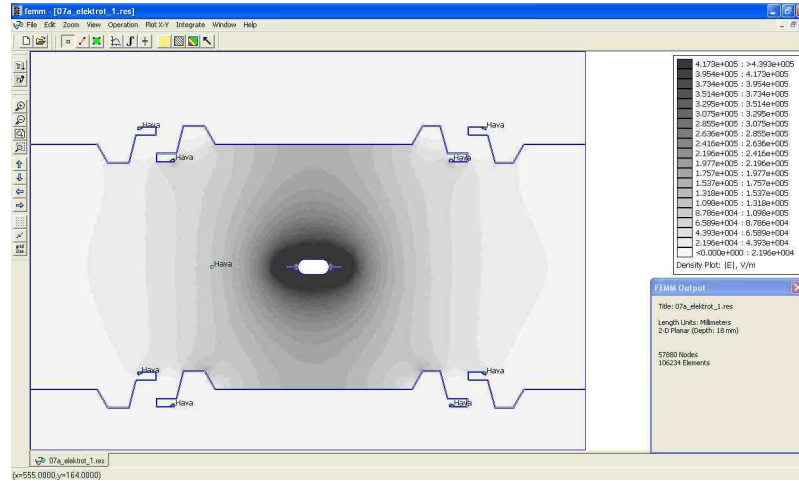
4.3.6 Farklı geometrik yapılarıdaki korona elektrotunun incelenmesi

Yeni elektrostatik filtre tasarımlarında tel şeklindeki korona elektrotlarının yerine sert yapıda sabit elektrotlar kullanılmaktadır. Sert ve sabit yapıdaki korona elektrotları Şekil 36'da görülmektedir. Bunlardan bir kısmı kaynaktan referans alınmış bir kısmı da kaynak dışından eklenmiştir [25]. Bu kısımda farklı tip korona elektrotlarının filtre içinde oluşturdukları elektrik alan incelenecektir.

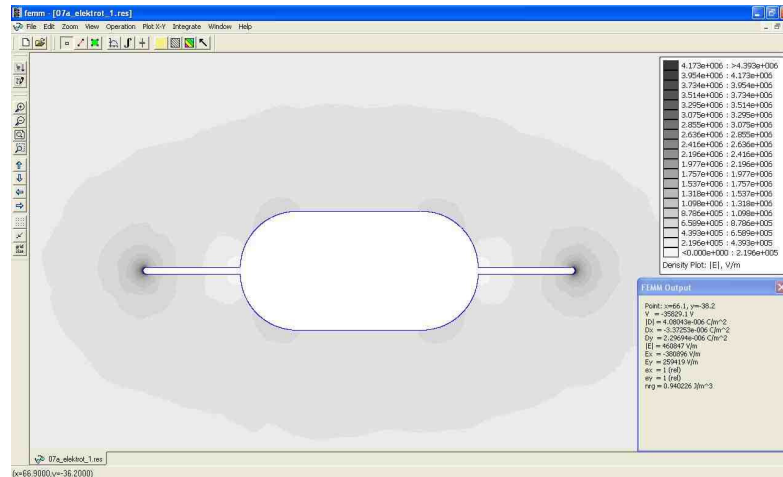


Şekil 4.36 : Farklı tip korona elektrotları.

Elektrostatik filtrede kullanılabilecek altı farklı korona elektrotunun elektrik alan dağılımları görülmektedir (Şekil 4.37-4.38-4.39-4.40-4.41-4.42).

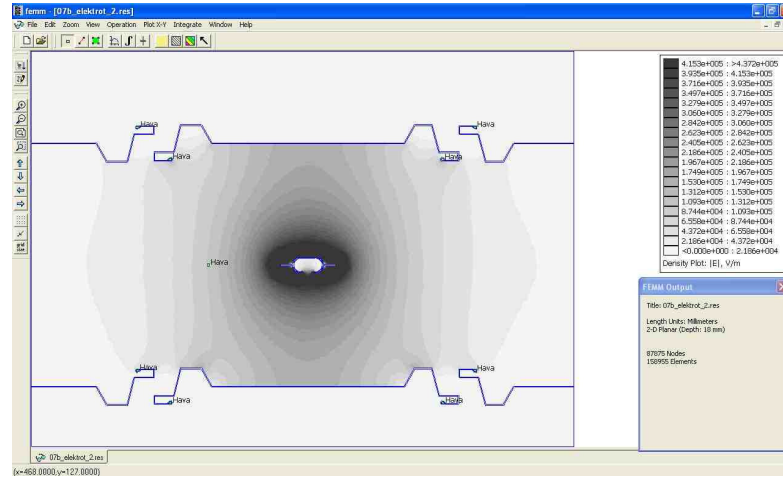


(a)

