



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GİRDAPLI AKIŞLARIN GEOMETRİK VE ÇALIŞMA PARAMETRELERİ  
ALTINDA İNCELENMESİ

Fuat KAYA

DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2009

## GİRDAPLI AKIŞLARIN GEOMETRİK ve ÇALIŞMA PARAMETRELERİ ALTINDA İNCELENMESİ

### ÖZET

Akışkanlar mekaniğinin en önemli ve en kompleks alanlarından birisi girdaplı akışlardır. Çift vorteks yapısına sahip olan siklon ayırıştırıcıları girdaplı akışların çok önemli ve çok ilginç uygulama alanıdır. Bu nedenle, çalışmada girdaplı akışların geometrik ve çalışma parametreleri altında deneysel ve numerik olarak inceleyebilmek amacıyla siklonlar kullanılmıştır.

Siklonlarda nümerik çalışma bir ve iki fazlı, türbülanslı, üç boyutlu, sürekli sıkıştırılmaz akışları kapsamaktadır. Deneyler başlıca önemli geometrik boyutları değiştirilebilen çok amaçlı modüler siklonda yapılmıştır. Hız bileşenlerini ve basıncı ölçmek için pitot tüpü ve eğik manometre kullanılmıştır.

Türbülans modelleri, şemalar, duvar fonksiyonları ve mesh sayısının performansı değerlendirmek için. CFD Fluent yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel datalar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar RSM türbülans modeli, Nonequilibrium duvar fonksiyonu, Basınç çözümünde PRESTO şemasının basınç-hız ilişkisi için SIMPLEC şeması, momentum denklemi için QUICK şeması, türbülans kinetik enerjisi ve yayılım oranı için ise Second Order Upwind şemasının ve Reynolds gerilmelerinin çözümünde ise First Order Upwind şeması değişkenlerinin kullanılması memnun edici sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Nümerik yöntem test edildikten sonra literatürde önemi vurgulanan ancak kapsamlı bir çalışma yapılmayan dipleg ve siklon boyu uzunluğunun etkileri çalışılmıştır. Siklondaki basınç düşümü, hız dağılımları ve partikül toplama verimi girdap yapısıyla ilişkilendirilmiş ve bu girdap yapısı üzerinde etkili olan optimum siklon uzunluğu yaklaşık olarak siklon çapının dört katı kadar bulunmuştur. Ayrıca, Siklon parametreleri üzerinde etkisi olan yüzey pürüzlülüğünün etkileri incelenmiştir. Küçük siklonlar için optimum yüzey pürüzlülük kalınlığı yaklaşık olarak 0.1 mm olarak görülmektedir.

Deneysel çalışmalarda ise; iki farklı deney düzeneğinde siklon geometrik ölçüleri ve çalışma parametreleri değiştirilerek sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar giriş hızının artmasıyla basınç düşümünün arttığını göstermektedir. Farklı çıkış borusu

Çapları ve farklı dalma uzunluklarında tek fazlı için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Teęetsel, aksenal hız profilleri, basınç dūřümü ve statik basınç farkları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar çift fazlı için değerlendirilmiştir. Siklon borusu çapının küçük olması durumunda basınç dūřümünde büyük olması durumuna göre artış olduğu ve ayrıştırma veriminde ise iyileşmenin olduğu grlmştir. Dalma uzunluğunun ise büyük olması durumunda benzer sonuçlar tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan optimum çıkış borusu ölçüleri tanımlanmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Girdaplı Akışlar, İki Fazlı Akış, Türbülans Modelleri, Siklon Ayrıştırıcılar, Basınç Dūřümü, Partikül Toplama Verimi, Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniięi

## **ANALYSIS OF CONFINED SWIRLING FLOWS UNDER GEOMETRICAL AND OPERATIONAL PARAMETERS**

### **ABSTRACT**

The swirling flow is one of the most important and complex fields of fluid mechanics. Having a double vortex structure, cyclone separators are very important and interesting application area of swirling flows. Therefore, cyclones used to investigate, experimentally and numerically, the geometrical and the operation parameters of swirling flows in this study.

Numerical study comprised three dimensional, steady, incompressible, turbulent, one and two phase flows in cyclones. Experiments carried out mainly in a multi purpose modular cyclone whose important geometrical dimensions could be changed. Pitot tube and inclined manometers were used for the measurements of velocity components and pressure.

Computational results obtained by using Fluent CFD code were compared with experimental data given in literature, so as to evaluate the performance of turbulence models, wall functions, numerical schemes and mesh structure. The results showed that the use of the RSM turbulence model with the nonequilibrium wall function for turbulence, the Presto interpolation scheme for pressure, the Simplec algorithm for pressure-velocity coupling and the quadratic upstream interpolation for convective kinetics (quick) scheme for momentum, the second order upwind scheme for turbulence kinetic energy and turbulence dissipation rate variables give satisfactory results.

After numerical validation studies, the influences of dipleg and cyclone length which their importance were emphasized but no comprehensive study was given in the literature, were studied. Pressure drop, velocity distribution and particle collection efficiency parameters were related to the swirl structure in the cyclone. And, the optimal length of the cyclone which has an important role on the swirl structure was found to be approximately fourfold of the cyclone diameter. In addition, influence of surface roughness on the cyclone performance was investigated in the cyclones. that is influence on cyclone parameters. The optimal height of wall roughness appears to be approximately 0.1 mm for small cyclones.



In the experimental study, the results were obtained by changing geometrical and operational parameters in two different cyclones. It can be seen from the results that the pressure drop is increased by increasing the inlet velocity. The effects of the exit pipe geometry were investigated in a tangential inlet cyclone separator. Experiments were carried out by varying the diameter and length of the exit pipe for one phase flow. Tangential and axial profiles, pressure losses and variation of static pressure along the cyclone were analyzed for different flow rates. The results were also evaluated for two phase flow in cyclones. The results show that a decrease in the exit pipe diameter causes an increase in pressure losses and collection efficiency. Similar results were obtained by the height of the exit pipe.

**KEYWORDS:** Swirling Flows, Two Phase Flow, Turbulence Models, Cyclone Separators, Pressure Drop, Particle Collection Efficiency, CFD

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
SİMGELER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Tezin Planı.....	3
1.3 Tezin Katkısı ve Yenilikleri.....	3
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Giriş.....	5
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>43</b>
3.1 Giriş.....	43
3.2 Temel Denklemler.....	43
3.3 Türbülans Modelleri, Duvar Fonksiyonları ve Şemalar.....	44
3.3.1 Standart $k- \varepsilon$ ve RNG $k- \varepsilon$ Türbülans Modeli.....	44
3.3.2 RSM Türbülans Modeli.....	45
3.3.3 Duvar Fonksiyonları.....	46
3.3.4 SİMPLE ve SİMPLEC Algoritmaları.....	48
3.3.5 Presto(Pressure staggering Option scheme) Şeması.....	53
3.3.6 Birinci, İkinci ve Yüksek Mertebe Upwind (Quick) Şemaları.....	54
3.4 Partikül Analizi.....	54
3.4.1 Ayrık Faz Modeli.....	54
3.4.2 Türbülanslı Akışta Stokastik Partikül İzleme Yöntemi.....	58
3.4.3 Türbülanslı Akışta Partikül Bulut İzleme Yöntemi.....	60
3.5 Deney Düzenegi.....	61
3.5.1 Kalibrasyon.....	66

<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve İRDELEME.....</b>	<b>71</b>
4.1 Giriş.....	71
4.2 Tek Fazlı(hava) Akış Nümerik Sonuçları.....	72
4.2.1 Türbülans ve Duvar Fonksiyonlarının Tespiti.....	74
4.2.1.1 Sonuçlar ve Analiz.....	75
4.2.1.2 Değerlendirme.....	82
4.2.2 Şemaların Tespiti.....	82
4.2.2.1 Basınç Hesabındaki Yöntemlerin Karşılaştırılması.....	83
4.2.2.2 Hız Alanlarının Karşılaştırılması.....	84
4.2.2.3 Değerlendirme.....	92
4.3 Çift Fazlı(hava+partikül) Akış Nümerik Sonuçları.....	92
4.3.1 Normal ve Uzatılmış Siklonlarda Akış Karakteristikleri ve Partikül Tutma Verimi Etkilerinin Nümerik Olarak İncelenmesi.....	92
4.3.1.1 Sonuçlar ve Analiz.....	94
4.3.1.2 Normal ve Uzatılmış Siklonlarda Hız Alanlarının İncelenmesi.....	101
4.3.1.3 Normal ve Uzatılmış Siklonların Performans Analizi.....	117
4.3.1.4 Değerlendirme.....	123
4.3.2 Siklonlarda Pürüzlülük Etkisinin Nümerik Olarak İncelenmesi..	124
4.3.2.1 Sonuçlar ve Analiz.....	124
4.3.2.2 Yüzey Pürüzlülüğüne Sahip Siklonlarda Hız Alanlarının İncelenmesi.....	125
4.3.2.3 Pürüzlü Yüzeyle Sahip Siklonların Performans Analizi.....	129
4.3.2.4 Değerlendirme.....	134
4.4 Deneysel Çalışma ve Nümerik Karşılaştırma.....	135

4.4.1 Sonuçlar ve Değerlendirme.....	135
4.4.2 Siklon ıkış Borusu Etkisinin İncelenmesi.....	139
4.4.2.1 Sonuç ve Analiz.....	140
4.4.2.2 Hata Analizi.....	164
4.4.2.3 Değerlendirme.....	168
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>169</b>
5.1 Giriş.....	169
5.2 Yenilikler ve Sonuçlar.....	169
5.3 Tavsiye ve Öneriler.....	170
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>172</b>
TEŞEKKÜR.....	178
ÖZGEÇMİŞ.....	179

## SİMGELER DİZİNİ

a	Siklon giriş genişliği, (m)
b	Siklon giriş yüksekliği, (m)
$D_1$	Siklon çapı, (m)
$D_2$	Siklon çıkış borusu çapı, (m)
$D_3$	Siklon toz giriş kutusu çapı, (m)
L	Siklon boyu, (m)
h	Siklon silindirik kısmın yüksekliği, (m)
S	Siklon çıkış borusunun siklon içinde kalan kısmı uzunluğu, (m)
x, y, z	Kartezyen koordinat takımı
i, j, k	(=1,2,3) Kartezyen koordinat bileşenleri
k	Türbülans kinetik enerjisi, ( $m^2/s^2$ )
p	Basınç, (Pa)
Re	Reynolds sayısı, $\left(\frac{Ud}{\nu}\right)$
t	Zaman, (t)
u, v, w	x, y ve z yönlerindeki hız değerleri, (m/s)
$\bar{u}$ , $\bar{v}$ , $\bar{w}$	x, y ve z yönlerindeki ortalama hız değerleri, (m/s)
$\bar{u}'$ , $\bar{v}'$ , $\bar{w}'$	x, y ve z yönlerindeki türbülans yoğunlukları, (1/s)
U	Hız, (m/s)
$C_D$	Sürüklenme katsayısı
$F_D$	Sürüklenme kuvveti, (N)
S	Kaynak terim
d	Çap, (m)

**Yunan Harfleri**

$\Gamma$	Yayınım katsayısı
$\Delta$	Fark
$\phi$	Korunum denklemi genel fonksiyonu
$\varepsilon$	Türbülans kinetik enerjisi yayınım oranı, (kg/ms <sup>3</sup> )
$\eta$	Verim
$\mu$	Dinamik viskozite, (Pa.s)
$\mu_t$	Türbülans viskozitesi, (Pa.s)
$\nu$	Kinematik viskozite, (m <sup>2</sup> /s)
$\rho$	Yoğunluk, (kg/m <sup>3</sup> )

**İndisler**

p	Partikül
50	% 50 verim
x, y, z	Kartezyen koordinatlarda x, y, z uzaklıklarındaki lokal değerler
eff	Efektif

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Staggered grid şeması.....	49
Şekil 3.2. Deney sistemi.....	62
Şekil 3.3. Pitot tüpünün yerleştirilmesi, şeritmetre, açıölçer, pitot tüpü.....	63
Şekil 3.4. Kullanılan eğik manometreler.....	63
Şekil 3.5. Kullanılan debimetre.....	64
Şekil 3.6. Deneysel çalışmada kullanılan özel olarak tasarlanmış siklon.....	65
Şekil 3.7. Pitot tüpünün kalibrasyonu için kullanılan rüzgar tüneli.....	67
Şekil 3.8. Kalibrasyonu yapılan pitot tüpünün eğik manometre bağlantısı.....	68
Şekil 3.9. Kalibrasyonda kullanılan hassas hız ölçer.....	69
Şekil 3.10. Kalibrasyonu yapılacak debimetre bağlantısı.....	70
Şekil 4.1. Nümerik çözüm için kullanılacak siklon.....	73
Şekil 4.2. Nümerik çözümde kullanılan siklona ait mesh yapısı.....	74
Şekil 4.3. $z=0.4$ m, $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ 'deki teğetsel hızın nümerik ve deneysel değerleri.....	77
Şekil 4.4. $z=0.4$ m, $90^{\circ}$ - $270^{\circ}$ 'deki teğetsel hızın nümerik ve deneysel değerleri.....	77
Şekil 4.5. $z=0.15$ m, $90^{\circ}$ - $270^{\circ}$ 'deki aksenal hızın nümerik ve deneysel değerleri.....	78
Şekil 4.6. RSM, RNG k- $\epsilon$ , Standart k- $\epsilon$ türbülans modellerinin nonequilibrium duvar fonksiyonu kullanılarak elde edilen y-z düzlemindeki statik basınç konturları.....	79
Şekil 4.7. RSM, RNG k- $\epsilon$ , Standart k- $\epsilon$ türbülans modellerinin nonequilibrium duvar fonksiyonu kullanılarak elde edilen y-z düzlemindeki vektörel hız büyüklükleri.....	80
Şekil 4.8. Farklı türbülans modelleriyle elde edilmiş türbülans kinetik enerjisi (k) ve dissipasyon oranı ( $\epsilon$ ) değişimleri ( $z = 150$ mm).....	81
Şekil 4.9. ns2, ns8 ve ns4 şemaları kullanılarak elde edilen z-düzlemindeki statik	

basınç konturları.....	85
Şekil 4.10. ns2, ns8 ve ns4 şemaları kullanılarak elde edilen z-düzlemindeki vektörel hız büyüklükleri.....	86
Şekil 4.11. $z=0.15$ m, $90^{\circ}$ - $270^{\circ}$ 'deki eksenel hızın ns2, ns5, ns8 ve deneysel değerleri.....	87
Şekil 4.12. $z=0.15$ m, $90^{\circ}$ - $270^{\circ}$ 'deki eksenel hızın ns4, ns5, ns6 ve deneysel değerleri.....	87
Şekil 4.13. $z=0.4$ m, $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ 'deki teğetsel hızın ns2, ns5, ns8 ve deneysel değerleri....	88
Şekil 4.14. $z=0.4$ m, $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ 'deki teğetsel hızın ns4, ns5, ns6 ve deneysel değerleri...	89
Şekil 4.15. $z=0.4$ m, $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ 'deki ns2, ns5 ve ns8 eksenel hız değerleri.....	90
Şekil 4.16. $z=0.4$ m, $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ 'deki ns4, ns5 ve ns6 eksenel hız değerleri.....	90
Şekil 4.17. $z=0.65$ m, $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ 'deki ns2, ns5 ve ns8 eksenel hız değerleri.....	91
Şekil 4.18. $z=0.65$ m, $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ 'deki ns4, ns5 ve ns6 eksenel hız değerleri.....	91
Şekil 4.19. Nümerik çözüm için kullanılan siklon.....	93
Şekil 4.20. Nümerik çözümde kullanılan siklonlara ait mesh yapısı.....	94
Şekil 4.21. 8 m/s Giriş hızı için elde edilen toplama verimleri ile deneysel sonuçların (C1) karşılaştırılması.....	95
Şekil 4.22. 16 m/s Giriş hızı için elde edilen toplama verimleri ile deneysel sonuçların (C1) karşılaştırılması.....	96
Şekil 4.23. $z=0.047$ m'de 10 m/s giriş hızı için elde edilen eksenel hıza ait nümerik sonuçlar ile literatürdeki(Chuah-Gimbun) nümerik sonuçların (C1) karşılaştırılması.....	97
Şekil 4.24. $z=0.047$ m'de 10 m/s giriş hızı için elde edilen teğetsel hıza ait nümerik sonuçlar ile literatürdeki(Chuah-Gimbun) nümerik sonuçların (C1) karşılaştırılması.....	97



Şekil 4.25. 19 m/s Giriş hızı için elde edilen toplama verimleri ile literatürdeki deneysel ve nümerik sonuçların (C3) karşılaştırılması.....	98
Şekil 4.26. 19 m/s Giriş hızı için elde edilen basınç düşümleri ile literatürdeki deneysel ve nümerik sonuçların (C3) karşılaştırılması.....	99
Şekil 4.27. 19 m/s Giriş hızı için farklı L/D oranlarında elde edilen (C3) basınç düşümleri ait konturlar.....	100
Şekil 4.28. 7 m/s giriş hızı ve $L_d=0$ , 38.5, 77 mm için elde edilen (C1) teğetsel hız konturları.....	101
Şekil 4.29. 16 m/s giriş hızı ve $L_d=0$ , 38.5, 77 mm için elde edilen (C1) teğetsel hız konturları.....	102
Şekil 4.30. 8 m/s giriş hızı ve $L_d=0$ , 40, 80 mm için elde edilen (C2) teğetsel hız konturları.....	103
Şekil 4.31. 12 m/s giriş hızı ve $L_d=0$ , 40, 80 mm için elde edilen (C2) teğetsel hız konturları.....	104
Şekil 4.32. $z=0.076$ , 0.1145 ve 0.153 m'de 7 m/s giriş hızı için elde edilen teğetsel hıza ait nümerik sonuçlar ile literatürdeki(Chuah-Gimbun) nümerik sonuçların (C1) karşılaştırılması.....	105
Şekil 4.33. $z=0.25$ m'de 19 m/s giriş hızı için elde edilen teğetsel hıza ait nümerik sonuçların (C3) karşılaştırılması.....	106
Şekil 4.34. 7 m/s giriş hızı ve $L_d=0$ , 38.5, 77 mm için elde edilen (C1) statik basınç konturları.....	107
Şekil 4.35. 16 m/s giriş hızı ve $L_d=0$ , 38.5, 77 mm için elde edilen (C1) statik basınç konturları.....	108
Şekil 4.36. 8 m/s giriş hızı ve $L_d=0$ , 40, 80 mm için elde edilen (C2) statik basınç konturları.....	109

Şekil 4.37. 12 m/s giriş hızı ve $L_d=0, 40, 80$ mm için elde edilen (C2) statik basınç konturları.....	110
Şekil 4.38. 8 m/s giriş hızı ve $L_d=0, 335, 670$ mm için elde edilen (C3) statik basınç konturları.....	111
Şekil 4.39. 7 m/s giriş hızı ve $L_d=0, 38.5, 77$ mm için elde edilen (C1) aksenal hız konturları.....	112
Şekil 4.40. 16 m/s giriş hızı ve $L_d=0, 38.5, 77$ mm için elde edilen (C1) aksenal hız konturları.....	113
Şekil 4.41. $z=0.03$ m'de 16 m/s giriş hızında normal ve uzatılmış siklonlar için elde edilen (C1) aksenal hız profilleri.....	114
Şekil 4.42. $z=0.053$ m'de 16 m/s giriş hızında normal ve uzatılmış siklonlar için elde edilen (C1) aksenal hız profilleri.....	114
Şekil 4.43. 8 m/s giriş hızı ve $L_d=0, 40, 80$ mm için elde edilen (C2) aksenal hız konturları.....	115
Şekil 4.44. 12 m/s giriş hızı ve $L_d=0, 40, 80$ mm için elde edilen (C2) aksenal hız konturları.....	116
Şekil 4.45. 16 m/s giriş hızı ve $L_d=0, 38.5, 77$ mm için elde edilen (C1) türbülans kinetik enerjisi konturları.....	117
Şekil 4.46. 8 m/s Giriş hızı için farklı toz giriş uzunluklarında elde edilen (C1) toplama verimleri.....	118
Şekil 4.47. $1.5 \mu\text{m}$ partikül çapı için C1 siklonunda farklı giriş hızlarında $L_d$ uzunluğunun partikül toplama verimi üzerinde etkisi.....	119
Şekil 4.48. $2 \mu\text{m}$ partikül çapı için farklı giriş hızlarında $L_d$ uzunluğunun partikül toplama verimi üzerinde etkisi.....	120
Şekil 4.49. Farklı giriş hızlarında C1 siklonu için $L_d$ uzunluğunun basınç düşümü	

üzerinde etkisi.....	121
Şekil 4.50. C3 siklonunda 19 m/s giriş hızı ve 1 µm partikül çapı için L/D oranlarının dipleg veya boyunun uzatılması durumlarında elde edilen partikül toplama verimlerinin karşılaştırılması.....	122
Şekil 4.51. C3 siklonu için 19 m/s giriş hızında L/D oranlarının dipleg veya boyunun uzatılması durumlarında elde edilen basınç düşümlerinin karşılaştırılması.....	122
Şekil 4.52. 16 m/s giriş hızı ve z=0.03 m için teğetsel hız profillerinin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi.....	125
Şekil 4.53. 16 m/s giriş hızı ve z=0.053 m için teğetsel hız profillerinin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi.....	126
Şekil 4.54. 16 m/s giriş hızı ve z=0.016 m için eksenel hız profillerinin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi.....	127
Şekil 4.55. 16 m/s giriş hızı ve z=0.03 m için eksenel hız profillerinin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi.....	127
Şekil 4.56. 16 m/s giriş hızı ve z=0.053 m için eksenel hız profillerinin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi.....	128
Şekil 4.57. 16 m/s giriş hızı ve z=0.076 m için eksenel hız profillerinin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi.....	128
Şekil 4.58. 8 m/s giriş hızı için farklı yüzey pürüzlülüklerinde partikül toplama verimleri.....	130
Şekil 4.59. 16 m/s giriş hızı için farklı yüzey pürüzlülüklerinde partikül toplama verimleri.....	130
Şekil 4.60. 30 m/s giriş hızı için farklı yüzey pürüzlülüklerinde partikül toplama verimleri.....	131

Şekil 4.61. 8 m/s giriş hızı için farklı çaplardaki partiküllerin toplama verimleri.....	132
Şekil 4.62. 16 m/s giriş hızı için farklı çaplardaki partiküllerin toplama verimleri.....	132
Şekil 4.63. Farklı giriş hızları için basınç düşümünün yüzey pürüzlülüğü ile değişimi.....	133
Şekil 4.64. 13 m/s siklon giriş hızı için $z=0.52$ m'deki teğetsel hız profillerinin karşılaştırılması.....	136
Şekil 4.65. 13 m/s siklon giriş hızı için $z=0.52$ m'deki aksenal hız profillerinin karşılaştırılması.....	136
Şekil 4.66. 6.5 m/ siklon giriş hızı için $z=0.52$ m'deki teğetsel hız profillerinin karşılaştırılması.....	137
Şekil 4.67. 6.5 m/s siklon giriş hızı için $z=0.52$ m'deki aksenal hız profillerinin karşılaştırılması.....	137
Şekil 4.68. 13 ve 6.5 m/s siklon giriş hızlarında basınç düşümü konturları.....	138
Şekil 4.69. Nümerik Çözümde Kullanılan Siklonlara ait Mesh Yapısı.....	140
Şekil 4.70. Farklı siklon giriş hızlarında ve farklı dalma uzunluklarında $D_2=47$ mm için siklon girişi ile çıkışı arasındaki statik basınç farkları.....	141
Şekil 4.71. Farklı siklon giriş hızlarında ve farklı dalma uzunluklarında $D_2=101$ mm için siklon girişi ile çıkışı arasındaki statik basınç farkları.....	141
Şekil 4.72. Farklı siklon giriş hızlarında ve farklı dalma uzunluklarında $D_2=47$ mm için siklon girişi ile çıkışı arasında meydana gelen basınç kayıpları.....	142
Şekil 4.73. Farklı siklon giriş hızlarında ve farklı dalma uzunluklarında $D_2=101$ mm için siklon girişi ile çıkışı arasında meydana gelen basınç kayıpları.....	143
Şekil 4.74. 5.1 m/s siklon giriş hızında ve farklı dalma uzunluklarında $D_2=47, 101$ mm için siklon girişi ile çıkışı arasında meydana gelen basınç kayıpları.....	144
Şekil 4.75. 3.63 m/s siklon giriş hızında $D_2=47$ mm çıkış çapında $S=175$ ve $285$ mm'de	

- ve 6.5 m/s siklon giriş hızı için  $D_2=101$  mm çıkış çapında aynı dalma uzunlukları ile elde edilen statik basınç konturları.....145
- Şekil 4.76. Farklı siklon giriş hızlarında ve farklı dalma uzunluklarında  $D_2=47$  mm için siklonda meydana gelen basınç kayıp katsayıları.....146
- Şekil 4.77. Farklı siklon giriş hızlarında ve farklı dalma uzunluklarında  $D_2=101$  mm için siklon girişi ile çıkışı arasında meydana gelen basınç kayıpları.....147
- Şekil 4.78. 5.1 m/s siklon giriş hızında ve farklı dalma uzunluklarında  $D_2=47, 101$  mm için siklon girişi ile çıkışı arasında meydana gelen basınç kayıpları.....147
- Şekil 4.79. 2.88 m/s siklon giriş hızında  $D_2=47$  mm çıkış çapında ve farklı dalma uzunlukları için  $z=375, 700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınçlar.....149
- Şekil 4.80. 3.63 m/s siklon giriş hızında  $D_2=47$  mm çıkış çapında ve farklı dalma uzunlukları için  $z=375, 700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınçlar .....149
- Şekil 4.81. 4.24 m/s siklon giriş hızında  $D_2=47$  mm çıkış çapında ve farklı dalma uzunlukları için  $z=375, 700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınçlar.....150
- Şekil 4.82. 5.1 m/s siklon giriş hızında  $D_2=101$  mm çıkış çapında ve farklı dalma uzunlukları için  $z=375, 700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınçlar.....150
- Şekil 4.83. 6.5 m/s siklon giriş hızında  $D_2=101$  mm çıkış çapında ve farklı dalma uzunlukları için  $z=375, 700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınçlar.....151
- Şekil 4.84. 9 m/s siklon giriş hızında  $D_2=101$  mm çıkış çapında ve farklı dalma uzunlukları için  $z=375, 700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınçlar.....151
- Şekil 4. 85.  $z=375$  mm'de  $S=285$  mm için farklı giriş hızlarında ve farklı siklon çıkış çaplarında aksenal hız profilleri.....153
- Şekil 4. 86.  $z=375$  mm'de  $S=175$  mm için farklı giriş hızlarında ve farklı siklon çıkış çaplarında aksenal hız profilleri.....154
- Şekil 4. 87.  $z=375$  mm'de  $S=85$  mm için farklı giriş hızlarında ve farklı siklon çıkış

çaplarında aksenal hız profilleri.....	154
Şekil 4. 88. $z=375$ mm'de 3.63 m/s giriş hızı ve 47 mm çıkış çapı için farklı dalma uzunluklarında aksenal hız profillerinin deneysel ve nümerik karşılaştırması.....	155
Şekil 4. 89. $z=375$ mm'de 6.5 m/s giriş hızı ve 101 mm çıkış çapı için farklı dalma uzunluklarında aksenal hız profillerinin deneysel ve nümerik karşılaştırması.....	156
Şekil 4. 90. $z=375$ mm'de $S=285$ mm için farklı giriş hızlarında ve farklı siklon çıkış çaplarında teğetsel hız profilleri.....	157
Şekil 4. 91. $z=375$ mm'de $S=175$ mm için farklı giriş hızlarında ve farklı siklon çıkış çaplarında teğetsel hız profilleri.....	157
Şekil 4. 92. $z=375$ mm'de $S=85$ mm için farklı giriş hızlarında ve farklı siklon çıkış çaplarında teğetsel hız profilleri.....	158
Şekil 4. 93. $z=375$ mm'de 3.63 m/s giriş hızı ve 47 mm çıkış çapı için farklı dalma uzunluklarında teğetsel hız profillerinin deneysel ve nümerik karşılaştırması.....	160
Şekil 4. 94. $z=375$ mm'de 6.5 m/s giriş hızı ve 101 mm çıkış çapı için farklı dalma uzunluklarında teğetsel hız profillerinin deneysel ve nümerik karşılaştırması.....	160
Şekil 4. 95. $z=375$ mm'de $S=285$ mm için 5.1 m/s giriş hızında elde edilen teğetsel hız profillerinin siklo çıkış çaplarına göre değişimleri.....	161
Şekil 4. 96. $z=375$ mm'de $S=175$ mm için 5.1 m/s giriş hızında elde edilen teğetsel hız profillerinin siklo çıkış çaplarına göre değişimleri.....	162
Şekil 4. 97. $z=375$ mm'de $S=85$ mm için 5.1 m/s giriş hızında elde edilen teğetsel hız profillerinin siklo çıkış çaplarına göre değişimleri.....	162

Şekil 4. 98. Tanımlanan $a_0$ mesafesinin şematik olarak gösterimi.....	163
Şekil 4.99. 9.5 m/s giriş hızları için $z=375$ mm’de elde edilen bileşke hız ve $\Delta V$ hata değerleri.....	166
Şekil 4.100. 9.5 m/s giriş hızları için $z=375$ mm’de elde edilen teğetsel hız ve $\Delta V_t$ hata değerleri.....	166
Şekil 4.101. 9.5 m/s giriş hızları için $z=375$ mm’de elde edilen aksenal hız ve $\Delta V_z$ hata değerleri.....	167

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması.....	10
Çizelge 3.1. $\phi$ 'ye bağlı olarak $\Gamma$ ve S değerleri.....	49
Çizelge 4.1. Nümerik çalışmada kullanılan siklon boyutları.....	73
Çizelge 4.2. İterasyon başına CPU süreleri (s).....	76
Çizelge 4.3. Nümerik çözümde kullanılan yöntemler.....	83
Çizelge 4.4. 14.8 m/s giriş hızında elde edilen basınç düşümü değerleri (Pa).....	83
Çizelge 4.5. Nümerik çalışmada kullanılan siklonlara ait boyutlar (mm).....	94
Çizelge 4.6. Deneysel ve nümerik çalışmada kullanılan siklon boyutları(mm).....	135
Çizelge 4.7. Deneysel ve nümerik çalışmada kullanılan siklon boyutları(mm).....	139



## 1. GİRİŞ

### 1.1 Tezin Amacı

Girdaplı akışların geometrik ve çalışma parametreleri altında incelenmesi ile ilgili tez araştırma konusunda parametrelerin incelenmesi amacıyla girdaplı akış görülen siklonlar ele alınmış ve incelemeler siklonlar üzerinde yapılmıştır.

Esas itibariyle çok fazlı akışlarda yoğun fazın ana akıştan ayrılması için kullanılan siklonlar farklı mühendislik proseslerinde uygulama alanı bulabilmektedir. Siklon ayırıcıların önemli bir kullanım alanı sanayi kaynaklı çevre kirliliğine yol açan toz ve partiküllerin tutulmasıdır. Ayrıca siklonlar enerji üretim santrallerinde, yakma sistemlerinde, kimya ve ilaç sanayinde, ısı ve kütle transferinin gerçekleştiği sistemlerde ön ayırıcı, ana ayırıcı ve örnek alıcı olarak kullanılmaktadır.

Siklon ayırıcılar, hareketli parçaları olmaması, imalat ve işletme maliyetlerinin düşük olması, uzun ömürlü ve ağır ortam koşullarında kullanılabilmesi gibi özellikleri nedeniyle dikkat çekmektedirler. Son 50 yılı aşkın bir süreden beri yaygın olarak kullanılan siklonlar teğetsel ve eksenel girişli olarak tasarlanmakla birlikte, teğetsel girişliler daha yaygın kullanılır. Teğetsel girişli siklonlar ters akışlı olup genelde silindirik bir gövde, konik bir kısım ve çıkış borusundan oluşur. Çıkış siklonun üst kısmından olup çıkış borusu belli bir miktar siklonun içine dalmış vaziyettedir. Siklon ayırıcılar atalet kuvvetlerine bağlı olarak çalışırlar. Siklona giren akışkan dönel bir hareket kazanması nedeniyle oluşan merkezkaç kuvvetler etkisinde akışkan içerisindeki partiküllerin veya yoğun fazın ayrıştırılması gerçekleşir.

Siklonların ayırıcı olarak kullanılmasında bilinmesi gereken en önemli performans karakteristikleri siklonun ayırma verimi, fraksiyonel verimleri ve basınç kayıplarıdır. Bu karakteristikleri doğru olarak tayin etmek çok zordur. Çünkü siklonlar basit bir yapıya sahip olmalarına rağmen içerisindeki akış oldukça karmaşık olup akışkanlar mekaniğinin ilginç bir uygulama örneğidir. Teğetsel olarak siklona giren akışkan spiral bir hareketle cidar boyunca belli bir konuma kadar gitmesi ve bir iç girdap oluşturarak geri dönmesi yanısıra siklonda ikincil akımlar ve sirkülasyon bölgeleri oluşur. Akışın bu karmaşık yapısı yanında olay üzerine etki eden

parametrelerin çokluğu akış alanının çözümünü ve siklon performansının tayinini son derece güçleştirir. Ayrıca parçacık karakteristikleri, dağılımları, büyüklüklerine bağlı olarak gelen ilave etkiler diğer analizi daha da güçleştirir. Literatürde siklonlar üzerinde birçok çalışma olmasına rağmen sürtünmenin veya yüzeylerde oluşan kirliliğin akış ve siklon performansı üzerindeki etkileri tam olarak ortaya konamamıştır.

Bu çalışmada, literatürdeki bu eksikliği gidermek üzere, siklonlarda akış karakteristiklerini ve siklon performansını etkileyen parametrelerin ve özellikle sürtünme kayıpları etkilerinin sayısal olarak tespit edilecek ve belirsizliğini koruyan sürtünme ve kayıpların iç içe olan girdap yapısı üzerindeki etkileri araştırılacak, düşük ve yüksek Reynolds sayılarındaki etkiler mukayese edilecektir.

Ayrıca, siklonun akış ve performans üzerine etkisi literatürde işaret edilen ancak detaylı bir araştırma yapılmayan siklonun geometrik ölçülerinin etkileri incelenecektir. Bunun için literatürde değişik siklonlara ait deneysel veriler kullanılarak siklonun toz giriş uzunluğu ve siklon boyu değiştirilerek farklı çalışma şartları altında sonuçlar elde edilecektir. Elde edilen sonuçların hem akış karakteristiği hemde partikül toplama karakteristiği açısından önemi vurgulanacaktır. Sonuçların değerlendirilmesi ile geometrik ve çalışma parametreleri ilişkilendirilecek ve optimum değerler tanımlanacaktır. Ayrıca, girdaplı akışların nümerik çözümünde kullanılan nümerik teknik çok önem taşımaktadır. Nümerik teknik uygun olarak belirlenmezse doğru sonuçların tahmin edilmesi ve dolayısı ile de yapılacak iyileştirme çalışmaları mümkün olmayacaktır. Bu kapsamda türbülans modelleri, duvar fonksiyonları ve nümerik şemalar değiştirilerek çözümler elde edilecek ve en iyi nümerik teknik ifade edilecektir.

Deneysel çalışmada; çıkış borusu çapı ve dalma uzunluğu değiştirilebilen fonksiyonel bir siklon imal edilmiştir. Silindirik kısmı şeffaf malzemeden imal edilmiş bu siklonda tek fazlı akışlarda yapılacak hız ve basınç değerleri siklondaki akış karakteristiklerini ve girdap yapısını ortaya koyacak ve olayı etkileyen geometrik ve işletme parametreleri araştırılacaktır. Bu çalışmada, Tek fazlı akış uygulamaları için elde edilen sonuçlar iki fazlı akış uygulamalarındaki etkileri değerlendirilecektir. Çalışması kapsamında yapılacak CFD analizleri vasıtasıyla siklon içindeki hız, basınç dağılımları ve türbülans durumu detaylı olarak incelenecek, deney sonuçları ile

yapılacak karşılaştırmalardan sonra yapılacak parametrik çalışmalar deneysel çalışmaların yükünü azaltacaktır.

Sonuç olarak, çalışmadan elde edilecek sonuçlar çok geniş kullanım alanı olan siklonların performanslarının iyileştirilmesinde, tasarımında ve optimizasyonunda bilim dünyasına ve uygulayıcılara önemli katkı sağlayacaktır. Sunulacak bilgiler ışığında siklonların kullanılabilceği yeni uygulama alanları yanında farklı siklonların geliştirilmesinde katkı sağlanmış olacaktır.

## **1.2 Tezin Planı**

Bu tez, toplam beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, yapılan araştırma ile ilgili teorik bilginin bulunduğu giriş bölümüdür. İkinci bölümde ise tez çalışmasındaki konunun şekillenmesine ve irdelenmesine yardımcı olan konu ile ilgili detaylı literatür araştırması verilmiştir. Üçüncü bölüm, iki kısım altında verilmiştir. Birinci kısım, giriş bölümünde ifade edilen konunun çözümünde temeli oluşturan korunum denklemleri, türbülans modelleri ifadesi ile oluşturulmuştur. İkinci kısımda ise nümerik çözümde kullanılan seçilmiş türbülans modelleri altında duvar fonksiyonları ve şemaların çözüm yaklaşımları verilmiştir. Dördüncü bölümde, ikinci bölümde araştırılan literatür taramasından yola çıkılarak, girdaplı akıslarda çalışma şartlarına etki eden basınç düşümü, aksel ve teğetsel hız, partikül toplama verimi gibi birçok parametre incelenmiştir. Nümerik çözümde girdaplı akısları inceleyebilmek amacıyla birinci bölümde ifade edildiği şekilde siklonlar kullanılmıştır. Bazı siklonlar için irdelenen türbülans modelleri, duvar fonksiyonları ve şemaların nümerik çözüm için en uygun olanın seçilmesi için çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar sunulmuştur. Siklonlarda kullanılan toz giriş uzunluğu için çalışmalar yapılmış ve bu parametrenin siklon boyu ile ilişkileri incelenerek optimum değerler tanımlanmış ve bu çalışmalar sunulmuştur. Yüzey pürüzlülüğünün etkileri incelenmiş ve optimum pürüzlülük kalınlığı ile ilgili çalışmalar sunulmuştur. Deneysel çalışmalar iki farklı siklonda yapılmış tek fazlı akıslarda siklon çıkış borusu etkileri incelenmiş ve partiküllü uygulamalar için değerlendirilmiştir. En uygun siklon çıkış borusu geometrik ölçüleri tanımlanarak sunulmuştur. Beşinci ve son bölümde, çalışmanın devamı olarak yapılabilecek uygulamalar için öneriler kısmı yer almaktadır.

### 1.3 Tezin Katkısı ve Yenilikleri

Girdaplı akışların geometrik ve çalışma parametrelerini inceleyebilmek için ele alınan siklon ayırıcıları ile yapılan araştırmanın katma değeri ve sağlayacağı yararlar birkaç başlık altında sıralanabilir;

**Bilimsel açıdan:** Öncelikle akışkanlar mekaniğinin, iç içe ve ters yönlerde hareket eden vortex yapısıyla ilginç bir uygulama örneği olan siklondaki akışın, yukarıda da belirtilen incelenmemiş yönünün analizi bilime orijinal bir katkı olacaktır. Elde edilen bilgiler ışığında, siklonlarda verim, kritik çap ve yük kayıplarının pratik değerlendirmeler literatüre kazandırılacaktır. Bu çalışma ile sonuçların duyurulabileceği en az iki uluslar arası bilimsel yayın beklenmektedir.

**Ulusal ekonomi açısından:** Siklonlar pratikte toz tutucu başta olmak üzere çok fazla akışlarda yoğun fazın ayrıştırılmasında, yakma sistemlerinde, kimyasal proseslerde kullanılmaktadır. Siklondaki akış olayının tam olarak anlaşılması ve ortaya konması, kullanım alanına yönelik performans artırma ve optimum tasarıma katkısı olacaktır. Böylece, örneğin ekstra bir maliyet olan çevre kirliliğini önleyici sistemlerin maliyetlerinin azaltılmasına yardımcı olunabilecektir. Ayrıca bu çalışma yeni siklon tasarımları yanında siklonların yeni kullanım alanlarını da ortaya çıkarabilecek bunun da sanayiye olumlu yansıması olacaktır.

**Toplumsal gönence açısından:** Günümüzde önemli bir problem olan çevre kirliliğinin bir parçası da hava kirliliğidir. Hava kirliliği, özellikle sanayinin gelişmiş, endüstrinin yaygın olduğu bölgelerde çok daha fazladır. Elde edilen bulgularla, sanayi kaynaklı hava kirliliğini önlemede kullanılan siklonların iyileştirilmesine ve yeni tasarlanacak daha verimli ve etkin sistemlerinin geliştirilmesine yardımcı olunacağı düşünülmektedir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1 Giriş

Siklonlar değişik amaçlarla yaygın olarak kullanılır. En yaygın kullanım alanlarından biri katı-sıvı-gaz fazlarını veya fazlardan ikisini içeren bir akış olayında fazları birbirinden ayırmaktır. Teğetsel ve aksenal girişli olarak tasarlanan siklonlardan teğetsel girişliler daha yaygın kullanılır. Farklı giriş tasarımları bulunmaktadır. Siklon ayırıcılar atalet kuvvetlerine bağlı olarak çalışırlar. Siklona giren akışkan dönel bir hareket kazanır. Bu şekilde oluşan girdap etkisinde akışkan içerisindeki farklı yoğunluklara sahip fazlara gelen farklı atalet kuvvetleri etkisinde radyal yönde izafi bir hareket oluşur. Sonuçta yoğun fazın bir kısmı bu yöntemle akış alanından uzaklaştırılır. Akışkanın cidar boyunca gidiş ve dönüş hareketi sırasında üç boyutlu akışın yanısıra ikincil akımlar ve sirkülasyon bölgeleri oluşur. Olay üzerine etki eden parametrelerin çokluğu akış alanının çözümünü son derece güçleştirir. Ayrıca parçacık karakteristikleri, dağılımları, büyüklüklerine bağlı olarak gelen ilave etkiler diğer güçlükleri oluşturur.

Siklonların ayırıcı olarak kullanılmasında bilinmesi gereken en önemli karakteristikleri siklonun ayırma verimi, fraksiyonel verimleri ve basınç kayıplarıdır. Çok karmaşık akış karakterine sahip siklonlar için bu değerlerin tahmini veya hesabı oldukça zor olması nedeniyle bu konuda yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda geliştirilen teoriler, işletme ve geometrik parametrelerin dar bir bölgesinde tatminkar tahmin yapabilmekte olduğundan bu modellerden hareketle yeni verimli siklon tasarımları yapmak oldukça zordur. Bu nedenle yeni tasarımlara daha çok deneysel çalışmalar ile ulaşılmaktadır. Bu şekilde elde edilmiş ve kullanılan siklonlardan bazıları Stairmand siklonu (1951), Lapple siklonu (1951), Southern Research Institute(SRI) siklonu (Smith ve ark.,1979), German Z siklonu (König ve ark.,1991), Aerojet siklonu (Upton ve ark., 1994), Kim ve Lee siklonu (1990) vb. olarak sayılabilir. Siklonlar bazı küçük geometrik değişiklikler içerdiğinde elde edilen siklon yakın geometrili siklon ailesi içinde kabul edilir. Siklonlarda verim tahmini için oluşturulan modellerin çoğu daha çok parçacıkların %50 verimde tutulabildiği çapın (kritik çap) tahminine yöneliktir. Bununla birlikte bir kısmı fraksiyonel verimlerin hesabını da içermektedir. Bu modellerin çoğu ampirik veya yarı ampiriktir. Bunlardan

bazıları Sepherd ve Lapple (1939), Lapple (1951), Barth (1956), Barth ve Leineveber (1964), Muschelknautz (1970), Leith ve Licht (1972), Blachman ve Lippmann (1974), Chan ve Lippmann (1977), Dietz (1981), Mothes ve Löffler (1988), Ioza ve Leith (1990), Liden ve Keny (1991), Liden ve Gudmundsson (1997) vb. şeklinde sayılabilir. Lapple (1951) gibi basit modeller, az parametre içermekte olup kullanımı kolay ancak sonuçlar tatminkar değildir. Fraksiyonel verim eğrileri deneysel verim eğrileri ile uyum göstermez. Buna karşılık daha kapsamlı modellerde (Barth, 1956; Ioza ve Leith, 1990 gibi), birden çok parametre göz önüne alınmakta bir kısmında deneysel sabitler bulunmakla birlikte bazı parametrelerinde tahmini gerekmektedir. Bu modellerin sonuçları genel görünüm olarak uyumlu görünse de gerek kritik çap ve gerekse fraksiyonel verimlerin tahmini açısından sınırlı kalmaktadırlar. Ayrıca ana girdaptaki dönme sayısını içeren modeller yanında akış alanında hız dağılımını göz önüne alarak sınır tabakayı önemseyen yaklaşımlar da bulunmaktadır.

Siklonlarda oluşan girdap boyunun belirlenmesi verim tahminleri açısından önemli olmaktadır. Bu durum özellikle büyük siklonlarda daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Küçük siklonlar açısından önemli olmasa bile uzun siklonlarda girdap koni ucuna ulaşmadığından seçilen parametrelerin ölçüleri gerçekçi olmamaktadır. Siklon boyunun artması belli bir değere kadar verimi artırırken belli bir değerden sonra verim azalmaktadır. Birinci durum Alexander (1949) sonuçlarından, her iki durum ise Zhu ve Lee (1999) sonuçlarından görülebilir. Bu hususta ilk çalışmalardan biri Alexander (1949) tarafından yapılmış ve doğal girdap uzunluğu için bir bağıntı önerilmiştir. Ancak daha sonra yapılan bazı çalışmalar (Dirgo ve Leith, 1985; Parker ve ark.,1981; Burkholz,1984; Ji ve ark.,1991 vb.) bunun çoğu durumlarda yanlış sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Bunlardan Ji ve ark. (1991) girdap boyu için daha fazla parametre içeren farklı bir bağıntı önermektedir. Bryant ve ark. (1983) etki yönü benzer bir bağıntı vermektedir. Bu bağıntılar geometrik parametrelere bağlı olarak elde edilmişlerdir. Ancak bazı deneysel çalışmalardan gözlemlediğimiz sonuçlar debinin veya siklona giriş hızının da önemli olduğunu göstermektedir. Hız arttıkça girdap boyu artmaktadır (Hoffmann ve ark.,1995). Ancak bu artışın üstten sınırlı olup olmadığı daha ayrıntılı olarak incelenmelidir. Diğer taraftan yüzey direnci veya sürtünme kayıp katsayısı da önemli görünmektedir. Ancak bu konuda da detaylı bir çalışma yoktur.

Siklonlarda verim tahminlerine yönelik sıkıntılardan biri de siklonlardaki akış türünün etkisidir. Genelde elde edilen bağıntılar büyük siklonlara ait karakteristiği yansıtır. Akış türbülanslı olup kabul edilen sürtünme katsayıları anlamlı görünebilir. Ancak küçük siklonlarda, özellikle numune almakta kullanılan siklonlarda, durum değişmektedir. Akış rejimi türbülanslı, geçiş halinde veya laminer olabilen (Blachman ve Lippmann, 1974) bu siklonlarda hız, sıcaklık, basınç, viskozite, çap gibi çalışma parametrelerinin etkisi daha fazla hissedilmektedir. Laminer akış rejiminde çalışma parametrelerinin verime ve basınç kaybına etkisi konusunda daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

Siklonlardaki basınç düşümünün modellenmesi üzerine de birkaç çalışma mevcuttur. En basitleri sadece gaz giriş ve çıkış boyutlarına bağlı olup diğer parametrelerin etkisini göstermekten uzaktır (Shepherd ve Lapple, 1939; Casal ve Martinez ,1983). Barth (1956) ilave olarak siklon sürtünme yüzeyini de göz önüne alarak bir model geliştirmiştir. Bu modelleri Izoa ve Leith (1989) ve Muschelknautz (1970) geliştirmişlerdir. Mothes ve Löfler (1989) siklon içini dört kısma ayırarak basınç düşümünü modellemiş, bu model daha sonra Lorenz (1994) tarafından geliştirilmiştir. Hoffmann ve ark.(2001) siklon boyunu değiştirerek performansı deneysel olarak incelemiş, basınç düşümünün siklon boyu ile azaldığını ifade etmiştir. Chen J., Shi M.(2006), siklon ayrıştırıcısında basınç düşümünü hesaplamak için lokal ve sürekli kayıpları ayrı ayrı göz önüne alan bir model geliştirmişler ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Basınç düşümüne toz yükünün etkisi de değişik araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Gil ve ark., 2002). Deneyler, akışa ilave edilen toz miktarı arttıkça basınç düşümünün bir miktar azaldığını göstermiştir. Bunu da teğetsel hızdaki azalmaya bağlamışlardır. Basınç düşümünün toz miktarına bağlılığını ifade eden bazı matematik modeller de önerilmiştir (Muschelknautz,1970; Gil ve ark., 2002).

Siklon üzerine geliştirilen bu teoriler basitleştirilmiş modellere ve ampirik bağıntılara dayanmakta olup genelde belli tip siklonlarda belli akış koşullarında geçerli sonuç vermektedir. Siklonlarda verim ve kritik partikül çapının hesabı (Avcı ve Karagöz 2000, 2001 ve 2003) ve basınç düşümü hesabı için (Karagöz ve Avcı, 2005)

sürtünme etkisini de içeren daha fazla parametreye bağlı, daha genel bir model geliştirilmiş, model sonuçları literatürdeki yarı-ampirik modellerle ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ancak bu modelin doğrulanması ve geliştirilmesi için daha geniş bir hız aralığında ilave deneylere ihtiyaç duyulmaktadır. Siklonların kullanım alanlarının genişletilmesi amacıyla da çalışmalar yapılmış ve farklı kullanım alanları önerilmiştir (Kaya, Avcı, Karagöz, 2008).

Son yıllarda bilgisayar donanımında ve hesaplamalı akışkanlar mekaniğindeki gelişmeler, siklonlardaki akışın CFD analizleri Griffiths ve Boysan (1996)'ın çalışması ile başlamıştır. Yakın zamanda siklonlar üzerine yapılan CFD çalışmaları da aşağıdaki gibi özetlenebilir:

İçerisine belli çapta düşey bir çubuk yerleştirilen siklonlarda akış ve performans karakteristikleri deneysel ve nümerik olarak incelemişler ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmıştır (Gong ve Wang, 2004; Wang ve ark., 2005). 3-D nümerik çalışmalarda Fluent yazılımı RSM türbülans modeli ile kullanılmıştır. Bu çalışmalarda, kullanılan çubuğun basınç düşümünde ve enerji kaybında önemli ölçüde azalma olduğu gösterilmiştir. İncelemeler siklonun merkezinde teğetsel hız değerinin azaldığını, buna karşın aksenal hız değerinin arttığını göstermiştir. Benzer bir çalışma Qian ve ark., (2006) tarafından yapılmış, siklonun içine dikey yerleştirilmiş bir çubuğun performans üzerindeki etkileri nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çubuğun, basınç düşümünde ve tutma veriminde artışa yol açtığı gösterilmiştir. Bernardo ve ark. (2006) ise siklona giriş açısının etkilerini incelemişlerdir.

Xiang ve Lee (2005), farklı koni boyutlarına sahip üç farklı siklon kullanılarak akışı nümerik olarak incelemişlerdir. Karşılaştırmalar 8 m/s giriş hızı için yapılmıştır. Nümerik çözümde RNG k- $\epsilon$  ve RSM modelleri kullanılmış ve bu modeller ile elde edilen sonuçlar deneysel datalar ile karşılaştırılarak modellerin uygunluğu irdelenmiştir. Ayrıca, kullanılan CFD programının uygun sonuçlar elde edip etmediği de irdelenmiştir. Siklon tipi olarak Stairmand siklonu kullanılmıştır. Nümerik çözümde kullanılan CFD Fluent yazılımının sonuçların tahmin edilmesinde deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında çok iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Ayrıca, kullanılan türbülans modellerinden RSM modelinin RNG k- $\epsilon$  modeline göre deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği işaret edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan koni boyutlarına bağlı olarak



akış davranışlarında farklılık olduğu ve farklı ayrışma davranışlarının meydana geldiği gösterilmiştir. Yüksek ayrıştırma veriminin koni dibi çapının azaltılmasıyla elde edildiği de ifade edilmektedir.

Shin ve ark. (2005), Basınçlı ve yüksek sıcaklıklı ortamlar için yüksek verimli siklon toz ayrıştırıcısı üzerinde nümerik ve deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmalarını maksimum 6 bar basınçta, 20-600 °C sıcaklıkta, 10-160 m<sup>3</sup>/h debide ve 1-10 µm partikül çapında yapmışlardır. Reynolds gerilmelerinin çözümü için türbülans k-ε modelini kullanmışlardır. Debinin bir fonksiyonu olarak artan basınç ve sıcaklıklarda basınç düşümünün büyüklüğünü tespit etmeye çalışmışlardır.

Gimbun J ve ark., (2005), basınç düşümü üzerinde sıcaklık ve giriş hızının etkilerini nümerik olarak incelemiştir. Çalışmada, CFD Fluent yazılımında türbülans modeli olarak RNG k-ε ve RSM modellerini kullanmışlar ve sonuçlarını literatürdeki dört farklı data ile karşılaştırmışlardır. Kullanılan türbülans modellerinden RSM modelinin iyi sonuçlar verdiğini ve deneysel datalardan % 3'den az sapma gösterdiğini ancak bu modelin çok karmaşık ve işlem zamanının fazla olduğunu ifade etmişlerdir. RNG k-ε modeli için ise basit ve az işlem zamanı gerektiğinden % 14-18 sapma oranlarında kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Bernardo S. ve ark. (2006), farklı giriş açılarında CFD çalışması yapmıştır. Normal girişli siklonlarda aynı çalışma şartlarında partikül toplama verimi % 54.4 iken 45° eğimli giriş borusu için bu değer % 72.2'ye çıktığı işaret edilmiştir.

Cortes C. ve Gil A.(2007), RSTM ve LES türbülans modellerinin nümerik çalışmalarda uygunluğunu ifade etmiştir.

Wan G. ve ark. (2008), partikül yüklemesi ile ilgili CFD çalışması yapmışlar ve çok fazla partikül yüklenmesi durumunda gaz akışının etkilendiğini işaret etmişlerdir.

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Leith ve Litch(1972)	-Siklon partikül toplayıcılarının toplama verimlerini ifade etmek için bir yaklaşım geliştirilmesi konusunda çalışmışlardır. Bu teori üzerinde çalışırken sürüklenme katsayısı ve siklon tarafından tutulamayan partiküllerin tekrar siklona girmesi durumlarını da dikkate alarak çalışmışlardır.	-Siklonda partikül toplama verimi için bir teori geliştirmişlerdir. Bu teori partikül toplama veriminin direkt olarak tespit edileceği doğrultusunda olduğu ifade edilmiştir. Bu teorinin özellikle teğetsel girişli siklonlarda yakın sonuçlar verdiği, diğer siklonlarda ise iyi sonuçlar vermediği söylenebilir.
Dirgo J. ve Leith D.(1985)	-Siklon partikül toplama verimini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarını Stairmand yüksek verimli siklonu için yapmışlardır. -860 kg/m <sup>3</sup> yoğunluktaki ve 1-7 µm çaplarında partiküller kullanmışlar, giriş hızlarını ise 5.1, 10, 15, 20 ve 25 m/s değerleri alarak çalışmışlardır. -Lapple, Dietz, Barth ve Leith-Litch teorik modellerini deneysel datalar ile karşılaştırmışlardır.	-Partikül toplama verimlerinin karşılaştırılmasında; 3 µm'den daha büyük partiküller için Stairmand tarafından elde edilen sonuçlardan daha yüksek verimlerin elde edildiği 3 µm'den daha küçük partiküller için ise daha düşük verimlerin elde edildiği ifade edilmiştir. -Barth ve Leith-Litch teorilerinin sadece teğetsel girişli siklonlar için iyi sonuçlar verdiği Lapple ve Dietz teorilerinin ise çok az parametre içermesinden dolayı kabul edilebilir sonuçlar vermediği ifade edilmiştir.

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Bohnet M. (1995)	<p>-Aerosiklonlarda ayrıştırma verimi üzerinde gaz sıcaklığının etkilerini incelemiştir.</p> <p>-Çalışmada basın düşümü ve verim değişimlerini görmek için sıcaklık 293-1123 K arasında alınmıştır.</p> <p>-Oluşturulan modelde sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı olarak değişmesi göz önüne alınmıştır.</p>	<p>-Verim üzerinde ve sürtünme katsayısına bağlı olarak basınç düşümü üzerinde gaz sıcaklığının önemli derecede rol oynadığı gösterilmiştir.</p> <p>-Siklonda sınır tabaka akışı ile birlikte ayrışan partiküllerin önemli bir miktarının tekrar siklon içine alındığına işaret etmiştir. Siklon duvarları ve vortex oluşmayan kısımlarda basınç düşümünün yüksek olduğu dile getirilmiştir.</p>
Griffiths W. D. ve Boysan D.(1996)	<p>-Üç farklı tip siklonun performansına dair CFD ve ampirik modelleme için çalışmışlardır. CFD tahminleri ile elde edilen sonuçların uygunluğunu araştırmışlardır.</p> <p>-Hava içindeki mikro organizmaların toplama verimlerini deneysel, ampirik ve CFD olarak çalışmışlardır.</p>	<p>-CFD nümerik çözümü ile elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyum içinde olduğunu göstermişler ve özellikle CFD çözümlerinin bu tür akış uygulamalarında doğru sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.</p> <p>-Üç farklı ampirik model arasında yapılan karşılaştırmalarında ise Barth(1956) modelinin küçük siklonlar için Iozia ve Leith(1989) modelinin büyük siklonlar için doğru sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigürasyonu	Temel Bulgular
Kenny L. C. ve Gussman R. A. (1997)	<p>-Aerosal tip siklonların modellenmesi konusunda çalışmışlardır.</p> <p>-İki farklı siklon grubu üzerinde geometri ve akış oranlarına bağlı olarak akış davranışlarının nasıl değiştiği konusunda deneyler yapmışlardır.</p> <p>-D<sub>50</sub> çapı tanımlanmaya çalışılmıştır. Bu çap % 50 verimle partikül toplama çapı olarak tanımlanmıştır.</p>	<p>-D<sub>50</sub> çapı üzerinde siklon geometrisi e siklon koni yüksekliğinin çok büyük bir etkisi olduğu yapılan çalışmalar neticesinde ortaya çıktığı gösterilmiştir.</p> <p>-Yaklaşık olarak D<sub>50</sub>=7-8 µm değerinde GK2.69 siklon tipi kullanışlı 1.5-2 lt/dk civarında önerilmiştir. Bu siklona alternatif olarak yüksek akış oranlarında yaklaşık 3 lt/dk civarında GK3.45 veya SRI-III siklon tipleri önerilmiştir.</p>
Liden G. ve Gudmundsson A.(1997)	<p>-Siklonda partikül toplama verimini ifade etmek için çalışma şartlarına ve siklon dizaynına bağlı olarak yarı ampirik model geliştirme üzerinde çalışmışlardır. Bunun için dört siklon dizaynı üzerinde durmuşlardır.</p> <p>-% 50 verimle tutulan partikül çapının; siklon çapı ve vorteks tüpü ile siklon duvarı arasındaki bağlantıları araştırmışlardır.</p>	<p>-Partikül toplama veriminin siklon dizaynı ve çalışma şartlarıyla ilişkisine dair yarı ampirik bir model oluşturmuşlar ve önermişlerdir. Geliştirilen bu modelde Reynolds sayısının 500-100 000 değerleri arasında vorteks tüpü uzunluğunun partikül toplama verimi üzerindeki etkileri de ifade edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Büttner H. (1999)	-Siklonda partikül ayırıştırma karakteristiğinin boyusuzlaştırılması konusunda çalışıştır. -Çalışmada, literatürde bulunan nümerik sonuçlar ve deneysel datalar ile karşılaştırma yapmak için Alexander 30 ve 50 mm çaplı siklonu kullanmıştır.	-Siklonda partiküllerin toplama verimini çok geniş bir şekilde değerlendirmek için ampirik boyutsuz bir korelasyon önerilmiştir. Re<10 <sup>5</sup> için; $E=F(Stk^{1/2}Re^{1/3}(d_i/d_0)^{2/3})$
Zhu Y. ve Lee K. W. (1999)	-Yüksek akış oranlarında küçük siklonlar üzerinde partikül toplama verimi ve basınç düşümünü deneysel olarak çalışmışlardır. Yedi farklı siklon için akış oranı 60-110 lt/dk, partikül hacmi oranı 0.026-3.6 µm, silindir yüksekliğinin siklon gövde çapına oranı 0.75-4.5 ve çıkış borusu uzunluğunun siklon gövde çapına oranı 0.5-1.5 arasında alınmıştır. -Silindir yüksekliği ve çıkış borusu uzunluğunun da etkileri incelenmiştir.	-Deneysel sonuçlar; akış oranının toplama verimi üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Yüksek akış oranları partikül toplama verimini artırmaktadır. -Silindir yüksekliği arttığında toplama verimliliği artmaktadır. Ancak silindir yüksekliği çok fazla olursa toplama veriminin azaldığı görülmüştür. -Basınç düşümü azalır ya silindir yüksekliği çok uzundur yada çıkış borusu uzunluğu çok kısadır şeklinde ifadeye ulaşmışlardır.

