



**NEWTONIAN OLMAYAN AKIŞKANLARIN  
SANTRİFÜJ POMPA  
PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİ**

**Muhammed DÖNMEZ**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NEWTONIAN OLMAYAN AKIŞKANLARIN SANTRİFÜJ POMPA  
PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİ**

**Muhammed DÖNMEZ**  
(0000-0002-9046-4989)

Dr. Öğr.Üyesi Onur YEMENİCİ  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### NEWTONIAN OLMAYAN AKIŞKANLARIN SANTRİFÜJ POMPA PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİ

**Muhammed DÖNMEZ**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr. Öğr.Üyesi Onur YEMENİCİ

Endüstride kullanılan uygulamaların birçoğunda santrifüj pompalar Newtonian olmayan akışkanlarla birlikte kullanılmaktadırlar. Newtonian olmayan akışkanların santrifüj pompa karakteristikleri üzerine etkileri Newtonian akışkanlarınkine tam olarak benzemediğinden su ile test edilip tasarlanan santrifüj pompaların Newtonian olmayan akışkanlar için de analiz edilmesi gerekmektedir.

Bu tezde Newtonian olmayan akışkanların düşük özgül hızlı birbirinden farklı iki santrifüj pompa performansı üzerine etkisi farklı rotor hızları ve debi değerlerinde nümerik olarak incelenmiştir. Pompalar temel tasarım parametreleri ile farklı kanat sayısı ve kanat çıkış açılarında bir optimizasyon gerçekleştirilerek tasarlanmıştır.

Pompa geometrisi, rotor hızı ve debi değişimiyle birlikte Newtonian olmayan akışkan viskozitesinin değiştiği ve bu durumdan santrifüj pompa performansının etkilendiği görülmüştür. 1. pompada en yüksek pompa basma yüksekliği su ile yapılan analizlerde elde edilirken, 2. pompada Newtonian olmayan akışkanlar su ile yapılanlara göre daha yüksek pompa basma yüksekliği vermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** CFD, Newtonian olmayan akışkanlar, radyal çark, santrifüj pompa performansı

**2019, xviii+ 155 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **EFFECTS of non-NEWTONIAN FLUIDS on CENTRIFUGAL PUMP PERFORMANCE**

**Muhammed DÖNMEZ**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Asst. Prof. Dr. Onur YEMENİCİ

Centrifugal pumps are used with non-Newtonian fluids in many industrial applications. Since the effects of non-Newtonian fluids on the characteristics of centrifugal pumps are not exactly similar to Newtonian fluids, centrifugal pumps designed and tested with water should also be analyzed for non-Newtonian fluids.

In this thesis, the effect of non-Newtonian fluids on the performance of two different centrifugal pumps designed low specific speed is investigated numerically at different rotor speeds and flow rates. The pumps are designed with basic design parameters and an optimization of different number of blade and outlet blade angle.

It has been observed that non-Newtonian fluid viscosity changes with the change of pump geometry, rotor speed and flow rate and this affects the performance of the centrifugal pump. In pump 1, the highest pump head was obtained by analysis with water, whereas in pump 2, non-Newtonian fluids yielded higher pump head than in water.

**Key words:** CFD, non-Newtonian fluids, radial impeller, centrifugal pump performance  
**2019, xviii + 155 pages.**

## TEŐEKKÜR

Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü yüksek lisans eğitim süresince bilgisini ve deneyimini cömertçe bizlerle paylaşan Dr.Öğr.Üyesi Onur YEMENİCİ' ye teşekkürlerimi sunuyorum.

Hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü durumda yanımda duran başta ailem olmak üzere bütün dostlarıma şükranlarımı sunuyorum.

Muhammed DÖNMEZ  
.../.../...



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	v
ABSTRACT.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	3
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	9
3.1. Giriş.....	9
3.2. Santrifüj Pompalar .....	9
3.2.1. Çark.....	10
3.2.2. Salyangoz .....	12
3.2.3. Debi.....	13
3.2.4. Manometrik Basma Yüksekliği.....	13
3.2.5. Güç ve verim .....	14
3.2.6. Hız Üçgenleri ve Pompa Tasarımı .....	16
3.2.7. Pompa kayıpları .....	18
3.3. Akışkan ve Akışkan Türleri .....	26
3.3.1. Newtonian Akışkanlar.....	26
3.3.2. Newtonian Olmayan Akışkanlar .....	28
3.3.2.1. Zamandan Bağımsız Akış Davranışı.....	29
3.3.2.1. Zamana Bağlı Akış Davranışı .....	33
3.4. Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği .....	34
3.4.1. Korunum Denklemleri .....	35
3.4.2. ANSYS CFD-CFX.....	38
3.4.2.1. Vista CPD Tasarımı .....	39
3.4.2.2. BladeGen.....	39
3.4.3. Optimizasyon (1.pompa).....	41
3.4.4. Optimizasyon (2.pompa).....	45
3.4.5. Cross ve Power-Law Model Karşılaştırması .....	60
3.4.6. Literatür Korelasyonu .....	65
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	70
5. SONUÇ.....	149
KAYNAKLAR .....	153
ÖZGEÇMİŞ .....	155

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$n$	Akış davranış sabiti (-)
$r_i$	Akışkanın dönme eksenine olan mesafesi (m)
$\omega_i$	Akışkanın dönme hızını (rad/s)
P	Basınç (Pa)
$\zeta$	Basınç kayıp katsayısı (-)
$D_2$	Çark çıkış çapı (mm)
$D_1$	Çark giriş çapı (mm)
n	Dakikadaki devir sayısı (rpm)
Q	Debi (m <sup>3</sup> /sa)
$\mu$	Dinamik viskozite (Pa.s)
V	Hız (m/s)
$D_h$	Hidrolik çap (mm)
$\beta_2$	Kanat çıkış açısı ( <sup>0</sup> )
$\beta_1$	Kanat giriş açısı ( <sup>0</sup> )
$\beta_m$	Kanat ortalama açısı ( <sup>0</sup> )
Z	Kanat sayısı (-)
$\tau$	Kayma gerilmesi (N/m <sup>2</sup> )
$\dot{\gamma}$	Kayma hızı (1/s)
K	Kıvamlılık parametresi (N/m <sup>2</sup> s <sup>n</sup> )
$\nu$	Kinematik viskozite (m <sup>2</sup> /s)
$\tau_0$	Kritik kayma gerilimi (N/m <sup>2</sup> )
H	Pompa basma yüksekliği (m)
n	Rotor hızı (rpm)
f	Sürtünme kayıp katsayısı (-)
$\varepsilon$	Türbülans kinetik enerji dissipasyonu
k	Türbülans kinetik enerjisi
$\mu_t$	Türbülans viskozitesi (Pa.s)
u	x-yönündeki hız (m/s)
$\bar{u}$	x-yönündeki ortalama hız (m/s)
$\eta$	Verim (%)
v	y-yönündeki hız (m/s)
$\bar{v}$	y-yönündeki ortalama hız (m/s)
g	Yer çekimi ivmesi (m <sup>2</sup> /s)
$\rho$	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
A	Yüzey alanı (m <sup>2</sup> )
$\varepsilon$	Yüzey pürüzlülüğü (mm)
w	z-yönündeki hız (m/s)
$\bar{w}$	z-yönündeki ortalama hız (m/s)

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
atm.	Atmosfer
CMC	Carboxy methyle cellulose
CPD	Centrifugal Pump Design
CFD	Computational Fluids Dynamic
HAD	Hesaplamaalı Akışkanlar Dinamiği
ppm	Parts per million
Pa	Paskal
RPM	Revolutions per Minute
R1	Rotor-hareketli kısım
S1	Stator-sabit kısım





## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 3. 1. Santrifüj pompa ve temel bileşenleri .....	10
Şekil 3. 2. Açık çark.....	11
Şekil 3. 3. Yarı açık çark.....	11
Şekil 3. 4. Kapalı çark.....	12
Şekil 3. 5. Sıvının çark kanallarından çıkışı ve salyangoz içinde akışı.....	13
Şekil 3. 6. Çark çıkış ve girişindeki hız üçgenleri.....	17
Şekil 3. 7. Özgül hıza göre çark şekli, çıkış hız üçgeni ve performans eğrileri.....	18
Şekil 3. 8. Pompadaki mekanik ve hidrolik kayıplara neden olan bileşenler .....	19
Şekil 3. 9. Moody diyagramı.....	21
Şekil 3. 10. Kesit genişlemesinden kaynaklı vorteks oluşumları ve hız değişimi .....	22
Şekil 3. 11. Kesitteki daralma kaynaklı oluşan hız değişimi ve vorteksler.....	23
Şekil 3. 12. Basınç kayıp katsayısının kesit genişleme ve daralması durumunda değişimi .....	24
Şekil 3. 13. Çeşitli kesitlerdeki basınç kayıp katsayıları (Johann Friedrich Gülich 2010' den değiştirilerek alınmıştır) .....	24
Şekil 3. 14. Çarktaki muhtemel vorteks akış bölgeleri .....	25
Şekil 3. 15. Çark kanadının ön kenarında vorteks oluşumu.....	26
Şekil 3. 16. İki paralel levha arasında akışta hız profili .....	27
Şekil 3. 17. Zamandan bağımsız akışkanların gösterimi .....	29
Şekil 3. 18. Kayma incilmesi davranışı .....	30
Şekil 3. 19. Zamana bağlı tiksotropik ve reopektif akış davranışı .....	34
Şekil 3. 20. İşlem şeması.....	40
Şekil 3. 21. 1.Pompa için farklı kanat varyasyonlarına sahip çarklar (a) 5 kanatlı, (b) 6 kanatlı, (c) 7 kanatlı.....	41
Şekil 3. 22. 1.pompa 5 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	42
Şekil 3. 23. 1.pompa 6 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	42
Şekil 3. 24. 1.pompa 7 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	43
Şekil 3. 25. 1.pompa 20 <sup>0</sup> kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	44
Şekil 3. 26. 1.pompa 25 <sup>0</sup> kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	44
Şekil 3. 27. 1.pompa 30 <sup>0</sup> kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	45
Şekil 3. 28. 2.Pompa için farklı kanat varyasyonlarına sahip çarklar (a) 6 kanatlı, (b) 7 kanatlı, (c) 8 kanatlı, (d) 9 kanatlı, (e) 10 kanatlı, (f) 11 kanatlı.....	46
Şekil 3. 29. 2. pompa 6 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	47
Şekil 3. 30. 2. pompa 7 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	47
Şekil 3. 31. 2. pompa 8 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	48
Şekil 3. 32. 2. pompa 9 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	48
Şekil 3. 33. 2. pompa 10 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	49
Şekil 3. 34. 2. pompa 11 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	49
Şekil 3. 35. 2. pompa 17 <sup>0</sup> kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	50
Şekil 3. 36. 2. pompa 19 <sup>0</sup> kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı .....	50

Şekil 3. 37. 2. pompa 20 <sup>0</sup> kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı	51
Şekil 3. 38. 2. pompa 25 <sup>0</sup> kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı	51
Şekil 3. 39. 2. pompa 30 <sup>0</sup> kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı	52
Şekil 3. 40. Özgül hıza bağlı olarak çark şekilleri (a)1. Pompa, (b) 2. Pompa	52
Şekil 3. 41. Akışkanın Çarka Giriş ve Çıkışı ve Kanadın Meridyonel Girişi (a) 1. Pompa, (b) 2. Pompa	53
Şekil 3. 42. Kanattan Kanada Görünümü	53
Şekil 3. 43. 3-B Çarkın Görünümü (a) 1. Pompa, (b) 2. Pompa	54
Şekil 3. 44. Santrifüj pompada çarkın yapılandırılmış turbo grid mesh yapısı (a) 1. Pompa, (b) 2. Pompa (c) kanat tarafında yoğunluk arttırılmış	54
Şekil 3. 45. Santrifüj pompada salyangozun yapılandırılmamış mesh yapısı (a) 1. Pompa, (b) 2. Pompa (c) mesh yoğunluğu arttırılmış bölgeler	55
Şekil 3. 46. Salyangozun rotor kısmı olan çark[R1] yeşil renkli, (a) 1. Pompa için rotor kısmı (b) 2. Pompa için rotor kısmı	57
Şekil 3. 47. Salyangozun sabit kısmı olan salyangoz[S1] yeşil renkli, (a) 1. Pompa için salyangoz kısmı (b) 2. Pompa için salyangoz kısmı	57
Şekil 3. 48. 1.pompa için k-ε ve SST türbülans modellerinin kullanımı	58
Şekil 3. 49. 2. pompa için k-ε ve SST türbülans modellerinin kullanımı	59
Şekil 3. 50. Türbülans yoğunluğunun 1. pompa için çözüme etkisi	60
Şekil 3. 51. Türbülans yoğunluğunun 2.pompa için çözüme etkisi	60
Şekil 3. 52. 1450 rpm, 25 kg/s şartlarında CMC %0.2 için 1.pompa da (a), (c), (e) Cross model için, (d), (e), (f) Power-Law model için basınç, hız ve viskozite dağılımları	62
Şekil 3. 53. 1450 rpm, 25 kg/s şartlarında CMC %0.4 için 1. pompa da (a), (c), (e) Cross model için, (d), (e), (f) Power-Law model için basınç, hız ve viskozite dağılımları	63
Şekil 3. 54. 1450 rpm, 45 kg/s şartlarında CMC %0.2 için 2.pompa da (a), (c), (e) Cross model için, (d), (e), (f) Power-Law model için basınç, hız ve viskozite dağılımları	64
Şekil 3. 55. 1450 rpm, 45 kg/s şartlarında CMC %0.4 için 2.pompa da (a), (c), (e) Cross model için, (d), (e), (f) Power-Law model için basınç, hız ve viskozite dağılımları	65
Şekil 3. 56. Kanadın Meridyonel Görünüşü ve 3B çark	66
Şekil 3. 57. Çarkın yapılandırılmış mesh görünümü	66
Şekil 3. 58. Sınır koşulları uygulanmış çark	67
Şekil 3. 59. Denklemlerin çözümü	67
Şekil 4. 1. 1. pompa, 1450 rpm ve 5 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı	70
Şekil 4. 2. 1. pompa, 1450 rpm ve 10 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı	70
Şekil 4. 3. 1. pompa, 1450 rpm ve 15 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı	71
Şekil 4. 4. 1. pompa, 1450 rpm ve 20 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı	71
Şekil 4. 5. 1. pompa, 1450 rpm ve 25 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı	71
Şekil 4. 6. 1. pompa, 1450 rpm ve 30 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı	72
Şekil 4. 7. 1. pompa, 1450 rpm ve 35 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı	72
Şekil 4. 8. 1. pompa, 1450 rpm'de su için pompa basma yükseklikleri	73
Şekil 4. 9. 1. pompa, 1450 rpm'de su için verim değerleri	74
Şekil 4. 10. 1. pompa, 1000 rpm ve 5 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı	74
Şekil 4. 11. 1. pompa, 1000 rpm ve 10 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı	75
Şekil 4. 12. 1. pompa, 1000 rpm ve 15 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı	75

Şekil 4. 13. 1. pompa, 1000 rpm ve 20 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı....	75
Şekil 4. 14. 1. pompa, 1000 rpm ve 25 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı....	76
Şekil 4. 15. 1. pompa, 1000 rpm ve 30 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı....	76
Şekil 4. 16. 1. pompa, 1000 rpm ve 35 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı....	76
Şekil 4. 17. 1. pompa, 1000 rpm'de su için pompa basma yükseklikleri .....	77
Şekil 4. 18. 1. pompa, 1000 rpm'de su için verim değerleri .....	78
Şekil 4. 19. 1. pompa, 500 rpm ve 3 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı.....	78
Şekil 4. 20. 1. pompa, 500 rpm ve 6 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı.....	79
Şekil 4. 21. 1. pompa, 500 rpm ve 9 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı.....	79
Şekil 4. 22. 1. pompa, 500 rpm ve 12 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı.....	79
Şekil 4. 23. 1. pompa, 500 rpm ve 15 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı.....	80
Şekil 4. 24. 1. pompa, 500 rpm'de su için pompa basma yükseklikleri .....	80
Şekil 4. 25. 1. pompa, 500 rpm'de su için verim değerleri .....	81
Şekil 4. 26. 1. pompa, 1450 rpm ve 5 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	81
Şekil 4. 27. 1. pompa, 1450 rpm ve 10 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	82
Şekil 4. 28. 1. pompa, 1450 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	82
Şekil 4. 29. 1. pompa, 1450 rpm ve 20 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	83
Şekil 4. 30. 1. pompa, 1450 rpm ve 25 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	83
Şekil 4. 31. 1. pompa, 1450 rpm ve 30 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	84
Şekil 4. 32. 1. pompa, 1450 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	84
Şekil 4. 33. 1. pompa, 1450 rpm'de CMC %0.2 için pompa basma yükseklikleri.....	85
Şekil 4. 34. 1. pompa, 1450 rpm'de CMC %0.2 için verim değerleri .....	86
Şekil 4. 35. 1. pompa, 1000 rpm ve 5 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	86
Şekil 4. 36. 1. pompa, 1000 rpm ve 10 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	87
Şekil 4. 37. 1. pompa, 1000 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	87
Şekil 4. 38. 1. pompa, 1000 rpm ve 20 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	88
Şekil 4. 39. 1. pompa, 1000 rpm ve 25 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	88
Şekil 4. 40. 1. pompa, 1000 rpm ve 30 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	89
Şekil 4. 41. 1. pompa, 1000 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	89
Şekil 4. 42. 1. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.2 için pompa basma yükseklikleri.....	90
Şekil 4. 43. 1. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.2 için verim değerleri .....	91
Şekil 4. 44. 1. pompa, 500 rpm ve 3 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	91

Şekil 4. 45. 1. pompa, 500 rpm ve 6 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	92
Şekil 4. 46. 1. pompa, 500 rpm ve 9 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	92
Şekil 4. 47. 1. pompa, 500 rpm ve 12 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	93
Şekil 4. 48. 1. pompa, 500 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	93
Şekil 4. 49. 1. pompa, 500 rpm'de CMC %0.2 için pompa basma yükseklikleri.....	94
Şekil 4. 50. 1.pompa, 500 rpm de CMC %0.2 için verim değerleri.....	94
Şekil 4. 51. 1. pompa, 1450 rpm ve 5 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	95
Şekil 4. 52. 1. pompa, 1450 rpm ve 10 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	96
Şekil 4. 53. 1. pompa, 1450 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	96
Şekil 4. 54. 1. pompa, 1450 rpm ve 20 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	97
Şekil 4. 55. 1. pompa, 1450 rpm ve 25 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	97
Şekil 4. 56. 1. pompa, 1450 rpm ve 30 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	98
Şekil 4. 57. 1. pompa, 1450 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	98
Şekil 4. 58. 1. pompa, 1450 rpm'de CMC %0.4 için pompa basma yükseklikleri.....	99
Şekil 4. 59. 1. pompa, 1450 rpm'de CMC %0.4 için verim değerleri.....	100
Şekil 4. 60. 1. pompa, 1000 rpm ve 5 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	100
Şekil 4. 61. 1. pompa, 1000 rpm ve 10 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	101
Şekil 4. 62. 1. pompa, 1000 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	101
Şekil 4. 63. 1. pompa, 1000 rpm ve 20 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	102
Şekil 4. 64. 1. pompa, 1000 rpm ve 25 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	102
Şekil 4. 65. 1. pompa, 1000 rpm ve 30 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	103
Şekil 4. 66. 1. pompa, 1000 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	103
Şekil 4. 67. 1. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.4 için pompa basma yükseklikleri.....	104
Şekil 4. 68. 1. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.4 için verim değerleri.....	104
Şekil 4. 69. 1. pompa, 500 rpm ve 3 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	105
Şekil 4. 70. 1. pompa, 500 rpm ve 6 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	106

Şekil 4. 71. 1. pompa, 1000 rpm ve 9 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	106
Şekil 4. 72. 1. pompa, 500 rpm ve 12 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	107
Şekil 4. 73. 1. pompa, 500 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	107
Şekil 4. 74. 1. pompa, 500 rpm'de CMC %0.4 için pompa basma yükseklikleri.....	108
Şekil 4. 75. 1. pompa, 500 rpm'de CMC %0.4 için verim değerleri.....	108
Şekil 4. 76. 2. pompa, 1450 rpm ve 5 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı....	109
Şekil 4. 77. 2. pompa, 1450 rpm ve 15 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı..	109
Şekil 4. 78. 2. pompa, 1450 rpm ve 25 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı..	110
Şekil 4. 79. 2. pompa, 1450 rpm ve 35 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı..	110
Şekil 4. 80. 2. pompa, 1450 rpm ve 45 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı..	110
Şekil 4. 81. 2. pompa, 1450 rpm ve 55 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı..	111
Şekil 4. 82. 2. pompa, 1450 rpm'de su için pompa basma yükseklikleri.....	111
Şekil 4. 83. 2. pompa, 1450 rpm'de su için verim değerleri.....	112
Şekil 4. 84. 2. pompa, 1000 rpm ve 5 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı....	112
Şekil 4. 85. 2. pompa, 1000 rpm ve 15 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı..	113
Şekil 4. 86. 2. pompa, 1000 rpm ve 25 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı..	113
Şekil 4. 87. 2. pompa, 1000 rpm ve 35 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı..	113
Şekil 4. 88. 2. pompa, 1000 rpm ve 45 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı..	114
Şekil 4. 89. 2. pompa, 1000 rpm ve 55 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı..	114
Şekil 4. 90. 2. pompa, 1000 rpm'de su için pompa basma yükseklikleri.....	115
Şekil 4. 91. 2. pompa, 1000 rpm'de su için verim değerleri.....	115
Şekil 4. 92. 2. pompa, 500 rpm ve 3 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı.....	116
Şekil 4. 93. 2. pompa, 500 rpm ve 6 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı.....	116
Şekil 4. 94. 2. pompa, 500 rpm ve 9 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı.....	116
Şekil 4. 95. 2. pompa, 500 rpm ve 12 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı....	117
Şekil 4. 96. 2. pompa, 500 rpm ve 15 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı....	117
Şekil 4. 97. 2. pompa, 500 rpm ve 18 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı....	117
Şekil 4. 98. 2. pompa, 500 rpm ve 21 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı....	118
Şekil 4. 99. 2. pompa, 500 rpm'de su için pompa basma yükseklikleri.....	118
Şekil 4. 100. 2. pompa, 500 rpm'de su için verim değerleri.....	119
Şekil 4. 101. 2. pompa, 1450 rpm ve 5 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	119
Şekil 4. 102. 2. pompa, 1450 rpm ve 15 kg/s'.....	120
Şekil 4. 103. 2. pompa, 1450 rpm ve 25 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	120
Şekil 4. 104. 2. pompa, 1450 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	121
Şekil 4. 105. 2. pompa, 1450 rpm ve 45 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	121
Şekil 4. 106. 2.pompa, 1450 rpm ve 55 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı.....	122
Şekil 4. 107. 2.pompa, 1450 rpm de CMC %0.2 için pompa basma yükseklikleri.....	122
Şekil 4. 108. 2. pompa, 1450 rpm'de verim CMC %0.2 için verim değerleri.....	123

Şekil 4. 109. 2. pompa, 1000 rpm ve 5 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	124
Şekil 4. 110. 2. pompa, 1000 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	124
Şekil 4. 111. 2. pompa, 1000 rpm ve 25 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	125
Şekil 4. 112. 2. pompa, 1000 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	125
Şekil 4. 113. 2. pompa, 1000 rpm ve 45 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	126
Şekil 4. 114. 2. pompa, 1000 rpm ve 55 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	126
Şekil 4. 115. 2. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.2 için pompa basma yükseklikleri.....	127
Şekil 4. 116. 2. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.2 için verim değerleri .....	128
Şekil 4. 117. 2. pompa, 500 rpm ve 3 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	128
Şekil 4. 118. 2. pompa, 500 rpm ve 6 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	129
Şekil 4. 119. 2. pompa, 500 rpm ve 9 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	129
Şekil 4. 120. 2. pompa, 500 rpm ve 12 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	130
Şekil 4. 121. 2. pompa, 500 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	130
Şekil 4. 122. 2. pompa, 500 rpm ve 18 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	131
Şekil 4. 123. 2. pompa, 500 rpm ve 21 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	131
Şekil 4. 124. 2. pompa, 500 rpm'de CMC 0.2% için pompa basma yükseklikleri.....	132
Şekil 4. 125. 2. pompa, 500 rpm'de CMC %0.2 için verim değerleri .....	133
Şekil 4. 126. 2. pompa, 1450 rpm ve 5 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	133
Şekil 4. 127. 2. pompa, 1450 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	134
Şekil 4. 128. 2. pompa, 1450 rpm ve 25 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	134
Şekil 4. 129. 2. pompa, 1450 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	135
Şekil 4. 130. 2. pompa, 1450 rpm ve 45 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	135
Şekil 4. 131. 2. pompa, 1450 rpm ve 55 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	136
Şekil 4. 132. 2. pompa, 1450 rpm'de CMC %0.4 için pompa basma yükseklikleri.....	137
Şekil 4. 133. 2. pompa, 1450 rpm'de verim CMC %0.4 için değerleri .....	138
Şekil 4. 134. 2. pompa, 1000 rpm ve 5 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	138

## Sayfa

Şekil 4. 135. 2. pompa, 1000 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	139
Şekil 4. 136. 2. pompa, 1000 rpm ve 25 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	139
Şekil 4. 137. 2. pompa, 1000 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	140
Şekil 4. 138. 2. pompa, 1000 rpm ve 45 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	140
Şekil 4. 139. 2. pompa, 1000 rpm ve 55 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	141
Şekil 4. 140. 2. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.4 için pompa basma yükseklikleri .....	142
Şekil 4. 141. 2. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.4 için verim değerleri .....	142
Şekil 4. 142. 2. pompa, 500 rpm ve 3 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	143
Şekil 4. 143. 2. pompa, 500 rpm ve 6 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	143
Şekil 4. 144. 2. pompa, 500 rpm ve 9 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	144
Şekil 4. 145. 2. pompa, 500 rpm ve 12 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	144
Şekil 4. 146. 2. pompa, 500 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	145
Şekil 4. 147. 2. pompa, 500 rpm ve 18 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	145
Şekil 4. 148. 2. pompa, 500 rpm ve 21 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı .....	146
Şekil 4. 149. 2. pompa, 500 rpm'de CMC %0.4 için pompa basma yükseklikleri .....	147
Şekil 4. 150. 2. pompa, 500 rpm'de CMC %0.4 için verim değerleri .....	147

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3. 1. İlk aşamada 1.pompa için dizayn parametreleri .....	41
Çizelge 3. 2. İlk aşamada 2.pompa için dizayn parametreleri .....	45
Çizelge 3. 3. 1.pompa için mesh istatistikleri .....	56
Çizelge 3. 4. 2.pompa için mesh istatistikleri .....	56
Çizelge 3. 5. Power-Law parametreleri ve kayma hızı aralığı.....	61
Çizelge 3. 6. CMC çözeltilerinin Cross model sabitleri .....	61
Çizelge 3. 7. Nümerik analizlerin gerçekleştirildikleri genel şartlar .....	68





## 1. GİRİŞ

Santrifüj pompalar akışkanı bir yerden bir yere taşımada kullanılan mekanik cihazlardır. Birçok alanda yaygın olarak bulunan santrifüj pompalar bugün neredeyse tüm endüstride kullanılır. Gıda, belediye, enerji santralleri, tarım ve ulaştırma gibi birçok uygulama alanı vardır. Bir santrifüj pompa tasarımı birçok parametreye bağlı olduğundan, pompaların seri üretimi yapılmadan önce prototip aşamasında test edilmesi gerekmektedir. Pompa üreticileri tasarımını yaptıkları pompaları su ile test etmelerine rağmen, bu uygulamaların birçoğunda santrifüj pompalar Newtonian olmayan akışkanlarla birlikte kullanılmaktadır. Kayma gerilimi ve kayma hızı arasındaki oranın lineer olmamasından dolayı, Newtonian olmayan akışkanların santrifüj pompa üzerine etkisi Newtonian akışkanlara tam olarak benzememektedir. Kayma gerilimi ve hızı arasındaki oranı gösteren viskozitenin sürtünme kaybı üzerine etkisi bulunmaktadır. Bu yüzden su ile test edilip üretilen santrifüj pompaların Newtonian olmayan akışkanlar ile de test edilmesi gerekmektedir.

Günümüzde bilgisayar alanındaki ve HAD konusundaki ilerlemeler pompa karakteristik eğrilerindeki hatayı en aza indirdiğinden, bu eğrilerinin prototip üretmeksizin elde edilmesi ve pompa performansının artırılması konusu pompa üreticilerinin ilgisini çok fazla çekmektedir. Böylece, deney yapmadan hem pompanın karakteristik değerleri hem de çark içindeki akış daha iyi analiz edilmektedir. Santrifüj pompanın en önemli bileşeni çark olduğundan, pompanın performansını geliştirmede de önemli bir etkiye sahiptir. Çarkın ise en önemli kısmı karmaşık bir dizayna sahip olan kanatlardır. Çok karmaşık kanat yapılarını çok hızlı ve kolay bir şekilde tasarlayabilen Vista CPD ve BladeGen yazılımları vasıtasıyla elde edilen kanat profilleri gerek analiz gerekse üretimde prototip olarak kullanılabilir. Pompanın performansını etkileyebilecek değişkenleri optimize etmek için hassas analizlere ihtiyaç duyulmakta ve bu konuda CFD büyük kolaylık sağlamaktadır.

Bu çalışmada su için tasarımı yapılan santrifüj pompada Newtonian olmayan akışkan kullanımının pompa performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Endüstride kullanılan iki santrifüj pompa tasarımı, akışkan su seçilerek, 1. pompada basma yüksekliği 10 m, hacimsel debi 90 m<sup>3</sup>/sa. ve rotor hızı 1450 rpm iken 2.pompa için sırasıyla 10 m, 160 m<sup>3</sup>/sa ve 1450 rpm de yapılmıştır. Ayrıca bu iki santrifüj pompa tasarımında kanat

sayısı ve kanat çıkış açısı üzerine bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. 1.pompa için kanat sayıları 5, 6 ve 7 olarak tasarlanırken 2.pompa 6, 7, 8, 9, 10 ve 11 seçilerek optimizasyon aşaması gerçekleştirilmiştir. 1.pompa için kanat çıkış açıları  $20^0$ ,  $25^0$  ve  $30^0$  olarak tasarlanırken 2.pompa için  $17^0$ ,  $19^0$ ,  $20^0$ ,  $25^0$  ve  $30^0$  olarak belirlenen kanat sayısındaki kanatların çıkış açısı optimizasyonu yapılmıştır. Tasarlanan her iki santrifüj pompada da su, CMC %0.2 ve CMC %0.4 ile nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan CMC %0.2 ve CMC %0.4 başta gıda sanayisinde kıvam arttırıcı olmak üzere bir çok sektörde kullanılmakta ve Newtonian olmayan akışkanların çoğunluğunu oluşturduğu pseudoplastik davranış sergilemektedirler.



## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Pompa karakteristiklerini etkileyen çok sayıda tasarım parametresi vardır. Santrifüj pompalarda performansı arttırmak için bu tasarım parametreleri olan çark, kanat sayısı, kanat çıkış ve giriş açıları, kanat yüksekliği, kanat kalınlığı, farklı salyangoz kesitleri ve difüzör kullanımı üzerine literatürde pek çok deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Bazı araştırmalar da ise hem deneysel hem de nümerik çalışmalar birlikte yapıp sonuçlar karşılaştırılmıştır. Santrifüj pompalardaki akışın nümerik olarak incelenmesi 1990'lı yıllara dayanmakta olduğundan bu konu geliştirilmeye oldukça açıktır ve birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Zhang ve ark. (2008) tarafından geliştirilen bir santrifüj pompa ksantan gam çözeltisi ve su ile deneysel olarak test edilmiştir. Bu pompa sağlık sektöründe kan pompalamak amacıyla tasarlanmıştır. Çözelti 400 ppm, 600 ppm, 1000 ppm ve 2000 ppm olarak hazırlanmış ve santrifüj pompa çarkının rotor hızı 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 ve 800 rpm olarak seçilmiştir. Pompa düşük rotor hızlarında çalıştığı zaman ksantan gam çözeltisinin manometrik yüksekliği aynı akışta suya göre daha düşük olarak bulunmuşken, yüksek rotor hızlarında ksantan gam çözeltisi aynı debi değerlerinde suya göre maksimum %7 daha fazla basma yüksekliği vereceği anlaşılmıştır.

Jafarzadeh ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada düşük özgül hızlı bir santrifüj pompanın akış simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. En uygun türbülans modelini incelemek için standart k-ε, RNG k-ε ve RSM olarak üç türbülans modeli ile CFD-FLUENT analizi yapmışlar ve daha sonra RNG k-ε ile nümerik analizlere devam etmişlerdir. Kanat sayısını 5 ile 7 arasında değiştirerek, pompa basma yüksekliğinin 7 kanatlı çarkta maksimum olduğunu bulmuşlardır.

Blanco ve ark. (2000) yaptıkları çalışmada bir santrifüj pompanın salyangoz tasarımını değiştirerek pompanın karakteristik eğrilerini nümerik olarak elde ettikten sonra deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında türbülans modeli olarak FLUENT ve k-ε kullanmış ve pompa içindeki çark kanat girişlerinde ve salyangoz dili bölgesinde sayısal ağ yoğunluğunu arttırmışlardır. Sonuç olarak, çark girişinden çıkışına doğru basınç artarken, salyangozda tam tersi bir eğilim izlenmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlarda sapma olduğunu ve bu sapmanın büyük debilerde arttığını tespit etmişlerdir.

Gonzales ve ark. (2002) santrifüj pompa karakteristikleri üzerine deneysel ve nümerik bir çalışma yapmışlardır. Nümerik çalışmada türbülans modeli olarak k-ε kullanılmış ve santrifüj pompadaki akışın nümerik analiziyle elde edilen karakteristik eğriler deneysel karakteristik eğrilerle karşılaştırılmıştır. Debi ve manometrik basma yüksekliği değerleri uyumlu olmasına rağmen, pompa verim eğrisinde deneysel ve nümerik çözümde bir farklılık gözlemlenmiştir. Bu fark sayısal analizden elde edilen pompa performansında, kaçak ve mekanik kayıpların etkisinin yeterli düzeyde olmaması olarak açıklanmıştır.

Hancıoğlu ve Ataş (2004) gerçekleştirdikleri çalışmada bir radyal santrifüj pompa çarkının optimum değerlerini nümerik olarak elde etmişlerdir. Çalışmalarında CFDesign adlı HAD programı ve türbülans modeli olarak da k-ε kullanmışlardır. Analizler pompa kanat sayısı ve kanat geometrileri değiştirilerek yapılmış ve optimum kanat profili ile kanat sayısı elde edilmiştir. Elde edilen profilin prototipi yapılarak deneysel olarak mevcut çarklarla kıyaslanmıştır. Sonuç olarak optimize edilen santrifüj pompayla performans değerlerinde %3 civarında artış sağlanmıştır.

Öztürk ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada, çark ve difüzör arasındaki mesafenin santrifüj pompa performansına etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Nümerik analizler standart k-ε RNG modeli ve CFD-FLUENT kullanılarak 8900 rpm' de gerçekleştirilmiştir. %10, %15, %20 radyal boşluklar kullanılmış ve basınç dalgalanmalarının %20 radyal boşluk için maksimum olduğu tespit edilmiştir.

Chakraborty ve ark. (2012) tarafından yapılan nümerik bir çalışmada farklı dönme hızlarındaki santrifüj pompa performanslarına kanat varyasyonlarının etkileri incelenmiştir. Kanat sayısı 4 ile 12 arasında değişen çarklar tasarlamışlar ve rotor çalışma hızlarını 2900, 3300 ve 3700 rpm olarak seçmişlerdir. Dönme hızındaki artışa bağlı olarak pompa basma yüksekliğinin ve verimin arttığı sonucuna varmışlardır. Kanat sayısı artınca santrifüj pompanın basma yüksekliği artarken verim azalmıştır ve optimum kanat sayısını 10 olarak bulmuşlardır.

Zhou ve ark. (2003) tek bir kanat profili üzerinden nümerik analizler gerçekleştirmişlerdir. Nümerik analizlerde üç farklı pompa çarkı kullanarak, çark

kanatları arasındaki akışı 1450 d/d ve 2900 d/d için incelemişlerdir. Uygun mesh belirledikten sonra bu çarklar için karakteristik eğriler çıkartılmıştır. Sonuç olarak tasarım noktasındaki debiden %25 fazla veya %25 az akışlar için kanatlar arasındaki akışın bozulmadığını gözlemlemişlerdir. Akıştaki bozulmanın ve debi düşümünün tasarım noktasındaki debinin % 35-40'ında meydana geldiğini saptamışlardır.

Bacharoudis ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmada kanat çıkış açısının santrifüj pompa çarkının performansına olan etkileri incelenmiştir. Analizler standart k-ε modeli ile CFD-FLUENT kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Performans eğrisi, tüm akış hızlarında kanat açısındaki artışa bağlı olarak daha düz hale gelmiştir. Çıkış kanadı açısı 20°'den 50°'e arttığında pompa basma yüksekliği %6' dan fazla artmıştır. Hidrolik verimin çıkış kanat açısının artmasına bağlı olarak arttığını görmüşlerdir.

Yassine ve ark. (2010) santrifüj çamur pompa performansına yönelik deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çamur konsantrasyonunu 0% ila 15% arasında değiştirmişlerdir. Performans eğrilerini elde etmek için her deney için pompa manometrik basma yüksekliği, genel verim ve elektrik gücü değerlerini ölçmüşlerdir. Katı parçacıkların mevcut olmasından dolayı suya kıyasla pompa basma yüksekliği ve verimin, çamur ile yapılan analizlerde daha düşük olduğunu görmüşlerdir. Çamur konsantrasyonu arttıkça, güç tüketimi artmıştır.

Çellek ve Engin (2016) santrifüj çamur pompasının performansını iyileştirmek için ara kanatçık ekleyerek ve kanat çıkış açısı ve kanadı değiştirilerek nümerik bir çalışma yürütmüşlerdir. Çamur pompa performansını optimize etmek için kanat çıkış açıları 20, 25 ve 40° olan çarklar tasarlamışlardır. Aynı mesh sayısına sahip k-ε ve SST türbülans modelleri kullanılmış ayrıca farklı mesh sayılarına sahip k-ε türbülans modelleri de kullanılıp verim değerleri hesaplanmıştır. Hacimsel debi 125 m<sup>3</sup>/h olarak ve çarkın dönme hızı 900 rpm ve 1000 rpm olarak seçilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarında ilk durumdaki haline göre değiştirilmiş salyangozun kullanılmasıyla 9% arttırmışlardır.

Houlin ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada kanat sayısının CFD-FLUENT kullanarak santrifüj pompanın performansı üzerine olan etkilerini analiz etmişlerdir. Simülasyon çalışması sırasında, çark kanadının sayısı 4 ila 7 arasında değişmektedir. Kanat sayısı arttıkça, pompanın basma yüksekliği artarken verimlilik değerinin azaldığını

görmüşlerdir. Tasarımını yaptıkları çarkın 5 kanada sahip olduğu durumda maksimum verime sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Shojaeefard ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada çark geçiş genişliğinin etkisi nümerik olarak,  $k-\epsilon$  ve SST türbülans modelleri kullanılarak, incelenmiştir. Çarkın geçiş genişliğinin 17 mm' den 21 mm' ye çıkarılmasıyla sürtünme kayıpları azaldığından pompa basma yüksekliği ve hidrolik verim artmıştır.

Rajendran ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada pompa çarkı esas alınarak pompa performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde 25<sup>0</sup>C su,  $k-\epsilon$  türbülans modeli ve %5 türbülans yoğunluğu seçilmiştir. Sonuçlar salyangoz olmadan çözülmüş ve basma yüksekliğini 9,4528 m ve toplam verimi ise %91,1029 olarak bulmuşlardır.

Buratto ve ark. (2017) farklı tip Newtonian olmayan akışkanların 2 farklı santrifüj pompa ile nümerik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Nümerik analizlerde türbülans model olarak standart  $k-\omega$  seçilmiştir. Özgül hızı daha düşük olan ilk pompanın akışkan viskozitesine karşı daha hassas olduğu ve daha büyük performansa sahip olduğu bulunmuştur.

Chakraborty ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada farklı kanat sayılarının santrifüj pompa performansına etkilerini incelemişlerdir. Analizlerde 3000 rpm rotor hızı,  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılmış ve kanat sayısı 5 ile 7 arasında değiştirilmiştir. Santrifüj pompa veriminin kanat sayısına göre değiştiği ve maksimum değere 7 kanat sayısında ulaşıldığı bulunmuştur. Statik basınç çark girişinden çıkışa kadar artmış ve kanat sayısındaki artışa bağlı olarak salyangoz çıkışındaki basınç da artmıştır.

Hüseyin ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada santrifüj pompanın dönme hızındaki değişimin basınç üzerine etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Analizler standart  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılarak 5 kanada sahip bir santrifüj pompa ile gerçekleştirilmiştir. tek bir kanat kullanıldığında analizlerin daha iyi sonuçlar verdiği, yüksek dönme hızında basınç konturunun kanat çark girişi ve örtünün emme tarafında negatif statik basınç verdiği ve dönüş hızı arttığında emme tarafındaki basıncın düştüğü tespit edilmiştir.

Zhou ve ark. (2013) santrifuj pompa çarkında performans optimizasyonu için deneysel ve nümerik bir çalışma yapmışlardır. Analizlerde ANSYS-CFX ile SST k- $\omega$  türbülans modeli kullanılmış ve çarkın beş ana geometrik parametresi seçilmiştir. 16 çark tasarlanmış ve bu çarklar aynı salyangozla birleştirilerek analizler yapılarak verimliliğın maksimum olduğu tasarım belirlenmiştir. Sonuç olarak, çarkın çıkış genişliğinin pompa basma ykseklėi ve verimlilik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır.

Kaewnai ve ark. (2013) radyal santrifuj pompa çarkı üzerinde akışı nümerik olarak incelemişlerdir. Akış simülasyonunu tek bir kanat akış hacmi üzerinden gerçekleştirmişler ve farklı türbülans ve mesh modellerini kıyaslamışlardır. Sonuç olarak, en uygun türbülans modelinin k- $\epsilon$  olduğunu belirlemişler ve akış oranı azaldıkça Q-H eğrilerinin sürekli olarak arttığını ve salyangozun dil bölgesinde basınc dağılımının yüksek olduğunu görmüşlerdir.

Burlon ve ark. (2017) polimer (polyox wsr301) zltilerinin pompa performansı üzerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. alışmalar 2900 rpm de gerçekleştirilirken, polimer zltileri (polyol wsr301) 20000 ppm, 1000 ppm, 5000 ppm, 2500 ppm, 1250 ppm, 625 ppm ve 312 ppm olarak hazırlanmıştır. Polyox zltileri 312 ppm, 625 ppm ve 1250 ppm' de newtonian davranış, 2500 ppm ve yukarı konsantrasyon değerlerinde ise newtonian olmayan davranış sergilemişlerdir. Sonuç olarak, düşük konsantrasyonlarda verim değerlerinin suyun değerleri ile yakın, pompa basma ykseklėi değerlerinin ise biraz daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yüksek konsantrasyonlarda ise pompa basma ykseklėinde %3.5 artış görünmesine rağmen, en iyi verim noktası dşmştir.

Aldi ve ark. (2017) yarı açık bir santrifuj pompa için üç farklı newtonian olmayan akışkanın pompa performansına etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Su ve Newtonian olmayan akışkanlar 2900 rpm, 2500 rpm ve 2000 rpm olmak üzere üç farklı hızda analiz edilmiştir. Türbülans yoğunluğu %5 ve türbülans model k- $\omega$  seçilmiştir. En düşük konsantrasyonlara sahip kaolin konsantrasyonlarında pompa basma ykseklėinde suya göre ufak bir artış olduğu grlmştir. Nümerik ile deneysel sonuçlar %30 ve %35 kaolin konsantrasyonları için uyum gösterirken, %40 kaolin konsantrasyonunda farklılıklar elde edilmiştir.

Bu bölümde santrifüj pompalar ile yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar incelenmiştir. Literatür taramasında özellikle yeni bir tasarımda nümerik analizin getirdiği kolaylıklar görülmüş ve geometri optimizasyonu veya tasarımda dikkat edilecek parametrelerin neler olduğu anlaşılmıştır. Deneysel verilerle nümerik analiz sonuçlarının birbirine çok yakın değerler verdiği bilhassa dizayn parametrelerinde görülmüştür. Nümerik analizleri yapılan ve prototipi üretilen pompaların deneysel analizlere göre bir önceki pompadan daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Deneysel verilerle elde edilemeyen akış hacmi görselleri nümerik analizlerle elde edilebilmektedir. Yapılan çalışmalar çoğunlukla  $k-\epsilon$  türbülans modeli ve %5 türbülans yoğunluğu kullanılarak yapılmış ve nümerik analizlerin deneysel verilerle örtüştüğü görülmüştür. Yapılan son çalışmalarda ise TurboGrid ile iyi ağ yapılarının kolaylıkla elde edildiği ve iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Özellikle Newtonian olmayan akışkanlar ile yapılan gerek deneysel gerekse nümerik çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Bu çalışmada piyasada benzerleri bulunan 2 santrifüj pompa tasarımı yapıldıktan sonra kanat sayısı ve kanat çıkış açısı üzerine bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Santrifüj pompa performans eğrileri su ve 2 non-Newtonian akışkan için 2 farklı debi ve rotor hızı değerlerinde elde edilmiştir. Non-Newtonian akışkan için 2 farklı model kıyaslaması nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak su ve non-Newtonian akışkanlar için elde edilen performans eğrileri karşılaştırılmıştır.



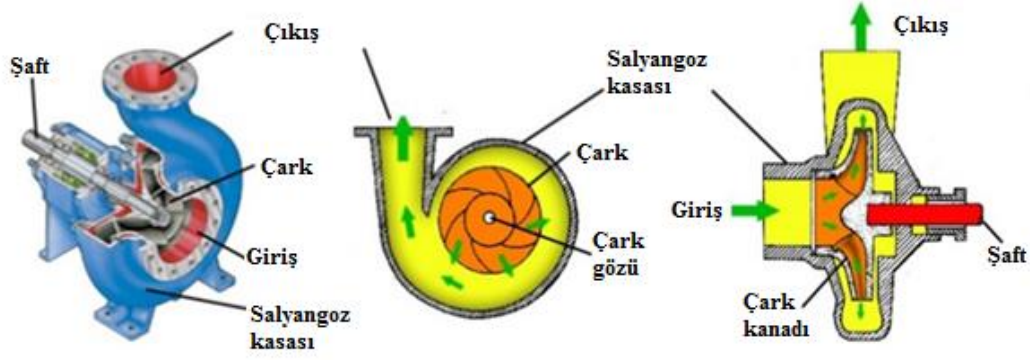
### **3. MATERYAL ve YÖNTEM**

#### **3.1. Giriş**

Bu çalışmada Newtonian olmayan akışkan kullanımının santrifüj pompa performansı üzerine olan etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmalarda kullanılan iki adet kapalı çark radyal santrifüj pompa kullanılmıştır. Bu bölümde santrifüj pompalar ve Newtonian olmayan akışkanlar hakkında temel bilgiler verilmiştir. Su ile tasarımı yapılan santrifüj pompalarda bir optimizasyon çalışması da yapılmıştır. Ayrıca nümerik çalışmaları gerçekleştireceğimiz CFD-CFX yazılımı hakkında bilgilere ve problem çözerken kullandığı korunum, Navier-Stokes denklemlerine de bu bölümde yer verilmiştir. Son olarak Newtonian olmayan akışkan davranışını tanımlayan modellerden olan Cross ve Power-Law model kıyaslamasına da bu bölümde yer verilmiştir.

#### **3.2. Santrifüj Pompalar**

Santrifüj pompa, mekanik enerjinin akışkan üzerine etkiyen merkezkaç kuvveti vasıtasıyla basınç enerjisine dönüştürüldüğü cihazdır. Santrifüj pompa, dünyada en çok kullanılan pompa türüdür. Santrifüj pompalar içinde ise radyal santrifüj pompalar en çok kullanılanlardır. Santrifüj pompalar günümüzde tek veya çift girişli, çarkın sayısına bağlı olarak tek veya çok kademeli olabilirler. Bir santrifüj pompanın iki ana bileşeni vardır, çark olarak bilinen akışkana enerji veren dönen kısım ve çarkı çevreleyen akışkanın hareket ettiği kısım olan salyangozdur. Akışkan, girişten çark merkezine ve oradan çark kanatları arasından salyangoza doğru akar. Santrifüj pompanın verimliliği çarkın şekline ve çarka bağlı olarak kullanıldığı uygulamayla oldukça ilişkilidir. Tasarım koşullarından dolayı santrifüj pompa boyunca debi değişimi istenen şekilde olmayabilir. Bu yüzden analizler sadece dizayn parametrelerinde yapmak oldukça yanlıştır. Tasarımı yapılan santrifüj pompanın analizleri değişken kütleli debi ile yapılması gerekmektedir. Şekil 3.1.'de santrifüj pompa temel bileşenleri ve akış hacmi görülmektedir.



**Şekil 3. 1.** Santrifüj pompa ve temel bileşenleri(Sagban, 2014'den değiştirilerek alınmıştır.)

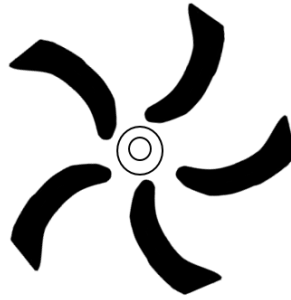
### 3.2.1. Çark

Bir elektrik motoru sürüş ünitesine bağlı bir mil üzerine monte edilen çark akışkanın basıncı ve hızını artırarak, pompaya giren sıvıya enerji aktarır. Sıvı, çark gözünden çark içine emilir ve örtü ile salyangoz arasında kalan alan olan çark kanalları boyunca akar. Çarkın tasarımı basınç, akış ve uygulama gereksinimlerine bağlıdır. Çark, pompa performansını belirleyen ana bileşendir. Çarkın basıncı artırma ve akış sağlama kabiliyeti esas olarak akışkanın çark boyunca radyal olarak mı yoksa aksenel olarak mı çalışmasına bağlıdır. Bir radyal çarkta, giriş çapı ile çıkış çapı arasında ve ayrıca çark çıkışındaki kanal yüksekliği olan çıkış çapı ile çıkış genişliği arasında önemli bir fark vardır. Böyle bir tasarımın kullanıldığı radyal santrifüj pompalarda merkezkaç kuvvetleri yüksek basınç ve düşük akışla sonuçlanır. Nispeten düşük basınç ve yüksek akış, radyal çarkın aksine, bir aksenel çarkta bulunur. Yarı-aksenli çarklar, basınç artışı ve akış arasında bir denge gerektiğinde kullanılır. Çarkın bir dizi çark kanadı vardır. Sayı esas olarak, istenen performans ve gürültü kısıtlamalarına ve ayrıca akışkandaki katı parçacıkların miktarına ve boyutuna bağlıdır. Örneğin bir, iki veya üç kanallı çark, atık su gibi parçacıklara sahip akışkanlar için kullanılır. Bu tür çarkların ön kenarı, çarkı tıkayan parçacıkların riskini en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır. Pompayı tıkkama riski olan akışkanlarla bir, iki ve üç kanatlı çark kullanımı uygundur.

Çarkın temel şekline karar verildikten sonra, çarkın tasarımı ile meydana gelen hız profillerinin bir sonucu olarak sürtünme kaybı ile kayıp arasında optimum noktayı

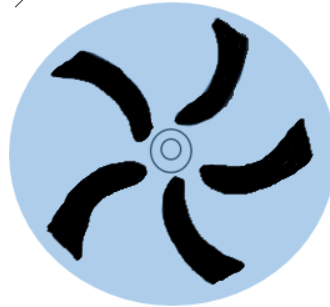
bulmak gerekmektedir. Örneğin, çark kanatlarının uzatılmasıyla aynı hız profilleri elde edilebilir, ancak bu duvar sürtünmesinin artmasına neden olur.

Çark performans karakteristiğine göre farklı sayıda kanat içermektedir. Dönen çark içerisinde kanatların arasına giren akışkan teğetsel hız kazanır. Akışkan, kanadın arka kenarına ulaşır ulaşmaz hızlanır ve çarkın dış çapında maksimum akışkan hızı artar. Santrifüj pompa çarkı karmaşık bir yapıya sahiptir. Radyal santrifüj pompalarda çarkın üç tipi bulunmaktadır. Bunlar açık çark, yarı açık çark ve örtülü veya kapalı çarktır.



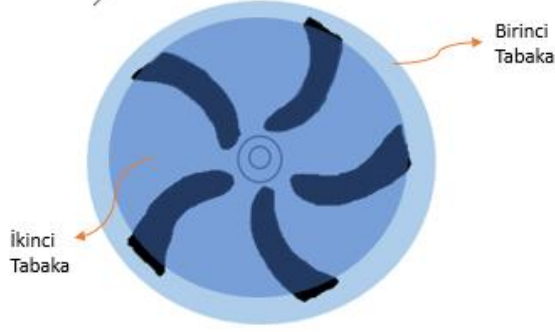
**Şekil 3. 2.** Açık çark

Örtüsü olmayan çarklara açık çark denir. Açık çarklarda ön ve arka kaplama yoktur. Şekil 3.2’de her iki tarafında da kaplama bulunmayan açık radyal santrifüj pompa görünmektedir. Bu tür pompalar su, kum, kil vb. karışımları taşımak için kullanılır. Genellikle dövme çelikten yapılır. Açık çarklar, çarkın temizlenmesi gereken yerlerde ve tıkanma riskinin olduğu yerlerde kullanılır. Atık su uygulamalarında açık çarklı santrifüj pompa kullanılmaktadır.



**Şekil 3. 3.** Yarı açık çark

Yarı-açık çarkta çarkın önünü veya arkasını kaplayan sadece bir tabaka vardır. Şekil 3.3'te de sadece bir tarafı kapalı radyal bir çark görünmektedir. Endüstride ve kanalizasyon gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.



