



**T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**ELEKTROSTATİK TOZ ÇÖKTÜRÜCÜLERDE BASINÇ  
OPTİMİZASYONU**

Doktora Tezi

**Sevtap TIRINK**

Danışman  
**Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK**

SAMSUN  
2021



T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



ELEKTROSTATİK TOZ ÇÖKTÜRÜCÜLERDE BASINÇ  
OPTİMİZASYONU

Doktora Tezi

**Sevtap TIRINK**

Danışman  
**Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK**

SAMSUN  
2021

## TEZ KABUL VE ONAYI

**Sevtap TIRINK** tarafından, **Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK** danışmanlığında hazırlanan “**Elektrostatik Toz Çöktürücülerde Basınç Optimizasyonu**” başlıklı bu çalışma, Jürimiz tarafından 11/01/2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	<b>Unvanı, Adı/Soyadı</b> <b>Üniversitesi</b> <b>Ana Bilim/Ana Sanat Dalı</b>	<b>İmza</b>	<b>Sonuç</b>
<b>Başkan</b>	Prof. Dr. Yaşar NUHOĞLU Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Bilimleri Ana Bilim Dalı		<input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b> (Danışman)	Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK Ondokuz Mayıs Üniversitesi Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı		<input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Prof. Dr. Beyhan PEKEY Kocaeli Üniversitesi Çevre Bilimleri Ana Bilim Dalı		<input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Doç. Dr. Nevzat BEYAZIT Ondokuz Mayıs Üniversitesi Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı		<input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Doç. Dr. Lütfü NAMLI Ondokuz Mayıs Üniversitesi Termodinamik Ana Bilim Dalı		<input type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

.... / .... /2021

Prof. Dr. Ali BOLAT

Enstitü Müdürü

## ETİKSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

İmza  
.../.../2021  
Sevtap TIRINK

## TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

**Tez Başlığı :** Elektrostatik Toz Çöktürücülerde Basınç Optimizasyonu

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 17/01/2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 4

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

İmza  
... /.../2021  
Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK

## ÖZET

### ELEKTROSTATİK TOZ ÇÖKTÜRÜCÜLERDE BASINÇ OPTİMİZASYONU

Sevtaç TIRINK

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Doktora, Ocak/2021

Danışman: Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK

Bu çalışmada, toz toplama sistemleri arasında yaygın olarak kullanılan elektrostatik toz çöktürücülerin (ESC) verimini artırmak için içerisindeki gaz akış dağılımını uygun geometrik tasarımla düzenlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tasarlanan ESC'ler içinde gazın bekletme süreleri, giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri, plaka sayıları, ESC boyutları, plakaların yerleştirme şekilleri gibi parametrelerin toz toplama verimine ve bu geometrik değişimlerin basınç kaybına olan etkileri farklı yaklaşma hızı ve debilerde incelenmiştir.

Giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri 20°, 30°, 40°, 50°, 52°, 54°, 56°, 58°, 60°, 70°, 80° ve plakalı/plakasız olarak tasarlanan ESC'ler için yaklaşma hızları 6 m/s, 12 m/s, 18 m/s, 24 m/s, gaz debileri 6 m<sup>3</sup>/s, 12 m<sup>3</sup>/s, 18 m<sup>3</sup>/s, 24 m<sup>3</sup>/s, bekletme süreleri 0.75 s, 1 s, 1.25 s, 1.5 s olarak seçilmiştir. Model ESC'ler içindeki plaka sayıları farklı gaz debilerine göre 7, 9, 11, 13 olacak şekilde planlanmıştır. Çalışmada 158 adet model tasarlanmış ve 3D geometrileri ise SOLIDWORKS programında çizilmiştir. Daha sonra akış analizleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemini kullanan ANSYS FLUENT modülü ile simüle edilerek modeller optimize edilmiştir.

Yapılan çalışmada basınç kaybını en fazla etkileyen faktörler yaklaşma hızı, koniklik açısı, toz toplama plakasının şekli ve ESC toz toplama bölümündeki plaka sayısı olduğu görülmüştür. Toz toplama verimini ise en fazla plakalar arasındaki ortalama iç hızın, plaka ve elektrotlar arasındaki mesafenin, göç hızının, koniklik açısının, toz toplama plaka alanının, toz toplama plakası şeklinin ve ESC içerisindeki bekletme süresinin etkilediği görülmüştür.

Optimizasyon çalışması sonucunda koniklik açısının 50°, yaklaşma hızının 6 m/s, gaz debisinin 6 m<sup>3</sup>/s ve ESC giriş genişliğinin gövde genişliğine oranının 1/1.7 olduğu durumda ESC girişinde minimum vorteks ve plakalar arasında homojen hız dağılımı sağlandığı, bu durumda en düşük statik basıncın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca toz toplama plakalarının tasarımları değiştirilerek daha homojen bir akış ile verim artışı sağlanabileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** ESC, türbülanslı akış, basınç düşüşü, kayıp katsayısı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), tasarım.

## ABSTRACT

### PRESSURE OPTIMIZATION IN ELECTROSTATIC PRECIPITATORS

Sevtap TIRINK

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineering

Ph.D., January/2021

Supervisor: Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK

In this study, to increase the efficiency of electrostatic precipitators (ESP), which are widely used among dust control processes, it is aimed to arrange the gas flow patterns inside with appropriate geometric design. Among the ESP designed for this purpose, the effects of parameters such as detention times of the gas, horizontal angle values of the inlet/outlet conical parts, plate numbers, ESP dimensions, placement ways of plates and the effects of these geometric changes on pressure drop have been studied at different approach velocities and flow rates.

Angle values of the inlet / outlet conical parts with the horizontal axis were 20°, 30°, 40°, 50°, 52°, 54°, 56°, 58°, 60°, 70°, 80° and ESPs were designed with / without plate. Approach velocities for ESPs were 6 m/s, 12 m/s, 18 m/s and 24 m/s. Gas flow rates were 6 m<sup>3</sup>/s, 12 m<sup>3</sup>/s, 18 m<sup>3</sup>/s, 24 m<sup>3</sup>/s. Detention times were 0.75 s, 1 s, 1.25 s, 1.5 s. The number of plates in the Model ESP is planned to be 7, 9, 11, 13 according to the changes in gas flow rates. In the study, 158 models were designed, and their 3D geometries were drawn in the SOLIDWORKS program. Further, the models were optimized by simulating flow analysis with ANSYS FLUENT module, which uses computational fluid dynamics method.

As a result of the study, it was seen that the most affecting factors for the pressure drop were approach speed, conical angle, placement style of plates, and the number of panels in the dust collection section. It was observed that the most influencing factors on dust collection efficiency were the average internal velocity between the plates, the distance between the plate and electrodes, the migration velocity, the conical angle, the dust collection plate area, placement shape of plates, and detention time in the ESP.

As a result of the optimization study, a homogeneous velocity pattern is achieved between the minimum vortex and plates at the ESP inlet when the conical angle is 50 degrees, approach velocities is 6 m/s, the gas flow is 6 m<sup>3</sup>/s and the ratio of the ESP's inlet width to the body width is 1/1.7, in this case the lowest static pressure has been found to occur. In addition, it has been concluded that by changing the designs of the dust collection plates, efficiency can be increased with a more homogeneous flow.

**Keywords:** ESP, turbulent flow, pressure drop, loss coefficient, computational fluid dynamic (CFD), design.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Lisansüstü akademik eğitimim boyunca ve tez çalışmam süresince, akademik bilgi ve birikimini sınırsızca paylaşan ve desteğini esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca çalışmanın ilerleyişi ile ilgili değerli fikirlerini benimle paylaşan, tez izleme dönemlerinde değerlendirilmek üzere yeni fikirler oluşturan ve bilgileri ile beni aydınlatan çok değerli hocalarım; Ondokuz Mayıs Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Nevzat BEYAZIT ve Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Lütfü NAMLI'ya katkılarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca, Tez Savunma Sınavı Jüri Üyeleri arasında yer alarak, yorum ve eleştirileri ile çalışmama katkıda bulunan değerli hocalarım Prof. Dr. Yaşar NUHOĞLU ve Prof. Dr. Beyhan PEKEY'e de teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca ve özellikle doktora tez çalışmam süresince, her zaman yanımda olan, sevgisini, desteğini, inancını benden hiç esirgemeyen, maddi ve manevi en büyük destekçim olan saygıdeğer anneme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca beni kendi evlatlarından ayırmayan sevgili TIRINK ve ŞAHİN ailesine inançlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca desteğini ve sevgisini bir an bile olsa esirgemeyen sevgili eşime, var olmasıyla bana moral ve motivasyon kaynağı olan biricik oğluma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevtap TIRINK

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
TABLolar DİZİNİ .....	xiv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ.....</b>	<b>4</b>
2.1. Toz Kirleticilerin Kontrolü .....	4
2.1.1. Çökeltme Odaları (Setting Chamber, Gravity Settlers) .....	6
2.1.2. Siklonlar (Cyclone Separator).....	8
2.1.3. Islak Yıkayıcılar (Wet Scrubber) .....	10
2.1.4. Torba Filtreler (Bag Filter, Fabric Filters, Baghouses).....	12
2.1.5. Elektrostatik Toz Çöktürücüler (Electrostatic Precipitator).....	13
2.1.5.1. ESÇ Tanımı.....	13
2.1.5.2. ESÇ'lerin Çalışma Prensibi .....	14
2.1.5.3. ESÇ Tipleri .....	15
2.1.5.4. ESÇ'lerin Kullanıldığı Bazı Endüstriler.....	20
2.1.5.5. Toz Toplama Verimi.....	22
2.1.5.5.1. Partikül Yükleme Mekanizmaları .....	23
2.1.5.5.2. Yüklenmiş Partikülün Göç Hızı .....	25
2.1.5.6. Tasarım parametreleri .....	27
2.1.5.7. ESÇ Sisteminde Verimi Etkileyen Faktörler .....	27
2.1.5.7.1. Gaz Hızı .....	27
2.1.5.7.2. Toz Özellikleri .....	30
2.1.5.7.3. Basınç Düşüşü.....	34
2.1.6. Toz Toplama Sistemlerinin Karşılaştırılması.....	35
2.2. Kaynak Özetleri .....	37
2.2.1. ESÇ ile İlgili Sayısal Modelleme Çalışmaları .....	37
2.2.2. ESÇ'deki Gaz Akışının Modellenmesi ile İlgili Çalışmalar .....	39
2.2.3. ESÇ İçerisindeki Elektriksel Alan ile İlgili Çalışmalar .....	45
2.2.4. ESÇ ile İlgili Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Çalışmaları.....	50
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>56</b>
3.1. Materyal .....	56

3.2. Yöntem.....	62
3.2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi .....	62
3.2.1.2. Türbülans model seçimi .....	66
3.2.1.1.1. k-epsilon (k-ε) modeli.....	70
3.2.1.1.2. Standart k-epsilon (k-ε) modeli.....	71
3.2.1.1.3. Realizable k-ε türbülans modeli.....	73
3.2.1.1.4. RNG k-ε türbülans modeli .....	75
3.2.1.2. Partiküller için hareket eşitliği .....	77
3.2.1.3. Çözüm Yöntemi ve Sınır Şartları .....	79
3.2.1.4. Katı modelin çizimi .....	79
3.2.1.5. Ağ yapısının oluşturulması ve optimizasyonu .....	80
3.2.1.6. FLUENT akış analizi .....	83
3.2.1.7. Türbülans modelinin belirlenmesi .....	84
3.2.1.8. Partiküller için ayrık faz kabulleri .....	84
3.2.1.9. Akışkan ve özelliklerinin belirlenmesi.....	85
3.2.1.10. Modelin sınır şartlarının girilmesi .....	85
3.2.1.11. Sayısal çözüm algoritması .....	86
3.2.1.12. Yakınsama .....	87
3.2.1.13. Çözümün geçerliliği.....	88
3.2.2. Basınç Kayıp Katsayısının Hesaplanması.....	90
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>91</b>
4.1. Model Değerlendirmeleri.....	92
4.1.1. Birinci Grup Model Değerlendirmesi .....	92
4.1.2. İkinci Grup Model Değerlendirmesi .....	105
4.1.3. Üçüncü Grup Model Değerlendirmesi.....	118
4.1.4. Dördüncü Grup Model Değerlendirmesi .....	128
4.1.5. Beşinci Grup Model Değerlendirmesi .....	136
4.1.6. Altıncı Grup Model Değerlendirmesi .....	139
4.2. Verim Değerlendirmesi.....	143
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>154</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>163</b>
<b>ÖZ GEÇMİŞ.....</b>	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\eta$	Toz toplama verimi (%)
$\mu$	Dinamik viskozite (kg/m.s)
$A$	Alan (m <sup>2</sup> )
$C_D$	Sürüklenme katsayısı
$D_h$	Hidrolik çap (m)
$E$	Partiküllerin yüklendiği elektrostatik alan gücü (V/m)
$H_2O$	Su
$H_2SO_4$	Sülfürik asit
$K$	Basınç kayıp katsayısı
$L$	ESÇ uzunluğu (m)
$NH_3$	Amonyak
$NO_x$	Azot oksitler
$P$	Basınç (Pa)
$Q$	Gaz debisi (m <sup>3</sup> /s)
$Re$	Reynolds sayısı
$SO_2$	Kükürt dioksit
$SO_3$	Kükürt trioksit
$T$	Gazın sıcaklığı (°C; K)
$U_g$	Yaklaşma hızı (m/s)
$U_{iç}$	Plakalar arasındaki gaz hızı (m/s)
$\alpha$	ESÇ girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açı
$\tau$	ESÇ toz toplama odasındaki bekletme süresi (s)
$\rho$	Akışkanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$I$	Türbülans şiddeti
$\Delta P$	Basınç farkı (Pa)
$\omega_e$	Göç hızı (m/s)
$\epsilon_w$	Partikülün bağıl dielektrik sabiti
$\epsilon_0$	Alanın elektriksel geçirgenliği (C/V.m)

## Kısaltmalar

ESÇ	Elektrostatik toz çöktürücü
EPA	Çevre koruma ajansı
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
ICAC	Temiz hava şirketler grubu
PM	Partikül madde
UDF	Kullanıcı tanımlı fonksiyon
RANS	Reynolds-ortalaması Navier-Stokes
DNS	Doğrudan sayısal çözüm metodu
LES	Büyük girdap yaklaşım metodu
RNG	Yeniden normalleştirme grubu
DPM	Ayrık faz modeli



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. PM partikülleri için boyut karşılaştırması .....	4
Şekil 2.2. Çeşitli hava kirliliği kontrol cihazlarının partikül boyutuna göre etkinliği .....	6
Şekil 2.3. Çökeltme Odası ve Ekipmanları.....	7
Şekil 2.4. Çoklu Tabakalı Howard Çökeltme Odası.....	8
Şekil 2.5. Engelleyici (Baffle) Çökeltme Odası .....	8
Şekil 2.6. Siklon Tipleri-(a) Üstten teğetsel girişli siklon, (b) Alttan teğetsel girişli siklon, (c) Eksenel girişli siklon .....	9
Şekil 2.7. Islak Yıkayıcı Sistemi .....	10
Şekil 2.8. Venturi Yıkayıcı Sistemi.....	11
Şekil 2.9. Torba Filtre odası .....	12
Şekil 2.10. Bir ESÇ odasının genel görünümü .....	14
Şekil 2.11. ESÇ içindeki deşarj elektrotları ve toz toplama plakaları. ....	14
Şekil 2.12. ESÇ içinde toz partiküllerin elektriksel yük ile yüklenmesi ve toplama elektrodu ile toplanması.....	15
Şekil 2.13. Toz toplama plaka tiplerine göre ESÇ modelleri-(a) Silindirik plakalı ESÇ ve (b) Paralel plakalı ESÇ .....	16
Şekil 2.14. Elektrot şarj yöntemine göre ESÇ modelleri-(a) Tek aşamalı ESÇ ve (b) İki aşamalı ESÇ .....	17
Şekil 2.15. İki aşamalı ESÇ.....	17
Şekil 2.16. Çalışma sıcaklığına göre ESÇ modelleri-(a) Sıcak ESÇ ve (b) Soğuk ESÇ .....	18
Şekil 2.17. Islak ESÇ modelleri-(a) Boru tipi ıslak ESÇ ve (b) plaka tipi ıslak ESÇ.....	19
Şekil 2.18. Laminer ve türbülanslı akışta teorik toz toplama verimi .....	23
Şekil 2.19. Bir ESÇ içinde bölme sayısı arttıkça sağ ve sol bölmelere doğru gaz hızındaki ve basınç kaybındaki değişim.....	28
Şekil 2.20. ESÇ içinde oluşan vorteks ve buna bağlı olarak bölmelerdeki akım hızında oluşabilecek değişim .....	29
Şekil 2.21. Paralel bağlı ESÇ .....	29
Şekil 2.22. Dört bölmeden oluşan seri bağlı bir ESÇ .....	29
Şekil 2.23. Altı farklı toz çeşidi için sıcaklık-direnç ilişkisi.....	31
Şekil 2.24. Bir çimento fabrikasındaki ESÇ için sıcaklık-verim ilişkisi .....	31
Şekil 2.25. Sıcaklık ve nemin çimento tozunun özdirencine etkisi .....	32
Şekil 2.26. ESÇ toz partikül dağılımının verimlilik üzerine etkisi .....	33

Şekil 2.27. Toz partiküllerinin çapı-toplama verimi eğrisi.....	33
Şekil 2.28. EŞÇ içerisindeki giriş gaz dağılımını düzenleyen delikli paneller .....	34
Şekil 2.29. EŞÇ içinde akım düzenleyici olarak kullanılan sistemler-(a) ve (b) akım yönü değiştirici bariyer, (c) delikli ön panel ve orifis.....	43
Şekil 2.30. EŞÇ içinde akım düzenleyici olarak kullanılan kılavuz kanatlar .....	45
Şekil 3.1. Model EŞÇ'nin tasarım ölçüleri (Model 1).....	61
Şekil 3.2. HAD'ın Çözüm Adımları .....	64
Şekil 3.3. Türbülanslı akış (a) ve laminar akış (b).....	66
Şekil 3.4. Akış analizinde kullanılan türbülans modellerinin karşılaştırılması.....	70
Şekil 3.5. SOLIDWORKS'de çizilen 3D EŞÇ modelleri-(a) içerisinde plaka olmayan ve (b) içerisinde plaka olan model görüntüleri .....	80
Şekil 3.6. Model-1 (a) ve Model-2 (b) ağ yapılarının görseli .....	81
Şekil 3.7. Model-1 EŞÇ için ağ yapısından bağımsızlığı .....	82
Şekil 3.8. Partikül duvar arasındaki etkileşim .....	85
Şekil 3.9. Doğrulama simülasyonunda kullanılan problemin şematik görünümü .....	89
Şekil 3.10. Doğrulama simülasyonunda ölçümü alınan bölgenin düzlemsel ve y yönündeki konumu .....	89
Şekil 3.11. Doğrulama simülasyonu ve bu çalışmanın karşılaştırılması .....	90
Şekil 4.1. Birinci grup EŞÇ modellerin farklı açı değerlerine göre basınç farkı ve basınç düşüş katsayıları (Model 1-48) .....	95
Şekil 4.2. EŞÇ içindeki düzlem konumu (Model-2).....	96
Şekil 4.3. Birinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $\alpha = 50^0$ (Model 1-48) .....	97
Şekil 4.4. Birinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $\alpha = 50^0$ (Model 1-48).....	98
Şekil 4.5. Birinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $\alpha = 50^0$ (Model 1-48)..	99
Şekil 4.6. EŞÇ orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 1-12).....	101
Şekil 4.7. EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 1-12) .....	102
Şekil 4.8. EŞÇ orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 1-12) .....	103
Şekil 4.9. İkinci grup EŞÇ modellerin sabit bekletme süresi tasarımı ( $\tau = 1$ s- $L = 2$ m).....	105
Şekil 4.10. İkinci grup EŞÇ modellerin farklı açı değerlerine göre basınç farkı ve basınç düşüş katsayıları (Model 49-96) .....	107
Şekil 4.11. İkinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $\alpha = 50^0$ (Model 49-96).....	109
Şekil 4.12. İkinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $\alpha = 50^0$ (Model 49-96) .....	110

Şekil 4.13. İkinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $\alpha = 50^0$ (Model 49-96) .....	111
Şekil 4.14. İkinci grup plakalı/plakasız EŞÇ'lerin orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s, $\alpha = 56^0$ .....	113
Şekil 4.15. EŞÇ orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 49-60) .	114
Şekil 4.16. EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 49-60) .....	115
Şekil 4.17. EŞÇ orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 49-60) .....	116
Şekil 4.18. Üçüncü grup EŞÇ modellerindeki giriş yapılarının boyutlarının değiştirilmesi ( $\tau = 1$ s, ... $U_g = 6$ m/s).....	119
Şekil 4.19. Üçüncü grup EŞÇ modellerin farklı açılı değerlerine göre basınç farkı ve basınç düşüş katsayıları (Model 97-144) .....	120
Şekil 4.20. İkinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $U_g = 6$ m/s, $\alpha = 50^0$ (Model 97-144).....	122
Şekil 4.21. İkinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $U_g = 6$ m/s, $\alpha = 50^0$ (Model 97-144) .....	123
Şekil 4.22. İkinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $U_g = 6$ m/s, $\alpha = 50^0$ (Model 97-144) .....	124
Şekil 4.23. Üçüncü grup EŞÇ'lerin orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $U_g = 6$ m/s, $\alpha = 50^0$ .	125
Şekil 4.24. Üçüncü Grup /İkinci grup EŞÇ'lerin orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $Q = 24$ m <sup>3</sup> /s, $\alpha = 50^0$ .....	126
Şekil 4.25. Üçüncü grup EŞÇ'lerin orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $U_g = 6$ m/s, $\alpha = 60^0$ .....	127
Şekil 4.26. Dördüncü grup EŞÇ modellerin farklı koniklik açılı tasarımları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 145-151).....	129
Şekil 4.27. Dördüncü grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 145-151).....	131
Şekil 4.28. Dördüncü grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 145-151) .....	132
Şekil 4.29. Dördüncü grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 145-151).....	133
Şekil 4.30. Dördüncü grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız vektörleri konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 145-151).....	134
Şekil 4.31. Model 151'in orta kesit bölgesindeki (a) basınç konturları, (b) hız konturları, (c) akım çizgisi konturları, (d) hız vektörleri konturları ( $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s, $\alpha = 80^0$ ) .....	135
Şekil 4.32. Beşinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 152-155) .....	137
Şekil 4.33. Beşinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $U_g = 6$ m/s- $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 152-155) .....	138

Şekil 4.34. Beşinci grup ESC orta kesit bölgesindeki hız konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 152-155) .....	138
Şekil 4.35. Model-1 toz toplama plakalarının uçlarında meydana gelen basınç artışı- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s, $\tau = 0.75$ s, Açık = 60° .....	139
Şekil 4.36. Altıncı grup ESC'lerin plakaların farklı yerleştirme biçimine göre tasarımları - $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s, $\tau = 1$ s.....	140
Şekil 4.37. Altıncı grup ESC orta kesit bölgesindeki basınç-hız-akım çizgileri konturları- $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s (Model 156-158).....	142
Şekil 4.38. Altıncı grup ESC'lerin plakaların farklı yerleştirme biçimine göre DPM video görseli - $U_g = 6$ m/s, $Q = 6$ m <sup>3</sup> /s, $\tau = 1$ s.....	143
Şekil 4.39. Plakalar arasındaki gaz debisini hesaplamak için tanımlanan düzlemler (Model-2)-(a) iki plaka arasında oluşturulan düzlem, (b) tüm plakalar arasında oluşturulan düzlem .....	144
Şekil 4.40. Alan ve difüzyon şarjının partikül çapı-partikül göç hızı arasındaki ilişki.....	146
Şekil 4.41. Göç hızı – direnç ilişkisi.....	147
Şekil 4.42. ESC modellerin farklı açı değerlerine göre verimleri (Model 1-144) .....	149
Şekil 4.43. Üçüncü Gruptaki (a) Model 108 – (b) Model 144 tasarımların akım çizgisi konturları	150
Şekil 4.44. Dördüncü grup ESC modellerin verimleri (Model 145-151) .....	151
Şekil 4.45. Beşinci grup ESC modellerin verimleri (Model 152-155) .....	152
Şekil 4.46. Elektrotlara uygulanan farklı elektriksel alan gücünün partikül boyut-verim ilişkisi (Model-134).....	153

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Katı yakıtlı yakma tesislerinin baca gazlarındaki toz emisyonları sınır değerleri.....	2
Tablo 2.1. Gaz, buhar ve toz gibi kirlenici ve kontrol sistemlerin özellikleri .....	5
Tablo 2.2. Toz kontrol sistemlerin avantaj ve dezavantajları .....	35
Tablo 3.1. Tasarlanan Model ESÇ'lerin boyutları .....	58
Tablo 3.2. Standart k-epsilon (k-ε) modelinin model sabitleri.....	73
Tablo 3.3. Realizable k-ε türbülans modelinin model sabitleri .....	75
Tablo 3.4. RNG k-ε türbülans modelinin model sabitleri .....	77
Tablo 3.5. Model-1 ve Model-2 ağ istatistikleri.....	81
Tablo 3.6. Ağ kalitesi göstergeleri .....	82
Tablo 3.7. Model-1 ESÇ için oluşturulan farklı ağ yapıları ve ağ kalitesi değerleri .....	83
Tablo 3.8. Partikül sınır koşulları .....	84
Tablo 5.1. Toz toplama verimini ve basınç kaybını etkileyen faktörler .....	162

## 1. GİRİŞ

2018 yılında dünyada kullanılan enerjinin yaklaşık % 82'si fosil yakıtlardan, bunun da % 30'u kömürden sağlanmıştır (EIA, 2019). Sanayinin gelişmesi enerjiye, dolayısıyla fosil yakıtlara duyulan talebi artırmaktadır. Dünyada yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımların bu hızla artması fosil yakıtlara olan talebi 2050 yılına kadar % 82'den % 69'a düşürebileceği tahmin edilmektedir. Ancak 2050 yılında bile fosil yakıtlardan sağlanan enerjinin % 27'si kömürden karşılanacaktır (EIA, 2019). Önümüzdeki yıllarda enerji üretiminde fosil yakıtın payının azalacağı görülse de dünya enerji üretiminin 2018-2050 yılları arasında % 50 artacağı tahmini göz önüne alındığında fosil yakıt kullanımının da buna paralel olarak artacağını tahmin etmek güç olamasa gerek. Bu projeksiyon göz önüne alındığında; 2018 yılına göre 2050 yılında % 35 daha fazla kömür, enerji üretmek amacıyla kullanılacak demektir. Bu durum kömüre dayalı yeni termik santrallerin kurulması ve yaygınlaşmasına neden olacaktır.

Termik santrallerden atmosfere salıverilebilecek kirleticilerin kontrolü ile ilgili yapılan yasal düzenlemelerdeki sınır değerler, alınacak önlemlerle sağlansa bile bu tesislerin bacasında atmosfere her gün tonlarca toz ve gaz kirleticiler salıverilmektedir. Bu toz ve gazların oluşturduğu hava kirliliğinin çevre ve insan sağlığına ciddi olumsuz etkileri söz konusudur. Bu etkiler; göz yanmaları, bronşit, nefes darlığı, romatizma, eklem romatizması, raşitizm, kalp hastalıkları, kirli havada yaşayan bireylerde aşırı derecede ihtiyarlaşma belirtilerinin görülmesi, akciğer kanseri, kan zehirlenmesi, sinirlilik ve ruhsal bozukluklar gibi rahatsızlıklar sayılabilir (İlhan, vd., 2011).

03/07/2009 tarihli ve 27277 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan "Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü (SKHKK) Yönetmeliği" EK-1'e göre; katı yakıtlı yakma tesislerinin baca gazlarındaki toz emisyonlarının sınır değerleri yakıt ısı gücüne göre Tablo 1.1'de verilmektedir. Yakma tesislerinin baca gazında yapılan ölçüm sonuçlarının bu sınır değerleri aşmaması gerekmektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2009).

Tablo 1.1. Katı yakıtlı yakma tesislerinin baca gazlarındaki toz emisyonları sınır değerleri.

Yakıt Isıl Gücü	Emisyon Sınır Değerleri (mg/Nm <sup>3</sup> )
500 kW<Yakıt Isıl Gücü≤5 MW	200 mg/Nm <sup>3</sup>
5MW<Yakıt Isıl Gücü≤50 MW	150 mg/Nm <sup>3</sup>
Yakıt Isıl Gücü> 50 MW	100 mg/Nm <sup>3</sup>

SKHKK Yönetmeliği'ne göre, tesislerdeki emisyon kontrollünün düzgün bir şekilde yapılması, sınır değerleri aşıp aşmadığının tespiti ve tesislerin etkinliklerinin belirlenmesi amacıyla kayıt özelliği olan cihazlarla sürekli olarak ölçüm yapılması istenebilir. Başka bir ifade ile bu tesislerden çıkan emisyonları filtreleme verimsizliği ve toz tutma kapasitesindeki düşüşler doğrudan yetkili kurumlar tarafından izlenmektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2009).

Bu kısıtlamalardan dolayı çevresine toz emisyonu yayan tesislerin bu emisyonları yönetmelikte belirtilen sınır değerinin altına indirmek için en uygun toz tutma sistemi seçimini yapması ve tesislerine kurması gerekmektedir. Başta kömür yakan termik santraller olmak üzere katı yakıt yakılmasından kaynaklanan toz emisyon kontrolü için en yaygın olarak kullanılan toz giderim sistemi, elektrostatik toz çöktürücüler (ESC)'dir. ESC'ler bir gaz akımı içindeki tozun negatif ya da pozitif bir elektriksel yük ile yüklendikten sonra zıt yüklü bir plakada toplanmasını sağlayıp tozu gazdan ayıran sistemlerdir. ESC'ler baca gazı içindeki tozu % 99'dan fazla bir verimle tutmalarına rağmen hala 2.5 µm den küçük boyuttaki tozları çok iyi giderememektedirler. Bunun en önemli nedenlerinden biri ESC'nin tasarımının iyi yapılmamış olmasından dolayı içindeki toz toplama panelleri (veya plakaları) arasında gazın akım düzensizliği göstermesi ve neticede plakalar arasında gaz hızlarının farklı olmasıdır. ESC sistemlerinin verimi genel olarak ESC içerisindeki türbülans şiddetine, basınç kaybına, gaz akım hızındaki değişime, tozun boyut dağılımına, tozun yoğunluğuna ve tozun elektriksel yük ile yüklenmeye karşı direncine bağlıdır. Bir ESC'nin tasarımının iyi yapıldığının temel göstergelerinden biri onun içinde gaz akım dağılımının iyi olmasıdır. Çünkü gaz akım dağılımındaki düzensizlik toz toplama bölümünde vortekse, basınç kaybına ve neticede toz tutma veriminde düşüklüğe ve işletme masraflarının artmasına neden olmaktadır. Tezin amacı bir ESC odası içinde gaz akım dağılımını optimize ederek ESC'lerin çok küçük boyuttaki tozları da etkin bir biçimde tutabilmesini sağlamak, neticede sistemin genel toz tutma verimini artırmak ve basınç kaybindan dolayı azalan toz tutma verimini artırmaktır.

Buna göre; bu tezin temel hedeflerini şu şekilde sıralayabiliriz;

- Bir ESÇ içinde gaz akım dağılımını düzenleyerek toz toplama plakaları arasından eşit hızda gaz akımı geçmesini sağlamak. Gaz akım dağılımı optimizasyonu ile ESÇ'nin küçük boyuttaki tozları da etkin biçimde tutmasını gerçekleştirerek sistemin genel toz tutma verimini artırmak.

- ESÇ içerisinde vorteksi minimuma indirecek tasarımı sağlayarak hem sistemin basınç kayıplarını azaltmak ve hem de toz toplama plakaları üzerine çökelmiş tozların yeniden sürüklenmesini engellemek.

- Tasarlanmış olan ESÇ sistemlerinde basınç kaybı ile gaz akım hızı arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak gaz akım dağılımı optimize edilmiş bir ESÇ için toplam basınç kayıp katsayısını hesaplamak ve neticede ESÇ'ler için karmaşık olmayan bir basınç kaybı hesaplamasını ortaya koymak.

- Bir ESÇ odası içinde bölme sayısındaki artış ile akım dağılımı ilişkisini ortaya koyarak söz konusu ESÇ odası içerisine yerleştirilebilecek maksimum bölme sayısını ve bir ESÇ'nin genel boyutunu belirlemek. Bunun sonucunu kullanarak yüksek baca gazı debisi durumunda bu debinin bölünerek besleneceği paralel bağlı ESÇ odaları sayısını tespit etmek.

- Tasarlanan her bir ESÇ odasındaki gaz akımını Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı FLUENT kullanılarak simüle etmek ve bu simülasyonlarla akım dağılımı ve basınç düşmesi durumlarını incelenmektedir.

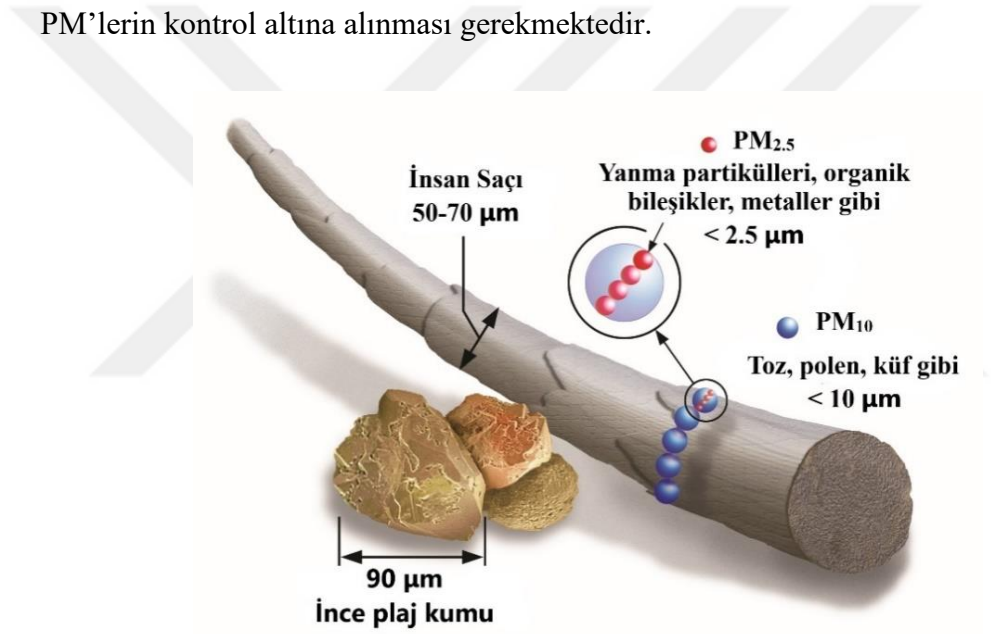
Bu amaçlar doğrultusunda özellikle termik santrallerde toz gidermek için kullanılan ESÇ sistemlerin daha etkin, daha verimli ve daha az işletme masraflarıyla kullanılabilmesi için optimizasyonu sağlanmıştır.

Tezden elde edilen sonuçlar ile ESÇ sistemlerinde işletme problemlerine sebep olan basınç düşüşü ve türbülans şiddeti uygun tasarım ile en aza indirilmiş olacaktır. Bu sayede büyük bir pazar ağına sahip bu sistemlerin yeni tasarımlarıyla toz tutma verimlerini artırıp işletme maliyetlerinin azalacağı düşünülmektedir. Ayrıca elde edilen veri ve değerlendirme sonuçları gelecekteki araştırmalara öncülük edecek ve ışık tutacaktır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1. Toz Kirleticilerin Kontrolü

Havada asılı durabilen ve boyutları 0.1-100  $\mu\text{m}$  arasında değişen katı ve sıvı maddelere partikül madde (PM) denir. PM'ler kaba (aerodinamik çapı 2.5-10  $\mu\text{m}$  aralığındaki partiküller,  $\text{PM}_{10}$ ) ve ince partiküller (aerodinamik çapı 2.5  $\mu\text{m}$ 'den küçük partiküller,  $\text{PM}_{2.5}$ ) olarak sınıflandırılır. Şekil 2.1'de kaba ve ince partiküller arasındaki farkın anlatıldığı bir karşılaştırma bulunmaktadır. PM'lerin başlıca kaynakları stabilize yollar, tarım alanları, şantiyeler (inşaat ve yıkım çalışmaları), baca gazları (fosil yakıt yakan tesisler) ve yangınlar sayılabilir. Bu maddeler, özellikle  $\text{PM}_{2.5}$  konsantrasyonuna ve maruz kalma süresine bağlı olarak ciddi sağlık problemlerine neden olabilmektedir (EPA, 2020). Bu sağlık problemlerinden dolayı PM'lerin kontrol altına alınması gerekmektedir.



Şekil 2.1. PM partikülleri için boyut karşılaştırması (EPA, 2020)

Bir gaz akımı içindeki tozu tutmak için söz konusu tozun bir takım fiziksel ve kimyasal özelliklerinden ve fiziksel kurallardan yararlanarak onu gaz akımından ayırmak mümkündür. Partiküller için toz tutucu olarak adlandırılan hava kirliliği kontrol sistemlerinin seçiminde işletme ve inşaat maliyetleri, ekipman, elektrik, arazi ve mühendislik masrafları da önemli faktörler olduğundan, giderilmesi istenilen kirletici maddenin birim miktarının en ucuz hangi sistemle giderilebileceği tespit edilmelidir. Endüstri tesislerinde emisyon kontrolünün sağlanması için farklı gaz ve toz tutma sistemleri kullanılabilir. Gaz ve buhar kontrolü için absorpsiyon, adsorpsiyon, yoğuştırma ve oksidasyon gibi yöntemler kullanılmaktadır. Tozu gaz

akımından ayırmak için yer çekimini kullanan çöktürme odaları, santrifüj ve yer çekimi kuvvetlerini birlikte kullanan siklonlar, partikül boyutundan yararlanan filtreler, fiziksel çekim ve hidrofilik özelliğinden yararlanan ıslak yıkayıcılar ve elektriksel yük ile yüklenmesinden yararlanan ESC'ler tasarlanmıştır (Liu and Liptak, 1999). Bu sistemlerin genel prensibi ile bir gaz akışındaki tozu aşağıda belirtilen dört basamakta uzaklaştırmak mümkündür (Theodore, 2008).

Bunlar;

1. Partikülün bir toplama bölümüne yönlendiren bir dış kuvvet (veya kuvvetler) uygulanmalıdır.
2. Partikül, yeterince güçlü kuvvetlerle bu bölgede tutulmalıdır.
3. Toplanan partiküller toplama bölümünde biriktikten sonra buradan uzaklaştırılır.
4. Partiküllerin son bertarafı giderim sürecini tamamlamaktadır.

Tozları akım yönünden saptıracak olan yerçekimi, santrifüj kuvveti, atalet ve elektriksel çekim kuvveti veya gaz ve tozu birlikte kontrol edebilen sistemlerden hangisi ya da hangilerinin kullanılacağına karar verilirken sistemin toz tutma verimi, ilk yatırım ve işletme masrafları, tutulacak tozun özelliği, baca gazı sıcaklığı, baca gazının kimyasal karakteristiği, baca gazı debisi ve tesisin baca gazı içindeki toz konsantrasyonunun düşürülmesi gereken değerin göz önüne alınması gerekmektedir(Müezzinoğlu, 1987; Jedrusik, et al., 2003).

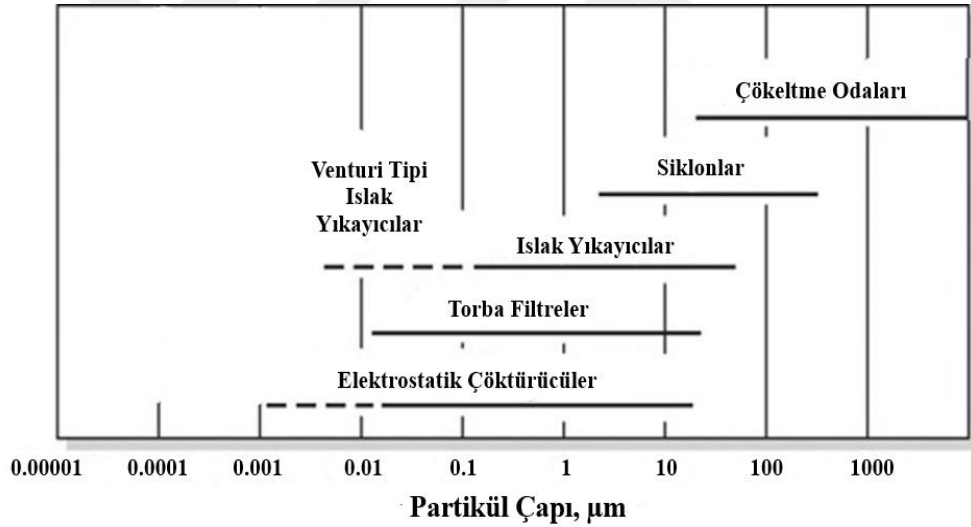
Tablo 2.1. Gaz, buhar ve toz gibi kirlenici ve kontrol sistemlerin özellikleri (Müezzinoğlu, 1987; Jedrusik, et al., 2003)

Partikül Özellikleri	Boyut dağılımı
	Biçimi
	Yoğunluğu
	Yapışabilirliği
	Su tutma yeteneği
	Elektriksel özellikleri
Proses Özellikleri	Gazın giriş debisi
	Gaz içindeki toz miktarı
	Müsaade edilecek basınç kaybı
	Sistemin sürekli ya da kesikli çalışma durumu
	Ne kadar toz tutma verimi istendiği
Tutulan tozların hangi yöntemle bertaraf edileceği	

Tablo 2.1. (devam)

Taşıyıcı Gazın Özellikleri	Sıcaklığı
	Nemliliği
	Alevlenme özelliği
	Paslandırma özelliği
İşletme Özellikleri	Sistemin kurulacağı alan miktarı
	Basınç, sıcaklık, korozyon gibi sınırlamaların olup olmadığı
	İlk yatırım masrafları
Ekonomi	İşletme masrafları
	Bakım masrafları

Toz kontrol sistemlerinden çökeltme odaları ve siklonlar genelde ön arıtım ve ileri toz tutucuların yükünü hafifletmek amacıyla; ıslak yıkayıcılar, torba filtreler ve ESK'ler ise ileri kademe toz tutma amacı ile kullanılmaktadırlar. Bu kontrol sistemlerinin etkin bir şekilde tuttuğu partikül çapları Şekil 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.2. Çeşitli hava kirliliği kontrol cihazlarının partikül boyutuna göre etkinliği (Vesilind, vd., 2014)

### 2.1.1. Çökeltme Odaları (Setting Chamber, Gravity Settlers)

Çökeltme odaları, partikül emisyonlarını kontrol eden en basit sistemlerdir. Su ve atıksu arıtma sistemlerindeki çökeltme tanklarıyla benzerlik gösterirler. Belli bir giriş hızındaki toz emisyonunun baca gazı kanalının aniden genişleyerek bir toplama ortamına alınıp, burada yatay hızlar minimumda tutulması için yeterli alan sağlanması durumunda yerçekimi etkisiyle meydana gelen düşey hızın toz partikülleri yeterli bir bekletme süresinde toplama bölgesine taşınması şeklinde çalışan sistemlerdir (Zevenhoven and Kilpinen, 2004). Uygulanan bekletme süresinde partiküller yer

çekimi etkisi ile toplama bölümünde biriktirilmiş olur. Gerekli görülmesi durumunda sisteme spreyleme de eklenebilmektedir (Theodore, 2008).

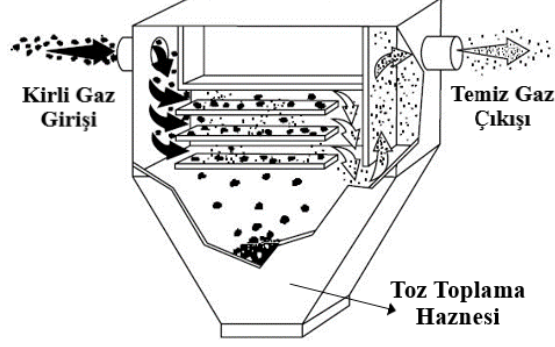


Şekil 2.3. Çökeltme Odası ve Ekipmanları (Theodore, 2008)

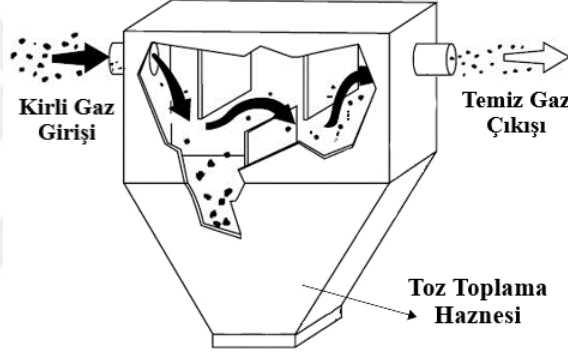
Çökeltme odaları; giriş ve çıkış kanalları ile toz çökeltme ve toplama bölümlerinden oluşmaktadır (Şekil 2.3). Çökeltme odası tasarımında gaz giriş hızı 30-300 cm/s arasında seçilebilmektedir. Sistemin yaklaşma hızı arttıkça artım verimi düşmektedir. Bu sistemler teorik olarak  $\text{çap} > 40 \mu\text{m}$  den büyük partiküller için verimlidir (Theodore, 2008).

Genel olarak iki tür çökeltme odası kullanılmaktadır. Bunlar; Howard çökeltme odası olarak da bilinen çoklu tabakalı çökeltme odaları (Şekil 2.4) ve engelleyicili (baffled) ataletli ayırıcılardır (Şekil 2.5). Çoklu tabakalıda gaz içindeki partiküller sistem içine yatay yerleştirilmiş birkaç tabakaya çarparak çökelmeye geçmektedir. Burada  $\text{çap} > 15 \mu\text{m}$  olan partiküller yatay tabakalı çökeltme odalarında daha verimli şekilde çöklerler(Theodore, 2008). Ataletli ayırıcılarda ise sistem içinde kanallara dik konumda yerleştirilen engelleyiciler gaz akımının yönünü değiştirerek partiküllerin ayrılma ve çökeltme işleminin birlikte gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bir yandan gaz hızının yönü değiştirilirken bir yandan da partiküllerin düşey taşınımı sağlanır. Partiküllerin toplanması; yerçekimi, atalet (eylemsizlik) ve momentum etkisiyle gerçekleşir. Bu yöntemle,  $\text{çap} > 20 \mu\text{m}$ 'den büyük iri partiküller toplanabilir. Bu sistemlerdeki düşey paneller, giren gazın bekletme süresini artırdığı için sistemin partikül tutma verimi artar ve bundan dolayı ağırlık çökeltme odalarından daha az alana ihtiyaç duyar (Theodore, 2008). Tablo 2.2'de Çökeltme odalarının avantaj ve dezavantajları verilmiştir (Neundorfer, 1997; Flagan and Seinfeld, 1988; UFC, 2003; Wang, et al., 2004; Theodore, 2008).

Çökeltme odaları nihai toplamaya girmeden önce gaz sıcaklığını düşürmek ve büyük partikülleri kısmi olarak toplamak için bu sistemler ön arıtım amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. Çoklu Tabakalı Howard Çökeltme Odası (Theodore, 2008)

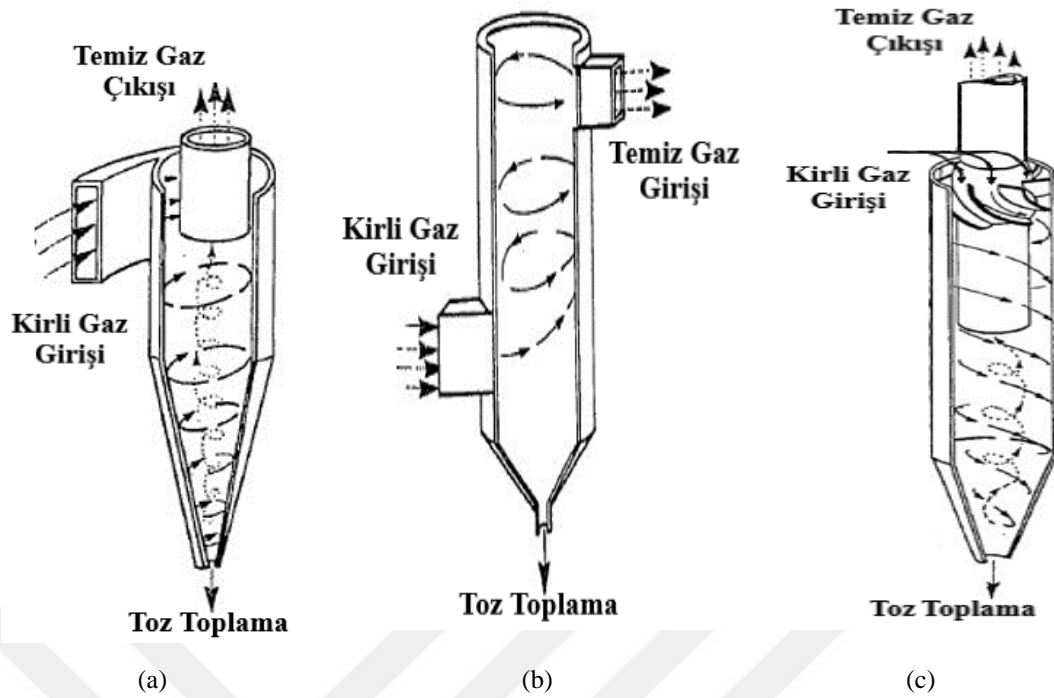


Şekil 2.5. Engelleyici (Baffle) Çökeltme Odası (Theodore, 2008)

### 2.1.2. Siklonlar (Cyclone Separator)

Siklonlar şekil itibari ile silindirik gövdeli ve alt tarafı konik şeklinde olan, katı-gaz ayrımı için en çok kullanılan sistemlerden biridir. Toz emisyonları gaz akımı ile birlikte silindirik yapı içine teğetsel olarak girdiğinde toz partikülleri santrifüj kuvveti ile yan çepere doğru itilmekte; siklonun iç gövde yüzeyine çarpan partiküllerin hızı sürtünme etkisiyle azalmakta ve yer çekimi daha etkili olmaya başladığında partikülü aşağı doğru çekmektedir. Sonuçta partiküller siklonun alt kısmındaki konik bölüme doğru çökeltmektedir (Theodore, 2008; Wang, et al., 2004). Siklonun toz toplama verimi santrifüj kuvvetinin artması ile artmaktadır. Ancak bu kuvvet belli bir değerin üzerine çıktığında siklonların toz tutma verimlerinde türbülans şiddetine bağlı olarak azalma ve sistemdeki basınç kaybında ise artış gözlemlenmektedir (Theodore, 2008).

Siklon ayırıcılar birkaç geometride kullanılmaktadır. Ancak konik - silindirik ters akış tipi yaygın olarak kullanılan modelidir (Şekil 2.6).



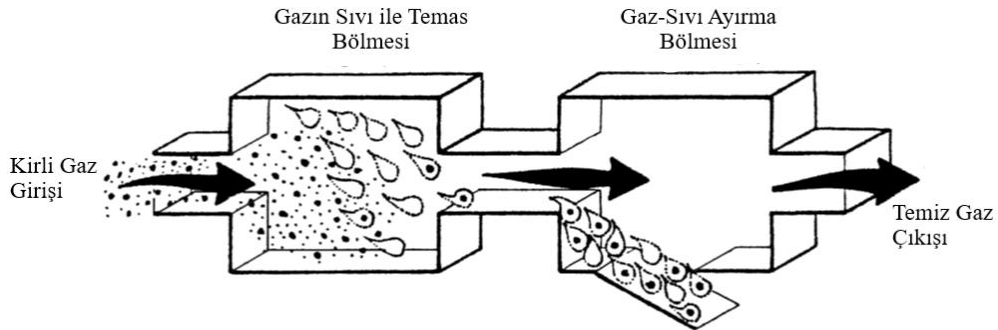
Şekil 2.6. Siklon Tipleri-(a) Üstten teğetsel girişli siklon, (b) Alttan teğetsel girişli siklon, (c) Eksenel girişli siklon

Siklonlar ürün geri kazanımında veya gaz temizlemede geniş bir endüstriyel uygulama yelpazesine sahiptir ve toz işleminin gerçekleştiği neredeyse her işletmede bulunur. Genel olarak çimento fabrikalarında, pamuk çırçır fabrikalarında, besin ve hububat imalathanelerinde, gübre fabrikalarında ve asfalt karıştırma fabrikalarında kullanılmaktadır. Ayrıca birçok tesiste büyük boyutta partiküller içeren büyük hacimli gazların oluştuğu diğer endüstri sektörlerinde ön arıtma amacıyla kullanılmaktadır. Nispeten bu sistemler ucuzdur, inşa edilmesi kolaydır, az bakım gerektirir ve prensip olarak yüksek sıcaklık ve basınçlarda çalışabilirler. İyi tasarlanmışsa eğer siklonlar 10  $\mu\text{m}$ 'den büyük partikülleri iyi verimlilikle toplayabilirler. Daha küçük partiküller için toz toplama verimi önemli ölçüde azalmaktadır. 10  $\mu\text{m}$ 'den küçük tozları tutmak için ESÇ'ler ve torba filtreler önerilir (Balgün, 2009). Siklonlar yapışkan partiküllerin giderilmesinde veya yüksek nem muhtevasına sahip katıların giderilmesinde kullanılamazlar; çünkü sistemde kekleşme ve tıkanma problemleri oluşabilmektedir. Bir siklon ile muamele edilebilen gaz akış hızları aralığı 50 - 50000  $\text{m}^3/\text{sa}$  arasında değişmektedir. Yüksek gaz akış hızlarında büyük boyutlu tek bir siklon inşa etmek yerine, genellikle akış hızı 20000  $\text{m}^3/\text{sa}$ 'i aştığı durumlarda, gaz akımı bölünerek paralel bağlı siklonlara beslenmesi yaygın bir uygulamadır (Wang, et al., 2004).

Siklonlar baca gazı akımlarından partikül maddenin alınması için nispeten düşük maliyetli bir yöntemdir. Siklonlar, basit yerçekimli çökeltme sistemlerinden çok daha karmaşıktır ve toz tutma verimleri çökeltme odalarından daha iyidir. Bununla birlikte, siklonlar, ESC'ler, torba filtreler ve venturi yıkayıcılar kadar verimli değildir, ancak bu sistemlerden (ESC'lerden ve torba filtrelerden) önce ön temizleyici olarak kullanılırlar (Theodore, 2008). Tablo 2.2'de siklonların avantaj ve dezavantajları verilmiştir (Neundorfer, 1997; Flagan and Seinfeld, 1988; UFC, 2003; Wang, et al., 2004; Theodore, 2008).

### 2.1.3. Islak Yıkayıcılar (Wet Scrubber)

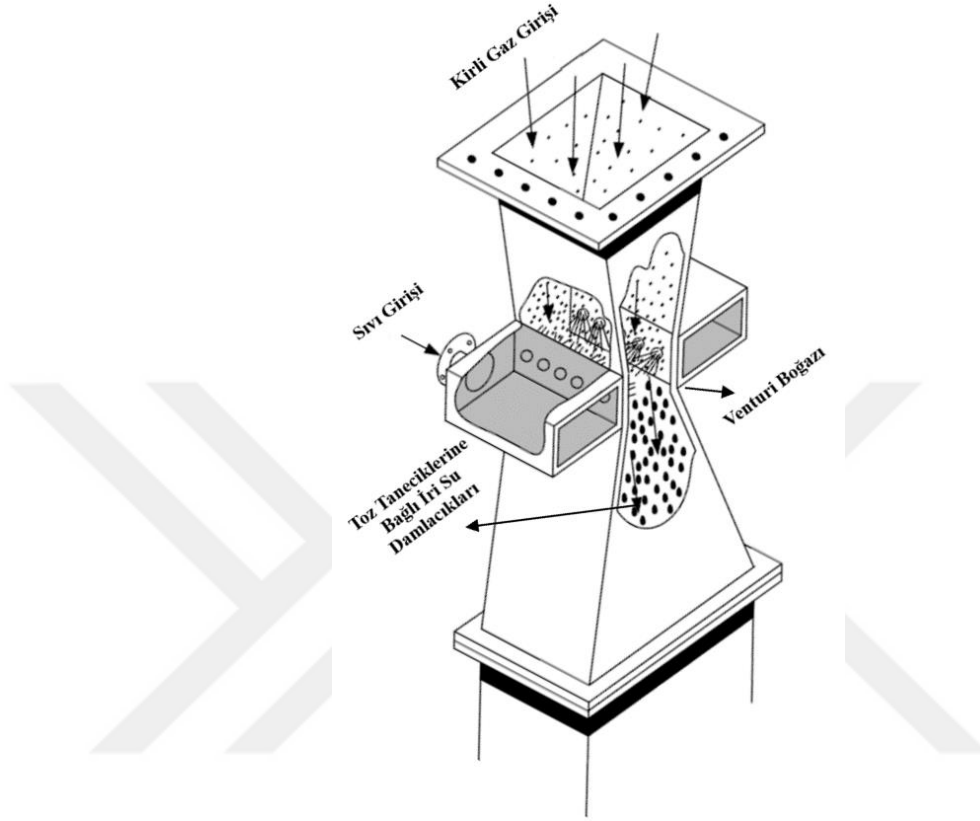
Islak yıkayıcılar, tozu sıvı damlacıkları vasıtasıyla atalet, difüzyon ve diğer kuvvetlerle birlikte gaz akımından uzaklaştırmak için kullanılan sistemlerdir (Liu and Liptak, 1999). Gaz akımı içindeki toz partikülleri sıvı damlacığına hacimsel çarpışma, kütsel çarpışma veya difüzyonla (Brown hareketi) çarpışma neticesinde yapışarak gazdan ayrılır (Şekil 2.7). Gaz emisyonlarının giderilmesi için tasarlanan bu sistemler toz emisyonlarının giderimi için de kullanılmaktadırlar (Theodore, 2008; Schnelle, et al., 2016).



Şekil 2.7. Islak Yıkayıcı Sistemi (Theodore, 2008)

Islak yıkayıcılar sıvının dağıtıldığı mekanizmaya göre çeşitli türlere ayrılmaktadır (Brauer and Varma, 1981). Bunlar, venturi yıkayıcılar, jet yıkayıcılar, püskürtme kuleleri gibi türleri bulunmaktadır. En yaygın kullanılan türü venturi yıkayıcılardır (Zevenhoven and Kilpinen, 2004). Şekil 2.8'de görülen venturi yıkayıcısında gaz ve sıvı dar bir boğazdan geçmeye zorlanır. Sıvı damlacıkları temas bölgesinde gaz akımındaki toz ile çarpışır ve ayırma bölgesinde su ile toz daha sonra arıtılmak üzere yerçekimi etkisiyle aşağı doğru hareket ederler (Theodore, 2008). Bu sistemlerde hem gazı hem de suyu basınçlandırmak için enerji harcamak gerektiğinden

sistemin işletme masrafları yüksektir (Schnelle, et al., 2016). Tozlu gazı basınçlı bir şekilde sisteme basmada kullanılan kompresörde sık sık arızalar meydana gelmektedir. Ayrıca bu sistemlerin işletilmesinde su temini ve çamur arıtımına da gerek duyulmaktadır (Theodore, 2008).



Şekil 2.8. Venturi Yıkayıcı Sistemi (Schnelle, et al., 2016)

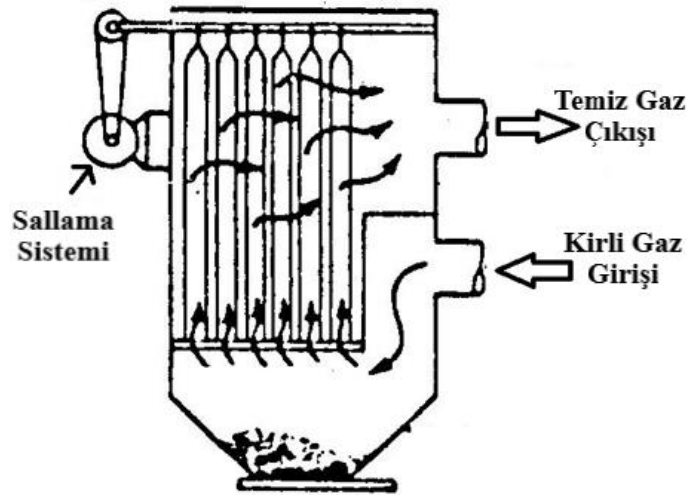
Bu sistemler giderilecek olan tozun yapışkan, yanıcı veya korozif olması durumunda ESÇ'ler ve kumaş filtrelerle göre tercih edilebilmektedirler. Bu özelliklere sahip bir kirleticiyi gidermek için ıslak yıkayıcı türlerinden birinin seçilmesi gerekmektedir (Flagan and Seinfeld, 1988). Tablo 2.2'de ıslak yıkayıcıların avantaj ve dezavantajları verilmiştir (Neundorfer, 1997; Flagan and Seinfeld, 1988; UFC, 2003; Wang, et al., 2004; Theodore, 2008).

Islak yıkayıcılar termik santral baca gazlarını veya başka bir proses (gübre üretimi, metal işleme, amonyak veya hidrojen sülfür üretme, asfalt üretme, çöp yakma gibi) gazları içindeki asit gazları, partikülleri, ağır metalleri, eser organikleri ve kokuları kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır (EPA, 2002; Wang, et al., 2004).

#### 2.1.4. Torba Filtreler (Bag Filter, Fabric Filters, Baghouses)

Filtreler tozun partikül boyutundan yararlanarak gazdan ayıran malzemelerdir. Yüzey ve derinlik filtreleri, tek kullanımlık ve çok kullanımlık filtreler gibi türlere ayrılır. Hava kirliliği kontrolünde en çok tercih edilen torba haline getirilmiş yüzey filtreleridir. Kumaş, cam yünü, polimer, teflon kaplı polimer ve seramik gibi malzemelerden filtre imal edilebilmektedir. Ancak yakma tesislerinin baca gazından toz giderebilmek için seçilecek filtre malzemesi sıcaklığa, basınca, tozun aşındırıcı etkisine ve asidik gaz etkisine dayanıklı olması gerekmektedir (Brauer and Varma, 1981; Schnelle, et al., 2016). En yaygın kullanılan filtre türü ise torba şeklindeki filtrelerdir (Theodore, 2008).

Baca gazının toz yüküne bağlı olarak filtre yüzeyi üzerinde filtrasyon hızını düşüren ve filtrede basınç kaybına neden olan bir toz tabakası (filtre keki) oluşur. Bu durumda filtreyi temizlemek gerekmektedir. Tıkanmış torbalar ters hava akımı veya vibrasyonla temizlenebilmektedir (Wang, et al., 2004). Filtreden ayrılan ve filtre odasının dibine çökelen toz, belirli aralıklarla buradan boşaltılarak toz depolama alanına nakledilir. Torba filtrelerin sık sık geri temizlenmesi hem işletme masraflarını artırır ve hem de filtrenin kullanım ömrünü kısaltır. Bu nedenle filtrasyon sisteminden önce çöktürme odası veya siklon toz tutucu gibi bir ön toz tutucu yerleştirmek filtrenin ömrünü uzatacak ve işletme masraflarını azaltacaktır (Sjoholm, et al., 2001). Şekil 2.9'da içine birden fazla torba filtre yerleştirilmiş bir filtre odası görülmektedir.



Şekil 2.9. Torba Filtre Odası

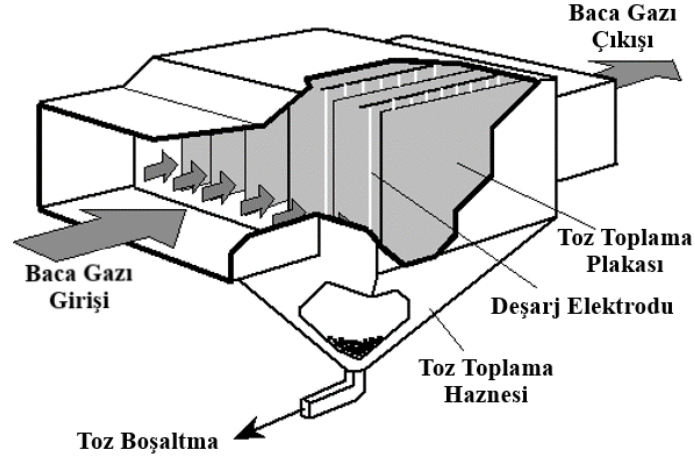
Torba filtreler  $1 \mu\text{m}$  ve daha küçük olan tozları da etkin biçimde tutabilmektedir (Schnelle, et al., 2016). Kömür yakıtlı tesislerde baca gazı içindeki uçucu külü % 99.9 verimle filtreleyebilirler (Liu and Liptak, 1999). Çok küçük boyuttaki tozları tutabilmek için gözenek çapı oldukça küçük filtre malzemesi kullanmak gerekmektedir, fakat bu durumda filtreden gazın geçişi zorlaşmaktadır. Filtrenin gaz geçişine karşı oluşturduğu bu direnç ancak gazı basınçlaştırarak yenilebilir. Bu durum işletme masrafını artırmakta ve yüksek basınca dayanıklı filtre seçilmesini zorunlu kılar ve işletme masraflarını artırır. Tablo 2.2’de Torba filtrelerin avantaj ve dezavantajları verilmiştir (Neundorfer, 1997; Flagan and Seinfeld, 1988; UFC, 2003; Wang, et al., 2004; Theodore, 2008).

Torba filtreler demir-çelik tesisi, dökümhane, çimento, termik santraller, yapı malzemesi üretim tesisleri, tahıl işleme tesisleri, deterjan üretme tesisi, kuru kimyasal geri kazanımı, kuru gıda işleme tesisleri ve metal toz geri kazanım tesislerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Brauer and Varma, 1981; Liu and Liptak, 1999).

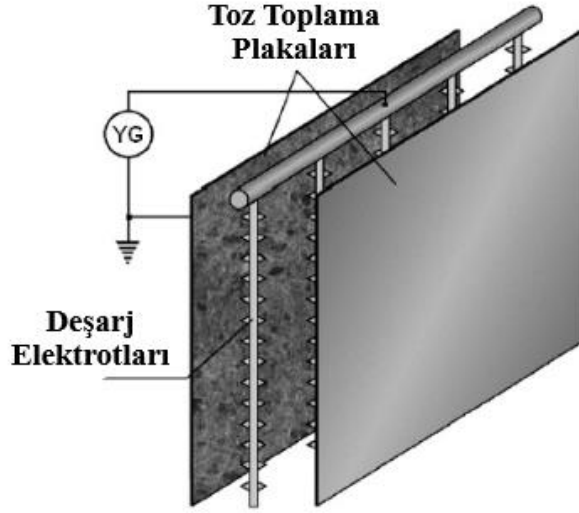
### **2.1.5. Elektrostatik Toz Çöktürücüler (Electrostatic Precipitator)**

#### **2.1.5.1. ESÇ Tanımı**

ESÇ tozun belirli bir elektriksel yük ile yüklendikten sonra zıt yüklü bir yüzeyde toplanmasını sağlayarak tozu gazdan ayıran sistemlerdir (Liu and Liptak, 1999). ESÇ’ler sülfürik asit tesisinde asit mistlerinin gideriminde kullanılabileceğinin gösterildiği 1907 yılından beri ticari olarak kullanılan sistemlerdir (EPA, 2000). ESÇ’ler genel olarak içinde tozun elektrik yükü ile yüklenmesini sağlayan deşarj elektrotları ve yüklü tozların toplanmasını sağlayan toz toplama yüzeylerini (toz toplama plakası) içeren kapalı odalar şeklindeki sistemlerdir. ESÇ’ler genel olarak geniş uygulama alanlarına sahip, farklı toz partikül boyut dağılımı üzerine yüksek toz tutma kapasiteleri, büyük baca gazı geçişlerine izin vermeleri, geniş sıcaklık aralığında çalışabilmeleri, uzun süre problemsiz kullanılabilmeleri, kontrol edilebilirlikleri, işletme masraflarının nispeten düşük olması ve fazla ek üniteye ihtiyaç duymamaları gibi özelliklerinden dolayı baca gazından toz giderilmesinde, özellikle termik santrallerde tercih edilen toz tutma sistemleridir. Bir ESÇ’nin genel görünümü Şekil 2.10’da ve ESÇ içerisindeki deşarj elektrotları ve toz toplama plakalarının görünümü Şekil 2.11’de verilmektedir.