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Youngmin J., Chi T., Madhumita B. R. (2000)	<p>-Ters akışlı siklonların verimini iyileştirmek için bir destek siklon geliştirmişlerdir. ‘Post Cyclone’ olarak isimlendirilen ve PoC olarak simgelenen yardımcı bir siklon tanımlanmıştır. PoC; ters akışlı siklonlarda çıkış borusunda emisyonları azaltmak için tasarlanmış halka şeklinde iki kabuktan oluşmaktadır ve siklonun çıkışına yerleştirilmiştir.</p> <p>-Deneysel ve yanında nümerik çalışmalarda yapılmıştır. İki farklı siklon kombinasyonu ve siklon tipi olarak Stairmand siklonu kullanılmıştır. Giriş hızları 4.9-23.2 m/s hızlarında katı partikül olarak karpit ve hidratlaşmış kireç kullanılarak siklonun verim üzerindeki etkileri incelenmiştir.</p>	<p>-PoC’de tozların ayrıştırılması teğetsel hız alanlarında partiküllerin santrifüj kuvvetlere uğramadan sağlanmaktadır. PoC’de partiküllerin toplanmasını santrifüjlük, diğer olaylar örneğin; pıhtılaşma veya yığılma, türbülans ayrılması ve partikül sıçraması gibi faktörler etkileyebilmektedir. PoC üzerinde bu olayların önemi geometri, giriş hızı ve toz giriş konsantrasyonuna bağlıdır.</p> <p>-Siklon verimi; giriş hızı 4.9’dan 23.2 m/s hızına artmasıyla karpit kullanıldığında % 72’den % 95’e hidratlaşmış kireç kullanıldığında ise % 63’den % 83’e arttığı yapılan deneysel ve nümerik çalışma neticesinde tespit edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Avcı A. ve Karagöz İ. (2000)	<p>-Teğetsel girişli siklonlarda iki fazlı akışın modelini sunmuşlardır. Bu modelle siklon geometrisi, yüzey pürüzlülüğü ve partikül konsantrasyonunu etkilerini içeren yeni parametreler tanımlanmıştır.</p> <p>-Kritik çap, kısmi verimlilik ve basınç kayıpları her bir fazda; sürüklenme katsayısının sabit kaldığı bazı durumlarda, radyal yönde izafi hızın oluştuğu, akışın spiral hareketinde aynı ivme ve hız durumları kabulleri altında hesaplanmıştır.</p> <p>-Elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel datalar ve teorik hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır.</p>	<p>-Elde edilen sonuçlar deneysel datalar ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Sonuçların deneysel datalar ile uyum içinde olmasından yapılan kabullerinde uygun bir şekilde olduğunu göstermektedir.</p> <p>-Önemli parametrelerden biri olarak siklon yüksekliği belirtilmiştir. Siklon yüksekliğinin belirli bir sınır değerine kadar artmasının verimi artırdığına işaret edilmiş ve siklon yüksekliğinin bu sınır değerini de sürtünme ve yüzeyden olan ayrılmaların etkilediği belirtilmiştir.</p> <p>-Çok fazla parametrenin etkisini içeren bu model kolay uygulanabilir olarak önerilmiş fakat sürüklenme katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü etkilerinin detaylı araştırılması tavsiye edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Fabio L. F., Leonardo G. Jr. (2000)	<p>-Bir siklon ayırıştırıcısında basınç düşümü ve toplama verimi üzerinde hava+partikül kullanılması durumunu deneysel olarak incelemiştir.</p> <p>-Deneysel çalışmada, yaklaşık 20 kg FCC katalizörü olan katı partiküller kullanılmıştır. Ayrıca, bu deneyler 7, 18, 27 m/s giriş hızlarında yapılmıştır.</p> <p>-Yapılan çalışmada partikül kullanılması durumu ile partikül kullanılmaması durumu karşılaştırılmış ve bu durumlarda basınç düşümü ve toplama verimliliğinin nasıl değiştiği incelenmiştir.</p>	<p>-Basınç düşümü; katı partikül kullanılmasında katı partikül kullanılmaması durumuna göre daha azaldığı görülmektedir. Ve bu azalma temiz havanın yaklaşık % 47'si kadar olduğu deneyler sonucunda elde edilmiştir. Ayrıca, yapılan deneyler sonucunda basınç düşümünün özellikle katı partikülün bir fonksiyonu olarak değişmediği görülmüştür.</p> <p>-Belirtilen giriş hızları ile yapılan deneylerde 18 m/s giriş hızındaki toplama veriminin 27 m/s giriş hızına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Partikül konsantrasyonu ile ayırıştırma verimi incelendiğinde ise, yaklaşık katı partikülün 12 kg olması durumunda verimin azaldığı görülmektedir.</p>



Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Avcı A. ve Karagöz İ. (2001)	<p>-Siklon ayırıştırıcılarında basınç kayıplarının teorik olarak incelenmesi için bir teorik model geliştirmişlerdir.</p> <p>-Bu teorik model basınç kayıplarının tahmin edilebilmesi için akışkan özellikleri, akış ve geometrik parametrelerin bir fonksiyonu olarak oluşturulmuştur.</p> <p>-Elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel datalar ile karşılaştırılmıştır.</p>	<p>-Siklon ayırıştırıcılarında basınç kayıplarının teorik olarak analizi için giriş geometrisi, yüzey pürüzlülüğü, hız ve partikül konsantrasyonunu içeren geometrik ve akış parametreleri göz önüne alınarak yeni bir denklem geliştirilmiştir. Bu denklemin çok kolay bir şekilde basınç kayıplarının tahmin edilmesinde kullanılabilineceği deneysel datalar ile uyumu neticesinde önerilmiştir.</p> <p>-Bu model, siklonların çalışma optimizasyonu ve dizaynı için de kullanılabilineceği ifade edilmiştir.</p>
Gustavsen A.(2001)	<p>-Pencere çerçevesindeki hava boşluklarının ısı transferine etkilerini incelemiştir. Çalışma, iki ve üç boyutlu olarak hava boşluklarının konveksiyon etkilerini içermektedir. Çalışmalar, 6 m uzunluğundaki alüminyum profiller üzerinde farklı kesitlerdeki toplam yayıcılık değerinin tespit edilmesi üzerine kurulmuştur.</p> <p>-Nümerik çalışmada CFD Fluent yazılımı kullanılmıştır.</p>	<p>-Toplam yayıcılık değerinin dış kısımlarda sabit kaldığını iç kısımlarda ise büyük değişmeler olduğuna işaret edilmiştir. Aynı zamanda, alüminyum profillerin ısı akışı hesapları için çok önemli malzemeler olduğu ifade edilmiştir.</p> <p>-CFD Fluent yazılımının nümerik hesaplarda, sonuçların tahmini açısından çok iyi olduğuna değinilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigürasyonu	Temel Bulgular
Xiang R., Park S. H. ve Lee K. W. (2001)	<p>-Siklon performansı üzerinde koni boyutunun etkisini deneysel olarak incelemişlerdir.</p> <p>-Siklon ayırıştırıcısı karakteristikleri üzerinde koni boyutu etkilerini incelemek için farklı koni dip çaplarında üç farklı siklon ve dört farklı akış oranında ölçümler elde edilmiştir.</p> <p>-Deneyler sonucu elde edilen datalar Barth teorisi, Leith ve Licht teorisi, Iozia ve Leith lojistik metodu ile karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca karşılaştırma yapılan bu teorilerin uygunluğu irdelenmiştir.</p>	<p>-Elde edilen ölçümler sonucunda akış oranının verim üzerinde çok fazla etkili olduğu ve yüksek akış oranlarında verim eğrisinin çok keskin bir hal aldığı görülmektedir.</p> <p>-Koni hacminin değişmesinin sadece toplama verimi üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür.</p> <p>Koni dip çapı azaldığı zaman toplama veriminin önemli bir derecede arttığını göstermişlerdir.</p> <p>-Barth teorisi, Iozia ve Leith lojistik metodunun verim eğrilerinin makul kabul edilebilir olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak, karşılaştırma yapılan üç teoriden hiçbirinin konu hacmi hakkında yeterli ve doğru bir şekilde rapor edilmediği işaret edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigürasyonu	Temel Bulgular
Hideto Y., Kunihiro F., Kenji Y., Eiji S. (2001)	-İnoya tipi gaz siklonları ile partikül ayrıştırılması konusunda deneysel ve nümerik olarak çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlarla diğer tip siklonlar arasında da karşılaştırma yapılmıştır. -Çalışmada ikili koni tipi için 40 ve 72 mm siklon çapı, 1.0-1.2-1.7-2.5 µm ortalama partikül çapı ve giriş hızları ise 14 ve 20 m/s seçilmiştir.	-İnoya tipi siklonlarda basınç düşümü koni kısımlarında diğer siklon tiplerine göre % 10 daha az olarak yapılan deneysel ve nümerik çalışma sonucunda bulunmuştur. Ayrıca, bu tip siklonlarda çok iyi bir ayrıştırma sağlandığı tespit edilmiştir. -Elde edilen sonuçlarla diğer siklon tipi sonuçları karşılaştırıldığına kısmi ayrıştırma veriminin uyum içinde olduğu gösterilmiştir.
Hoffman A. C., de Groot M., Peng W., Dries H. W. A. ve Kater J.(2001)	- Ayrıştırma verimi ve basınç düşümü üzerinde siklon uzunluğu etkilerini deneysel, CFD ve matematiksel modellerle incelemişlerdir. - Çalışmalarını 19 m/s giriş hızında, 2730 kg/m <sup>3</sup> partikül yoğunluğunda 0.3-60 µm arasındaki partikül çapları için yapmışlardır. - D=200 mm siklon çapı için L/D=2.65-6.15 arasındaki oranlarda çalışmışlardır.	- L/D=5.65 oranına kadar siklon performansında bir iyileşme gözlemişler ve bu orandan sonra performansta kötüleşmenin başladığını ifade etmişlerdir. - CFD çözümlerinin ve kullandıkları matematiksel model hesaplarının belirli hata payları ile deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. - L/D oranında artış ile basınç düşümünde azalmanın olduğu gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Gil A., Romeo L. M., ve Cortés C.(2002)	<p>-Siklon performansı üzerinde partikül konsantrasyonunun ve toz giriş uzunluğunun(dipleğ) etkileri incelenmişlerdir.</p> <p>-Bir PFBC(basınçlı akışkan yataklı yakıcı) üniteli yeni bir siklon dizaynı tanıtmışlar ve kullanmışlardır. 4-14 m/s giriş hızlarında ısıtılmış hava kullanılarak yaptıkları deneylerde partikül konsantrasyonu ise 30-230 gr katı/kg gaz şeklindedir.</p> <p>-Çapı 0.2 m ve yüksekliği 0.759 m olan siklon dizaynında dipleğ uzunluğu olarak 1.8044 m alınmış ve çalışmalar dipleğ uzunluğu % 0.3-2 arasında kısaltılarak yapılmıştır.</p>	<p>-10 µm çapının altındaki partiküller için siklon basınç düşümü direnç katsayısı ampirik olarak tanımlanmış ve önerilmiştir. Bu direnç katsayısı siklon giriş geometrisinin ve girişteki partikül konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir.</p> <p>-Dipleğ uzunluğu kullanılarak yapılan çalışmalarda basınç düşümünde bir azalma olduğu gösterilmiştir. Aynı zamanda, dipleğ'in alt kısmında teğetsel hızın düşük olduğu ifade edilmiştir.</p> <p>-Dipleğ uzunluğunun partikül toplama verimi üzerinde olumlu etkilerinin olduğu ifade edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
<p>Peng W., Hoffmann A. C., Bott P. J. A. J., Udding A., Dries H. W. A., Ekker A., Kater J. (2002)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ters akış santrifüj ayırıştırıcılarda akış özelliklerini belirlemek amacıyla deneyler yapmışlar ve bu deneyleri nümerik ve teorik modellerle desteklemişlerdir.</li> <li>- Çalışmalarında silindirik ve konik kısımlardan oluşan teğetsel girişli siklon ile silindirik girdap tüpü kullanmışlardır.</li> <li>- Deneysel çalışmalarında akış özelliklerini belirlemek amacıyla Laser Doppler Anemometre'si kullanmışlardır. Sıcaklık ve basınç değerleri ise uygun termometre ve manometre kullanılarak ölçülmüştür.</li> <li>- Deneysel dataları baz alarak CFD çözümlerinin ve matematiksel modellerin uygunluğu incelenmiştir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Her iki dizaynda akışın benzer özellikler gösterdiği açıklanmıştır.</li> <li>- Teğetsel hız siklonda hemen hemen sabit kalırken girdap tüpünde alt kısımlara doğru bir azalmanın olduğu gösterilmiştir.</li> <li>- Eksenel hız her iki dizaynda da benzer özellikler gösterdiği ifade edilmiştir.</li> <li>- Radyal hız siklonlarda hemen hemen üniform kalırken girdap tüpünde ise iç bölgede çok güçlü akışların olduğu ifade edilmiştir.</li> </ul> <p>Vortex tipinin literatürde kabul gördüğü şekilde Rankine tipi vortex olduğu açıklanmıştır.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Xiaodong L., Jianhua Y., Yuchun C., Mingjiang N., Kefa C. (2003)	<p>-Siklon ayırıştırıcısında ayırıştırma verimi üzerinde türbülans yoğunluğu ve sınır tabakanın etkilerini nümerik olarak incelemişlerdir. Giriş hızı 21 m/s, partikül çapı 7.5-20 µm alınarak Saffman kuvveti etkisi ile analiz yapılmıştır.</p> <p>-Saffman kuvveti küçük partiküllerin ayrışmasını hızlandırmakta ve bu kuvvetin etkisinde olan küçük partiküller siklon içerisinde çok kısa süre kalmaktadır.</p>	<p>-Elde edilen sonuçlar türbülans yoğunluğu arttığı zaman ayırıştırma veriminin azaldığını ve sınır tabaka kalınlığının azalması ile de ayırıştırma veriminin arttığını göstermiştir.</p> <p>-Ayrıştırma verimi üzerinde türbülans yoğunluğunun etkilerinin sadece partikül konsantrasyonuna bağlı olmadığı aynı zamanda partikül hacmi dağılma karakteristiklerine de bağlı olduğu ifade edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Altmeyer S., Mathieu V., Jullemier S., Contal P., Midoux N., Rode S., Leclerc J.-P. (2003)	-Bir yazılım kullanarak çeşitli çalışma durumları için farklı modellerle siklonun tahmin edilen performansında kullanılan bu modelleri karşılaştırmış ve literatürdeki deneysel datalar ile uygunluğunu incelemiştir. - Hesaplamalar oldukça düşük yoğunluklu(<10 gr/m <sup>3</sup> ) katılarla doldurulan siklonlar için ve basınç düşümü 10-10 000 Pa, Partikül çapı 0.2-20 µm, valümetrik akış oranı 10 <sup>-4</sup> -1000 m <sup>3</sup> /s ve siklon çapı 0.01-3 m alınarak geniş bir aralıkta karşılaştırma yapılmıştır. Literatürde bulunan dört model referans alınarak hesaplamalar yapılmıştır.	-Dört model kullanılarak yapılan karşılaştırmalar, yazılımın geniş bir çalışma oranında deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu gösterilmiştir. -Siklon veriminin hesaplanmasında çok kolay ve basit bir kullanım olarak bu yazılım deneysel sonuçlarla uyumu ve kullanılan modellere uygunluğu neticesinde önerilmiştir. -Teğetsel girişli siklonların gazlardan partiküllerin ayrıştırılmasında tercih edilmesi gerektiğini göstermişlerdir.

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Avcı A., Karagöz İ. (2003)	<p>-Siklon ayırıştırıcılarında akış ve geometrik parametrelerinin verim üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Kısmi etkiler ve % 50 verimle partikül toplama için bir matematiksel model geliştirmişlerdir.</p> <p>-Matematiksel modelleme akışın hızlandırıcı etkileri altında sürtünme ve geometriye bağlı olarak hızlanmanın azaldığı göz önüne alınarak yapılmıştır.</p> <p>-Elde edilen sonuçlar literatürdeki yarı-ampirik modellerle karşılaştırılmıştır.</p>	<p>-Elde edilen sonuçlarla literatürdeki yarı-ampirik modeller karşılaştırılmış ve mevcut modelin bir teğetsel girişli siklonun performansının karşılanmasında başarılı olabileceğine işaret edilmiştir.</p> <p>-Özellikle küçük boyutlu siklonlarda akış ve geometrik parametrelerden yüzey sürtünmesi, vortex uzunluğu ve akış rejimi gibi parametrelerin önemli rol oynadığı gösterilmiştir.</p>



Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Gong A. L., and Wang L.-Ze(2004)	<p>-Repds bulunduran siklonlarda gaz fazı akışını nümerik olarak incelemişler ve elde edilen nümerik sonuçları Wang ve Ye's(1999)'ın deneysel sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Wang ve Ye's, deneysel çalışmalarında 20 m/s giriş hızı kullanmışlar ve beş farklı noktada PIV cihazı ile ölçüm almışlardır.</p> <p>-3D nümerik çalışma için Fluent yazılımını kullanmışlar, türbülans modeli olarak RSTM modelini kullanarak 14.8 m/s giriş hızı ve 500000 hücre sayısına kadar mesh yapısında Repds'li Stairmand siklonu(170mm çapında) için değerlerini elde etmişlerdir.</p>	<p>-Repds, basınç düşümünü azaltan çubuk olarak isimlendirilmiştir. Siklonda bu çubuğun kullanılmasıyla enerji kaybında önemli ölçüde azalma olduğu gösterilmiştir.</p> <p>-Siklonda Repds kullanılarak yapılan nümerik hesaplamalar; siklonun merkezinde teğetsel hız değerinin azaldığını, buna karşın aksenal hız değerinin arttığını göstermiştir. Hız dağılımındaki bu değişme enerji yayılımını azaltmaktadır. Ayrıca, siklonda düzensiz akışa neden olan vortex yapısı yüzünden teğetsel ve aksenal hız dağılımları özellikle siklonun merkezinde çok düzensiz, radyal ve çevresel yönlerde asimetric olduğu görülmüştür.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Bingtao Z., Henggen S., Yanming K. (2004)	<p>-Siklon ayırıştırma performansını geliştirmek için spiral girişli siklon tasarlamışlardır. Üç siklon ayırıştırıcısı farklı giriş geometrileri için tasarlanmıştır.</p> <p>-Siklon performans karakteristiklerinden partikül toplama verimi ve basınç düşümü parametreleri partikül hacmi ve akış oranının bir fonksiyonu olarak tanımlanmış ve giriş geometrisi değiştirilerek incelenmiş ve karşılaştırılma yapılmıştır. Giriş hız olarak 11.99, 16.04, 20.18 ve 23.85 m/s değerlerinde çalışılmıştır.</p>	<p>-Bu tür siklonlarda çok az basınç düşümü artışı ile çok yüksek partikül toplama verimleri elde edilmiştir.</p> <p>-Alışılmış teğetsel girişli siklonlar ile aynı çalışma şartlarında karşılaştırma yapıldığında partikül toplama verimi daha yüksek olarak elde edilmiş fakat basınç düşümünde çok az bir miktar da olsa artış olmuştur. Basınç düşümü katsayısı spiral girişli bir siklon için 5.67 iken teğetsel girişli bir siklonda ise 5.55 olduğu, verimin ise tüm siklon verimini % 0.4-2.4 arttırdığı ifade edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

<b>Yazar, Yıl</b>	<b>Akış Konfigurasyonu</b>	<b>Temel Bulgular</b>
Slack M. D., Del Porte S., Engelman M. S. (2004)	<p>-Hidrosiklon dizaynı için CFD modelleme tool'larının iyileştirilmesi ve pratik olarak kullanılması için bir çalışma yapmışlardır.</p> <p>-Çalışmada, hidrosiklon modellenmesi için farklı CFD model tekniklerinin sınırları ve avantajları referans alınmıştır. Nümerik çözümler, 70 000 mesh sayısı sabit tutularak yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel datalar ile karşılaştırılmıştır.</p>	<p>-Nümerik sonuçların deneysel datalar ile karşılaştırılması neticesinde kullanımı kolay farklı siklon tiplerinin modellenmesine ilişkin testler önerilmiştir.</p> <p>-CFD nümerik çözümleri tool'larının iyileştirilmesinin yanında tool'lar içerisinde olmayan bespoke tool'u geliştirilmiş ve önerilmiştir. Bu hesaplamalar belirli tip siklonlar için yapılmıştır fakat başka tipteki siklonların modellenmesine de kolay uygulanabilir olduğu ifade edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Zhang R., Basu P.(2004)	<p>-Gaz-katı ayrıştırıcısında katı partikül toplama verimini tahmin edebilmek için basit bir model geliştirmişlerdir. Bu model, yörünge(çember) denklemi teorisi üzerine kurulmuştur. Siklon performansını tahmin etmek için yaklaşımlar; i- Analitik model ii- Yarı-analitik model iii- Boyutlu korelasyon modeli iv- Boyutsuz grup korelasyon modeli ve v- Makine modeli şeklinde sınıflandırılmıştır.</p> <p>-Modelin doğruluğu için büyük siklonlarda deneyler yapılmıştır. Deneyde kullanılan siklonun giriş genişliği 0.3 m, giriş yüksekliği 0.34 m, gaz çıkış çapı 0.25 m ve kare siklon genişliği 1.08 m' dir.</p>	<p>-Model, deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.</p> <p>-Literatürde siklon ayrıştırıcısında partikül toplama verimi modelleri genel olarak Reynolds sayısı ve Stokes sayısının bir fonksiyonu olarak verilmiş, mevcut modelde ise; partikül toplama verimi Stokes sayısından bağımsız hale getirilmiş ve bu sayının yerine partikül yörünge yarıçapının çıkış yarıçapına oranı(<math>r/r_0</math>) tanımlanmış ve Reynolds sayısı ve bu orana göre deneysel sonuçlarla daha da uyumlu sonuçların elde edildiği ifade edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Narasimha M., Sripriya R., Banerjee P. K. (2005)	<p>-Partikül hacminin tahmin edilmesi için hidrosiklonu CFD olarak modellemişlerdir.</p> <p>-Hesaplamalar, iki farklı musluk çapında (10, 20 mm) ve farklı giriş hızlarında yapılmıştır. 10 mm çaplı musluk için 5.95-12.35 m/s, 20 mm çaplı musluk için 5.95-11.40 m/s giriş hızları uygulanarak denenmiş ve literatürdeki deneysel datalar ile karşılaştırılmıştır.</p> <p>-Ayrıştırmada çalışma ve dizayn şartlarının geniş oranları için katı partikülün ayrıştırma veriminin tahmin edilmesi denenmiştir.</p>	<p>-Hidrosiklon ayrıştırıcısının şekli ve hacmi akış yapıları üzerinde direkt olarak etkili olmaktadır ve özellikli fazların ayrıştırılması da etkilenmektedir.</p> <p>-Akış oranında artma ve musluk çapında azalma ile siklonda ayrışmanın keskin bir şekilde iyileştiğini göstermiştir. Elde edilen sonuçların deneysel datalar ile karşılaştırıldığında uyum içinde olduğu gösterilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Wang J.-J., Wang L.-Ze ve Liu C.-W. (2005)	<p>-Bir siklon ayırıştırıcısında gaz akışı türbülans yapısı üzerinde siklonun içine çubuk yerleştirilmesi durumunda meydana gelen etkileri incelemiştir.</p> <p>-Deneylerde; Stairmand tipi siklon kullanmışlar, akışı daha detaylı analiz edebilmek için siklonu plexiglas malzemesinden elde etmişlerdir.</p> <p>-Siklon ayırıştırıcısındaki türbülans yapısını ölçmek için Laser Doppler Velocimetry(LDV) kullanmışlardır. Ayrıca, debi ölçümü için microtasimeter ve basınç için manometre kullanmışlardır.</p> <p>-Siklon içine çubuk yerleştirerek veya çubuk yerleştirmeden giriş Reynolds sayısı <math>6.1 \times 10^4</math> alınarak çalışılmıştır.</p>	<p>-Elde edilen teğetsel ve aksenal hız değerleri; Zhou(1990), Hoekstra v.d.(1999), Solero(2002) ve Peng v.d.(2002) karşılaştırıldığında çubuk kullanılmaması durumunda benzer olarak çıkmış, fakat çubuk kullanıldığında ise teğetsel hızın büyük ölçüde azaldığı ifade edilmiştir. RSM hızları üzerinde çubuğun çok fazla etkili olduğu, türbülans yoğunluğunda ise çubuk siklon içine aksenal yönde yerleştirildiğinde türbülans yoğunluğunun aksenal bileşeni üzerinde fazla etkili olmadığı ifade edilmiştir.</p> <p>-Kullanılan çubuk silindirik kesitli ve genişliği 5 mm'den 15 mm'ye kadar arttırıldığında basınç düşümü % 32.2'den % 43.6'ya kadar azaldığı dikdörtgen kesitli çubuk kullanıldığına ise basınç düşümündeki azalmanın çok daha fazla olduğu belirtilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Bingtao Z.(2005)	<p>-Teğetsel ve simetrik giriş geometrisine sahip siklon ayrıştırıcısındaki akışı deneysel olarak incelemiştir.</p> <p>-Araştırmanın temelinde; teğetsel hız, aksenal hız ve statik basınç dağılımlarını bu iki siklon ayrıştırıcısı için karşılaştırmaktır.</p> <p>-Deneyle; 0.3 m çapına sahip Stairmand siklonunda iki farklı giriş geometrisinde yapılmıştır. Pitot tüpü ve dijital micro manometre ölçüm cihazları olarak kullanılmıştır. Ölçümler; <math>z=0.2, 0.4, 0.7</math> ve <math>1.0</math> m'de siklon çapı(D) ile orantılı olarak <math>z/D=0.67, 1.33, 2.33</math> ve <math>3.33</math> m'de alınmıştır. Giriş hızı <math>20.18</math> m/s, atmosfer basıncı <math>99.93</math> kPa, sıcaklık <math>293</math> K ve nemlilik ise % 70 alınarak çalışılmıştır.</p>	<p>-Teğetsel girişli siklonlarda maksimum teğetsel hız yaklaşık olarak giriş hızının 2 katı olduğu, simetrik girişli siklonlarda ise bu değer yaklaşık 1.7 kat olduğu gösterilmiştir.</p> <p>-Eksenal hız her iki siklonda da benzer şekilde çıkmasına rağmen simetrik girişli siklonlarda koni ucunda daha iyi simetrik karakteristik yansıttığı tespit edilmiştir.</p> <p>-Simetrik giriş geometrisinin statik basıncı arttırdığı gösterilmiş bu durum ise siklonda radyal yöndeki statik basınç değişimini azaltabileceği ifade edilmiştir.</p> <p>-Sonuç olarak, giriş geometrisinde iyileştirilme ile basınç düşümünün azaltılacağı vurgulanmıştır.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigürasyonu	Temel Bulgular
Xiang R. B., Lee K. W. (2005)	<p>-Farklı koni boyutlarında (toz giriş çapı I=19.4 mm, II=15.5 mm, III=11.6 mm) üç farklı siklon kullanılarak akışı nümerik olarak incelemişlerdir. Karşılaştırmalar 8 m/s giriş hızı için yapılmıştır.</p> <p>-Nümerik çözümde RNG k-ε ve RSM modelleri kullanılmış ve bu modeller ile elde edilen sonuçlar deneysel datalar ile karşılaştırılarak modellerin uygunluğu irdelenmiştir. Ayrıca, kullanılan CFD programının uygun sonuçlar elde edip etmediği de irdelenmiştir. Siklon tipi olarak Stairmand siklonu kullanılmıştır.</p>	<p>-Nümerik çözümde kullanılan CFD Fluent yazılımının sonuçların tahmin edilmesinde deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında çok iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Ayrıca, kullanılan türbülans modellerinden RSM modelinin RNG k-ε modeline göre deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği işaret edilmiştir.</p> <p>-Elde edilen sonuçlardan koni boyutlarına bağlı olarak akış davranışlarında farklılık olduğu ve farklı ayırma davranışlarının meydana geldiği gösterilmiştir. Yüksek ayırma veriminin koni dibi çapının azaltılmasıyla elde edildiği de ifade edilmektedir.</p>



Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Bingtao Z. (2005)	<p>-Siklon verimini değerlendirmek için yeni bir metot geliştirmiştir. Bu metot kritik ayrıştırma teorisi ve sınır tabaka ayrıştırma teorisi üzerine kurulmuş ve akış çiftlerinin incelenmesi için geliştirilmiştir. Modelin testi için stairmand 300 mm siklon gövde çaplı siklonu kullanılmış, giriş hızı 20.18 m/s ve toz yükü ise 5 g/m<sup>3</sup> alınmıştır. Yapılan çalışmalarda radyal partikül konsantrasyonu genelde siklon içinde üniform olarak alınmıştı bu çalışmada bu parametrelerin etkileri de dikkate alınmıştır.</p> <p>-Elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel datalar ve teorik hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır.</p>	<p>-Elde edilen sonuçlar Mothes ve Löffler, Iozia ve Leith teorileriyle uyum içinde olduğu işaret edilmiştir.</p> <p>-Elde edilen sonuçlar ile mevcut teorilerin karşılaştırılmasında;</p> <p>*Küçük partiküller için; Leith ve Licht teorisinden deneysel datalara daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.</p> <p>*Büyük partiküller için; Clift teorisi kadar ve Dietz teorisinden ise deneysel datalara daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
<p>Shin Mi-S., Kim H.-S., Jang D.-S., Chung J.-D., Bohnet M.(2005)</p>	<p>-Basınçlı ve yüksek sıcaklıklı çevreler için yüksek verimli siklon toz ayırıştırıcısı üzerinde nümerik ve deneysel olarak çalışmışlardır.</p> <p>-Çalışmalarını maksimum 6 bar basınçta, 20-600 °C sıcaklıkta, 10-160 m<sup>3</sup>/h debide ve 1-10 µm partikül çapında yapmışlardır.</p> <p>-Çalışmalarında esas amaç olarak kullanışlı ve güvenilir bir program oluşturmaktır. Reynolds gerilmelerinin çözümü için türbülans k-ε modelini kullanmışlardır. Debinin bir fonksiyonu olarak artan basınç ve sıcaklıklarda basınç düşümünün büyüklüğünü tespit etmeye çalışmışlardır.</p> <p>-Deneysel çalışmada; siklon bir basınç kabına yerleştirilmiş ve bir basınç kontrol vanası ile ayarı yapılmıştır. Sıcaklık ise, iki tane elektrikli ısıtıcı kullanılarak artırılmıştır.</p>	<p>-Oluşturulan program; iki boyutlu axi-simetrik akış alanlarının uygulamaları için Patankar's Simple metodu kullanılarak geliştirilmiştir.</p> <p>-Deneysel sonuçlar; 10 µm'den daha küçük partiküllerin toplama verimi üzerinde artan basınç ve sıcaklığın önemli ölçüde etkili olduğunu ancak, basınç ve sıcaklığın birbirlerini zıt yönde etkilediklerini göstermektedir. Örneğin, basınç artımı ile partikül toplama verimi artarken sıcaklık artımı ile partikül toplama verimi azalmaktadır. Bu olay; gaz yoğunluğunun değişimi ve sürüklenme kuvveti üzerindeki viskoz etkiler ile açıklanmıştır. Nümerik çözümler ise, bu sonuçları başarılı bir şekilde doğrulamaktadır. Sonuçlar; vortex uzunluğunun partikül toplama verimi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını fakat vortex çapının ise, partikül toplama verimini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Gimbun J., Chuah T. G., Fakhru'l-Razi A., Thomas S. Y. Choong (2005)	<p>-Basınç düşümü üzerinde sıcaklık ve giriş hızının etkilerini nümerik olarak incelemiştir.</p> <p>-Çalışmada, CFD Fluent yazılımında türbülans modeli olarak RNG k-ε ve RSM modellerini kullanmışlar ve sonuçlarını literatürdeki dört farklı data ile karşılaştırmışlardır. Aynı zamanda kullandıkları türbülans modelleriyle elde ettikleri sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumu neticesinde bu türbülans modellerinin de kendi içinde karşılaştırmasını yapmışlardır.</p> <p>- Kullandıkları siklon modelleri arasında da karşılaştırma yapmışlardır.</p>	<p>-Kullanılan türbülans modellerinden RSM modelinin çok iyi sonuçlar verdiğini ve deneysel datalardan % 3'den az sapma gösterdiğini ancak bu modelin çok karmaşık ve işlem zamanının fazla olduğunu ifade etmişlerdir. RNG k-ε modeli için ise basit ve az işlem zamanı gerektiğinden % 14-18 sapma oranlarında kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.</p> <p>-Karşılaştırılan siklon modellerinden; Dirgo modelinde sıcaklık değişimleri göz önüne alınmadığı için bu modelin farklı sıcaklıklarda uygun olmadığını, sıcaklık değişimlerinde en uygun modelin Shepher ve Lapple modeli olduğunu dile getirmişlerdir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigürasyonu	Temel Bulgular
<p>Chuah T. G., Gimbun J., Thomas S. Y. Choong(2006)</p>	<p>-Siklonda koni boyutlarının etkilerini nümerik olarak incelemişlerdir.</p> <p>-Nümerik çözüm CFD Fluent yazılımında RSM ve RNG k-ε türbülans modelleri kullanılarak üç farklı koni ucunda(19.4, 15.5, 11.6 mm) yapılmıştır. Bu siklonlar için kullanılan hücre sayısı ise 7847, 8500, 10235'dir.</p> <p>-8 m/s'den 16 m/s'ye kadar giriş hızlarında, partikül yükü % 3-5(volume fraction), partikül çapları ise 1µm, 2 µm ve 3 µm alınarak nümerik sonuçlar elde edilmiştir.</p> <p>-Literatürdeki deneysel sonuçlar ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılarak hem CFD Fluent yazılımının hemde kullanılan türbülans modellerinin doğruluğu araştırılmıştır.</p>	<p>-Farklı koni boyutları kullanılarak elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel datalar ile karşılaştırılmış ve basınç düşümünde yaklaşık % 2.9, partikül toplama veriminde ise yaklaşık % 5 hata ile sonuçlar elde edilmiştir.</p> <p>-Koni ucu boyutlarının değiştirilmesi ile elde edilen sonuçlarda, küçük koni ucu boyutlarına sahip siklonlarda teğetsel hız ve aksel hız değerlerinin çok yüksek olduğu, bu yüksek hız değerlerinin ise toplama verimini ve basınç düşümünü önemli ölçüde artırdığı ifade edilmiştir.</p> <p>-Nümerik çözümde kullanılan türbülans modellerinden RSM türbülans modelinin RNG k-ε türbülans modeline göre daha doğru sonuçlar verdiği de ifade edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Bernardo S., Mori M., Peres A. P., Dionísio R. P. (2006)	<p>-Bir siklonda farklı giriş açıları ile gaz ve gaz+partikül için 3D CFD analizi ile akışkanlar mekaniği profilleri ve performans parametreleri incelenmiştir. Giriş açısı siklon çapına bağlı olarak 30°, 45°, 60° alınmıştır.</p> <p>-Nümerik çözümde RSM türbülans modeli kullanılmış, giriş hızı 15.8 m/s, partikül çapı 26 µm, partikül yoğunluğu 2740 kg/m<sup>3</sup> alınmış ve çözümler 81581 hücre sayısında yapılmıştır.</p>	<p>-Elde edilen sonuçlar RSM türbülans modelinin siklonda gaz ve gaz+partikül türbülanslı girdap akışları için çok iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.</p> <p>-Normal girişli siklonlarda aynı çalışma şartlarında partikül toplama verimi % 54.4 iken 45° eğimli giriş borusu için bu değer % 72.2'ye çıktığı işaret edilmiştir. Ayrıca, çok yüksek giriş hızlarında çok yüksek basınç düşümlerinin meydana geldiği ve siklon giriş borusu açısının artmasıyla teğetsel hızın azaldığı gösterilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
<p>Qian F., Zhang J., Zhang M. (2006)</p>	<p>-Siklonun ayrıştırma performansı üzerinde uzatılmış dikey tütün etkilerini nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir.</p> <p>-Nümerik çalışmada CFD Fluent yazılımı kullanılarak çözümler 18 m/s giriş hızında ve Reynolds Stress Transport Modelinde yapılmıştır. Grid sayısı olarak 45000, 70000, 78000, 86000 kullanmıştır.</p> <p>-Dikey tüp uzunluğu uzatılmadan, 0.3 m uzatılmış, 0.4 m uzatılmış ve 0.5 m uzatılarak çalışmalar yapılmış, dikey tütün uzatılması durumunda partikül toplama veriminin değişimleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir.</p> <p>-Üç farklı siklon için karşılaştırma yapılmış, deneysel çalışmada siklondaki değişimlerin incelenebilmesi için siklon saydam plastikten yapılmıştır.</p> <p>-Deneysel çalışma, 10-20 m/s giriş hızında, partikül çapı 6.39 <math>\mu\text{m}</math>, partikül yoğunluğu 2750 <math>\text{kg}/\text{m}^3</math>, partikül yükü 10 <math>\text{g}/\text{Nm}^3</math> değerlerinde yapılmıştır.</p>	<p>-Teğetsel hız, aksel hız ve türbülans kinetik enerjisi değerlerinin uzatılmış dikey tüp toz kutusuna bağlandığı zaman toz kutusunun içinde büyük ölçüde azaldığı gösterilmiştir. Normal siklonlarda ise bu değerler daha yüksek olarak verilmektedir. Toz kutusunda, yüksek türbülans kinetik enerjisi ve güçlü akış olduğu zaman iyi bir ayrıştırma olmaması yüzünden uzatılmış tüp ile çok az bir basınç düşümündeki artış ile ayrıştırma veriminin büyük ölçüde iyileştiği gösterilmiştir. Uzatılmış tüp uzunluğu için optimum uzunluk olarak 0.5 m verilmiştir.</p> <p>-Deneysel ve nümerik çalışma, Slack M. D. ve diğerleri(2000) karşılaştırılmış ve sonuçların uyum içinde olduğu gösterilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Chen J., Shi M.(2006)	<p>-Siklon ayırıştırıcısında basınç düşümünü hesaplamak için genel bir model geliştirmişlerdir.</p> <p>-Teğetsel girişli ters akışlı siklonlarda basınç düşümünü analiz edebilmek için basınç düşümü iki ana faktöre bağlı olarak tanımlanmıştır. Bu faktörler, lokal ve sürekli kayıplar olarak ifade edilmiştir. Lokal kayıplar, çıkış borusunun girişindeki azalan kayıpları ve siklon girişindeki artan kayıpları içermektedir. Sürekli kayıplar ise, gazın çıkış borusundaki dinamik enerji yayılımı ve siklon duvarlarındaki sürtünmeden kaynaklanan kayıplardan oluştuğu belirtilmiştir.</p> <p>-Stairmand, Lapple ve Stern tipi siklonlarda gaz olarak hava kullanılması durumunda karşılaştırmalar yapılmıştır.</p>	<p>-Akış alanındaki ölçüm sonuçları kullanılarak kayıpları hesaplamak için basit ve genel bir model elde etmişlerdir. Deneysel sonuçlar ve hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması ile çok fazla siklon modelinde her sıcaklıkta, saf ve tozlu gazlar için modelin doğruluğu gösterilmiştir.</p> <p>-Sıcaklığın artması; gazın viskozitesinin artmasına ve yoğunluğunun azalmasına sebep olur. Her iki durumda, girdap hareketinde azalmaya ve çıkışta yayılma kaybı ve ayırma bölgesinde girdap kaybının azalmasına yol açar. Bu durum; sürüklenme katsayısı ve sıcaklığın bir Reynolds sayısı ile ilişkilendirilebileceğine işaret ettiği ifade edilmiştir.</p>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Cortes C., Gil A.(2007)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ters akışlı siklon ayırıcıları için geliştirilen modelleri incelemişlerdir.</li> <li>- Çalışmalarını temiz hava(tek faz) kullanımı ve partikül yüklenmesi(çift faz) durumları için iki guruba bölerek yapmışlardır.</li> <li>- CFD tahminlerinin bu tür akışlarda uygunluğu ve nümerik hesaplamalarda kullanılan türbülans modellerinin incelenmesini de yapmışlardır.</li> <li>- Ele aldıkları çok sayıda modelin deneysel datalar ile karşılaştırmasını yaparak en uygun modelin tespitini incelemişlerdir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- İnceledikleri çok sayıda modelin deneysel datalar ile karşılaştırılmasında basınç düşümü için Muschelknautz modelinin partikül toplama verimi için Trefz ve Muschelknautz modelinin çok daha doğru sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.</li> <li>- CFD çözümlerinin diferansiyel RSTM veya LES türbülans modeli kullanılması durumunda uygun olduğu gösterilmiştir.</li> <li>- Bu tür akışlarda siklon doğal uzunluğu olarak isimlendirilen parametrenin ikincil akışlara neden olduğu ve optimum koşulların sağlanabilmesi için bu parametrenin detaylı incelenmesi gerektiği vurgulanmıştır.</li> </ul>



Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Wan G., Sun G., Xue X., Shi M. (2008)	<ul style="list-style-type: none"><li>- Siklon ayırıştırıcılarında farklı partikül çaplarındaki partikül konsantrasyonlarını nümerik olarak incelemişlerdir.</li><li>- Nümerik çözümde CFD Fluent yazılımını kullanmışlardır. Türbülans modeli olarak RSM türbülans modeli ile sonuçlar elde etmişlerdir. Bu çözümleri 20 m/s giriş hızında ve 1-24 µm partikül çapları arasında yapmışlardır.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Nümerik yönteminde kullanılan CFD Fluent yazılımının RSM türbülans modeli kullanılarak uygunluğunu göstermişlerdir.</li><li>- Partikül konsantrasyonuna bağlı olarak gaz akışında önemli ölçüde bir değişimin olduğunu ifade etmişlerdir.</li><li>- Vorteks bulunan yerin 0.25D kadar aşağısında özellikle küçük partiküller için partikül konsantrasyonunun yüksek olduğunu belirtmişlerdir.</li></ul>

Çizelge 2.1. Kaynak araştırması(devam)

Yazar, Yıl	Akış Konfigurasyonu	Temel Bulgular
Chu K. W., Yu A. B. (2008)	<ul style="list-style-type: none"><li>- Kompleks akışların nümerik olarak tahmin edilmesinin uygunluğunu irdelemişlerdir.</li><li>- Çözümlerini CFD Fluent yazılımında Discrete Element Method (DEM) u kullanarak elde etmişlerdir.</li><li>- Kompleks akışın görüldüğü üç farklı model kullanmışlardır. Kullandıkları modellerden siklon ayırıştırıcısında giriş hızı 10 ve 20 m/s, partikül çapı olarak 1, 1.5 ve 2 mm partikül yoğunluğu ise 1500 kg/m<sup>3</sup> de sonuçlar elde etmişlerdir.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- CFD Fluent yazılımının uygun yöntemlerin kullanılmasıyla kompleks akış problemlerinin çözümlerinin elde edilmesinde uygun olduğu ifade edilmiştir.</li><li>- Kompleks akış olayının görüldüğü siklon ayırıştırıcısında partiküllerin büyük ölçüde gaz akışını etkilediği belirtilmiştir.</li><li>- Partikül yüklemesinden sonra alışılmış vorteks yapısının ortadan kalktığı ve aynı zamanda partikül-partikül ve partikül-gaz etkileşimlerinin önemli hale geldiğine değinilmiştir.</li></ul>

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1 Giriş

Girdaplı akışlarda nümerik çözüm yönteminin tespit edilebilmesi amacıyla türbülans modelleri, duvar fonksiyonları ve şemalar aşağıda verildiği şekilde incelenmiştir. Nümerik çözüm yönteminin tespiti ile ilk olarak tek fazlı(hava) akışlar için siklondaki basınç düşümü, hız büyüklükleri ve türbülans değerleri gibi önemli büyüklükler elde edilerek ilgili literatürle karşılaştırılmıştır. Daha sonra çift fazlı(hava+partikül) akışlar için ifade edilen bu büyüklerin yanı sıra partikül toplama verimi nümerik olarak çözümlenerek ilgili literatürle karşılaştırılmıştır.

Araştırmanın deneysel aşaması için Bölüm 3.5’de açıklandığı şekilde deney düzeneği kurulmuş ve tek fazlı(hava) ve çift fazlı(hava+partikül) akışlar çalışılmıştır.

#### 3.2 Temel Denklemler

Süreklilik, Navier-Stokes ve yayınının ihmal edildiği enerji denklemi, tam gelişmiş türbülanslı akış için  $u = \bar{u}$ ,  $v = \bar{v}$ ,  $w = \bar{w}$ ,  $p = \bar{p}$ ,  $T = \bar{T}$  kabulüyle aşağıdaki gibi yazılabilir.

Newtonian, sürekli rejim, sıkıştırılmaz türbülanslı akış için korunum denklemleri;

$$\text{div } u = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \text{div}(\mu \text{grad } u) + \left[ -\frac{\partial(\overline{\rho u^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial z} \right] \quad (3.2a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \text{div}(\mu \text{grad } v) + \left[ -\frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] \quad (3.2b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \text{div}(\mu \text{grad } w) + \left[ -\frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho w'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right] \quad (3.2c)$$

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \text{div}(k \text{grad } T) + \left[ -\frac{\partial(\overline{\rho u'T'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'T'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'T'})}{\partial z} \right] \quad (3.3)$$

### 3.3 Türbülans Modelleri, Duvar Fonksiyonları ve Şemalar

Nümerik çözümlerin gerçekleştirilebilmesi için nümerik teknik çok önem teşkil etmektedir. Bu amaçla, oluşturulan modelin çözümünde kullanılan yöntemlerin iyi bir şekilde araştırılıp en iyi çözüm yöntemlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar doğru sonuçlara çok yakın bile olsa çözümün nasıl gerçekleştirildiği bilinmediği için ele alınan problemin iyileştirilmesi çok zor hatta imkansız olacaktır.

Bu çalışmada, girdaplı akışları üzerinde barındıran ve çalışmalarda kullanılan siklonların nümerik çözümünde kullanılan türbülans modelleri, duvar fonksiyonları ve şemalar detaylı olarak incelenerek aşağıda verilmiştir.

#### 3.3.1 Standart $k$ - $\varepsilon$ ve RNG $k$ - $\varepsilon$ türbülans modeli

Standart  $k$ - $\varepsilon$  modeli akışın tamamen türbülanslı olduğu kabulü esasına dayanır. Türbülans kinetik enerji( $k$ ) ve dissipasyon oranı( $\varepsilon$ ) için yazılan iki adet transport denkleminin çözümünü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir. Türbülans kinetik enerji( $k$ ) ve dissipasyon oranı( $\varepsilon$ ) aşağıdaki transport denklemlerinden;

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + -\rho\varepsilon + G_b - Y_M \quad (3.4)$$

ve

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.5)$$

elde edilebilir. Burada  $\alpha_k$  ve  $\alpha_\varepsilon$  terimleri ise  $k$  ve  $\varepsilon$  için ters etkili Pr sayılarını göstermekte olup, analitik olarak;

$$\frac{|\alpha - 1.3929|^{0.6321}}{|\alpha_0 - 1.3929|} = \frac{|\alpha - 2.3929|^{0.3679}}{|\alpha_0 - 2.3929|} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (3.6)$$

şeklinde dir. Burada  $\alpha_0 = 1$  dir. Reynolds sayısının üst sınırında ( $\mu_{mol} / \mu_{eff} \ll 1$ )

$\alpha_k = \alpha_\varepsilon \cong 1.393$  dir. Ayrıca bu yöntemde  $Pr_t = \frac{1}{\alpha}$  olup  $\alpha_0 = \frac{1}{Pr} = \frac{k}{\mu C_p}$  dir.

Türbülans viskozitesi için aşağıdaki diferansiyel denklem yazılabilir.

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (3.7)$$

burada  $\hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}$ ,  $C_v \cong 100$ . Yüksek Re sayısı limitinde denklem;

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.8)$$

şeklinde olup  $C_\mu = 0.0845$  dir.

Fluent CFD yazılımının alt birimlerinden olan, RNG modeli, türbülans viskozitesini uygun bir şekilde düzelterek dönme ve girdap etkilerini göz önüne almaya imkan verir. Düzeltilmiş değer için aşağıdaki fonksiyon kullanılmıştır.

$$\mu_t = \mu_{t0} f\left(\alpha_s, \Omega, \frac{k}{\varepsilon}\right) \quad (3.9)$$

Burada  $\Omega$  karakteristik girdap sayısını (Fluent 1998),  $\alpha_s$  ise girdabın şiddetine göre değişik değerler alabilen girdap sabitidir. Düşük girdaplı durumlar için  $\alpha_s = 0.05$  olarak alınmaktadır. Ancak kuvvetli girdaplarda yüksek  $\alpha_s$  değerleri kullanılır.

RNG k- $\varepsilon$  modelinde  $\varepsilon$  denklemindeki ilave terimler

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (3.10)$$

ifadesiyle hesaplanır. Burada  $\eta \equiv S_k/\varepsilon$ ,  $\eta_0 = 4.38$ ,  $\beta = 0.012$  dir. Sabitler;

$$C_{1\varepsilon} = 1.42, \quad C_{2\varepsilon} = 1.68$$

şeklindedir.

### 3.3.2 RSM türbülans modeli

Reynolds gerilme türbülans modeli(RSM), Reynolds gerilme değerlerinin ( $\overline{\rho u_i' u_j'}$ ) hesaplanması esasına dayanır. Bu denklemler momentum denklemlerinin momentlerinin alınmasıyla elde edilebilir. Bazı kabuller altında momentum denklemlerinin salınım büyüklüğü ile çarpılması ve Reynolds ortalamasının alınması esasına dayanır.

$(\overline{\rho u_i' u_j'})$  Reynolds gerilmelerinin transport denklemleri aşağıdaki şekilde;

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho U_k u_i u_j}) = \\ & - \frac{\partial}{\partial t}[\overline{\rho u_i u_j u_k} + \overline{p(\delta_{kj} u_i + \delta_{ik} u_j)}] + \frac{\partial}{\partial x_k}[(\mu \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_i u_j})] \\ & - \overline{\rho(u_i u_k \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + u_j u_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k})} - \overline{\rho \beta (g_i u_j \theta + g_j u_i \theta)} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} & + \overline{p \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)} - 2 \overline{\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}} \\ & - 2 \overline{\rho \Omega_k (u_j u_m \varepsilon_{ikm} + u_i u_m \varepsilon_{ikm})} \end{aligned}$$

yazılabilir.

Burada belirtilen her bir terim Fluent(1998) yazılımında bazı kabuller altında hesaplanabilmektedir.

### 3.3.3 Duvar Fonksiyonları

Duvar fonksiyonları, duvarlarla türbülans bölgesi arasında viskozite etkilerini ilişkilendirmek amacıyla kullanılırlar. Bu fonksiyonların kullanımıyla türbülans modellerinin modifiye edilme gerekliliğini ortadan kaldırır. Yüksek Reynolds sayılı akışlarda duvar fonksiyonları yaklaşımını, duvar civarında çözüm değişkenlerini çok hızlı bir şekilde değiştiren viskoz etkilerin çözümler için gerekli olmayışı ve nümerik olarak yaklaşık doğru sonuç vermesi sebebiyle çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fluent CFD yazılımında Standart duvar fonksiyonları ve Nonequilibrium duvar fonksiyonları olmak üzere başlıca iki duvar fonksiyonu yazılımı kullanılmaktadır.

#### Standart duvar fonksiyonları

Standart duvar fonksiyonları; duvarla çevrili alanların nümerik çözümünde doğru sonuçlar vermektedir. Duvara yakın yerlerde yüksek hız ve basınç değişimlerinin

olduğu akışlarda ise standart duvar fonksiyonu yaklaşımının kullanılması elde edilen sonuçları büyük ölçüde etkilemekte ve doğru sonuçlardan uzaklaşmaktadır. Bu tür durumlarda, nonequilibrium duvar fonksiyonları elde edilen sonuçların düzeltilmesine yardımcı olmaktadır.

Hız alanlarında tanımlanan duvar kanunu;

$$U^* = \frac{1}{K} \ln(Ey^*) \quad (3.12)$$

burada

$$U^* \equiv \frac{U_0 C_\mu^{1/4} k_0^{1/2}}{\tau_w / \rho} \quad (3.13)$$

$$y^* \equiv \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_0^{1/2} y_0}{\mu} \quad (3.14)$$

Fluent CFD yazılımında logaritmik kanun  $y^* > 11.225$  olduğunda uygulanmaktadır.  $y^* < 11.225$  olduğunda ise duvar komşu hücrelerinde aşağıdaki gibi yazılabilen laminer stress-strain ilişkisini;

$$U^* = y^* \quad (3.15)$$

uygulanmakta, bu değerler Fluent CFD yazılımında default değerler olarak alınmaktadır.

### Nonequilibrium duvar fonksiyonları

Nonequilibrium duvar fonksiyonları; standart duvar fonksiyonunda ihmal edilen yüksek hız ve basınç gradyanlarının etkilerini de göz önüne alarak hesaplamalar yapar. Nonequilibrium duvar fonksiyonları bu özelliğinden dolayı yüksek hız ve basınç gradyanlarının görüldüğü akış uygulamalarında ve ısı transferi özelliklerinin incelenmesinde doğru sonuçlara yaklaşmak amacıyla kullanılır.

Ortalama hız için logaritmik kanunu;

$$\frac{\tilde{U} C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{K} \ln \left( E \frac{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y}{\mu} \right) \quad (3.16)$$

burada

$$\tilde{U} = U - \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} \left[ \frac{y_v}{\rho K^* k^{1/2}} \ln \left( \frac{y}{y_v} \right) + \frac{y - y_v}{\rho K^* k^{1/2}} + \frac{y_v^2}{\mu} \right] \quad (3.17)$$

$y_v$ , fiziksel viskoz alt tabaka kalınlığıdır. Değeri ise;

$$y_v \equiv \frac{\mu y_v^*}{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2}} \quad (3.18)$$

şeklinde hesaplanır. Fluent CFD yazılımında default değer  $y_v^* = 11.225$  olarak alınmaktadır.

$C_l = K C_\mu^{-3/4}$  şeklinde tanımlanan ifade viskoz alt tabaka boyutsuz kalınlığıdır.

### 3.3.4 SİMPLE ve SİMPLEC Algoritmaları

Semi-implicit method for pressure-linked equation ve Simple consistent kelimelerinin kısaltmalarından oluşmakta olup basınç-hız ilişkisinin çözümünde kullanılan algoritmaları ifade eder.

Üç boyutlu kartezyen koordinatlarda sürekli rejim için korunum denklemi;

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S \quad (3.19)$$

şeklinde basit olarak yazılabilir.

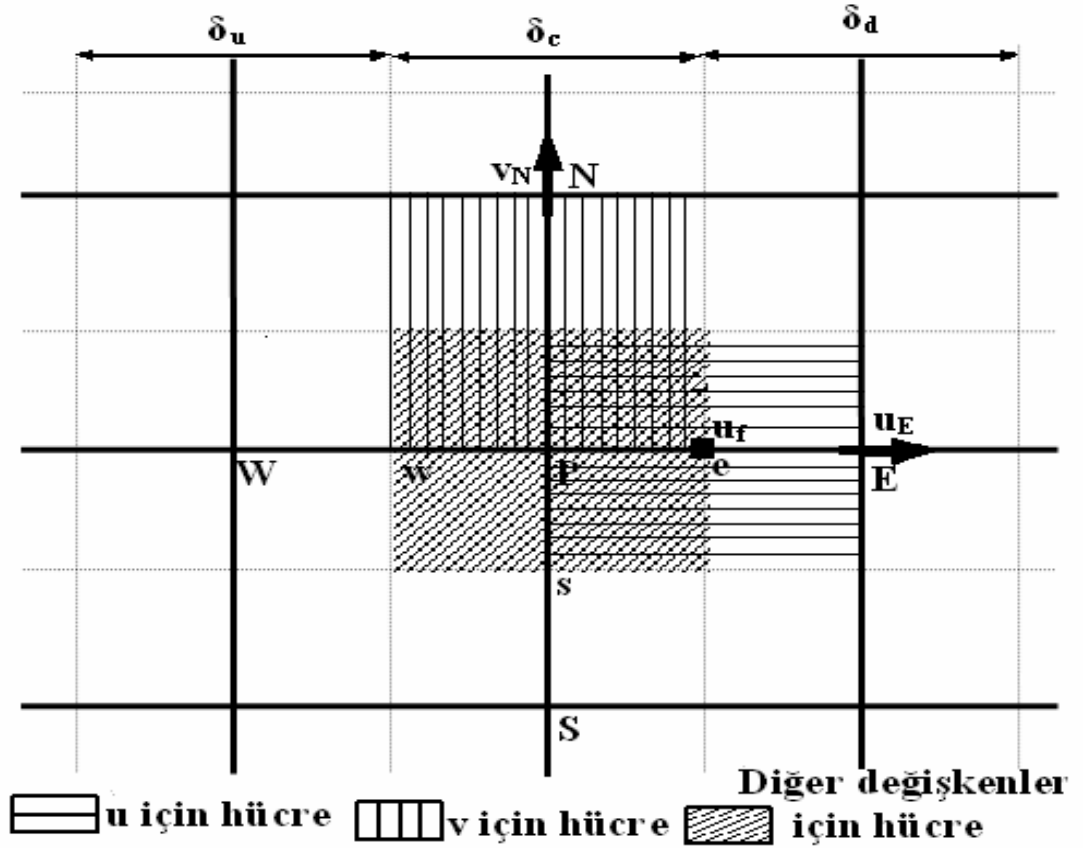
Burada  $\phi$ ; l, u, v, T, k ve  $\epsilon$  (k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanıldıysa) gibi herhangi bir özelliştir. S kaynak terimi,  $\Gamma$  ise laminar ve türbülanslı akışta yayılım şiddetidir.

$\phi$ 'nin tanımına bağlı olarak  $\Gamma$  ve S ifadeleri çizelge 3.1'de belirtildiği şekilde ifade edilebilmektedir.



Çizelge 3.1.  $\phi$ 'ye bağlı olarak  $\Gamma$  ve S değerleri

	$\phi$	$\Gamma$	S
Süreklilik denklemi	1	0	0
x-yönünde momentum denklemi	u	$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x$
y-yönünde momentum denklemi	v	$\mu_{eff}$	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y$
z-yönünde momentum denklemi	w	$\mu_{eff}$	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z$



Şekil 3.1. Staggered grid şeması

Kontrol hacmi metoduna uygun olarak hesaplanan yüzeydeki hücreler şekil 3.1'deki gibi belirtilmiştir.

Staggered grid şeması, hızların kayarak hareket etmesi neticesinde oluşan şema olarak ifade edilebilir. P grid noktasını çevreleyen her bir hücre üzerinde diferansiyel denklemler integre edilmiştir. Komşu grid değerleri açısından her bir hücre için konvektif terimler  $\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y}$  ve difüzyon terimleri  $\frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)$ ,  $\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)$

değerlendirilebilmektedir. Kaynak terim S,  $S = \delta_c + \delta_p \phi_p$  şeklinde ifade edildikten sonra, süreklilik denklemi aşağıdaki şekilde;

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (3.20)$$

veya kısaca;

$$a_p \phi_p = \Sigma a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.21)$$

yazılabilir(Qian S. Y.1999).

Burada;  $\phi_p, \phi_E, \phi_W, \phi_N$  ve  $\phi_S$ , P grid ve komşu dört grid (sırayla; doğu, batı, kuzey ve güney) noktasında  $\phi$  değişkeni değerleridir. nb komşu noktalar toplamı olarak ifade edilmektedir.

Basınç denklemi; yukarıdaki denklemlerde basınç(P) değerini veren bir denklemin olmaması bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Basınç değeri sadece momentum denklemindeki kaynak teriminin bir kısmında gradyant formundadır. Dolayısıyla, hız alanlarının hesaplanması bilinmeyen basınç alanlarına bağlı olarak karşımıza çıkmaktadır. SIMPLE metodu, momentum ve süreklilik denklemleri arasında bir bağlantı kurarak bu problemi ortadan kaldırmaktadır. SIMPLE metodunu geliştirmek için yukarıdaki şekildeki staggered grid şeması kullanılmaktadır. Burada, şekil 1'de gösterilen u hız bileşeni; x-doğrultusunda bitişik iki grid noktasının birleştiği yere yerleştirilir. Aynı şekilde, v hız bileşeni y-doğrultusuna ve üç boyutlu ise w hız bileşeni z-doğrultusuna yerleştirilir.  $\phi$  değeri yerine u yazılıp, b teriminden basınç ifadesi açıldıktan sonra [Eş. 3.21] e noktasında merkezlenen kontrol hacmine göre aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$a_e \phi_e = \Sigma a_{nb} \phi_{nb} + b + (P_p - P_E) A_e \quad (3.22)$$

$(P_p - P_E)A_e$  ifadesi x-doğrultusunda basınç gradyanı tarafından kontrol hacmi üzerinde meydana getirilen kuvvettir.  $A_e$  ise bu kuvvetin oluştuğu alan olarak ifade edilmektedir. Tahmin edilen  $P^*$  değeri üzerine kurulmuş u-momentum denklemi bir  $u^*$  değeri elde etmek için kesin olarak çözülebilir.

$$a_e u_e^* = \Sigma a_{nb} u_{nb}^* + b + (P_p^* - P_E^*) A_e \quad (3.23)$$

şeklinde yazılır.

Ve basınç değeri,  $p = p^* + p'$  ifadesiyle tanımlanabilir. Burada,  $p'$  tahmini basınç değerini doğru olan basınç değerine yaklaştırmak amacıyla tanımlanmış basınç düzeltme değeridir. Aynı şekilde hız değeri,  $u = u^* + u'$  tanımlanabilir. [Eş. 3.22]'dan elde edilen [Eş. 3.23] gibi hız düzeltme değerini;

$$a_e u_e' = \Sigma a_{nb} u_{nb}' + b + (P_p' - P_E') A_e \quad (3.24)$$

elde edebiliriz.

SIMPLE metodunda,  $\Sigma a_{nb} u_{nb}'$  değeri ihmal edilmiştir. Ve böylece [Eş. 3.24];

$$u_e' = \frac{A_e}{a_e} (p_p' - p_E') = d_e (p_p' - p_E') \quad (3.25)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada;  $d_e = \frac{A_e}{a_e}$  şeklindedir. Böylece;

$$u_e = u_e^* + d_e (p_p' - p_E') \quad (3.26a)$$

elde edilir.

Benzer şekilde;

$$u_w = u_w^* + d_w (p_w' - p_p') \quad (3.26b)$$

$$v_n = v_n^* + d_n (p_p' - p_N') \quad (3.26c)$$

$$v_s = v_s^* + d_s (p_s' - p_p') \quad (3.26d)$$

yazılabilir.

$\Sigma a_{nb} u_{nb}'$  teriminin ihmal edilmesi elde edilen son sonuçlarda önemli bir değişikliğe yol açmayacaktır. Basınç düzeltme değeri  $p'$  için bir denklem elde etmek amacıyla, [Eş. 3.26]'de verilen düzeltilmiş hız değerleri süreklilik denkleminde yerine yazılırsa;

$$(\rho u)_e A_e - (\rho u)_w A_w + (\rho v)_n A_n - (\rho v)_s A_s = 0 \quad (3.27)$$

denklemini elde edilir. [Eş. 3.26]'ün [Eş. 3.27]'de yerine yazılmasıyla basınç düzeltme değeri için basınç denklemini;

$$a_p p'_p = \sum a_{nb} p'_{nb} + b \quad (3.28)$$

elde edebiliriz.

Burada katsayılar;

$$a_p = \sum a_{nb} = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (3.29)$$

$$a_E = (\rho A d)_e \quad (3.30a)$$

$$a_W = (\rho A d)_w \quad (3.30b)$$

$$a_N = (\rho A d)_n \quad (3.30c)$$

$$a_S = (\rho A d)_s \quad (3.30d)$$

ve kaynak terim b ise;

$$b = c_W - c_E + c_S - c_N \quad (3.31)$$

şeklindedir. Burada;

$$c_E = (\rho u^* A)_e \quad (3.32a)$$

$$c_W = (\rho u^* A)_w \quad (3.32b)$$

$$c_N = (\rho u^* A)_n \quad (3.32c)$$

$$c_S = (\rho u^* A)_s \quad (3.32d)$$

şeklindedir. [Eş. 3.28]'in çözümü ile basınç düzeltme değerleri elde edilmektedir. SIMPLE metodunun çözüm aşamaları ise; Tahmin edilen başlangıç alanları ile iterasyona başlanır ve  $u^*$ ,  $v^*$  değerlerini elde etmek için [Eş. 3.26] çözülür. Basınç denklemini [Eş. 3.28] çözüldüğü zaman ise  $p'$  basınç düzeltme değeri elde edilir. Hız ve basınç [Eş. 3.25 ve Eş. 3.28] alanlarının update edilmesiyle düzeltme değerleri ve diğer denklemlerin çözümü sağlanır. Tüm denklemlerin yakınsama şartı sağlanınca işlem sonlandırılmış olur.

SIMPLEC metodunun çözüm aşamaları ise; SIMPLE metoduyla aynıdır. SIMPLEC metodu ile SIMPLE metodu arasındaki fark; SIMPLE metodunda ihmal edilen terimler SIMPLEC metodunda ilave edilerek  $d_e$  katsayısı;

$$d_e = \frac{A_e}{(a_e - \sum a_{nb} p'_{nb})} \quad (3.33)$$

şeklinde yazılır.

SIMPLEC metodu ile SIMPLE metodundan daha hızlı yakınsama sağlanır. Elde edilen son sonuçlar açısından ise önemli bir değişiklik olmamaktadır.

### 3.3.5 Presto(Pressure staggering Option scheme) Şeması

Presto algoritması, hücre civarında staggered kontrol hacminde süreklilik dengesi oluşturarak hücre merkez değerlerini kullanıp yüzeydeki basınç değerinin hesaplanması sağlar. Yüksek Reynolds sayılarında; basınç değerlerinin tahmin edilmesinde ve viskoz bölgelerde görülen yüksek basınç gradyanları sebebiyle hız profillerinin tahmin edilmesinde yüksek mertebeden upwind şemaları ile birlikte daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Genel yakınsama şartı aşağıdaki bağıntı ile verilebilir(Gustavsen A. 2001).

$$R^\phi = \frac{\sum |\sum a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p|}{\sum |a_p \phi_p|} \quad (3.34)$$

bu denklem ile nümerik çözümde kullanılarak basınç değerinin doğru sonuçlara yakın değerler elde edilmesi sağlanmış olacaktır. PRESTO algoritmasının denklem karakteristiği bakımından basınç-hız denkleminde kullanılan SIMPLEC şemasıyla benzerlik göstermesi sebebiyle doğru sonuçlara çok daha yaklaşmak için bu iki şemanın bir arada kullanılması gerekebilir.

### 3.3.6 Birinci, İkinci ve Yüksek Mertebe Upwind (Quick) Şemaları

Düzenli akışlarda birinci mertebe upwind algoritması sonuçların tahmin edilmesinde yeterli olurken, girdaplı akışlarda bu algoritma hataların artmasına sebep olmaktadır. Birinci mertebe upwind algoritması; hücrenin merkezindeki hız değerini ortalama hız değeri olarak kabul ederek hücrenin tüm noktalarında bu değeri alarak çözüm işlemini gerçekleştirir. Aynı zamanda hücre yüzeyinde hız değerine ihtiyaç duyulursa ortalama hız değeri kullanılır.

İkinci mertebe upwind algoritması ise; hız değerini sürekli bir hücre boyunca sabit olarak göz önüne almaz. Hücre yüzey değerleri kullanılır.

Yüksek mertebe veya quick(quadratic upwind) algoritması; ikinci mertebe upwind ve hız değerinin merkezi interpolasyonu üzerine merkezlenen bir algoritmadır. Quadratik bir dağılımı takip eden bir nokta etrafındaki yayılım konsantrasyonunu dikkate alarak çözüm gerçekleştiren bir algoritmadır. Karmaşık geometrilerdeki çözümler için kullanılır.

Şekil 3.1 dikkate alınarak aşağıdaki denklem;

$$u_f = \theta \left( \frac{\delta_d}{\delta_c + \delta_d} u_P + \frac{\delta_c}{\delta_c + \delta_d} u_E \right) + (1 - \theta) \left( \frac{\delta_u + 2\delta_c}{\delta_u + \delta_c} u_P - \frac{\delta_c}{\delta_u + \delta_c} u_W \right) \quad (3.35)$$

denklemini hesaplanmış olur(Fluent 1998).

Yukarıdaki denklemde;  $\theta = 0$  olduğunda, ikinci mertebe upwind değeri elde edilirken,  $\theta = 1$  olduğunda, merkezi ikinci mertebe interpolasyonla elde edilmiş olur. Quick şemasında ise,  $\theta = 1/8$  olması durumunda sonuçlar elde edilir. Fluent'de  $\theta$ 'ya bağlı çözümler yapılmaktadır. Bu algoritmalar; momentum, türbülans kinetik enerjisi, türbülans yayılım oranı ve reynolds gerilmelerinin tahmin edilmesinde kullanılır.

### 3.4 Partikül Analizi

Siklonların en önemli görevlerinden biri havada bulunan partiküllerin tutulması işlemidir. Yukarıda türbülans modelleri, duvar fonksiyonları ve şemaların analiz edilip tek fazlı(hava) akışkan için yapılan nümerik çalışmalar daha ziyade ilgili literatür dikkate alınarak nümerik yöntemi belirlemek ve geliştirmek için yapılmıştır. Fakat, siklonda akış hareketi ve siklon geometrisinden kaynaklanan önemli parametrelerde mevcuttur. Basınç düşümü, hız büyüklükleri ve türbülans özellikleri gibi parametreler bu tür uygulamalarda özellikle üzerinde durulması gerekmektedir. Nümerik teknik belirlendikten sonra belirtilen parametrelerin analizi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Türbülans modelleri, duvar fonksiyonları ve şemalar kullanılarak yukarıda ifade edilen parametreler incelenebilmektedir. İki fazlı(hava+partikül) çalışmalarda partikül yörüngelerini tayin etmek için partiküllerin modellenmesi gerekir.

#### 3.4.1 Ayrık Faz Modeli

Bu model, Lagrangian formu altında partiküller üzerindeki kuvvetler dengesinin integrasyonu ile partiküllerin yörüngelerinin tahmin edilmesini sağlayan bir modeldir. Partikül üzerindeki kuvvetler dengesi x-doğrultusunda kartezyen koordinatlarda;

$$\frac{Du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3.36)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada:  $F_x$  ilave ivmelenme (Kuvvet/birim partikül kütlesi) terimidir.  $F_D(u - u_p)$  birim partikül kütlesinin sürüklenme terimidir. Burada,  $F_D$  sürüklenme kuvveti ise;

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (3.37)$$

şeklinde ifade edilir.

$u$  akışkan hızı,  $u_p$  partikül hızı,  $\mu$  akışkanın moleküler viskozitesi,  $\rho$  akışkan yoğunluğu,  $\rho_p$  partikül yoğunluğu,  $d_p$  partikül çapı ve  $Re$  relativ Reynolds sayısıdır ve bu ifade;

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3.38)$$

şeklindedir.

Sürüklenme katsayısı( $C_D$ ) ise;

$$C_D = \frac{24}{Re_{sph}} \left(1 + b_1 Re_{sph}^{b_2}\right) + \frac{b_3 Re_{sph}}{b_4 + Re_{sph}} \quad (3.39)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada:

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2) \quad (3.40a)$$

$$b_2 = (0.0964 - 0.5565\phi) \quad (3.40b)$$

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

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3) \quad (3.40d)$$

şeklindedir. Buradaki  $\phi$  biçim faktörüdür ve  $\phi = \frac{s}{S}$  olarak tanımlanır.  $S$  gerçek partikülün yüzey alanı,  $s$  ise partikül ile aynı hacme sahip kürenin yüzey alanıdır.  $Re_{sph}$ ,

aynı hacme sahip kürenin çapıyla hesaplanır. Mikronun altındaki partiküller için Stokes sürüklenme kanunu tanımlanır ve bu tanımlama neticesinde sürüklenme kuvveti;

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 C_C} \quad (3.41)$$

şeklinde ifade edilir.  $C_C$  terimi Stokes sürüklenme kanunu için Cunningham düzeltme değeridir. Bu değer ise;

$$C_C = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \left( 1.257 + 0.4e^{-(1.1d_p/2\lambda)} \right) \quad (3.42)$$

şeklinde elde edilir.