**Şekil 3. 4.** Kapalı çark

Örtülü veya kapalı tip çarklarda kanatlar her iki tarafta da örtü ile kaplanmıştır. Şekil 3.4'te her iki tarafı bir örtü veya kaplamayla kaplanmış radyal santrifüj pompa çark görülmektedir. Su, sıcak su, yağlar ve asitler gibi kimyasal sıvıların taşımak için kullanılır. Santrifüj pompanın çark kanatlarının sayısı büyük ölçüde performans üzerinde etkilidir. Kanat sayısı ne kadar fazla olursa, o kadar fazla güç tüketilir ve maliyet artar. Ayrıca kanat sayısı akış türbülansını önemli derecede etkiler. Denklem 3.1 ile verilen Pfeleiderer denklemi ile çark kanatlarının sayısı hesaplanabilir.

$$z = 6.5 \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} \sin \beta_m \quad (3.1)$$

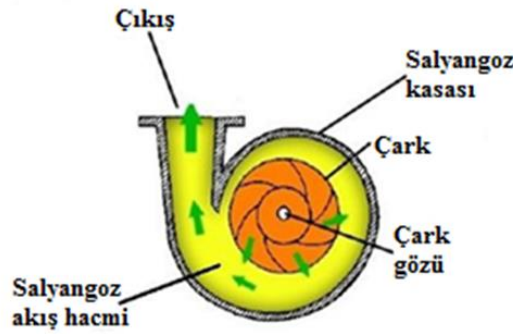
$$\beta_m = \frac{\beta_2 + \beta_1}{2} \quad (3.2)$$

Denklemlerde z optimum radyal santrifüj pompa kanat sayısını,  $D_2$  çark çıkış çapını ve  $D_1$  çark giriş çapını göstermektedir. Denklem 3.2 ile verilen  $\beta_m$  ise kanat çıkış ve giriş açılarının aritmetik ortalamasıdır.

### 3.2.2. Salyangoz

Akış alanının kademeli olarak arttığı spiral tip yapısıdır. Çark, tüm işi bir dönme hareketi ile yaparken, girişten aldığı akışkanı çıkışa yönlendirir. Çark ve salyangoz boşluğu

birbirlerine akış hacmi itibarıyla bağlıdır, çünkü salyangoz akış hacmi çarkın çalıştığı çevreyi belirlemektedir. Ayrıca, pompa salyangoz akış hacmindeki akış çark performansı üzerinde derin bir etkiye sahiptir ve çarkın düşük verimlilikte çalışmasına neden olabilir. Salyangoz iyi dizayn edilirse hidrolik kayıplar minimum değere düşer, pompa genel verimi artar. Bazı özel hallerde, çift salyangoz da kullanılabilir. Fakat iki çıkışlı salyangoz basma yüksekliğinin 100m den daha fazla olduğu durumlarda kullanılması uygundur. Şekil 3.5'te sıvının çark kanallarından çıkışı ve salyangoz içindeki akışı görülmektedir.



**Şekil 3. 5.** Sıvının çark kanallarından çıkışı ve salyangoz içinde akışı(Sagban, 2014'den değiştirilerek alınmıştır.)

### 3.2.3. Debi

Birim zamanda birim kesitten geçen akışkan miktarı olup, hacimsel ( $m^3/sa$ ) veya kütleli ( $kg/s$ ) debi olarak ifade edilmektedir. Maddenin korunumu prensibi gereği debi tüm sistemde sabittir, yani pompa girişinde ve çıkışında hacimsel debi aynı kalmaktadır. Ancak santrifüj pompalarda, sıvı çark çıkışından çark girişine, çıkış basıncına bağlı olarak geri dönebilmektedir. Bu yüzden pompalarda pompanın bastığı sıvı debisi deneysel veya nümerik olarak incelenmelidir.

### 3.2.4. Manometrik Basma Yüksekliği

Birim ağırlıkta sıvının hidrolik enerjisi Denklem 3.3 ile ifade edilmektedir.

$$H = \frac{u^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z \quad (3.3)$$

Burada  $u$  akışkan hızını,  $P$  akışkan basıncını,  $z$  giriş ve çıkıştaki kod farkını ve  $g$  ise yer çekimi ivmesini göstermektedir.  $H_1$  ve  $H_2$  sırasıyla pompa giriş ve çıkışındaki akışkanın kazanabileceği yüksekliği olmak üzere santrifüj pompanın birim ağırlıkta sıvıya sağlayacağı hidrolik enerji ( $H_m$ ) enerjinin korunumu ilkesine dayanarak  $H_m=H_2-H_1$  ile elde edilir. Böylece

$$H_m = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + z_2 - z_1 \quad (3.4)$$

olarak Denklem 3.4 ile ifade edilebilir. Bu ifadeye burada pompa giriş ve çıkışındaki sürtünme kayıpları da eklenirse Denklem 3.5 elde edilir.

$$H_m = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + z_2 - z_1 + \xi_{12} \quad (3.5)$$

Burada,  $\frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$  kinetik enerji değişimini,  $\frac{P_2 - P_1}{\rho g}$  basınç enerjisi değişimini,  $z_2 - z_1$  potansiyel enerjisi değişimi ve  $\xi_{12}$  kayıp enerjii göstermektedir.

### 3.2.5. Güç ve verim

Elektrik, benzin veya dizel motoru olabilen bir tahrik elemanı ile mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye çeviren cihazlara pompa denir. Tahrik motorundan çekilen gücün hepsi kayıplardan dolayı santrifüj pompa çıkışındaki sıvıya kazandırılmış olmaz. Bu kayıplar pompanın farklı kısımlarında ve elemanlarında gerçekleşmektedir. Bu yüzden bir pompa devresinde çeşitli güçler tanımlanmaktadır. Efektif güç ( $N_{ef}$ ) motorun santrifüj pompa miline sağladığı güçtür. Bu güç elektrik motorunun akım devresinden çektiği güçten sargı kayıplarının çıkarılmasından sonra kalan güçtür. Santrifüj pompa çarkı mil vasıtasıyla motordan hareket alır. Pompa mili yatak içinde dönerken mil ve sızdırmazlık elemanları arasında sürtünmeler oluşmaktadır. Bu mekanik sürtünmeler sonucu çekilen efektif gücün bir kısmı ısı enerjisi halinde kayıp olmaktadır. Elektrik motorundan santrifüj pompa çarkına iletilen güce hidrolik güç ( $N_h$ ) denir. Denklem 3.6 motordan sıvıya kazandırılan hidrolik güç ile efektif gücün oranını diğer bir ifadeyle mekanik verimi göstermektedir.

$$\eta_m = \frac{N_h}{N_{ef}} \quad (3.6)$$

Sıvının santrifüj pompa çarkı kanatları arasında, difüzör ve salyangoz içerisinde akışı sırasında, sıvı ve duvar arasında sürtünme kayıpları meydana gelir. Gerçek akış çizgileri kanat eğrilerine paralel olmadıklarından dolayı da santrifüj pompa içindeki akış karmaşıktır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu hidrolik gücün gerçekte daha küçük olduğu görülürken, bu fark, çark, difüzör ve salyangoz içinde sıvı akımı sırasında oluşan kayıp enerjiden kaynaklanır. Böylece pompa çıkışında akışkana iletilen hidrolik enerji gerçek hidrolik güç ( $N'_0$ ) ile ifade edilir. Bu güç santrifüj pompa tasarımıyla ilişkili bir durumdur. Hidrolik verim Denklem 3.7 ile tanımlanmaktadır.

$$\eta_h = \frac{N'_0}{N_h} \quad (3.7)$$

Teorik ve deneysel bağıntılar santrifüj pompa tasarımında çark, salyangoz ve difüzör içi akışların kaybını en aza indirmek için kullanılmalıdır. Çark içindeki akışkanın debisiyle pompa çıkışındaki debi pompanın çalışma koşullarına bağlı olarak aynı olmamaktadır. Pompa giriş ve çıkışındaki bu debi farkına kaçak debi denmektedir. Çark içinden geçen debi ( $Q'_0$ ) ile pompa çıkışındaki debi ( $Q_0$ ) arasındaki fark kaçak hacimsel debi  $\Delta Q$  denilirken bu iki debi arasındaki orana volümetrik verim ( $\eta_v$ ) denilir. Çarkın içinden geçen  $Q'_0$  debisinde akışkanın çarktan çıktığında kazandığı hidrolik güç  $N'_0$  olup,

$$N'_0 = \rho g Q'_0 \cdot H_m \quad (3.8)$$

ile hesaplanırken, çark çıkışında ölçülen  $Q_0$  debisinde akışkanın sahip olduğu hidrolik güç  $N_0$  olup,

$$N_0 = \rho g Q_0 \cdot H_m \quad (3.9)$$

ile hesaplanır. Volümetrik verim aynı zamanda bu iki gücün oranı olup Denklem 3.10 ile ifade edilmiştir.

$$\eta_v = \frac{N_0}{N'_0} \quad (3.10)$$

Pompa hakkında yapılan verim tanımlarının ardından bir genel verim tanımının yapılmasının ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Daha önce verilen verimleri kısaca özetlersek:

pompa miline verilen efektif güç çeşitli kayıplarla pompa çıkışında  $Q_0$  hacimsel debide akışkana  $N_0$  hidrolik güç ile iletilir. Böylece pompa çıkışında akışkana kazandırılan hidrolik güç ve mildeki mekanik güç ile Denklem 3.11’de verilen pompanın genel verimi ile tanımlanmaktadır.

$$\eta_g = \eta_v \cdot \eta_h \cdot \eta_m \quad (3.11)$$

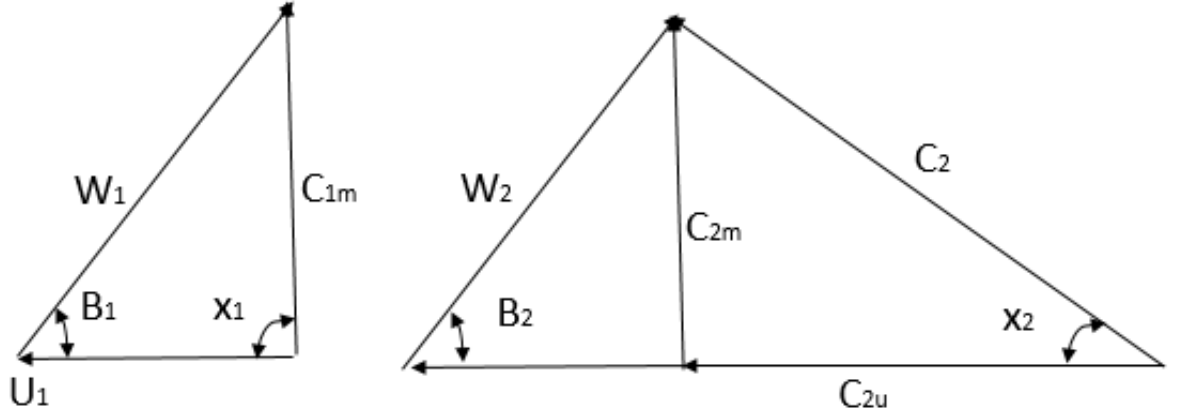
### 3.2.6. Hız Üçgenleri ve Pompa Tasarımı

Bir santrifüj pompada enerji dönüşümünün teorik temeli bu bölümde tanımlanmıştır. Pompa çalıştığında, şafta elektrik motorundan mekanik enerji iletilir. Bu mekanik enerji çarkta iç (statik basınç) ve kinetik enerjiye (hız) dönüştürülür.

Akışkan pompa çarkı içinden geçerken  $U$  çevresel hızıyla dönmekte ve  $W$  bağıl hızıyla ilerlemektedir. Çarkın milden aldığı  $\omega$  açısal hızı ve çarkın merkezinden olan uzaklığıyla akışkanın çevresel hızı değişmektedir. Şekil 3.6’daki  $C$  ise çevresel ve bağıl hızın vektörel toplamıdır. 1 indisyle giriş hız üçgeni, 2 indisyle ise çıkış hız üçgeni gösterilmektedir. Çevresel hız olan  $U_1$  ve  $U_2$ ,  $r_1$  ve  $r_2$  çaplı çemberlere teğettir. Bağıl hız olan  $W_1$  ve  $W_2$  ise kanata teğettir. Çark ve altındaki üçgenlerde gördüğümüz  $\vec{C}$  ve  $\vec{U}$  vektörleri arasındaki  $\alpha$  açılara akış açıları denir.  $\vec{W}$  ve  $\vec{U}$  vektörleri arasında görünen  $\beta$  açıları ise kanat açılarıdır.

Burada  $C$  mutlak hızının çarkın dönme yönünde ve çarkın dönme yönüne dik ( $C_u, C_m$ ) olmak üzere iki bileşenin olduğu görülmektedir. Bu bileşenler mutlak hızın çevresel bileşeni ( $C_u$ ) ve mutlak hızın meridyenel bileşeni ( $C_m$ ) olarak adlandırılır. Çarktaki bu hız bileşenleri pompa dizayn aşamasında büyük öneme sahiptir.





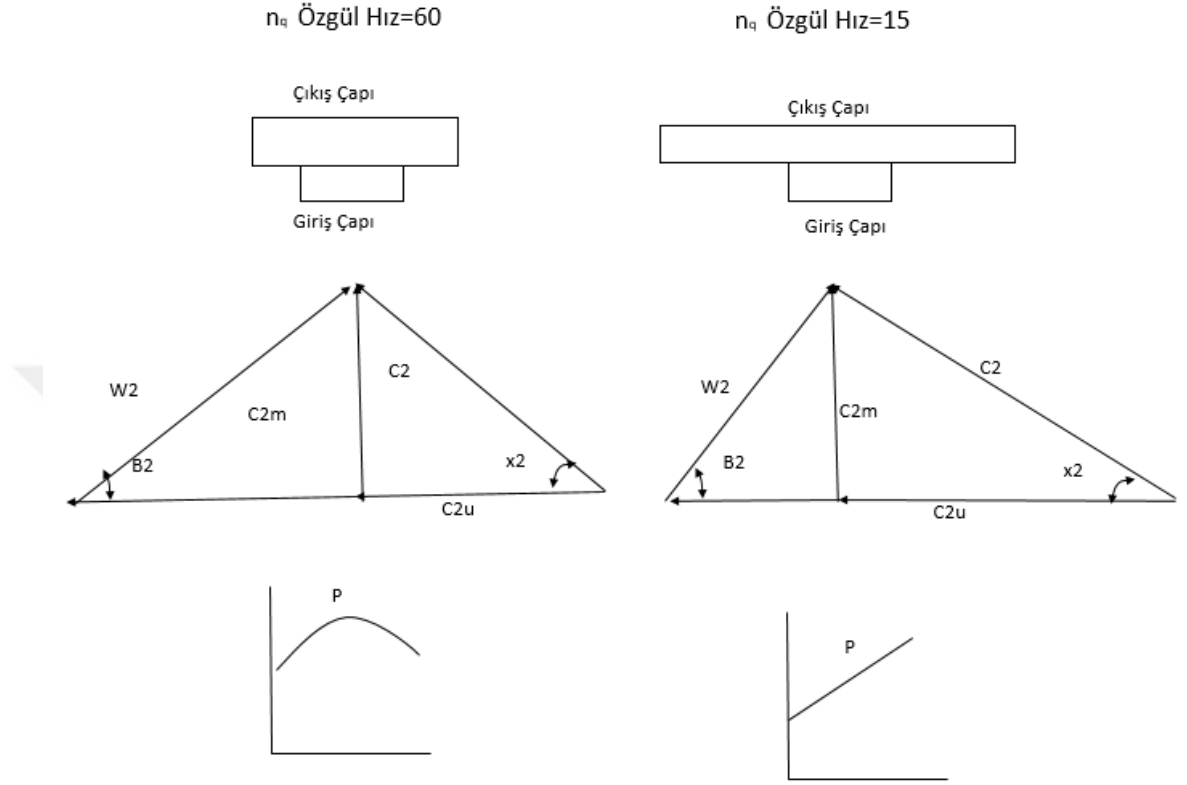
Şekil 3. 6. Çark çıkış ve girişindeki hız üçgenleri

Pompaların özgül hızları pompaların sınıflandırılmasında kullanılmaktadır. Özgül hızı ( $n_q$ ) belirlemek için Denklem 3.12 kullanılmaktadır.

$$n_q = n_d \cdot \frac{Q_d^{1/2}}{H_d^{3/4}} \quad (3.12)$$

Burada,  $n_d$  [ $\text{min}^{-1}$ ] tasarım noktasındaki dönme hızı,  $Q_d$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] tasarım noktasındaki akış debisini ve  $H_d$  [m] tasarım noktasında pompa basma yüksekliğini ifade etmektedir.

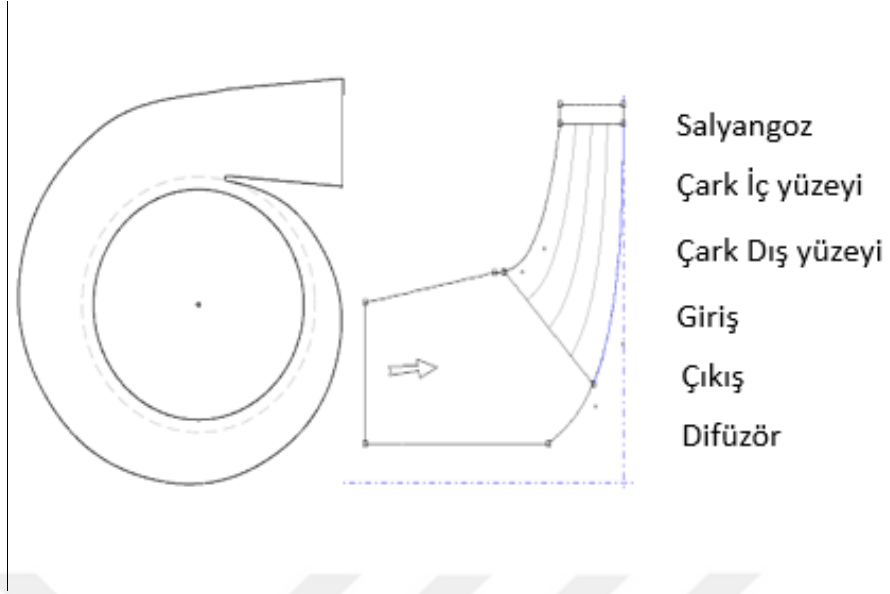
Düşük özgül hızlı ( $n_q$ ) pompalar giriş çapına kıyasla büyük çıkış çapına sahip pompalardır. Bu pompalarda basma yüksekliği eğrisi nispeten düzken, güç eğrisi ise tüm akış alanında pozitif bir eğime sahiptir. Yüksek özgül hızlı ( $n_q$ ) pompalarda giriş çapının çıkış çapına oranı düşük özgül hızlı pompalara göre daha büyüktür. Güç eğrileri ise akış alanının bir kısmında negatif eğime sahiptir. Şekil 3.7’de özgül hıza bağlı olarak çark şekilleri ve performans eğrileri görülmektedir.



**Şekil 3. 7.** Özgül hıza göre çark şekli, çıkış hız üçgeni ve performans eğrileri

### 3.2.7. Pompa kayıpları

Pompa performansı çark ve salyangozdaki bir takım mekanik ve hidrolik kayıplar nedeniyle düşmektedir. Kayıplar daha yüksek güç tüketimine ve daha düşük basma yüksekliğine neden olur. Kayıplar mekanik kayıplar ve hidrolik kayıplar olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. Şekil 3.8’de pompadaki mekanik ve hidrolik kayıplara neden olan bileşenler görülmektedir.



**Şekil 3. 8.** Pompadaki mekanik ve hidrolik kayıplara neden olan bileşenler

### **Mekanik kayıplar**

Pompalar tiplerine bağlı olarak yataklar, salmastralar ve dişlilerden oluşurlar. Bu bileşenlerin tümü mekanik sürtünme kayıplarına neden olurlar ve genellikle güç tüketimine bir sabit olarak eklenmektedirler. Ancak kayıpların boyutu basınç ve rotor hızına bağlı olarak değişmektedir. Mekanik kayıplar rulman ve salmastradaki güç kayıplarının toplamı olarak sabittir.

### **Hidrolik kayıplar**

Pompanın akış hacminde hidrolik kayıplar ortaya çıkar. Kayıplar sürtünme nedeniyle veya akışkanın pompa akış hacminde yön ve hızı değiştirmesinden dolayı meydana gelir. Bu durum kesit değişikliklerinden ve dönen çark içinden geçişten kaynaklanmaktadır. Akış sürtünmesi, akışkanın dönen çark yüzeyleri ve pompa gövdesindeki iç yüzeyler ile temas halinde olması durumunda oluşur. Akış sürtünmesi pompa basma yüksekliğini azaltan bir basınç kaybına neden olur. Sürtünme kaybının büyüklüğü yüzeyin pürüzlülüğüne ve yüzeye göre akışkan hızına bağlıdır. Sürtünme kayıpları akışkanın temas ettiği tüm hidrolik bileşenlerde oluşur. Akış sürtünmesi dinamik basma yüksekliği bileşenin içine eklenen bir basınç kaybı katsayısı olarak düşünülmektedir. Denklem 3.13'te;

$$H_{\text{sürtünme kaybı}} = \zeta \cdot H_{\text{gir.din.}} = \zeta \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3.13)$$

olarak verilmiştir. Burada,  $\zeta$  (-) boyutsuz kayıp katsayısını,  $H_{\text{sürtünme kaybı}}$  (m) girişteki dinamik basma yüksekliğini ve  $V$ (m/s) girişteki hızı ifade etmektedir.

Boru sürtünmesinde duvarda akışkan hızı sıfırdır, boru merkezinde ise maksimum bir değere ulaşır. Borudaki bu hız farkları nedeniyle, akışkan molekülleri birbirine sürtünür. Bu kinetik enerji kayıp olarak kabul edilebilecek ısı enerjisine dönüşür. Boruda bir akış sağlamak için, kaybedilen enerjiye karşılık gelen enerji miktarının sürekli eklenmesi gerekir. Sıvının hareketi basınç farkı ile sağlanır. Borudaki kayıp, akışkan hızına, borunun hidrolik çapına, uzunluğuna ve iç yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Pompa basma yüksekliğindeki kayıp Denklem 3.14'te verilmiştir.

$$H_{\text{borudaki kayıp}} = f \cdot \frac{LV^2}{D_h 2g} \quad (3.14)$$

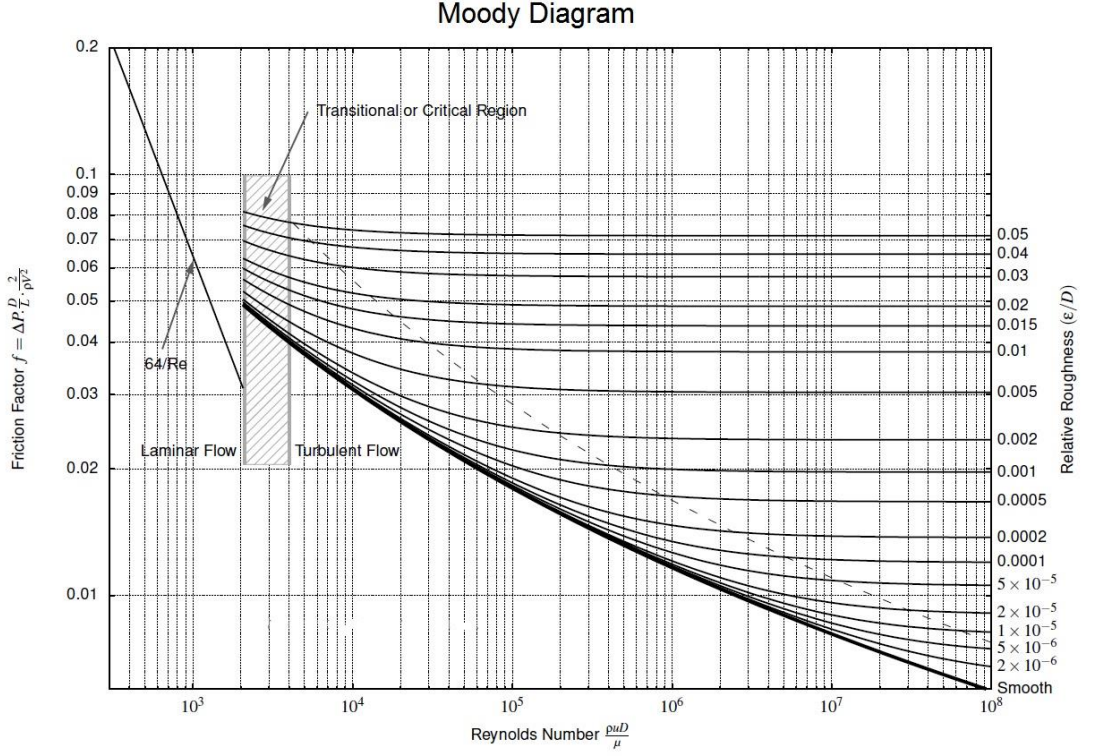
Bu denklemde  $H_{\text{borudaki kayıp}}$ (m) basma yüksekliğinde kayıp,  $f$ (-) sürtünme kayıp katsayısı,  $L$  (m)boru uzunluğu,  $V$ (m/s) borudaki ortalama hız ve  $D_h$ (m) hidrolik çap ile ifade edilmektedir. Denklem 3.14 tüm kesit şekilleri için geçerlidir. Borunun dairesel kesite sahip olduğu durumlarda hidrolik çap, boru çapına eşittir. Sürtünme katsayısı sabittir ancak akışın laminer veya türbülanslı olmasına bağlıdır. Denklem 3.15'te verilen Reynolds sayısına bakılarak akış tipi tespit edilir.

$$Re = \frac{VD_h}{\nu} \quad (3.15)$$

Reynolds sayısı atalet ve viskoz kuvvetleri arasındaki orandır. Boru içindeki akışlar için  $Re < 2300$  ise laminer akış,  $2300 < Re < 4000$  ise geçiş bölgesi ve  $Re > 4000$  ise türbülanslı akış elde edilir. Dairesel kesitli borularda laminer akış için sürtünme katsayısı Denklem 3.16'da verildiği gibi yüzey pürüzlülüğünden bağımsız ve Reynolds sayısının bir fonksiyonudur.

$$f_{\text{laminer}} = \frac{64}{Re} \quad (3.16)$$

Laminer akışta sürtünme katsayısı yalnızca Reynolds sayısına bağlı iken türbülanslı akış için sürtünme katsayısı Reynolds sayısına ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Laminer ve türbülanslı akışlardaki sürtünme katsayısı Lewis Ferry Moody tarafından Şekil 3.9’da gösterildiği gibi bir diyagram haline getirilmiştir.



**Şekil 3. 9.** Moody diyagramı(Anonim)

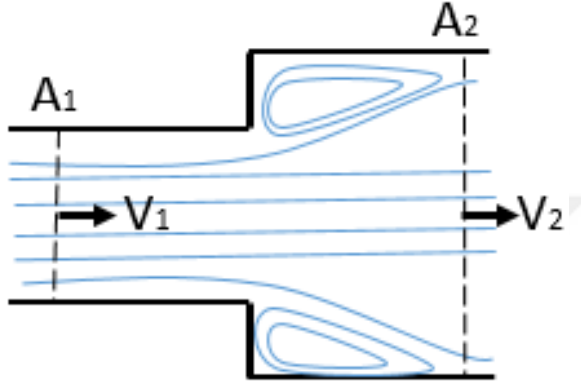
Colebrook–White denklemi Moody diyagramı bilgilerinin denkleme dökülmüş halini göstermektedir.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon}{3.7D_h} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3.17)$$

Bu denklemde türbülanslı akışta sürtünme katsayısının yüzey pürüzlülüğü ve Reynolds sayısının bir fonksiyonu olduğu görülürken laminer akışta sadece Reynolds sayısının bir fonksiyonudur. Denklem 3.17’de görünen  $\epsilon$  yüzey pürüzlülüğünü ifade etmektedir.

Kinetik enerji pompanın kesit genişlemelerinde statik basınç enerjisine dönüşür. Bunun nedeni kesit genişlediğinde hız farklılıklarının oluşmasıdır. Akışkandaki moleküller arasında sürtünme akışkan partikülleri aynı hızda hareket etmediği için meydana

gelmektedir. Bu durum pompa basma yüksekliğinde bir kayba neden olmaktadır. Şekil 3.10'da ani genişleyen bir difüzör görülmektedir. Kesit genişlemesinden sonraki hız profili kademeli olarak eşitlenmektedir. Hidrolik bileşenleri tasarlarken mümkün olduğu kadar küçük ve pürüzsüz kesit açılımları oluşturmak daha iyi verim ve basma değeri için önemlidir.



**Şekil 3. 10.** Kesit genişlemesinden kaynaklı vorteks oluşumları ve hız değişimi

Bir kesit genişlemesindeki kayıp, dinamik pompa basma yüksekliğinin bir fonksiyonudur ve Denklem 3.18 ile hesaplanır.

$$H_{\text{genişleme kaybı}} = \zeta \cdot H_{\text{din.1}} = \zeta \cdot \frac{V_1^2}{2g} \quad (3.18)$$

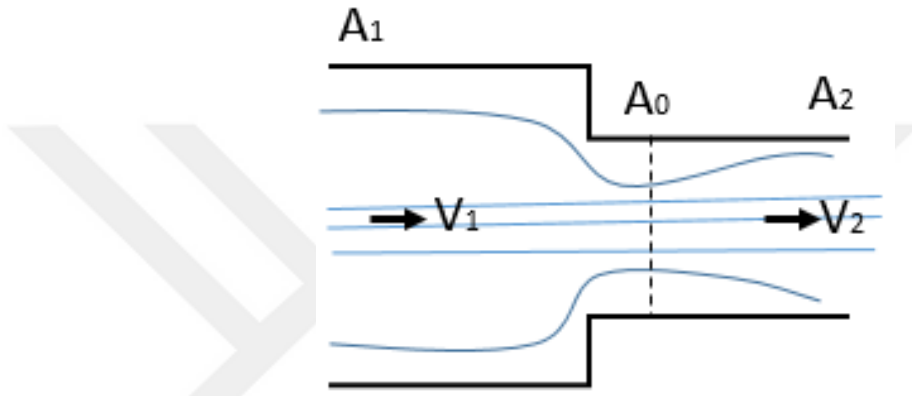
Burada,  $V_1$  (m/s) girişteki akışkanın hızını ifade etmektedir. Ani bir genişleme için basınç kayıp katsayısı ise Denklem 3.19'da verilmiştir.

$$\zeta = \left[1 - \frac{A_1}{A_2}\right]^2 \quad (3.19)$$

Denklemden görüldüğü gibi ani genişlemeli bir kesitte basınç kayıp katsayısı sadece alanlara bağlı bir fonksiyondur.

Kesit daralmasındaki pompa basma yüksekliği kaybı, geometrinin kenarlarına yaklaştığında akışta oluşan girdapların bir sonucu olarak meydana gelir. Şekil 3.11'de akışın ayrıldığı ve vortekslerin oluştuğu görülmektedir. Bunun nedeni, yerel basınç gradyanları nedeniyle akışın artık yüzeye paralel yapışmaması, bunun yerine akış

eğrisinin düz çizgileri takip etmesidir. Bu akış hacminin etkin kesit alanının azaldığı anlamına gelir. Alan  $A_0$  ile büzülme şekilde görülmektedir. Büzülme akışı hızlandırmakta ve bu nedenle kesiti doldurmak için daha sonra akışkanın yavaşlaması gerekmektedir. Kesit büzülmesinin bir sonucu olan pompa basma yüksekliği kaybı genel olarak bir borunun girişinde ve çark gözünde meydana gelir. Giriş yeterince yuvarlatılırsa bu kayıp azalır.



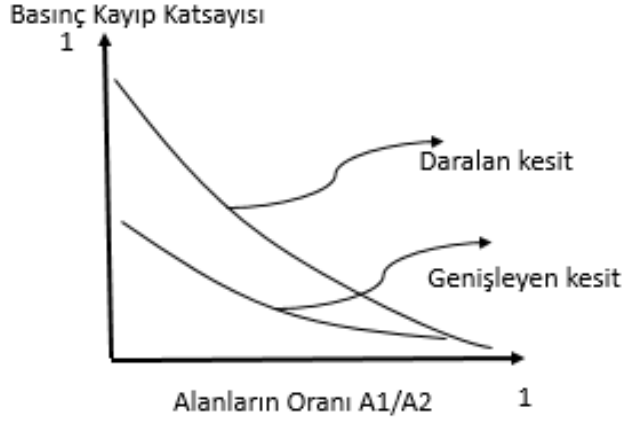
**Şekil 3. 11.** Kesitteki daralma kaynaklı oluşan hız değişimi ve vorteksler

Kesit daralmasında meydana gelen kayıp Denklem 3.20 ile ifade edilmiştir.

$$H_{daralma\ kaybi} = \left[1 - \frac{A_0}{A_2}\right]^2 \cdot \frac{V_0^2}{2g} \quad (3.20)$$

Burada,  $V_0$ (m/s) daralmadaki akışkan hızı ve  $A_0/A_2$  alanların oranını ifade eder.  $A_0$  doğrudan ölçülemediğinden genellikle Denklem 3.21 kullanılır.

$$H_{daralma\ kaybi} = \zeta \cdot H_{din.2} = \zeta \cdot \frac{V_2^2}{2g} \quad (3.21)$$



**Şekil 3. 12.** Basınç kayıp katsayının kesit genişleme ve daralması durumunda değişimi Şekil 3.12’de gösterildiği gibi, kayıp katsayısı ve dolayısıyla da basma yüksekliği kaybı, kesit daralmalarında daha küçüktür. Bu özellikle büyük genişleme ve daralma alan oranlarında geçerlidir.

Şekil 3.13’te çeşitli kesitlerdeki basınç kayıp katsayılarının nasıl hesaplanacağı verilmiştir.

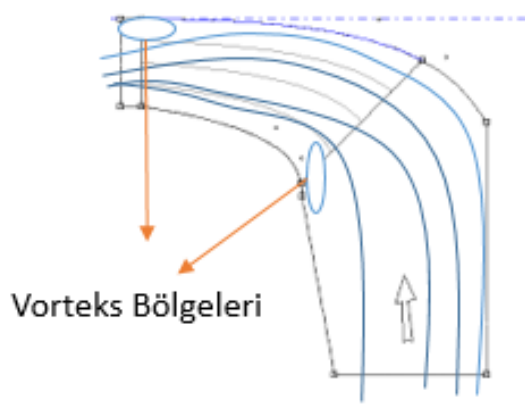
Basınç kayıp katsayısı		$\Delta p = \zeta \frac{\rho}{2} w_1^2$	$f = \frac{A_1}{A_2}$
Yuvarlatılmış giriş		$\zeta = e^{-17 \frac{r}{D_H}}$	$0 \leq \frac{r}{D_H} \leq 0.2$
Yuvarlatılmış giriş yalıtımlı		$\zeta = 0.5 e^{-14 \frac{r}{D_H}}$	$0 \leq \frac{r}{D_H} \leq 0.2$
45 eğimli giriş		$\zeta = 0.5 e^{-4.6 \frac{a}{D_H}}$	$0 \leq \frac{a}{D_H} \leq 0.15$
Daralma		$\zeta = 0.5 (1-f) e^{-14 \frac{r}{D_H}}$	$0 \leq \frac{r}{D_H} \leq 0.2$
45 eğimli daralma		$\zeta = 0.5 (1-f) e^{-4.6 \frac{a}{D_H}}$	$0 \leq \frac{a}{D_H} \leq 0.15$
Ani genişleme		$\zeta = (1-f)^2$	
Keskin kenarlı ince orifis		$\zeta = \{0.7\sqrt{1-f} + 1 - f\}^2$	
Keskin kenarlı kalın orifis		$\zeta = (1-f) \{1.5 - f + 0.24 \sqrt{1-f}\}$	
Yuvarlatılmış orifis		$\zeta = (1-f) \{1 - f + \zeta' + 2\sqrt{\zeta'(1-f)}\}$	$\zeta' = 0.5 e^{-14 \frac{r}{D_H}}$

**Şekil 3. 13.** Çeşitli kesitlerdeki basınç kayıp katsayıları (Johann Friedrich Gülich 2010’den değiştirilerek alınmıştır)



Hidrolik bileşenlerde vorteks bölgeleri genelde çalışma koşulları tasarım parametrelerinin dışında olduğunda meydana gelir. Vorteks bölgeleri akışın etkin kesit alanını azaltır. Sonuçta, vorteks oluşumundan dolayı önemli bir hidrolik kayıp oluşur. Vorteks bölgeleri giriş, çark ve salyangozda oluşabilir. Bu vorteks bölgelerin oluşumu geometri ve çalışma noktasına bağlıdır. Hidrolik bileşenleri tasarlarken, dizayn çalışma bölgesindeki noktalarındaki vorteks bölgelerinin boyutunu minimize etmek önemlidir. Vorteks bölgelerinin meydana gelip gelmediğini ve ne ölçüde olduğunu belirtecek basit bir model yoktur. Sadece gelişmiş lazer tabanlı hız ölçümleri veya zaman alan bilgisayar simülasyonları sayesinde vorteks bölgelerini ayrıntılı olarak belirlemek mümkündür. Vorteks oluşumu tahmin edilenden daha düşük pompa basma yüksekliği ve daha yüksek güç tüketimi gösteren performans ölçütü olarak da tanımlanabilir.

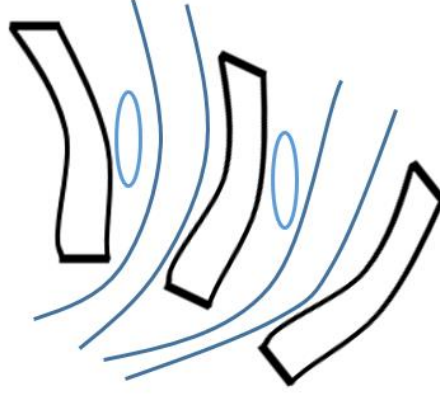
Pompaları tasarlarken, başlangıç noktası nominal çalışma noktasıdır. Pompa performansı nominal çalışma noktasında vorteks meydana gelmeyeceğinden oldukça doğru bir şekilde tahmin edilebilir. Akışın nominal çalışma noktasının altında olduğu durumlarda pompa eğrilerini öngörmek için deneysel ve nümerik çalışma yapma zorunluluğu vardır. İyi tasarlanmış bir pompada nominal çalışma değerleri haricinde Şekil 3.14'te gösterildiği gibi vorteksler oluşabilir.



**Şekil 3. 14.** Çarktaki muhtemel vorteks akış bölgeleri

Çark kanadının ön kenarlarındaki akış açısı ve kanat açısı arasında bir fark olduğunda vorteksler meydana gelir. Şekil 3.15'te gösterildiği gibi akış açısı ile kanat açısı arasında fark olduğunda kanadın bir tarafında vorteks bölgesi meydana gelir. Vorteks bölgesi, kanadın ön kenarından sonra bir akış daralmasına neden olur. Daha sonra

akışkan tekrar boşlukları doldurduğu için daralmadan sonra akış yavaşlar ve bu durum kayba sebep olmaktadır.



**Şekil 3. 15.** Çark kanadının ön kenarında vorteks oluşumu

Çark örtüsü ve göbeğinde sürtünme kaynaklı güç tüketimi kaybı meydana gelir. Çark ve pompa gövdesi arasındaki boşlukta sıvı dönmektedir. Dönme hızı çark yüzeyinde çarkın dönme hızına eşitken pompa gövdesinin yüzeyinde ise sıfırdır. Sürtünmenin büyüklüğü esas olarak hıza, çarka ve ayrıca pompa gövdesinin boyutlarına bağlıdır. Çark ve pompa gövdesi yüzey pürüzlülüğü sürtünmenin boyutu için belirleyici bir öneme sahiptir.

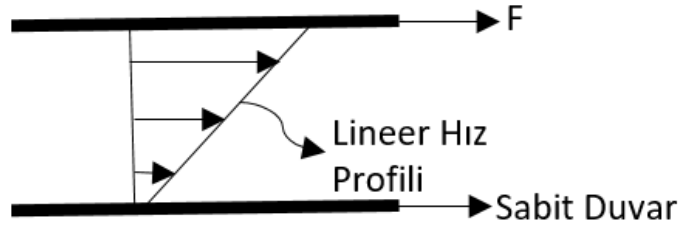
### **3.2.8. Performans eğrileri**

Pompa performansı birçok eğri ile tanımlanmaktadır. Performans eğrileri, belirli bir uygulama için gereksinimlerini karşılayan pompayı seçmek için kullanılmaktadır. Pompa basma yüksekliği ve akış gereksinimleri pompanın genel boyutlarını belirler. Buna ek olarak, güç tüketimi (P) ve verim eğrileri de elde edilmelidir. Verimlilik eğrisi, belirtilen çalışma aralığında en verimli pompayı seçmek için kullanılır. İstenen performans eğrileri yeni bir pompanın tasarımının en önemli parçasıdır.

## **3.3. Akışkan ve Akışkan Türleri**

### **3.3.1. Newtonian Akışkanlar**

Akışkanlarda akmaya karşı akışkanın iç direncini veya akışkanlığını temsil eden bir özellik bulunmakta ve bu özellik viskozite adıyla tanımlanmaktadır. Viskozite akışkanın bir cisme akma yönünde uyguladığı direnç kuvvetinin büyüklüğünü etkilemektedir.



**Şekil 3. 16.** İki paralel levha arasında akışta hız profili

Şekil 3.16'da iki paralel levhadan üstteki levhanın sabit bir hızla hareket etmesi ve alttaki levhanın sabit kalması halinde bir akışkanın laminer akış davranışı görülmektedir. Kayma gerilmesi Denklem 3.22 ile ifade edilmektedir.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3.22)$$

Burada A levha ile akışkan arasındaki temas alanıdır. Laminer akışta iki levha arasındaki akışkan hızındaki değişim doğrusal olmakta ve hız gradyeni Denklem 3.23 ile ifade edilmektedir.

$$u(y) = \frac{y}{l} V \quad \text{ve} \quad \frac{du}{dy} = \frac{V}{l} \quad (3.23)$$

Paralel iki levha arasındaki akış y yönünde değişmektedir. Diferansiyel bir dt zaman aralığında akışkan parçacıklarının kenarları düşey bir MN çizgisi boyunca diferansiyel bir dβ açısı kadar dönerken üstteki levha da = Vdt kadar diferansiyel bir mesafe kat eder. Bunun sonucunda ortaya çıkan açısal yerdeğiştirme ve deformasyon (veya kayma şekil değiştirmesi)  $d\beta \sim \tan d\beta = \frac{du}{l} = \frac{Vdt}{l} = \frac{du}{dy} dt$  olur. Böylece τ kayma gerilmesi etkisiyle şekil değiştirme hızı

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (3.24)$$

haline gelir. Denklem 3.24'e göre akışkan elemanının deformasyon hızı du/dy hız gradyenine eşittir. Ayrıca Newtonian akışkanlar için deformasyon hızının doğrudan kayma gerilmesi τ ile orantılı olduğu deneysel olarak da ispatlanmıştır ( $\tau \propto \frac{d\beta}{dt}$  veya  $\tau \propto \frac{du}{dy}$ ).

Deformasyon hızının kayma gerilmesiyle orantılı olduğu akışkanlara Newtonian akışkanlar denilmekte ve Newtonian akışkanların tek boyutlu kayma akışında kayma gerilmesi aşağıdaki Denklem 3.25'teki doğrusal ifadeyle gösterilmektedir.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad (3.25)$$

Newtonian akışkanların viskozitesi deformasyon hızından bağımsızdır. Deformasyon hızı birim zamandaki şekil değiştirme olduğundan viskozitenin gerilme şekil değişimi bağıntısındaki bir katsayı olduğu görülmektedir. Newtonian akışkana etki eden kayma kuvveti Denklem 3.26'da verilmiştir.

$$F = \tau A = \mu A \frac{du}{dy} \quad (N) \quad (3.26)$$

Newtonian olmayan akışkanlar için kayma gerilmesiyle deformasyon hızı veya kayma hızı arasındaki ilişki lineer değildir.

### 3.3.2. Newtonian Olmayan Akışkanlar

Kayma gerilimi ile kayma hızı oranını gösteren eğri Newtonian akışkanlar için belirli bir sıcaklık ve basınçta doğrusal davranış sergilemezler. Bu akışkanlar üç kategoride sınıflandırılmakta ve açıklanmaktadır.

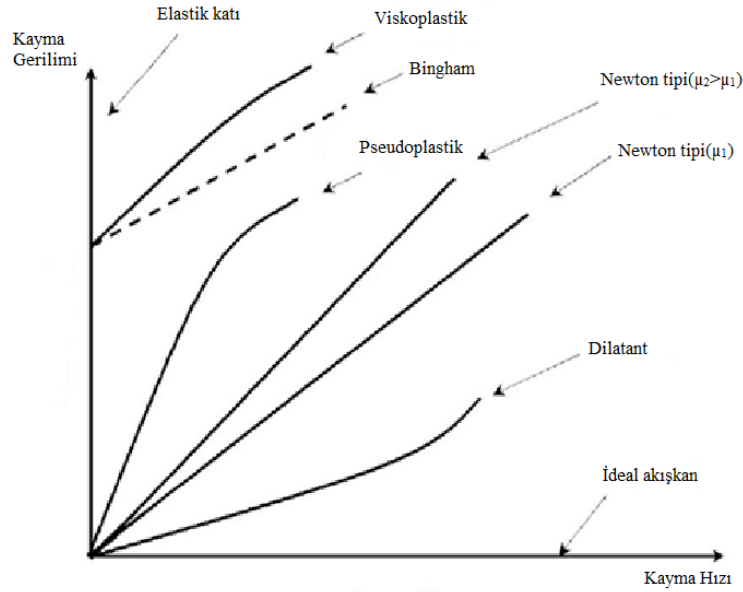
- Zamandan bağımsız akışkanlar; kayma hızının yalnızca anlık kayma gerilmesinin değerine bağlı olduğu akışkanlar olmakla beraber bunlar için tamamıyla viskoz, elastik olmayan, genelleştirilmiş Newtonian gibi adlandırmalar da yapılabilir.
- Zamana bağlı akışkanlar; kayma hızının ve kayma gerilmesi arasındaki ilişkinin kayma süresinin büyüklüğüne ve süresine bağlı olduğu akışkanlardır.
- Viskoelastik akışkanlar; hem yapışkan hem de elastik özellikler sergileyen bu akışkanlar kayma gerilmesinin kaldırılması durumunda akışkanda meydana gelen deformasyonda kısmi iyileşme gösterirler.

### 3.3.2.1. Zamandan Bağımsız Akış Davranışı

Zamandan bağımsız akışkanlar kayma hızı kayma süresine bağlı olmayan ancak uygulanan kayma gerilmesi büyüklüğüne bağlı olan akışkanlardır. Denklem 3.27’de verildiği gibi belirli bir noktadaki kayma hızı değeri ( $\dot{\gamma}$ ) yine bu noktadaki kayma gerilimi ( $\tau$ ) ile belirlenebilir. Zamandan bağımsız akışkanlar kayma incelmesi (pseudoplastik), kayma kalınlaşması (dilatant) ve viskoplastik akışkan olmak üzere üç gruba ayrılabilir.

$$\dot{\gamma} = f(\tau) \text{ veya tersi olarak } \tau = g(\dot{\gamma}) \quad (3.27)$$

Şekil 3.17’de bu akışkanların kayma gerilimi ve kayma hızına bağlı davranışı görülmektedir.



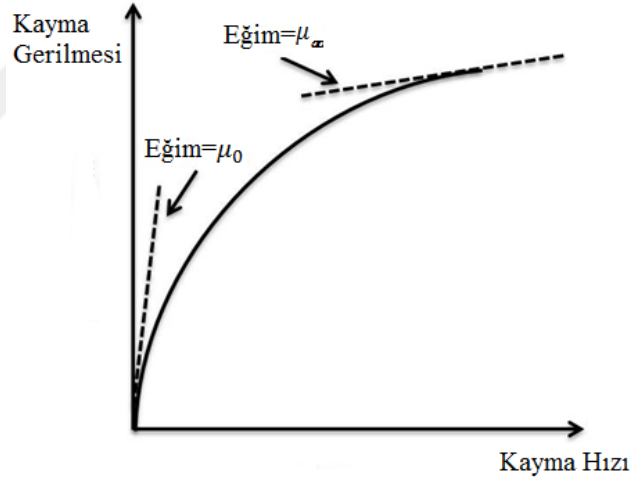
Şekil 3. 17. Zamandan bağımsız akışkanların gösterimi (Yeğiner, 2014’den değiştirilerek alınmıştır.)

Pseudoplastik (Kayma İncelmesi) : Zamana bağlı olmayan Newtonian olmayan akışkanlar arasında en yaygın olanı pseudoplastik veya kayma incelmesi olarak adlandırılan türüdür. Bu tarz davranış sergileyen akışkanlar azalan bir viskozite ve artan bir kayma gerilimi ile ifade edilir. Kayma gerilimi ile kayma hızı arasında çizilen grafik,

çok düşük ve çok yüksek viskozitede doğrusal olarak karakterize edilir. Bu bölgelere karşılık gelen eğimler sırasıyla “sıfır kayma viskozitesi” ( $\mu_0$ ) ve “sonsuz kayma viskozitesi” ( $\mu_\infty$ ) olarak adlandırılır. Pseudoplastik akışkanlarda kayma gerilmesi ve kayma hızı ile ilgili olarak önerilen ampirik modellerden bazıları aşağıda verilmiştir.

- Kayma hızının sıfır olduğu yerde limit viskozite ( $\mu_0$ ) kayma hızıyla ile sabit değişim göstermektedir.
- Orta kısımda viskozite kayma hızı ile değişir ve Power-Law model uygulanabilir.
- Kayma hızının sonsuza gittiği yerde limit viskozite ( $\mu_\infty$ ) kayma hızıyla ile sabit değişim gösterir.

Şekil 3.18’de kayma incelmesi davranışında sıfır viskozite ve sonsuz viskozite değerleri görülmektedir.



**Şekil 3. 18.** Kayma incelmesi davranışı (Yeğiner, 2014’den değiştirilerek alınmıştır)

Pseudoplastik (kayma gerilmesi) akışkanların modellenmesinde Power-Law, Carreau Cross ve Ellis matematiksel modelleri kullanılmaktadır.

Pseudoplastik davranışındaki bir akışkan kayma gerilimi ile kayma hızı grafiğinin logaritmik formunda doğrusal olan bölgede Power-Law eşitliği geçerlidir. Aynı zamanda oldukça sade oluşuyla Power-Law modeli önem kazanmıştır. Ancak, bu modeldeki sorun, sıfır ve sonsuz viskozite değerlerini doğru tahmin etmemesidir.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (3.28)$$

Denklem 3.28 ile verilen kayma gerilmesi ifadesinde,  $K(N/m^2s^n)$  kıvamlılık parametresi ve  $n$  Power-Law üssü sabitini ifade etmektedir. Burada akışkanın tipini belirleyen  $n$  sayısına göre:

- $n=1$  olması durumunda Newtonian akışkan
- $n<1$  olması durumunda pseudoplastik veya kayma incelmeleri tipi akışkan
- $n>1$  olması durumunda dilatant veya kayma kalınlaşması tipi akışkan tanımlanmıştır.

Kayma incelmeleri akışkanlar için basit bir model olan Power-Law modeli belirli aralıktaki kayma hızı değerlerinde kullanılır. Sıfır veya sonsuz değerlerindeki kayma hızlarında bulunan limit viskozitelerinin belirlenmesinde iyi sonuçlar vermediği kullanılmamaktadır.

Power-Law modeline göre daha geniş bir kayma hızı aralığında pseudoplastik akışkanların davranışlarını temsil eden model Carreau modelidir. Bu model düşük kayma hızlarında Newtonian olmayan akışkanların viskozitelerini Power-Law modeline göre daha iyi tahmin etmekte ve viskozite Denklem 3.29 ile ifade edilmektedir.

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left(1 + (\lambda\dot{\gamma})^2\right)^{\frac{n-1}{2}} \quad (3.29)$$

Burada,  $\mu_0$  kayma hızının sıfır olduğu yerdeki limit viskozite,  $\mu_{\infty}$  kayma hızının sonsuza gittiği yerdeki limit viskozite ve  $\lambda$  zaman viskozitenin azalmaya başladığı kayma hızının tersidir.

Cross modelinde ise Newtonian akışkanları  $k \rightarrow 0$  temsil ederken, yüksek kayma hızlarında ise Power-Law modeline yaklaşmaktadır. Bu modelde viskozite Denklem 3.30 ile hesaplanmaktadır.

$$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + k(\dot{\gamma})^2} \quad (3.30)$$

Ellis modeli düşük kayma hızlarında Power-Law modelinden daha iyi sonuçlar verdiği için dolayı tercih edilebilir ve Denklem 3.31 ile tanımlanmaktadır.

$$\mu = \frac{\mu_0}{1+k\left(\frac{\tau}{\tau_{1/2}}\right)^{\alpha-1}} \quad (3.31)$$

Burada,  $\alpha$  kayma incelmesinin ölçüsü ve  $\tau_{1/2}$  ise kayma hızının sıfır olduğu viskozite değerinin yarısındaki kayma değeridir.

Dilatant (Kayma Kalınlaşması) : Dilatant (kayma kalınlaşması) akışlar pseudoplastik akışkan davranışının tersini göstermektedirler. Kayma gerilimi ile birlikte viskozite de artmaktadır. Yani karıştırıldıkça veya tam ifadesiyle hareket ettirildikçe akışkanın göstereceği direncin artacağı görülür. Kayma kalınlaşması davranışı sergileyen akışkanlar arasındaki boşluk kayma hızının artışıyla artmaktadır. Dilatant akışkanlar, pseudoplastik akışkanlardan çok daha az yaygındır. Pseudoplastik akışkanları tanımlamak için kullanılan modeller dilatant davranış sergileyen akışkanları modellemek için de kullanılabilir.

Viskoplastik Akışkan : Bu akış tipinde akışkan akmaya başlamadan önce başlangıç akma gerilimi olması gerektiği ifade edilir. Uygulanan gerilim bu başlangıç geriliminden daha düşükse akışkanlar akmazken daha yüksekse doğrusal veya doğrusal olmayan bir davranış sergilerler. Eğer ilerleme doğrusal ise Bingham Plastik doğrusal değilse kayma incelmeleri davranış görülmektedir.

Bingham plastik modeli, Denklem 3.32'nin ifade ettiği gibi ancak belirli gerilme uygulandıktan sonra akmaya başlayan akışkanları tarif eden modeldir.

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad \tau > \tau_0 \text{ için} \quad (3.32)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \tau < \tau_0 \text{ için} \quad (3.33)$$

Burada,  $\tau_0$  kritik kayma gerilimini ve  $\mu_p$  Bingham plastik viskozitesini ifade eder. Belirli kayma gerilimi uygulanmadığı takdirde akışkanın kayma hızının sıfır olacağını Denklem 3.33 göstermektedir. Kayma gerilimi ile kayma hızına ait grafikten eğrinin ekstrapolasyon değerleri vasıtasıyla Bingham plastik viskozitesi ve kritik kayma gerilimi değerleri belirlenebilir.



Herschel-Bulkley modeli, Newtonian Bingham plastik ve Power-Law akışkanlarını tanımlayan üç parametreye dayalı bir modeldir ve Denklem 3.34 ve Denklem 3.35 ile ifade edilir.