Şekil 2.10. Bir EŞÇ odasının genel görünümü

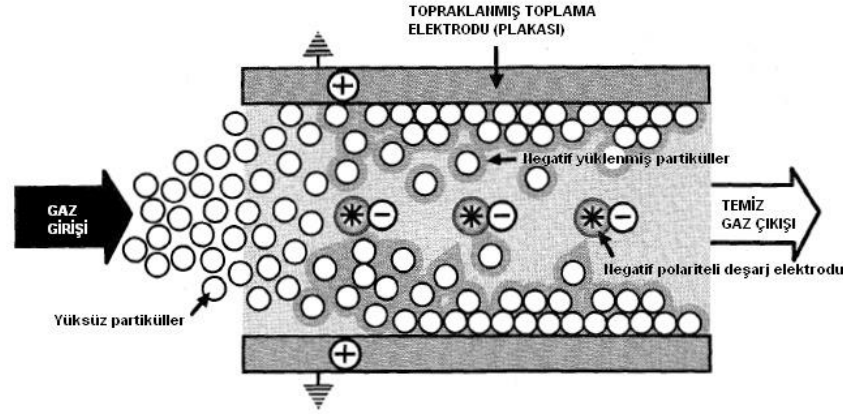


Şekil 2.11. EŞÇ içindeki deşarj elektrotları ve toz toplama plakaları (Jaworek, et al., 2007).

### 2.1.5.2. EŞÇ'lerin Çalışma Prensibi

EŞÇ'lerin temeli Coulomb'un elektriksel çekim ve cisimlerin bu cisimler arasındaki mesafe ile itilmesiyle ilgili bir yasadır; bu yasaya göre, elektrik kuvvetinin gücü mesafenin karesi ile azalır (Brauer and Varma, 1981). Elektrotlara uygulanan yüksek yüklü doğru akım bu elektrotlar etrafında bir elektriksel alan oluşturur. Bu elektriksel alana giren gaz molekülleri yüksek voltajın yarattığı elektron çarpışmalarıyla iyonlaşarak bir deşarj bölgesi yani koronayı oluşturur (Brauer and Varma, 1981; Mycock, et al., 1995). İyonlar ve elektronlar bu korona bölgesinde üretilmektedir. İyon polaritesi ise pozitif ve negatif yüklü olabilmektedir (Parker, 2003). Yapılan çalışmalar genellikle tozların negatif yüklerle daha iyi yüklendiğini ve topraklanmış bir metal yüzeyde de daha iyi toplandığını göstermektedir (Theodore, 2008). Ancak iyonların negatif yüklerle yüklenmesi durumunda sistem içerisinde ozon

oluşumu gerçekleşeceğinden pozitif iyon polaritesi tercih edilebilmektedir (EPA, 2002; Mizuno, 2000). Oluşturulan bu iyonlar havadaki asılı konumda bulunan katı partiküllere bağlanmaktadır. Elektriksel olarak yüklenmiş bu katı partiküller Coulomb kuvvetinin etkisiyle zıt yüklü toplama elektrotuna doğru hareket ederek Şekil 2.12’de görüldüğü gibi onun üzerinde toplanmaktadır (Mizuno, 2000).



Şekil 2.12. ESÇ içinde toz partiküllerin elektriksel yük ile yüklenmesi ve toplama elektrodu ile toplanması (Biege, et al., 1997)

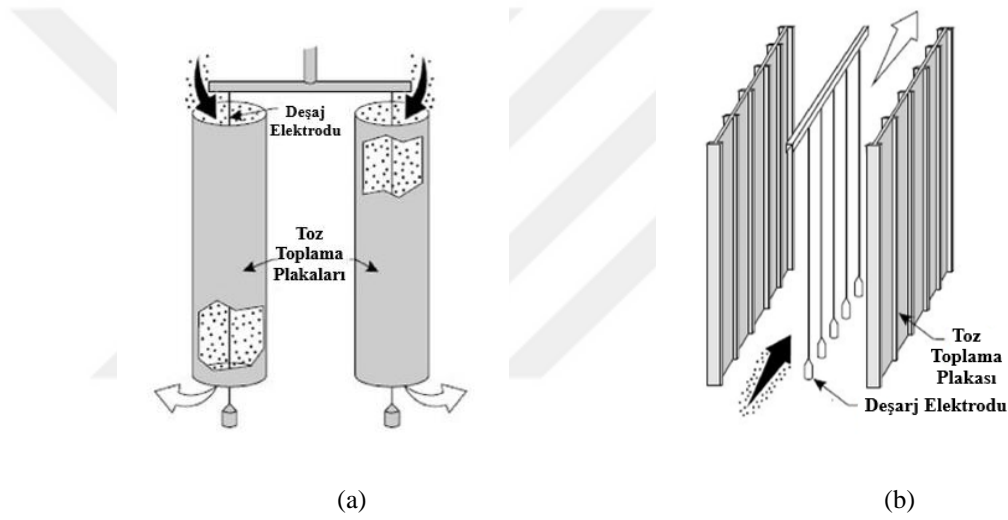
Toplama elektrotlarında toplanan katı partiküllerin kalınlığı belirli bir seviyeye ulaştığında, toplama elektrotları bir çekiçleme ekipmanı kullanılarak mekanik olarak silkenmektedir. Bu silkeleme sonucunda toplama elektrotunun yüzeyinden ayrılan toz, yerçekimi etkisiyle ESÇ'nin alt bölümünde bulunan hazneye dökülmektedir. Haznede biriken toz belirli aralıklarla ESÇ dışına alınmaktadır (Brauer and Varma, 1981; Mizuno, 2000).

### 2.1.5.3. ESÇ Tipleri

ESÇ'lerin endüstri tesislerinde uygulama şekillerine göre çeşitli tipleri söz konusudur. Bu tipler toplama elektrotlarının şekline göre (silindirik ya da plaka tipi; Şekil 2.13), gelen gaz akış yönüne göre (dikey ya da yatay gaz akışı), elektrot deşarj yöntemine göre (bir ya da iki aşamalı; Şekil 2.14), çalışma sıcaklığına göre (sıcak veya soğuk) ve işletme şekillerine göre (kuru ya da ıslak olarak; Şekil 2.16) farklılıklar göstermektedir (Mizuno, 2000).

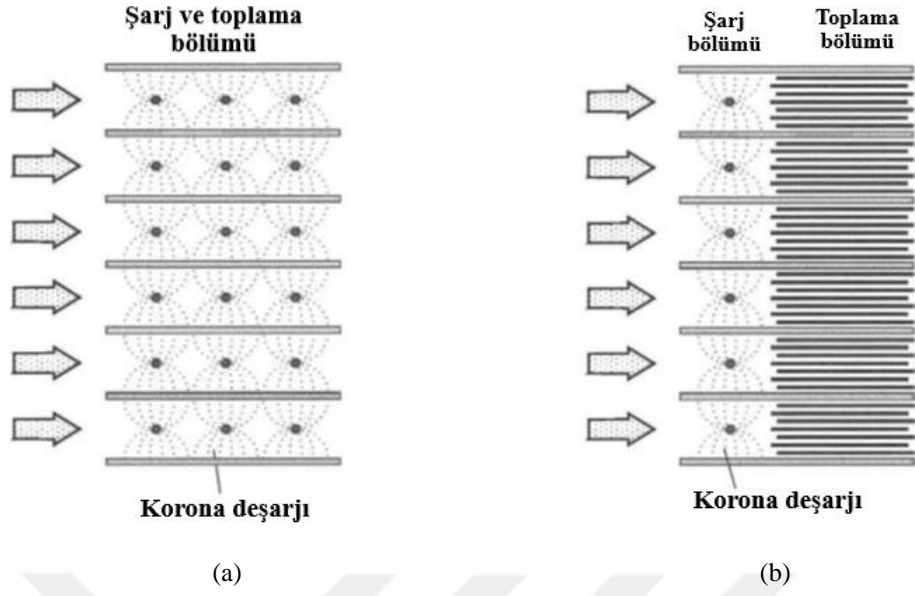
Silindirik plakalı ESÇ'ler de (Şekil 2.13 (a)), deşarj elektrotu silindir eksenini boyunca uzanır, silindirin iç yüzeyi ise toz toplama alanı olarak görev yapar. Gaz, silindir içinde aşağıdan yukarı doğru hareket ederken deşarj elektrotları vasıtasıyla elektriksel yük ile yüklenen tozlar zıt yüklü silindirin iç yüzeyine doğru hareket

ederler. Silindir iç yüzeyinde toplanan tozlar daha sonra alttan boşaltılır. Bu tip çöktürücüler esas olarak düşük gaz debilerinde kullanılmaktadır. Paralel plaka tiplerine kıyasla, genellikle % 90'dan daha büyük bir toz toplama verimliliğine sahiptir. Bu sistemlerde toplama plakası yüzeyini temizlemek için sallama ya da çekiçleme yerine su ile yıkama sıklıkla uygulanmaktadır (UFC, 2003). Plaka tipi EŞÇ'ler (Şekil 2.13 (b)), en sık kullanılan EŞÇ tipidir. Burada gaz yatay yönde akmakta, deşarj elektrotları her biri paralel toz toplama plaka arasında dikey olarak asılmış ve genellikle paralel plaka arası 20-30 cm olarak ayarlanmış EŞÇ tipidir (Anonymous, 2020b). Bu tip EŞÇ'ler genelde işletme şekli kuru ve tek aşamalı olarak birçok endüstriyel tesiste yaygın olarak kullanılmaktadır (Mizuno, 2000).

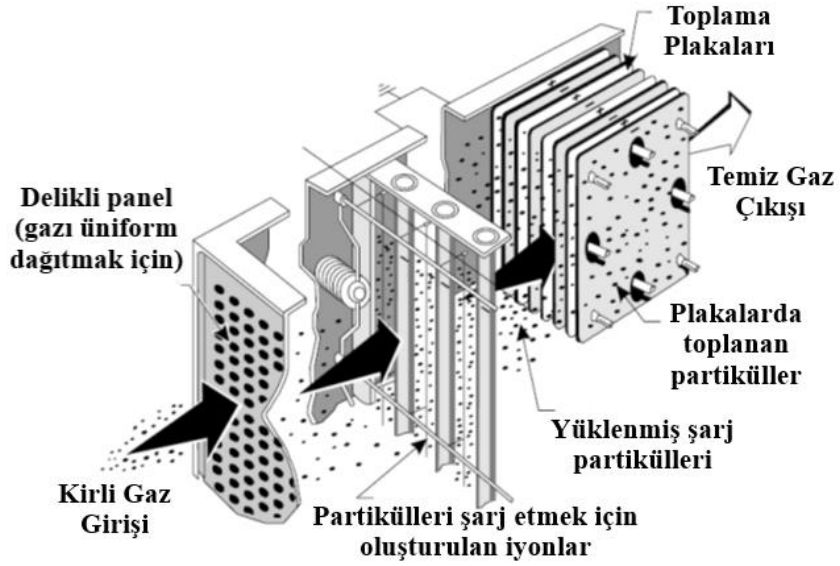


Şekil 2.13. Toz toplama plaka tiplerine göre EŞÇ modelleri-(a) Silindirik plakalı EŞÇ ve (b) Paralel plakalı EŞÇ (Anonymous, 2020c)

Şekil 2.14 (a)'da gösterildiği gibi, tek kademeli EŞÇ'ler de tek bir korona deşarjı kullanılırken, iki aşamalı EŞÇ'ler de (Şekil 2.14 (b)) partikül şarjı ve partikül toplama için seri bağlı elektrot setleri kullanılmaktadır. Burada partikül şarjı için korona deşarjı ve partikül toplama için paralel plaka elektrotları kullanılır (Liu and Liptak, 1999). Tek aşamalı EŞÇ'ler, toplanan partiküllerin yeniden sürüklenmesini önlemede daha iyidirler. Ancak iki aşamalı EŞÇ'ler de toz toplama bölümünün alanı azaltarak EŞÇ boyutunun azaltılması mümkündür. Giderilecek toz konsantrasyonu düşük olduğunda ve yapışkan partikülleri toplamak için iki aşamalı EŞÇ'ler uygulanabilmektedir (Mizuno, 2000). Şekil 2.15'te iki aşamalı EŞÇ'nin genel şekli görülmektedir.



Şekil 2.14. Elektrot şarj yöntemine göre ESC modelleri-(a) Tek aşamalı ESC ve (b) İki aşamalı ESC (Sjoholm, 2001)

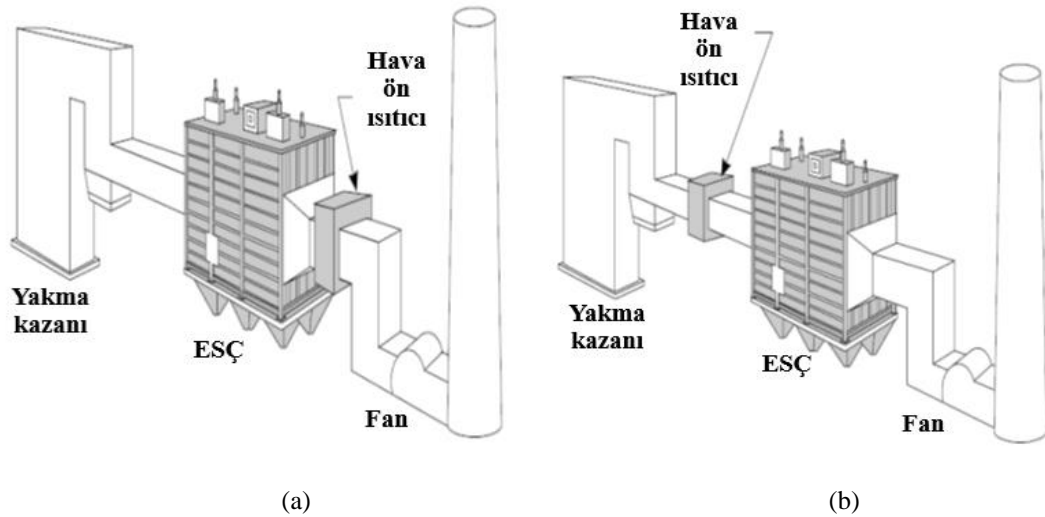


Şekil 2.15. İki aşamalı ESC (EPA, 2000)

ESC'ler, sisteme giren baca gazı emisyon sıcaklığına göre de gruplandırılmaktadır. Sıcak ESC'ler 315°C'nin üzerindeki gaz sıcaklıklarında çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. Genellikle tek kademeli ve paralel toplama plakalı şeklinde tasarıma sahiptirler. Bu sistemler sıcak gaz akımından dolayı yüksek partikül toplama avantajına sahiptir, çünkü yüksek sıcaklıklarda partikül direnci azaltılarak toplama verimi artmaktadır. Sıcak ESC'ler (Şekil 2.16 (a)), baca gazı sıcaklığının nispeten yüksek olduğu yanma havası ön ısıtıcısının önüne yerleştirilmektedir (UFC,

2003). Sıcak ESC'ler, çimento endüstrisi, çelik rafine fırınları veya kamu hizmeti ve endüstriyel kazanlar gibi baca gazı emisyon sıcaklığının yüksek olduğu endüstri uygulamalarında kullanılmaktadır. Sıcak ESC'lerin kullanımı, korozyon ve hazne tıkanmasını azaltmaya yardımcı olmaktadır. Bununla birlikte, bu sistemlerin (çoğunlukla kömür yakıtlı kazanlarda kullanılan) bazı dezavantajları söz konusudur. Bu sistemlerde baca gazı sıcaklığı yüksek olduğundan ESC içerisindeki gaz hacmi de fazladır. Bu durumda ESC'nin toplam boyutu daha büyük ve yatırım maliyetinin yüksek olmasına neden olmaktadır. Diğer bir dezavantajı ise, toz toplama plakalarında meydana gelen yapısal ve mekanik problemler ve termal genişlemenin yarattığı problemlerdir (Anonymous, 2020c).

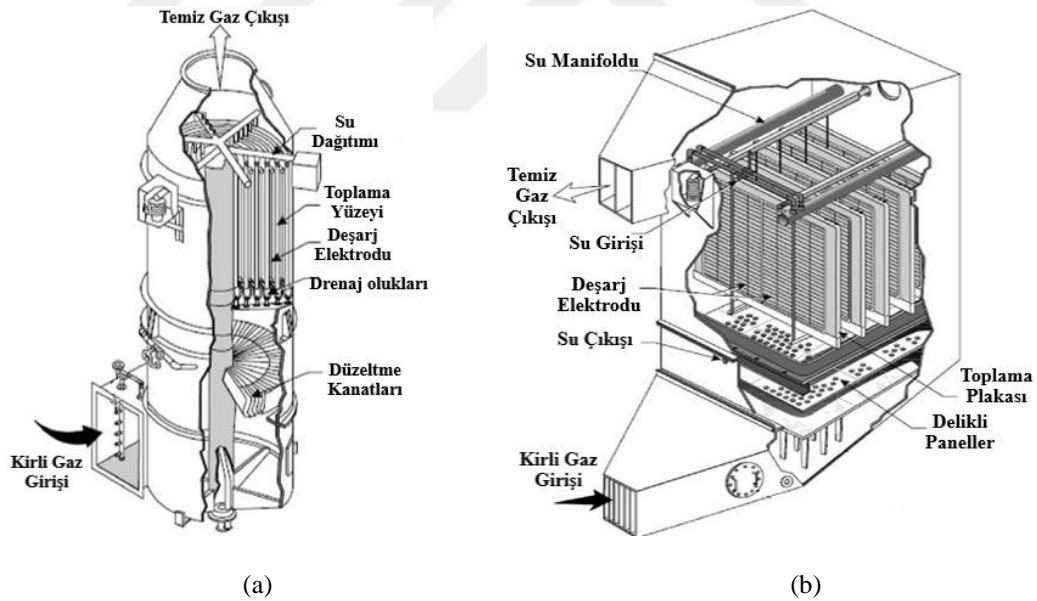
Soğuk ESC'ler (Şekil 2.16 (b)), baca gazı sıcaklığının düşük olduğu (genellikle 200°C'den düşük sıcaklığa sahip baca gazları için) endüstrilerde düşük dirençli toz partiküllerinin toplanmasında kullanılmaktadır. Bu ESC'ler sıcak ESC'lerden daha düşük sıcaklıklarda çalışırıldığından aynı kütleye sahip baca gazı hacmi daha küçüktür, dolayısıyla ESC boyutu daha küçük ve yatırım maliyeti azdır (UFC, 2003). Soğuk ESC'ler, yüksek kükürtlü kömür yakan kazanlardan uçucu külü ayırmak için kullanılmaktadırlar (Anonymous, 2020c). Bu ESC'lerin dezavantajı düşük sıcaklıklarda asit buharının yoğunlaşması nedeniyle korozyona maruz kalmalarıdır (UFC, 2003).



Şekil 2.16. Çalışma sıcaklığına göre ESC modelleri-(a) Sıcak ESC ve (b) Soğuk ESC (Anonymous, 2020c)

Islak tip ESC'ler özellikle yapışkan toz durumunda kullanılmaktadır. Toplama elektrodu üzerinde biriken toz sallamayla zor giderildiğinde deşarj elektrodu ile toz

toplama elektrodu arasındaki mesafe kısalmakta ve iki elektrot arasında elektriksel sıçrama (geri korona: back corona) meydana gelmektedir. Bu elektrik sıçraması sistemde yangınlara neden olabilmekte ve elektrik kontrol sisteminin devre dışı kalmasına neden olabilmektedir. Bunu engellemek için toplama elektrodunun üst kısmından aşağıya doğru yüzeyi yalayarak akan bir su kullanılmaktadır. Bu su akışı tozun yüzeyden kolay kopmasına ve aşağıya doğru sürüklenmesine neden olmaktadır (Mizuno, 2000). Geri koronayı engellemek için deşarj elektroduna uygulanan voltaj azaltılabilir, fakat bu durum elektrostatik alan gücünün azalmasına, toz toplama veriminin düşmesine ve enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır (White, 1974). Ayrıca ıslak tip ESÇ'ler, daha ince toz partiküllerini tutmak için, ya da toplanacak malzeme yapışkan, ıslak, patlayıcı, yanıcı veya yüksek dirençli olduğunda kullanılmaktadır (Şekil 2.17 (a) ve Şekil 2.17 (b)). Islak silindirik tip ESÇ'ler (Şekil 2.17 (a)) tekstil endüstrisinde, kâğıt hamuru tesislerinde, metalürji endüstrisinde, tehlikeli atık yakma fırınlarında, kok fırınlarında ve sülfürik asit üretim tesislerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Hou, et al., 2009; Chandrappa and Kulshrestha, 2016).



Şekil 2.17. Islak ESÇ modelleri-(a) Boru tipi ıslak ESÇ ve (b) plaka tipi ıslak ESÇ (Anonymous, 2020c)

Tablo 2.2'de ESÇ sisteminin avantaj ve dezavantajları verilmiştir (Neundorfer, 1997; Flagan and Seinfeld, 1988; UFC, 2003; Wang, et al., 2004; Theodore, 2008).

#### 2.1.5.4. ESÇ'lerin Kullanıldığı Bazı Endüstriler

Bugün en yaygın kullanıldığı endüstri tesisleri termik santraller, mineralden bakır, çinko veya kurşun üretme tesisleri ve çimento fabrikalarıdır. ESÇ'lerin kullanıldığı bazı endüstri sektörleri aşağıda özetlenmiştir (Wang, et al., 2004).

Termik santrallerde, elektrik üretmek amacıyla kömürün yanması sonucu açığa çıkan ana emisyonlar; askıdaki partikül maddeler, kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>) ve azot oksitler (NO<sub>x</sub>)'dir. ESÇ'ler termik santrallerde toz partiküllerin toplanması için en çok tercih edilen sistemlerdir. Bu tesislerdeki uçucu külün partikül boyut dağılımı, yakma kazanın tipine ve kömürün özelliklerine göre değişiklik göstermekle birlikte genel olarak 5-15 µm arasındadır, fakat ESÇ'ler bu farklı boyut dağılımını tolere ederek etkili bir şekilde çalışabilmektedir.

Demir-çelik üretim fırınları, yüksek fırınlar, dökümhaneler, sinter makineleri ve kok fırınlarından gelen gaz içindeki tozun tutulmasında, bakır, kurşun ve çinko izabe tesisleri baca gazının tozdan arındırılmasında, kırıcı, elek, soğutucu ve yükleme istasyonlarında oluşan kirlili havadan tozun ayrıştırılmasında ESÇ'ler kullanılmaktadır. Yüksek fırının tepesinden çıkan egzoz gazında bulunan toz esas olarak demir oksit, silika ve kireçten oluşmaktadır. ESÇ'ler ayrıca alüminyum üretmek için boksit indirgenmesinde elektrolitik hücrelerden gelen gazların temizlenmesinde de kullanılmaktadır. Bu tesislerde ESÇ'ler % 85-90 toz tutma verimi sağlayabilmektedir.

Çimento fabrikalarında, çimentonun geri kazanılmasını ve toz emisyonlarının kontrolünü sağlandığı için ESÇ'lerin ilk buluşundan itibaren yaygın olarak kullanılmaktadır. Çimento fırınlarında oluşan tozlar genellikle yüksek dirençlidir. ESÇ'lerin çimento endüstrisindeki ilk uygulamalarında sıcaklık nedeniyle yüksek özdirenç problemi gibi aksaklıklar söz konusu olsa da yeni tesislerde gaz sıcaklığını kontrol ederek, baca gazı nemi ayarlanarak ve elektrik enerjisini geliştirerek özdirenç probleminin üstesinden başarıyla gelinmiştir. Bu tesislerde ESÇ'ler % 99.5'in üzerinde toz toplama verimi sağlayabilmektedir.

Sülfürik ve fosforik asit gibi kimya tesislerinde ESÇ'ler toz partikülleri buhar fazındaki elementel fosfordan ayırmak için kullanılmaktadır. Sülfürik asit imalat tesisinden çıkan gazlar yaklaşık % 3-10 sülfür dioksit ve sülfür dioksit bulaşmış toz partikül içermektedirler. Bu tesislerde katalizörün SO<sub>2</sub>'den olumsuz etkilenmemesi için SO<sub>2</sub> bulaşmış katı tozların konvertörden önce giderilmeleri gerekmektedir. Kimya endüstrisi için tasarlanmış ESÇ'ler genellikle dikey gaz akışlı boru tipi ESÇ'lerdir. Bu

endüstrilerde ESC'lerin toz partikül toplama verimleri % 97-99.5 arasında değişmektedir.

Belediye katı atık yakma fırınlarında ESC kullanımı nispeten yeni bir uygulamadır. Toz emisyonu 50 - 300 g/kg çöp veya 1.2 - 5.7 g/m<sup>3</sup> gaz arasında değişmektedir. Çöp bileşimi değişken olduğu için toz partikülün özellikleri ve bileşimi büyük ölçüde değişiklik göstermektedir. Partikül büyüklüğü ortalama 15-30 µm çapı arasında değişmektedir. Belediye katı atık yakma fırınlarından çıkan gazların sıcaklığı 655-900°C'dir. Bu tesislerden çıkan gazların ESC'ye girmeden önce soğutulmaları gerekmektedir. Bu tesislerde ESC'lerin toz partikül tutma verimlilikleri % 90-99 arasında değişmektedir.

Petrol endüstrisinde ESC'lerin temel kullanımları, akışkan yataklı katalitik parçalama ünitelerinde yakıt gazları, asetilen ve damıtma gazları gibi gaz akımlarından katranın uzaklaştırılması ve akışkan yataklı atık çamur yakma fırınlarından yayılan partiküllerin toplanmasında kullanılmaktadır.

Aerosol örnekleme, gıda işleme, yüksek hızlı taşıma makineleri, galvanizleme su ısıtıcıları, kauçuk fırınları ve radyoaktif partikül toplama için iki aşamalı ESC'ler kullanılmaktadır. Ayrıca, hastanelerde ve ofis binalarında toz imisyonun kontrol altına alınması gerekli olduğu durumlarda da kullanılmaktadırlar.

### 2.1.5.5. Toz Toplama Verimi

ESC model tasarımında iki temel toz toplama modeli kullanılmaktadır. Bunlar;

- Laminer akım modeli
- Türbülanslı akış modeli (Deutsch-Anderson modeli)'dir.

Laminer akış modelinde toz toplama verimi;

$$\eta = \frac{\omega_e A}{Q} \quad (2.1)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Burada;  $\eta$  toz toplama verimini,  $\omega_e$  elektriksel yük ile yüklenmiş partikülün toplama plakalarına doğru göç hızını (m/s),  $A$  toz toplama plaka alanını ( $m^2$ ) ve  $Q$  baca gazı debisini ( $m^3/s$ ) ifade etmektedir.

Laminer akış için;

- Elektriksel alana zıt yönde toz için bir itici gücün olmadığı
- Tozların türbülans etkilenmediği
- Tozlar laminer akım çizgilerini takip ettiğini kabul edilmektedir.

Stokes kanununa göre gaz akımı içinde hareket eden toza etki eden sürüklenme kuvvetinin minimum olması gerekmektedir. Partikülün yüzeyinde akışkanın hızı sıfıra yaklaştıkça küçük boyuttaki tozları tutmak mümkün olmaktadır, ki bu durumda Stokes kanunu geçerlidir ve  $C_D = 24 / Re$ 'dir. Burada;  $C_D$  sürüklenme katsayısı,  $Re$  Reynolds sayısıdır (Parker, 1997b). 110 yılı aşkın süredir uygulanan ESC teknolojisinde istenen toplama verimini elde etmek için bir dizi teknik kullanılmıştır. Tüm bu teknikler klasik Deutsch-Anderson denkleminde dayanmaktadır (Eşitlik 2.2).

Deutsch-Anderson türbülanslı akış modelinde toz toplama verimi;

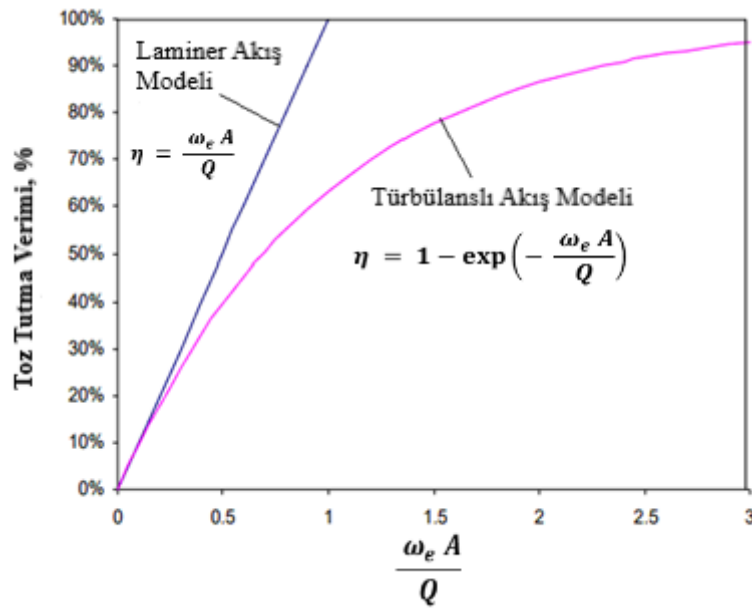
$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\omega_e A}{Q}\right) \quad (2.2)$$

eşitliğinden hesaplanır.

Deutsch-Anderson modelinin bazı kabulleri vardır (EPA, 1985). Bunlar;

- Toz ve gaz ESC içinde yatay doğrultuda sabit hız ile hareket ettiği,
- Tozlar gaz içinde homojen olarak dağılım gösterdiği,
- Deşarj elektrotları etrafındaki elektriksel alan düzenli durumda olduğu,
- Çökelen tozlar yeniden sürüklenmemekte olduğu şeklindedir.

Şekil 2.18’de Laminer ve Deutsch-Anderson akış modellerine göre iç gaz hızı ile ESC’nin toz toplama verimi arasındaki ilişki görülmektedir (Hinds, 1982). Laminer akışta düşük gaz akım hızı gazın ESC odası içinde kalma (bekletme) süresini artırdığından mikron altı boyuttaki tozlar da elektriksel yük ile yüklenebilmekte ve toz toplama verimi % 100’lere ulaşabilmektedir (Kim and Lee, 1999). Fakat pratikte laminer akımın sağlanması pek mümkün olmadığından Deutsch-Anderson türbülanslı akım modeli kullanılarak ESC model tasarımı yapılmaktadır.



Şekil 2.18. Laminer ve türbülanslı akışta teorik toz toplama verimi (Hinds, 1982)

#### 2.1.5.5.1. Partikül Yükleme Mekanizmaları

ESC’lerin korona alanında iyonize olmuş gaz molekülleri ile toz partikülleri arasında iki ayrı partikül yükleme mekanizması bulunmaktadır. Bu yükleme mekanizmaları alan etkisiyle (bombardıman ile) yüklenme ve difüzyon ile yüklenmedir. Alan etkisiyle yüklenme genellikle saha şarjı olarak tanımlanmaktadır.

Saha şarjında toz partikülleri iyon içeren elektriksel alandan geçerken alan çizgileri boyunca akan iyonlar toz partiküllerine temas eder ve yükleri partiküle aktarırlar. Partikül yüklendikçe elektrik alan çizgileri partikülden itilerek partikül doyma alanı yüküne ulaşır ve alan şarjı gerçekleşmez (White, 1963). Saha şarjında toz partiküllerin yüklenmesi zamana bağlı olarak elektriksel alan şiddetine partikülün dielektik özelliklerine ve partikülün çapına bağlıdır. Ayrıca bu yükleme aerodinamik çapı  $0.5 \mu\text{m}$ ’den büyük partiküller için etkilidir (Mclean, 1988; Mizuno, 2000; Intra,

et al., 2014; Boehm, 1982). Başlangıçta nötr bir küresel partikülün alan şarjı nedeniyle elde ettiği yüklerin sayısı,

$$q_a(t) = q_\infty \frac{t/\tau}{1 + t/\tau} \quad (2.3)$$

$$q_\infty = \pi \varepsilon_0 \frac{3 \varepsilon_w}{\varepsilon_w + 2} d_p^2 E \quad (2.4)$$

$$\tau = 4 \frac{\varepsilon_0 E}{J} \quad (2.5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Yukarıdaki denklemlerde  $q_\infty$  gaz akışında ilerleyen partiküle verilen maksimum şarjı veya doyum yükünü (C),  $t$  yüklenme için geçen zamanı (s),  $\tau$  alan yüklenme zaman sabitini (s),  $\varepsilon_0$  alanın elektriksel geçirgenliğini ( $8.85 \times 10^{-12}$  C/V.m),  $\varepsilon_w$  partikülün bağıl dielektrik sabitini,  $d_p$  partikülün çapını (m),  $E$  partiküllerin yüklendiği elektrostatik alan gücünü (V/m) ve  $J$  akım yoğunluğunu ( $A/m^2$ ) ifade etmektedir. Doyum yükü olan  $q_\infty$  partiküllerin yüklendiği elektrostatik alan gücü olan  $E$  ile doğru orantılıdır. Zaman sabiti olan  $\tau$  ise akım yoğunluğu olan  $J$  ile ters orantılıdır. Bu sebepten dolayı yüklenmeyi artırmak için  $E$  ve  $J$  değerlerinin yüksek olması gerekmektedir (Mizuno, 2000).

Difüzyon şarjında elektrik alandaki sürüklenen iyonların sıcaklığı gaz molekülleri arasında rasgele hareketin gerçekleşmesine neden olmaktadır. Burada partiküller elektrik alana bağlı olmaksızın iyonların ısı enerjisine bağlı olarak gaz molekülleri arasında rastgele hareket eden iyonlarla çarpışma ile yüklenirler. Difüzyon ile şarjda partiküllerin yüklenmesi partikülün boyutlarına, gazın özelliklerine, gazın sıcaklığına ve yükleme için geçen zamana bağlı olarak gerçekleşir (Balgün, 2009). Partiküllerin yüklenmesinde aerodinamik çapı  $0.2 \mu\text{m}$ 'den küçük partiküller için difüzyon şarjı etkilidir. Partikülün aerodinamik çapı  $0.2 \mu\text{m}$ - $0.5 \mu\text{m}$  arasında ise alan şarjı ve difüzyon şarjı olan her iki yükleme mekanizması da etkilidir (McClean, 1988; Mizuno, 2000; Intra, et al., 2014)

Başlangıçta nötr bir küresel partikülün difüzyon şarjı nedeniyle elde ettiği yüklerin sayısı,

$$q_a(t) = q^* \ln(1 + t/\tau^*) \quad (2.6)$$

$$q^* = \frac{2 \pi \varepsilon_0 d_p k T}{e} \quad (2.7)$$

$$\tau^* = \frac{8 \varepsilon_0 k T}{d_p C_i n_i e^2} = 8 \varepsilon_0 \left( \frac{m_i k T}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\mu_i E}{d_p J e} \right) \quad (2.8)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Yukarıdaki denklemlerde  $q^*$  yük sabitini (C),  $\tau^*$  difüzyon ile yüklenme için geçen zamanı (s),  $k$  Boltzman sabitini ( $1.38 \times 10^{-23}$  j/K),  $T$  gazın sıcaklığını (K),  $e$  elektron yükünü ( $1.6 \times 10^{-19}$  C),  $C_i$  iyonun termal hızını (m/s),  $n_i$  boşluktaki iyon yoğunluğunu ( $m^3$ ),  $m_i$  iyon kütleini (kg) ve  $\mu_i$  iyon hareketliliğini ( $V \text{ m/s}^2$ ) ifade etmektedir (Mizuno, 2000).

Deneyisel olarak toplam toz partikül yükü alan şarjı ile yükleme ve difüzyon şarjı ile yüklemenin toplamıdır. Toplam toz partikül yükü,

$$q(t) = q_a(t) + q_d(t) \quad (2.9)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Burada  $q_a(t)$  partikülün alan şarjı ile yüklenmesi ve  $q_d(t)$  ise partikülün difüzyon şarjı ile yüklenmesini ifade etmektedir. Tipik endüstriyel ESC'lerin literatürdeki toz boyut dağılımları incelendiğinde literatürdeki araştırma sonuçlarına dayanarak difüzyon şarj mekanizmasının göz ardı edilebileceği kabul edilmektedir (Jedrusik and Swierczok, 2012).

#### 2.1.5.5.2. Yüklenmiş Partikülün Göç Hızı

Elektriksel yük ile yüklenmiş olan partiküllerin bir elektrik alandan geçerken Coulomb kuvvetine maruz kalarak toplama plakalarına doğru belli bir göç hızıyla hareket etmektedir. ESC toz toplama odasındaki elektrik alan içindeki partiküllere etki eden kuvvet,

$$F = q E \quad (2.10)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada  $F$  partikül üzerine etki eden Coulomb kuvvetini (N),  $q$  partikül yükünü (C) ve  $E$  partiküllerin yüklendiği elektrostatik alan gücünü (V/m) ifade etmektedir (Flagan and seinfeld, 1988). Hareketli bir partikülün viskoz kuvveti,

$$F_s = \frac{3 \pi \mu d_p w_e}{C_u} \quad (2.11)$$

formülü ile hesaplanmaktadır.

$$\omega_e = \frac{q E C_u}{3 \pi \mu d_p} \quad (2.12)$$

$$C_u = 1 + 2.54 \left( \frac{\lambda}{d_p} \right) + 0.8 \left( \frac{\lambda}{d_p} \right) \exp \left( \frac{-0.55 d_p}{\lambda} \right) \quad (2.13)$$

$$\lambda = 6.61 \times 10^{-8} \left( \frac{T}{293} \right) \left( \frac{101.3 \times 10^3}{P} \right) \quad (2.14)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $\omega_e$  göç hızını (m/s),  $\mu$  gazın viskozitesini (kg/m s) (200 °C'de  $2.53 \cdot 10^{-5}$  Pa s),  $d_p$  partikülün çapını (m),  $C_u$  Cunningham düzeltme faktörünü ( $d_p \leq 1 \mu\text{m}$ 'deki partiküllerde viskoziteyi hesaba katmak için kullanılmaktadır),  $\lambda$  gaz molekülünün ortalama serbest yolunu (m),  $T$  gazın sıcaklığını (K) ve  $P$  basıncı (Pa) ifade etmektedir (Mizuno, 2000).

Alan şarjı uygulanabilir olduğunda göç hızı;

$$\omega_e = \frac{q E}{3 \pi \mu d_p} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_w}{\mu (\varepsilon_w + 2)} d_p E^2 \quad (2.15)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada göç hızı olan  $\omega_e$ , partikül çapıyla ve partiküllerin yüklendiği elektrostatik alan gücünün karesi ile orantılıdır.

$$\omega = \frac{\frac{\varepsilon_w}{(\varepsilon_w + 2)} \varepsilon_0 \left( \frac{C}{V m} \right) d_p (m) E^2 E \left( \frac{V}{m} \right)^2 C_u \left( N \frac{m}{C V} \right)}{\mu \left( \frac{kg}{m s} \right) \left( \frac{N s}{m^2} \right)} \quad (2.16)$$

Difüzyon şarjındaki göç hızı ise;

$$\omega_e = 6.2 \left( \frac{2 \pi \varepsilon_0 d_p k T}{3 \pi \mu d_p e} \right) E C_u \quad (2.17)$$

$$\omega_e = \frac{4 \varepsilon_0 k}{\mu e} T E C_u \quad (2.18)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

### **2.1.5.6. Tasarım parametreleri**

Bir ESÇ tasarımı yapılırken aşağıdaki parametreleri göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Bu temel ESÇ model tasarım parametreleri (Brauer and Varma, 1981; EPA, 1985; Liu and Liptak, 1999; EPA, 2000; Wang et al., 2004; UFC, 2003);

- Gaz akış hızı
- Gaz sıcaklığı
- Toz direnci
- Giriş toz konsantrasyonu
- Toz boyut dağılımı
- Gaz ve tozun aşındırıcı özellikleri
- Toz toplama plakası alanı
- Deşarj elektrot sayısı
- Deşarj elektrotu ve toplama plakası aralığı
- İzin verilen toz deşarj emisyonu
- Beklenen verim değeridir.

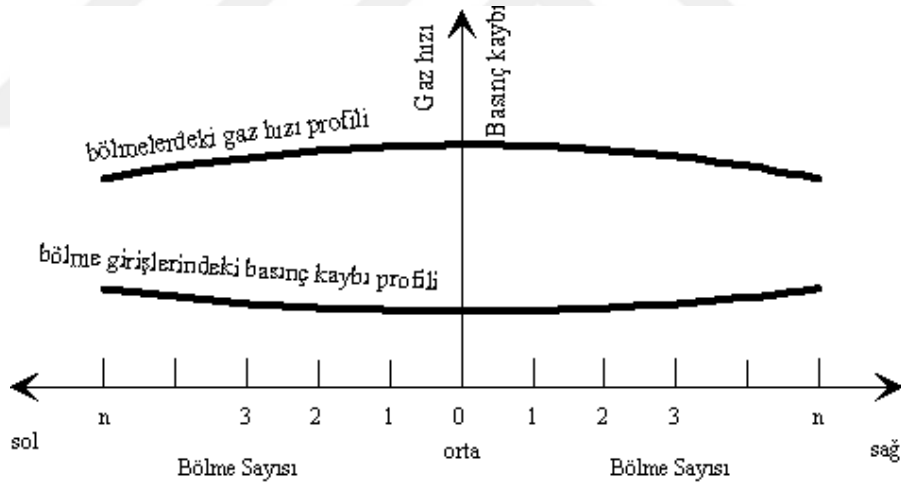
### **2.1.5.7. ESÇ Sisteminde Verimi Etkileyen Faktörler**

#### **2.1.5.7.1. Gaz Hızı**

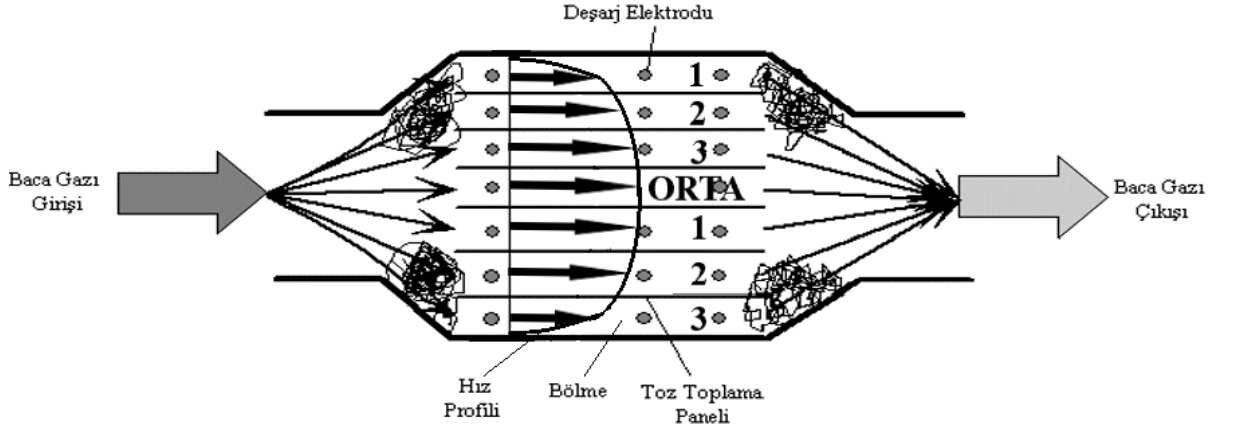
Bir ESÇ'nin tasarımı yapılırken ESÇ içinde düzenli bir gaz akış hızı sağlamak gerekmektedir. Düzenli bir gaz akışını sağlamak için de Temiz Hava Şirketler Grubu (ICAC)'nin ESÇ için belirlemiş olduğu gaz akım hızı standardının (ICAC EP-7) sağlanması gerekmektedir (ICAC EP-7, 1997). ICAC EP-7 standardına göre bir ESÇ'nin içinde gazın iki plaka arasına hemen girişteki ve plakalar arasından tam çıkış anındaki hızı plakalar arasındaki ortalama gaz hızının 1.15-1.4 katı arasında olmalıdır. HAD metodu ile ESÇ'lerdeki gaz akım hızı modellenmesi yapılırken de ICAC EP-7 gaz akım hızı standardının sağlanması gerekmektedir.

ESÇ içinde gaz hızının eşit olarak dağılması için yaklaşma hızı giriş kanalında genellikle 6-24 m/s arasında olmalıdır (Lee and Lin, 2007). Toz toplama verimi plakalar arasından geçen gazın hızı arttıkça azalmaktadır. Genelde toz toplama plakaları arasındaki optimum mesafenin (iki plaka arası mesafe veya bir bölmenin genişliği) 15-50 cm (yaygın olarak kullanılan 30 cm) olması ve plakalar arası iç hız değerinin 0.6-2.4 m/s arasında olması gerekmektedir (Heumann, 1997; Wang, et al., 2004). Bu nedenle bir ESÇ'ye beslenen gazın debisi arttıkça ESÇ içinde bölmelerde optimum hızı sağlamak için bölme sayısını artırmak gerekmektedir. Bölme sayısının

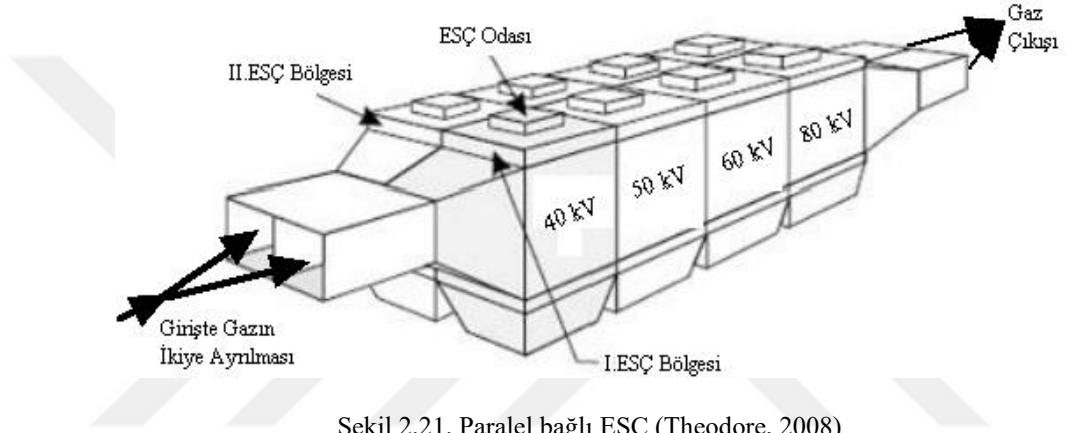
fazlaştırılması ESC odasının genişletilmesine bağlıdır; ESC odasının genişletilmesi odanın yan tarafına doğru gidildikçe artan vorteks nedeniyle gaz akım hızının azalmasına orta bölmelerde ise gaz akış hızının artmasına neden olmaktadır (Şekil 2.19); yani ESC içinde akım düzensizlikleri oluşur (Şekil 2.20). Bu nedenle bir ESC odası içine istediğimiz kadar bölme inşa edemeyiz. Dolayısıyla yüksek baca gazı debisi durumlarında, ana gaz akımı birden fazla kanala ayrılır ve her bir kanaldaki gaz akımı bir ESC odasına beslenir. Sonuçta paralel bağlı ESC odaları oluşturulmuş olur (Şekil 2.21). Baca gazının toz yükü fazla olduğunda, zaten elektriksel yük ile zor yüklenen çok ince tozların yüklenmesi daha da zorlaşmaktadır. Bu nedenle aerodinamik çapı çok daha küçük tozları da giderebilmek için ESC odalarını seri bağlamak ve ilk odadan son odaya doğru deşarj elektrotlarına uygulanan gerilimi artırmak gerekmektedir (Şekil 2.22). Baca gazı içinde tutuşabilir toz bulunduğunda tozun büyük kısmını düşük voltaj uygulanan ilk ESC odalarında tutmak ve daha sonraki odalarda yüksek voltaj uygulamak hem tutuşma riskini azaltacak hem de küçük boyuttaki tozların daha iyi tutulmasını sağlayacaktır.



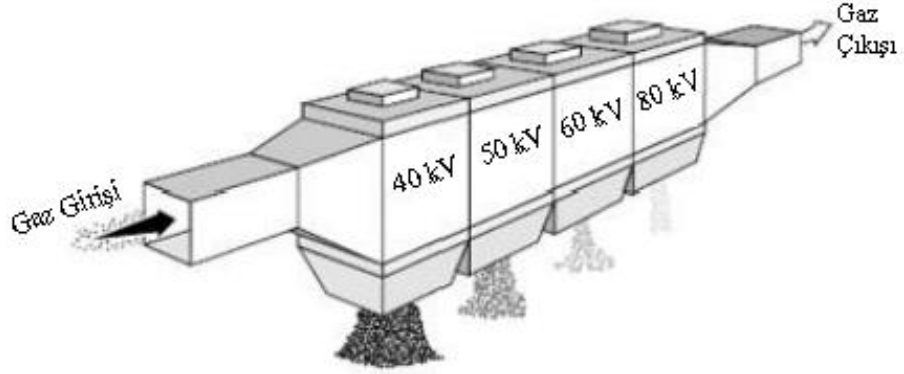
Şekil 2.19. Bir ESC içinde bölme sayısı arttıkça sağ ve sol bölmelere doğru gaz hızındaki ve basınç kaybındaki değişim



Şekil 2.20. ESÇ içinde oluşan vorteks ve buna bağlı olarak bölmelerdeki akım hızında oluşabilecek değişim



Şekil 2.21. Paralel bağlı ESÇ (Theodore, 2008)



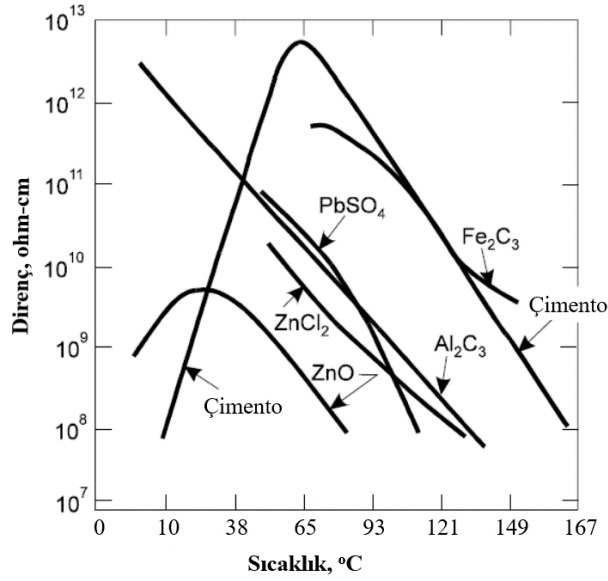
Şekil 2.22. Dört bölmeden oluşan seri bağlı bir ESÇ (Theodore, 2008)

### 2.1.5.7.2. Toz Özellikleri

ESÇ işletilmesinde verim üzerine büyük etkiye sahip olan toz partikülünün karakteristik özellikleri (toz partikül çapı, şekli ve yapısı, toplanma eğilimi, elektriksel direnci, kimyasal bileşimi ve reaktivitesi gibi)'dir (Parker, 1997a). ESÇ model tasarımında bu özelliklerin de göz önüne alınması gerekmektedir.

#### Özdirenç

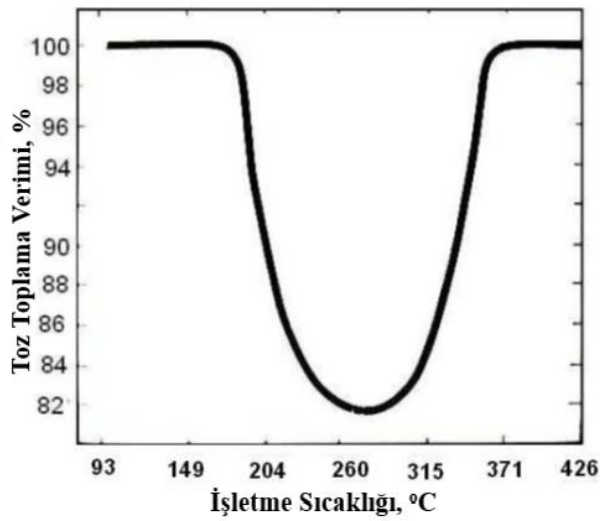
Toz partikülünün karakteristik özelliklerinden biri olan özdirenç, ESÇ performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Özdirenç, toz partikülünün elektriği iletme kabiliyetinin bir ölçüsüdür ve birimi ohm-cm'dir. Özdirenç azaldıkça elektrik iletme kabiliyeti artmaktadır (Liu and Liptak, 1999). Toz partiküllerinin özdirenci, gazın ve toz partiküllerinin kimyasal özelliklerine, gazın sıcaklık ve nemine göre değişiklik göstermektedir. Toz partiküllerinin özdirenç değeri  $10^4 - 10^{10}$  ohm-cm aralığında olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir (Mizuno, 2000). Yüksek elektrik direncine sahip toz partikülleri yük transferi için uygun değildirler (Liu and Liptak, 1999). ESÇ arızalarının büyük çoğunluğu toz partiküllerinin yüksek özdirencinden ( $>2.10^{11}$   $\Omega$ -cm) kaynaklanmaktadır (EPA, 2002). Ayrıca yüksek özdirenç geri korona oluşumuna neden olmaktadır. Bu yüzden toz partiküllerinin özdirenci uygun değer aralığında olması gerekmektedir. Özdirençin bu değer aralığında olabilmesi için giriş gaz molekülleri yapılarına uygun olarak bazı kimyasalların ( $SO_3$ ,  $H_2SO_4$ ,  $NH_3$  ve  $H_2O$ ) gaz akımı içerisine eklenmesi gerekmektedir (Brauer and Varma, 1981; EPA, 2002). Bu yüzden ıslak tipteki ESÇ'ler için özdirençteki değişimin önemi yoktur. Dirençte değişim söz konusu ise ıslak tip ESÇ kullanılması daha etkili verim alınmasına neden olmaktadır. Toz partiküllerinin özdirenci sıcaklığın artması ile azalmaktadır. Şekil 2.23'de bazı endüstrilerde kullanılan altı farklı toz çeşidi için sıcaklıkla-direnç değişimi gösterilmektedir (Schnelle, et al., 2016).



Şekil 2.23. Altı farklı toz çeşidi için sıcaklık-direnç ilişkisi (EPA, 1985)

### Sıcaklık

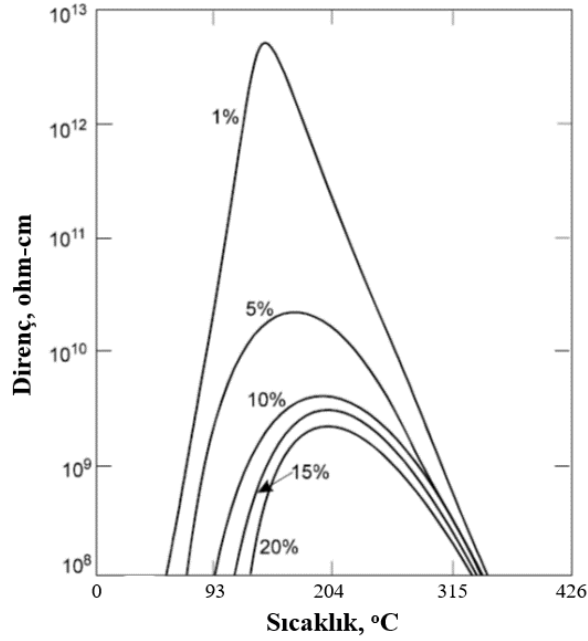
ESÇ'ler 700°C'ye kadar çok çeşitli gaz sıcaklarında çalışabilmektedirler (Wang, et al., 2004). Bu sistemler torba filtrelere göre sıcaklığa daha az duyarlıdır. Şekil 2.24'deki grafikte bir çimento ön ısıtma fırınında sıcaklığın su püskürtülerek azaltıldığı durumda sıcaklığın ESÇ verimliliği üzerindeki etkisi görülmektedir. ESÇ'nin işletilmesinde tutulacak toz partiküllerinin öz direncinin sıcaklığa göre nasıl değiştiğinin bilinmesi gerekmektedir, çünkü gaz sıcaklığının ve bileşiminin öz direnci üzerinde güçlü bir etkisi söz konusudur (EPA, 1985).



Şekil 2.24. Bir çimento fabrikasındaki ESÇ için sıcaklık-verim ilişkisi (EPA, 1985)

## Nemlilik

Baca gazı akımının nem içeriği partikül direncini etkilemektedir. Toz partiküllerine ESÇ içerisine girmeden önceki kanalda su püskürtülerek veya buhar enjekte edilerek gaz akımının nem içeriği artırılıp özdirenci azaltılabilmektedir. Şekil 2.25'te çimento tozunun özdirenci üzerindeki sıcaklık ve nemin etkisini göstermektedir. Burada tozdaki nem yüzdesi % 1'den % 20'ye yükseldikçe, tozun özdirenci önemli ölçüde azalır. Ayrıca, sıcaklığın yükseltilmesi veya düşürülmesi, grafikte gösterilen tüm nem yüzdeleri için çimento tozu direncinde azalma söz konusudur.

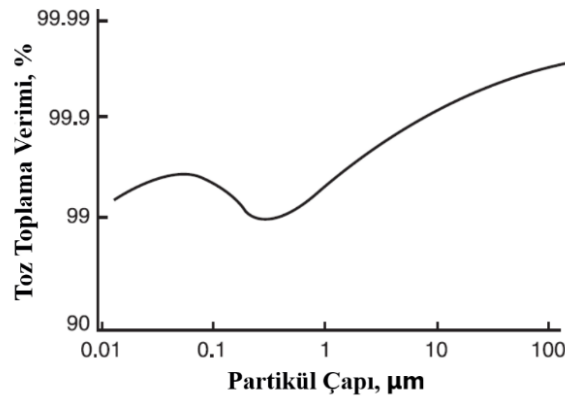


Şekil 2.25. Sıcaklık ve nemin çimento tozunun özdirencine etkisi (Anonymous, 2020c)

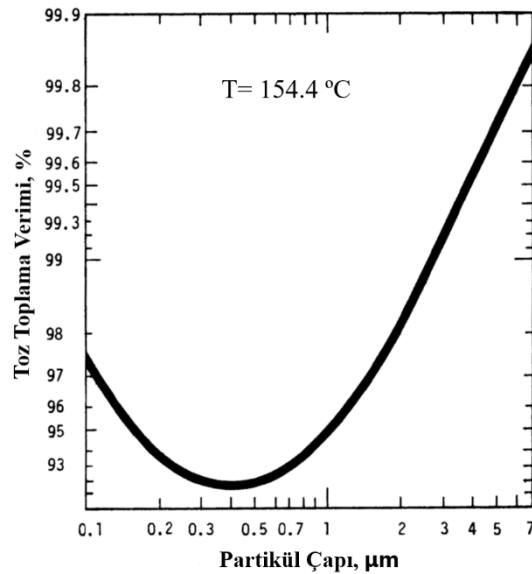
## Toz Partikül Boyutu

ESÇ'ler çok küçük toz partiküllerini bile elektrik yükü ile yüklerler ve bu sayede oldukça yüksek toz toplama verimiyle çalışırlar (Liu and Liptak, 1999). ESÇ'ler çapı 0.01  $\mu\text{m}$  den büyük ( $1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$ ) partikülleri etkili bir şekilde toplayabilmektedirler. Şekil 2.26'da farklı aerodinamik çapa sahip toz partikülü dağılımlarının tutma verimine etkisi gösterilmektedir (Parker, 2003). Bu eğride görüleceği gibi, 0.1-1  $\mu\text{m}$  arasında boyuta sahip toz partiküllerin toplanması toz toplama verimini azaltıcı etki göstermektedir. ESÇ'ler de gaz akışındaki büyük toz partikülleri daha kolay elektriksel yük ile yüklenip toplama plakasında toplanmaktadırlar. Aerodinamik çapı 0.2-0.4  $\mu\text{m}$  aralığındaki toz partikülleri en zor

tutma verimine sahip olanlardır. Bunun sebebi, küçük partiküller için elektriksel alan yüklemesinin, ısıl iyonlarla difüzyon yüklemesine yol açmasından kaynaklanmaktadır. Gaz akışı içindeki 1  $\mu\text{m}$ 'den küçük toz partiküllerinin çoğunluğu ESÇ girişinde korona boşalmasını azaltarak yüklenmiş partikül sayısını azaltmakta bu da toplama verimini olumsuz etkilemektedir (EPA, 1985; EPA, 2002). ESÇ işletme sıcaklığının 154.4  $^{\circ}\text{C}$  olduğu bir durum için toz partikül büyüklüğünün toplama verimi üzerine olan etkisi Şekil 2.27'te görülmektedir. ESÇ model tasarımında istenen performans seviyesini karşılaması için toz partiküllerinin boyutu belirlenerek hesaplamalar yapılması gerekmektedir (Parker, 2003).



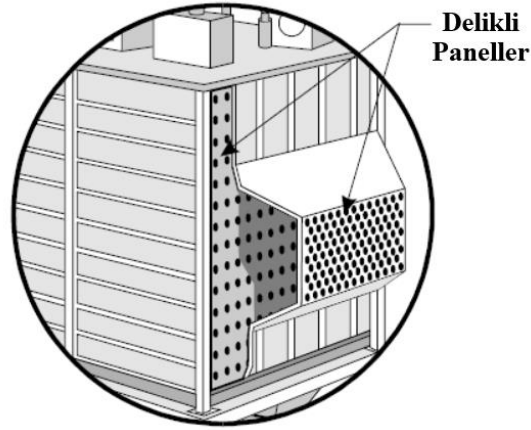
Şekil 2.26. ESÇ toz partikül dağılımının verimlilik üzerine etkisi (Parker, 2003)



Şekil 2.27. Toz partiküllerinin çapı-toplama verimi eğrisi (EPA, 1985)

### 2.1.5.7.3. Basınç Düşüşü

Tasarım hesaplamalarında verime etki eden diğer bir husus ESÇ içerisindeki basınç düşüşüdür ve bunun da iyi bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. ESÇ giriş kanalında düşük gaz akımı nedeniyle basınç düşüşü de çok düşük olmaktadır. ESÇ’de basınç düşüşü, genellikle 12.7 mm H<sub>2</sub>O’dan az olması istenmektedir (EPA, 2002). ESÇ girişinde kademeli genişlemeye bağlı basınç düşüşü, akış ayırma ve duvar sürtünmesinin etkilerinden kaynaklanır ve genişlemenin şekline bağlıdır. ESÇ çıkışında ise, kısa bir çıkış ve iyi düzenlenmiş kademeli bir daralmanın neden olduğu basınç düşüşü küçüktür (EPA, 2002). Basınç düşüşü yaklaşma hızına, gazın viskozitesine, gazın yoğunluğuna, gazın düzgün dağılıp dağılmamasına, gaz giriş kanal genişliğine, toplama plakasının bölme sayısına, elektrot ve plaka aralarındaki mesafeye ve bu plakalar üzerinde biriken toz miktarına bağlıdır (Brauer and Varma, 1981; EPA, 2002). Yapılan çalışmalarda ESÇ’lerin gaz giriş kanalındaki gaz dağılımını düzenleyip basınç düşüşünü azaltmak için bu bölme Şekil 2.28’de görüldüğü gibi delikli panel monte edilmektedir (Şahin and Ward-Smith, 1987; Şahin, 1989; Noorpoor and Sadeghi, 2003; Hou, et al., 2009; Swaminathan and Mahalakshmi, 2010; Guo, et al., 2013; Ye, et al., 2016; Kabadi and Hambarde, 2016; Jedrusik, et al., 2017).



Şekil 2.28. ESÇ içerisindeki giriş gaz dağılımını düzenleyen delikli paneller (Anonymous, 2020d)

## 2.1.6. Toz Toplama Sistemlerinin Karşılaştırılması

Tablo 2.2. Toz kontrol sistemlerin avantaj ve dezavantajları

Toz Kontrol Sistemleri	Güçlü Yönleri	Zayıf Yönleri
<b>Çökeltme Odaları</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tasarım ve işletimleri basit</li><li>• &gt;50 µm boyutundaki toz partiküllerde etkili</li><li>• Güvenle işletilebilir</li><li>• Yatırım ve İşletme maliyeti düşük</li><li>• Enerji gereksinimi düşük</li><li>• Basınç düşüşü oldukça az (yaklaşık 2.5 mm H<sub>2</sub>O)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Genelde ön bertaraf için kullanılıp ardından diğer sistemler ile kullanılması</li><li>• Yüksek alan gereksinimi</li><li>• Büyük boyutlu partiküllerde verimli</li><li>• Düşük toz toplama (&lt;% 50) etkisi</li></ul>
<b>Siklonlar</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 5-25 µm boyutundaki toz partiküllerde etkili</li><li>• % 50-90 toz toplama etkisi</li><li>• Tasarım ve bakım kolaylığı</li><li>• Düşük yatırım ve işletme maliyeti</li><li>• Düşük işletme basıncında çalışma (5-15 cm su kolonu)</li><li>• Az alan gereksinimi</li><li>• Toplanan tozların kuru olarak bertarafı</li><li>• Sıcaklık etkili değildir</li><li>• Yüksek toz yüklemelerinde etkili</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• &lt;10 µm çaplı partiküller için düşük verimli olmaları</li><li>• Yüksek basınç düşüşüne bağlı işletme maliyetinde artış</li><li>• Yapışkan veya yüksek nemli partiküller için kullanılmaz</li><li>• Yüksek verimli siklonlarda basınç kayıplarında artış</li><li>• Değişken toz yüklerine ve akış hızlarına duyarlılık</li><li>• Yüksek gaz debisinde (&gt;20000 m<sup>3</sup>/sa) akıma bağlı olarak blower ve ona bağlı aksamalarda problem</li><li>• Optimum işletme sıcaklığı 4-370 °C arasında olması</li></ul>
<b>Islak Yıkayıcılar</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Düşük yatırım maliyeti</li><li>• Düşük alan ihtiyacı</li><li>• Yapışkan ve nemli gaz ve tozları giderebilme</li><li>• Sıcak gaz akışlarından etkilenmemesi</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Korozyon sorunları (gaz kirleticiler korozif asit çözeltileri oluşturabilir)</li><li>• Yeniden kullanım için tozun geri kazanımı zor ve maliyetli</li><li>• Yüksek bakım ve işletme maliyetleri</li><li>• Atıksu problemi (Tasarımda gerekli önlemler alınmalıdır)</li></ul>

Tablo 2.2. (devam)

<b>Torba Filtreler</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &lt;1 µm boyutundaki toz partiküllerde bile etkili</li> <li>• Orta derecede yatırım maliyeti</li> <li>• Kuru toplama mümkün</li> <li>• % 99.9 verimle ve kolay işletilebilme</li> <li>• Gaz akımındaki değişikliklere uygunluk</li> <li>• Filtreler için değişik özellikler ve yapıların olması</li> <li>• Toz direncinden etkilenmez</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toplanan tozun giderilmesi için filtre değişimi (torbanın değişim sıklığı; gazın özelliklerine, sıcaklığa, basınca, gazın asidik özelliğine, tozun aşındırıcı özelliklerine, yüzey pürüzsüzlüğüne ve nemliliğe bağlıdır)</li> <li>• Yüksek bakım ve işletme maliyetleri</li> <li>• Sıcaklık, nem, organik partiküller ve yanıcı-patlayıcı gazlara duyarlılık</li> <li>• Asitli ortamda bulunan tozlar için patlama ve yangın riski</li> <li>• Filtre değişimlerinde koruyucu donanım ihtiyacı</li> </ul>
<b>Elektrostatik Toz Çöktürücüler</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &lt;1 µm boyutundaki toz partiküllerde bile etkili</li> <li>• % 99.9 verimle işletilme</li> <li>• Partiküller ıslak veya kuru olarak toplanabilir</li> <li>• Yüksek sıcaklıklarda (700°C) işletilebilmesi</li> <li>• Düşük basınç düşüşü (12.7 mm H<sub>2</sub>O'dan az)</li> <li>• Yüksek basınç (10 atm den fazla) ve vakumda çalışabilme</li> <li>• Tozların kuru olarak toplanması ve uzaklaştırılması</li> <li>• En az bakımla sürekli işletilebilmesi</li> <li>• Düşük işletim maliyeti</li> <li>• Değişken materyallerin toplanması veya duman veya tozun ıslak sistemle toplanabilmesi</li> <li>• Aşındırıcı ve patlayıcı partikülleri giderebilme (ıslak ESÇ)</li> <li>• Temizleme işlemi için çöktürücü ünitelerin çıkarılmaması</li> <li>• Toplanan tozun yüksek geri kazanım değeri</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek yatırım maliyeti</li> <li>• Değişken toz yüklerine ve akış hızındaki değişimlere duyarlılık</li> <li>• Yüksek veya düşük özdirençli tozların tutulmasında güçlük</li> <li>• Kurulumu için fazla alan gereksinimi</li> <li>• Yanıcı gaz veya partiküllerin toplanmasından dolayı patlama riski</li> <li>• Negatif yüklü deşarj elektrotları tarafından ozon üretimi</li> <li>• Personelin yüksek voltajlardan korunması için alınması gereken önlemler</li> <li>• Kuru tip ESÇ'ler de yanma gazlarından dolayı patlama riski</li> <li>• Kalifiye personel ihtiyacı</li> </ul>

## 2.2. Kaynak Özetleri

İlk ticari ESÇ, Sir Oliver Lodge ve meslektaşları Walker ve Hutchings tarafından 1885'te Kuzey Galler'deki kurşun izabe tesisi için geliştirmişlerdir. Ancak yüksek voltajlı güç kaynağı ve kurşun oksit dumanının yüksek direnci ile ilgili sorunlar nedeniyle bu uygulama başarısız olmuştur. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki California Üniversitesinde kimya profesörü olan Dr. Frederick Cottrell ve meslektaşları 1907 yılında ESÇ'lerin ticari uygulamasını geliştirmişler ve 11 Ağustos 1908 yılında cihazın patentini almışlardır. Daha sonra Cottrell, ESÇ teknolojisinin temel dayanağını oluşturan deneysel çalışmaları destekleyen kâr amacı gütmeyen Cottrell Research Corporation'ı (Cottrell Araştırma şirketi) kurmuştur (Schnelle, et al., 2016). ESÇ'ler o zamanlardan günümüze kadar etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle termik santral ve mineralden metal üretme tesislerinin baca gazından toz giderme işlemlerinde uzun süredir kullanılan ESÇ'lerin performansı üzerine etki eden parametrelerin optimizasyonu ve toz tutma veriminin artırılması üzerine birçok araştırma çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında da ESÇ performansını artırıcı çalışmalar yürütülmüştür. Tez çalışmasına yol gösterici ve referans olabilecek daha önce tamamlanmış çalışmalardan bazıları aşağıda konularına göre sınıflandırılarak başlıklar halinde özetlenmiştir.