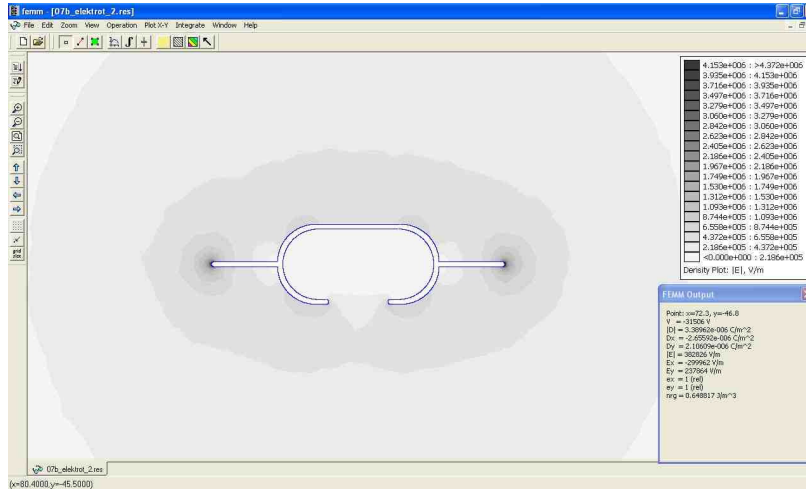


(b)

Şekil 4.37 : 1 Numaralı korona elektrotu (a) elektrik alanının dağılımının genel görünümü (b) elektrotun çevresinin yakından görünümü.

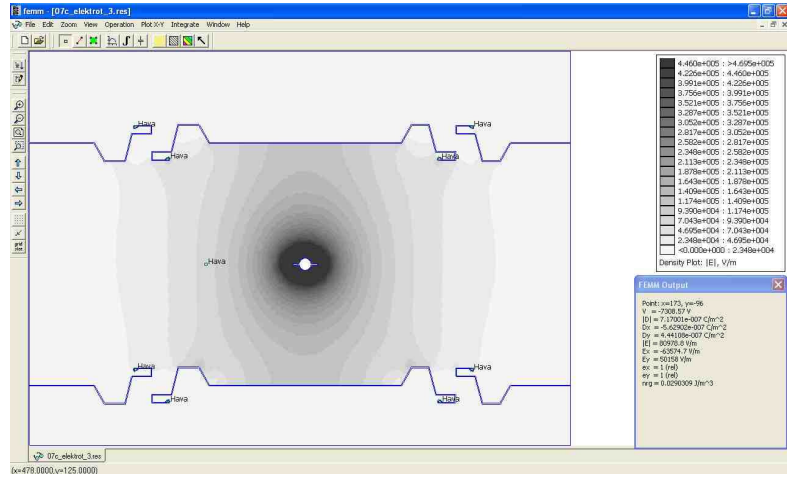


(a)

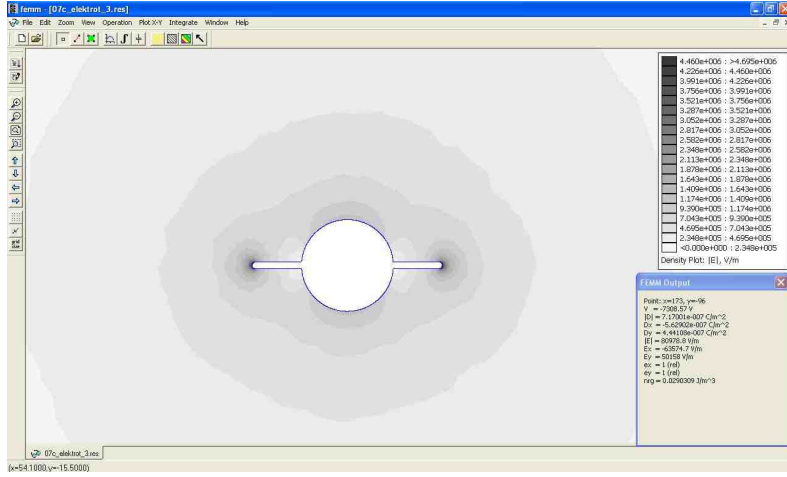


(b)

Şekil 4.38 : 2 Numaralı korona elektrotu (a) elektrik alanının dağılımının genel görünümü (b) elektrotun çevresinin yakından görünümü.

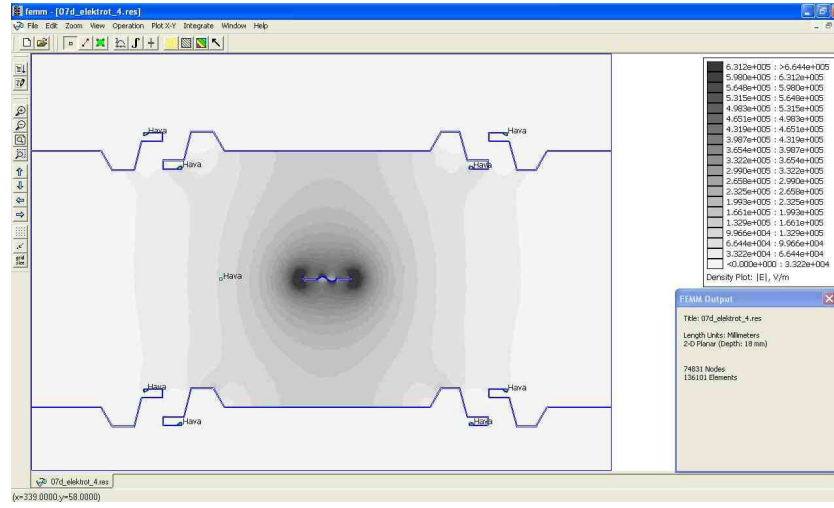


(a)