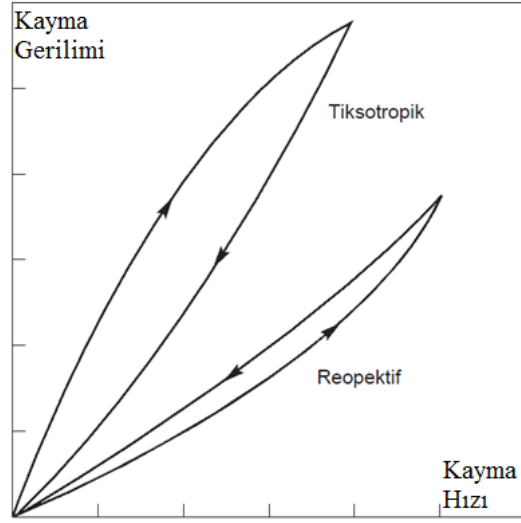
$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad \tau > \tau_0 \text{ için} \quad (3.34)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \tau < \tau_0 \text{ için} \quad (3.35)$$

Burada,  $K$  ( $\text{N/m}^2\text{s}^n$ ) kıvamlilik parametresi,  $n$  akış davranış sabiti ve  $\dot{\gamma}$  ( $1/\text{s}$ ) kayma hızını göstermektedir.

### 3.3.2.1. Zamana Bağlı Akış Davranışı

Zamana bağlı kayma incelmesi ve kayma kalınlaşması davranışını gösteren akışkanlarda görülmektedir. Yani bazı akışkanlar sabit kayma oranına maruz olduklarında zamana bağlı olarak pseudoplastik veya dilatant akışkan davranışı sergilemektedirler. Zamana bağlı olarak sabit kayma oranında kayma gerilimi ve viskozitede azalma olanlar tiksotropik akışkanlar olarak adlandırılmaktadır. Bunun nedeni uygulanan kayma gerilmesiyle beraber akışkanın yapısındaki değişim ile açıklanabilir. Diğer bir ifadeyle tiksotropik akışkanlara zamana bağlı pseudoplastik akışkanlar da denilebilir. Zamana bağlı olarak sabit kayma oranında kayma incelmesinin aksine kayma gerilimi ve viskozitede artma olanlar reopektif veya anti tiksotropik olarak adlandırılır. Şekil 3.29'da gösterilen zamana bağlı pseudoplastik veya dilatant akışkan davranışı birkaç modelle karakterize edilmektedir. Bu modeller Weltman, Tiu ve Boger olarak bilinmektedirler.



**Şekil 3. 19.** Zamana bağlı tiksotropik ve reopektif akış davranışı (Yeğiner, 2014'den değiştirilerek alınmıştır.)

### 3.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) veya CFD (Computational Fluid Dynamic) gelişmiş bilgisayar tabanlı tasarım ve analiz tekniğidir. Akış alanını ve ilgili fiziksel olayları tahmin etmek için genel akış denklemleri kullanılır. Hesaplamalı bölümün anlamı veya yüksek hızlı dijital bilgisayarlarda gerçekleştirilen yazılım paketlerini kullanan sayısal simülasyonu kullanarak akışı incelemektir.

Akış analizi için süreklilik denklemi (kütlenin korunumu) ve Navier-Stokes (momentum denklemleri) denklemleri, ısı transferi analizi için enerji denklemi kullanılmalıdır. Bu denklemler birbiriyle ilişkili olduklarından ve lineer olmadıklarından bazı problemler haricinde analitik genel çözüm bulunamamaktadır. Bu durumlarda akışta yapılacak kabullerle denklemler analitik çözüm yapılabilecek denklemlere dönüştürülür. Evrende gerçekleşen olayların çoğu bu sınıfa girmediğinden yaklaşım metotları kullanılarak çözüme yakınsamaya çalışılır. Bunun için birçok yaklaşım metodu kullanılarak iyi bir yakınsama elde edilmeye çalışılır.

### 3.4.1. Korunum Denklemleri

Denklem 3.36’da süreklilik denklemi Denklem 3.37, Denklem 3.38 ve Denklem 3.39’da ise momentum denklemleri verilmiştir.

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + \frac{\partial}{\partial x}\rho \cdot u + \frac{\partial}{\partial y}\rho \cdot v + \frac{\partial}{\partial z}\rho \cdot w = 0 \quad (3.36)$$

x-momentum denklemi:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}u + \rho \cdot u \frac{\partial}{\partial x}u + \rho \cdot v \frac{\partial}{\partial y}u + \rho \cdot w \frac{\partial}{\partial z}u = \rho \cdot g_x - \frac{\partial}{\partial x}P + \frac{\partial}{\partial x}\left(2 \cdot \mu \frac{\partial}{\partial x}u\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu \left(\frac{\partial}{\partial y}u + \frac{\partial}{\partial x}v\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu \left(\frac{\partial}{\partial z}u + \frac{\partial}{\partial x}w\right)\right] + S_w \quad (3.37)$$

y-momentum denklemi:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}v + \rho \cdot u \frac{\partial}{\partial x}v + \rho \cdot v \frac{\partial}{\partial y}v + \rho \cdot w \frac{\partial}{\partial z}v = \rho \cdot g_y - \frac{\partial}{\partial y}P + \frac{\partial}{\partial y}\left(2 \cdot \mu \frac{\partial}{\partial y}v\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu \left(\frac{\partial}{\partial y}u + \frac{\partial}{\partial x}v\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu \left(\frac{\partial}{\partial z}v + \frac{\partial}{\partial y}w\right)\right] + S_w \quad (3.38)$$

z-momentum denklemi:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}w + \rho \cdot u \frac{\partial}{\partial x}w + \rho \cdot v \frac{\partial}{\partial y}w + \rho \cdot w \frac{\partial}{\partial z}w = \rho \cdot g_z - \frac{\partial}{\partial z}P + \frac{\partial}{\partial z}\left(2 \cdot \mu \frac{\partial}{\partial z}w\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu \left(\frac{\partial}{\partial z}u + \frac{\partial}{\partial x}w\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu \left(\frac{\partial}{\partial z}v + \frac{\partial}{\partial y}w\right)\right] + S_w \quad (3.39)$$

Momentum denklemlerinde geçen,  $g_x, g_y, g_z$  sırasıyla x, y ve z yönündeki yerçekimi ivmelerini, P basıncı, u x-yönündeki hız bileşenini, v y-yönündeki hız bileşenini, w z-yönündeki hız bileşenini,  $\rho$  yoğunluğu ve  $\mu$  viskoziteyi tanımlamaktadır.  $S_w$  ise dönen akışkanlar için kaynak terimidir ve Denklem 3.40 ile ifade edilmiştir.

$$S_w = -2\rho\omega_i \times V_i - \rho\omega_i \times \omega_i \times r_i \quad (3.40)$$

Burada, i global koordinat sistemindeki yönler olan (x, y, z) ‘yi,  $\omega_i$  akışkanın dönme hızını ve  $r_i$  ise akışkanın dönme eksenine olan mesafesini temsil etmektedir.

Türbülans, akış alanındaki parçacıkların düzensiz ve rastgele hareketlerinden meydana gelir ve temel olarak atalet kuvveti, akışkandaki viskoz kuvvetten daha baskın olduğunda ortaya çıkar. Yüksek Reynolds sayısı türbülansı karakterize etmek için kullanılırken hem laminar ve hem de türbülanslı akışlar Navier-Stokes denklemleriyle tanımlanır. Türbülanslı akışta değişkenler biri zamandan bağımsız ikincisi ise değişken kısımdır. Türbülans küçük ölçeklerde olduğunda, türbülansın doğrudan sayısal simülasyonu hesaplama açısından çok daha zordur, çünkü simülasyon için çok küçük sonlu hacim ağları gerekir.

Navier-Stokes denklemleri türbülanslı akış için de yazılabilir. Bağımlı değişkenler ortalama değer ve ortalama değer etrafında salınım yapan değerlerin toplamı olarak yazılırsa zamana bağımlı denklemler ortaya çıkar. Bu çalışmada Navier-Stokes denklemleri k-ε türbülans modeli ile çözülmüştür. Denklem 3.41 ile türbülanslı akışta hız ifadeleri verilmiştir.

$$u = \bar{u} + u^t \quad (3.41)$$

Burada  $\bar{u}$  ortalama hızı gösterirken,  $u^t$  ortalama hız etrafındaki u hızının salınımını ifade etmekte ve çalkantı hızı adını almaktadır. Bu ifadeleri yukarıdaki denklemlerde yerine yazarsak Denklem 3.42 ile verilen süreklilik denklemi ve Denklem 3.43, Denklem 3.44 ve Denklem 3.45 ile verilen momentum denklemleri elde edilir.

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho \cdot u}{\partial x} + \frac{\partial \rho \cdot v}{\partial y} + \frac{\partial \rho \cdot w}{\partial z} = 0 \quad (3.42)$$

x-momentum denklemi:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \rho V \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \rho W \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2\mu \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho u^t u^t \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \rho u^t v^t \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) - \rho u^t w^t \right] + S_w \quad (3.43)$$

y-momentum denklemi:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \bar{v} + \rho \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \bar{v} + \rho \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} \bar{v} + \rho \bar{w} \frac{\partial}{\partial z} \bar{v} = \rho g_y - \frac{\partial}{\partial y} P + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2\mu \left( \frac{\partial}{\partial x} \bar{v} - \rho v^l v^l \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial}{\partial y} \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} \bar{v} \right) - \rho u^l v^l \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial}{\partial z} \bar{v} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{w} \right) - \rho v^l w^l \right] + S_w \quad (3.44)$$

z-momentum denklemi:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \bar{w} + \rho \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \bar{w} + \rho \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} \bar{w} + \rho \bar{w} \frac{\partial}{\partial z} \bar{w} = \rho g_z - \frac{\partial}{\partial z} P + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2\mu \left( \frac{\partial}{\partial z} \bar{w} - \rho w^l w^l \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial}{\partial z} \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} \bar{w} \right) - \rho u^l w^l \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial}{\partial z} \bar{v} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{w} \right) - \rho v^l w^l \right] + S_w \quad (3.45)$$

$\rho u^l u^l$ ,  $\rho u^l v^l$ ,  $\rho u^l w^l$ ,  $\rho v^l v^l$ ,  $\rho v^l w^l$  ve  $\rho w^l w^l$  ifadelerine Reynolds gerilmeleri denir.

Sonuç olarak akışı çözerken, dört adet denkleminiz (bir tane süreklilik ve üç tane momentum denklemleri olmak üzere) ve  $\bar{u}$ ,  $\bar{w}$ ,  $\bar{v}$ ,  $P$ ,  $\rho u^l u^l$ ,  $\rho u^l v^l$ ,  $\rho u^l w^l$ ,  $\rho v^l v^l$ ,  $\rho v^l w^l$ ,  $\rho w^l w^l$  olmak üzere on adet bilinmeyenimiz vardır. Dört denklem ve on bilinmeyen için çözüm bulmak imkânsızdır. Akış alanının sayısal olarak çözülebilmesi için Reynolds gerilmeleri terimlerinin modellenmesi gerekmektedir. Modelleme yapılırken bilinmeyen ek terimler daha önceki bilinmeyenlerle ilişkilendirilmeye çalışılır. Burada türbülans viskozitesi ( $\mu_t$ ) Denklem 3.46 ve Denklem 3.47 ile ifade edilmiştir.

$$\mu_t = \frac{-\rho u^l w^l}{\frac{\partial}{\partial z} \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} \bar{w}} = \frac{-\rho u^l v^l}{\frac{\partial}{\partial y} \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} \bar{v}} = \frac{-\rho v^l w^l}{\frac{\partial}{\partial z} \bar{v} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{w}} \quad (3.46)$$

Bilinmeyenleri tanımlarken iki denklemlilik k-ε modeli kullanılmıştır. Bu modelde türbülans kinetik enerjisi k ve türbülans kinetik enerjisinin dissipasyonu ε terimleri tanımlanmıştır. Denklem 3.47'de tanımlanan türbülans viskozitesinde  $C_\mu$  deneysel bir sabittir.

$$\mu_t = C_\mu \cdot \rho \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.47)$$

Momentum denklemlerinden türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans kinetik enerjisi dissipasyonu (ε) terimleri türetilirse Denklem 3.48 ve Denklem 3.49 elde edilir.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t} \bar{v} + \rho \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \bar{v} + \rho \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} \bar{v} + \rho \bar{w} \frac{\partial}{\partial z} \bar{v} = \rho g_y - \frac{\partial}{\partial y} P + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial}{\partial x} k \right] + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial}{\partial z} k \right] - \rho \cdot \varepsilon + \mu_t \left[ 2 \left( \frac{\partial}{\partial x} \bar{u} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial}{\partial y} \bar{v} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial}{\partial z} \bar{w} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial y} \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} \bar{v} \right)^2 + \right. \\ \left. \left( \frac{\partial}{\partial z} \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} \bar{w} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial z} \bar{v} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{w} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon + \rho \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \varepsilon + \rho \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon + \rho \bar{w} \frac{\partial}{\partial z} \varepsilon = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial}{\partial x} \varepsilon \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon \right] + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial}{\partial z} \varepsilon \right] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \left[ 2 \left( \frac{\partial}{\partial x} \bar{u} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial}{\partial y} \bar{v} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial}{\partial z} \bar{w} \right)^2 + \right. \\ \left. \left( \frac{\partial}{\partial y} \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} \bar{v} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial z} \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} \bar{w} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial z} \bar{v} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{w} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (3.49)$$

Denklem 3.48 ve 3.49'da görülen  $\sigma_k$  ifadesi türbülans Prandtl sayısını ifade eder ve değeri 1.0 olarak alınır.  $C_1$  ve  $C_2$  ise deneysel olarak elde edilmiş sabitlerdir ve değerleri sırasıyla 1.44 ve 1.92' dir.  $C_\mu$  ve  $\sigma_\varepsilon$  sabitlerinin değerleri ise sırasıyla 0.09 ve 1.3 olarak Böylece süreklilik denklemi, üç yönde momentum denklemi, türbülans kinetik enerjisi denklemi ve türbülans kinetik enerji dissipasyon denklemi olmak üzere elimizde altı adet denklem vardır. Bilinmeyenlerimiz ise  $\bar{u}$ ,  $\bar{w}$ ,  $\bar{v}$ ,  $P$ ,  $k$ ,  $\varepsilon$  olmak üzere altı adettir. Böylece k-ε türbülans modeliyle denklem ve bilinmeyen sayısı eşitlenerek denklemler çözümler hale gelmiştir.

### 3.4.2. ANSYS CFD-CFX

ANSYS CFX akışkanı özellikle turbo makinalarda olmak üzere farklı geometrilerde analiz etmek için kullanılır. Uygulama alanlarına örnek olarak, gemi gövdeleri, türbinler, pompalar, fanlar, uçaklar ve kompresörler verilebilir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizi geometrinin ilk tasarımının üretimi ve mesh ile başlar. Ardından sınır değerlerin tanımı yapılır ve Navier-Stokes, korunum denklemleri akışkan analiz problemlerini çözmek için kullanılır. Analiz aşamaları;

1- CFX Ön İşlemcisi:

- Geometri alan tanımı.
- Çok küçük elementler ile mesh üretimi
- Akışkan özelliklerinin tanımlanması

- Sınır koşulu tanımı.
- 2- CFX-Akış çözücü.
- Denklemlerin çözümü CFX çözücü tarafından yapılır.
- 3- CFX-Post işlemcisi
- Geometri alanı ve meshe dayalı gösterimi.
  - Vektörler ve konturlar çizimleri.
  - 3D-2D grafikler

olarak verilebilir. Santrifüj pompa tasarımı ve çark modellemesinde ise sırasıyla Vista CPD ve BladeGen yazılımları kullanılmıştır.

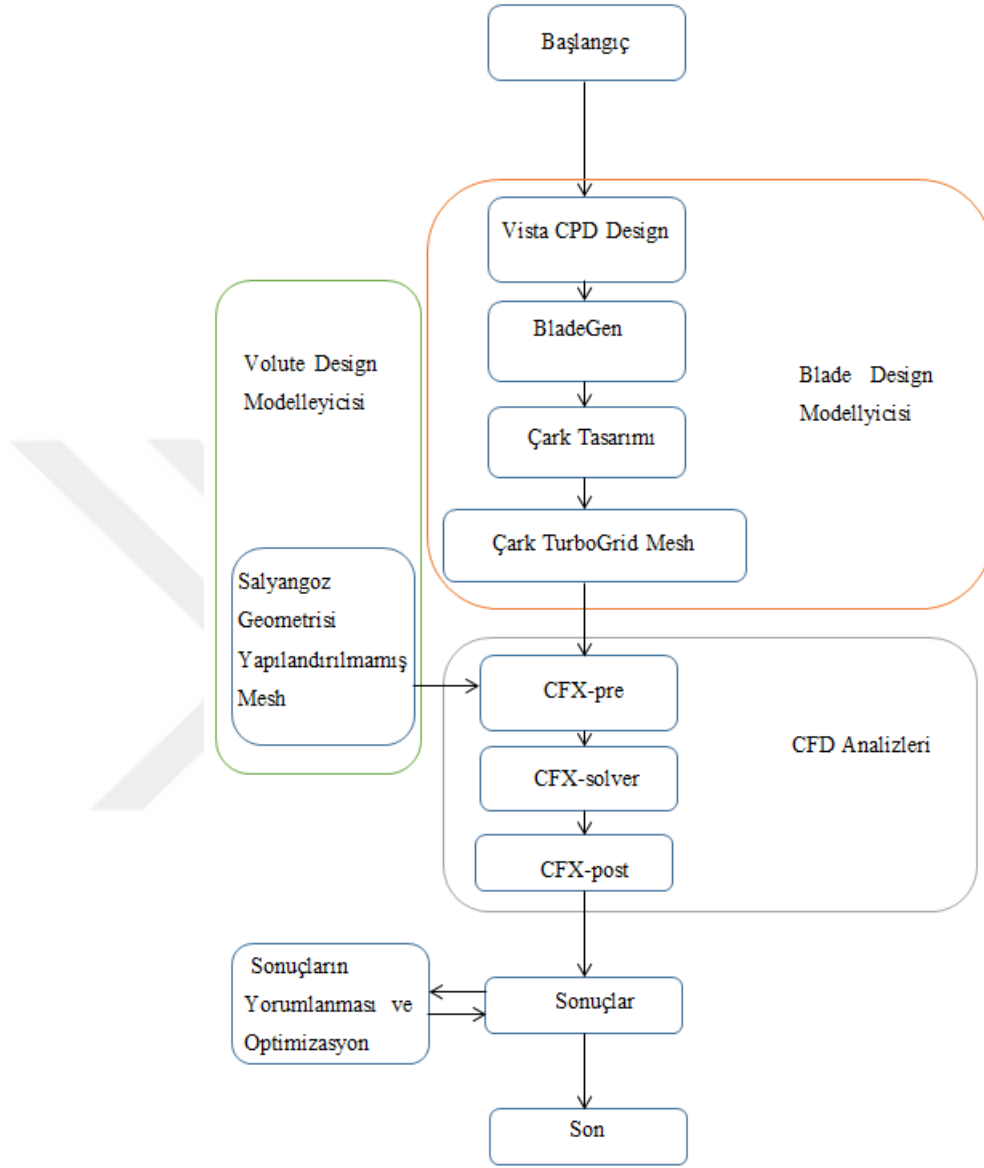
#### **3.4.2.1. Vista CPD Tasarımı**

ANSYS CPD santrifüj pompanın standart boyutlarını elde etmek için gereken pompa verimi ve pompa basma değerlerini girerek tasarım yapabilen bir yazılımdır. Bu yazılımı kullanarak pompaların ilk tasarımları yapılır ve santrifüj pompanın en karmaşık kısmı olan çark kanadı BladeGen 'e eklenir.

#### **3.4.2.2. BladeGen**

BladeGen çark kanatlarının geometrisinin modellemesinde kullanılır. BladeGen kanat modelleyicisi yazılımcılar tarafından ANSYS 'e uzantı olarak eklenmiştir. BladeGen 3 boyutlu pompa oluşturmak için kullanılır. Radyal, aksenal ve karışık pompaların tasarımında kullanılır. Böylece yeni bir tasarım oluşturmak ve mevcut olan çarkın tasarımını yapmak oldukça kolaylaşır. Ek olarak, bu özellik, santrifüj pompa çark kanadı, türbin kanadı ve kompresör kanadı gibi farklı çark kanat modellerinin tasarlanmasına da yardımcı olur. Geometri CAD ile modelledikten sonra BladeGen ile 3 boyutlu akış analizi yapılır.

Bu çalışmada öncelikle iki farklı santrifüj pompa tasarımı yapılmıştır. Daha sonra bu santrifüj pompalarda kanat sayısı ve çıkış kanat açısı değiştirilerek en iyi pompa basma yüksekliği ve verim değerlerinin elde edildiği pompalar tespit edilmiştir.



**Şekil 3. 20.** İşlem şeması

Bu bölümde öncelikle genel hatlarıyla 2 farklı santrifüj pompa tasarımı yapılmıştır. Daha sonra bu santrifüj pompalarda kanat sayısı ve çıkış kanat açısı değiştirilerek pompa basma yüksekliği ve verim değerleri okunmuştur.



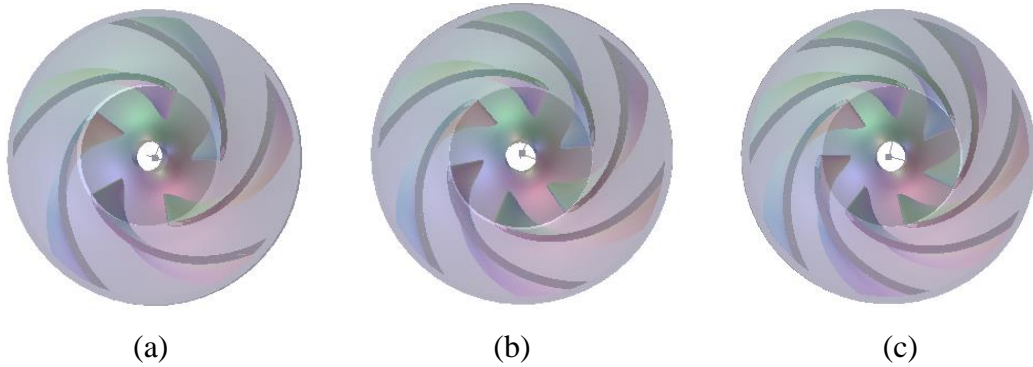
### 3.4.3. Optimizasyon (1.pompa)

Birinci pompa için ilk adımda oluşturulan farklı kanat sayısı ve kanat çıkış açılarının uygulandığı dizayn parametreleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3. 1.** İlk aşamada 1.pompa için dizayn parametreleri

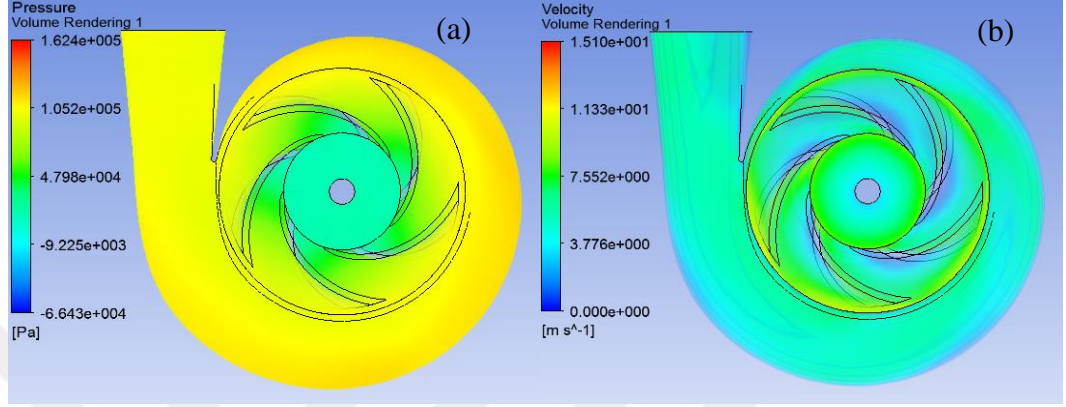
Dizayn Parametreleri	
Debi	90 m <sup>3</sup> /sa.
Basma Yüksekliği	10 m
Rotor Hızı	1450 rpm
Giriş Çapı	100 mm
Çark Çıkış Çapı	200 mm
Kanat Sayısı	5, 6, 7
Kanat Giriş Açısı	20 <sup>0</sup>
Kanat Çıkış Açısı	20 <sup>0</sup> , 25 <sup>0</sup> , 30 <sup>0</sup>
Akışkan	Su
Salyangoz Çıkış Çapı	90 mm

Şekil 3.21’de gösterildiği gibi 3 farklı kanat sayısına sahip santrifüj pompa tasarımı yapılmıştır. Her durum için nümerik analizler yapılmış ve hangi kanat sayısının daha iyi basma yüksekliği verdiği belirlenmiştir.



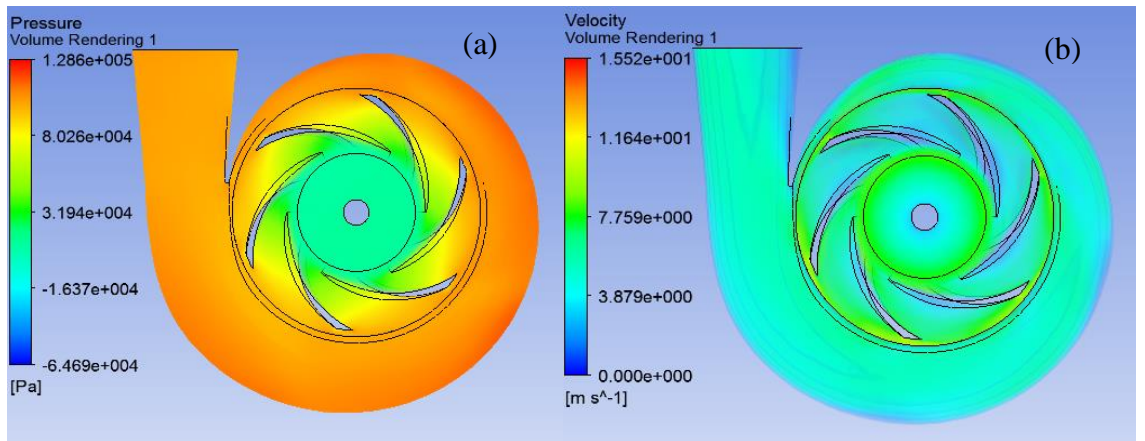
**Şekil 3. 21.** 1.Pompa için farklı kanat varyasyonlarına sahip çarklar (a) 5 kanatlı, (b) 6 kanatlı, (c) 7 kanatlı

Şekil 3.22’de 5 kanatlı  $25^0$  kanat çıkış açılı santrifüj pompa için basınç ve hız dağılımı verilmiştir. Basınç çark girişinden çıkışına doğru artmış ve maksimum 1.624 bar’a kadar çıkmıştır. Hız için okunan maksimum değer ise çark çıkışında 15.1 m/s olarak tespit edilirken, basma yüksekliği 9.41662 m olarak elde edilmiştir.



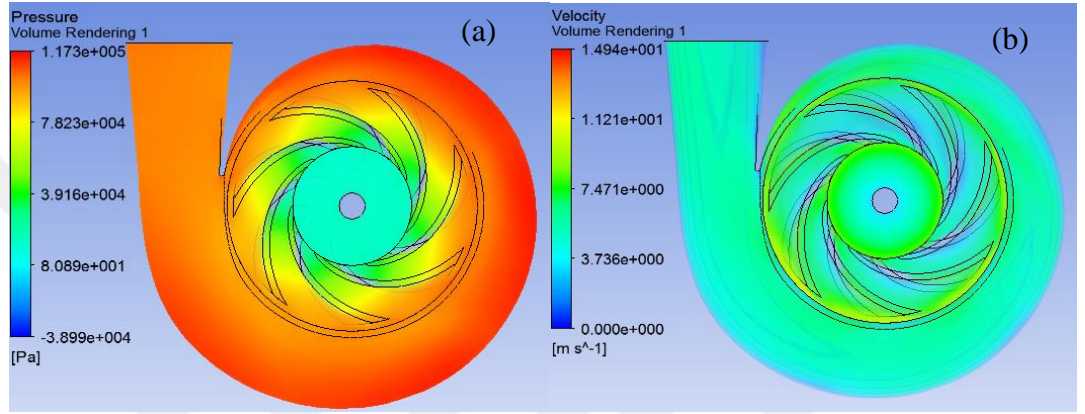
Şekil 3. 22. 1.pompa 5 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

Şekil 3.23’te görüldüğü gibi 6 kanatlı  $25^0$  kanat çıkış açılı santrifüj pompada okunan maksimum basınç ve hız değerleri sırasıyla 1.286 bar ve 15.52 m/s olarak elde edilmiştir. Maksimum hızın kanat çıkışlarının uç kısımlarında okunduğu görülmektedir. 6 kanatlı tasarımda 5 kanatlı tasarıma göre okunan maksimum basınç yaklaşık %26.3 düşerken hız %2.8 oranında artmıştır. Bu pompa basma yüksekliği 5 kanatlı tasarıma göre yaklaşık %6.2 artarak 10.001 m olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. 23. 1.pompa 6 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

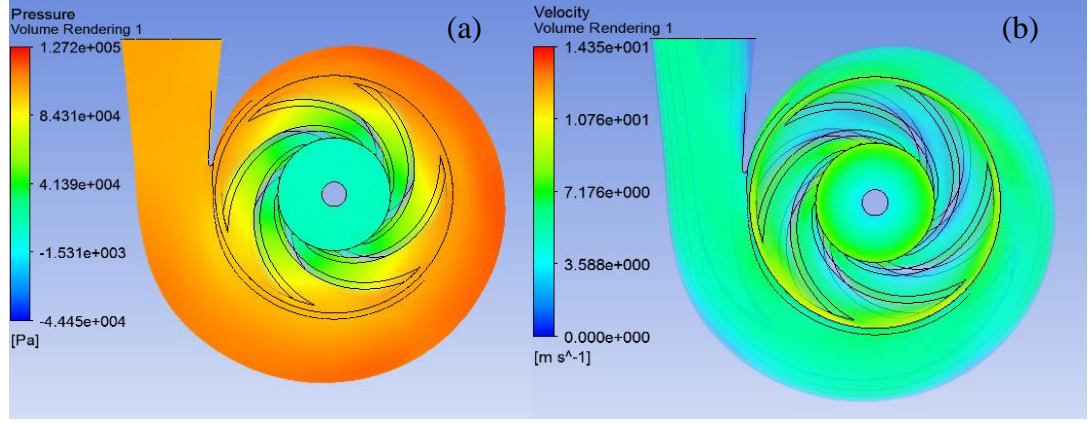
Şekil 3.24'te 7 kanatlı  $25^0$  kanat çıkış açılı santrifüj pompa için yapılan nümerik analizlerin basınç ve hız dağılımları gösterilmiştir. Bu tasarım için okunan maksimum basınç değeri çark çıkışında, salyangoz girişinde 1.173 bar' dır. Bu pompada salyangoz girişinden çıkışına doğru basınçtaki düşüş 5 ve 6 kanatlı tasarımlara göre daha belirgindir. 7 kanatlı tasarımdaki maksimum basınç ve hız değerleri 6 kanatlı tasarıma göre sırasıyla yaklaşık %9.6 ve %3.9 düşmüştür. Pompa basma yüksekliği ise 9.7824 m olarak elde edilmiştir.



**Şekil 3. 24.** 1.pompa 7 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

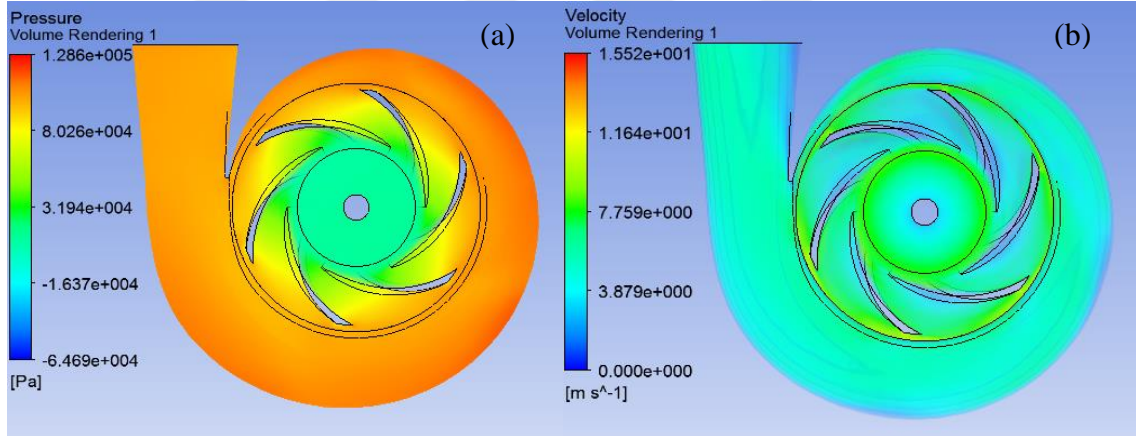
Pompa basma yükseklikleri kıyaslandığı zaman en iyi basma yüksekliğini veren tasarımın 6 kanatlı pompa tasarımı olduğu görülmüştür. 6 kanatlı pompa tasarımı için basma yüksekliği 10.001 m olarak elde edilirken 5 kanatlı tasarım için 9.41662 m ve 7 kanatlı tasarım için 9.7824 m olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle 6 kanatlı pompa tasarımı ile analizlere devam edilmiştir. Bu sonuç sadece kanat sayısındaki bir adet değişimle pompa basma yüksekliğinin yaklaşık 7% değişebileceğini göstermiştir. Pompa kanat sayısı belirlendikten sonra kanat çıkış açısı optimizasyonu ile analizlere devam edilmiştir.

Şekil 3.25'te 6 kanatlı  $20^0$  kanat çıkış açılı 1. pompa için basınç ve hız dağılımı verilmiştir. Maksimum basınç ve hız sırasıyla 1.272 bar ve 14.35 m/s olarak elde edilirken, pompa basma yüksekliği 9.76645 m olarak tespit edilmiştir.



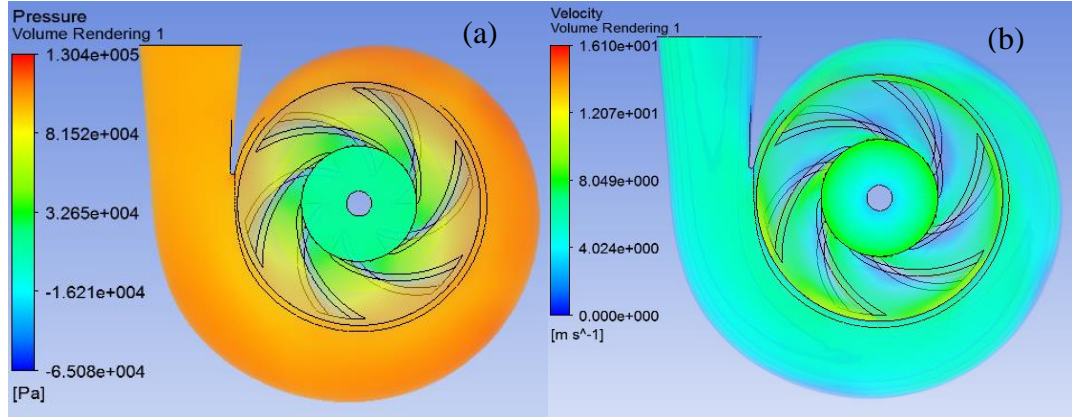
**Şekil 3. 25.** 1.pompa  $20^0$  kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

6 kanatlı  $25^0$  kanat çıkış açılı çark için maksimum basınç ve hız, Şekil 3.26'da gösterildiği gibi, sırasıyla 1.286 bar ve 15.52 m/s olarak elde edilmiştir. Kanat çıkış açısı  $20^0$  den  $25^0$ ' ye çıktığında maksimum basınç %11 ve hız %8.2 artarken, pompa basma yüksekliği 10.001 m değerini alarak %2.4 artmıştır.



**Şekil 3. 26.** 1.pompa  $25^0$  kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

Çıkış kanat açısının  $20^0$ 'den  $25^0$ 'ye artırılması pompa basma yüksekliği arttırdığından,  $30^0$  kanat çıkış açısı içinde analizler yapılmıştır. Şekil 3.27'de 6 kanatlı, kanat çıkış açısı  $30^0$  olan santrifüj pompanın basınç ve hız dağılımını görülmektedir. Pompa basma yükseklikleri tıpkı kanat sayısında yapıldığı gibi kıyaslanmıştır. En iyi pompa basma yüksekliği veren kanat çıkış açısı tasarlanan 6 kanatlı çark için  $25^0$  olarak belirlenmiştir.  $25^0$  için pompa basma yüksekliği 10.001 m çıkarken  $20^0$  çıkış açısı için 9.76645 m,  $30^0$  için 9.61284 m çıkmıştır. Bundan sonraki aşamalarda santrifüj dizayn parametreleri kanat çıkış açısı  $25^0$  olarak, kanat sayısı ise 6 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. 27. 1.pompa 30<sup>0</sup> kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

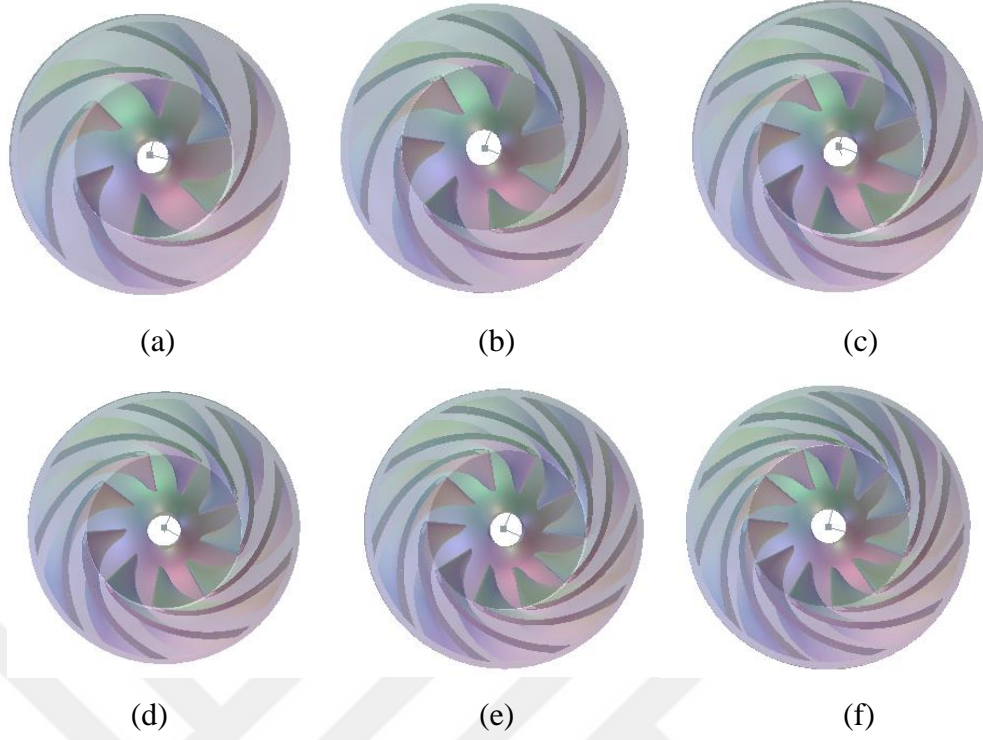
#### 3.4.4. Optimizasyon (2.pompa)

Bu bölümde farklı dizayn parametrelerine sahip ikinci bir santrifüj pompa tasarımı ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon aşamasında 2. pompa dizayn parametreleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 2. İlk aşamada 2.pompa için dizayn parametreleri

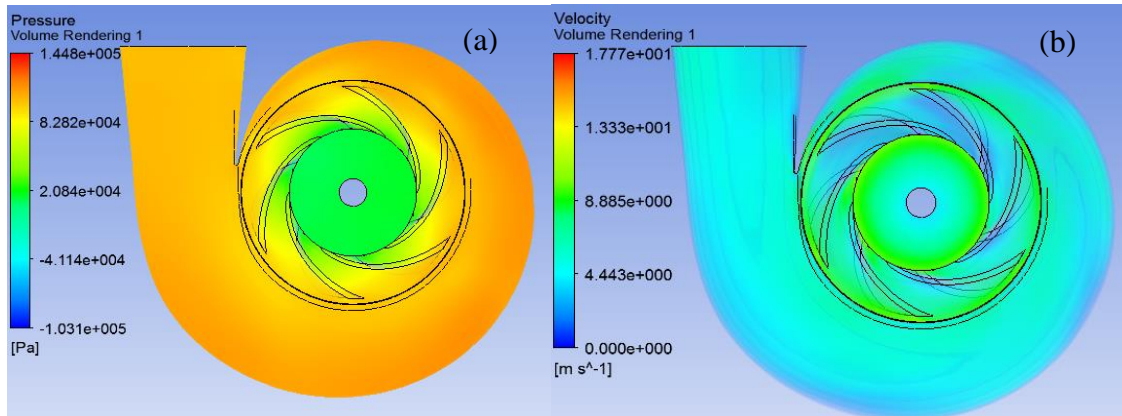
Dizayn Parametreleri	
Debi	160 m <sup>3</sup> /sa.
Basma Yüksekliği	10 m
Rotor Hızı	1450 rpm
Giriş Çapı	120 mm
Çark Çıkış Çapı	200 mm
Kanat Sayısı	6, 7, 8, 9, 10, 11
Kanat Giriş Açısı	20 <sup>0</sup>
Kanat Çıkış Açısı	17 <sup>0</sup> , 19 <sup>0</sup> , 20 <sup>0</sup> , 25 <sup>0</sup> , 30 <sup>0</sup>
Akışkan	Su
Salyangoz Çıkış Çapı	120 mm

Şekil 3.28’de gösterildiği gibi 6 farklı kanat sayılı çarka sahip santrifüj pompa tasarımı yapılmış ve hangi kanat sayısının daha iyi basma yüksekliği verdiği belirlenmiştir.



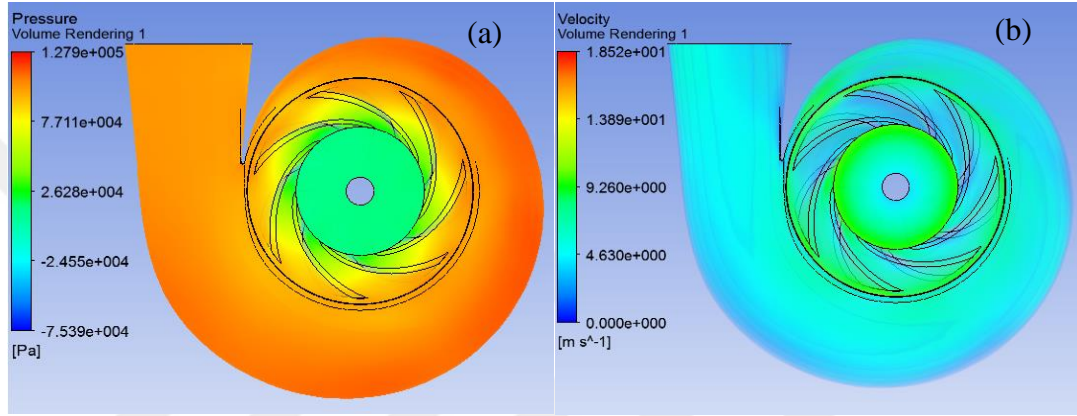
**Şekil 3. 28.** 2.Pompa için farklı kanat varyasyonlarına sahip çarklar (a) 6 kanatlı, (b) 7 kanatlı, (c) 8 kanatlı, (d) 9 kanatlı, (e) 10 kanatlı, (f) 11 kanatlı

2. pompa tasarımında ilk olarak 6 kanatlı ve  $25^{\circ}$  kanat çıkış açılı bir çark modellenmiştir ve bu pompa için basınç ve hız dağılımları Şekil 3.29'da gösterilmiştir. Bu çarkta okunan maksimum basınç 1.448 bar iken maksimum hız 17.7 m/s olarak tespit edilmiştir. Maksimum hızın çarkın çıkış kısmına doğru olduğu görülmektedir. Tasarımı yapılan 6 kanatlı  $25^{\circ}$  kanat çıkış açılı 2. pompa için okunan basma yüksekliği değeri 9.3514 m'dir.



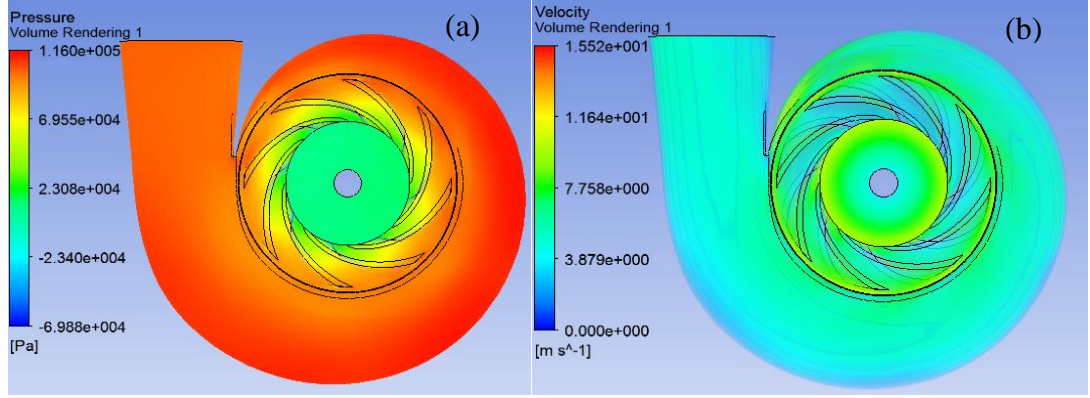
**Şekil 3. 29.** 2. pompa 6 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

Şekil 3.30'da 7 kanatlı ve  $25^0$  kanat çıkış açılı pompa için basınç ve hız dağılımı verilmiştir. Maksimum basınç değeri 1.279 bar iken maksimum hız değeri 18.52 m/s olarak elde edilmiştir. 6 kanatlı tasarıma göre 7 kanatlı tasarımda okunan basınç değerinde yaklaşık %13 düşüş gerçekleşirken, hız değerinde ise 4.6% lık bir artış gerçekleşmiştir. Pompa basma yüksekliği 9.42829 m olarak tespit edilerek, 6 kanatlı tasarıma göre yaklaşık %0.8 oranında bir artış gerçekleşmiştir.



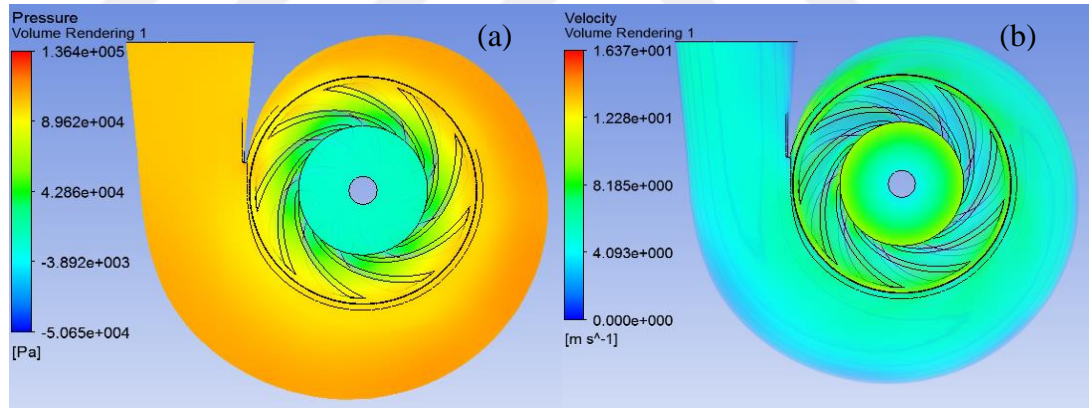
**Şekil 3. 30.** 2. pompa 7 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

8 kanatlı ve  $25^0$  kanat çıkış açılı santrifüj pompa için basınç ve hız dağılımları Şekil 3.31'de gösterilmiştir. Bu pompa için okunan maksimum basınç değeri 1.160 bar'dır ve salyangoz girişinden çıkışına doğru basınçtaki düşüş bir önceki tasarımlara göre daha belirgindir. Maksimum basınç 7 kanatlı tasarıma göre 10% daha düşük çıkmıştır. Elde edilen maksimum hız değeri çark kanat çıkış ucunda 15.52 m/s iken, basma yüksekliği değeri 9.49456 m olarak elde edilmiştir. Yani basma yüksekliğinde 7 katlı tasarıma göre %0.7 oranında bir artış tespit edilmiştir.



**Şekil 3. 31.** 2. pompa 8 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

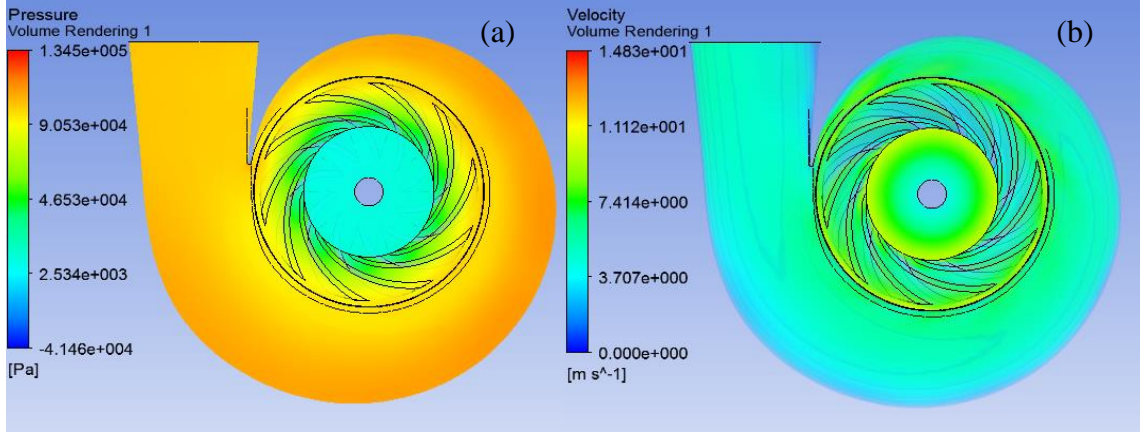
Şekil 3.32'de 9 kanatlı ve  $25^\circ$  kanat çıkış açılı 2.pompa için basınç ve hız dağılımı verilmiştir. 9 kanatlı pompada görünen maksimum basınç değeri 1.364 bar iken maksimum hız değeri 16.37 m/s dir. 8 kanatlı tasarıma göre, 9 kanatlı olarak tasarlanan santrifüj pompada okunan basınç değerinde %18 artış gerçekleşirken, hız değerinde ise %5.5 lik bir artış gerçekleşmiştir. Pompada okunan basma yüksekliği ise 8 kanatlı tasarıma göre yaklaşık %1.2 artarak 9.61298 m olarak elde edilmiştir.



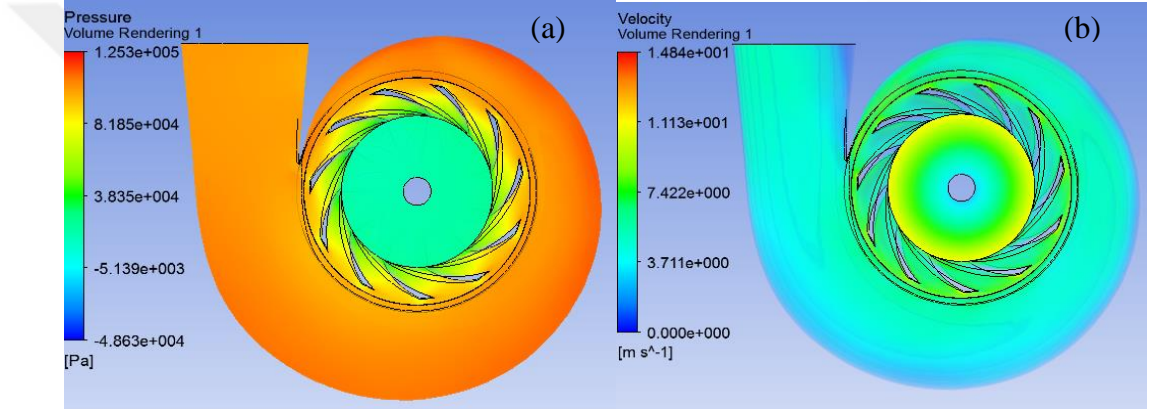
**Şekil 3. 32.** 2. pompa 9 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

$25^\circ$  kanat çıkış açılı, 10 ve 11 kanatlı olarak tasarlanan santrifüj pompa için basınç ve hız dağılımları sırasıyla Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'te verilmiştir. 10 kanatlı pompa için okunan maksimum basınç ve hız değerleri sırasıyla 1.345 bar ve 14.83 m/s iken, 11 kanatlı tasarımda bu değerler 1.253 bar ve 14.84 m/s olarak bulunmuştur. 10 kanatlı santrifüj pompadaki basma yüksekliği değeri 9.67056 m iken 11 kanatlı santrifüj pompada 9.40713 m olarak bulunmuştur.





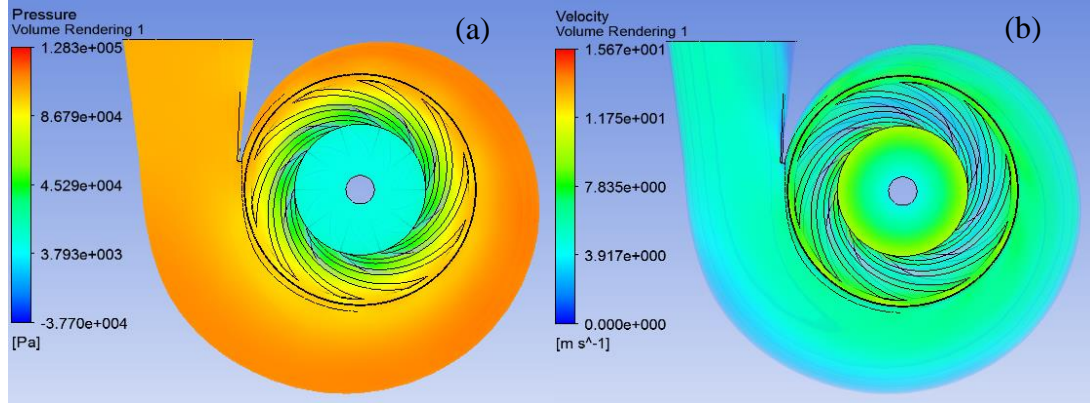
Şekil 3. 33. 2. pompa 10 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı



Şekil 3. 34. 2. pompa 11 kanatlı tasarım için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

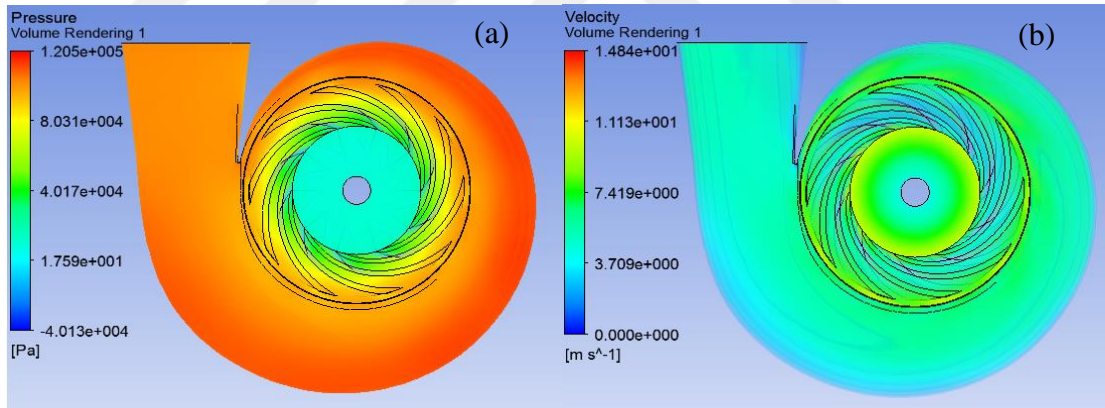
En yüksek basma yüksekliği değeri 10 kanatlı santrifüj pompa tasarımında elde edildiğinden bundan sonraki nümerik analizler 10 kanatlı tasarım gerçekleştirilmiştir. Santrifüj pompa kanat sayısının 10 olarak belirlenmesinin ardından kanat çıkış açısı üzerine optimizasyon çalışması ile devam edilmektedir.