### 2.2.1. ESÇ ile İlgili Sayısal Modelleme Çalışmaları

Günümüze kadar ESÇ'lerin çalışma prensibinin anlaşılması ve toz toplama performansı üzerine çok fazla çalışma yapılmıştır. Bu amaçlarla önceki çalışmalarda geçerli denklemlerin çözümü ve anlaşılması için birçok sayısal çalışma yapılmıştır (Cooperman, 1971; Leonard, et al., 1980; Vincent and MacLennan, 1980; Talaie, 2005; He and Dass, 2017). Deutsch modeli, hem ESÇ performansını tahmin etmek için (çöktürücülerin performansının verimlilik ölçümleri ve kullanımdan belirlenen etkili bir göç hızı açısından karakterize etmek) hem de bilgisayar kodlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Cooperman, 1971). Literatürde ESÇ'lerle ilgili yapılan bu sayısal çalışmaların bir kısmı detaylandırılarak aşağıda özetlenmiştir.

Cooperman (1971) yaptığı çalışmada, Deutsch formülüne getirilen bazı itirazlardan dolayı yeni bir verimlilik teorisi geliştirmiştir. Bu teoriye göre toz partiküllerin rastgele hareket hızının gazın hızından farklı olduğu ve partiküllerin elektrotlara doğru olan net hızının elektrostatik hızdan daha düşük bir katsayı (1-f) ile gösterdiği belirtilmiştir. Buradaki, f değeri yeniden sürüklenme katsayısı, olduğu

bildirilmiştir. Yeni teori ve eskisi arasındaki en büyük farkın özel varsayımlar olmadan doğal bir şekilde etkili olan göç hızının formüle getirilmesi ve verimliliğin türbülans şiddeti ile ilişkilendirilmesidir. Eski formüldeki elektrostatik göç hızı olan 'w' yerine yeni formülde '(1-f).w' ile değiştirilmesi gerektiği önerilmiştir.

Vincent and Maclennan (1980) yürüttükleri çalışmada, ESC performansına etki eden çeşitli aerodinamik faktörlerin olduğunu ve bu faktörlerden özellikle de türbülans ve gaz akışının toz giderimi üzerine etkisi oldukça karmaşık olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada orijinal Deutsch denkleminin temel üssel formuyla gaz arıtımı zaman dağılımı ilişkisi kavramını içeren alternatif bir yaklaşım önerilmiştir. Ayrıca bu yaklaşımı, gaz türbülansını ESC performansını tahmin etmede de kullanmışlardır.

Leonard, et al. (1980) yaptıkları çalışmada, ideal bir ESC içerisindeki partikül taşınımını analitik ve sayısal çözümlenmesini gerçekleştirmişlerdir. Bu çözümler sonucunda ESC performansına ve tasarımına olan etkiler tartışılmıştır. Ayrıca gaz akış kalitesini iyileştirerek ESC veriminin Deutsch değerinden daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle, türbülans şiddetini en aza indirmek için gaz akış kalitesini iyileştirip bu sayede ESC uzunluğunun azalacağı ileri sürülmüştür.

Talaie (2005) çalışmasında, tek aşamalı bir ESC'nin performansını simüle etmek için iki boyutlu bir matematiksel model geliştirilmiştir. Çalışmada ayrıca partikül hareketini tahmin etmek için basit Lagrange yaklaşımı ve türbülanslı akış denklemlerini çözmek için Standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Araştırma sonucunda matematiksel modelin elektriksel bölümünün sonuçları literatürdeki deneysel çalışmalar ile iyi bir uyum gösterdiği tespit edilmiştir.

He and Dass (2017) çalışmalarında, ESC performansını geometrik ve işletme parametrelerine bağlı olarak sayısal bir simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın ilk kısmında korona deşarjını, türbülanslı akışı ve partikül yüklemesini ve bu parametreleri ESC içerisinde görselleştiren üç boyutlu bir model geliştirmişlerdir. İlk kısımda geliştirilen modele dayanılarak, deney parametrelerini uygulayıp tasarım parametrelerini ESC performansı ile ilişkilendirmişlerdir. Tel yarıçapı, toplama plakası uzunluğu, plaka aralığı, uygulanan voltaj ve partikül çapı da dahil olmak üzere beş tasarım parametresi araştırılmıştır. Araştırma sonucunda korona deşarjı, türbülanslı akış ve partikül izleme modelleri arasında tek yönlü birleştirme yerine tam bir birleştirme göz önüne alan yapay sinir ağı yaklaşımı önerilmiştir.

ESC ile ilgili sayısal modelleme çalışmalarının kaynak taraması sonucunda, ESC'yi iyi tanımlamak ve performansını artırmak amacıyla birçok sayısal çalışmanın yapıldığı görülmektedir. İlk başlarda ESC performansını tahmin etmede Deutsch formülü kullanılırken yapılan sayısal model çalışmalarıyla birlikte performans hesaplamalarında değişim söz konusu olmuş ve literatürde farklı formüller sunulmuştur.

### **2.2.2. ESC'deki Gaz Akışının Modellenmesi ile İlgili Çalışmalar**

Tasarım ve performans hesaplamalarında ESC içerisindeki gaz akışının düzgün bir şekilde dağılması önemli bir rol oynamaktadır. Literatürde ESC'ler de akış kontrolü, düzgün akış dağılımını sağlamak için giriş yapılarına kılavuz kanatlar (Şekil 2.30) konularak yapılan çalışmalar, giriş ya da çıkış bölümlerine delikli paneller (Şekil 2.28) yerleştirilerek yapılan çalışmalar ve optimum gaz hızının belirlenmesi ile ilgili araştırmalar yürütülmüştür (Sahin and Ward-Smith, 1987; Şahin 1989; Şahin, et al., 1995; Gallimberti, 1998; Kim and Lee, 1999; Noorpoor and Sadeghi, 2003; Haque, et al., 2009a; Haque, et al., 2009b; Hou, et al., 2009; Swaminathan and Mahalakshmi, 2010; Guo, et al., 2013; Guo, et al., 2015; Sayem, et al., 2015; Kabadi and Hambarde, 2016; Ye, et al., 2016; Jedrusik, et al., 2017). ESC'ler de düzgün akış dağılımını elde etmek için birçok önemli çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları detaylı olarak aşağıda verilmiştir.

Sahin and Ward-Smith (1987) yürüttükleri tasarım çalışmasında, ESC içerisindeki akışın uniform dağılmasını sağlamak amacıyla giriş yapısına delikli panel yerleştirmişlerdir. Çalışmada ESC girişinde iki adet delikli panel kullanılmış delikli panellerin yeri ve gözenekliliği modifiye edilmiş ve bu tasarımların toz toplama odasındaki gaz akış dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmada, difüzör çıkış düzlemindeki akışa etki eden ana faktörlerin, toplama odasında homojen bir hız profili oluşturan plaka özellikleri ve farklı kombinasyonların ilgili basınç düşüşü özellikleri tespit edilmiştir. Araştırma sonucunda, iki plakalı difüzörde gözenekliliğin % 50 oranında difüzör çıkışında homojen bir hız dağılımı olduğu ve akış profilindeki düzensizliklerin düşük gözenekli delikli paneller için daha fazla olduğu saptanmıştır.

Şahin (1989) çalışmasında, ESC'ler de düzgün olmayan gaz akış profilini kontrol altına almak için delikli panellere sahip geniş açılı bir difüzör kullanarak bir tasarım gerçekleştirilmiş ve delikli panellerin ölçüm yerlerine ve geometrisine göre ESC içinde akışın davranışı tanımlanmış ve bu plakaların basınç kaybı özellikleriyle

ilgili temel teorik ve ampirik hususlar tartışılmıştır. Araştırma sonucunda, delikli panellerin arka yüzüne yakın bölgelerde düzensiz akışların gerçekleştiği ve akış profilindeki düzensizliklerin aralığı, porozitesi düşük delikli paneller için daha fazla olduğu bulunmuştur. Çalışmada düzensiz akışların düşük gözenekli plakalara ve deliklerin dağılımına bağlı olduğu belirtilmiştir.

Şahin, et al. (1995) yaptıkları çalışmada, ESÇ içinde toz toplama kanallarından önce 45° ve 60°'lik açılarla piramit şeklinde delikli difüzörler yerleştirilerek difüzörün ESÇ içinde gaz akımı ve basınç dağılımı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Araştırma sonucunda delikli difüzörlerin basınç dağılımı ve basınç geri kazanım büyüklüğü; difüzörlerin plaka geometrisine, difüzörlerin uzunluk oranına, difüzörlerin yerleştirme açısı ve konumuna bağlı olduğunu saptanmıştır. Ayrıca toz toplama plakalarından önce yerleştirilen delikli difüzörlerin ESÇ içinde gaz akışı ve basınç dağılımı üzerine oldukça fazla etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Gallimberti (1998) çalışmasında, büyük ölçekli bir ESÇ'nin çalışma koşullarının simülasyonu için kapsamlı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Çalışmada ayrıca ESÇ giriş ve çıkışına 5 adet delikli panel yerleştirilerek zamana bağlı olarak ESÇ'nin çalışması simüle edilmiştir. Proseste korona deşarjı, toz yüklemesi, toz toplama verimi, toz toplama plakalarına vurma ve dökülen tozların tekrar sürüklenmesi gibi işlemlerin her biri fiziksel kanunlara dayalı kendi başına bir matematiksel model ile temsil edilmiştir. Ayrıca gerekli bilgiler ve modüllerin her birinin geçerliliği için kontrollü koşullar altında test hücreleri üzerinde laboratuvar ölçümleri yapılmıştır. Araştırmalar sonucunda modelin ESÇ performansını artırmak ve endüstriyel ESÇ'nin çalışma koşullarını optimize etmek için kullanılabilmesi belirtilmiştir.

Kim and Lee (1999) yürüttükleri çalışmada, laboratuvar ölçeğinde tek bölmeden oluşan bir ESÇ inşa etmişler ve deşarj elektrotu-toz toplama plaka mesafesinin, deşarj elektrotu kalınlığının, hava akış hızının, türbülans şiddetinin ve voltajın toz toplama verimi üzerine etkisi incelenmiş ve optimize edilmiştir. Araştırma sonucunda, deşarj elektrodu kalınlığı ve deşarj elektrotu-toz toplama plakası arasındaki mesafe azaldıkça toz toplama veriminin arttığı not edilmiştir. Ayrıca aynı bölme içine birden fazla deşarj elektrotu yerleştirildiğinde ve voltaj artırıldığında verimin arttığı, türbülans şiddetinin toz toplama verimi üzerine etkisinin yüksek olduğu ve elektrotlara uygulanan voltaj yükseltildiğinde türbülans şiddetinin toz toplama verimi üzerine etkisinin azaldığı belirtilmiştir.

Noorpoor and Sadeghi (2003) yaptıkları çalışmada, ESC toz toplama verimliliğini artırmak ve ESC içerisindeki akışın uniform dağılımını sağlamak amacıyla giriş ve çıkış bölümlerine plakalar yerleştirilmiştir. Bu amaçlarla çalışmalarını hem deneysel hem de sayısal simülasyon (FLUENT ile) yaparak, sonuçları karşılaştırmışlardır. Araştırma sonucunda diğer modellere göre giriş ve çıkış bölümlerine delikli panel yerleştirilen modelde ESC deşarj bölümünde homojen bir akışın sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Haque, et al. (2009a) çalışmalarında, bir termik santrale bağlı ESC'nin akış simülasyonu yapılmış ve gerçek boyuttaki bir ESC'nin karmaşık iç yapısından dolayı toz toplama performansının önemli ölçüde etkileneceği gösterilmiştir. Bu amaçla çalışmada ESC içerisine delikli panel yerleştirilerek akış dağılımı gözlemlenmiş ve ESC'de ölçülen değerlerle HAD programı FLUENT simülasyonundan elde edilen değerlerin birbiriyle oldukça uyum içinde olduğu belirtilmiştir. Sonuçta simülasyondan elde edilen sonuçların mevcut ESC yapısında değişiklik yapmada kullanılabileceği not edilmiştir.

Swaminathan and Mahalakshmi (2010) çalışmalarında, sayısal olarak ESC difüzöründeki delikli panel içerisindeki akış hem deneysel hem de HAD ile incelenmiştir. Simülasyon ve deneysel sonuçlar toz toplama odasındaki akışın homojenliği üzerine delikli panel alanının ve gözenekliliğin etki ettiği, gözenekliliğin (delik sayısının) fazla olduğu durumda toz toplama plakaları arasında gaz akışının yavaş fakat homojen olduğu, gözenekliliğin azalması durumunda ESC içinde jet akımının oluştuğu ve toz toplama plakalarından önce gözenekli bir plakanın yerleştirilmesinin fazla basınç düşmesine neden olduğunu göstermiştir.

Guo, et al. (2013) yaptıkları çalışmada, ESC içerisindeki gaz akışının kontrolü için ESC girişine delikli paneller yerleştirilmiş ve matematiksel modeller ile ESC'nin optimizasyonunun delikli panelin detaylarını kullanarak yapmanın güç olduğunu, bu nedenle delikli panel kullanılması durumunda basitleştirilmiş bir modelin kullanılmasının daha iyi olacağı belirtilmiştir. Çalışmada delikli panel durumu HAD simülasyonu ile incelenmiş ve elde edilen sonuçlar literatür verileriyle karşılaştırılmıştır. Simülasyonda Reynolds sayısı, gözeneklilik durumu, orifis çapı, panel kalınlığı, yüzey pürüzsüzlüğü ve panel yerleştirme açısının etkileri incelenmiştir. Simülasyondan elde edilen sonuçlarla literatürdeki denklemler kullanıldığında elde

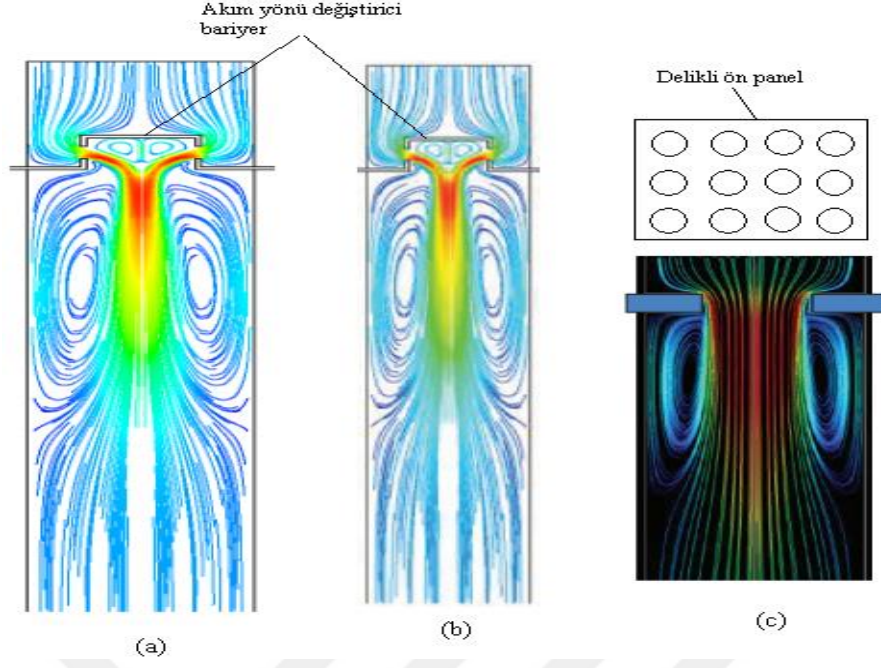
edilen sonuçların uyum içinde olduğu ve delikli panel kullanmanın ESC içinde gaz akım dağılımını homojenleştirdiği, fakat basınç düşüşünü ise artırdığı görülmüştür.

Sayem, et al. (2015) çalışmalarında, tek bölmeden oluşan bir ESC'nin toz toplama plakaları üzerine gaz akış yönünü değiştirecek bariyerler yerleştirmişler ve gaz akımını HAD-FLUENT programı ile simüle etmişlerdir. Çalışma sonucunda toz toplama plakaları üzerine yerleştirilen bariyerlerin iki panel arasında gaz akışında vortekse neden olduğu ve bu durumun çok ince tozların deşarj elektrotuna doğru harekete neden olduğu, bu da sonuçta toz toplama verimini artırdığını belirtmişlerdir.

Kabadi and Hambarde (2016) yaptıkları çalışmada, ESC içindeki akış davranışının simülasyonu ve çeşitli ESC'ler için akış ayırımını önleme ve yüksek akış derecesinde uniform akış elde etmek için gözeneklilik şekillerinin bulması amaçlanmıştır. Bu amaçla ESC içindeki gaz akışı FLUENT HAD programı ile simülasyonu sağlanmıştır. Araştırma sonucunda, düzgün bir gaz akışı olmayan ESC'nin gözenekli plaka ile akışın eşit olarak dağıldığını, ayrıca yüksek hız ve düşük gaz hızının olduğu bölgelerdeki akışların gözeneklilik ayarlamaları yaparak akışın optimize edilebileceği bildirilmiştir.

Jedrusik, et al. (2017) yürüttükleri çalışmada, bir ESC modelini 1:20 ölçeğinde sayısal ve fiziksel olarak modellemişlerdir. Ayrıca gaz akışını görselleştirmek için ESC'nin fiziksel modelini şeffaf plastikten yapmışlar ve ESC içerisinde düzgün hız dağılımı sağlamak için delikli gaz yönlendirici elemanlar kullanmışlardır. Çalışmada sayısal simülasyon için ANSYS-HAD programı kullanmışlar ve bu simülasyondan çıkan sonuçlarla fiziksel model sonuçları karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucunda sayısal ve fiziksel modellerin gaz akış karakteristiklerinin benzer olduğu bildirilmiştir.

Bazı çalışmalarda orta bölmelerin önüne birer bariyer koyularak gazın orta bölmelere doğrudan girişi yerine kıvrılarak girmesi sağlanmıştır (Hou, et al., 2009; Ye, et al., 2016). Fakat bu bariyer de sistemde basınç kaybına neden olmuştur (Şekil 2.29). Ayrıca bu çalışmalar sadece tek bölmeli bir ESC model tasarımları için yapılmıştır.



Şekil 2.29. ESC içinde akım düzenleyici olarak kullanılan sistemler-(a) ve (b) akım yönü değiştirici bariyer (Hou, et al., 2009; Ye, et al., 2016), (c) delikli ön panel ve orifis (Ye, et al., 2016)

Mevcut gaz akış çalışmaları, partikül difüzyonu ve daha küçük ölçekli türbülansın etkileri üzerine yoğunlaşmaktadır (Robinson, 1968). ESC içerisinde meydana gelen türbülanslı akış hem partiküllerin toplanmasını engelleyebilmekte hem de toplanan partiküllerin plaka yüzeyinden harekete geçmesine neden olmaktadır. Bu durum ESC'nin toz toplama performansını olumsuz yönde etkilemekte ve toz toplama veriminin azalmasına da neden olmaktadır. Akış türbülansı ile ilgili daha önce yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır (Davis and Hoburg, 1983; Leonard, et al., 1983; Davidson and Shaughnessy, 1986; Hassid, et al., 1987; Hetsroni, 1989; Davidson and McKinney, 1991; Navarrete, et al., 1997; Kiss, et al., 1998; Leonard, et al., 1982; Soldati, et al., 1993; Zhibin and Guoquan, 1992; Varonos, et al., 2002). Bu çalışmaların bir kısmı detaylandırılarak aşağıda özetlenmiştir.

Leonard, et al. (1983) yürüttükleri çalışmada, pozitif ve negatif koronanın akıştaki türbülans seviyeleri üzerindeki etkilerini ölçmek için deşarj elektrotları ve toplama plakaları arasında kapsamlı iki boyutlu akış ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada sıcak tel anemometresi ve akış görselleştirme teknikleri kullanarak deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Araştırma sonucunda, tipik elektrot boyutları, ortalama gaz hızları ve akım yoğunlukları için, gaz akışı ve korona deşarjı arasındaki etkileşimin nispeten zayıf olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

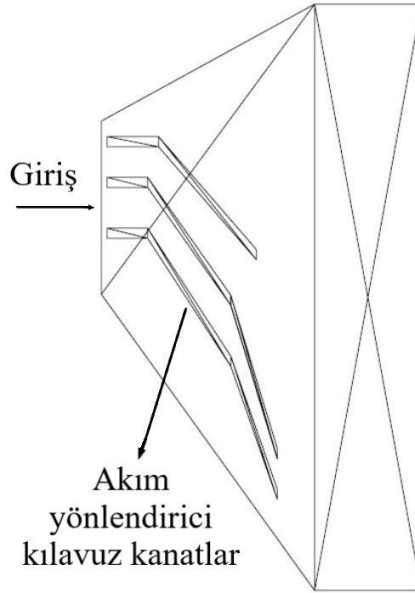
Hassid, et al. (1987) çalışmalarında, ESÇ toz toplama verimliliğini artırmak için ESÇ içerisindeki türbülans ve toz toplama plakası pürüzlülüğünün, taşıma (transport) denkleminin sayısal çözümüne dayanan tozun çökmesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırma sonucunda, türbülanslı sürtünme hızındaki bir artışın, küçük hız oranları için toplama verimliliğini artırdığı, ancak büyük hızlar için bu değeri azalttığı bildirilmiştir. Toz tabakası pürüzlülüğünün ESÇ'nin performansı üzerindeki etkisinin bir göstergesi olarak göz önünde bulundurulması gerektiği ve hız oranının küçük değerleri için toplama verimliliğinin pürüzlülük değeri ile arttığı, ancak bu oranın daha yüksek değerleri için bundan etkilenmediği sonucuna varılmıştır.

Davidson and McKinney (1991) yaptıkları çalışmada, tel tipi elektrot ve plaka tipi elektrot için koronadan kaynaklanan türbülans oluşumu görselleştirilmiştir. Çalışma sonucunda tel tipi elektrot düzenlemesinde elektrot ve toz toplama plakaları arasında yoğun vorteksler tespit edilmiştir. Ayrıca plaka tipi elektrot ve toz toplama plaka modelinde daha iyi bir toplama verimliliği elde edilmiştir.

Navarrete, et al. (1997) çalışmalarında, kömür enerji santralinde kullanılan toz haline getirilmiş farklı kömür türlerinin oluşturduğu külün pilot ölçekli bir ESÇ ile giderilmesi amacıyla verimlilik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Farklı toplama plaka aralıklarının etkisi, bu kömür türlerinin oluşturduğu külün kütle yükünün etkisi göz önüne alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, yüksek dirençli kömür türü için, toplama plakaları arasındaki mesafenin 400 mm ve 0.8 m/s lik gaz hızı ile yüksek toz toplama verimi tespit edilmiş, düşük dirençli kömür için ise en iyi toz toplama verimi toz toplama plakaları arasındaki mesafenin 300 mm ve optimum gaz hızının 1.1 m/s olması durumunda elde edilmiştir. Ayrıca daha geniş aralıklı ESÇ'nin, aynı verimlilik düzeylerini korumak için daha geniş bir kollektör alanı gerektirdiği sonucuna varılmıştır.

Varonos, et al. (2002) yürüttükleri çalışmada, bir ESÇ'nin toz toplama verimini artırmak amacıyla gaz akışı, partikül ve elektrik alan özellikleri dikkate alınarak tasarım ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları tasarım tam ölçekli elektrik santrali ünitesinde çalışan bir endüstriyel ESÇ üzerine uygulamışlardır. Çalışmada vorteksin ESÇ sistemindeki toz toplama verimliliği üzerindeki etkilerinin düşürülmesi için çöktürücüyü, ilk önce mevcut durumda modellemişler ve daha sonra çökelen tozların tekrar sürüklenmesini azaltmak için aerodinamik kriterlere dayanan bir optimizasyon çalışması yapmışlardır. Optimizasyon çalışmasında giriş

bölümündeki ani genişleme alanını azaltıp gaz akımını düzenlemek için kılavuz kanatlar (Şekil 2.30) kullanılmıştır. Araştırma sonucunda, toplanan tozun vorteksten etkilendiğini, ESÇ'nin alt kısmındaki toz toplama haznesi önündeki kılavuz kanatların ve toz toplama plakaları arasındaki mesafenin vortekste rol oynadığı bildirilmiştir.



Şekil 2.30. ESÇ içinde akım düzenleyici olarak kullanılan kılavuz kanatlar (Varonos, et al., 2002)

Singh and Tiwari (2012) yaptıkları çalışmada, Hindistan'daki bir termik santralde kullanılan kömür özellikleri verilmiş ve Hindistan'daki termik santrallerde kullanılan ESÇ'lerin toplama verimini artırmak amacıyla bir araştırma yapılmıştır. Çalışmada, farklı kükürt formları, kül, öz direnç, iletkenlik gibi kimyasal bileşenler açısından problemlerin nedenleri analiz edilmiştir. Araştırma sonucunda, ESÇ'ye giren gazın yaklaşma hızının azaltılması durumunda spesifik toplama alanını artıran gaz akış hacmini azaltma etkisine sahip olduğu bildirilmiştir. Verimi artırmak için uyguladıkları başka bir yöntem de ESÇ yüksekliğini 7.5 metreden 8.5 metreye çıkarmak için, toplama alanını yaklaşık % 13 oranında artırılması durumunda, emisyonların yaklaşık % 22 oranında azaldığı görülmüştür. ESÇ boyutunun daha da artırılması durumunda, toplama verimliliğinin de artacağı bildirilmiştir.

### 2.2.3. ESÇ İçerisindeki Elektriksel Alan ile İlgili Çalışmalar

Bazı çalışmalarda ESÇ içerisindeki akışın birincil akış ve ikincil akış olmak üzere ikiye ayrıldığı görülmektedir. Birincil akışın ESÇ içerisine giren gazın ilerlemesini sağlayan akış olduğu, ikincil akışın ise korona deşarjının olduğu elektrot etrafında elektriksel güçten kaynaklanan akış olduğu belirtilmektedir. Partiküllerin

hareketini etkileyen ikincil akışın var olduğunu ve bu akışın sistem içerisinde vorteksi oluşturarak partikül taşınmasını ve verim üzerinde olumsuz etkileri olduğu görülmüştür (Robinson, 1967; Robinson 1968; Cooperman, 1971; Soo and Rogers, 1971; Yamamoto and Velkoff, 1981; Leonard, et al., 1980; Leonard, et al., 1982; Shaughnessy, et al., 1985; Kogelschatz, et al., 1999; Gajbhiye, et al., 2015). Önceki çalışmalarda, elektriksel alan ve gaz akışının sayısal çözümlenmeleri genel olarak elektrohidrokinamik (EHD) yöntem kullanılarak yapılmıştır (Ramadan and Soo, 1969; Choi and Fletcher, 1998; Nielsen and Lind, 2004; Mizeraczyk, et al., 2013). Elektriksel alan ve elektrotların etkisinin modellenmesi ile ilgili bilgisayar model çalışmalarının çoğu iki boyutlu modellerle gerçekleştirilmiştir (Nikas, et al., 2005; Adamiak and Atten, 2009; Podliński, et al., 2013; Gajbhiye, et al., 2015). Bu çalışmalardan bazıları detaylandırılarak aşağıda verilmiştir.

Shaughnessy, et al. (1985) çalışmalarında, EŞÇ'lerde korona deşarjı tarafından üretilen ikincil akışların ve vorteksin, partikül taşınmasını ve çöktürücü verimliliğini etkilediği hipotezini öne sürmüşler ve bunun üzerine araştırmalar yapmışlardır. Çalışmada Navier-Stokes ve azalan Maxwell denklemlerini kullanarak problemin temel bir analizi gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonucunda akım yoğunluğunun dönme bileşeninin gazda vorteks oluşumuna neden olduğu ve dolayısıyla ikincil akışın ve vorteksin kaynağının akım yoğunluğu olduğu gösterilmiştir. Akım yoğunluğu döngüsel olmadığında, elektriksel gövde gücünün basınç dağılımında bir değişikliğe neden olduğunu, ancak hız alanı üzerinde bir etkisi olmadığı belirtilmiştir. Sonuç olarak, akım yoğunluğu dağılımı yalnızca elektrot geometrisi ve deşarj yapısı ile belirlendiğinden, elektrotların akım yoğunluğunun dönme bileşenini en aza indirmek ve böylece gaz akış bozukluklarını azaltmak üzere tasarlanması gerektiği belirtilmiştir.

Atten, et al. (1987) yaptıkları çalışmada, EŞÇ'de vorteksin EHD kaynağı üzerine teorik bir araştırma yapmışlardır. Belli bir akışkan için uygulanan voltaja bağlı olan, boyutsuz bir sayı (Coulomb kuvvetinin viskoz kuvvete oranı) olan 't' sayısını bulmuşlardır. Buradaki t-değeri arttıkça, iyon hareketinin daha güçlü hale geldiği ve sonuçta partikül taşınımını etkileyen vorteksin meydana geldiği görülmüştür. Eğer t-değeri 3'ü aşarsa, yük taşıyıcılarının sürüklenmesinde belirgin bir etkisi olan ikinci bir boyutsuz sayı olan "M" sayısı (iyon hareketliliğinin gaz hareketliliğine oranı) ortaya

çıkarılmıştır. Çalışmada, Reynolds sayısının ortalama gaz hızına dayalı olarak  $Re$  yerine,  $Re_{turb}$  olarak temsil edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yamamoto (1989) tarafından yapılan çalışmada, EHD ile birleşmiş türbülanslı difüzyon denkleminin sayısal simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonucunda, tel-plaka tipi ESC'nin toz toplama verimliliğinin plaka tipi ESC'den önemli ölçüde düşük olduğu, tel plakalı ESC için türbülanslı difüzyon katsayısının  $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 'den düşük olduğunda toplama veriminin herhangi bir türbülans veya EHD seviyeden etkilenmediği, bu kritik değerin aşılması durumunda EHD sayısının ve partikül göç hızı değerine bakılmaksızın toplama veriminin keskin bir şekilde düştüğü, plaka tipi ESC için toplama verimliliğinin türbülansa daha az duyarlı olduğu ve ESC'de akış karakteristiğinin kontrolünün önemli olduğunu vurgulanmıştır.

Kallio and Stock (1992) çalışmalarında, tel plakalı bir ESC modelindeki elektrik alanından kaynaklı ikincil akış oluşumu ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu modeldeki akışı görselleştirmek için Lazer-Doppler Anemometre (LDA) ölçümleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, duman partiküllerinin hız dağılımı LDA kullanılarak analiz edilmiş, düşük giriş hızlarında (0.5 m/s) ortalama akışın geri dönüşünün belirgin olduğunu ve türbülans şiddetinin % 50 kadar fazla olduğunu, daha yüksek giriş hızlarının (1 ve 2 m/s) akışın geri dönüşünü ve düşük türbülans seviyelerini sağlamadığı bildirilmiştir. Ayrıca ESC içinde iyon yoğunluğu ve elektrik alan dağılımını elde etmek için kombine bir sonlu elemanlar ve sonlu farklara dayalı elektrostatik model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modelde, duman akışını görselleştirerek LDA ölçümleri ile tutarlı olan ortalama akış geri dönüşümü ve türbülanslı yayılım öngörülmüştür.

Soldati, et al. (1993) çalışmalarında, elektrostatik alan etkisi altında türbülanslı akıştaki partikül dağılımının doğrudan sayısal simülasyonu çalışılmıştır. Bu simülasyonda partiküller aerodinamik sürüklenmenin yanı sıra elektrostatik ve yerçekimi kuvvetinin etkisi altında geçici ve mekânsal olarak değişen türbülanslı akış alanında hareket ettirilmiştir. Simülasyon sonuçlarını hem toplama etkinliği hem de konsantrasyon profili bakımından daha önce Kihm (1987) tarafından yapılan deneysel çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların Kihm'in sonuçları ile iyi uyum gösterdiği belirtilmiştir.

Canadas, et al. (1995) yaptıkları çalışmada, plaka tipi ESÇ'nin performansını karakterize edecek teorik bir model tasarlanmıştır. Deutsch modeline göre teorik bir PRELEC modeli geliştirilmiştir. Model, iyonik ve partiküllü alan şarjının etkisini hesaba katıp uygulanan gerilime dayalı olarak elektrik alanını hesaplamaktadır. Çalışma sonucunda, modelin yerel enerji santrallerinden alınan deneysel ölçümlerle iyi bir uyum gösterdiği bildirmiştir.

Khare and Sinha (1996) yürüttükleri çalışmada, pozitif korona modunda çalıştırılan ESÇ'nin verimliliğini simüle etmek için bir bilgisayar simülasyon algoritması geliştirilmiştir. Plakalar ve elektrotlar arasındaki elektrik alan tanımlanmış, ayrıca giriş verileri (plaka ve elektrot arasındaki gerilim ve mesafeyi, elektrot yarıçapını, iyon hareketliliğini, korona akımını, uçucu kül partiküllerinin yarıçapı gibi) kullanılarak kararlı durum koşulları altında veriler elde edilmiş ve simülasyon gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda toplama verimliliğinin plaka alanı yerine deşarj elektrotlarının sayısına bağlı olduğunu bildirilmiştir.

Soldati and Banerjee (1998) çalışmalarında, EHD etkilerini hesaba katarak akışkan hareket denklemlerinde mekânsal olarak değişen bir gövde kuvveti tanımlayan, bir sahte spektral kanal akış simülasyonu gerçekleştirilmiştir. EHD akışıyla duvar yapıları arasındaki etkileşim, akış alanının anlık yapısı incelenerek açıklanmıştır. Çalışma sonucunda, ortalama akışın EHD akışının ve türbülans alanının karşılıklı etkileşimden kaynaklanan önemli değişikliklere uğradığı gösterilmiştir. EHD akışının sürtünmeyi azalttığı ve belirli bir basınç düşmesi için daha büyük akış hızlarına izin verdiği bulunmuştur. Kendiliğinden oluşan EHD akışın varlığıyla, özellikle kanalın orta bölgesine gelindiğinde akışın zayıfladığı görülmüştür. EHD akışları hem artan dağılımların hem de türbülans üretimi ile türbülans alanını etkilediği bildirilmiştir. EHD akış yoğunlukları akış yönünde artmasına rağmen, sürüklenmede gözlemlenen azalma ile tutarlı olarak Reynolds gerilimini azalttığı tespit edilmiştir.

Soldati (2000) çalışmasında, EHD akışlarının ve türbülanslı akış alanlarının partikül taşınımı ve toplama verimliliği üzerine etkilerini incelemek için doğrudan sayısal simülasyon kullanılarak bir analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca, farklı boyut ve yükteki partiküllerin ESÇ tellerine uygulanan farklı potansiyele karşı iki farklı akış alanı izlenmiştir. Çalışma sonucunda, elektrostatik alanın sadece partikül üzerinde etkili olduğu yapılan simülasyon çalışmalarında görülmüştür. Simülasyon sonuçları, elektrostatik alanın yalnızca parçacık üzerinde etkili olduğunu gösteren

simülasyonlarla karşılaştırılmıştır. Partikül konsantrasyonunun daha yüksek olması gereken duvarın yakınında EHD akışlarının partikül birikimi üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olma eğiliminde olduğu bulunmuştur.

Park and Kim (2003) yaptıkları çalışmada, EHD akışın ve türbülanslı difüzyonun boşluklu plakalardan oluşan bir ESC modelindeki partiküllerin toplanma verimliliğine etkisi, sayısal hesaplamalarla incelenmiştir. EHD akış alanı, gaz fazının süreklilik ve momentum denklemleri ile çözülmüş ayrıca elektrik alan altındaki iyonların hareketi tarafından uyarılan elektriksel gövde kuvveti de hesaplamaya dahil edilmiştir. Türbülanslı akışın analizi için Re-Normalization Group (RNG)  $k-\epsilon$  türbülans modelinin kullanıldığı çalışmada partiküllerin elektriksel göç hızı yüksek olduğu durumda partiküllerin türbülanslı difüzyonun arttığı ve toplama etkinliğinin ise azaldığı tespit edilmiştir.

Gutierrez-Ortiz, et al. (2010) çalışmalarında, kurdukları bir modelde ESC'nin performansı boyutsal analiz yapılarak değerlendirilmiştir. Amaçlarının pilot ölçekten gerçek ölçeğe geçişte ESC'nin performansını etkileyen parametrelerin sayısını azaltmak olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada farklı boyutlarda inşa edilen ESC'ler de gaz akım hızı, voltaj ve EHD şartları aynı tutarak yürütülmüştür. Ayrıca lineer ve lineer olmayan regresyon analizi yaparak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçların lineer olmayan regresyondan elde edilen sonuçlarla daha uyumlu olduğu belirtilmiştir.

ESC içerisindeki elektriksel alan ve buradaki süreci anlamak için partikül taşınması ve birikmesi üzerindeki türbülanslı EHD akış etkisi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu akışın çok karmaşık yapısı nedeniyle birçok çelişkili sonuç bildirilmiştir. Kogelschatz, et al. (1999) yürüttükleri çalışmada, EHD akışları ortadan kaldırıldığında toplama verimliliğinin arttığı bildirilmiştir. Bunun aksine, Soldati (2000) yaptığı çalışmada, EHD akışının toplam toplama verimliliği üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunu belirtilmiştir.

#### 2.2.4. ESÇ ile İlgili Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Çalışmaları

Sayısal çözümlenmelerde ESÇ performansına etki eden faktörlerin tümünün hesaba katılması zor ve çözümü imkânsız hale getirmektedir. Ancak sayısal çalışmalarda ne kadar fazla etki eden faktör hesaba katılırsa o kadar performans tahminlerinde doğruya yaklaşmış olmaktadır. Nihayetinde bilgisayar tabanlı modeller ile karmaşık modellerin bile eksiksiz olarak çözümlenmesi mümkün olmaktadır. Teknolojik ilerlemelerle birlikte bilgisayar tabanlı çözümlenmelerde gelişmeler meydana gelmiş ve karmaşık akışların modellenmesine olanak sağlanmıştır. Bu modelleme çalışmalarından biri olan HAD, özellikle mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. HAD programı karmaşık akışların gerçekleştiği ve toz toplama veriminin buna bağlı olarak etkilendiği ESÇ'ler içerisindeki gaz akışının başarılı bir şekilde modellenmesine de olanak sağlamaktadır. HAD, herhangi bir geometrideki akışları tahmin etmek için kullanılan yeni bir teknolojidir. Bilgisayar ortamında FLUENT programı kullanılarak Navier-Stokes denklemlerini uygulayıp tekrar eden bir çözüm süreci gerçekleştirilir. FLUENT yazılımı sürekli olarak daha fazla uygulamayı kapsayacak şekilde daha da geliştirilmekte ve çoğu durumda ek bir parametre tanımlamak için kullanıcı tanımlı fonksiyon (UDF) kullanılarak programa özel yetenekler eklenebilmektedir. Gaz akış dağılımını iyi anlama ESÇ'nin performansını artırmada önemli bir faktördür. Son yıllarda ESÇ içerisindeki akışı optimize etmek ve partikül dağılımını tahmin etmede HAD giderek daha fazla önem kazanmış durumdadır (Skodras, et al., 2006; Adamiak and Atten, 2009; Haque, et al., 2009a; Haque, et al., 2009b; Bhasker; 2011; Swaminathan and Mahalakshmi, 2010; Guo, et al., 2013; Nielsen and Lind, 2014; Yusop, et al., 2014; Sayem, et al., 2015; Kabadi and Hambarde, 2016; Ye, et al., 2016; Jedrusik, et al., 2017). Kaynak araştırmalarında, ESÇ simülasyonlarını yapmak amacıyla kullanılan HAD modelleriyle ilgili yapılan bazı çalışmalar detaylandırılarak aşağıda özetlenmiştir.

Skodras, et al. (2006) yürüttükleri çalışmada, ESÇ içindeki gaz akışı, partikül dinamiği ve elektrostatik alan arasındaki çift yönlü etkileşimleri dikkate alan iki boyutlu bir HAD modeli oluşturulmuştur. Kütle ve momentumun zaman-ortalamalı korunum denklemleri kullanılarak gaz akışı üzerine odaklanan teorik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Kullandıkları denklemler ile partikül akışı, partikül yüklenmesi, elektrik alan ve akış denklemlerinin gaz akışın uygulandığı teorik analizler

gerçekleştirilmiştir. Elektrik alan değerlerini ve partikül alan yük yoğunluğunu çözmek için uygun kod yazılarak FLUENT 6.1 HAD paketinin UDF özelliği kullanılarak FLUENT ile birleştirilmiştir. Model ile gaz hızı, partikül konsantrasyonu, türbülans yoğunluklu elektrik alan yoğunluğu, elektrik alan potansiyeli ve toz toplama verimi tahmin edilmiştir. Çalışma sonucunda, modelin değişen geometriye veya çalışma parametrelerine uygulanması, küçük partiküllerin toplanmasının daha zor olduğu ve toplama performansının artırmanın en etkili yolunun tel voltajının artırılması veya yaklaşma hızının düşürülmesi (yani bekletme süresini artırmak) olduğu saptanmıştır.

Adamiak and Atten (2009), tek telli bir ESC içinde ince partiküllerin çökmesini simüle etmek için sayısal bir modelle simüle etmeye çalışmışlar ve çökelmeye etki eden tüm önemli parametreleri (elektrik alan, yük yoğunluğu, korona deşarjı, yüklü partiküllerin neden olduğu ikincil EHD akış, gaz akışı ve partikül taşınması) dahil ederek FLUENT programı HAD ile hesaplamalar yapmışlardır. Çalışma sonucunda, gaz akış modeli partikül konsantrasyonuna bağlı olan ikincil EHD akış ile önemli ölçüde değiştiği, ince partiküller için sapma hızının küçük olduğu ve partiküllerin gaz akış çizgilerini pratik olarak takip ettiği, partikül konsantrasyonu çökme verimi üzerinde çok büyük bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Bhasker (2011) tarafından yapılan çalışmada, ESC'deki giriş kanallarındaki akış dağılımını iyileştirmek ve çıkış bölümündeki akış modelini anlamak için tasarım yapılmıştır. Ölçüm verilerinin bulunmadığı durumlarda anlamlı tahminler sağlamak amacıyla HAD çözümleyicisi olan CFX-TASCFLOW, FLUENT, CFX ve STAR-CD gibi farklı akış çözücülerini kullanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, giriş borusuna daha fazla dönen kanat koyarak akış dağılımını iyileştirilebileceği gösterilmiştir.

Nielsen and Lind (2014) çalışmalarında, ESC'deki elektro-hidrodinamik akışın modellenmesi için gaz dağılımı değerlendirilmiştir. Modellemeyi FLS Airtech'te HAD ile yapılmıştır. Ayrıca, tam ölçekli ve model ölçekli ölçümlere karşı sayısal simülasyonlar karşılaştırılmıştır.

Yusop, et al. (2014) ESC içindeki gaz akışını geliştirdikleri bir HAD modeli ile incelemiştir. Model, kütle ve momentumun zaman-ortalama korunum denklemi ile gaz akışına odaklanan simülasyon analizine dayanmaktadır. Hava akımı için sayısal

hesaplamalar, gerçekleştirilebilir  $k-\epsilon$  türbülans model denklemleri ile birleştirilmiş RANS denklemi kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Modeller, düzgün bir hız profili göz önüne alınarak giriş bölgesinde farklı hızlar (10 m/s, 20 m/s ve 30 m/s) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Düşük hız profili ile yapılan simülasyon sonuçları ESC'nin giriş ve çıkışı arasında daha homojen bir gaz akışı sağlandığını göstermiştir.

Ye, et al. (2016) yürüttükleri çalışmada, 600 MW'lık bir termik santralin baca gazı değerleri kullanılarak tek odalı bir ESC, seri ve paralel bağlı ESC odalarını simüle etmişlerdir. Simülasyondan elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve her ikisinin uyum içinde olduğu, çoklu ESC odalarının da HAD –FLUENT programı ile simüle edilebileceği belirtilmiştir.

Birçok araştırmada ESC içerisindeki partikül hareketi, partiküle etki eden kuvvetler ve partiküllerin yörüngesini tahmin etmek amacıyla HAD tekniği kullanan FLUENT programı içerisinde Ayrık Faz Modeli (DPM) kullanılarak incelemelerde bulunulmuştur (Choi and Fletcher, 1998; Haque, et al., 2007a; Haque, et al., 2007b; Zhang, et al., 2011; Gajbhiye, et al., 2015). Bu konuyla ilgili yapılan bazı çalışmalar detaylandırılarak aşağıda verilmiştir.

Choi and Fletcher (1998) çalışmalarında, ESC'deki türbülanslı gaz akışındaki toz dağılımını ve yüklü partiküllerin davranışını incelemek ve ESC verimliliğini optimize etmek için iki boyutlu bir HAD modeli prosedürünü ortaya koymuşlardır. Türbülanslı gaz akışı ve elektrostatik kuvvetler altında partikül hareketi ANSYS-HAD programı olan FLUENT kullanılarak incelenmişler, sonuçta elektriksel alan gücünün toz taşınımı üzerindeki etkisinin önemli olduğu, yüksek toz yüklemesine sahip küçük partiküller için korona akımının önemli ölçüde azaldığı ve partikül alan şarjından dolayı iyon yükünün bozularak dağıldığı görülmüştür.

Haque, et al. (2007b) çalışmalarında, laboratuvar ölçekli bir ESC'deki akış dağılımını optimize etmek için HAD modelleme tekniğini kullanmışlardır. Gaz akışı için sayısal hesaplamalar RANS denklemlerinin çözülmesi ile gerçekleştirilmiş ve türbülans modellemesi ise  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılması ile modellenmiştir. Çalışmada ESC içerisine delikli panel yerleştirilmiş ve akışı görselleştirilmek için duman kullanılmıştır. Deneyler sonucunda, toplama odasındaki duvarların yakınında girdapların oluştuğu, deneysel ve simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçların nispeten iyi bir uyum içinde olduğu ve geliştirilen akış modelinin ESC tasarımında

yapılacak olası değişikliklerin etkisini tahmin etmek için yeni bir araç olarak kullanılabileceği bildirilmiştir. Haque ve arkadaşlarının aynı yıl içerisinde yaptıkları başka bir çalışmada, tek telli EŞÇ ile HAD tekniği kullanılarak türbülanslı gaz akışı ve elektrostatik kuvvetler altındaki partikül hareketi modellenmiştir. Diğer çalışmadan farklı olarak bu sefer elektrik alanının etkisi incelenmiştir. Bunun için gaz akışı denklemiyle birlikte UDF de FLUENT'e eklenmiştir. UDF kullanılarak elektrik alanı ve yük nakil denklemlerinin çözümü birlikte gerçekleştirilmiş ve DPM kullanılarak da partikül hareketi simüle edilmiştir. Çalışma sonucunda, EŞÇ içerisindeki sayısal olarak tahmin edilen elektrik potansiyeli literatür verileriyle karşılaştırılmış ve uyum içinde olduğu görülmüştür. Geliştirilen hesaplama prosedürü endüstriyel EŞÇ performansını iyileştirmek için seçeneklerin belirlenmesinde faydalı olabileceği bildirilmiştir (Haque, et al., 2007a).

Zhang, et al. (2011) yürüttükleri çalışmada, uygulanan manyetik alana maruz bırakılan 2 boyutlu EŞÇ'nin partikül dinamiği için istatistiksel partikül boyut dağılımı dikkate alınarak güçlü bir şekilde birleştirilmiş bir hesaplama prosedürü açıklanmıştır. Türbülanslı gaz akışı için RNG k-ε türbülans modeli ve dış kuvvetler altındaki partikül hareketi, FLUENT HAD simülasyon programı ve UDF kullanılarak modellenmiştir. Gaz akışı için sayısal hesaplamalar RANS denklemleri çözülerek gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik alan ve yük taşıma denklemlerinin birlikte çözülmesiyle elde edilen UDF, elektromanyetik alanın etkisini yakalamak için gaz akış denklemine eklenmiştir. Partikül fazı, DPM Rosin-Rammler dağılımı kullanılarak simüle edilmiş ve EŞÇ içindeki partikül yörüngeleri hem aerodinamik hem de elektromanyetik kuvvetlerin etkisi altında incelenmiştir. Araştırma sonucunda tel kanallı EŞÇ'den elde edilen sayısal sonuçlar, uygulanan manyetik alanın artmasıyla toplama verimliliğinin arttığı, partikül yörüngesinin toz toplama kanalının yönüne göre daha görünür olduğu ve toplama verimliliğinin, uygulanan manyetik alana belirli bir boyutta yöneldiğini göstermiştir. Ayrıca, kaçan partiküllerin ortalama çapının azaldığı ve artan manyetik alanla birlikte farklı boyutlardaki toz partikül dağılımının arttığı ve partikül çapı belirli bir boyuta gelmeden önce manyetik alanla doğrusal olarak azaldığı ifade edilmiştir.

Gajbhiye, et al. (2015) yaptıkları çalışmada, Navier-Stokes için sonlu hacim çözücü ve süreklilik denklemleri kullanan bir EŞÇ toz toplama verimliliği ve akım devamlılığı için Poisson denklemi kullanılmıştır. Partikül hareketi, partiküle etki eden çeşitli kuvvetler sonucu bir sıvıdaki tek partiküllerin yörüngesini tahmin etmek için

bir Lagrange yaklaşımı kullanılarak simüle edilmiştir. Araştırma sonucunda ESC'nin etkinliği, partikül çapıyla güçlü bir şekilde tespit edildiği bulunmuştur. Ayrıca belirli bir giriş hızı için partikül çapı ve tel potansiyeli ile toplama verimliliğinin arttığı tespit edilmiştir. Toplama verimliliğini tahmin etmede önerilen matematiksel modelin, farklı partikül çaplarında çok telli geometriler için mantıklı sonuçlar verdiği bildirilmiştir.

Bazı çalışmalarda FLUENT program sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırarak FLUENT programının güvenilirliği ve ESC model tasarımında güvenilir bir şekilde kullanılıp kullanılmayacağı incelenmiştir.

Bernstein and Crowe (1981) çalışmalarında, ESC'ler de akışkanlar dinamiği ve elektrostatik etkileri üzerine çalışmalar yaparak temel bir model ortaya koymuşlardır. ESC içinde duman akışını görselleştirmek için lazer ışını aydınlatmalı bir laboratuvar çöktürücü üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Gözlemlenen akış modellerini sayısal olarak simüle etmek için iki denklemlilikli türbülans modeli ile zaman ortalamalı kütle ve momentum denklemleri tanımlanmıştır. Ayrıca elektrik alan denklemlerini tanımlamak için Maxwell denklemi kullanılmıştır. Araştırma sonucunda, duman partiküllerinin yüksek ve düşük duman konsantrasyonuna sahip türbülanslı girdapları gösterdiği ve türbülanslı difüzyonun, Deutsch analiziyle varsayıldığı gibi düzgün partikül konsantrasyonu sağlamak için yeterli olmadığı vurgulanmıştır. Kullandıkları denklemler ile akışkanlar dinamiği ve elektrostatik güç arasındaki etkileşimin ESC'deki akışın değiştirilmesinde bazı bölgelerdeki toz göçüne yardımcı olacağı ancak bazı bölgelerdeki toz göçünün ise azalmasına neden olacağı ifade edilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Dumont and Mudry (2003) yaptıkları çalışmada, ESC geometrisini optimize etmek için dönen kanatçıklar, engelleyici bariyerler ve delikli paneller yerleştirilerek HAD modelleme teknikleri kullanılarak ESC içinde gaz akışını incelemişlerdir. Modellemede hız dağılımı, sıcaklık katmanlaşması, kimyasal enjeksiyon, toz birikimi ve basınç kaybı analizleri yapılmıştır. HAD modelinden elde ettikleri akış simülasyonu sonuçları kurulan ESC sisteminden elde ettikleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve deneysel verilerin % 28-33 aralığında uyumlu olduğu bulunmuştur.

ESÇ simülasyonları gerçekleştiren çalışmalar incelendiğinde; ESÇ içerisindeki türbülanslı akışın genel olarak  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılarak simüle edildiği görülmüştür (Park and Kim, 2003; Talaie, 2005; Haque, et al., 2007b; Haque, et al., 2009b; Farnoosh, 2011; Zhang, et al., 2011; Yusop, et al., 2014). Türbülanslı akışların hesaplanması için bazı çalışmalarda Navier-Stokes denklemleri (Shaughnessy, et al., 1985; Adamiak, 2013; Gajbhiye, et al., 2015) ya da RANS denklemleri (Haque, et al., 2007b; Haque, et al., 2009b; Zhang, et al., 2011; Yusop, et al., 2014) kullanılmıştır. Ayrıca bazı çalışmalarda da ESÇ içindeki partiküllerin yörüngesini hesaplamak için Lagrange yaklaşımı kullanılmıştır (Suh and Kim, 1996; Choi and Fletcher, 1997; Goo and Lee; 1997; Choi and Fletcher, 1998; Talaie, et al., 2001; Varonos, et al., 2002; Nikas, et al., 2005; Talaie, 2005; Haque, et al., 2007a; Adamiak and Atten, 2009; Zhang, et al., 2011; Gajbhiye, et al., 2015; Guo, et al., 2015).

Kaynak araştırması sonucunda ESÇ ile ilgili şimdiye kadar çok fazla çalışma yapıldığı ve hala toplama performansını artırmak amacıyla multidisipliner yaklaşımlarla çözüm önerilerine ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. Kaynak araştırması ve verime etki eden faktörler göz önüne alındığında ESÇ sistemlerinde karşılaşılan genel problemler aşağıdaki şekilde sıralanabilir. Bunlar;

1. Deutsch-Anderson denkleminde sapmalar
2. Partiküllerin yüksek direnci
3. Düzgün olmayan gaz akımı
4. Elektrot sistemleri tasarımındaki uygunsuzluklar
5. Yüksek voltajlı elektriksel ekipmanların yetersizliği
6. Kamalama ekipmanlarının yetersizliği
7. Toplanan partiküllerin yeniden hareketlenmesi
8. ESÇ dış yapısı tasarımında eksiklikler
9. ESÇ içerisindeki vorteksin çöktürme performansına olumsuz etkileridir.

Bu tez çalışmasında yukarıda sıralanan problemlerden 3. sıradaki “düzgün olmayan gaz akımı” ve 9. sıradaki “ESÇ içerisindeki vorteksin çöktürme verimine etkisi” üzerinde durulmuştur.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması baca gazından tozu etkin biçimde gidermek için sıklıkla kullanılan ESC'lerin daha verimli ve düşük işletme maliyetiyle kullanılabilmesi için gerçekleştirilen bir optimizasyon çalışmasıdır. Bu amaçla tasarlanan ESC'lerin bekletme süreleri, giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri, plaka sayıları, ESC boyutları, klasik toz toplama plaka yerleştirme şekillerin aksine farklı plaka yerleştirme şekilleri gibi parametreler ve bu geometrik değişimlerin basınç kaybına ve toz tutma verimindeki etkileri farklı yaklaşma hızı ve debideki akış analizleri HAD programı FLUENT ile simüle edilerek araştırılmıştır.

#### 3.1. Materyal

Bu çalışmada her bir model ESC için yürütülen işlemler; plakalı ve plakasız olmak üzere farklı boyutlarda toplam 158 adet ESC modeli simüle edilmiştir. Bu modellerin 144 tanesinin giriş ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açı ( $\alpha$ ) değerleri ( $50^\circ$ ,  $52^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $56^\circ$ ,  $58^\circ$  ve  $60^\circ$ ), yaklaşma hızı değerleri, debi, plaka sayıları, giriş ağzı boyutları, ESC genişliği ve yüksekliği değiştirilerek ESC içinde minimum basınç düşmesini sağlayacak optimum parametreler tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu işlem söz konusu ESC'nin içine plakalar yerleştirilmeden gerçekleştirilmiş ve ESC girişindeki debi ve yaklaşma hızı sabit tutulmuştur. Daha sonra, ESC içine sayıları 7, 9, 11 ve 13 adet olacak şekilde plakalar yerleştirilmiş ve bu plakalar için uygun açı, yaklaşma hızı ve basınç kaybı değişimlerinin sayısal analizleri tekrarlanmıştır. Sabit bir debide plakalı ve plakasız ESC'ler için uygun açı bulunduğundan sonra debiyi artırıp giriş hızının ESC içinde hız dağılımı ve basınç kaybını nasıl etkilediği gözlemlenerek uygun yaklaşma hızı belirlenmiştir.

Çalışmada kullanılan ESC'lerin boyutları Tablo 3.1'de ve örnek olması amacıyla model ölçülerinin ESC üzerinde gösterimi ise Şekil 3.1'de verilmiştir. Bir ESC'nin giriş kanalında partikül çökmesi olmaması için gaz hızının (yaklaşma hızı) bu kanalda 2 m/s'nin altına düşmemesi gerekmektedir. Bu çalışmada 1-96 arasındaki modellerde yaklaşma hızı 6 m/s, 12 m/s, 18 m/s ve 24 m/s olacak şekilde giriş kanalları boyutlandırılmıştır. Literatürde ESC içindeki gaz hızının ise 0.6-2.4 m/s arasında olması gerektiği belirtilmektedir (Heumann, 1997; Wang, et al., 2004). Bu çalışmada ESC içindeki gaz hızının 2 m/s olarak seçilmiştir. Ayrıca giriş ve çıkış kanalı kare ve boyutları 100 cm x 100 cm olarak tasarlanmıştır. Çalışmada 1-48 arasındaki modellerde ESC uzunluğu bekletme süresine (0.75 s, 1 s, 1.25 s ve 1.5 s) göre farklı

boyutlarda; sırasıyla 150 cm, 200 cm, 250 cm ve 300 cm olacak şekilde tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Elektriksel yük ile yüklenmiş partiküllerin ESÇ içerisindeki bekletme süresi  $\tau = L/U_{iç}$  şeklinde hesaplanmaktadır. Burada L bir gaz akımı boyunca ESÇ'nin uzunluğu (m) ve  $U_{iç}$  plakalar arasındaki gaz hızı (m/s)'dir (Vincent and MacLennan, 1980; Mizuno, 2000).

Daha sonra 49-96 arasındaki modellerde bekletme süresi 1 s olarak kabul edilmiş ve ESÇ uzunlukları 200 cm olarak tasarlanmıştır. Çalışmada 1-96 arasındaki modellerde yapılan analizler sonucunda ESÇ giriş yapısının kirli gaz debisine göre değiştirilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Bu sebepten 97-144 arasında tasarlanan modeller plakalı (plaka sayıları 7, 9, 11 ve 13 adet) ve plakasız olarak tasarlanmıştır. Bu modellerdeki ESÇ'nin yaklaşma hızı sabit 6 m/s ve ESÇ'nin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açı ( $\alpha$ ) değerleri değiştirilerek (50°, 52°, 54°, 56°, 58° ve 60°) model tasarımları gerçekleştirilmiştir. 6 m/s'lik sabit yaklaşma hızı için farklı debilerde giriş yapısı boyutları da değiştirilmiştir. 6 m<sup>3</sup>/s, 12 m<sup>3</sup>/s, 18 m<sup>3</sup>/s ve 24 m<sup>3</sup>/s'lik debiler için 1 m<sup>2</sup>, 2 m<sup>2</sup>, 3 m<sup>2</sup> ve 4 m<sup>2</sup>'lik giriş kesit alanı kullanılmıştır. Daha sonra 145-151 arasındaki modellerde yaklaşma hızı 6 m/s, giriş gaz debisi 6 m<sup>3</sup>/s, ESÇ bekleme odasındaki bekletme süresi 1 s, ESÇ uzunluğu 200 cm, giriş kanalı kare (100 cm x 100 cm) biçiminde ve ESÇ'nin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açı ( $\alpha$ ) değerleri değiştirilerek 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70° ve 80° olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca 152-155 arasındaki modellerde yaklaşma hızı 6 m/s, giriş gaz debisi 6 m<sup>3</sup>/s, giriş kanalı kare (100 cm x 100 cm) biçiminde ve ESÇ'nin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açı ( $\alpha$ ) değeri 60°, ESÇ uzunluğu bekletme süresine (0.75 s, 1 s, 1.25 s ve 1.5 s) göre farklı boyutlarda; sırasıyla 150 cm, 200 cm, 250 cm ve 300 cm olacak şekilde tasarlanmıştır. 156-158 arasındaki modellerde yaklaşma hızı 6 m/s, giriş gaz debisi 6 m<sup>3</sup>/s, ESÇ bekleme odasındaki bekletme süresi 1 s, ESÇ uzunluğu 200 cm, giriş kanalı kare (100 cm x 100 cm) biçiminde ve ESÇ'nin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açı ( $\alpha$ ) değeri 60°, plakaların yerleştirme şekilleri ve plaka plaka boyutları farklı olacak şekilde tasarlanmıştır.