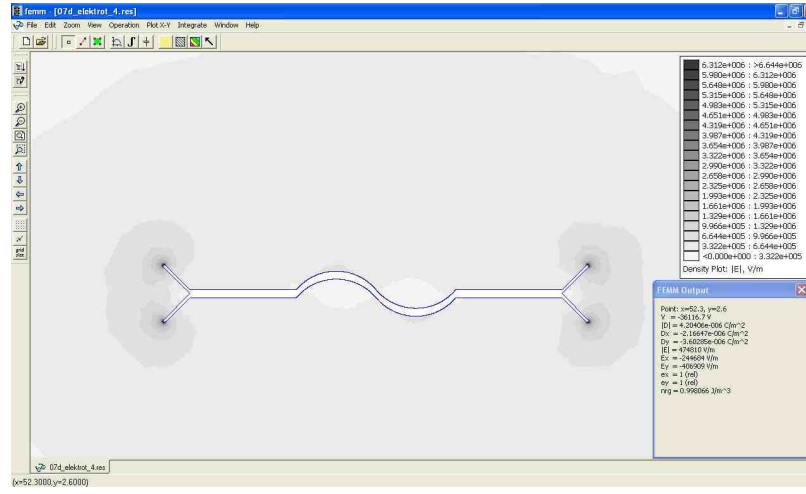


(b)

Şekil 4.39 : 3 Numaralı korona elektrotu (a) elektrik alanının dağılımının genel görünümü (b) elektrotun çevresinin yakından görünümü.



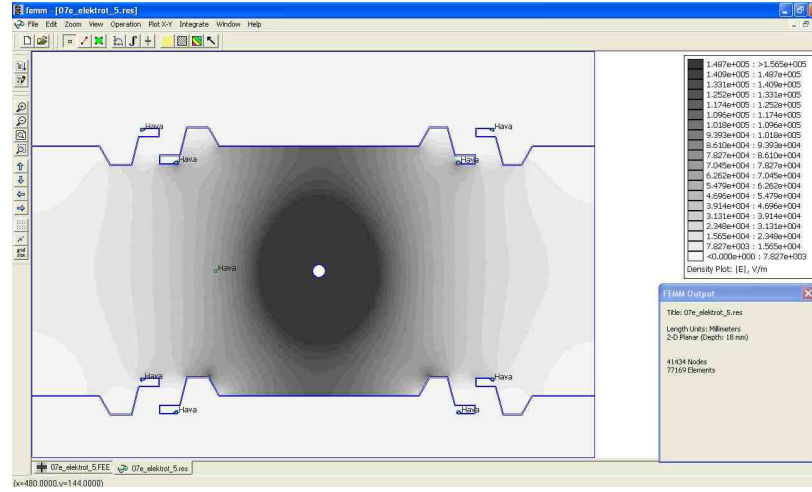
(a)



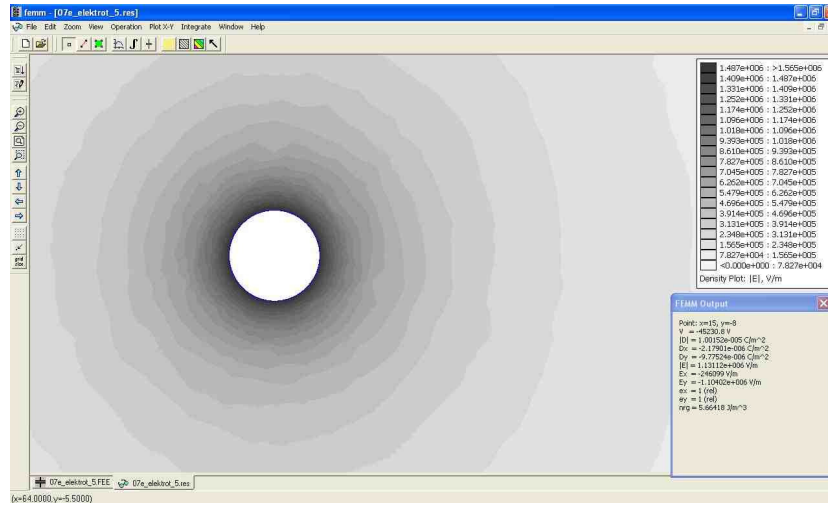
(b)

Şekil 4.40 : 4 Numaralı korona elektrotu (a) elektrik alanının dağılımının genel görünümü (b) elektrotun çevresinin yakından görünümü.

Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de 5 ve 6 numaralı korona elektrotlarının elektrik alan dağılımı görülmektedir.