Şekil 3.35'te 10 kanatlı  $17^0$  kanat çıkış açılı olarak tasarımı yapılan santrifüj pompa için basınç ve hız dağılımı verilmiş ve sonuç olarak maksimum basınç 1.283 bar ve maksimum hız 15.67 m/s olarak tespit edilmiştir. Akışkanın sahip olduğu statik basıncın santrifüj pompa çark girişinden çıkışına doğru artarken, salyangoz girişinden çıkışına doğru azaldığı görülmektedir. Santrifüj pompa basma yüksekliği 10 kanatlı  $17^0$  kanat çıkış açılı tasarım için 9.8317 m olarak bulunmuştur.



**Şekil 3. 35.** 2. pompa 17<sup>0</sup> kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

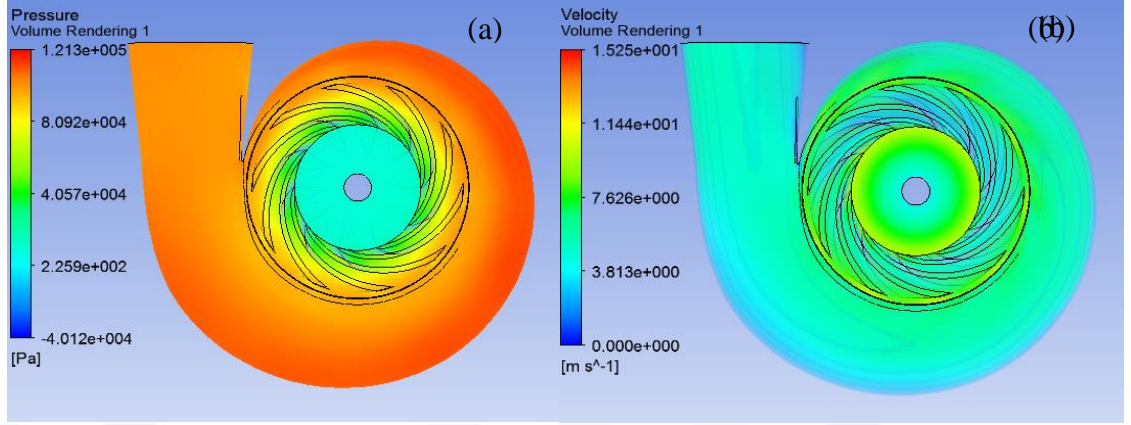
Şekil 3.36'da 10 kanatlı 19<sup>0</sup> kanat çıkış açılı olarak tasarlanan santrifüj pompa için basınç ve hız dağılımı gösterilmiştir. Bu pompada okunan maksimum basınç değeri 1.205 bar iken hız değeri 14.84 m/s' dir. 17<sup>0</sup> kanat çıkış açılı tasarım ile kıyaslandığında basınç ve hız değerinde sırasıyla %6.4 ve % 5.6 oranında düşüş gerçekleşmiştir. 2<sup>0</sup> kanat çıkış açısındaki artış santrifüj pompa basma yüksekliğini %0.05 arttırmıştır.



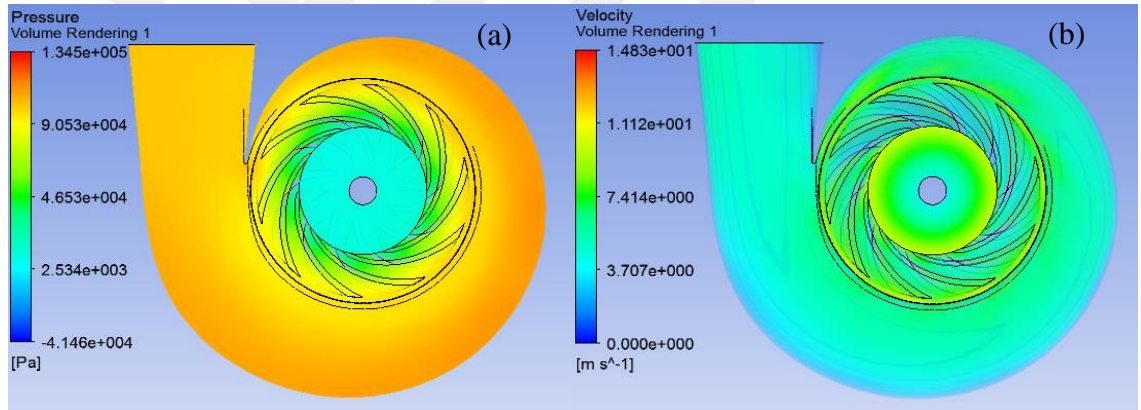
**Şekil 3. 36.** 2. pompa 19<sup>0</sup> kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

Şekil 3.37 ve Şekil 3.38'de 10 kanatlı, sırasıyla 20<sup>0</sup> ve 25<sup>0</sup> kanat çıkış açılı santrifüj pompa için basınç ve hız dağılımı olarak görselleştirilmiştir. 20<sup>0</sup> kanat çıkış açılı tasarımda maksimum basınç çark çıkışı ve salyangoz girişinde 1.213 bar olarak ve maksimum hız 15.25 m/s olarak elde edilmiştir. Bu radyal santrifüj pompanın basma yüksekliği ise 9.79685 m olarak belirlenmiştir. 25<sup>0</sup> kanat çıkış açılı pompada ise maksimum basınç değeri 1.345 bar iken hız değeri 14.83 m/s' dir. 20<sup>0</sup> kanat çıkış açılı tasarıma kıyasla 25<sup>0</sup> kanat çıkış açılı santrifüj pompadaki basınç değerinde %10.8 artış

varken, hız değerinde %2.8' lik bir düşüş olmuştur. Kanat çıkış açısı  $5^{\circ}$  arttığında santrifüj pompa basma yüksekliği 9.79685 m' den 9.67056 m' ye düşmüştür.

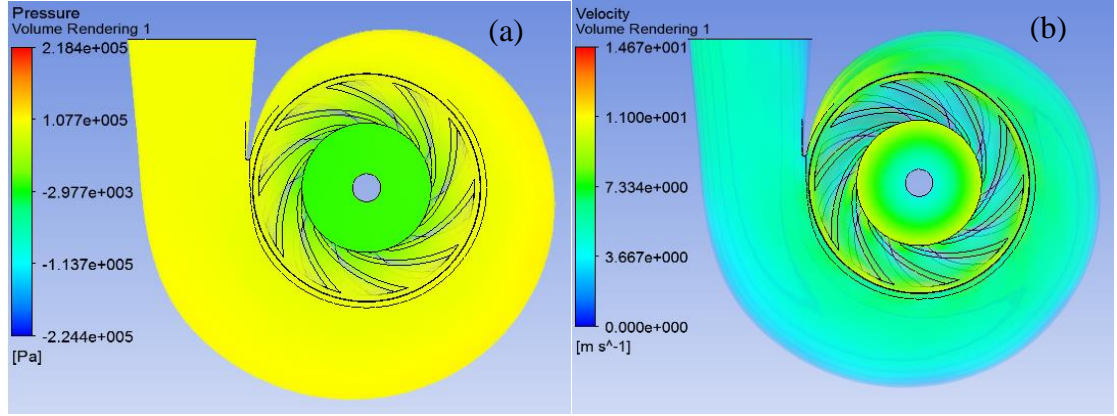


Şekil 3. 37. 2. pompa  $20^{\circ}$  kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı



Şekil 3. 38. 2. pompa  $25^{\circ}$  kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

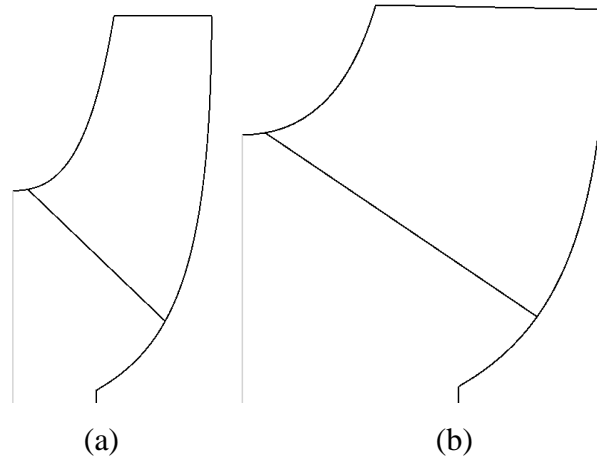
Şekil 3.39'da 10 kanatlı  $30^{\circ}$  kanat çıkış açısıyla dizayn edilen pompadan elde edilen basınç ve hız dağılımları gösterilmiştir. Maksimum basınç 2.184 bar, hız ise 14.67 m/s olarak belirlenmiştir. Santrifüj pompada okunan maksimum hızın çark çıkışı ve salyangoz dil bölgesinde olduğu görülmektedir. Bu pompanın basma yüksekliği değeri ise 9.64235 m olarak bulunmuştur.



**Şekil 3. 39.** 2. pompa 30<sup>0</sup> kanat çıkış açılı çark için (a) basınç dağılımı, (b) hız dağılımı

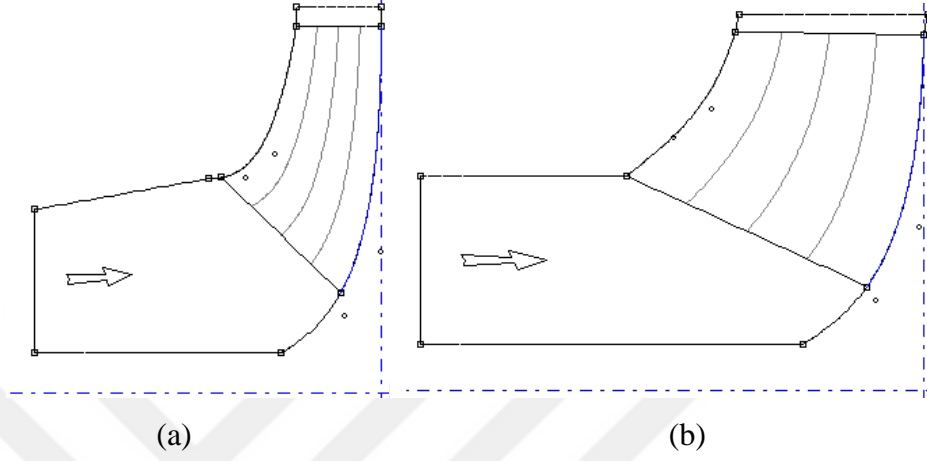
Santrifüj pompada daha iyi bir basma yüksekliği elde etmek için kanat sayısındakine benzer bir şekilde kanat çıkış açısında da bir optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Bu çalışmanın sonucunda en iyi pompa basma yüksekliği veren kanat çıkış açısı 10 kanatlı çark için 19<sup>0</sup> olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, bundan sonraki analizlerde ikinci santrifüj pompanın kanat çıkış açısı 19<sup>0</sup> ve kanat sayısı ise 10 olarak belirlenmiştir.

Pompa geometrisi üzerine yapılan optimizasyon çalışmasının tamamlanmasının ardından türbülans modeli, türbülans yoğunluğu mesh sayısının çözüme olan etkisi incelenmiştir. Şekil 3.40'da her iki pompa için Vista CPD ile tasarlanan çark şekilleri görülmektedir.

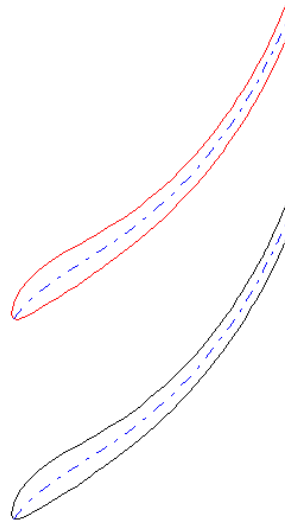


**Şekil 3. 40.** Özgül hıza bağlı olarak çark şekilleri (a)1. Pompa, (b) 2. Pompa

BladeGen’de elde edilmiş akışkanın çarka giriş ve çıkış kanalının meridyonel görünüşü Şekil 3.41’de verilirken, yine BladeGen’de elde edilen kanattan kanada görünüm Şekil 3.42’de verilmiştir.



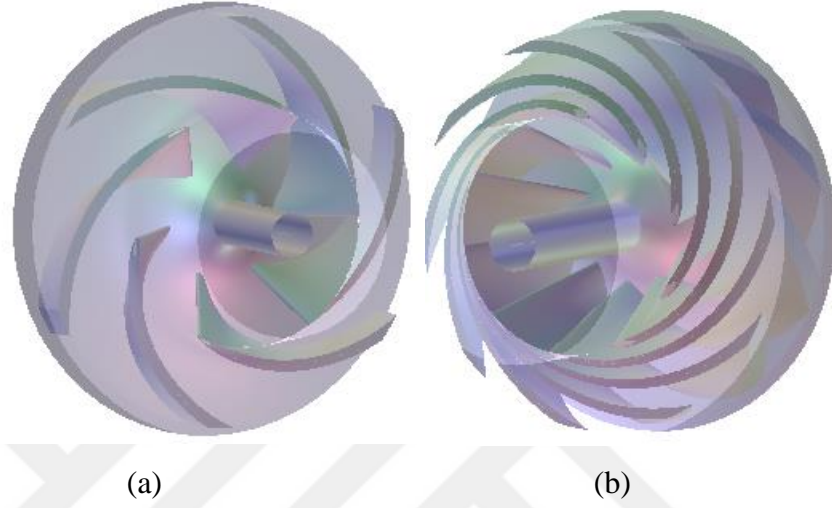
**Şekil 3. 41.** Akışkanın Çarka Giriş ve Çıkışı ve Kanadın Meridyonel Girişi (a) 1. Pompa, (b) 2. Pompa



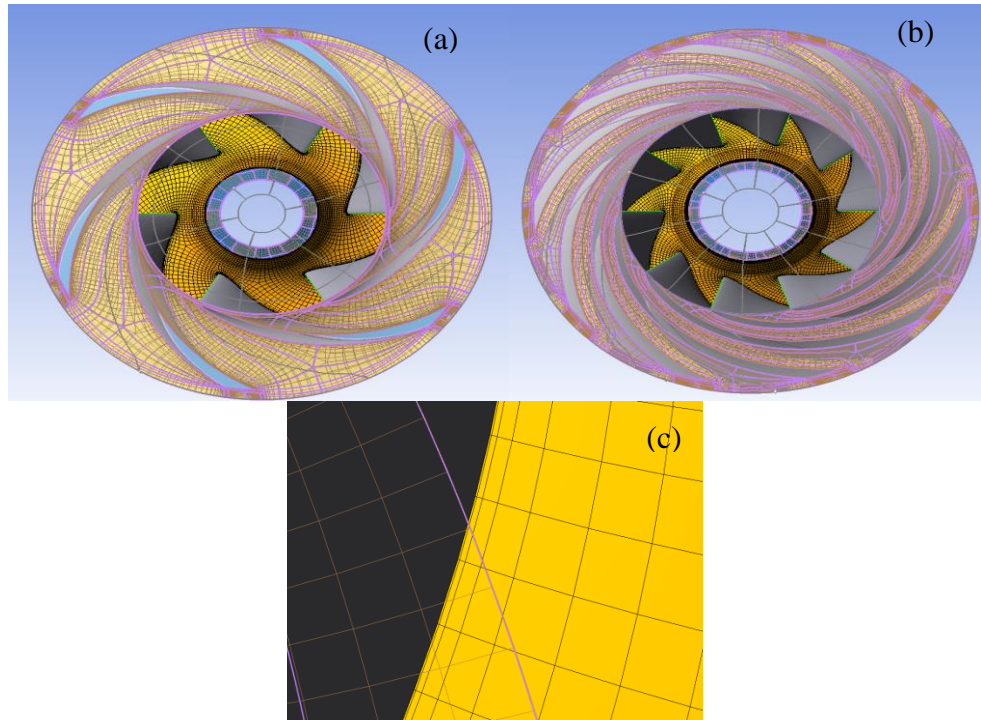
**Şekil 3. 42.** Kanattan Kanada Görünüm

Şekil 3.43’te 1. ve 2. pompa için çarkın 3 boyutlu görünümü verilmiştir. Modellenen kanatların mesh yapısı ANSYS TurboGrid kullanılarak elde edilirken, modelleyici de ATM ile optimize edilmiş topoloji ağ yöntemi seçilmiştir. ANSYS programındaki

ANSYS TurboGrid, turbo makine sistemi için çok iyi bir ağ özelliği sağlar ve yüksek kaliteli altı yüzlü kafesler oluşturur. Bu kafesler ANSYS iş akışında karmaşık çark kanat problemlerini çözmek için kullanılır. Şekil 3.44'te görüldüğü gibi, ATM topoloji metodu kullanılarak santrifüj pompanın çark kanadı için kaliteli ve sık ağlar elde edilmiştir.

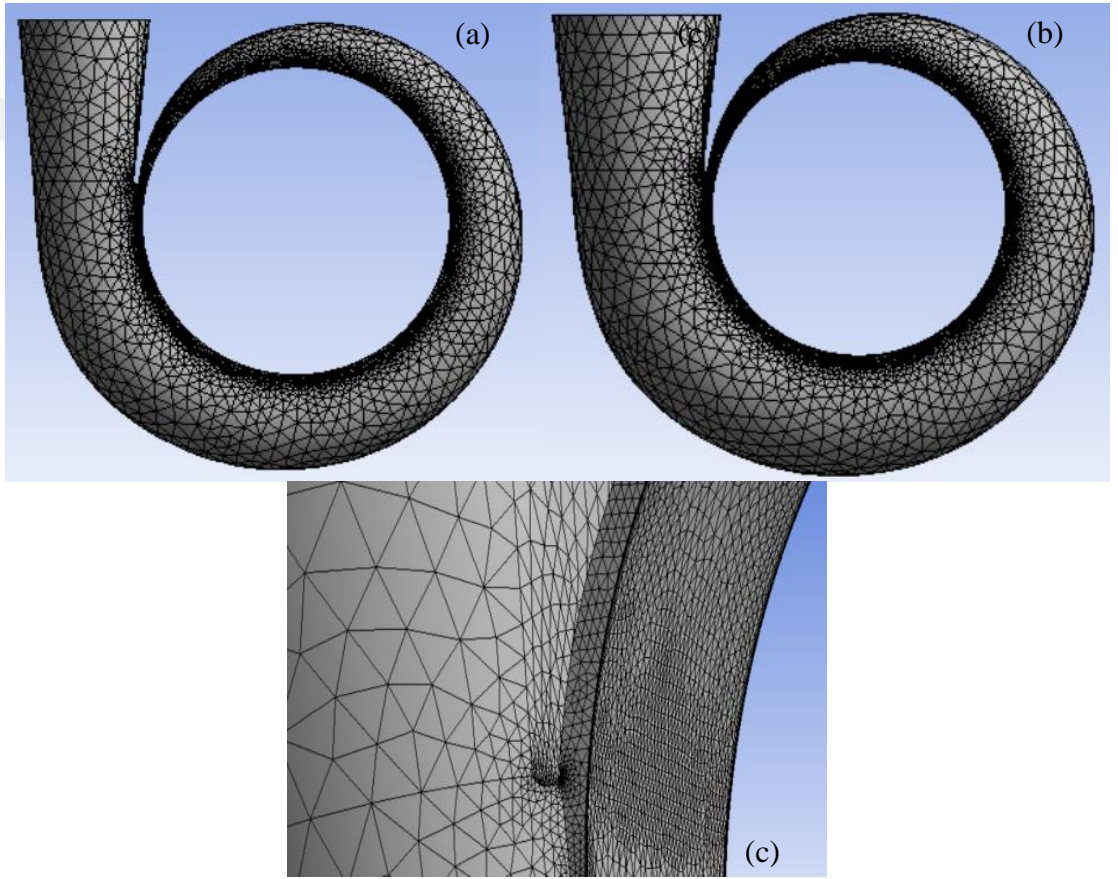


Şekil 3. 43. 3-B Çarkın Görünümü (a) 1. Pompa, (b) 2. Pompa



Şekil 3. 44. Santrifüj pompada çarkın yapılandırılmış turbo grid mesh yapısı (a) 1. Pompa, (b) 2. Pompa (c) kanat tarafında yoğunluk arttırılmış

Santrifüj pompa performansını en çok çark kanadı, salyangoz giriş ve dil bölgesi etkilemektedir. Bu nedenle, Şekil 3.45'te görüldüğü gibi, her iki pompada da salyangoz giriş ve dil bölgesinde sık bir mesh görünmektedir. Salyangoz mesh sayısında yapılan değişimler sonucu etkilememiştir. Blanco ve ark. (2000) tarafından yapılan çalışmalarda da salyangoz giriş ve dil bölgesine ve kanat çevresine yoğun mesh atmanın daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmadan ilham alan yazılımcılar santrifüj pompa için optimize edilmiş bir mesh modeli geliştirmişlerdir.



**Şekil 3. 45.** Santrifüj pompada salyangozun yapılandırılmamış mesh yapısı (a) 1. Pompa, (b) 2. Pompa (c) mesh yoğunluğu arttırılmış bölgeler

Çizelge 3.3'te ilk pompa için mesh istatistikleri verilmiştir. Nümerik analizler 4 farklı mesh modelinde gerçekleştirilmiştir ve bu meshlerin hepsinde ATM optimize edilerek TurboGrid mesh kullanılmıştır. Santrifüj pompa çarkında kullanılan mesh yapılandırılmış mesh iken salyangozda kullanılan mesh yapılandırılmamış meshtir. Çalışmadaki 4 mesh yapısının kullanımının santrifüj pompanın basma yüksekliğine

etkisi %1' den daha azdır. 1.pompada bundan sonraki analizlerde kullanılacak olan mesh modeli C mesh modelidir.

**Çizelge 3. 3.** 1.pompa için mesh istatistikleri

	A	B	C	D
Düğüm sayısı	2005269	876225	495705	230937
Element sayısı	1945688	907898	556898	327422
Tetrahedrons	105396	105396	105396	105396
Prisms	77960	77960	77960	77960
Hexahedrons	1762332	724542	373542	144066

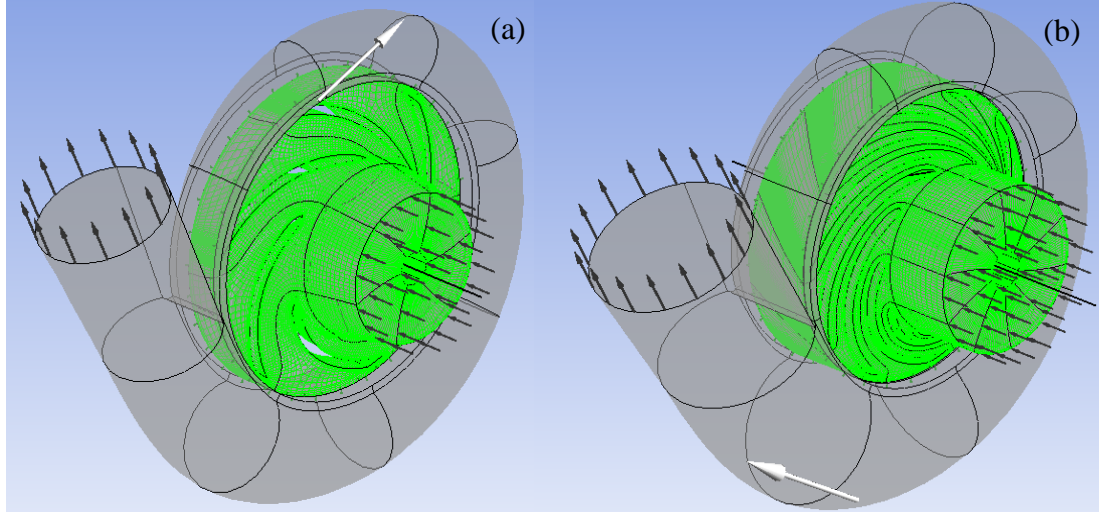
Çizelge 3.4'te görüldüğü gibi nümerik analizler 2. pompada da 4 farklı mesh modelinde gerçekleştirilmiştir. Salyangoz mesh sayısındaki değişimin nerdeyse çözümü hiç etkilemediği görülmüştür. Pompada kullanılan mesh modellerinin çözüme olan etkisinin ise en fazla %0.5 olduğu görülmüştür.

**Çizelge 3. 4.** 2.pompa için mesh istatistikleri

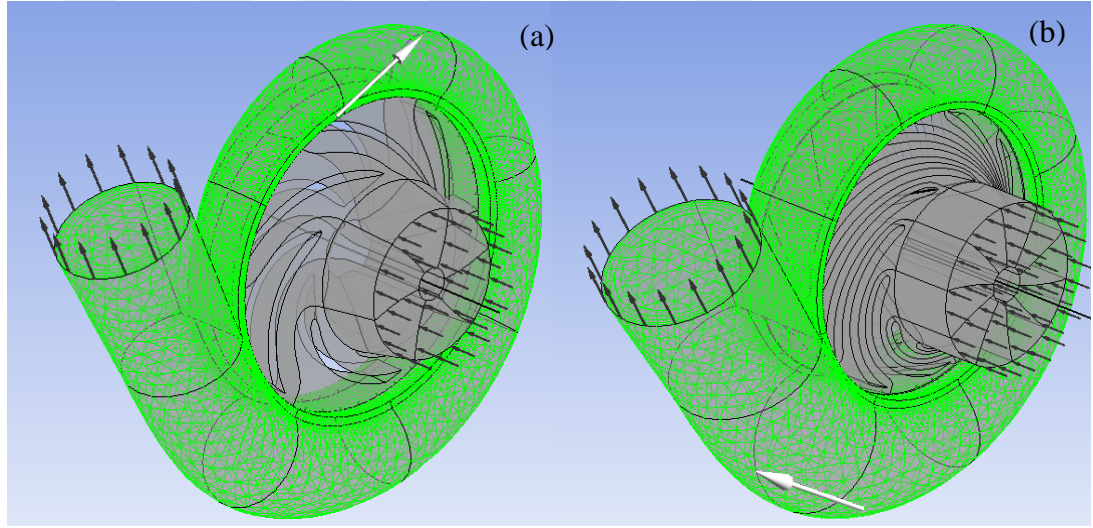
	A	B	C	D
Düğüm sayısı	3378256	970185	536633	412426
Element sayısı	3273887	1017614	611705	496657
Tetrahedrons	121857	121857	121857	121857
Prisms	82430	82430	82430	82430
Hexahedrons	631200	824670	418761	292370

Şekil 3.46 ve Şekil 3.47'de her iki pompa için sırasıyla çark ve salyangoz kısımları gösterilmiştir. Çark santrifüj pompanın [R1] bir rotor parçası olarak kabul edilirken, sabit kısım salyangoz [S1] olarak kabul edilir. İki parça için tasarım ANSYS BladeGen ile yapılmış ve parçalar arasında akışkanın hidrodinamik özelliklerini, özellikle de pompanın kanadının bulunduğu rotor kısmını geliştirmiş ve belirlemiştir.





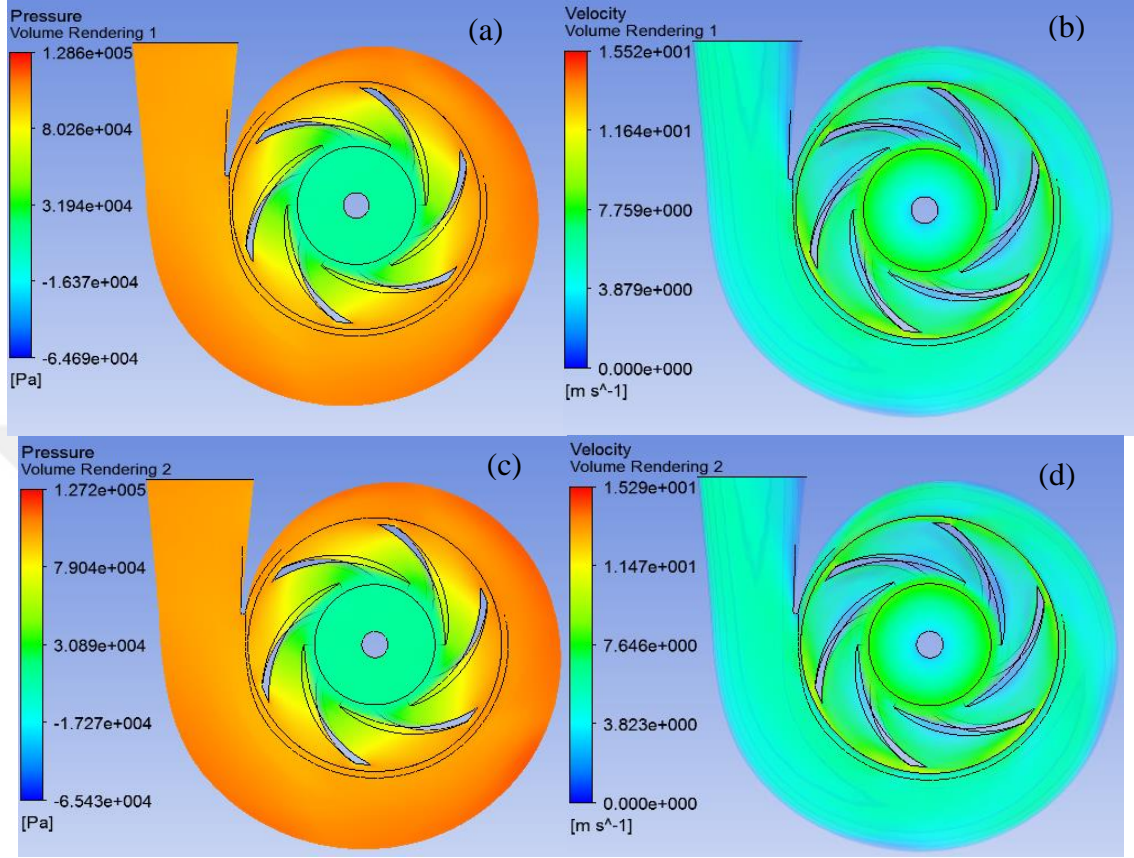
**Şekil 3. 46.** Salyangozun rotor kısmı olan çark[R1] yeşil renkli, (a) 1. Pompa için rotor kısmı (b) 2. Pompa için rotor kısmı



**Şekil 3. 47.** Salyangozun sabit kısmı olan salyangoz[S1] yeşil renkli, (a) 1. Pompa için salyangoz kısmı (b) 2. Pompa için salyangoz kısmı

k- $\epsilon$  ve SST türbülans modelleri santrifüj pompalarda en yaygın kullanılan türbülans modelleri olduğundan, analizler bu modeller kullanılarak su ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.48’de 1. pompa için k- $\epsilon$  ve SST türbülans modelleriyle yapılan nümerik analizlerin basınç ve hız dağılımları gösterilmiştir. 1. pompada türbülans modeli olarak k- $\epsilon$  kullanıldığında pompa basma yüksekliği 10.001 m çıkarken, SST kullanılırsa basma yüksekliği 9.97607 m çıkmıştır. Sonuç olarak, k- $\epsilon$  ile yapılan nümerik analizlerin

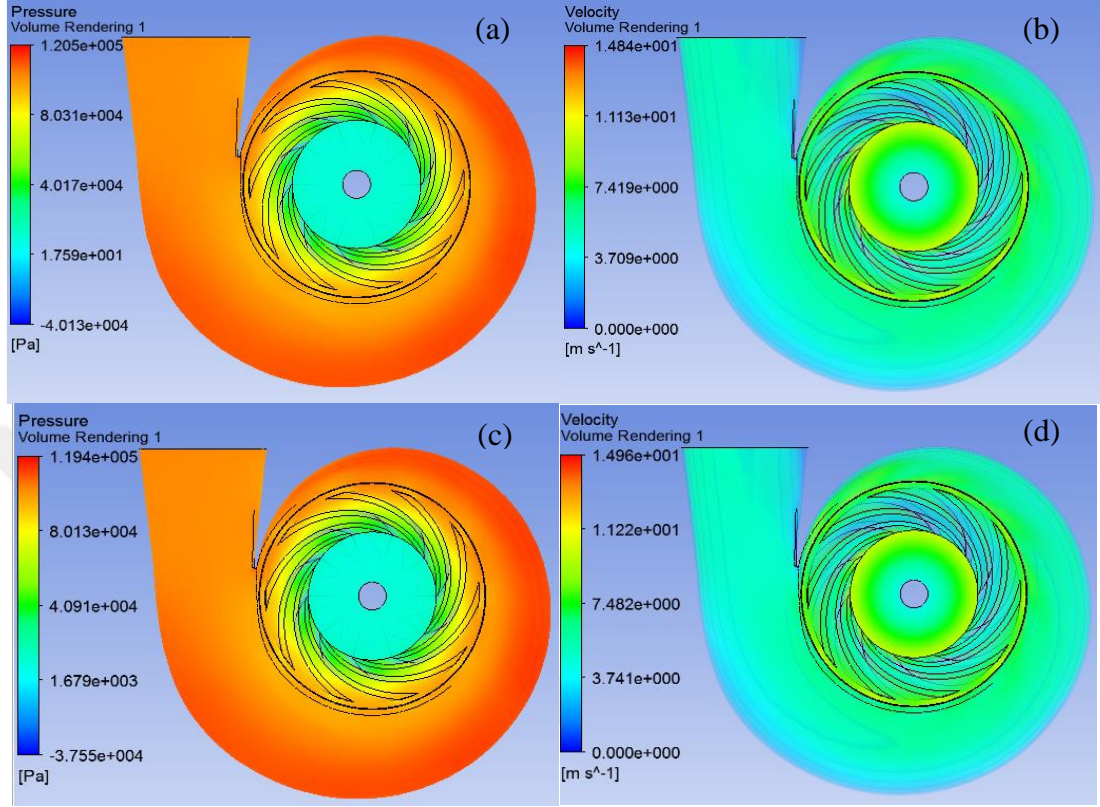
pompa basma yükseklikleri SST türbülans modeliyle elde edilen basma yüksekliğinden yaklaşık % 0.25 daha yüksektir.



**Şekil 3. 48.** 1.pompa için k-ε ve SST türbülans modellerinin kullanımı

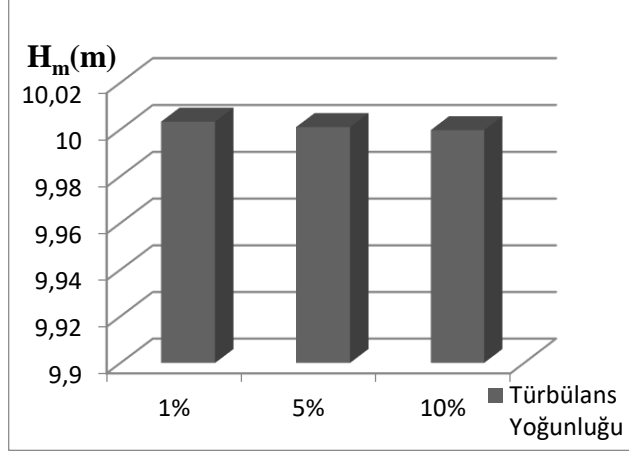
Şekil 3.49’ da 2. pompa için k-ε ve SST türbülans modelleri ile yapılan nümerik analizlerin sonucunda elde edilen basınç ve hız dağılımları verilmiştir. 1. pompadakine benzer olarak k-ε türbülans modeli kullanıldığında daha yüksek pompa basma yüksekliği elde edilmiştir. Pompa basma yüksekliği k-ε için 9.83739 m iken, SST için 9.7038 m, yani aradaki fark %1.33’ dür. 1. pompada iki türbülans modeli arasındaki fark ise %2.5’ tur. Bu çalışmada olduğu gibi literatürde de çeşitli türbülans modelleri daha doğru sonuç elde edebilmek için kıyaslanmıştır. Örneğin, Kaewnai ve ark. (2008) k-ε, RNG k- ε ve SST türbülans modellerini, Çellek ve Engin (2016) ise k- ε ve SST türbülans modellerini kullandıktan sonra çalışmalarına k- ε türbülans modeliyle devam etmişlerdir. Santrifüj pompa üzerine yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar k- ε türbülans modelinin oldukça doğru sonuçlar verdiğini kanıtladığından, bu model en yaygın kullanılan türbülans modelidir. Gonzales ve ark. (2002) ve Hussein ve ark.

(2013) tarafından yapılan çalışmalar, k- $\epsilon$  türbülans modeli kullananlara örnek olarak verilebilir.

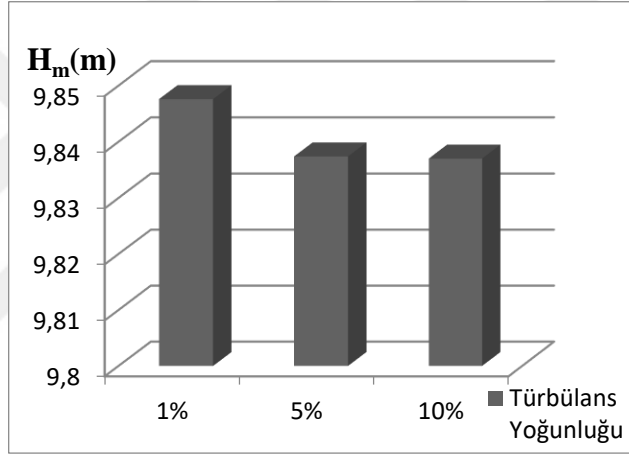


**Şekil 3. 49.** 2. pompa için k- $\epsilon$  ve SST türbülans modellerinin kullanımı

Her iki pompada da türbülans modeli olarak k- $\epsilon$  ve mesh modeli olarak C seçildikten sonra türbülans yoğunluğunun analizlere etkisi 1. pompa için Şekil 3.50 ve 2. pompa için Şekil 3.51’de gösterilmiştir. 1. pompa için türbülans yoğunlukları arasındaki fark sadece %0.04 iken, türbülans yoğunluğunun 2. pompadaki analizlere etkisi yaklaşık olarak %0.1’ dir. Her iki pompada da türbülans yoğunluğu %5 olarak belirlenmiştir. Aldi ve ark. (2017) tarafından yapılan deneysel ve nümerik çalışmalarda da türbülans yoğunluğu olarak % 5 seçilmiştir.



**Şekil 3. 50.** Türbülans yoğunluğunun 1. pompa için çözüme etkisi



**Şekil 3. 51.** Türbülans yoğunluğunun 2.pompa için çözüme etkisi

### 3.4.5. Cross ve Power-Law Model Karşılaştırması

Bu çalışmada, her iki pompa için dizayn parametrelerinde Cross ve Power-Law modellerinin kıyaslaması da yapılmıştır. Power-Law model için akışkan özellikleri Pinho ve Whitelaw (1990) tarafından verilen değerlerle Çizelge 3.5'te sunulmuştur.

**Çizelge 3. 5.** Power-Law parametreleri ve kayma hızı aralığı

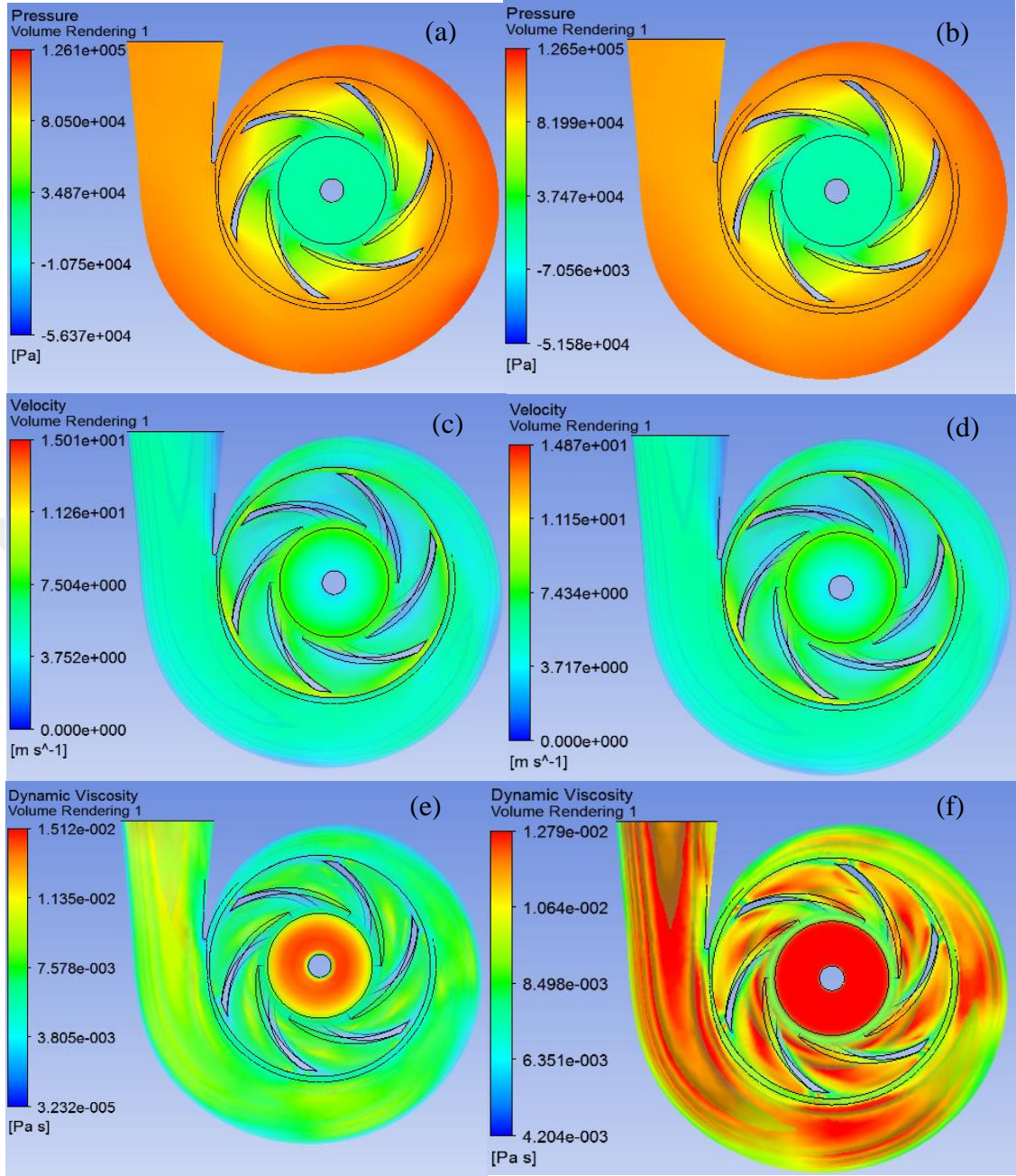
Çözelti	$K(\text{Pa.s})$	$n$	$\gamma$ , Kayma hızı( $\text{s}^{-1}$ )
CMC %0.4	0.447	0.56	115-12000
CMC %0.2	0.044	0.75	140-12000

Cross model için akışkan özellikleri Benchabane ve Bekkour (2008) tarafından yapılan çalışmadan alınmış ve bu değerler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

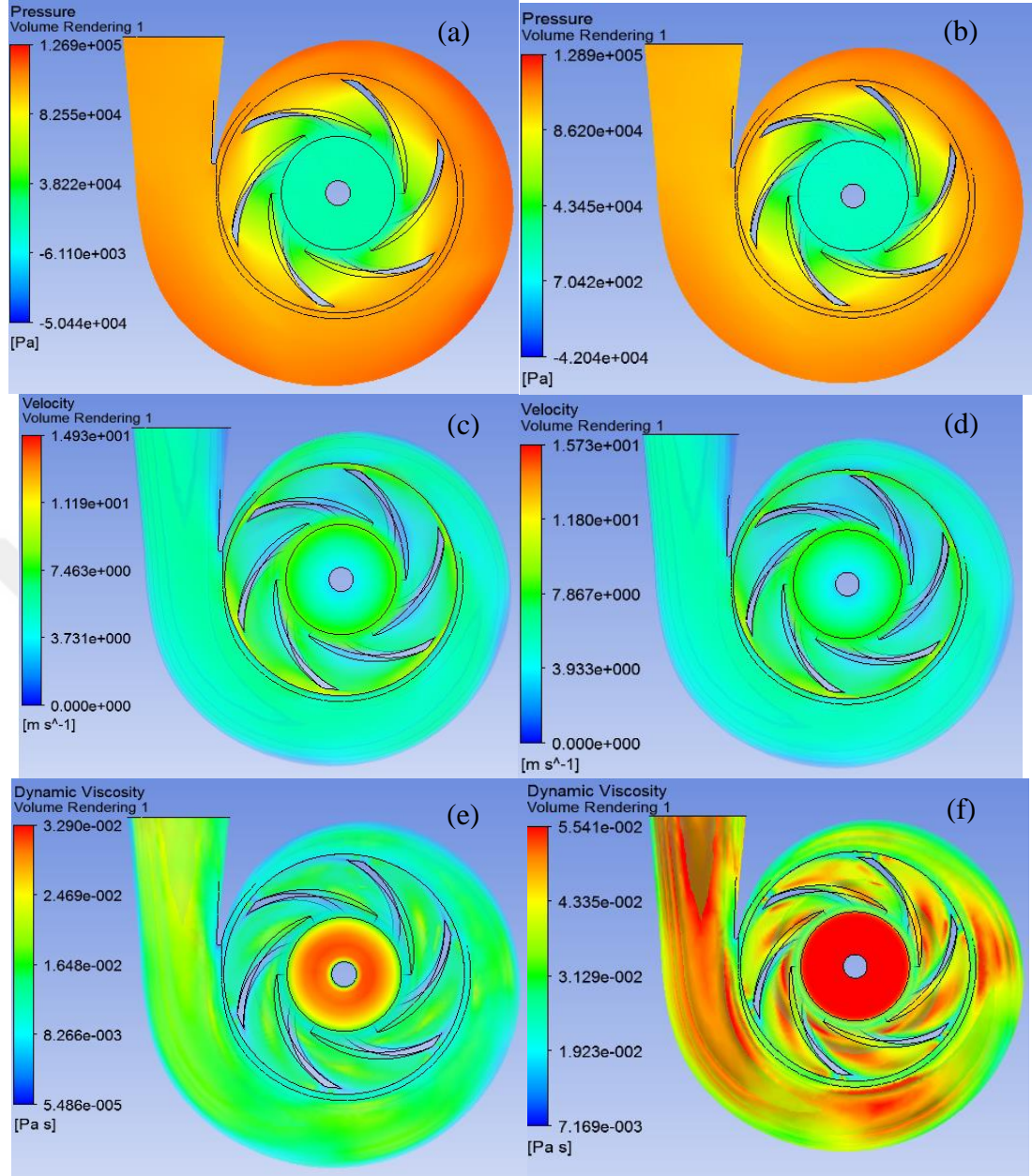
**Çizelge 3. 6.** CMC çözeltilerinin Cross model sabitleri

Çözelti	$n$	$\mu_0(\text{Pa.s})$	$\mu_\infty(\text{Pa.s})$
CMC %0.4	0.65	0.045	0.001
CMC %0.2	0.67	0.019	0.001

CMC %0.2 ve CMC %0.4 için 1. pompada dizayn parametrelerinde yapılan analiz sonuçları sırasıyla Şekil 3.52 ve Şekil 3.53'te verilmiştir. CMC %0.2 Cross model ile elde edilen maksimum basınç, maksimum hız ve maksimum viskozite değerleri sırasıyla 1.261 bar, 15.01 m/s ve 0.01512 Pa.s çıkarken, Power-Law modelde bu değerler sırasıyla 1.265 bar, 14.87 m/s ve 0.01279 Pa.s olarak çıkmıştır. CMC %0.4 Cross model ile maksimum basınç, maksimum hız ve maksimum viskozite değerleri ise 1.269 bar, 14.93 m/s ve 0.0329 Pa.s olarak elde edilirken, Power-Law modelde bu değerler sırasıyla 1.289 bar, 15.73 m/s ve 0,005541 Pa.s olarak elde edilmiştir. Santrifüj pompa basma yükseklikleri CMC %0.2 için Cross ve Power-Law model için sırasıyla 9.9648 ve 9.9093 m olarak bulunurken, CMC %0.4 için Cross ve Power-Law model için sırasıyla 9.9529 m ve 9.8574 m olarak bulunmuştur. CMC %0.2 de ile yapılan analizlerle elde edilen pompa basma yüksekliği CMC %0.4 ile yapılan analizlere göre Cross model ve Power-Law modelde sırasıyla %0.12 ve %0.47 daha yüksek çıkmıştır.



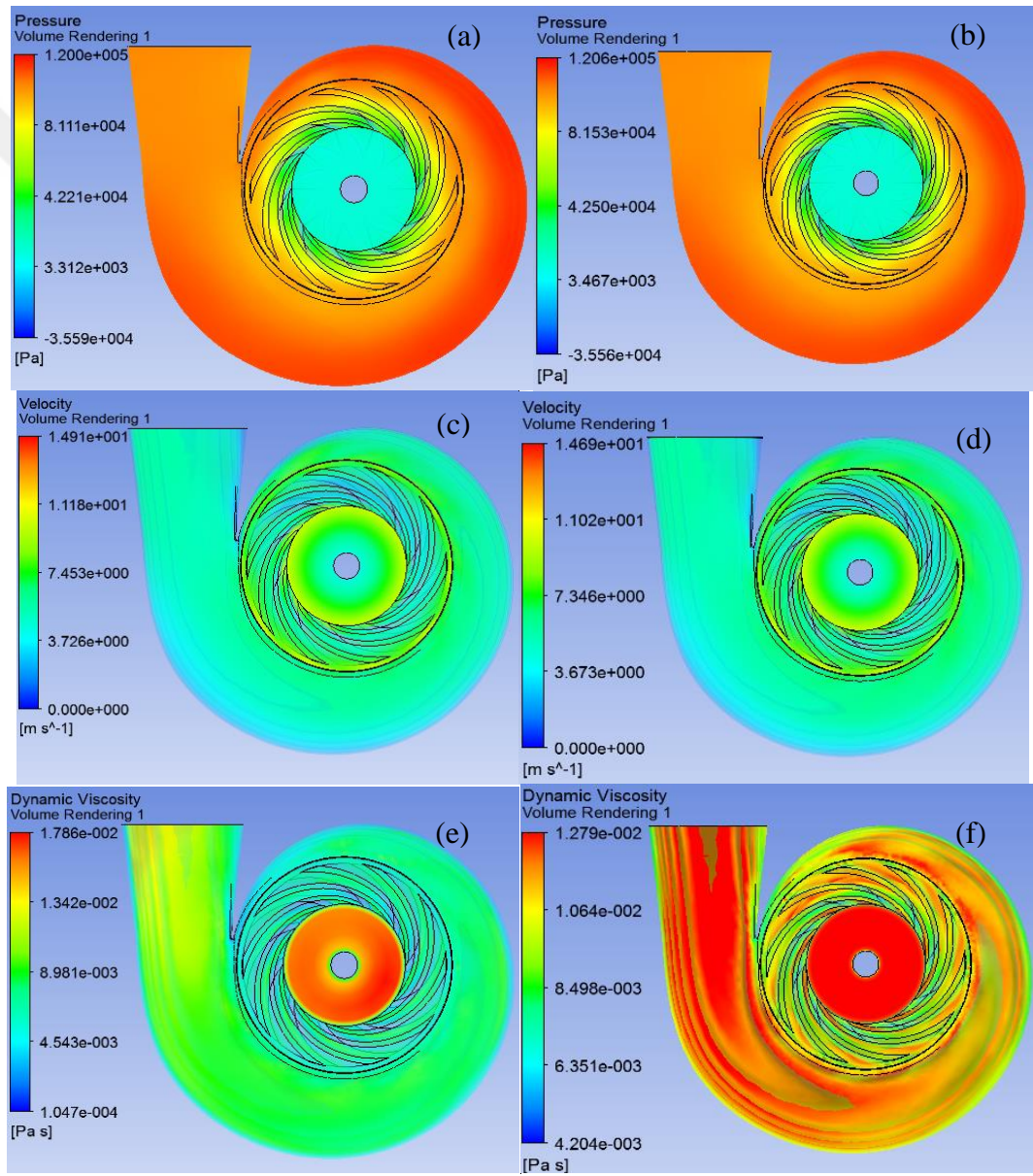
**Şekil 3. 52.** 1450 rpm, 25 kg/s şartlarında CMC %0.2 için 1.pompa da (a), (c), (e) Cross model için, (d), (e), (f) Power-Law model için basınç, hız ve viskozite dağılımları



**Şekil 3. 53.** 1450 rpm, 25 kg/s şartlarında CMC %0.4 için 1. pompa da (a), (c), (e) Cross model için, (d), (e), (f) Power-Law model için basınç, hız ve viskozite dağılımları

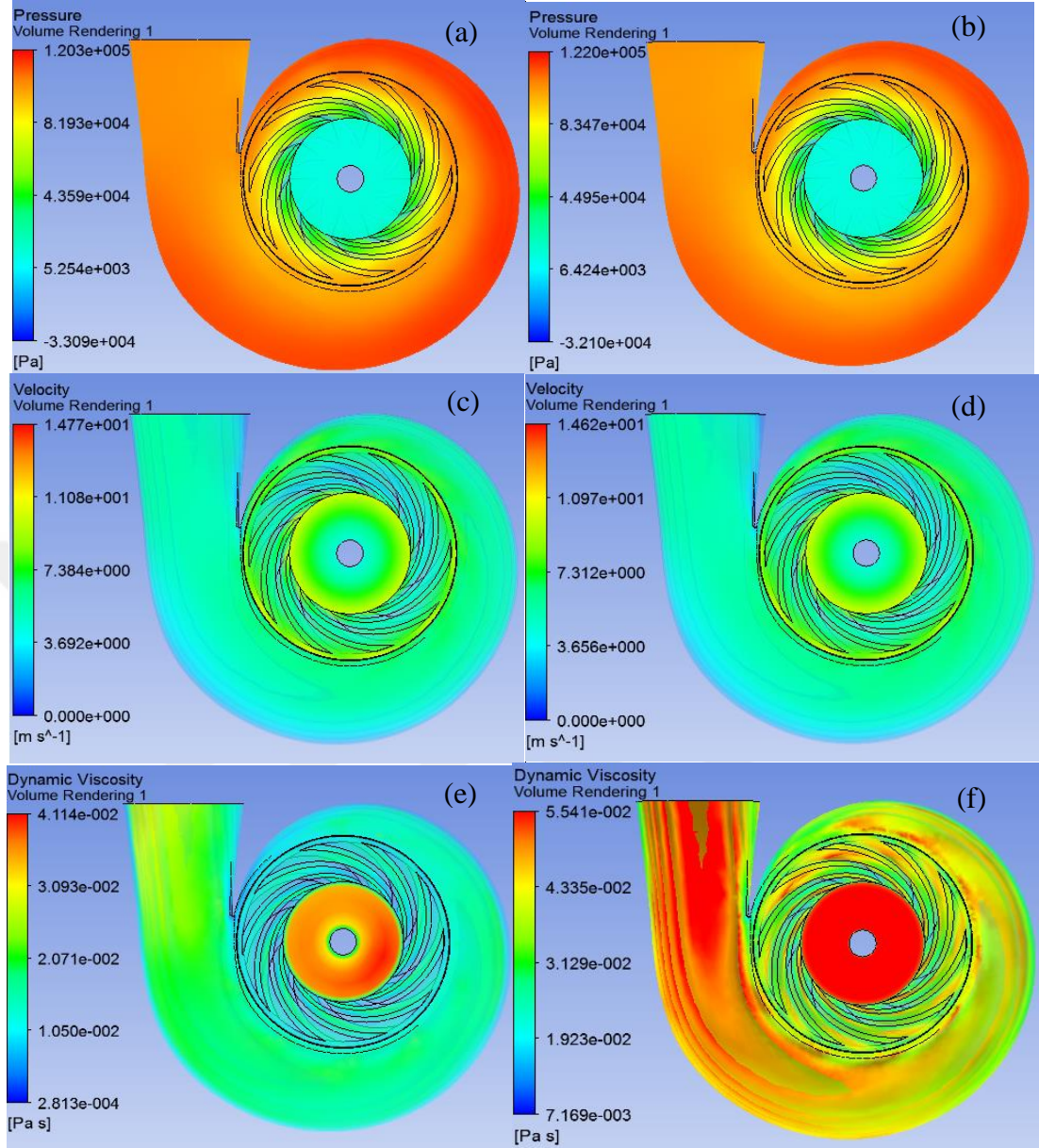
CMC %0.2 ve CMC %0.4 için 2.pompada 1450 rpm ve 45 kg/s de yapılan analiz sonuçları sırasıyla Şekil 3.54 ve Şekil 3.55'te verilmiştir. CMC %0.2 Cross model ile maksimum basınç, maksimum hız ve maksimum viskozite 1.2 bar, 14.91 m/s ve 0.001786 Pa.s çıkarken, Power-Law modelde bu değerler sırasıyla 1.206 bar, 14.69 m/s ve 0.001279 Pa.s çıkmıştır. CMC %0.4 Cross model ile maksimum basınç, maksimum hız ve maksimum viskozite değerleri 1.203 bar, 14,77 m/s ve 0.004114 Pa.s bulunurken,

Power-Law modelde bu değerler sırasıyla 1.22 bar, 14.62 m/s ve 0.005541 Pa.s bulunmuştur. CMC %0.2 için santrifüj pompa basma yükseklikleri Cross ve Power-Law modelde sırasıyla 9.9127 ve 9.8685 m olarak elde edilirken, CMC %0.4 için bu değerler sırasıyla 9.8774 ve 9.8413 m olarak elde edilmiştir. Bundan sonraki analizlere literatürde de daha iyi sonuçlar verdiği görülen Cross model ile devam edilmiştir. Örneğin, Mehrnia ve ark. (2011) çalışmalarında non-Newtonian akışkanları modelleyen 7 modeli (Cross, Power-Law vb.) deneysel olarak karşılaştırmışlar ve sonuç olarak Carreau ve Cross modelinin en iyi sonuçları verdiğini görmüşlerdir.