Tablo 3.1. Tasarlanan Model EŞÇ'lerin boyutları

EŞÇ Model Numarası	EŞÇ İçindeki Plaka Sayısı	Giriş Gaz Debisi	Yaklaşma Hızı	Giriş Kanalı Boyutu	EŞÇ Yüksekliği/Genişliği (L1)	EŞÇ Uzunluğu (L2)	Giriş ve Çıkış Açısı
		(m <sup>3</sup> /s)	(m/s)	(cm x cm)	(cm)	(cm)	(o)
1	0	6	6	100 x 100	173.2	150	50
2	7	6	6	100 x 100	173.2	150	50
3	0	6	6	100 x 100	173.2	150	52
4	7	6	6	100 x 100	173.2	150	52
5	0	6	6	100 x 100	173.2	150	54
6	7	6	6	100 x 100	173.2	150	54
7	0	6	6	100 x 100	173.2	150	56
8	7	6	6	100 x 100	173.2	150	56
9	0	6	6	100 x 100	173.2	150	58
10	7	6	6	100 x 100	173.2	150	58
11	0	6	6	100 x 100	173.2	150	60
12	7	6	6	100 x 100	173.2	150	60
13	0	12	12	100 x 100	244.9	200	50
14	9	12	12	100 x 100	244.9	200	50
15	0	12	12	100 x 100	244.9	200	52
16	9	12	12	100 x 100	244.9	200	52
17	0	12	12	100 x 100	244.9	200	54
18	9	12	12	100 x 100	244.9	200	54
19	0	12	12	100 x 100	244.9	200	56
20	9	12	12	100 x 100	244.9	200	56
21	0	12	12	100 x 100	244.9	200	58
22	9	12	12	100 x 100	244.9	200	58
23	0	12	12	100 x 100	244.9	200	60
24	9	12	12	100 x 100	244.9	200	60
25	0	18	18	100 x 100	300	250	50
26	11	18	18	100 x 100	300	250	50
27	0	18	18	100 x 100	300	250	52
28	11	18	18	100 x 100	300	250	52
29	0	18	18	100 x 100	300	250	54
30	11	18	18	100 x 100	300	250	54
31	0	18	18	100 x 100	300	250	56
32	11	18	18	100 x 100	300	250	56
33	0	18	18	100 x 100	300	250	58
34	11	18	18	100 x 100	300	250	58
35	0	18	18	100 x 100	300	250	60
36	11	18	18	100 x 100	300	250	60
37	0	24	24	100 x 100	346.4	300	50
38	13	24	24	100 x 100	346.4	300	50
39	0	24	24	100 x 100	346.4	300	52
40	13	24	24	100 x 100	346.4	300	52
41	0	24	24	100 x 100	346.4	300	54
42	13	24	24	100 x 100	346.4	300	54

Tablo 3.1. (devam)

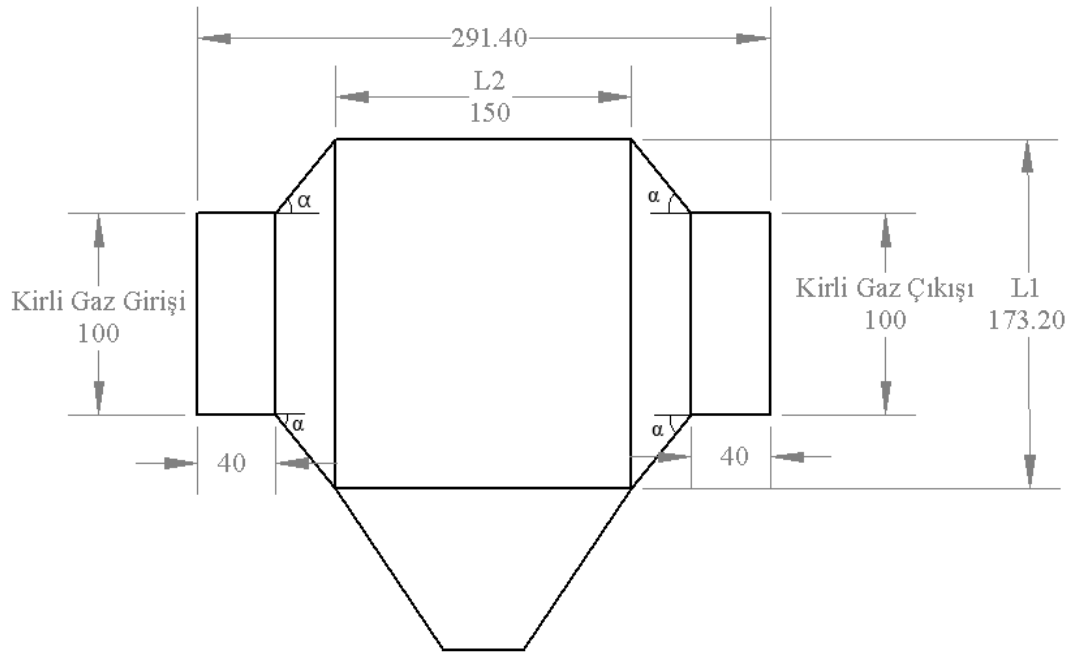
43	0	24	24	100 x 100	346.4	300	56
44	13	24	24	100 x 100	346.4	300	56
45	0	24	24	100 x 100	346.4	300	58
46	13	24	24	100 x 100	346.4	300	58
47	0	24	24	100 x 100	346.4	300	60
48	13	24	24	100 x 100	346.4	300	60
49	0	6	6	100 x 100	173.2	200	50
50	7	6	6	100 x 100	173.2	200	50
51	0	6	6	100 x 100	173.2	200	52
52	7	6	6	100 x 100	173.2	200	52
53	0	6	6	100 x 100	173.2	200	54
54	7	6	6	100 x 100	173.2	200	54
55	0	6	6	100 x 100	173.2	200	56
56	7	6	6	100 x 100	173.2	200	56
57	0	6	6	100 x 100	173.2	200	58
58	7	6	6	100 x 100	173.2	200	58
59	0	6	6	100 x 100	173.2	200	60
60	7	6	6	100 x 100	173.2	200	60
61	0	12	12	100 x 100	244.9	200	50
62	9	12	12	100 x 100	244.9	200	50
63	0	12	12	100 x 100	244.9	200	52
64	9	12	12	100 x 100	244.9	200	52
65	0	12	12	100 x 100	244.9	200	54
66	9	12	12	100 x 100	244.9	200	54
67	0	12	12	100 x 100	244.9	200	56
68	9	12	12	100 x 100	244.9	200	56
69	0	12	12	100 x 100	244.9	200	58
70	9	12	12	100 x 100	244.9	200	58
71	0	12	12	100 x 100	244.9	200	60
72	9	12	12	100 x 100	244.9	200	60
73	0	18	18	100 x 100	300	200	50
74	11	18	18	100 x 100	300	200	50
75	0	18	18	100 x 100	300	200	52
76	11	18	18	100 x 100	300	200	52
77	0	18	18	100 x 100	300	200	54
78	11	18	18	100 x 100	300	200	54
79	0	18	18	100 x 100	300	200	56
80	11	18	18	100 x 100	300	200	56
81	0	18	18	100 x 100	300	200	58
82	11	18	18	100 x 100	300	200	58
83	0	18	18	100 x 100	300	200	60
84	11	18	18	100 x 100	300	200	60
85	0	24	24	100 x 100	346.4	200	50
86	13	24	24	100 x 100	346.4	200	50
87	0	24	24	100 x 100	346.4	200	52
88	13	24	24	100 x 100	346.4	200	52
89	0	24	24	100 x 100	346.4	200	54

Tablo 3.1. (devam)

90	13	24	24	100 x 100	346.4	200	54
91	0	24	24	100 x 100	346.4	200	56
92	13	24	24	100 x 100	346.4	200	56
93	0	24	24	100 x 100	346.4	200	58
94	13	24	24	100 x 100	346.4	200	58
95	0	24	24	100 x 100	346.4	200	60
96	13	24	24	100 x 100	346.4	200	60
97	0	6	6	100 x 100	173.2	200	50
98	7	6	6	100 x 100	173.2	200	50
99	0	6	6	100 x 100	173.2	200	52
100	7	6	6	100 x 100	173.2	200	52
101	0	6	6	100 x 100	173.2	200	54
102	7	6	6	100 x 100	173.2	200	54
103	0	6	6	100 x 100	173.2	200	56
104	7	6	6	100 x 100	173.2	200	56
105	0	6	6	100 x 100	173.2	200	58
106	7	6	6	100 x 100	173.2	200	58
107	0	6	6	100 x 100	173.2	200	60
108	7	6	6	100 x 100	173.2	200	60
109	0	12	6	141.4 x 141.4	244.9	200	50
110	9	12	6	141.4 x 141.4	244.9	200	50
111	0	12	6	141.4 x 141.4	244.9	200	52
112	9	12	6	141.4 x 141.4	244.9	200	52
113	0	12	6	141.4 x 141.4	244.9	200	54
114	9	12	6	141.4 x 141.4	244.9	200	54
115	0	12	6	141.4 x 141.4	244.9	200	56
116	9	12	6	141.4 x 141.4	244.9	200	56
117	0	12	6	141.4 x 141.4	244.9	200	58
118	9	12	6	141.4 x 141.4	244.9	200	58
119	0	12	6	141.4 x 141.4	244.9	200	60
120	9	12	6	141.4 x 141.4	244.9	200	60
121	0	18	6	173.2 x 173.2	300	200	50
122	11	18	6	173.2 x 173.2	300	200	50
123	0	18	6	173.2 x 173.2	300	200	52
124	11	18	6	173.2 x 173.2	300	200	52
125	0	18	6	173.2 x 173.2	300	200	54
126	11	18	6	173.2 x 173.2	300	200	54
127	0	18	6	173.2 x 173.2	300	200	56
128	11	18	6	173.2 x 173.2	300	200	56
129	0	18	6	173.2 x 173.2	300	200	58
130	11	18	6	173.2 x 173.2	300	200	58
131	0	18	6	173.2 x 173.2	300	200	60
132	11	18	6	173.2 x 173.2	300	200	60
133	0	24	6	200 x 200	346.4	200	50
134	13	24	6	200 x 200	346.4	200	50
135	0	24	6	200 x 200	346.4	200	52
136	13	24	6	200 x 200	346.4	200	52

Tablo 3.1. (devam)

137	0	24	6	200 x 200	346.4	200	54
138	13	24	6	200 x 200	346.4	200	54
139	0	24	6	200 x 200	346.4	200	56
140	13	24	6	200 x 200	346.4	200	56
141	0	24	6	200 x 200	346.4	200	58
142	13	24	6	200 x 200	346.4	200	58
143	0	24	6	200 x 200	346.4	200	60
144	13	24	6	200 x 200	346.4	200	60
145	7	6	6	100 x 100	173.2	200	20
146	7	6	6	100 x 100	173.2	200	30
147	7	6	6	100 x 100	173.2	200	40
148	7	6	6	100 x 100	173.2	200	50
149	7	6	6	100 x 100	173.2	200	60
150	7	6	6	100 x 100	173.2	200	70
151	7	6	6	100 x 100	173.2	200	80
152	7	6	6	100 x 100	173.2	150	60
153	7	6	6	100 x 100	173.2	200	60
154	7	6	6	100 x 100	173.2	250	60
155	7	6	6	100 x 100	173.2	300	60
156	7	6	6	100 x 100	173.2	200	60
157	7	6	6	100 x 100	173.2	200	60
158	7	6	6	100 x 100	173.2	200	60



Şekil 3.1. Model ESÇ'nin tasarım ölçüleri (Model 1)

### 3.2. Yöntem

Problem çözümlerinde genel olarak analitik, deneysel ve sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Analitik çözümler sadece basitleştirilmiş problemlerin çözümleri için kullanıldığında çözüm alanını sınırlandırırken, deneysel yöntemler ise zaman alıcı olmaları, maliyetli olmaları ve kullanılan ölçüm aletleri ile ideal şartlar altında hassas ölçüm yapılamaması gibi bu yöntemlerin olumsuz yönlerini oluşturmaktadır. Ancak analitik ve deneysel yöntemlerin karmaşık problemlerin çözümünde bu olumsuzluklardan dolayı sayısal yöntemlerin kullanılmasını gerekli kılmaktadır (Erol, 2016).

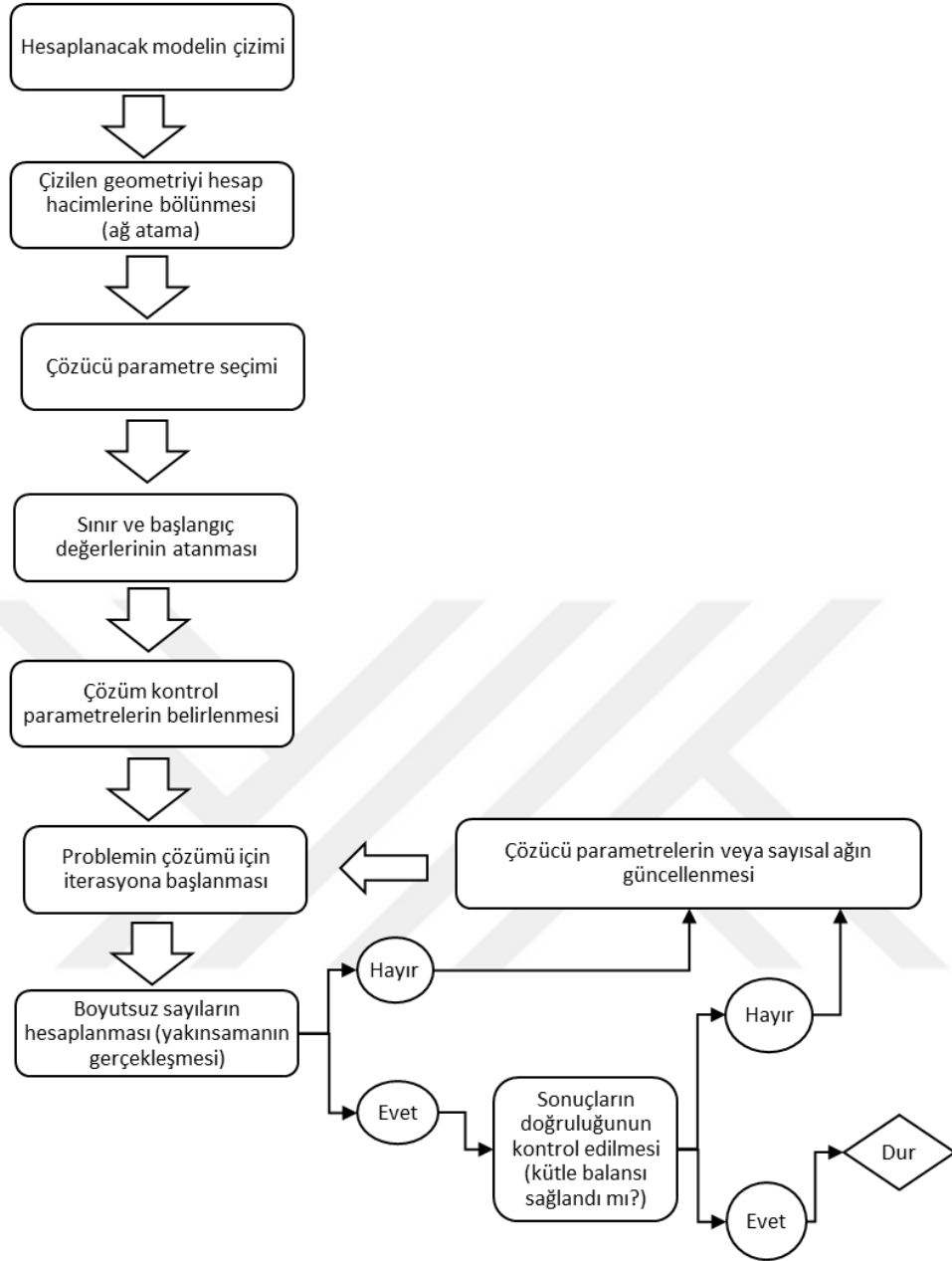
#### 3.2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi

Bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmelere paralel olarak akademik ve endüstriyel çalışmalarda karmaşık akış problemlerini çözmek, akış hareketlerini ve davranışlarını anlamak amacıyla birçok paket program (ANSYS, CATIA, MARC, MANIFOLD, AUTODESK, SOLIDWORKS ve ABAQUS gibi) geliştirilmiştir. Bu paket programlarda çoğunlukla HAD modelleme, analiz ve sonuçların grafik değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Bu programlar kullanılarak elle çözülmesi mümkün olmayan ya da çözümü çok fazla vakit alan karmaşık kısmi diferansiyel denklemleri basit denklemlere dönüştürerek çözümleri sağlanmaktadır. Basit denklemlere dönüştürmek için sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sonlu hacimler gibi metotlar kullanarak çözümler gerçekleştirilmektedir. Sonlu hacimler yöntemi, problemi kabul edilebilir yaklaşık olarak çözen bir yöntemdir. Bu yöntemde, kısmi diferansiyel denklemlerde sapma terimi içeren hacim integralleri, sapma teoremi ile yüzey integrallerine dönüşmektedir. Bu yöntem ile öncelikle bir çözüm bölgesi oluşturulur. Bu bölge ayrık kontrol hücrelerine ya da hacimlerine bölünür. Bölünen bölgelerde belirlenen noktalar arasındaki farklı kontrol noktaları alınır ve kontrol hacmi denilen alan sınırlarında peş peşe gelen noktalar arasında ortak nokta alınarak her bir kontrol noktası bir kontrol hacmi ile çevrelenerek çözüm gerçekleştirilir (Şahin, 2018).

Bu tez çalışmasında sayısal analizler için en yaygın kullanılan programlardan biri olan kısmi diferansiyel denklemleri sonlu hacimler metoduna dayalı çözümler de gerçekleştiren ANSYS FLUENT 6.3.26 paket programı kullanılmıştır. ANSYS programı ile modellerin henüz prototipleri üretilmeden bilgisayar ortamında akışkan analizlerinin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca bu programla

oluşturulan bilgisayar ortamındaki simülasyonlar ile modellerin zayıf noktalarının tespit edilmesi ve üretime geçmeden muhtemel problemleri öngörülerek bu problemlerin giderilmesi mümkün olmaktadır. Ancak çözümü yapılacak modeldeki problemin türüne göre yüksek özellikli bilgisayar gereksinimine ve uzun çalışma sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla bu bölümde programda kullanılan sayısal analiz yöntemi açıklanarak analiz adımlarının detayları hakkında bilgiler verilmiştir. Bu amaçla bu bölümde öncelikle sayısal analizde kullanılan denklemler verilmiş ve daha sonra ANSYS FLUENT ayarları ve FLUENT’deki analiz prosedürü açıklanmıştır.

HAD simülasyonları matematiksel modelin oluşturulması ve sonuçların incelenmesi amacıyla üç adımda gerçekleşmektedir. Bunlar sırasıyla; ön-işleme (preprocessing), çözme (solving) ve ard-işlemedir (post-processing). Ön-işleme adımında, probleme uygun geometrinin tanımlanması ve modellerin katı modelleme yazılımları ile oluşturulması, geometriye uygun hesaplama alanının belirlenmesi, modelin yapısal veya yapısal olmayan çözüm ağının çözüm ağı üretme (grid generation) yazılımlarıyla oluşturulması işlemleri gerçekleştirilir. Çözme işlemi için bir önceki adımda oluşturulan çözüm ağının uygun formatta adım adım çözücüye tanıtılması gerekmektedir. Bu işlem için kullanılacak akışkanın özellikleri, çözülecek denklemler, sınır şartları, yakınsama kriterleri gibi parametreler sistem üzerinden modele tanımlanır. Ardından bu bölümde başlangıç şartları girilerek analiz başlatılır. Çözüm işlemi belirtilen tüm parametreler yakınsayana kadar veya zaman adımına gelene kadar ya da belirtilmiş olan maksimum iterasyon değerine ulaşıyana kadar analiz devam etmektedir. Bu süreçlerden sonra son işlem olarak sonuçların görselleştirilmesi gerekmektedir. Modelde oluşturulan çözüm ağının her biri için elde edilen parametre hesaplarının bulunduğu veri dosyaları bir görselleştirme yazılımına aktarılarak burada kullanıcı tarafından yorumlanacağı görsellere dönüştürülür (Coşkun, 2014; Kok, 2016). Çözülecek problemin HAD analizleri sırasında işlem basamakları Şekil 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.2. HAD'ın Çözüm Adımları (ANSYS, 2009)

Bir akış alanının hesaplanmasında süreklilik, momentum ve enerji korunum denklemleri ile çözüm yapılmaktadır. Kütlelenin korunumu (süreklilik denklemi) genel haliyle Eşitlik 3.1'de ve momentumun korunumu ise Eşitlik 3.3'te verilmektedir (ANSYS, 2009). Tez çalışmasında üç boyutlu, tek fazlı, özelliklerin sabit kabul edildiği, sıkıştırılmaz daimî akış ( $\rho$  ve  $\mu$ : sabit) modelleri sayısal olarak incelenmiştir. Bir modelde meydana gelen akış olayı, akış esnasında yoğunluğun değişme düzeyine bağlı olarak sıkıştırılabilir ya da sıkıştırılmaz olarak sınıflandırılır. Eğer bir akış sıkıştırılmaz olarak kabul ediliyorsa, akışkanın her yerinde akışın değişmeden sabit kaldığı varsayılır. Genel olarak sıvılar sıkıştırılmaz, gazlar ise sıkıştırılabilir

akışkanlar olarak kabul edilir. Fakat gaz akışlarında görülen yoğunluk farkının miktarı ve akışın sıkıştırılabilir ya da sıkıştırılmaz olarak nitelendirilmesi Mach sayısına bağlıdır. Boyutsuz olan bu Mach sayısı  $Ma = u/c$  şeklinde hesaplanmaktadır. Burada  $u$  akış hızı (m/s) ve  $c$  ses hızı olup deniz seviyesinde ve oda sıcaklığındaki havada 346 m/s değerini alır. Gaz akışlarının modellenmesinde  $Ma < 0.3$  (yani yoğunluk farkının  $< \% 5$ ) olması durumunda akışın sıkıştırılmaz olduğu kabul edilmektedir (Çengel ve Cimbala, 2015). Bu durumdan dolayı ESC içindeki gaz akışı sıkıştırılmaz Newton tipi akış olarak kabul edilmektedir. Bünye kuvvetlerinin bulunmadığı durumda türbülanslı akış için hız ve basıncın anlık değerleriyle kartezyen koordinatlardaki süreklilik ve momentum korunum denklemleri sayısal olarak çözülmektedir.

Kütlenin korunumu ilkesi gereği  $\Delta t$  zaman aralığında mevcut sistemin toplam kütledeki değişimin sisteme giren kütlede sistemden çıkan kütle farkına eşittir (Ayhan, 2011). Sisteme dışarıdan kütle girişi olmadığı durumda süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada  $\vec{u}$  zaman ( $t$ ) ve konumun ( $x, y, z$ ) fonksiyonu olan yerel hız bileşenleri ( $u, v, w$ ) ile tanımlanan hız vektörünü,  $S_m$  ise kütle kaynak terimini ifade etmektedir. Bu denklem kartezyen koordinat sisteminde  $S_m = 0$  a eşitleyip Eşitlik 3.2'deki gibi yazılabilmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.2)$$

Momentum denklemi (Reynolds ortalamalı Navier-Stokes eşitliği, RANS);

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P' + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{\nabla} (\tau_{ij, \text{türbülans}}) \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $\vec{u}$  ve  $P$  sırasıyla akışın ortalama hızını ve ortalama basıncını temsil etmektedir.  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu ve  $\nu$  akışkanın kinematik viskozitesini temsil etmektedir.  $\vec{\nabla}$  gradyan vektörünü ve  $\nabla^2$  laplace operatörünü ifade etmektedir.  $\tau_{ij, \text{türbülans}}$  kaynak terimi ise Reynolds gerilmelerini ifade eden özgül Reynolds gerilme tensörüdür (Çengel ve Cimbala, 2015). Kartezyen koordinatlarda  $\tau_{ij, \text{türbülans}}$ , aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\tau_{ij,türbülans} = - \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

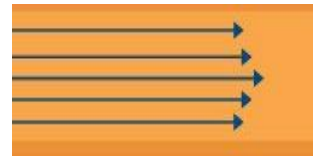
HAD programında ESC içindeki akışın gerçeğe yakın değerler vermesi ve programın başarılı bir şekilde çalıştırılması için model içerisindeki akışın türbülanslı davranışının doğru olarak tanımlanması gerekmektedir. ESC içindeki türbülanslı akışı modelleyebilmek için FLUENT paket programı içinde yer alan türbülans modellerinden, çözülecek problemi doğru tanımlayacak olan türbülans modelinin seçimini yapmak gerekmektedir. Tez çalışmasında (3.3) eşitliğinde bilinmeyen olarak ortaya çıkan kaynak teriminin modellenmesi için FLUENT paket programı içinde yer alan ve bu tür simülasyonlarda kullanılan Realizable k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

### 3.2.1.2. Türbülans model seçimi

Herhangi bir akış problemi tanımlanırken akışın laminar mı ya da türbülanslı mı olup olmadığını belirlemek gerekmektedir. Laminar ve türbülanslı akış şartları arasında oldukça büyük farklar bulunmaktadır. Laminar akış şartında akışkan hareketi oldukça düzenlidir ve partiküllerin hareket alanı boyunca akım çizgilerini belirlemek mümkündür. Akım hattı boyunca akışkan hareketi düşey ve aksel doğrultudaki hız bileşenleriyle karakterize edilebilir. Tersine durumda ise, türbülanslı akış gerçekleşir. Bu durumda akış şartında akışkan hareketi oldukça düzensizdir ve dalgalanma hızlarıyla karakterize edilir. Bu dalgalanmalar momentumu artırır ve böylece yüzey sürtünmelerinin artmasına neden olur. Şekil 3.3'de akışkan içerisinde akış hareketinin karmaşık bir şekilde hareket ettiği türbülanslı akış Şekil 3.3 (a)'da ve akış hareketinin akışı oluşturan katmanlar arasında herhangi bir bozulma olmadan hareket ettiği laminar akışın Şekil 3.3 (b)'de görselleştirilmiş şekli bulunmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 3.3. Türbülanslı akış (a) ve laminar akış (b) (Anonim, 2020a)

Türbülanslı akış tipinde sınır tabaka boyunca üç farklı bölge görülmektedir. Birinci bölümde laminar alt tabakadaki taşınım difüzyon etkilidir ve hız profili

lineere yakındır. İkinci bölgede ise, birinci bölgenin bitişinde başlar; difüzyon ve türbülans karışımının olduğu bir ara tabaka yer alır. Üçüncü bölgede ise, ikinci bölümün bitişinde akışkanın üst kısımlarında gerçekleşir ve burada ise taşınım türbülans karışımlarının baskın olduğu türbülanslı bölge görülmektedir. Akış türünün belirlenmesinde Reynolds sayısına bakılmaktadır. Reynolds sayısı ( $Re$ ), atalet kuvvetlerinin dinamik viskoziteye oranı olarak tanımlanmaktadır. Akışlar üzerinde yapılan deneylerde, kritik Reynolds sayısının altındaki değerlerde akışın düzgün aktığı ve komşu akışkan partiküllerinin düzgün bir biçimde hareket ettiği görülmektedir. Eğer uygulanan sınır şartları zamanla değişmezse akış kararlıdır. Bu akış rejimi laminer akış olarak adlandırılır (Versteeg and Malalasekera, 2007). Dikdörtgen bir kanal içerisindeki akışın Reynolds sayısı  $Re = \rho U_g D_h / \mu$  şeklinde hesaplanır. Burada  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesini ( $kg/m.s$ ),  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu ( $kg/m^3$ ),  $U_g$  akışkanın kanal içerisine girişteki yaklaşma hızını ( $m/s$ ) ve  $D_h$  hidrolik çapı ( $m$ ) ifade etmektedir. Dinamik viskozite  $\mu = \nu \rho$  şeklinde hesaplanır ve burada  $\nu$  ise kinematik viskoziteyi ( $m^2/s$ ) ifade etmektedir. Kare giriş kanalı için hidrolik çap ( $D_h$ ) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$D_h = \frac{4x \text{ Kesit Alanı}}{\text{Islak Çevre}} = \frac{4xa^2}{2x(2a)} \quad (3.5)$$

Burada  $a$ , ESÇ giriş kanal uzunluğunu ( $m$ ) ifade etmektedir.

Bu tez çalışmasında ESÇ içerisine giren yaklaşma hız değerleri  $6 m/s$ ,  $12 m/s$ ,  $18 m/s$  ve  $24 m/s$  ve farklı ESÇ giriş kanal uzunlukları  $1 m^2$ ,  $2 m^2$ ,  $3 m^2$  ve  $4 m^2$ 'dir. Bu hız aralığında  $Re$  sayısı yaklaşık  $177 \times 10^3 - 708 \times 10^3$  arasında farklı değerler almaktadır. Dolayısıyla kullanılan tüm modellerdeki akışlar türbülanslıdır.

Kritik Reynolds sayısının üzerindeki değerlerde, akış karakterinde radikal bir değişikliğe yol açan karmaşık olaylar serisi başlatmaktadır. En son aşamada akış davranışı düzensiz ve rastgele olmaktadır. Akışkan hareketi sabit sınır şartlarında olsa dahi esas olarak kararsız hale gelmektedir. Bu durumda hız ve basınç (hatta sıkıştırılabilir akışta  $\rho$ ) düzensiz ve rastgele bir şekilde değişmesi söz konusudur. Ayrıca meydana gelen yoğun karışım, kütle transferinin yanında farklı momentuma sahip akışkan partiküllerini birbirleriyle temas etmesine ve bunun sonucunda da momentumun artmasına neden olmaktadır. Bu tür akışlar türbülanslı akış olarak adlandırılmaktadır (Çengel ve Cimbala, 2015).

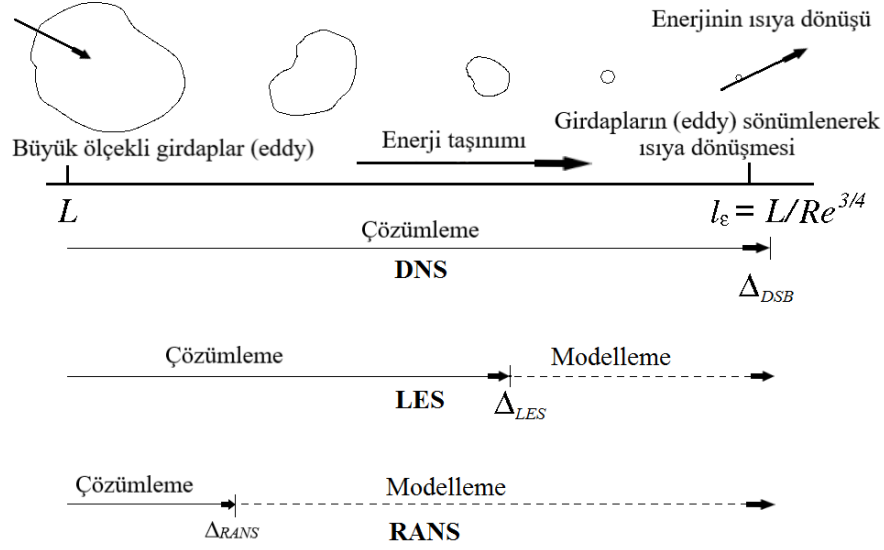
Türbülans modelleme, HAD çözümlerinde önemli bir yeri bulunan ağ üretimi ve algoritma geliştirmeye birlikte ele alınan konulardan bir tanesidir. Pratikte ve mühendislik uygulamalarında karşılaşılan akışların hemen hemen tamamı türbülanslı akımlardır. Türbülanslı akış modellerinde zaman ölçekleri ve uzayda uzunluk ölçekleri geniş bir dağılıma sahiptir ve Reynolds sayısı ile artış göstermektedir. Türbülanslı akışların anlaşılması ve momentum denklemlerinin çözülebilmesi amacıyla türbülans modelleme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla HAD ile türbülanslı akış problemlerin çözümünde üç temel yaklaşım söz konusu olmaktadır. Bu yaklaşımlar;

- Doğrudan Sayısal Çözüm Metodu (Direct Numerical Solution Method-DNS)
- Büyük Girdap Yaklaşım Metodu (Large Eddy Simulation-LES)
- Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes çözümü (Reynolds Average Navier-Stokes Solution-RANS) olarak adlandırılmaktadır (ANSYS, 2013).

DNS metodu, türbülanslı akışların analizinde herhangi bir türbülans modeli kullanmaksızın kararsız Navier-Stokes denklemlerinin doğrudan sayısal olarak çözülmesini amaçlamaktadır. Türbülanslı akışın analizi, akışın tüm ölçeklerinin daimî olmayan hareketlerini çözmek için kullanılmaktadır. Bu metotta herhangi bir zaman ve konum ölçeği için tam sonuçlar alınmaktadır. Türbülanslı akışlarda hareket denklemlerin çözümlenebilmesi için zaman adımının yeterince küçük seçilmesi gerekmektedir. Bu metotta, çözümlemenin yapılabilmesi için çok sık ağ yapısına ihtiyaç duyulmakta ve çok fazla sayısal işlem gerektirmektedir. DNS ile türbülanslı akış çözümlerinin yapılabilmesi için yüksek kapasiteli uygun bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır. Basit düzeyde türbülans akışların çözümü deneysel verilerle karşılaştırıldığında çok iyi sonuçlar vermektedir. Ancak DNS ile karmaşık yapıdaki bir türbülanslı akışın simülasyonu, bu simülasyonu yapacak günümüz şartlarında süper bilgisayar olarak tanımladığımız yüksek performanslı cihazlarla dahi oldukça uzun zaman almaktadır. Ayrıca bu metot şu an için geliştirilen yeni türbülans modellerinin geçerliliğini kontrol etmek için kullanılmaktadır. DNS metodu Kolmogorov'un geliştirmiş olduğu yaklaşımları kullanarak türbülanslı akışın analizini yapmaktadır. Bu metodun çözümü için bazı basitleştirilmiş kabullerin yapılması gerekmektedir (İpci, 2018; Arabacı, 2016; Kok, 2016; Ayhan, 2011; Griebel, et al., 1998; Mollenhauer and Tschöke, 2010).

DNS metodunun altındaki seviye olan Büyük Girdap Yaklaşım Metodunda (LES), türbülans girdaplarının büyük ölçekli daimî olmayan hareket özellikleri çözülerek, küçük ölçekli ve yitirgen eğilimli türbülans girdapları ise modellenerek analizler gerçekleştirilmektedir. DNS ile kıyaslandığında çözümlenmeleri yaparken Navier – Stokes denklemlerini direkt olarak çözmeden bazı sayısal kabuller yapmaktadır. Ayrıca türbülanslı akış bölgesindeki en küçük girdapları çözme ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. LES metodu, DNS metodunun kullandığı bilgisayar gücünden çok daha azını kullanmasına rağmen günümüz teknolojisiyle mevcut mühendislik türbülans analizlerinin simülasyonunu gerçekleştirecek bilgisayar gereksinimlerinin karşılanması oldukça zordur (Kok, 2016).

HAD modelinde, sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışkanların, laminer ve türbülanslı bir veya çok fazlı akışı simüle etmek için Navier-Stokes veya Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes çözümü (RANS) denklemlerinin çözümünün yapılması gerekmektedir. RANS metodunda, türbülanslı akıştan dolayı meydana gelen karmaşık akış yapısının ayrıntılarını çözmeden denklem sistemindeki değişkenleri ortalama akış parametre ve dalgalanma (fluctuation) değerlerini alarak iki bileşene ayırıp yeniden düzenlemektedir. Çözümlemede ortalama bileşeni, eğer akış daimî hareketli (steady) ise zaman üzerinden ancak akış daimî olmayan hareketli (unsteady) ise grup üzerinden yapılmaktadır (Ayhan, 2011). Bu metot, mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen yöntemdir. Ayrıca bu metodun hesaplama maliyeti diğer metotlarla karşılaştırıldığında en düşük olanıdır. Türbülanslı akış analizlerinde kullanılan bu üç metodun kıyaslanması Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4. Akış analizinde kullanılan türbülans modellerinin karşılaştırılması (Sodja, 2007)

Genel olarak türbülans modelleri Navier-Stokes ve süreklilik denklemleri ile simüle edilmiştir. Bu çalışmada daha önceden de belirttiğimiz gibi HAD analizleri için FLUENT kullanılmıştır. FLUENT programı aşağıda belirtilen türbülans modellerini kullanma imkânı sunmaktadır.

- Spalart-Allmaras modeli
- k-epsilon (k-ε) modeli
- k-omega (k-ω) modeli
- Reynolds Gerilme modeli (RSM)
- Large Eddy Simülasyonu (LES)
- Detached Eddy Simülasyonu (DES)

Bu modellerin her biri kendi alanlarına göre özellikteki simülasyonları analiz etmektedir. İç akışta ve daha çok boru akışlarında k-ε modeli yakınsayan sonuç verirken, dış akışta k-ω SST (Shear Stress Transport) modeli yakınsak sonuç vermektedir (Tekir and Arslan, 2017). Bu çalışmalar arasında bizim çalışmamızda kullanılan tüm modeller için k-epsilon (k-ε) türbülans modeli uygun görülmüş ve kullanılmıştır.

### 3.2.1.1.1. k-epsilon (k-ε) modeli

Türbülans modellerinden olan k-ε, iki denklemlilik model ticari yazılımlarda en çok kullanılan yöntemdir. Genişçe bir alanda kullanıma sahip türbülanslı akışların neredeyse hepsi için başarılı sonuçlar vermektedir. Bu modelin RNG, standart ve

realizable gibi farklı türleri vardır. Üçünün de benzerlikleri olmakla beraber, türbülanslı akış ve viskoziteyi hesaplama yönteminde farklılıklar bulunmaktadır. Bu özellikler türbülanslı üretim, yuzdürme nedeniyle üretim, sıkıştırılabilirlik etkilerinin hesaplanması, ısı ve kütle aktarımının modellenmesi dahil olmak üzere, tüm modellerde temel olarak görülen özelliklerdir.

### 3.2.1.1.2. Standart k-epsilon (k-ε) modeli

Standart k-ε türbülans modeli, endüstriyel hesaplamalarda ve birçok HAD analizinde sıkça kullanılan yarı ampirik iki denklemlilik bir türbülans modelidir. Launder and Spalding'in 1974'te ortaya attıkları model standart k-ε türbülans modeli olarak bilinmektedir. Model özellikle Reynolds gerilmelerinin önemli olduğu sınırlandırılmış akışlarda iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca endüstriyel mühendislik uygulamalarında karşılaşılan çoğu akışlarda da iyi sonuç vermektedir. Bu model bazı sınırlandırılmamış akışlar, dönen akışlar ve dairesel olmayan kanallardaki akışlarda zayıf performans gösterse de ısı transferi, yanma, serbest yüzey ve iki fazlı akışlar gibi geniş yelpazedeki akışlarla test edilmiş ve genel olarak gerçekçi sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Versteeg and Malalasekera, 2007). Bu model, süreklilik ve momentum denklemlilikleriyle birlikte türbülans kinetik enerjisi (k) ve onun yutulma miktarı (ε) için yazılan iki adet transport denkleminin çözümünü ve türbülans viskozitesinin hesabını içermektedir (Bilgin, 2014). Standart k-ε türbülans modelindeki türbülans viskozitesi, zaman ortalaması alınmış k ve ε değerleri cinsinden ifade edilmektedir. Bu iki ek transport değerleri aşağıdaki eşitliklerden elde edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (3.7)$$

Yukarıdaki denklemlilerde  $G_k$  hesaplanan ortalama hız gradyanlarına bağlı olarak ortaya çıkan türbülans kinetik enerji üretimini,  $G_b$  kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimini,  $Y_M$  sıkıştırılabilir türbülanstaki çalkantı ayrılmasından oluşan toplam yutulma oranına olan katkısı,  $C_{1\epsilon}$  ve  $C_{2\epsilon}$  sabitlerdir.  $\sigma_k$  ve

$\sigma_\varepsilon$  ise sırasıyla türbülans kinetik enerji ve enerji yutulması için türbülans Prandtl sayılarını ifade etmektedir.

Türbülans kinetik enerji üretim miktarı aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.8)$$

Kaldırma kuvvetleri etkisinden kaynaklı türbülans kinetik enerji üretimi aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3.9)$$

Burada  $\beta$  termal genişleme faktörüdür ve  $\beta$  aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (3.10)$$

$Pr_t$  türbülans Prandtl sayısıdır ve aşağıdaki bağlantıdan hesaplanmaktadır.

$$Pr_t = \frac{\nu_t}{\alpha_t} \quad (3.11)$$

Burada  $\nu_t$ , türbülans kinetik viskozitesi ve  $\alpha_t$ , türbülanslı ısı yayılım katsayısını ifade etmektedir.

Yutulma oranı aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2 \quad (3.12)$$

Burada  $M_t$  türbülanslı Mach sayısını vermektedir. Aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{c^2}} \quad (3.13)$$

Burada  $c$  ses hızıdır.

Bütün iki denklemlerle modellerde  $\mu_t$ , türbülans viskozitesini ifade etmektedir. Ayrıca bu değer aşağıda verilen Prandtl – Kolmogorov eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.14)$$

Burada,  $C_\mu$  sabittir.

Model sabitleri,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  Tablo 3.2' deki varsayılan değerlere sahiptir (Şahin and Ward-Smith, 1993; Shih, et al., 1995).

Tablo 3.2. Standart k-epsilon (k-ε) modelinin model sabitleri

Model Sabitleri	$C_1$	$C_2$	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
Değerleri	1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

### 3.2.1.1.3. Realizable k-ε türbülans modeli

Launder and Spalding'in (1974) Standart k-ε türbülans modelini ortaya çıkarmasından sonra bu modeli geliştirmek için teşebbüslerde bulunmuş ve RNG k-ε türbülans modeli (Yakhot and Orszag, 1986) ve Realizable k-ε türbülans modelleri gibi birkaç farklı versiyon ortaya atılmıştır. İlk defa Shih ve arkadaşlarının 1995 yılında ortaya koyduğu Realizable k-ε türbülans modeli, Reynolds gerilmelerinde bulunan bazı matematiksel kısıtlamaları türbülanslı akışın fiziğiyle uyumlu olarak gideren iki denklemlilik bir türbülans modelidir. Yapılan çalışmalarda bu modelin k-ε türbülans modelleri arasında akış ayrılması ve ikincil akış özelliklerinin görüldüğü zayıf akım bölgesinde en iyi performans gösterdiği belirtilmiştir (Saberinejad, et al., 2010; Bilgin, 2014). Bu modelde, iki ek transport denklemi (k ve ε) aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + k + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (3.16)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $G_k$  hesaplanan ortalama hız gradyanlarına bağlı olarak ortaya çıkan türbülans kinetik enerji üretimini,  $G_b$  kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimini,  $Y_M$  sıkıştırılabilir türbülanstaki çalkantı ayrılmasından oluşan toplam yutulma oranına olan katkısını,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$  sabitlerdir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  ise sırasıyla türbülans kinetik enerji ve enerji yutulması için

türbülans Prandtl sayılarını ifade etmektedir. Burada  $C_{1\varepsilon}$  aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$C_{1\varepsilon} = \max \left[ 0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (3.17)$$

Bu denklemde;

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.18)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. S ortalama şekil değişim oranıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.19)$$

Türbülans viskozitesi,  $\mu_t$  Eşitlik 3.13'te verilmiştir. Bu modelde diğer modellerdeki türbülans viskozitesinde yer alan  $C_\mu$  değeri sabit değildir. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (3.20)$$

Bu denklemde;

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.21)$$

ve

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.22)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada  $\bar{\Omega}_{ij}$  açısal hız  $\omega_k$  ile dönen bir referans çerçevede gözlenen ortalama dönme oranıdır. Türbülans viskozite modelinin sabitleri  $A_0$  ve  $A_s$  değerleridir. Bunlar;

$A_0 = 4.04$  ve  $A_s = \sqrt{6 \cos \theta}$  gibi tanımlanmaktadır.

Buradaki,

$$\theta = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left( \sqrt{6} \frac{S_{ij}S_{ik}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \right) \quad (3.23)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (3.24)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu türbülans modeli için kullanılan sabitlerin değerleri Tablo 3.3'deki gibi verilmiştir (ANSYS, 2009).

Tablo 3.3. Realizable k-ε türbülans modelinin model sabitleri

Model Sabitleri	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
Değerleri	1.44	1.9	1.0	1.2

#### 3.2.1.1.4. RNG k-ε türbülans modeli

Re-Normalization Group (RNG) k-ε modeli, renormalizasyon grup teorisi olarak bilinen matematiksel teknikler kullanılarak anlık Navier-Stokes denklemlerinden türetilmiştir. Standart k-ε türbülans modeline benzemektedir ancak bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Bu iyileştirmeler modele girdaplı akıslarda doğruluğu iyileştirmek amacıyla girdap hareketinin türbülans üzerine olan etkisi dahil edilmiştir. RNG teorisi türbülans Prandtl sayısı için analitik bir formül sağlamaktadır. Standart modelde ise kullanıcı tarafından belirlenen sabit değerler kullanılmaktadır. Standart model yüksek Reynolds sayısına sahip akış modeli iken RNG model ise düşük Reynolds sayıları için analitik diferansiyel denklemi sağlamaktadır (Bulut, 2016). Bu modelde, k ve ε aşağıdaki eşitliklerden elde edilmektedir. Bunlar;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\alpha_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\alpha_\varepsilon \mu_{eff}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \\ - R_\varepsilon + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (3.27)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Yukarıdaki denklemlerde  $G_k$  hesaplanan ortalama hız gradyanlarına bağlı olarak ortaya çıkan türbülans kinetik enerji üretimini,  $G_b$  kaldırma

kuvvetlerinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimini,  $Y_M$  sıkıştırılabilir türbülanstaki çalkantı ayrılmasından oluşan toplam yutulma oranına olan katkısını,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$  sabitlerdir.  $\alpha_k$  ve  $\alpha_\varepsilon$  ise sırasıyla türbülans kinetik enerji ve enerji yutulması için ters efektif Prandtl sayılarını,  $\mu_{eff}$  ise efektif viskoziteyi ifade etmektedir. Eşitlik 3.27 ve Eşitlik 3.26'daki sabitler aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.  $\alpha_k$  ve  $\alpha_\varepsilon$  değerleri RNG teorisinden analitik olarak türetilmekte olup,

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 1.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (3.28)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Buradaki  $\alpha_0 = 1$ 'dir. Yüksek Reynolds sayılarında ( $\frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \ll 1$ )  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon \cong 1.393$  olmaktadır.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.29)$$

Model, dönme ve girdap (swirl) etkileri Eşitlik 3.26'daki ilave terim olan  $R_\varepsilon$  hesaba katılmasına katkı sağlamaktadır. Modelde bu etkiyi hesaba katıp düzeltilmiş türbülans viskozitesi için;

$$\mu_t = \mu_{t0} f\left(\alpha_s, \Omega, \frac{k}{\varepsilon}\right) \quad (3.30)$$

eşitliği kullanılmaktadır. Burada  $\mu_{t0}$  girdap hesaba katılmadan hesaplanan viskozite değerini,  $\alpha_s$  girdabın şiddetine göre değişen sabit değeri,  $\Omega$  karakteristik girdap sayısını ifade etmektedir. Burada,

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.31)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.  $\eta$  türbülans kinetik enerji üretimi ve disipasyon oranının fonksiyonu olup;  $\eta = sk/\varepsilon$  şeklinde hesaplanmaktadır. Buradaki S, ortalama şekil değiştirme fonksiyonu olup;

$$S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (3.32)$$

ve

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.33)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu türbülans modeli için kullanılan sabitlerin değerleri Tablo 3.4'deki gibi verilmiştir (Yakhot, et al., 1992).

Tablo 3.4. RNG k-ε türbülans modelinin model sabitleri

Model Sabitleri	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_\mu$	$\alpha_k$	$\alpha_\varepsilon$	$\eta_0$	$\beta$
Değerleri	1.42	1.68	0.0845	1.393	1.393	4.38	0.012

Bu tez çalışmada; kararlı rejimde türbülanslı akış göz önüne alınmış olup matematiksel formüller bu akışı temsil edecek biçimde verilmiştir. Standart duvar fonksiyonlu Realizable k-ε modeli türbülans modeli kullanılmıştır. İki denklemlilik bir türbülans modeli olan  $k - \varepsilon$  türbülans modeli, türbülanslı akışın sayısal çözümünde en yaygın kullanılan yaklaşımlardandır. Mühendislik problemlerinin büyük bir kısmında yeterli doğrulukta sonuç vermektedir ve hesaplama maliyeti açısından düşük bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda türbülanslı akışın sahip olduğu kinetik enerji ve bu kinetik enerji yutulumu, akış denklemlerine ek, iki kısmi diferansiyel denklem ile hesaplanarak çözüme dâhil edilir. Ayrıca, diğer türbülans modeli yaklaşımlarında olduğu gibi,  $k - \varepsilon$  türbülans modelinde de akış alanı parametrelerinde ortalama değerler ve salınım (fluctuation) değerleri dikkate alınarak çözümler gerçekleştirilir.

### 3.2.1.2. Partiküller için hareket eşitliği

DPM'de çok fazlı akışların sayısal olarak hesaplanmasında iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar Euler-Lagrange yaklaşımı ve Euler-Euler yaklaşımıdır. Euler-Lagrange yaklaşımında akışkan fazı Navier-Stokes denklemlerini çözerek sürekli ortam davranışı gösterirken hesaplanan akış alanındaki dağılmış faz bir ya da birden çok sayıdaki partikül, kabarcık veya damlacığı izleyerek çözüm sağlamaktadır (Özdemir, 2014; Park, et al., 2018). Dağılmış faz, akışkan fazı ile kütle ve momentum transferleri gerçekleşebilir. Hesaplamalar esnasında akışkan fazdaki belirli aralıklarla partiküller ayrı ayrı hesaplanmaktadır (Şahin, 2018).

FLUENT, bir Lagrange referans çerçevesinde yazılan partikül üzerindeki kuvvet dengesini entegre ederek, ayrık bir fazdaki partikülün (damlacık ya da kabarcığın) yörüngesini partikül kuvvet denkleminin integralinin alınmasıyla elde edilmektedir. Bu kuvvet dengesi partikül ataletini partikül üzerine etkiyen kuvvetlerle eşitler. Küresel bir partikülün hareket eşitliği kartezyen koordinatlarda  $x$  yönü için yazıldığında şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3.34)$$

Burada;  $u$  akışkan fazdaki akış hızını,  $u_p$  partikülün hızını,  $\rho_p$  partikülün yoğunluğunu,  $g_x$  yerçekimi ivmesini ve  $F_x$  partikülün kütlesinden kaynaklanan kaldırma kuvvetini,  $F_D(u - u_p)$  birim partikül kütlesi için sürüklenme kuvvetini ifade etmektedir. Sürüklenme kuvveti ise,

$$F_D = \left( \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \right) \left( \frac{C_D R_e}{24} \right) \quad (3.35)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada;  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesi,  $C_D$  sürüklenme (drag) katsayısı ve  $R_e$  göreceli Reynolds sayısıdır. Bu değerler aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$R_e = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3.36)$$

$$C_D = \frac{24}{R_e} (1 + b_1 R_e^{b_2}) + \frac{b_3 R_e}{b_4 + R_e} \quad (3.37)$$

Burada,

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2) \quad (3.38)$$

$$b_2 = (0.0964 - 0.5565\phi) \quad (3.39)$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.894\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3) \quad (3.40)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3) \quad (3.41)$$

şeklinde Haider and Levenspiel (1989), tarafından tanımlanmıştır. Buradaki  $\phi$  şekil faktörü ve  $\phi = s/S$  şeklinde tanımlanır. Buradaki  $s$  partikül ile aynı hacme sahip kürenin yüzey alanı,  $S$  partikülün gerçek yüzey alanıdır.

Mikron altı partiküller için bir tür Stokes sürüklenme kanunu mevcuttur.

Sürüklenme kuvveti şu şekilde ifade edilmektedir.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 C_C} \quad (3.42)$$

Burada  $C_C$  terimi Stokes-Cunningham kayma düzeltmesidir. Bu terim ise,

$$C_C = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-1.1d_p/2\lambda}) \quad (3.43)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;  $\lambda$  gazların moleküler ortalama serbest yoludur.

Eşitlik 3.33'deki  $F_x$  değeri partikülün kütesinden kaynaklanan kaldırma kuvvetidir ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u - u_p) \quad (3.44)$$

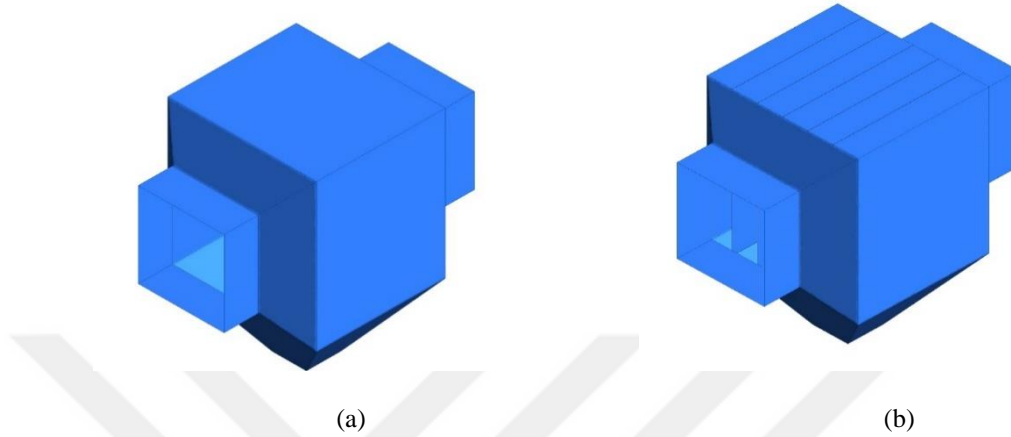
### 3.2.1.3. Çözüm Yöntemi ve Sınır Şartları

Bu tez çalışmasında Tablo 3.1'deki EŞÇ modellerini SOLIDWORKS bilgisayar paket programı kullanarak 3 boyutlu olarak çizilmiştir. Daha sonra çizilen modeller ANSYS Workbench'e aktarılmış ve ardından hesaplamaların yapılabilmesi için model geometrisi üzerinde ANSYS Meshing Module ile sonlu hacimlere bölünerek uygun ağ yapısı oluşturulmuştur. Probleme FLUENT paket programında gerekli sınır şartlar tanımlanıp sayısal çözümün doğru sonuçlar vermesi için düzenlemeler yapıldıktan sonra programın süreklilik denklemi, momentum korunumu ve türbülans modelinin kullanılmasıyla model çözümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda EŞÇ içindeki havanın hız ve basınç dağılımı ayrıntılı olarak CFD-POST programı ile görselleştirilmiştir.

### 3.2.1.4. Katı modelin çizimi

Sayısal analizi gerçekleştirilecek olan bir problemin analizini yapmadan önce yapılması gereken işlemlerin başında problemin geometrisini çizmek gerekmektedir. Bu çalışmada her bir model EŞÇ için yürütülen işlemler; plakalı ve plaka olmadan farklı boyutlarda toplamda 158 adet EŞÇ modeli simüle edilmiştir. Analize başlamadan önce ilk olarak Tablo 3.1'deki EŞÇ modelleri 3 boyutlu olarak bilgisayar paket programı olan SOLIDWORKS'da çizilmiştir. SOLIDWORKS'de çizilen EŞÇ modellerin 3D görüntüleri örnek olarak Şekil 3.5'te verilmektedir. Daha sonra çizilen modeller ANSYS Workbench'e aktarılmış ve ardından hesaplamaların yapılabilmesi

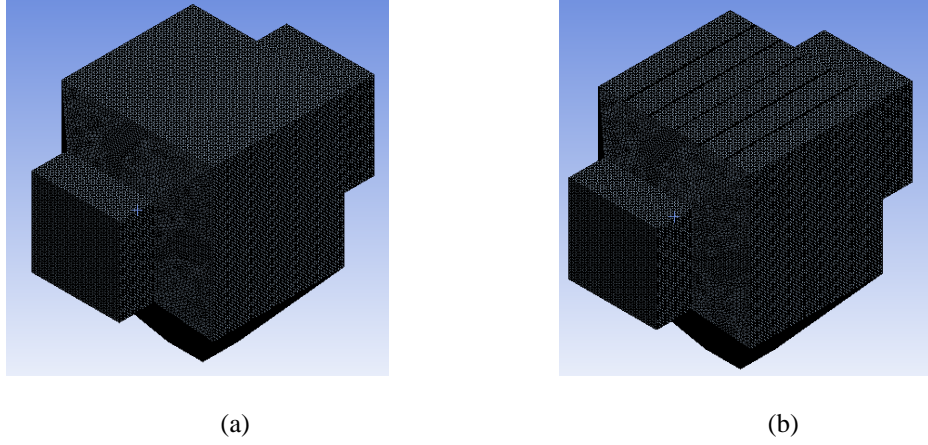
için model geometrisi üzerinde ANSYS Meshing programı ile sonlu hacimlere bölünerek bir ağ yapısı oluşturulmuştur. FLUENT programında gerekli sınır şartlar tanımlanıp süreklilik denklemi, momentum korunumu ve türbülans modelinin kullanılmasıyla akış analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. SOLIDWORKS 'de çizilen 3D EŞÇ modelleri-(a) içerisinde plaka olmayan ve (b) içerisinde plaka olan model görüntüleri

### 3.2.1.5. Ağ yapısının oluşturulması ve optimizasyonu

HAD yönteminin en önemli adımlarından biri, oluşturulan geometrinin akışkan hareketlerini ve fiziksel problemleri matematiksel denklemlerle tanımladıktan sonra bu denklemleri çeşitli ayrıklaştırma yöntemlerini kullanarak sayısal olarak çözüm gerçekleştirilir. Bu işlem için hesap bölgesindeki hız ve basınç gibi akış değişkenlerinin hesaplanacağı küçük hücrelerden oluşan kontrol hacimlerine bölünerek bir ağ (mesh) yapısı hazırlanmaktadır. Akışa ait temel diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü için problem geometrisi ağlara bölünmektedir. Kontrol hacminin merkez noktaları ve kontrol hacminin sınırları birbirini takip eden iki nokta arasında bulunmaktadır. Problem alanının sınırı genellikle kontrol hacminin sınırıyla çakışmaktadır. Ağ yapısının oluşturulması amacıyla ANSYS paket programı içerisinde Workbench ara yüzünde bulunan MESHING programı kullanılarak yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında 3 boyutlu model çizimlerinden sonra tüm modellerin ağ yapısı oluşturulmuştur. Tablo 3.1'de tasarım boyutları verilen Model-1 ve Model-2 EŞÇ'lerin Şekil 3.6'deki gibi ağ yapısı oluşturulmuş ve Tablo 3.5'te ise iki modelin ağ istatistikleri verilmiştir. Bu tez çalışmasında yapılan 158 modelin her biri yaklaşık 2300000 – 22000000 arasında değişen sonlu hacimlere bölünmüştür.



Şekil 3.6. Model-1 (a) ve Model-2 (b) ağ yapılarının görseli

Tablo 3.5. Model-1 ve Model-2 ağ istatistikleri

Ağ parametreleri	Model-1 EŞÇ	Model-2 EŞÇ
Nokta sayısı	3189843	4201351
Eleman sayısı	2350168	2850730
Skewnees (Çarpıklık)	Min 2.1165e-004	Min 2.5373e-004
	Max 0.79877	Max 0.95787
	Ort 0.20433	Ort 0.25969
Orthogonal Quality (Diklik Kalitesi)	Min 0.20123	Min 4.2134e-002
	Max 0.99737	Max 0.99736
	Ort 0.79436	Ort 0.73916

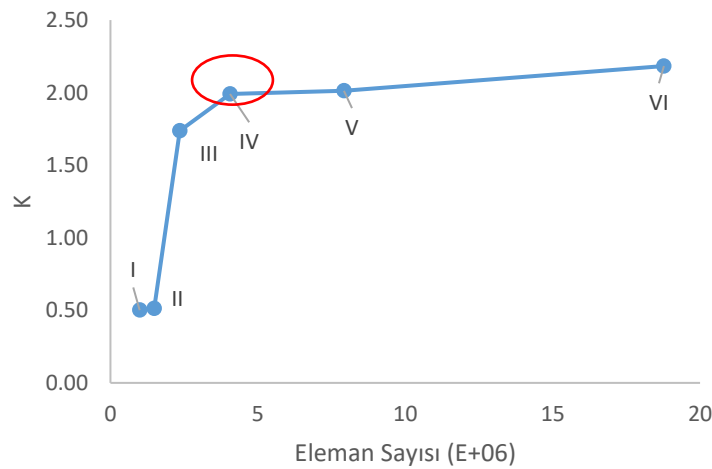
Ağ yapısının homojenliği, ağ eleman dağılımı ve düzgün ağ yapısının oluşturulması önemli parametrelerdir. HAD analizleri esnasında doğru hesaplama yapılabilmesi için çözüm ağ yapısının niteliği ve sıklığından bağımsız ağ yapıları oluşturmak gerekmektedir. Ağ kalitesi ne kadar iyi olursa analiz sonucunun doğruluğu da o kadar iyi olmaktadır. HAD programında oluşturulan ağ yapısının kalitesini gösteren parametreler mevcuttur. Bu parametrelerden biri olan skewness değeri, 0-1 arası değer almaktadır. Maksimum skewness değerinin 0.95'ten düşük olması ve ortalama skewness değerinin ise sıfır değerine yakın olması eleman kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir. Diğer parametre ise orthogonal quality değeri, 0-1 arası değer almaktadır. Hücre merkezlerinin bağlantı vektörleri ile hücrelerin iç yüzeylerinin yüzey normal vektörleri arasındaki açı olarak ifade edilmektedir. Minimum orthogonal quality değerinin 0.1'den büyük olması ve ortalama orthogonal quality değerinin ise 1 ve 1'e yakın olması eleman kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir (Ozen, 2014; ANSYS, 2015; Çiftçi, 2016). Tablo 3.5 incelendiğinde oluşturulan ağ yapısının kalitesinde herhangi bir problem olmadığı görülmektedir. Buna göre, oluşturulan ağ yapısı ile analizler bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca ortalama skewness ve orthogonal quality değerlerine göre ağ kalitesinin belirlenmesi için verilen aralıklar Tablo 3.6'daki gibi verilmiştir.

Tablo 3.6. Ağ kalitesi göstergeleri (Ozen, 2014; ANSYS, 2015)

Hücre Ağ Kalitesi	Skewness Değeri (Ortalama)	Orthogonal Quality Değeri (Ortalama)
Mükemmel	0-0.25	0.95-1
Çok iyi	0.25-0.50	0.70-0.95
İyi	0.50-0.80	0.20-0.69
Kabul edilebilir	0.80-0.94	0.15-0.20
Kötü	0.95-0.97	0.001-0.14
Çok kötü	0.98-1	0-0.0001

Ağ yapısının daha sık olması hassas sonuçlar vermesi açısından tercih edilmektedir. Ancak ağ yapısının sıklığının artması zaman ve alt yapı yetersizliğine neden olabilmektedir. Bu açıdan ağ bağımsızlığı yapılarak uygun ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir. Tez çalışmasında tüm modeller için basınç düşüşü değerleri hesaplanarak ağ yapısından bağımsızlık çalışması yapılmış ve sonuçların çözüm ağından bağımsız olduğu görülmüştür. Örnek olması amacıyla Şekil 3.7'de Model-1 ESÇ'nin analizinin çözüm ağından bağımsızlığı gösterilmiştir. Bunun için ağ eleman sayıları 991128 ile 18773776 arasında değişen 6 farklı çözüm ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan bu çözüm ağlarının HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve ESÇ kanal giriş/çıkış kesitleri arasındaki basınç farkı değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlara göre eleman sayısı değerleri arttıkça elde edilen basınç düşüşü çözüm değerleri hassaslaşmakta ve değişim miktarı artmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde IV numaralı ağ yapısından sonra Model-1 ESÇ'nin basınç düşüşü değerlerinde önemli bir değişimin olmadığı görülmüştür.



Şekil 3.7. Model-1 ESÇ için ağ yapısından bağımsızlığı

Tablo 3.7. Model-1 ESÇ için oluşturulan farklı ağ yapıları ve ağ kalitesi değerleri

Oluşturulan Ağ Yapısı	Skewness Değeri (Maksimum)	Orthogonal Quality Değeri (Minimum)
I	0.79972	0.20028
II	0.79966	0.20034
III	0.79959	0.20041
IV	0.79877	0.20123
V	0.79641	0.20359
VI	0.79263	0.20797

Tablo 3.7’de görüldüğü gibi farklı çözüm ağ yapılarında gerçekleşen sayısal analizlerde ağ yapılarının kaliteleri incelenmiştir. Maksimum skewness değerinin 0.95’ten düşük olması ve minimum orthogonal quality değerinin ise 0.1’den büyük olması gerekmektedir. Burada eleman sayısının artmasıyla ağ kalitesinde çok fazla değişim söz konusu değildir. Yüksek eleman sayılarında çalışmak çok güçlü bilgisayar gerektirdiğinden hem eleman sayısı hem de kalite parametreleri göz önüne alınması gerekmektedir. Şekil 3.7 ve Tablo 3.7 incelendiğinde en uygun ağ eleman sayısı ve ağ kalitesi değerlerine sahip olan IV numaralı ağ yapısındaki model olduğu görülmektedir ve bu ağ yapısına göre sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Tüm modeller için yapılan bu bağımsızlık çalışmasıyla modellere uygulanan ağ yapısının çözümde hassas sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

Ağ yapısının oluşturulmasından sonra modelin sınır şartları belirlenmiştir. Bu kısımda, ESÇ Model’inin hava giriş kısmı inlet, çıkış kısmı “outlet”, duvarlar için “walls” ve partiküllerin çöktüğü bölüm “dustbin” olarak isimlendirilmiştir.

### 3.2.1.6. FLUENT akış analizi

Modellerin ağ yapısı oluşturulduktan sonra sayısal analizlere başlamadan önce FLUENT programında gerekli ayarlamaların yapılması gerekmektedir. Bu ayarlamalar için her bir model ayrı ayrı sınır şartlarının ve akış özelliklerinin programa tanıtılması gerekmektedir. FLUENT programı çalıştırılırken çift hassasiyetli çözücü (Double Precision) seçilmiştir. Çift hassasiyetli çözücünün seçilmesinin sebebi tek hassasiyetli çözücüde her kayan nokta sayısında 32-bit kullanılırken çift hassasiyetli çözücüde 64-bit kullanarak ekstra hassasiyet sağlamaktır. Fakat çift hassasiyetli çözücü seçilirken hassasiyetin artırılmasıyla bellek kullanımını da artırdığını bilmek gerekmektedir. Ayrıca programda birimler mm olarak ayarlanmıştır. Daha sonra genel ayarlarda çözüm bölümünde modellerin üç boyutlu, tek fazlı, özelliklerin sabit kabul edildiği, sıkıştırılmaz daimî (zamandan bağımsız) bir akış olduğu ve basınç temelli çözücü (Pressure based solver) tipi seçilerek modeller sayısal olarak incelenmiştir.

Basınç temelli çözücünde momentum ve basınç birincil değişken olarak ele alınmaktadır. Basınç ve hız alanı hesaplandıktan sonra enerji, türbülans ve varsa diğer transport denklemleri çözülmektedir (Teke, 2010). Ayrıca analizde yerçekiminin yönü ve değeri de tanımlanmıştır. Modellerde yerçekimi y yönünde ve  $9.81 \text{ m/s}^2$  olarak tanımlanmıştır.

### 3.2.1.7. Türbülans modelinin belirlenmesi

HAD sayısal analizlerinde  $k-\varepsilon$  türbülans modeli sıkça tercih edilen bir modeldir. Çalışmada ESC içerisindeki türbülanslı akışı modellemek için Standart duvar fonksiyonlu Realizable  $k-\varepsilon$  türbülans modeli tutarlı sonuçlar verdiği için tasarlanan modellerin akış analizlerinde bu türbülans modeli kullanılmıştır.

### 3.2.1.8. Partiküller için ayrık faz kabulleri

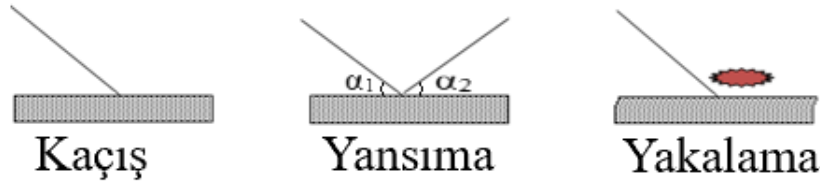
Model ESC içinde yol alacak partiküller için Lagrange yörünge analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla FLUENT kodunun bünyesindeki ayrık faz modeli (Discrete Phase Model-DPM) kullanılarak ESC içindeki partiküllerin dağılımını ve gaz fazındaki türbülansın toz partikülleri üzerine yörüngelerine olan etkisi belirlenmiştir. Bu çalışmada, partiküllerin hızları, büyüklükleri gibi karakteristikler tanımlanmıştır. Tablo 3.8’de partikülün sisteme tanımlanan özellikleri yer almaktadır.

Tablo 3.8. Partikül sınır koşulları

Parametreler	Sınır Koşullar
Partikül Materyali	Ash-Solid
Enjeksiyon	Giriş yüzeyinden
Giriş-hız	6 m/s, 12 m/s, 18 m/s ve 24 m/s
Kütleli debi	0.0001 kg/s
Yoğunluk	800 kg/m <sup>3</sup>
Partikül boyutu	2.5 $\mu$ , 5 $\mu$ , 7.5 $\mu$ ve 10 $\mu$

Ayrıca partiküllerin fiziksel model için yayılmaları (dispersion) için Stokes-Cunningham sürüklenme yasası kullanılmıştır. Ayrık faz enjeksiyonu için havanın girdiği aynı yüzey alanına sahip bölgeden toz partiküllerini gönderebilmesi amacıyla yüzey seçeneği aktifleştirilmiş ve giriş yüzeyi seçilmiştir. Partikül dağılımı için daha doğru bir dağılım sonucunun elde edilebilmesi amacıyla Rosin-Rammler dağılımı kullanılmıştır. Partikül hızı, ESC giriş kanalına giren kirli gazın giriş hızı ile aynı olacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca giriş ve çıkış sınır şartı olarak kaçış (Escape) sınır şartı, duvarlarda ise sınır şartı olarak yansıma (Reflect) sınır şartı ve plakaların sınır şartları olarak yakalama (Trap) sınır şartı tanımlanmıştır. Partikül duvar arasındaki etkileşim için kullanılacak sınır şartları Şekil 3.8’de gösterilmiştir (ANSYS, 2009).

Kaçış sınır şartında partikül duvar içinden geçebilmekte, yansımaya sınır şartında  $\alpha_1$  açısı ile gelen partikül  $\alpha_2$  açısı ile duvardan yansıyarak yoluna devam etmekte ve yakalama sınır şartında ise partikül çarptığı duvar tarafından tutulmaktadır (Erol, 2016).



Şekil 3.8. Partikül duvar arasındaki etkileşim

### 3.2.1.9. Akışkan ve özelliklerinin belirlenmesi

ESÇ model girişinde akışkan olarak hava kullanılmıştır. Akışkanın ESÇ içerisine giriş sıcaklığı 200°C (473.15 K)'dir. Bu sıcaklıktaki havanın yoğunluğu 0.7461 kg/m<sup>3</sup>, kinematik viskozitesi 3.39×10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s ve dinamik viskozitesi ise 2.53×10<sup>-5</sup> Ns/m<sup>2</sup>'dir.