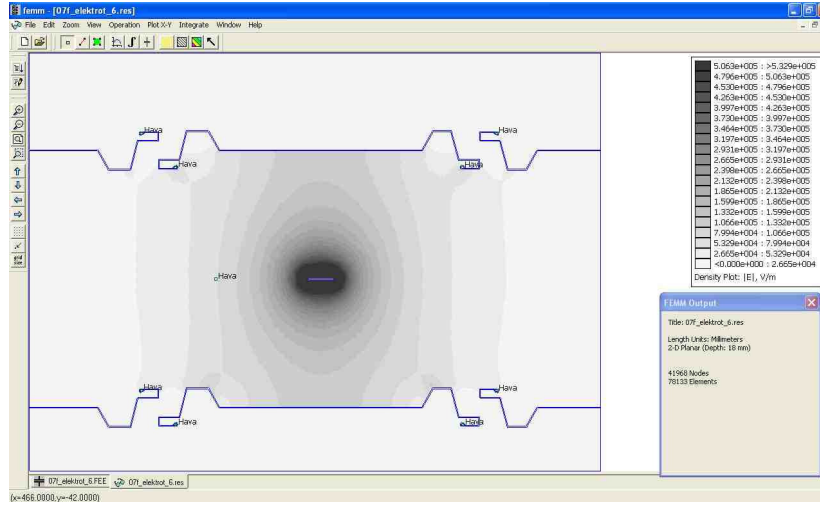


(a)

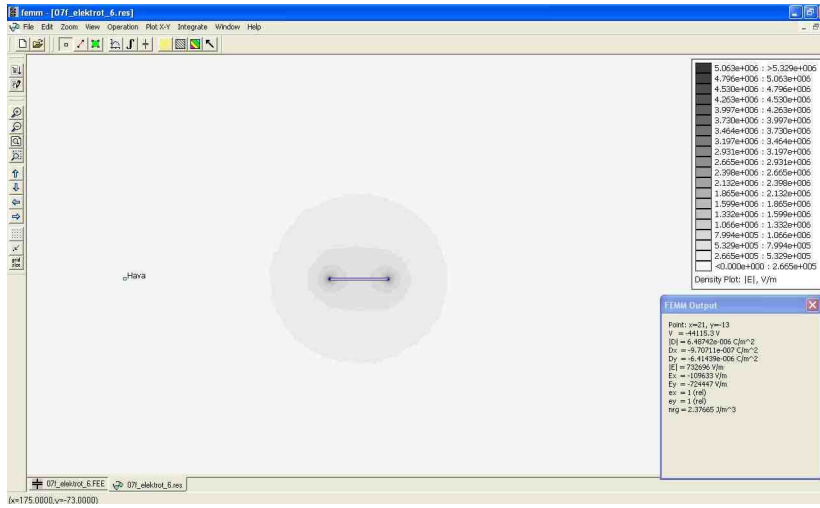


(b)

Şekil 4.41 : 5 Numaralı korona elektrotu (a) elektrik alanının dağılımının genel görünümü (b) elektrotun çevresinin yakından görünümü.



(a)



(b)

Şekil 4.42 : 6 Numaralı korona elektrotu (a) elektrik alanının dağılımının genel görünümü (b) elektrotun çevresinin yakından görünümü.

Çizelge 4.5 : Farklı korona elektrot tipleri için E_{max} değerleri.

Farklı Korona Elektrot Tipleri	Maksimum Elektrik Alan Şiddeti (E_{max}) (V/m)
1 Numaralı Korona Elektrotu	4.393.000
2 Numaralı Korona Elektrotu	4.372.000
3 Numaralı Korona Elektrotu	4.695.000
4 Numaralı Korona Elektrotu	6.644.000
5 Numaralı Korona Elektrotu	1.565.000
6 Numaralı Korona Elektrotu	5.329.000

Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi kıvrımlı şekle sahip 4 numaralı elektrot tipinin maksimum elektrik alan şiddeti en yüksek değerdir. Fakat elektrik alan dağılımının geniş alana yayılmadığı görülebilmektedir.

4.3.7 Sonuçlar

Bu bölümde, elektrostatik filtrelerin en önemli elemanı olan korona elektrotunun farklı geometrik yapılarında, elektrik alan dağılımı ve maksimum elektrik alan şiddeti incelenmiştir. Bu incelemede FEMM isimli sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

Korona elektrotunun diziliminin sıklaşması elektrik alan dağılımını arttırmaktadır. Aynı zamanda elektrot üzerinde bulunan iğnelerin uzaması yine elektrik alanda iki elektrotlu sistem kadar olmasa da elektrik alan dağılımını arttırmaktadır. Korona elektrotunun hava akış yönüne dik olarak koyulmasının düzgün hava akışını olumsuz yönde etkileyeceği değerlendirilmektedir. Ayrıca korona elektrotunun toplama elektrotuna yaklaşması sonucu elektrotlar arası atlamanın daha erken olması beklenen bir sonuçtur. Korona elektrotu üzerindeki iğnelerin yönünün hava akışının ters yönünde olmasının, hava içindeki toz parçacıklarının çok az da olsa daha geç yüklenmesine neden olması olasıdır. Bu durumda filtre veriminin azalacağı öngörülmektedir.