Burada,  $\lambda$  moleküler serbest yörünge olarak tanımlanır. Ayrıca  $Re > 20$  olduğunda yüksek Mach sürüklenme kanunu tanımlanır. Bu durumda partikülün Mach sayısı 0.4'den büyük bir değer alınır.

Eşitlik 3.36'da  $F_x$  olarak ifade edilen ve ilave kuvvetler olarak tanımlanan kuvvetlerden biri partikül kütlelerinden kaynaklanan kuvvettir. Bu kuvvet:

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u - u_p) \quad (3.43)$$

şeklinde yazılır.

Bu kuvvet  $\rho > \rho_p$  olduğu durumlarda çok önemli hale gelmektedir. İlave kuvvetlerden bir diğeri ise akıştaki basınç farkından kaynaklanan:

$$F_x = \frac{\rho}{\rho_p} \frac{\partial u}{\partial x} u_p \quad (3.44)$$

kuvvetidir. Ayrıca, z-ekseni etrafında dönen bir akış için partikül üzerindeki kuvvetler kartezyen koordinatlarda x ve y doğrultusunda:

$$F_x = \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) \Omega_x^2 + 2\Omega \left( u_{y,p} - \frac{\rho}{\rho_p} u_y \right) \quad (3.45)$$

burada;  $u_{y,p}$  ve  $u_y$  partikül ve akışkanın y-doğrultusundaki hızı ve:

$$F_x = \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) \Omega_y^2 + 2\Omega \left( u_{x,p} - \frac{\rho}{\rho_p} u_x \right) \quad (3.46)$$



burada;  $u_{x,p}$  ve  $u_x$  partikül ve akışkanın x-doğrultusundaki hızı olmak üzere yazılabilir.

### Thermophoretic Kuvvet

Partikül ısısından kaynaklanan kuvvettir. Küçük partiküllerin akışkan içerisinde iken sahip oldukları bir sıcaklık gradienti vardır ve bu gradientin tersi yönünde bir kuvvet oluşur. Bu olaya thermohoresis denir. Partiküller üzerindeki sıcaklık analizi yapılırken ilave kuvvet:

$$F_x = -D_{T,p} \frac{1}{m_p T} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.47)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada;  $m_p$  Partikül kütlesi,  $T$  Lokal akışkan sıcaklığı ve  $D_{T,p}$  ısıl katsayıdır.  $D_{T,p}$  katsayısı, sabit veya polinom şeklinde veya literatürde önerilen formda:

$$D_{T,p} = \frac{6\pi d_p \mu^2 C_s (K + C_t K_n)}{\rho (1 + 3C_m K_n) (1 + 2K + 2C_t K_n)} \quad (3.48)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada;

$$K_n = \text{Knudsen sayısı} = 2^{\lambda/d_p}$$

$\lambda$  = Akışkanın serbest yörüngesi

$k$  = Akışkanın ısıl iletkenliği

$k_p$  = Partikülün ısıl iletkenliği

$$C_s = 1.17$$

$$C_t = 2.18$$

$$C_m = 1.14$$

$\mu$  = Akışkan viskozitesi

şekildedir. Fakat, bu ifade partikülün küresel şekilde ve akışkanın ise ideal gaz olması durumunda geçerlidir.

### Brownian Kuvveti

Mikronun altındaki partiküller için Brownian hareketi etkileri ilave kuvvetler teriminde yazılabilir. Brownian kuvvet bileşeni:

$$F_{bi} = \xi_i \sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}} \quad (3.49)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada;  $\xi_i$  birim varyans ve  $S_0$  ise:

$$S_0 = \frac{216\nu k_B T}{\pi^2 \rho d_p^5 \left(\frac{\rho_p}{\rho}\right)^2 C_c} \quad (3.50)$$

şeklinindedir. Burada; T akışkanın mutlak sıcaklığı,  $\nu$  kinematik viskozite ve  $k_B$  ise Boltzmann sabitidir. Brownian kuvvetleri her bir zaman adımında ayrı ayrı değerlendirilir ve bu kuvvetler laminar akışlar için ifade edilmiş kuvvetlerdir.

### Saffman's Kaldırma Kuvveti

Bu kuvvet, kayma oranı nedeniyle meydana gelmektedir. İlave kuvvetler kısmında ifade edilebilen bu kuvvet:

$$\vec{F} = \frac{2K\nu^{1/2} \rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk} d_{kl})^{1/4}} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (3.51)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;  $K=2.596$ ,  $d_{ij}$  deformasyon tensörüdür.

Yukarıdaki şekilde tanımlanan Saffman's kaldırma kuvveti mikronun altındaki partiküller ve laminar akışlar için geçerlidir.

### 3.4.2 Türbülanslı Akışta Stokastik Partikül İzleme Yöntemi

Türbülanslı akışta ortalama akışkan hızını ( $\bar{u}$ ) kullanarak partikül yörüngesi tahmin edilebilmektedir. Eşitlik 3.36'da değişken gaz akış hızının anlık değerleri ( $u = \bar{u} + u'_{(t)}$ ) yazılarak türbülans nedeniyle oluşan partiküllerin dağılımı tahmin edilir. Partikül dağılımının tahmini bir integrasyon zaman scalası (T) kullanılarak

yapılır. Bu zaman scalası partikül yörüngesi boyunca türbülans hareketinde harcanan zaman olarak tanımlanır. Ve bu scala:

$$T = \int_0^{\infty} \frac{u'_{p(t)} u'_{p(t+s)}}{u'^2_p} ds \quad (3.52)$$

şeklinde yazılabilir. Bir akışta çok fazla türbülans hareketi olduğunda integrasyon zamanı partikül dağılım oranı ile orantılıdır. Akışkan ile birlikte hareket eden küçük partiküller için partikül yayını  $\overline{u'_i u'_j} T$  şeklinde yazılabilir. Buradaki akışkan hareket zamanı Lagrangian hareket zamanı ( $T_L$ ) olarak ifade edildiğinde zaman scalasının yaklaşık değeri:

$$T_L = C_L \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.53)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;  $C_L$  türbülans modellerine göre 0.15-0.30 değerleri seçilebilen sabittir.

Partikül dağılımı üzerinde türbülansın rasgele etkileri, ayrık rasgele yürüme (DRW) yöntemiyle hesaplanır. Bu yöntemde, değişken hız bileşenleri zamanın ayrı ayrı sabit fonksiyonlarıdır. Onların rasgele değerleri, eddy'lerin karakteristik ömürleri olarak verilen zaman aralıkları üzerinde sabit kalmaktadır. Bariz olarak yayınının hakim olduğu ve heterojen bir yapı gösteren akışlarda küçük partiküllerin uniform olarak dağılması beklenir. Fakat bunun yerine DRW modeli, akışın düşük türbülans bölgelerinde partiküllerin konsantrasyonu için bir dağılım gösterir. Bu model, eddy ömrü modeli olarak da isimlendirilir ve akışkan türbülans eddy'leri ile partiküller arasındaki etkileşimleri simule eder. Her bir eddy:

- i.  $u', v', w'$  (Gaussian rasgele hız değişimi)
- ii.  $T_e$  (zaman scalası, eddy ömrü)

ile karakterize edilir.

$u' = \xi \sqrt{u'^2}$  ve diğer hız bileşenleri de aynı şekilde yazılabilir. Buradaki  $\xi$  değeri lokal gerilmedir. Eddy'nin ömür karakteristiği ise;

$$T_e = 2T_L \quad (3.54)$$

şeklinde yazılabilir. Partiküllerin Stokastik olarak izlenmesinde bir diğer yaklaşım ise partiküllerin kaydırılarak yörünge tayinidir. Bir noktanın daha iyi bir şekilde temsil edilmesini sağlamak amacıyla partiküllerin her biri kaydırılır. Burada bir kaydırma faktörü tanımlanır. Bu kaydırma faktörü başlangıç zaman adımının yüzde kontrolü şeklinde ifade edilir. Örneğin; kaydırma faktörü 0.5 ise püskürtülecek partiküller başlangıç zamanının yarısı kadar izlenecektir. Kaydırma faktörü 0.1 ise partiküller başlangıç zamanının % 90'ı kadar izlenecektir.

### 3.4.3 Türbülanslı Akışta Partikül Bulut İzleme Yöntemi

Türbülans değişimi yüzünden oluşan partikül dağılımı partikül bulut izleme yöntemi kullanılarak belirlenir. Ortalama yörünge çevresinde partiküllerin dağılımı istatistiksel yöntemler kullanılarak hesaplanır. Ortalama yörünge çevresinde partiküllerin konsantrasyonu bir Gaussian olasılık yoğunluğu değişimi(PDF) ile ifade edilebilir. PDF, türbülans değişimi neticesinde ortaya çıkan partikül dağılımının derecesi üzerinde kurulmuş bir varyanstır. PDF değeri akış alanında bir  $x_i$  noktasındaki bulutta  $t$  süresince bulunan partikülleri temsil eder. Ortalama partikül yoğunluğu ise partiküllerin toplam akış oranı( $\dot{m}$ ) ile elde edilebilir.

$$\langle n(x_i) \rangle = \dot{m}P(x_i, t) \quad (3.55)$$

Partikül pozisyonları için PDF değerleri çok değişkenli Gaussian formu olarak kabul edilirler.

Ortalama varyans  $\sigma_i^2$  olmak üzere;

$$P(x_i, t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \prod_{i=1}^3 \sigma_i} e^{-s/2} \quad (3.56)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada;

$$s = \sum_{i=1}^3 \left( \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3.57)$$

şeklindedir.

Ortalama PDF verilen bir zamanda buluttaki partiküllerin yerini temsil eder. Partiküllerin ortalama yeri ise partikül bulutları için tanımlanan hareket denklemlerinin ifade ettiği partikül hızının integrasyonu:

$$\mu_i(t) \equiv \langle x_i(t) \rangle = \int_0^t \langle V_i(t_1) \rangle dt_1 + \langle x_i(0) \rangle \quad (3.58)$$

ile hesaplanır.

Partikül bulutu yarıçapı ile PDF varyansı arasındaki ilişki:

$$\sigma_i^2(t) = 2 \int_0^{t_1} \langle u_{p,i}'^2(t_2) \rangle \int_0^{t_2} R_{p,ij}(t_2, t_1) dt_1 dt_2 \quad (3.59)$$

burada;  $u_{p,i}'^2$  ortalama hız değişkenleri ve  $R_{p,ij}(t_2, t_1)$  partikül hız düzeltme fonksiyonudur. Bu değer ise;

$$R_{p,ij}(t_2, t_1) = \frac{\langle u_{p,i}'(t_2) u_{p,j}'(t_1) \rangle}{[\langle u_{p,i}'^2(t_2) u_{p,j}'^2(t_2) \rangle]^{1/2}} \quad (3.60)$$

şeklinde yazılabilir.

$\tau = |t_2 - t_1|$  ve  $|t_4 - t_3| = |t_2 - t_1|$  tanımlanıp  $R_{p,ij}$  ifadesi:

$$R_{p,ij}(t_2, t_1) = R_{p,ij}(t_4, t_3) \quad (3.61)$$

şeklinde düzenlenirse, bu durumda varyans:

$$\sigma_i^2(t) = 2 \int_0^{t_1} \langle u_{p,i}'^2(t_2) \rangle \int_0^{t_2} R_{p,ij}(\tau) d\tau dt_2 \quad (3.62)$$

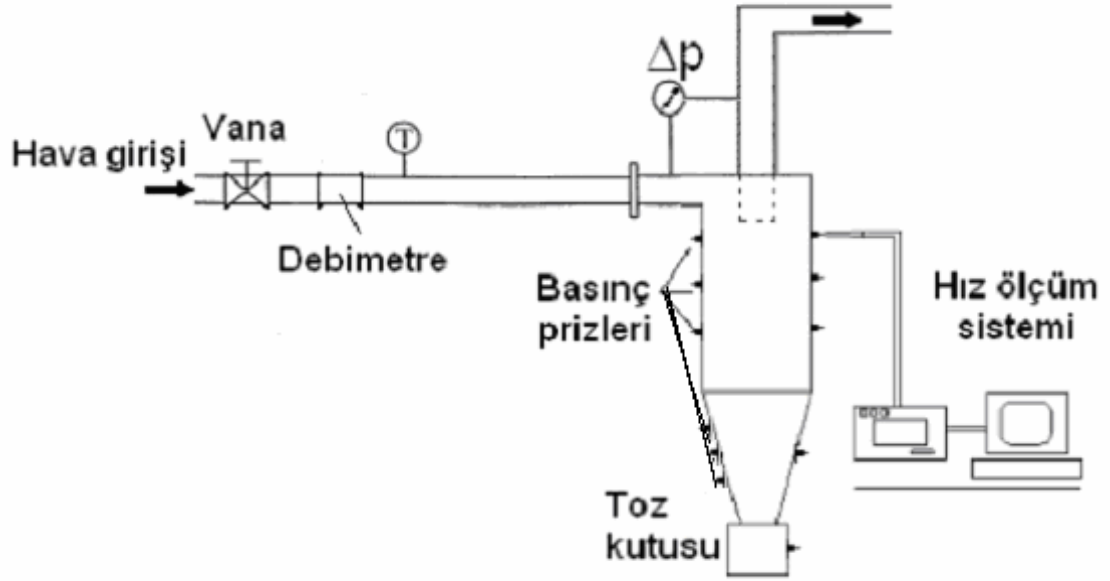
şeklinde yazılabilir.

Türbülanslı akışta partikül bulut izleme modeli geçici rejim çözümlerinde kullanılmamaktadır.

### 3.5 Deney Düzenegi

Geometrik oranları değiştirilebilen, fonksiyonel ve modüler yapıda bir siklon imal edilmiş ve deney sistemi kurulmuştur (Şekil 3.2). Akışın gözlemlenebilmesi için

siklon şeffaf plexiglastan modüler bir yapıda imal edilmiştir. Siklon çapı ( $D_1$ ) sabit olup değiştirilmesi düşünülen geometrik boyutlar, siklon boyu ( $h, H$ ), giriş kesiti ( $a$ ), çıkış çapı ( $D_2$ ) ve çıkış borusunun dalma uzunluğu ( $S$ ) dur. Deney sistemi mevcut vantilatör kullanılarak üfleme ve emme tarzda çalıştırılabilir. Şekil 3.2. Deney sistemi



Şekil 3.2. Deney sistemi

Temiz hava kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda siklondaki akış karakteristikleri ve girdap yapısı incelenmiştir. Bu amaçla siklon boyunca değişik kesitlerde hız ve statik basınç ölçülmüştür. Bu ölçümlerde mevcut pitot tüpü ve hassas basınç ölçer kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Pitot tüpünün yerleştirilmesi, şeritmetre, açölçer, pitot tüpü

Ayrıca siklondaki basınç düşümü de hassas diferansiyel bir manometre ile ölçülecektir.



Şekil 3.4. Kullanılan eğik manometreler

Deneyler değişik hava debilerinde ve siklon giriş hızlarında tekrarlanmıştır. Hava debisi bir debimetre ile ölçülmüştür.



Şekil 3.5. Kullanılan debimetre

Ölçümler, siklon çapına göre tanımlanan değişik boyut oranlarında tekrarlanmıştır. Hız ve basınç dağılımı ve yük kayıpları üzerinde, çıkış kesiti, çıkış borusu dalma uzunluğu ve çapı gibi değişik geometrik parametrelerin etkileri incelenmiştir.

Bu kapsamda özel olarak tasarlanmış ve yaptırılmış siklon kullanılmıştır.





Şekil 3.6. Deneysel çalışmada kullanılan özel olarak tasarlanmış siklon

Şekil 3.6'da gösterilen siklon üzerinde tüm geometrik ölçüler değiştirilebilmektedir. Siklonun değişik kesitlerinde hız ve basınç ölçümleri için delikler

açılmıştır. Siklonun silindirik kısmı değişik boyutlarda plexiglas malzemesinden yapılmıştır.

Deneylerin yukarıda belirtildiği şekilde tekrarlanması siklonun toz toplama kapasitesi hakkında da bilgi verecektir. Giriş hızının artması ile hızın teğetsel bileşeninin değeri yüksek olacağı için santrifüj kuvvetlerin artmasına neden olacaktır. Bu durumda, partikül toplama veriminin ve basınç kayıplarının arttığı ilgili literatür incelendiğinde karşımıza çıkmaktadır. Yine aynı şekilde, girdap yapısının da partikül toplama verimi üzerinde etkisi görülmektedir. Siklonun gerçek uzunluğunda farklı olarak giriş hızı, yüzey pürüzlülüğü gibi bir çok parametrenin üzerinde etkili olduğu ve doğal vorteks uzunluğu olarak ifade edilen uzunluğunda partikül toplama verimi ve basınç düşümü parametreleri üzerinde etkisinin olduğu bilinmektedir.

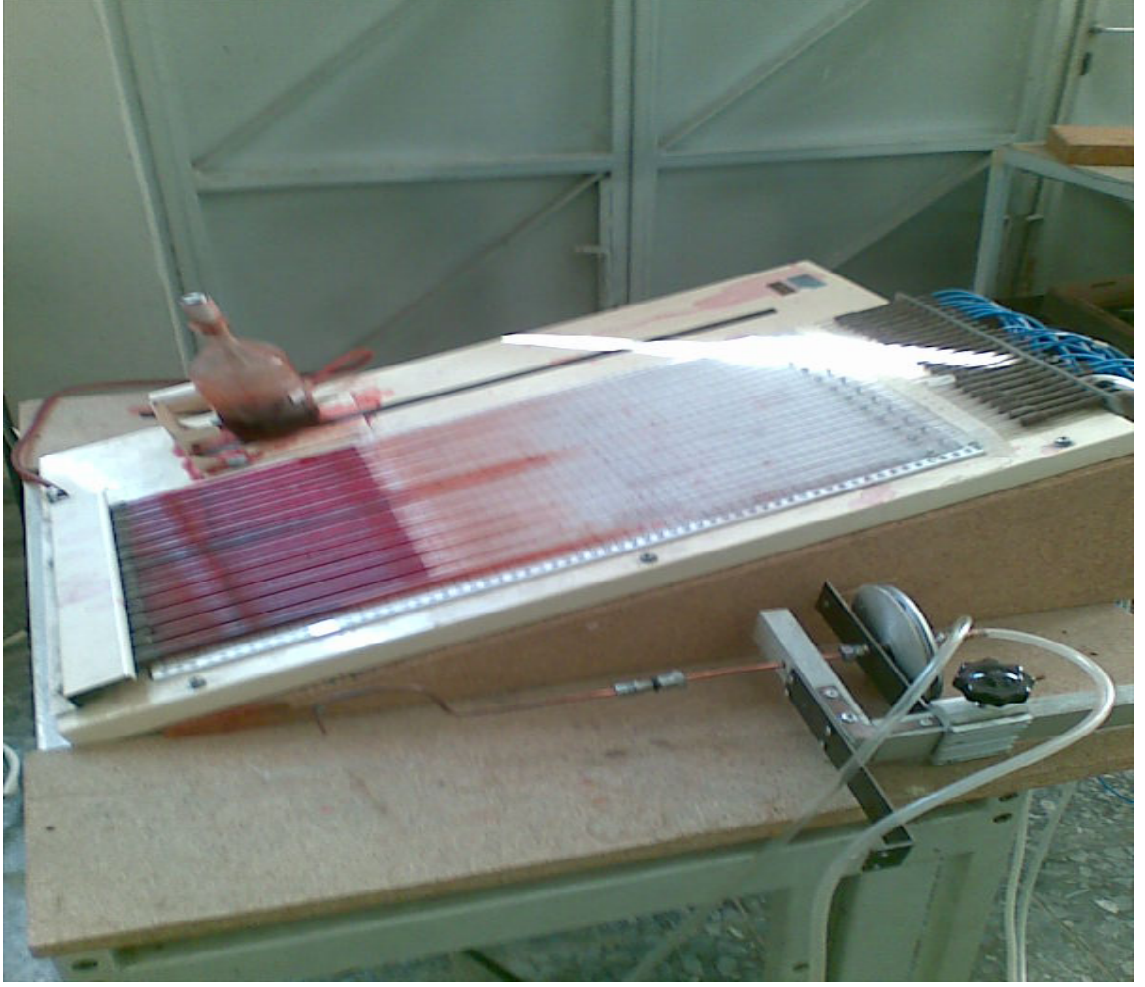
Siklon performansının iyileştirmesine yönelik yukarıda belirtilen deneylerin gerçekleştirilmesi ile akış karakteristiklerin ve girdap yapısının değişimi hakkında bilgi sağlanacaktır. Aynı zamanda bu karakteristiklerin incelenmesi ile siklon ayırıştırıcısının partikül toplama veriminin ne şekilde değişeceği de görülecektir.

### **3.5.1 Kalibrasyon**

Deneylerde kullanılan şekil 3.3’de verilen pitot tüpü ile şekil 3.5’de verilen debimetrenin kalibrasyonu yapılmıştır. Pitot tüpünü kalibre etmek için şekil 3.7’de verilen Makine Mühendisliği Laboratuar’ında mevcut bulunan rüzgar tüneli ve şekil 3.8’de kalibrasyon için eğik manometreye bağlanan pitot tüpü ve şekil 3.9’de gösterilen hassas hız ölçer kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Pitot tüpünün kalibrasyonu için kullanılan rüzgar tüneli



Şekil 3.8. Kalibrasyonu yapılan pitot tüpünün eğik manometre bağlantısı





Şekil 3.9. Kalibrasyonda kullanılan hassas hız ölçer

Şekil 3.7’de gösterilen rüzgar tüneli farklı hızlarda çalıştırılarak farklı kesitlerde pitot tüpü ve hassas hız ölçer ile hız ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar % 2 tolerans değeri ile benzerlik göstermektedir. Benzer şekilde, şekil 3.10’da gösterilen debimetrenin kalibrasyonu yapılmıştır.



Şekil 3.10. Kalibrasyonu yapılacak debimetre bağlantısı

Şekil 3.10’da gösterilen gibi debimetre boruya bağlanarak debimetreden okunan debi değerleri elde edilmiştir. Bu debi değerleri boru çapıyla ilişkilendirilerek (süreklilik denklemi) hız değerleri elde edilmiştir. Debimetrenin gösterdiği değer için şekilde gösterilen borunun açık olan kısmından farklı noktalarda hem pitot tüpü ile hem de hassas hız ölçer ile çok sayıda hız değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler yaklaşık % 2-3 tolerans değeri ile benzerlik göstermektedir.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve İRDELEME

### 4.1 Giriş

Bu bölümde girdaplı akışların geometrik ve çalışma parametreler altında incelenmesi amacıyla bu tür akışların meydana geldiği siklonlar ele alınmıştır. Siklonlar, akışın giriş yönüne göre teğetsel, aksenal ve yarı aksenal olarak tasarlanmışlardır. Teğetsel girişli siklonlarda akış siklona tamamen teğetsel yönde girmekte ve aksenal yönde sistemden ayrılmaktadır. Yarı aksenal girişli siklonlarda akış siklona belli bir açı ile girerken aksenal yönde sistemden ayrılmaktadır. Aksenal girişli siklonlarda ise akış siklona aksenal yönde girmekte ve yine aynı yönde sistemden ayrılmaktadır.

Girdaplı akışları inceleyebilmek için yapılan literatür araştırmasında bu siklon tasarımlarından teğetsel girişli siklonların daha uygun olduğu görülmüştür. Teğetsel girişli siklonlarda akış karakteristiklerinin ve partikül toplama verimlerinin tespiti için nümerik ve deneysel olarak çalışılmıştır.

Son zamanlarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ve hesaplamalı akışkanlar mekaniğinde geliştirilen yöntemler nümerik çözümlerin yoğunlaştırılması neden olmuştur. Hesaplamalı akışkanlar mekaniğinde (CFD) sonuçların doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için kullanılacak programlar ve bu programda müsaade edilen modifikasyonlar ve yöntemler çok önem taşımaktadır. Bu kapsam incelenen literatürde girdaplı akışlarda sonuçların tahmin edilmesinde en uygun paket programın CFD Fluent yazılımı olduğu işaret edilmektedir. Ancak bütün nümerik çözümlerde olduğu gibi sonuçların doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için nümerik tekniği iyi belirlemek gerekmektedir. Nümerik tekniği belirlemek için ise Bölüm 3.3'de verilen türbülans modelleri, duvar fonksiyonları ve şemaların iyi bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

Nümerik algoritmayı oluşturabilmek amacıyla literatürde (Gong-Wang, 2004) deneysel sonuçları verilen siklon için diferansiyel Reynolds Stress türbülans modeli (RSM), RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli ve Standart k- $\epsilon$  türbülans modelleri ile Standart ve Nonequilibrium duvar fonksiyonları değiştirilerek elde edilen sonuçlar ve oluşturulan model Bölüm 4.2.1'de verilmiştir (Kaya, Karagöz; 2007). Elde edilen türbülans

modelleri ve duvar fonksiyonları ile şemaların tespiti ise Bölüm 4.2.2’de verilmiştir (Kaya, Karagöz; 2008).

Bölüm 4.2.1 ve Bölüm 4.2.2’de tespit edilen en uygun nümerik algoritma oluşturularak çift fazlı (hava+Partikül) akışlar Bölüm 4.3’de çözülmüştür. Chuah ve Gimbin (2006), Hoffmann v.d. (2001)’de verilen deneysel sonuçlar kullanılmıştır. Burada, Bölüm 4.2’deki modellemelere ilave olarak partiküllerinde modellenmesi gerekir. Literatür dikkate alınarak Bölüm 3.4.1’de detaylı olarak verilen Ayrık Faz Modeli (DPM) partikül akışının modellenmesi için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Bölüm 4.3.1’de verilmiştir. Yine burada da nümerik teknik doğrulandıktan sonra siklonlarda girdap yapısı, akış karakteristikleri ve toplama verimi üzerinde etkisi olan toz giriş uzunluğu ve siklon boyunun etkileri incelenmiş ve Bölüm 4.3.1’de verilmiştir. Bölüm 4.3.1’de ifade edildiği gibi siklon performansı ve partikül toplama verimi üzerinde etkisi olan ancak literatürde eksik bırakılan toz giriş uzunluğu siklon boyu ile ilişkilendirilerek ve sonuçlar Bölüm 4.3.1’de verilmiştir.

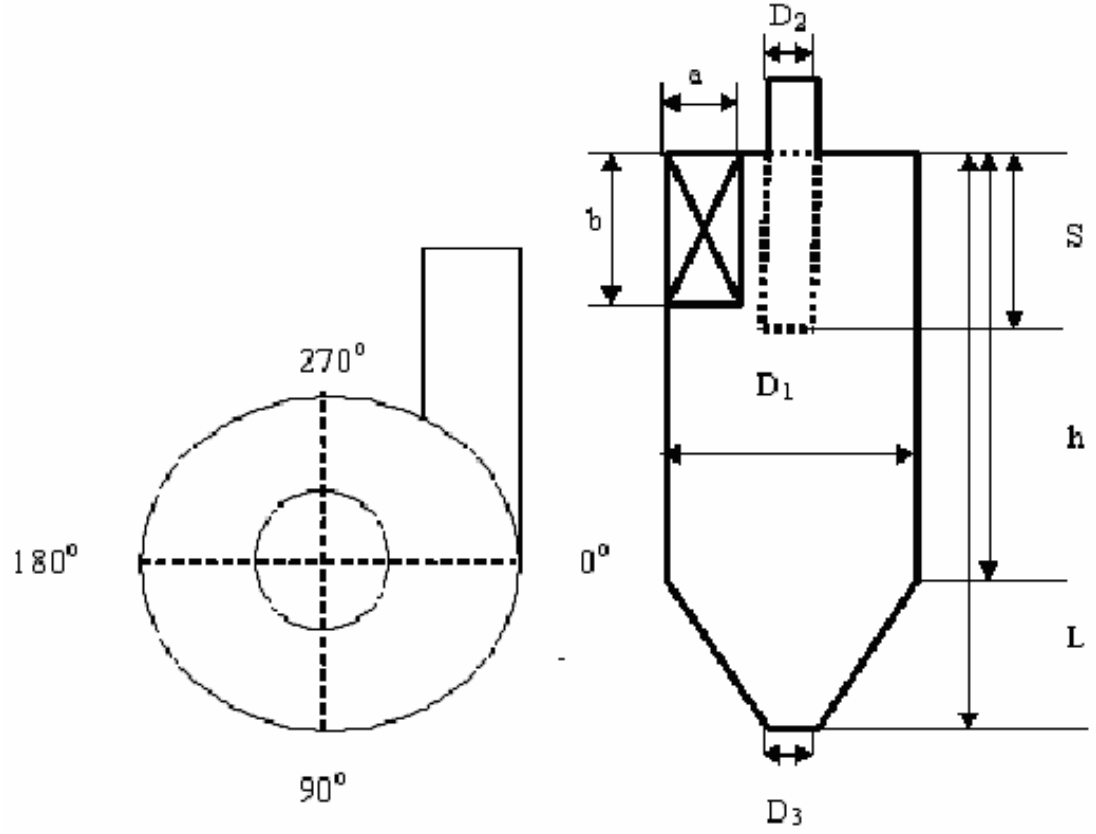
Girdaplı akışlarda etkili alan bir diğer parametre ise pürüzlülük etkisidir. Literatürde pürüzlülük etkilerinin akış karakteristikleri ve siklon partikül toplama verimi üzerinde etkisinin olduğu ifade edilmektedir. Ancak pürüzlülükle ilgili çalışmalar çok sınırlıdır. Bu çalışmaların çoğunluğunu da matematiksel modeller oluşturmaktadır. Bölüm 4.3.1’de nümerik tekniği doğrulanan siklon modeli pürüzlülük değerleri değiştirilerek farklı giriş hızları ve partikül çaplarında simule edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve siklon ayırıştırıcılarında müsaade edilebilecek maksimum yüzey pürüzlülük değerleri Bölüm 4.3.2’de verilmiştir.

Bölüm 3.5’de verilen özel olarak tasarlanmış siklonda girdaplı akışlar üzerinde etkili olduğu literatürde sınırlı çalışmalar ile kabul edilen ancak kapsamlı bir çalışma yapılmayan çıkış borusunun etkileri detaylı olarak Bölüm 4.4.2’de verilmiştir.

## **4.2 Tek Fazlı(hava) Akış Nümerik Sonuçları**

Siklondaki akış olayını nümerik olarak analiz edebilmek için Bölüm 3’de vurgulanan türbülans modeller, duvar fonksiyonları ve şemaların uygunluğunun araştırılmasıdır. Aynı zamanda, siklondaki akış ve çalışma parametrelerinden tek fazlı akış uygulamalarının müsaade ettiği önemli parametrelerde incelenmiştir.

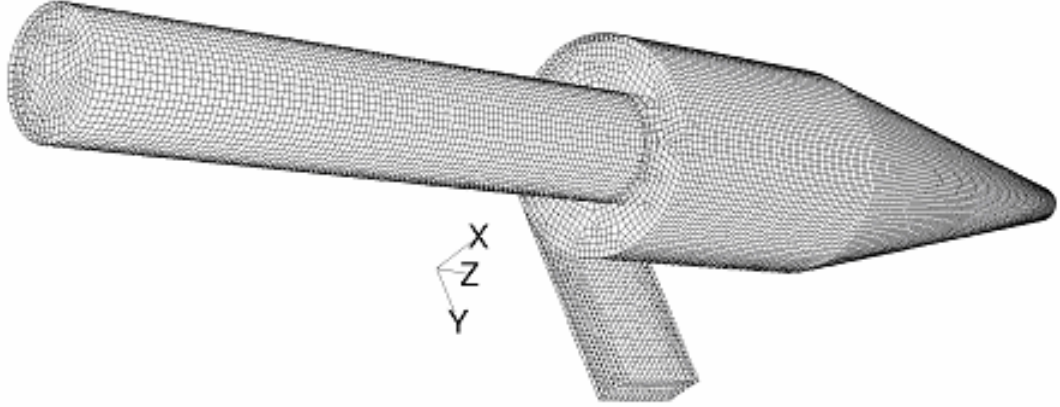




Şekil 4.1. Nümerik Çözüm için Kullanılan Siklon

Çizelge 4.1. Nümerik çalışmada kullanılan siklon boyutları

a	b	D <sub>2</sub>	S	h	L	D <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>
32	85	85	85	255	680	32	170



Şekil 4.2. Nümerik Çözümde Kullanılan Siklona ait Mesh Yapısı

Karşılaştırmalar ilgili literatür dikkate alınarak türbülans modeli için  $k-\epsilon$  ve reynolds stress türbülans modelleri, duvar fonksiyonu için standart ve nonequilibrium duvar fonksiyonları, basınç için standart, second order upwind ve presto, basınç-hız için simple ve simplec, momentum için second order upwind ve quick, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılım oranı için second order upwind ve quick, reynolds gerilmeleri için ise first ve second order upwind şemaları arasında yapılmıştır.

Türbülans modelleri, duvar fonksiyonları ve şemalar değiştirilerek yapılan nümerik çalışmalarda elde edilen sonuçlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

#### 4.2.1 Türbülans ve duvar fonksiyonlarının tespiti

Yukarıda verilen matematik model, Şekil 4.1'de görülen ve boyutları çizelge 4.1 de verilen teğetsel girişli bir siklon için nümerik olarak çözülmüştür. Bunun için siklon giriş kanalı tetra olmak üzere hekza gridlere bölünmüştür (Şekil 4.2). Oluşturulan bu kontrol hacimleri üzerinden integre edilerek cebirsel hale getirilmiş denklemlerin iteratif çözümünde Fluent CFD yazılımı kullanılmıştır. Hız-basınç ilişkisinde SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Grid yapısından bağımsız çözümler elde etmek için 170, 360 ve 450 bin grid ile testler yapılmış, 170 bin grid için analizler gerçekleştirilmiştir. Özellikle RSM modeli ile yapılan çözümlerde yakınsama problemleri ortaya çıkmıştır. Akışın kararsızlık durumlarında zamana bağımlı olma karakteri nedeniyle, bu

problemlerin üstesinden gelmek üzere çözüm zamana bağlı olarak başlatılarak yakınsama sağlanmıştır.

Sınır şartları olarak girişte sabit ve üniform hız kabul edilmiş ve  $V_0 = 14.8$  m/s alınmıştır. Girişte türbülans şiddeti  $I = 0.10$  kabul edilmiştir. Buna göre giriş kesitindeki diğer değişkenler aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned} k &= 3(V_0 I)^2 / 2 \\ \varepsilon &= C_\mu^{3/4} k^{3/2} / D_h \\ \overline{u'_i u'_j} &= 0 \\ \overline{u_i'^2} &= 2k/3 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Çıkış kesitinde debi sınır şartı olarak kullanılmıştır. Yani bu kesitte kütle dengesi sağlanacak şekilde tüm akış değişkenlerine ait difüzyon akıları sıfır alınmıştır. Bu sınır şartında çıkış değişkenleri akış alanından ekstrapolasyonla elde edilmekte ve iç akış etkilenmemektedir. Tüm cidarlarda ise hız sıfır alınmıştır.

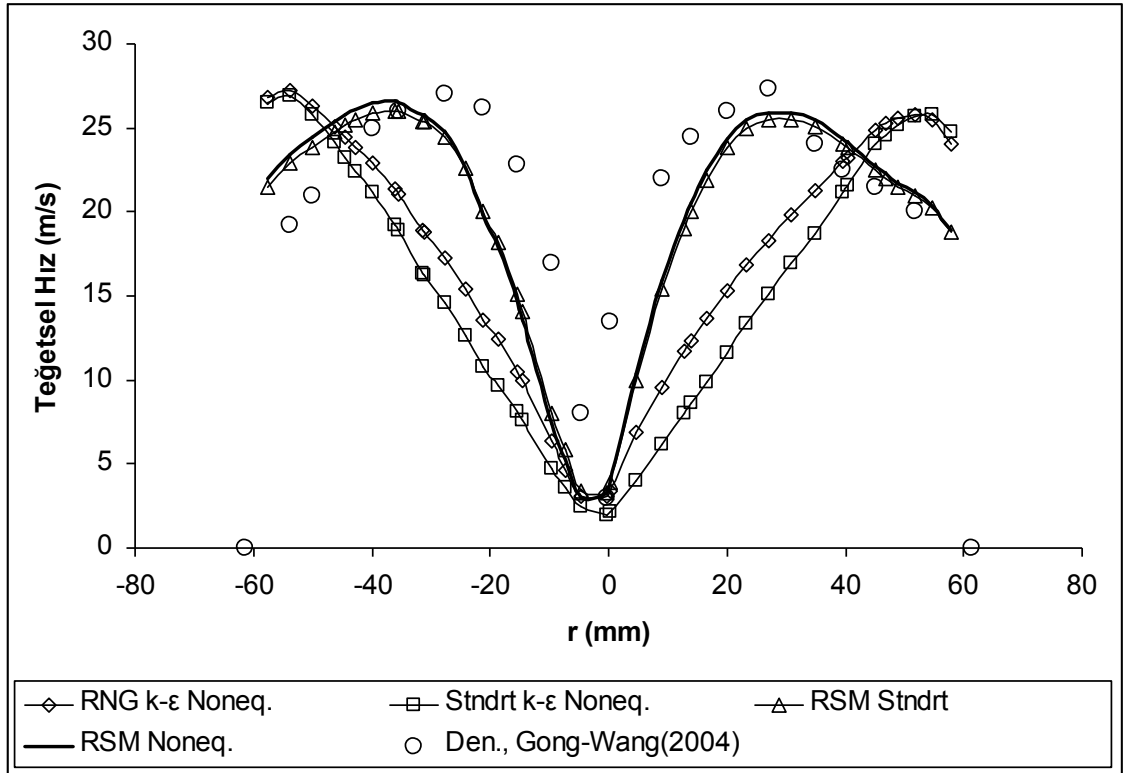
#### 4.2.1.1. Sonuçlar ve analiz

Teğetsel girişli ve ters akışlı bir siklondaki girdaplı hava hareketine ait matematik model Fluent CFD yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Tüm çözümlerde giriş hızı 14.8 m/s alınmış denklemler 170000 mesh sayısında çözümlenerek literatürdeki deneysel ve nümerik sonuçlar (Gong ve Wang, 2004) ile karşılaştırılmıştır. Her çözüm için  $10^{-6}$  mertebesinde bir yakınsama ile sonuçlar elde edilmiştir. Çözümler P4 2.8 GHz 1 GB ram bellek olan bilgisayarda gerçekleştirilmiş, yakınsama için iterasyon başına harcanan CPU süreleri çizelge 4.2'de verilmiştir. Görüldüğü gibi RSM modelinde standart duvar fonksiyonu kullanıldığında süre bir miktar daha kısa olmaktadır. RNG modelinde harcanan süre RSM ye göre beklendiği kadar düşük çıkmamıştır. Bunun nedeni yakınsamanın çok yavaş olmasıdır.

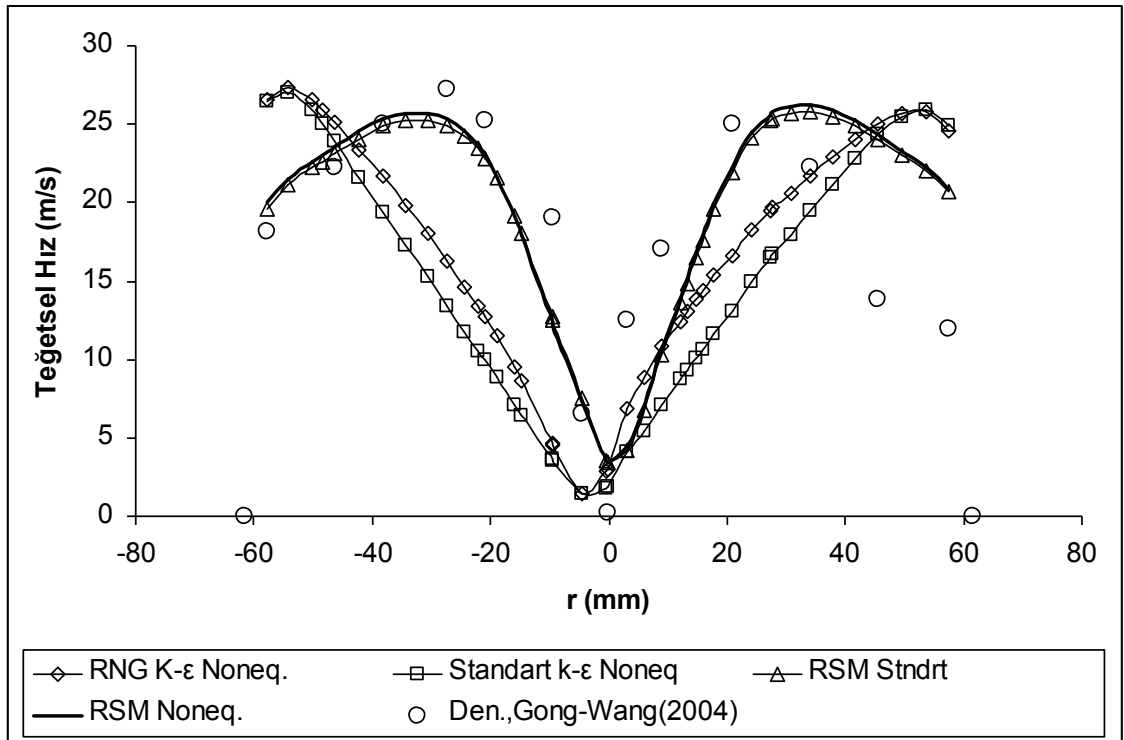
Çizelge 4.2. İterasyon başına CPU süreleri (s)

RSM modeli ve standart duvar fonksiyonu	4.52
RSM modeli ve nonequilibrium duvar fonksiyonu	4.54
RNG k-ε modeli ve nonequilibrium duvar fonksiyonu	4.50
Standart k-ε modeli ve nonequilibrium duvar fonksiyonu	3.80

Siklonun konik kısmında ( $z= 0.4$  m) farklı türbülans modelleri ve duvar fonksiyonları ile elde edilmiş teğetsel hız profilleri Şekil 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Görüldüğü gibi bu kesitteki teğetsel hız giriş hızının yaklaşık 2 katına çıkmakta ve bu durum her nümerik çözümde elde edilebilmektedir. Maksimum teğetsel hızlar için nümerik çözüm ile deneysel değerler arasındaki fark yaklaşık %10 olmaktadır. Ancak maksimum teğetsel hızın oluştuğu konuma bakıldığında nümerik çözümler arasında oldukça bariz farklar olduğu görülmektedir. Siklondaki akışın, deneysel sonuçların da gösterdiği bileşik vorteks yapısını en iyi modelleyen RSM türbülans modeli olduğu görülmektedir. Standart k-ε türbülans modeli aşırı türbülans viskozitesi ve dissipasyon oranı üretmesi nedeniyle cebri vorteks hareketine yakın bir teğetsel hız dağılımına yol açmaktadır. RNG k-ε türbülans modeli girdaplı akışlar için geliştirilmesine rağmen siklondaki teğetsel hızın elde edilmesinde Standart k-ε türbülans modeline yakın davranmaktadır. Tüm türbülans modelleri simetrik olmayan bir akışı göstermektedir. Duvar fonksiyonları açısından bakıldığında nümerik sonuçlar arasında önemli bir fark ortaya çıkmamaktadır. Ancak nonequilibrium duvar fonksiyonu deneysel sonuçlara az da olsa daha yakın bir dağılım verdiği görülmektedir.

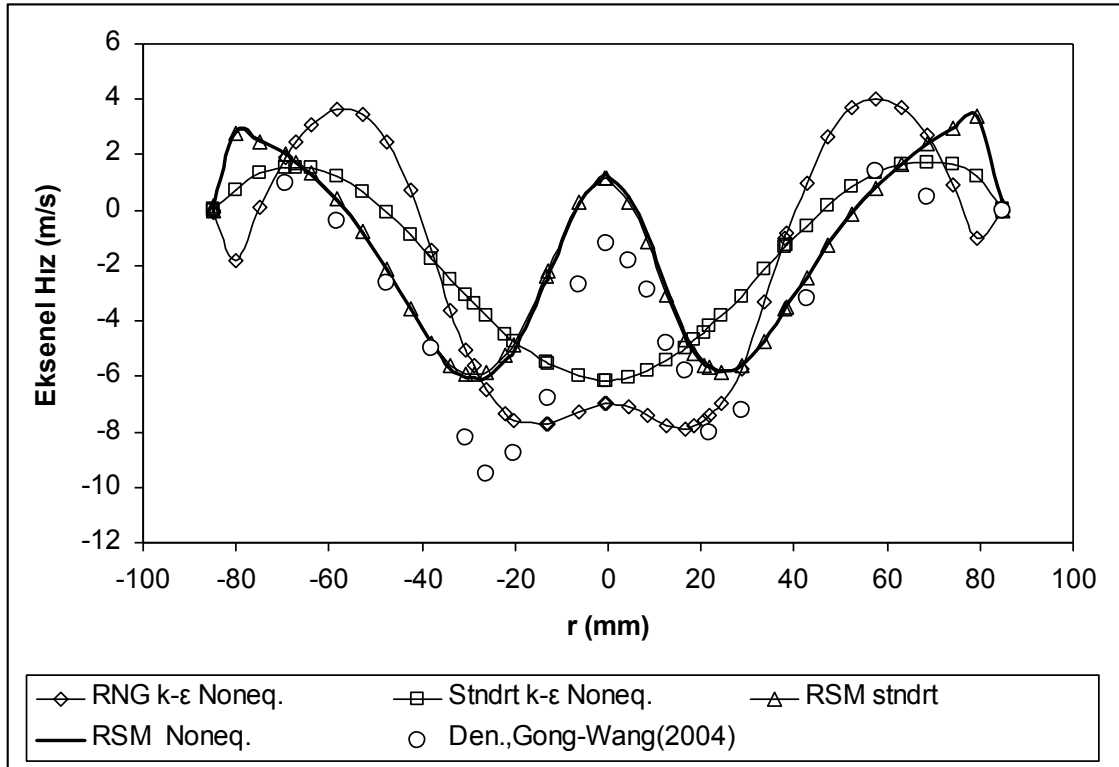


Şekil 4.3.  $z=0.4$  m,  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ 'deki teğetsel hızın nümerik ve deneysel değerleri

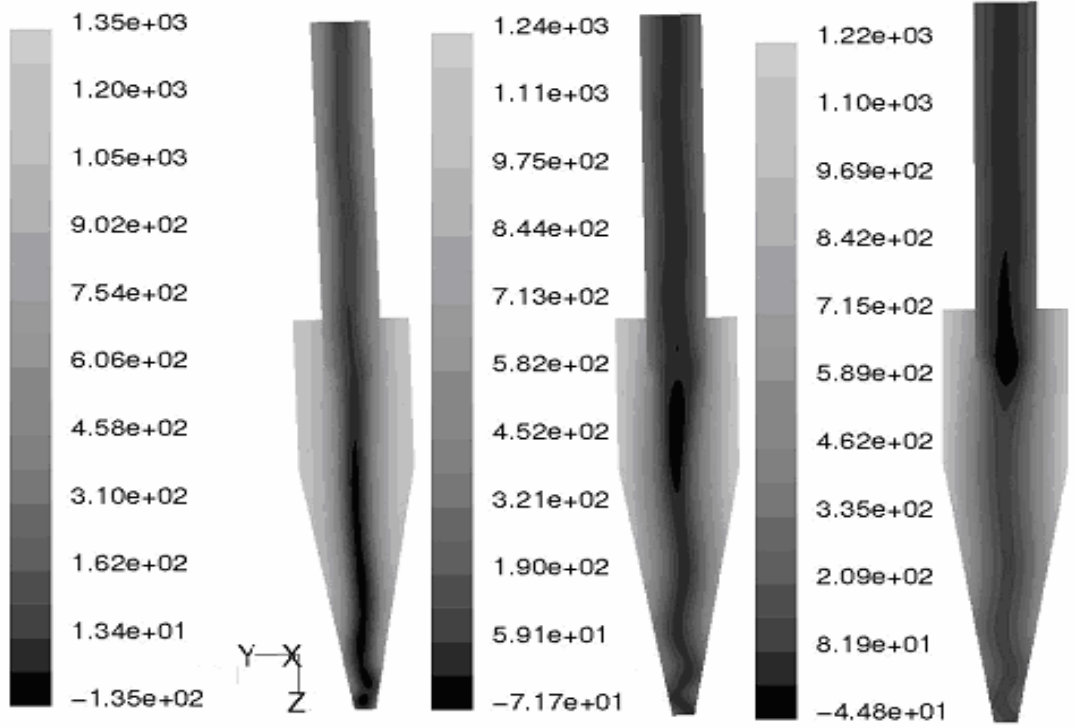


Şekil 4.4.  $z=0.4$  m,  $90^{\circ}$ - $270^{\circ}$ 'deki teğetsel hızın nümerik ve deneysel değerleri

Şekil 4.5’de siklonun silindirik kısmında ( $z=0.15$  m) aksenal hız profillerinin bir mukayesesini göstermektedir. Türbülans modelleri arasındaki belirgin farklar burada da görülmektedir. Cidara yakın bölge olan dış girdap bölgesinde deneysel sonuçlara en yakın profiller sırası ile RSM, Standart k- $\epsilon$  ve RNG k- $\epsilon$  türbülans modelleri ile elde edilmiştir. İç bölgede ise deneysel sonuçların ortaya koyduğu aksenal hız profili merkezindeki çökme ancak RSM modelinde elde edilmiştir. RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli merkezde küçük bir çökme göstermesine rağmen deneysel değerlerden fark büyük olmaktadır. Standart k- $\epsilon$  modeli ise bu bölgede gerçekçi olmayan bir hız profili vermektedir. RSM modeli aksenal hızın genel yapısını doğru ortaya koymuştur, ancak deneysel veriler merkezde sıfıra yakın bir aksenal hız verirken RSM modeli düşük bir pozitif hız yani yukarı doğru bir hız vermiştir. Yine RSM modeli iç ve dış girdap kalınlıklarını maksimum %5 hatayla doğru olarak vermektedir. İç girdap yarıçapı bu kesitte yaklaşık 55 mm olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5.  $z=0.15$  m,  $90^{\circ}$ - $270^{\circ}$  deki aksenal hızın nümerik ve deneysel değerleri



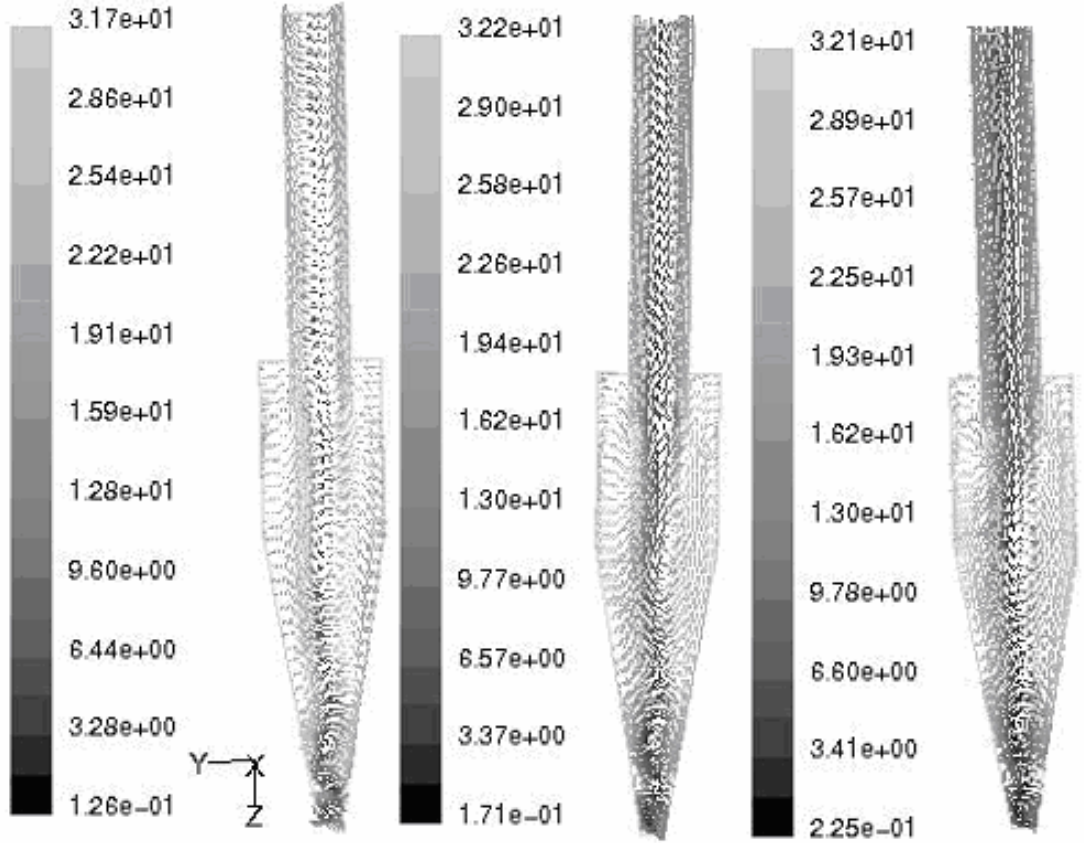
Şekil 4.6. RSM, RNG k-ε, Standart k-ε türbülans modellerinin nonequilibrium duvar fonksiyonu kullanılarak elde edilen y-z düzlemindeki statik basınç konturları

Siklonun merkez düzlemindeki statik basınç konturları Şekil 4.6'da verilmiştir. Görüldüğü gibi siklon içerisindeki girdaplı akışın yarattığı santrifüj kuvvetler nedeniyle her üç türbülans modelinde cidara yakın bölgede yüksek, merkezde ise düşük basınç bölgesi oluşmaktadır. RSM modeli ile elde edilen çözümde merkezdeki vakum basıncı daha düşük ve ince olmakta, girdap ucu koni ucuna yakın bölgede yan duvara değmektedir. RNG k-ε türbülans modelinde ise düşük basınç bölgesi daha geniş olup girdap merkezi spiral bir şekilde gelip koni tabanında son bulmaktadır. Standart k-ε modelinde ise esas düşük basınç bölgesi çıkış borusu başlangıcında olduğu iç girdap merkezinde ise vakum basıncı oluşmadığı görülmektedir.

Elde edilen basınç düşümü değerlerinin literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Gong ve Wang (2004) yaptıkları çalışmada basınç düşümünü deneysel olarak 1465.2 Pa ölçerken nümerik çalışmalarında 1340 Pa elde etmişlerdir. Şimdiki çalışmada ise farklı modellerle elde edilen değerler şöyledir:

RSM Nonequilibrium duvar fonksiyonu	1350 Pa
RSM Standart duvar fonksiyonu	1300 Pa
RNG k-ε Nonequilibrium duvar fonksiyonu	1240 Pa
Standart k-ε Nonequilibrium duvar fonksiyonu	1220 Pa

Görüldüğü gibi basınç düşümünü en iyi tahmin eden model %8 bir farkla nonequilibrium duvar fonksiyonu kullanan RSM modeli olmuştur.

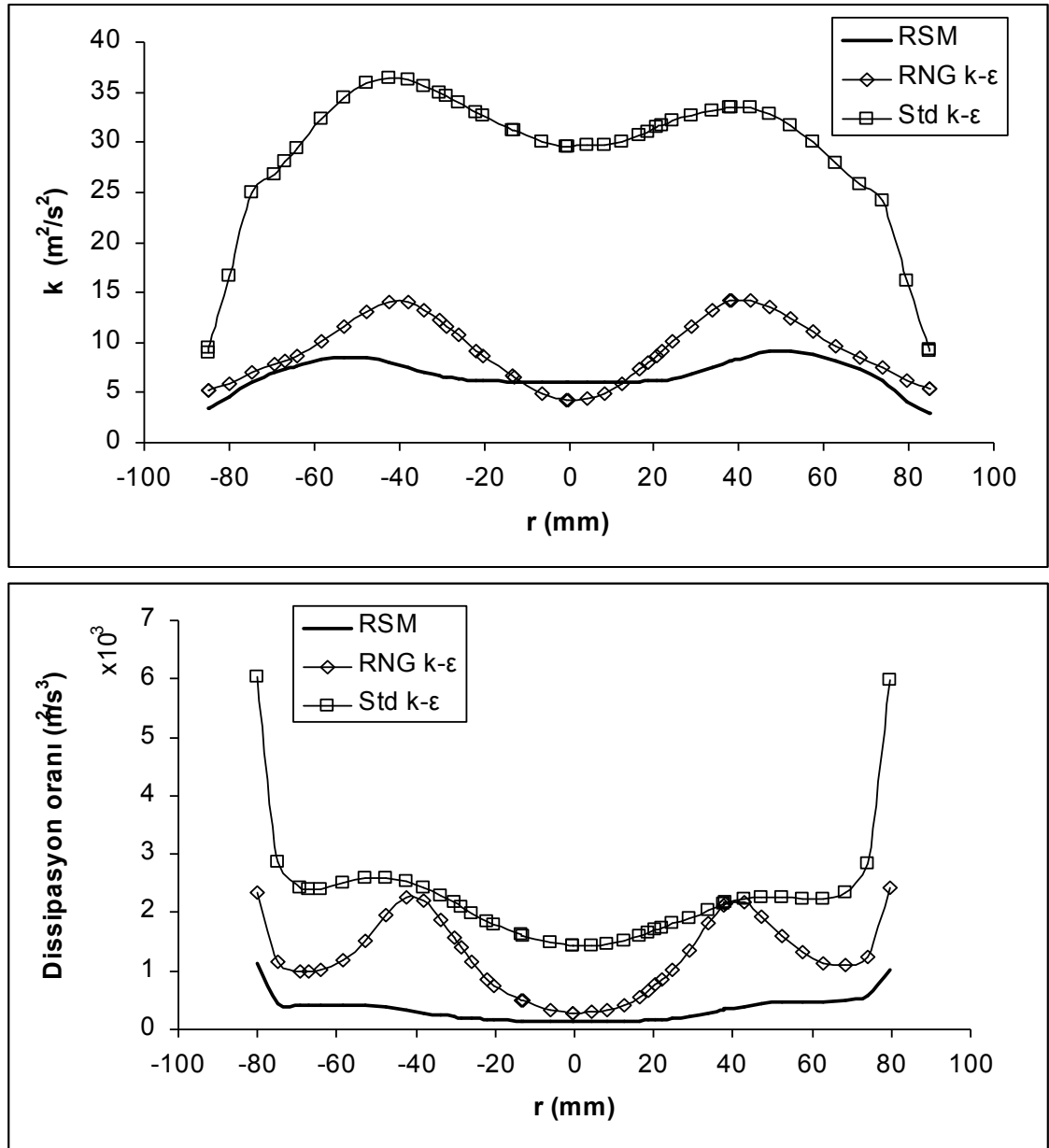


Şekil 4.7. RSM, RNG k-ε, Standart k-ε türbülans modellerinin nonequilibrium duvar fonksiyonu kullanılarak elde edilen y-z düzlemindeki vektörel hız büyüklükleri

Düşey y-z düzlemindeki, her üç türbülans modeliyle elde edilmiş, hız vektörleri ise Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.8’de  $z = 0.15$  m deki yarıçap boyunca üç farklı türbülans modeli ile elde edilen türbülans kinetik enerjisi ve dissipasyon oranı değişimlerini göstermektedir. Burada özellikle Standart  $k-\epsilon$  modeli ile elde edilen aşırı yüksek türbülans kinetik enerjisi ve cidara yakın yüksek değerlere ulaşan dissipasyon oranı görülmektedir. Profillerdeki değişimler davranış itibariyle benzer olmakla beraber RNG  $k-\epsilon$  modelinde daha bariz olmaktadır.



Şekil 4.8. Farklı türbülans modelleriyle elde edilmiş türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve dissipasyon oranı ( $\epsilon$ ) değişimleri ( $z = 150$  mm)

#### 4.2.1.2. Değerlendirme

Son yıllarda akış ve ısı transferi problemlerinin analizinde CFD teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Nümerik çözümlerde farklı türbülans modelleri ve duvar fonksiyonları geliştirilmiştir. Basit akışlarda çoğu türbülans modeli tatminkar sonuç verebilmektedir. Ancak karmaşık akışlarda, bu modellerden incelenen probleme uygun olanlarının kullanılması hesaplama sonuçlarının güvenilirliği açısından son derece önemlidir.

Bu çalışmada, girdaplı ve oldukça karmaşık bir akışın olduğu teğetsel girişli ve ters akışlı bir siklonda kullanılacak türbülans modelleri ve duvar fonksiyonlarının belirlenmesi konusu ele alınmıştır.

Belli bir giriş hızında değişik türbülans modelleri ile akışa ait korunum denklemleri çözülmüş elde edilen aksel ve teğetsel hız profilleri ile basınç düşümü değerleri literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Bu karşılaştırmalara göre RSM türbülans modelinin girdaplı akışlar için en uygun türbülans modeli olduğu, standart k- $\epsilon$  türbülans modelinin ise akışın bu şekli için uygun olmadığı görülmektedir. Standart k- $\epsilon$  türbülans modelinde türbülans viskozitesinin aşırı yüksek hesaplanması ve izotropik türbülans esasına dayanması gerçekçi olmayan hız dağılımlarının elde edilmesine yol açmaktadır.

RSM modelinde, basınç düşümü parametresi ilave edildiğinde, nonequilibrium duvar fonksiyonunun standart duvar fonksiyonuna göre daha uygun sonuçlar verdiği, elde edilen nümerik sonuçların deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında anlaşılmaktadır.

Standart k- $\epsilon$  türbülans modelinden farklı olarak RNG k- $\epsilon$  modelinin dönme olayını içermesi ve ilave terimler kullanmasına rağmen verdiği sonuçlar yeterli hassasiyette olmadığı görülmüştür.

#### 4.2.2 Şemaların tespiti

Teğetsel girişli siklonlarda literatürde kabul gördüğü ve Bölüm 4.2.1'de doğrulandığı şekilde RSM türbülans modeli ve nonequilibrium duvar fonksiyonu altında çözümde kullanılan şemalar değiştirilerek modellenmiştir. Bu model CFD Fluent yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Giriş hızları 14.8 m/s olan siklonlar 170000 mesh

sayılarında çözümlenerek literatürdeki deneysel sonuçlar (Gong ve Wang, 2004) ile karşılaştırılmışlardır.

Her çözüm için, herhangi bir değişkenin izafi hatası  $10^{-6}$  mertebesinde yakınsama şartını sağlayacak şekilde çözümler elde edilmiştir. Nümerik çözümde kullanılan şema ve algoritmalar Çizelge 4.3’de verilmiştir. Bu yöntemlerle elde edilen basınç düşümü değerleri Çizelge 4.4’de deneysel sonuçlar ile beraber verilmiştir.

Çizelge 4.3. Nümerik çözümde kullanılan yöntemler

	Nümerik Çözüm2 (ns2)	Nümerik Çözüm4 (ns4)	Nümerik Çözüm5 (ns5)	Nümerik Çözüm6 (ns6)	Nümerik Çözüm8 (ns8)
Basınç	Presto	Presto	Presto	Presto	İkinci mertebe
Basınç-Hız İlişkisi	Simple	Simplec	Simplec	Simplec	Simple
Momentum	İkinci mertebe	Quick	İkinci mertebe	Quick	İkinci mertebe
Türbülans Kinetik Enerjisi	İkinci mertebe	İkinci mertebe	İkinci mertebe	Quick	İkinci mertebe
Türbülans Dağılım Oranı	İkinci mertebe	İkinci mertebe	İkinci mertebe	Quick	İkinci mertebe
Reynolds Gerilmeleri	Birinci mertebe	Birinci mertebe	Birinci mertebe	Birinci mertebe	Birinci mertebe

Çizelge 4.4. 14.8 m/s giriş hızında elde edilen basınç düşümü değerleri (Pa)

ns2	ns4	ns5	ns6	ns8	Deneysel [10]
1301	1407	1359	1393	890	1465.2

#### 4.2.2.1 Basınç hesabındaki yöntemlerin karşılaştırılması

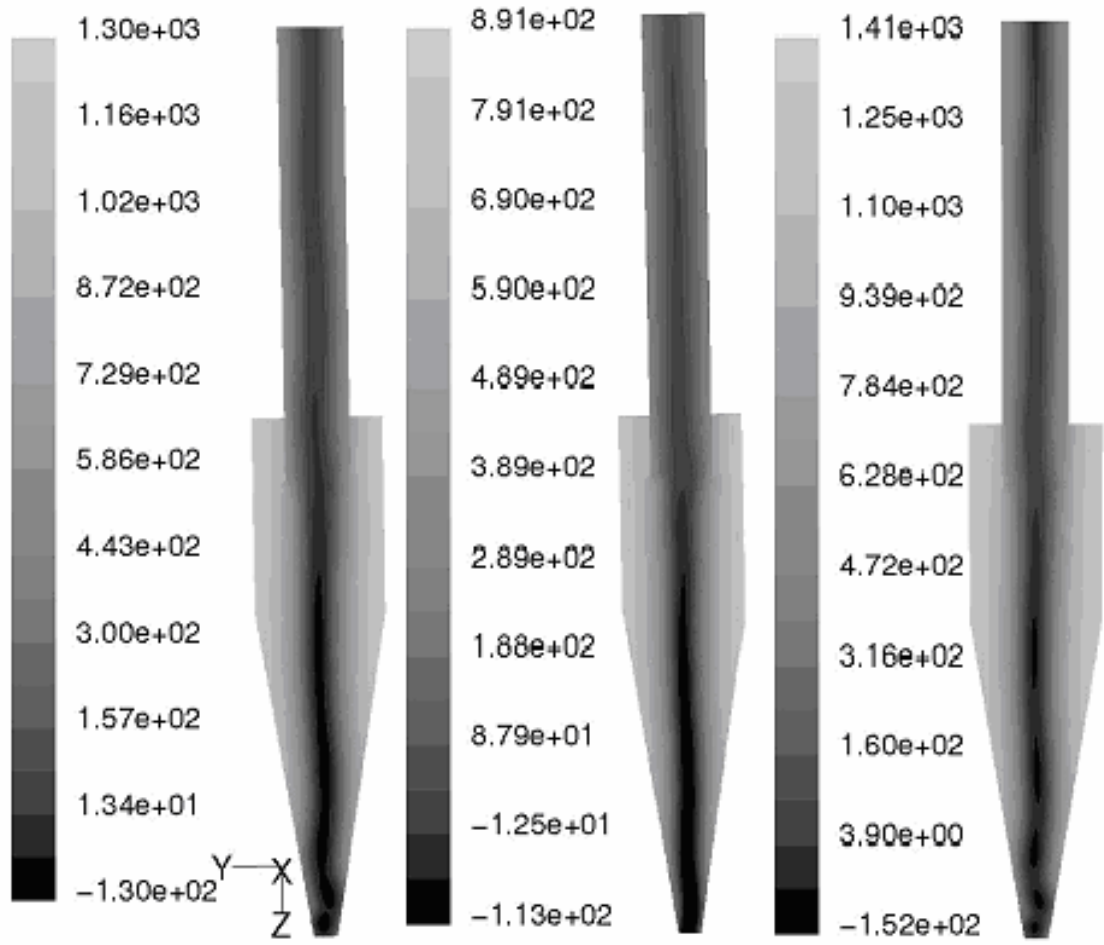
Çizelge 4.3’de verilenler ışığında, elde edilen nümerik sonuçlardan da anlaşıldığı üzere basınç parametresinin çözümünde kullanılan Presto algoritması siklondaki akışın girdaplı akış olmasından dolayı daha doğru sonuçlar vermektedir. İç içe girdap yapısı ve yüksek basınç gradyanları, basıncın hassas bir şekilde hesaplanmasını gerektirdiği görülmektedir. Bu açıdan Presto algoritması başarılı olmaktadır.