### 3.2.1.10. Modelin sınır şartlarının girilmesi

Akış alanı içerisinde kütle ve momentum denklemlerinde kullanılan değişkenlerin uygun sınır şartları ile çözülmesi gerekmektedir. ESÇ modellerinde bu denklemlerin çözümünde kullanılacak giriş sınır şartları tanımlanmıştır. ESÇ girişinde akışkan olarak hava kullanılmıştır. Hava model ESÇ kanalına 6 m/s, 12 m/s, 18 m/s ve 24 m/s olarak farklı yaklaşma hızlarında girmektedir. Inlet (giriş) için “velocity inlet” olarak seçim yapıp, cidarlarda da kaymama koşulu (no-slip) tanımlanmıştır. Kaymama koşulundan dolayı, eleman yüzeylerinde bütün hız bileşenleri sıfır olarak alınmıştır. Modelin giriş kısmında belirlediğimiz hız ve özelliklere göre hava girişi olmaktadır. Tasarlanan 158 modeldeki ESÇ'lerin girişinde 4 farklı yaklaşma hızı (6 m/s, 12 m/s, 18 m/s ve 24 m/s) değerleri programa girilmiştir.

ESÇ modellerinde çıkış sınır şartları tanımlanmıştır. ESÇ çıkışında akışkan hava ESÇ kanalından girerek akışkan hesaplama bölgesinden geçip dışarı doğru akmaktadır. FLUENT programında ESÇ çıkış sınır şartı (pressure-outlet) olarak sadece basınç değerleri programa girilmiş ve cidarlarda da kaymama koşulu (no-slip) tanımlanmıştır. Çıkış basıncı atmosfer basıncına eşit olarak alınmış ve analizler sırasında bu değer sabit kabul edilmiştir. Çıkış düzleminde ESÇ hesaplama bölgesi içindeki bilgilerin ekstrapolasyonu yapılarak tamamen gelişmiş akış şartları

uygulamak için yukarı doğru akış üzerine etkisinin olmadığı durum varsayılarak tüm değişkenler için sıfır difüzyon akı şartı uygulanmıştır.

Tez çalışmasında tasarlanan 158 model EŞÇ'lerin içerisine 4 farklı yaklaşma hızında ve 4 farklı debide hava gönderilmiştir. Giriş ve çıkış türbülans sınır şartı olarak türbülans şiddeti ve hidrolik çap göz önüne alınmıştır. Hesaplamalarda türbülans şiddeti için Eşitlik 3.45 ve hidrolik çap ise Eşitlik 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I = 0.16Re^{-1/8} \quad (3.45)$$

Eşitlik 3.5 ve Eşitlik 3.45 kullanılarak, 1-12 arası EŞÇ modellerin yaklaşma hızı 6 m/s ve hidrolik çapı 1 m olup türbülans şiddeti % 3.5 olarak, 13-24 arası modellerin yaklaşma hızı 12 m/s ve hidrolik çapı 1 m olup türbülans şiddeti % 3.2 olarak, 24-36 arası modellerin yaklaşma hızı 18 m/s ve hidrolik çapı 1 m olup türbülans şiddeti % 3.1 olarak, 37-48 arası modellerin yaklaşma hızı 24 m/s ve hidrolik çapı 1 m olup türbülans şiddeti % 3 olarak, 49-60 arası modellerin yaklaşma hızı 6 m/s ve hidrolik çapı 1 m olup türbülans şiddeti % 3.5 olarak, 61-72 arası modellerin yaklaşma hızı 12 m/s ve hidrolik çapı 1 m olup türbülans şiddeti % 3.2 olarak, 73-84 arası modellerin yaklaşma hızı 18 m/s ve hidrolik çapı 1 m olup türbülans şiddeti % 3.1 olarak, 85-96 arası modellerin yaklaşma hızı 24 m/s ve hidrolik çapı 1 m olup türbülans şiddeti % 3 olarak, 97-108 arası modellerin yaklaşma hızı 6 m/s ve hidrolik çapı 1 m olup türbülans şiddeti % 3.5 olarak, 109-120 arası modellerin yaklaşma hızı 6 m/s ve hidrolik çapı 1.414 m olup türbülans şiddeti % 3.4 olarak, 121-132 arası modellerin yaklaşma hızı 6 m/s ve hidrolik çapı 1.732 m olup türbülans şiddeti % 3.3 olarak, 133-144 arası modellerin yaklaşma hızı 6 m/s ve hidrolik çapı 2 m olup türbülans şiddeti % 3.2 olarak, 145-158 arası modellerin yaklaşma hızı 6 m/s ve hidrolik çapı 1 m olup türbülans şiddeti % 3.5 olarak hesaplanmıştır.

### 3.2.1.11. Sayısal çözüm algoritması

FLUENT programında korunum denklemlerinin cebirsel denklemlere dönüştürülebilmesi için kontrol hacmi oluşturulmakta ve her kontrol hacmi için tanımlanan denklemler integre edilmektedir. Kontrol hacimlerin hücre merkezinde hesaplanan skaler değerler kontrol hacmi sınırlarında kullanılmaktadır. Hücre merkezlerinde tutulan değişkenlerin kontrol hacimlerin yüzeylerine interpolate edilmesi gerekmektedir. Bu işlem için ANSYS FLUENT programında birinci dereceden ayrıklaştırma, ikinci dereceden ayrıklaştırma, power law ve quick interpolasyon

şemaları kullanılmaktadır (Şener, 2013). Bu tez çalışmasında basınç ve momentum denklemlerinin ayrıklaştırılması için ikinci dereceden ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. İkinci dereceden ayrıklaştırma (Second Order Upwind) şemasında, hücre yüzeyindeki değerler çok boyutlu lineer yaklaşım ile hesaplanmaktadır.

Basınç ve hız bağlanma şemasında simple, simplec, piso ve coupled çözüm algoritmaları bulunmaktadır. Bu algoritmaları kısaca şu şekilde ifade edebiliriz; 1970’li yıllardan beri kullanılan ve bu denklemlerin çözümünde tahmin ve doğrultma döngüsünden oluşan bir mantık üzerine kurulu olan SIMPLE algoritması; yine bu algoritmanın hem kullanıcısı hem de geliştiricisi Suhas Patankar’ın 1979 yılında sunduğu doğrulama aşamasının güçlendirilmiş hali SIMPLEC algoritması; 1986’da tasarlanan, özellikle zamana bağımlı, kararsız, sıkıştırılabilir akışlar için olan PISO ve her türlü çoklu faza sahip akışlarda, geniş zaman dilimlerinde tercih edilen Coupled algoritmaları bulunmaktadır (Yakut, 2014). Bu tez çalışmasında SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritması kullanılmıştır.

#### **3.2.1.12. Yakınsama**

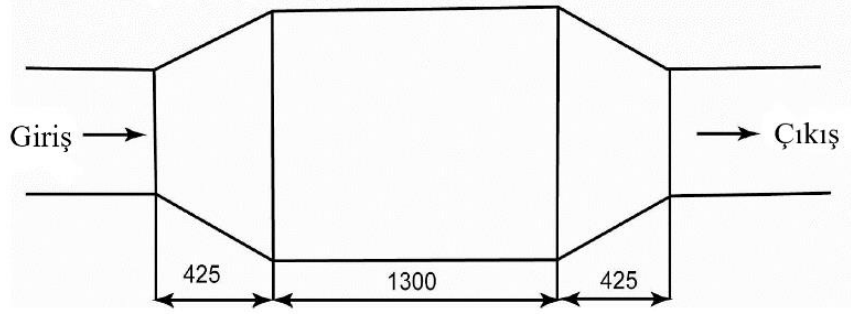
Sayısal çalışmalarda simülasyonun doğru ve güvenilir sonuçlar vermesi için, yakınsama çok önemli ve dikkat edilmesi gerekmektedir. ANSYS FLUENT programı, ayrık çözüm algoritmasını kullanan bir çözücüdür. Bu programda her bir hacim için kütle ve momentum denklemleri tek tek hesaplanmaktadır. Çözüm döngüsünü birkaç kez birleştirerek hesaplanan hız bileşenlerinin süreklilik denklemini sağlayıp sağlamadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Eğer süreklilik denklemini sağlamıyorsa basınç dağılımı düzeltilmektedir. Düzeltilmiş basınç dağılımı kullanılarak ikinci basamaktan itibaren süreklilik denklemini sağlanıncaya kadar işleme devam edilmektedir. Bu işlem çözüm yakınsayıncaya kadar devam etmektedir (Erdoğan, 2014). Bu çözümler esnasında çözüm kalıntıları (sayısal hatalar) meydana gelmektedir. Bu hataların en az düzeyde olması için “underrelaxation” faktörleri programa girilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan çözüm kontrol faktörleri; basınç denklemleri için 0.3, momentum denklemleri için 0.7, enerji denklemleri için 1, gövde kuvveti ve yoğunluk için ise 1 olarak alınmıştır.

Tez çalışmasında kütle ve momentum denklemlerinin yakınsama kriteri, kalıntıların ortalama karekök (RMS) değerleri  $10^{-3}$  olarak belirlenmiş ve tüm çözüm kalıntıların bu değerin altına inmesi şartıyla analizler gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.1.13. Çözümün geçerliliği

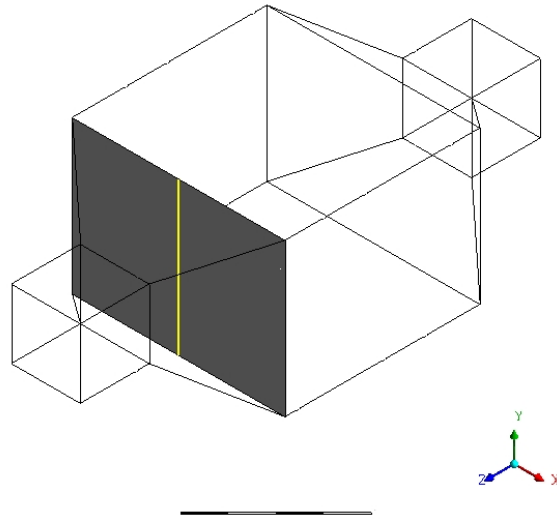
Literatürdeki benzer bir ESC akış analizi çalışması bu çalışmada elde edilen sayısal sonuçların doğrulanmasında ve desteklenmesinde referans alınmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçları doğrulamak için, literatürde ESC geometrisi benzer aerodinamik akış analizlerinin gerçekleştirildiği bir çalışma esas alınmış ve analiz edilen problemin sonuçları karşılaştırılmıştır (Swaminathan, 2010). Bu çalışmada kullanılan ANSYS FLUENT programı kullanılarak Swaminathan (2010) çalışmasındaki aynı problem çözülmüş ve ESC içerisindeki hız dağılımları incelenerek benchmark çalışması yapılmıştır.

Swaminathan (2010) tarafından gerçekleştirilmiş olan ve şematik görünümü Şekil 3.9’de verilmiş olan problem esas alınmıştır. Bu modelin Swaminathan (2010)’da belirtildiği gibi çizimi ve akış analizi için gerekli bilgiler sisteme girilmiştir. Modelin geometrisi çalışmada belirtildiği gibi giriş ve çıkış bölümü kare biçimde 460 x 460 mm, ESC toz toplama bölümünün genişliği 1420 mm ve yüksekliği ise 1020 mm olarak çizilmiştir. Ayrıca modelin düğüm nokta sayısı yaklaşık 1400000 sonlu hacimlere bölünerek uygun ağ yapısı oluşturulmuştur. Daha sonra Swaminathan (2010) çalışmasında belirtildiği gibi analiz FLUENT’te çift hassasiyet seçilerek tasarlanan modellerin tek fazlı, özelliklerin sabit kabul edildiği, sıkıştırılmaz daimî (zamandan bağımsız) bir akış olduğu ve basınç temelli çözücü (Pressure based solver) tipi seçilmiştir. Basınç- hız bağlantısı için SIMPLE algoritması ve kontrol hacimlerin yüzeyindeki değişkenleri interpolate edilmesi için ikinci dereceden ayrıklaştırma kullanılmıştır. ESC içerisindeki türbülanslı akışı modellemek için Standart duvar fonksiyonlu Standart  $k-\epsilon$  türbülans modeli seçilmiştir. ESC model girişinde akışkan olarak hava kullanılmış ve akışkanın ESC içerisine giriş sıcaklığı 25 °C (298.15 °K)’dir. Bu sıcaklıktaki havanın yoğunluğu 1.16 kg/m<sup>3</sup> ve dinamik viskozitesi ise  $1.86 \times 10^{-5}$  Ns/m<sup>2</sup>’dir. Hava ESC kanalına 20 m/s hızda girmekte, giriş sınır şartı için “velocity inlet” ve ESC çıkışı sınır şartı için “pressure-outlet” olarak seçim yapılmıştır. Ayrıca ESC’nin cidarlarında da kaymama koşulu (no-slip) tanımlanmıştır. Giriş ve çıkış sınırındaki türbülans yoğunlukları sırasıyla % 5 ve % 8 olarak girilmiştir. Çalışmada kütle ve momentum denklemlerin yakınsama kriteri  $10^{-3}$  alınarak tasarlanan ESC modellerinin çözümleri gerçekleştirilmiştir.

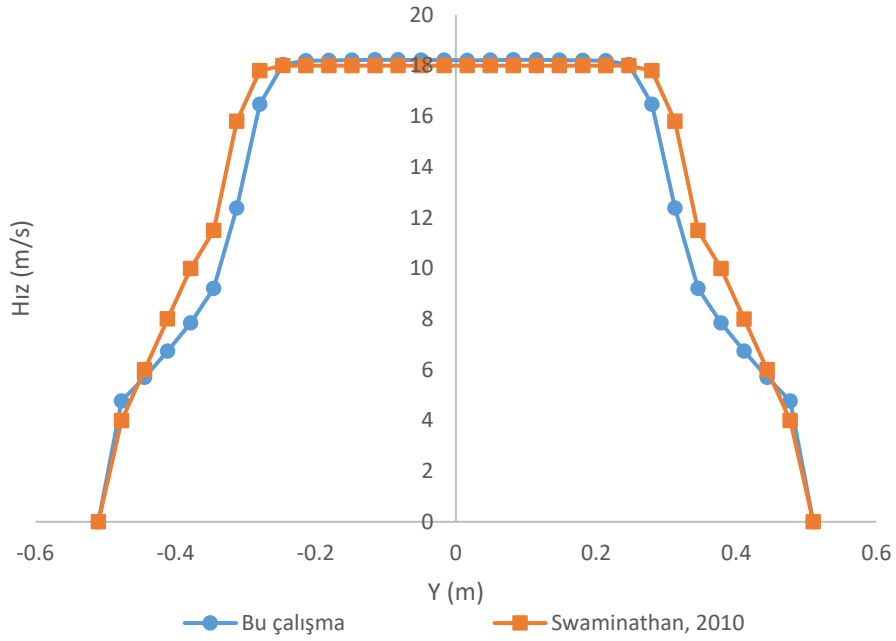


Şekil 3.9. Doğrulama simülasyonunda kullanılan problemin şematik görünümü (Swaminathan, 2010)

Literatürdeki modelin sayısal simülasyonlardan elde edilen analiz sonuçlarını değerlendirmek amacıyla ölçümü alınan bölgenin düzlemsel ve y yönündeki konumu Şekil 3.10'da verilmiştir. Doğrulama simülasyonunda Swaminathan (2010) yapmış olduğu çalışmanın analiz sonuçlarının karşılaştırılması için modelin konik bölümünün çıkışında Şekil 3.10'da belirtildiği y doğrultusundaki hız değerleri Şekil 3.11' de verilmiştir. Ayrıca literatürdeki Şekil 3.10'da belirtildiği düzlemsel bölgenin alan ağırlıklı hız ortalama değeri ile çalışmadaki değer karşılaştırıldığında hata oranı arasında % 4.99 gibi düşük ve kabul edilebilir bir fark bulunmaktadır.



Şekil 3.10. Doğrulama simülasyonunda ölçümü alınan bölgenin düzlemsel ve y yönündeki konumu



Şekil 3.11. Doğrulama simülasyonunda (Swaminathan, 2010) ve bu çalışmanın karşılaştırılması

Şekil 3.11 de görüldüğü üzere, bu çalışmada gerçekleştirilmiş olan sayısal model ile literatürde elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Bu karşılaştırma dikkate alınıp, çözümün geçerli olduğu test edilmiştir. Böylece, benzer yaklaşımla gerçekleştirilecek çalışmaların doğru olacağı varsayılmış ve bu tezin konusunu oluşturan farklı geometrik yapılarla sahip EŞÇ'lerin türbülanslı akışın sayısal olarak çözümü gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.2. Basınç Kayıp Katsayısının Hesaplanması

EŞÇ girişi ile çıkışı arasındaki basınç farkı sistem içindeki basınç kaybını göstermektedir. Bu basınç kaybının kabul edilebilir seviyede olması için sistemdeki dinamik basıncın statik basınca oranının (Eşitlik 3.46) düşük olması gerekmektedir. Bu çalışmada, model hesaplamalarında basınç kayıp katsayısı,

$$K = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U_g^2} \quad (3.46)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır (Sahin and Ward-Smith, 1987; Varonos, et al., 2002). Burada,  $\Delta P$  hesap alanı içerisindeki basınç farkını (Pa),  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ) ve  $U_g$  giriş kanalındaki ortalama yaklaşma hızını (m/s) ifade etmektedir.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

HAD sonuçlarının değerlendirilmesinde çalışmada kullanılan modeller altı gruba ayrılmıştır. Birinci grup model değerlendirilmesinde; 1-48 arasındaki modeller yer almaktadır. Bu modellerin EŞÇ uzunlukları kirli gazın EŞÇ içerisindeki bekleme süresine (0.75 s, 1 s, 1.25 s ve 1.5 s) göre farklı boyutlarda ve sırasıyla 150 cm, 200 cm, 250 cm ve 300 cm olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca bu modellerde EŞÇ'ye giren gazın yaklaşma hızı ( $U_g$ ) 6 m/s, 12 m/s, 18 m/s ve 24 m/s olarak ve gaz debisi ise 6 m<sup>3</sup>/s, 12 m<sup>3</sup>/s, 18 m<sup>3</sup>/s ve 24 m<sup>3</sup>/s olacak şekilde tasarlanan ve analizleri gerçekleştirilen modellerin değerlendirilmesi yapılmıştır. İkinci grup model değerlendirilmesinde; 49-96 arasındaki modeller bulunmaktadır. Bu modeller gelen gazın EŞÇ içerisindeki bekleme süresi 1 s alınmış, EŞÇ'ye giren gazın yaklaşma hızı 6 m/s, 12 m/s, 18 m/s ve 24 m/s olarak ve gaz debisi ise 6 m<sup>3</sup>/s, 12 m<sup>3</sup>/s, 18 m<sup>3</sup>/s ve 24 m<sup>3</sup>/s olarak tasarlanmış olan modellerin değerlendirilmesi yer almaktadır. Üçüncü grup model değerlendirilmesinde ise 97-144 arasında tasarlanan modelleri içermektedir. Bu modellerin EŞÇ'ye giren gazın yaklaşma hızı (6 m/s) ve gazın EŞÇ içerisindeki bekleme süresi (1 s) sabit, EŞÇ giriş gaz debileri sırasıyla, 6 m<sup>3</sup>/s, 12 m<sup>3</sup>/s, 18 m<sup>3</sup>/s ve 24 m<sup>3</sup>/s olarak tasarlanan modellerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Tasarlanan bu modellerin yaklaşma hızı sabit tutulup plakasız ve plakalı olarak model EŞÇ'ler için uygun açı bulunduktan sonra debi artırılarak EŞÇ içerisindeki akışın nasıl değiştiği gözlemlenip uygun gaz debisi belirlenmeye çalışılmıştır. Dördüncü grup model değerlendirilmesinde ise 145-151 arasında tasarlanan modeller yer almaktadır. Bu modellerin EŞÇ giriş kanalındaki yaklaşma hızı 6 m/s, giriş gaz debisi 6 m<sup>3</sup>/s, EŞÇ bekleme odasındaki bekleme süresi 1 s, EŞÇ uzunluğu 200 cm, giriş kanalı kare (100 cm x 100 cm) biçiminde ve EŞÇ'nin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açı ( $\alpha$ ) değerleri değiştirilerek 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70° ve 80° olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan bu modellerin sabit hız, debi, bekleme süresinde EŞÇ'nin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri değiştirilerek koniklik açısının EŞÇ'nin basınç kaybına olan etkisi araştırılmıştır. Beşinci grup model değerlendirilmesinde ise 152-155 arasındaki modeller yer almaktadır. Bu modellerin giriş kanalındaki yaklaşma hızı 6 m/s, giriş gaz debisi 6 m<sup>3</sup>/s, giriş kanalı kare (100 cm x 100 cm) biçiminde ve EŞÇ'nin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açı ( $\alpha$ ) değeri 60°, EŞÇ uzunluğu bekleme süresine (0.75 s, 1 s, 1.25 s ve 1.5 s) göre farklı boyutlarda; sırasıyla 150 cm, 200 cm, 250 cm ve 300

cm olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan bu modellerin sabit hız, debi, koniklik açısı değerlerinde ESC bekletme odasındaki bekletme süresinin ESC gaz akışına ve sistem içindeki basınç kaybına olan etkisi gözlemlenip uygun bekletme süresi belirlenmeye çalışılmıştır. Altıncı grup model değerlendirilmesinde ise 156-158 arasındaki modellerde giriş kanalındaki yaklaşma hızı 6 m/s, giriş gaz debisi 6 m<sup>3</sup>/s, ESC bekleme odasındaki bekletme süresi 1 s, ESC uzunluğu 200 cm, giriş kanalı kare (100 cm x 100 cm) biçiminde, ESC'nin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açı ( $\alpha$ ) değeri 60° ve toz toplama plakalarının uçlarından kısaltılıp uzunlukları farklı boyutlarda olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan bu modellerin sabit hız, debi, bekletme süresi, koniklik açısı değerlerinde toplama plakalarının giriş ve çıkıştaki akışı engellemeyecek şekilde farklı plaka boyutlarının ESC içerisindeki akışa etkisi gözlemlenip uygun plaka boyutları belirlenmeye çalışılmıştır. Altı grup model değerlendirmelerinde ESC içerisindeki gaz hızı, basıncı ve gaz akışına olan etkileri değerlendirildikten sonra tasarlanan 158 adet modelin verim analizleri yapılarak model karşılaştırmaları ve değerlendirmeleri sunulmuştur.

Bu amaçlar doğrultusunda tasarlanan modellerin analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerin tamamlanmasının ardından ANSYS FLUENT programının CFD-POST bölümünde her bir modelin ayrı ayrı hız, basınç ve akım çizgileri kontur görüntüleri alınarak birbiri ile kıyaslanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bu bölümde modellerin çözümü ve sonuçların değerlendirilmesi ile ilgili bilgilere yer verilmiştir.

#### **4.1. Model Değerlendirmeleri**

##### **4.1.1. Birinci Grup Model Değerlendirmesi**

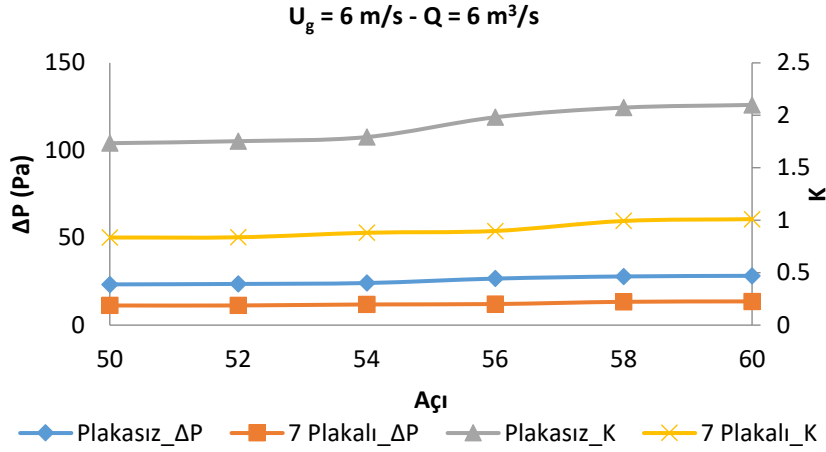
Birinci grup ESC model tasarımlarında toz toplama bölümünü plakalı ve plakasız olarak tasarlanan model ESC'lerin basınç kaybına olan etkisini görebilmek için yapılmıştır. Birinci grupta tasarlanan ESC'lerin basınç kaybına olan etkisi yaklaşma hızları, gaz debileri, bekletme süreleri, giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri, plaka sayıları ve ESC boyutları değişken olarak incelenmiştir. Giriş kanal boyutlarının belirlenmesinde yaklaşma hızı ve debi kullanılmıştır. Bu gruptaki model tasarımlarında ESC giriş ve çıkış kanalını kare biçimde 100 cm x 100 cm boyutlarında sabit olacak şekilde tasarımlar gerçekleştirilmiş ve gazın yaklaşma hızının artırılması durumunda gaz debisi de artırılmıştır. ESC'nin toz toplama bölümü boyutlarının belirlenmesinde ESC toz toplama bölümündeki iç hız ( $U_{iç}$ ) ve gaz debisi

kullanılmıştır. Çalışmadaki tüm EŞÇ model tasarımlarında EŞÇ'nin toz toplama bölümündeki iç hız, ICAC EP-7 gaz akım hızı standartlarının sağlanabilmesi için 2 m/s olarak alınmıştır. Bu durumda iç hız sabit alındığına göre toz toplama bölümünün boyutlarını belirleyen parametre gaz debisi olmaktadır. Toz toplama bölümü boyutları (yükseklik ve genişlik) kare olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durumda, gaz debisinin artırıldığı EŞÇ modellerinde EŞÇ'nin toz toplama bölümünün boyutları da artırılmıştır. EŞÇ içerisindeki plaka sayısı gaz debisine, toplama bölümündeki iç hıza, iki plaka arasındaki mesafeye (30 cm) ve EŞÇ'nin toz toplama bölümünün yüksekliğine bağlıdır. Tüm modeller için EŞÇ'nin iki toplama plakası arasındaki mesafe 30 cm alınmıştır. Bu durumda iki toplama plakası arasındaki mesafe ve iç hız sabit, EŞÇ'nin toz toplama bölümünün yüksekliği de gaz debisine bağlı olduğuna göre toz toplama plaka sayısının belirlenmesi gaz debisine bağlı olarak değiştirilmiştir. Ayrıca EŞÇ toz toplama plaka boyutları EŞÇ'nin toz toplama bölümünün boyutlarına göre eşit alınmıştır. EŞÇ'nin toz toplama bölümündeki bekletme süresi iç hıza ve EŞÇ'nin toz toplama bölümünün uzunluğuna bağlı olmaktadır. İç hız sabit alındığına göre bekletme süresinin artırılması EŞÇ'nin toz toplama bölümünün uzunluğunun artırılması ile gerçekleştirilmektedir. Bundan dolayı birinci grup model tasarımlarında kirli gazın EŞÇ içerisindeki kalış sürelerini 0.75 s, 1 s, 1.25 s ve 1.5 s olacak şekilde tasarlanabilmesi için EŞÇ'nin toz toplama bölümünün uzunluklarının 150 cm, 200 cm, 250 cm ve 300 cm olması gerekmektedir.

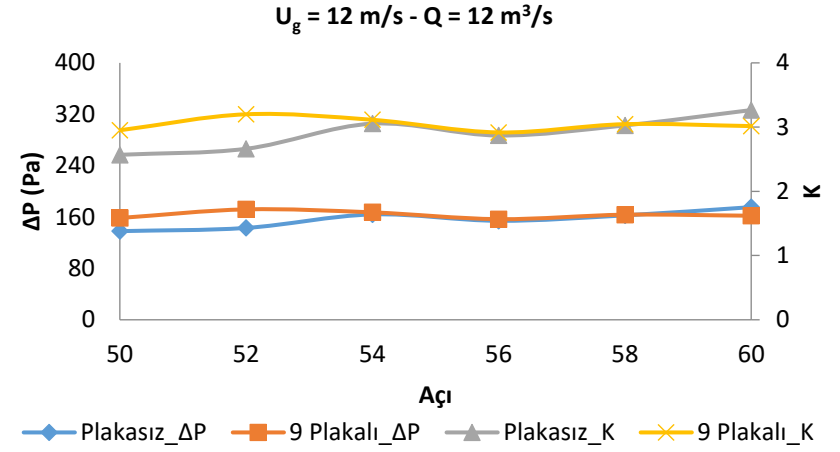
Birinci grupta tasarlanan EŞÇ'lerin yaklaşma hızları sırasıyla; 6 m/s, 12 m/s, 18 m/s ve 24 m/s, gaz debisi sırasıyla; 6 m<sup>3</sup>/s, 12 m<sup>3</sup>/s, 18 m<sup>3</sup>/s, 24 m<sup>3</sup>/s, EŞÇ içerisinde baca gazı bekletme süreleri sırasıyla; 0.75 s, 1 s, 1.25 s ve 1.5 s ve EŞÇ giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri sırasıyla; 50°, 52°, 54°, 56°, 58° ve 60° ve plakalı/plakasız olarak tasarlanmıştır. Model EŞÇ'lerin içine yerleştirilen plaka sayıları farklı gaz debilerine göre EŞÇ boyutlarının değişmesi ile değişen sayıda 7, 9, 11 ve 13 adet olacak şekilde plakalar yerleştirilmiştir. Bu sayede oluşturulan geometrilerin EŞÇ içinde minimum basınç düşmesine neden olan açı bulunmaya çalışılmıştır. Ayrıca model EŞÇ'lerin girişindeki debi ve yaklaşma hızı sabit tutularak söz konusu EŞÇ'nin içerisine plakalar yerleştirip ve yerleştirilmeden modeller oluşturulmuştur. Yerleştirilen plakalar için uygun giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı, yaklaşma hızı, bekletme süresi ve gaz debisinin basınç farkı ( $\Delta P$ ) ve basınç kayıp katsayısı (K) gibi verime etki eden parametrelerin değişimlerinin gözlemleri

tekrarlanmıştır. Bu amaçla, farklı yaklaşma hızlarına sahip ESÇ'lerin giriş ve çıkış bölümlerinin farklı açı model tasarımları için basınç kayıpları ve basınç kayıp katsayılarının değerleri Şekli 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1 (a), (b), (c) ve (d) incelendiğinde hızın artmasıyla basınç kayıp değerlerinde ve basınç kayıp katsayısında artışların olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.1 (a) incelendiğinde bu şekildeki modeller düşük hız, debi ve bekletme süresindeki model tasarımlarıdır. Bu modellerin analiz sonuçlarının değerleri açının artması ile basınç farkı değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Plakalı ve plakasız olan modeller karşılaştırıldığında (düşük hız ve düşük debi değerlerindeki) plakasız modellerde basınç düşüşünün yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca ESÇ içerisine plakaların yerleştirilmesiyle düzgün gaz akışı oluşmakta ve bu sayede basınç kayıp katsayısının da azaldığı görülmektedir.

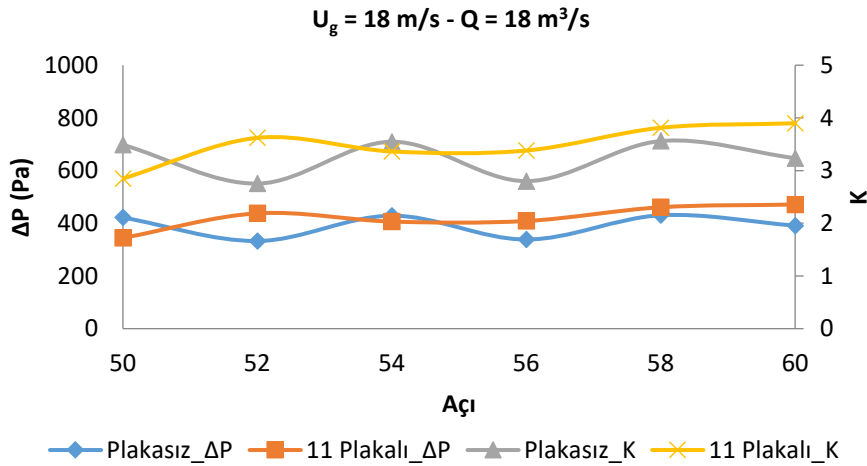




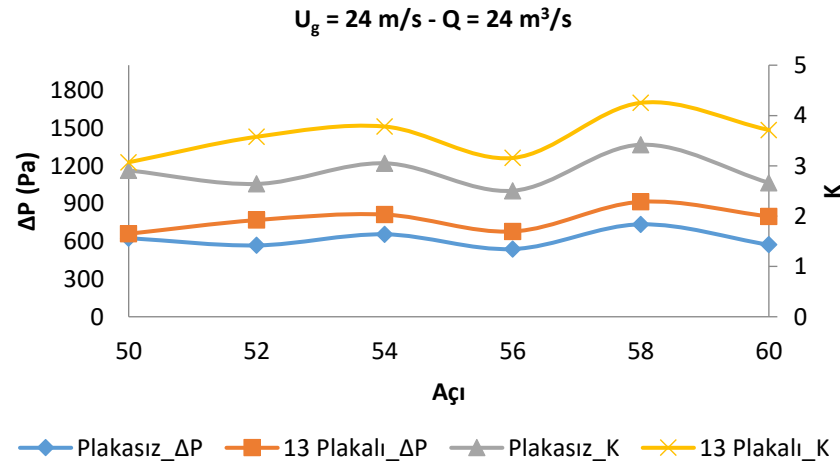
(a)



(b)



(c)

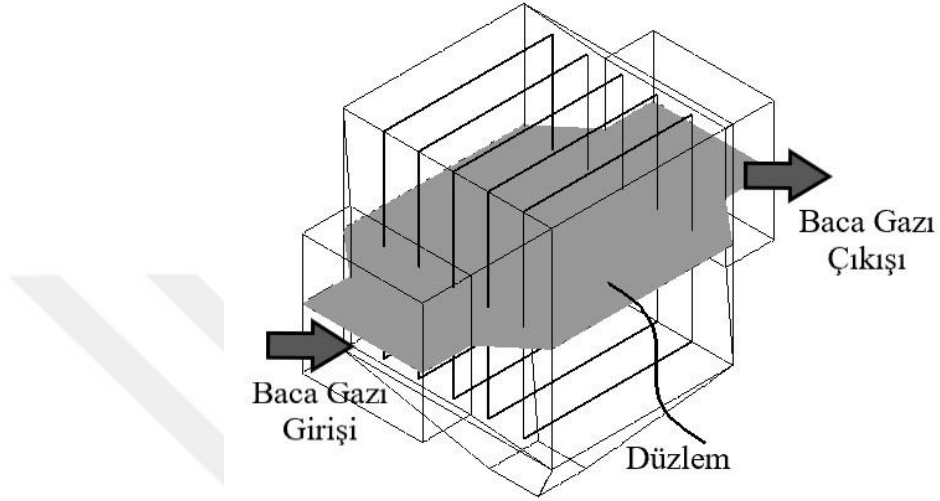


(d)

96

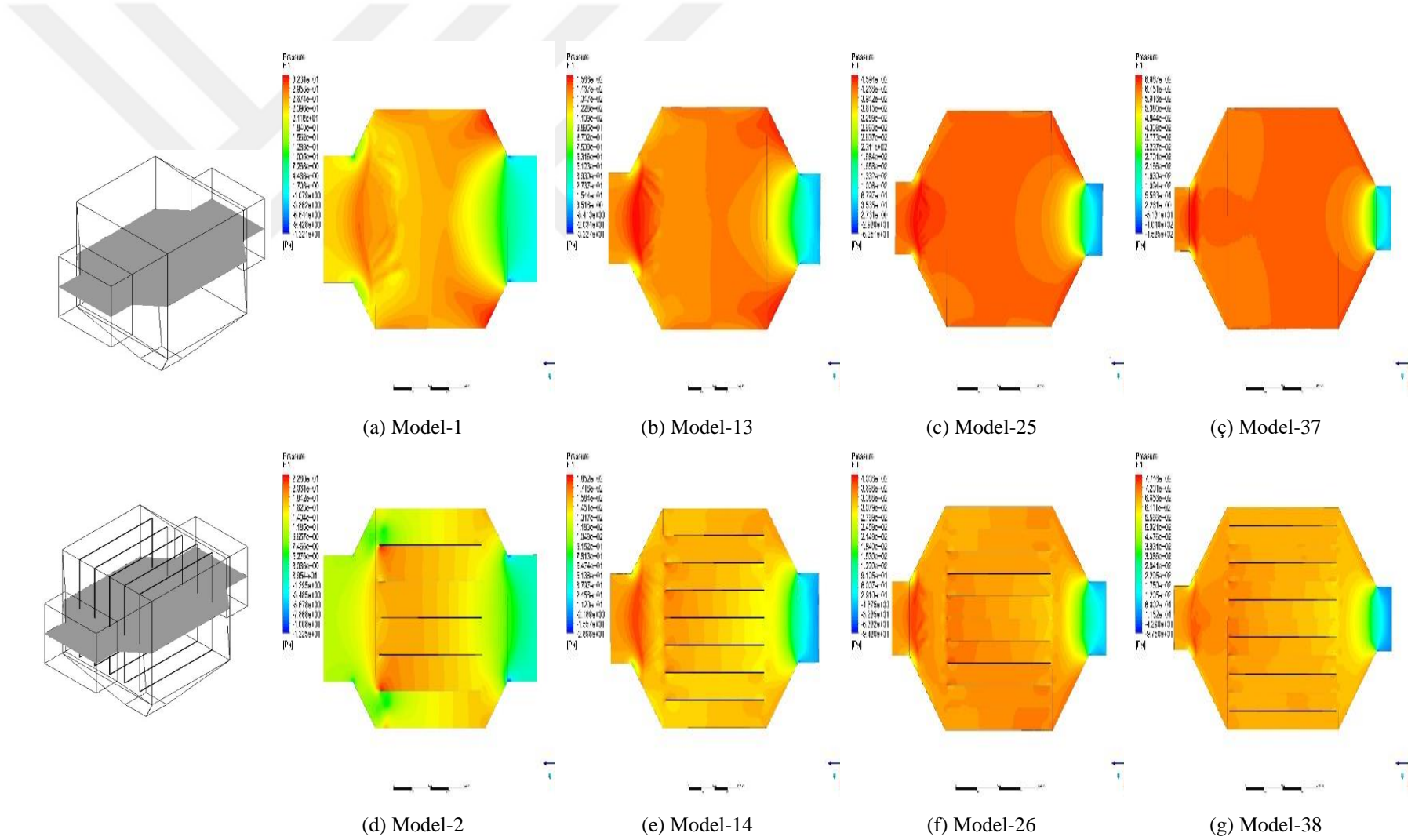
Şekil 4.1. Birinci grup EŞÇ modellerin farklı açı değerlerine göre basınç farkı ve basınç düşüş katsayıları (Model 1-48)

Birinci grup modellerin akış analizlerinin tamamlanmasının ardından CFD-POST bölümünde her bir modelin ayrı ayrı hız ve basınç görüntüleri alınarak birbiri ile kıyaslanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Modellerin hız ve basınç farkı gibi değişimlerini görüntülemek için ESC içerisindeki orta bölmeye yerleştirilen Şekil 4.2'deki gibi bir düzlem oluşturulmuştur.

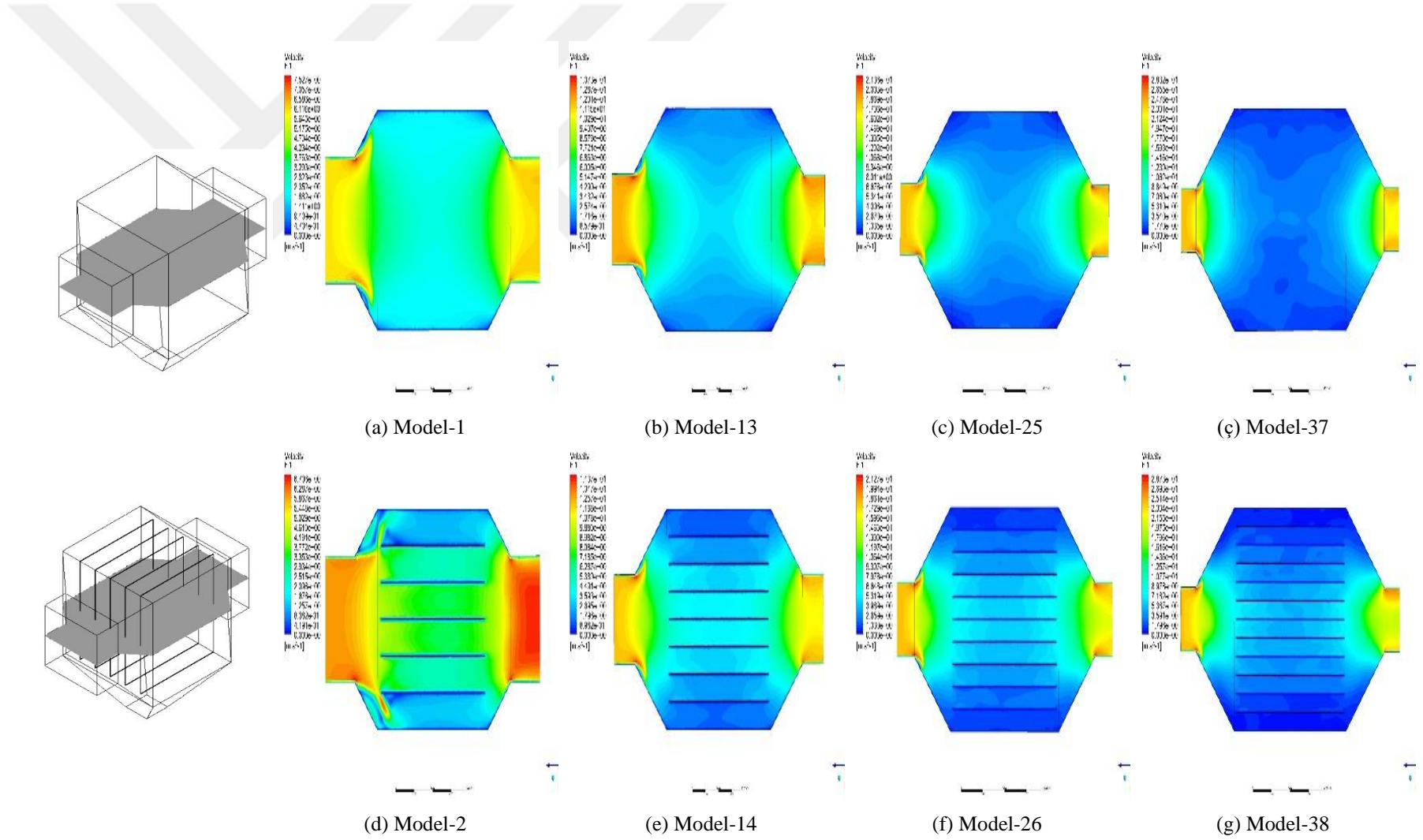


Şekil 4.2. ESC içindeki düzlem konumu (Model-2)

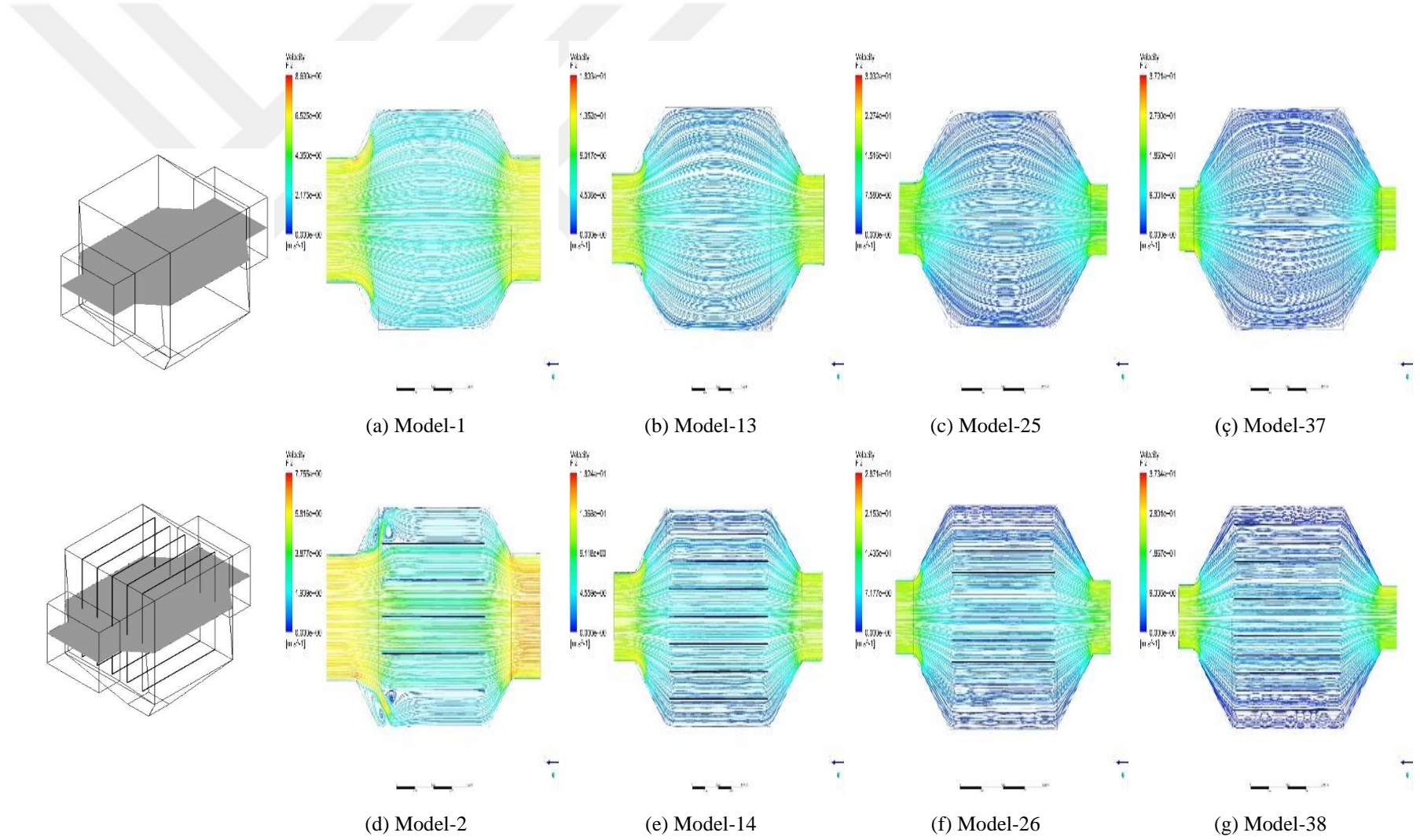
ESC'nin farklı yaklaşma hızlarında, farklı debilerde ve farklı ESC içerisindeki kalış sürelerinde tasarlanan modellerin sonuçlarını değerlendirmek için örnek olması amacıyla ESC'nin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı  $50^{\circ}$ 'lik açı değerlerindeki HAD analiz sonuçlarının akış görselleri Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Belirtilen modellerin basınç konturları Şekil 4.3'te, hız konturları Şekil 4.4'te ve akım çizgisi konturları Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde ESC içerisindeki basınç farkı ve hız değerlerinin plakalı modellerde daha homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Ancak bu grupta Şekil 4.3 (a) ve Şekil 4.3 (d)'den Şekil 4.3 (ç) ve Şekil 4.3 (g)'ye basınç değerlerindeki artışın sebebini birinci gruptaki modellere bakıp anlayamayız. Bu artışın sebebi ya yaklaşma hızının artmasından ya gaz debisinin artmasından ya da bekletme süresinin artmasından kaynaklanıyor olabilir. Bu değişimin sebebini anlayabilmek için ikinci grup analizler gerçekleştirilmiştir. İkinci grup analizlerde bekletme süresi sabit alınmış, değişken olarak yaklaşma hızı ve gaz debisi değiştirilmiştir. Şekil 4.5 (d) incelenecek olursa buradaki akım çizgileri düşük yaklaşma hız değerlerine sahip ESC'lerin, konik kısmın köşelerindeki vorteks oluşumunda artışa neden olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3. Birinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $\alpha = 50^0$  (Model 1-48)

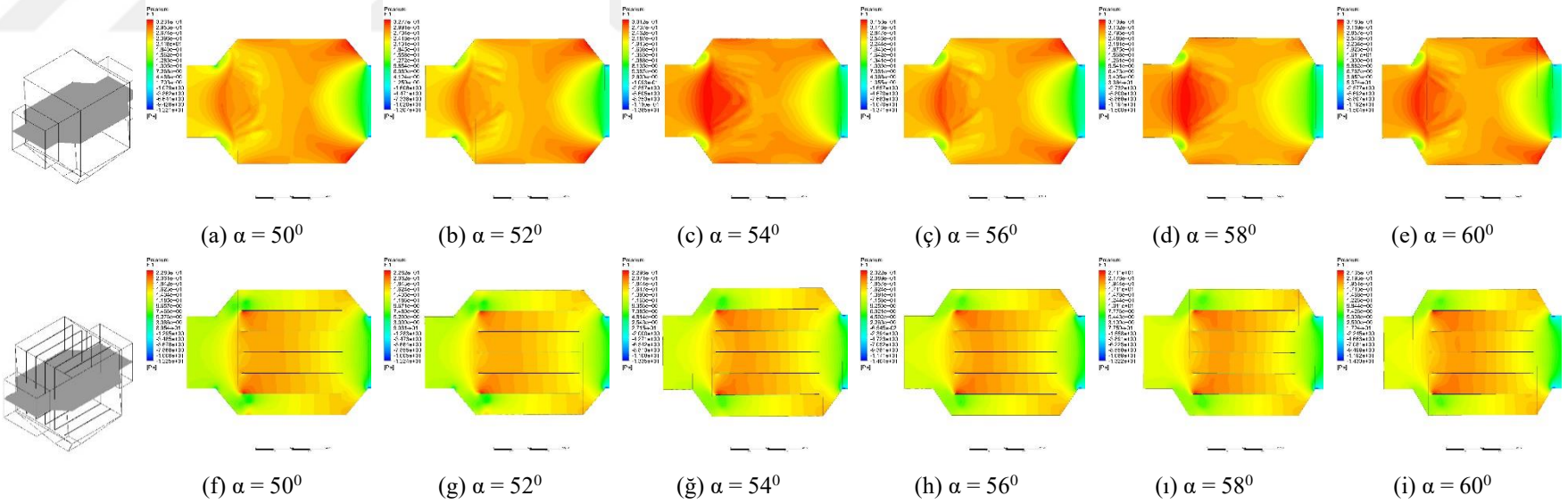


Şekil 4.4. Birinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $\alpha = 50^0$  (Model 1-48)

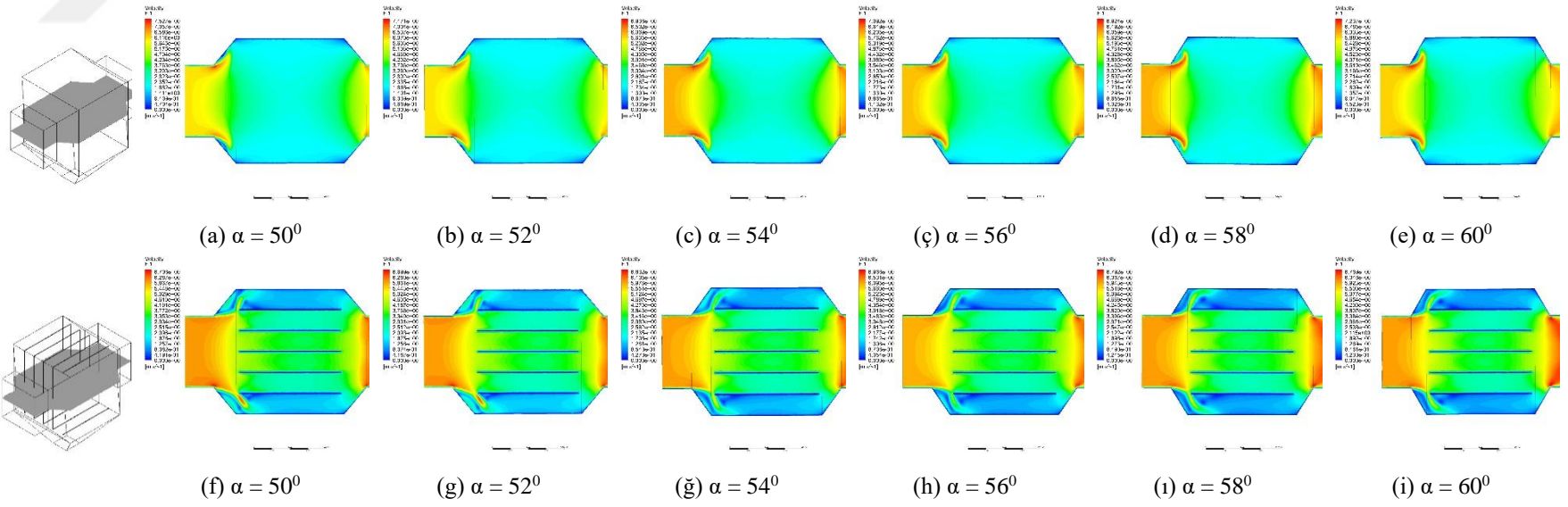


Şekil 4.5. Birinci grup ESÇ orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $\alpha = 50^\circ$  (Model 1-48)

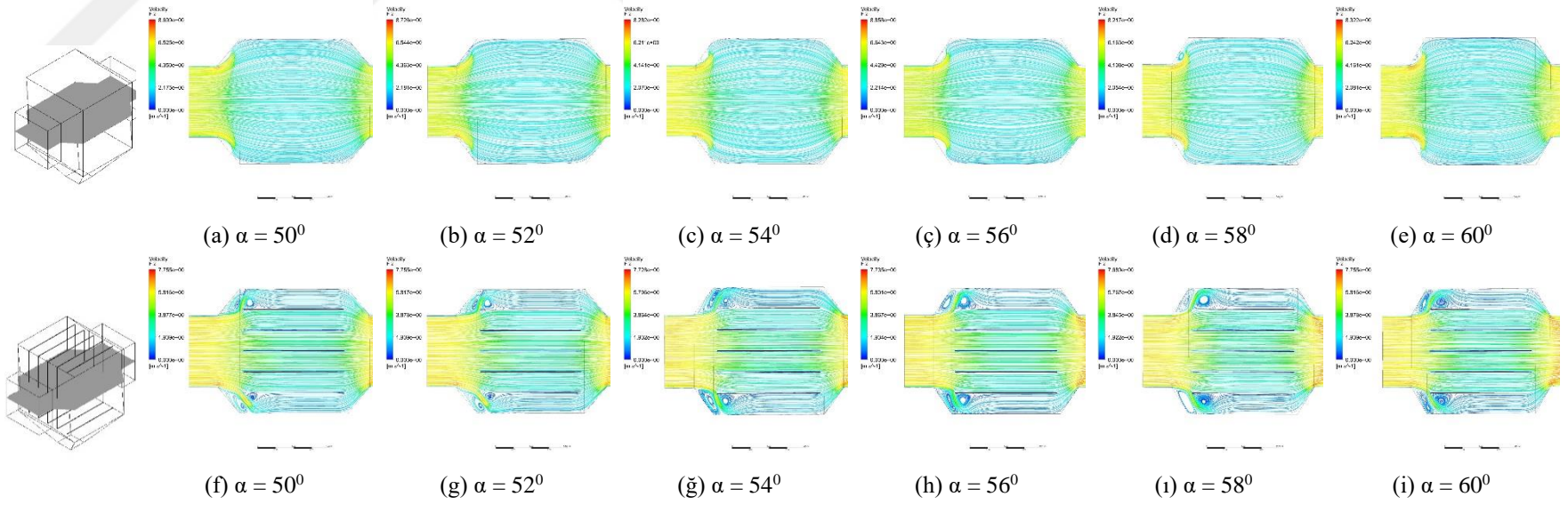
Birinci grup modellerin sonuçlarını değerlendirmek için örnek olması amacıyla yaklaşma hızı 6 m/s, gaz debisi 6 m<sup>3</sup>/s ve gazın ESC içerisinde bekletme süresi 0.75 s olan Model-1 ile Model-12 arasındaki modellerin hız ve basınç gibi parametrelerin değişimleri ESC'nin orta bölmesine yerleştirilen bir düzlem ile gösterilmiştir. Bu modellerin ESC giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri sırasıyla; 50°, 52°, 54°, 56°, 58° ve 60° ve plakalı/plakasız olarak tasarlanan modellerin akış görselleri Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir. Belirtilen modellerin basınç konturları Şekil 4.6'da, hız konturları Şekil 4.7'de ve akım çizgisi konturları Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.6 incelendiğinde plakaların varlığı sistemin genel basınç azalsa da plakalar arasında daralmaya bağlı olarak basınç farkı değerlerinde bir artış söz konusu olduğu söylenebilir. Şekil 4.7 incelendiğinde plakaların yerleştirilmesiyle ESC'nin kenarlarında hızın çok fazla azaldığı ve plakaların orta kısımlarında ise hızın arttığı görülmektedir. Kenarlarındaki hızın çok fazla azalması Şekil 4.8'deki ESC'lerin konik kısımların köşelerindeki vortekslerin oluşmasına ve düzgün gaz akışının sağlanamamasına neden olmaktadır. Şekil 4.8 incelendiğinde plakalı ESC'lerin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı tüm açı değerlerinde vortekslerin oluştuğu görülmektedir. Bu çalışmanın temel hedeflerinden biri konik kısımların köşelerindeki vortekslerin azaltılması ve ESC içerisinde düzgün gaz akışının sağlanabilmesidir. ESC'ler de toz toplama verimine etki eden parametrelerden biri de ESC içerisindeki düzgün gaz akışıdır. Tasarımlarda değiştirilen parametrelerin ESC'lerin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerlerine olan etkisi birinci grup model değerlendirilmelerinde anlaşılammış ve ikinci grup modellerin tasarlanıp analizlerin yapılmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.6. EŞÇ orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 1-12)



Şekil 4.7. EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 1-12)

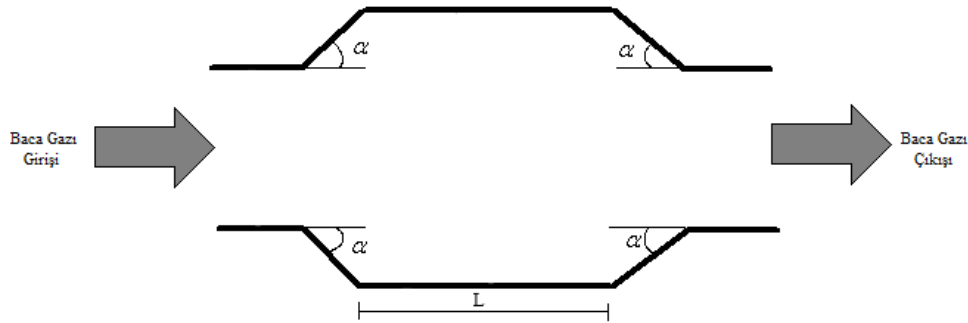


Şekil 4.8. EŞÇ orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 1-12)

Birinci grup model tasarımlarının analiz sonuçlarını özetleyecek olursak; hızın, debinin ve bekletme süresinin artmasıyla basınç farkı ve basınç kayıp katsayısı değerlerinin arttığı görülmüştür. Ancak bu artışın sebebini birinci gruptaki modellere bakıp anlayamayız. Artışın sebebi ya yaklaşma hızının artmasından ya gaz debisinin artmasından ya da bekletme süresinin artmasından kaynaklanıyor olabilir. Bu değişimin sebebini anlayabilmek için ikinci grup model tasarım analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Birinci grup modellerde plakalı ve plakasız olan modeller karşılaştırıldığında (düşük hız ve düşük debi değerlerindeki) plakasız modellerde basınç düşüşünün yüksek olduğu görülmüştür. ESC içerisine plakaların yerleştirilmesiyle düzgün gaz akışı oluşmakta ve bu sayede basınç kayıp katsayısının da azaldığı görülmektedir. ESC içerisindeki basınç farkı ve hız değerlerinin plakalı modellerde daha homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Akım çizgisi konturları incelendiğinde düşük hız, düşük debi ve düşük bekletme süresi değerlerine sahip ESC'lerin, konik kısımların köşelerindeki vorteks oluşumunda artışa neden olduğu görülmektedir. Bu grup modellerdeki toz toplama plakaların varlığı sistemin genel basınç değeri azalsa da plakalar arasında daralmaya bağlı olarak basınç farkı değerlerinde bir artışın söz konusu olduğu söylenebilir. ESC içerisine toz toplama plakaların yerleştirilmesiyle ESC'nin kenarlarında hızın çok fazla azaldığı ve plakaların orta kısımlarında ise hızın arttığı görülmektedir. Kenarlarındaki hızın çok fazla azalması ESC'lerin konik kısımlarının köşelerindeki vortekslerin oluşmasına ve düzgün gaz akışının sağlanamamasına neden olmaktadır. Düşük hız, düşük debi ve düşük bekletme süresindeki model tasarımlarındaki plakalı ESC'lerin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı tüm açı değerlerinde vortekslerin oluştuğu görülmüştür. Tasarımlarda değiştirilen parametrelerin ESC'lerin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerlerine olan etkisi birinci grup model değerlendirilmelerinde anlaşılammış ve ikinci grup modellerin tasarlanıp analizlerin yapılmasına karar verilmiştir.

#### 4.1.2. İkinci Grup Model Değerlendirmesi

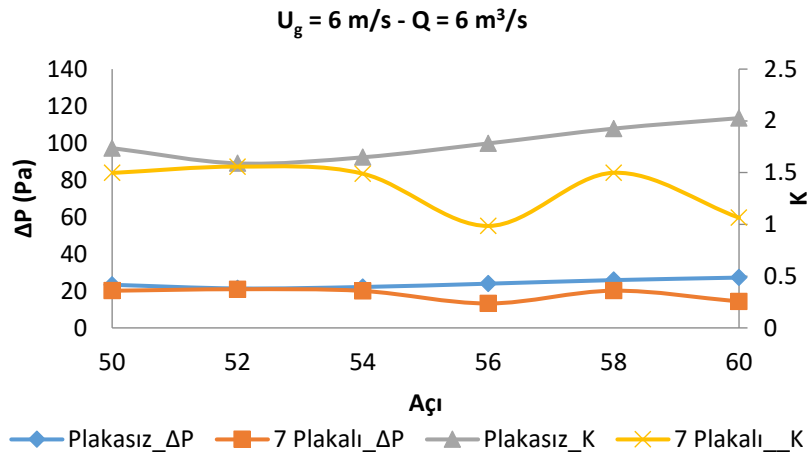
İkinci grup ESC model tasarımlarında gazın toz toplama bölümündeki bekletme süresinin değişimiyle basınç kaybına olan etkilerinin görülebilmesi için yapılmıştır. İkinci grupta tasarlanan ESC'lerin yaklaşma hızları, gaz debileri, giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri, plaka sayıları ve ESC boyutları değişken olarak alınmıştır. Bu grupta tasarlanan modellerin birinci grupta tasarlanan ESC'lerden farkı ESC toz toplama bölümündeki gazın bekletme süresinin sabit alınmasıdır. ESC'nin toz toplama bölümündeki gazın bekletme süresi iç hıza ve ESC'nin toz toplama bölümünün uzunluğuna bağlıdır. İç hız 2 m/s olarak sabit alındığında bekletme süresinin artırılması ESC'nin toz toplama bölümünün uzunluğunun artırılması ile gerçekleştirilebilmektedir. Bundan dolayı ikinci grup model tasarımlarında kirli gazın ESC içerisindeki bekletme süresi 1 s olacak şekilde tasarlanabilmesi için ESC'nin toz toplama bölümünün uzunluğu 200 cm alınmıştır. Şekil 4.9'da toz toplama bölümündeki gazın bekletme süresinin sabit alınabilmesi için ESC'nin toz toplama bölümündeki sabit alınan ESC uzunluğu belirtilmiştir.



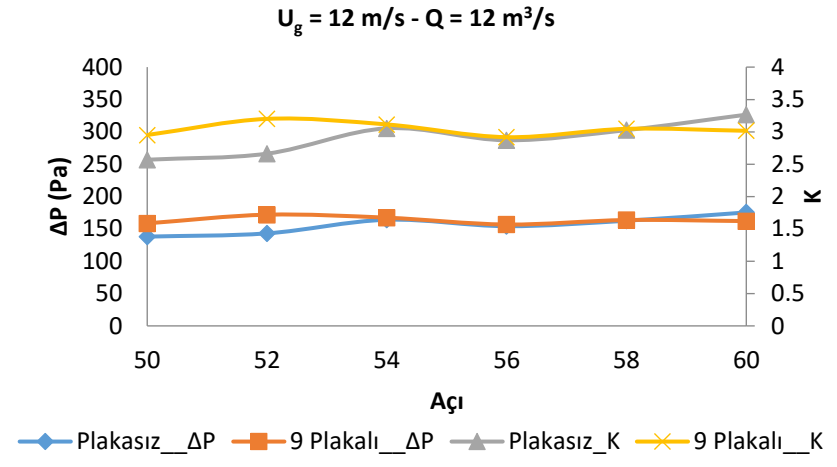
Şekil 4.9. İkinci grup ESC modellerin sabit bekletme süresi tasarımı ( $\tau = 1 \text{ s} \cdot L = 2 \text{ m}$ )

İkinci grupta tasarlanan ESC'lerin yaklaşma hızları sırasıyla; 6 m/s, 12 m/s, 18 m/s ve 24 m/s, gaz debileri sırasıyla; 6 m<sup>3</sup>/s, 12 m<sup>3</sup>/s, 18 m<sup>3</sup>/s, 24 m<sup>3</sup>/s, ESC içerisinde baca gazı bekletme süreleri 1 s olarak sabit alınmış, ESC giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri sırasıyla; 50°, 52°, 54°, 56°, 58° ve 60° ve plakalı/plakasız olarak tasarlanmıştır. Model ESC'lerin içine yerleştirilen plaka sayıları farklı gaz debilerine göre 7, 9, 11 ve 13 adet olacak şekilde plakalar yerleştirilmiştir. Model ESC'lerin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açıya göre (50°, 52°, 54°, 56°, 58° ve 60°) seçilen konik açı değerleri için farklı geometriler oluşturulmuştur. Bu sayede oluşturulan geometrilerin ESC içinde minimum basınç düşmesine neden olan açı bulunmaya çalışılmıştır. Ayrıca model ESC'lerin girişindeki

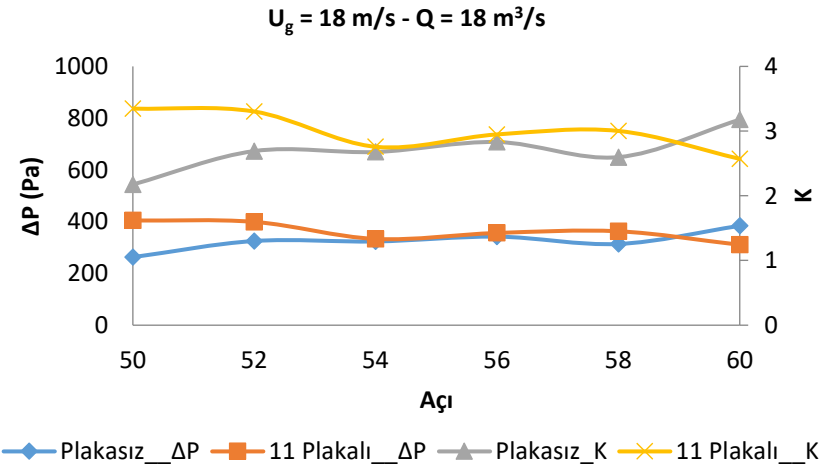
debi, yaklaşma hızı ve ESC içerisindeki gazın bekletme süresi sabit tutularak söz konusu ESC'nin içerisine plakalar yerleştirilerek ve yerleştirilmeden modeller oluşturulmuştur. Yerleştirilen plakalar için uygun giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı, yaklaşma hızı ve gaz debisi parametrelerinin basınç farkı ve basınç kayıp katsayısı gibi verime etki eden değişken değişimlerinin değerleri hesaplanıp değerlendirilmiştir. Bu amaçla, farklı yaklaşma hızı ve gaz debisine sahip ESC'lerin giriş ve çıkış bölümlerindeki değişen açının model tasarımları için basınç kayıp katsayılarının değerleri Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.10 (a) incelendiğinde düşük hız ve düşük debi değerlerinde giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerlerinin artması ile basınç farkı değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Düşük hız ve düşük debi değerlerindeki plakalı ve plakasız olan modeller karşılaştırıldığında plakasız modellerde basınç düşüşünün yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun sebebi ESC içerisine plakaların yerleştirilmesiyle düzgün gaz akışının oluşması ile açıklanabilmektedir.