Artan besleme gerilimiyle elektrik alan şiddetinin arttığı ve atlama gerilim seviyelerine ulaşmayacak düzeyde en yüksek gerilim seviyesiyle, elektrik alan oluşumunun yüksek olacağı ve filtre verimini arttıracak değerlendirilmektedir.

Uygulamada incelenen su taneciğinin elektrik alan dağılımını arttırdığı görülmüştür. Korona elektrotuna doğru yaklaşan su taneciğinin maksimum elektrik alan şiddetini arttırdığı saptanmıştır. Bu durumda, normal çalışma koşullarında, elektrotlar arasında atlama oluşma olasılığının su bulunan durumda daha fazla olacağı sonuç olarak çıkarılabilir. Elektrotlar arasında oluşacak gerilim atlamasının filtre verimini olumsuz etkileyeceği bilinmektedir. Aynı şekilde incelenmiş olan farin tozunun, elektrik alan dağılımına büyük bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Farklı geometrik şekillere sahip korona elektrotları için elektrik alan dağılımları ve maksimum alan şiddeti incelenmiştir. Sivri ucu fazla ve kıvrımlı olan 4 numaralı elektrotun bulunduğu durumda, maksimum elektrik alan şiddetinin en yüksek

değerde olduğu görülmektedir. Ayrıca yuvarlak şekle sahip 5 numaralı korona elektrotunun en geniş elektrik alan dağılımını sağladığı şekilden görülebilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sanayi tesislerinden atmosfere atılan havanın kalitesi, yasal olarak kontrol edilmekte ve belli sınır değeri altında tutulmaktadır. Bu sınır değerlerin, gelecek yıllarda daha düşük düzeylere inmesi olasıdır. İşletme üretiminin durdurulmasına kadar gidebilen ceza unsurları içeren bu yasal zorunluluklar, sanayi tesislerini filtreleme sistemlerinde iyileştirmeye gitmelerine yol açacaktır.

Toz tutma sistemleri arasında, sürekli işletim özelliğine sahip, farklı işlem süreci koşullarında çalışabilen, düşük çalışma maliyeti ve yüksek verim sağlayan elektrostatik filtreler halen sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrostatik filtrede en iyi performans, genel olarak filtre parametrelerinin ve geometresinin başlangıç aşamasında uygun seçilmesiyle mümkündür. Uygun olmayan yapıda korona elektrotu, korona ve toplama elektrotları arasında hatalı uzaklık, toplama elektrotunun uygun olmayan boyutu, hava akışının tasarıma uygun olmaması, korona elektrotuna uygulanan yüksek gerilim seviyesinin ve tipinin yük durumuna ve filtre yapısına uygun olmaması gibi birçok nedenden dolayı elektrostatik filtrede istenen verim elde edilemeyebilir. Ayrıca üretim sistemindeki süreç parametrelerinin değişimleri, elektrostatik filtre verimi üzerinde etkili olmaktadır.

Toplama elektrotlarında toplanan toz parçacıklarının, yeterli şekilde silkelmesi gerekmektedir. Aynı şekilde korona elektrotu üzerine de yapışmış olan tozların temizlenmesi gerekmekte böylece korona boşalmasının etkinliğinin aynı seviyede kalması sağlanmaktadır.

Elektrostatik filtre veriminde büyük öneme sahip olan korona boşalması, korona elektrot yapısına eklenen iğnelerle (tel ya da metal uzantılarla), daha erken başlamaktadır. Bu durumda parçacıkların daha iyi yüklenmesi ve toplama elektrotlarına doğru daha hızlı hareket etmesi sağlanacaktır. Ayrıca elektrostatik filtrenin negatif gerilimle beslenmesinin, pozitif gerilime kıyasla daha yüksek atlama gerilimleri sağlayarak, parçacık yüklenmesini olumlu yönde etkilediği görülmüştür.

Yapısal özellik bakımından filtrenin iç donanımlarının sağlam bir şekilde sabitlenmesiyle, oluşabilecek kısa devre durumlarının böylece en az düzeye indirilmesi sağlanacaktır. Hava akışının orantılı olması filtrede toz tutulmasını olumlu yönde etkileyecektir.

Elektrostatik filtredeki korona elektrotlarının beslemesi son yıllarda gelişim göstermiştir. Gelişen yarıiletken sistemi ve mikroişlemci ile birlikte, korona elektrotunun darbeli ve yüksek frekanslı gerilim ile beslenmesi, filtrenin verimini olumlu yönde etkilemekte ve geri korona etkisini azaltmaktadır. Bununla birlikte, yeni yarıiletken ve mikroişlemci teknolojilerine sahip donanımlar ile değişken işletme parametrelerine hızlı ve etkin bir şekilde cevap verilmesi mümkündür. Mikroişlemci sistemiyle, filtrenin istenen parametreleri, anlık olarak bilgisayar yardımıyla değiştirilebilmekte ve sistemden gelen veriler izlenebilmektedir.