Basınç parametresinde Presto kullanılıp diğer parametreler için yüksek mertebeden yöntemlerinin kullanılması ile teğetsel ve aksenal hız parametrelerinin de gerçek sonuçlara yaklaştırdığını söyleyebiliriz. Presto algoritmasının kullanıldığı alternatifler arasında en iyi sonucu ns4 vermektedir. ns4 çözümünde basınç-hız arasındaki ilişki için Simplec algoritması, momentum denkleminin çözümünde Quick ise şeması kullanılmıştır. Siklon düşey kesit düzleminde değişik yöntemlerle elde edilen basınç konturları Şekil 4.9'de sunulmuştur.

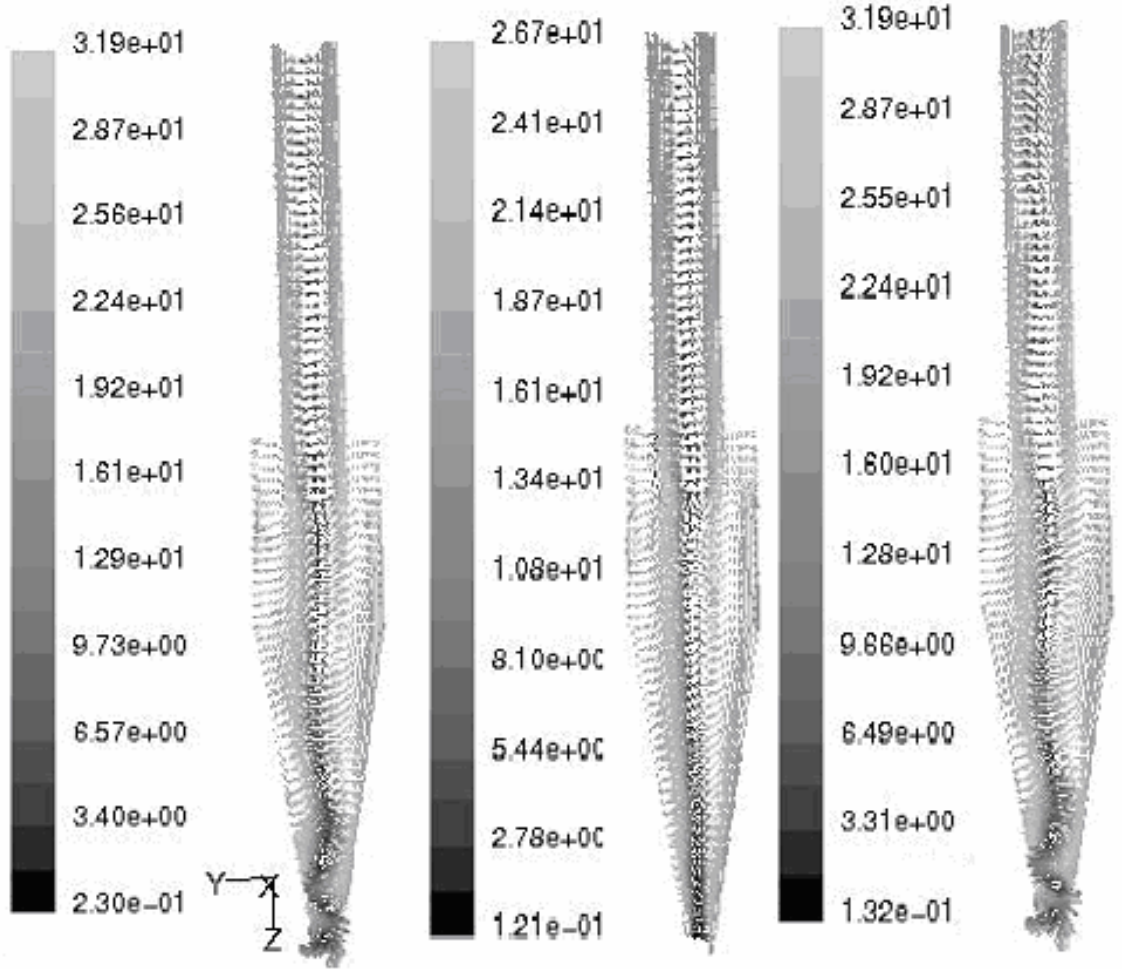
Basınç büyüklükleri yanında iç girdap merkezindeki düşük basınç bölgesinin şekli açısından ns8 diğerlerinden özellikle koni ucu bölgesinde farklı olduğu görülmektedir.

#### **4.2.2.2 Hız alanlarının karşılaştırılması**

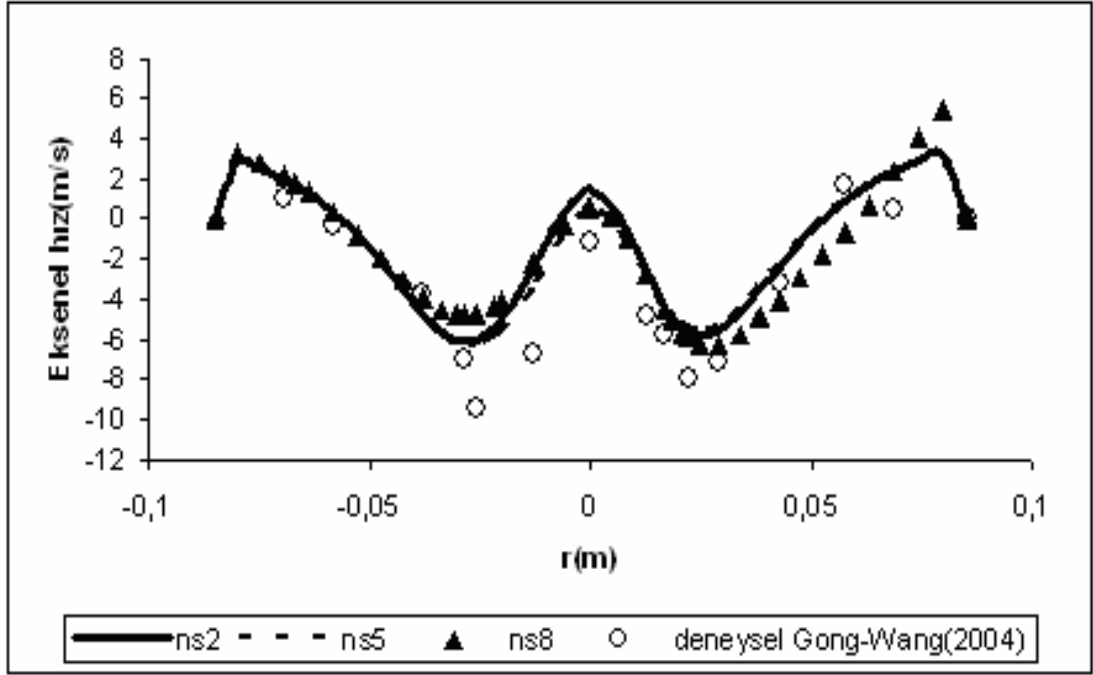
Kullanılan yöntemlerle elde edilen hız alanları da incelenmiştir. Bu çözümlere ait üç örnek olarak, siklon düşey kesit düzlemindeki hız vektörleri Şekil 4.10'de verilmiştir.



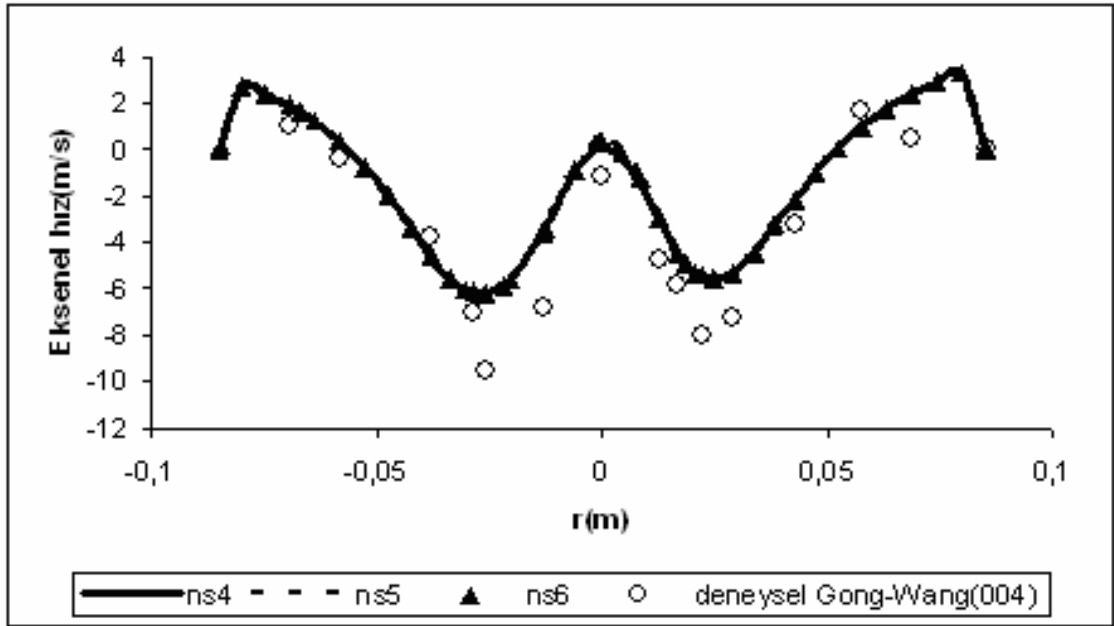
Şekil 4.9. ns2, ns8 ve ns4 şemaları kullanılarak elde edilen z-düzlemindeki statik basınç konturları



Şekil 4.10 ns2, ns8 ve ns4 şemaları kullanılarak elde edilen z-düzlemindeki vektörel hız büyüklükleri



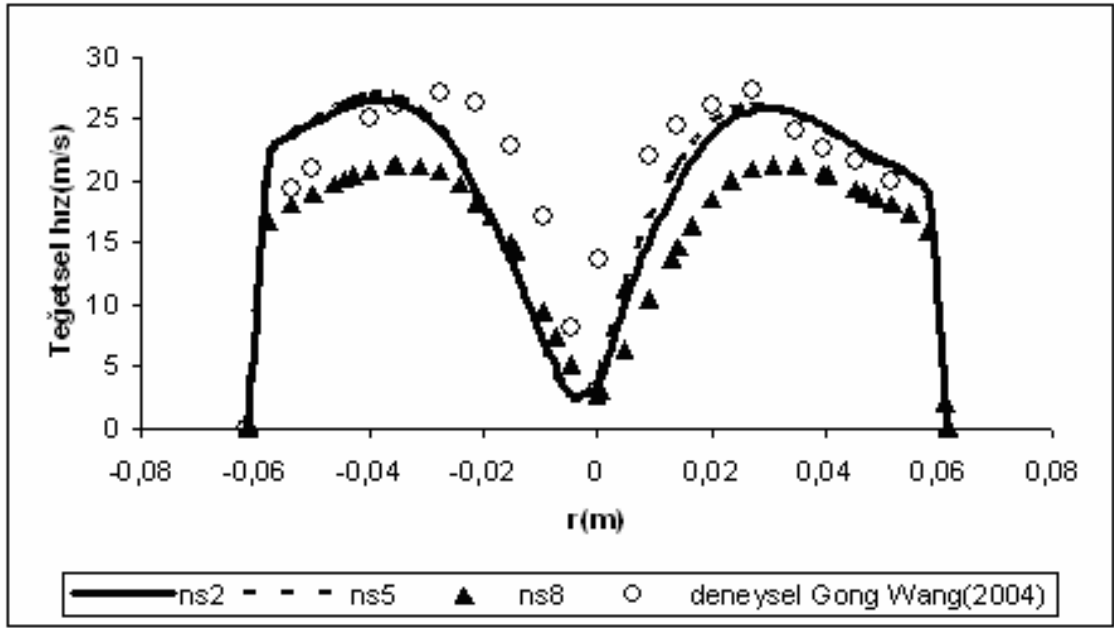
Şekil 4.11.  $z=0.15$  m,  $90^{\circ}$ - $270^{\circ}$ 'deki aksel hızın ns2, ns5, ns8 ve deneysel değerleri



Şekil 4.12.  $z=0.15$  m,  $90^{\circ}$ - $270^{\circ}$ 'deki aksel hızın ns4, ns5, ns6 ve deneysel değerleri

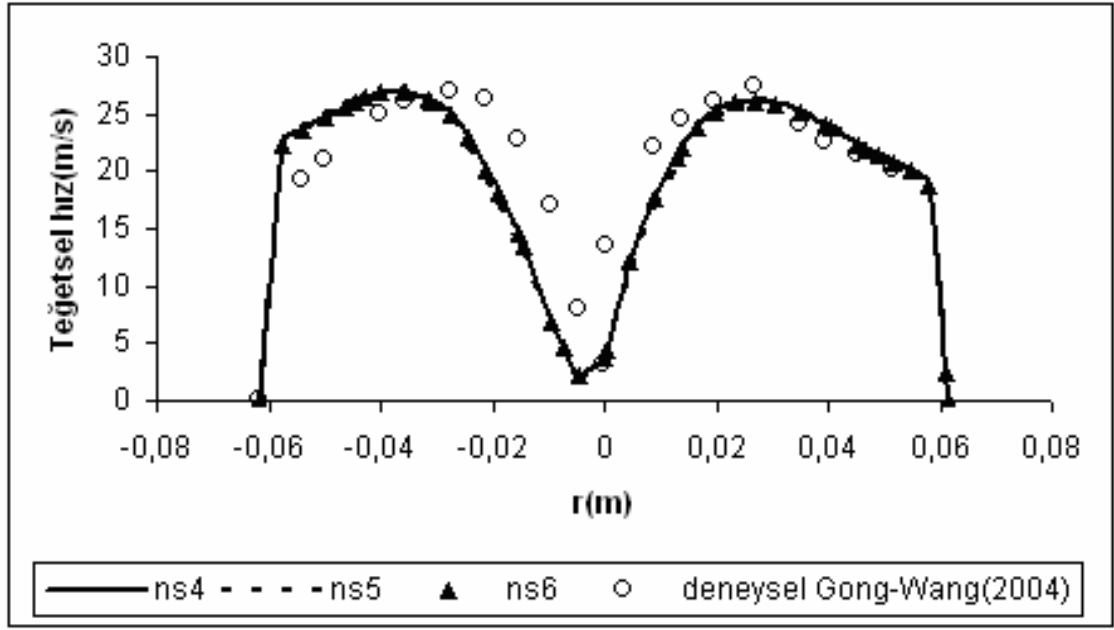
Burada da Şekil 4.10'dakine benzer olarak, ns8 özellikle konik kısımda diğerlerinden farklı bir hız alanı ortaya koymaktadır. ns8 nispeten düzgün bir hız alanı

gösterirken, ns2 ve ns4 çözümleri, spiral bir iç girdap, koni ucuna doğru ivmelenme neticesi hız büyüklüklerinin arttığı karmaşık bir yapı ortaya koymaktadır. Dolayısıyla Presto yönteminin daha gerçekçi bir basınç hesabı ve buna bağlı olarak daha doğru bir hız alanı verdiği söylenebilir. Deneysel verilerle yapılan karşılaştırmalar da bunu doğrulamaktadır.



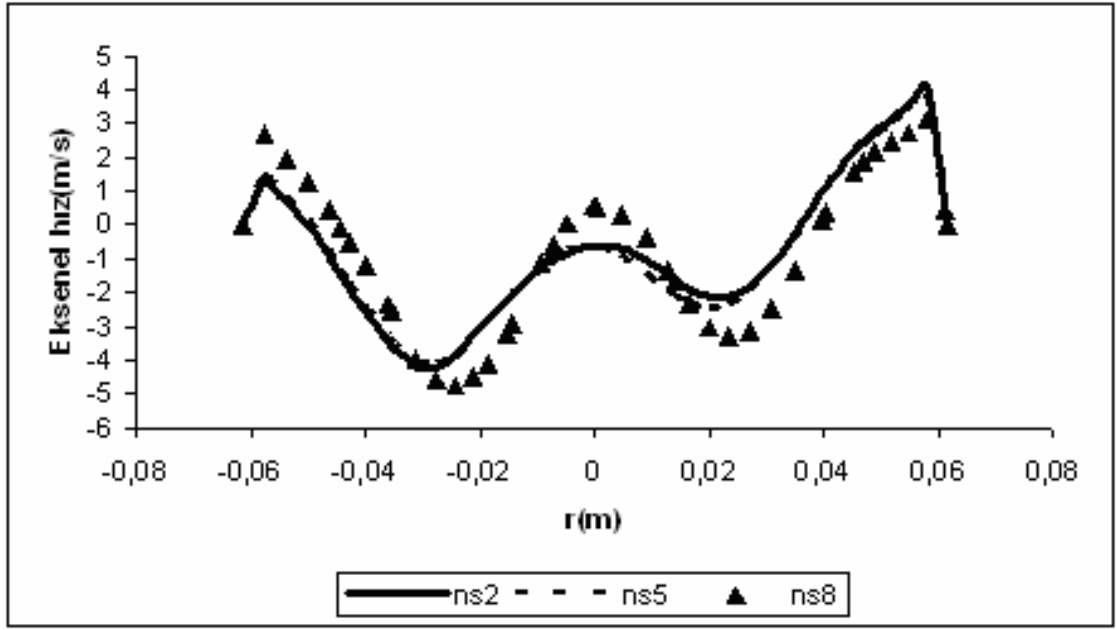
Şekil 4.13.  $z=0.4$  m,  $0^\circ-180^\circ$ 'deki teğetsel hızın ns2, ns5, ns8 ve deneysel değerleri



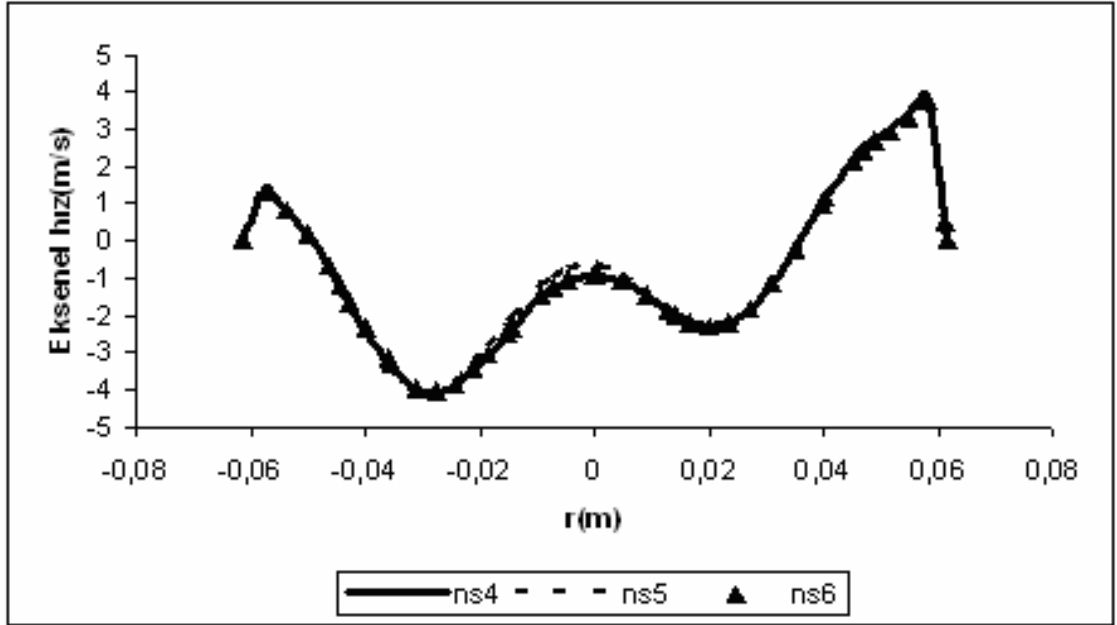


Şekil 4.14.  $z=0.4$  m,  $0^\circ-180^\circ$ 'deki teğetsel hızın ns4, ns5, ns6 ve deneysel değerleri

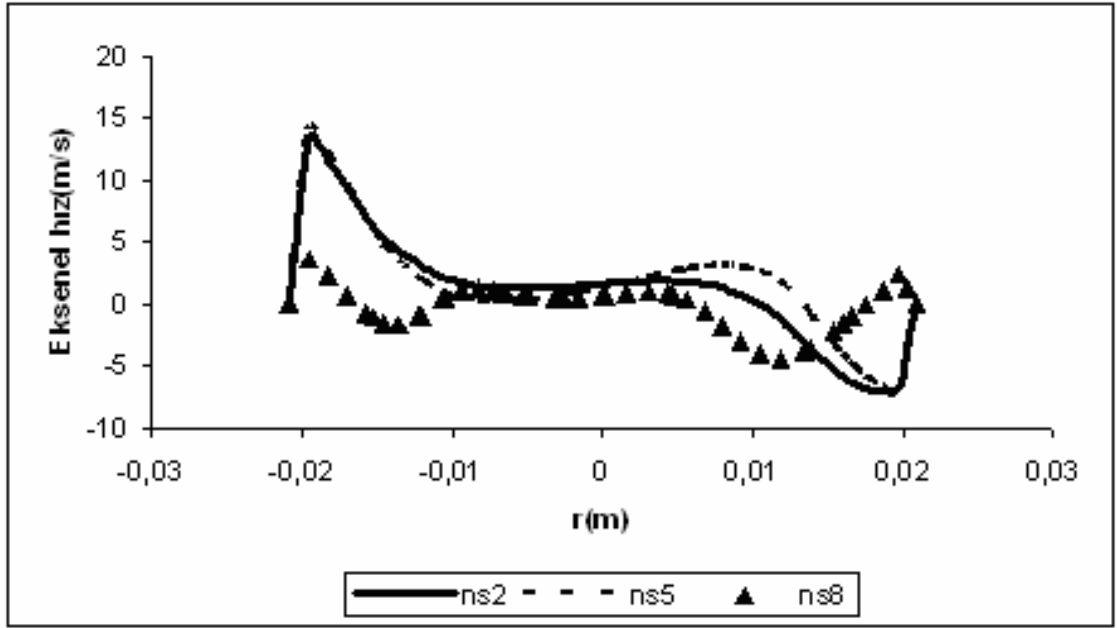
Siklon boyunca değişik kesitlerdeki aksenal ve teğetsel hız profilleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.11-4.18'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, gerek aksenal gerekse teğetsel hız profilleri açısından ns4, ns5 ve ns6 çözümleri yaklaşık aynı sonuçları vermektedir. ns2, ns5 ve ns8 çözümleri arasındaki karşılaştırmalardan da, ns8 çözümünün diğerlerden ve deneysel sonuçlardan bariz olarak farklı olduğu görülmektedir. Buna göre basınç için Presto algoritmasının kullanılmasının girdaplı akışlar için önemli olduğu ortaya çıkmıştır. Momentum denklemi için büyük farklar ortaya çıkmamakla beraber Quick şemasının özellikle basınç düşümü açısından daha uygun olduğu söylenebilir. Türbülans kinetik enerjisi ve türbülans dağılım oranı için en uygun şemaların ikinci mertebe şeması olmaktadır. Türbülans büyüklüklerinin hesabında daha yüksek mertebeden şemaların kullanılması yakınsama problemlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. ns2 ve ns8 için yapılan çözümlerin yakınsama süreleri diğerlerine göre nispeten daha kısa olmuştur.



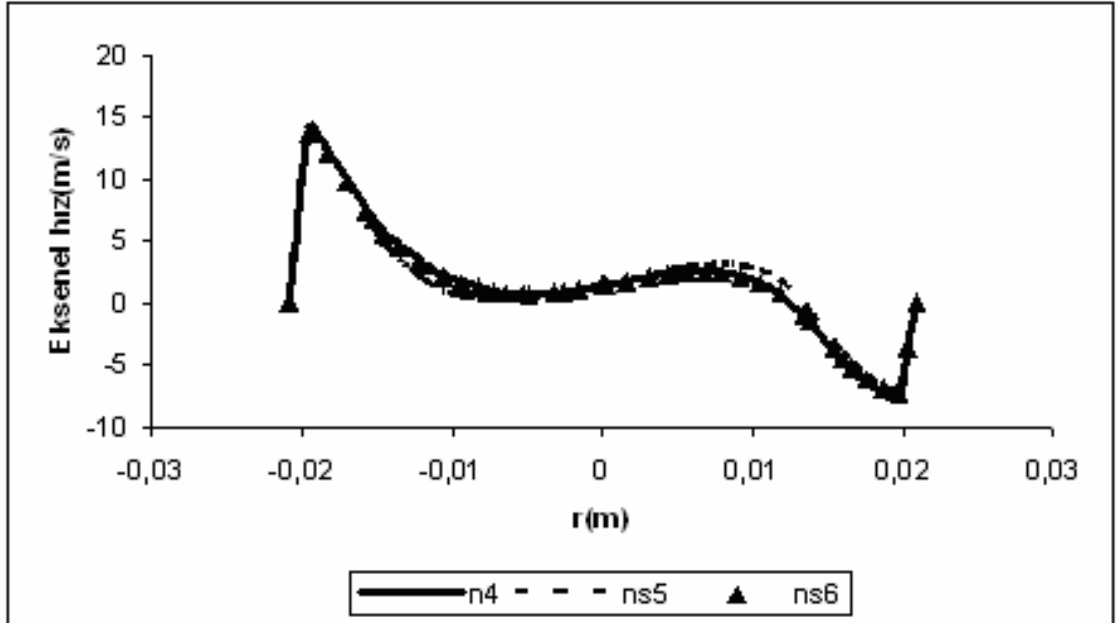
Şekil 4.15. z=0.4 m, 0°-180°deki ns2, ns5 ve ns8 eksenel hız değerleri



Şekil 4.16. z=0.4 m, 0°-180°deki ns4, ns5 ve ns6 eksenel hız değerleri



Şekil 4.17.  $z=0.65$  m,  $0^\circ$ - $180^\circ$ 'deki ns2, ns5 ve ns8 eksenel hız değerleri



Şekil 4.18.  $z=0.65$  m,  $0^\circ$ - $180^\circ$ 'deki ns4, ns5 ve ns6 eksenel hız değerleri

### 4.2.2.3 Değerlendirme

Çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan bazı algoritma ve şemalar test edilmiştir. Tüm nümerik testlerde RSM türbülans modeli kullanılmış, elde edilen çözüm sonuçları literatürde mevcut deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Sonuçların analizi, basınç denkleminin çözümünde kullanılan yöntemin oldukça önemli olduğunu göstermiştir. Buna göre girdaplı akışlar için en uygun yöntemin Presto algoritması olarak ortaya çıkmıştır. Basınç denkleminin çözümünde diğer algoritmaların kullanımı deneysel sonuçlardan oldukça farklı basınç ve hız alanı vermektedir.

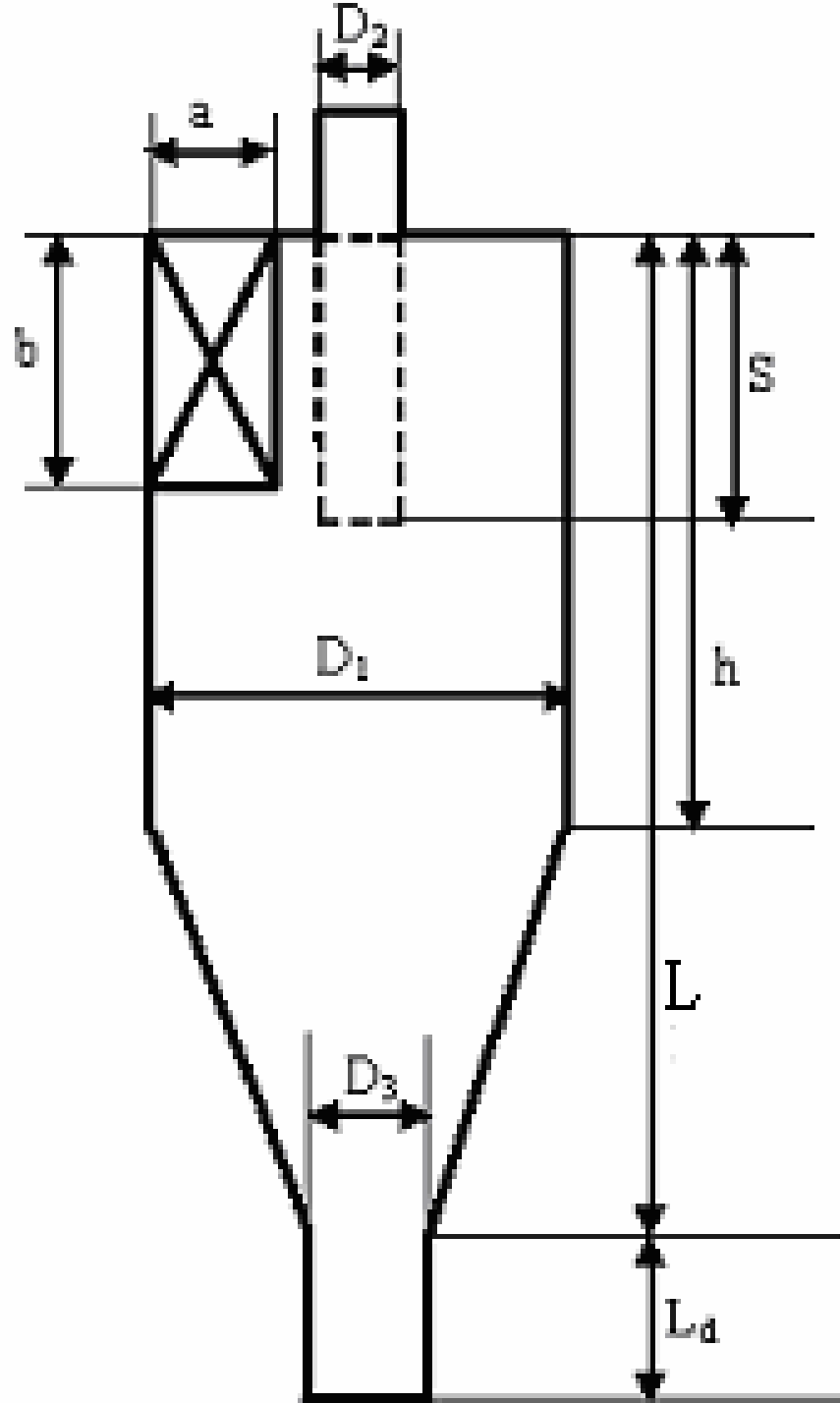
Momentum denkleminin çözümünde kullanılan şemalar belli toleranslar içerisinde benzer sonuçlar vermektedir. Ancak Quick şemasının nispeten daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir. Türbülans büyüklüklerinin hesaplanmasında farklı şemaların kullanılması çok farklı sonuçlara yol açmamaktadır. Ancak yüksek mertebeden şemaların kullanılması yakınsama problemlerine neden olmaktadır. Türbülans kinetik enerjisinde ikinci, Reynolds gerilmelerinde ise birinci mertebeye şemaların kullanımı optimum çözüm olarak gözükmektedir. Basınç ve hız arasındaki ilişki için de Simplec algoritmasının kullanılması yakınsama açısından biraz daha avantajlı olmaktadır.

Bu sonuçlar hız ve basınç değerlerinin mukayesesinden elde edilmiştir.

## 4.3 Çift Fazlı(hava+partikül) Akış Nümerik Sonuçları

Siklondaki akış olayını nümerik olarak analiz edebilmek için Bölüm 3’de vurgulanan türbülans modeller, duvar fonksiyonları ve şemaların uygunluğu Bölüm 4.2.1 ve Bölüm 4.2.2’de doğrulandığı şekilde kullanılmıştır. Siklondaki akış ve çalışma parametrelerinden çift fazlı akış uygulamalarının müsaade ettiği önemli parametreler incelenmiştir.

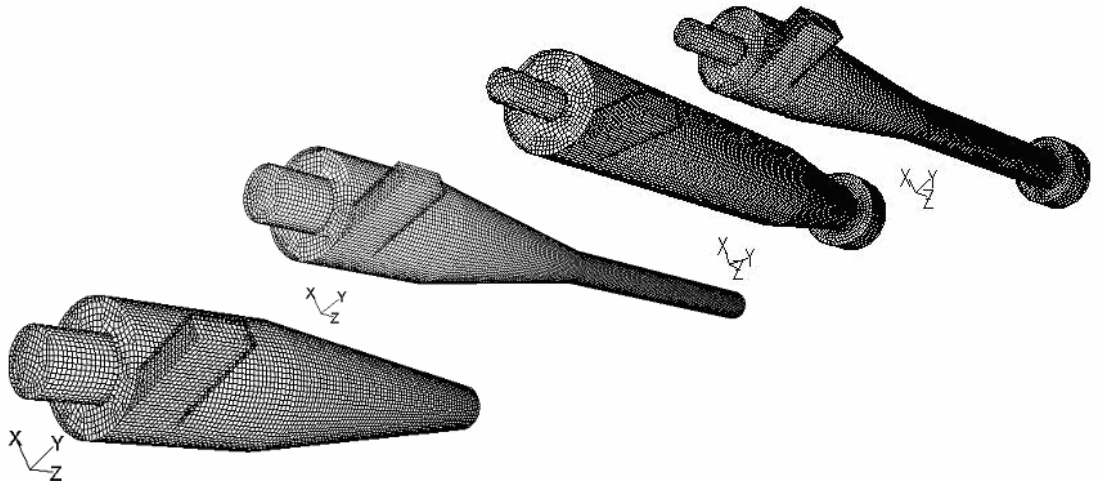
### 4.3.1 Normal ve uzatılmış siklonlarda akış karakteristikleri ve partikül tutma verimi etkilerinin nümerik olarak incelenmesi



Şekil 4.19. Nümerik Çözüm için Kullanılacak Siklon

Çizelge 4.5. Nümerik çalışmada kullanılan siklonlara ait boyutlar (mm)

Model	a(mm)	b(mm)	D <sub>2</sub> (mm)	S(mm)	h(mm)	L(mm)	D <sub>3</sub> (mm)	D <sub>1</sub> (mm)
C1	5	12.5	15.5	15.5	31	77	11.6	31
Stairmand (C2)	4	10	10	10	30	80	7.5	20
Hoffmann (C3)	50	114	65	140	260- 560-960	670- 970- 1370	110	200



Şekil 4.20. Nümerik Çözümde Kullanılan Siklonlara ait Mesh Yapısı

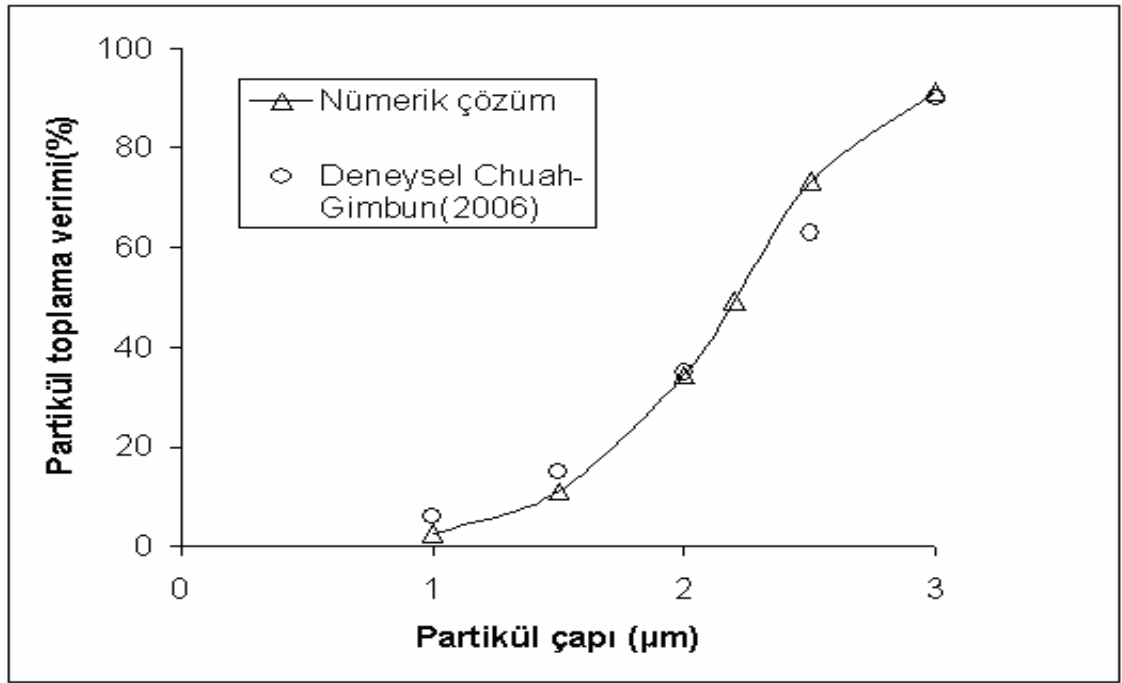
Karşılaştırmalar çift fazlı (hava+partikül) akışlar için ilgili literatürdeki (Chuah ve Gimbin, 2006 ve Hoffmann v.d., 2001) verilen deneysel çalışmalar için yapılmıştır. Nümerik yöntemin doğruluğu tespit edildikten sonra partikül toplama ve basınç düşümü parametrelerinin iyileştirilmesine yönelik toz giriş uzunluğu ve siklon boyu değiştirilerek optimum geometrik oran tespit edilmiştir (Kaya, Karagoz; 2009).

#### 4.3.1.1 Sonuçlar ve Analiz

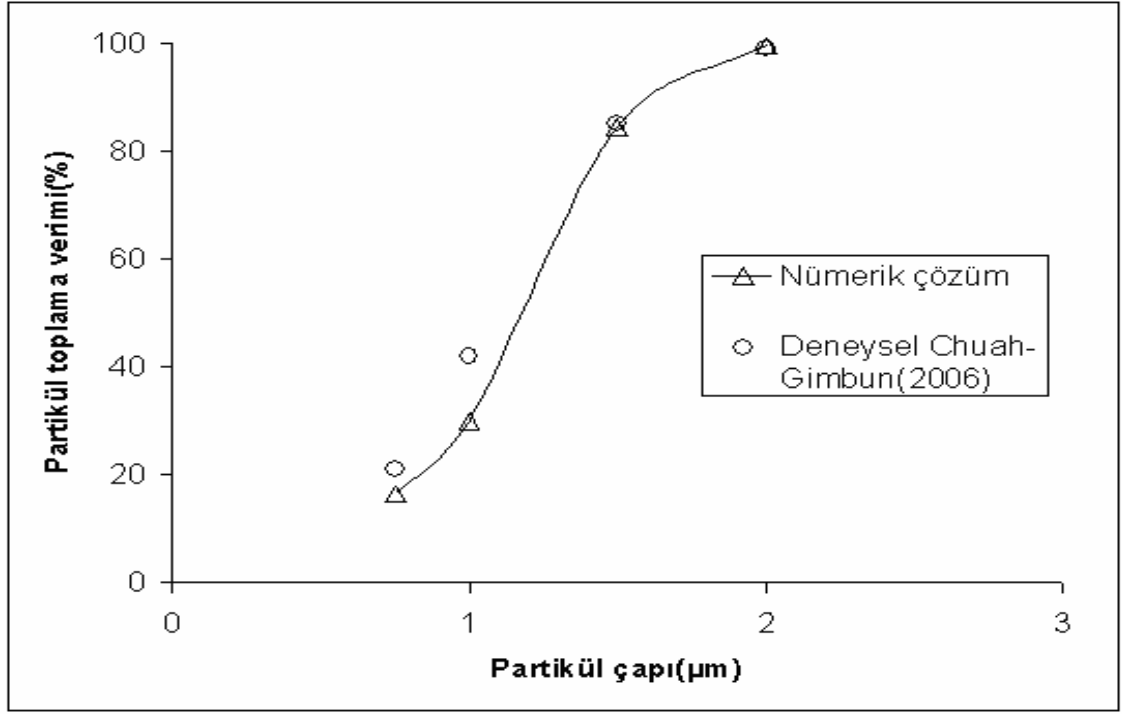
Nümerik çözümler ilgili literatür (Chuah-Gimbin ve Hoffmann v.d.) literatür dikkate alınarak 7-19 m/s giriş hızında ve 0.75 ile 3 µm arasındaki partikül çaplarında yapılmıştır. Toz giriş uzunluğu ( $L_d$ ) ise 0, 38.5, 77, 40, 80, 300, 335, 600 ve 700 mm

olarak değiştirilmiştir. Dipleg çözümlerinde Hoffmann v.d. (2001) tarafından literatürde verilen siklonlara ait deneysel datalardan  $L/D=3.35$  (C3) kullanılmıştır.

Şekil 4.21 ve 4.22’de 8 ve 16 m/s giriş hızları için elde edilen verimler ile literatürdeki deneysel datalar (Chuah ve Gim bun, 2006) karşılaştırılmıştır.



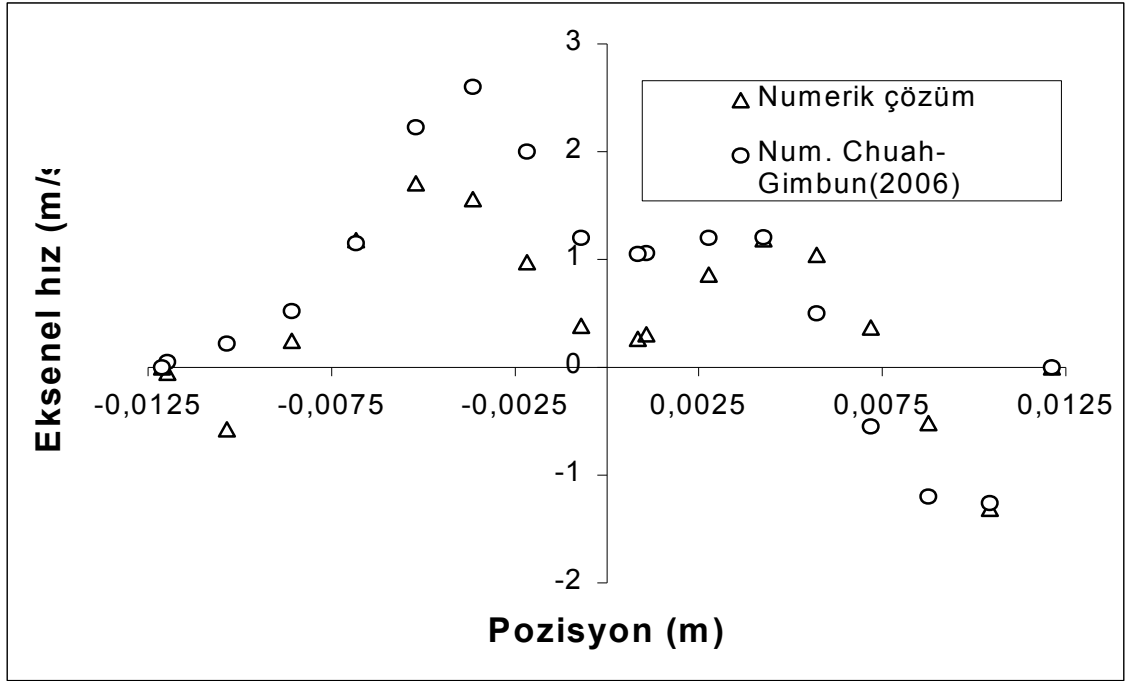
Şekil 4.21. 8 m/s giriş hızı için elde edilen toplama verimleri ile deneysel sonuçların (C1) karşılaştırılması



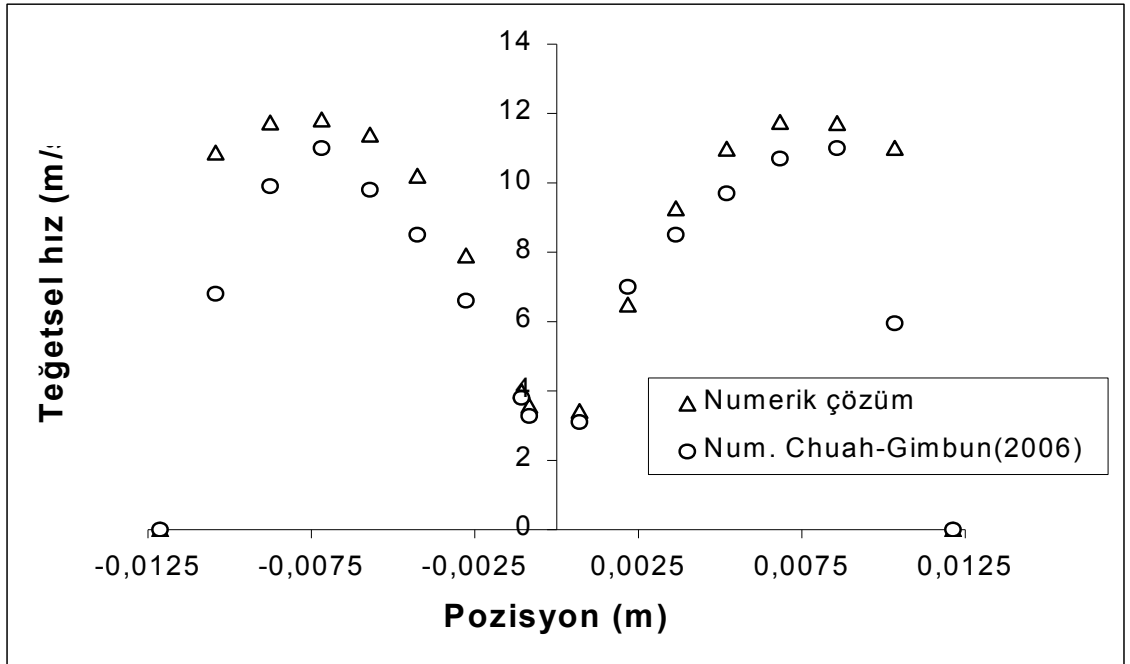
Şekil 4.22. 16 m/s giriş hızı için elde edilen toplama verimleri ile deneysel sonuçların (C1) karşılaştırılması

Elde edilen verim eğrisi S şeklinde olup deneysel datalar ile uyum içerisindedir. Tahmin edilen sonuçlar ile deneysel datalar arasındaki fark % 7'den daha azdır. Şekil 4.23' ve 4.24'de  $z=0.047$  m için elde edilen nümerik sonuçlar ile Chuah ve Gimbun (2006) tarafından elde edilen nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır.





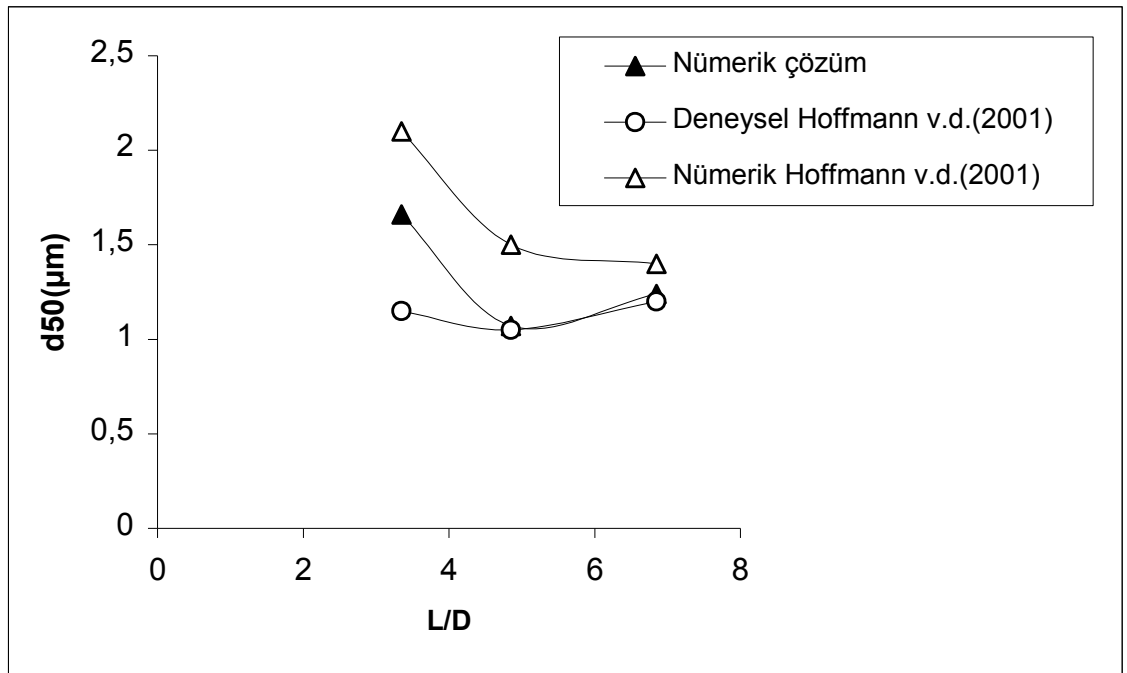
Şekil 4.23.  $z=0.047$  m'de 10 m/s giriş hızı için elde edilen aksel hızla ilgili literatürdeki (Chuah-Gimbun) sonuçların karşılaştırılması



Şekil 4.24.  $z=0.047$  m'de 10 m/s giriş hızı için elde edilen teğetsel hızla ilgili literatürdeki (Chuah-Gimbun) sonuçların karşılaştırılması

Elde edilen aksenal ve teğetsel hız profilleri Chuah ve Gimibun (2006) tarafından elde edilen sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.23'den siklon duvarlarına yakın bölgelerde akışın aşağı doğru olduğu görülebilmektedir. Elde edilen aksenal hız profilinden akışta iki asimetric dönüm noktasının olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen teğetsel hız profillerinden ise iki vorteks yapısının olduğu görülmektedir. Bunlardan birincisi; teğetsel hızın arttığı merkezde oluşan kuvvetli vorteks, ikincisi ise;  $r$ 'nin artmasıyla hızda azalmanın meydana getirdiği serbest vortektir.

Şekil 4.25'de 19 m/s giriş hızı için partikül toplama verimleri farklı L/D oranlarında literatürdeki deneysel ve nümerik sonuçlar (Hoffmann v.d., 2001) ile karşılaştırılmıştır.

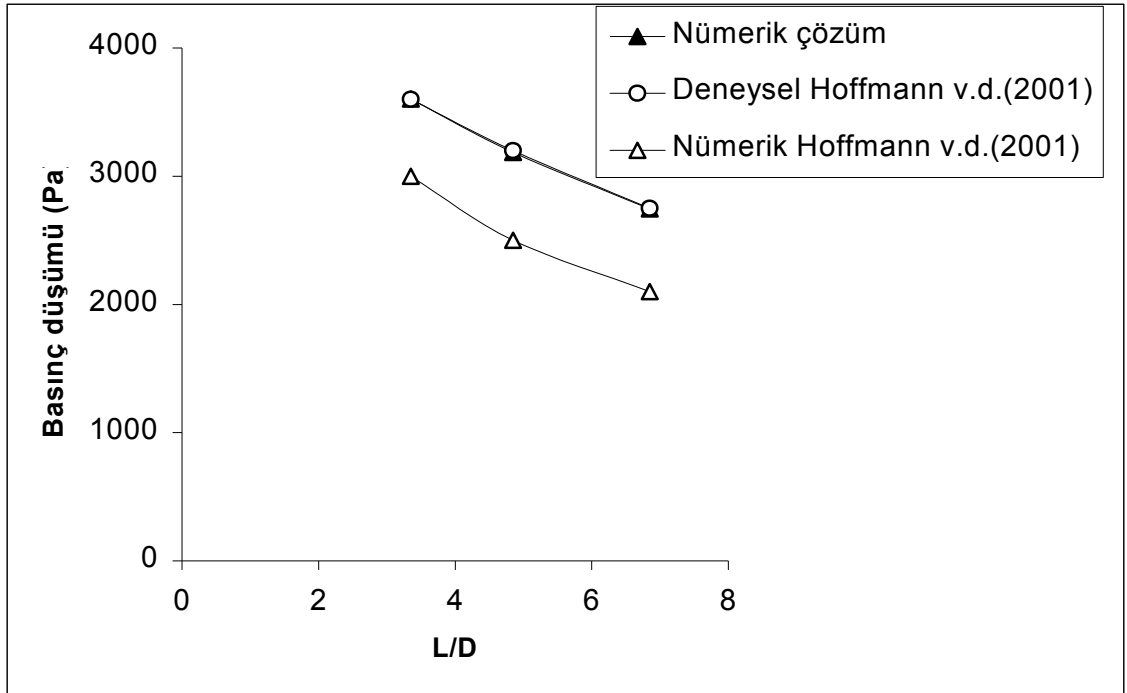


Şekil 4.25. 19 m/s giriş hızı için elde edilen toplama verimleri ile literatürdeki deneysel ve nümerik sonuçların (C3) karşılaştırılması

Elde edilen sonuçların literatürdeki (Hoffmann v.d., 2001) deneysel ve nümerik sonuçlar ile karşılaştırılmasının verildiği şekil 4.25'e dikkat edilirse kullanılan nümerik tekniğin deneysel sonuçları kritik çap açısından iyi bir şekilde yansıttığı görülmektedir.

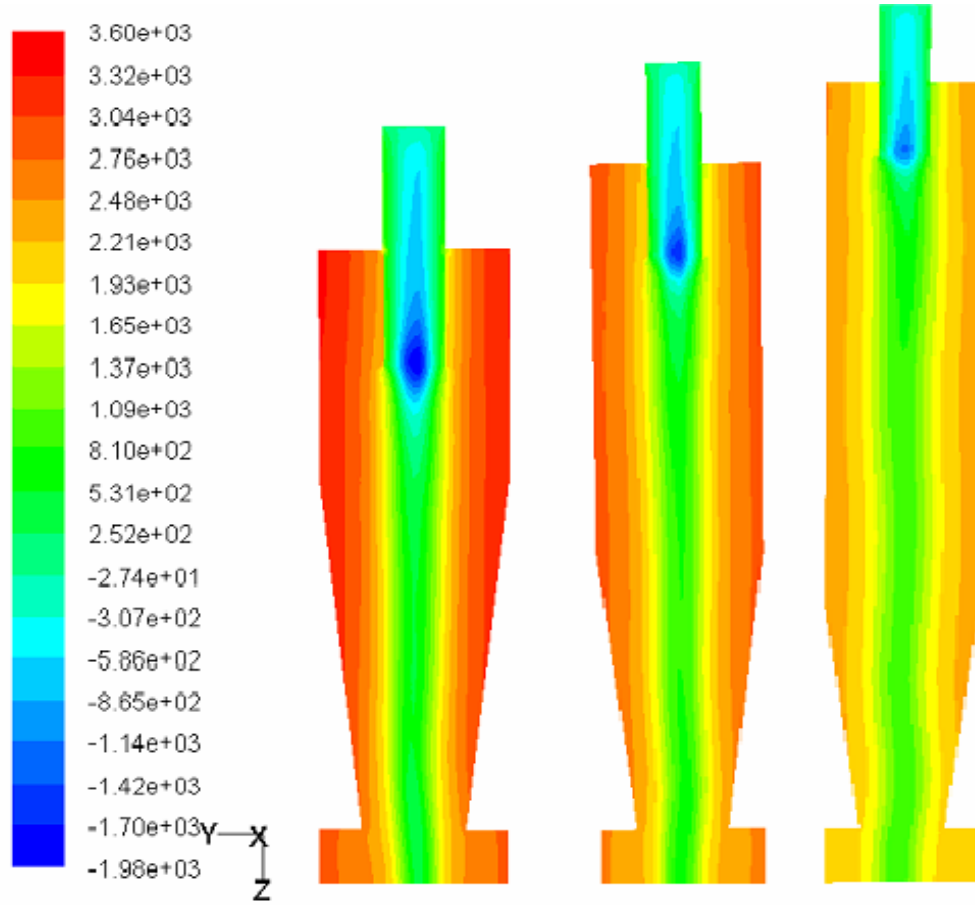
Şekil 4.25’de verilen literatürdeki nümerik teknikten mevcut nümerik tekniğin çok daha uygun olduğu görülmektedir.

Şekil 4.26’da ise aynı şartlar altında elde edilen basınç düşümü sonuçlar ile Hoffmann v.d. (2001) tarafından elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.26. 19 m/s giriş hızı için elde edilen basınç düşümleri ile literatürdeki deneysel ve nümerik sonuçların (C3) karşılaştırılması

Şekil 4.26’da verilen basınç düşümüne ait sonuçlar şekil 4.27’de kontur şeklinde verilmiştir.

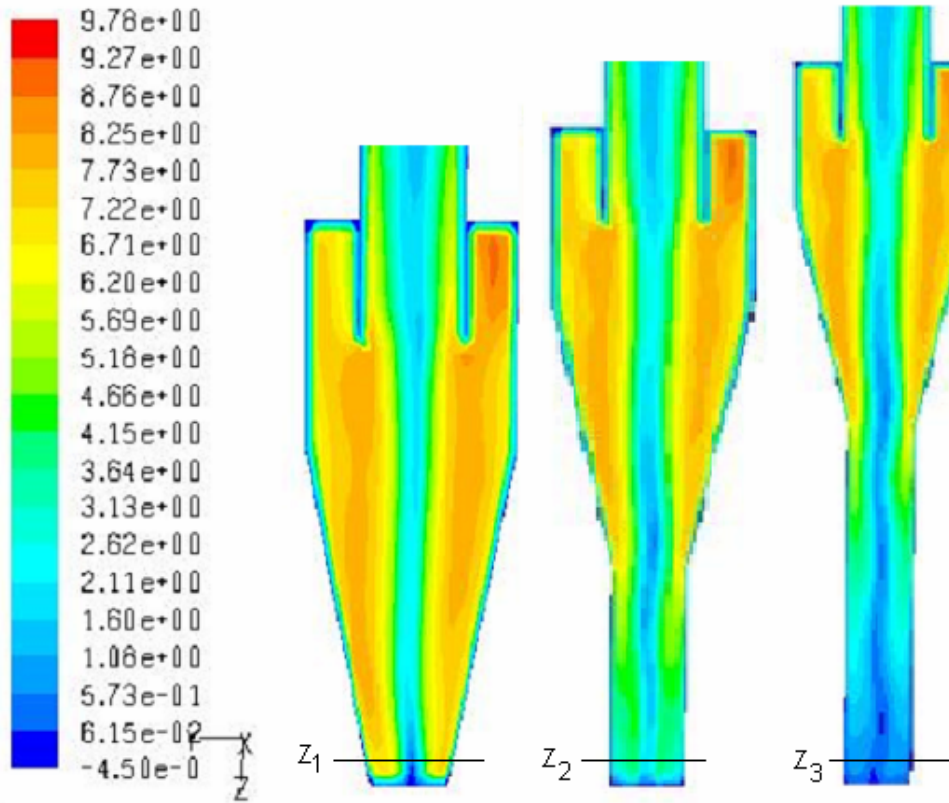


Şekil 4.27. 19 m/s giriş hızı için farklı L/D oranlarında elde edilen (C3) basınç düşümleri ait konturlar

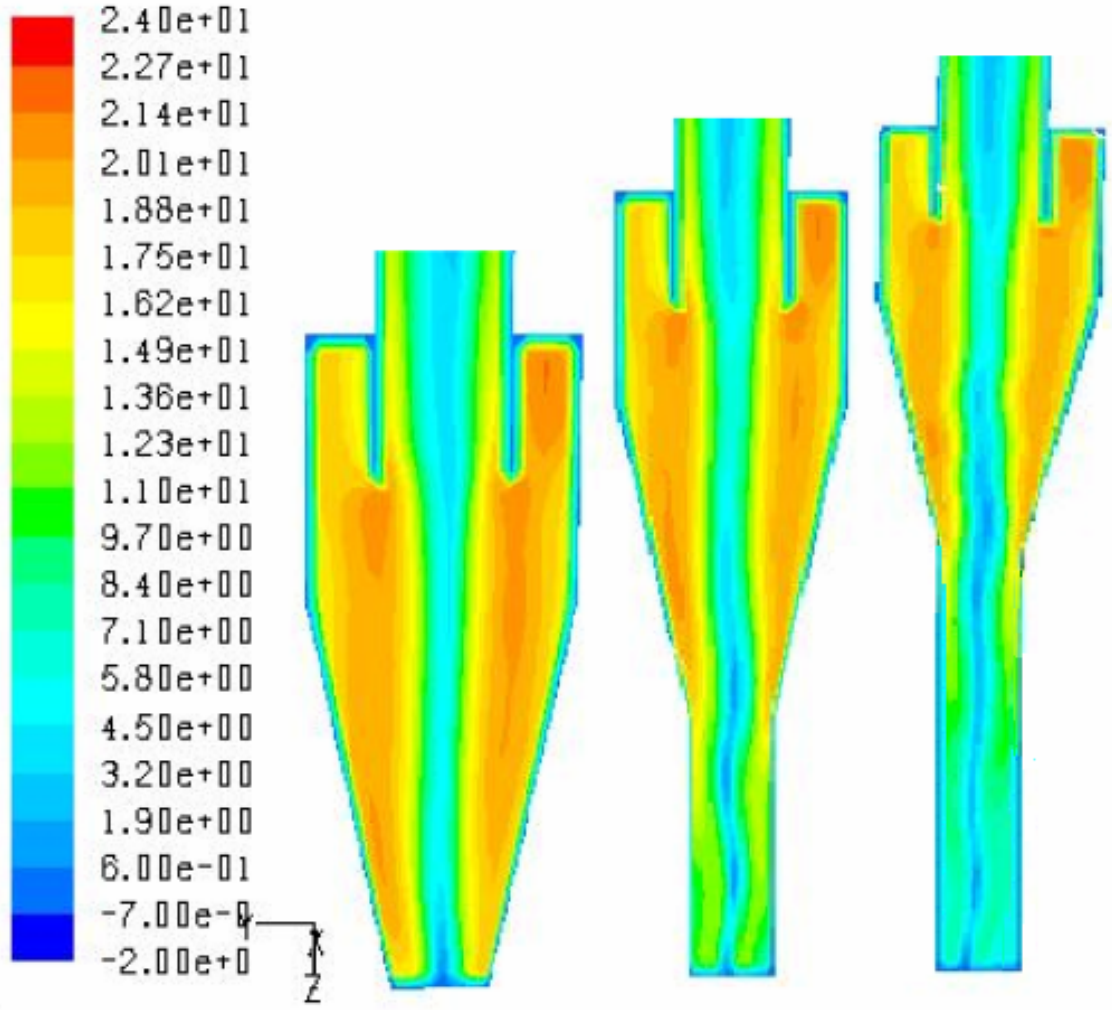
Elde edilen sonuçların literatürdeki deneysel sonuçlar (Hoffmann v.d., 2001) uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Dikkat edilirse, 19 m/s giriş hızında L/D oranı 3.35 iken deneysel olarak elde edilen basınç düşümü 3600 Pa iken mevcut nümerik çözümde 3601 Pa elde edilmiş literatürdeki nümerik çözümde ise 3000 Pa olarak verilmiştir. Yine aynı şekilde, L/D oranı 4.85 için deneysel sonuçta basınç düşümü 3200 Pa iken mevcut nümerik çözümde 3190 Pa literatürdeki nümerik çözümde ise 2500 Pa'dır. L/D oranı 6.85 olduğunda ise basınç düşümüne ait deneysel sonuç 2750 Pa iken mevcut nümerik çözümde 2740 Pa literatürdeki nümerik çözümde ise 2100 Pa'dır. Görüldüğü üzere nümerik çözümde kullanılan teknik ile basınç düşümü değerlerini maksimum % 0.35 hata ile tespit edilmiş olmaktadır. Bu sonuçlardan kullanılan nümerik tekniğin son derece uygun olduğu görülmektedir.

#### 4.3.1.2 Normal ve uzatılmış siklonlarda hız alanlarının incelenmesi

Teğetsel hız, aksenal hız ve türbülans kinetik enerjisi siklondaki gaz akışının önemli bileşenleridir. Teğetsel hız partikül ayrıştırması için santrifüj kuvvetlerin meydana gelmesini sağlayan hız bileşenidir. Aksenal hız ise partiküllerin toz kutusuna nakil işlemini sağlayan hız bileşeni olarak tanımlanabilir. Türbülans kinetik enerjisi türbülans yoğunluğunu gösteren bir büyüklüktür. 7 ve 19 m/s için normal ve uzatılmış siklonlarda teğetsel hız konturları şekil 4.28 ve 4.29’da verilmiştir.