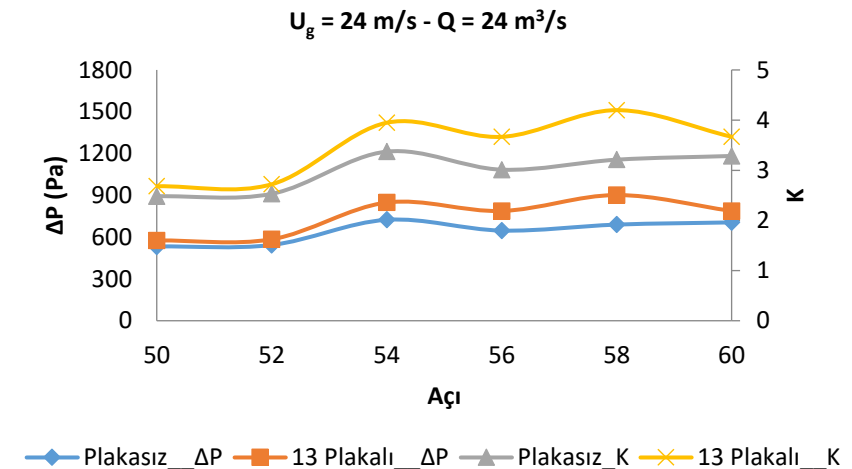
(a)



(b)



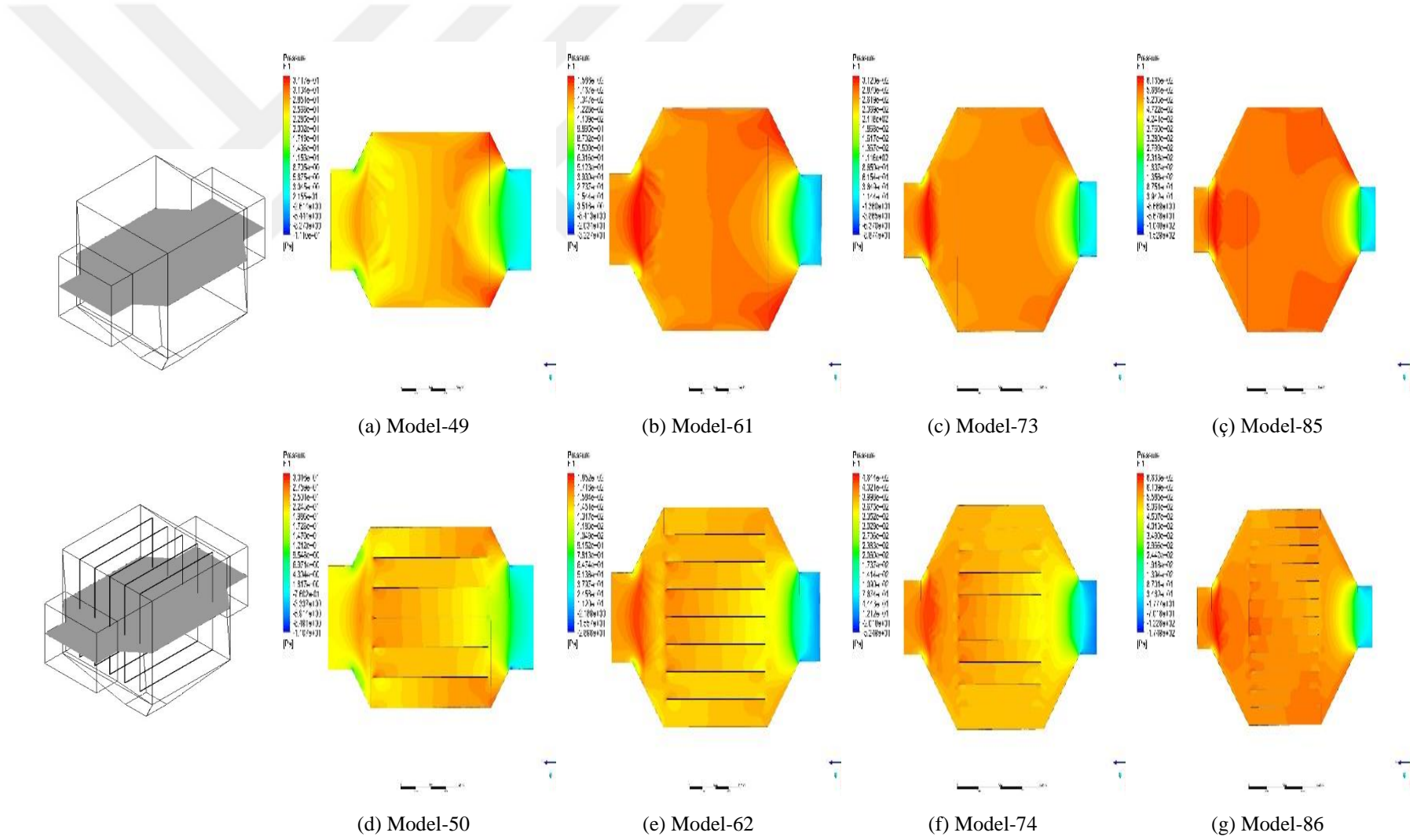
(c)



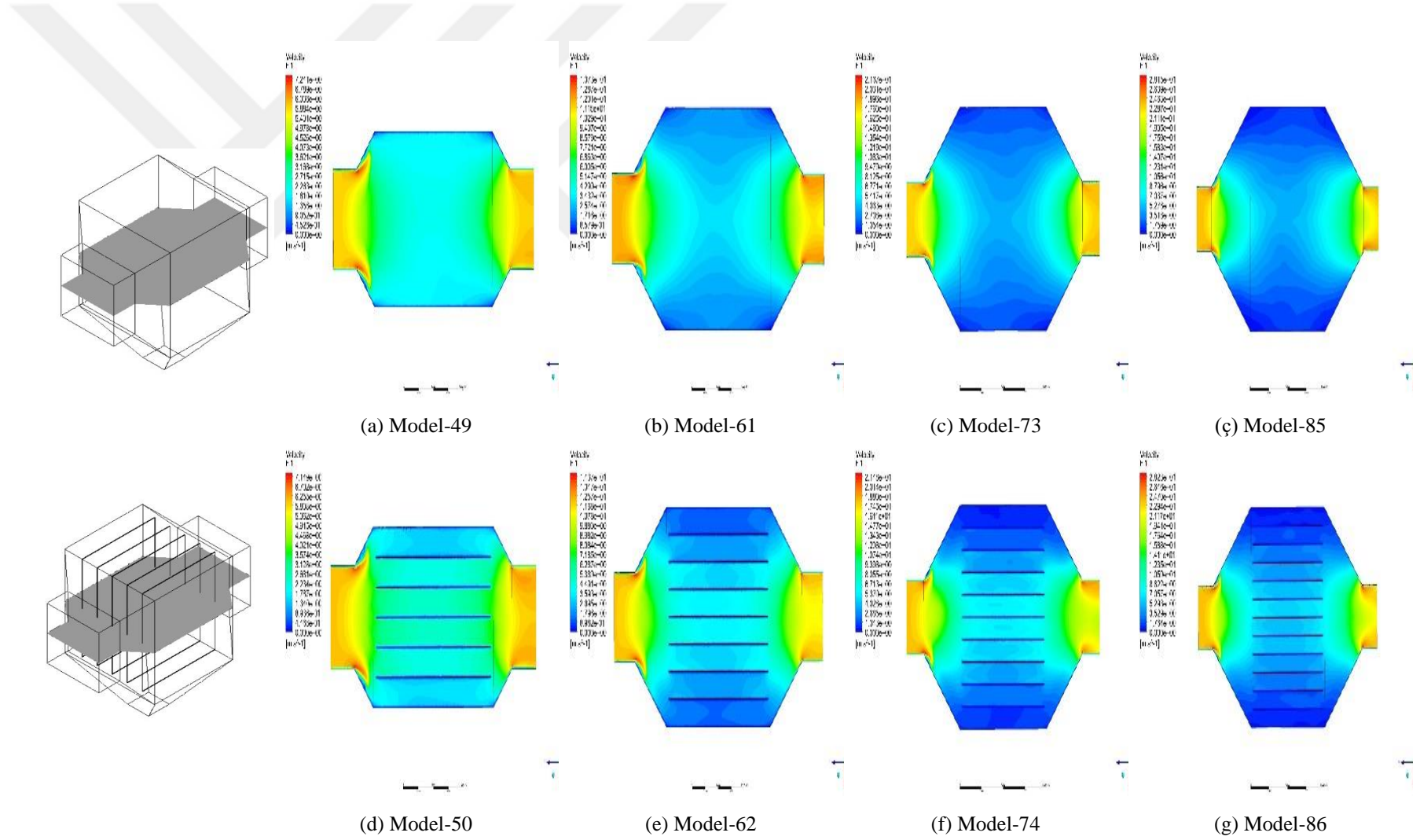
(d)

Şekil 4.10. İkinci grup EŞÇ modellerin farklı açı değerlerine göre basınç farkı ve basınç düşüş katsayıları (Model 49-96)

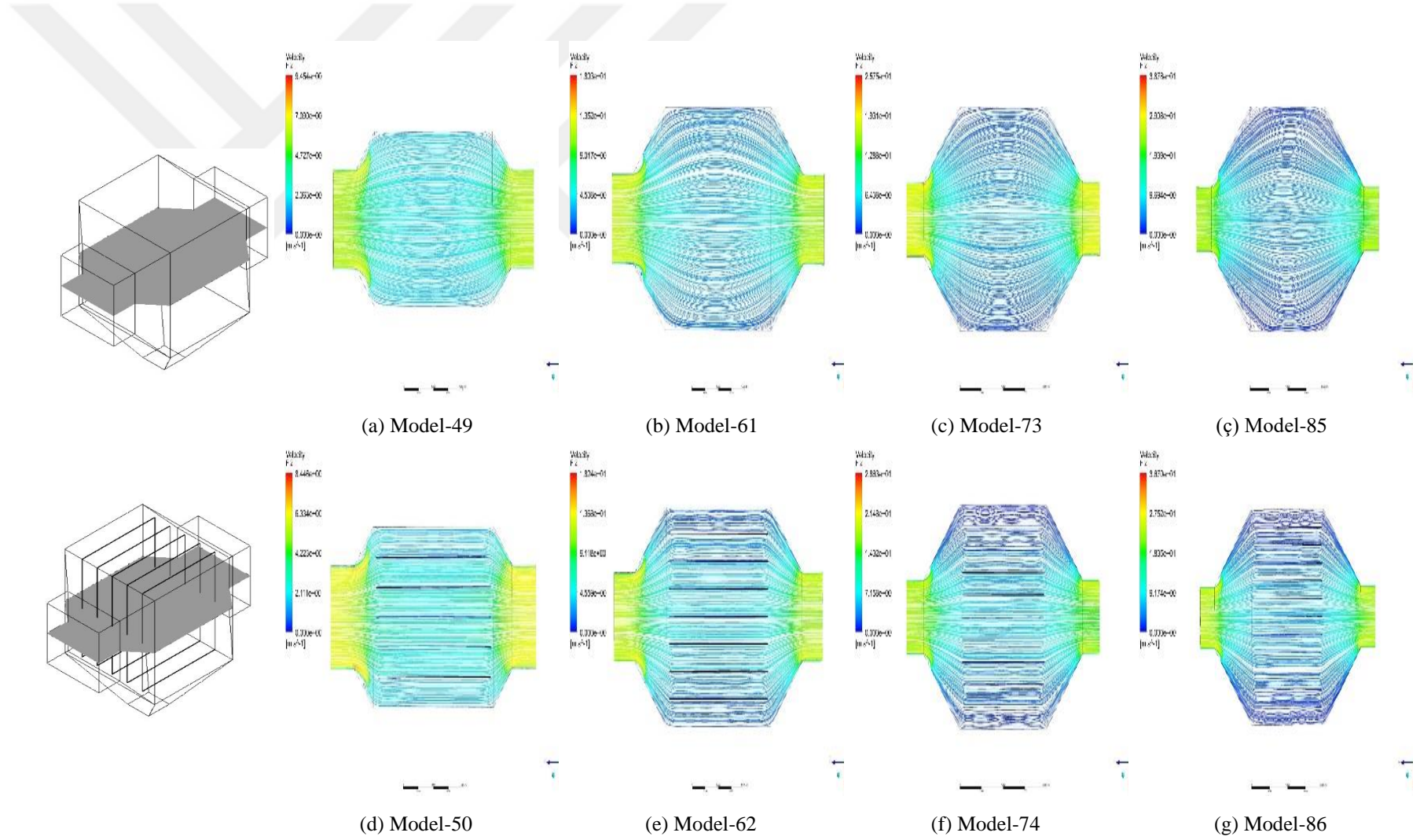
Tasarlanan model ESC'lerin hız ve basınç farkı gibi değişimleri görüntülemek için ESC içerisindeki orta bölmeye bir düzlem yerleştirilmiştir (Şekil 4.2). ESC'nin farklı yaklaşma hızlarında ve farklı debilerde tasarlanan modellerin sonuçlarını değerlendirmek için örnek olması amacıyla ESC'nin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı 50°'lik açı değerlerindeki HAD analiz sonuçlarının akış görselleri Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te verilmiştir. Belirtilen modellerin basınç konturları Şekil 4.11'de, hız konturları Şekil 4.12'de ve akım çizgisi konturları Şekil 4.13'te verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde ESC içerisindeki basınç farkı ve hız değerlerinin plakalı modellerde daha homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Ancak bu grupta Şekil 4.11 (a) ve Şekil 4.11 (d)'den Şekil 4.11 (ç) ve Şekil 4.11 (g)'ye basınç değerlerindeki artışın sebebi ikinci gruptaki modellere bakıp anlayamamıştır. Çünkü bu artışın sebebi ya yaklaşma hızının artmasından ya da gaz debisinin artmasından kaynaklanıyor olabilir. Bu değişimin sebebini anlayabilmek için üçüncü grup analizler gerçekleştirilmiştir. İkinci grup analizlerde bekletme süresi ve yaklaşma hızı sabit alınarak, gaz debisi değişken olarak alınmıştır. Birinci gruptaki Şekil 4.5 (d) ile ikinci gruptaki Şekil 4.13 (d) incelenecek olursa buradaki akım çizgileri düşük yaklaşma hızı ve düşük gaz debisine sahip modellerin konik kısımlarının köşelerindeki vorteks oluşumu hala söz konusu olduğu görülmektedir. Ancak bekletme süresinin artması ile vorteks oluşumuna ve verime olan etkiler anlayamamıştır. Bu yüzden farklı bekletme süresindeki etkileri gözlemlemek için beşinci grup model tasarımları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.11. İkinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $\alpha = 50^0$  (Model 49-96)

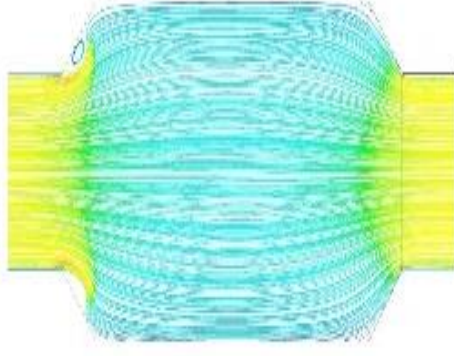


Şekil 4.12. İkinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $\alpha = 50^\circ$  (Model 49-96)

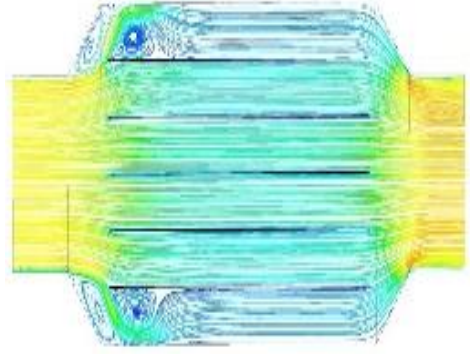


Şekil 4.13. İkinci grup ESC orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $\alpha = 50^\circ$  (Model 49-96)

İkinci grup modellerin sonuçlarını değerlendirmek için örnek olması amacıyla yaklaşma hızı 6 m/s, gaz debisi 6 m<sup>3</sup>/s ve gazın ESC içerisinde bekletme süresi 1 s olan Model-49 ile Model-60 arasındaki modellerin hız ve basınç gibi parametrelerin değişimleri ESC'nin orta bölmesine yerleştirilen bir düzlem ile gösterilmiştir. Bu modellerin ESC giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri sırasıyla; 50°, 52°, 54°, 56°, 58° ve 60° ve plakalı/plakasız olarak tasarlanan modellerin akış görselleri Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir. Belirtilen modellerin basınç konturları Şekil 4.15'te, hız konturları Şekil 4.16'da ve akım çizgisi konturları Şekil 4.17'de verilmiştir. Şekil 4.15 incelendiğinde birinci grupta olduğu gibi plakaların varlığı sistemin genel basınç değerini düşürse de plakalar arasında daralmaya bağlı olarak basınç düşüşü değerlerinde bir artışın söz konusu olduğu söylenebilir. Şekil 4.16 incelendiğinde yine aynı şekilde birinci grupta olduğu gibi plakaların yerleştirilmesiyle ESC'nin kenarlarında hızın çok fazla azaldığı ve plakaların orta kısımlarında ise hızın arttığı görülmektedir. ESC'nin kenarlarındaki hızın çok fazla azalması Şekil 4.17 (h)'deki Şekil 4.17 (i)'deki modellerde daha belirgin olarak ESC'nin konik kısımlarının köşelerindeki vortekslerin oluştuğu ve düzgün gaz akışının sağlanamadığı görülmektedir. Şekil 4.17 incelendiğinde plakalı ESC'lerin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı 56°'lik (Model-56) ve 58°'lik (Model-58) açı değerlerinde vortekslerin daha fazla oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.14'deki gibi plakalı (Model-55) ve plakasız (Model-56) ESC modelleri karşılaştırıldığında plakaların varlığı toz toplama bölümünün konik kısımlardaki vorteksi artırmaktadır. İkinci grup tasarımında farklı yaklaşma hızı ve farklı gaz debisi değerlerinde tasarlanan modeller olduğu için ESC'nin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerlerine olan etkisi birinci grup modellerde olduğu gibi ikinci grup model değerlendirmelerinde de anlaşılamamış ve üçüncü grup modellerin tasarlanıp analizlerin yapılmasına karar verilmiştir.



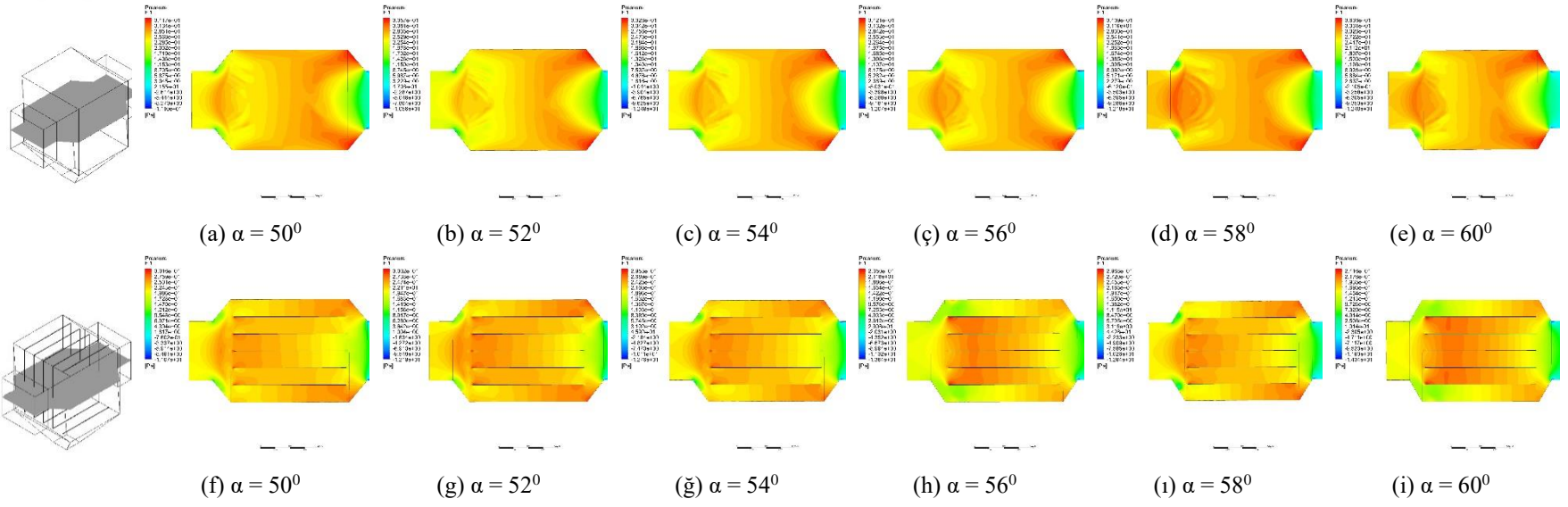
(a) Model-55



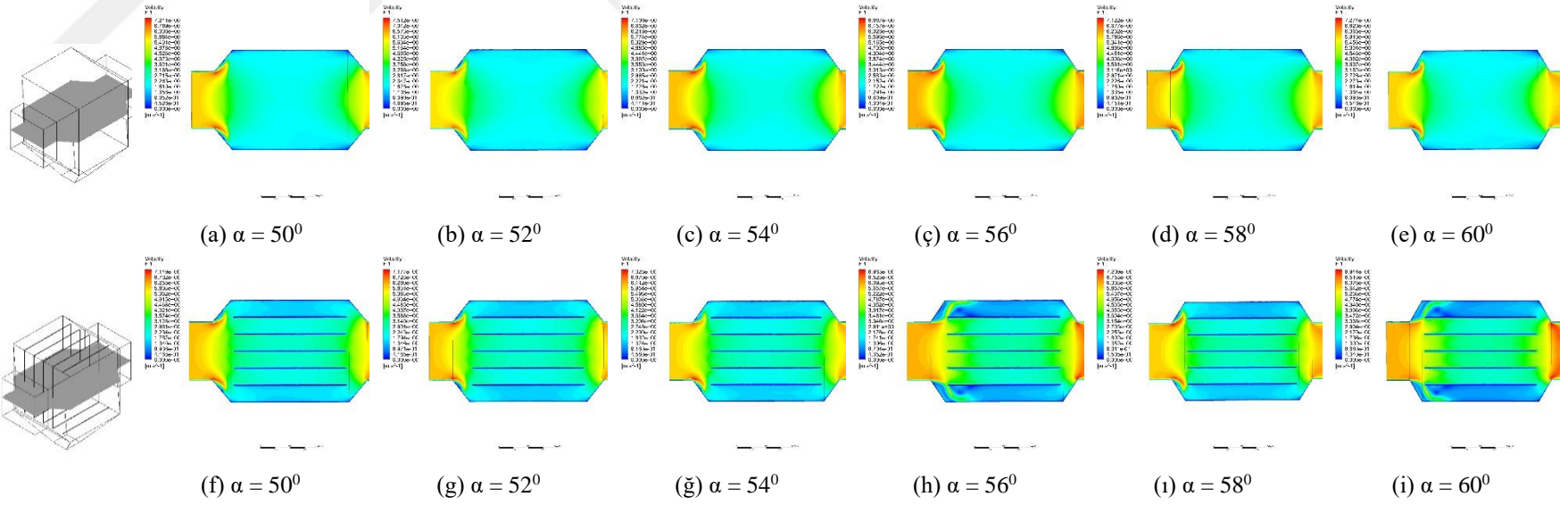
(b) Model-56

Şekil 4.14. İkinci grup plakalı/plakasız ESC'lerin orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları-  $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\alpha = 56^\circ$





Şekil 4.15. ESC orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 49-60)



(a)  $\alpha = 50^\circ$

(b)  $\alpha = 52^\circ$

(c)  $\alpha = 54^\circ$

(ç)  $\alpha = 56^\circ$

(d)  $\alpha = 58^\circ$

(e)  $\alpha = 60^\circ$

(f)  $\alpha = 50^\circ$

(g)  $\alpha = 52^\circ$

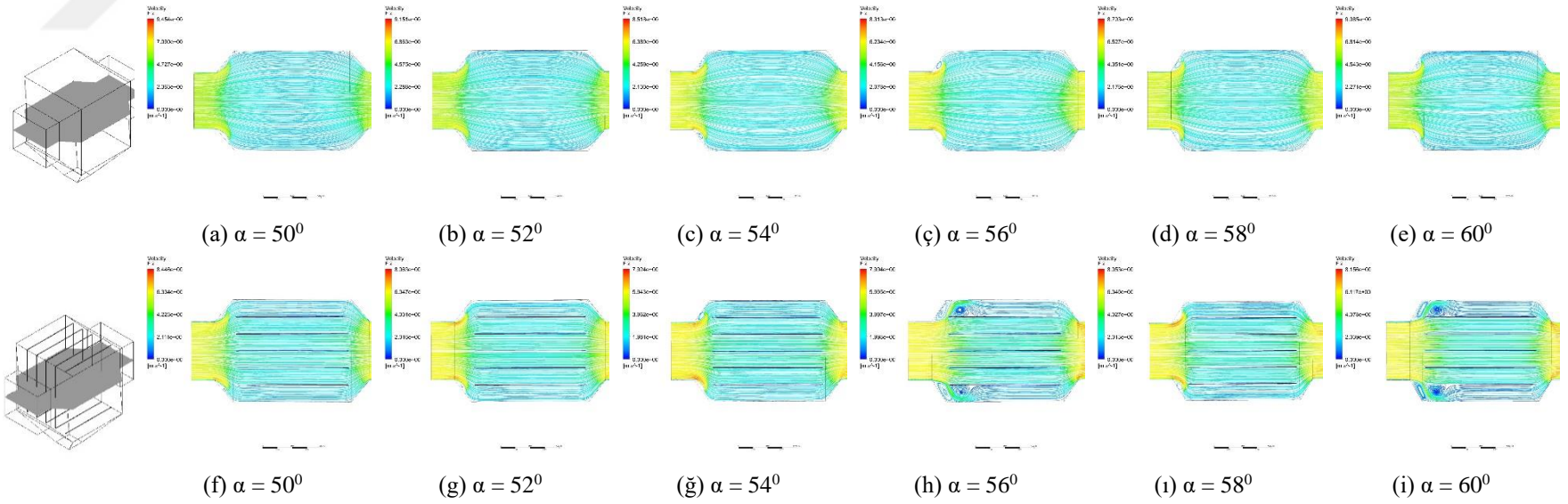
(ğ)  $\alpha = 54^\circ$

(h)  $\alpha = 56^\circ$

(ı)  $\alpha = 58^\circ$

(i)  $\alpha = 60^\circ$

Şekil 4.16. EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 49-60)

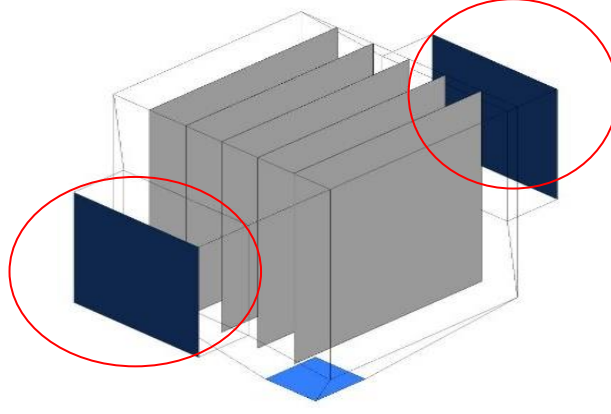


Şekil 4.17. ESÇ orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 49-60)

İkinci grup model tasarımlarının analiz sonuçları özetlenecek olursa hızın ve debinin artmasıyla basınç farkı değerlerinin ve basınç kayıp katsayısı değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu artışın sebebini birinci gruptaki modellerde olduğu gibi ikinci gruptaki modellere de bakıp anlayamayız. Bu artışın sebebi ya yaklaşma hızının artmasından ya da gaz debisinin artmasından kaynaklanmaktadır. Bu değişimin sebebini anlayabilmek için üçüncü grup model tasarımlarının analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. İkinci grup modellerde plakalı ve plakasız olan düşük hız ve düşük debi değerlerindeki modeller karşılaştırıldığında plakasız modellerde basınç düşüşünün yüksek olduğu görülmüştür. ESC içerisinde plakaların yerleştirilmesiyle düzgün gaz akışının oluşmasına neden olduğu görülmektedir. ESC içerisindeki basınç farkı ve hız değerlerinin plakalı modellerde daha homojen olarak dağıldığı görülmüştür. İkinci gruptaki modellerin akım çizgisi konturları incelendiğinde buradaki hız değerleri birinci gruptaki modellerde olduğu gibi düşük hız ve düşük gaz debisi değerlerine sahip ESC'lerin konik kısımlarındaki köşelerde vorteks oluşumu hala söz konusudur. Ancak bekletme süresinin artmasıyla vorteks oluşumunun azaldığı söylenebilir. Farklı bekletme süresindeki etkileri gözlemlemek için beşinci grup model tasarımları gerçekleştirilmiştir. Birinci grupta olduğu gibi ikinci gruptaki modellerin toz toplama plakalarının varlığı sistemin genel basınç değerini düşürse de plakalar arasında daralmaya bağlı olarak basınç düşüşü değerlerinde bir artışın olduğu söz konusudur. Yine aynı şekilde birinci grupta olduğu gibi ESC içerisinde toz toplama plakalarının yerleştirilmesiyle ESC kenarlarındaki hızın çok fazla azaldığı ve plakaların orta kısımlarında ise hızın arttığı görülmektedir. ESC'nin kenarlarındaki hızın çok fazla azalması ESC'lerin konik kısımların köşelerindeki vortekslerin oluşmasına ve düzgün gaz akışının sağlanamamasına neden olmaktadır. İkinci grup modellerdeki plakalı ESC'lerin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı 56°'lik (Model-56) ve 58°'lik (Model-58) açı değerlerinde vortekslerin daha fazla oluştuğu görülmektedir. İkinci grup tasarımında farklı yaklaşma hızı ve farklı gaz debisi değerlerinde tasarlanan modeller olduğu için ESC'nin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerlerine olan etkisi birinci grup modellerde olduğu gibi ikinci grup model değerlendirilmelerinde de anlaşılammış ve üçüncü grup modellerin tasarlanıp analizlerin yapılmasına karar verilmiştir.

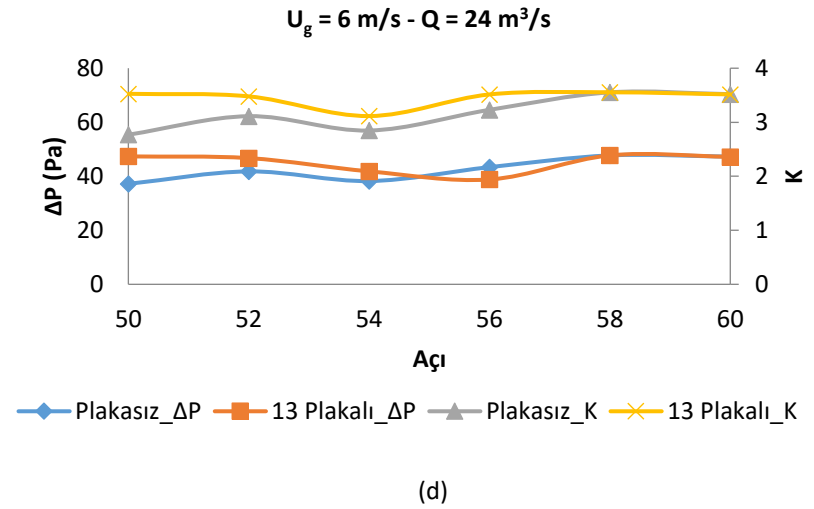
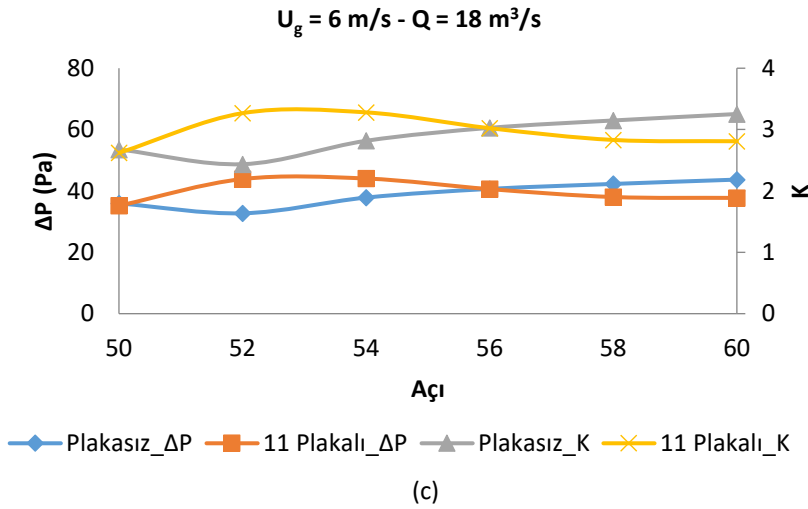
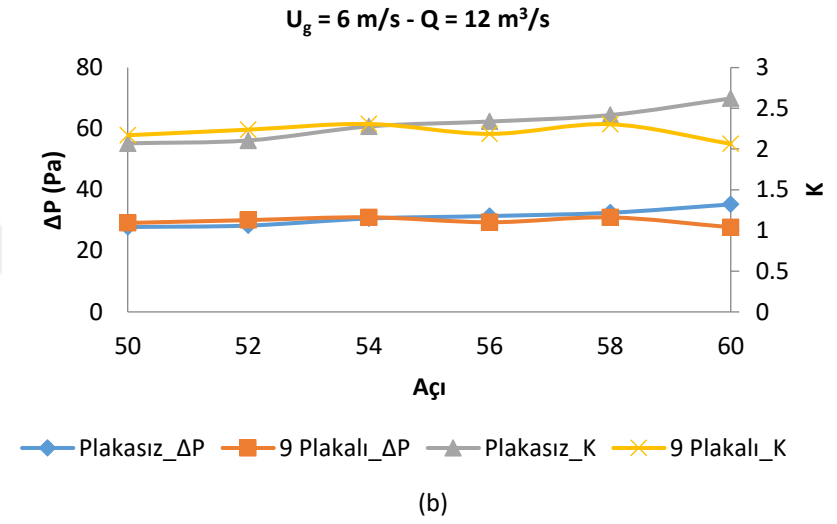
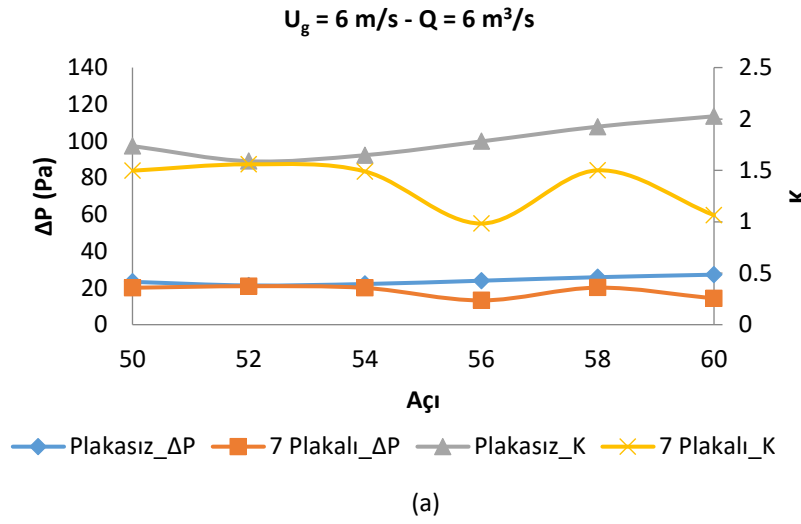
### 4.1.3. Üçüncü Grup Model Değerlendirmesi

Üçüncü grup ESC model tasarımlarında ESC'nin yana doğru genişlemesinin ve ESC giriş kanal boyutlarının artırılmasının basınç kaybına olan etkisini görebilmek için yapılmıştır. Üçüncü grupta tasarlanan ESC'de gaz debileri, giriş/çıkış kanal boyutu, giriş/çıkış konik kısımlarının yatayla yaptığı açı değerleri, plaka sayıları ve ESC boyutları değişken, fakat gazın bekletme süresi ve yaklaşma hızı sabit alınmıştır. ESC model tasarımında gaz debisi, giriş kanal boyutunun, ESC toz toplama bölümünün boyutlarının, ESC toz toplama plaka sayısının ve toz toplama plaka boyutlarının belirlenmesinde etkilidir. Üçüncü grup ESC model tasarımlarında giriş kanal boyutlarının belirlenmesinde yaklaşma hızı ve debi kullanılmıştır. Sabit yaklaşma hızında (6 m/s) giriş kanal boyutunu belirleyecek olan faktör debidir. Debinin artması durumunda giriş kanal boyutunun artması da söz konusudur. ESC giriş ve çıkış kanalını kare biçimde farklı gaz debisine göre 1 m<sup>2</sup>, 2 m<sup>2</sup>, 3 m<sup>2</sup> ve 4 m<sup>2</sup> olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 4.18'de yaklaşma hızının sabit ve debinin artırılması durumunda farklı ESC giriş kanalı belirtilmiştir. ESC'nin toz toplama bölümü boyutlarının belirlenmesinde ESC toz toplama bölümündeki iç hız ve gaz debisi kullanılmaktadır. İç hız (2 m/s) sabit alındığına göre toz toplama bölümünün boyutlarını belirleyen parametre gaz debisi olmaktadır. Toz toplama bölümü boyutları (yükseklik ve genişlik) kare olacak şekilde 3 m<sup>2</sup>, 6 m<sup>2</sup>, 9 m<sup>2</sup> ve 12 m<sup>2</sup> olarak tasarlanmıştır. Gaz debisi arttığında ESC'nin toz toplama bölümünün boyutları da artmaktadır. ESC içerisindeki plaka sayısı gaz debisine, toz toplama bölümündeki iç hıza, iki plaka arasındaki mesafeye (30 cm) ve ESC'nin toz toplama bölümünün yüksekliğine bağlıdır. Tüm modeller için ESC'nin iki toplama plakası arasındaki mesafe 30 cm alınmıştır. Bu durumda iki toplama plakası arasındaki mesafe ve iç hız sabit, ESC'nin toz toplama bölümünün yüksekliği de gaz debisine bağlı olduğuna göre toz toplama plaka sayısının belirlenmesi gaz debisine bağlı olarak değişmektedir. ESC toz toplama plaka boyutları da ESC'nin toz toplama bölümünün boyutlarına eşit olacak şekilde tasarlanmıştır. Model ESC'lerin içine yerleştirilen plaka sayıları farklı gaz debilerine göre 7, 9, 11 ve 13 adet olacak şekilde plakalar yerleştirilmiştir.



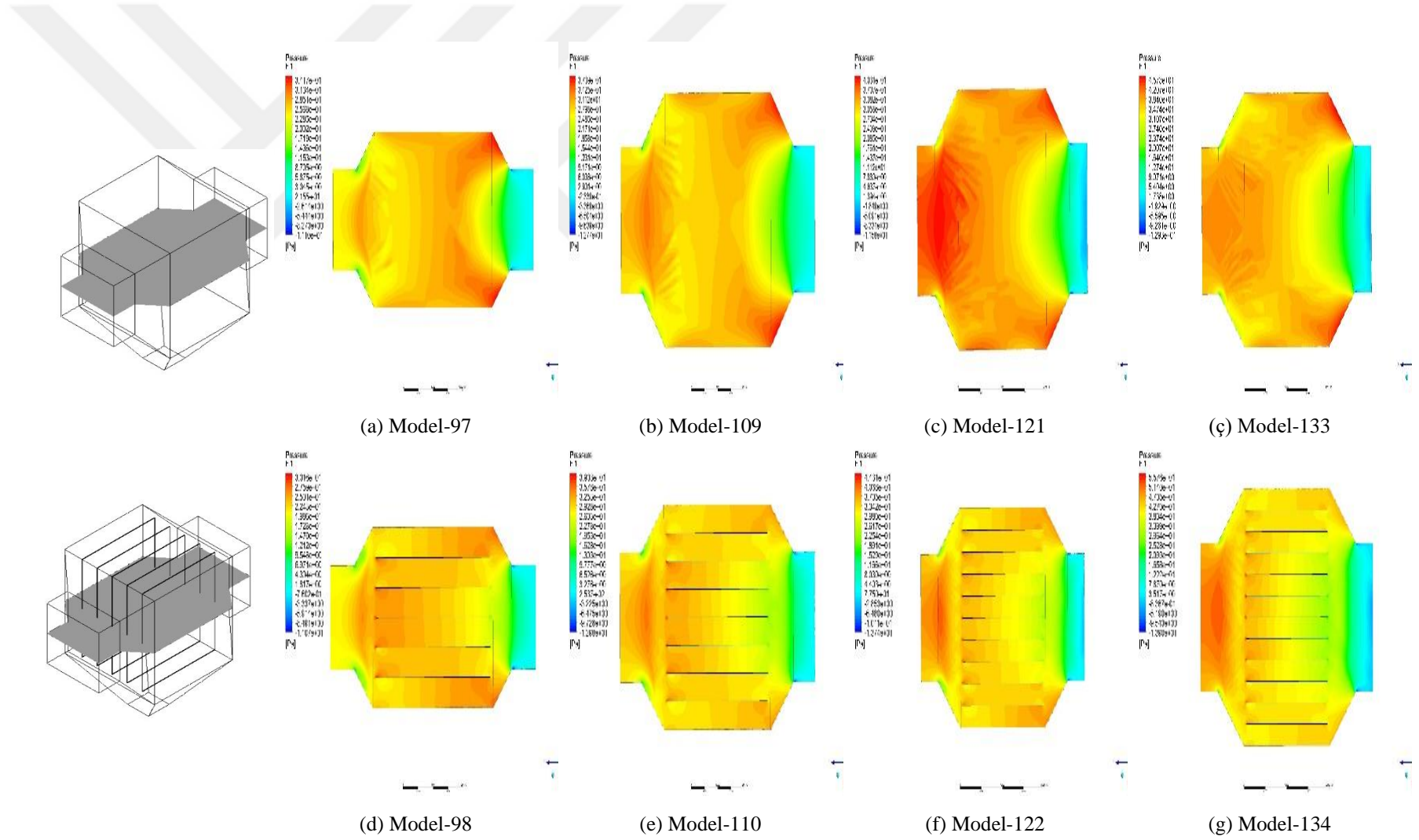
Şekil 4.18. Üçüncü grup ESC modellerindeki giriş yapılarının boyutlarının değiştirilmesi ( $\tau = 1$  s,  $U_g = 6$  m/s)

Üçüncü grupta tasarlanan ESC'lerin gaz debileri  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $18 \text{ m}^3/\text{s}$  ve  $24 \text{ m}^3/\text{s}$ , yaklaşma hızı  $6 \text{ m/s}$ , ESC içerisinde baca gazı bekletme süresi  $1 \text{ s}$ , ESC giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri sırasıyla;  $50^\circ$ ,  $52^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $56^\circ$ ,  $58^\circ$  ve  $60^\circ$  ve plakalı/plakasız olarak tasarlanmıştır. Model ESC'lerin içine yerleştirilen plaka sayıları farklı gaz debilerine göre 7, 9, 11 ve 13 adet olacak şekilde plakalar yerleştirilmiştir. Ayrıca bu gruptaki modellerin giriş yapıları da sabit debide yaklaşma hızlarına göre hesaplanmış ve sırasıyla,  $1 \text{ m}^2$ ,  $2 \text{ m}^2$ ,  $3 \text{ m}^2$  ve  $4 \text{ m}^2$  olacak şekilde tasarlanmıştır. Model ESC'lerin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açıya göre ( $\alpha = 50^\circ$ ,  $52^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $56^\circ$ ,  $58^\circ$  ve  $60^\circ$ ) seçilen konik açı değerleri için farklı geometriler oluşturulmuştur. Bu sayede oluşturulan geometrilerin ESC içinde basınç düşmesine neden olan açı bulunmaya çalışılmıştır. Ayrıca model ESC'lerin farklı gaz debisinde yaklaşma hızını sabit tutularak söz konusu ESC'nin içerisine plakalar yerleştirip ve yerleştirilmeden modeller oluşturulmuştur. Yerleştirilen plakalar için uygun giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı ve gaz debisinin basınç farkı ve basınç kayıp katsayısı gibi verime etki eden parametrelerin değişimlerinin değerleri hesaplanmıştır. Bu amaçla, farklı gaz debisine sahip ESC'lerin giriş ve çıkış bölümündeki konik kısmın yatayla yaptığı farklı açı model tasarımları için basınç kayıp katsayılarının değerleri Şekli 4.19'da verilmiştir. Bu modellerde koniklik açısının artması ile basınç farkı değerlerinde az da olsa bir artış olduğu görülmüştür. Genel anlamda model sonuçları değerlendirildiğinde giriş ağız bölümünün ve ESC toz toplama boyutlarının gaz debisiyle artmasının basınç farkı değerlerinde bir artışa neden olmadığı görülmektedir. İkinci grup ve üçüncü grup modeller karşılaştırıldığında ise ESC model tasarımlarının basınç farkı etkilerinde debiden daha çok yaklaşma hızının daha fazla etkili olduğu görülmüştür.

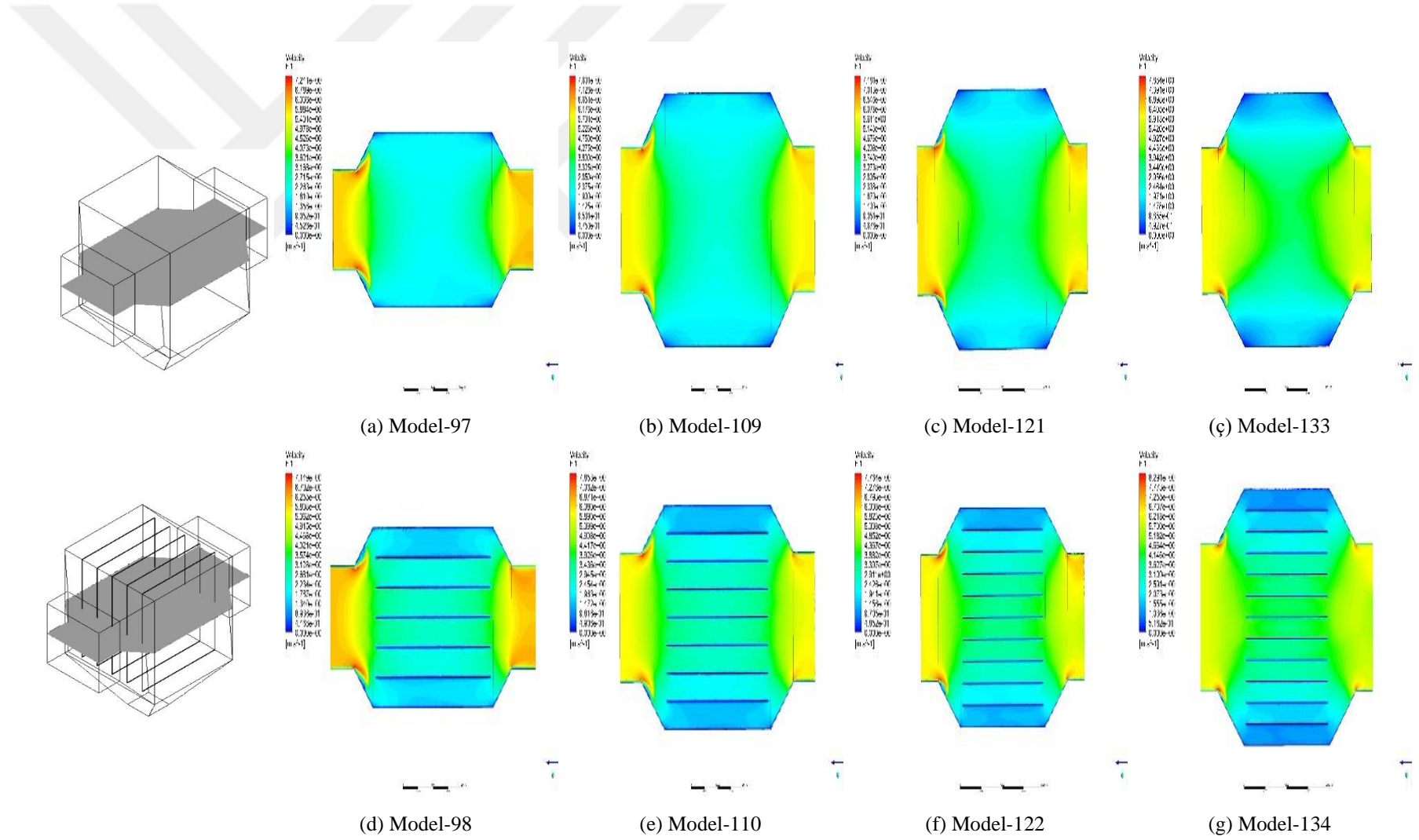


Şekil 4.19. Üçüncü grup ESÇ modellerin farklı açı değerlerine göre basınç farkı ve basınç düşüş katsayıları (Model 97-144)

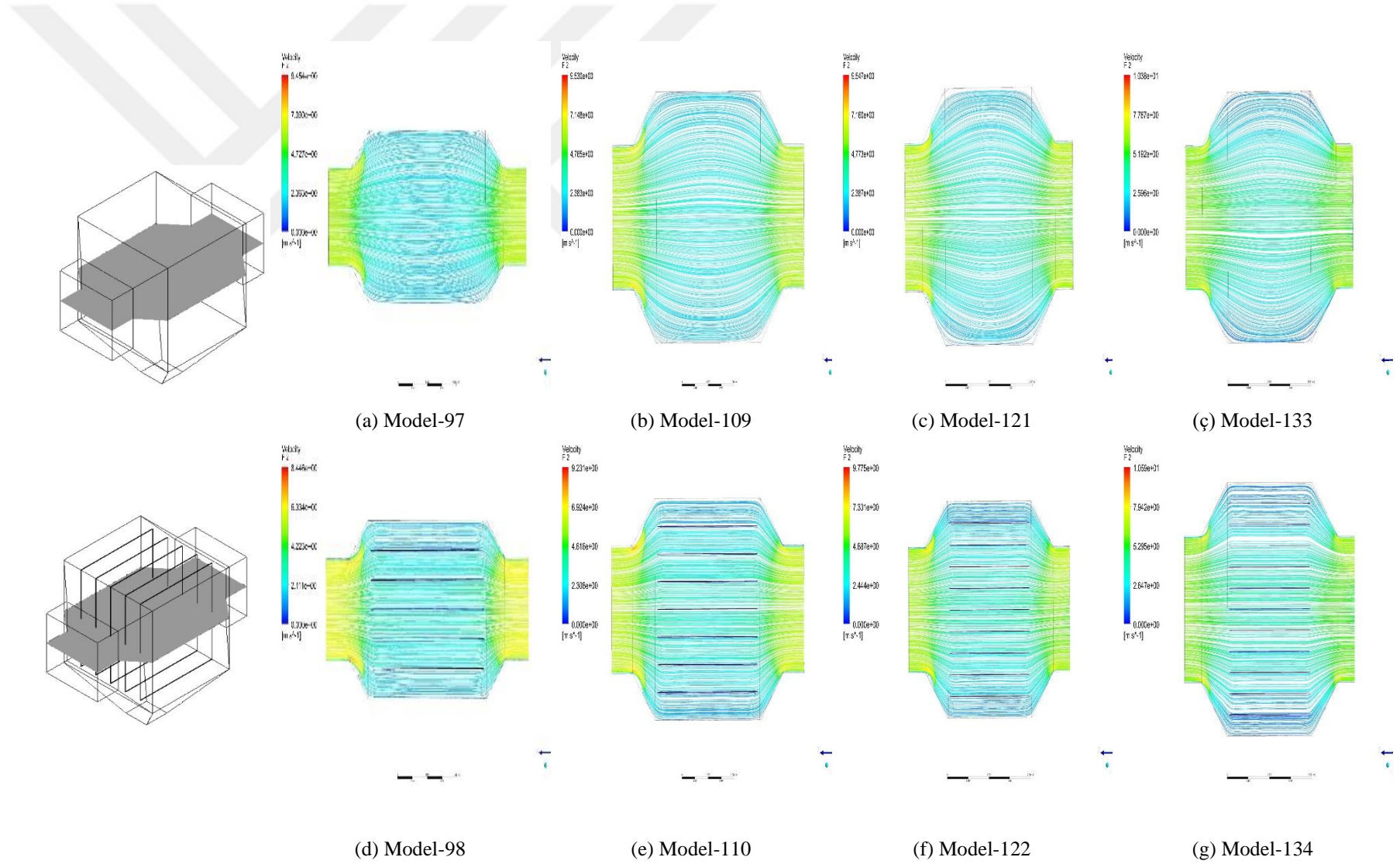
Üçüncü grup tasarlanan model ESC'lerin hız ve basınç farkı gibi değişimleri görüntülemek için ESC içerisindeki orta bölmeye bir düzlem yerleştirilmiştir (Şekil 4.2). ESC'nin farklı debilerde tasarlanan model sonuçlarını değerlendirmek için örnek olması amacıyla ESC'nin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı 50<sup>0</sup>'lik açı değerlerindeki HAD analiz sonuçlarının akış görselleri Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de verilmiştir. Belirtilen modellerin basınç konturları Şekil 4.20'de, hız konturları Şekil 4.21'de ve akım çizgisi konturları Şekil 4.22'de verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde ESC içerisindeki basınç farkı ve hız değerlerinin plakalı modellerde daha homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Üç grup model tasarımları incelendiğinde düşük farklarla farklı (50<sup>0</sup>-52<sup>0</sup> gibi) açı değerlerinden ziyade yüksek farklarla farklı (20<sup>0</sup>-30<sup>0</sup> gibi) açı değerlerindeki değişimi gözlemlemek açı değişimleri arasındaki farkın anlaşılmasını kolaylaştıracaktır. Bu sebepten dolayı bir sonraki bölümde anlatılacak olan dördüncü grup model tasarımları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.20. İkinci grup ESDC orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 50^\circ$  (Model 97-144)

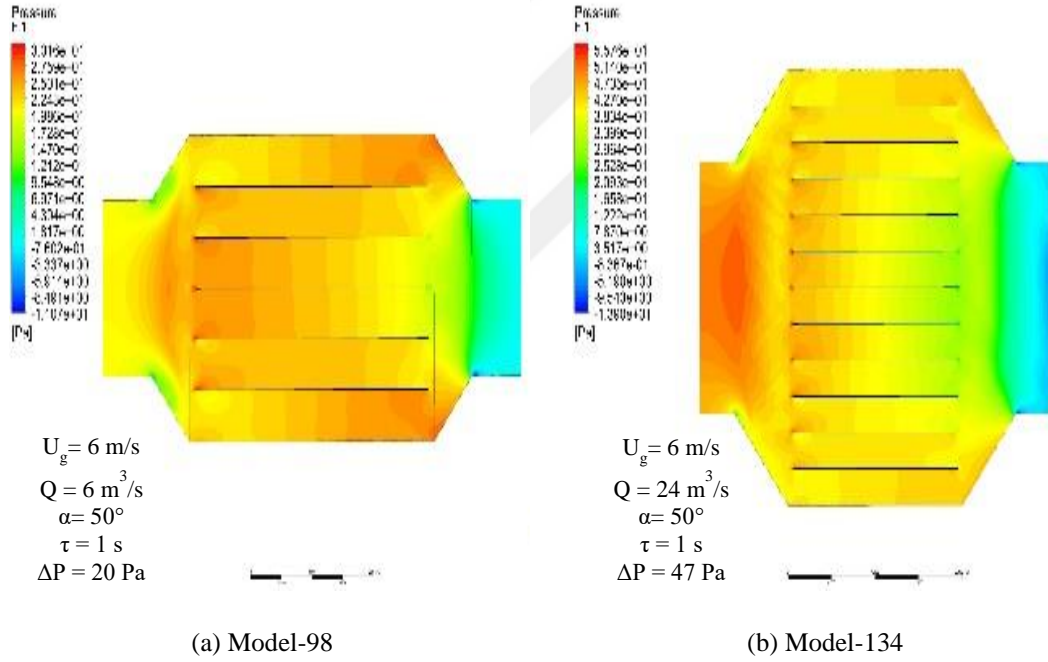


Şekil 4.21. İkinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 50^\circ$  (Model 97-144)



Şekil 4.22. İkinci grup ESC orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 50^\circ$  (Model 97-144)

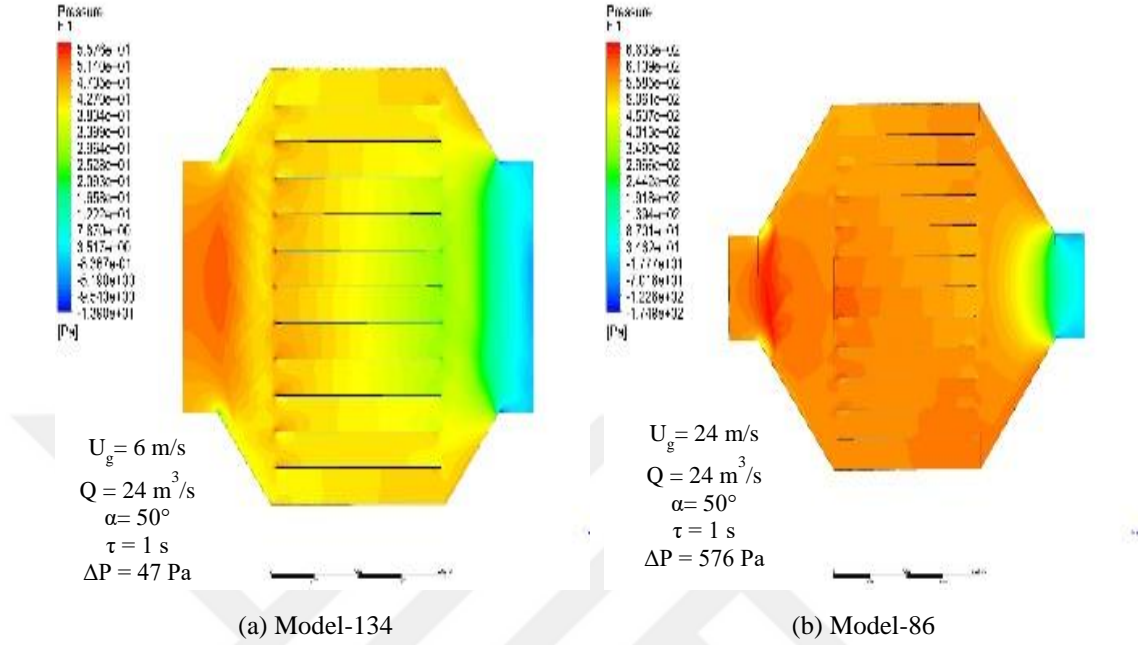
Tasarlanan model ESC'lerin hız ve basınç farkı gibi değişimleri görüntülemek için ESC içerisindeki orta bölmeye bir düzlem yerleştirilmiştir (Şekil 4.2). Üçüncü grupta yer alan Model-98 ve Model-134 ESC modellerinin karşılaştırılması Şekil 4.23'te verilmiştir. Bu iki modelin yaklaşma hızları aynı (6 m/s), giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değeri aynı (50°) ve ESC toz toplama bölümündeki gazın bekletme süresi aynı (1 s)'dir. Ancak gaz debisi Model-98'nin 6 m<sup>3</sup>/s ve Model-134'ün gaz debisi 24 m<sup>3</sup>/s'dir. Şekil 4.23'te debinin artması ile genişleyen ESC boyutları ve giriş/çıkış konik kısmın alanının ESC'nin basınç kayıplarına olan etkisi gösterilmektedir. Şekil 4.23 incelendiğinde debinin 4 kat artmasıyla basınç farkı değerleri 20 Pa'dan 47 Pa'a bir artış olduğu görülmektedir. Bu durumda çok fazla bir değişim olmadığı yani debinin çok etkisinin olmadığı söylenebilir.



Şekil 4.23. Üçüncü grup ESC'lerin orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 50^\circ$

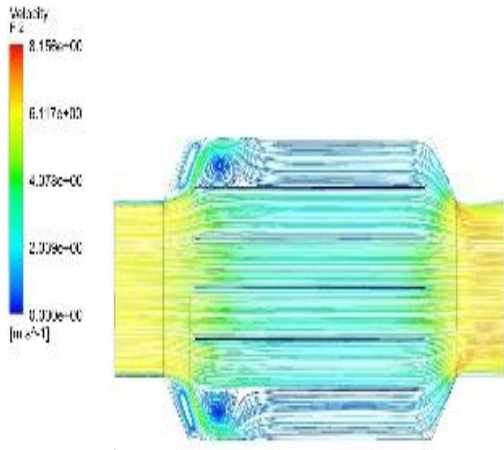
İkinci grupta yer alan Model-86 ve üçüncü grupta yer alan Model-134 ESC modellerinin karşılaştırılması Şekil 4.24'te verilmiştir. Bu iki modelin giriş gaz debileri aynı (6 m<sup>3</sup>/s), giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değeri aynı (50°) ve ESC toz toplama bölümündeki gazın bekletme süresi aynı (1 s)'dir. Ancak yaklaşma hızları Model-86'nin 24 m/s ve Model-134'ün yaklaşma hızı ise 6 m/s'dir. Şekil 4.24'te sabit debi değerinde yaklaşma hızının artması ile debiyi sabit tutabilmek için ESC'nin giriş/çıkış konik kısmın alanı daraltılmış ve ESC'nin basınç kayıplarına olan etkileri incelenmiştir. Şekil 4.24'te yaklaşma hızının 4 kat artmasıyla basınç farkı

değeri 47 Pa'dan 576 Pa'a çıktığı görülmüştür. Bu durumda ESÇ tasarımlarındaki parametrelerden biri olan gazın yaklaşma hızının basınç farkına olan etkisinin oldukça yüksek bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.



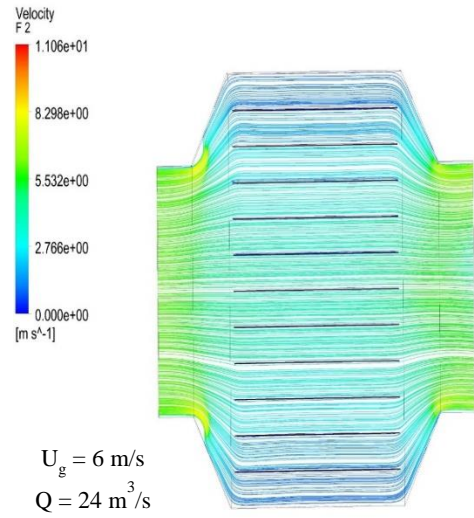
Şekil 4.24. Üçüncü Grup /İkinci grup ESÇ'lerin orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $Q = 24 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\alpha = 50^\circ$

Üçüncü grupta yer alan Model-108 ve Model-144'ün akım çizgisi konturlarının karşılaştırılması Şekil 4.25'te verilmiştir. Bu iki modelin giriş gaz debileri aynı ( $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ), giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değeri aynı ( $60^\circ$ ) ve ESÇ toz toplama bölümündeki gazın bekletme süresi aynı ( $1 \text{ s}$ )'dir. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 incelendiğinde ESÇ içindeki basınç farkı değişiminin debinin artırılmasından daha çok yaklaşma hız değerinin artırılması durumunda daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Şekil 4.25 incelendiğinde debinin artması ile genişleyen ESÇ toz toplama bölümün boyutları ve giriş ağzının ESÇ'nin konik kısımlardaki vorteksi azalttığı görülmüştür.