Uygulama bölümünde, korona elektrotundaki iğnelerin (uzantıların) farklı konumlardaki elektrik alan dağılımı incelenmiştir. Burada iğne uzunluğunun artışı ile elektrik alan dağılımının da genişlediği gözlenmiştir. Korona elektrotlarındaki iğnelerin, dikey doğrultuda bulunmasının maksimum elektrik alan şiddetini artırdığı görülmüştür. Aynı zamanda, bu konumlandırma, pratik uygulamada, gaz akışının olumsuz yönde etkilenmesine yol açabilmektedir. Korona elektrotu üzerindeki iğnelerin, yatayda bulunmasının ve uzun olmasının uygun olacağı sonucuna ulaşılmaktadır. Ayrıca, kaynaklardaki deneylerde görülebildiği gibi iyi bir korona boşalması için sivri çıkıntılar uygundur.

Korona elektrotuna uygulanan gerilimin artışıyla elektrik alan dağılımının arttığı gözlenmiştir. Bu amaçla, mümkün olan en yüksek gerilimin korona elektrotuna uygulanması önerilmektedir. Böylece, daha çok parçacık yüklenmesi, daha yüksek göç hızı ve sonuç olarak daha iyi bir verim sağlanacaktır. İşletme koşullarında, atlamaya neden olmayacak en yüksek gerilimin korona elektrotlarına verilmesi amacıyla, kontrol sistemleri ayarlarındaki gerilim limit değerleri mümkün olduğunca yüksek tutulmalıdır.

Bir su damlasının filtre içindeki ilerleyişi sırasında elektrik alan dağılımı incelenmiştir. Suyun elektrik alan dağılımını genişlettiği görülmüştür. Bu avantajına ters olarak, korona elektrotuna yaklaştıkça maksimum elektrik alan şiddeti de artmıştır. Maksimum elektrik alan şiddetinin artması, daha düşük atlama

gerilimlerinin oluşmasına neden olacaktır. Su damlacıkları içeren malzemenin, düşük gerilimlerde atlamaya sebep olması verimin azalmasına yol açacaktır. Su damlasının ardından farin tozunun elektrik alan dağılımına etkisi incelenmiş ve çok küçük değişimler tespit edilmiştir. Buradan bağıl dielektrik katsayısı düşük olan malzemenin, elektrik alan dağılımında daha az değişikliğe yol açtığı sonucuna ulaşılabilir.

Korona elektrotu için farklı geometrik yapılar incelenmiştir. Yuvarlak şekle sahip korona elektrotunun daha geniş bir elektrik alan dağılımı sağladığı ve maksimum elektrik alanın ise daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu açıdan, elektrostatik filtrede yuvarlak şekle sahip korona elektrotunun kullanılması daha uygundur.

İşletme koşullarında, filtre içindeki nemli malzemenin, toplama ve korona elektrotuna yapışarak, elektrotlar üzerinde tabaka oluşturduğu, bu durumun da korona boşalmasının uygun seviyede oluşmasına engel olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda filtre içinde oluşabilecek kısa devrelerde, akımın yüksek değerlere çıkıp gerilimin artmadığı, hat arızasında ise gerilimin yüksek değerde olup akımın artmadığı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] <[http://tr.wikipedia.org/wiki/Hava_\(atmosfer\)](http://tr.wikipedia.org/wiki/Hava_(atmosfer))>, alındığı tarih 21.12.2008.
- [2] **Kalkan, O.**, 2001. Hava Kirliliği, alındığı tarih Aralık 20, 2008, <http://www.bsm.gov.tr/makale/20013.asp?sayi=20013>
- [3] **İlhan, A. İ., Dündar, C., Öz, N., Kılınç, H.**, 2003. Hava kirliliği ve asit yağmurlarının çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri, alındığı tarih Aralık 20, 2008, www.meteor.gov.tr/FILES/arastirma/webhakir.pdf
- [4] <<http://www.cevreorman.gov.tr/HavaKirliligi.html>>, alındığı tarih 28.12.2008.
- [5] <http://www.esa.int/esaEO/SEMNU9MJC0F_index_0.html#subhead5>, alındığı tarih 20.12.2008.
- [6] **Resmi Gazete**, 2006: Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, 16, 32, 46.
- [7] <http://www.sahakk.sakarya.edu.tr/documents/hava_kirliligi_ve_kirleticiler_rapor1.pdf>, alındığı tarih 28.12.2008.
- [8] **Karadavut D.**, 2008. Emisyon ölçüm kuralları ve emisyon ölçüm programı, alındığı tarih Aralık 30, 2008, web.sakarya.edu.tr/~ssoylu/dersler/havaolcum/emisyon_measurement.pdf
- [9] <www.bcm.org.tr/pdf/toz%20emisyonlarinin%20onlenmesi.pdf>, alındığı tarih 30.12.2008.
- [10] **White, H. J.**, 1981: Electrostatic precipitation, Addison-Wesley, 80.
- [11] **Mizuno, A.**, 2000: Electrostatic precipitation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **7**, 615-624.
- [12] **Rose, H. E., Wood, A. J.**, 1964: *An introduction to electrostatic precipitation in theory and practice*, London constable & company ltd, 39, 44-52.
- [13] **Jaworek, A., Krupa, A., Czech, T.**, 2007: Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning, *Journal of Electrostatics*, **65**, 133–155.
- [14] **Biege N., Pretti, H., Pirwitz, W.**, 1997. Emerging and competing technologies for particulate control in cement plants, *39th IEEE Cement Industry Technical Conference*, 326.
- [15] **Mauritzson, C.**, 2005: ESP theory, Alstom.
- [16] **McDonald, J. R., Smith, W. B., Spencer, H. W.**, 1997: A mathematical model for calculating electrical conditions in wire-duct electrostatic precipitation devices, *J. Appl. Phys.*, **48**, 2231-2243.