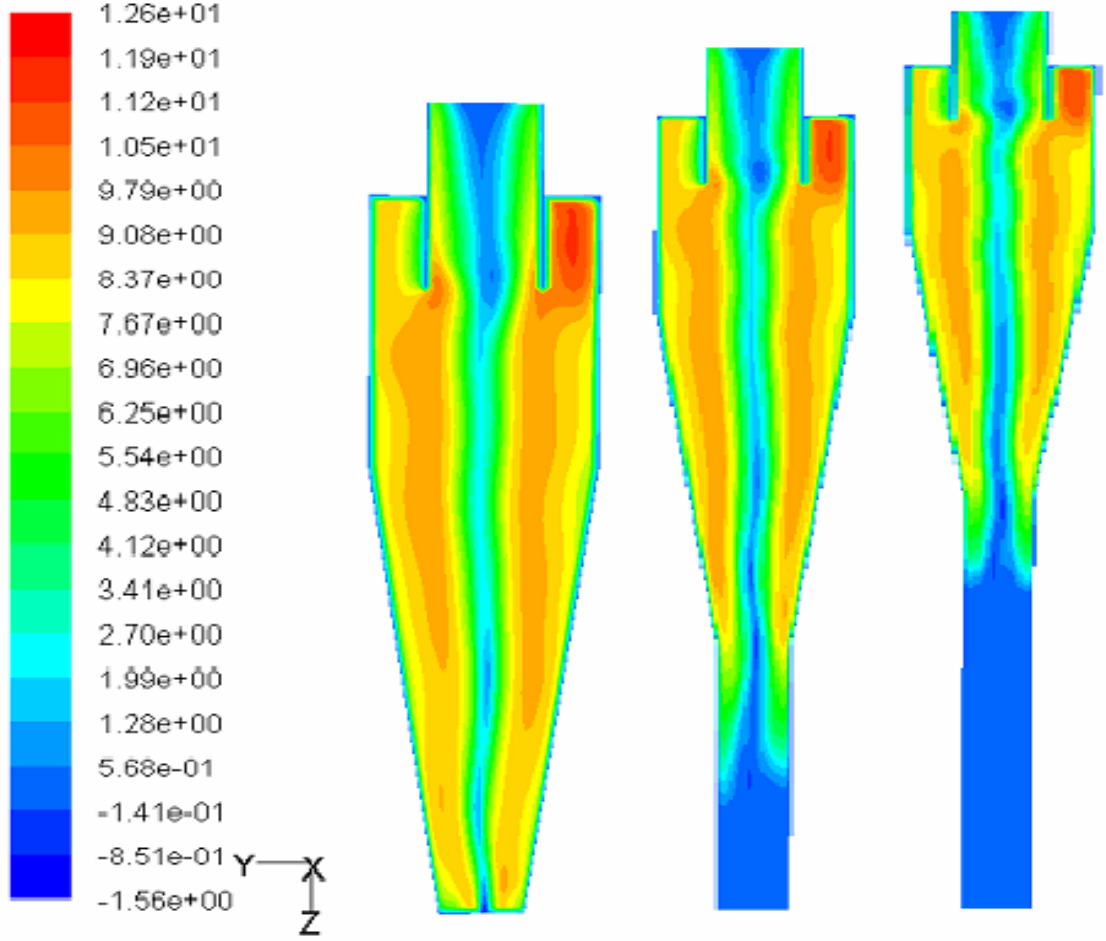
Şekil 4.28. 7 m/s giriş hızı ve  $L_d=0$ , 38.5, 77 mm için elde edilen (C1) teğetsel hız konturları



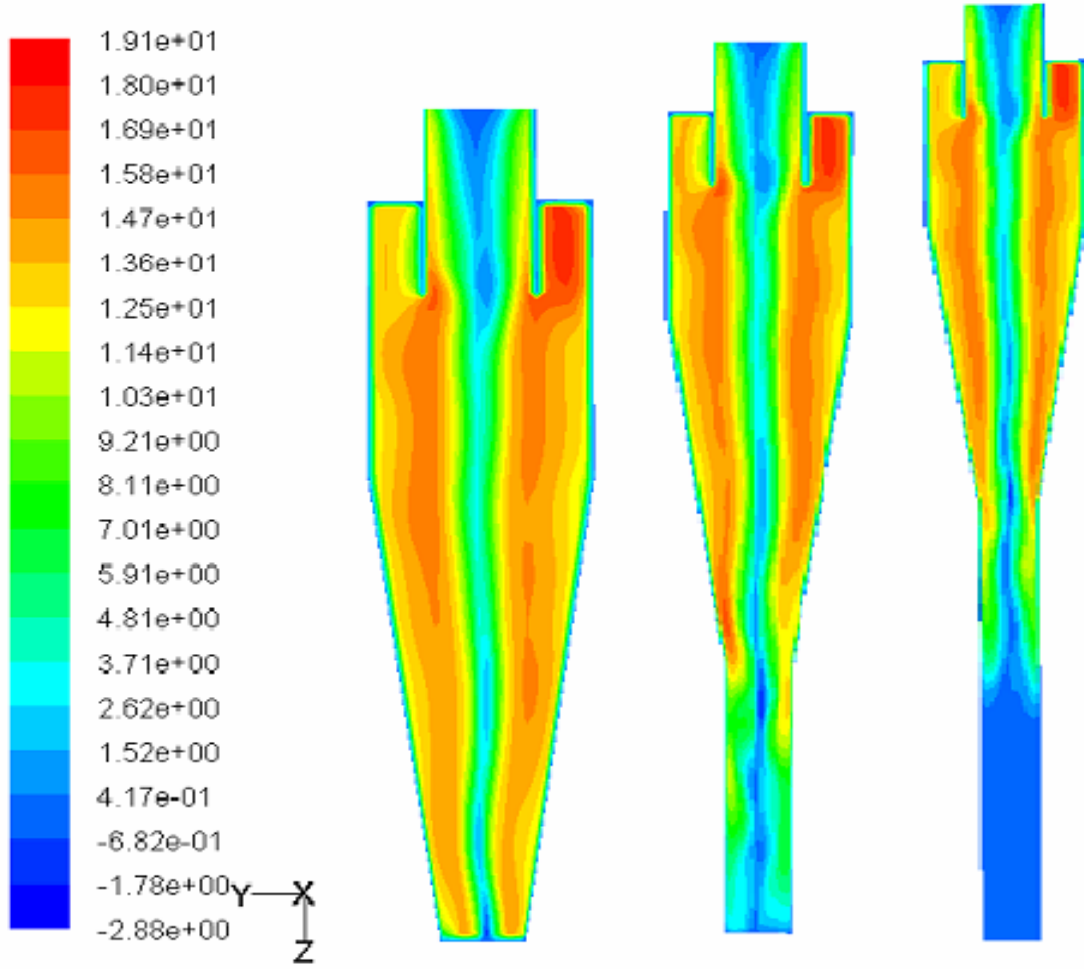
Şekil 4.29. 16 m/s giriş hızı ve  $L_d=0$ , 38.5, 77 mm için elde edilen (C1) teğetsel hız konturları

Simülasyon sonuçlarından maksimum teğetsel hızın toz kutusu giriş uzunluğunun artmasıyla konik kısmın ortasında küçük bir azalmayla diğer kısımlarda hemen hemen aynı kaldığı görülebilmektedir. Bu nedenle silindirik kısımda teğetsel hız üzerinde uzatılmış toz giriş uzunluğu etkileri ihmal edilebilmektedir. Ancak, toz giriş uzunluğu artırıldığı zaman bu uzunluktaki teğetsel hız azalmaktadır (şekil 4.28-4.29). Bu durum vorteks ucunun dipleg'in en alt kısmına kadar ulaşmadığını göstermektedir. Benzer sonuçlar Hoffmann v.d. (2001) siklonunda da elde edilmiştir.

Doğrulan nümerik teknik ile Stairmand yüksek verimli siklon (C2) için 8 ve 12 m/s giriş hızları için elde edilen teğetsel hız konturları şekil 4.30 ve şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.30. 8 m/s giriş hızı ve  $L_d=0, 40, 80$  mm için elde edilen (C2) teğetsel hız konturları

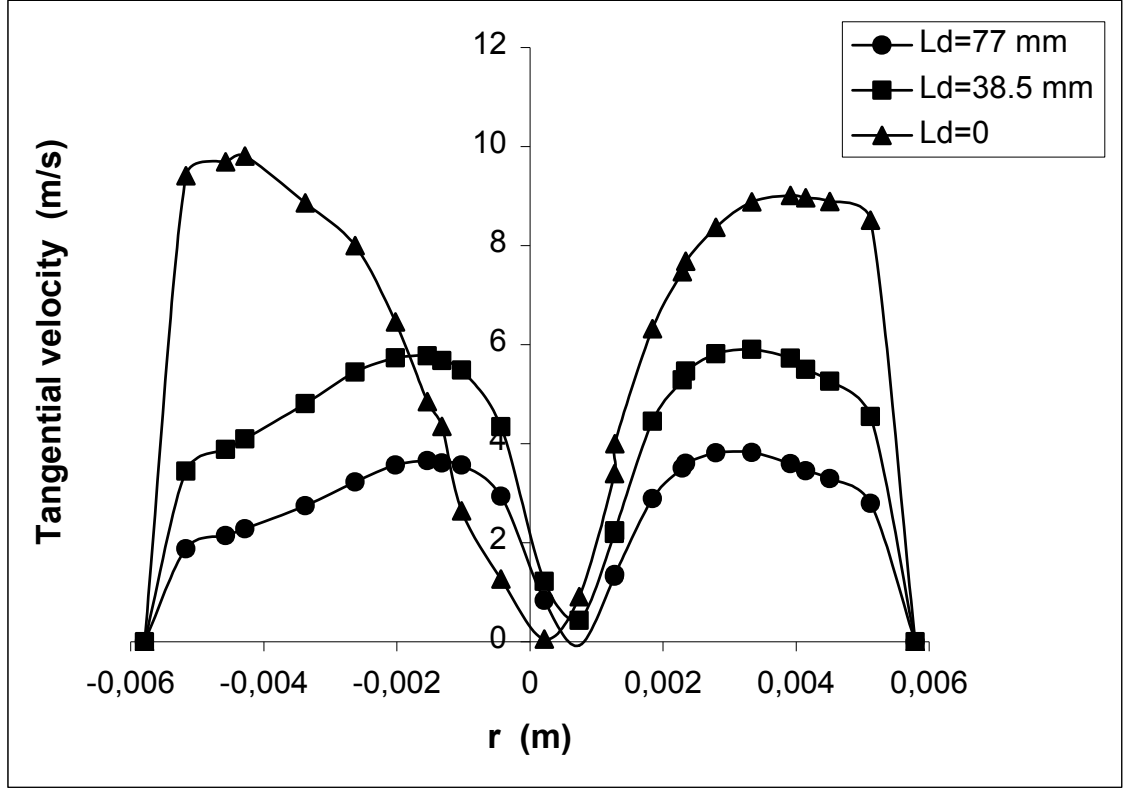


Şekil 4.31. 12 m/s giriş hızı ve  $L_d=0, 40, 80$  mm için elde edilen (C2) teğetsel hız konturları

Stairmand yüksek verimli siklonu (C2) için 8 ve 12 m/s giriş hızlarında elde edilen sonuçlardan dipleg uzunluğunun artırılması ile teğetsel hızda bir azalmanın olduğu görülmektedir. C2 siklonu için elde edilen sonuçlar C1 siklonu ile karşılaştırıldığında C1 siklonunda  $L/D_1=2.48$  olduğundan dolayı benzer hızlarda dipleg'in ilavesi doğal vorteks ucunun yol bulmasını sağlayacak ve teğetsel hızlar dipleg'in alt kısımlarında C2 siklonuna göre daha fazla olacaktır. C2 siklonunda  $L/D_1$  oranı 4 olduğundan dolayı benzer hızlarda geometriden kaynaklanan vorteks uzunluğunun kısalması durumu olmamaktadır. Bu durum şekil 4.31'de dikkate alınarak değerlendirildiğinde dipleg ilaveli teğetsel hız konturlarında siklonun alt kısımlarında teğetsel hızın oldukça düşmesinden görülebilmektedir.



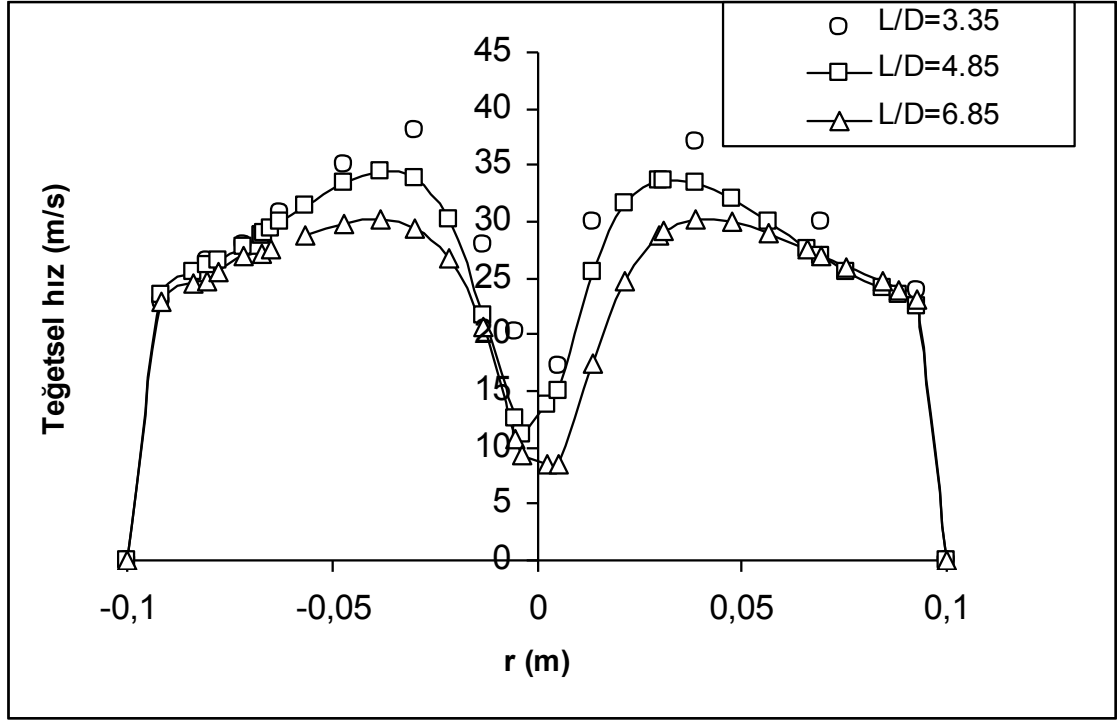
Şekil 4.32'de  $Y=0$  da şekil 4.28'de gösterilen  $z$ -kesitlerindeki  $Z_1=0,076$  m,  $Z_2=0,1145$  m ve  $Z_3=0,153$  m'de C1 siklonuna ait teğetsel hız profilleri verilmektedir.



Şekil 4.32.  $z=0,076$ ,  $0,1145$  ve  $0,153$  m'de  $7$  m/s giriş hızı için elde edilen teğetsel hızla ait nümerik sonuçların (C1) karşılaştırılması

Şekil 4.32'den dipleg kısmının uzatılmasıyla teğetsel hızın azaldığı açık olarak görülmektedir.

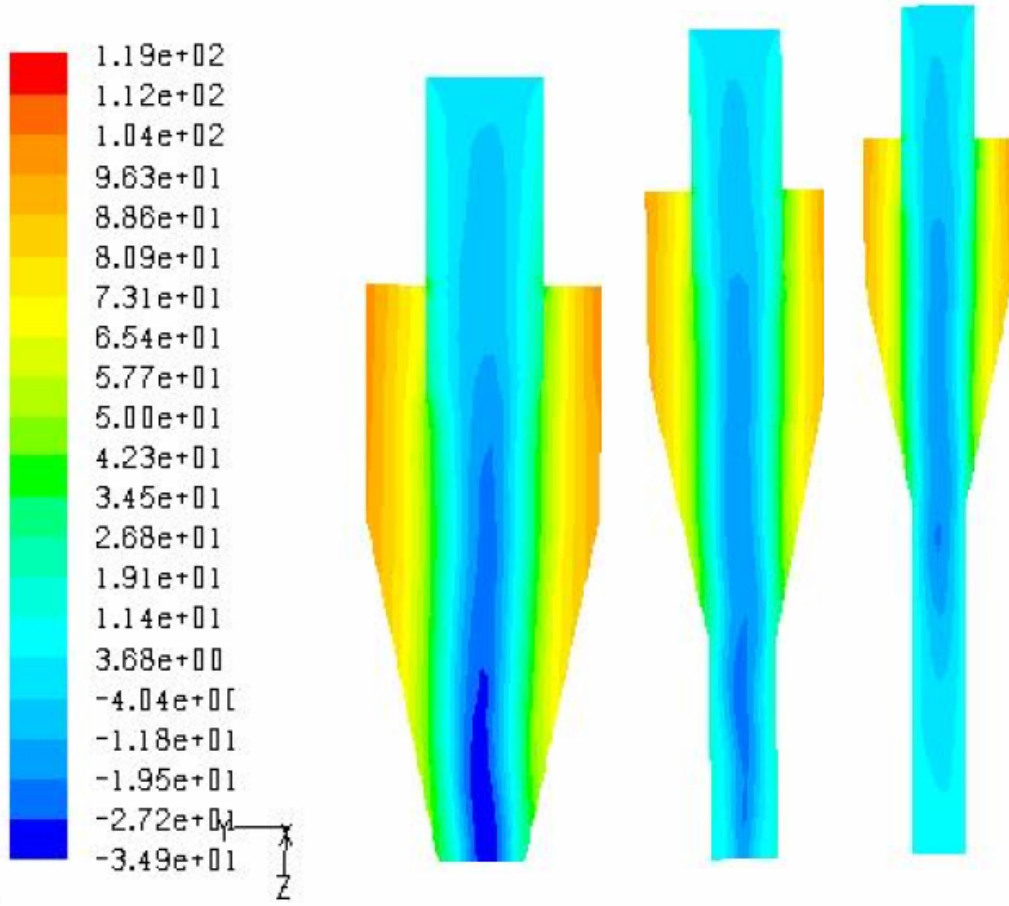
Şekil 4.33'de  $19$  m/s giriş hızı için siklonun dipleg ile değil boyunun uzatılması durumunda  $z=250$  mm'deki (silindirik kısımdaki) C3 siklonuna ait teğetsel hız profilleri verilmiştir.



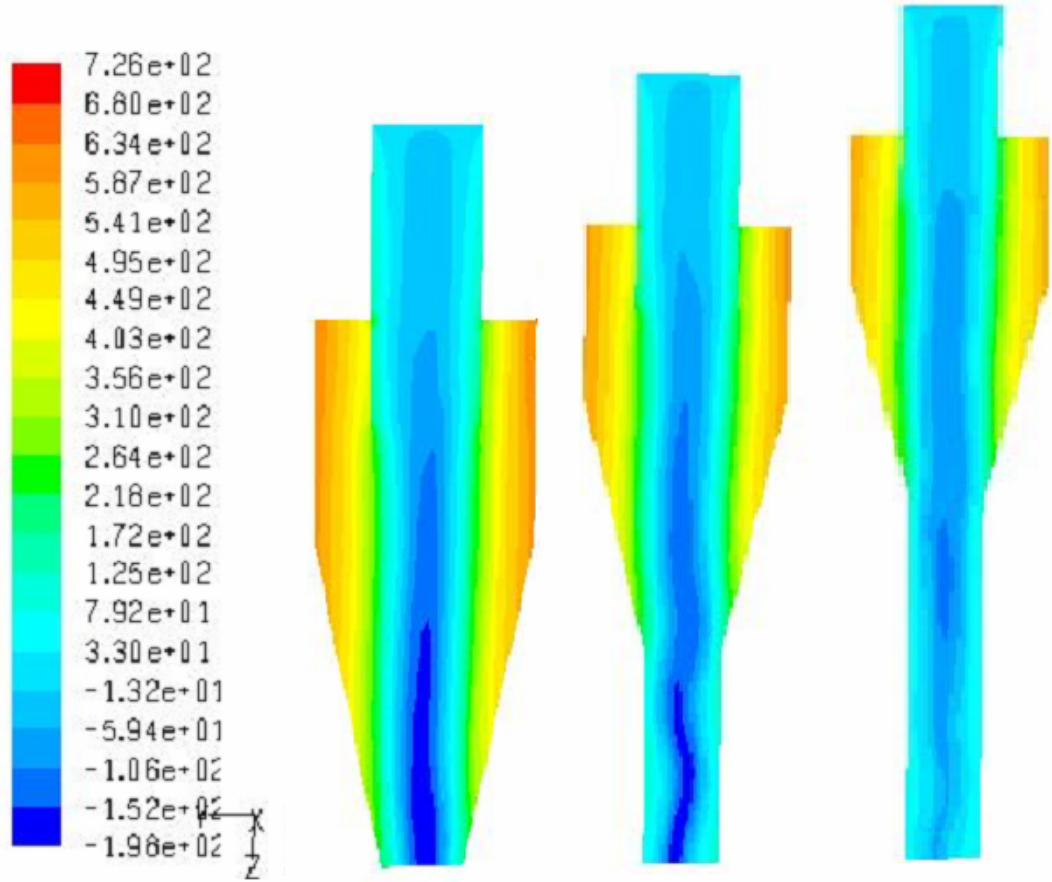
Şekil 4.33.  $z=0.25$  m'de 19 m/s giriş hızı için elde edilen teğetsel hıza ait nümerik sonuçların (C3) karşılaştırılması

Aynı kesitte alınan teğetsel hız profillerine dikkat edilirse siklon boyunun uzatılması ile teğetsel hız profillerinde azalmanın olduğu görülmektedir.

Şekil 4.34 ve 4.35'de 7 ve 16 m/s giriş hızında C1 siklonu için  $L_d=0$ , 38.5 ve 77 mm olması durumundaki statik basınç konturları verilmektedir.



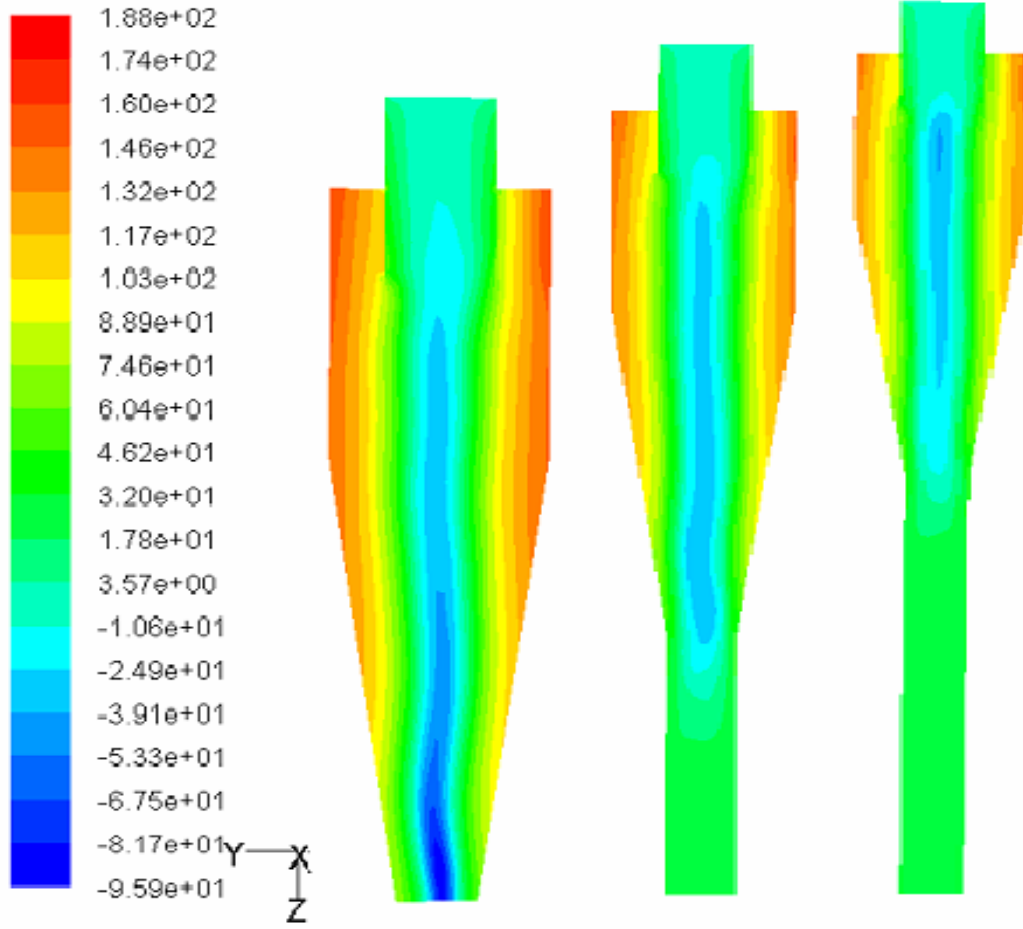
Şekil 4.34. 7 m/s giriş hızı ve  $L_d=0$ , 38.5, 77 mm için elde edilen (C1) statik basınç konturları



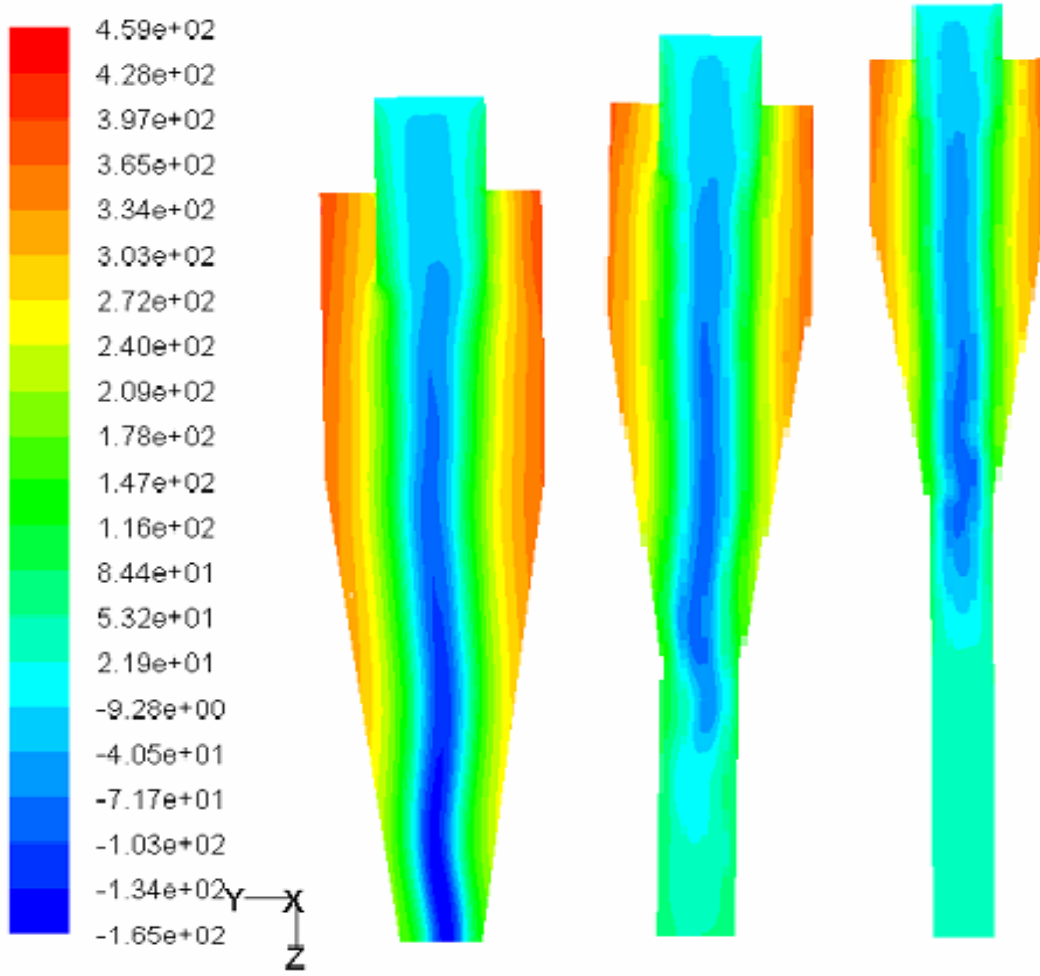
Şekil 4.35. 16 m/s giriş hızı ve  $L_d=0$ , 38.5, 77 mm için elde edilen (C1) statik basınç konturları

Vorteks'in uç kısmının altında kalan kısımdaki düşük teğetsel hızlar dipleg'in alt kısmına doğru basınç değerlerinde azalmaya neden olmaktadır. En uzun dipleg uzunluğu için dipleg'in alt kısmında hemen hemen sabit olan radyal basınç vorteks ucunun en alt kısma ulaşmadığına bir işarettir. Diğer dipleg kısımlarına dikkat edilirse bahsedilen durumun oluşmadığı açık olarak görülmektedir (şekil 4.34). 16 m/s giriş hızı için sabit radyal basıncın oluşmadığı görülmektedir (şekil 4.35).

Şekil 4.36 ve 37'de 8 ve 12 m/s giriş hızında C2 siklonu için  $L_d=0$ , 40 ve 80 mm olması durumundaki statik basınç konturları verilmektedir.



Şekil 4.36. 8 m/s giriş hızı ve  $L_d=0, 40, 80$  mm için elde edilen (C2) statik basınç konturları

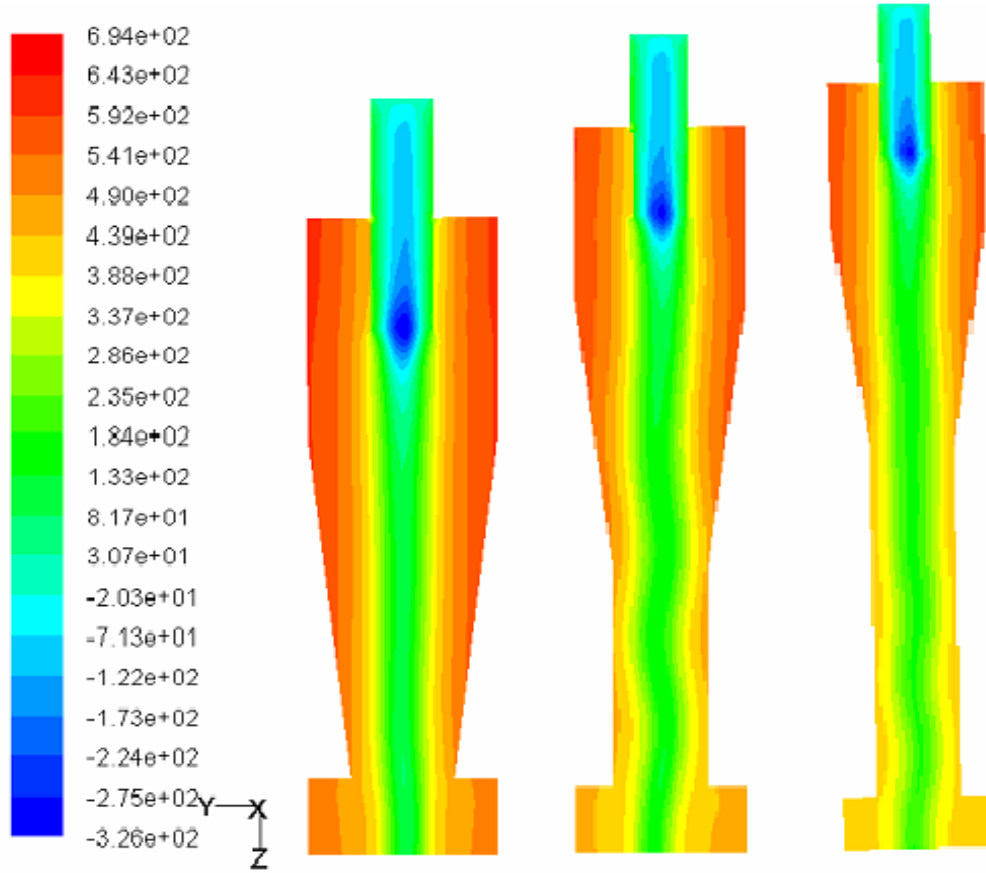


Şekil 4.37. 12 m/s giriş hızı ve  $L_d=0, 40, 80$  mm için elde edilen (C2) statik basınç Konturları

C2 siklonu için 8 ve 12 m/s giriş hızları için elde edilen sonuçlara dikkat edildiğinde C1 sonuçların farklı olarak radyal doğrultuda sabit statik basınç bölgelerinin dipleg'in çok daha üst kısımlarında meydana geldiği görülmektedir. Bunun nedeni C1 siklonunda  $L/D=2.48$  iken C2 siklonunda  $L/D$  oranının 4 olmasından kaynaklanmaktadır. C1 siklonunda küçük  $L/D$  oranı olduğu için dipleg uzunluğunun sıfır olması durumunda doğal vorteks ucunun ilerleme alanı olmamaktadır. Bu durumda C1 siklonunun dipleg ile uzatılması durumunda vorteks ucu ilerleme alanı bulmaktadır. Benzer hızlarda C2 siklonunda ise  $L/D$  oranı 4 olduğu için dipleg ile artırılması durumunda vorteks ucu aşağı kısımlara inmemektedir. C1 siklonunun yarı boyda dipleg

ile artırılması durumunda L/D oranı 3.73 olmakta ve C2 siklonundan küçük L/D oranına sahip olmaktadır.

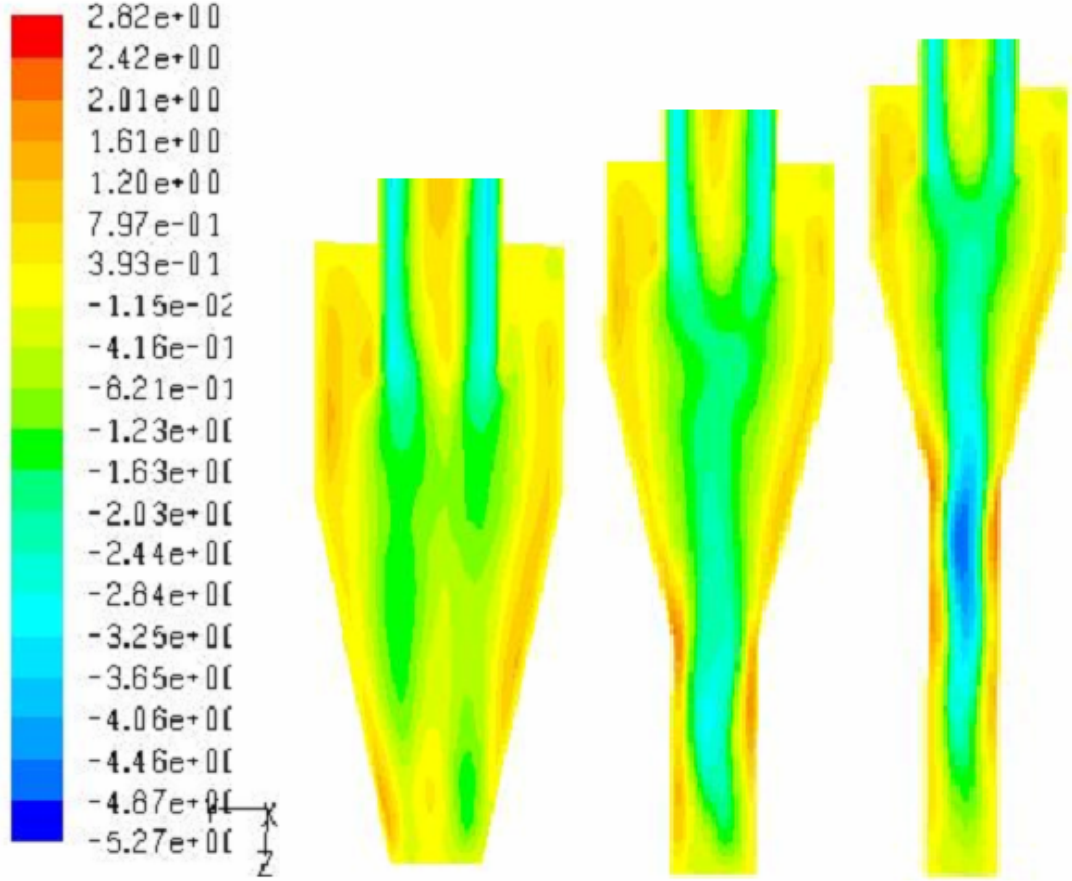
Şekil 4.38’de 8 m/s giriş hızında C3 siklonu için  $L_d=0, 335$  ve  $670$  mm olması durumundaki statik basınç konturları verilmektedir.



Şekil 4.38. 8 m/s giriş hızı ve  $L_d=0, 335, 670$  mm için elde edilen (C3) statik basınç konturları

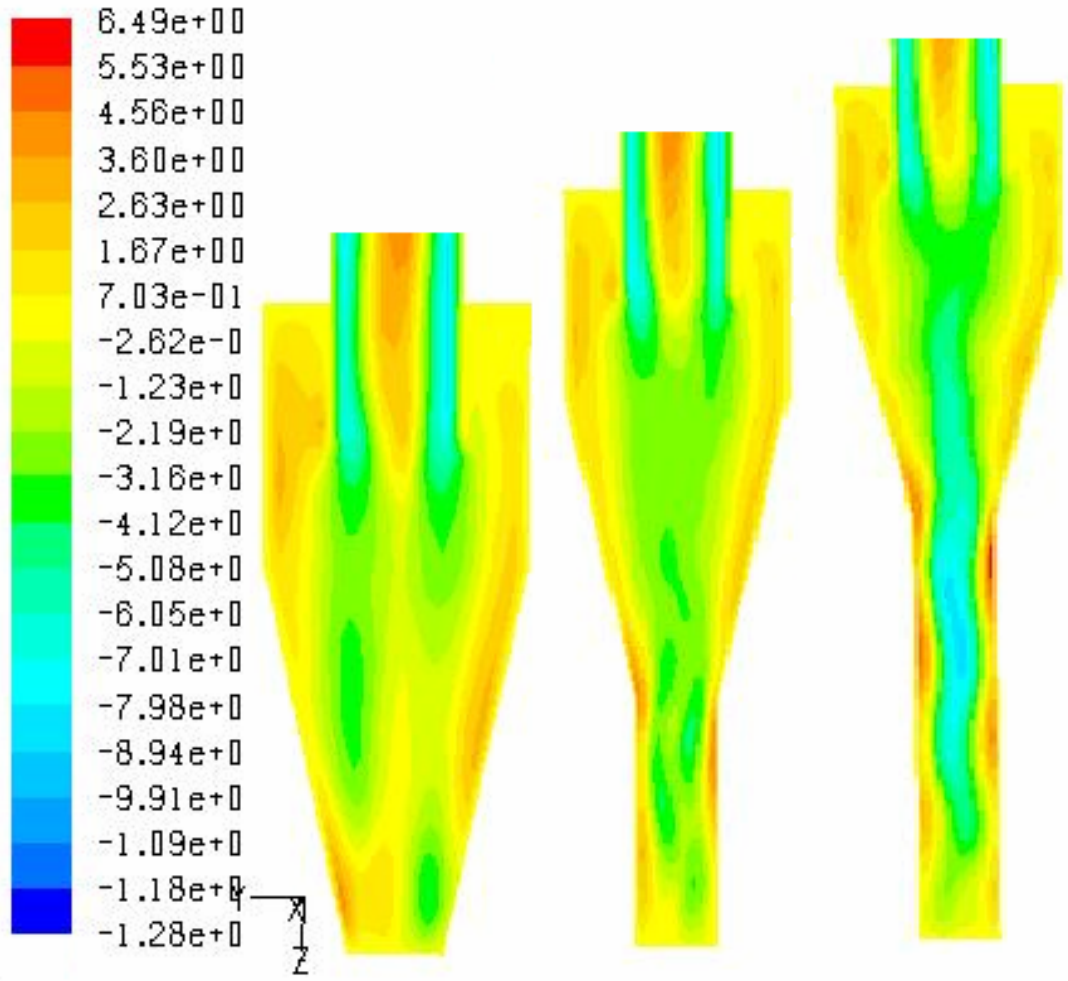
Şekil 4.38’e dikkat edileceği üzere 8 m/s giriş hızı için C3 siklonunda radyal yönde sabit statik basıncın oluşmadığı görülmektedir. Bu durumda doğal vorteks ucunun dipleg’in en alt kısmına kadar indiği yorumu yapılabilir.

Şekil 4.39 ve 4.40’da 7 ve 16 m/s giriş hızları için aksel hız konturları verilmektedir.

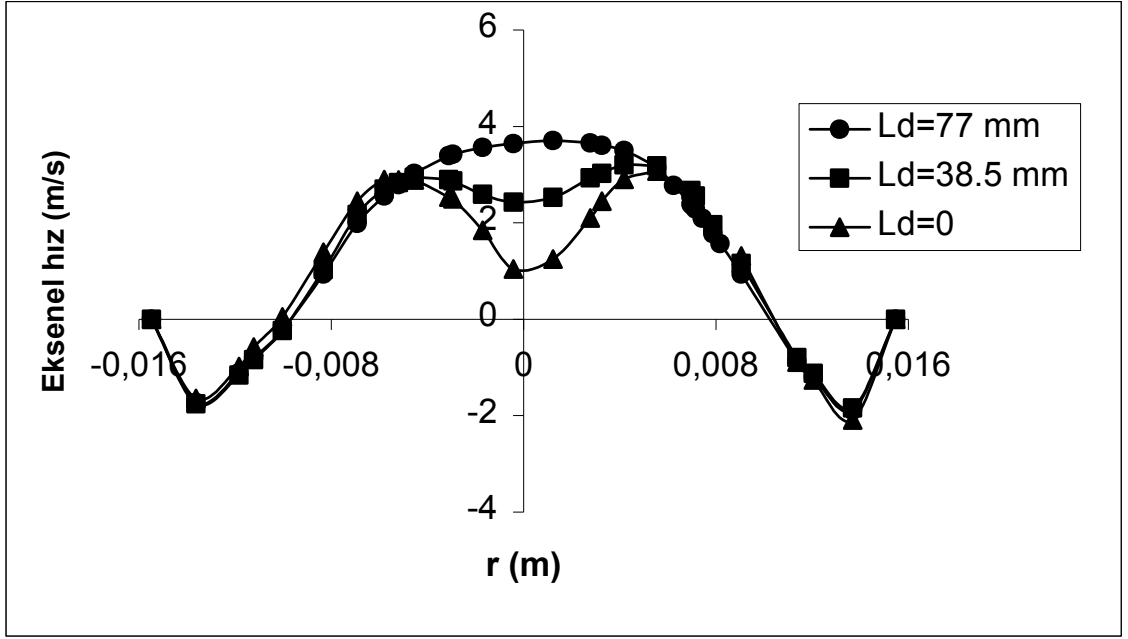


Şekil 4.39. 7 m/s giriş hızı ve  $L_d=0$ , 38.5, 77 mm için elde edilen (C1) aksel hız konturları

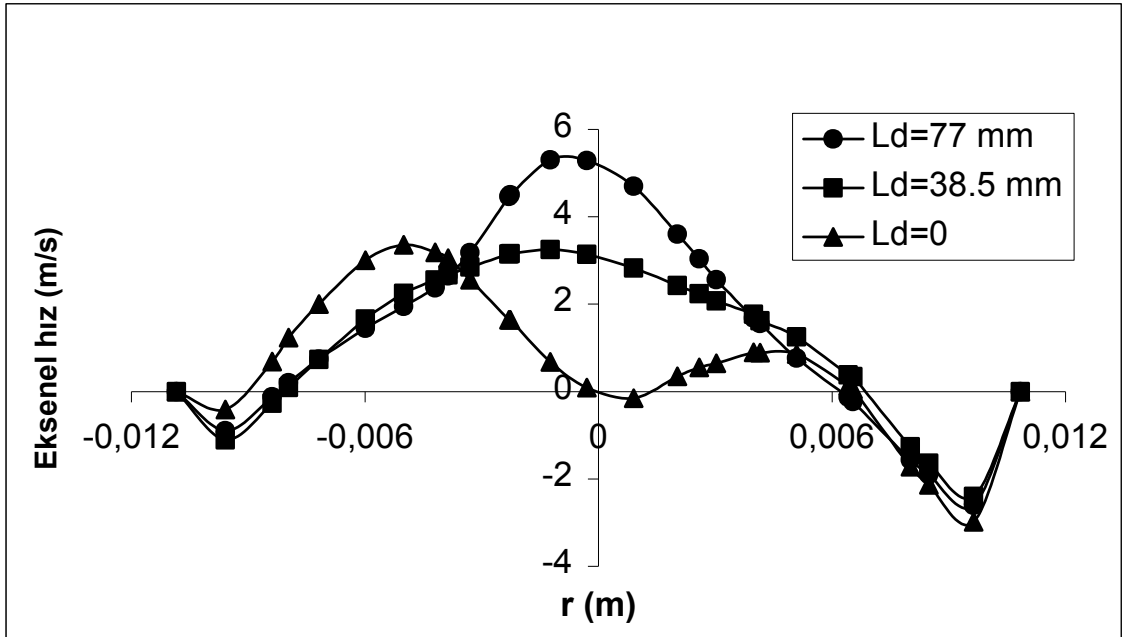




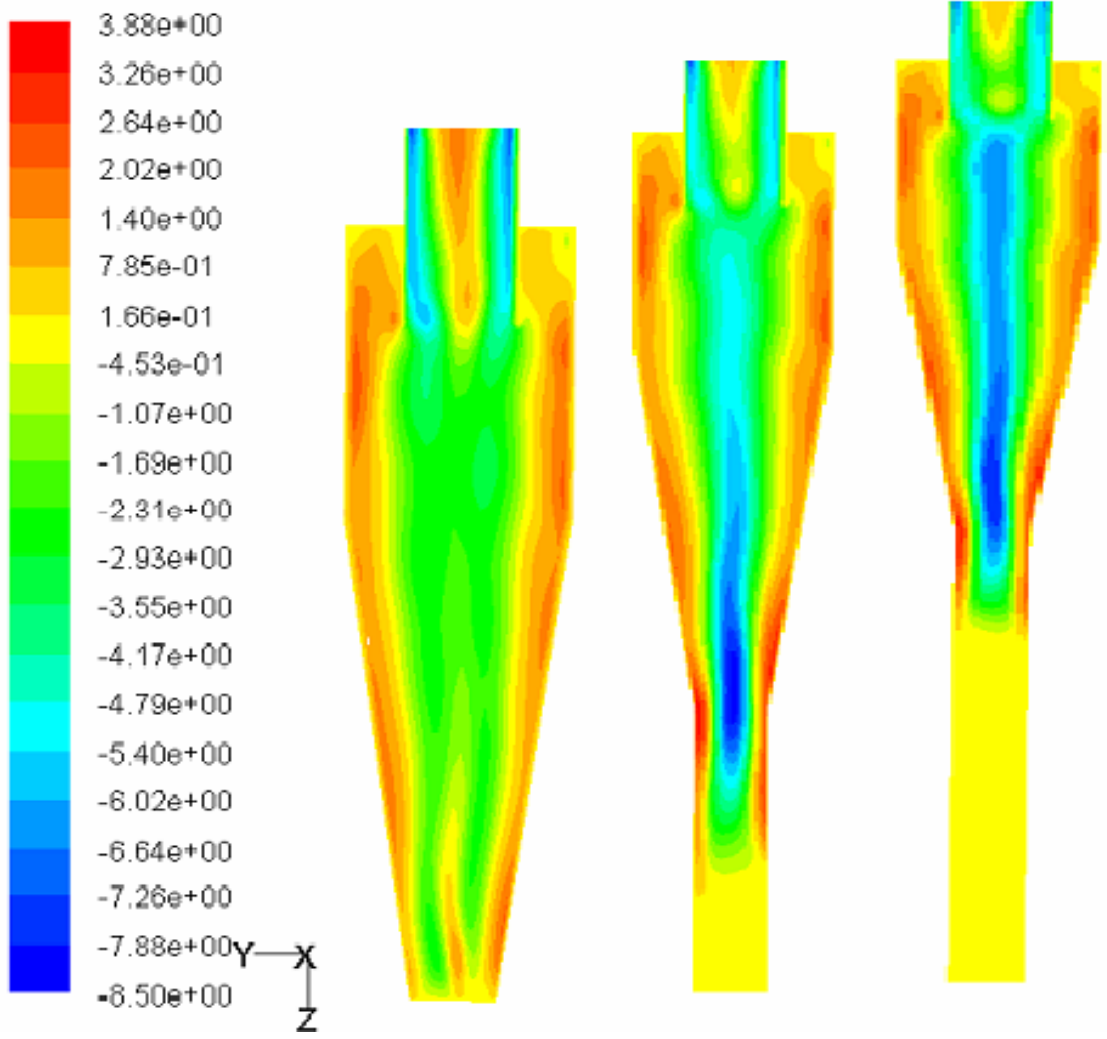
Şekil 4.40. 16 m/s giriş hızı ve  $L_d=0, 38.5, 77$  mm için elde edilen (C1) aksenal hız konturları



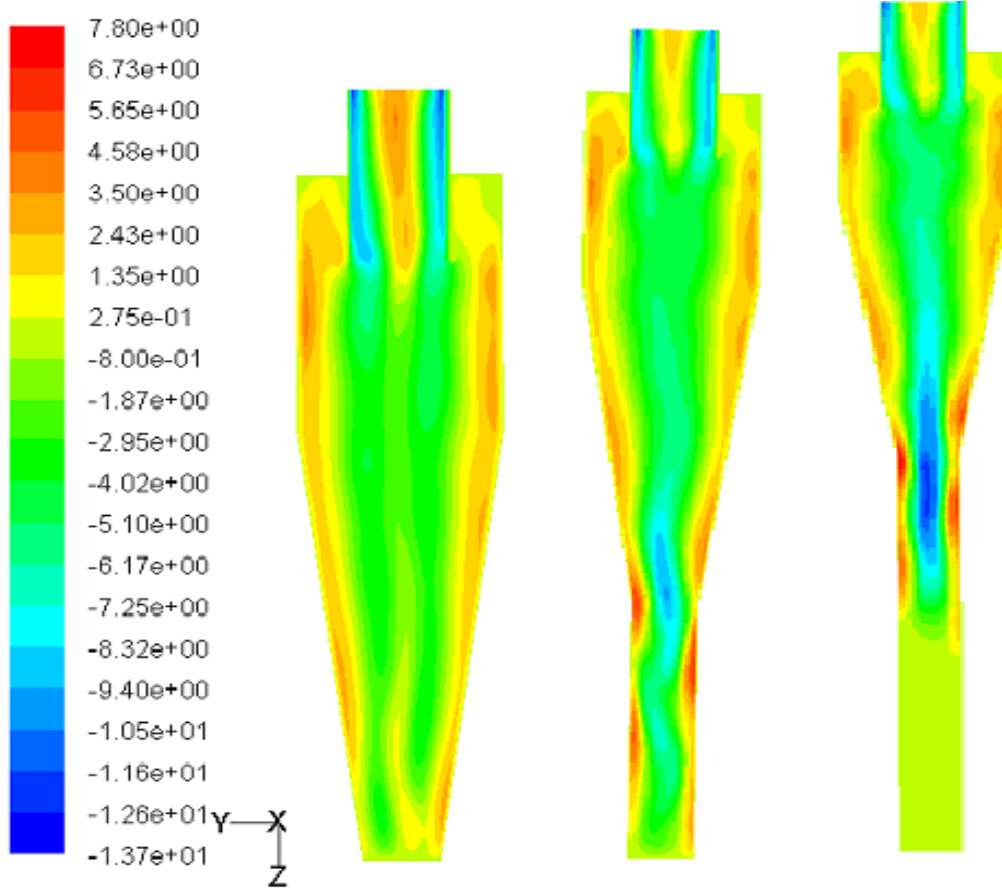
Şekil 4.41.  $z=0.03$  m'de 16 m/s giriş hızında normal ve uzatılmış siklonlar için elde edilen (C1) eksenel hız profilleri



Şekil 4.42.  $z=0.053$  m'de 16 m/s giriş hızında normal ve uzatılmış siklonlar için elde edilen (C1) eksenel hız profilleri

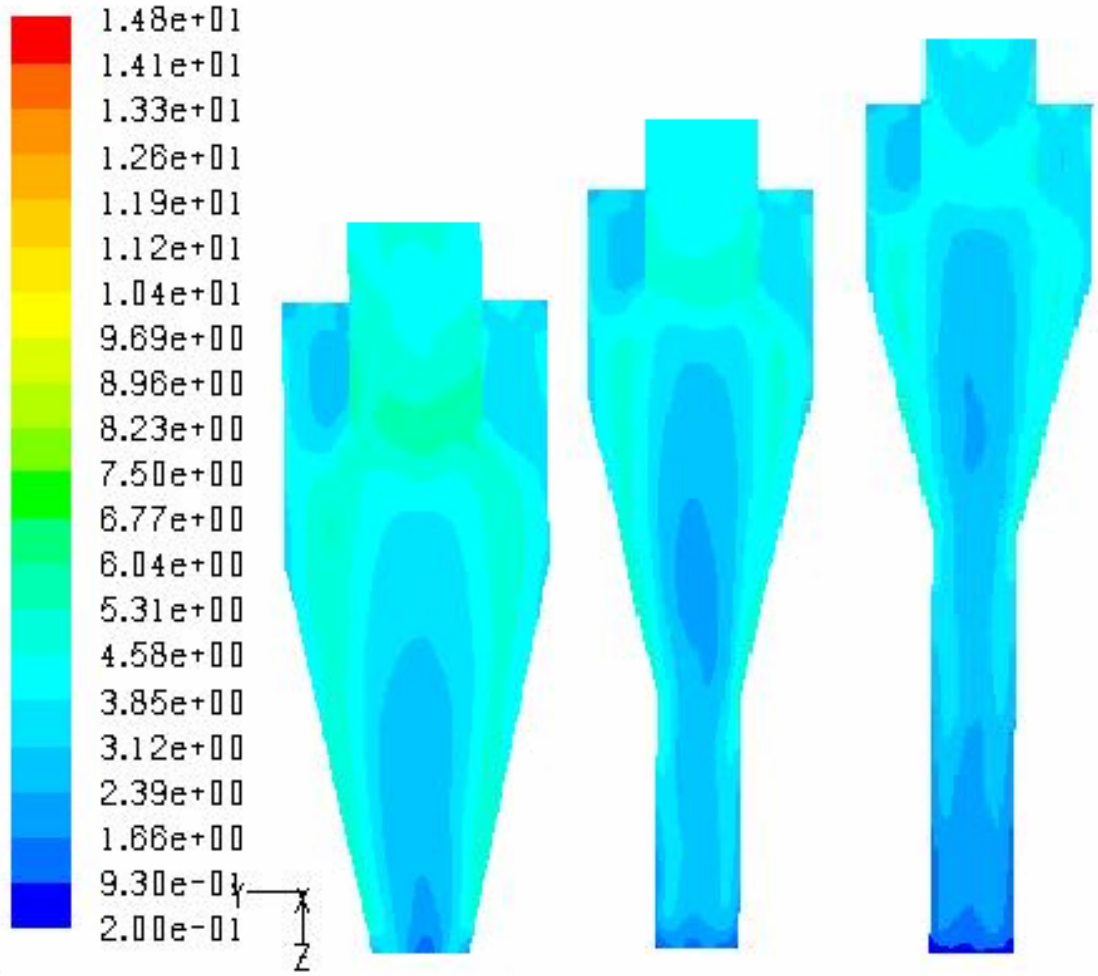


Şekil 4.43. 8 m/s giriş hızı ve  $L_d=0, 40, 80$  mm için elde edilen (C2) aksenal hız konturları



Şekil 4.44. 12 m/s giriş hızı ve  $L_d=0, 40, 80$  mm için elde edilen (C2) aksenal hız konturları

Şekil 4.39-4.44'den de görüldüğü üzere, toz kutusu giriş uzunluğu aksenal hız dağılımları üzerinde önemli bir etki yapmaktadır. Duvar boyunca santrifüj kuvvetlerin etkisi altındaki partiküllerin toz kutusuna ulaştırılmasını sağlayan aşağı yönde bir vorteks bölgesi oluşmaktadır. Merkezde oluşan ikinci vorteks ise yukarı yöndedir. Toz kutusu giriş uzunluğunun etkileri dış vorteks bölgesinde ihmal edilebilmektedir. Ancak, akıştaki dönüm noktaları kaybolmakta ve yukarı yöndeki akış hızı artmaktadır. Yukarı yöndeki bu hız artışı akışın aşağıya tam inmeden iç vortekse dahil olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Benzer davranışlar türbülans kinetik enerjisinde de gözlenmektedir (şekil 4.45, C1 siklonu için).

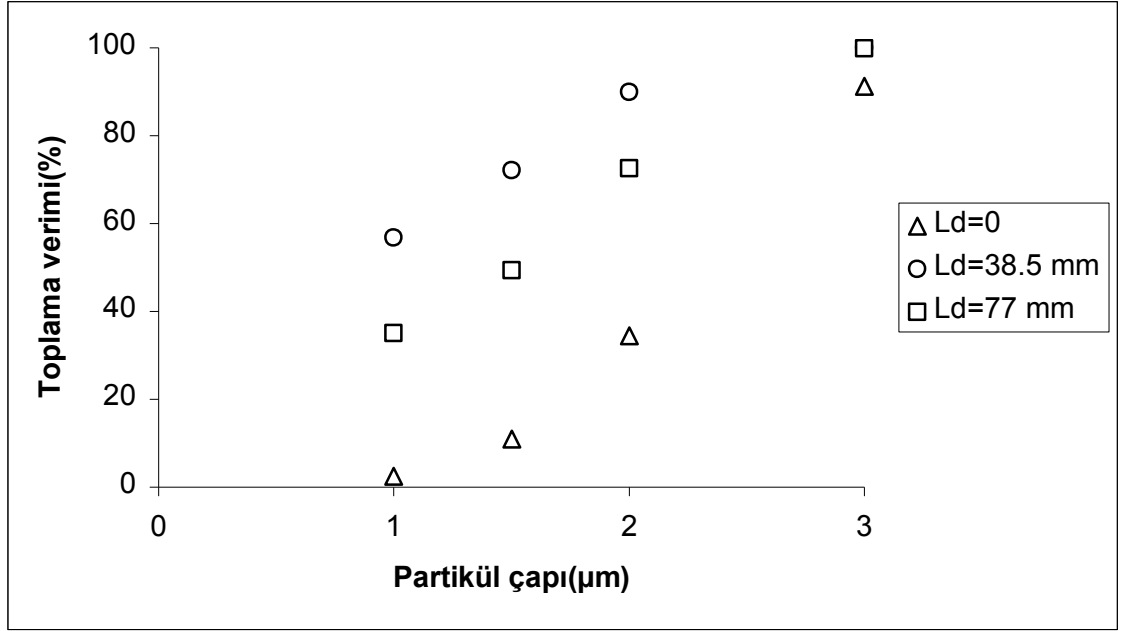


Şekil 4.45. 16 m/s giriş hızı ve  $L_d=0, 38.5, 77$  mm için elde edilen (C1) türbülans kinetik enerjisi konturları

Beklendiği gibi, siklonun dip kısmında düşük türbülans kinetik enerjisi alanı toz giriş uzunluğunun artmasıyla artmaktadır. Konik kısımdaki düşük türbülans kinetik enerjisi durumu partiküllerin tekrar girişini engelleyecek ve ayrıştırmayı iyileştirecek bir neden olarak yorumlanabilir.

#### 4.3.1.3 Normal ve uzatılmış siklonların performans analizi

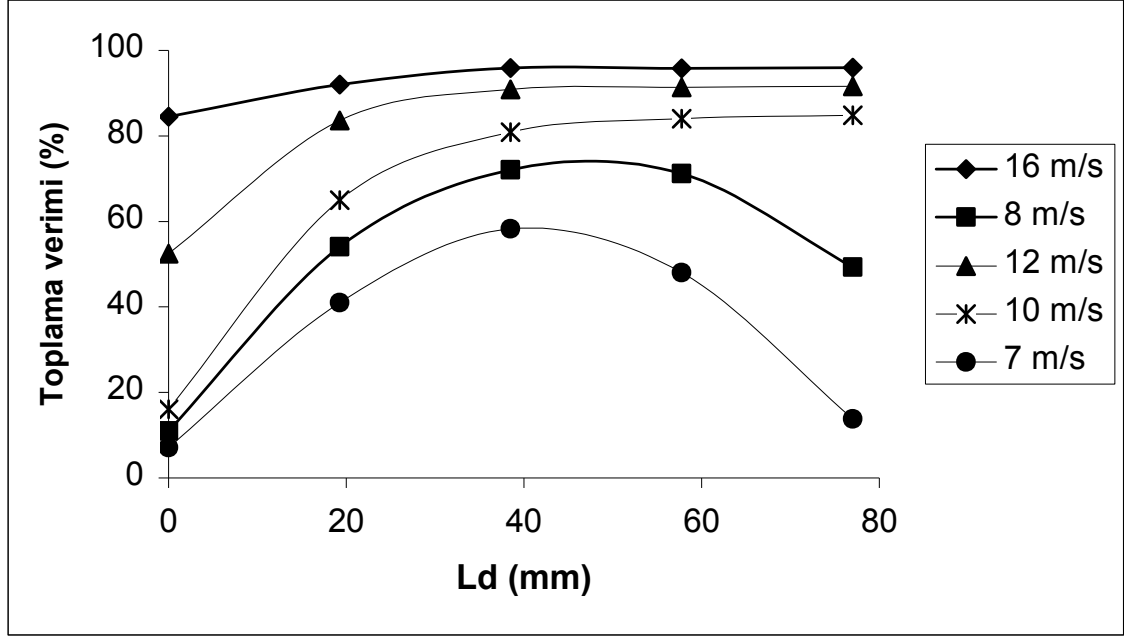
Şekil 4.46'da 8 m/s için C1 siklonuna ait farklı toz giriş uzunluklarında partikül toplama verim eğrileri verilmiştir.



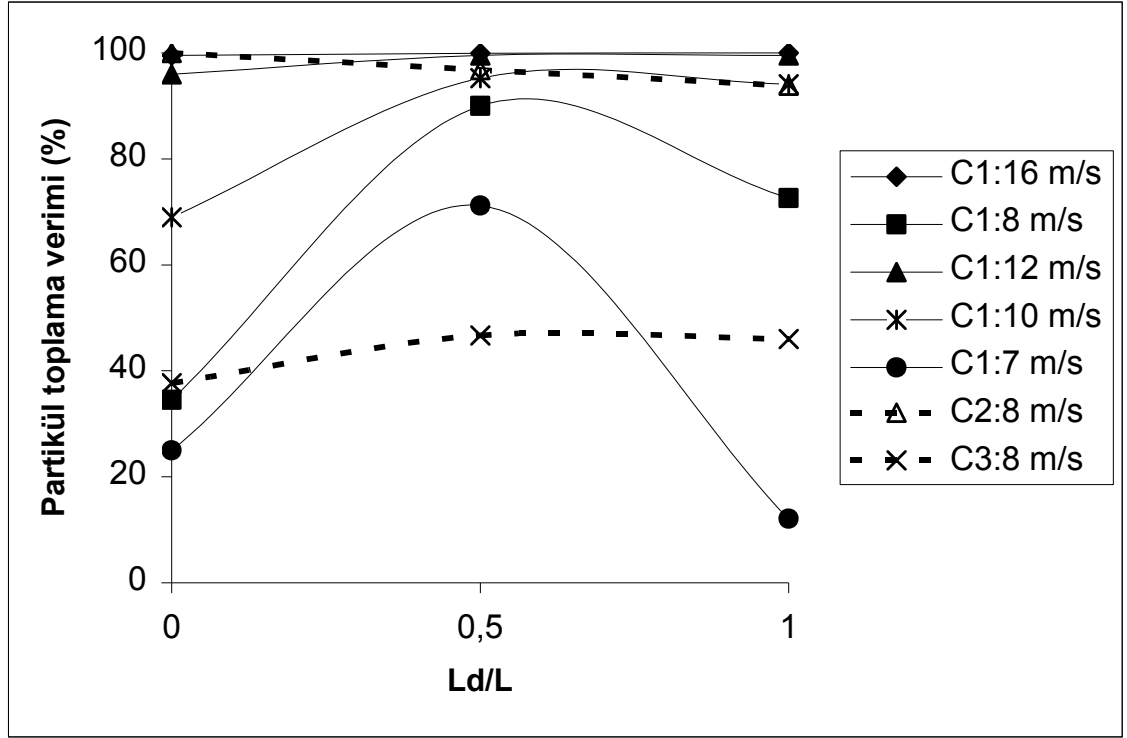
Şekil 4.46. 8 m/s giriş hızı için farklı toz giriş uzunluklarında elde edilen (C1) toplama verimleri

Toz giriş uzunluğunun partikül toplama verimini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Uzatılmış siklon ile ayrıştırma veriminin artırılması için önemli olan ayrıştırma bölgelerini artırılabilir. Ancak, tüm hız ve partikül çapları için elde edilen nümerik sonuçlar konik kısımda düşük türbülans enerjisi yüzünden en iyi verimin toz giriş uzunluğunun yarısı kadar olduğu durumda elde edildiğini göstermiştir. Bunun başka bir nedeni, doğal vorteks uzunluğundan kaynaklanıyor olabilmektedir. Dipleg uzunluğu siklon boyunun yarısı kadar olduğu durumda yüksek partikül toplama verimine neden olan vorteks ucunun yeri dipleg'in en alt kısmına kadar ulaşmaktadır. Dipleg uzunluğunun siklon boyu kadar olması durumunda ise vorteks ucunun yeri dipleg'in alt kısımlarına kadar ulaşmamaktadır. Bunun neticesinde, ayrıştırılan partiküllerin tekrar girmesi durumu ortaya çıkmakta ve partikül toplama verimi düşmektedir.

1.5  $\mu\text{m}$  partikül çapı için farklı giriş hızında C1 siklonu için hesaplanan verimler şekil 4.47’de ve 2  $\mu\text{m}$  partikül çapında üç siklon modeli için farklı giriş hızlarında ve dipleg uzunluklarında elde edilen toplama verimleri şekil 4.48’de verilmiştir.



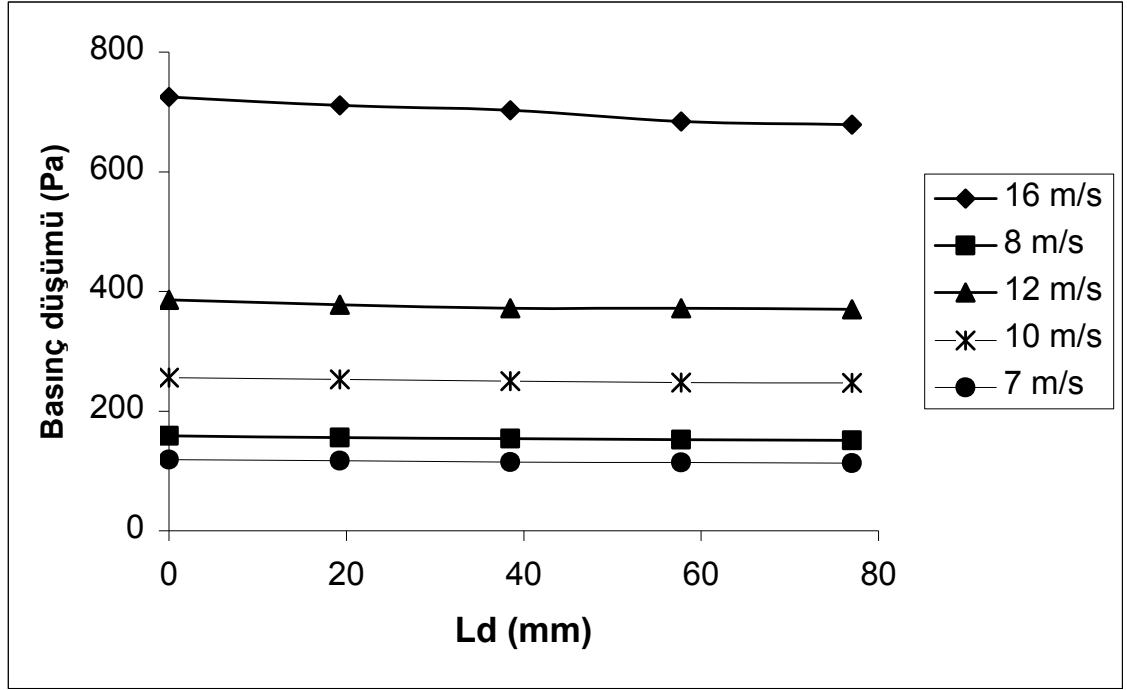
Şekil 4.47. 1.5  $\mu\text{m}$  partikül çapı için C1 siklonunda farklı giriş hızlarında  $L_d$  uzunluğunun partikül toplama verimi üzerinde etkisi



Şekil 4.48. 2 µm partikül çapı için farklı giriş hızlarında  $L_d$  uzunluğunun partikül toplama verimi üzerinde etkisi

C1 ve C3 siklonları için toplama verimlerindeki artış toz giriş uzunluğunun yaklaşık siklon boyunun yarısı kadar mesafede olduğu görülmektedir. C2 siklonunda ise benzer hızlarda toz giriş uzunluğunun artırılması ile toplama verimlerinde bir azalma olmaktadır. Bunun nedeni  $L/D$  oranlarından kaynaklanmaktadır. C1 siklonunda  $L/D$  oranı 2.48 iken C3 siklonunda bu oran 3.35 ve C2 siklonunda ise 4'dür. Benzer hızlarda siklonun yarısı kadar C1 ve C3 siklonunda dipleg ilavesi C2 siklonunun dipleg ilave edilmeden  $L/D$  oranına yaklaşık karşılık gelmekte ve toplama verimleri artmaktadır. C1 ve C3 siklonlarında tüm partikül çapları için herhangi bir toz giriş uzunluğunda giriş hızının artmasıyla partikül toplama veriminin arttığını göstermektedir. Benzer sonuçlar diğer partikül çaplarında da gözlenmiştir. Ancak, C1 ve C3 siklonlarındaki dipleg ilavesi ile artış C2 siklonunun dipleg ilave edilmeden  $L/D$  oranına karşılık gelmektedir. Bu nedenle, optimum siklon boyu ve çapı arasındaki oran  $L/D=4$  olarak tanımlanabilir. Şekil 4.49'da C1 siklonuna ait toz giriş uzunluğunun basınç düşümü üzerinde olan etkileri verilmiştir.