**Şekil 3. 54.** 1450 rpm, 45 kg/s şartlarında CMC %0.2 için 2.pompa da (a), (c), (e) Cross model için, (d), (e), (f) Power-Law model için basınç, hız ve viskozite dağılımları



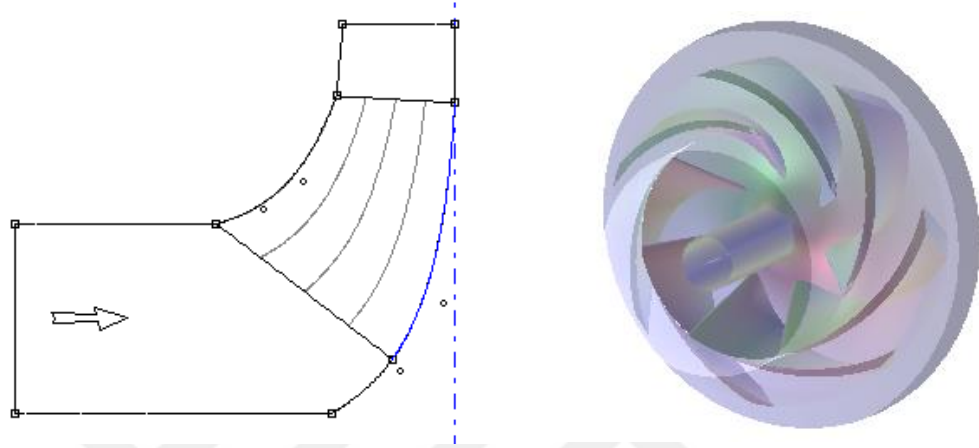


**Şekil 3. 55.** 1450 rpm, 45 kg/s şartlarında CMC %0.4 için 2.pompa da (a), (c), (e) Cross model için, (d), (e), (f) Power-Law model için basınç, hız ve viskozite dağılımları

### 3.4.6. Literatür Korelasyonu

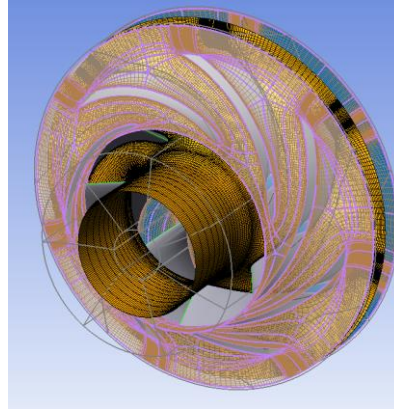
Radyal bir santrifüj pompanın nümerik analizleri Kaewnai ve ark. (2009) tarafından yapılmış ve elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Pompa dizaynını 20 m, 1450 rpm ve 528 m<sup>3</sup>/sa ana parametreleri ile birlikte çark çapı 300 mm, kanat sayısı 7 ve kanat çıkış açısı 24.5<sup>0</sup> olarak yapmışlardır. Analizler k-ε türbülans modeli ve %5 türbülans yoğunluğu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu bölüm de Kaewnai ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmadaki pompa dizayn parametrelerinin aynısı kullanılarak pompa tasarımı gerçekleştirilmiş ve aynı koşullarda nümerik analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.56'da kanadın bu çalışmada elde edilmiş meridyonel görünüşü ve 3 boyutlu çark verilmiştir.



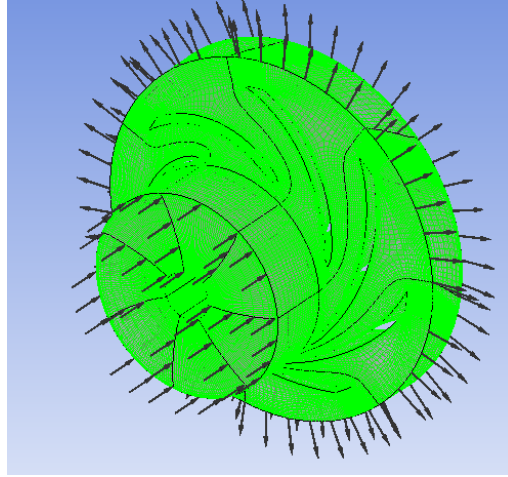
**Şekil 3. 56.** Kanadın Meridyonel Görünüşü ve 3B çark

Çalışmadaki mesh istatistikleri ise 966322 düğüm, 889966 hexahedrons elementlerden oluşmaktadır. Şekil 3.57'de çarkın yapılandırılmış mesh yapısı gösterilmiştir.



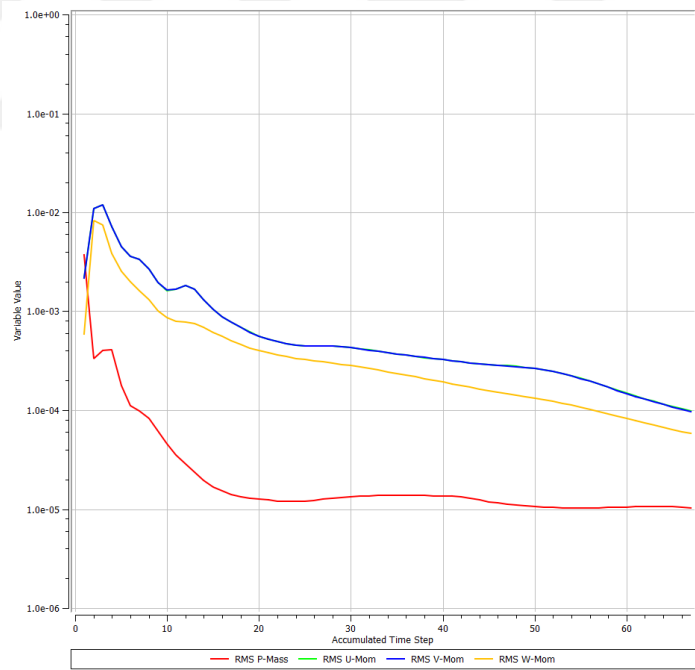
**Şekil 3. 57.** Çarkın yapılandırılmış mesh görünümü

Sınır koşulları olarak çark girişine total pressure çark çıkışına ise mass flow rate tanımlanmış ve Şekil 3.58'de sınır koşulları uygulanmış çark gösterilmiştir.



**Şekil 3. 58.** Sınır koşulları uygulanmış çark

Literatürde yapılan çalışmada yakınlıma kriterini  $1e-4$  olarak aldıklarından bu tez çalışmasında da yine  $1e-4$  alınarak literatür sağlaması gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.59'da denklemlerin çözümü gösterilmiştir.



**Şekil 3. 59.** Denklemlerin çözümü

Kaewnai ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmada elde edilen basma yüksekliği değerleri  $k- \epsilon$ , SST ve RNG  $k- \epsilon$  türbülans modelleri için sırasıyla 19.80, 19.75 ve 19.85 m olarak bulunmuştur. Aynı pompa dizayn parametreleri kullanılarak bu çalışmada

yapılan analizlerden elde edilen santrifüj pompanın basma yüksekliği ise 19.8542 m' dir. Bu tezde elde edilen basma yüksekliği değeriyle Kaewnai ve ark. (2008) yaptıkları çalışmalarında k-ε, SST ve RNG k-ε türbülans modelleriyle elde ettikleri değerler arasındaki fark sırasıyla %0.27, %0.52 ve %0.02 dir. Sonuç olarak, yapılan bu çalışmada elde edilen değerler ile Kaewnai ve ark. (2008)' nin elde ettikleri değerler oldukça yakındır ve bu fark bu çalışmada daha yüksek mesh sayısı kullanılması ile açıklanabilir.

Sınır koşulları olarak hesaplamalı alanın girişinde kütleli debi (mass flow rate) ve çıkışta ise toplam basınç (total pressure) tanımlanmıştır. Ayrıca, duvarlara (kanat ve kaplamalara) kaymama koşulu uygulanmıştır. Çizelge 3.7'de analizlerde uygulanan şartlar toplu olarak gösterilmiştir.

**Çizelge 3. 7.** Nümerik analizlerin gerçekleştirildikleri genel şartlar

Nümerik analiz şartları	Çark ve Salyangoz
Mesh	Çark yapılandırılmış, Salyangoz yapılandırılmamış
Akışkan	Su, CMC normal koşullarda
Giriş	Mass flow=Q(kg/s)
Çıkış	Total pressure 1 atm
Türbülans modeli	k-ε

Literatürde nümerik olarak optimizasyon çalışması yapıp daha sonra prototipi üretilip piyasada ki pompayla analizleri deneysel olarak karşılaştırılan çalışmalar mevcuttur. Örneğin, Hancıoğlu ve Ataş (2004) optimum kanat sayısını ve kanat profilini elde ettikten sonra optimizasyonu yapılan pompanın prototipiyle piyasadaki pompayı deneysel olarak kıyaslamışlardır. Bu kıyaslanmanın sonucunda optimize edilmiş pompanın %3 civarında daha iyi performans verdiğini görmüşlerdir. Piyasada bulunan bir çamur pompasının optimizasyonu da Çellek ve Engin (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon kanatçık eklenmesi ve kanat çıkış açısının değişimiyle kanat tasarımı yapılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, kanat ve salyangoz optimizasyonu ile santrifüj pompanın hidrolik verimi ilk durumdaki pompaya göre %9 arttırılmıştır.

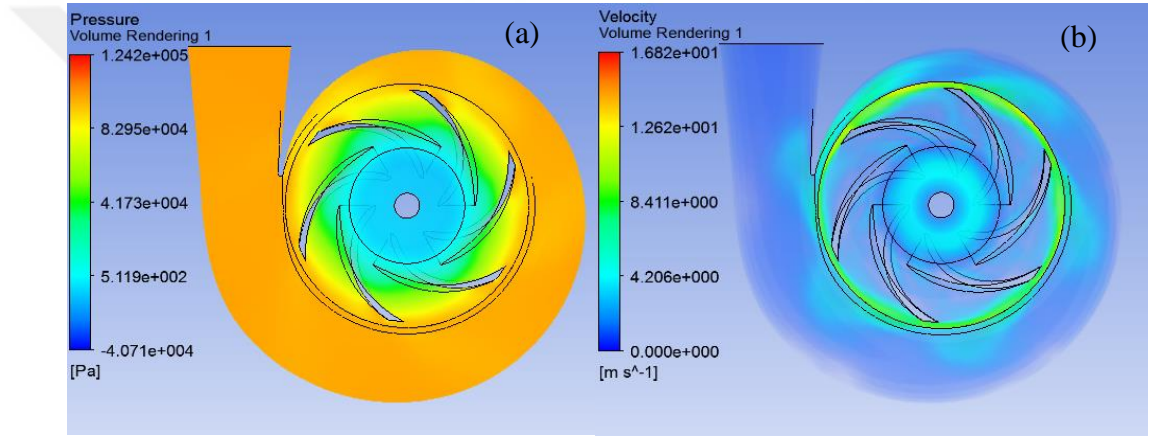
Bu çalışmada tasarımı yapılan iki santrifüj pompa üzerine optimizasyon çalışması nümerik olarak yapılmıştır. 1. pompa optimizasyon sonucunda 6 kanatlı ve 25<sup>0</sup> çıkış

açılı olarak tasarlanırken 2. pompa 10 kanatlı ve  $19^0$  kanat çıkış açılı olarak tasarlanmıştır. Nümerik analizler için k- $\epsilon$  ve SST türbülans modellerinin sonuca etkisi incelenmiştir. Ayrıca sonuç mesh yapısından ve sayısından bağımsız hale getirilmiştir. Son olarak Newtonian olmayan akışkan modellerinden olan Cross ve Power-Law model kıyaslaması yapılmıştır. Literatürdeki deneysel çalışmalara dayanılarak bu çalışmada analiz aşamasına k- $\epsilon$  türbülans modeliyle devam edilirken, non-Newtonian akışkan modeli olarak yine deneysel çalışmalara dayanılarak Cross model ile devam edilmiştir.

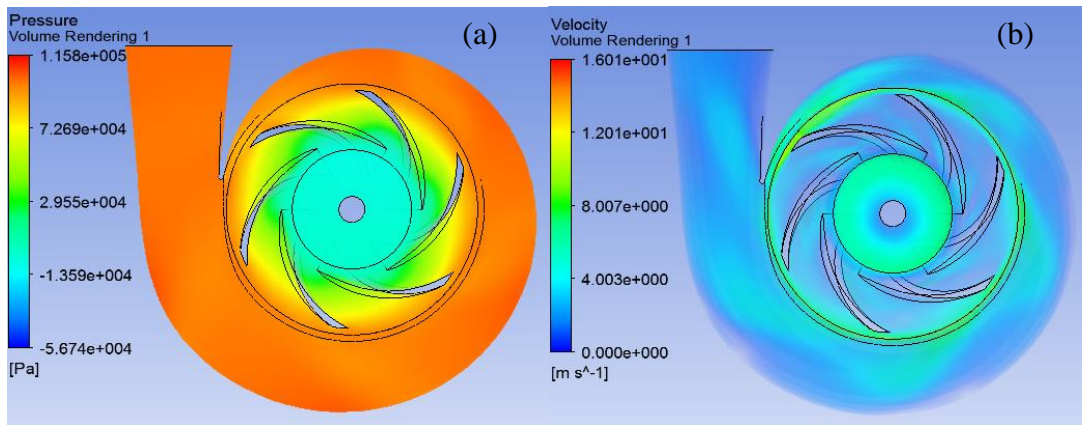


#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

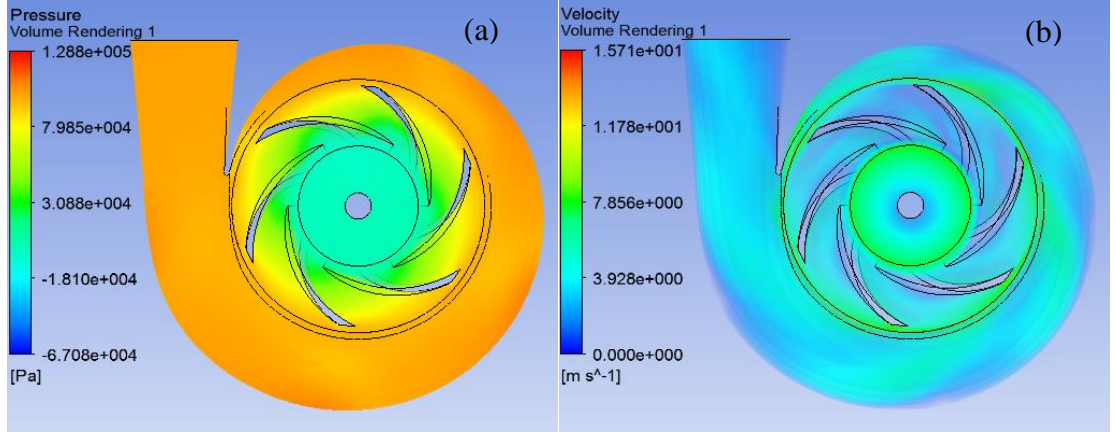
Newtonian olmayan akışkanların birbirinden farklı düşük özgül hızlı 2 santrifüj pompa performansı üzerine etkisi farklı rotor hızı ve debi değerlerinde nümerik olarak incelenmiştir. Analizler her iki pompa için 1450, 1000, 500 rpm rotor hızlarında gerçekleştirilmiştir. 1. pompada 1450 ve 1000 rpm rotor hızlarında 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 kg/s ve 500 rpm rotor hızında ise 3, 6, 9, 12 ve 15 kg/s debi değerlerinde gerçekleştirilmiştir. 2. pompa debi değerleri 1450 ve 1000 rpm rotor hızlarında 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s alınırken 500 rpm rotor hızında 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21 kg/s olarak alınmıştır.



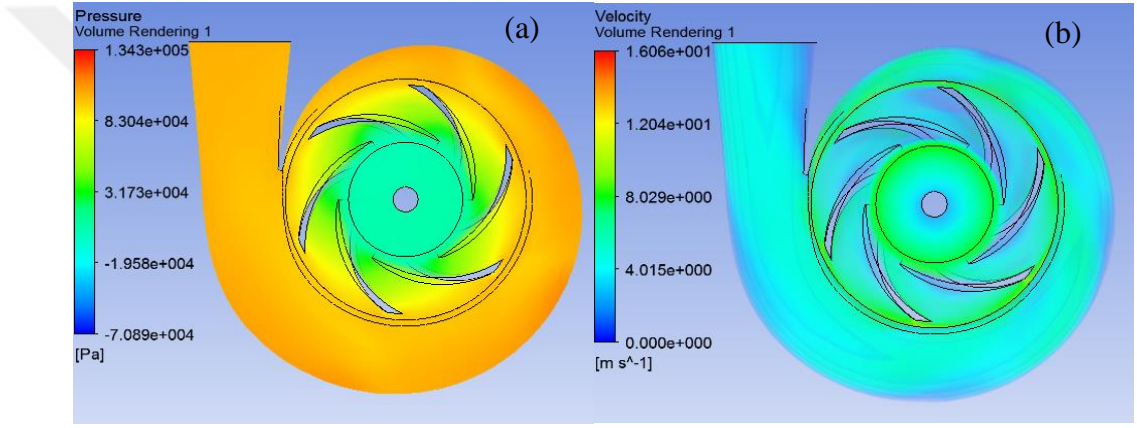
Şekil 4. 1. 1. pompa, 1450 rpm ve 5 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



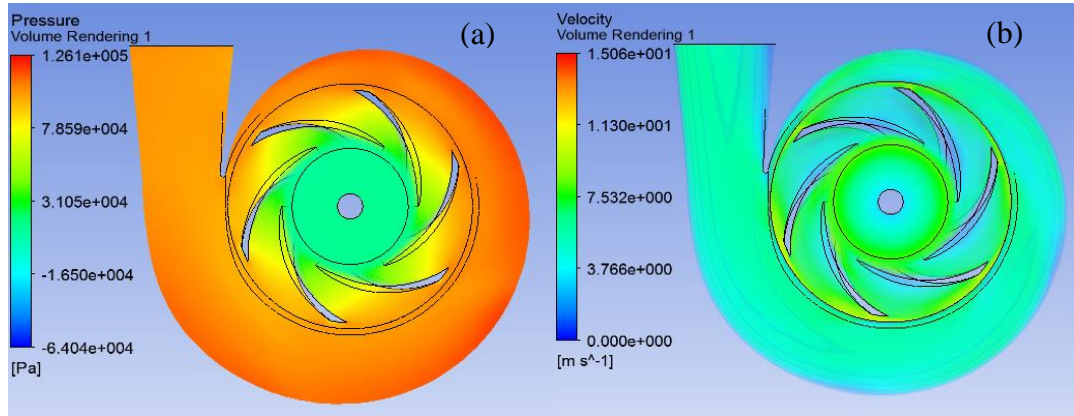
Şekil 4. 2. 1. pompa, 1450 rpm ve 10 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



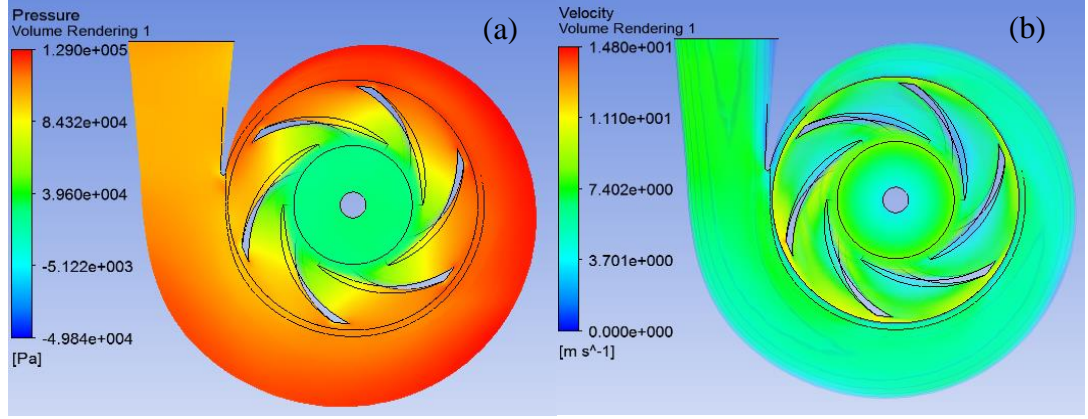
Şekil 4. 3. 1. pompa, 1450 rpm ve 15 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



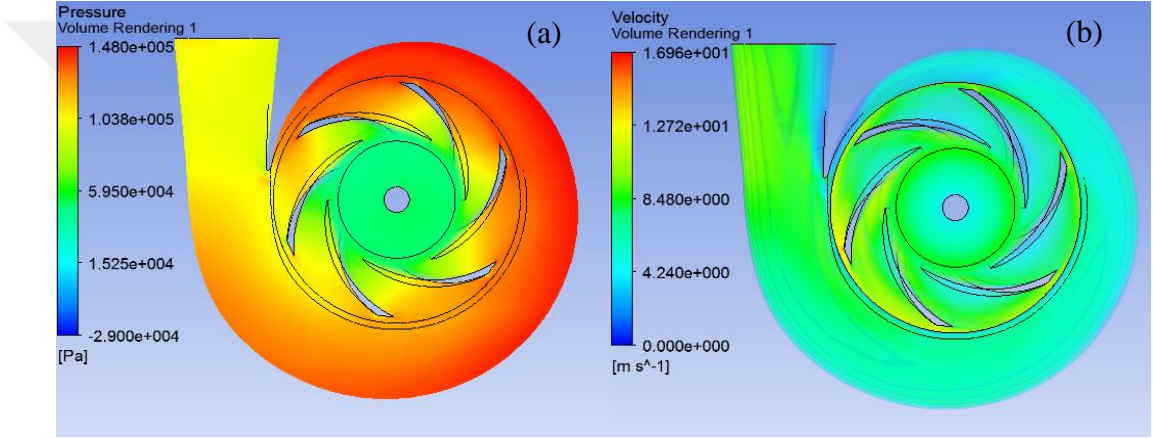
Şekil 4. 4. 1. pompa, 1450 rpm ve 20 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



Şekil 4. 5. 1. pompa, 1450 rpm ve 25 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



Şekil 4. 6. 1. pompa, 1450 rpm ve 30 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

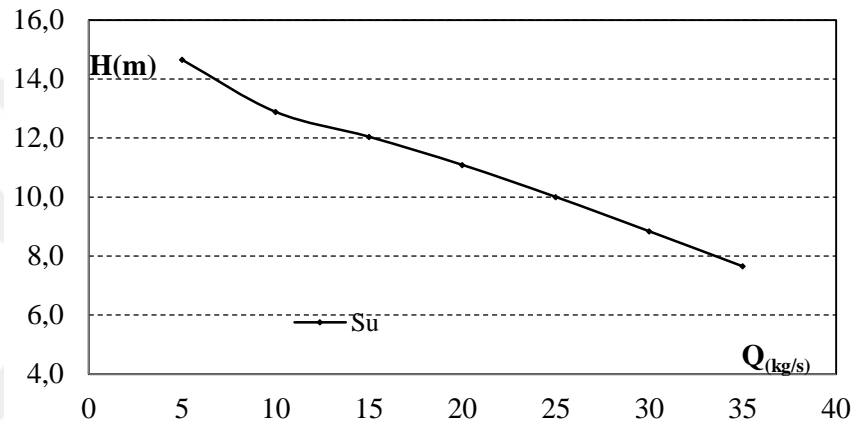


Şekil 4. 7. 1. pompa, 1450 rpm ve 35 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

Santrifüj pompadaki basınç ve hız dağılımını incelemek için çark kanadının basınç ve hız grafikleri çözücü sonrası ANSYS-CFX’te üretilmiştir. Şekil 4.1-4.7’ de 1. pompada 1450 rpm için sırasıyla 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s debi değerlerinde su ile yapılan analizlerde elde edilen basınç ve hız dağılımları verilmiştir. 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s debi değerleri için maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.242, 1.158, 1.288, 1.343, 1.261, 1.290 ve 1.48 bar olarak elde edilirken, maksimum hız değerleri 16.82, 16.01, 15.71, 16.06, 15.06, 14.8 ve 16.96 m/s olarak tespit edilmiştir. Basınç çarkın girişinden çıkışına doğru sürekli artarken, salyangoz girişinden çıkışına doğru sürekli azalmıştır. Düşüşteki bu oran ise debiyle beraber artmıştır. Hız dağılımı incelendiğinde ise hızın çark girişinden çıkışına doğru monoton olarak ve çark kanadının çıkış ucunda ise ani olarak arttığı gözlemlenmiştir. Hız dağılımı debi değişimiyle incelendiği zaman büyük debilerde salyangoz dil ve boğaz bölgesine yakın kısımda hız değerinde daha büyük

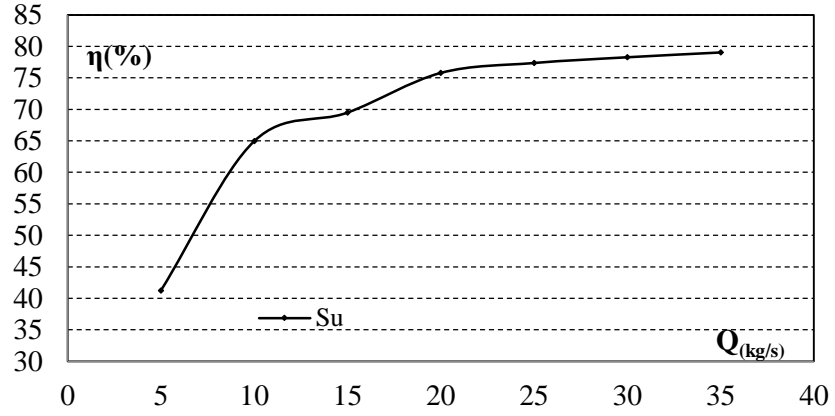


artış gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu basınç ve hız dağılımı çarkın rotodinamik hareketinden dolayı gerçekleşmiştir. Yine literatür incelendiği zaman Chakraborty ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada da statik basıncın çark girişinden çıkışına doğru arttığı ifade edilmiştir. Kaewnai ve ark. (2013) da çark çıkışında ve salyangoz dili bölgesinde basınç dağılımının yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Hız dağılımı çarkın rotodinamik hareketinden dolayı çarkın girişinden çıkışına doğru artmaktadır özellikle çark çıkış ucunda ani bir artış gözlemlenmiştir. Yani kanadın emme tarafındaki hız kanadın deşarj tarafındaki hızdan daha düşüktür.



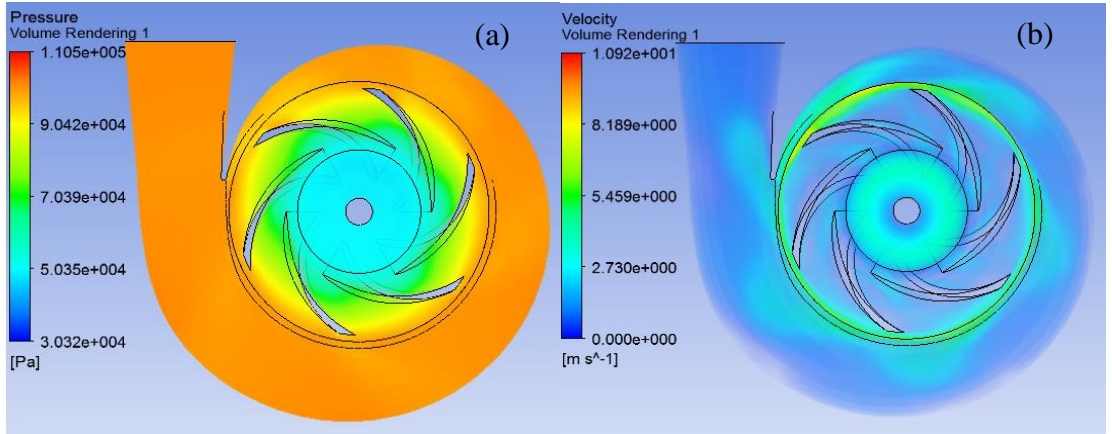
**Şekil 4. 8.** 1. pompa, 1450 rpm’de su için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.8’de 1450 rpm de çalışan 1. pompa için 7 farklı debi değerinde su ile yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği değerleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere debi artışıyla birlikte basma yüksekliği düşmüştür. Pompa basma yüksekliği değerleri 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s için sırasıyla 14.6496, 12.886, 12.0423, 11.0869, 10.001, 8.8371 ve 7,6493 m olarak elde edilmiştir. 1.pompa için dizayn parametreleri olan 90 m<sup>3</sup>/sa ve 1450 rpm de nümerik analizlerden elde edilen su için basma yüksekliği değeri 10.001 m iken, 15 kg/s de elde edilen basma yüksekliği değeri 12.886 m çıkmıştır.

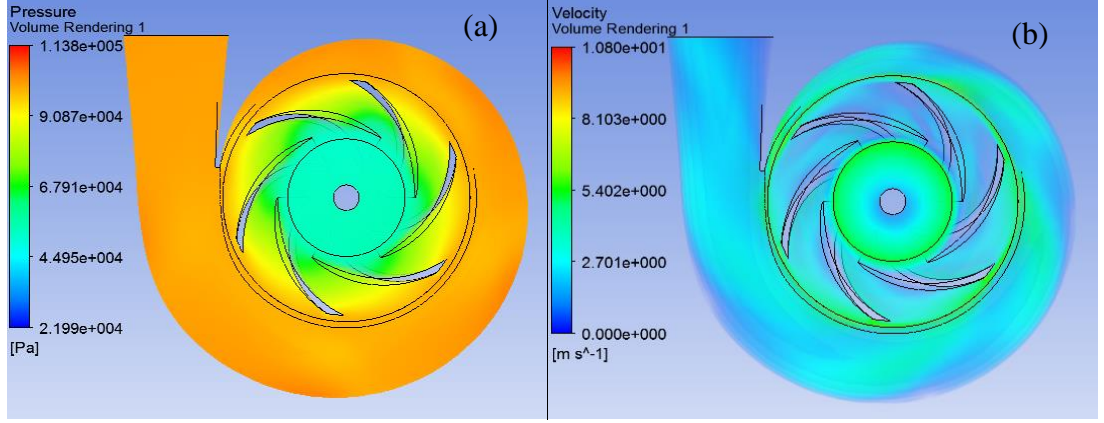


**Şekil 4. 9.** 1. pompa, 1450 rpm’de su için verim değerleri

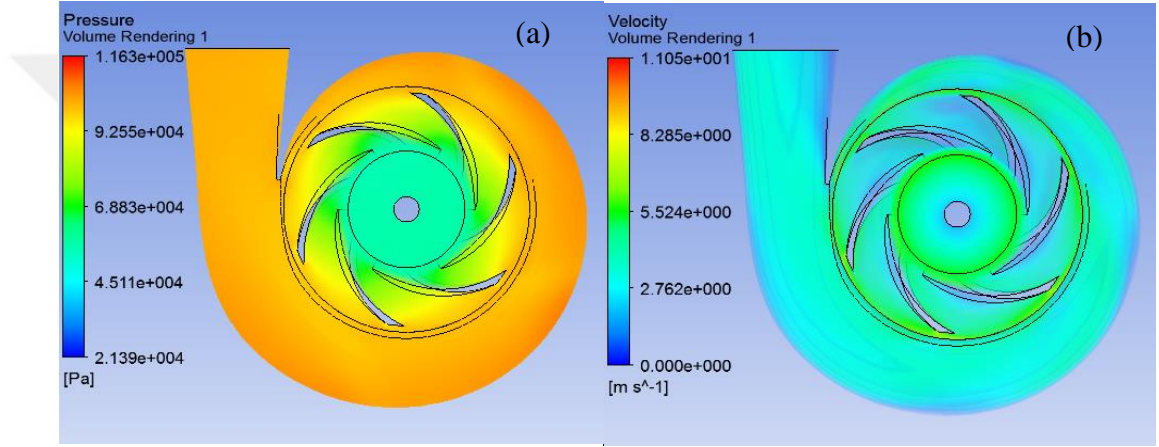
Şekil 4.9’da 1450 rpm ve 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s de 1. pompa verim değerleri verilmiştir. Pompa verim değeri en küçük debide 0% dan başlamış, dizayn noktasına yakın yerlerde maksimum değerine ulaşmış ve sonra düşmeye başlamıştır. Verim değerleri 5-35 kg/s arasındaki debi değerlerinde sırasıyla %41.2454, %64.9444, %69.4921, %75.7893, %77.3634, %78.2734 ve %79.0359 olarak elde edilmiştir. Dizayn parametrelerinde pompanın verim değeri %77.3634 olarak çıkarken, 15 kg/s deki verim değeri ise %69.4921 olarak tespit edilmiştir.



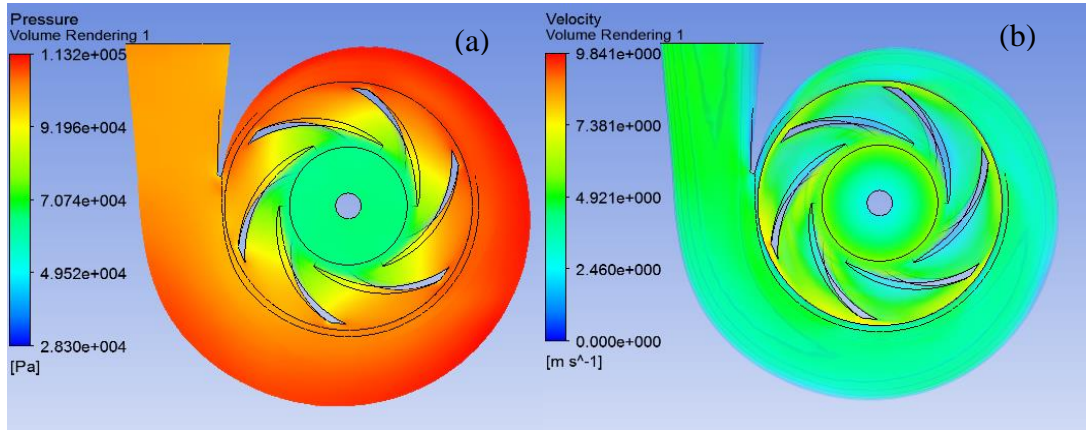
**Şekil 4. 10.** 1. pompa, 1000 rpm ve 5 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



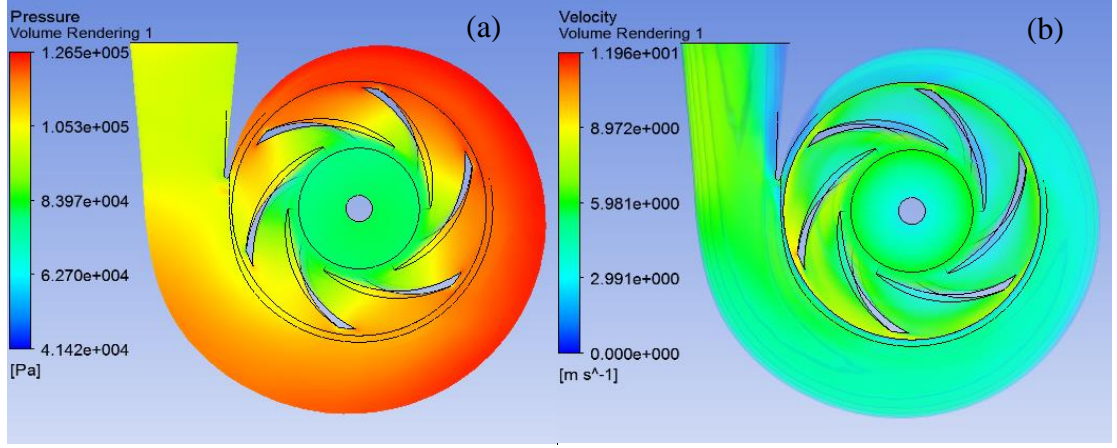
Şekil 4. 11. 1. pompa, 1000 rpm ve 10 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



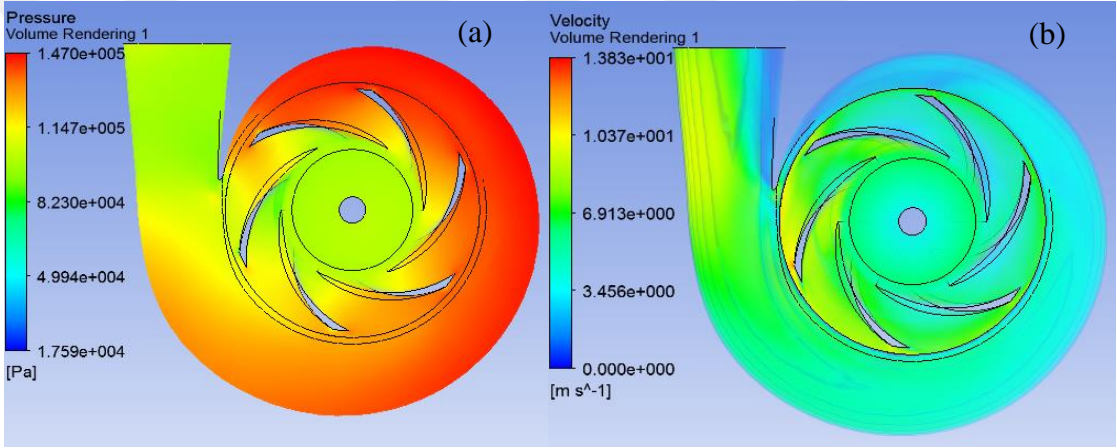
Şekil 4. 12. 1. pompa, 1000 rpm ve 15 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



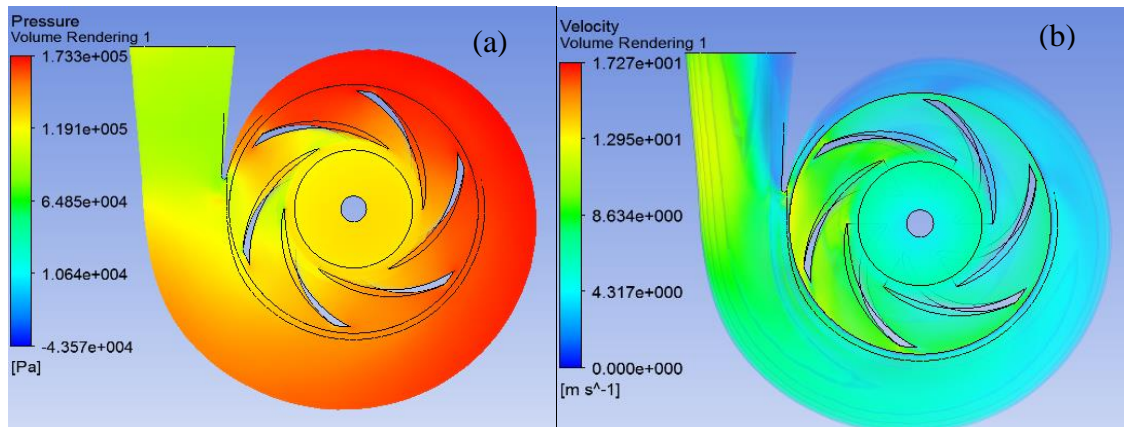
Şekil 4. 13. 1. pompa, 1000 rpm ve 20 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



Şekil 4. 14. 1. pompa, 1000 rpm ve 25 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

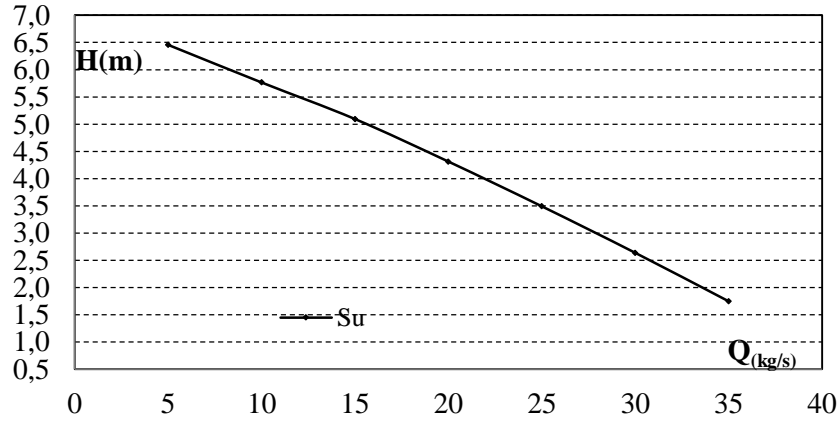


Şekil 4. 15. 1. pompa, 1000 rpm ve 30 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



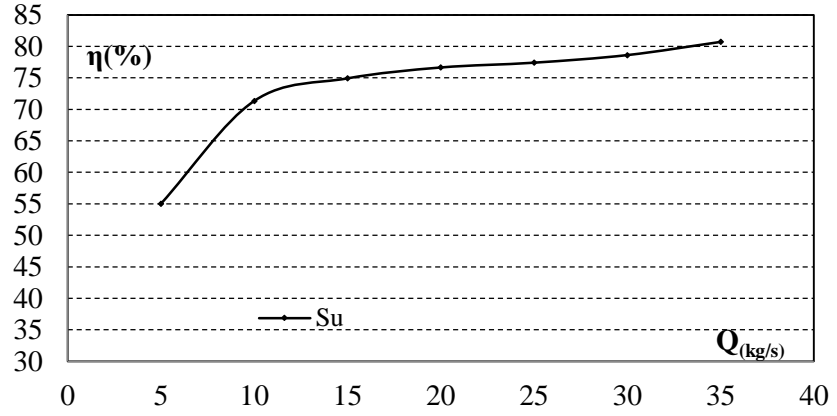
Şekil 4. 16. 1. pompa, 1000 rpm ve 35 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

1. pompa için 1000 rpm’de 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s için basınç ve hız dağılımları Şekil 4.10-16’da verilmiştir. 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s debi değerlerinde maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.105, 1.138, 1.163, 1.132, 1.265, 1.47 ve 1.733 bar olarak elde edilirken, maksimum hız değerleri ise sırasıyla 10.92, 10.8, 11.05, 9.841, 11.96, 13.83 ve 17.27 m/s olarak çıkmıştır. 1000 rpm de elde edilen hız ve basınç dağılımları 1450 rpm de elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermiştir.



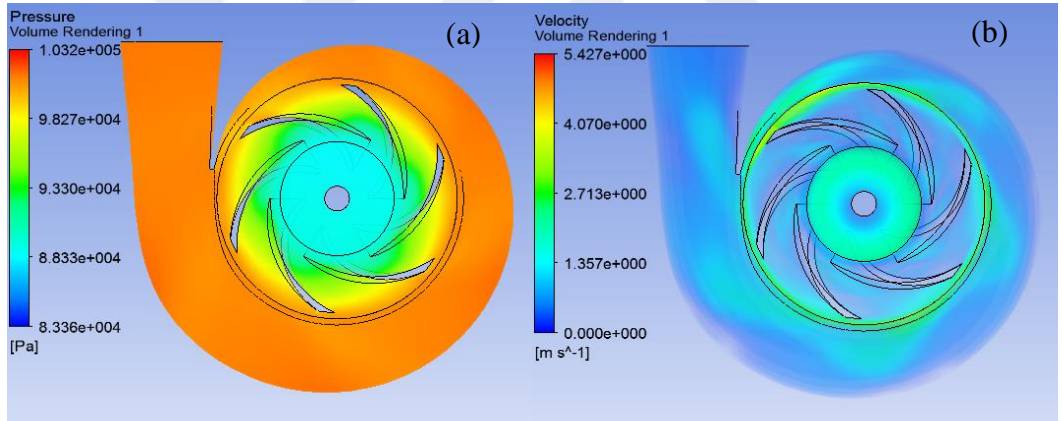
**Şekil 4. 17.** 1. pompa, 1000 rpm’de su için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.17’ de ilk pompa için 1000 rpm ve 7 farklı debi değerinde su ile yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği değerleri verilmiştir. Pompa basma yüksekliği debinin artmasıyla birlikte düşmüştür. Pompa basma yüksekliği değerleri 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s için sırasıyla 6.4563, 5.7659, 5.0944, 4.3127, 3.491, 2.6372 ve 1.7467 m olarak elde edilmiştir ki bu değerler 1450 rpm de elde edilen basma yüksekliği değerlerinden sırasıyla %44, %44.7, %42.3, %38.9, %34.9, %30 ve %22.8 daha düşüktür.

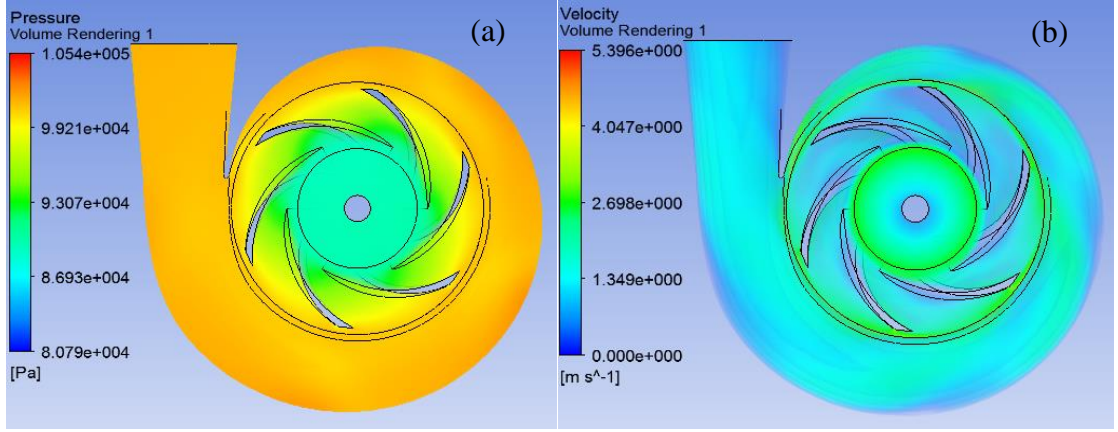


**Şekil 4. 18.** 1. pompa, 1000 rpm’de su için verim değerleri

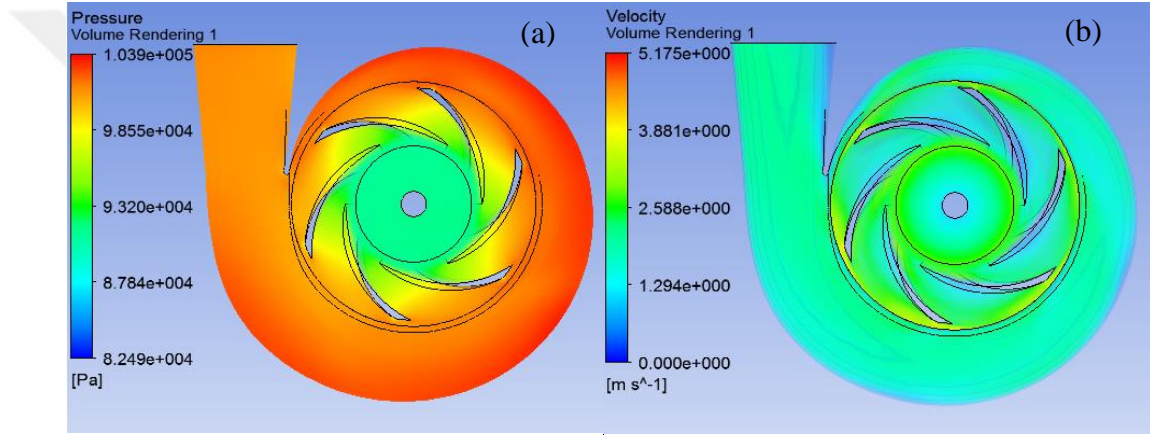
Şekil 4.18’de 1. pompa ve 1000 rpm’de 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s debideki su için verim değerleri verilmiştir. Bu değerler kullanılan debiler için sırasıyla %54.974, %71.3025, %74.8975, %76.6229, %77.3855, %78.5916 ve %80.6842 olarak tespit edilmiştir.