- [17] **Lu, C., Huang, H.**, 1997: A sectional model to predict performance of a plate-wire electrostatic precipitator for collecting polydisperse particles, *J. Aerosol Sci.*, **29**, 295-308.
- [18] **Goo, J. H., Lee, J. W.**, 1996: Stochastic simulation of particle charging and collection characteristics for a wire-plate electrostatic precipitator of short length, *J. Aerosol Sci.*, **28**, 875-893.
- [19] **Önal, E.**, 1988. Elektrostatik filtreler, *Yüksek lisans tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 49,63.
- [20] **Oglesby, S., Nichols, B., Grady B.**, 1978: Electrostatic precipitation, *Marcel Dekker Inc.*, 33-72.
- [21] **Watanabe, T., Fujinami, H., Takuma, T., Sunaga, Y.**, 1986: DC corona discharge characteristics and ion-flow distribution for several types of rods under low pressure, *IEEE transactions on industry applications* **22**, 547-553.
- [22] **Mclean, K. J.**, 1988: Electrostatic precipitator, *IEE Proceedings*, **135**, 347-361.
- [23] **Deutsch, W.**, 1922: Bewegung und ladung der elektrizitatstrager zylinderkondensator, *Annalen der Physik*, **168**, 335.
- [24] **Saunders, G. L., Hawks, R.L., Szabo, M. F.**, 1985. *Manual operation and maintenance manual for electrostatic precipitators*, Environmental Protection Agency Research Triangle Park, 2/31-2/59.
- [25] **Parker, K. R.**, 1997: Improving electrostatic precipitator performance for power stations, *Power engineering journal*, **11**,169-176.
- [26] **Allan, R. A.**, 2002: Dry and wet electrostatic precipitators: an overview of performance and operation, *CAPCA Conference, Myrtle Beach*, 23-25.
- [27] **Jedrusik, M., Gajewski, J. B., Swierczok, A. J.**, 2001: Effect of the particle diameter and corona electrode geometry on the particle migration velocity in electrostatic precipitators, *Journal of Electrostatics*, **51-52**, 245-251.
- [28] **Miller, J., Hoferer, B., Schwab, A. J.**, 1998: The impact of corona electrode configuration on electrostatic precipitator performance, *Journal of Electrostatics*, **44**, 67-75.
- [29] **Chang, J. S.**, 2002: Next generation integrated electrostatic gas cleaning systems, *Journal of Electrostatics*, **57** 273–291.
- [30] **Grass, N., Hartman, W., Klöckner, M.**, 2004: Application of different types of high-voltage supplies on industrial electrostatic precipitators, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **40**, 1513-1520.
- [31] **Hoferer, B., Schwab, A. J.**, 2000: Local occurrence of back corona at the dust layer of electrostatic precipitators, *2000 Conference on electrical insulation and dielectric phenomena*, **1**, 93-96.
- [32] **Davidson, J.H.**, 2000: Electrsotatic precipitation, 6-7.

- [33] **Jayaram, S., Castle G. S., Chang, J. S., Berezin A. A., Looy, P. C., Mangal, R., Mozes, M. S.,** 1996: Semipilot plant pulse energized cold-precharger electrostatic precipitator tests for collection of moderately high resistivity fly ash particles, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **32**, 851-857.
- [34] **Rajanikanth, B. S., Prabhakar, B. R.,** 1991: Sparkover characteristics of prototype precipitator subjected to dc/pulse energization, *Conference Record of the 1991 IEEE*, **1**, 729-733.
- [35] **Kim, W. H., Kim, J. S., Kang, I., Rim, G. H., Kim, C. U.,** 1999: A high voltage pulsed power system for electrostatic precipitators, *Industry Applications Conference*, **2**, 773-777.
- [36] **Milde, H. I.,** 1982: Pulse corona discharge in electrostatic precipitators, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, **EI-17**, 179-186.
- [37] **Petersen, H. H.,** 1981: New trends in electrostatic precipitation: wide duct spacing, precharging, pulse energization, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **17**, 496-501.
- [38] **Mauritzson, C.,** 2005: The SIR concept, Alstom Power Service, (Zeki Göçmen'in izniyle).
- [39] **Gommeren, W.,** 2003: Description of SIR, Alstom Power Service, (Zeki Göçmen'in izniyle).
- [40] **Grass, N.,** 2007: 150kV 300kW high voltage supply with IGBT inverter for large industrial electrostatic precipitators, *Industry Applications Conference*, 808-811.
- [41] **Genceli, O. F.,** 1997. Endüstriyel gaz temizlenmesi ve hava kirliliğinin kontrolü, *III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, <http://www.mmoistanbul.org/yayin/tesisat/45/02.htm>, alındığı tarih, 30.04.09.
- [42] <http://www.eray.gen.tr/html/tfiltre.html>, alındığı tarih 04.11.2008.
- [43] <http://www.sc.com.tr/page.php?ID=28>, alındığı tarih 30.04.2009.
- [44] <http://www.biymed.com/femmuuh/analiz/sev2.htm>, alındığı tarih 04.03.2009.