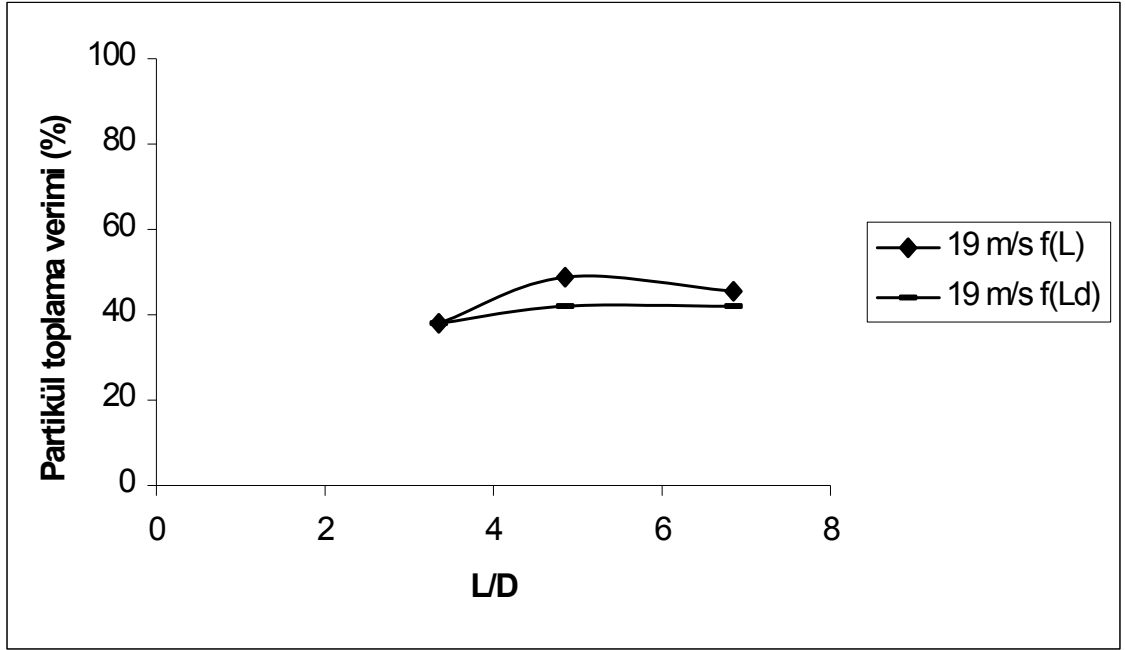




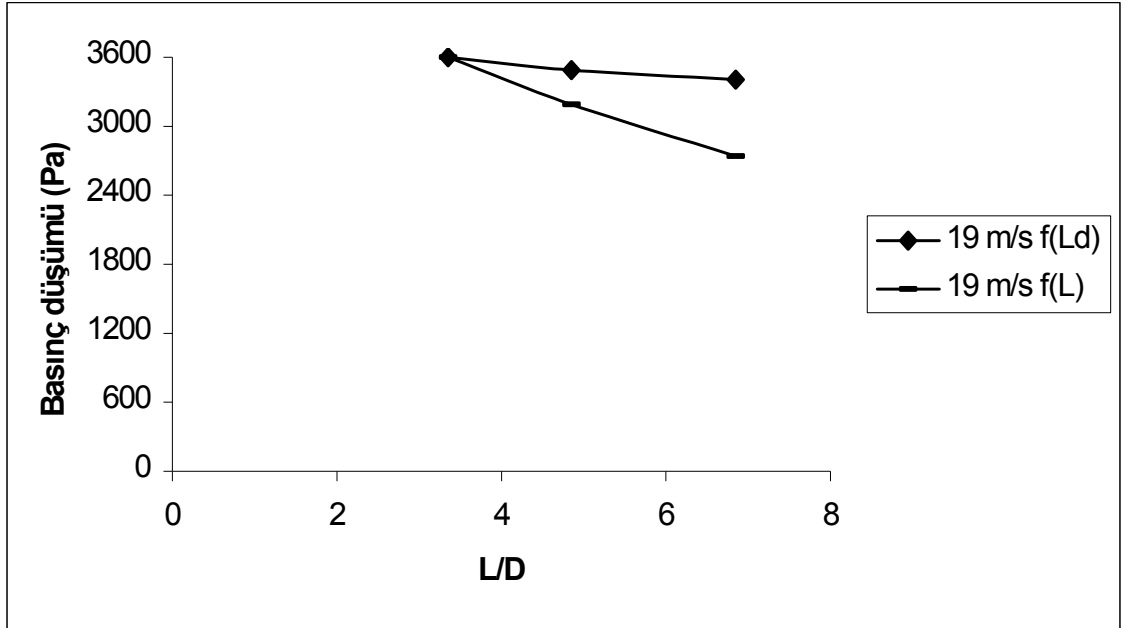
Şekil 4.49. Farklı giriş hızlarında C1 siklonu için  $L_d$  uzunluğunun basınç düşümü üzerinde etkisi

Toz giriş uzunluğunun partikül toplama verimi üzerinde önemli etkileri olmasına rağmen basınç düşümü üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilir oranda olduğu görülmektedir. Toz giriş uzunluğunun artması duvar yüzeylerindeki sürtünmeleri azaltmakta ve teğetsel hızı da azaltmaktadır. Bu nedenle, basınç düşümü toz giriş uzunluğunun artmasıyla yüksek hızlarda çok az bir miktarda azalırken düşük hızlarda ise hemen hemen aynı kalmaktadır (şekil 4.49). Ayrıca, giriş hızının artması basınç düşümünde artışa neden olduğu açıkça görülmektedir. Benzer sonuçlar C2 ve C3 siklonlarında da elde edilmiştir.

Siklon boyunun, boyunca veya dipleg ile uzatılması durumları C3 siklonunda incelenmiş ve elde edilen toplama verimleri ve basınç düşümleri şekil 4.50 ve 4.51'de verilmiştir.



Şekil 4.50. C3 siklonunda 19 m/s giriş hızı ve 1  $\mu$ m partikül çapı için L/D oranlarının dipleg veya boyunun uzatılması durumlarında elde edilen partikül toplama verimlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.51. C3 siklonu için 19 m/s giriş hızında L/D oranlarının dipleg veya boyunun uzatılması durumlarında elde edilen basınç düşümlerinin karşılaştırılması

C3 siklonunda L/D oranı 3.35 olduğu için dipleg veya boyunun uzatılması ile toplama verimlerinde artış olmaktadır. Bu çalışmada, L/D oranı olarak 4 önerilmektedir. C3 siklonunda yaklaşık L/D=4.85 olması durumunda toplama verimi maksimum olmaktadır ve değerden sonra her iki uzatma durumları için giriş hızına bağlı olarak ya azalmakta yada sabit kalmaktadır. Siklon boyunun uzatılması dipleg ile uzatmaya göre toplama verimlerinde daha uygun olduğu sonuçlardan görülmektedir. Boyunun uzatılmasının dipleg ile uzatmaya göre basınç düşümlerinde daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, şekil 4.33'de verilen aynı kesitteki teğetsel hız profilleri incelenirse siklon boyunun uzatılması ile teğetsel hız profillerinde azalma olmaktadır. Böylelikle sürünmeler azalmakta ve basınç düşümünde azalma olmaktadır. Partikül toplama verimindeki artışın nedeni ise, doğal vorteks ucunun siklonun daha aşağı kısımlarına ulaşması ve ayrışma bölgelerindeki artma olarak yorumlanabilir.

Sonuçlardan L/D oranları 4'den küçük olan siklonların boyunca uzatılmasının uygun olduğu görülmektedir. Ancak, her zaman siklon boyunun uzatılması çalışma şartları açısından uygun olmayabilmektedir. Bu durumlarda siklonun dipleg ile uzatılmasının hem basınç düşümü hemde partikül toplama verimi açısından uygun olduğu görülmektedir.

#### 4.3.1.4 Değerlendirme

Bu çalışmada normal ve uzatılmış siklonların partikül tutma verimleri ve akış karakteristikleri incelenmiştir. Partikül tutma verimleri ve akış karakteristikleri toz giriş uzunluğu veya siklon boyu değiştirilerek üç farklı siklon modelinde ele alınmıştır.

L/D oranı 4'den küçük olan siklonlarda ayrıştırma veriminin akış çiftlerinde değişmeye neden olan toz giriş uzunluğunun veya siklon boyunun uzatılması ile iyileştirilebileceği sonuçlardan görülmektedir. Siklonda teğetsel hız ve türbülans kinetik enerjisi toz giriş uzunluğunun ve boyunun artmasıyla azalmaktadır. Ancak, toz giriş uzunluğu veya boyu çok fazla uzatılırsa iç vortekse kısa yoldan giren akış oranı artar ve buda orta bölümdeki eksenel hızın artmasına sebep olur.

Toz giriş uzunluğunun artmasıyla duvar yüzeylerinde sürtünme azalmakta ve teğetsel hız bir miktar düşmektedir. Böylece, özellikle yüksek hızlarda basınç düşümündeki azalma olmaktadır. Ancak, siklon boyunun artmasıyla teğetsel hızlarda

azalma meydana gelmekte ve duvar yüzeylerinde sürtünmeler azalmakta dolayısı ile de basınç düşümlerinde önemli miktarda azalma olmaktadır.

Vorteks'in uç kısmının altında kalan kısımdaki düşük teğetsel hızlar dipleg'in veya siklonun alt kısmına doğru basınç değerlerinde azalmaya neden olmaktadır. En uzun dipleg veya siklon boyu uzunluğu için alt kısımlarda hemen hemen sabit olan radyal basınç vorteks ucunun en alt kısma ulaşmadığına bir işarettir.

Sonuçlardan L/D oranları 4'den küçük olan siklonların boyunca uzatılmasının uygun olduğu görülmektedir. Ancak, her zaman siklon boyunun uzatılması çalışma şartları açısından uygun olmayabilmektedir. Bu durumlarda siklonun dipleg ile uzatılmasının hem basınç düşümü hemde partikül toplama verimi açısından uygun olduğu görülmektedir.

#### **4.3.2. Siklonlarda Pürüzlülük Etkisinin Nümerik Olarak İncelenmesi**

Siklondaki akış olayını nümerik olarak analiz edebilmek için Bölüm 3'de vurgulanan türbülans modeller, duvar fonksiyonları ve şemaların uygunluğu Bölüm 4.2.1 ve Bölüm 4.2.2'de doğrulandığı şekilde kullanılmıştır. Siklondaki akış ve çalışma parametrelerinden çift fazlı akış uygulamalarının müsaade ettiği önemli parametreler incelenmiştir. Çift fazlı akış uygulamalarında pürüzlülük etkisini incelemek amacıyla ilk olarak Bölüm 4.3.1'de nümerik tekniği doğrulanan siklon ele alınmıştır.

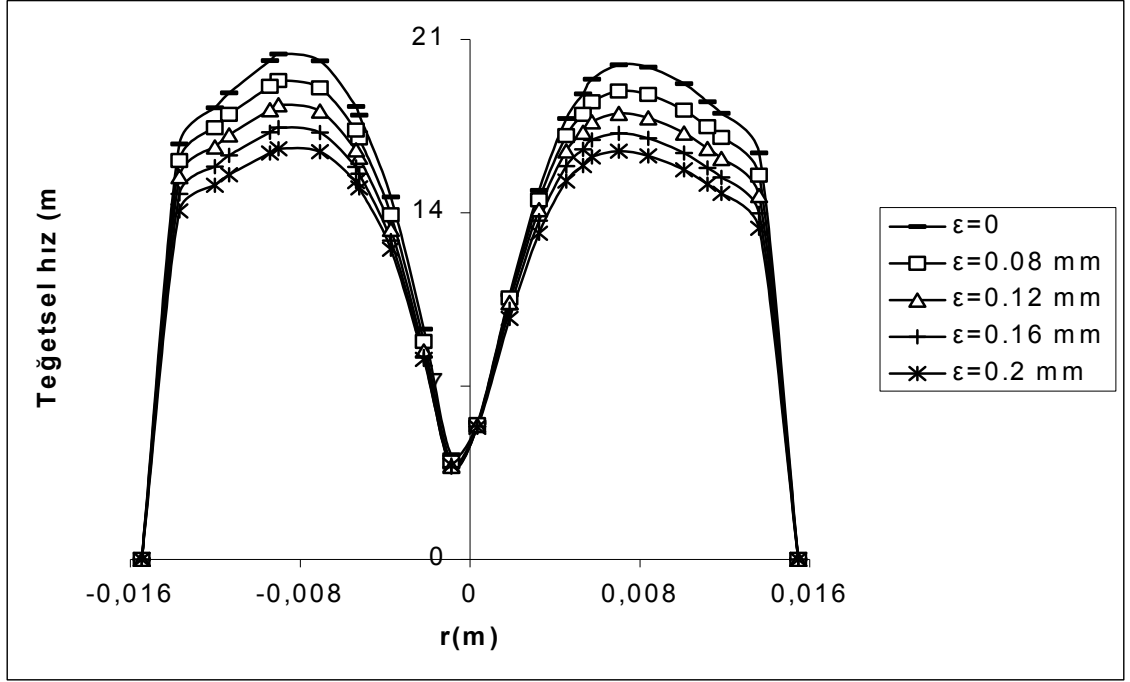
Siklon ayırıştırıcılarında ilgili literatürde önemi vurgulanan ancak eksik bırakılan siklon yüzey pürüzlülüğünün akış karakteristiklikleri ve partikül toplama verimi üzerinde etkileri incelenmiş ve yüzeylerde müsaade edilebilen pürüzlülük kalınlığı tespit edilmiştir.

##### **4.3.1.2 Sonuçlar ve Analiz**

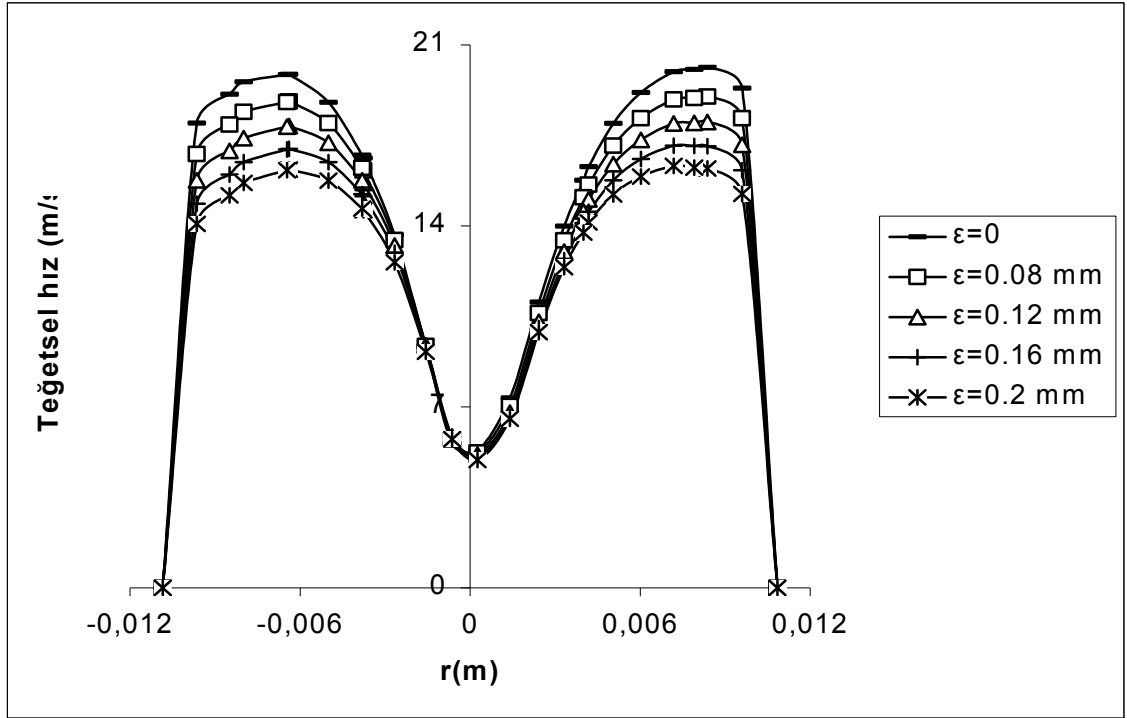
Nümerik çözümler ilgili literatür (Chuah-Gimbun) dikkate alınarak 7-30 m/s giriş hızında ve 0.75 ile 3 µm arasındaki partikül çaplarında yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü 0.08-0.2 mm arasında değiştirilmiştir.

#### 4.3.2.2 Yüzey pürüzlülüğüne sahip siklonlarda hız alanlarının incelenmesi

16 m/s için farklı yüzey pürüzlülüklerindeki siklonlarda  $z=30$  ve  $53$  mm'deki teğetsel hız profilleri şekil 4.52 ve 4.53'de verilmiştir.



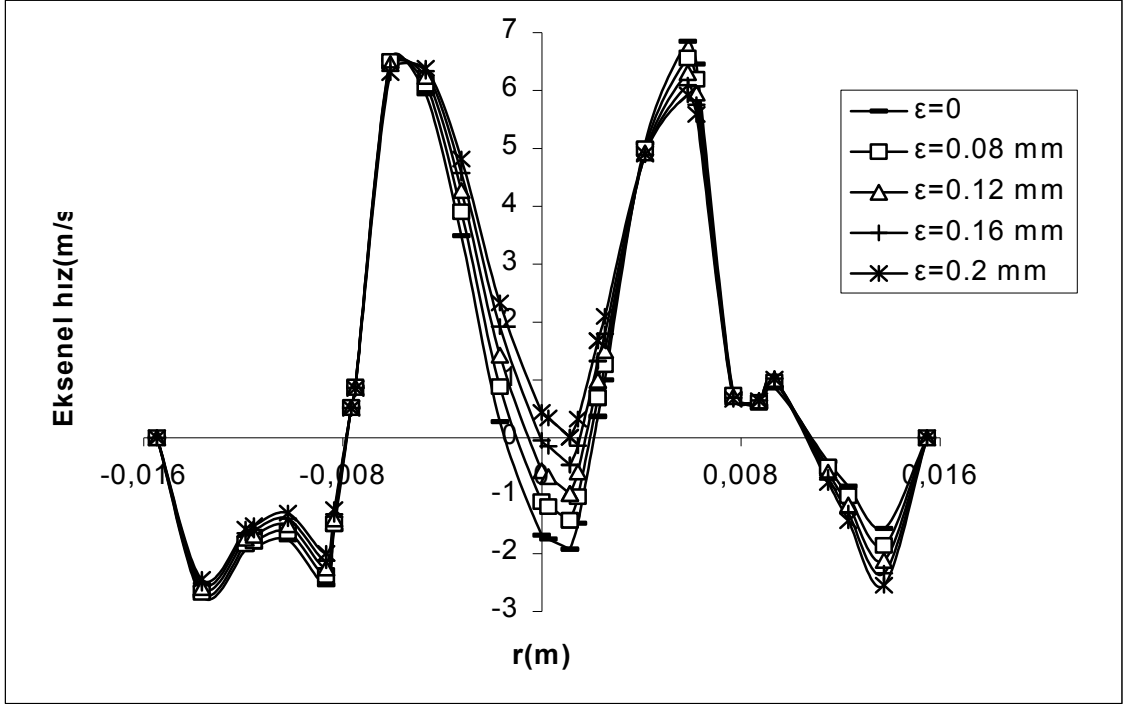
Şekil 4.52. 16 m/s giriş hızı ve  $z=0.03$  m için teğetsel hız profillerinin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi



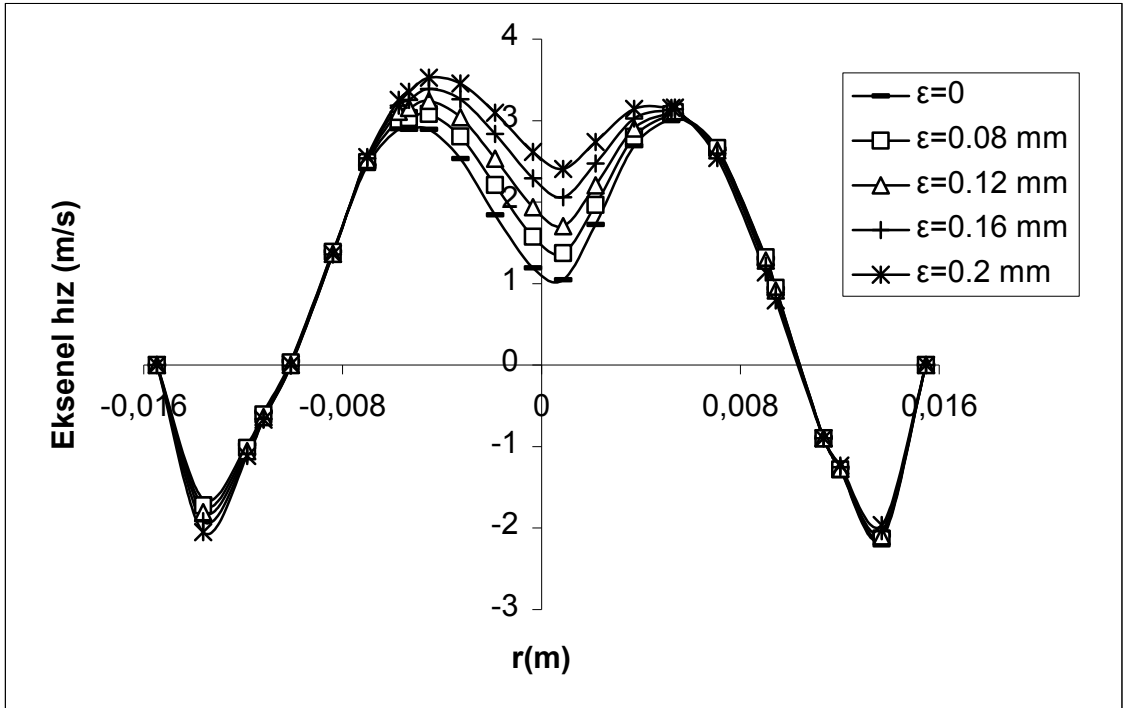
Şekil 4.53. 16 m/s giriş hızı ve z=0.053 m için teğetsel hız profillerinin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi

Şekil 4.52 ve 4.53'den görüldüğü üzere, maksimum teğetsel hız profilleri yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla azalmaktadır. Bu durum yüzey pürüzlülüğünün oluşan santrifüj kuvvet üzerinde etkili olarak teğetsel hızın azalmasına neden olduğu şeklinde yorumlanmaktadır. Elde edilen sonuçlardan açık olarak yüzey pürüzlülüğü teğetsel hız üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu görülmektedir.

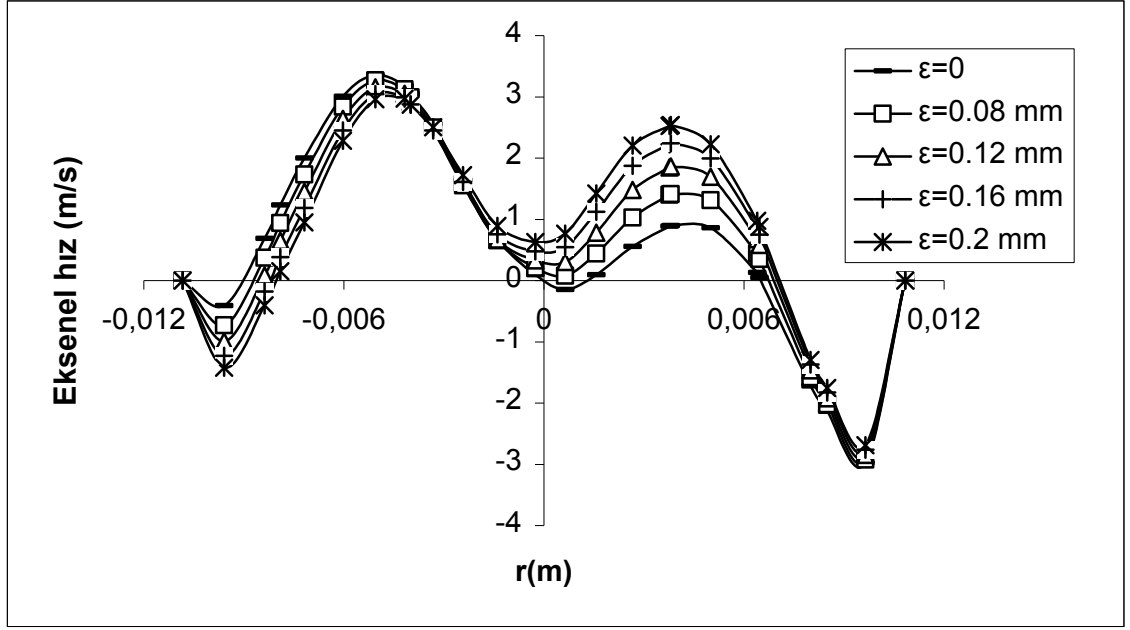
Şekil 4.54-4.57'de 16 m/s için farklı yüzey pürüzlülüklerindeki siklonlarda z=16, 30, 53 ve 76 mm'deki eksenel hız profilleri verilmiştir.



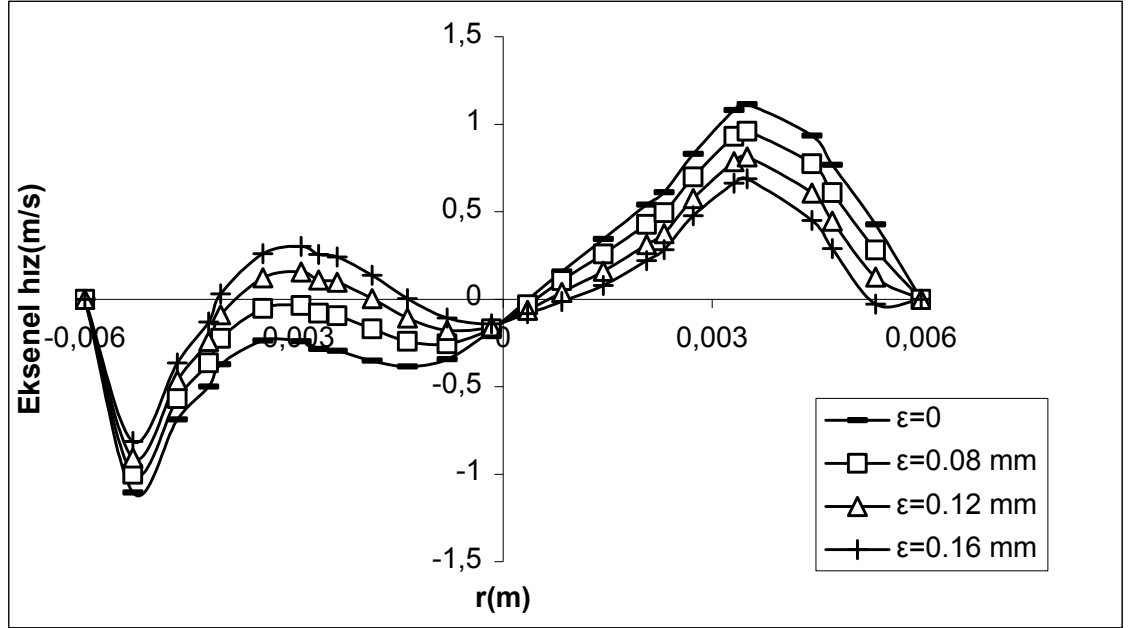
Şekil 4.54. 16 m/s giriş hızı ve  $z=0.016$  m için eksenel hız profillerinin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi



Şekil 4.55. 16 m/s giriş hızı ve  $z=0.03$  m için eksenel hız profillerinin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi



Şekil 4.56. 16 m/s giriş hızı ve  $z=0.053$  m için eksenel hız profillerinin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi



Şekil 4.57. 16 m/s giriş hızı ve  $z=0.076$  m için eksenel hız profillerinin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi

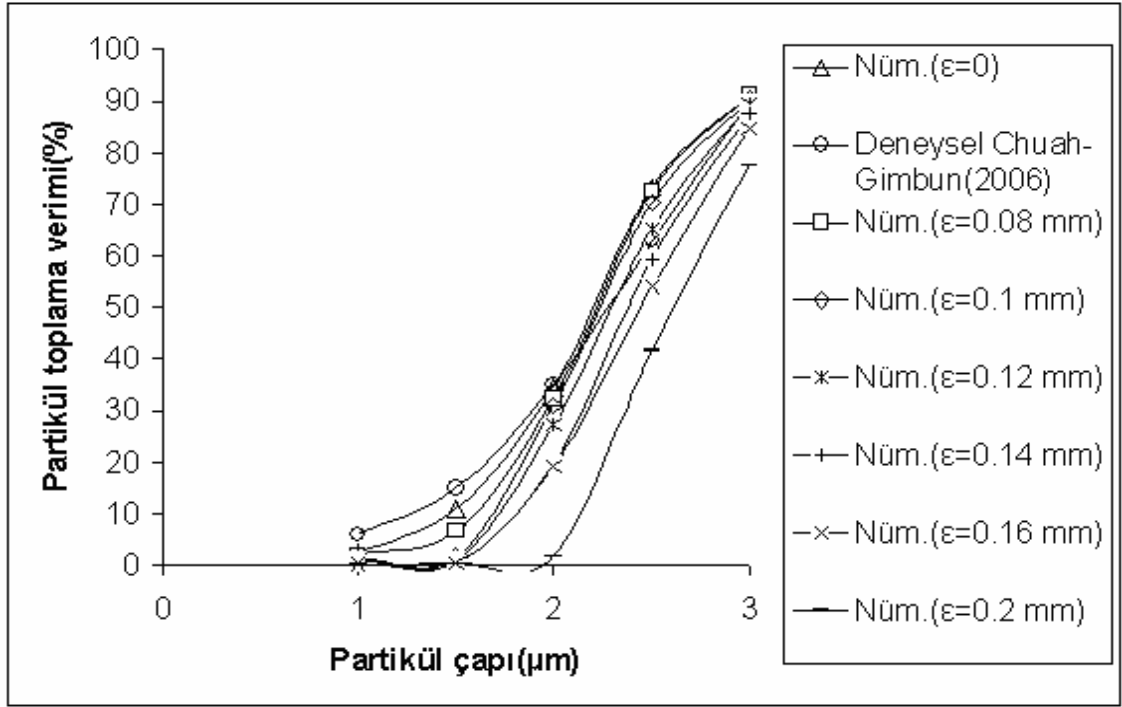


Şekil 4.54-4.57'den görüldüğü üzere, yüzey pürüzlülüğünün aksenal hız dağılımları üzerinde önemli bir etki yapmaktadır. Duvar boyunca santrifüj kuvvetlerin etkisi altındaki partiküllerin toz kutusuna ulaştırılmasını sağlayan aşağı yönde bir vorteks bölgesi oluşmaktadır. Merkezde oluşan ikinci vorteks ise yukarı yöndedir. Şekil 4.54 ve 4.55'de silindirik kısımdaki ( $z=0.016$  ve  $0.03$  m) ve şekil 4.56 ve 4.57'de konik kısımdaki ( $z=0.053$  ve  $0.076$  m) aksenal hız profilleri karşılaştırılmıştır. Merkezde oluşan ikinci girdapta aksenal hız değerlerinde yüzey pürüzlülüğü arttığı zaman artma olmaktadır. Yukarı yöndeki bu hız artışı akışın aşağıya tam inmeden iç vortekse dahil olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

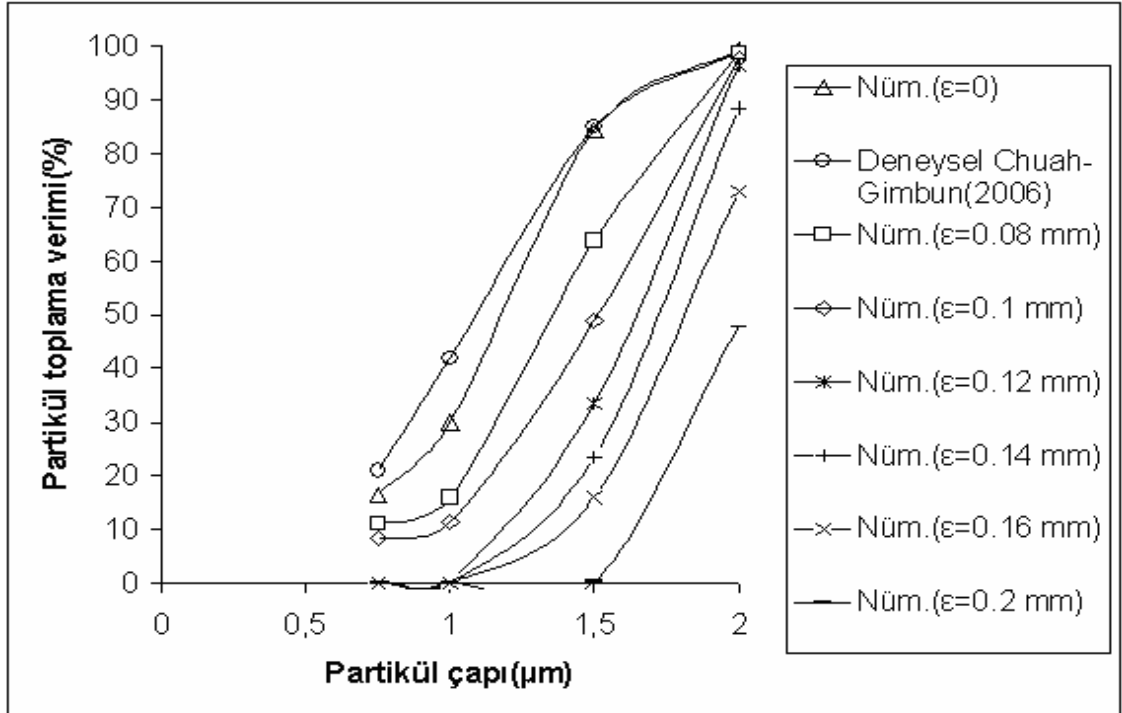
Teğetsel ve aksenal hızlar üzerinde yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde etki yapmaktadır. Teğetsel hız değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün artması ile azalma olması aksenal hızlarda ise iç girdapta artış görülmesi santrifüj kuvvetlerin azalmasına ve dolayısıyla da iyi bir ayırıştırma elde edilememesine neden olduğu şeklinde yorumlanabilir.

#### **4.3.2.3 Pürüzlü yüzeylere sahip siklonların performans analizi**

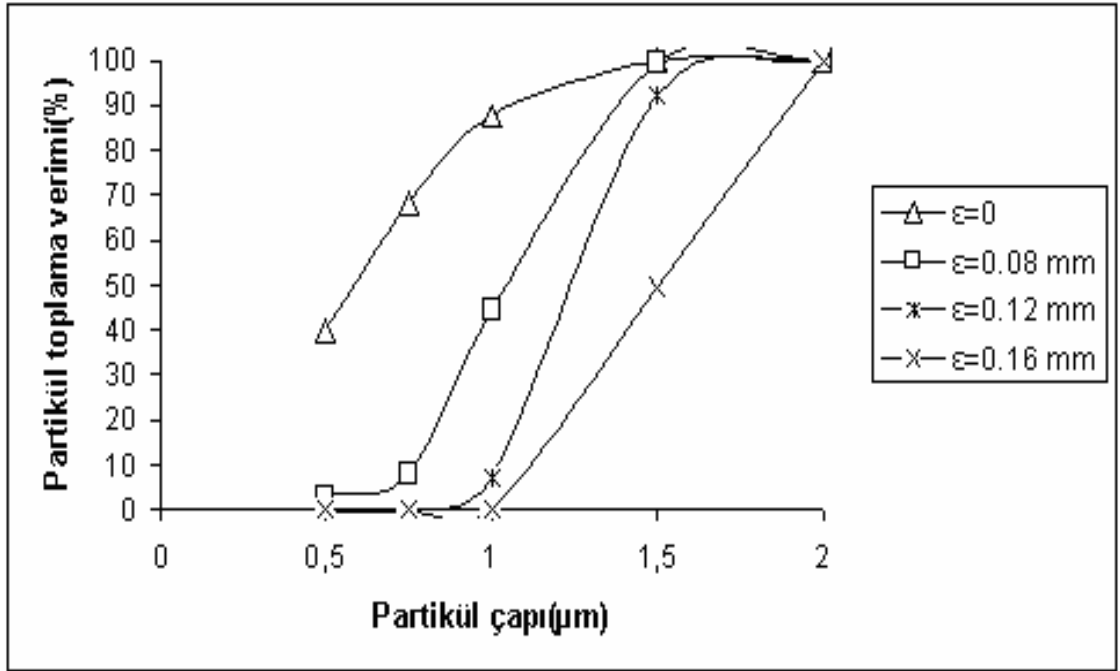
Şekil 4.58-60'da 8, 16 ve 30 m/s giriş hızları için farklı yüzey pürüzlülüklerindeki siklonun partikül toplama verimi eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.58. 8 m/s giriş hızı için farklı yüzey pürüzlülüklerinde partikül toplama verimleri



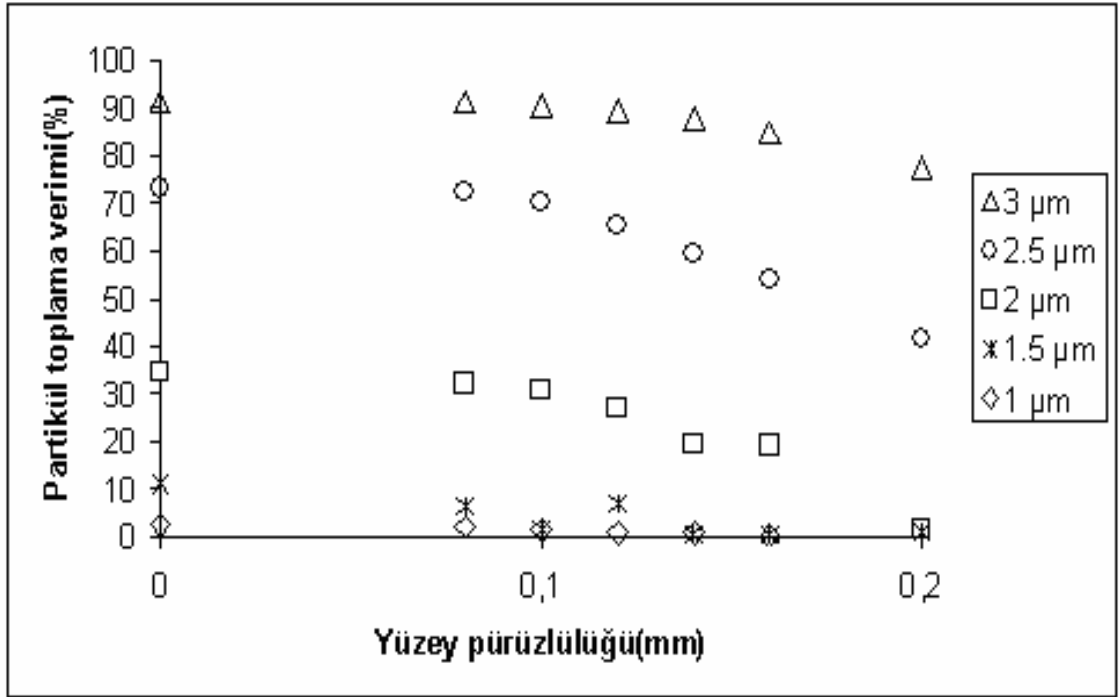
Şekil 4.59. 16 m/s giriş hızı için farklı yüzey pürüzlülüklerinde partikül toplama verimleri



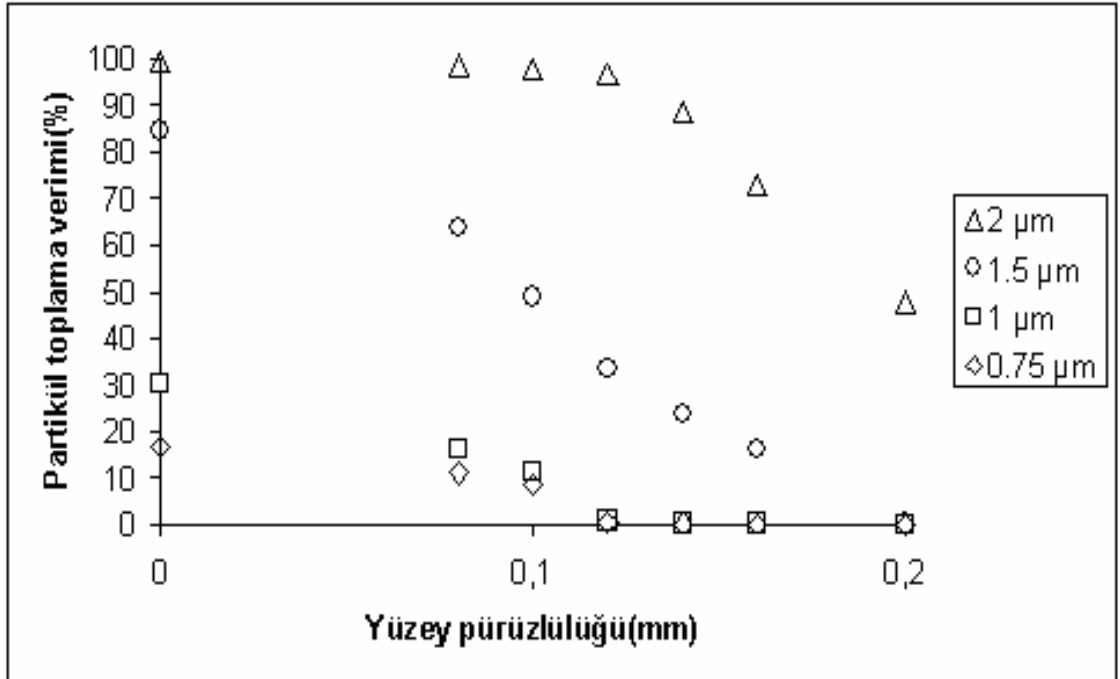
Şekil 4.60. 30 m/s giriş hızı için farklı yüzey pürüzlülüklerinde partikül toplama verimleri

Yüzey pürüzlülüğünün partikül toplama verimini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Siklon ayırıştırıcısında yüzey pürüzlülüğünün artırılması oluşan santrifüj kuvvetlerin azalmasına ve dolayısıyla teğetsel hız bileşeninin azalmasına neden olur. Silindirik ve konik kısımlarda farklı kesitlerde alınan teğetsel hız profillerindeki değişim bu durumu açık olarak ifade etmektedir. Bu durumda doğal vorteks uzunluğunda bir kısalma meydana gelmektedir. Böylelikle, silona giren akışkan koni ucuna kadar ulaşmadan oluşan iç girdaba katılmakta ve ayırıştırma veriminde bir kötüleşme meydana gelmektedir. Farklı kesitlerde alınan aksenal hız profillerine dikkat edilirse yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla merkezde başka bir deyişle iç girdapta bir artış olduğu görülmektedir. Buda kötü bir ayırıştırmanın meydana geldiği şeklinde yorumlanabilir.

0.75-3 μm partikül çapları için 8 ve 16 m/s giriş hızlarında yaklaşık  $Re=3810$  ve  $Re=7620$  Reynolds sayılarında partikül toplama veriminin yüzey pürüzlülükleri ile değişimi aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

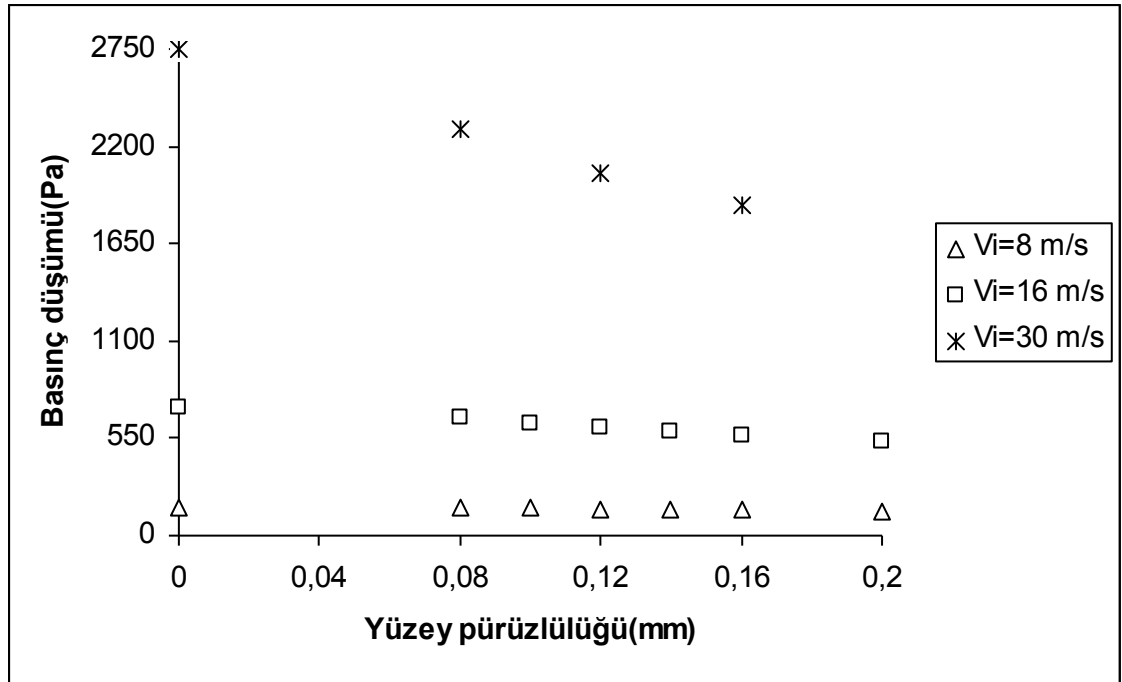


Şekil 4.61. 8 m/s giriş hızı için farklı çaplardaki partiküllerin toplama verimleri



Şekil 4.62. 16 m/s giriş hızı için farklı çaplardaki partiküllerin toplama verimleri

Şekillerden görüldüğü üzere, yüzey pürüzlülüğü ile partikül toplama verimi değişmektedir. Elde edilen sonuçlardan siklonlarda müsaade edilebilen maksimum yüzey pürüzlülüğünün 0.1 mm'ye bu kalınlık siklon giriş hidrolik çapına göre yaklaşık 0.0014 izafi pürüzlülük değeri ile genelleştirilerek kadar olabileceği söylenebilir. Sonuçlar farklı giriş hızlarında ve partikül çaplarında elde edilmiş ve tüm hız ve partikül çapları için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar tüm partikül çapları için herhangi bir yüzey pürüzlülük değerinde giriş hızının artmasıyla partikül toplama veriminin arttığını göstermektedir. Bu nedenle, siklonun yüzey pürüzlülüğüne dikkat edilmeli ve yüzey pürüzlülük değerinin 0.1 mm'den küçük olması sağlanmalıdır. Şekil 4.63'de yüzey pürüzlülüğünün basınç düşümü üzerinde olan etkileri verilmiştir.



Şekil 4.63. Farklı giriş hızları için basınç düşümünün yüzey pürüzlülüğü ile değişimi

Farklı yüzey pürüzlülüklerinde ve farklı giriş hızlarında elde edilen basınç düşümü sonuçlarından basınç düşümünde yüksek giriş hızlarında daha fazla olmak üzere bir azalma olduğu şekil 4.63'den görülmektedir. Aynı zamanda, basınç düşümünün giriş hızının artmasıyla arttığı görülmektedir. Düşük giriş hızları için yüzey pürüzlülüğünün basınç düşümü üzerinde etkileri ihmal edilebilir. Yüksek giriş hızları için ise yüzey pürüzlülüğünün artması ile basınç düşümünde dikkate değer oranda bir azalma olmaktadır. Basınç düşümündeki bu azalma yüzey pürüzlülüğünün teğetsel hızı azaltması ile santrifüj etkilerin azalmasından kaynaklandığı şeklinde yorumlanabilir.

#### 4.3.2.4 Değerlendirme

Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğüne sahip siklonların partikül tutma verimleri ve akış karakteristikleri incelenmiştir. Partikül tutma verimleri ve akış karakteristikleri yüzey pürüzlülükleri değiştirilerek ele alınmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü partikül toplama verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Siklon ayırıştırıcısında yüzey pürüzlülüğünün artırılması oluşan santrifüj kuvvetlerin azalmasına ve dolayısıyla teğetsel hız bileşeninin azalmasına neden olur. Bu durumda doğal vorteks uzunluğunda bir kısalma meydana gelmektedir. Böylelikle, silona giren akışkan koni ucuna kadar ulaşmadan oluşan iç girdaba katılmakta ve ayırıştırma veriminde bir kötüleşme meydana gelmektedir. Eksenel hız profillerinde yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla merkezde başka bir deyişle iç girdapta bir artış olduğu görülmektedir. Buda kötü bir ayırıştırmanın meydana geldiği şeklinde yorumlanabilir.

Farklı yüzey pürüzlülüklerinde basınç düşümünde bir azalma olmaktadır. Basınç düşümündeki bu azalma yüzey pürüzlülüğünün teğetsel hızı azaltması ile santrifüj etkilerin azalmasından kaynaklanmaktadır.

Ayırıştırma verimi yüzey pürüzlülük değerinin artmasıyla azalmaktadır. Bunun nedeni, pürüzlülükle santrifüj kuvvetlerin azalmasıyla doğal vorteks uzunluğunun kısalmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, siklonlarda müsaade edilebilen maksimum yüzey pürüzlülüğünün 0.1 mm'ye bu kalınlık yaklaşık 0.0014 izafi pürüzlülük değeri ile genelleştirilerek kadar olabileceği söylenebilir.

#### 4.4. Deneysel Çalışma ve Nümerik Karşılaştırma

##### 4.4.1 Sonuçlar ve Değerlendirme

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar ve nümerik karşılaştırma aşağıda verilmektedir.

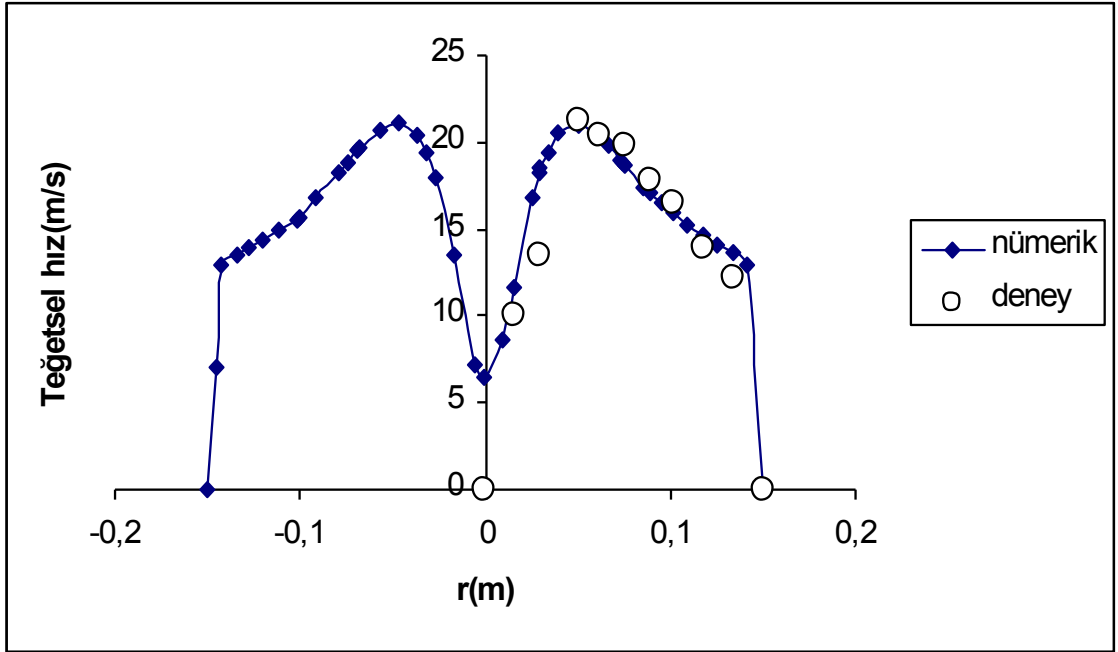
Çizelge 4.6. Deneysel ve nümerik çalışmada kullanılan siklon boyutları(mm)

a	b	D <sub>2</sub>	S	h	L	D <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>
45	145	120	200	720	970	90	300

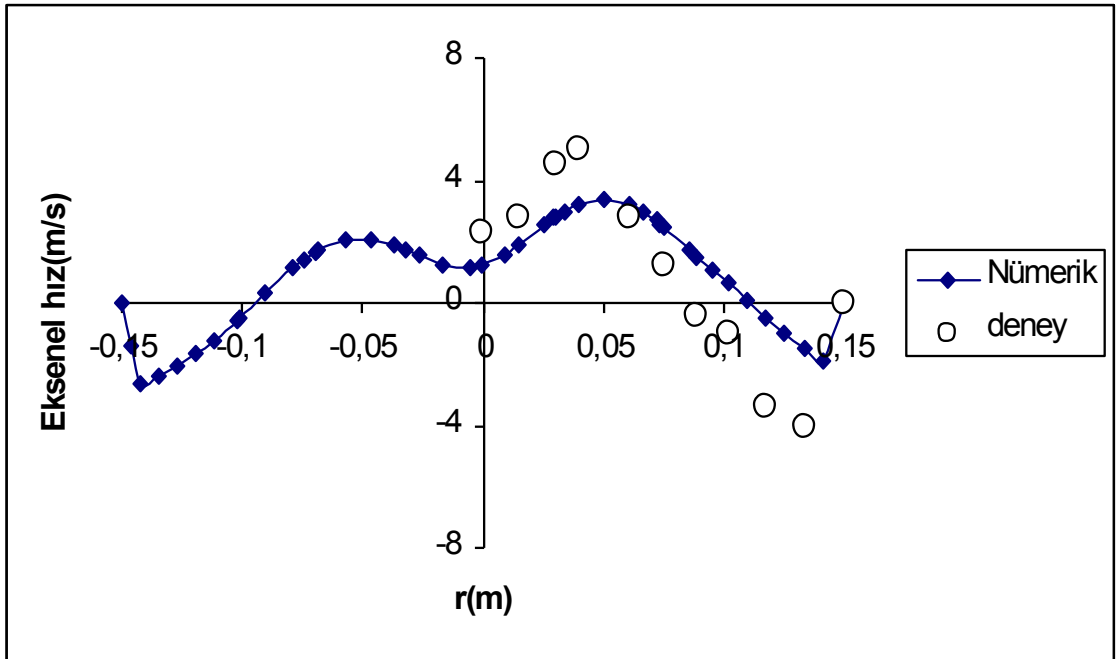
Siklon giriş ve çıkış arasındaki basınç farkı eğik manometre kullanılarak bulunmuştur. Siklon silindirik kısmın 520 mm mesafesine pitot tüpünün yerleştirilmesi için delik delinmiştir. Burada kullanılan pitot tüpü 520 mm'deki hız profillerini elde edebilmek amacıyla pitot tüpü toplam basınç deliği ile pitot tüpü yatay eksenini eşit mesafededir.

Pitot tüpü ile ölçüm yapmak için pitot tüpünü akış yönünde tutmak gerekmektedir. Ancak siklondaki akışın girdaplı olmasından dolayı akışın hangi yönde olduğu bilinmemektedir. Bu amaçla pitot tüpüne bir açı ölçeği bağlanmış ve pitot tüpü her defasında 10° döndürülerek akış yönü tespit edilmiştir. Bu ölçümler ölçüm alınan her istasyonda tekrarlanmıştır. Ayrıca deneysel sonuçların hassasiyeti açısından her debide 3 ölçüm alınarak elde edilen değerlerin ortalamaları ile sonuçlar elde edilmiştir.

Deneysel olarak. 6,5 ve 13 m/s siklon giriş hızlarında elde edilen sonuçlarla nümerik çözümden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

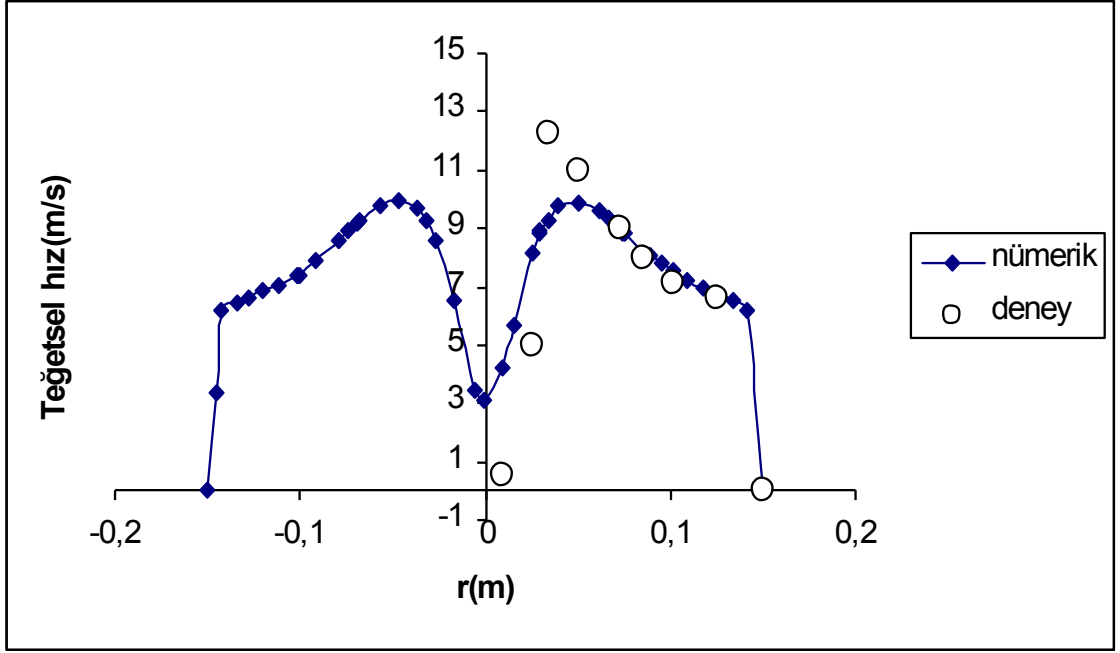


Şekil 4.64. 13 m/s siklon giriş hızı için  $z=0.52$  m'deki teğetsel hız profillerinin karşılaştırılması

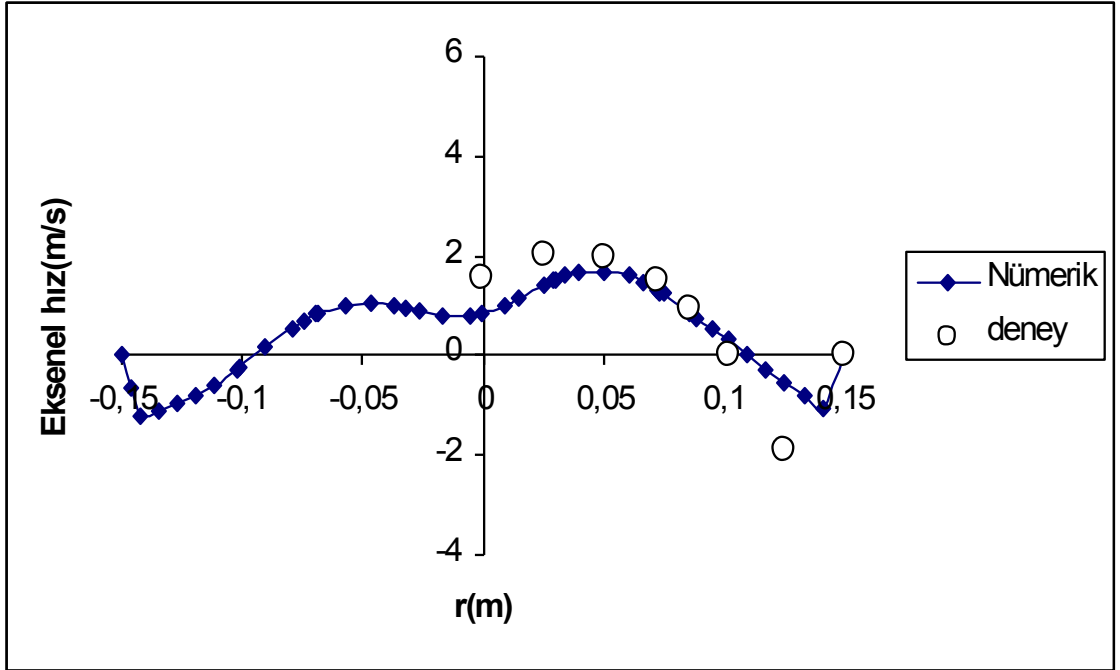


Şekil 4.65. 13 m/s siklon giriş hızı için  $z=0.52$  m'deki aksenal hız profillerinin karşılaştırılması

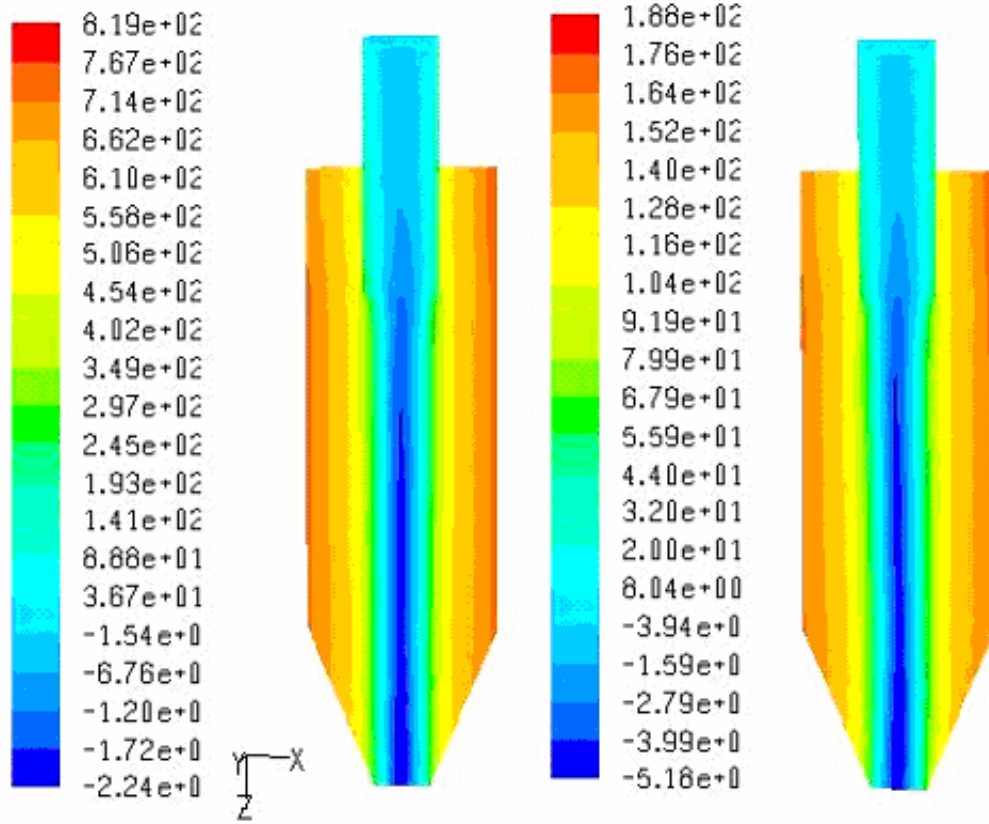




Şekil 4.66. 6.5 m/s siklon giriş hızı için  $z=0.52$  m'deki teğetsel hız profillerinin karşılaştırılması



Şekil 4.67. 6.5 m/s siklon giriş hızı için  $z=0.52$  m'deki aksel hız profillerinin karşılaştırılması



Şekil 4.68. 13 ve 6.5 m/s siklon giriş hızlarında basınç düşümü konturları

Şekil 4.64-4.68'de elde edilen deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Nümerik olarak elde edilen teğetsel ve eksenel hız profillerinin deneysel datalarla uyum içinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.68'de ise farklı giriş hızlarında nümerik olarak elde edilen basınç düşümü konturları verilmektedir. 13 m/s giriş hızı için elde edilen deneysel sonuç 864 Pa ve 6.5 m/s giriş hızı için ise 209 Pa olarak elde edilmiştir. Basınç düşümü için elde edilen nümerik sonuçlar ile deneysel datalar karşılaştırıldığında sonuçların uyum içinde olduğu görülmektedir. Giriş hızının artmasıyla basınç düşümünün arttığı sonuçlardan görülmektedir. Eksenel hız profilleri karşılaştırıldığında siklonun cidar kısmına yakın bölgelerde aşağı yönde bir akış oluşmakta merkez bölgesinde ise ikinci bir girdap bölgesi oluşmakta ve burada ise akış yönü yukarı yönde olmaktadır. Giriş hızının artmasıyla teğetsel hızın artması oluşan

santrifüj kuvvetleri arttırmakta ve dolayısıyla bu durum partiküllü uygulamalarda iyi bir ayırıştırmanın oluşmasına neden olarak partikül toplama veriminin artmasını sağlayacaktır. Aynı zamanda, giriş hızının artması doğal vorteks uzunluğunun artmasına neden olduğundan yine daha iyi bir ayırıştırma sağlayacaktır.