$U_g = 6 \text{ m/s}$   
 $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $\alpha = 60^\circ$   
 $\tau = 1 \text{ s}$

(a) Model-108



$U_g = 6 \text{ m/s}$   
 $Q = 24 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $\alpha = 60^\circ$   
 $\tau = 1 \text{ s}$

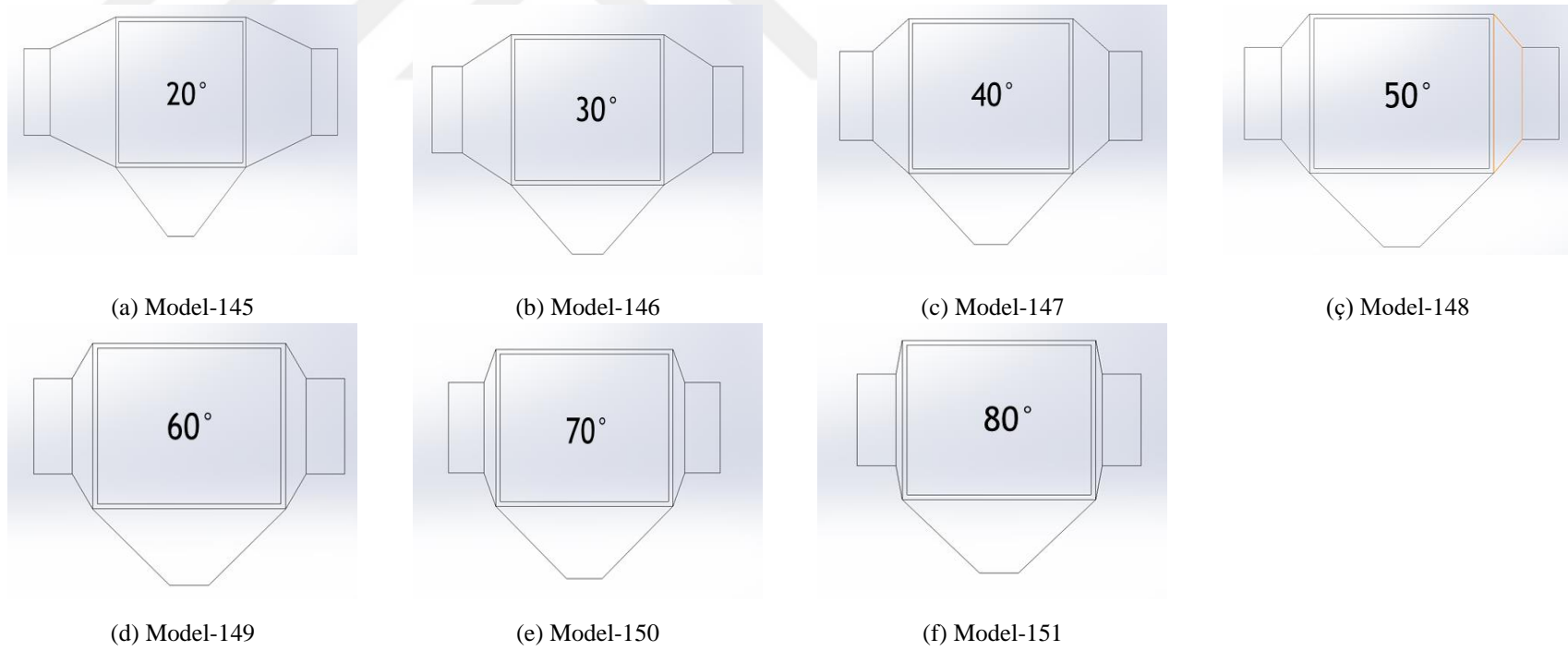
(b) Model-144

Şekil 4.25. Üçüncü grup ESC'lerin orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 60^\circ$

#### 4.1.4. Dördüncü Grup Model Değerlendirmesi

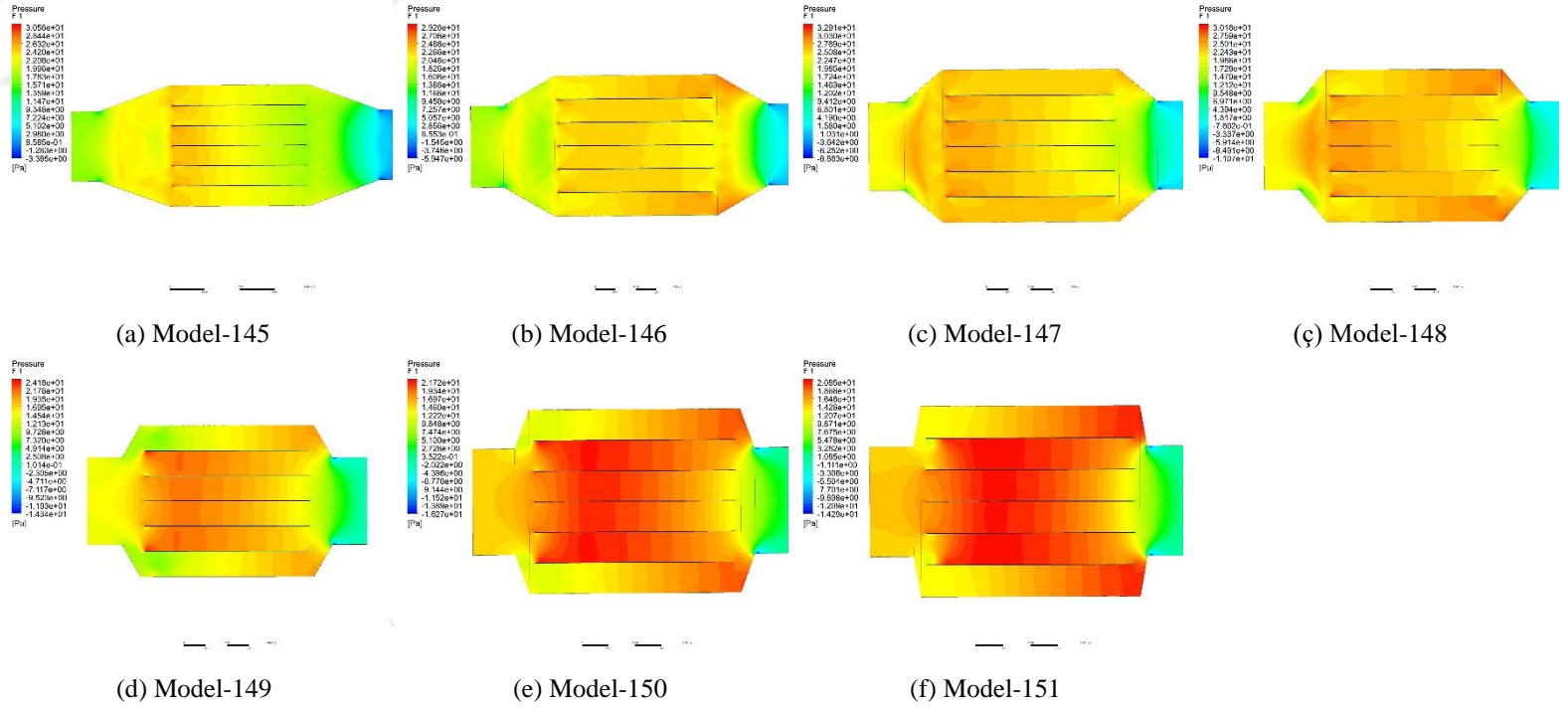
Önceki grup model tasarımları incelendiğinde ESC'nin giriş/çıkış konik kısımlarının yatayla yaptığı açı değerlerinin  $50^\circ$ ,  $52^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $56^\circ$ ,  $58^\circ$  ve  $60^\circ$  gibi az farklarla farklı açı değerleri ESC'nin içerisindeki akışa ve statik basınca olan etkilerinin değişimi çok iyi fark edilememiştir. Bu yüzden  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  ve  $80^\circ$  gibi farkın fazla olduğu açı değerlerinde tasarımlar yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede açının büyük farklarla değişmesiyle ESC içerisindeki gaz akış dağılımına ve basınç kaybına olan etkisi incelenmiştir.

Dördüncü grup model değerlendirilmesinde ise 145-151 arasında tasarlanan modeller yer almaktadır. Bu modellerin ESC giriş kanalındaki yaklaşma hızı 6 m/s, giriş gaz debisi  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ , ESC bekletme odasındaki bekletme süresi 1 s, ESC uzunluğu 200 cm, giriş kanalı kare (100 cm x 100 cm) biçiminde ve ESC'nin girişindeki ve çıkışındaki konik kısımların yatayla yaptığı açı ( $\alpha$ ) değerleri değiştirilerek  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  ve  $80^\circ$  olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan bu modellerin sabit yaklaşma hızında, sabit debide ve sabit bekletme süresinde, ESC'nin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri değiştirilerek koniklik açısının ESC'nin basınç kaybına ve toz toplama verimine olan etkileri araştırılmıştır. Şekil 4.26'da farklı koniklik açı değerlerine göre tasarlanan modellerin yan görünüşleri verilmektedir. Tasarlanan modeller için uygun koniklik açı değeri, basınç farkı ve basınç kayıp katsayısı değerlerinin değişimleri gözlemlenmiştir.

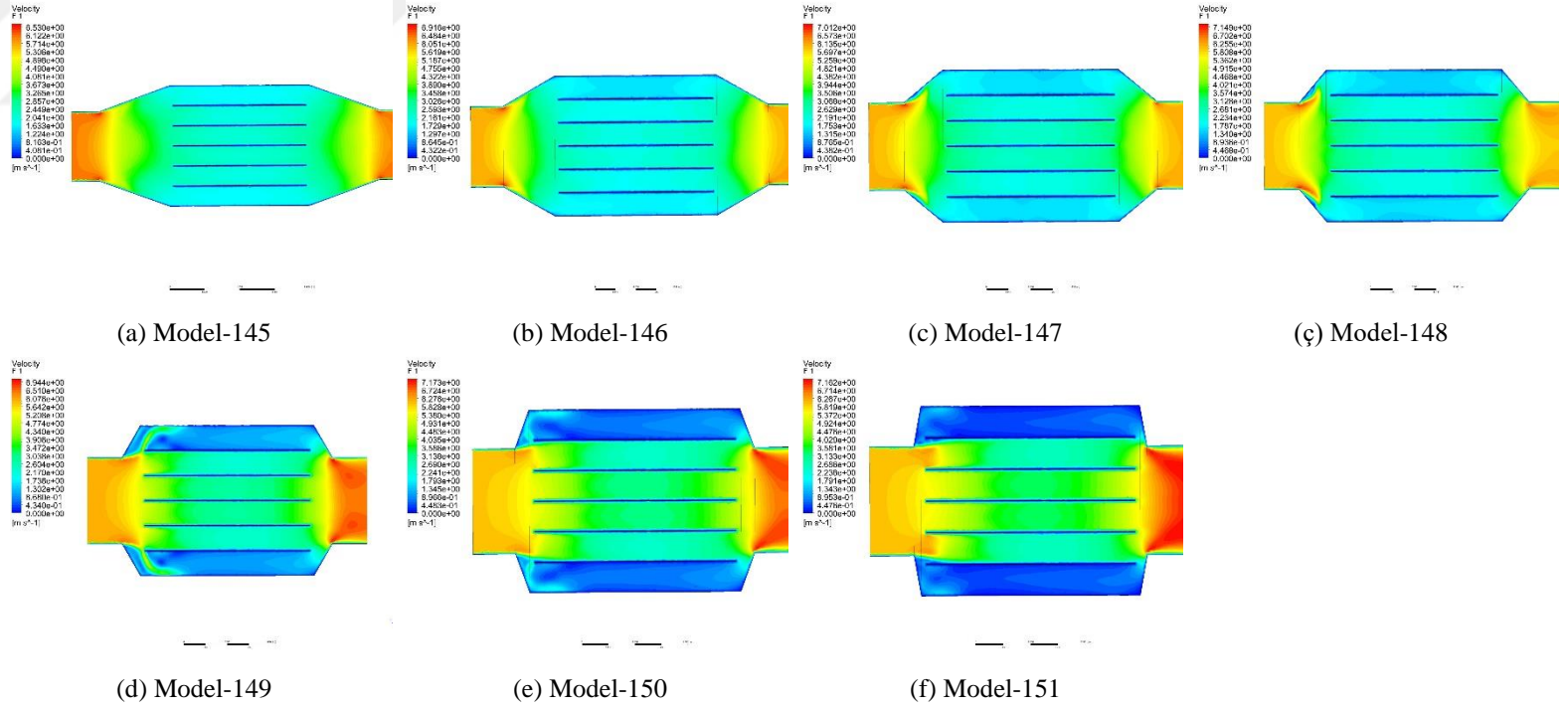
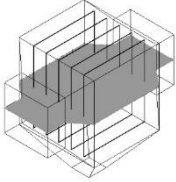


Şekil 4.26. Dördüncü grup ESC modellerin farklı koniklik açı tasarımları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 145-151)

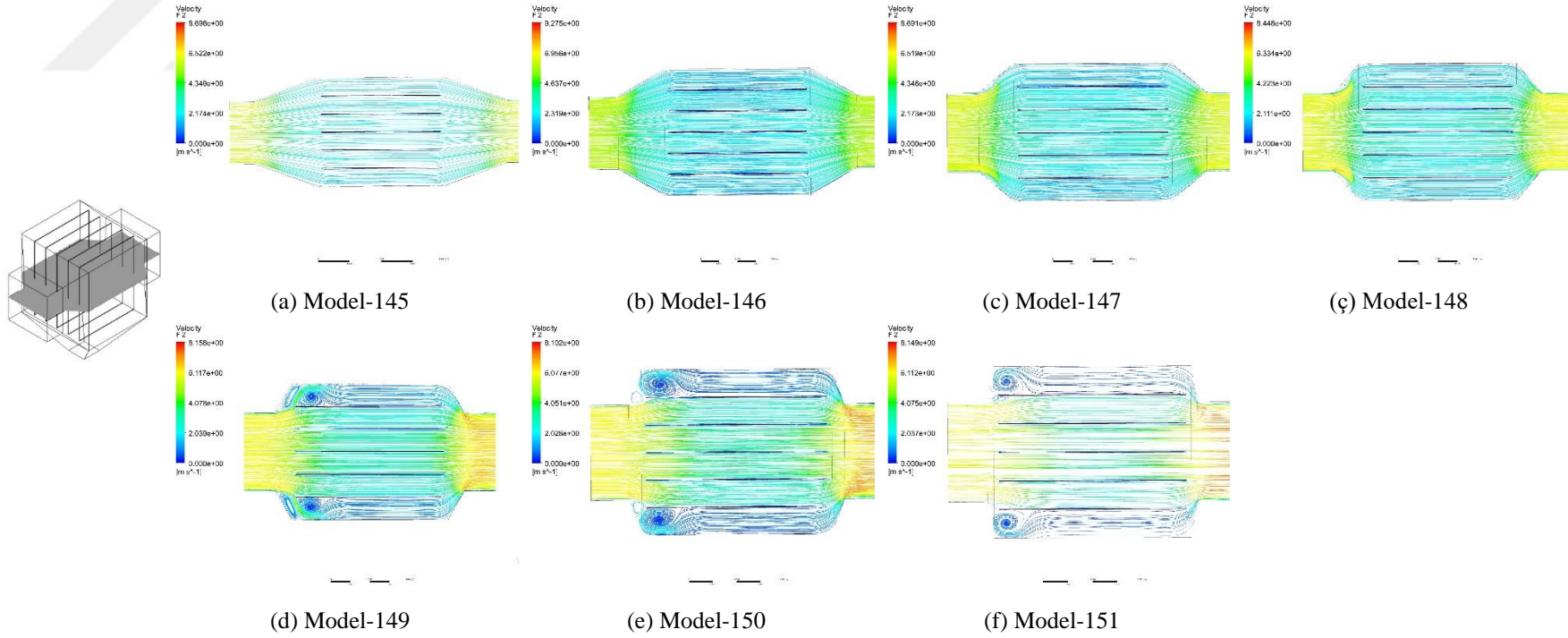
Tasarlanan model ESC'lerin hız ve basınç farkı gibi değişimlerini görüntülemek için ESC içerisindeki orta bölmeye bir düzlem yerleştirilmiştir (Şekil 4.2). ESC'nin farklı koniklik açı değerlerinde tasarlanan modellerin sonuçlarını değerlendirmek için HAD analiz sonuçlarının akış görselleri Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmiştir. Belirtilen modellerin basınç konturları Şekil 4.27'de, hız konturları Şekil 4.28'de, akım çizgisi konturları Şekil 4.29'da, hız vektörleri Şekil 4.30'da verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde ESC'nin giriş/çıkış koniklik açısının artmasıyla sistem içindeki basınç farkı değerlerinde bir artış olduğu Şekil 4.27'de görülmektedir. Şekil 4.27'de açının artması giriş/çıkış koniklik bölümünün toz toplama odasına yaklaşması toz toplama odasındaki ve plakalar arasındaki statik basıncın daha fazla artmasına neden olduğu görülmektedir. Şekil 4.28 incelendiğinde koniklik açısının artmasıyla ESC'nin köşelerindeki ve iki yan bölgelerindeki hızın neredeyse sıfıra yaklaştığı ve gazın ESC kenarlarından geçmeden neredeyse tüm gazın toz toplama odasının orta bölmesinden geçtiği görülmektedir. Burada koniklik açı değeri arttıkça gazın toz toplama odasının ortasından geçme hızı da artmaktadır. Plakalar arasındaki iç hızın artması toz toplama verimini azaltan faktörlerden biridir. Bu sebeple iç hızın olabildiğince düşük tutulması gerekmektedir. Toz toplama verimi ile ilgili ayrıntılı değerlendirmeyi ilerleyen bölümlerde "Verim Değerlendirmesi" bölümünde açıklanmıştır. Şekil 4.29 incelendiğinde giriş/çıkış koniklik açısının artmasıyla ESC'nin köşelerinde ters akım oluşmakta ve bu da vorteks oluşumuna neden olmaktadır. Koniklik açısının artmasıyla ESC'nin köşelerinde vorteks şiddeti ve sayısında da artış olmaktadır. Yüksek açı değişimlerinde bu durum daha net görülmektedir (Şekil 4.29 (f)). Şekil 4.30 incelendiğinde giriş/çıkış koniklik açısının artmasıyla ESC'nin iki yan bölgesindeki bölümde gaz geçişi olmamakta, burada gaz geçişi sıfıra yaklaşmaktadır. Ayrıca Şekil 4.30'da hız vektörleri yardımıyla gazın orta bölmeden geçtiği daha açık bir şekilde görülmektedir.



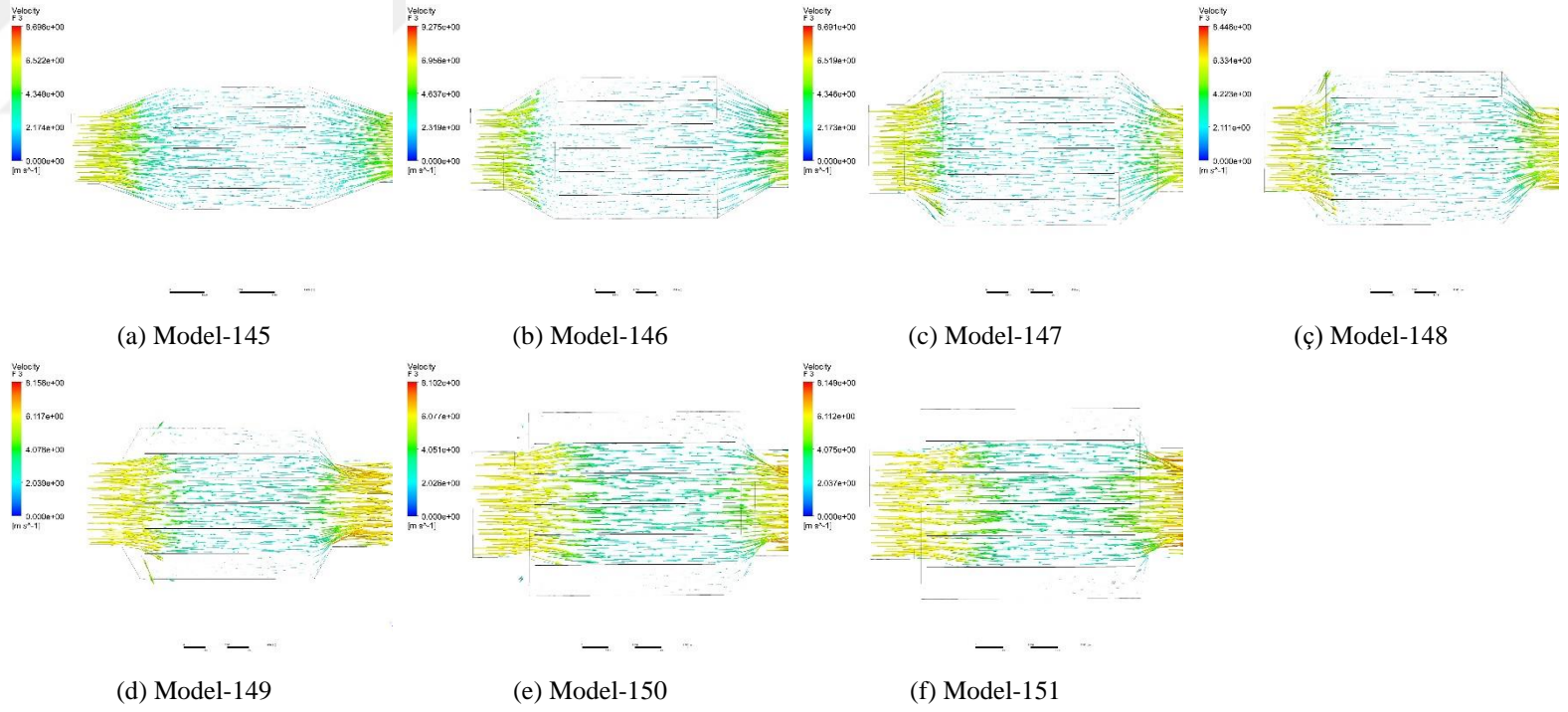
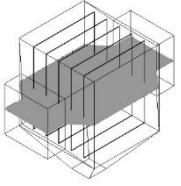
Şekil 4.27. Dördüncü grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 145-151)



Şekil 4.28. Dördüncü grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 145-151)

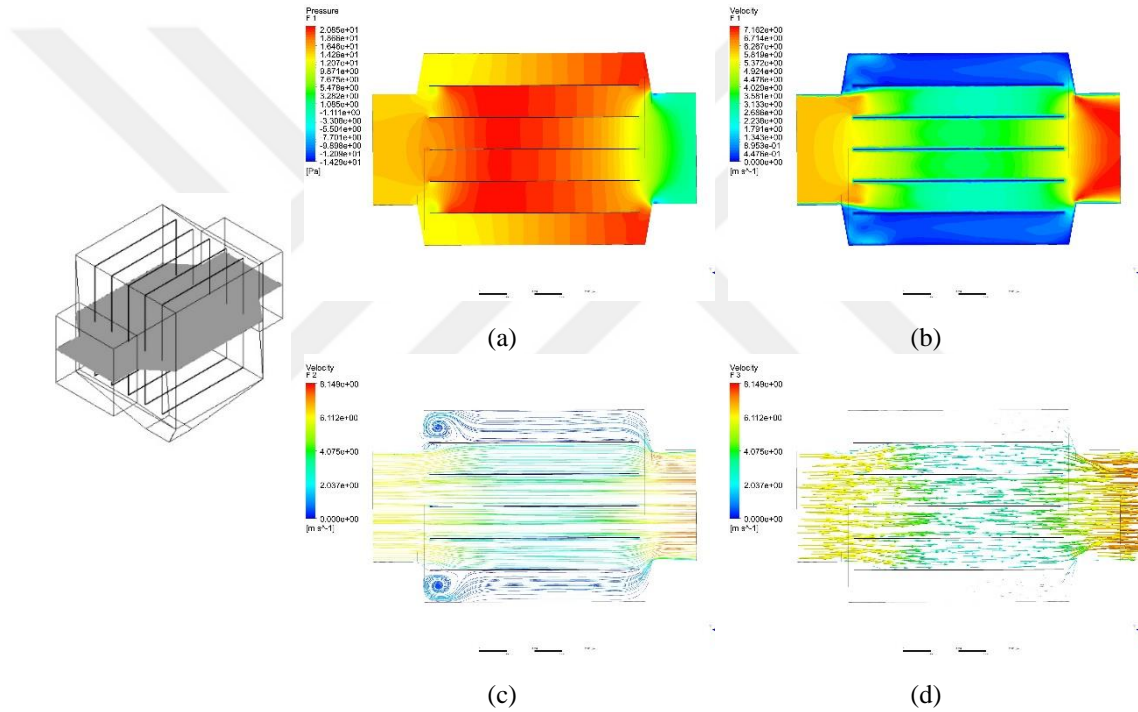


Şekil 4.29. Dördüncü grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki akım çizgisi konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 145-151)



Şekil 4.30. Dördüncü grup ESC orta kesit bölgesindeki hız vektörleri konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 145-151)

Şekil 4.31’de tasarlanan Model 151’in orta kesit bölgesindeki basınç ve hız konturları görülmektedir. EŞÇ konik bölümünün yatayla yaptığı açının artırılmasıyla şiddetli vortekslerin oluşmasına neden olduğu oluşan bu vorteksler kenarlardaki plakalar arasında gaz geçişini sınır değer oldukça altına düşürdüğü Şekil 4.31 (c)’de görüldüğü gibi akış çizgilerinden kenarlardaki gaz akışının oldukça düşürdüğü, bu durumda gazın EŞÇ’nin orta bölgesine yöneldiği bunun sonucunda orta bölgede yüksek statik basınca neden olduğu Şekil 4.31 (a) ve Şekil 4.31 (b)’de görülmektedir. Gazın bu şekilde orta bölgeye yönelmesi orta bölgedeki gazın geçiş hızını artıracak dolayısıyla bekletme süresini azaltacak ve toz toplama verimini olumsuz etkileyeceği aşıkardır.

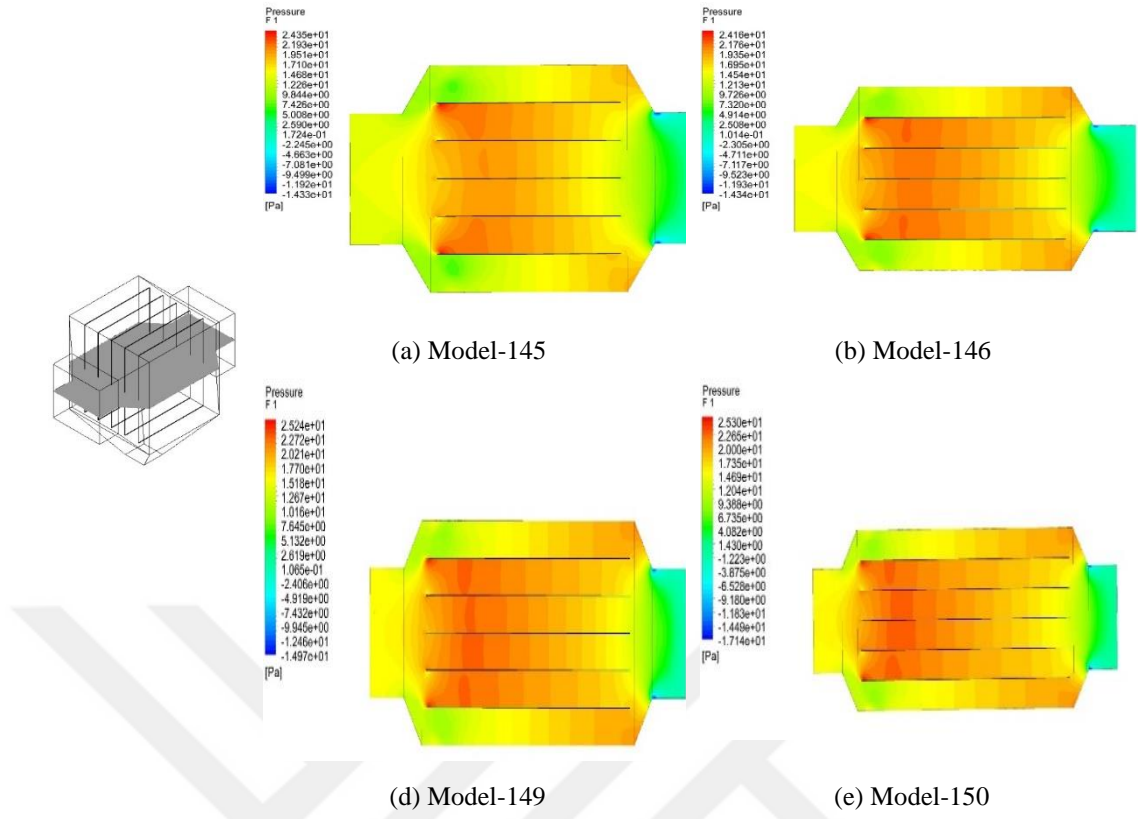


Şekil 4.31. Model 151'in orta kesit bölgesindeki (a) basınç konturları, (b) hız konturları, (c) akım çizgisi konturları, (d) hız vektörleri konturları ( $U_g = 6$  m/s,  $Q = 6$  m<sup>3</sup>/s,  $\alpha = 80$ )

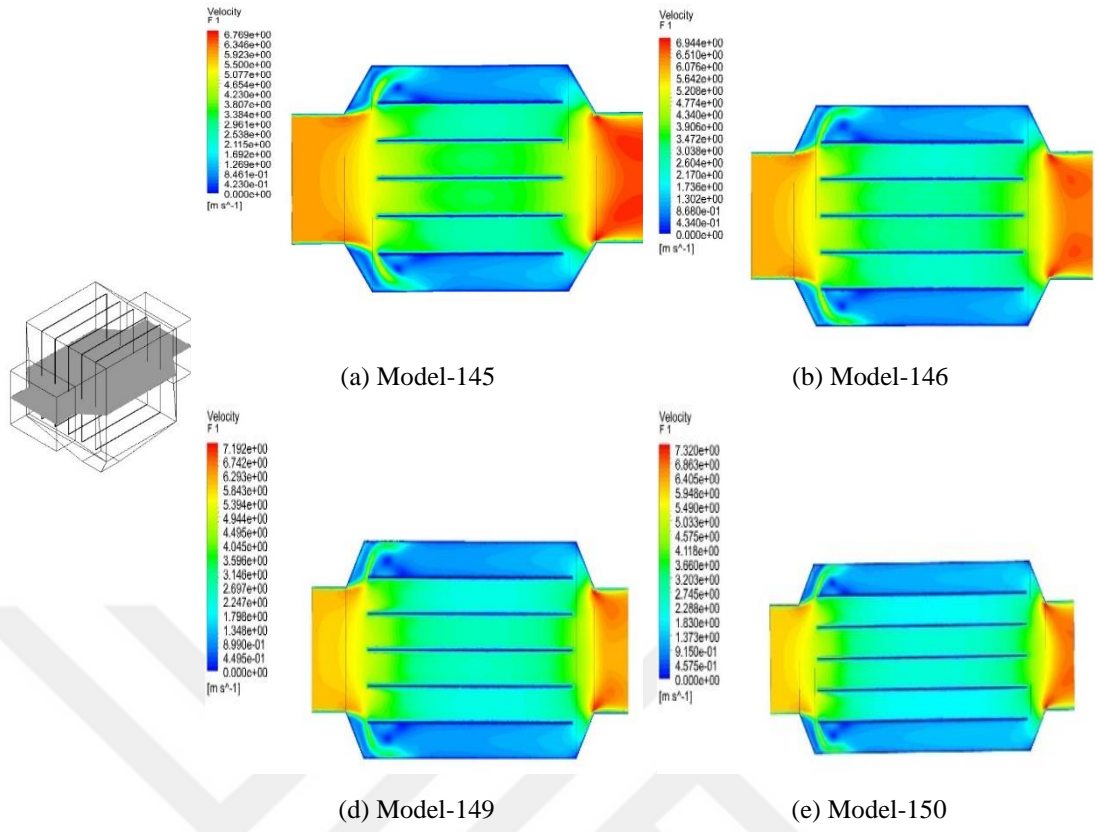
#### 4.1.5. Beşinci Grup Model Değerlendirmesi

Beşinci grup model değerlendirilmesinde ise 152-155 arasındaki modeller yer almaktadır. Bu modellerin giriş kanalındaki yaklaşma hızları 6 m/s, giriş gaz debileri 6 m<sup>3</sup>/s, giriş kanalları kare (100 cm x 100 cm) biçiminde ve ESC'nin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı ( $\alpha$ ) değerleri 60° ve ESC uzunluğu bekletme sürelerine (0.75 s, 1 s, 1.25 s ve 1.5 s) göre farklı boyutlarda; sırasıyla 150 cm, 200 cm, 250 cm ve 300 cm olacak şekilde farklı geometriler tasarlanmıştır. Tasarlanan bu modellerin sabit yaklaşma hızı, hacimsel debi, koniklik açı değerlerinde ESC bekletme odasındaki bekletme süresinin ESC içinde basınç değişimine ve düzgün gaz akışına etkisi gözlemlenip uygun bekletme süresi belirlenmeye çalışılmıştır.

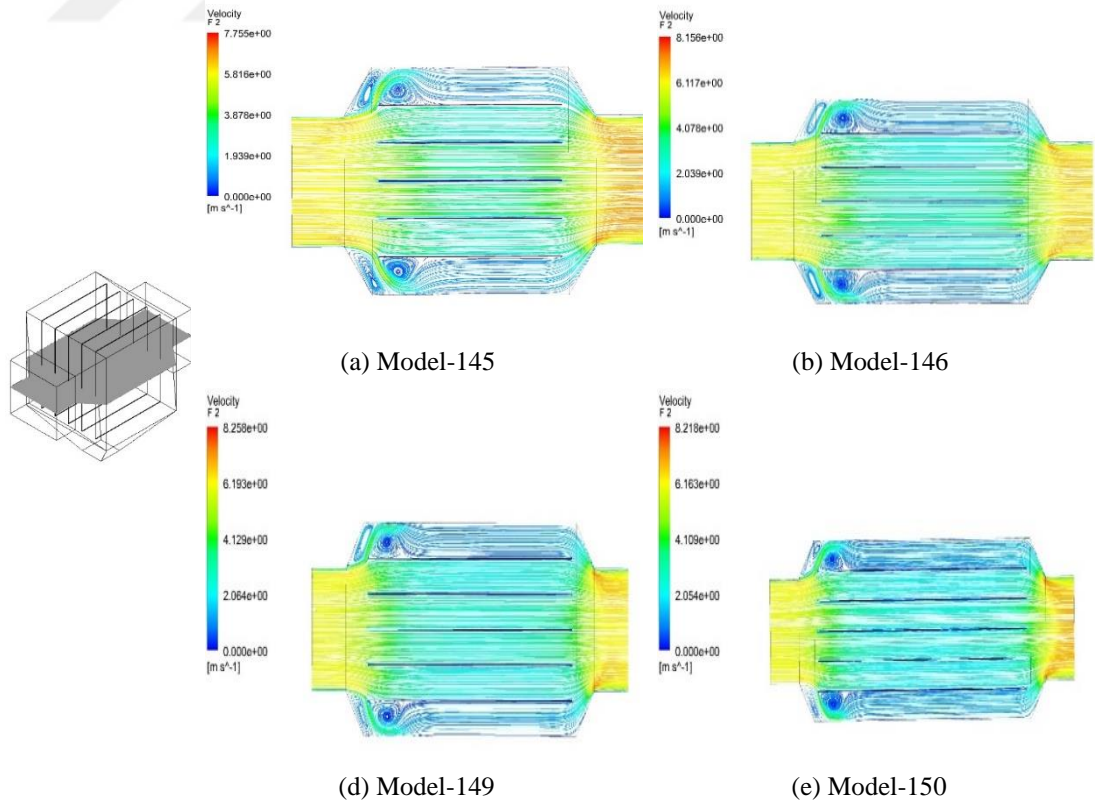
Tasarlanan model ESC'lerin hız ve basınç farkı gibi değişimlerini görüntülemek için ESC içerisindeki orta bölmeye bir düzlem yerleştirilmiştir (Şekil 4.2). Bu amaçla, farklı bekletme sürelerine sahip ESC'lerin HAD analiz sonuçlarının akış görselleri Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te verilmiştir. Belirtilen modellerin basınç konturları Şekil 4.32'de, hız konturları Şekil 4.33'de ve akım çizgisi konturları Şekil 4.34'te verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde bekletme süresinin ESC içerisindeki basınç farkı ve hız parametrelerinde çok az bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Önceki bölümlerdeki ikinci grup model değerlendirmesinde, birinci gruptaki Şekil 4.5 (d) ile ikinci gruptaki Şekil 4.13 (d)'deki akım çizgileri incelenmiş ve bekletme süresinin artması vorteks oluşumunu azaltabileceği üzerinde durulmuştur. Bunun üzerine beşinci grup model tasarımları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.34 incelenecek olursa akım çizgileri arasındaki mesafenin artması hızın azaldığını ve bu mesafenin azalması durumunda ise hızın arttığını göstermektedir. Şekil 4.34 (a) ve Şekil 4.34 (d) incelendiğinde ESC'nin iki kenar bölgesinde hızın Şekil 4.33'de sıfır değerine yaklaştığı bölgelerde, Şekil 4.34 (d)'de bu bölgelerde ise hızın arttığı görülmektedir. Bekletme süresinin toplama verimine olan etkileri ilerleyen bölümde "Verim Değerlendirmesi" bölümünde açıklanmıştır.



Şekil 4.32. Beşinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki basınç konturları- $U_g = 6$  m/s,  $Q = 6$  m<sup>3</sup>/s (Model 152-155)



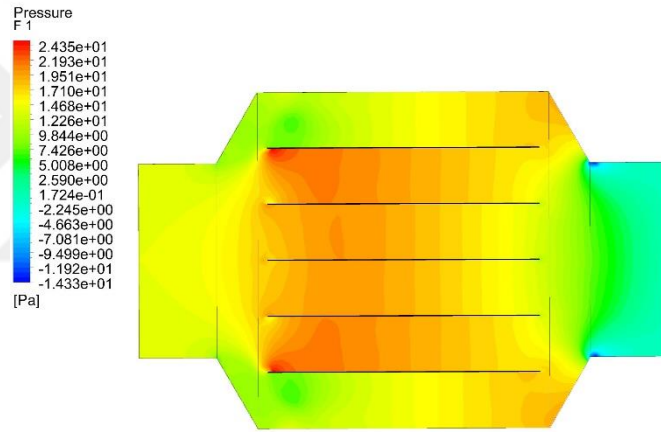
Şekil 4.33. Beşinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ - $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 152-155)



Şekil 4.34. Beşinci grup EŞÇ orta kesit bölgesindeki hız konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 152-155)

#### 4.1.6. Altıncı Grup Model Değerlendirmesi

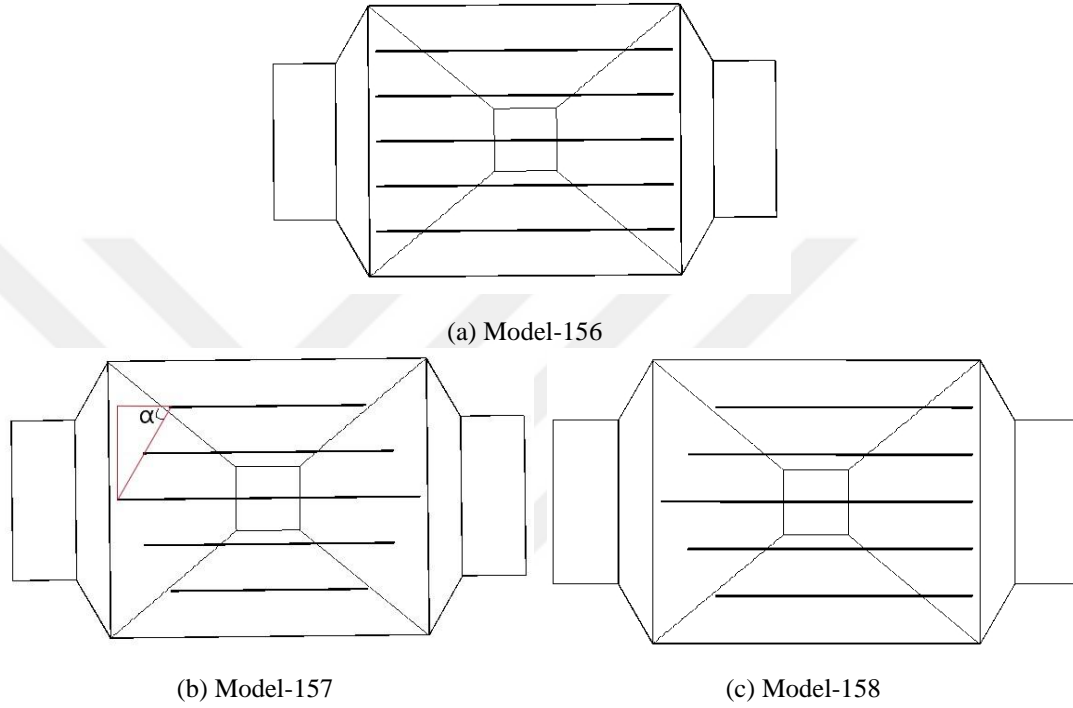
Önceki bölümlerde beş grup model tasarımlarının analiz sonuçları incelendiğinde ESC'nin klasik plaka yerleştirme şekil tasarımlarındaki plakalar toplama odasının ilk girişinde yüksek basınç oluşmasına, ESC toz toplama bölümünde plakaların varlığı ile daralan akışa zorlanmasının getirmiş olduğu basınç farkı değerlerindeki artışın meydana gelmesine, ESC'nin iki yan bölgelerdeki köşelerde hızın sıfıra kadar yaklaşmasına ve bunlardan dolayı verimin düşmesine neden olduğu görülmüştür. Bu sebeplerden dolayı ESC'lerdeki plakaların klasik bilinen tasarımlarının dışında ESC toz toplama odasındaki akışı rahatlatarak tasarımların yapılması verim artışına neden olacağı düşünülerek altıncı grup model tasarımları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.35'te toplama plakalarının varlığından dolayı meydana gelen basınç artışı Model-1'in basınç konturları yardımıyla görülebilmektedir.



Şekil 4.35. Model-1 toz toplama plakalarının uçlarında meydana gelen basınç artışı- $U_g = 6$  m/s,  $Q = 6$  m<sup>3</sup>/s,  $\tau = 0.75$  s, Açısı = 60°

Altıncı grup model değerlendirilmesinde ise 156-158 arasında tasarlanan modeller bulunmaktadır. Bu modellerin ESC giriş kanalındaki yaklaşma hızı 6 m/s, giriş gaz debisi 6 m<sup>3</sup>/s, ESC bekleme odasındaki bekletme süresi 1 s, ESC uzunluğu 200 cm, giriş kanalı kare (100 cm x 100 cm) biçiminde ve ESC'nin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değeri ( $\alpha$ ) 60° ve toplama plakalarının uç kısımları kısaltılıp uzunlukları farklı boyutlarda olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 4.36'da farklı toz toplama plaka yerleştirme şekli tasarımları yer almaktadır. Şekil 4.36 (a)'da klasik toz toplama plaka yerleştirme şeklindeki model, Şekil 4.36 (b)'da iki tarafı 60° ile uç kısımlarından kısaltılmış toz toplama plakalı model ve Şekil 4.36 (c)'da tek tarafı 60° ile uç kısımlarından kısaltılmış toz toplama plakalı model tasarımlarının üst

görünüşleri verilmektedir. Tasarlanan bu modellerin sabit yaklaşma hızı, sabit gaz debisi, sabit bekletme süresi ve sabit koniklik açđ değerlerinde toplama plakaların giriş ve çıkıştaki akışı engellemeyecek şekilde farklı toz toplama plakaların yerleştirme biçimi tasarımı EŞÇ içerisindeki akışa olan etkisi ‘‘Altıncı grup değerlendirmesinde’’ ve EŞÇ’nin toz toplama verimine olan etkisi ise ‘‘Verim Değerlendirmesi’’ bölümünde gözlemlenip uygun plaka şekilleri belirlenmeye çalışılmıştır.

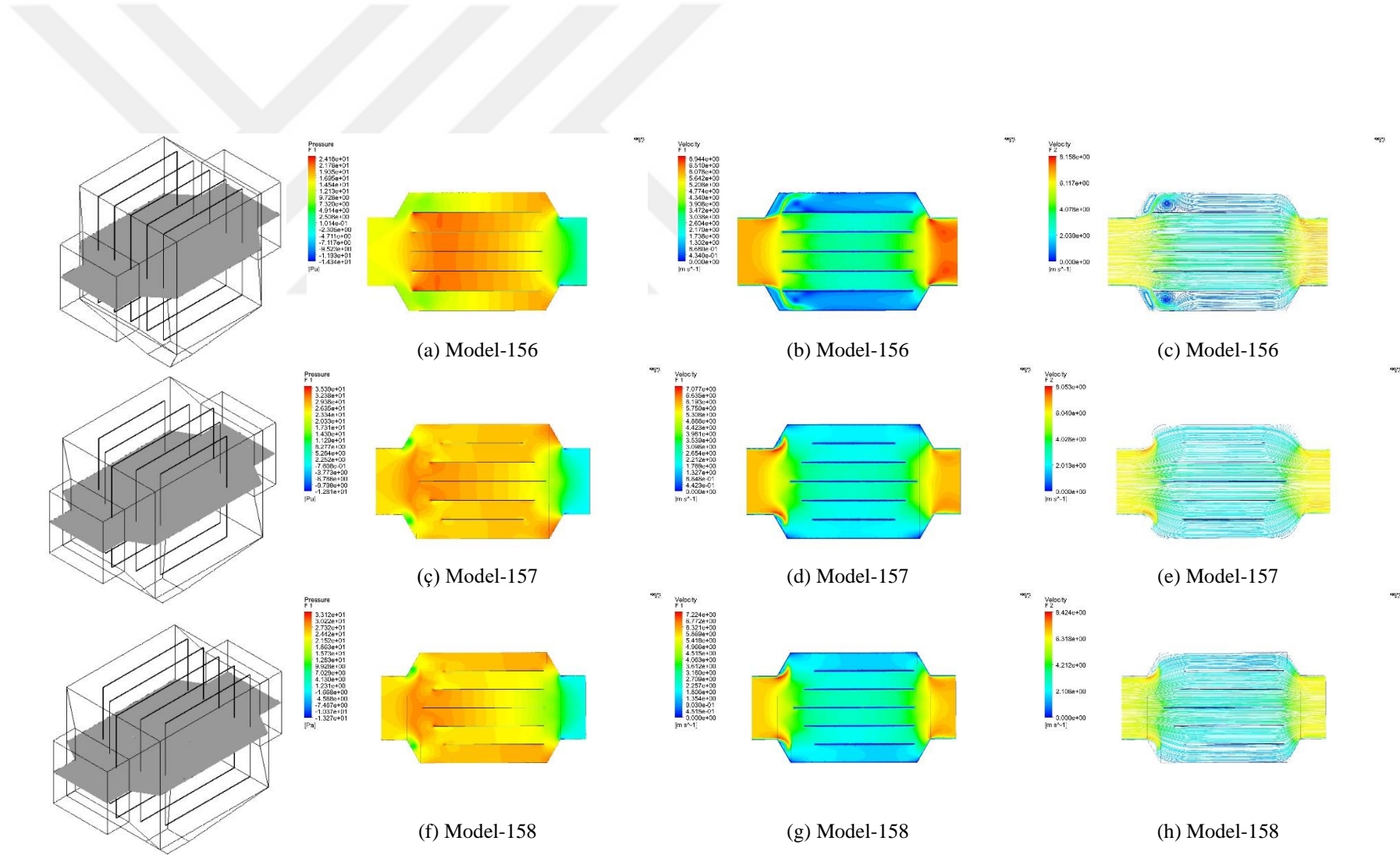


şekil 4.36. Altıncı grup EŞÇ’lerin plakaların farklı yerleştirme biçimine göre tasarımları -  $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  
 $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\tau = 1 \text{ s}$

Altıncı grupta tasarlanan model EŞÇ’lerin hız ve basınç farkđ gibi değişimleri görüntülemek için EŞÇ içerisindeki orta bölmeye bir düzlem yerleştirilmiştir (şekil 4.2). EŞÇ’nin farklı yerleştirme şekillerinde tasarlanan plaka modellerinin sonuçlarını değerlendirmek için HAD analiz sonuçlarının akış görselleri şekil 4.37’de verilmiştir. Belirtilen modellerin basınç konturları şekil 4.37 (a,,f)’de, hız konturları şekil 4.37 (b,d,g)’de ve akım çizgisi konturları şekil 4.37 (c,e,h)’da verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde EŞÇ’nin toz toplama odasının girişindeki plakaların uçlarını kısalttığımızda, akış zorlanmadan EŞÇ odasına girmekte ve EŞÇ toz toplama odasında homojen bir gaz akışı sağlanmaktadır. Toz toplama odasının içindeki basınç farkđ değerlerinde azalma olduğu şekil 4.37 (a,,f)’da görölmektedir. Akım çizgilerine baktığımızda ise şekil 4.37 (c)’de klasik plakalı EŞÇ modelindeki toz toplama odasının köşelerinde oluşan vorteks şekil 4.37 (e)’de ve şekil 4.37 (h)’da vorteks

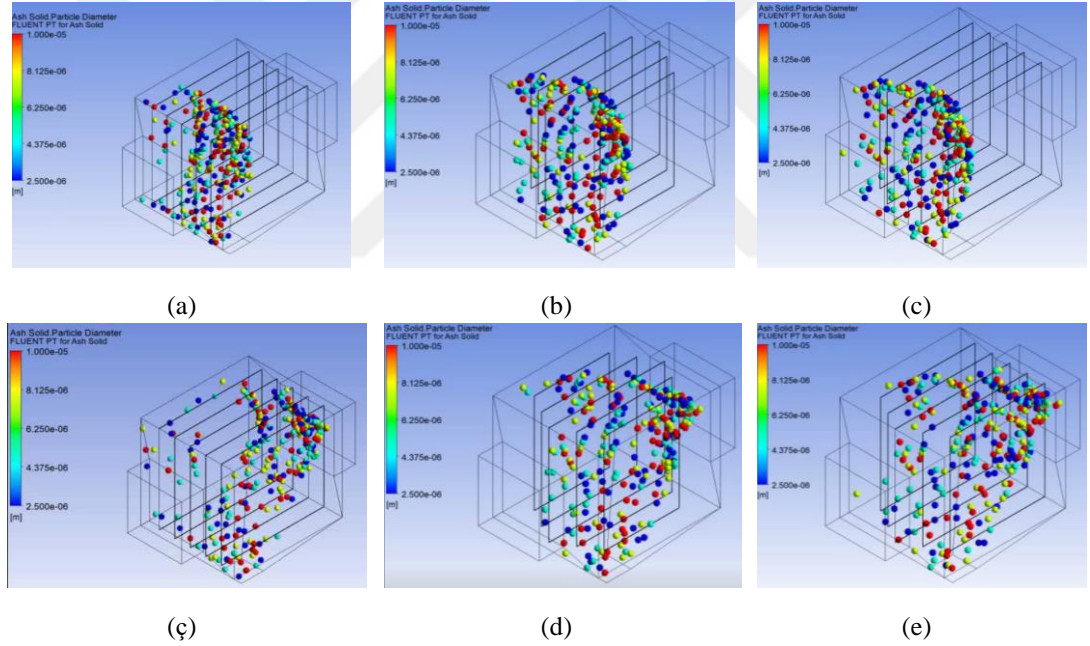
oluşumunun olmadığı görülmektedir. ESÇ plakaları bu şekilde tasarlandığında ESÇ içerisindeki gaz akışı homojen olarak dağılım sağladığı görülmektedir. Toz toplama plakasının iki tarafının mı (Model-157) yoksa tek tarafının mı (Model-158) kısaltılmasının daha iyi sonuç verdiği ile ilgili karşılaştırmayı akış görsellerine bakıp karar veremeyiz, bunun için verim hesaplarının yapılıp ona göre bir karar verilmesi gerekmektedir. Tüm modellerin verim değerlendirmesi bir sonraki bölümde yapılmıştır.





Şekil 4.37. Altıncı grup ESC orta kesit bölgesindeki basınç-hız-akım çizgileri konturları- $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$  (Model 156-158)

Altıncı grupta tasarlanan model ESÇ'lerin DPM video görselleri en yavaş ayarlama yapılarak Şekil 4.38'de verilmiştir. Şekil 4.38 (a)'da Model-156'nın 4. saniyedeki ve Şekil 4.38 (ç)'de 9. saniyedeki ESÇ toz toplama bölümüne partiküllerin dağılımı, Şekil 4.38 (b)'da Model-157'nin 4. saniyedeki ve Şekil 4.38 (d)'de 9. saniyedeki ESÇ toz toplama bölümüne partiküllerin dağılımı ve Şekil 4.38 (c)'da Model-158'nin 4. saniyedeki ve Şekil 4.38 (e)'de 9. saniyedeki ESÇ toz toplama bölümüne partiküllerin dağılımının video görselleri verilmiştir. Bu görsellerde belirtilen saniyeler yavaşlatılmış videolar olduğu için gerçek zaman dilimini ifade etmemektedir. Bu üç modelde partikülün toz toplama odasındaki kalış süresi 1 saniye olduğu unutulmamalıdır. Ancak partikülün ESÇ'nin toz toplama bölümündeki dağılımı gösterilmek için Şekil 4.38 verilmiştir. Bu şekilde Model-157 ve Model-158'deki partiküllerin ESÇ toz toplama odasına daha homojen dağıldığı görülmektedir.



Şekil 4.38. Altıncı grup ESÇ'lerin plakaların farklı yerleştirme biçimine göre DPM video görseli -  $U_g = 6 \text{ m/s}$ ,  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\tau = 1 \text{ s}$

#### 4.2. Verim Değerlendirmesi

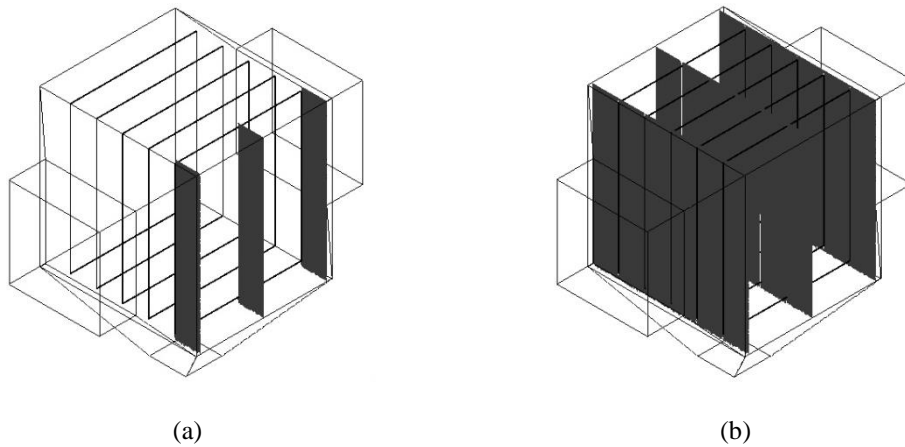
Tez çalışmasının amacı ESÇ geometrisindeki değişikliklerin sistem içindeki basınç kaybına ve toz toplama verimi üzerindeki etkilerini belirlemektir. Bu kısma kadar olan bölümde altı grup ESÇ model değerlendirmesinde tasarlanan 158 adet ESÇ modelin HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve farklı geometrik tasarımlarının ESÇ içerisinde akışa nasıl etki ettiği CFD-POST yardımıyla görselleştirilerek incelenmiştir. Çalışmanın bu kısmında, toz toplama veriminin değerlendirilmesinde önemli bir etkiye

sahip olan toz toplama verimleri, tasarlanan 158 adet EŞÇ için hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. EŞÇ'ler de verimi etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. EŞÇ'lerdeki toz toplama verimi düzgün gaz akışına, gazın sıcaklığına, gazın ve tozun içeriğine, ortam nemliliğine, toplama plakası ve elektrotlar arası uzaklığa, elektrot ve toz toplama arasındaki mesafeye ve toz toplama plakasının çekiçleme mekanizmasının düzgün çalışması gibi birçok fiziksel parametreye bağlıdır. EŞÇ verim hesabının yapılabilmesi için verime etki eden parametrelerin iyi bilinmesi gerekmektedir. EŞÇ verim hesaplamaları ile ilgili ayrıntılı açıklama bir önceki bölüm olan "Materyal ve Yöntem" bölümünde belirtilmiştir. EŞÇ toz toplama verimini tekrar yazacak olursak;

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\omega_e A}{Q}\right)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır.

Toz toplama verimi elektriksel yük ile yüklenmiş partikülün toz toplama plakalarına doğru göç hızına ( $\omega_e$ ), toz toplama plaka alanına ( $A$ ) ve baca gazı hacimsel debisine ( $Q$ ) bağlıdır. Bu bölümde verim hesaplamalarını gerçekleştirebilmek için literatürdeki bilgiler ışığında bazı kabuller yapıp EŞÇ boyutlarını ve geometrisinin değiştirilmesinin verim üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla verim formülündeki baca gazı debisini hesaplayabilmek için tasarlanan EŞÇ'lerin içerisine Şekil 4.39'deki gibi düzlemler tanımlanıp bu düzlemlerdeki hız değerleri CFD-POST bölümünde okunmuş ve iki plaka arasından geçen gaz akışının ortalama hız değerleri bulunmuştur. İki plaka arasındaki toz toplama verimini hesaplamak için burada hesaplanan ortalama hız değerleri kullanılmıştır.



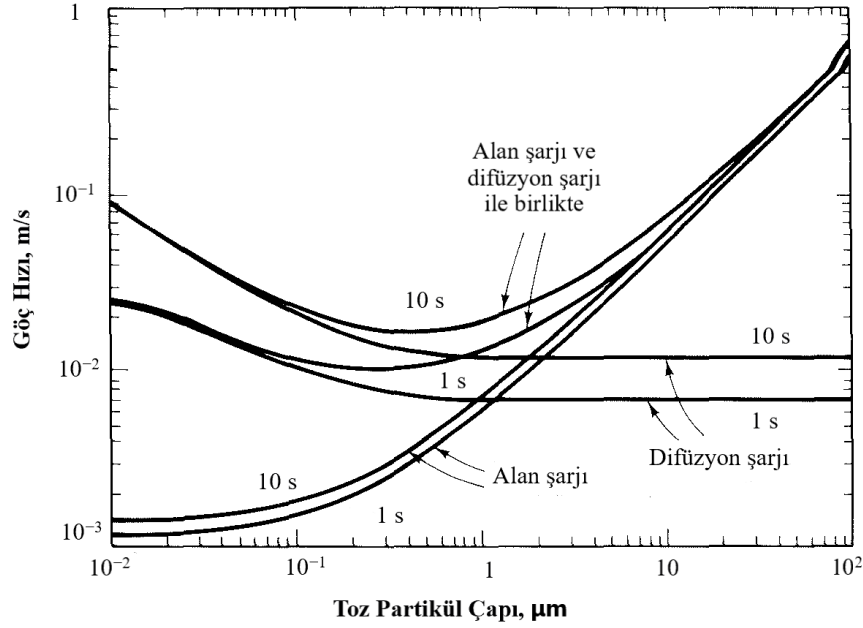
Şekil 4.39. Plakalar arasındaki gaz debisini hesaplamak için tanımlanan düzlemler (Model-2)-(a) iki plaka arasında oluşturulan düzlem, (b) tüm plakalar arasında oluşturulan düzlem

Verim hesabındaki yüklenmiş partikülün toplama plakalarına doğru göç hızı bir önceki bölüm olan materyal ve yöntem bölümünde ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Göç hızını tekrar yazacak olursak;

$$\omega_e = \frac{\epsilon_0 \epsilon_w}{\mu (\epsilon_w + 2)} d_p E^2$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

Burada göç hızı, alanın elektriksel geçirgenliğine ( $\epsilon_0$ ), partikülün bağıl dielektrik sabitine ( $\epsilon_w$ ), partikülün çapına ( $d_p$ ), partiküllerin yüklendiği elektrostatik alan gücünün karesine (E) ve gazın dinamik viskozitesine ( $\mu$ ) bağlıdır. Alanın elektriksel geçirgenliğinin değeri  $8.85 \times 10^{-12}$  C/V.m'dir. Partikülün bağıl dielektrik sabitinin ( $\epsilon_w$ ), değeri 3-8 arasında değişiklik göstermektedir (Nevers, 2000). Bu sabit kâğıt ve pamuk tozları için yaklaşık 3, kömür tozları için yaklaşık 5-6 ve haddehane tozları için yaklaşık 8 olarak alınmaktadır. Bu değer partikülün (nem, sıcaklık ve kükürt içeriği gibi) özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Partikül içerisinde nem ve kükürt değeri arttıkça partikülün bağıl dielektrik sabitinin değeri de artmaktadır. Çalışmada verim hesaplarının gerçekleştirilmesi için kullanılan partikülün bağıl dielektrik sabitinin değeri 6 alınmıştır. Göç hızını etkileyen diğer bir husus da partikül çapıdır. Partikül çapı ile ilgili Şekil 4.40 incelendiğinde partikül çapı arttıkça difüzyon şarjında göç hızı azalmakta ve alan şarjında ise göç hızı artmaktadır. Hem difüzyon hem de alan şarjında ise göç hızı iki yüklemenin toplamı olarak ifade edilmektedir. Partiküllerin yüklenmesinde aerodinamik çapı  $0.2 \mu\text{m}$ 'den küçük partiküller için difüzyon şarjı etkilidir (Mclean, 1988; Mizuno, 2000; Intra, et al., 2014). ESC'nin toz toplama bölümünde iki plakanın tam ortasındaki deşarj elektrotunun etrafında bulunan iyonlaşmış partikülün toz toplama yüzeyine olan göç hızı arttığında toz toplama verimi artmaktadır.

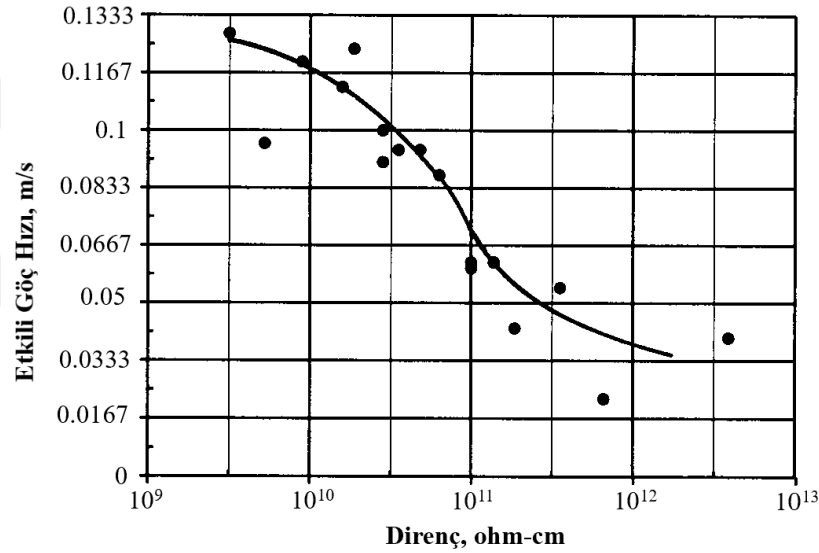


Şekil 4.40. Alan ve difüzyon şarjının partikül çapı-partikül göç hızı arasındaki ilişki (Flagan and Seinfeld, 1988)

İki plaka arasındaki elektrotlara genelde 30-75 kV arasında doğru gerilim uygulanmaktadır (Wang, et al., 2004). Tipik bir ESÇ’de toz toplama plakası ile elektrot arasındaki mesafenin 0.1-0.15 m olması gerekmektedir (Heumann, 1997; Wang, et al., 2004). Deşarj elektrodu ile toz toplama plakası arasındaki mesafenin artması korona elektrotları arasındaki elektrik alan kuvvetinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca iki deşarj elektrodu arasındaki mesafe arttıkça, maksimum elektrik alan kuvveti azalırken, maksimum iyonik yük yoğunluğu artmaktadır. Deşarj elektrodu ile toz toplama plakası arasındaki mesafe ve iki deşarj elektrodu arasındaki mesafe, iyon yük yoğunluğu ve elektrik alan şiddeti dağılımında büyük etkiye sahiptir (Deng, et al., 2019). Bu yüzden ESÇ tasarımında bu mesafenin iyi ayarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada yapılan tasarımlarda toz toplama plakası ile elektrot arasındaki mesafe 0.15 m alınmıştır. Partiküllerin yüklendiği elektrostatik alan gücü plakanın yakınındaki alan gücü olarak ifade edilmektedir. Elektrostatik alan gücü, elektrotlara uygulanan voltajın toz toplama plakası ile elektrot arasındaki mesafeye orantılanarak bulunmaktadır. Yani deşarj elektrotuna 60 kV elektrik potansiyeli uyguladığımızda, toz toplama plakası ile elektrot arasındaki mesafe 0.15 m ise elektrostatik alan gücü ( $50 \text{ kV}/0.15 \text{ m}$ )  $4 \times 10^5 \text{ V/m}$  alan kuvveti olduğu varsayılır (Flagan and Seinfeld, 1988).

Göç hızının sayısal değeri toz ile ilgili deneyimlere bağlı olarak işletme şartlarına göre seçilmektedir. Göç hızı toza, işletme şartlarına ve tasarlanan sisteme göre

değişmektedir (Reynolds, et al., 2002). Göç hızı, uçucu kül için genelde 0.04-0.2 m/s arasında bir değerdir (Reynolds, et al., 2002; Wang, et al., 2004; Theodore, 2008). Ayrıca göç hızı toz partiküllerin özdirencine de bağlıdır. Yüksek elektrik dirence sahip toz partiküller yük transferi için uygun değildirler (Liu and Liptak, 1999). Düşük özdirenç değerleri durumunda göç hızının değeri de artmaktadır. Şekil 4.41’da göç hızı ve özdirenç arasındaki ilişki verilmektedir. ESC arızalarının büyük çoğunluğu toz partiküllerinin yüksek özdirencinden ( $>2.10^{11} \Omega\text{-cm}$ ) kaynaklanmaktadır (EPA, 2002). Yüksek özdirenç, geri korona oluşumuna neden olmaktadır. Bu yüzden toz partiküllerin özdirencinin uygun değer aralığında olması gerekmektedir. Toz partikülün özdirenç değeri  $10^4 - 10^{10}$  ohm-cm aralığında olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir (Mizuno, 2000).

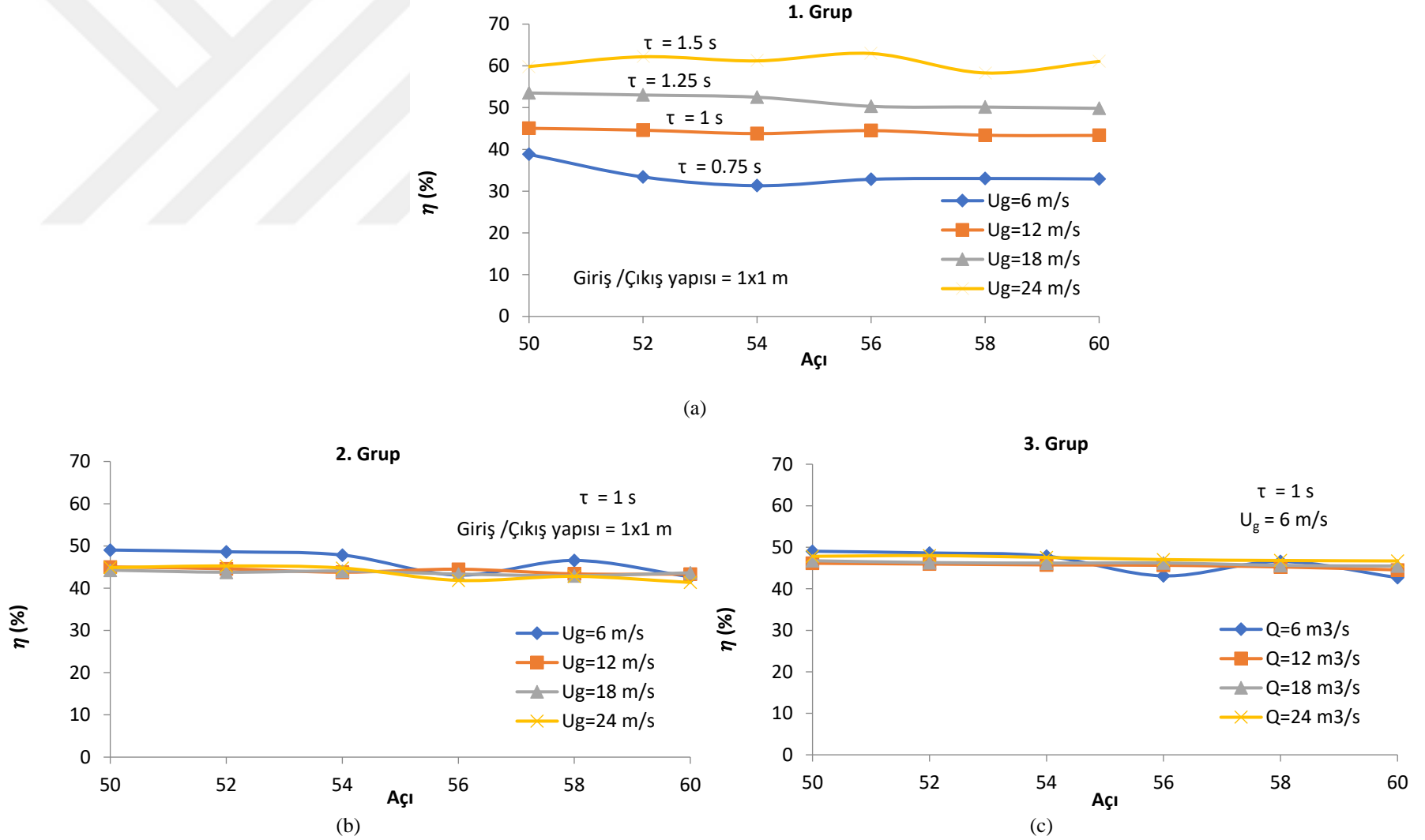


Şekil 4.41. Göç hızı – direnç ilişkisi (White, 1984)

Bu tez çalışmasında, birinci grup, ikinci grup ve üçüncü grup ESC model tasarımların toz toplama verim hesabı Şekli 4.42’de verilmektedir. Verim hesaplamalarında alanın elektriksel geçirgenliğini ( $\epsilon_0$ )  $8.85 \times 10^{-12}$  C/V.m, partikülün bağıl dielektrik sabitini ( $\epsilon_w$ ) 6, partikülün çapını ( $d_p$ ) 1  $\mu\text{m}$ , partiküllerin yüklendiği elektrostatik alan gücünü (E)  $4 \times 10^5$  V/m ve 200 °C’deki gazın dinamik viskozitesi ( $\mu$ )  $2.53 \times 10^{-5}$  kg/m.s olarak alınmış ve bu değerler kullanılarak göç hızı ( $\omega_e$ ) 0.041976 m/s olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.42’deki verim hesaplamaları göç hızı 0.041976 m/s değerine göre hesaplanmıştır. Şekil 4.42 (a) birinci grupta yer alan model numarası 1-48 arasındaki modellerin verim hesaplamalarını vermektedir. Şekil 4.42 (a) incelendiğinde, birinci grup modeller arasında bir verim artışı söz konusudur.