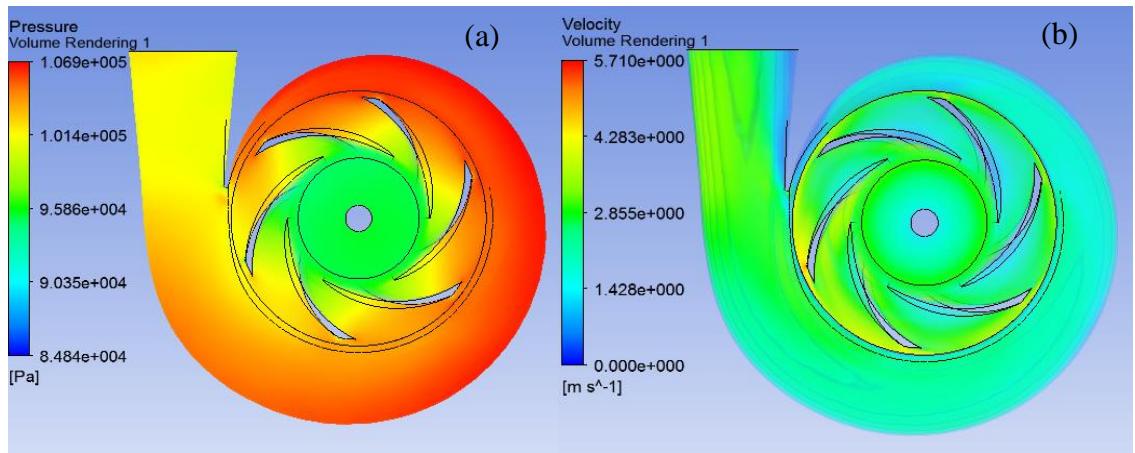
**Şekil 4. 19.** 1. pompa, 500 rpm ve 3 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



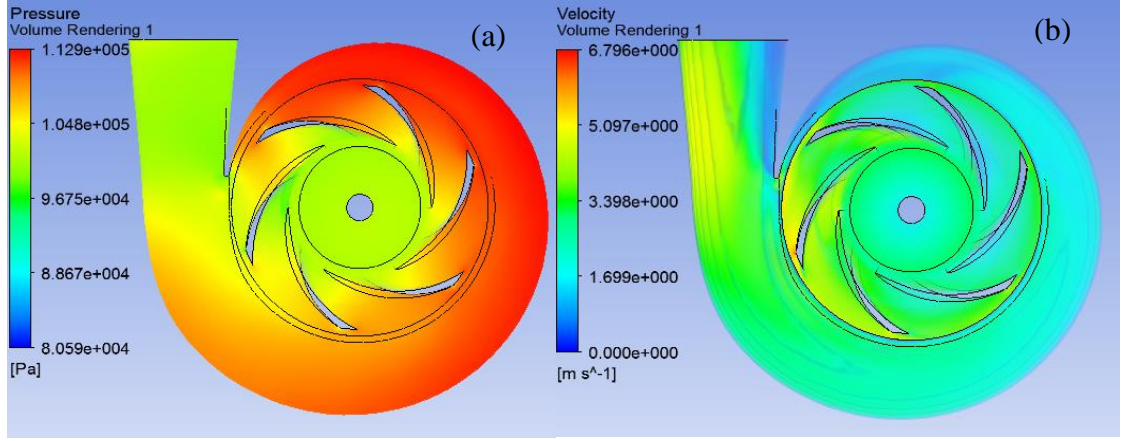
Şekil 4. 20. 1. pompa, 500 rpm ve 6 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



Şekil 4. 21. 1. pompa, 500 rpm ve 9 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

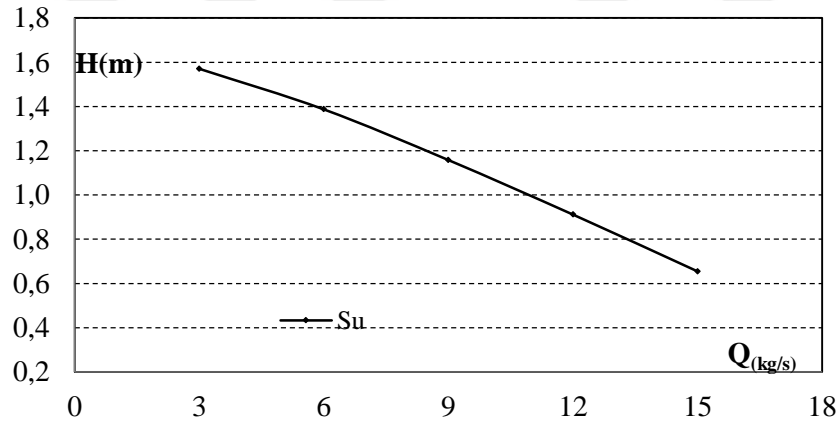


Şekil 4. 22. 1. pompa, 500 rpm ve 12 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



**Şekil 4. 23.** 1. pompa, 500 rpm ve 15 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

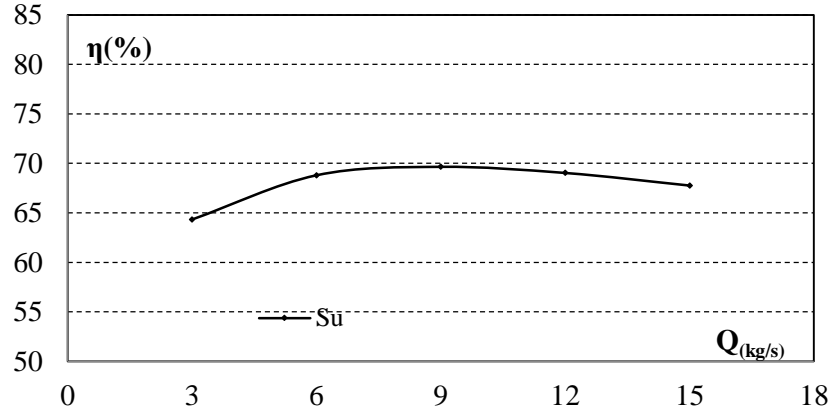
Şekiller 4.19-4.23’ te 1. pompa, 500 rpm ve 3, 6, 9, 12 ve 15 kg/s de su için elde edilen basınç ve hız dağılımları gösterilmiştir. 500 rpm ve 3-15 kg/s de su ile 1.pompada elde edilen maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.032, 1.054, 1.039, 1.069 ve 1.129 bar iken maksimum hız değerleri 5.427, 5.396, 5.175, 5.710 ve 6.796 m/s olarak elde edilmiştir. 500 rpm’ deki basınç ve hız dağılımları 1000 rpm ve 1450 rpm rotor hızlarındaki dağılımlarla benzer sonuçlar göstermiştir.



**Şekil 4. 24.** 1. pompa, 500 rpm’de su için pompa basma yükseklikleri

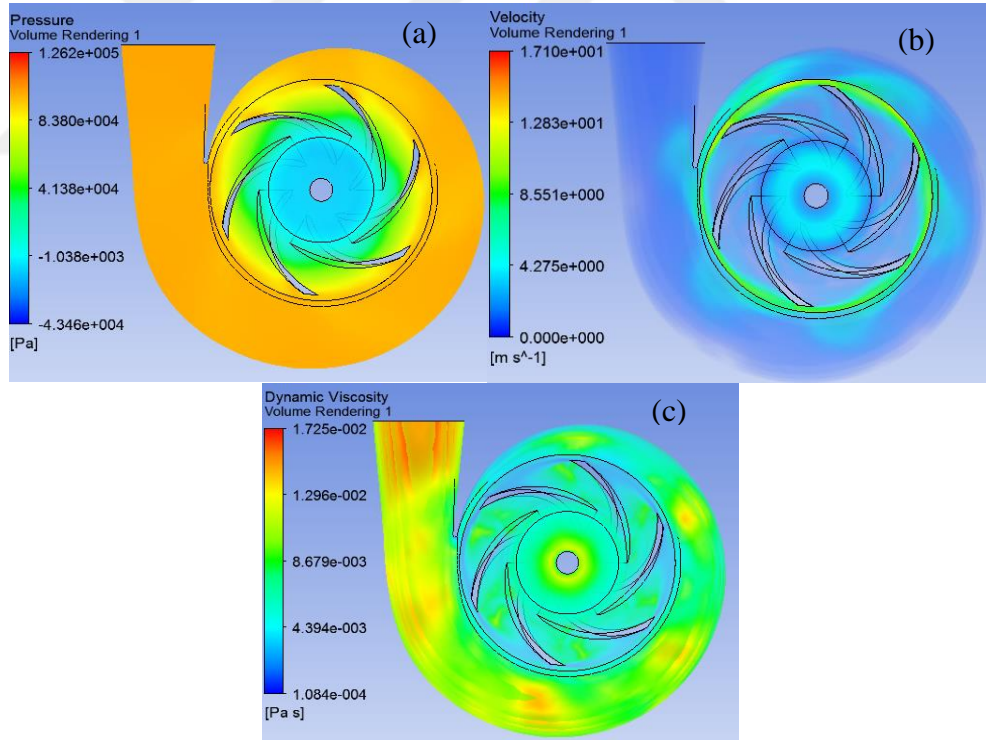
Şekil 4.24’te 1. pompa, 500 rpm’de 3, 6, 9, 12 ve 15 kg/s debi değerinde su için yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği değerleri verilmiştir. Pompa basma yüksekliği debi artmasıyla düşmüştür. Pompa basma yüksekliği değerleri 3, 6, 9, 12 ve 15 kg/s için sırasıyla 1.571, 1.3875, 1.1583, 0.9118 ve 0.655 m olarak çıkmıştır. 500 rpm ve 15 kg/s’de elde edilen basma yüksekliği değeri 0,655 m iken 1000 rpm’de bu değer %87 düşerek 5.0944 m olarak çıkmıştır.



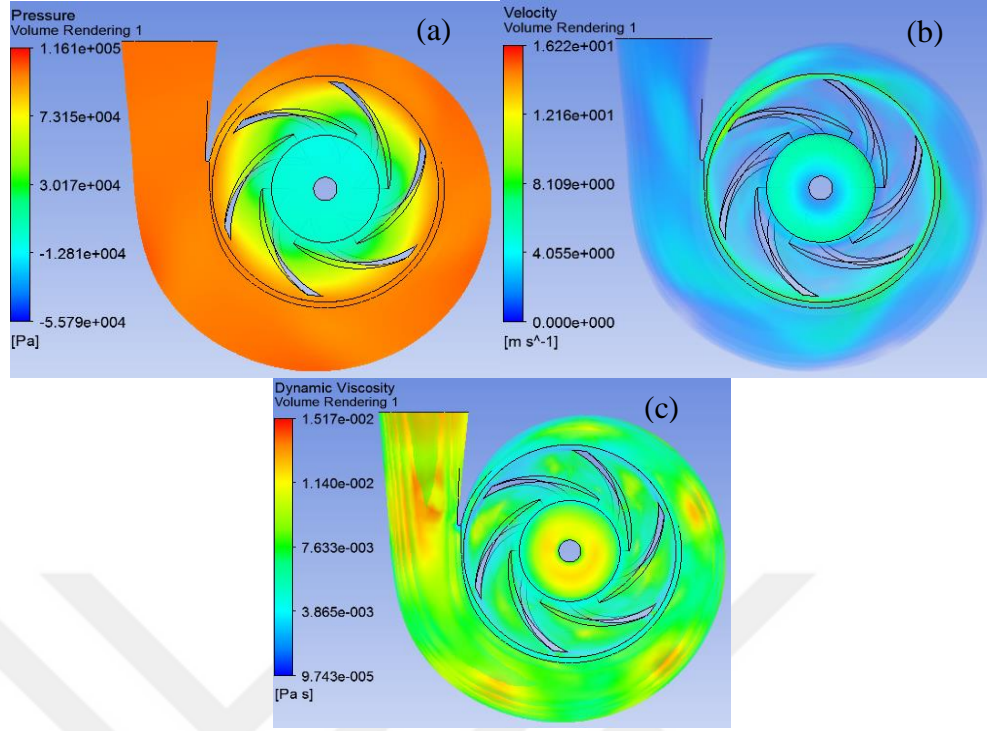


**Şekil 4. 25.** 1. pompa, 500 rpm’de su için verim değerleri

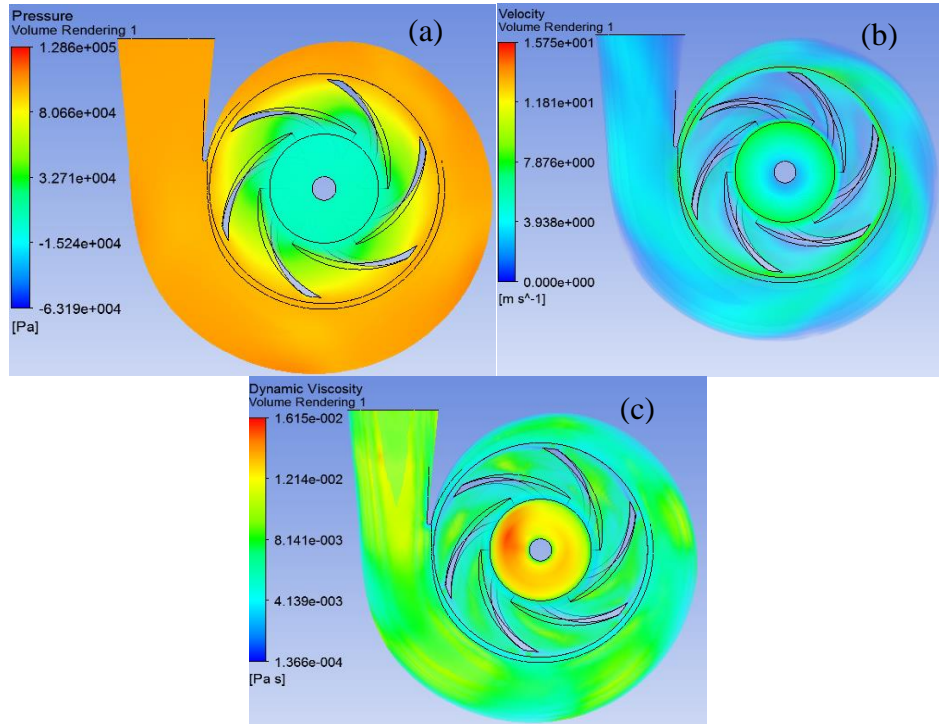
Şekil 4.25’te 1. pompa’da su kullanılmasıyla, 500 rpm rotor hızı ve 3, 6, 9, 12 ve 15 kg/s debi değerlerinde verim değerleri verilmiştir. 1. pompa için 500 rpm’de verim değerleri 3-15 kg/s arasındaki debi değerlerinde sırasıyla %64.31, %68.7966, %69.6587, %69.0369 ve %67.7602 olarak elde edilmiştir.



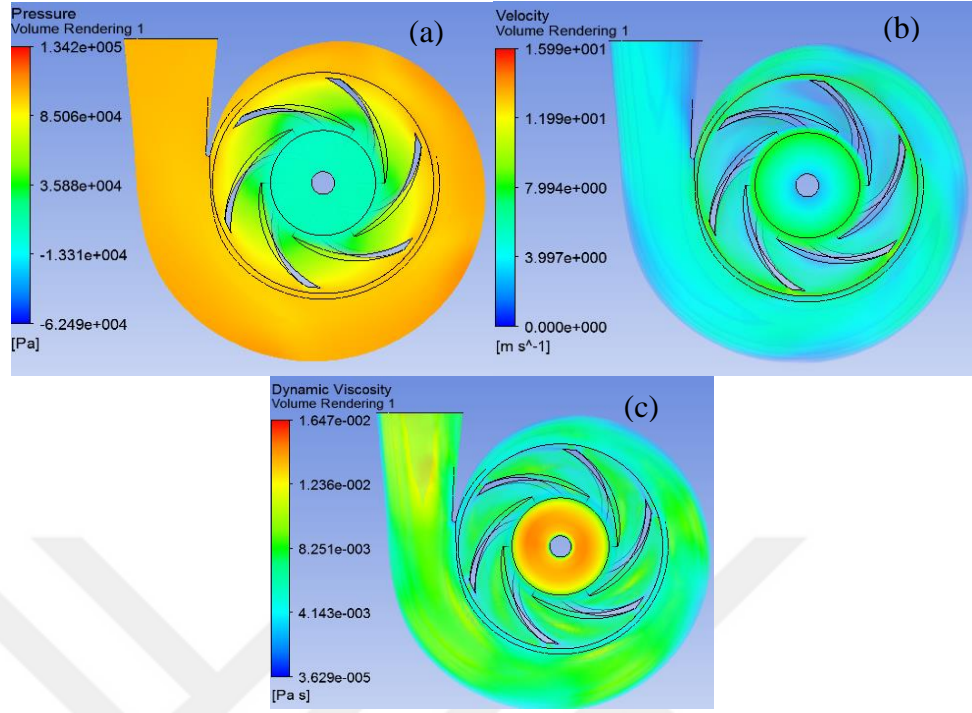
**Şekil 4. 26.** 1. pompa, 1450 rpm ve 5 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



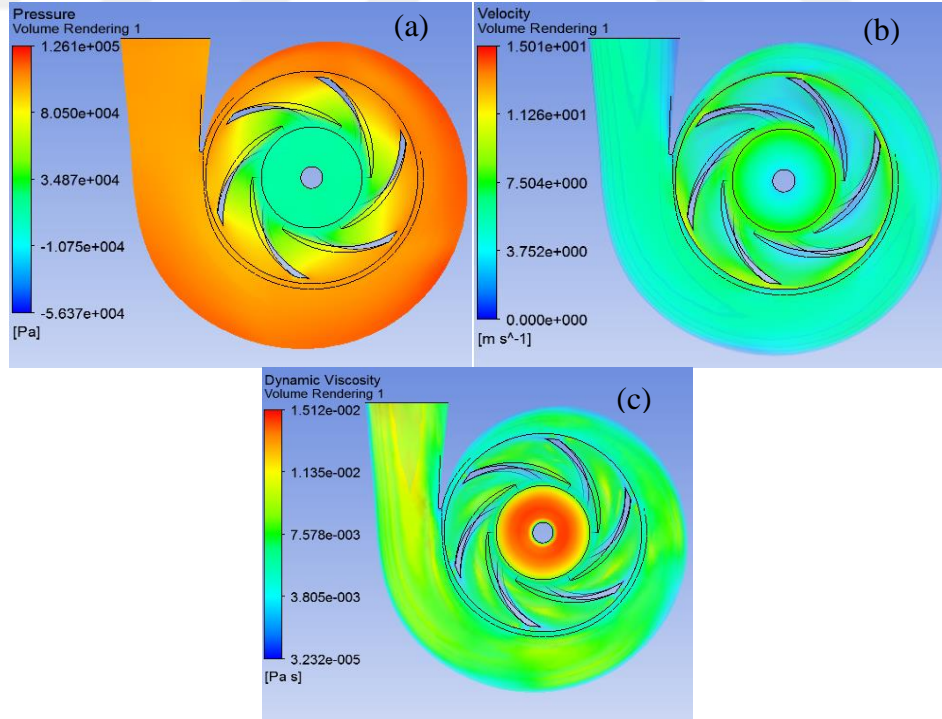
Şekil 4. 27. 1. pompa, 1450 rpm ve 10 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



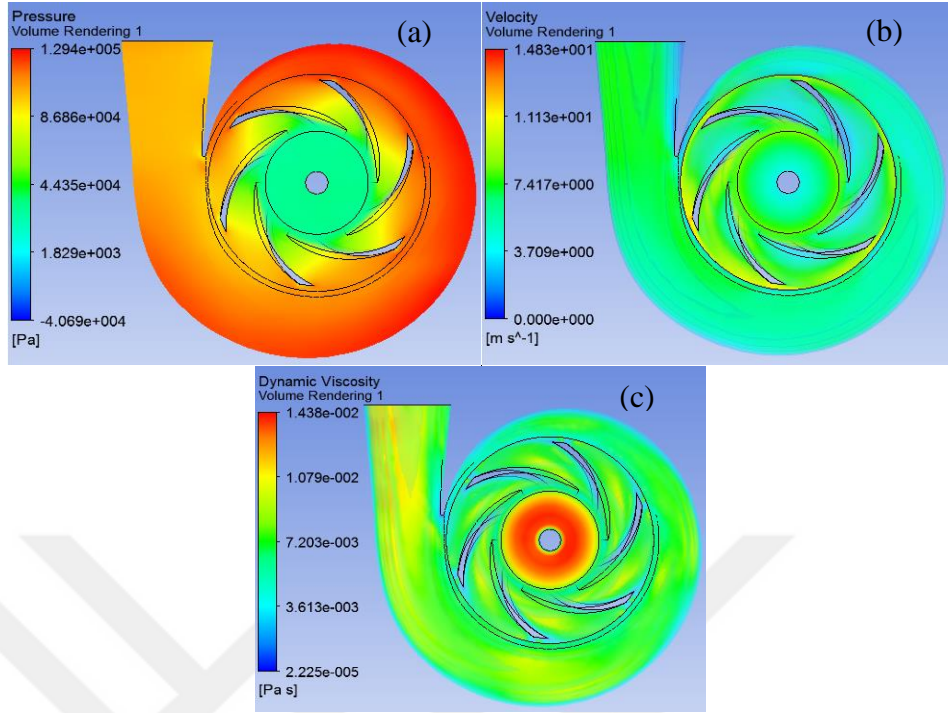
Şekil 4. 28. 1. pompa, 1450 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



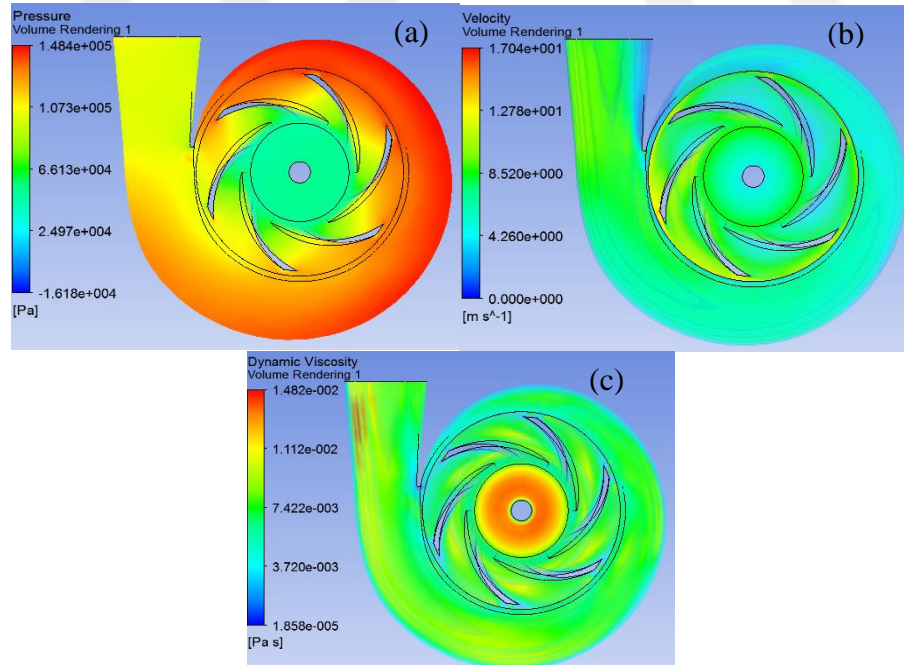
Şekil 4. 29. 1. pompa, 1450 rpm ve 20 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



Şekil 4. 30. 1. pompa, 1450 rpm ve 25 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

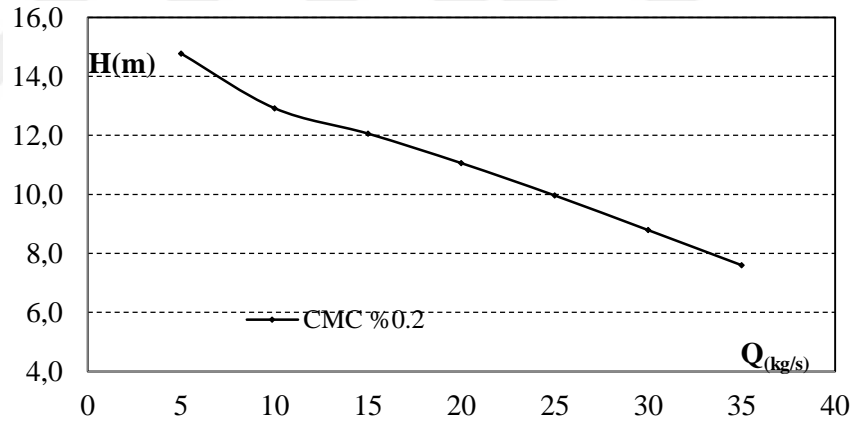


Şekil 4. 31. 1. pompa, 1450 rpm ve 30 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



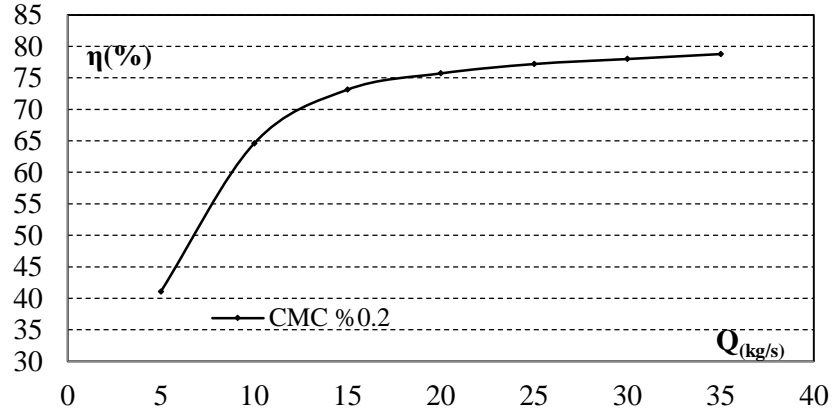
Şekil 4. 32. 1. pompa, 1450 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

1. pompa, CMC %0.2 için 1450 rpm rotor hızı ve 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s debi değerleri ile yapılan nümerik analizlerden elde edilen basınç, hız ve viskozite dağılımları Şekiller 4.26-4.32’de görselleştirilmiştir. 1450 rpm ve 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s de CMC %0.2 ile 1. pompa’da maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.262, 1.161, 1.286, 1.342, 1.261, 1.294 ve 1.484 bar çıkmıştır. Maksimum hız değerleri 17.1, 16.22, 15.75, 15.99, 15.01, 14.83 ve 17.04 m/s çıkarken, maksimum viskozite değerleri ise 0.01725, 0.01517, 0.01615, 0.01647, 0.01512, 0.01483 ve 0.01482 Pa.s olarak elde edilmiştir. Akışkanın viskozitesinde gelen değişim görsellerden anlaşılmaktadır. Çark girişinde yüksekten çark içinde viskozite düşmektedir. Bu yüzden pompa basma yüksekliği su’ya göre biraz farklılık göstermiştir. Nitekim Abazariyan ve ark. ise 2018 yılında viskozitenin sürtünme katsayısının değişimi üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Sonuçta non-Newtonian akışkanın viskozitesinin değişimin sürtünme faktörü üzerine etkisini incelemiş ve viskozite değişimini pompa performans karakteristiğine etkisini görmüşlerdir.



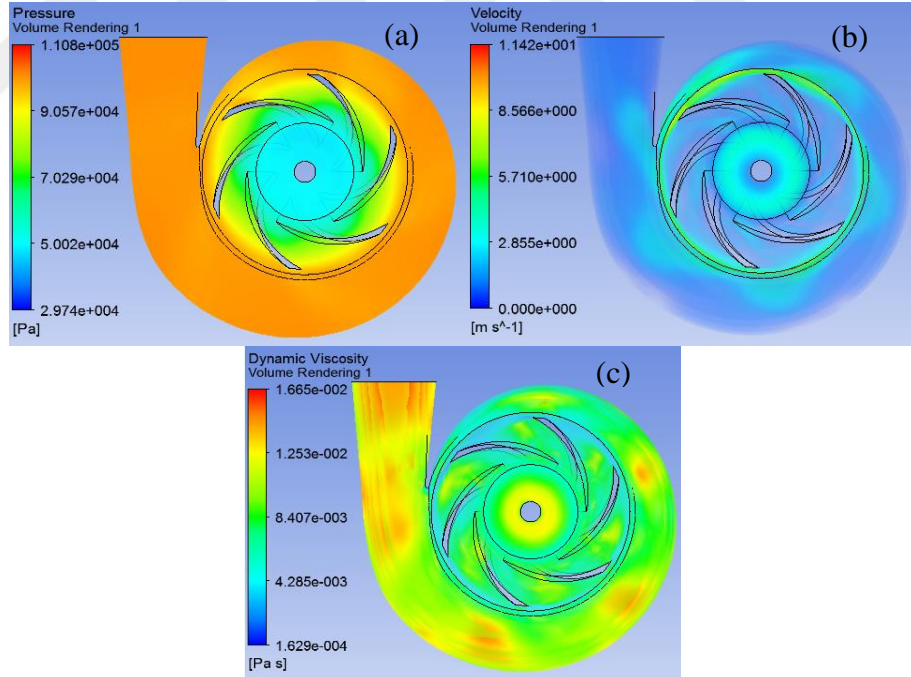
**Şekil 4. 33.** 1. pompa, 1450 rpm’de CMC %0.2 için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.33’te 1. pompa, CMC %0.2 için 1450 rpm’de 7 farklı debi değerinde yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği değerleri verilmiştir. 1450 rpm’de CMC %0.2 için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s için sırasıyla 14.7683, 12.9205, 12.06, 11.0594, 9.9648, 8.7912 ve 7.6037 m olarak elde edilmiştir. CMC %0.2 ile yapılan analizlerdeki pompa basma yükseklikleri su ile yapılanlara göre 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s için sırasıyla %0.81, %0.26, %0.14, %-0.24, %-0.36, %-0.52 ve %-0.59 daha büyüktür.

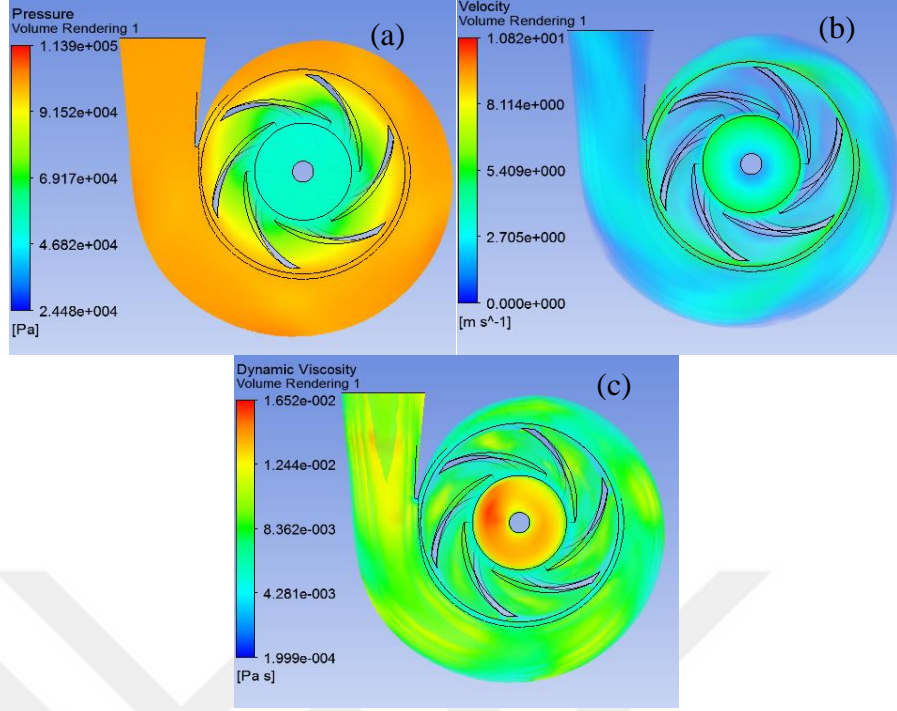


**Şekil 4. 34.1.** pompa, 1450 rpm’de CMC %0.2 için verim değerleri

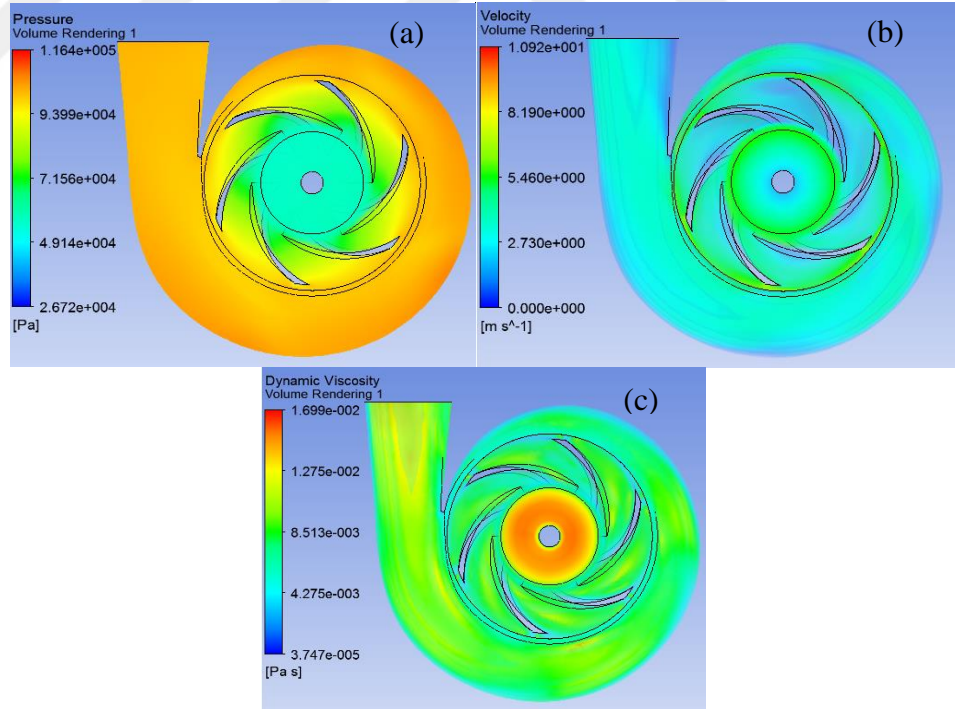
Şekil 4.34’te 1450 rpm, 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s ve 1. pompa’da CMC %0.2 için nümerik analizlerden elde edilen verim değerleri verilmiştir. 1. pompa’da CMC %0.2 için verim değerleri 5-35 kg/s arasındaki debi değerlerinde sırasıyla %41.086, %64.5925, %73.1331, %75.7159, %77.2032, %77.9987 ve %78.7861 olarak tespit edilmiştir.



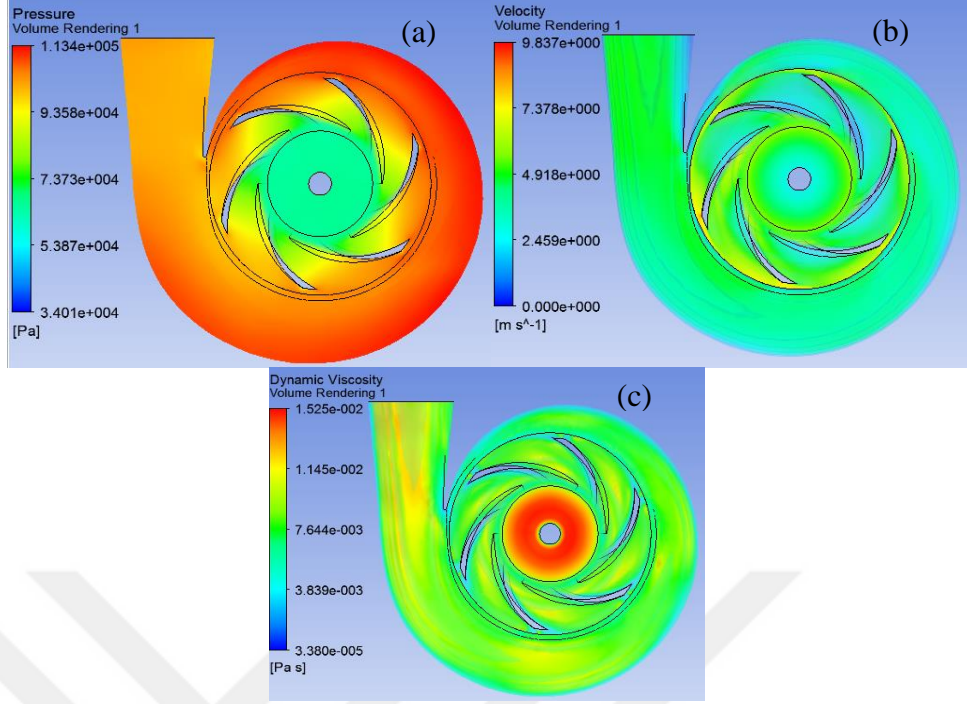
**Şekil 4. 35.** 1. pompa, 1000 rpm ve 5 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



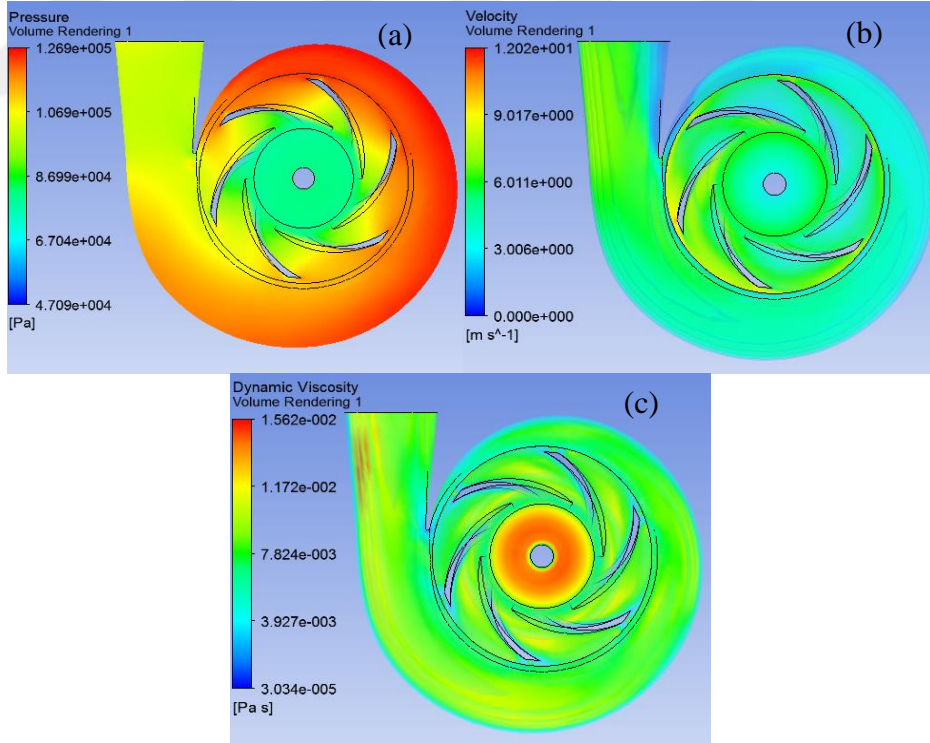
**Şekil 4. 36.** 1. pompa, 1000 rpm ve 10 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



**Şekil 4. 37.** 1. pompa, 1000 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

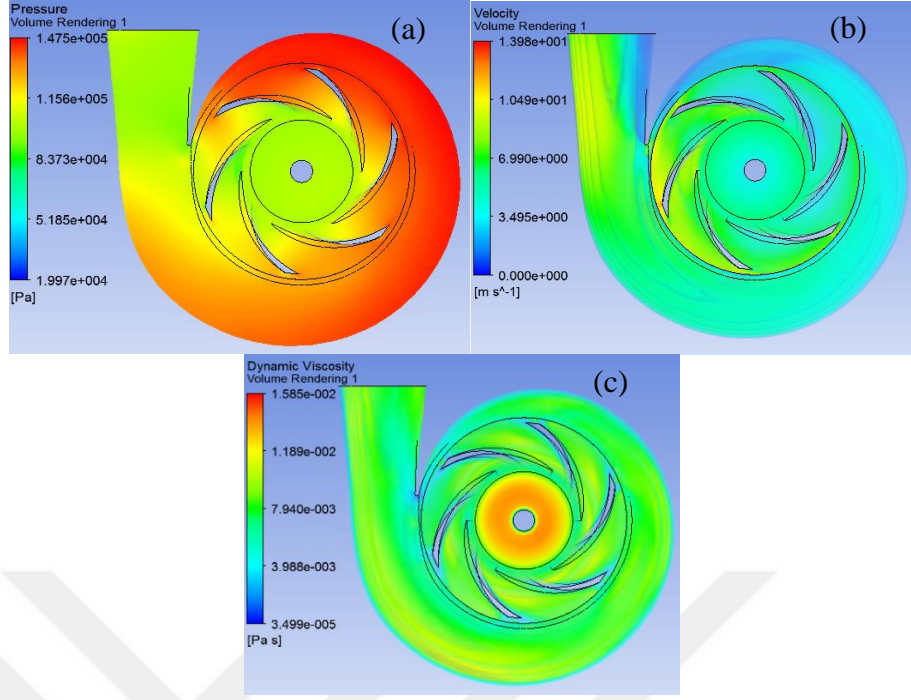


Şekil 4. 38. 1. pompa, 1000 rpm ve 20 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

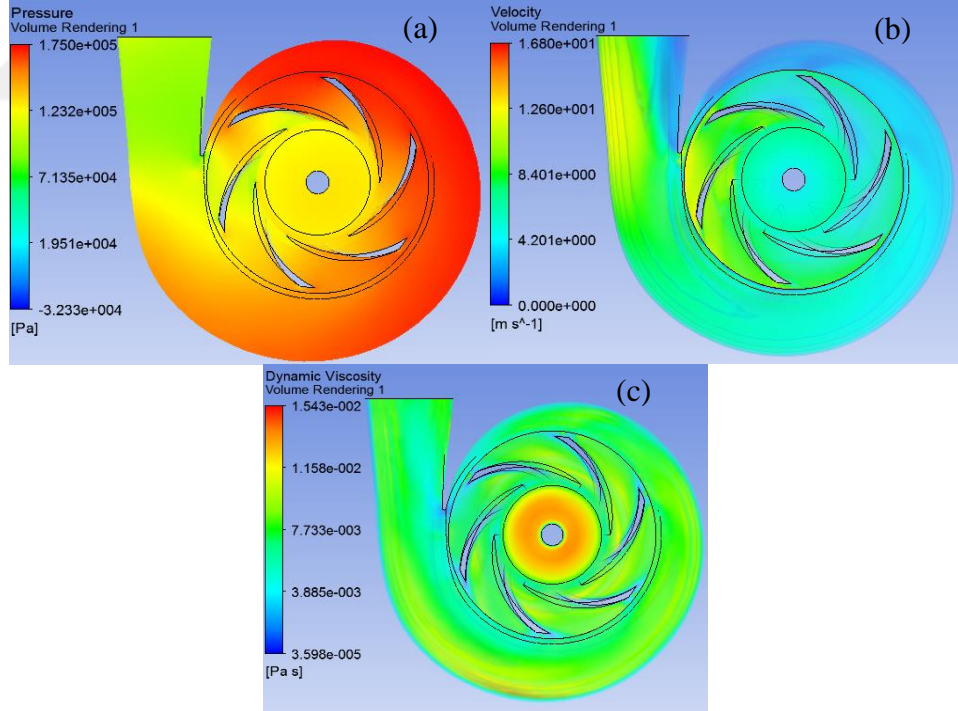


Şekil 4. 39. 1. pompa, 1000 rpm ve 25 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



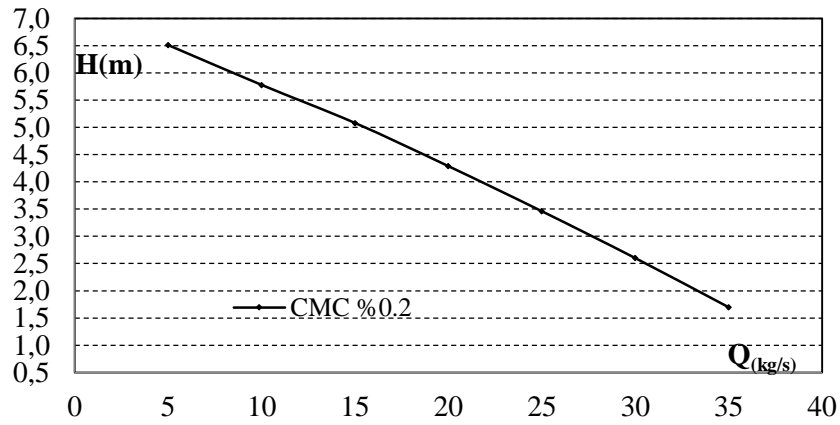


**Şekil 4. 40.** 1. pompa, 1000 rpm ve 30 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



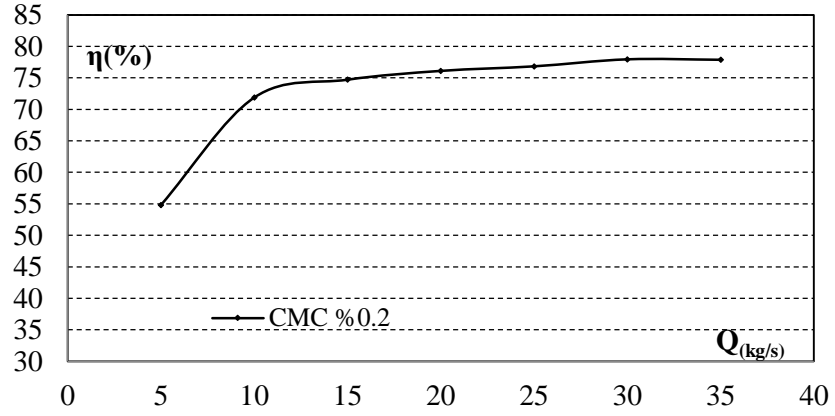
**Şekil 4. 41.** 1. pompa, 1000 rpm ve 35 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

1. pompa, CMC %0.2 ile 1000 rpm'de 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s ile yapılan analizlerde elde edilen basınç, hız ve viskozite dağılımları Şekiller 4.35-4.41'de görselleştirilmiştir. Maksimum basınç değerleri 5-35 kg/s için sırasıyla 1.108, 1.139, 1.164, 1.134, 1.269, 1.475 ve 1.750 bar çıkmıştır. Maksimum hız değerleri sırasıyla 11.42, 10.82, 10.92, 9.837, 12.02, 13.98 ve 16.8 m/s ve maksimum viskozite değerleri ise 0.01665, 0.01652, 0.01699, 0.01525, 0.01562, 0.01585 ve 0.01543 Pa.s olarak çıkmıştır.



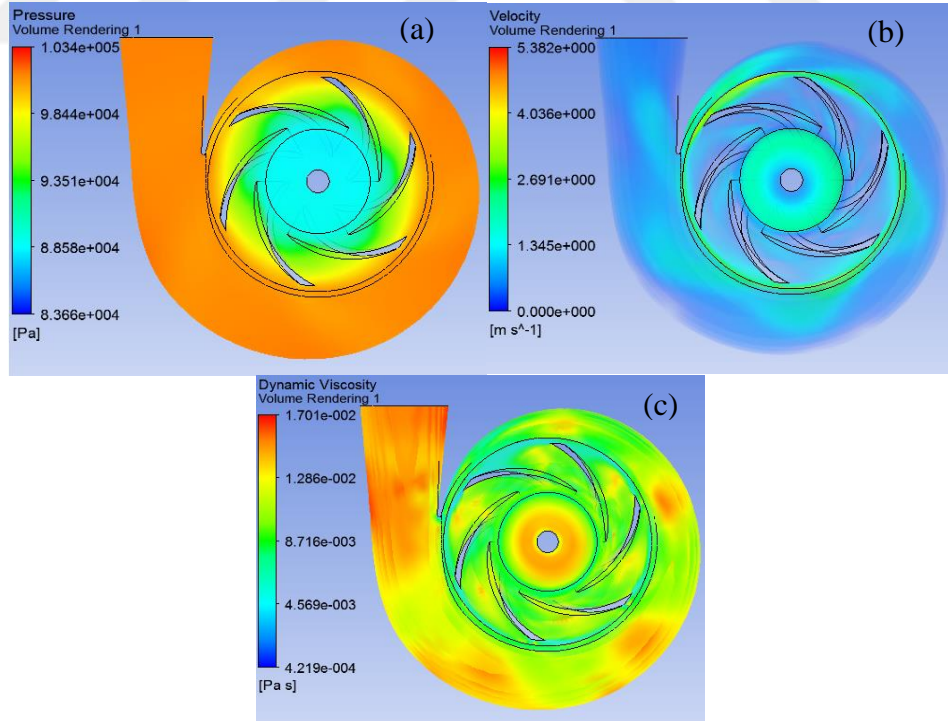
**Şekil 4. 42.** 1. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.2 için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.42'de 1. pompa için 1000 rpm'de 7 farklı debi değerinde CMC %0.2 ile yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği verilmiştir. 1000 rpm, CMC %0.2 için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s için sırasıyla 6.5094, 5.7786, 5.08, 4.2872, 3.4605, 2.601 ve 1.6988 m olarak elde edilmiştir. CMC %0.2 ile yapılan analizlerdeki pompa basma yüksekliği su ile yapılanlara göre 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s için sırasıyla %0.82,%0.22, %-0.28,% -0.59, %-0.87, %-1.37 ve %-2.74 artmıştır.

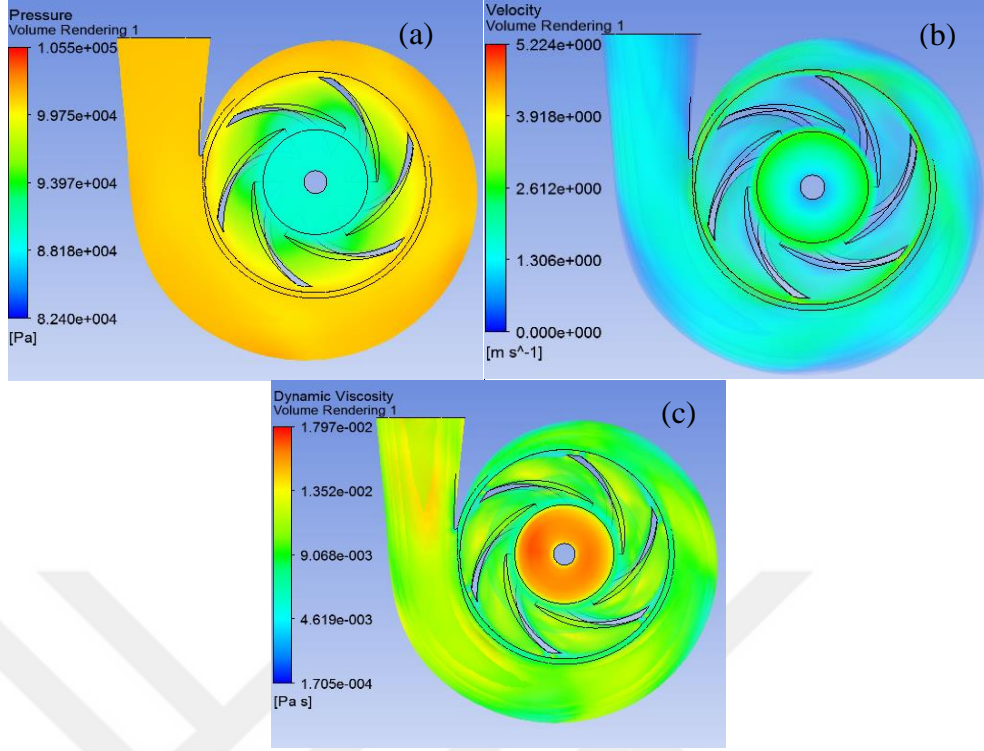


**Şekil 4. 43.** 1. pompa, 1000 rpm’de CMC %0.2 için verim değerleri

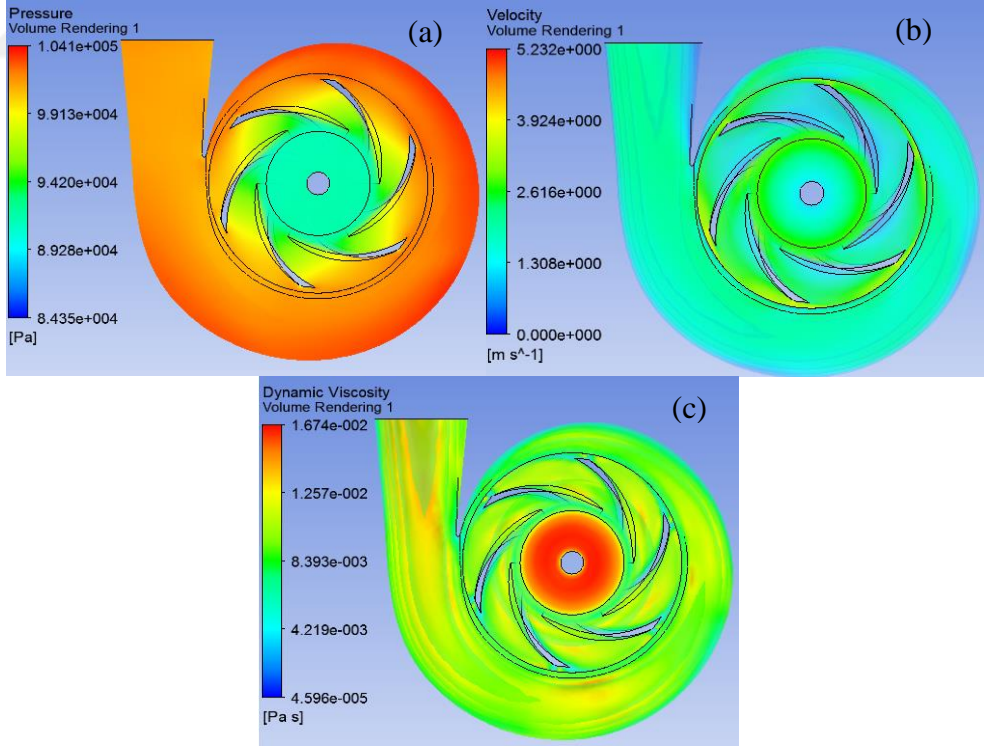
Şekil 4.43’te 1000 rpm ve 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s’de 1. pompa ve CMC %0.2 için nümerik analizlerden elde edilen verim değerleri verilmiştir. 1. pompa için 1000 rpm’de verim değerleri 5-35 kg/s arasındaki debi değerlerinde CMC %0.2 için sırasıyla %54.7951, %71.8443, %74.6909, %76.0864, %76.8089, %77.9205 ve %77.8495 olarak çıkmıştır. 15 kg/s’ de elde edilen verim değeri CMC %0.2 için %74.6909 iken su için %74.8975 olarak tespit edilmiştir.