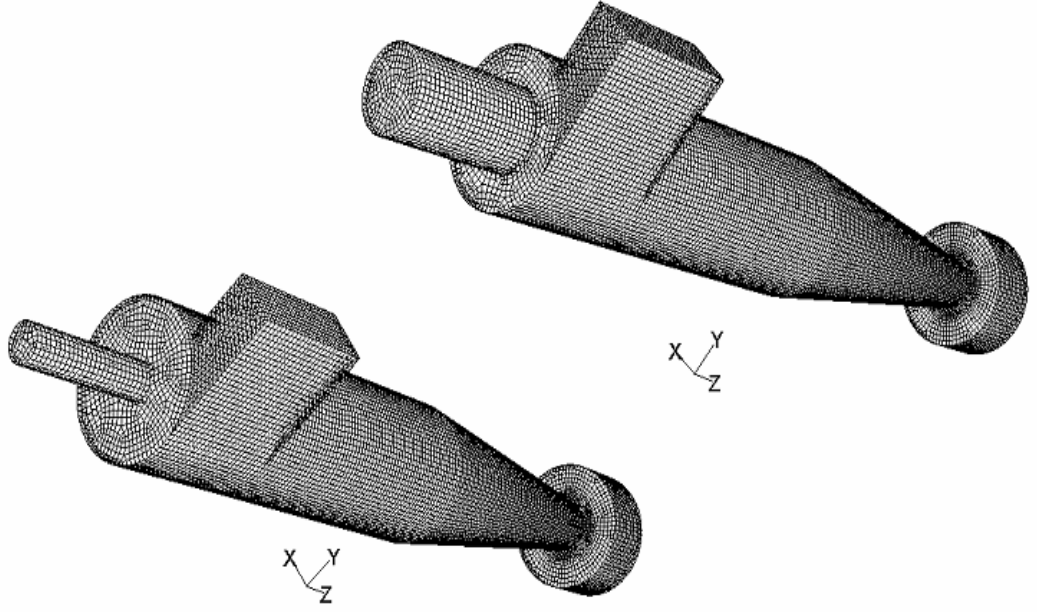
#### 4.4.2 Siklon Çıkış Borusu Etkisinin İncelenmesi

DeneySEL çalışmalar şekil 3.5’de gösterilen ve özel olarak imal edilmiş deney düzeneğinde devam etmiştir. Bu deney düzeneğine ait geometrik ölçülere ait değerler çizelge 4.7’de verilmiştir (Kaya, Karagöz; 2008).

Çizelge 4.7. DeneySEL ve nümerik çalışmada kullanılan siklon boyutları(mm)

a	b	D <sub>2</sub>	S	h	L	D <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>
70	175	47-101	85-120- 175- 285- 350	575	1045	75	190

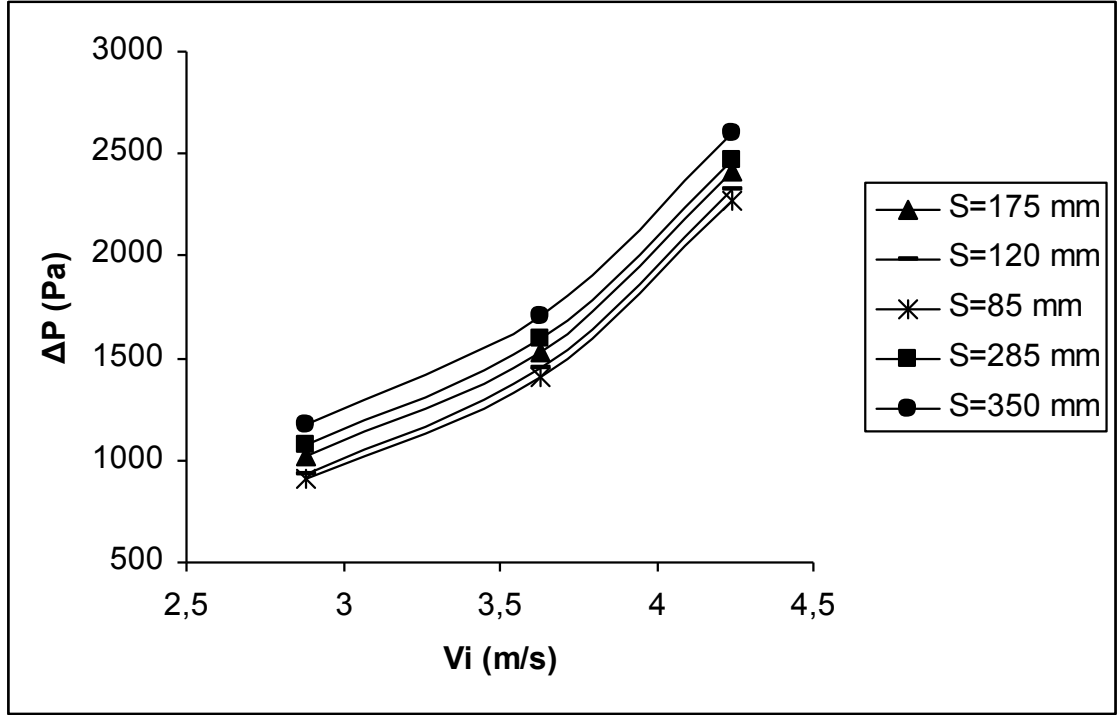
Siklon çıkış borusunun basınç düşümü, hız büyüklükleri gibi parametreler üzerinde etkileri deneySEL ve nümerik olarak incelenmiştir. Nümerik çözümlerde kullanılan siklona ait mesh yapıları şekil 4.69’da verilmiştir.



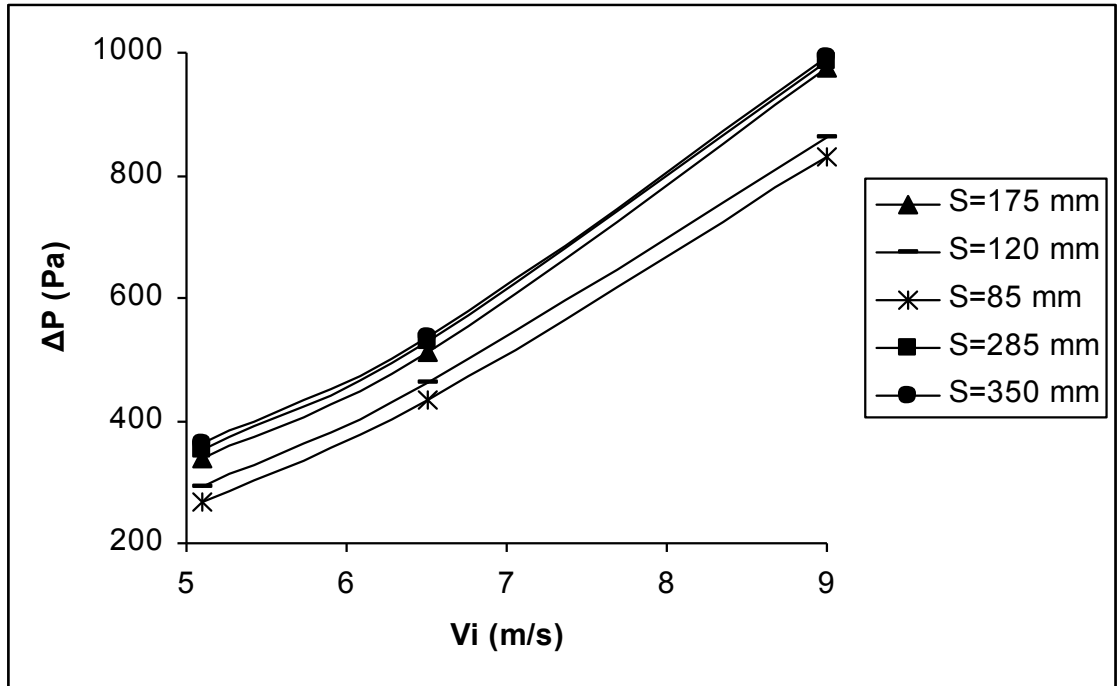
Şekil 4.69. Nümerik Çözümde Kullanılan Siklonlara ait Mesh Yapısı

#### 4.4.2.1 Sonuç ve Analiz

Çizelge 4.7’de verilen özel olarak imal edilmiş siklonda farklı giriş debilerinde ve farklı geometrik ölçülerde siklonda meydana gelen statik basınç farkları deneysel olarak elde edilmiş aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 4.70. Farklı siklon giriş hızlarında ve farklı dalma uzunluklarında  $D_2=47$  mm için siklon girişi ile çıkışı arasındaki statik basınç farkları

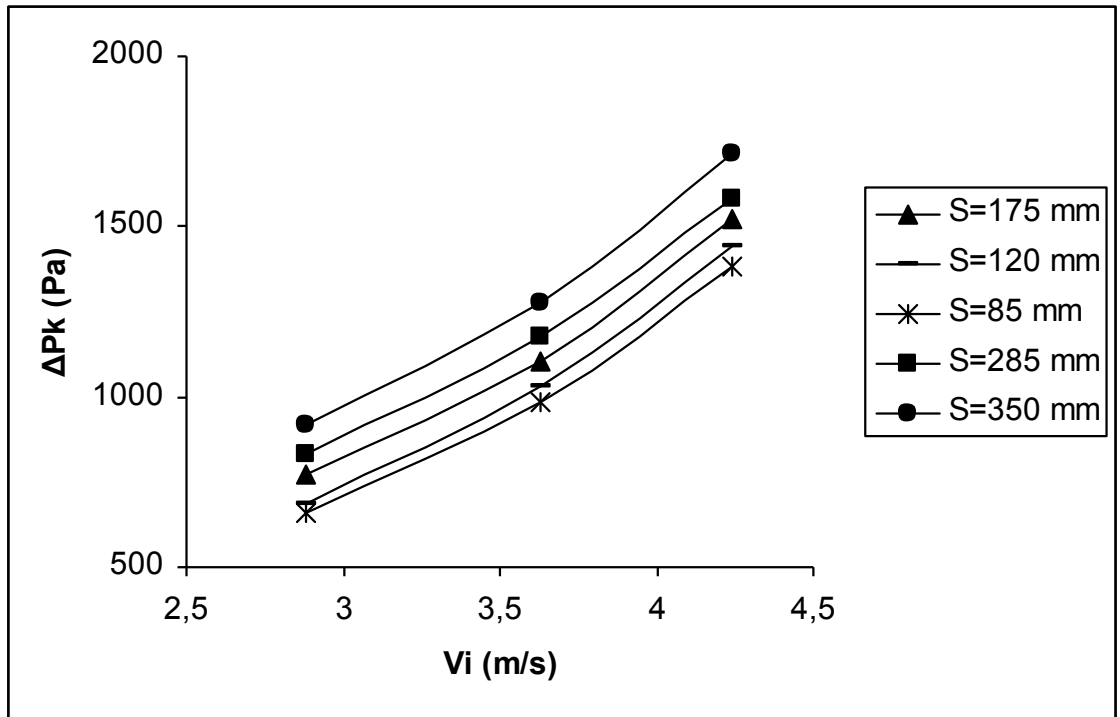


Şekil 4.71. Farklı siklon giriş hızlarında ve farklı dalma uzunluklarında  $D_2=101$  mm için siklon girişi ile çıkışı arasındaki statik basınç farkları

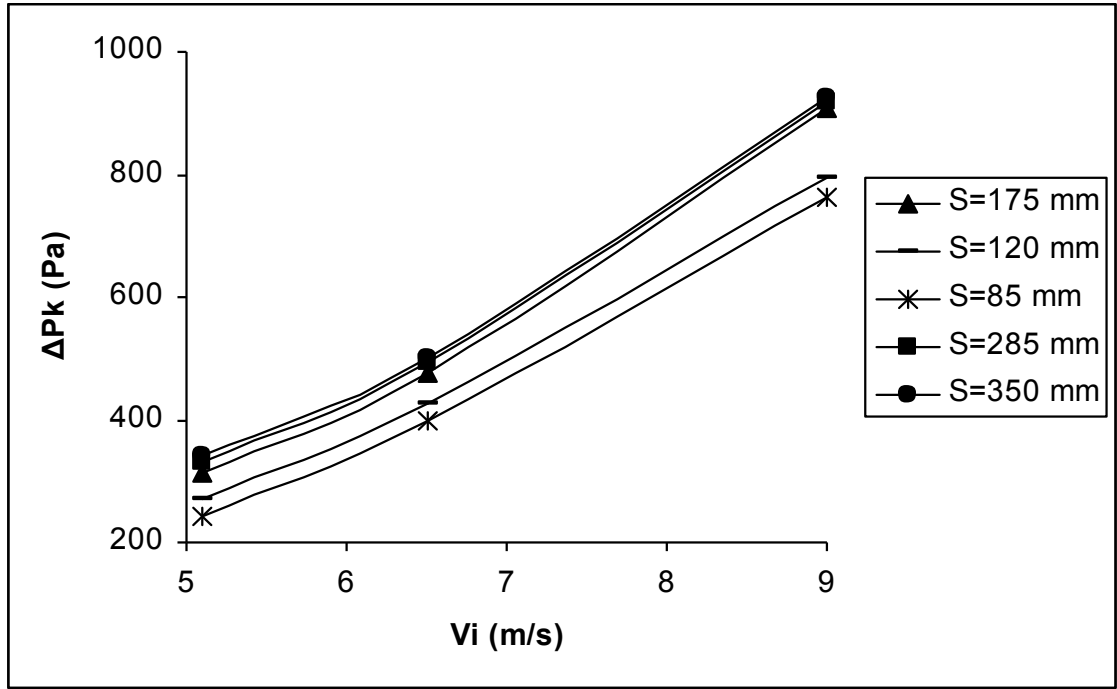
Bu basınç farkları ele alınarak basınç kayıpları siklonun girişi ve çıkışı arasında Bernoulli denklemi uygulanarak denklem 4.2'den elde edilmiştir.

$$\Delta P_k = \Delta P + \left( \rho \cdot \frac{V_i^2 - V_\xi^2}{2} \right) + \rho g (z_i - z_\xi) \quad (4.2)$$

Elde edilen sonuçlar şekil 4.72 ve 4.73'de verilmiştir.



Şekil 4.72. Farklı siklon giriş hızlarında ve farklı dalma uzunluklarında  $D_2=47$  mm için siklon girişi ile çıkışı arasında meydana gelen basınç kayıpları

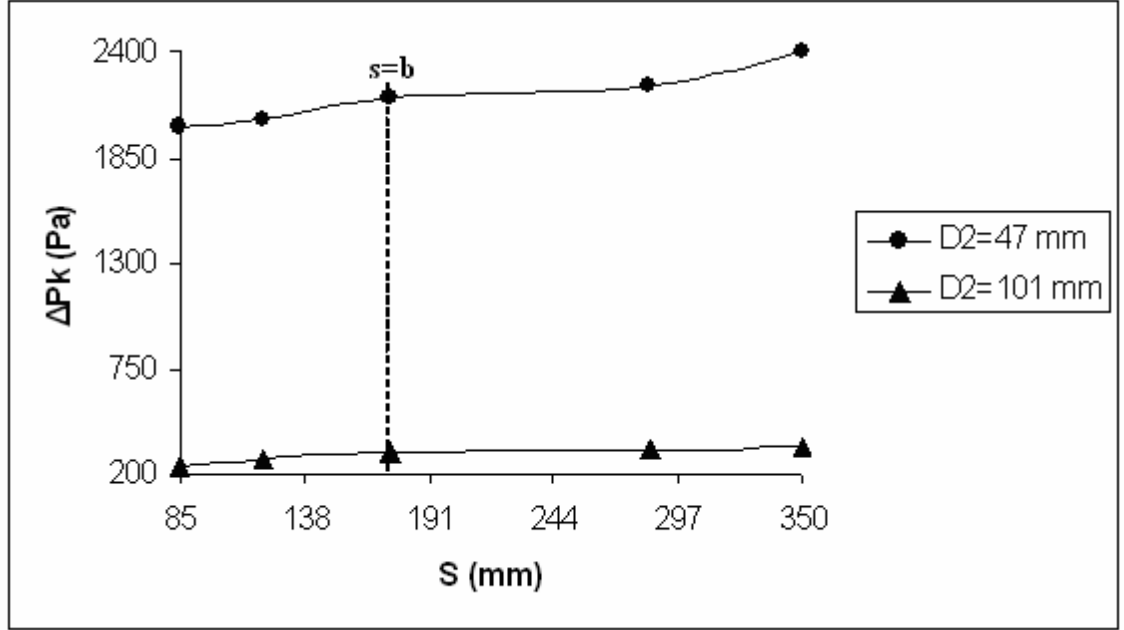


Şekil 4.73. Farklı siklon giriş hızlarında ve farklı dalma uzunluklarında  $D_2=101$  mm için siklon girişi ile çıkışı arasında meydana gelen basınç kayıpları

Şekillerden görüldüğü üzere, siklon giriş hızının artmasıyla basınç kayıpları değerleri de artmaktadır. Bunun yanında, siklon geometrisi hiç kuşkusuz basınç kayıplarını etkileyen bir parametredir. Deneysel çalışmada yüksek basınç kayıplarının meydana gelmesindeki en önemli geometrik parametre çıkış borusu çapının küçük ve çıkış borusunun siklon içerisinde kalan kısmının (dalma uzunluğu, S) fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

Siklon giriş çapının küçük olması durumunda yüksek basınç kayıpları elde edilirken yüksek siklon çıkış çapında basınç kayıplarının oldukça azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın nedeni,  $D_2$  siklon çıkış çapının fazla olması durumunda oluşan santrifüj kuvvetler etkisi azalmakta ve dolayısı ile de basınç kayıpları azalmaktadır. Ayrıca, benzer etkilere bağlı olarak dalma uzunluğunun artmasıyla basınç kayıplarında artma olmaktadır. Geometrik ölçülerin basınç kayıpları üzerindeki etkilerinin daha iyi tespit edilebilmesi için 5.1 m/s siklon giriş hızında farklı çıkış

çaplarında ve dalma uzunluklarında deneysel olarak elde edilen basınç kayıpları şekil 4.74'de verilmiştir.



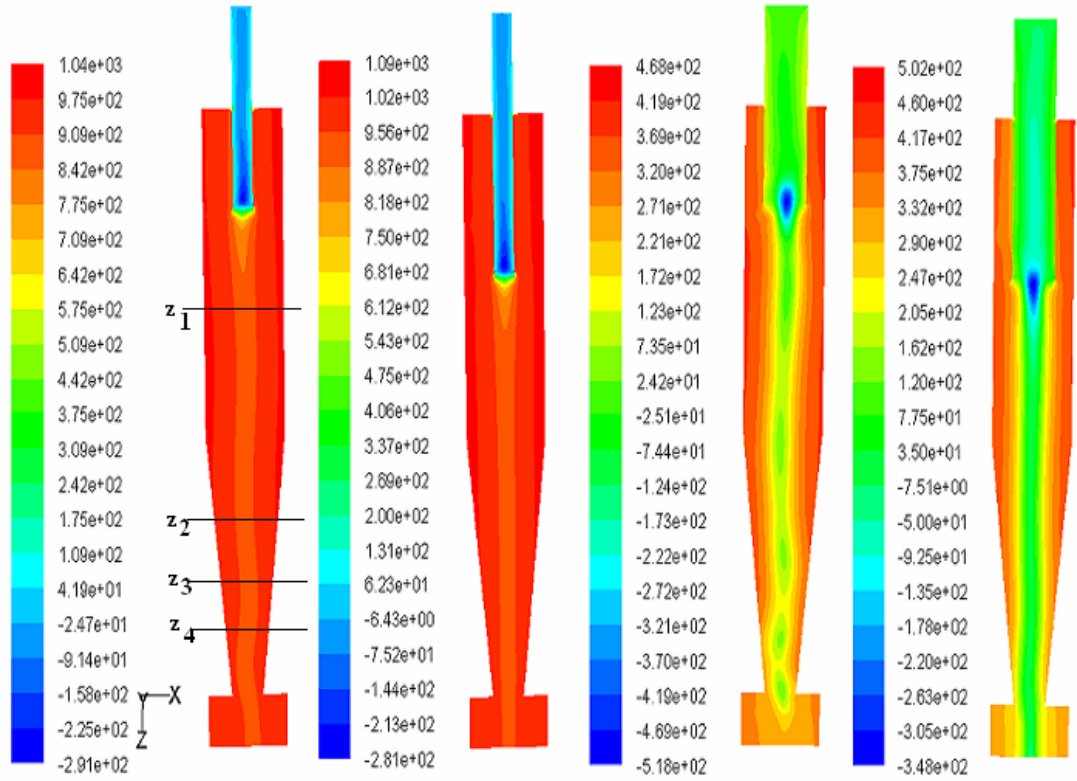
Şekil 4.74. 5.1 m/s siklon giriş hızında ve farklı dalma uzunluklarında  $D_2=47, 101$  mm için siklon girişi ile çıkışı arasında meydana gelen basınç kayıpları

Şekil 4.74'den açık olarak çaplar arasında basınç kayıpları açısından çok büyük farkların olduğu görülmektedir. Dalma uzunluklarının daha ziyade 47 mm çapındaki çıkış borusunda etkili olduğu 101 mm çıkış çapında ise önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. 47 mm çıkış borusu çapında meydana gelen basınç kayıpları 101 mm çapının yaklaşık 6-7 kat daha fazla olduğu tespit edilmektedir.

Basınç kayıpları açısından değerlendirildiğinde 47 mm çıkış borusu çapının uygun olmayacağı yorumu yapılabilir.

Şekil 4.75'de 47 mm çıkış çapında 3.63 m/s giriş hızında ve 101 mm çıkış çapında 6.5 m/s giriş hızında  $S=175$  ve 285 mm dalma uzunluklarında elde edilen statik basınç konturları verilmiştir.





Şekil 4.75. 3.63 m/s siklon giriş hızında  $D_2=47$  mm çıkış çapında  $S=175$  ve 285 mm'de ve 6.5 m/s siklon giriş hızı için  $D_2=101$  mm çıkış çapında aynı dalma uzunlukları ile elde edilen statik basınç konturları

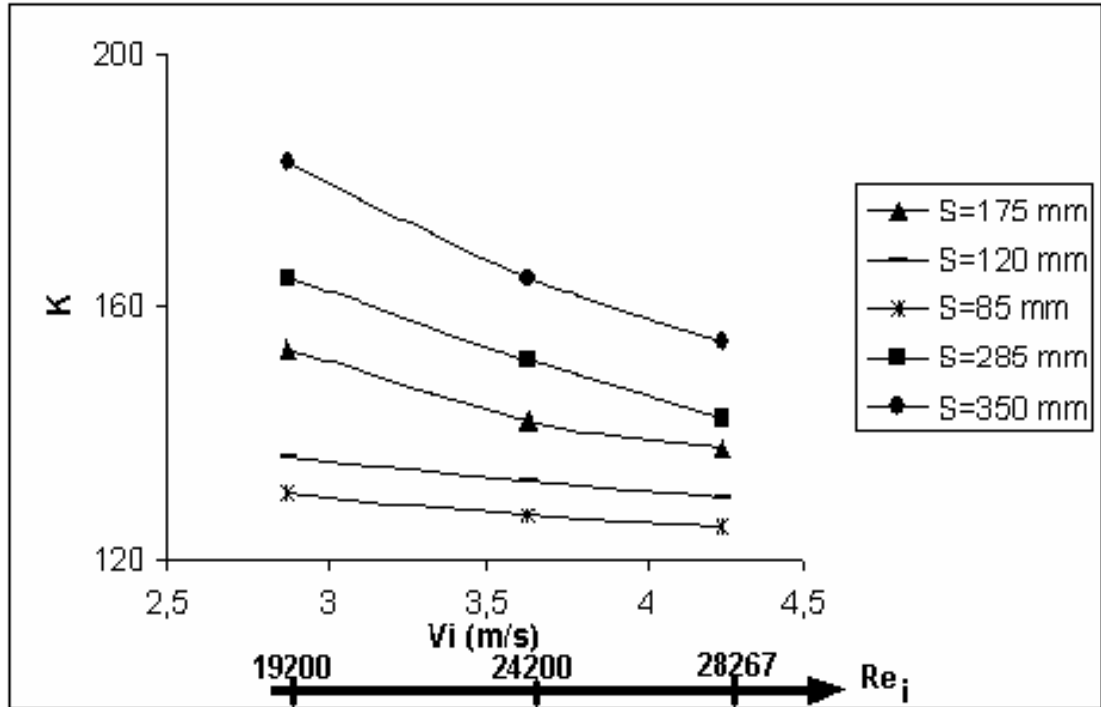
Elde edilen sonuçlar şekil 4.72 ve 4.73'de verilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Dikkat edilirse 47 mm çıkış borusu çapında 3.63 m/s giriş hızı için dalma uzunluğu 175 mm iken deneysel olarak 1103 Pa ve nümerik olarak ise 1040 Pa basınç kayıpları elde edilmiştir. Aynı şartlar altında dalma uzunluğu 285 mm iken deneysel olarak 1177 Pa nümerik çözümde ise 1090 Pa sonuç elde edilmiştir. 47 mm çıkış borusu çapı için nümerik çözümlerde kullanılan teknik ile sonuçlar maksimum % 7.4 hata ile elde edilmiştir. 101 mm çıkış borusu çapında 6.5 m/s giriş hızı için dalma uzunluğu 175 mm iken deneysel olarak 477 Pa ve nümerik olarak ise 468 Pa basınç kayıpları elde edilmiştir. Dalma uzunluğunun 285 mm olması durumunda deneysel olarak 502 Pa nümerik çözümde ise 493 Pa sonuç

elde edilmiştir. 101 mm çıkış borusu çapı için aynı nümerik teknik ile sonuçlar maksimum % 1.9 hata ile elde edilmiştir.

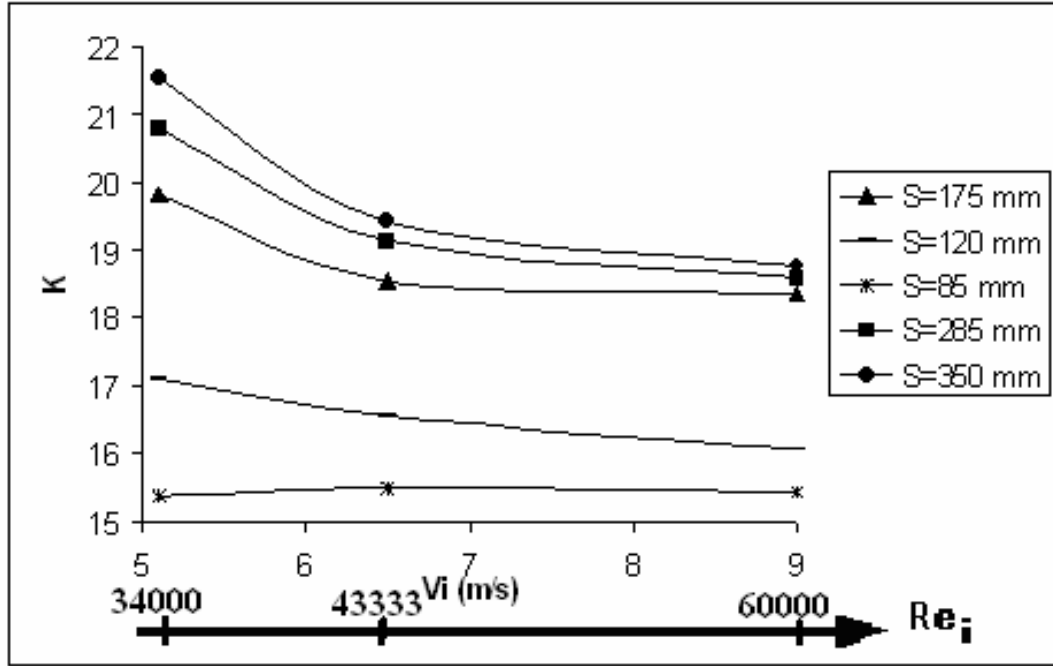
Siklonda basınç kayıplarını karakterize etmek için boyutsuz parametreler ile çalışmak sonuçların daha iyi analiz edilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle basınç kayıp katsayısı (K) siklon giriş hızına bağlı olarak;

$$\Delta P_k = \frac{K}{2} \rho V_i^2 \quad (4.3)$$

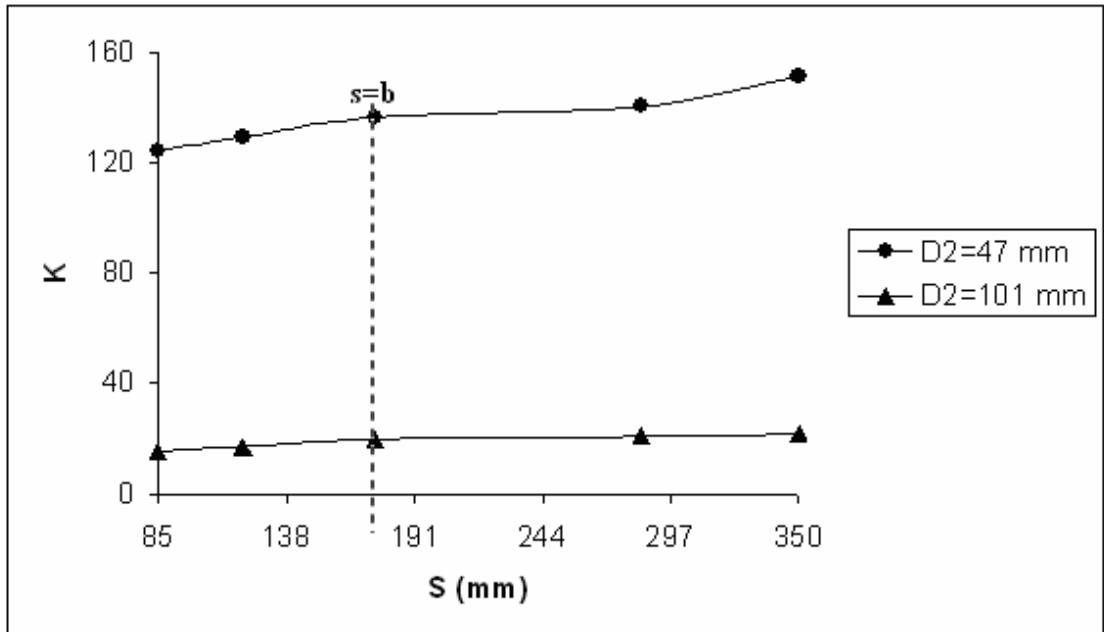
denklemleriyle elde edilerek aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 4.76. Farklı siklon giriş hızlarında ve farklı dalma uzunluklarında  $D_2=47$  mm için siklonda meydana gelen basınç kayıp katsayıları



Şekil 4.77. Farklı siklon giriş hızlarında ve farklı dalma uzunluklarında  $D_2=101$  mm için siklon girişi ile çıkışı arasında meydana gelen basınç kayıpları

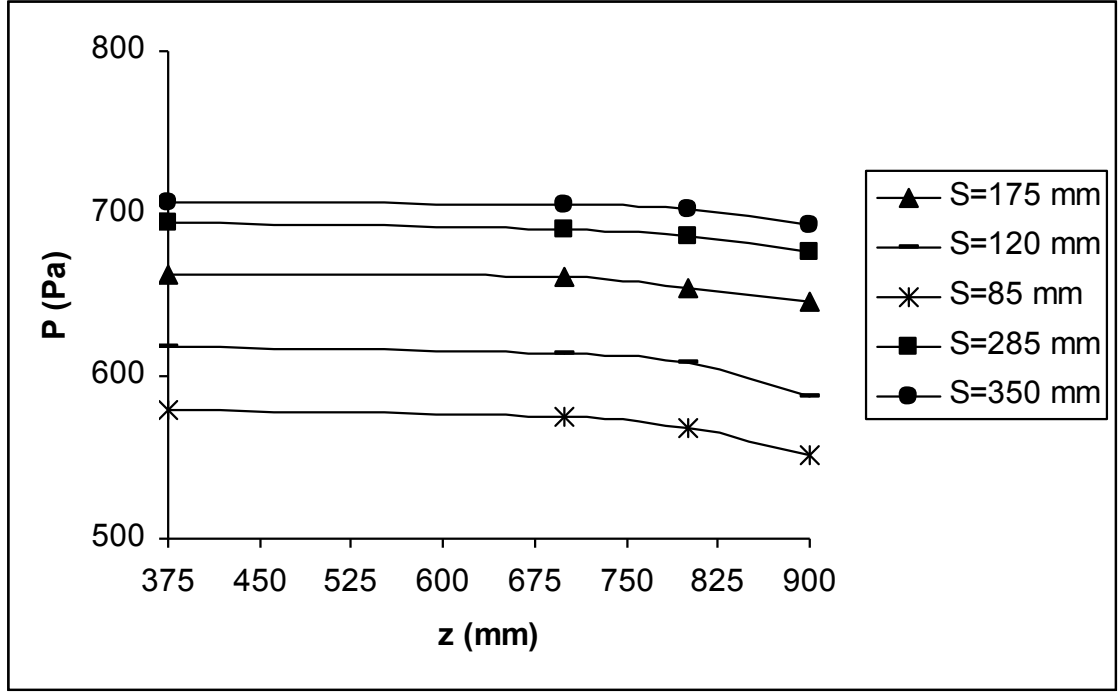


Şekil 4.78. 5.1 m/s siklon giriş hızında ve farklı dalma uzunluklarında  $D_2=47, 101$  mm için siklon girişi ile çıkışı arasında meydana gelen basınç kayıp katsayıları

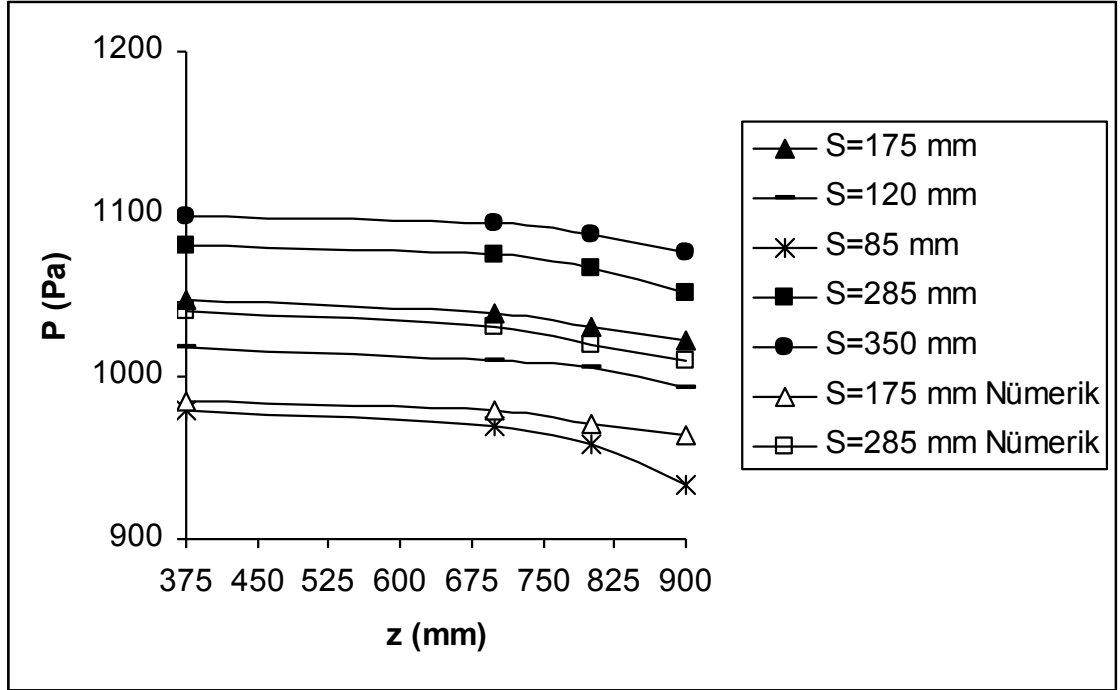
Siklon giriş hızının artmasıyla kayıp katsayılarında azalmanın olduğu görülmektedir. Dikkat edilirse 47 mm çıkış çapındaki basınç kayıp katsayısı 101 mm çıkış çapının yaklaşık 7-8 katı olarak görülmektedir. Yine aynı şekilde dalma uzunluğunun yüksek olması durumunda her iki çıkış çapı için basınç kayıp katsayılarında giriş hızının artmasıyla bir azalma olmakta dalma uzunluğunun azalmasıyla artan giriş hızlarında kayıp katsayılarında önemli bir değişiklik olmamaktadır. Farklı dalma uzunluklarında siklon çıkış borusu çapının azalmasıyla basınç kayıp katsayısı artmaktadır. 47 mm çıkış borusu çapında dalma uzunluğunun kayıp katsayısı üzerinde önemli etkisinin olduğu elde edilen sonuçlardan görülürken 101 mm çıkış borusu çapında ise önemli bir etkisi olmamaktadır.

İlgili literatür dikkate alındığında basınç kayıp katsayısının önemli etkisinin olması siklon geometrisine bağlı olarak ifade edilmektedir. Ancak, yine literatürde ifade edildiği şekilde giriş hızının artmasıyla kayıp katsayılarında bir azalmanın olduğu ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda bu durum açık olarak görülmektedir. Bernoulli denkleminden elde edilen basınç kayıplarının giriş hızına göre parabolik olarak artması ve denklem 4.2'den elde edilen basınç kayıp katsayısının ise parabolik olarak azalması basıncın hızın karesi ile değişmesinden kaynaklanmaktadır.

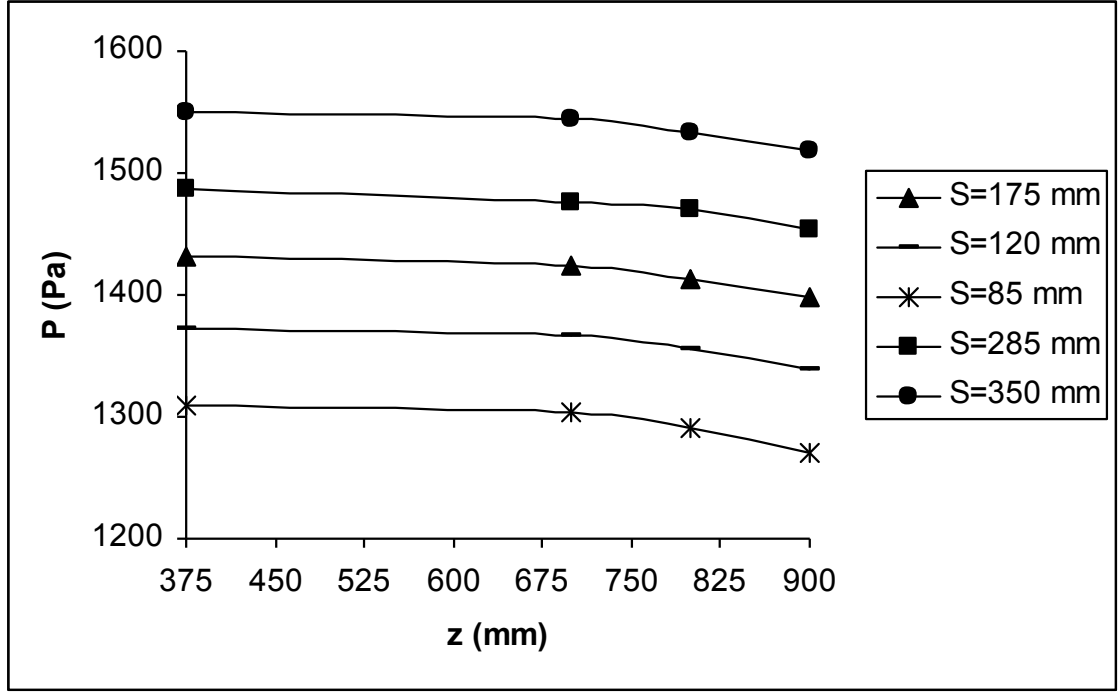
Siklonun şekil 4.75'de gösterilen z-kesitlerinde silindirik kısımda  $z_1=375$  mm 'de ve konik kısmında  $z_2, z_3, z_4=700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınç değerleri, farklı siklon çıkış çaplarında giriş hızı ve dalma uzunluğu değiştirilerek deneysel ve nümerik olarak elde edilmiş şekil 4.79-84'de verilmiştir.



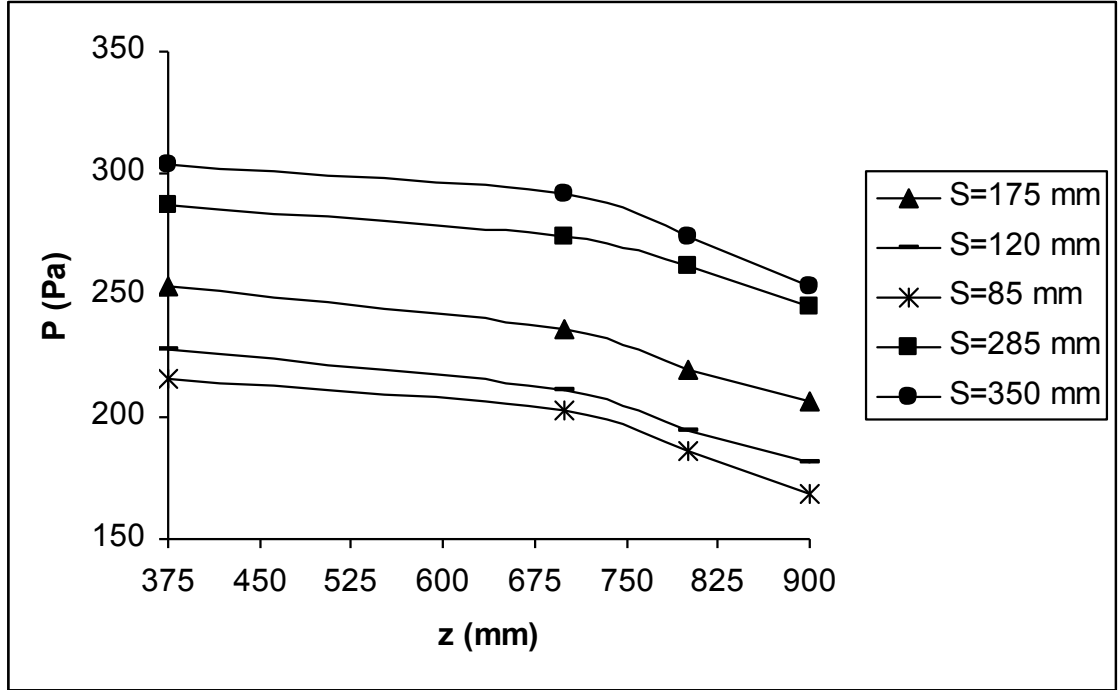
Şekil 4.79. 2.88 m/s siklon giriş hızında  $D_2=47$  mm çıkış çapında ve farklı dalma uzunlukları için  $z=375, 700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınçlar



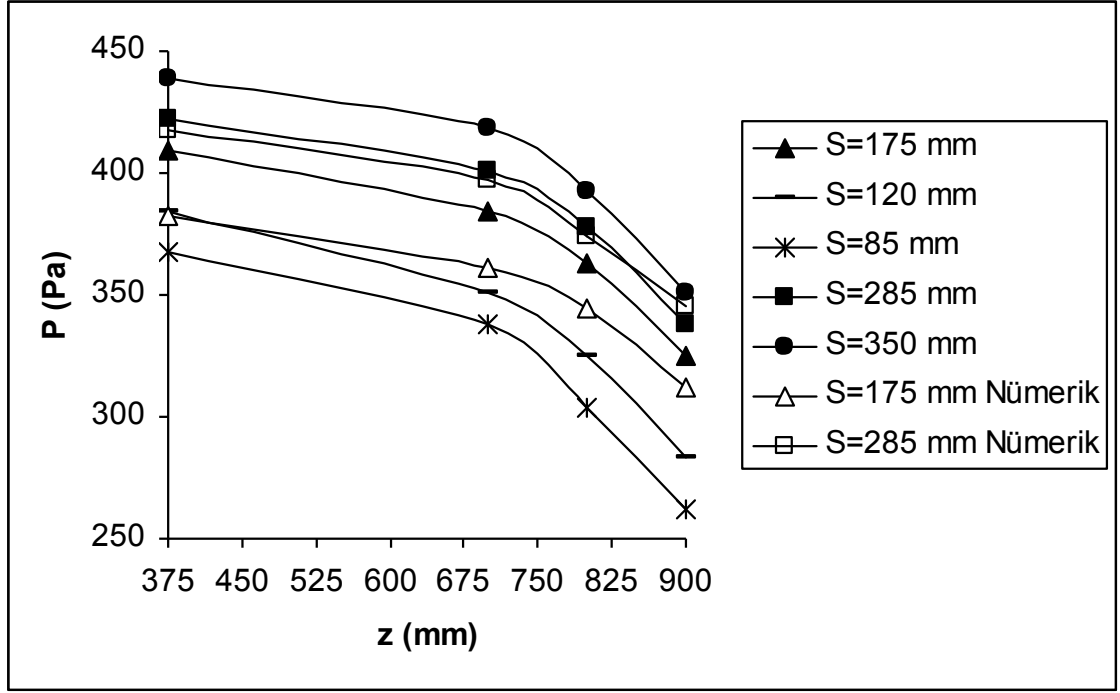
Şekil 4.80. 3.63 m/s siklon giriş hızında  $D_2=47$  mm çıkış çapında ve farklı dalma uzunlukları için  $z=375, 700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınçlar



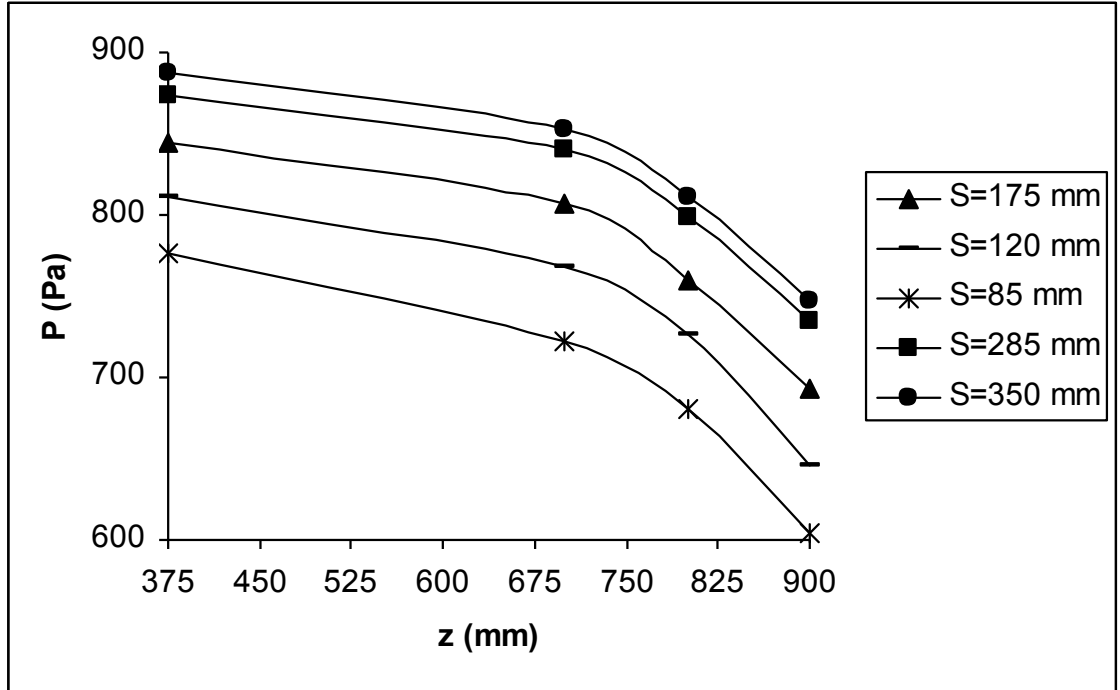
Şekil 4.81. 4.24 m/s siklon giriş hızında  $D_2=47$  mm çıkış çapında ve farklı dalma uzunlukları için  $z=375, 700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınçlar



Şekil 4.82. 5.1 m/s siklon giriş hızında  $D_2=101$  mm çıkış çapında ve farklı dalma uzunlukları için  $z=375, 700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınçlar



Şekil 4.83. 6.5 m/s siklon giriş hızında  $D_2=101$  mm çıkış çapında ve farklı dalma uzunlukları için  $z=375, 700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınçlar



Şekil 4.84. 9 m/s siklon giriş hızında  $D_2=101$  mm çıkış çapında ve farklı dalma uzunlukları için  $z=375, 700, 800$  ve  $900$  mm'deki statik basınçlar

Her iki çıkış boru çapında siklon giriş hızının ve dalma uzunluğunun azalmasıyla statik basınç farklarının azaldığı açık olarak görülmektedir. Yüksek siklon giriş hızlarında kesitler arasında sabit statik basınç farklarının elde edilmesi doğal vorteks ucunun siklon toz kutusu altına kadar indiğinin bir işareti olarak yorumlanabilir. Böylelikle, partiküllü uygulamalarda daha iyi bir ayırma olacak ve siklonun partikül toplama verimi artacaktır. 47 mm çıkış borusu çapında 2.88 m/s ve 3.63 m/s giriş hızları için elde edilen statik basınç farklarına dikkat edilirse 2.88 m/s giriş hızı için  $S=85$  ve 120 mm dalma uzunluklarında 800-900 mm arasındaki farkların azaldığı görülmektedir. Bu durum 3.63 m/s giriş hızı için 85 mm dalma uzunluğunda görülmektedir. Bu azalmanın nedeni siklonda iç içe vorteks yapısının bozulduğunun ve vorteksin ucunun sonlandığı olarak yorumlanmalıdır. Partiküllü uygulamalarda bu gibi durumlarda ayırma alanları azalacağı için daha kötü bir ayırma olacak ve partikül toplama verimi düşecektir.

Çıkış borusu 101 mm olması durumunda tüm dalma uzunluklarında statik basınç farklarının özellikle 800-900 mm kesitleri arasında önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni  $D_2=101$  mm siklon çıkış borusu çapının ayırtmayı meydana getiren santrifüj kuvvetler üzerinde olumsuz etkisinin olmasından kaynaklanmaktadır. Yani, çok yüksek giriş hızlarında dahi vorteks ucu siklonun toz kutusu altına kadar ulaşmamaktadır. Bu durumda, partiküllü uygulamalarda partikül toplama veriminin kötüleşmesi olacaktır.

Nümerik olarak elde edilen sonuçların deneysel olarak karşılaştırılmasına ait sonuçlar şekil 4.80'de 47 mm çıkış borusu çapı ve 3.63 m/s giriş hızı için verilmiştir. Benzer şekilde, 101 mm çıkış borusu çapı ve 6.5 m/s giriş hızı için deneysel ve nümerik karşılaştırma şekil 4.83'de verilmiştir. Nümerik sonuçların deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmasına dikkat edilirse nümerik sonuçların deneysel sonuçlar ile son derece uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde maksimum % 6.8 hata ile nümerik sonuçların elde edildiği tespit edilmiştir.

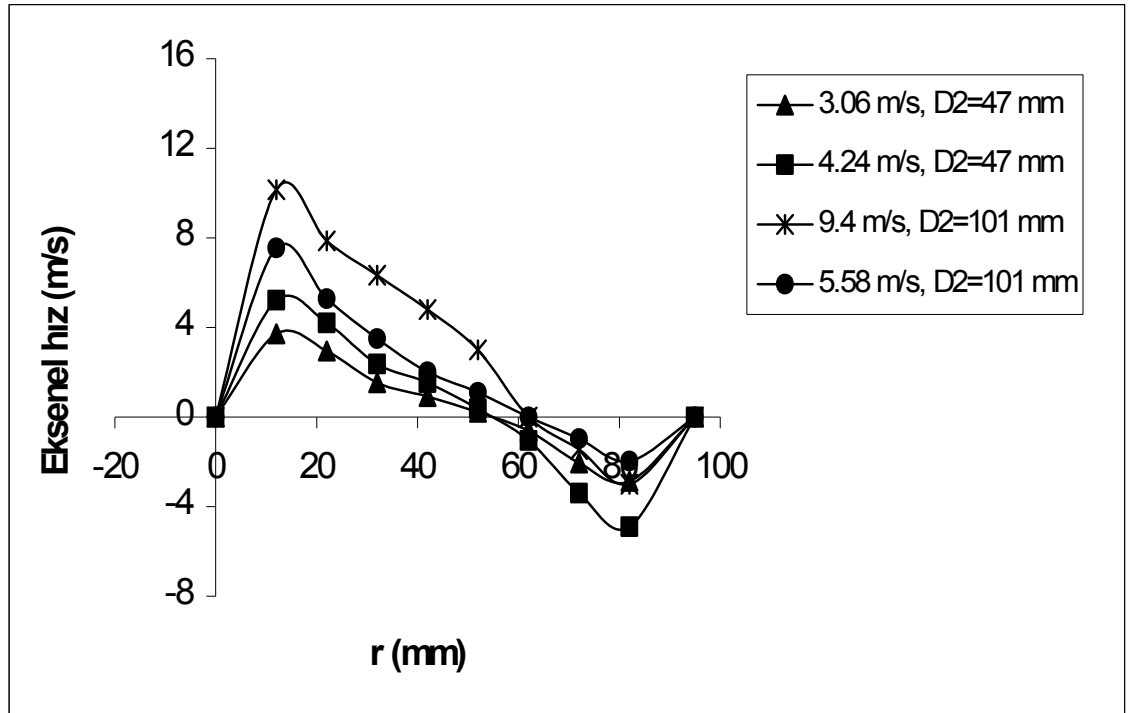
Doğal vorteks ucunun hem 47 mm çıkış borusu çapı için 175 ve 285 mm dalma uzunluklarında hemde 101 mm çıkış borusu çapı için aynı dalma uzunluklarında nümerik olarak elde edilen sonuçlardan da tespit edilebileceği görülmektedir.



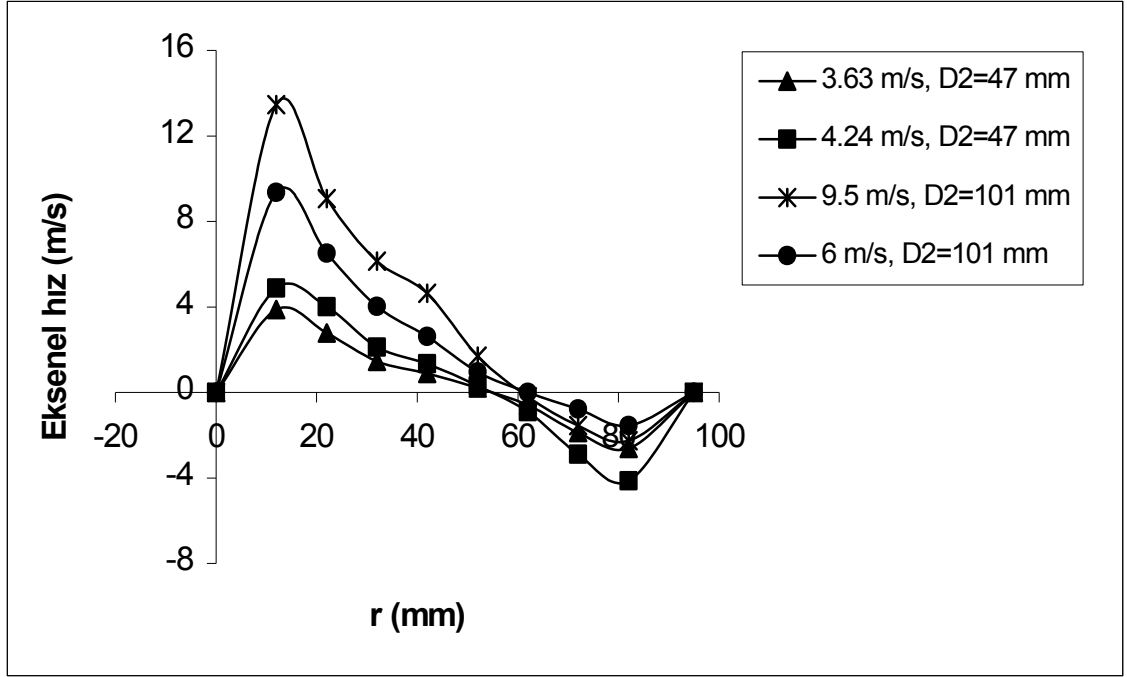
Statik basınç farkları için elde edilen sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde 101 mm çıkış borusu çapının uygun olmadığı doğal vorteks ucu ile sonuçlar ilişkilendirildiğinde karşımıza çıkmaktadır.

Doğal vorteks uzunluğu herhangi bir giriş hızında siklon boyu mesafesine kadar ulaşmamışsa giriş hızının artırılmasıyla vorteks'in boyu uzayacaktır. Bu durumda, statik basınç farklarına ilave olarak hız profillerinin de incelenmesi yerinde olacaktır.

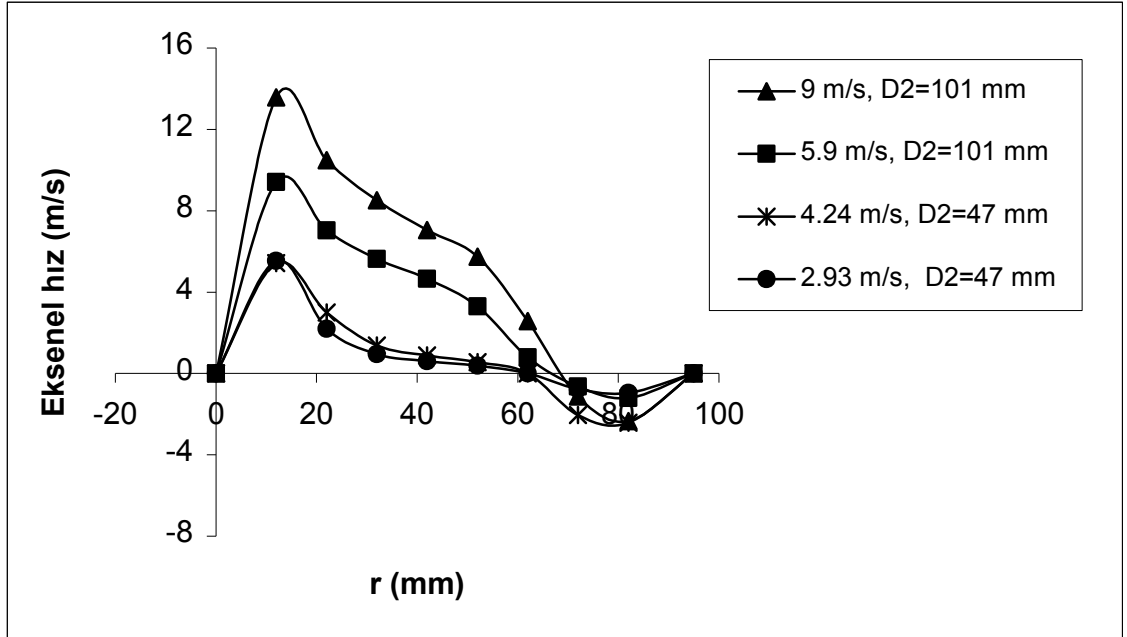
Şekil 4.85, 4.86 ve 4.87'de farklı siklon giriş debileri ve farklı geometrik ölçüler için üstten 375 mm'deki aksenal hız profilleri verilmiştir.



Şekil 4. 85. z=375 mm'de S=285 mm için farklı giriş hızlarında ve farklı siklon çıkış çaplarında aksenal hız profilleri



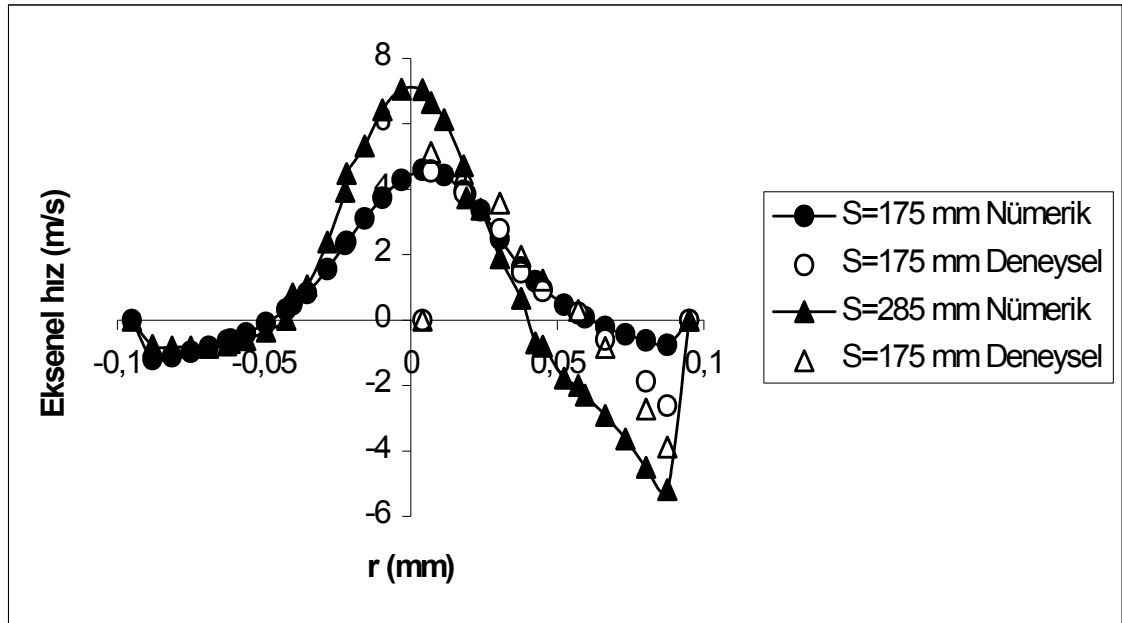
Şekil 4. 86. z=375 mm'de S=175 mm için farklı giriş hızlarında ve farklı siklon çıkış çaplarında eksenel hız profilleri



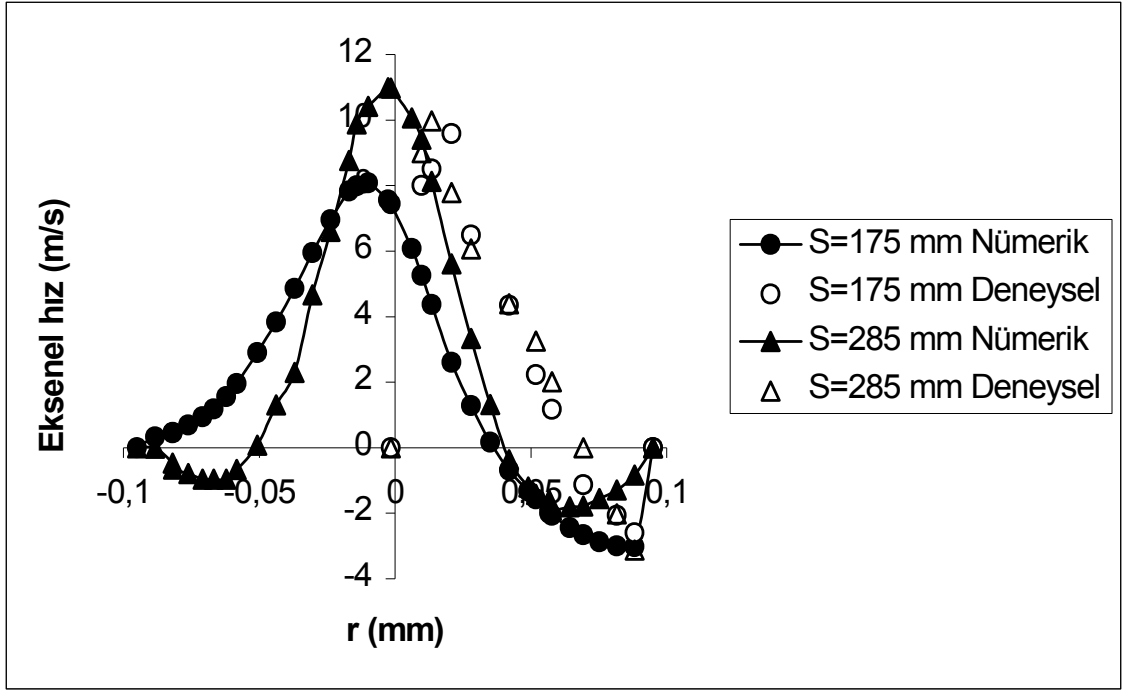
Şekil 4. 87. z=375 mm'de S=85 mm için farklı giriş hızlarında ve farklı siklon çıkış çaplarında eksenel hız profilleri

Yukarıdaki gösterilen aksenal hız profillerinde iki farklı girdap oluştuğu görülmektedir. Siklon cidarlarına yakın yerlerde aşağı doğru bir akış olurken iç kısımlarda ikinci girdap olmakta ve akış yukarı yönde olmaktadır. Siklon çıkış çapının artırılması ve dalma uzunluğunun azaltılması ile benzer giriş debileri için aşağı yöndeki girdabın az, yukarı yöndeki ikinci girdabın ise fazla olması durumu ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni, oluşan santrifüj kuvvetlerin azalması ve böylelikle akışın aşağıya inmeden ikinci girdaba katılımların artmasından kaynaklanmaktadır. Aksenal hız profillerinden D<sub>2</sub> siklon çıkış çapının 101 mm S dalma uzunluğunun 85 mm olması durumunda bu durum daha belirgin olarak görülmektedir.

Siklon çıkış borusu çapının 47 mm olması durumunda iken 3.63 m/s giriş hızı ve 175, 285 mm dalma uzunluklarında 101 mm çıkış borusu çapı için 6.5 m/s giriş hızında benzer dalma uzunluklarında elde edilen aksenal hız profilleri deneysel ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılmış ve sırayla şekil 4.88 ve 4.89’da verilmiştir.