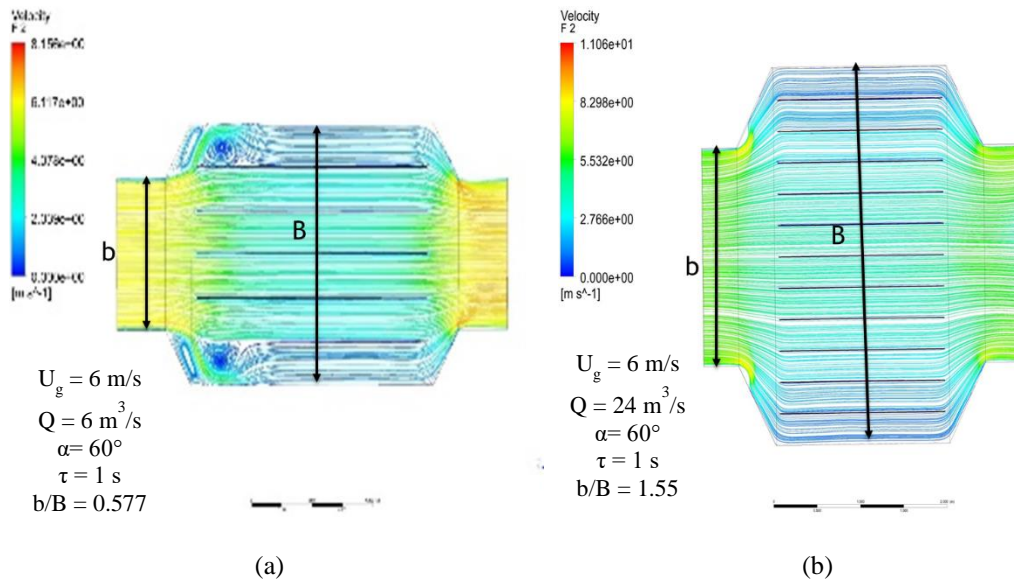
Bu artışın sebebi ya yaklaşma hızının artmasından ya debinin artmasından ya da bekletme süresinin artmasından kaynaklanıyor olabilir. Bu değişimin sebebini anlayabilmek için ikinci grup analizler gerçekleştirilmiştir. İkinci grup analizlerde bekletme süresi sabit alınmış, değişken olarak hız ve debi değiştirilmiştir. Şekil 4.42 (b)'deki modellerin verimleri incelendiğinde ikinci gruptaki modeller arasında yine verim artışı söz konusudur. Üçüncü grup analizlerde ise bekletme süresi sabit 1 s ve yaklaşma hızı sabit 6 m/s alınmış, değişken olarak debi değiştirilmiştir. Debinin değiştirilmesi için giriş ağızı ve ESÇ yapısının boyutları artırılmıştır. Şekil 4.42 (c)'deki modellerin verimleri incelendiğinde verim artışı söz konusu olduğu söylenebilmektedir.





Şekil 4.42. ESÇ modellerin farklı açı değerlerine göre verimleri (Model 1-144)

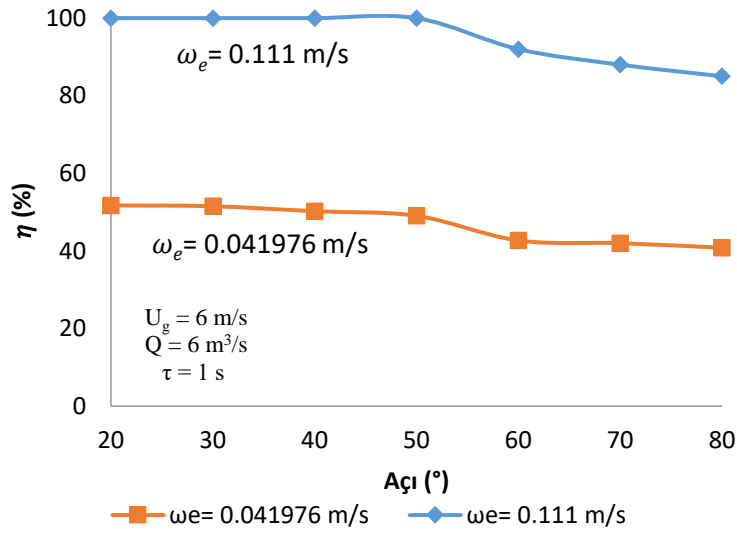
Şekil 4.42 (c)'deki verim grafiklerinde üçüncü gruptaki modeller arasında çok fazla bir değişim olmamasına rağmen Şekil 4.43'de üçüncü grupta bulunan Model-108 ve Model-144 tasarımlarının akım çizgisi konturları incelendiğinde ESC'nin içerisinde ve özellikle konik bölümlerin köşelerinde ani genişlemeye bağlı olarak vorteks oluşumunun meydana geldiği (Şekil 4.43 (a)), bu durumun meydana gelmesi sonucunda ESC toz toplama verimi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bekletme süresi, hız, koniklik açısı sabit alınıp debi artırıldığında Şekil 4.43 (b)'deki gibi akım çizgileri oluşmaktadır. Model-144'deki gibi debi artırıldığında ESC'nin giriş bölümünün boyutları ve toz toplama bölümünün boyutları da artmaktadır. Toz toplama odasının boyutlarının artması toz toplama plakalarının sayısının artmasına neden olmaktadır. Debinin artırılması için b/B değerinin artırılması gerekmektedir. Şekil 4.43 (a)'da b/B değeri 0.577 iken Şekil 4.43 (b)'de b/B değeri 1.155'dir. Bu durumlar göz önüne alındığında verimin artması kaçınılmaz olmaktadır. Verime etki eden parametrelerden biri olan göç hızı 0.111 m/s alınacak olursa toz toplama verimi Şekil 4.43 (a)'da % 30 ve Şekil 4.43 (b)'de ise % 98 olmaktadır. Debinin artırılması yani b/B oranının artırılması ESC içerisindeki vortekslerin azalmasına ve verimin artmasına neden olduğu görülmüştür.



Şekil 4.43. Üçüncü Gruptaki (a) Model 108 – (b) Model 144 tasarımlarının akım çizgisi konturları

Birinci, ikinci ve üçüncü grup modeller incelendiğinde giriş/çıkış bölümünün yatayla yaptığı koniklik açısı değerinin değişimi toz toplama verimi üzerine olan etkileri Şekil 4.41'de net bir şekilde anlaşılamamıştır. Koniklik açısı değerinin yüksek

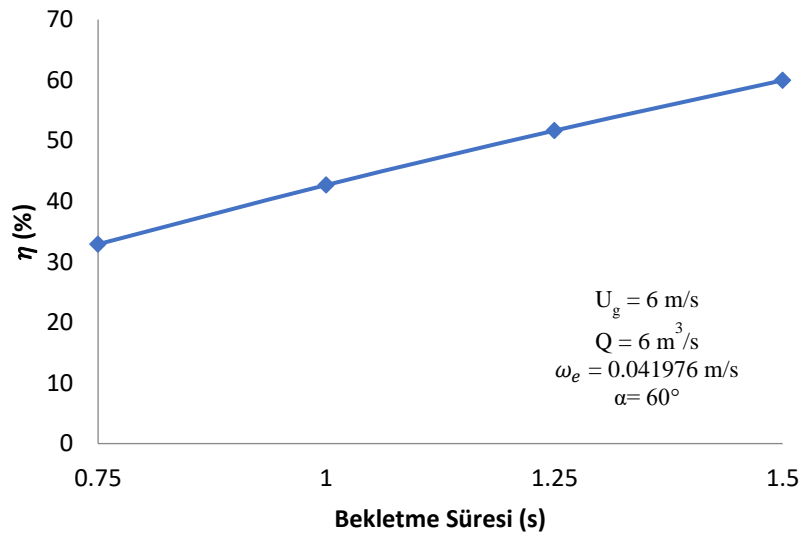
aralıklarda değişimi dördüncü grup model değerlendirme bölümünde anlatıldığı gibi basınç farkı değerlerinde ve homojen akışın sağlanmasında etkilerinin olduğu görülmektedir. Dördüncü grup modellerin göç hızı  $\omega_e = 0.041976$  m/s ve  $\omega_e = 0.111$  m/s alındığında verime olan etkileri Şekil 4.44’de verilmiştir. Şekil 4.43 incelendiğinde giriş/çıkış bölümünün yatayla yaptığı koniklik açısının artması toz toplama veriminin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca göç hızının artırılması durumunda toz toplama veriminin artmasında büyük bir öneme sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.44. Dördüncü grup EŞÇ modellerin verimleri (Model 145-151)

Beşinci grup model sonuçları incelendiğinde EŞÇ toz toplama bölümündeki bekleme süresinin değişiminin toz toplama verimine olan etkileri Şekil 4.45’te verilmektedir. Şekil 4.45’deki verim hesapları göç hızı 0.041976 m/s alınarak hesaplanmıştır. Şekil 4.45 incelendiğinde EŞÇ içerisindeki bekleme süresinin artması toz toplama veriminin artmasına neden olmaktadır. Bunun sebebi yüksek bekleme süresine sahip modellerde toz toplama plakalarının boyutlarındaki artış toz toplama verimin artmasına neden olmaktadır. Beşinci grup model değerlendirmelerinde Şekil 4.32, Şekil 4.34 incelenecek olursa eğer bekleme süresinin artması EŞÇ içerisindeki gaz akışını düzenlemede ve köşelerde oluşan vorteksin azalması ya da yok olmasında etkili olmadığı görülmüştür. Bu durumlar neticesinde EŞÇ içerisindeki bekleme süresinin artmasıyla artan EŞÇ boyutları işletme maliyetinin ve ilk yatırım maliyetlerinin artmasına neden olacaktır.

Şekil 4.40 incelenecek olursa alan şarjında partikül bekletme süresi 1 s ile 10 s karşılaştırılmıştır. Bu şekilde alan şarjında gaz akım hızıyla hareket eden tozların ESC içerisindeki bekletme süresinin artması, göç hızı değerinde çok fazla değişime neden olmadığı görülmektedir. Difüzyon ile şarjda ise partiküllerin rastgele hareketi söz konusu ve partiküller ne kadar süre ESC toz toplama odasında kalırsa o kadar deşarj elektrotuna rastlama olasılığı artmaktadır. Bu yüzden difüzyon şarjında bekletme süresi daha etkilidir. Baca gazının toz yükü fazla olduğu durumda partiküller elektriksel yük ile zor yüklenerek çok ince tozların yüklenmesi daha da zorlaşmaktadır. Bu nedenle aerodinamik çapı çok daha küçük tozları giderebilmek için ESC odalarını seri bağlamak ve ilk odadan son odaya doğru deşarj elektrotlarına uygulanan gerilimi artırmak gerekmektedir. Bu sayede tek odalı yüksek boyutlu ESC model tasarımları gerçekleştirilmeden, seri bağlı ESC modelleri tasarlanıp yüksek toz toplama verimleri elde edilmesi mümkün olacaktır.

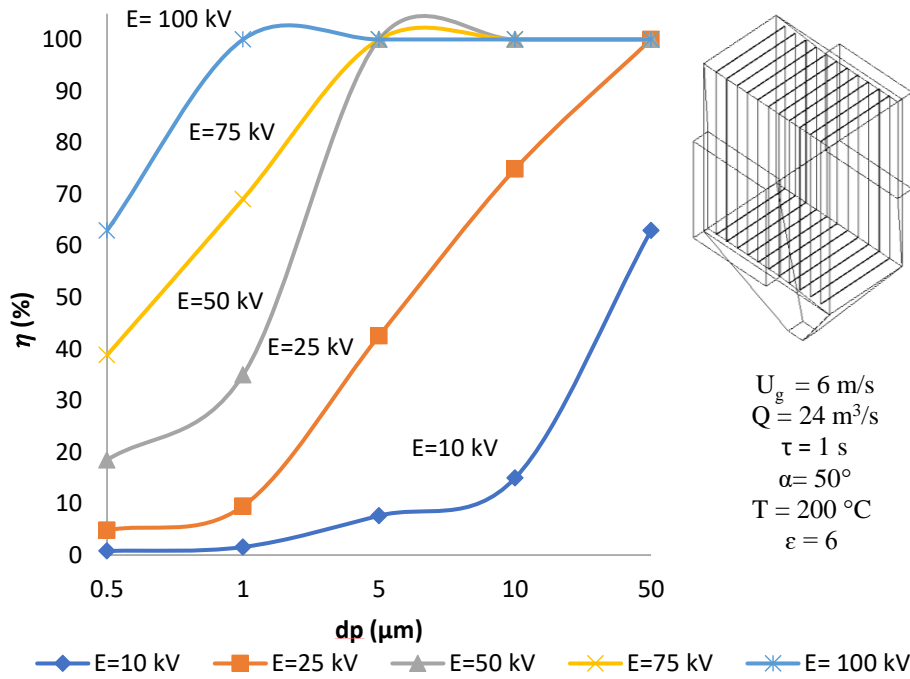


Şekil 4.45. Beşinci grup ESC modellerin verimleri (Model 152-155)

Altıncı grup model sonuçları incelendiğinde ESC içerisinde düzgün gaz akışının sağlanabilmesi için giriş/çıkış bölümündeki koniklik açı değerleri ile aynı açı değeriyle toz toplama plakalarının uç kısımları kesilerek düzgün gaz akışı ve köşelerde oluşan vorteksin azaltılması ya da yok edilmesi sağlanmıştır. Altıncı grup ESC model tasarımlarının toz toplama verimleri göç hızı 0.041976 m/s alınarak hesaplanmıştır. Model verimleri şu şekildedir; Model-156'nın verimi % 43, Model-157'nin verimi % 41 ve Model-158'in verimi % 44'tür. Model-157'de toz toplama plakaları giriş ve çıkış uçlarından kısaltılmıştır. Plakanın iki ucu kısaltıldığında toz toplama plaka alanı da

azalmaktadır. Bu yüzden verim % 43'ten % 41'e düşmektedir. Ancak Model-158'de toz toplama plakaları giriş ucundan kısaltılmıştır. Plakanın tek ucu kısaltıldığında toz verimi % 43'ten % 44'e çıkmaktadır. Toz toplama plaka alanı azalsa da EŞÇ içerisinde köşelerde vorteksler azalıp düzgün gaz akışı sağlandığı için verim artışı Model-158'de daha fazla olduğu görülmektedir.

Toz toplama verimini en fazla etkileyen faktörlerden biri partiküllerin yüklendiği elektrostatik alan gücüdür. Üçüncü grup model tasarımlarından olan Model-134'ün elektrotlarına farklı voltaj akımları uygulandığında ve farklı partikül çapındaki tozların, toz toplama verimleri Şekil 4.46'deki gibidir. Düşük partikül çapına sahip tozlara yüksek elektriksel alan gücü uygulandığında toz toplama verimi artmaktadır. Intra ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptıkları çalışmada 0.01  $\mu\text{m}$  – 100  $\mu\text{m}$  arasında partiküllere 5 kV-25 kV arasında elektrik alan uygulanmış ve toz toplama verimi Şekil 4.46 ile uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil 4.46 incelendiğinde sisteme uygulanan voltaj arttıkça toz toplama veriminin de arttığı görülmektedir.



Şekil 4.46. Elektrotlara uygulanan farklı elektriksel alan gücünün partikül boyut-verim ilişkisi (Model-134)

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, toz toplama sistemleri arasında yaygın olarak kullanılan ESC'lerin toz toplama verimini artırmak için ESC içerisinde gaz akış dağılımının uygun geometrik tasarımla düzenlenmesi amaçlanmıştır. ESC'lerin toz toplama verimi üzerine etkileri Talaie ve arkadaşlarının 2001 yılında yaptıkları çalışmada da belirtildiği gibi üç ana faktör (elektriksel alan, gaz akışı ve partikül hızı) etkili ve literatür çalışmalarında da bu faktörler üzerinde durulmaktadır. ESC'lerin verimine etki eden faktörlerin arayışı günümüzde de çoğu araştırmacı tarafından yaygın bir şekilde araştırılmaktadır. Belirtilen faktörlerin hepsinin bir arada modellenmesi tasarımı karmaşık hale getirmektedir. Ancak bu faktörlerin her biri birbirleri üzerinde önemli etkiye sahip olması nedeniyle bir faktör üzerinde gerçekleştirilecek verim artırıcı bir etki diğer faktörleri de etkileyecek ve ESC veriminin artmasına neden olacaktır. Bundan dolayı verime etki eden faktörlerden biri olan gaz akışının ESC içerisinde düzgün dağılmasını sağlamak oldukça büyük bir öneme sahiptir. Çalışmada gaz akışının homojen dağılması amacıyla ESC'nin geometrik yapısı üzerinde yeni tasarımlar ve araştırmalarda bulunulmuştur.

Çalışma kapsamında tasarlanan ESC modellerin bekletme süreleri, giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri, plaka sayıları, ESC boyutları, klasik toz toplama plakaların yerleştirme şekillerinin aksine farklı plaka yerleştirme biçimleri gibi parametreler tasarım parametreleri olarak farklı ESC model tasarımları elde edilmiştir. Daha sonra ESC içerisindeki akış analizleri gerçekleştirilerek farklı parametre değerlerinde tasarlanan ESC'lerin basınç kaybına ve toz tutma verimine etkileri, farklı yaklaşma hızı ve farklı debi değerlerinde araştırılmıştır. Tasarlanan ESC modellerinin değişkenleri, yaklaşma hızları sırasıyla; 6 m/s, 12 m/s, 18 m/s ve 24 m/s, gaz debileri sırasıyla; 6 m<sup>3</sup>/s, 12 m<sup>3</sup>/s, 18 m<sup>3</sup>/s ve 24 m<sup>3</sup>/s, ESC içerisinde baca gazı bekletme süreleri sırasıyla; 0.75 s, 1 s, 1.25 s ve 1.5 s, ESC giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri sırasıyla; 20°, 30°, 40°, 50°, 52°, 54°, 56°, 58°, 60°, 70° ve 80° ve plakalı/plakasız olacak şekilde tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Model ESC'lerin içine yerleştirilen plaka sayıları farklı gaz debilerine göre 7, 9, 11 ve 13 adet olacak şekilde plakalar yerleştirilmiştir. Çalışmada 158 adet model tasarlanmış ve model tasarımları altı grupta değerlendirilmiştir.

Tasarlanan modellerin 3D geometrileri SOLIDWORKS programında çizilmiştir. Daha sonra akış analizleri için en yaygın kullanılan programlardan biri olan

kısmi diferansiyel denklemleri sonlu hacimler metoduna dayalı çözümler gerçekleştirilen HAD programı FLUENT ile simüle edilerek görselleştirilmiştir. Analizlere başlamadan önce işlem yoğunluğunu azaltmak, çözüm süresini kısaltmak, doğru hesaplama yapılabilmesi ve hata risklerini azaltmak için çözüm ağ yapısının niteliği ve sıklığından bağımsız ağ yapıları oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal hesaplamalar için çift hassasiyet seçilerek tasarlanan modellerin tek fazlı, özelliklerin sabit kabul edildiği, sıkıştırılmaz daimî (zamandan bağımsız) bir akış olduğu ve basınç temelli çözücü (Pressure based solver) tipi seçilmiştir. Basınç-hız bağlantısı için SIMPLE algoritması ve kontrol hacimlerin yüzeyindeki değişkenleri interpolate edilmesi için ikinci dereceden ayrıklaştırma kullanılmıştır. ESC içerisindeki türbülanslı akışı modellemek için Standart duvar fonksiyonlu Realizable k- $\epsilon$  türbülans modeli seçilmiştir. Daha sonra gerekli sınır şartlar tanımlanıp sayısal çözümün doğru sonuçlar vermesi için düzenlemeler yapıldıktan sonra programın Standart duvar fonksiyonlu Realizable k- $\epsilon$  türbülans model denklemleri ile RANS denklemi kullanılarak model çözümleri gerçekleştirilmiştir. Altı grup model tasarımlarında 158 adet model kullanılmış, bu modellerin analizleri sonucunda ESC içindeki akışın hız ve basınç dağılımları ayrıntılı olarak CFD-POST modülü ile görselleştirilmiştir. Daha sonra verim analizleri yapılarak model karşılaştırmaları ve değerlendirmeleri yapılmıştır.

Birinci grup ESC model tasarımları için elde edilen bulgulara göre,

- Yaklaşma hızının, debinin ve bekletme süresinin artmasıyla basınç kayıp değerlerinin ve basınç kayıp katsayısının arttığı,
- Plakalı ve plakasız olan modeller karşılaştırıldığında (düşük hız ve düşük debi değerlerindeki) plakasız modellerde basınç düşüşünün yüksek olduğu,
- ESC içerisine plakaların yerleştirilmesiyle düzgün gaz akışının oluştuğu ve bu sayede basınç kayıp katsayısının da azaldığı,
- ESC içerisindeki basınç farkı ve hız değerlerinin plakalı modellerde daha homojen olarak dağıldığı,
- Akım çizgisi konturları incelendiğinde düşük hız, düşük debi ve düşük bekletme süresi değerlerine sahip ESC'lerin, konik kısımların köşelerindeki vorteks oluşumunda artışa neden olduğu,

- Bu gruptaki modellerde toz toplama plakalarının varlığı sistemin genel basınç farkı değerini düşürse de plakalar arasında daralmaya bağlı olarak basınç farkı değerlerinde bir artışa neden olduğu,
- ESC içerisine toz toplama plakalarının yerleştirilmesiyle ESC'nin kenarlarında hızın çok fazla azaldığı ve plakaların orta kısımlarında ise hızın arttığı,
- ESC'lerin kenarlarındaki hızın çok fazla azalması konik kısımların köşelerindeki vortekslerin oluşmasına ve düzgün gaz akışının sağlanamamasına neden olduğu,
- Düşük hız, düşük debi ve düşük bekletme süresindeki model tasarımlarındaki plakalı ESC'lerin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı tüm açılarında vortekslerin oluştuğu,
- Modeller arasında hız, debi ve bekletme süresinin artması ile verim artışının söz konusu olduğu görülmüştür.

Tasarımlarda değiştirilen yaklaşma hızı, bekletme süresi ve debi gibi parametrelerin ESC'lerin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerlerine olan etkisi birinci grup model değerlendirilmelerinde anlaşılamamış ve ikinci grup modellerin tasarlanıp analizleri yapılmıştır.

İkinci grup ESC model tasarımları için elde edilen bulgulara göre,

- Yaklaşma hızının ve debinin artmasıyla basınç kayıp değerlerinin ve basınç kayıp katsayısının arttığı,
- Plakalı ve plakasız olan düşük hız ve düşük debi değerlerindeki modeller karşılaştırıldığında plakasız modellerde basınç düşüşün yüksek olduğu,
- ESC içerisine plakaların yerleştirilmesiyle düzgün gaz akışının oluştuğu ve bu sayede basınç kayıp katsayısının da azaldığı,
- ESC içerisindeki basınç farkı ve hız değerlerinin plakalı modellerde daha homojen olarak dağıldığı,
- Akım çizgisi konturları incelendiğinde bu gruptaki modellerin hız değerleri birinci gruptaki modellerde olduğu gibi düşük hız ve düşük gaz

debi değerlerine sahip ESÇ'lerin konik kısımlarının köşelerindeki vorteks oluşumunun hala söz konusu olduğu,

- Birinci grupta olduğu gibi ikinci gruptaki modellerde de toz toplama plakalarının varlığı ile sistemin genel basınç değerlerini düşürse de plakalar arasında daralmaya bağlı olarak basınç farkı değerlerinde bir artışa neden olduğu,
- ESÇ içerisine toz toplama plakaların yerleştirilmesiyle ESÇ'nin kenarlarındaki hızın çok fazla azaldığı ve plakaların orta kısımlarında ise hızın arttığı,
- ESÇ'nin kenarlarındaki hızın çok fazla azalması ESÇ'lerin konik kısımların köşelerindeki vortekslerin oluşmasına ve düzgün gaz akışının sağlamamasına neden olduğu,
- Plakalı ESÇ'lerin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı 56° (Model-56) ve 58°'lik (Model-58) açı değerlerinde vortekslerin daha fazla oluştuğu görülmüştür.

Tasarımlarda değiştirilen yaklaşma hızı ve debi gibi parametrelerin ESÇ'lerin giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerlerine olan etkisi ikinci grup model değerlendirilmelerinde anlaşılammış ve üçüncü grup modellerin tasarlanıp analizleri gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü grup ESÇ model tasarımları için elde edilen bulgulara göre,

- Debinin artmasıyla basınç kayıp değerlerinin ve basınç kayıp katsayısının çok fazla değişmediği,
- Bu modellerde koniklik açısının artması ile basınç farkı değerlerinde az da olsa bir artışın söz konusu olduğu,
- İkinci grup ve üçüncü grup modeller karşılaştırıldığında basınç düşüşünün debiden daha çok yaklaşma hızının değişiminden daha fazla etkilendiği,
- ESÇ içerisindeki basınç farkı ve hız değerlerinin plakalı modellerde daha homojen olarak dağıldığı,
- Yaklaşma hızları 6 m/s, giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değeri 50° ve ESÇ toz toplama bölümündeki gazın bekletme süresi 1 s olan

iki model karşılaştırıldığında gaz debisi 6 m<sup>3</sup>/s olan modelin gaz debisi 24 m<sup>3</sup>/s olan modeldekine göre debinin 4 kat arttığı, bu iki modelin genişleyen ESC boyutları ve giriş ağzının ESC'nin basınç farkı değerlerinde ise 20 Pa'dan 47 Pa'a yükselmesine neden olduğu,

- Giriş gaz debileri 6 m<sup>3</sup>/s, giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değeri 50° ve ESC toz toplama bölümündeki gazın bekletme süresi 1 s olan farklı yaklaşma hızlarında debiyi sabit tutabilmek için ESC'nin giriş ağzının genişletildiği iki model karşılaştırıldığında, bu modellerden yaklaşma hızı 24 m/s olan modelin yaklaşma hızı 6 m/s olan modelinkine göre yaklaşma hızının 4 kat artmasıyla basınç farkı değerlerinin 20 Pa'dan 576 Pa'a çıktığı görülmüştür. ESC tasarımlarında gazın yaklaşma hızının basınç farkına olan etkisi oldukça fazla olduğu,
- Debinin artmasıyla verim artışının söz konusu olduğu,
- Giriş gaz debileri 6 m<sup>3</sup>/s, giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerleri 60° ve ESC toz toplama bölümündeki gazın bekletme süreleri 1 s, basınç farkı değişiminin en fazla yaklaşma hızının değişiminden etkilendiği debinin çok fazla bir etkisinin olmadığı ve debinin artması ile genişleyen ESC toz toplama bölümün boyutları ve giriş ağzının ESC'nin konik kısımlardaki vorteksi azalttığı,
- Akım çizgisi konturları incelendiğinde ise vortekslerin artmasından dolayı verimin azaldığı görülmektedir.

Verim değerlendirmesi bölümünde anlatıldığı gibi tüm parametreleri sabit tutup debinin artırılması durumunda ESC'nin b/B oranının artırılması gerekmektedir. Debinin 6 m<sup>3</sup>/s'den 24 m<sup>3</sup>/s'ye çıkardığımızda, b/B oranı 0.577'den 1.155'e yükselmekte ve göç hızının 0.111 m/s alınır ise toz toplama verimi % 30'dan % 98'e çıktığı görülmektedir. Debinin artırılması yani b/B oranının artırılması ESC içerisindeki vortekslerin azalmasına ve bu sayede verim artışına neden olmaktadır. Ancak ESC'nin giriş kanal boyutlarının sabit olması, yaklaşma hızının ve debisinin artırılması durumunda ESC'nin aşırı genişlemesine neden olmaktadır. Bu durum sistemin kontrolünü olumsuz yönde etkileyeceğinden büyük boyutlu ESC kullanılmasının yerine paralel bağlı ESC'lerin kullanılması daha verimli işletilmesine neden olacaktır.

Dördüncü grup ESC model tasarımları için elde edilen bulgulara göre,

- ESC'nin giriş/çıkış koniklik açısının artmasıyla sistem içindeki basınç kayıp değerlerinde bir artışın olduğu,
- Açının artması ile giriş/çıkış konik bölümünün toplama odasına yaklaşması toplama odasındaki ve plakalar arasındaki statik basıncın daha fazla artmasına neden olduğu,
- Açısının artmasıyla ESC'nin köşelerinde ve iki yan bölgelerinde hızın neredeyse sıfıra yaklaştığı ve gazın homojen dağılmadan toz toplama odasının orta bölmesinden geçtiği,
- Modellerdeki koniklik açı değerleri arttıkça gazın toz toplama odasındaki hız konturlarında hızın arttığı, buradaki plakalar arasından geçen gaz hızının artması toz toplama veriminin azalmasına neden olduğu,
- Bu gruptaki modellerin giriş/çıkış bölümünün yatayla yaptığı koniklik açısının artması ile toz toplama veriminin azaldığı,
- Ayrıca göç hızının artması toz toplama veriminin artmasında büyük öneme sahip olduğu görülmüştür.

Giriş/çıkış koniklik açısının artmasıyla ESC'nin köşelerinde ters akım oluşmakta ve bu da vorteks oluşumuna neden olmaktadır. Koniklik açısının artmasıyla ESC'nin köşelerinde vorteks şiddeti ve sayısında da artış olmaktadır. Yüksek açı değişimlerinde bu durum daha net görülmektedir. Giriş/çıkış koniklik açısının artmasıyla ESC'nin iki yan bölgesindeki bölümde gaz geçişi olmamakta, burada gazın geçiş hızı sıfıra yaklaşmaktadır ve hız vektörleri yardımıyla gazın kenarlardan değil de orta bölmeden geçtiği daha net görülmektedir.

Beşinci grup ESC model tasarımları için elde edilen bulgulara göre,

- Bekletme süresinin ESC içerisindeki basınç farkı ve hız parametrelerinde çok az bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Ancak ESC içerisindeki bekletme süresinin artması toz toplama veriminin artmasına neden olduğu,
- Yüksek bekletme süresine sahip modellerin toz toplama plakaları boyutlarının artması verimin artmasına neden olduğu,

- Bekletme süresinin artması ESC içerisindeki gaz akışını düzenlemede ve köşelerde oluşan vorteksleri azaltmada ya da yok olmasında etkili olmadığı görülmüştür.

ESC içerisindeki bekletme süresinin artması ESC boyutlarının artmasına neden olduğu görülmüştür. Ancak bu durum işletme maliyetini ve ilk yatırım maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Alan şarjında gaz akım hızıyla hareket eden tozların ESC içerisindeki bekletme süresinin artması göç hızı değerinde çok fazla değişime neden olmamaktadır (Flagan and Seinfeld, 1988). Baca gazının toz yükü fazla olduğu durumda partiküller elektriksel yük ile zor yüklenerek çok ince tozların yüklenmesi daha da zorlaşmaktadır. Bu nedenle aerodinamik çapı çok daha küçük tozları giderebilmek için ESC odalarını seri bağlamak ve ilk odadan son odaya doğru deşarj elektrotlarına uygulanan gerilimi artırmak gerekmektedir. Bu sayede tek odalı yüksek boyutlu ESC tasarlamadan seri bağlı ESC'ler tasarlanıp yüksek verimle toz toplanabilmektedir.

Altıncı grup ESC model tasarımları için elde edilen bulgulara göre,

- ESC'nin toz toplama odasının girişindeki plakaların uçlarını kısalttığımızda akış zorlanmadan ESC odasına girmektedir. Ayrıca ESC toz toplama odasına homojen bir gaz akışı sağladığı ve toz toplama odasının içindeki basınç farkı değerlerinin azaldığı,
- Akım çizgilerine baktığımızda ise klasik plaka yerleştirme şekline sahip ESC modelindeki toz toplama odasının köşelerinde oluşan vorteks diğer modellerde neredeyse yok denecek kadar azaldığı,
- Klasik toz toplama plakaların yerleştirme şekline sahip modelin (Model-156) toz toplama verimi % 43 iken toz toplama plakaları giriş ve çıkış uçlarından kısaltılmış olan modelin (Model-157) toz toplama veriminin % 41 olduğu ve tek ucu kısaltılmış olan modelin (Model-158) ise toz toplama veriminin % 44 olduğu, plakanın iki ucu kısaltıldığında ise toz toplama plaka alanının da azalması verimin % 43'ten % 41'e düşürdüğü, ancak plakanın tek ucu kısaltıldığında ise toz veriminin % 43'ten % 44'e çıktığı görülmüştür. Model-158'de toz toplama plaka alanı azalsa da ESC içerisinde ve köşelerinde vorteks oluşumlarının azaldığı görülmüştür. Bu

durumdan dolayı düzgün gaz akışı sağlandığı için verim artışının daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

- ESÇ plakaları bu şekilde tasarladığında ESÇ içerisindeki gaz akışı homojen hale gelmekte ve verim artışı söz konusu olmaktadır.

Tasarlanmış olan ESÇ sistemleri incelendiğinde gaz akım hızı arttıkça basınç kaybı değerlerinde artış olduğu görülmektedir. ESÇ içerisinde en düşük basınç farkı değeri olan model giriş/çıkış koniklik açısının yatayla yaptığı açı değeri 50°, yaklaşma hızı 6 m/s, gaz debisi 6 m<sup>3</sup>/s ve ESÇ giriş genişliğinin gövde genişliğine oranının 1/1.7 olduğu durumda ESÇ girişinde minimum vorteks ve plakalar arasında homojen hız dağılımı sağladığı görülmüştür. Ayrıca ESÇ toz toplama bölümünün içine plakaların yerleştirilmesi ESÇ'nin partikül toz toplama odasındaki gaz akışının homojen hale getirildiği görülmektedir. Ancak plakaların ESÇ içerisine fazla yerleştirilmesiyle bölmeler arasında vorteks oluşumuna neden olduğu tespit edilmiştir. Plakalar arasında oluşan vorteksler partiküllerin elektrostatik alan ile yüklenmesini engelleyerek toplama verimini azaltıcı etkiye sahip olmaktadır (Kim and Lee, 1999; Park and Kim 2003). Toz toplama verimini en fazla etkileyen faktörlerden biri partiküllerin yüklendiği elektrostatik alan gücüdür. Sisteme uygulanan voltaj arttıkça toz toplama verimi de artmaktadır. ESÇ sistemlerinin çok küçük boyuttaki tozları da etkin bir biçimde tutabilmesi elektriksel alan, yaklaşma hızı, homojen gaz dağılımı gibi faktörlere bağlıdır. Bu faktörlerin hepsi birbiri ile ilişkisi söz konusudur. ESÇ içerisindeki gaz akımını düzenlemek verim artırıcı bir etkiye sahip olduğunu görülmektedir.

Tasarlanan modeller incelendiğinde ESÇ içindeki gaz akım dağılımını uygun geometrik tasarım ile düzenleyerek toz toplama plakaları arasında eşit hızda gaz akımının geçmesi sağlanabilmektedir. Bu sayede gaz akım dağılımının optimizasyonu ile ESÇ'nin küçük boyuttaki tozları da etkin biçimde tutulması sağlanabilmektedir. ESÇ içerisinde türbülans şiddetini minimuma indirecek tasarımı sağlamak hem sistemin basınç kayıplarını azaltacak hem de toz toplama plakalarında toplanan tozların yeniden sürüklenmesi engellenmiş olacaktır. Tasarlanan 158 modelde düşük basınç kaybı ve yüksek toz toplama verimi; düşük yaklaşma hızlarında, düşük giriş/çıkış koniklik açısının yatayla yaptığı açı değerlerinde, düşük debilerde, düşük giriş ağız alanlarında, yüksek plaka alanlarında, partikülün yüksek göç hızlarında ve

klasik modellerin dışındaki toz toplama giriş ucunun kesik olduğu toz toplama plakası modellerinde elde edilmiştir.

Yapılan çalışmada basınç kaybını en fazla etkileyen faktörler yaklaşma hızı, giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değeri, toz toplama plakasının şekli ve ESC toz toplama bölümündeki plaka sayısı olduğu görülmüştür. Toz toplama verimini ise en fazla plakalar arasındaki ortalama iç hızın, plaka ve elektrotlar arasındaki mesafenin, göç hızının, giriş/çıkış konik kısımların yatayla yaptığı açı değerinin, toz toplama plaka alanının, toz toplama plakası şeklinin ve ESC içerisindeki bekletme süresinin etkilediği görülmüştür. Toz toplama verimini ve basınç kaybını etkileyen faktörlerin etki seviyeleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Toz toplama verimini ve basınç kaybını etkileyen faktörler

Parametreler	Toz toplama verimi	Basınç kaybı
Göç hızı	Çok yüksek	-
Plaka-elektrot arasındaki mesafe	Yüksek	-
İç hız	Yüksek	Yüksek
Koniklik açısı	Orta	Orta
Toz toplama plaka alanı	Yüksek	-
Toz toplama plakaların yerleştirme biçimi	Orta	Orta
Bekletme süresi	Orta	Düşük
Yaklaşma hızı	Yüksek	Çok yüksek
Elektrik alan gücü	Çok yüksek	-
Gaz debisi	Orta	Düşük

Çalışma sonuçları neticesinde ESC’lerin giriş/çıkış koniklik açısı, bekletme süresi, yaklaşma hızı ve debisi değiştirilerek akış optimizasyonu ve ESC içerisinde meydana gelen vorteks olayını uygun geometrik tasarımlar ile giderilebilmesi mümkündür. Büyük bir pazar ağına sahip olan ESC sistemlerinin yeni tasarımlarıyla toz tutma verimlerinin artmasına ve işletme maliyetlerinin azalmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca elde edilen veri ve değerlendirme sonuçları gelecekteki araştırmalara ve tasarımcılara da öncülük edecek ve ışık tutacaktır.

## KAYNAKLAR

- Adamiak, K. (2013). Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: a review. *Journal of Electrostatics*. 71 (4). 673-680. doi:10.1016/j.elstat.2013.03.001
- Adamiak, K. and Atten, P. (2009). Numerical simulation of the 2-D gas flow modified by the action of charged fine particles in a single-wire ESP. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 16 (3). 608-614. doi: 10.1109/TDEI.2009.5128495
- Anonim, (2020a). *Laminer ve türbülanslı akış*. <https://www.nkfu.com/reynold-sayisi-nedir-nasil-hesaplanir/> (Erişim tarihi: 1.09.2020)
- Anonymous, (2020b). *ESP design review (lesson 4)*. Retrieved September 1, 2020, from <https://ppcair.com/pdf/EPA%20Lesson%20Lesson%204%20-%20ESP%20Design.pdf>
- Anonymous, (2020c). *ESP design parameters and their effects on collection efficiency (lesson 3)*. Retrieved September 1, 2020, from [https://www.neundorfer.com/wp-content/uploads/2016/05/ESP-KnowledgeBase-03-Design\\_Parameters.pdf](https://www.neundorfer.com/wp-content/uploads/2016/05/ESP-KnowledgeBase-03-Design_Parameters.pdf)
- Anonymous, (2020d). *Electrostatic precipitator operation (lesson 1)*. Retrieved September 1, 2020, from <https://www.neundorfer.com/wp-content/uploads/2016/05/ESP-KnowledgeBase-01-Operation.pdf>
- ANSYS (2009). ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide. *ANSYS Inc Release*. Retrieved September 1, 2020, from [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/FLUENT/html/th/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/FLUENT/html/th/main_pre.htm)
- ANSYS (2013). ANSYS FLUENT 15.0 Theory Guide. *ANSYS FLUENT Release*. Retrieved September 10, 2020, from <http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/martoran/NotasModelosGrad/ANSYS%20FLUENT%20Theory%20Guide%2015.pdf>
- ANSYS (2015, February). "Lecture 7: Mesh Quality & Advanced Topic". *Introduction to ANSYS Meshing*. ANSYS FLUENT Release. Retrieved September 1, 2020, from [https://www.academia.edu/16970000/MESH\\_QUALITY\\_AND\\_ADVANCED\\_TOPICS\\_ANSYS\\_WORKBENCH\\_16\\_0](https://www.academia.edu/16970000/MESH_QUALITY_AND_ADVANCED_TOPICS_ANSYS_WORKBENCH_16_0)
- Arabacı, S. (2016). *Canlılardan Esinlenerek Kara Taşıtlarının Aerodinamik Tasarımlarının İyileştirilmesi*. Basılmamış Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 120, Manisa.
- Atten, P., McCluskey, F.M.J. and Lahjomri, A.C. (1987). The electrohydrodynamic origin of turbulence in electrostatic precipitators. *IEEE Transactions on Industry Applications*. IA-23 (4). 705-711. doi:10.1109/tia.1987.4504969
- Ayhan, H. (2011). *T-Birleşim Bölgesi Yakınlarında Sıcaklık Salınımlarının Modellenmesi*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı, 60, Ankara.
- Balgün, Y.E. (2009). *Elektrostatik Filtre Verimini Artırıcı Çözümlerin incelenmesi*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, 121, İstanbul.
- Bernstein, S. and Crowe, C.T. (1981). Interaction between electrostatics and fluid dynamics in electrostatic precipitators. *Environment International*. 6 (1). 181-189. doi:10.1016/0160-4120(81)90024-6
- Bhasker, C. (2011). Flow simulation in electro-static-precipitator (ESP) ducts with turning vanes. *Advances in Engineering Software*. 42 (7). 501-512. doi:10.1016/j.advengsoft.2011.04.002

- Biege, N., Pretti, H. and Pirwitz, W. (1997, April). "Emerging and competing technologies for particulate control in cement plants". *39th IEEE Cement Industry Technical Conference*, (s. 321-344).
- Bilgin, Ş. (2014). *Periyodik Olarak Tam Gelişmiş Türbülanslı Akış ve Isı Transferinde Realizable K-Epsilon Türbülans Modelinin Performansının İncelenmesi*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi. Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 68, Yozgat.
- Boehm, J. (1982). Electrostatic precipitators. *Elsevier Scientific Publishing Company*. 1-52.
- Brauer, H. and Varma, Y. B. (1981). *Air pollution control equipment (First edition)*. Berlin: Springer.
- Bulut, E. (2016). *Direkt Püskürtmeli Motorlarda Püskürtme Karakteristiklerinin Nümerik İncelenmesi*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, 97, Bursa.
- Canadas, L., Navarrete, B. and Salvador, L. (1995). Theoretical modelling of electrostatic precipitators performance (PRELEC code). *Journal of Electrostatics*. 34 (4). 335-353. doi:10.1016/0304-3886(94)00021-N
- Chandrappa, R. and Kulshrestha, U.C. (2016). *Sustainable air pollution management theory and practice*. Springer: Switzerland.
- Choi, B.S. and Fletcher, C.A.J. (1997). Computation of particle transport in an electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*. 40-41. 413-418. doi:10.1016/S0304-3886(97)00080-6
- Choi, B.S. and Fletcher, C.A.J. (1998). Turbulent particle dispersion in an electrostatic precipitator. *Applied Mathematical Modelling*. 22. 1009-1021. doi:10.1016/S0307-904X(98)10034-3
- Cooperman, P. (1971). A new theory of precipitator efficiency. *Atmospheric Environment*. 5 (7). 541-551. doi:10.1016/0004-6981(71)90064-3
- Coşkun, U.C. (2014). *Hermetik Pistonlu Kompresörlerde Kullanılan Emme Susturucusunun Sayısal İncelenmesi*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 75, İstanbul.
- Çengel, Y.A. ve Cimbala, J.M. (2015). *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*. Tahsin Engin (Çev.), Ankara: Palme Yayınevi.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2009). Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/12/20141220-2-1.docx> (Erişim tarihi: 13.02.2020)
- Çiftçi, E. (2016). *Isı Tekerleği Performansının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Belirlenmesi*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, 80, Ankara.
- Davidson, J.H. and McKinney, P.J. (1991). EHD flow visualisation in the wire plate and barbed plate electrostatic precipitator. *IEEE Transaction on Industry Applications*. 27 (1). 154-160.
- Davidson, J.H. and Shaughnessy, E.J. (1986). Turbulence generation by electric body forces. *Experiments in Fluids*. 4 (1). 17-26. doi:10.1007/BF00316781
- Davis, J.L. and Hoburg, J.P. (1983). Wire-duct precipitator field and charge computation using finite element and characteristics methods. *Journal of Electrostatics*. 14 (2). 187-199. doi:10.1016/0304-3886(83)90006-2

- Deng, B., Xu, Y., Zhang, H. and Chen, X. (2019). Numerical simulation of electrostatic field and flow field and flow field and flow field in an electrostatic precipitator. *Journal of Air Pollution and Health*, 4 (2). 87-98.
- Dumont, B.J. and Mudry, R.G. (2003, March). Computational fluid dynamic modeling of electrostatic precipitators. in: *Proceedings of the Electric Power Conference*.
- EIA (2019). International Energy Outlook 2019 with Projections to 2050. *U.S. Energy Information Administration (US-EIA)*. Retrieved September 1, 2020, from [www.eia.gov/outlooks/ieo/](http://www.eia.gov/outlooks/ieo/)
- EPA (1985). Manual operation and maintenance manual for electrostatic precipitators. Retrieved September 1, 2020, from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/20008QN4.PDF?Dockey=20008QN4.PDF>
- EPA (2000). Control of particulate matter emissions. Retrieved September 1, 2020, from <http://www.4cleanair.org/APTI/413Combined.pdf>
- EPA (2002). EPA Air pollution control cost manual (sixth edition). Retrieved September 1, 2020, from [https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/c\\_allchs.pdf](https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/c_allchs.pdf)
- EPA (2020). Particulate matter (PM) pollution. Retrieved September 1, 2020, from <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
- Erdinç, M.T. (2014). *Birbirleriyle Bağlantılı Daralan ve Genişleyen Kanallarda Akış ve Isı Geçişinin Sayısal Olarak İncelenmesi*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 85, Osmaniye.
- Erol, H.İ. (2016). *Siklon Çıkış Boru Çapının Siklon Verimliliğine Etkisinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 101, Ankara.
- Farnoosh, N. (2011). *Three-dimensional modeling of electrostatic precipitator using hybrid finite element-flux corrected transport technique*. Unpublished Postdoctoral Studies, The University of Western Ontario Department of Electrical and Computer Engineering, Ontario.
- Flagan, R.C. and Seinfeld, J.H. (1988). *Fundamentals of air pollution engineering*. New Jersey: Prentice-Hall Englewood Cliffs.
- Gajbhiye, N., Eswaran, V., Saha, A. K. and Kumar, A. (2015). Numerical calculation of particle collection efficiency in an electrostatic precipitator. *Sadhana*. 40 (3). 863-873. doi:10.1007/s12046-015-0342-1
- Gallimberti, I. (1998). Recent advancements in the physical modelling of electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics*. 43 (4). 219-247. doi:10.1016/S0304-3886(98)00009-6
- Goo, J. and Lee, J.W. (1997). Stochastic simulation of particle charging and collection characteristics for a wire-plate electrostatic precipitator of short length. *Journal of Aerosol Science*. 28 (5). 875–893. doi:10.1016/S0021-8502(96)00475-2
- Griebel, M., Dornseifer, T. and Neunhoffer, T. (1998). *Numerical simulation in fluid dynamics: a practical introduction (Volume 3)*. USA: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Guo, B., Yu, A. and Guo, J. (2015). Numerical modelling of esp for design optimization. *Procedia Engineering*. 102. 1366-1372. doi:10.1016/j.proeng.2015.01.268
- Guo, B.Y., Hou, Q.F., Yu, A.B., Li, L.F. and Guo, J. (2013). Numerical modelling of the gas flow through perforated plates. *Chemical Engineering Research and Design*. 91 (3). 403-408. doi:10.1016/j.cherd.2012.10.004

- Gutierrez-Ortiz, F.J., Navarrete, B. and Cañadas, L. (2010). Dimensional analysis for assessing the performance of electrostatic precipitators. *Fuel processing technology*. 91 (12). 1783-1793. doi:10.1016/j.fuproc.2010.07.013
- Haider, A. and Levenspiel, O. (1989). Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles. *Powder Technology*. 58. 63–70.
- Haque, S., Rasul, M., Khan, M.M.K., Deev, A. and Rao, S. (2007a, December). “A numerical model of an electrostatic precipitator”. *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Gold Coast, Australia.
- Haque, S., Rasul, M., Khan, M.M.K., Deev, A. and Rao, S. (2007b). Numerical modelling for optimizing flow distribution inside an electrostatic precipitator. *International journal of mathematics and computers in simulation*. 1 (3). 255-261.
- Haque, S.M.E., Rasul, M.G., Deev, A.V., Khan, M.M.K. and Subaschandar, N. (2009a). Flow simulation in an electrostatic precipitator of a thermal power plant. *Applied Thermal Engineering*. 29 (10). 2037-2042. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.10.019
- Haque, S.M.E., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., Deev, A.V. and Subaschandar, N. (2009b). Influence of the inlet velocity profiles on the prediction of velocity distribution inside an electrostatic precipitator. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 33 (2). 322-328. doi:10.1016/j.exptermflusci.2008.09.010
- Hassid, S., Oron, A. and Gutfinger, C. (1987). An asymptotic description of electrostatic precipitation of charged particles in turbulent flow. *Journal of Aerosol Science*. 18 (4). 357-367. doi: 10.1016/0021-8502(87)90034-6
- He, Z. and Dass, E.T.M. (2017). Correlation of design parameters with performance for electrostatic precipitator. Part II. Design of experiment based on 3D FEM simulation. *Applied Mathematical Modelling*. 57. 656-669. doi:10.1016/j.apm.2017.06.031
- Hetsroni, G. (1989). Particles-turbulence interaction. *International Journal of Multiphase Flow*. 15 (5). 735-746. doi:10.1016/0301-9322(89)90037-2
- Heumann, W.L. (1997). *Industrial air pollution control systems (Vol. 620)*. New York: McGraw-Hill.
- Hinds, W.C. (1982). *Aerosol Technology. Properties Behaviour and Measurement of Airborne Particles*. New York: John Wiley and Sons.
- Hou, Q.F., Guo, B.Y., Li, L.F. and Yu, A.B. (2009, December). “Numerical simulation of gas flow in an electrostatic precipitator”. *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, CSIRO, Melbourne.
- Institute of Clean Air Companies (ICAC), (1997)*. Electrostatic Precipitator Gas Flow Model Studies. Publication EP-7.
- Intra, P., Yawootti, A. and Tippayawong, N. (2014). Demonstration of a modular electrostatic precipitator to control particulate emissions from a small municipal waste incinerator. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 9 (1). 239-246.
- İlhan, A.İ., Dündar, C., Öz, N. ve Kılınç, H. (2011). Hava kirliliği ve asit yağmurlarının çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri. *Ankara: Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü*. (s. 5-8) Erişim: 10 Eylül 2020, [www.mgm.gov.tr/FILES/genel/makale/havakirliligi.pdf](http://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/makale/havakirliligi.pdf)
- İpci, D. (2018). *Taşıt Radyatörlerinde Bulunan Dar Kanallarda Akış ve Isı Transferinin İncelenmesi*. Basılmamış Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, 210, Ankara.
- Jaworek, A., Krupa, A. and Czech, T. (2007). Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review. *Journal of electrostatics*. 65 (3). 133-155.

- Jedrusik, M. and Świerczok, A. (2012). "Design efficiency of ESP". Mukesh Khare (ed.). in: *Air Pollution-Monitoring, Modelling, Health and Control* (s.197-220). Intech. ISBN: 978-953-51-0381-3
- Jedrusik, M., Swierczok, A. and Luskiewicz, D. (2017). Physical and numerical modelling of gas flow in electrostatic precipitator. *Przegląd Elektrotechniczny*. 93 (2). 228-231. doi:10.15199/48.2017.02.50
- Jedrusik, M., Swierczok, A. and Teisseyre, R. (2003). Experimental study of fly ash precipitation in a model electrostatic precipitator with discharge electrodes of different design. *Powder Technology*. 135. 295-301.
- Kabadi, S.J. and Hambarde, M.D. (2016). Flow optimization of electrostatic precipitator using non uniform porosity distribution screen. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 68-74. doi:10.14741/Ijcet/22774106/spl.5.6.2016.12
- Kallio, G.A. and Stock, D.E. (1992). Interaction of electrostatic and fluid dynamic fields in wire—plate electrostatic precipitators. *Journal of Fluid Mechanics*. 240. 133-166. doi:10.1017/S0022112092000053
- Khare, M. and Sinha, M. (1996). Computer-aided simulation of efficiency of an electrostatic precipitator. *Environment International*. 22 (4). 451-462. doi:10.1016/0160-4120(96)00033-5
- Kihm, K.D. (1987). *Effects of nonuniformities on particle transport in electrostatic*. Unpublished Ph.D. thesis, Stanford University, Department of Mechanical Engineering, USA.
- Kim, S.H. and Lee, K.W. (1999). Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models. *Journal of Electrostatics*. 48 (1). 3-25. doi:10.1016/S0304-3886(99)00044-3
- Kiss, I., Suda, J., Kristóf, G. and Berta, I. (1998, September). "The turbulent transport process of charged dust particles in electrostatic precipitators". In *7th international Conference on Electrostatic Precipitation*, Kyongju, Korea.
- Kogelschatz, U., Egli, W. and Gerteisen, E.A. (1999). Advanced computational tools for electrostatic precipitators. *ABB Review*. 4. 33-42.
- Kok, B. (2014). *Farklı Sıcaklıklardaki Jetlerin Akış ve Isıl Karışım Karakteristiklerinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi*. Basılmamış Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 75, Elâzığ.
- Lauder, B.E. and Spalding, D.B. (1974). The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computer Methods in Applied Mechanical Engineering*. 3. 269-289.
- Lee, C. and Lin, S. (2007). *Handbook of Environmental Engineering Calculations (2nd edition)*. McGraw-Hill Prof Med/Tech.
- Leonard, G., Mitchner, M. and Self, S.A. (1980). Particle transport in electrostatic precipitators. *Atmospheric Environment*. 14 (11). 1289-1299. doi:10.1016/0004-6981(80)90230-9
- Leonard, G.L., Mitchner, M. and Self, S.A. (1983). An experimental study of the electrohydrodynamic flow in electrostatic precipitators. *Journal of Fluid Mechanics*. 127. 123-140. doi:10.1017/S0022112083002657
- Leonard, G.L., Mitchner, M. and Self, S.A. (1982). Experimental study of the effect of turbulent diffusion on precipitator efficiency. *Journal of Aerosol Science*. 13 (4). 271-284. doi:10.1016/0021-8502(82)90030-1
- Liu, D.H. and Liptak, B.G. (1999). *Environmental engineers' handbook*. New Jersey: CRC press.

- McLean, K.J. (1988). Electrostatic precipitators. *IEE Proceedings A Physical Science Measurement and Instrumentation Management and Education Reviews*. 135 (6). 347. doi:10.1049/ip-a-1.1988.0056
- Mizeraczyk, J., Podlinski, J., Niewulis, A. and Berendt, A. (2013). Recent progress in experimental studies of electro-hydrodynamic flow in electrostatic precipitators. *In Journal of Physics: Conference Series-IOP Publishing*. 418(1). 1-26. doi:10.1088/1742-6596/418/1/012068
- Mizuno, A. (2000). Electrostatic precipitation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 7 (5). 615-624.
- Mollenhauer, K. and Tschöke H. (2010). *Handbook of Diesel Engines*. Berlin: Springer.
- Müezzinoğlu, A. (1987). *Hava kirliliğinin ve kontrolünün esasları*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları.
- Mycok, J.C., Mckenna, J.D. and Theodore, L. (1995). *Handbook of air pollution control engineering and technology*. USA: CRC Press/Lewis Publishers.
- Navarrete, B., Cañadas, L., Cortés, V., Salvador, L. and Galindo, J. (1997). Influence of plate spacing and ash resistivity on the efficiency of electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics*. 39 (1). 65-81. doi:10.1016/S0304-3886(96)00041-1
- Neundorfer, M. (1997). *Electrostatic precipitator design & operation*. Ohio: Neundorfer Engineered Systems.
- Nevers, N.D. (2000). *Air Pollution Control Engineering (Second edition)*. Singapore: McGraw-Hill.
- Nielsen, N.F. and Lind, L. (2004). "CFD simulation of gas flow and particle movement in ESPs". *9th International Conference On Electrostatic Precipitation (ICESP IX)*, Mpumalanga, South Africa.
- Nikas, K.S.P., Varonos, A.A. and Bergeles, G.C. (2005). Numerical simulation of the flow and the collection mechanisms inside a laboratory scale electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*. 63 (5). 423-443. doi:10.1016/j.elstat.2004.12.005
- Noorpoor, A.R. and Sadeghi, M. (2003). Experimental and numerical simulation the effect of distribution plates in a mobile electrostatic precipitator. *Amir Kabir*. 14(54). 71-80.
- Ozen, M. (2014, November). Meshing Workshop. Retrieved September 1, 2020, from [https://www.ozeninc.com/wp-content/uploads/2014/11/MESHING\\_WORKSHOP\\_2014.pdf](https://www.ozeninc.com/wp-content/uploads/2014/11/MESHING_WORKSHOP_2014.pdf)
- Özdemir, F. (2014). *Tunçbilek termik santrali'nin 5. ünite kazanındaki alev oluşumunun sayısal modellemesi*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 51, İstanbul.
- Park, J.W., Kim, C., Park, J. and Hwang, J. (2018). Computational fluid dynamic modelling of particle charging and collection in a wire-to-plate type single-stage electrostatic precipitator. *Aerosol and Air Quality Research*. 18 (3). 590-601.
- Park, S.J. and Kim, S.S. (2003). Effects of electrohydrodynamic flow and turbulent diffusion on collection efficiency of an electrostatic precipitator with cavity walls. *Aerosol Science and Technology*. 37 (7). 574-586. doi:10.1080/02786820300928
- Parker, K. (2003). *Electrical operation of electrostatic precipitators*. London: The Institution of Engineering and Technology.
- Parker, K.R. (1997a). *Applied Electrostatic Precipitation*. London: Blackie Academic & Prof.
- Parker, K.R. (1997b). Improving electrostatic precipitator performance for power stations. *Power Engineering Journal*. 11 (4). 169-176.

- Podliński, J., Berendt, A. and Mizeraczyk, J. (2013). Electrohydrodynamic secondary flow and particle collection efficiency in spike-plate multi-electrode electrostatic precipitator. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 20 (5). 1481-1488. doi:10.1109/TDEI.2013.6633674
- Ramadan, O.E. and Soo, S.L. (1969). Electrohydrodynamic secondary flow. *The Physics of Fluids*. 12 (9). 1943-1945. doi:10.1063/1.1692763
- Reynolds, J.P., Jeris, J.S. and Theodore, L. (2002). *Handbook of chemical and environmental engineering calculations*. Canada: J. Wiley-Interscience.
- Robinson, M. (1967). A modified deutsch efficiency equation for electrostatic precipitation. *Atmospheric Environment*. 1 (3). 193-204. doi:10.1016/0004-6981(67)90001-7
- Robinson, M. (1968). Turbulent gas flow and electrostatic precipitation. *Journal of The Air Pollution Control Association*. 18 (4). 235-239. doi:10.1080/00022470.1968.10469120
- Saberinejad, H., Hashiehbafe, A. and Afrasiabian, E. (2010). A Study of Various Numerical Turbulence Modeling Methods in Boundary Layer Excitation of a Square Ribbed Channel. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 4 (11). 1202-1208.
- Sahin, B. and Ward-Smith, A.J. (1987). The use of perforated plates to control the flow emerging from a wide-angle diffuser, with application to electrostatic precipitator design. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 8(2). 124-131. doi:10.1016/0142-727X(87)90011-7
- Sayem, A.S.M., Khan, M.M.K., Rasul, M.G., Amanullah, M.T.O. and Hassan, N.M.S. (2015). Effects of baffles on flow distribution in an electrostatic precipitator (ESP) of a coal based power plant. *Procedia Engineering*. 105. 529-536. doi:10.1016/j.proeng.2015.05.086
- Schnelle, K.B., Dunn, R.F. and Ternes, M.E. (2016). *Air pollution control technology handbook (First edition)*. New York: CRC press.
- Shaughnessy, E.J., Davidson, J.H. and Hay, J.C. (1985). The fluid mechanics of electrostatic precipitators. *Aerosol Science and Technology*. 4 (4). 471-476. doi:10.1080/02786828508959072
- Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J. (1995). A New k- $\epsilon$  Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows – Model Development and Validation. *Computers Fluids*. 24 (3). 227-238.
- Singh, V. and Tiwari, A.C. (2012). Performance analysis of electrostatic precipitator in thermal power plant. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. 3 (2). 431-436.
- Sjoholm, P., Ingham, D.B., Lehtimaki, M., Perttu-Roiha, L., Goodfellow, H. and Torvela, H. (2001). "Gas-cleaning technology". H. Goodfellow and E. Tahti (eds.). in: *In industrial ventilation design guidebook* (s.1197-1316). USA: Academic Press.
- Skodras, G., Kaldis, S.P., Sofialidis, D., Faltsi, O., Grammelis, P. and Sakellariopoulos, G.P. (2006). Particulate removal via electrostatic precipitators-CFD simulation. *Fuel Processing Technology*. 87 (7). 623-631. doi:10.1016/j.fuproc.2006.01.012
- Sodja, J. (2007). *Turbulence models in CFD*. Seminar, University of Ljubljana Department of physics, 1-18.
- Soldati, A. (2000). On the effects of electrohydrodynamic flows and turbulence on aerosol transport and collection in wire-plate electrostatic precipitators. *Journal of Aerosol Science*. 31 (3). 293-305. doi:10.1016/S0021-8502(99)00055-5

- Soldati, A. and Banerjee, S. (1998). Turbulence modification by large-scale organized electrohydrodynamic flows. *Physics of Fluids*. 10 (7). 1742-1756. doi:10.1063/1.869691
- Soldati, A., Andreussi, P. and Banerjee, S. (1993). Direct simulation of turbulent particle transport in electrostatic precipitators. *AIChE journal*. 39 (12). 1910-1919. doi:10.1002/aic.690391203
- Soo, S.L. and Rodgers, L.W. (1971). Further studies on the electro-aerodynamic precipitator. *Powder Technology*. 5 (1). 43-49. doi:10.1016/0032-5910(71)80069-4
- Suh, Y.J. and Kim, S.S. (1996). Effect of obstructions on the particle collection efficiency in a two-stage electrostatic precipitator. *Journal of Aerosol Science*. 27 (1). 61-74. doi:10.1016/0021-8502(95)00539-0
- Swaminathan, M.R. (2010). *Flow and turbulence studies in electrostatic precipitator*. Unpublished Ph.D. thesis, Anna University, Department of Mechanical Engineering, Chennai.
- Swaminathan, M.R. and Mahalakshmi, N.V. (2010). Numerical modelling of flow through perforated plates applied to electrostatic precipitator. *Journal of Applied Sciences*. 10(20). 2426-2432. doi:10.3923/jas.2010.2426.2432
- Şahin, B. (1989). Pressure losses in an isolated perforated plate and jets emerging from the perforated plate. *International journal of mechanical sciences*. 31 (1). 51-61. doi:10.1016/0020-7403(89)90118-5
- Şahin, B. (2018). *Katı Yakıt Yakan Hareketli Izgaralı Kazanların Sayısal Akışkanlar Dinamiği ile Analizi*. Basılmamış Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim Dalı, 132, Elazığ.
- Şahin, B. and Ward-Smith A.J. (1993). The pressure distribution in and flow characteristics of wide-angle diffusers using perforated plates for flow control with application to electrostatic precipitators. *International Journal of Mechanical Science*. 35 (2). 117-127.
- Şahin, B., Ward-Smith, A.J. and Lane, D. (1995). The pressure drop and flow characteristics of wide-angle screened diffusers of large area ratio. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 58 (1). 33-50. doi:10.1016/0167-6105(95)00018-M
- Şener, M. (2013). *Etkin Bir Havalı Güneş Kollektörünün Tasarımı ve Optimizasyonu*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi. Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 90, Çorum.
- Talaie, M.R. (2005). Mathematical modeling of wire-duct single-stage electrostatic precipitators. *Journal of Hazard Mater*. 124 (1-3). 44-52. doi:10.1016/j.jhazmat.2005.01.007
- Talaie, M.R., Fathikaljahi, J., Taheri, M. and Bahri, P. (2001). Mathematical modeling of double-stage electrostatic precipitators based on a modified Eulerian approach. *Aerosol Science & Technology*. 34 (6). 512-519.
- Teke, M. (2010). *Gaz-Partikül İki Fazlı Girdaplı Akışların Matematik Modellenmesi ve Sayısal Çözümü*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 99, Bursa.
- Tekir, M. and Arslan, K. (2017). "CFD Analyses of CuO-Water Nanofluid Flow in a Square Cross-Sectioned Duct under Turbulent Flow Condition". In *3rd International Conference on Engineering and Natural Sciences*, Budapest.
- Theodore, L. (2008). *Air pollution control equipment calculations*. New Jersey: John Wiley and Sons.

- UFC (2003). *Air pollution control systems for boilers and incinerators*. UFC (Unified Facilities Criteria) (UFC 3-430-03). USA: Departments of the army and air force.
- Varonos, A.A., Anagnostopoulos, J. S. and Bergeles, G. C. (2002). Prediction of the cleaning efficiency of an electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*. 55 (2), 111-133. doi:10.1016/S0304-3886(01)00187-5
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid Dynamics. Finite Volume Method (Second Edition)*, England: Essex, Longman Scientific & Technical.
- Vesilind, P.A., Morgan, S.M. ve Heine, L.G. (2014). *Çevre Mühendisliğine Giriş*. İsmail Toröz (çev.), Ankara: Nobel yayınları.
- Vincent, J.H. and MacLennan, A.S.M. (1980). Aerodynamic considerations in electrostatic precipitation. *Journal of Electrostatics*. 8 (4). 325-342. doi:10.1016/0304-3886(80)90054-6
- Wang, L.K., Pereira, N.C. and Hung, Y.T. (2004). *Handbook of environmental engineering volume 1 air pollution control engineering*. New Jersey: Humana press.
- White, H.J. (1963). *Industrial Electrostatic Precipitation*. Addison-Wesley Publishing Company.
- White, H.J. (1974). Resistivity problems in electrostatic precipitation. *Journal of the Air Pollution Control Association*. 24 (4). 313-338.
- White, H.J. (1984). *Control of particulates by electrostatic precipitation*. Handbook of air pollution tecknology. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Yakhot, V. and Orszag, S.A. (1986). Renormalization Group Analysis of Turbulence: Basic Theory. *Journal of Scientific Computing*. 1 (1). 1-51.
- Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A*. 4 (7). 1510-1520.
- Yakut, M. Z. (2014). *Servo-Kontrollü Bir Plastik Enjeksiyon Makinasının Tasarımı ve Üretimi*. Basılmamış Doktora Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 124, Isparta.
- Yamamoto, T. (1989). Effects of turbulence and electrohydrodynamics on the performance of electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics*. 22 (1). 11-22. doi:10.1016/0304-3886(89)90106-X
- Yamamoto, T. and Velkoff, H.R. (1981). Electrohydrodynamics in an electrostatic precipitator. *Journal of Fluid Mechanics*. 108. 1-18. doi:10.1017/S002211208100195X
- Ye, X.-L., Su, Y.-B., Guo, B.-Y. and Yu, A.-B. (2016). Multi-scale simulation of the gas flow through electrostatic precipitators. *Applied Mathematical Modelling*. 40 (21-22), 9514-9526. doi:10.1016/j.apm.2016.06.023
- Yusop, A.F., Mamat, R., Yasin, M.H.M. and Suhaimi, S. (2014). Effects of the inlet velocity profiles on the prediction of velocity distribution inside an electrostatic precipitator (ESP). *International Journal of Computer and Electrical Engineering*. 64-66. doi:10.7763/ijcee.2014.v6.795
- Zevenhoven, R. and Kilpinen, P. (2004). *Control of pollutants in flue gases and fuel gases*. Energy Norway: Engineering and Environmental Protection Publications.
- Zhang, J.P., Ding, Q.F., Dai, Y.X. and Ren, J.X. (2011). Analysis of collection efficiency in wire-duct electrostatic precipitators subjected to the applied magnetic field. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 39 (1). 569-575. doi:10.1109/TPS.2010.2087364

Zhibin, Z. and Guoquan, Z. (1992). New model of electrostatic precipitation efficiency accounting for turbulent mixing. *Journal of Aerosol Science*. 23 (2). 115-121. doi:10.1016/0021-8502(92)90048-z