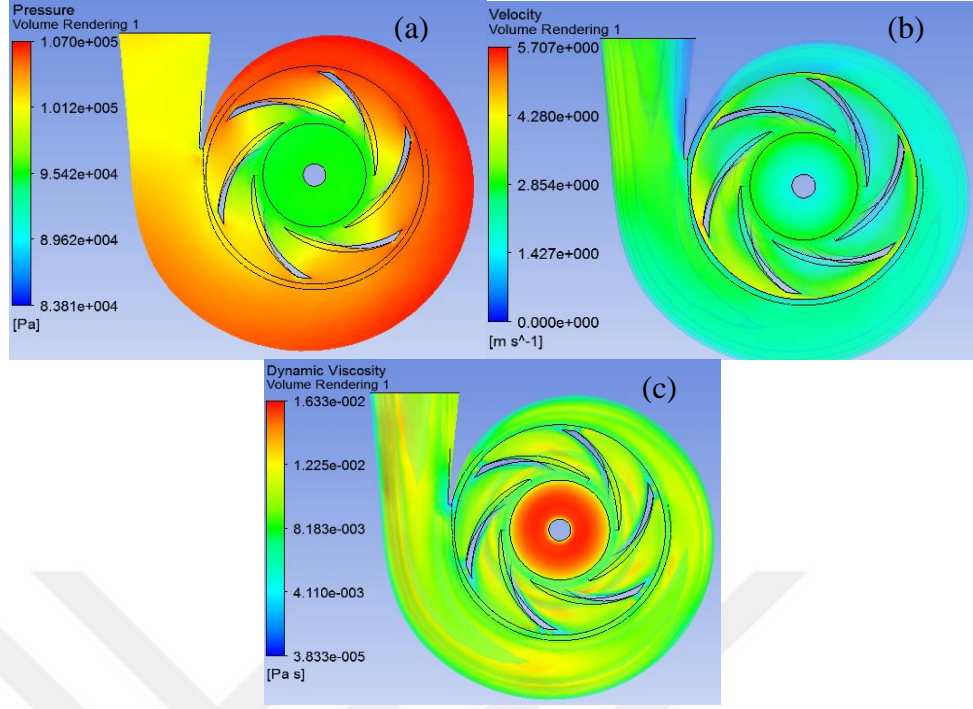
**Şekil 4. 44.** 1. pompa, 500 rpm ve 3 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



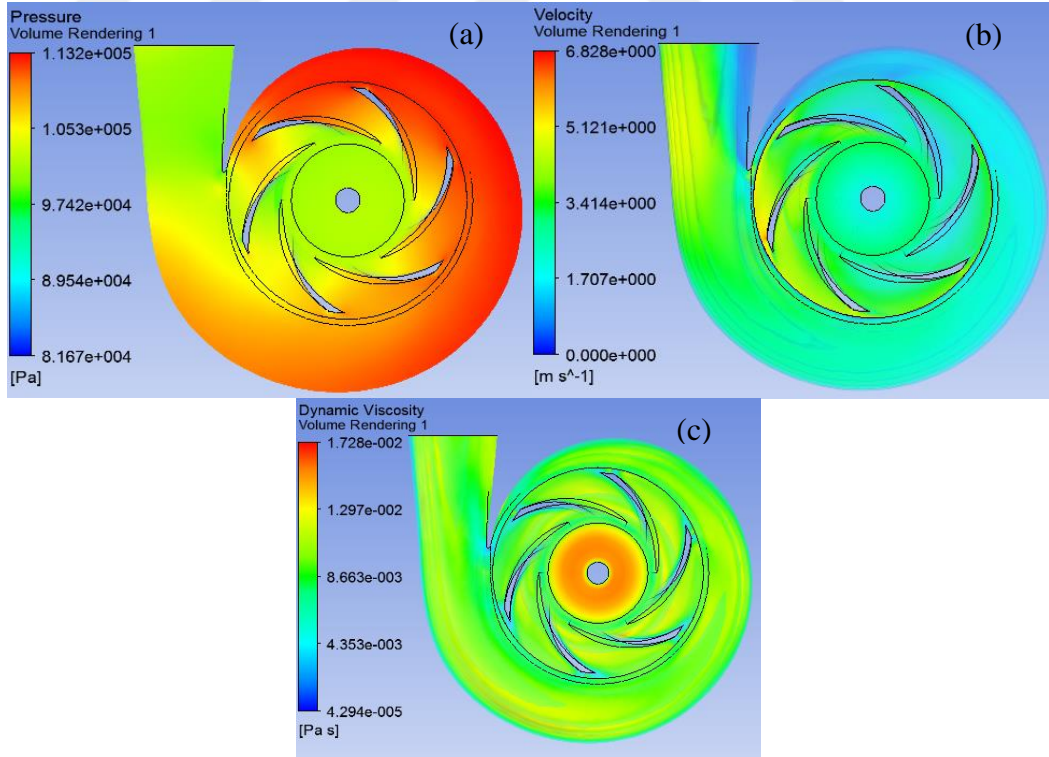
Şekil 4. 45. 1. pompa, 500 rpm ve 6 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



Şekil 4. 46. 1. pompa, 500 rpm ve 9 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

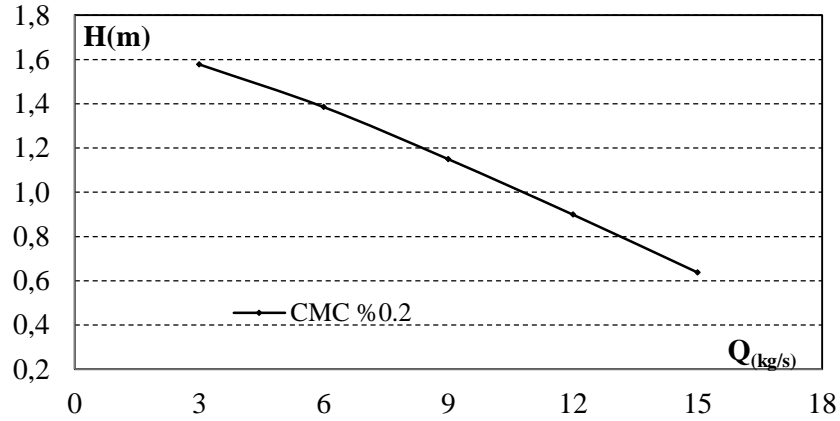


Şekil 4. 47. 1. pompa, 500 rpm ve 12 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



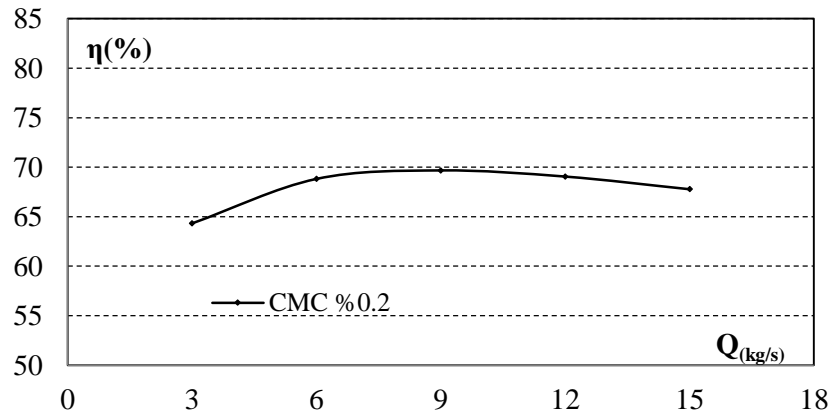
Şekil 4. 48. 1. pompa, 500 rpm ve 15 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

Şekiller 4.44-4.48’de 1.pompa, CMC %0.2 ile 500 rpm’de 3, 6, 9, 12 ve 15 kg/s ile yapılan analizlerden elde edilen basınç ve hız dağılımları gösterilmiştir. 1. pompa için 500 rpm ve 3-15 kg/s’de CMC %0.2 ile yapılan analizlerden elde edilen maksimum hız değerleri 5.382, 5.232, 5.707 ve 6.828 m/s çıkmıştır. Maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.034, 1.055, 1.041, 1.07 ve 1.132 bar çıkarken, maksimum viskozite değerleri ise 0.01701, 0.01797, 0.01674, 0.01633, ve 0.01728 Pa.s çıkmıştır.



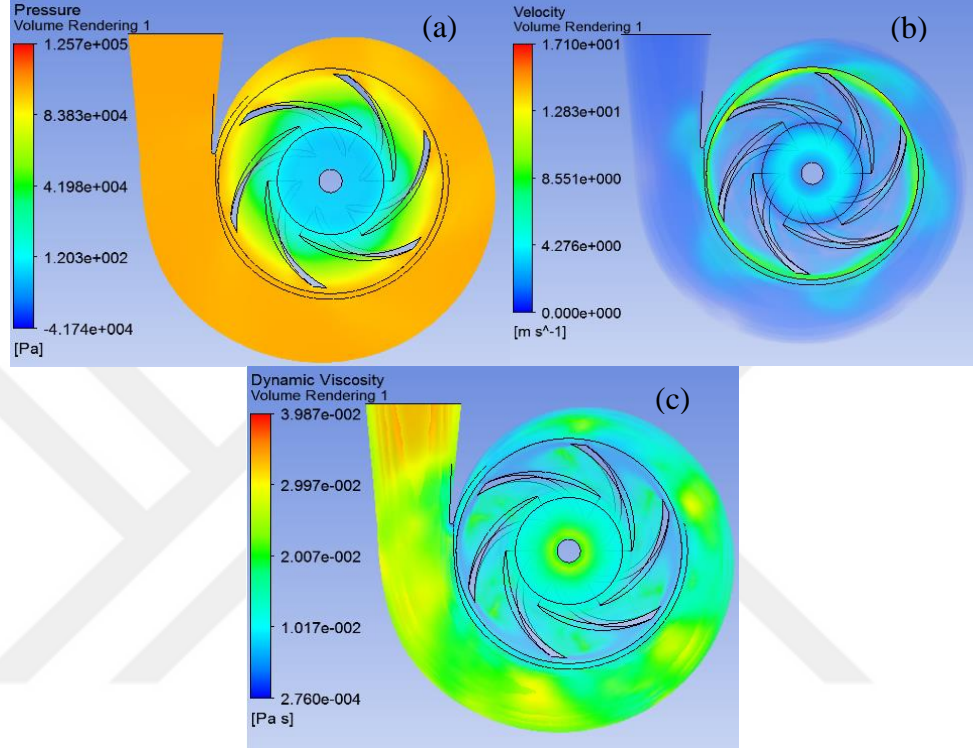
**Şekil 4. 49.** 1. pompa, 500 rpm’de CMC %0.2 için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.49’da 1.pompa, 500 rpm ve 3, 6, 9, 12 ve 15 kg/s debi değerinde CMC %0.2 ile yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği değerleri verilmiştir. 500 rpm’de CMC %0.2 için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri 3-15 kg/s için sırasıyla 1.5777, 1.3847, 1.1491, 0.8986 ve 0.6374 m çıkmıştır. 1. pompa 500 rpm ve 15 kg/s’de CMC %0.2 ile elde edilen basma yüksekliği değeri 0.6374 m çıkarken, aynı şartlarda su ile elde edilen basma yüksekliği değeri 0.655 m çıkmıştır.

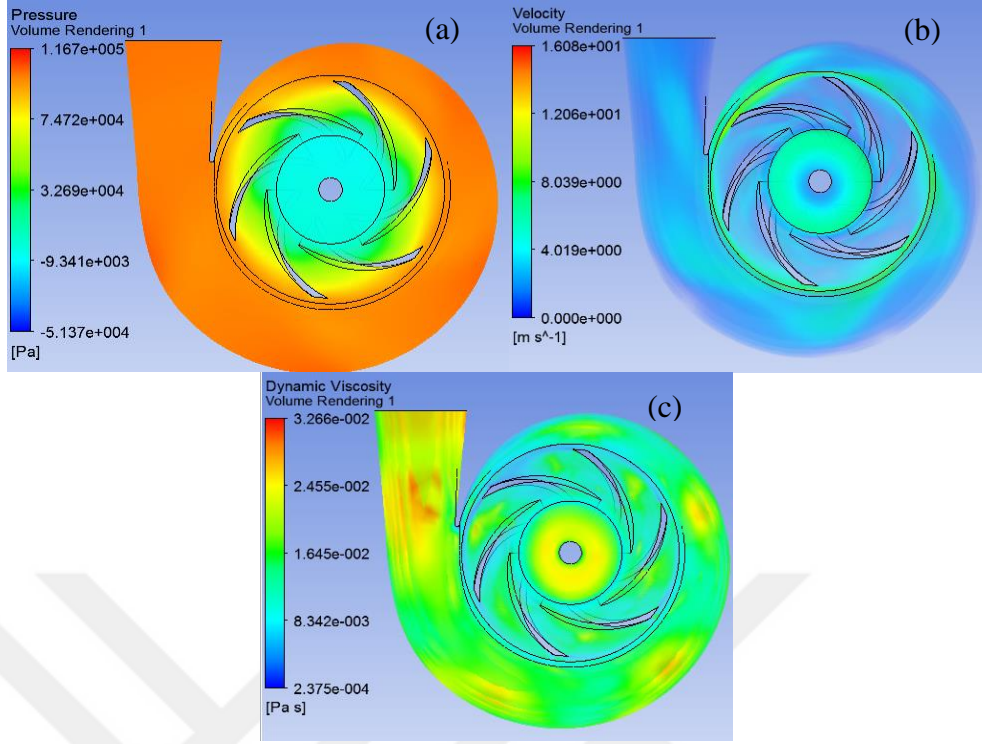


**Şekil 4. 50.** 1.pompa, 500 rpm de CMC %0.2 için verim değerleri

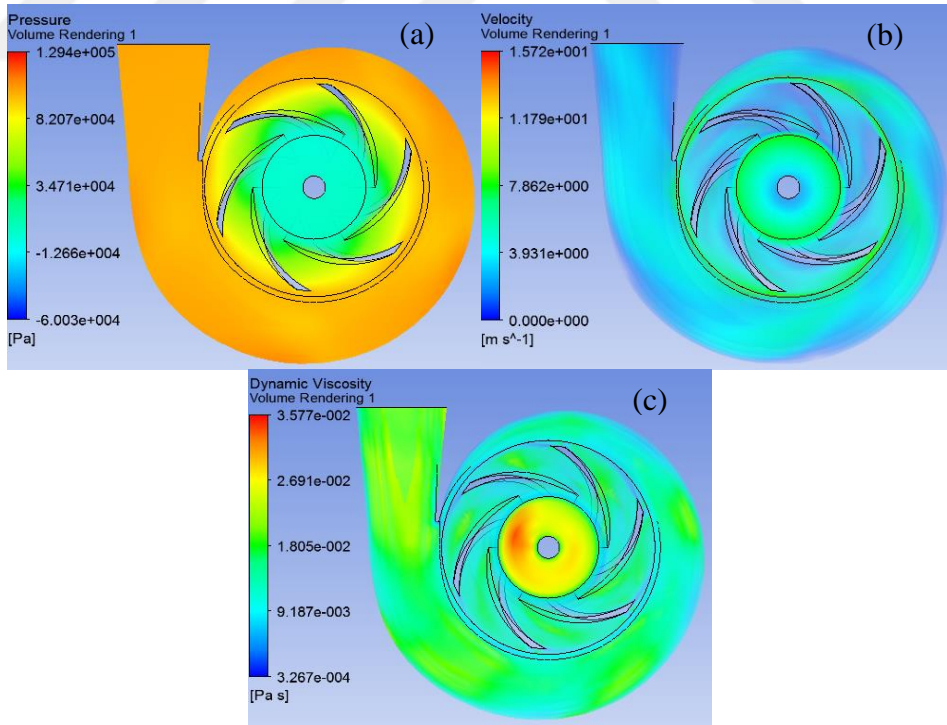
Şekil 4.50’de 500 rpm ve 3, 6, 9, 12 ve 15 kg/s de 1. pompa ve CMC %0.2 için nümerik analizlerden elde edilen verim değerleri eğrisidir. 1. pompa için 500 rpm’de CMC %0.2 için verim değerleri 3-15 kg/s arasındaki debi değerlerinde sırasıyla %56.6595, %67.9531, %68.6416, %67.8005 ve %66.0915 çıkmıştır.



Şekil 4. 51. 1. pompa, 1450 rpm ve 5 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

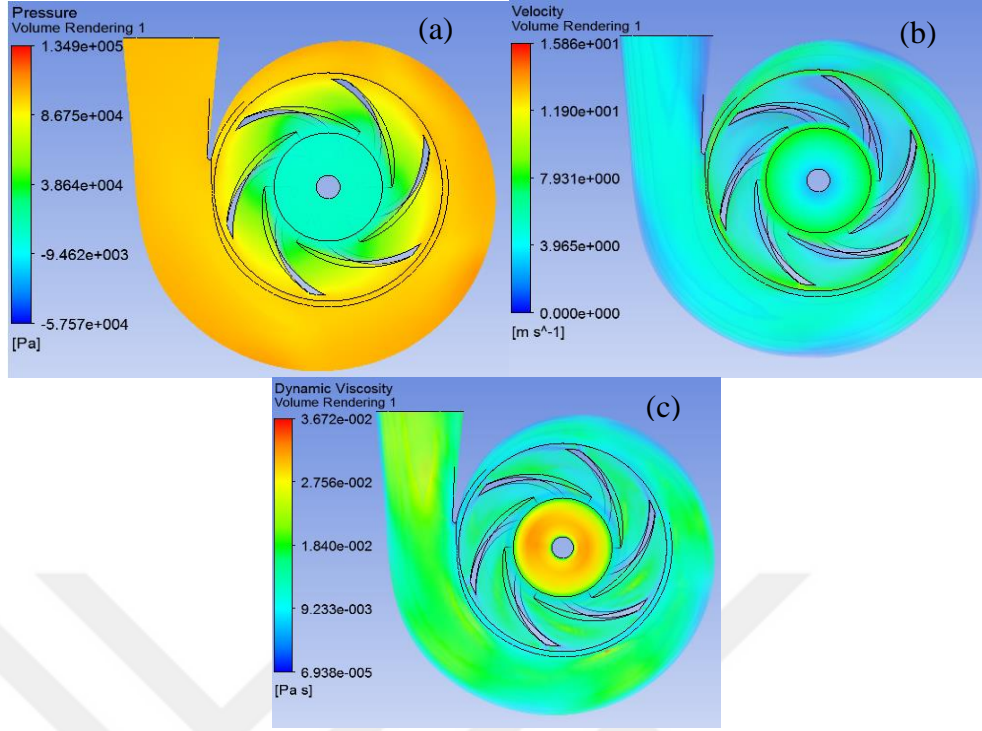


Şekil 4. 52. 1. pompa, 1450 rpm ve 10 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

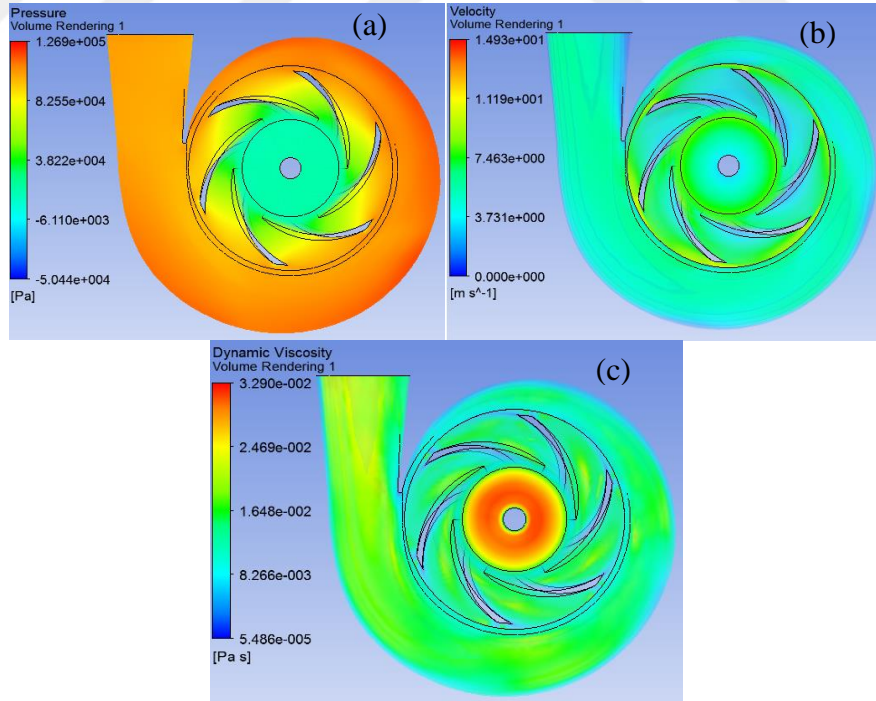


Şekil 4. 53. 1. pompa, 1450 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

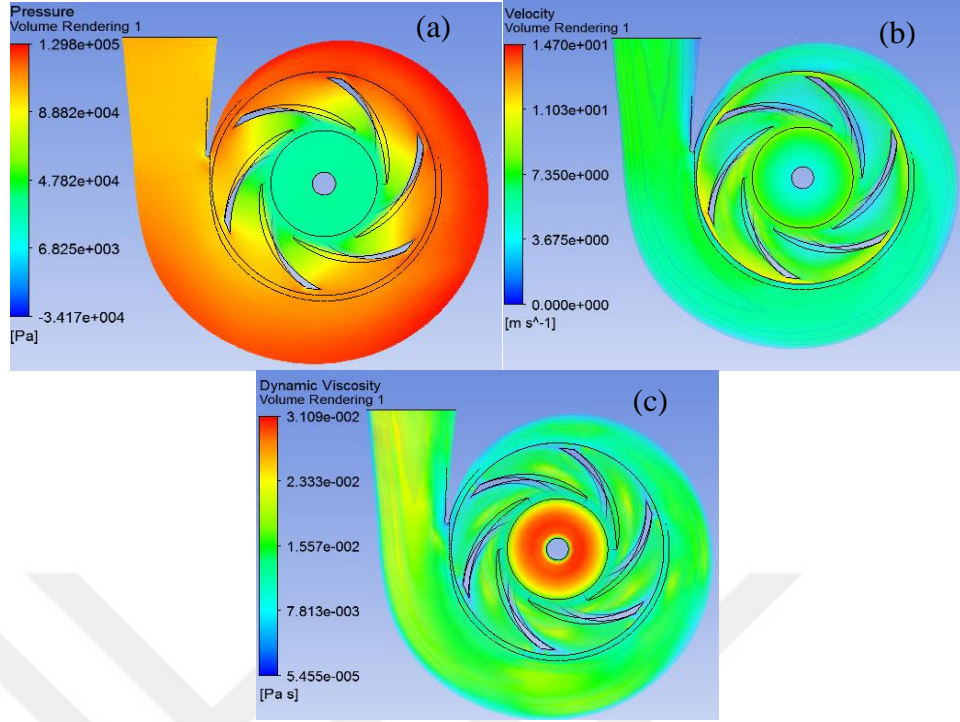




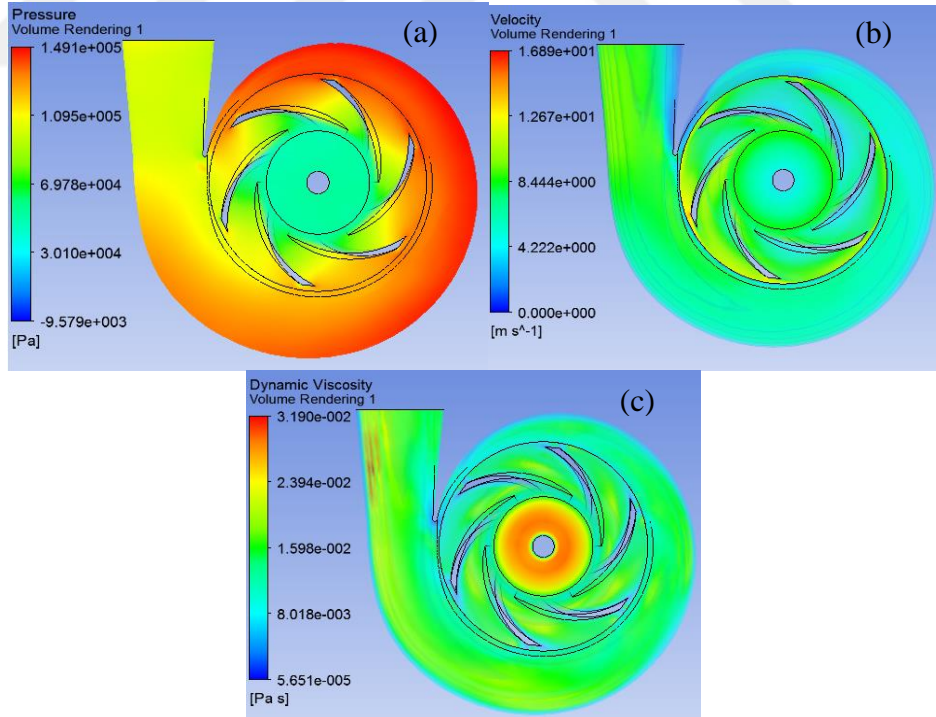
Şekil 4. 54. 1. pompa, 1450 rpm ve 20 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



Şekil 4. 55. 1. pompa, 1450 rpm ve 25 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

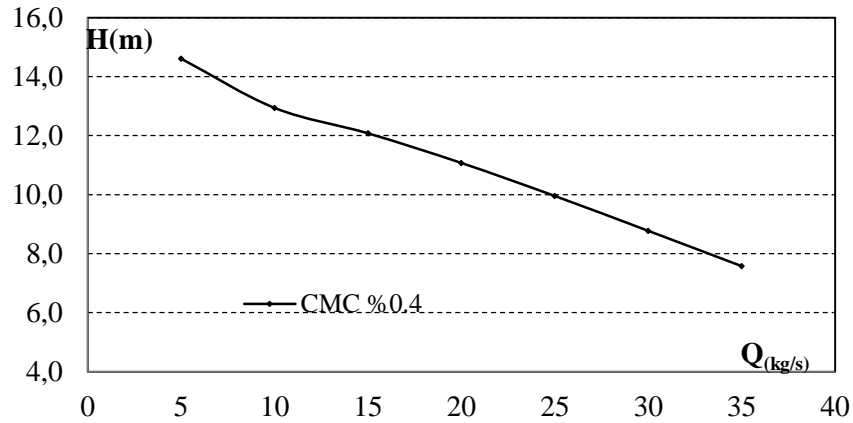


Şekil 4. 56. 1. pompa, 1450 rpm ve 30 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



Şekil 4. 57. 1. pompa, 1450 rpm ve 35 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

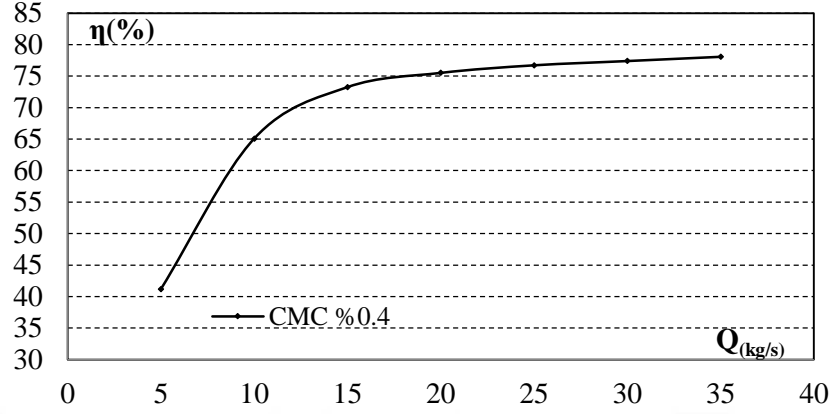
1. pompa, CMC %0.4 ile 1450 rpm de 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s ile yapılan nümerik analizlerde elde edilen basınç, hız ve viskozite dağılımları Şekiller 4.51-4.57'de görselleştirilmiştir. Maksimum basınç artan debi değeri için sırasıyla 1.257, 1.167, 1.294, 1.349, 1.269, 1.298 ve 1.484 bar, maksimum hız 17.1, 16.08, 15.72, 15.86, 14.93, 14.7 ve 16.89 m/s, maksimum viskozite değerleri ise 0.03987, 0.03266, 0.03577, 0.03672, 0.0329, 0.03109 ve 0.0319 Pa.s olarak elde edilmiştir. Santrifüj pompa içindeki basınç ve hız dağılımı su ve CMC %0.4 ile yapılan analizlerden elde veriler ile benzer çıkmıştır. Bu tezde rotor hızındaki artışla oluşan pompa basma yüksekliğindeki artışın suya göre pseudoplastik akışkanlarda literatüre uyumlu bir şekilde daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca pompadan pompaya bu durumun değişeceği de anlaşılmıştır. Bu tezde kullanılan 2. pompanın 1. pompa'ya göre viskoziteye karşı daha duyarlı olduğu görülmüştür. Aldi ve ark.(2017) 3 farklı kaolin (Newtonian olmayan) çözeltisinin kullanımının yarı açık bir santrifüj pompa performansı üzerine etkilerini deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Düşük konsantrasyonlarda pompa başında hafif bir düşüş varken yüksek konsantrasyonlarda ise su ile yapılan analizler daha yüksek pompa başı vermiştir. Düşük konsantrasyonlarda elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar birbiriyle benzer sonuçlar vermiştir.



**Şekil 4. 58.** 1. pompa, 1450 rpm'de CMC %0.4 için pompa basma yükseklikleri

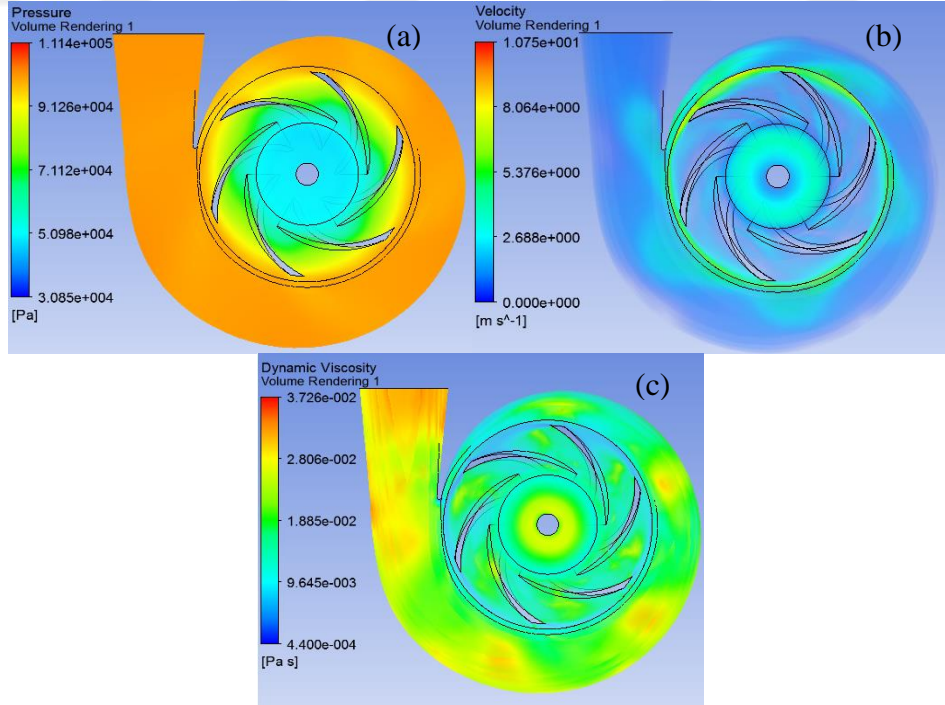
Şekil 4.58'de 1. pompa, CMC %0.4 için 1450 rpm'de 7 farklı debi değerinde yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği değerleri verilmiştir. Elde edilen pompa basma yüksekliği 14.6083, 12.9397, 12.0779, 11.0722, 9.9529, 8.7718 ve 7.575 m olarak artan debi değerlerine karşılık çıkmıştır. CMC %0.4 ile yapılan analizlerdeki pompa basma yüksekliği CMC %0.2 ile yapılanlara göre 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s

için sırasıyla %-1.1, %0.15, %0.14, %0.11, %-0.12, %-0.22 ve %-0.37 daha büyük çıkmıştır.

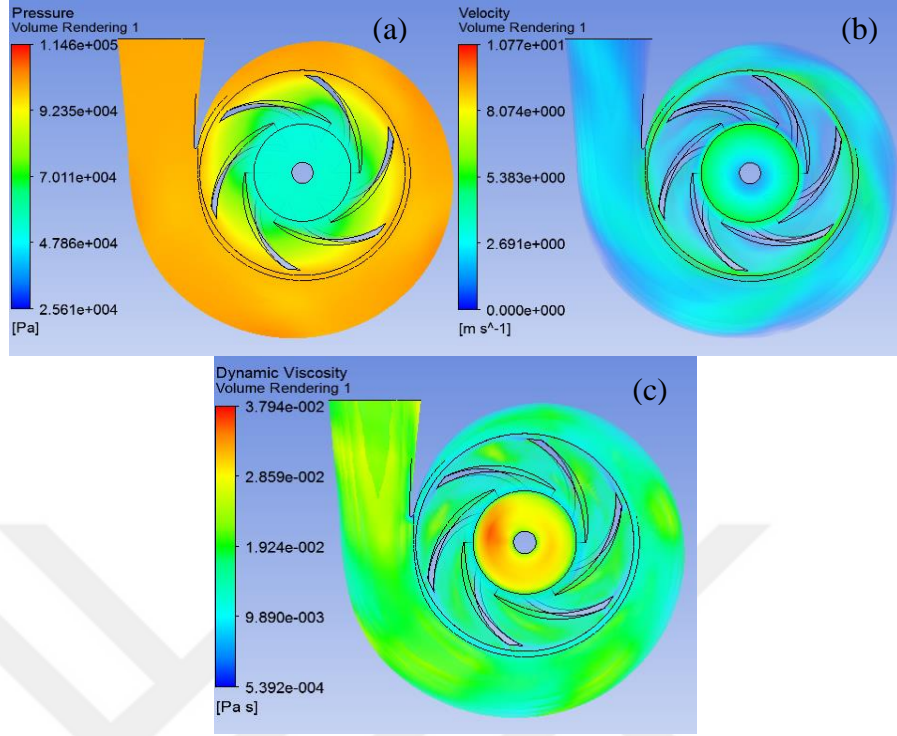


Şekil 4. 59. 1. pompa, 1450 rpm’de CMC %0.4 için verim değerleri

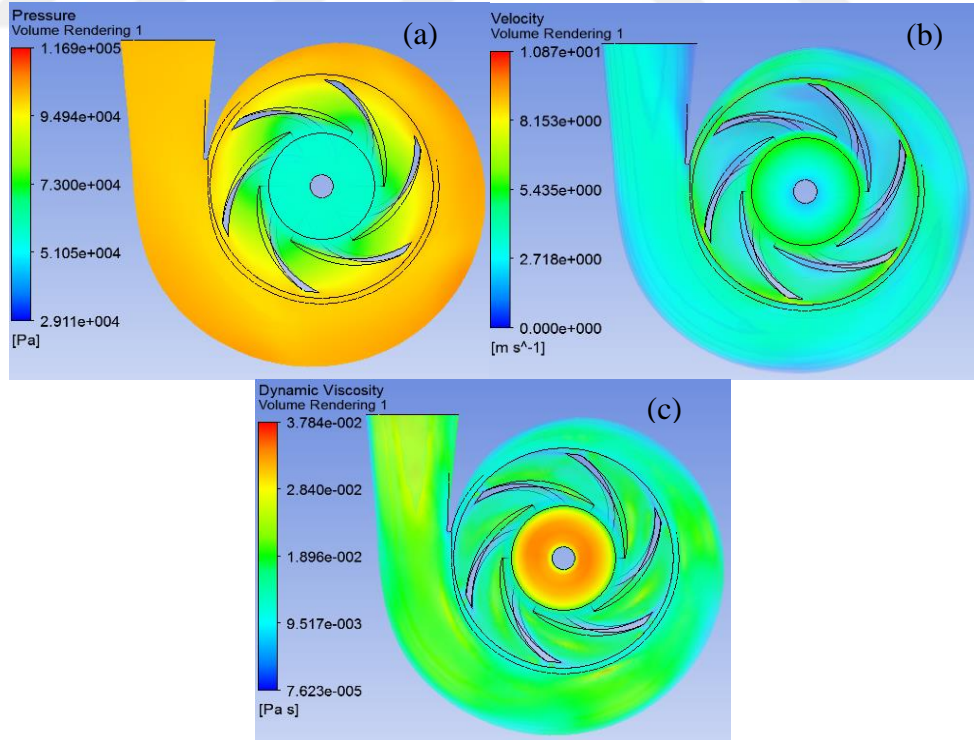
Şekil 4.59’da 1450 rpm ve 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s de 1. pompa ve CMC %0.2 için nümerik analizlerden elde edilen verim değerleri verilmiştir. 1. pompa’da CMC %0.4 için verim değerleri 5-35 kg/s arasındaki debi değerlerinde sırasıyla %41.1531, %65.069, %73.2496, %75.5153, %76.7156, %77.3941 ve %78.069 çıkmıştır.



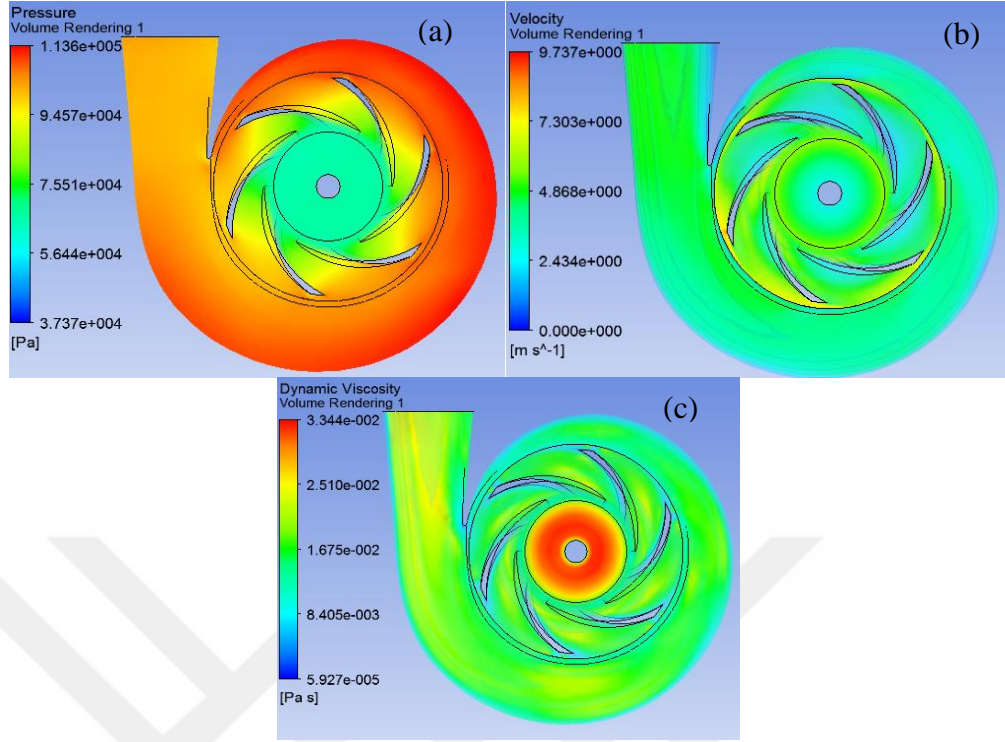
Şekil 4. 60. 1. pompa, 1000 rpm ve 5 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



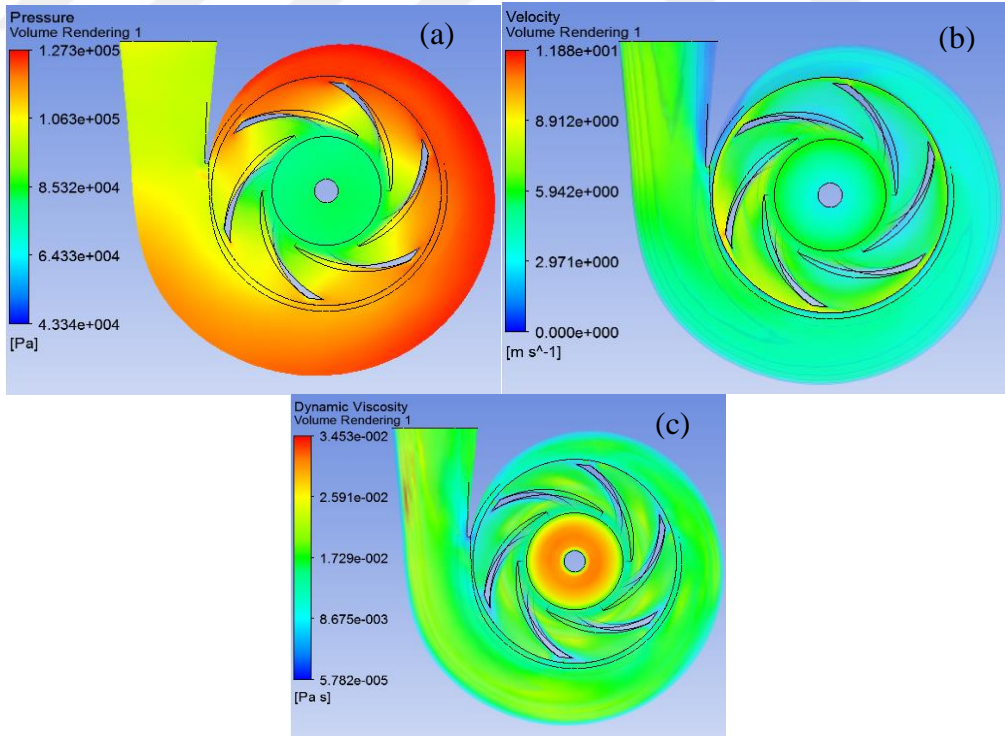
Şekil 4. 61. 1. pompa, 1000 rpm ve 10 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



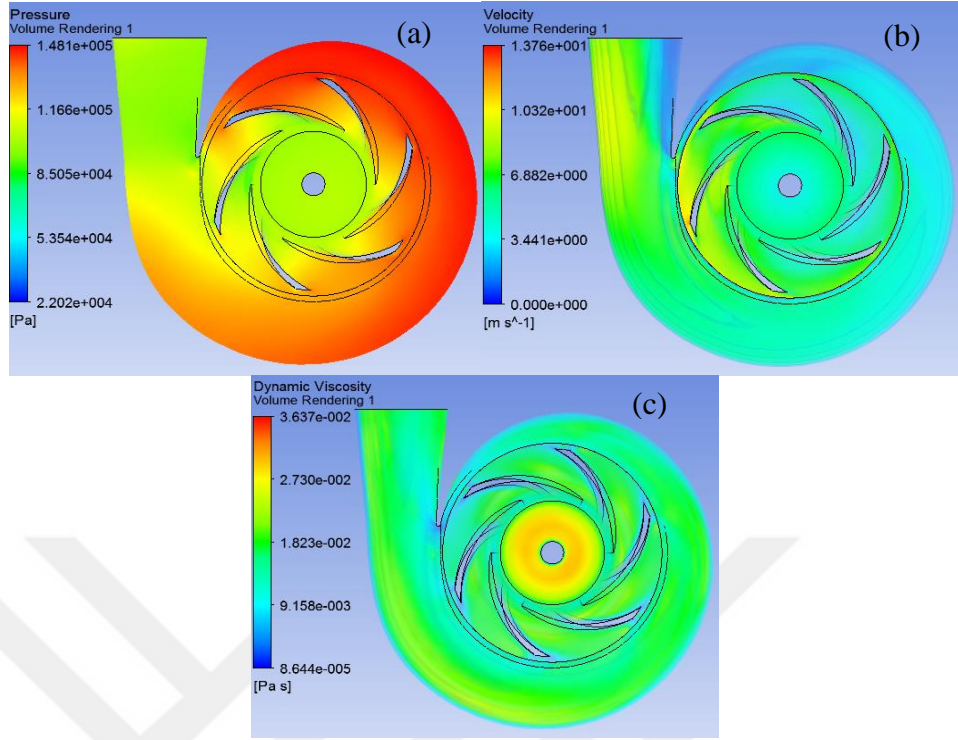
Şekil 4. 62. 1. pompa, 1000 rpm ve 15 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



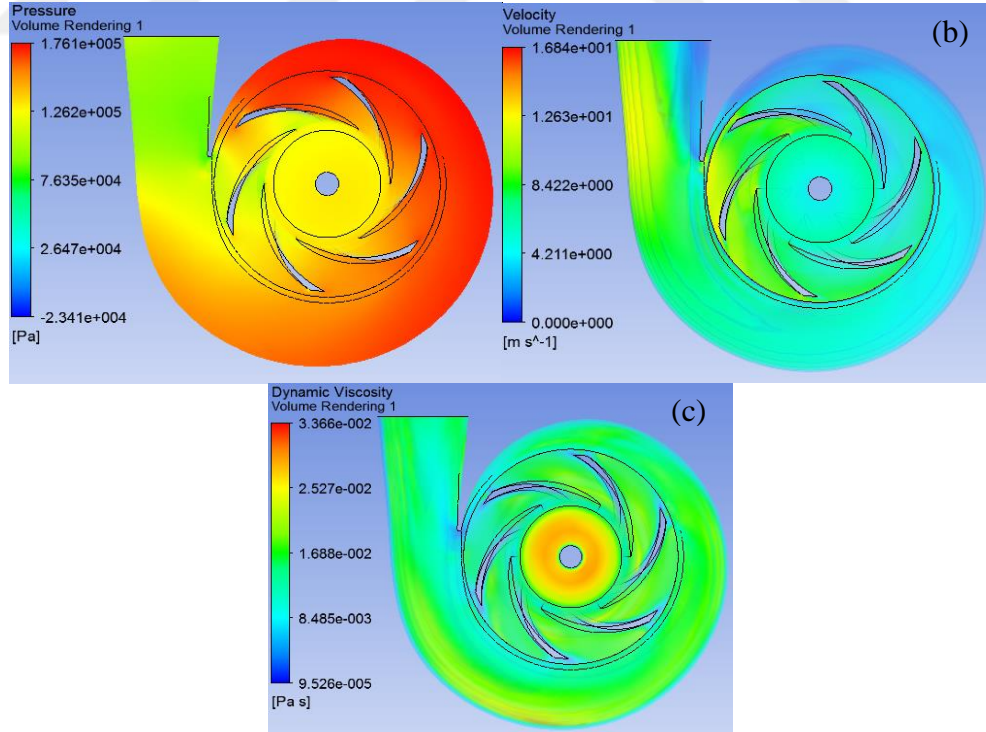
**Şekil 4. 63.** 1. pompa, 1000 rpm ve 20 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



**Şekil 4. 64.** 1. pompa, 1000 rpm ve 25 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

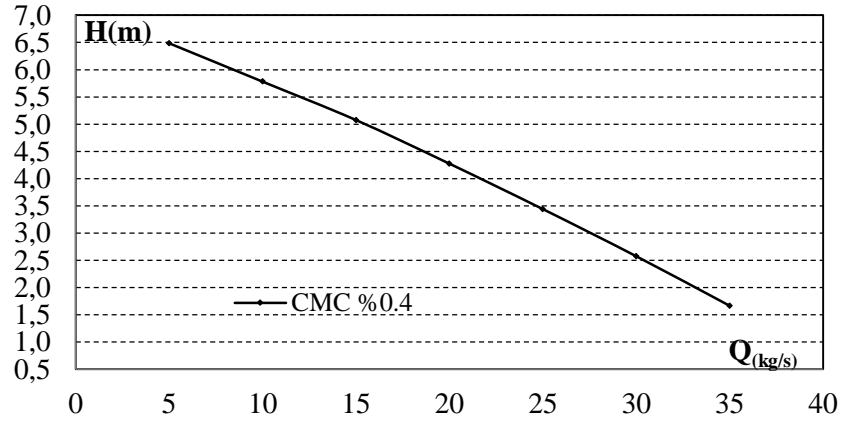


**Şekil 4. 65.** 1. pompa, 1000 rpm ve 30 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



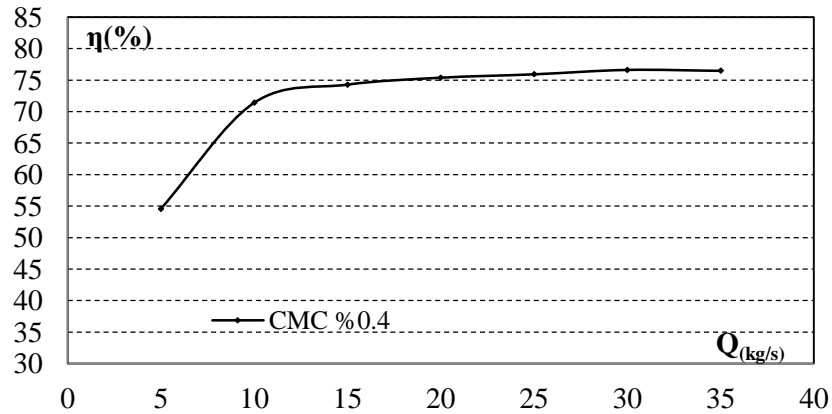
**Şekil 4. 66.** 1. pompa, 1000 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

1. pompa, CMC %0.4 ile 1000 rpm'de 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s debi değerlerinde elde edilen basınç, hız ve viskozite dağılımları Şekiller 4.60-4.66'da görselleştirilmiştir. Maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.114, 1.146, 1.169, 1.136, 1.273, 1.481 ve 1.761 bar çıkmıştır. Maksimum hız değerleri 10.75, 10.77, 10.87, 9.737, 11.88, 13.86 ve 16.84 m/s çıkarken, maksimum viskozite değerleri ise 0.03726, 0.03794, 0.03784, 0.0344, 0.03453, 0.03637 ve 0.03366 Pa.s olarak 5-35 kg/s'de elde edilmiştir.



**Şekil 4. 67.** 1. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.4 için pompa basma yükseklikleri

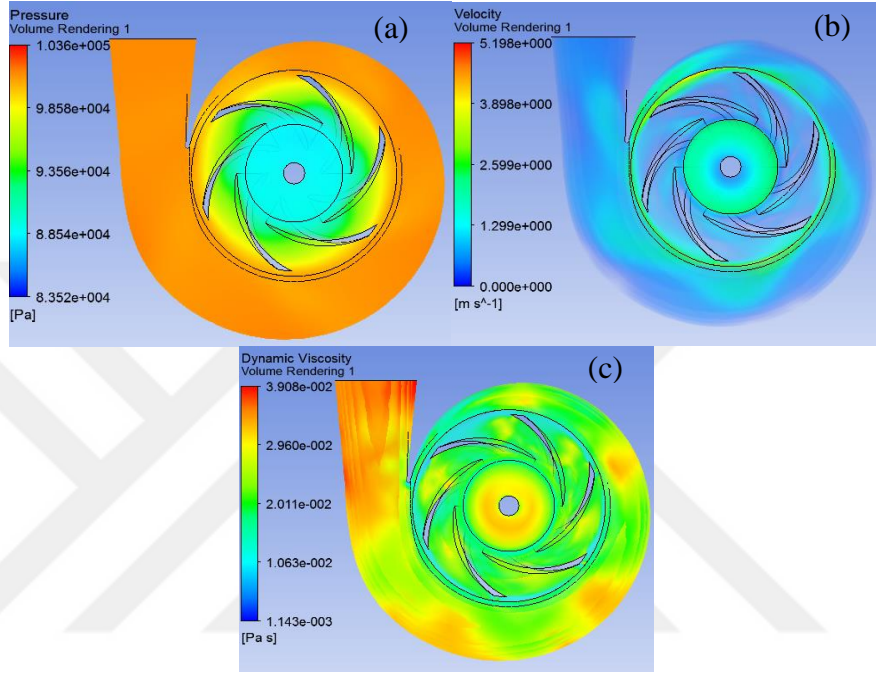
Şekil 4.67'da 1. pompa için 1000 rpm'de 7 farklı debi değerinde CMC %0.4 ile yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği değerleri verilmiştir. Pompa basma yüksekliği değerleri 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s için sırasıyla 6.4878, 5.7828, 5.0767, 4.2749, 3.44, 2.574 ve 1.6633 m çıkmıştır. 1. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.4 ile yapılan analizlerdeki pompa basma yüksekliği CMC %0.2 ile yapılanlara göre 5-35 kg/s için sırasıyla %-0.33, %0.07, %-0.06, %-0.28, %-0.59, %-1.03 ve %-2.08 daha büyük çıkmıştır.



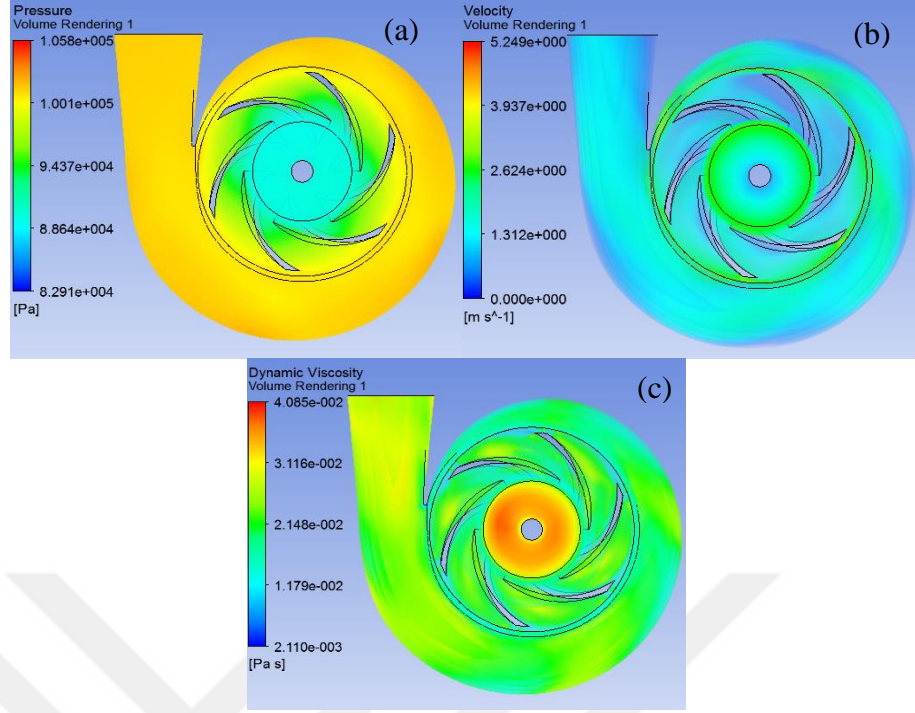
**Şekil 4. 68.** 1. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.4 için verim değerleri



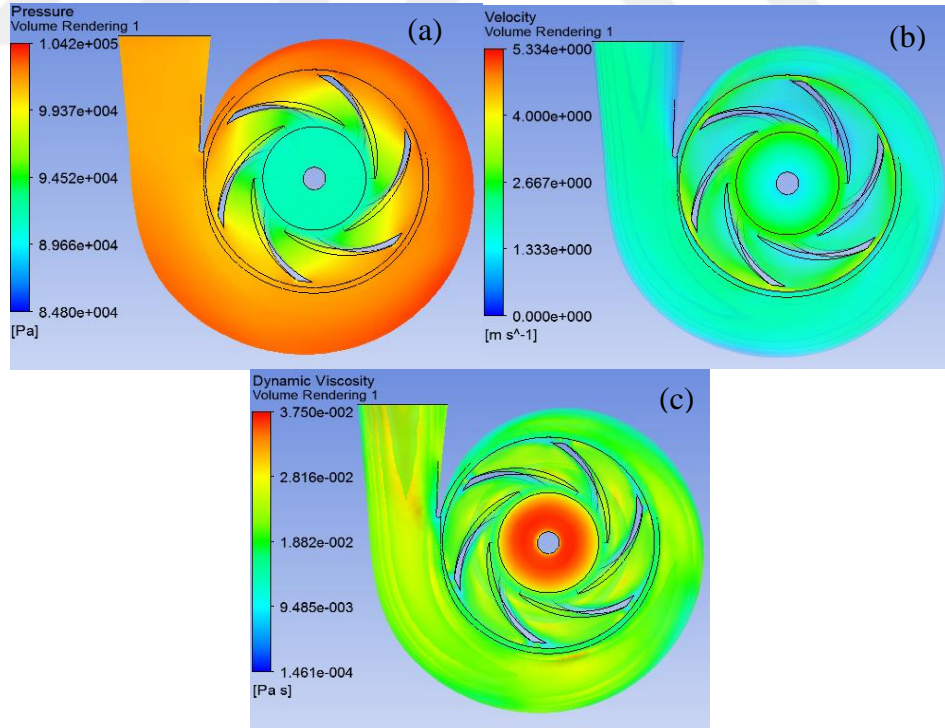
Şekil 4.68’de 1000 rpm ve 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 kg/s’de 1. pompa ve CMC %0.4 için nümerik analizlerden elde edilen verim değerleri verilmiştir. 1. pompa için 1000 rpm’de verim değerleri 5-35 kg/s arasında CMC %0.4 için sırasıyla %54.5647, %71.4061, %74.2930, %75.3889, %75.9297, %76.6285 ve %76.4785 çıkmıştır. 15 kg/s de verim değeri CMC %0.4 için %74.2930 iken CMC %0.2 için %74.6909 çıkmıştır.