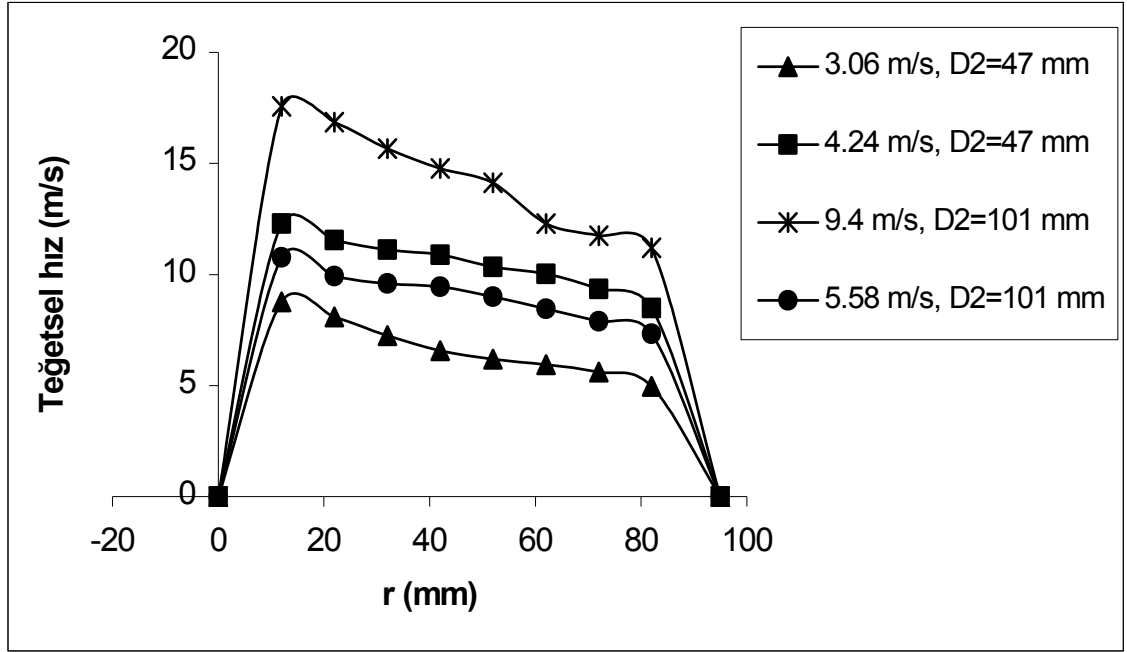
Şekil 4. 88. z=375 mm’de 3.63 m/s giriş hızı ve 47 mm çıkış çapı için farklı dalma uzunluklarında aksenal hız profillerinin deneysel ve nümerik karşılaştırması



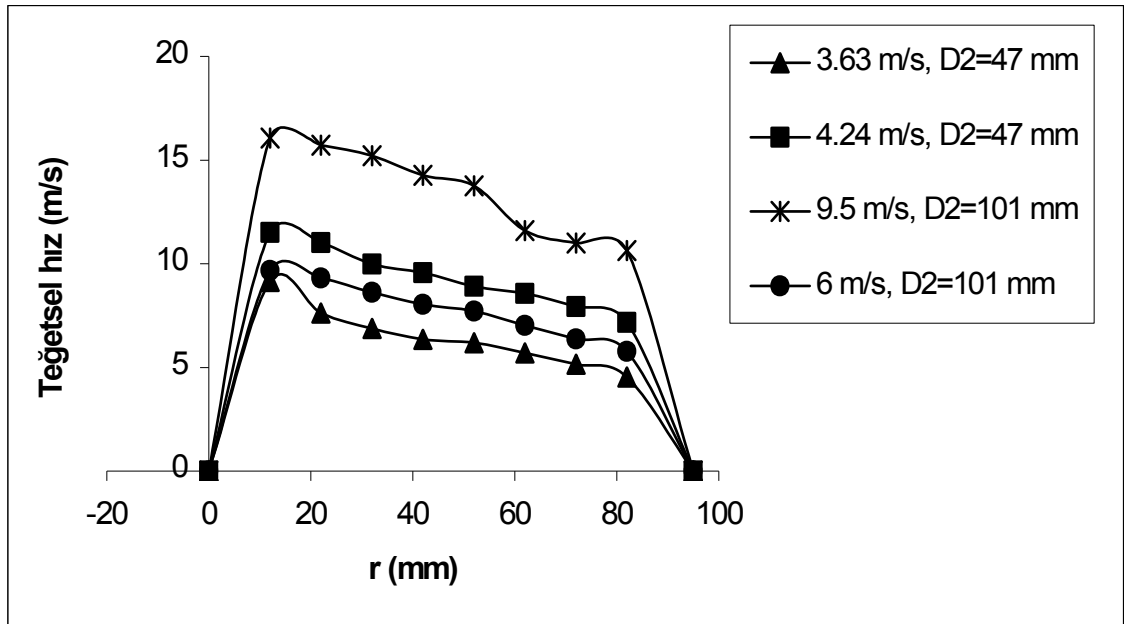
Şekil 4. 89. z=375 mm'de 6.5 m/s giriş hızı ve 101 mm çıkış çapı için farklı dalma uzunluklarında aksenal hız profillerinin deneysel ve nümerik karşılaştırması

Şekil 4.88 ve 4.89'da verilen aksenal profillere ait nümerik ve deneysel karşılaştırmalardan gerek maksimum değerlerin tahmin edilmesi gerekse vorteks bölgelerinin ve akış yönünün tahmin edilmesinde deneysel sonuçlarla nümerik sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

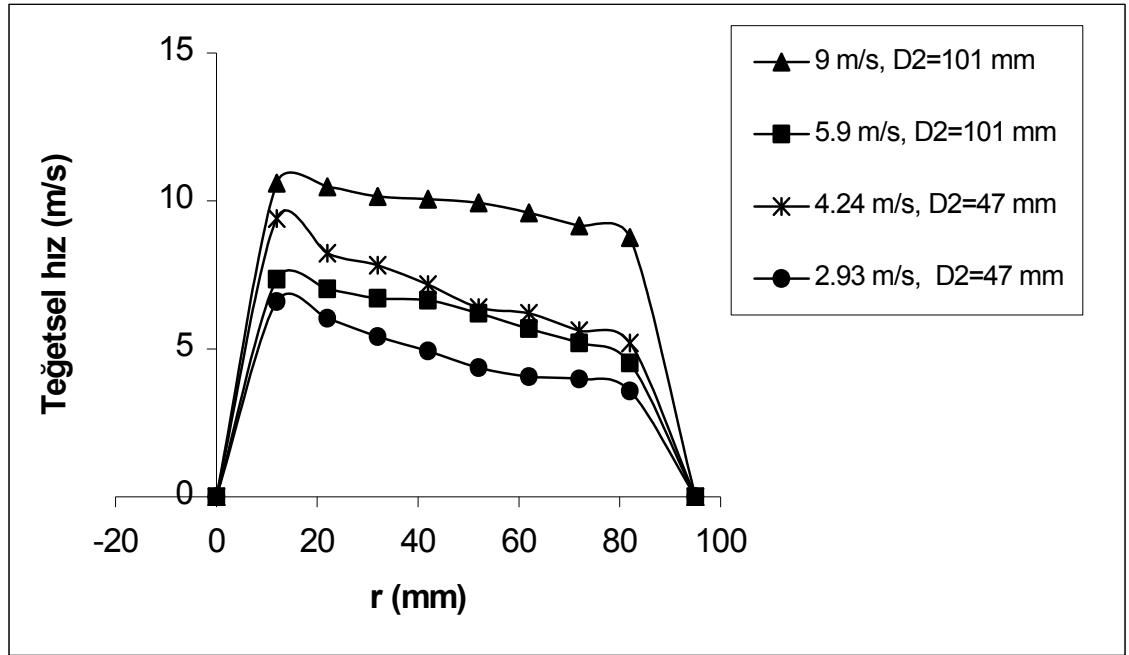
Şekil 4.90, 91 ve 4.92'de farklı siklon giriş hızları ve farklı geometrik ölçüler için üstten 375 mm'deki teğetsel hız profilleri verilmiştir.



Şekil 4. 90. z=375 mm'de S=285 mm için farklı giriş hızlarında ve farklı siklon çıkış çaplarında teğetsel hız profilleri



Şekil 4. 91. z=375 mm'de S=175 mm için farklı giriş hızlarında ve farklı siklon çıkış çaplarında teğetsel hız profilleri



Şekil 4. 92. z=375 mm'de S=85 mm için farklı giriş hızlarında ve farklı siklon çıkış çaplarında teğetsel hız profilleri

Dikkat edilirse yüksek teğetsel hızların 47 mm çıkış borusu çapında ve 285 mm dalma uzunluğunda meydana geldiği görülmektedir. Bunun nedeni, siklon çıkış çapının küçük ve çıkış borusunun siklon içinde kalan kısmının büyük olmasına bağlı olarak santrifüj kuvvetler ve dolayısı ile de teğetsel hızlar artmaktadır. Siklonda partiküllü uygulamalarda yüksek teğetsel hızların daha iyi bir ayırışmaya neden olduğu ve bu durumda ise partikül toplama veriminin arttığı yorumu yapılabilir.

Siklon çıkış borusu çapının artırılması durumunda ise siklon giriş hızına göre nispeten düşük teğetsel hızların meydana geldiği görülmektedir. Elde edilen teğetsel hız profillerinde S dalma uzunluğunun sabit 285 mm'de ve  $D_2$  siklon çıkış çapının 47 mm'den 101 mm'ye artırılması durumu karşılaştırıldığında büyük oranda bir azalmanın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni çıkış borusu çapının büyük olmasından dolayı akışın daha aşağı inmeden ikinci girdaba katılmasından dolayı santrifüj kuvvetleri azaltan düşük teğetsel hızlar meydana gelmektedir. Artan teğetsel hız ile oluşan santrifüj kuvvetlerinin artması ve dolayısı ile de partiküllü uygulamalarda daha iyi bir ayırışmanın olduğu bilinmektedir. S dalma uzunlukları karşılaştırıldığında teğetsel hız

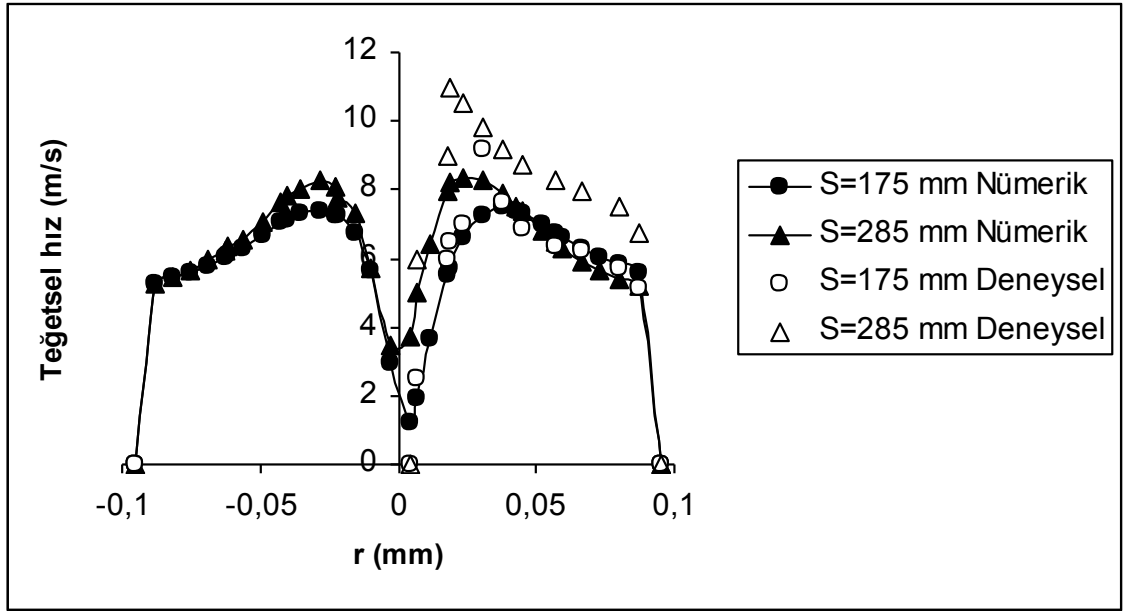
profillerinde bir azalmanın olduğu görülmektedir. Artan teğetsel hız ile oluşan santrifüj kuvvetlerinin artması ve dolayısı ile de partiküllü uygulamalarda daha iyi bir ayırıştırmanın olduğu bilinmektedir.

Bu nedenle S dalma uzunluğunun azaltılmasıyla teğetsel hızdaki azalma partiküllü uygulamalarda daha kötü bir ayrışmanın olmasına işaretir.

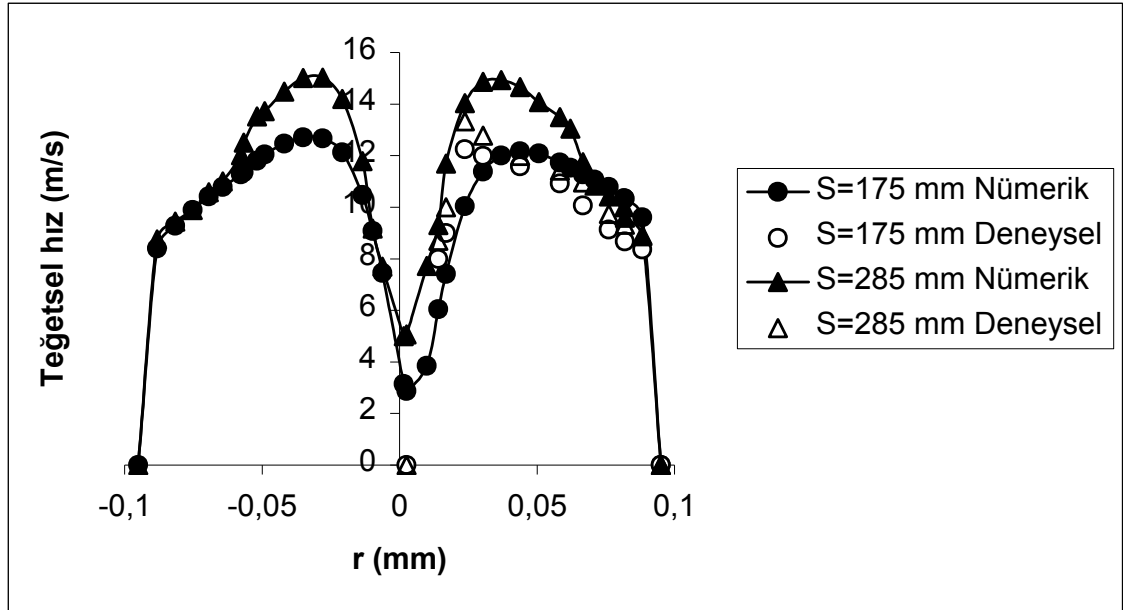
Yukarıda belirtilen S dalma uzunluğunun siklon giriş uzunluğundan küçük, giriş uzunluğu ile aynı veya daha uzun olması durumları farklı çıkış borusu çaplarında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan en uygun çıkış borusu parametresinin çıkış borusu çapının 47 mm ile 101 mm arasında S dalma uzunluğunun ise siklon giriş yüksekliğinde olması yorumu yapılabilir. Çünkü,  $D_2=47$  mm ve  $S=285$  mm olduğu durumda giriş hızının yaklaşık 3 katı teğetsel hız elde edilmektedir. Bu da partiküllü uygulamalarda yüksek santrifüj kuvvetlerin meydana gelmesinden dolayı iyi bir ayrışmanın işaretidir.  $D_2=101$  mm olması durumunda ise  $S=285$  mm'de teğetsel hız giriş hızının yaklaşık 2.2 katı  $S=175$  mm'de ise teğetsel hızda bir miktar azalma olmaktadır. Aynı zamanda,  $D_2=101$  mm çıkış çapında 85 mm dalma uzunluğunda teğetsel hızlar ise giriş hızının yaklaşık 1.2 katı olarak kalmaktadır. Bunun nedeni akışın siklonun alt kısmına inmeden iç girdaba katılımlarının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Çıkış çapının 47 mm olması durumunda ise teğetsel hız giriş hızının yaklaşık 2.3 katı kadar olurken aksel hızda ise normale yakın bir durum olmaktadır.

Bu sonuçlar beraber değerlendirildiğinde  $S=85$  mm dalma uzunluğu için çıkış çapının 101 mm olmasının uygun olmadığı görülebilmektedir. Çıkış çapının 47 mm olması durumunda bu dalma uzunluğunun olabileceği görülmektedir.

Siklon çıkış borusu çapının 47 mm olması durumunda iken 3.63 m/s giriş hızı ve 175, 285 mm dalma uzunluklarında 101 mm çıkış borusu çapı için 6.5 m/s giriş hızında benzer dalma uzunluklarında elde edilen teğetsel hız profilleri deneysel ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılmış ve sırayla şekil 4.93 ve 4.94'de verilmiştir.



Şekil 4. 93.  $z=375$  mm'de 3.63 m/s giriş hızı ve 47 mm çıkış çapı için farklı dalma uzunluklarında teğetsel hız profillerinin deneysel ve nümerik karşılaştırması

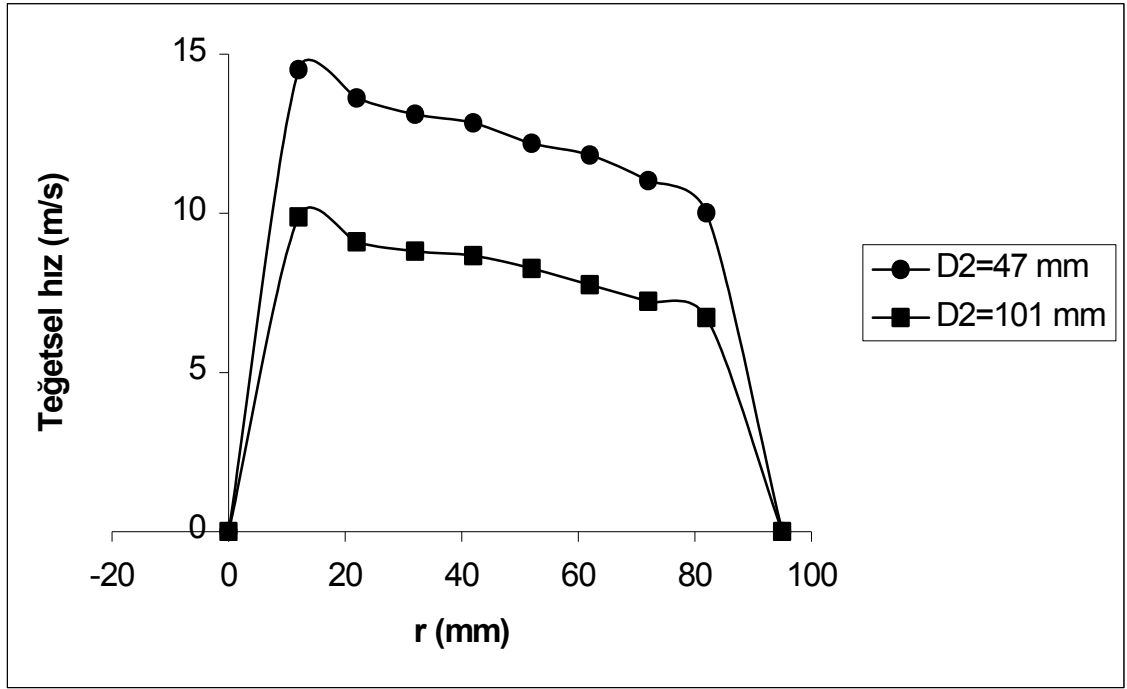


Şekil 4. 94.  $z=375$  mm'de 6.5 m/s giriş hızı ve 101 mm çıkış çapı için farklı dalma uzunluklarında teğetsel hız profillerinin deneysel ve nümerik karşılaştırması

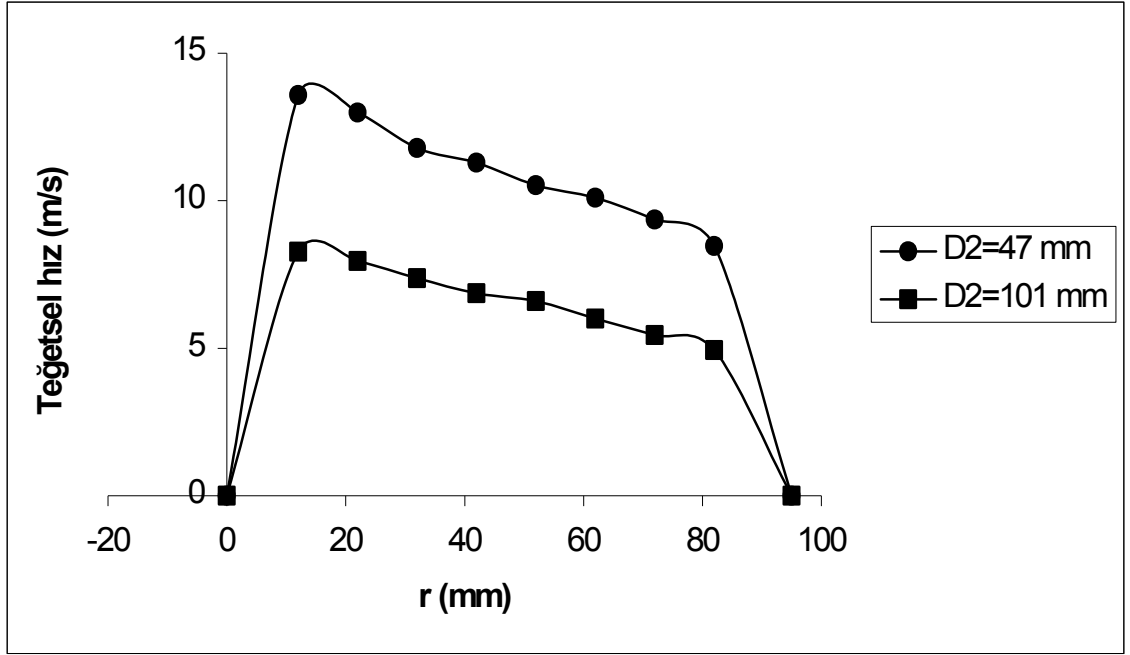


Şekil 4.93 ve 4.94’de verilen teğetsel profillere ait nümerik ve deneysel karşılaştırmalardan görüldüğü üzere, teğetsel hız karakteristiğinin ve maksimum değerlerin konumunun tahmin edilmesinde deneysel sonuçlarla nümerik sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

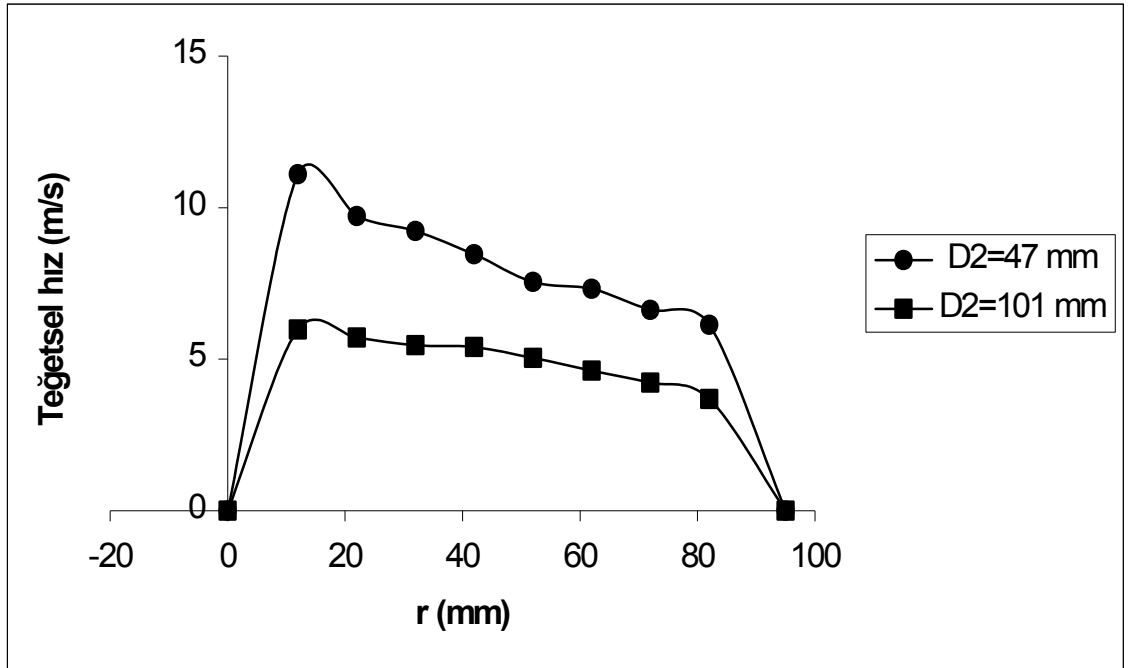
S dalma uzunluğunun ve çıkış borusu çapının etkilerini daha iyi tespit edebilmek için 5.1 m/s siklon giriş hızında farklı çıkış borusu çaplarında ve farklı dalma uzunluklarında yapılan deneylerde elde edilen teğetsel hız değişimleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4. 95. z=375 mm’de S=285 mm için 5.1 m/s giriş hızında elde edilen teğetsel hız profillerinin siklo çıkış çaplarına göre değişimleri



Şekil 4. 96.  $z=375$  mm'de  $S=175$  mm için 5.1 m/s giriş hızında elde edilen teğetsel hız profillerinin siklo çıkış çaplarına göre değişimleri

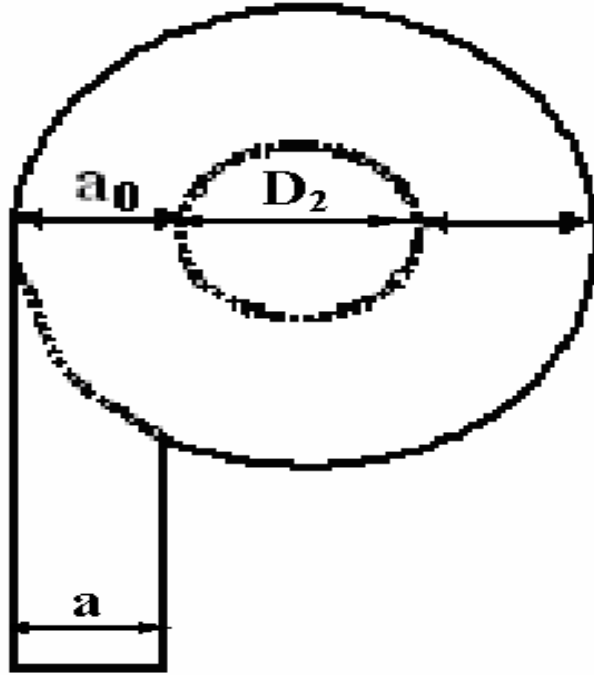


Şekil 4. 97.  $z=375$  mm'de  $S=85$  mm için 5.1 m/s giriş hızında elde edilen teğetsel hız profillerinin siklo çıkış çaplarına göre değişimleri

Şekil 4.95-4.97 arasındaki şekillerde gösterilen teğetsel hız profillerinden siklon çıkış borusu çapının küçük olması, S dalma uzunluğunun büyük olması gibi durumlarda yüksek teğetsel hızların meydana geldiğini geldiği açık olarak görülmektedir. Siklon çıkış çapının 47 mm olması durumunda dalma uzunluklarına bağlı olarak teğetsel hızlar giriş hızının yaklaşık 2.8 ile 3 katı arasında olurken çıkış borusu çapının 101 mm olması durumunda ise bu oran 1.1 ile 2.1 arasında kalmaktadır. Yüksek teğetsel hızlar partiküllü uygulamalarda iyi bir ayırışmaya neden olduğu için çıkış borusu çapının 47 mm olması daha uygun olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çıkış borusu çapının artması durumunda teğetsel hız profillerinde azalma ve eksenel hız profillerinin merkezinde artma olmasının nedenlerinden biri

$$a_0 = \frac{D_1 - D_2}{2} < a \text{ şeklinde tanımlanan uzunluktur.}$$



Şekil 4.98. Tanımlanan  $a_0$  mesafesinin şematik olarak gösterimi

$D_2=47$  mm olması durumunda  $a_0=71.5$  mm ve  $D_2=101$  mm olması durumunda  $a_0=44.5$  mm olmaktadır. Çıkış çapının 101 mm olması durumunda  $a_0 < a$  olmaktadır.

$a_0$  uzunluğunun siklon giriş genişliği olan  $a$  mesafesinden küçük olması durumunda siklona giren akışkan çıkış borusuna çarpacak ve akışkan hız büyüklüklerinde bir değişme meydana gelecektir. Dolayısıyla, siklona giren akışkanın siklon duvarlarıyla direkt teması engellenmiş olacaktır. Bu durumda girdap yapısında bozulma meydana gelip teğetsel hızda bir azalma ve merkezde aksel hızda bir artış olacaktır. Akışkan siklon koni ucuna kadar inmeden çıkış ağzına yönelecek ve dolayısı ile de iç girdaba katılımlar artacaktır. Böylece, partiküllü uygulamalarda kötü bir ayrışma meydana gelecektir.

#### 4.4.2.2 Hata Analizi

Girdaplı akışların geometrik ve çalışma parametreleri altında incelenmesi amacıyla ele alınan teğetsel girişli siklonlarda deneyler yapılmıştır. Deney düzeneği ve kullanılan ölçüm cihazları Bölüm 3.5’de verilmiştir. Bu cihazlar deneysel verileri belli ölçüm aralıklarında kaydedebilmekte; diğer taraftan, tespit edilen her deneysel değer cihazın hassasiyeti ile ilgili olarak belli bir hata içermektedir.

Çizelge 4.7’de verilen ölçülerde S dalma uzunluğunun 175 mm ve  $D_2$  siklon çıkış çapının 101 mm olduğu durumda 9.5 m/s siklon giriş hızları için  $z=375$  mm’de pitot tüpü ile elde edilen hızlara ait hata analizi yapılmıştır. Pitot tüpünün bağlandığı eğik manometrenin eğim açısı  $\theta=26.5^\circ$  ve kullanılan akışkan  $1000 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğundaki sudur.

Deneyde manometre üzerinden okunan  $h$  mesafesinin hıza çevrilmesi;

$$V = \sqrt{\frac{2 * \rho_{su} * g * h * \sin \theta}{\rho_{hava}}} \quad (4.4)$$

şeklindedir.

Burada, hata değeri Taylor serisi açılımına göre  $x$  ve  $y$  gibi iki değişkene bağlı bir fonksiyonun;

$$f(x, y) = f(x, y)_n + (x - x_n) \frac{\partial f}{\partial x} + (y - y_n) \frac{\partial f}{\partial y} \quad (4.5)$$

yüksek mertebeden türevler atılarak hesaplanabilir.

Denklem 4.5 hızda meydana gelen hata miktarı için düzenlenerek denklem 4.6;

$$\Delta V = V(h, \theta) - V(h, \theta)_n = \Delta h \frac{\partial V}{\partial h} + \Delta \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \quad (4.6)$$

şeklinde elde edilir.

Bileşke hız büyüklüğünden elde edilen teğetsel hız;

$$V_t = V \cdot \sin \alpha \quad (4.7)$$

şeklinde buradaki hata ise;

$$\Delta V_t = V_t(h, \alpha) - V_t(h, \alpha)_n = \Delta h \frac{\partial V_t}{\partial h} + \Delta \alpha \frac{\partial V_t}{\partial \alpha} \quad (4.8)$$

yazılabilir.

Benzer şekilde eksenel hız ise;

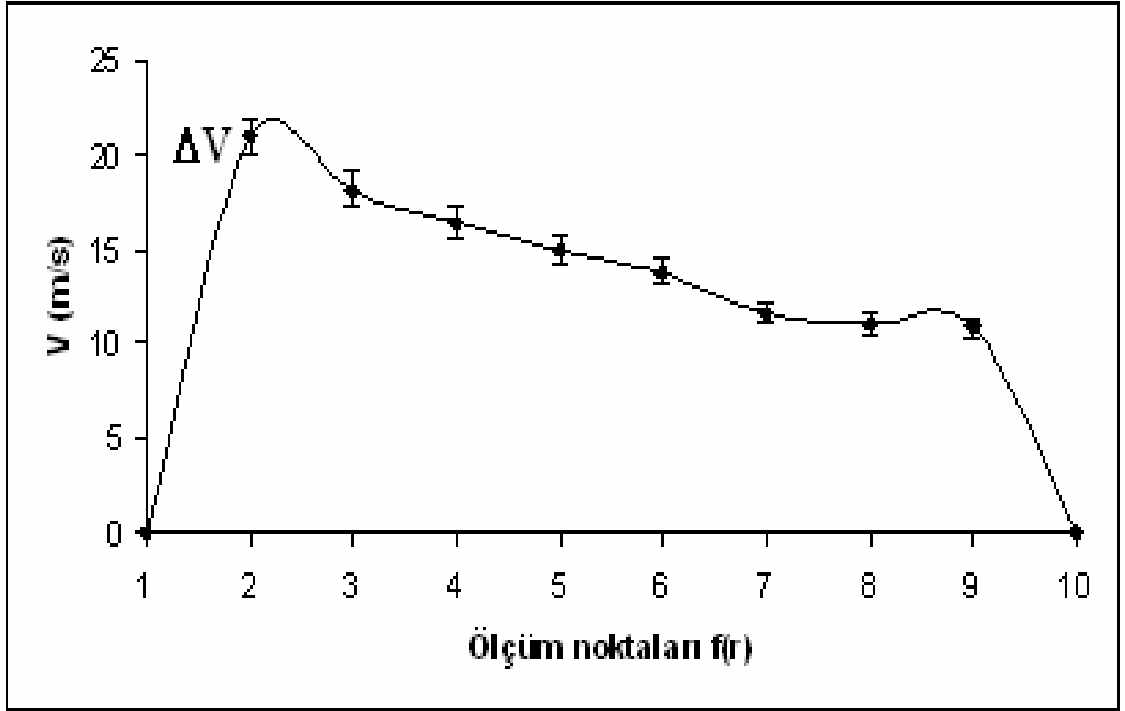
$$V_z = V \cdot \cos \alpha \quad (4.9)$$

şeklinde buradaki hata ise;

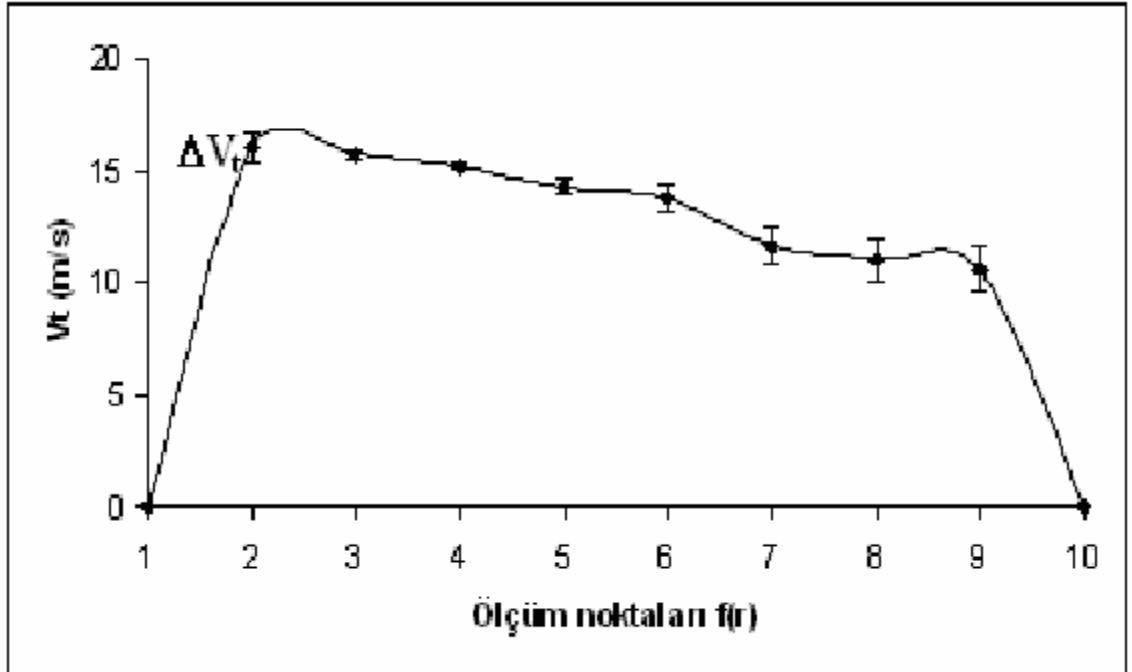
$$\Delta V_z = V_z(h, \alpha) - V_z(h, \alpha)_n = \Delta h \frac{\partial V_z}{\partial h} + \Delta \alpha \frac{\partial V_z}{\partial \alpha} \quad (4.10)$$

yazılabilir.

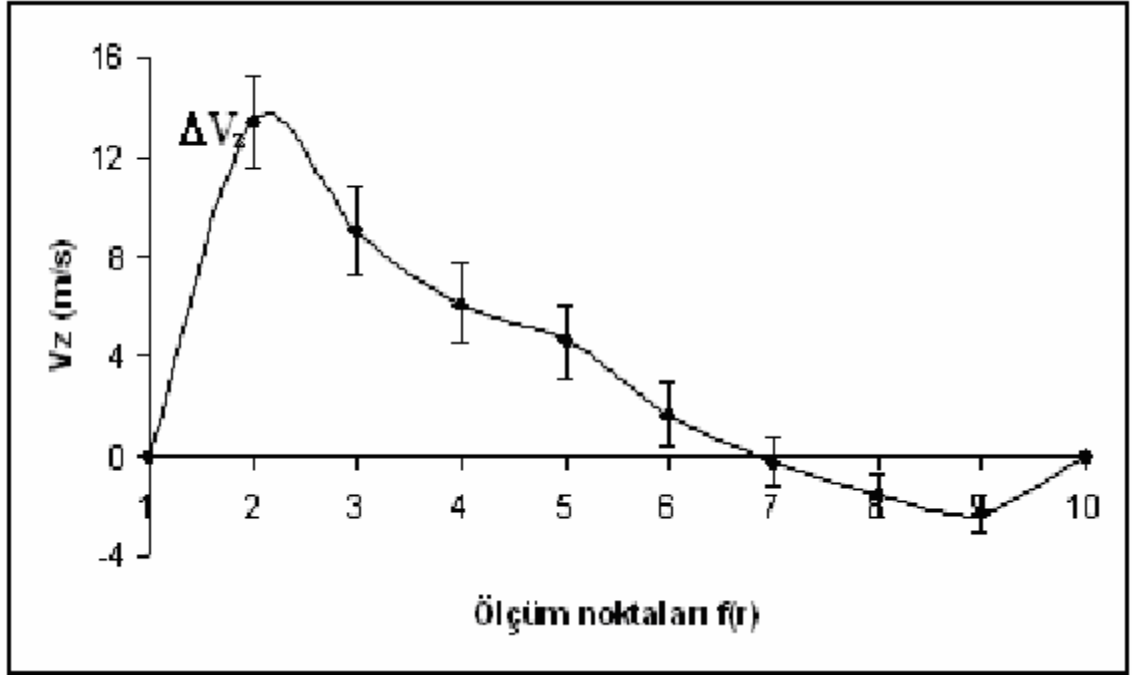
Buna göre hız değerlerindeki  $\Delta\theta=2^\circ$ ,  $\Delta h=1$  mm ve  $\Delta\alpha=5^\circ$  alınarak hata miktarları r siklon yarıçapına bağlı olarak şekil 4.99-4.101'de verilmiştir.



Şekil 4.99. 9.5 m/s giriş hızları için z=375 mm'de elde edilen bileşke hız ve  $\Delta V$  hata değerleri



Şekil 4.100. 9.5 m/s giriş hızları için z=375 mm'de elde edilen teğetsel hız ve  $\Delta V_t$  hata değerleri



Şekil 4.101. 9.5 m/s giriş hızları için  $z=375$  mm'de elde edilen aksenal hız ve  $\Delta V_z$  hata değerleri

Pitot tüpü ile yürütülen hız ölçümlerinde yukarıda hesaplanan hataların dışında, pitot tüpünün ölçüm ağzının hemen dışındaki hız gradyanı da hatalı değer okunmasına neden olduğu ilgili literatürden bilinmektedir. Yine, literatür incelendiğinde bu hatanın ölçüm yapılan noktaya bağlı olarak değiştiğini ve yüzeye yakın ve yüksek hız gradyanlarının bulunduğu noktalarda bu değerlerin % 8'e kadar yükselebileceği görülmektedir.

Pitot tüpü ile akış yönünde ölçümlerin alınabilindiği ilgili literatürden bilinmektedir. Girdaplı akışlarda akışın yönü değiştiği için akışın yönünün tayini oldukça zorlaşmaktadır. Bu amaçla, pitot tüpü ölçüm alınan kesitte  $360^\circ$  döndürülerek maksimum hızın elde edildiği açı tespit edilmiştir.

#### 4.4.2.3 Değerlendirme

Siklon çıkış borusunun basınç düşümü, hız büyüklükleri gibi parametreler üzerinde etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çıkış borusunun dalma uzunluğu ve çapı değiştirilerek farklı giriş hızlarında çalışılmıştır.

Siklon çıkış çapının küçük dalma uzunluğunun ise siklon giriş yüksekliğinden büyük olması durumunda çok yüksek basınç düşümlerinin meydana geldiği ancak giriş yüksekliğine eşit veya daha küçük dalma uzunluklarında basınç düşümlerinde önemli oranda azalmanın olduğu görülmektedir. Çıkış borusu çapının ise büyük olması durumunda dalma uzunluğuna bağlı olarak önemli sayılabilecek bir azalmanın olmadığı görülmüştür. Ancak, çıkış çapının büyük olması durumundaki basınç düşümleri küçük olmasına göre önemli oranda azalmaktadır.

Siklon çıkış çapının küçük olması durumunda en büyük dalma uzunluğunda giriş hızının yaklaşık üç katı teğetsel hız elde edilirken dalma uzunluğunun küçültülmesi durumunda küçük bir azalma meydana gelmektedir. Siklon çıkış çapının büyük olması durumunda dalma uzunluğunun siklon giriş yüksekliğinden büyük veya eşit olması durumunda ortalama giriş hızının iki katı teğetsel hız elde edilirken dalma uzunluğunun giriş yüksekliğinden küçük olması durumunda bu oran oldukça azalmaktadır. Aynı zamanda, aksel hız profilleri merkezde başka bir deyişle iç girdapta çok yüksek elde edilmiştir. Bunun nedeni, akışın siklon altına kadar inmeden iç girdaba katılımların artmasından kaynaklanmaktadır.

Farklı kesitler arasında elde edilen statik basınç farklarından siklon çıkış borusu çapının büyük ve dalma uzunluğunun siklon giriş yüksekliğinden küçük olması durumunda çok yüksek bir giriş hızında akışın siklon altına kadar inmediği tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan siklon çıkış borusu çapının çalışılan çaplar arasında ve dalma uzunluğunun ise siklon giriş yüksekliği kadar alınması hem basınç düşümü hemde partiküllü uygulamalarda partikül toplama verimi açısından uygun olacağı önerilmektedir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1 Giriş

Bu bölümde tez kapsamında elde edilen nümerik ve deneysel sonuçların bir özeti ile bu çalışma doğrultusunda ileride yürütülecek nümerik ve deneysel araştırmalar için tavsiye ve öneriler sunulmuştur.

### 5.2 Yenilikler ve Sonuçlar

Bu çalışmada, girdaplı akışların geometrik ve çalışma parametreleri altında inceleyebilmek amacıyla, iç içe ve ters yönlerde hareket eden vortex yapısıyla ilginç bir uygulama örneği olan siklonlar kullanılmıştır. Akış problemlerinin nümerik çözümleri için kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin uygunluğu incelenmiştir. Nümerik çözümlerde CFD Fluent yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel datalar ile karşılaştırılarak türbülans modelleri, şemalar, duvar fonksiyonları ve mesh sayısı gibi parametrelerin sonuçlar üzerinde etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel datalar ile karşılaştırıldığında en iyi sonuçların RSM türbülans modeli, Nonequilibrium duvar fonksiyonu, Basınç çözümünde PRESTO şemasının basınç-hız ilişkisi için SIMPLEC şeması kullanılarak, momentum denklemi için QUICK şeması, türbülans kinetik enerjisi ve yayılım oranı için ise Second Order Upwind şemasının ve Reynolds gerilmelerinin çözümünde ise First Order Upwind şemasıyla oluşturulan algoritma ile elde edildiği görülmüştür. Nümerik yöntem test edildikten sonra literatürde önemi vurgulanan ancak kapsamlı bir çalışma yapılmayan siklon toz giriş uzunluğu ve siklon boyu nümerik olarak çalışılmıştır. Siklondaki basınç düşümü, hız dağılımları ve partikül toplama verimi girdap yapısıyla ilişkilendirilmiş ve bu girdap yapısı üzerinde etkili olan toz giriş uzunluğu ve siklon boyu değerlendirilerek optimum  $L/D_1=4$  olarak önerilmiştir. Ayrıca, literatürde çok sınırlı çalışma bulunan ve basınç düşümü, partikül toplama verimi ve girdap yapısı üzerinde önemli etkisi olan yüzey pürüzlülüğü çalışılmış ve maksimum pürüzlülük kalınlığı için 0.1 mm genel olarak 0.0014 izafi pürüzlülük olarak önerilmiştir.

Deneysel çalışmalarda ise; iki farklı deney düzeneğinde siklon geometrik ölçüleri ve çalışma parametreleri değiştirilerek sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar giriş hızının artmasıyla basınç düşümünün arttığını göstermektedir. Çıkış borusu çapının toz giriş çapına eşit veya daha büyük olması durumunda oluşan santrifüj kuvvetlerin azalmasına neden olduğundan basınç düşümünde azalma olduğu aksi durumunda ise artma meydana geldiği görülmüştür. Bu geometrik değişimler belirli sınırlarda olmaktadır. Bu değerlerin çok büyük veya çok küçük olması durumunda oluşan girdap yapısı bozulacağından siklon özelliğini kaybedecektir. Ayrıca, geometrik ve çalışma parametrelerinin değiştirilmesiyle değişik kesitlerde hız profilleri elde edilmiştir. Hız profillerinin değişimiyle oluşan girdap yapısı elde edilmiştir. Giriş hızının artması oluşan santrifüj kuvvetleri arttıracığından doğal girdap uzunluğunu da artıracak ve dolayısı ile partikül toplama veriminin de artmasına neden olacaktır. Çıkış borusu çapının artması santrifüj kuvvetlerin azalmasına ve dolayısı ile de partikül toplama veriminin azalmasına neden olacaktır. Siklon içerisinde kalan çıkış borusu uzunluğunun (dalma uzunluğu) arttırılması santrifüj kuvvetleri arttıracak ve partikül toplama veriminin artmasına neden olacaktır.

### 5.3 Tavsiye ve Öneriler

Bu araştırma kapsamında yürütülen deneysel ve nümerik çalışmalar siklonlarda geniş bir geometrik ve çalışma parametreleri altında yapılmıştır. Girdaplı akışlarda nümerik olarak kabul edilebilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla izlenmesi gereken nümerik yöntem kapsamlı bir şekilde ifade edilmiştir. Türbülans modeli olarak RSM türbülans modelinin nonequilibrium duvar fonksiyonu ile kullanılarak ve basınç denkleminde PRESTO şemasının momentum ve türbülans denklemlerinde yüksek mertebeden Upwind şemaları ve Reynolds gerilmelerinde ise birinci mertebeden Upwind şemasının kullanılması sonuçların tahmin edilmesinde çok güçlü bir algoritma olduğu önerilmektedir ve girdaplı akış problemlerinin çözümünde bu algoritmanın kullanılması tavsiye edilmektedir.

Girdaplı akışları inceleyebilmek amacıyla ele alınan siklonda akış ve partikül toplama verimini iyileştirebilmek amacıyla toz giriş uzunluğu (diplek uzunluğu), siklon

boyu ve yüzey pürüzlülüğü etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan toz giriş uzunluğu siklon boyu ile ilişkilendirilmiş ve optimum geometrik oran  $L/D_1=4$  olarak önerilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ile ilgili olarak elde edilen sonuçlardan özellikle küçük siklonlar için pürüzlülük kalınlığının maksimum 0.1 mm diğer siklon modelleri için bu durum genelleştirilirse 0.0014 izafi pürüzlülük değerinden fazla olmaması gerektiği tavsiye edilmiştir.

Deneysel çalışmalar ise; siklon giriş hızının artmasıyla basınç düşümünde artış olduğunu göstermiştir. Çalışma parametrelerinin değiştirilmesi ile akış özelliklerinin değişmesi geometrik parametreler değişerek değişmektedir. Çıkış borusu çapının büyük olması basınç düşümünde azalma meydana getirirken küçük olması durumunda bu parametreyi artırmaktadır. Aynı zamanda, çıkış borusunun siklon içinde kalan kısmının az olması durumunda basınç düşümünde azalma meydana gelirken aksi durumda ise bu parametrelerin arttığı deneysel olarak elde edilmiştir. Bu durumlar girdap uzunluğu ve partikül toplama veriminin elde edilmesinde yol göstermektedir. Çıkış borusu çapının artması santrifüj kuvvetlerin azalmasına ve dolayısı ile de partikül toplama veriminin azalmasına neden olacaktır. Siklon içerisinde kalan çıkış borusu uzunluğunun arttırılması santrifüj kuvvetleri arttıracak ve partikül toplama veriminin artmasına neden olacaktır.

Çalışmanın devamı olarak deneysel çalışmaların partikül kullanılarak devam ettirilmesi diğer geometrik parametrelerin akış özellikleri ve partikül toplama verimi üzerinde etkilerinin incelenmesi araştırmaya yön verecek unsurlardır.

## 6. KAYNAKLAR

- ALTMAYER, S., MATHIEU, V., JULLEMIER, S., CONTAL, P., MIDOUX, N., RODE, S. ve LECLERC, J. P. 2004. Comparisor of Different Models of Cyclone Prediction Performance for Various Operating Conditions Using A General Software. *Chem. Eng. and Proc.*, 43: 511-522.
- AVCI, A. ve KARAGOZ, I. 2000. A Mathematical Model for the Determination of A Cyclone Performance. *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer*, 27(2): 263-272.
- AVCI, A. ve KARAGOZ, I. 2001. Theoretical Investigation of Pressure Losses in Cyclone Separators. *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, 28(1): 107-117.
- AVCI, A., KARAGOZ, I. 2003. Effect of Flow and Geometrical Parameters on the Collection Efficiency in Cyclone Separators. *Aerosol Science*, 34: 937-955.
- BERNARDO, S., MORI, M., PERES, A. P., DIONISIO R. P. 2006. 3-D Computational Fluid Dynamics for Gas and Gas-Particle Flows in A Cyclone with Different Inlet Section Angles. *Powder Tec.*, 162: 190-200.
- BINGTAO, Z., HENGGEN, S., YANMING, K. 2004. Development of A Symmetrical Spiral Inlet to Improve Cyclone Separator Performance. *Powder tec.*, 145: 47-50.
- BINGTAO, Z. 2005. Experimental Investigation of Flow Patterns in Cyclones with Conventional and Symmetrical Inlet Geometries. *Chem. Eng. Tech.*, 9: 28.
- BINGTAO, Z. 2005. Development of A New Method for Evaluating Cyclone Efficiency. *Chemical Eng. and Pro.*, 44: 447-451.
- BLACHMAN, M. W. ve LIPPMANN, M. 1974. Performance Characteristics of the Multicyclone Aerosol Sampler. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.*, 35: 311-326.
- BOHNET, M. 1995. Influence of the Gas Temperature on the Separation Efficiency of Aerosolcyclones. *Che. Eng. and Pro.*, 34: 151-156.
- BRYANT, H. S., SILVERMAN, R. W. ve ZENZ F. A. 1983. How dust in Gas Affects Cyclone Pressure Drop. *Hydrocarbon Process.*, 62: 87-90.
- BURKHOLZ, A. 1984. Appoximation Formulae for Particle Separation in Cyclones. *Ger. Chem. Engng.*, 8: 351-358.
- BUTTNER, H. 1988. Size Separation of Particles from Aerosol Samples Using Impactors and Cyclones. *Part. Part. Syst. Charact.*, 5: 87-93.
- BUTTNER, H. 1999. Dimensionless Representation of Particle Separation Characteristic of Cyclones. *J. Aerosol Science*, 30: 1291-1302.

CASAL, J. ve MARTINEZ-BENET, J. M. 1983. A Better Way to Calculate Cyclone Pressure Drop. *Chem. Eng.*, 99-108.

CHAN, T. ve LIPPMANN, M. 1977. Particle Collection Efficiencies of Air Sampling Cyclones: An Empirical Theory. *Environ. Sci. Technol.*, 11: 377-382.

CHEN, J., SHI, M. 2006. A Universal Model to Calculate Cyclone Pressure Drop. *Powder Tech.*, 171: 184-191.

CHUAH, T. G., GIMBUN, J., THOMAS, S. Y. C. 2006. A CFD Study of the Effect of Cone Dimensions on Sampling Aerocyclones Performance and Hydrodynamics. *Powder Tech.*, 162: 126-132.

CHU, K. W., YU, A. B. 2008. Numerical Simulation of Complex Particle-Fluid Flows. *Pow. Tech.*, 179(3): 104-114.

COOPER, D. W. 1983. Cyclone design: Sensitivity, Elasticity and Error Analyses. *Atmos. Envir.*, 17: 485-489.

CORTES, C., GIL, A. 2007. Modeling the Gas and Particle Flow Inside Cyclone Separators. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33: 409-452.

DEOTTE, R. E. 1990. Characterization of the Velocity Field in Small, Cylindrical, Low Reynolds Number Aerosol Sampling Cyclone. *Aerosol Sci. Technol.*, 12: 1037-1049.

DIETZ, P. W. 1981. Collection Efficiency of Cyclone Separators. *AIChE J.*, 27: 888-892.

DÍRGO, J. ve LEITH, D. 1985. Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions. *Aerosol Sci. Technol.*, 4: 401-411.

DORMAN, R. G. 1974. *Dust Control and Air Cleaning*. Pergamon Press Ltd., Germany.

FABIO, L. F., LEONARDO, G. JR. 2000. A Study of the Effect of High Inlet Solids Loading on A Cyclone Separator Pressure Drop and Collection Efficiency. *Powder Technology*, 107: 60-65.

FLUENT INCORPORATION. 1997. *Fluent 4.4 User's Guide Second Edition*, 4: 19-111.

GIL, A., ROMEO, L.M. ve CORTÉS, C. 2002. Effect of the Solid Loading on A Pressurized Fluidized Bed Combustors Cyclone with Pneumatic Extraction of Solids. *Chem.Eng. Technol.*, 25: 407-415.

GIRIFITHS, W. D. ve BOYSAN, F. 1996. *Computational Fluid Dynamics(CFD) and*

Empirical Modelling of the Performance of A Number of Cyclone Samplers. *J. Aerosol Sci.*, 27: 281-304.

GONG, A. L. ve WANG, L.-ZE. 2004. Numerical Study of Gas Phase Flow in Cyclones with the Repds. *Aerosol Science and Tec.*, 38: 506-512.

GUPTA, A. K., LILLEY, D. C. ve SYRED, N. 1984. *Swirl Flows*. Abacus Press, 295-310.

GUSTAVSEN, A. 2001. *Heat Transfer in Window Frames with Internal Cavities*. Norwegian University of Science and Technology.

HIDETO, Y., KUNIHIRO, F., KENJI, Y., EIJI, S. 2001. Particle Separation by Iinoya's Type Gas Cyclone. *Powder Tec.*, 118: 16-23.

HOFFMAN, A. C., DE GROOT, M., PENG, W., DRIES, H. W. A. ve KATER, J. 2001. Advantages and Risks in Increasing Cyclone Separator Length. *AIChE Journal*, 47(11): 2452-2460.

HOFFMANN, A. C. , JONGE, R. D., ARENDS, H. ve HANRATS, C. 1995. Evidence of the Natural Vortex Length and Its Effect on the Separation Efficiency of Gas Cyclones. *Filt. Separation*, 32: 799-804.

IOZA, D. L. ve LEITH, D. 1989. Effect of Cyclone Dimensions on Gas Flow Pattern and Colection Efficiency. *Aerosol Sci. Technol.*, 10: 491-500.

IOZA, D. L. ve LEITH, D. 1990. The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency. *Aerosol Sci. Technol.*, 12: 598-606.

JI, Z., WU, X. ve SHI, M. 1991. Experimental Research on the Natural Turning Length of the Cyclone. In *FilTech. Europa*, 91(2): 583-589.

JOLIUS, G., CHUAH, T. G., FAKHRU'L-RAZI, A., THOMAS, S. Y. C. 2005. The Influence of Temperature and Inlet Velocity on Cyclone Pressure Drop: A CFD Study. *Chemical Engineering and Processing*, 44: 7-12.

KARAGOZ, I., ve AVCI, A. 2005. Modelling of the Pressure Drop in Tangential Inlet Cyclone Separators. *Aerosol Sci Technol.*, 39 (9): 857-865.

KARAGOZ, I., KAYA, F. 2007. CFD Investigation of the Flow and Heat Transfer Characteristics in A Tangential Inlet Cyclone. *Int. Com. in Heat And Mass Trans.*, 34(9-10): 1119-1126.

KAYA, F., KARAGÖZ, İ. 2007. Girdaplı Akışlarda Türbülans Modellerinin Uygunluğunun İncelenmesi. *Uludağ Üni. Müh.-Mim. Fak. Dergisi*, 1: 85-96.

KAYA, F. ve KARAGOZ, I. 2008. Performance Analysis of Numerical Schemes in Highly Swirling Turbulent Flows in Cyclones. *Current Sci.*, 94(10): 1273-1278.

- KAYA, F., AVCI, A., KARAGÖZ, İ. 2008. Araçlarda hava filtresi olarak siklon ayırıcılarının kullanımı, OTEKON'08 Bursa, 153-159.
- KAYA, F., KARAGÖZ, İ. 2008. Siklon ayırıcılarında çıkış borusunun akış ve performans üzerine etkilerinin incelenmesi, Ç.Ü. MMF 30 Sempozyumu Adana, 525-531.
- KAYA, F., KARAGOZ, I. 2009. Numerical Investigation of Performance Characteristics of a Cyclone Prolonged with a Dipleg, Chemical Engineering Journal, Available Online Elsevier, DOI:10.1016/j.cej.2009.01.040.
- KENNY, L. C. ve GUSSMAN, R. A. 1995. Characterisation and Modelling of a Family of Cyclone Aerosol Preseparators. J. Aerosol Sci., 26: 777-778.
- KENNY, L. C. ve GUSSMAN, R. A. 1997. Characterisation and Modelling of A Family of Cyclone Preseparators. Journal of Aerosol Science, 26: 677-688.
- KIM, J. C. ve LEE, K. W. 1990. Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones. Aerosol Sci. Technol., 12: 1003-1015.
- KONIG, C., BUTTNER, H. ve EBERT, F. 1991. Design Data for Cyclones. Part. Part. Syst. Charact., 8: 301-307.
- LAPPLE, C. E. 1951. Processes Use Many Collector Types. Chem. Engineering, 58: 144-151.
- LEITH, D. ve LICHT, W. 1972. The Collection Efficiency of Cyclone the Particle Collectors- a New Theoretical Approach. AIChE Symp. Ser., 68: 196-206.
- LEITH, D. ve MEHLTA, D. 1973. Cyclone Performance and Design. Atmos. Env., 7: 527-549.
- LIDEN, G. ve GUDMUNDSSON, A. 1997. Semi-Empirical Modelling to Generalise the Dependence of Cyclone Collection Efficiency on Operating Conditions and Cyclone Design. J. Aerosol Sci., 28: 853-874.
- LIDEN, G. ve KENNY, L. C. 1991. Comparision of Measured Respirable Dust Sampler Penetration Curves with Sampling Conventions. Ann. Occup. Hyg., 35: 485-504.
- LIPPMANN, M. ve CHAN, T. L. 1979. Cyclone Sampler Performance. Staub., 39: 7-11.
- MAYNARD, A. D. ve KENNY, L. C. 1995. Performance Assesment of Three Personal Cyclone Models, Using an Aerodynamic Particle Sizer. J. Aerosol Sci., 26: 671-684.
- MOORE, M. E. ve MCFARLAND, A. R. 1993. Performance Modeling of Single-Inlet Aerosol Sampling Cyclones. Environ. Sci. Technol., 27: 1842-1848.

MOTHES, H. ve LOFFLER, F. 1988. Prediction of Particle Removal in Cyclone Separators. *Int. Chem. Engng.*, 28: 231-240.

MUSCHELKNAUTZ, E. 1970. Auslegung von Zyklonabscheidern in der Technischen Praxis. *Staub Reinhalt. Luft.*, 30: 187 –195.

MUSCHELKNAUTZ, E. ve KRAMBROCK, W. 1970. Aerodynamische Beiwerte des Zyklonabscheiders Aufgrund Neuer und Verbessertter Messungen. *Chem.-Ing.-Technol.*, 42: 247-255.

NARASIMHA, M., SRIPRIYA, R., BANERJEE, P. K. 2005. CFD Modelling Hydrocyclone-Prediction of Cut Size. *Int. J. Miner. Process.*, 75: 53-68.

OGAWA, A. 1984. Estimation of the Collection Efficiencies of the Three Types of the Cyclone Dust Collectors from the Standpoint of the Flow Patterns in the Cylindrical Dust Collectors. *Bull JSME* , 27: 64.

PARKER, R., JAIN, R., CALVERT, S., DREHMEL, D. ve ABBOTT, J. 1981. Particle Collection in Cyclones at High Temperatures and High Pressures. *Environ. Sci. Technol.*, 15: 451-458.

PATTERSON, P. A. ve MUNZ, R. J. 1989. Cyclone Collection Efficiencies at Very High Temperatures. *Can. J. Chem. Eng.*, 67: 321-328.

PENG, W., BOOT, P. J. A. J., HOFFMANN, A.C., DRIES, H. W. A., KATER, J., EKKER, A. 2001. Flow in the Inlet Region in Tangential Inlet Cyclones. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 40(23): 5649-5655.

PENG, W., HOFFMANN, A. C., BOTT, P. J. A. J., UDDING, A., DRIES, H. W. A., EKKER, A., KATER, J. 2002. Flow Pattern in Reverse-Flow Centrifugal Separators. *Powder Technology*, 127: 212-222.

QIAN, F., ZHANG, J., ZHANG, M. 2006. Effects of the Prolonged Vertical Tube on the Separation Performance of A Cyclone. *Journal of Hazardous Materials*, B136: 822-829.

SHENG, Y. Q. 1999. Modifications to the Simple Method for Buoyancy-Driven Flow. PhD thesis, McMaster University.

SHEPHERD, G. B. ve LAPPLE, C. E. 1939. Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors. *Ind. Engng. Chem.*, 31.

SHIN, MI-S., KIM, H. S., JANG, D. S., CHUNG, J. D., BOHNET, M. 2005. A Numerical and Experimental Study on A High Efficiency Cyclone Dust Separator for High Temperature and Pressurized Environments. *Applied Thermal Eng.*, 25: 1821-1835.



SLACK, M. D., DEL PORTE, S., ENGELMAN, M. S. 2004. Designing Automated Computational Fluid Dynamics Modelling Tools for Hydrocyclone Design. *Minerals Eng.*, 17: 705-711.

SMITH, W. B., WILSON, R. R., ve HARRIS, D. B. 1979. A Five-Stage Cyclone System for in-situ Sampling. *Environ. Sci. Technol.*, 13: 1387-1392.

SOLERO, G. ve COGHE, A. 2002. Experimental Fluid Dynamic Characterization of A Cyclone Chamber. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 27(1): 87-96.

STAIRMAND, C. J. 1951. The Design and Performance of Cyclone Separators. *Trans. Instn. Chem. Eng.*, 29: 356-383.

UPTON, S. L., MARK, D., HALL, D. ve GRIFFITHS, W. D. 1994. A Wind Tunnel Evaluation of the Sampling Efficiencies of Three Bioaerosol Samplers. *J. Aerosol Sci.*, 25: 1493-1501.

WANG, J. J., WANG, L.-ZE ve LIU, C. W. 2005. Effect of A Stick on the Gas Turbulence Structure in A Cyclone Separator. *Aerosol Science and Tec.*, 39: 713-721.

WAN, G., SUN, G., XUE, X., SHI, M. 2008. Solid Concentration Simulation of Different Size Particles in A Cyclone Separator. *Pow. Tech.*, 183: 94-104.

XIANG, R. B., LEE, K. W. 2005. Numerical Simulation of Flow Patterns in Cyclones of Different Cone Dimensions. *Part. Part. Syst. Cha.*, 22: 212-218.

XIANG, R., PARK, S. H. ve LEE, K. W. 2001. Effect of Cone Dimension on Cyclone Performance. *Journal of Aerosol Sci.*, 32: 549-561.

XIAODONG, L., JIANHUA, Y., YUCHUN, C., MINGJIANG, N., KEFA, C. 2003. Numerical Simulation of the Effects of Turbulence Intensity and Boundary Layer on Separation Efficiency in A Cyclone Separator. *Che. Eng. J.*, 95: 235-240.

YOUNGMIN, J., CHI, T., MADHUMITA, B. R. 2000. Development of A Post Cyclone to Improve the Efficiency of Reverse Flow Cyclones. *Powder Tec.*, 113: 97-108.

ZHANG, R., BASU, P. 2004. A Simple Model for Prediction of Solid Collection Efficiency of A Gas-Solid Separator. *Powder Tech.*, 147: 86-93.

ZHOU, L. X. ve SOO, S. L. 1990. Gas-Solid Flow and Collection of Solids in a Cyclone Separator. *Powder Technology*, 63(1): 45-53.

ZHU, Y. ve LEE, K. W. 1999. Experimental Study on Small Cyclones Operating at High Flow Rates. *J. Aerosol Sci.*, 30: 1303-1315.

## TEŞEKKÜR

Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi ve doktora çalışmalarım için görevlendirildiğim andan itibaren desteğini hiç eksik etmeyen, doktora çalışmalarımda bilgi ve deneyimi ile çalışmalarımı yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ'e, tez izleme komitesinin değerli üyeleri Sayın Prof. Dr. Habib UMUR ile Sayın Prof. Dr. Erdoğan DİLAVEROĞLU'na, Bölüm Başkanım Sayın Prof. Dr. Muhsin KILIÇ'a ve çalıştığım konu ile ilgili olarak bilgilerini esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Atakan AVCI'ya en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Bu araştırmaya maddi kaynak sağlayan Uludağ Üniversitesi Rektörlüğü'ne desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum. Laboratuadaki çalışmalarım sırasında yardımcı olan teknisyen Sayın Yaşar KUMRALTEKİN'e ve bütün araştırma görevlisi arkadaşlarıma yardımlarından dolayı teşekkür ediyorum.

Çalışmalarım süresince bana moral veren, sevincimi ve sorunlarımı daima paylaşan aileme şükranlarımı sunuyorum.

Bu çalışmayı, rahmetli olan Annem Kezban KAYA'ya ithaf ederek çalışmanın onun adına bundan sonraki çalışmalara yardımcı olmasını diliyorum.

## ÖZGEÇMİŞ

Fuat KAYA 1976 yılında Kayseri ili Yahyalı ilçesinde doğdu. Bursa Yıldırım Bayazıt Lisesi'nden 1994 yılında mezun olan Fuat KAYA 1999 yılında Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden B.Sc ünvanını aldı. Aynı yıl Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'nde yüksek lisans çalışmalarına başlayarak 2000 yılında araştırma kadrosuna atandı. 2001 yılında M.Sc ünvanı alan Fuat KAYA 2002 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde doktora çalışmasına başladı. Ulusal ve uluslararası dergi ve konferanslarda İngilizce ve Türkçe yayınları bulunan Fuat KAYA halen Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.