EKLER

EK A : Elektrotların Teknik Resimleri

EK B : Farin Tozunun Tane Dağılım Raporu

[illegible]

116



EK B



Sympatec GmbH
System-Partikel-Technik

WINDOX

Particle Size Analysis

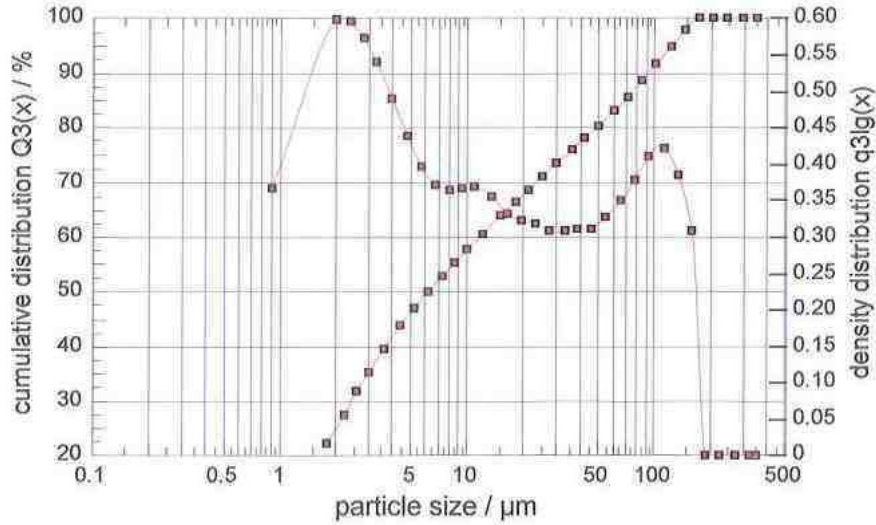
Sympatec HELOS (H0792) RODOS: cimento

02/23/09 / 17:25:00

feeder: VIBRI
pressure: 3.00 bar
vacuum: 10.00 mbar
feed rate: 50.00 %
funnel gap: 1.50 mm
revolution: 0.00 %

Measuring conditions: xxx
measuring range: R4: 0.5/1.8...350µm
measuring duration: 6.00 s
cycle time: 1000 ms
start when: 1.00s at C.Opt
reference measurement: 00:00:39 , 0.00 %
evaluation: HRLD (V 3.3 Rel.1)
HELOS/DOS file name : C:\USR\HDATA\CPAS VGL\RO200 1.

operator : OZNUR
identifier : PREMIX 20.02.2009
Comments: özgül ağırlık: 2.74 → KILAY ÖĞÜNEN
blaine : 5211



Volume Size Distribution

x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
1.80	22.02	7.40	52.61	30.00	73.30	122.00	94.67
2.20	27.22	8.60	54.98	36.00	75.72	146.00	97.66
2.60	31.52	10.00	57.38	42.00	77.80	174.00	100.00
3.00	35.07	12.00	60.28	50.00	80.14	206.00	100.00
3.60	39.34	15.00	63.71	60.00	82.71	246.00	100.00
4.40	43.59	18.00	66.32	72.00	85.46	294.00	100.00
5.20	46.75	21.00	68.47	86.00	88.37	350.00	100.00
6.20	49.77	25.00	70.87	102.00	91.40		
x10 =	1.09 µm	x50 =	6.30 µm	x90 =	94.63 µm		
x16 =	1.44 µm	x84 =	65.62 µm	x99 =	162.03 µm		
VMD =	27.1 µm	Sv =	1.84 m ² /cm ³	c_opt =	9.09 %		

Şekil B.1 : Farin tozunun tane dağılım raporu.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Yusuf Erkan Balgün
Doğum Yeri ve Tarihi: Diyarbakır – 30.03.1982
Adres: Kalıcı Konutlar 4. Ada 15. Blok No: 6 BOLU
Lisans Üniversite: Kocaeli Üniversitesi

Bolu Sakarya İlkokulu'nda ilköğretimini tamamlayıp, İzzet Baysal Anadolu Lisesi'nden 2000 yılında, Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği (İ.Ö.) Bölümü'nden 2004 yılında mezun oldu. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programına başladı. İki farklı iş deneyiminden sonra halen Bolu Çimento Sanayi A.Ş.'de elektrik bakım mühendisi olarak çalışmaktadır.