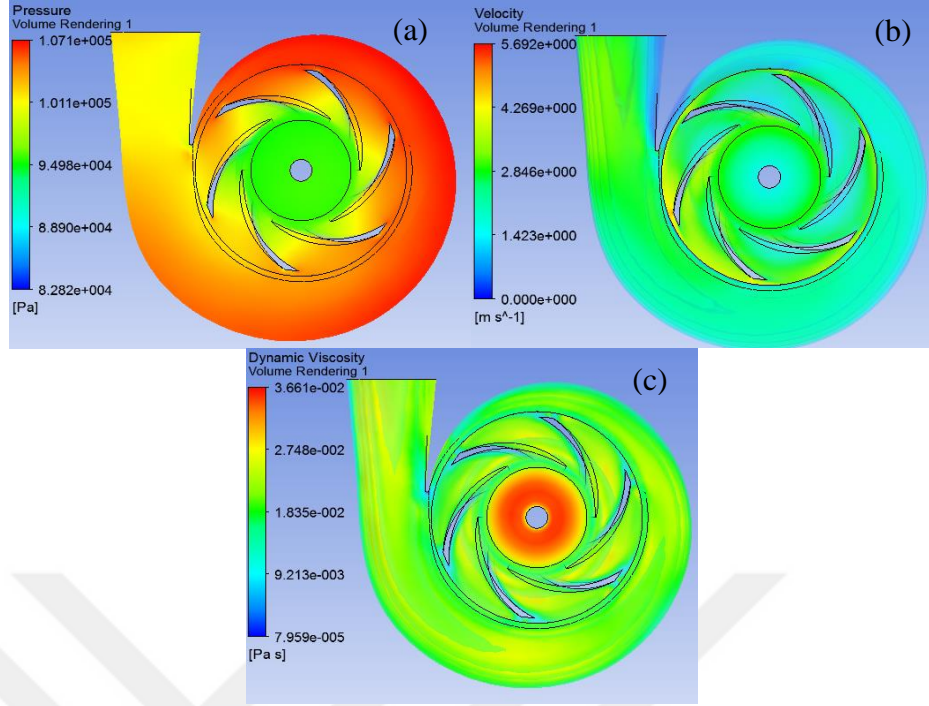
Şekil 4. 69. 1. pompa, 500 rpm ve 3 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



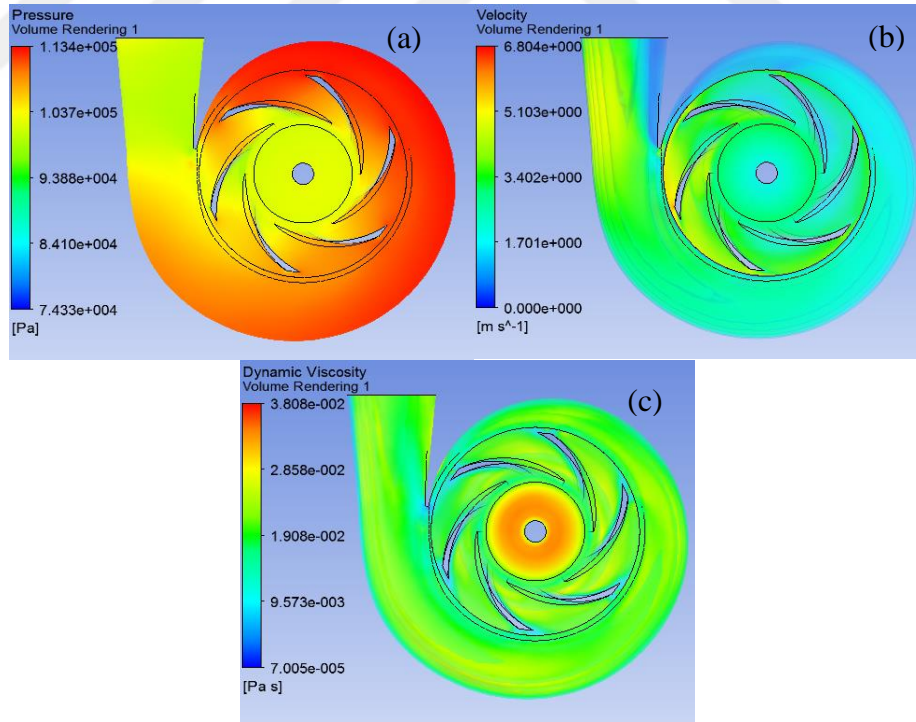
Şekil 4. 70. 1. pompa, 500 rpm ve 6 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



Şekil 4. 71. 1. pompa, 1000 rpm ve 9 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

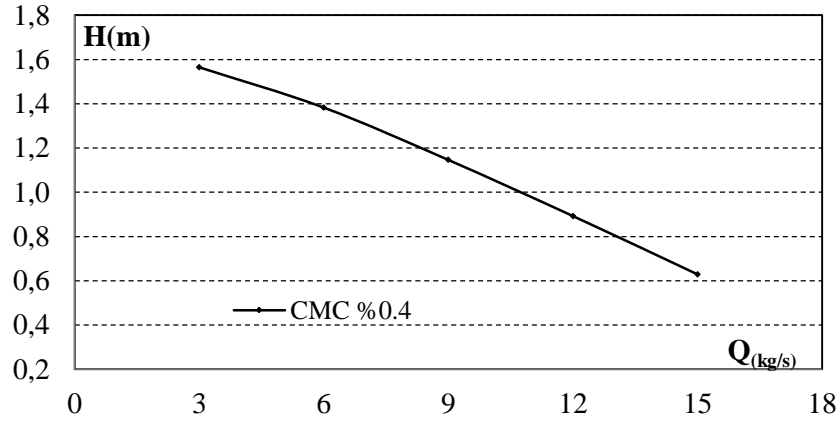


Şekil 4. 72. 1. pompa, 500 rpm ve 12 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



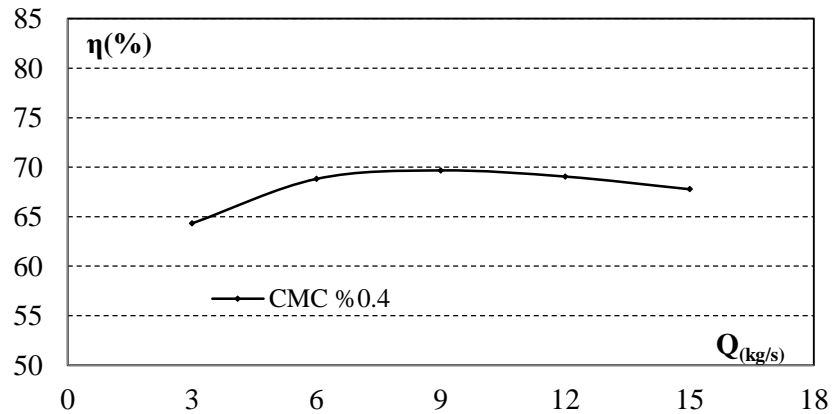
Şekil 4. 73. 1. pompa, 500 rpm ve 15 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

Şekiller 4.69-4.73 1. pompa, CMC %0.4 ile 500 rpm’de 3, 6, 9, 12 ve 15 kg/s ile yapılan analizlerde elde edilen basınç ve hız dağılımı görselleridir. Maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.036, 1.058, 1.042, 1.071 ve 1.134 bar çıkarken, maksimum hız değerleri 5.198, 5.249, 5.334, 5.692 ve 8.804 m/s çıkmıştır. Maksimum viskozite değerleri ise 0.03908, 0.04085, 0.0375, 0.03661 ve 0.03808 Pa.s olarak 500 rpm ve 3-15 kg/s debi aralığında CMC %0.2 ile 1. pompa’da yapılan nümerik analizlerden elde edilmiştir.



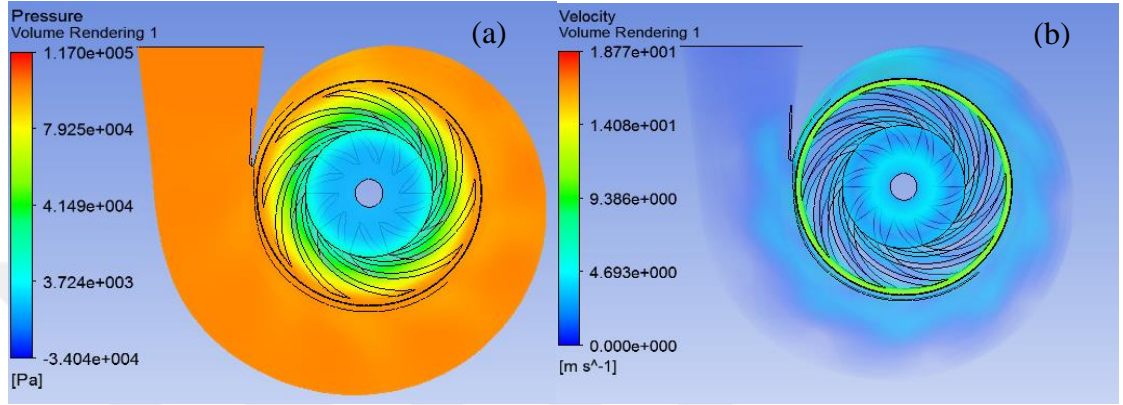
Şekil 4. 74. 1. pompa, 500 rpm’de CMC %0.4 için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.74’te 1.pompa için 500 rpm’de 3-15 kg/s debi aralığımda CMC %0.4 ile yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği değerleri verilmiştir. 500 rpm’de CMC %0.4 için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri 3-15 kg/s için sırasıyla 1.5658, 1.3828, 1.1461, 0.8924 ve 0.6287 m çıkmıştır. 1. pompa için 500 rpm’de 15 kg/s de CMC %0.4 ile elde edilen basma yüksekliği değeri 0.6287 m çıkarken CMC %0.2 ile elde edilen basma yüksekliği değeri 0.6374 m çıkmıştır.

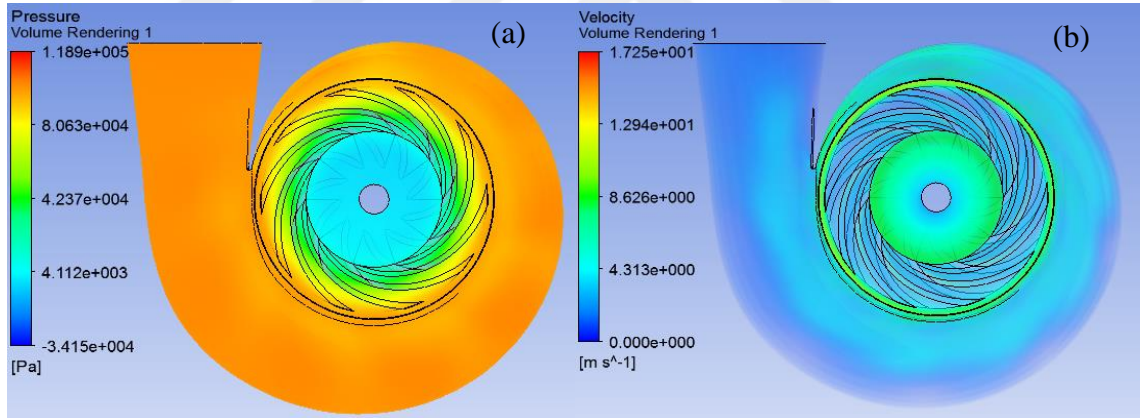


Şekil 4. 75. 1. pompa, 500 rpm’de CMC %0.4 için verim değerleri

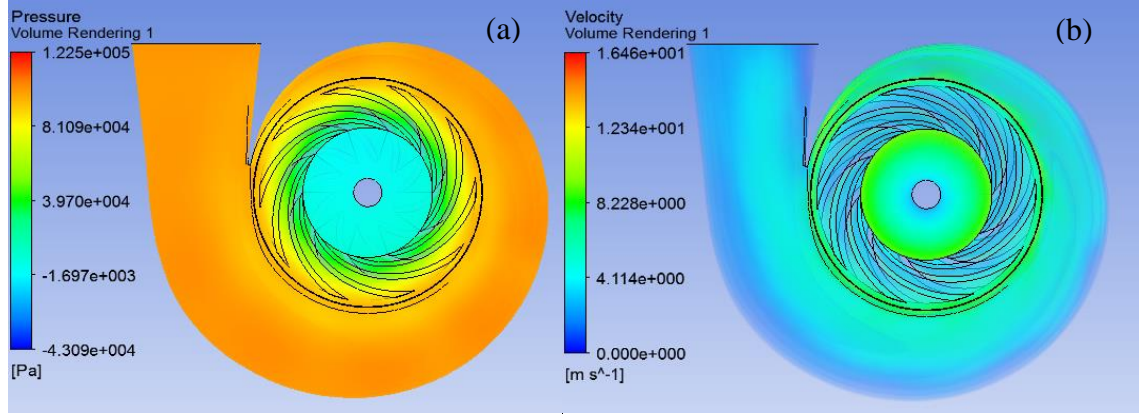
Şekil 4.75'te 500 rpm ve 3, 6, 9, 12 ve 15 kg/s'de 1. pompa ve CMC %0.4 için nümerik analizlerden elde edilen verim değerleri verilmiştir. 1. pompa için 500 rpm'de CMC %0.4 için verim değerleri 3-15 kg/s arasındaki debi değerlerinde sırasıyla %55.6212, %66.6859, %67.6327, %66.7995 ve %64.5502 çıkmıştır. 15 kg/s verim değeri 1000 rpm göre 500 rpm'de yaklaşık %13.11 düşmüştür.



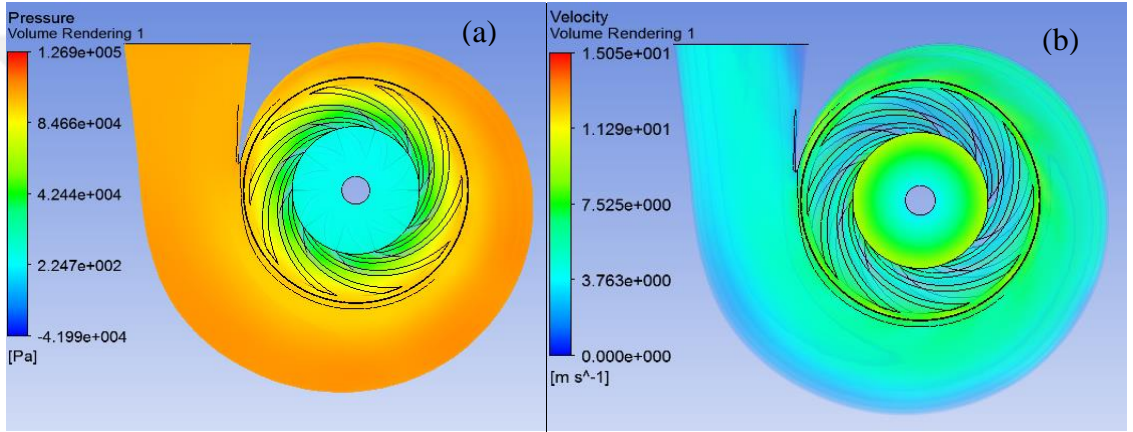
Şekil 4. 76. 2. pompa, 1450 rpm ve 5 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



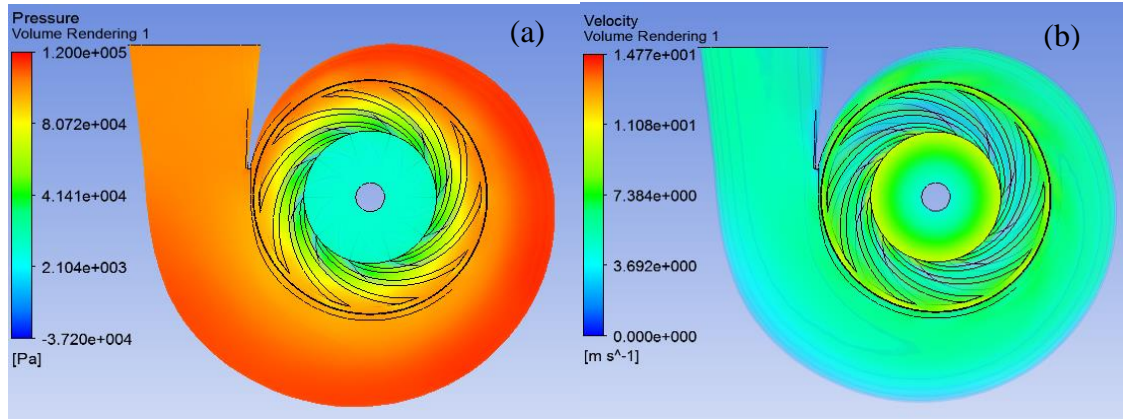
Şekil 4. 77. 2. pompa, 1450 rpm ve 15 kg/s'de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



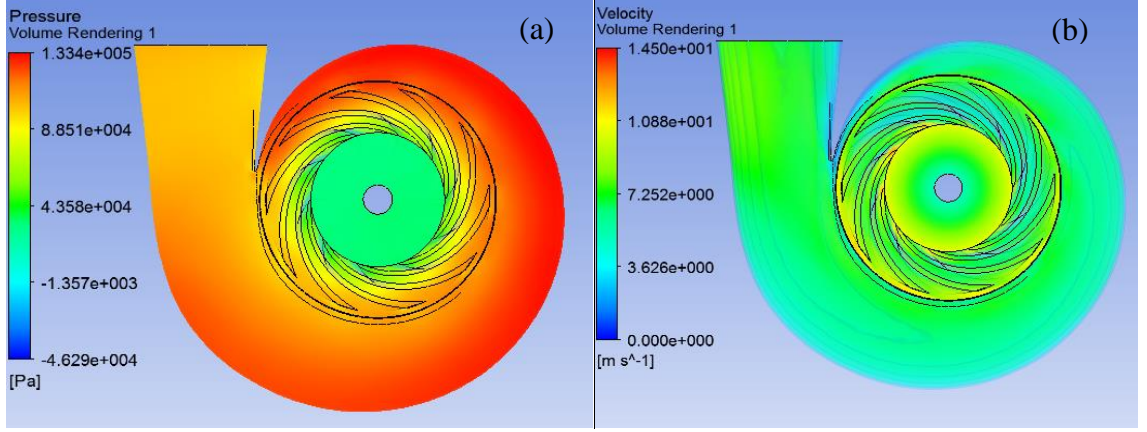
Şekil 4. 78. 2. pompa, 1450 rpm ve 25 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



Şekil 4. 79. 2. pompa, 1450 rpm ve 35 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

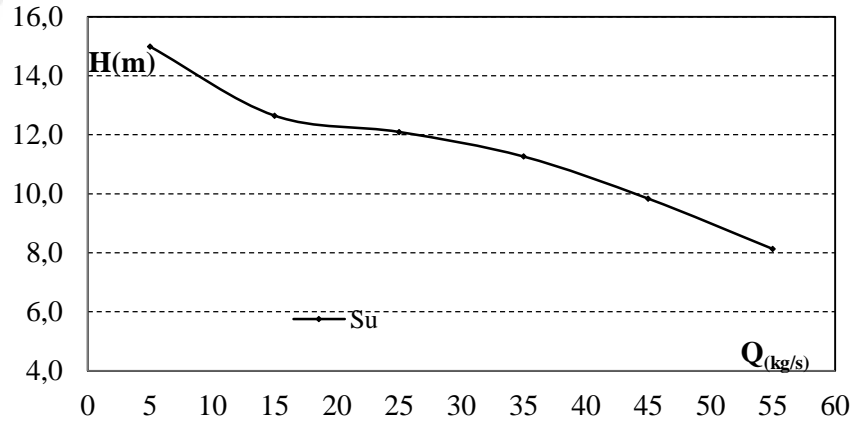


Şekil 4. 80. 2. pompa, 1450 rpm ve 45 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



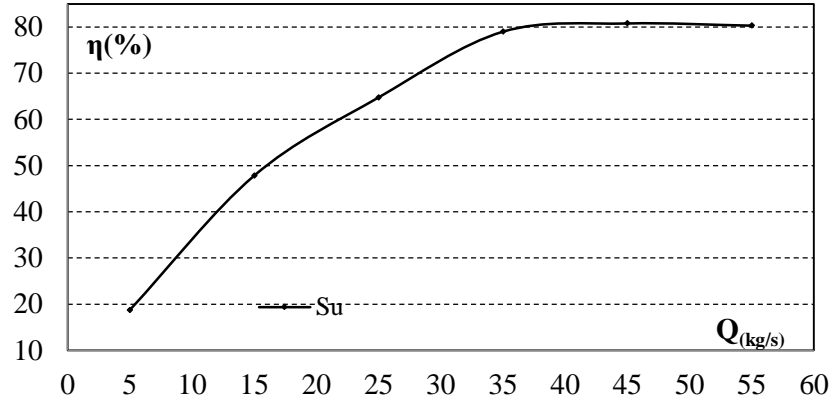
**Şekil 4. 81.** 2. pompa, 1450 rpm ve 55 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

Şekiller 4.76-4.81 2. pompa’da su ile 1450 rpm de 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s ile yapılan nümerik analizlerde elde edilen basınç ve hız dağılımı görselleridir. Maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.170, 1.189, 1.225, 1.269, 1.2 ve 1.334 bar çıkmıştır. Maksimum hız değerleri ise 18.77, 17.25, 16.46, 15.05, 14.77 ve 14.5 m/s nümerik analizlerden elde edilmiştir. 2. pompa için santrifüj pompadaki basınç ve hız dağılımı 1. pompa için elde edilen sonuçlarla benzer çıkmıştır.



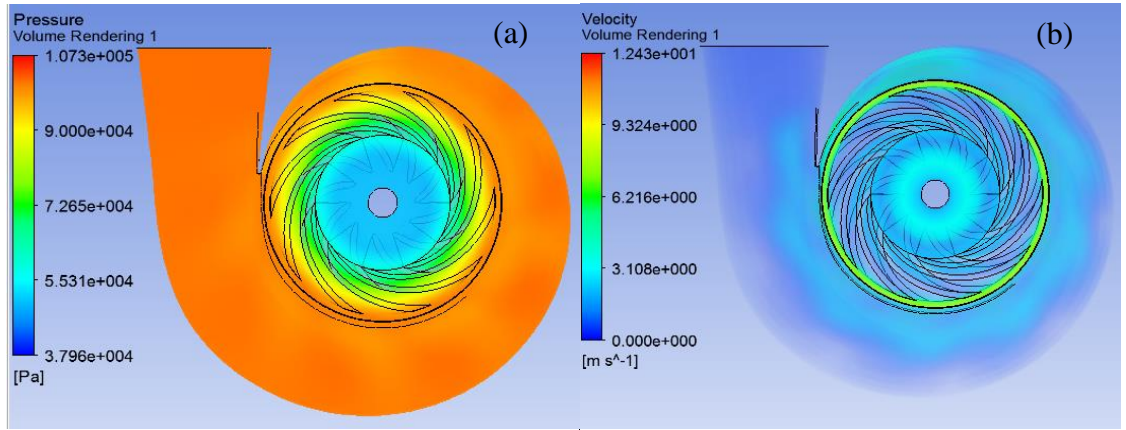
**Şekil 4. 82.** 2. pompa, 1450 rpm’de su için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.82’de 2. pompa için 1450 rpm’de 6 farklı debi değerinde su ile yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği değerleri verilmiştir. Pompa basma yüksekliği değeri Şekil 4.82’de görüldüğü üzere sürekli düşmüştür. 2.pompa için 1450 rpm’de ve su için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri 5-55 kg/s için sırasıyla 14.9837, 12.6462, 12.0941, 11.2620, 9.8374 ve 8.1341 m çıkmıştır.



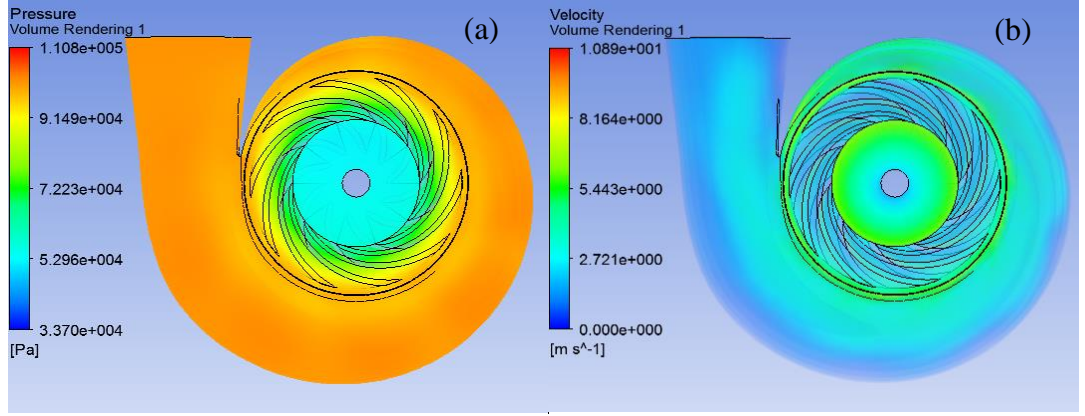
**Şekil 4. 83.** 2. pompa, 1450 rpm’de su için verim değerleri

Şekil 4.83’te 1450 rpm ve 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s’de 2. pompa ve su için nümerik analizlerden elde edilen verim değerleri verilmiştir. Genel olarak bilinen ve su 1450 rpm’de her iki pompayla yapılan analizde de görüldüğü gibi pompa verim değeri en küçük debide 0% dan başlar dizayn noktasına yakın yerlerde maksimum değerine ulaşır ve sonra düşmeye başlar. 1. pompa’da verim değerleri 5-55 kg/s arasındaki debi değerlerinde sırasıyla %18.7345, %47.8251, %64.7565, %78.999, %80.7802 ve %80.3038 m çıkmıştır.

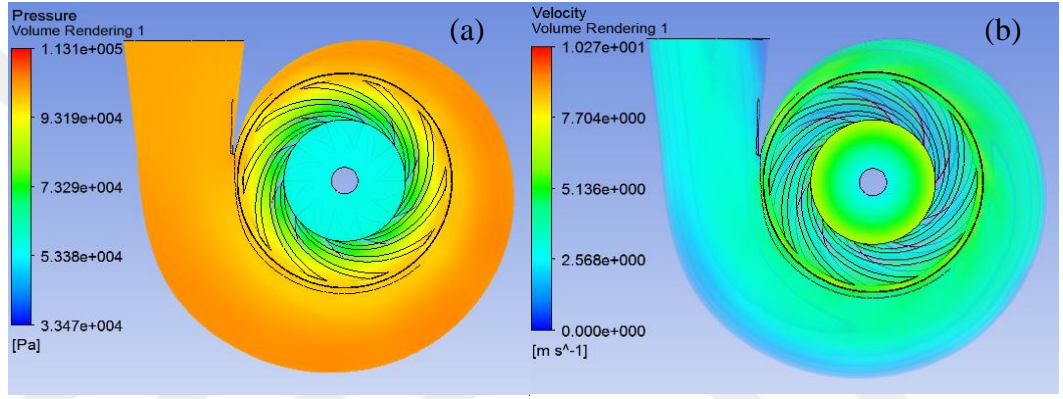


**Şekil 4. 84.** 2. pompa, 1000 rpm ve 5 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

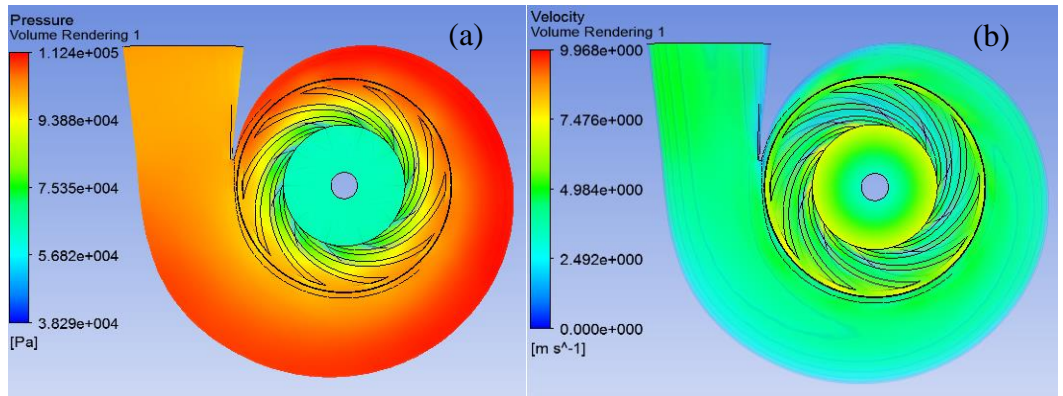




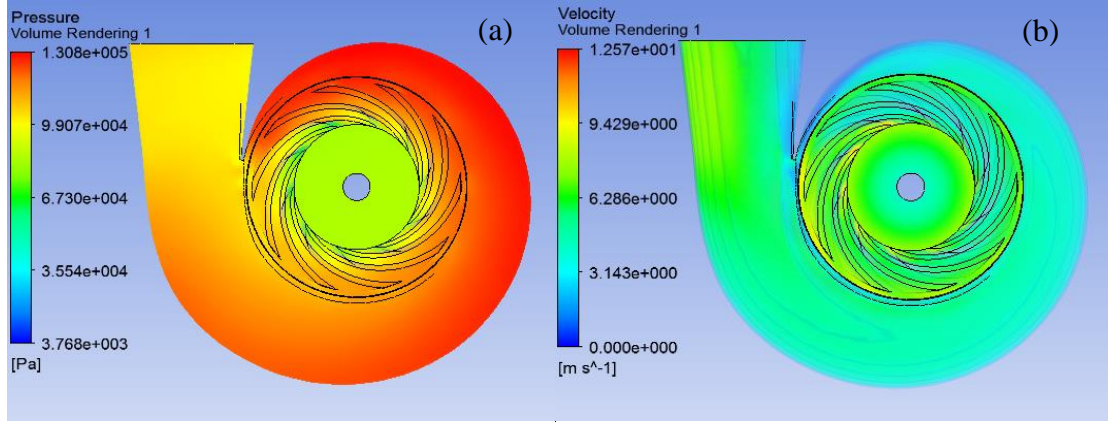
Şekil 4. 85. 2. pompa, 1000 rpm ve 15 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



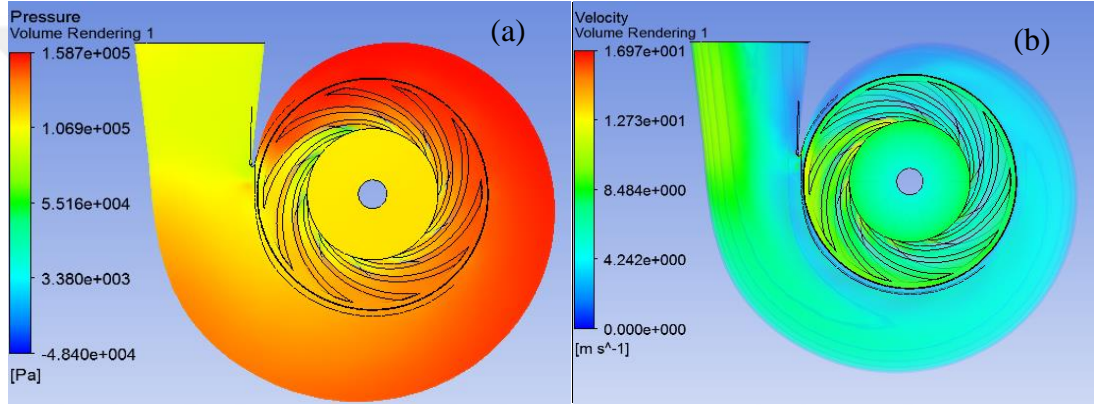
Şekil 4. 86. 2. pompa, 1000 rpm ve 25 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



Şekil 4. 87. 2. pompa, 1000 rpm ve 35 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

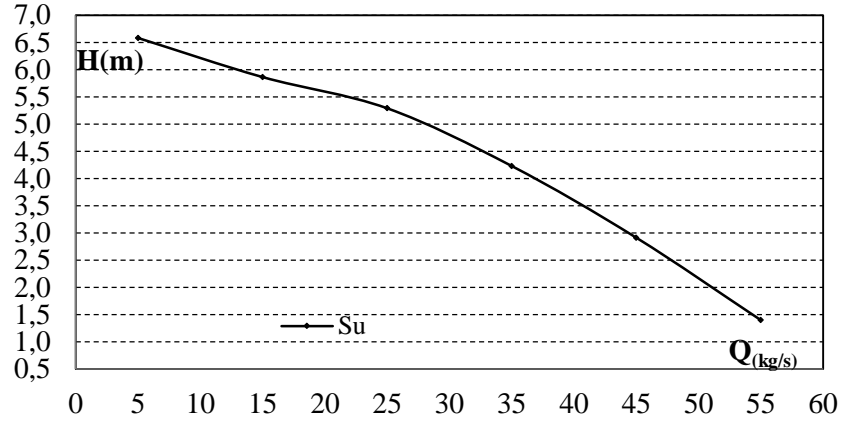


Şekil 4. 88. 2. pompa, 1000 rpm ve 45 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



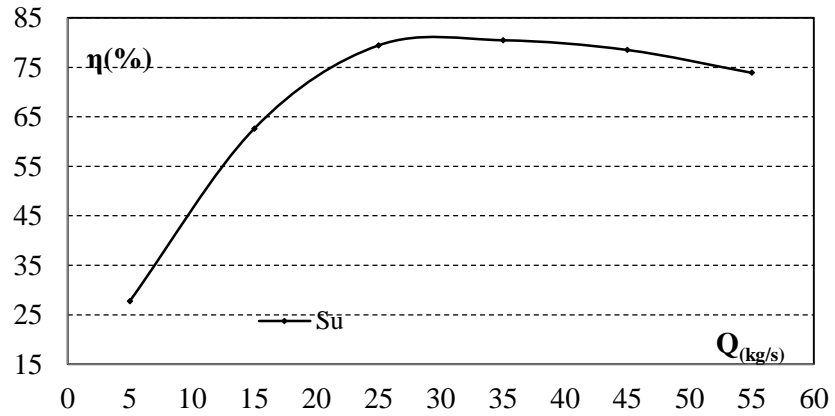
Şekil 4. 89. 2. pompa, 1000 rpm ve 55 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

1. pompa, su ile 1000 rpm’de 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s ile yapılan nümerik analizlerde elde edilen basınç ve hız dağılımları Şekiller 4.84-4.89’da görselleştirilmiştir. Maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.073, 1.108, 1.131, 1.124, 1.308 ve 1.587 bar, maksimum hız değerleri ise 12.43, 10.89, 10.27, 9.968, 12.57 ve 16,97 m/s olarak elde edilmiştir.



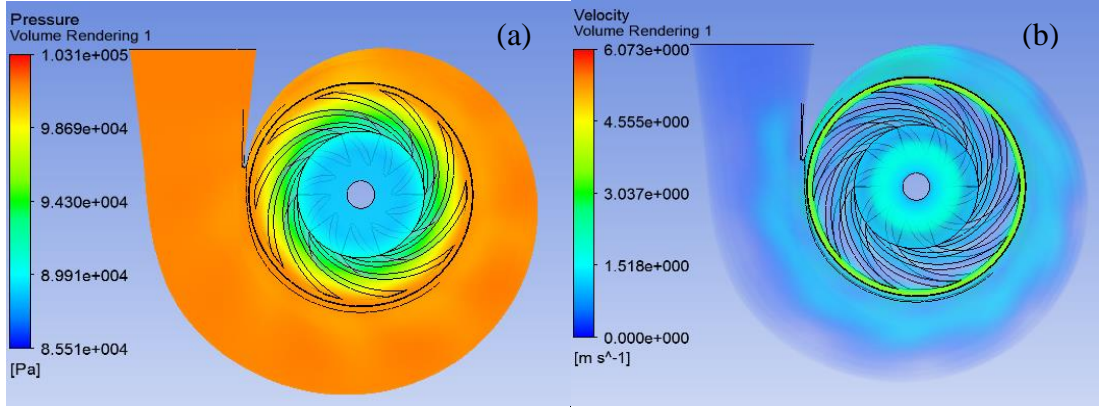
**Şekil 4. 90.** 2. pompa, 1000 rpm’de su için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.90’da 1. pompa için 1000 rpm’de 6 farklı debi değerinde su ile yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği değerleri verilmiştir. 1000 rpm’de su için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s için sırasıyla 6.5802, 5.8626, 5.2897, 4.2302, 2.9146 ve 1.4014 m çıkmıştır. 1000 rpm için elde edilen pompa basma yüksekliğinin 1450 rpm ile elde edilen basma yüksekliğinden 5, 15-55 kg/s için sırasıyla %44, %46.3, %43.7, %37.56, %29.6 ve %17.23 büyüklüğüne tekabül ettiği anlamına gelmektedir.

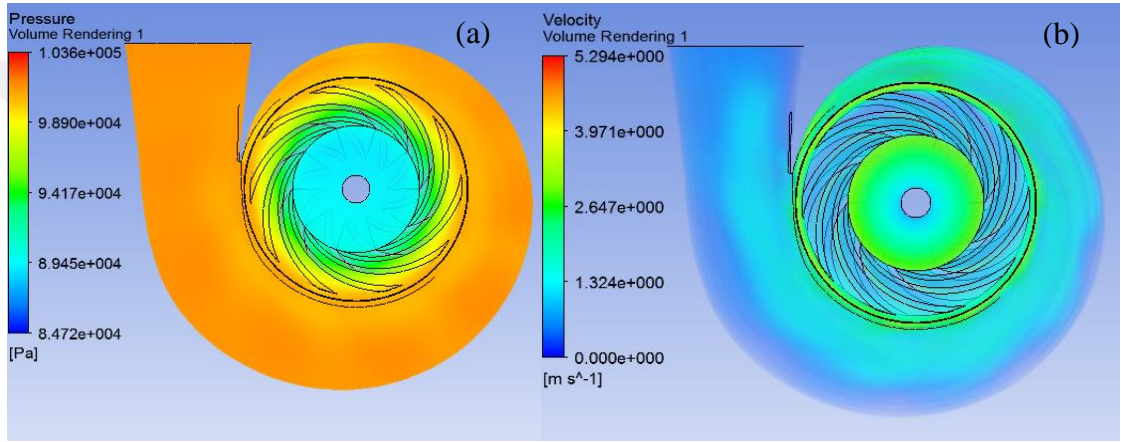


**Şekil 4. 91.** 2. pompa, 1000 rpm’de su için verim değerleri

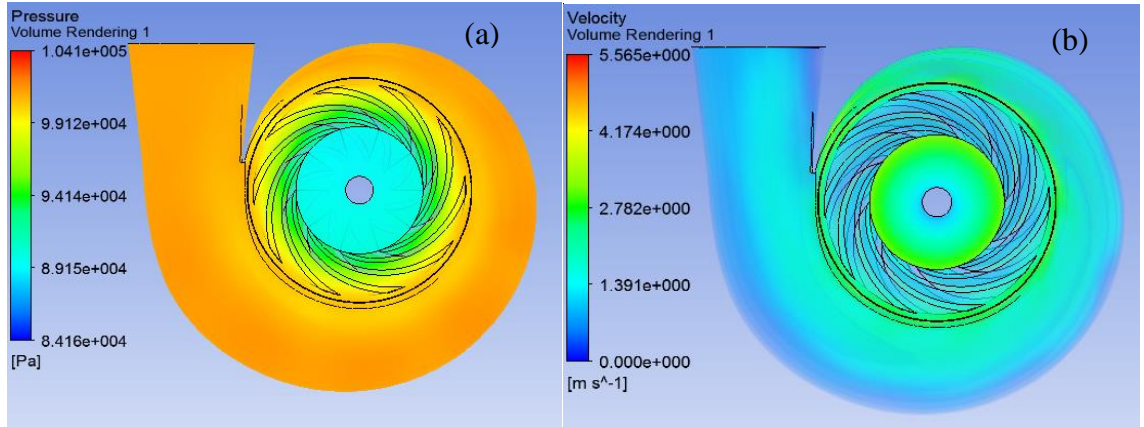
Şekil 4.91’de 1000 rpm, 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s’de 2.pompa ve su için nümerik analizlerden elde edilen verim eğrisidir. 2. pompa, 1000 rpm’de verim değerleri 5-55 kg/s arasındaki debi değerlerinde sırasıyla %27.7595, %62.6052, %79.4494, %80.4822, %78.5228 ve %73.9035 çıkmıştır.



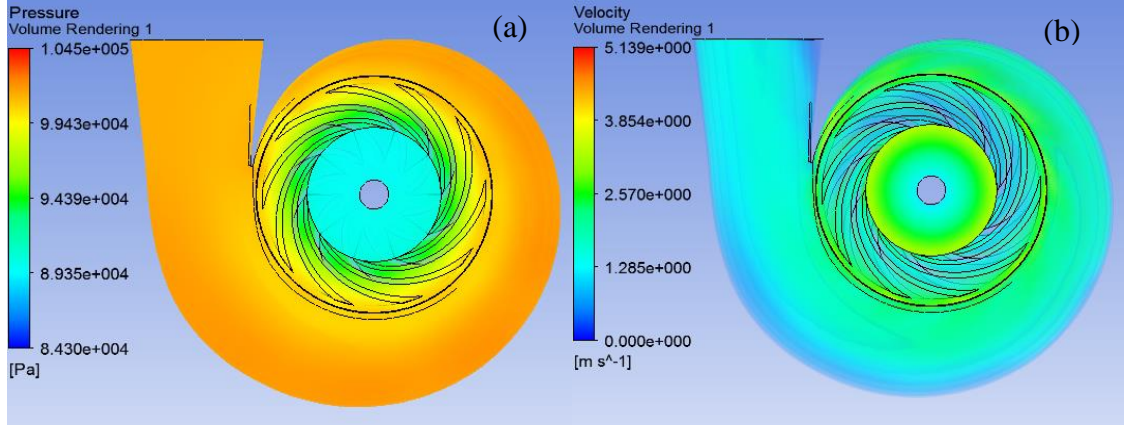
Şekil 4. 92. 2. pompa, 500 rpm ve 3 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



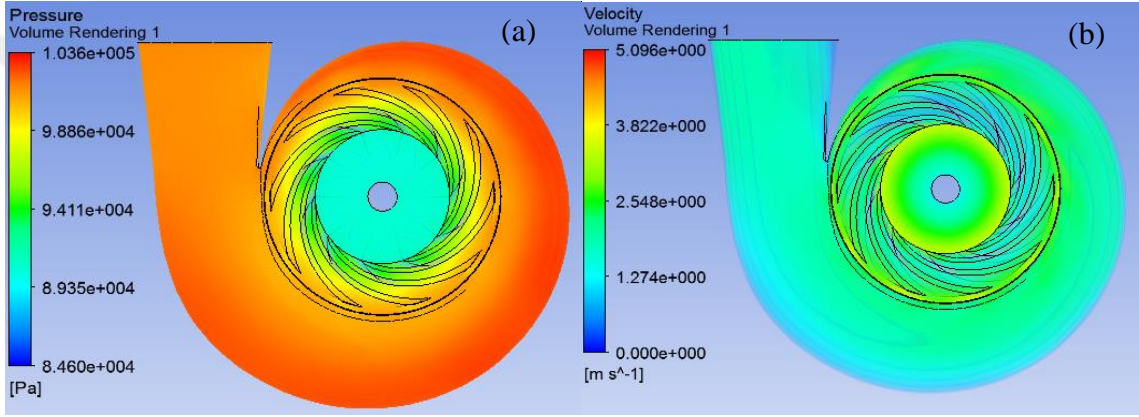
Şekil 4. 93. 2. pompa, 500 rpm ve 6 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



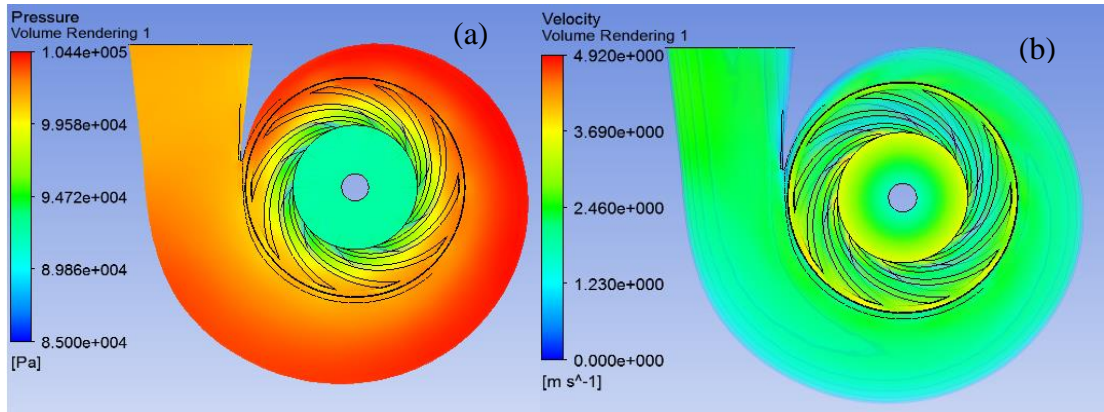
Şekil 4. 94. 2. pompa, 500 rpm ve 9 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



Şekil 4. 95. 2. pompa, 500 rpm ve 12 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



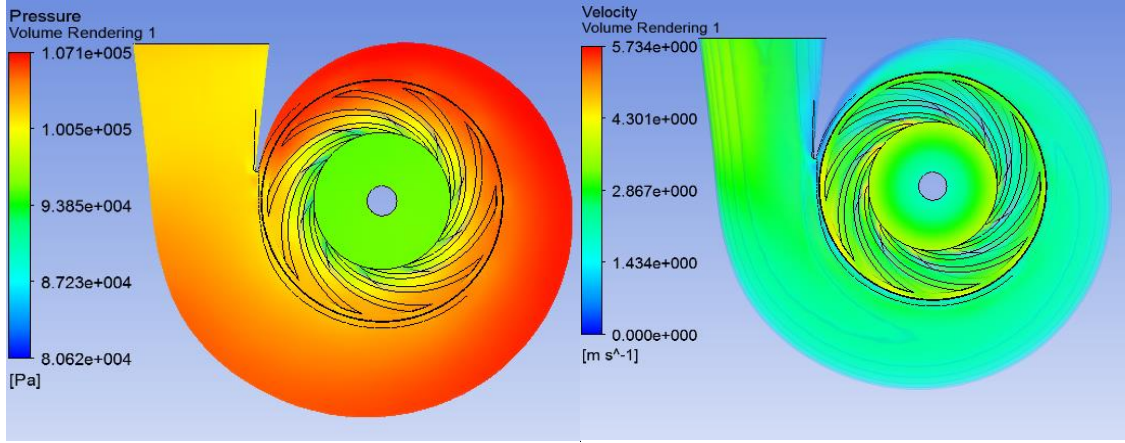
Şekil 4. 96. 2. pompa, 500 rpm ve 15 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı



Şekil 4. 97. 2. pompa, 500 rpm ve 18 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

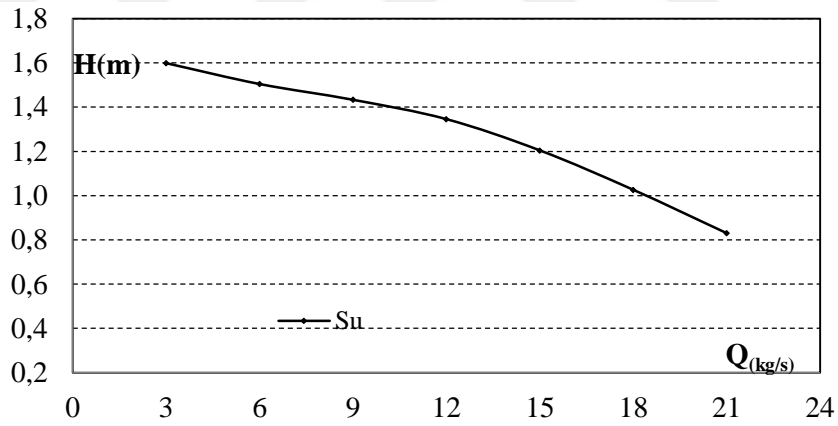
(a)

(b)



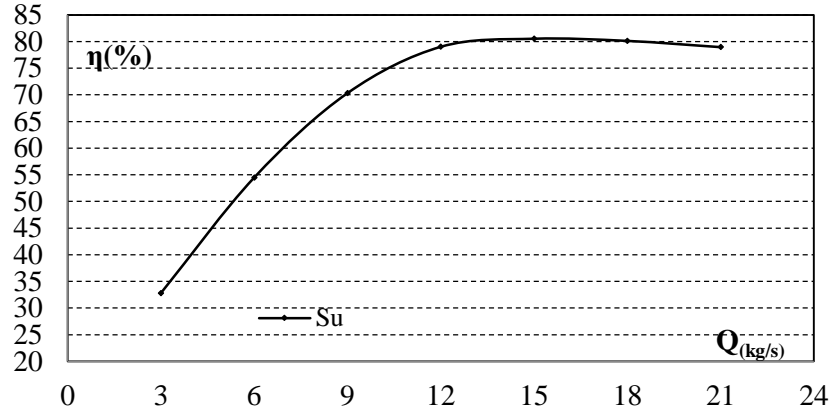
**Şekil 4. 98.** 2. pompa, 500 rpm ve 21 kg/s’de su için (a) basınç ve (b) hız dağılımı

Şekiller 4.92-4.98’de 1. pompa, su ile 500 rpm’de 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21 kg/s ile yapılan nümerik analizlerde elde edilen basınç ve hız dağılımı görselleridir. Maksimum basınç değerleri 1.031, 1.038, 1.041, 1.045, 1.036, 1.044 ve 1.071 bar, maksimum hız değerleri ise 6.073, 5.294, 5.565, 5.139, 5.096, 4.92 ve 5.734 m/s olarak yapılan nümerik analizlerden elde edilmiştir.



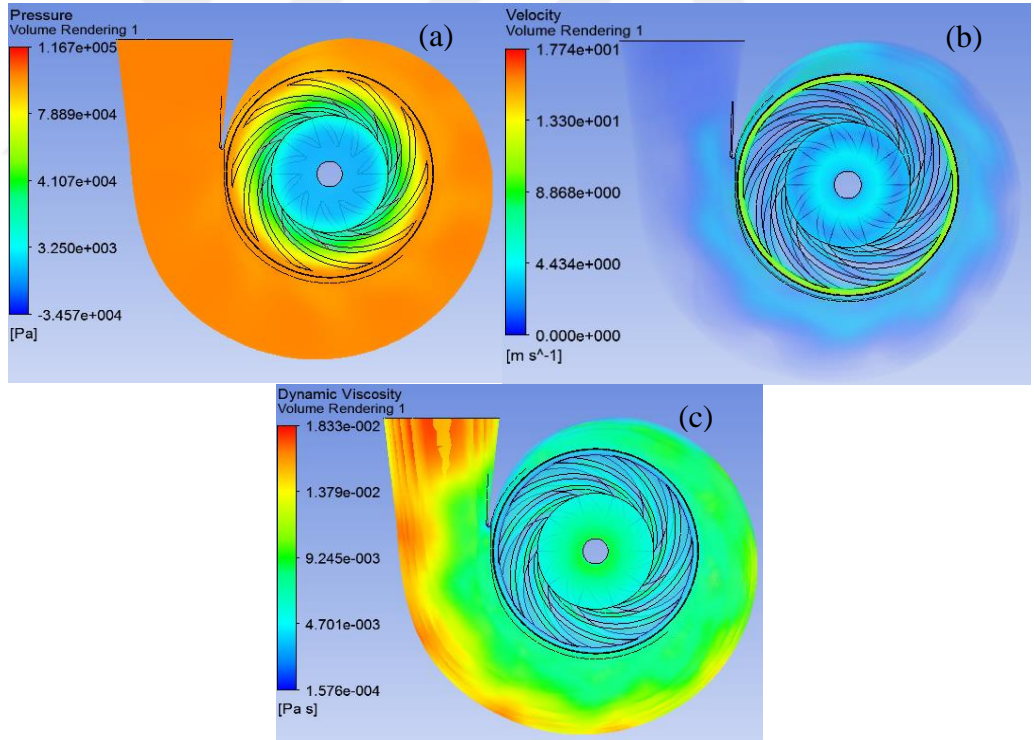
**Şekil 4. 99.** 2. pompa, 500 rpm’de su için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.99’da 2. pompa için 500 rpm’de 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21 kg/s debi değerinde su ile yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği eğrisi elde edilmiştir. 500 rpm’de su için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri 3-21 kg/s için sırasıyla 1.5987, 1.5044, 1.4331, 1.3456, 1.2043, 1.0261 ve 0.8299 m çıkmıştır.

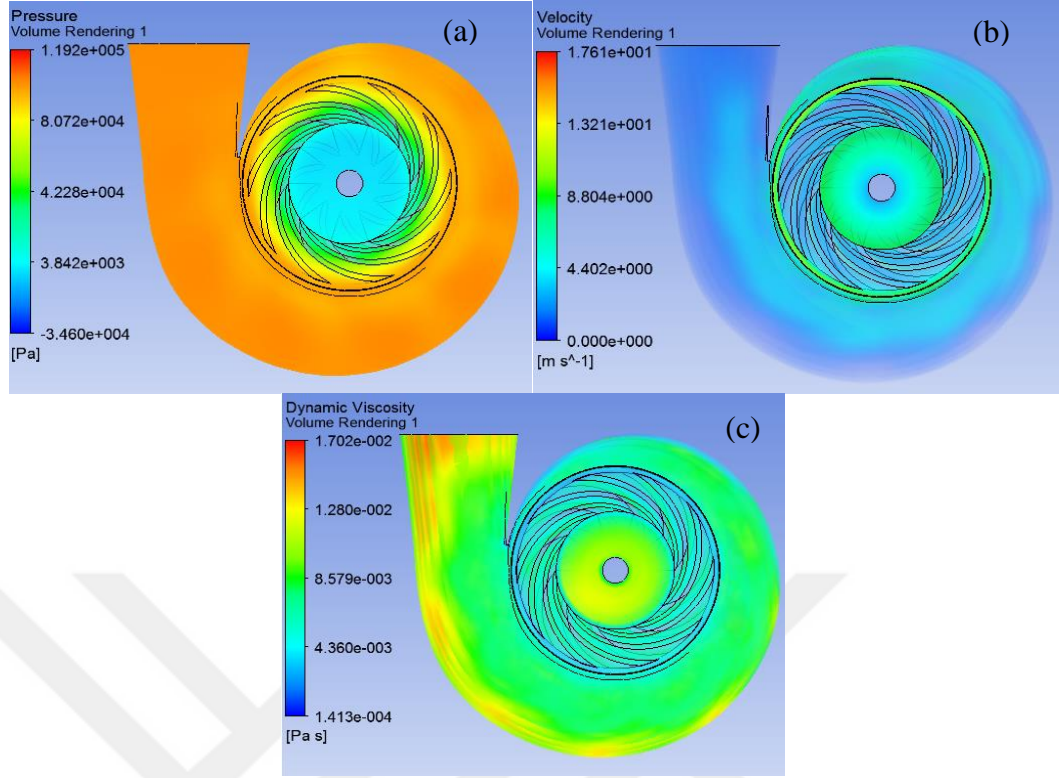


**Şekil 4. 100.** 2. pompa, 500 rpm’de su için verim değerleri

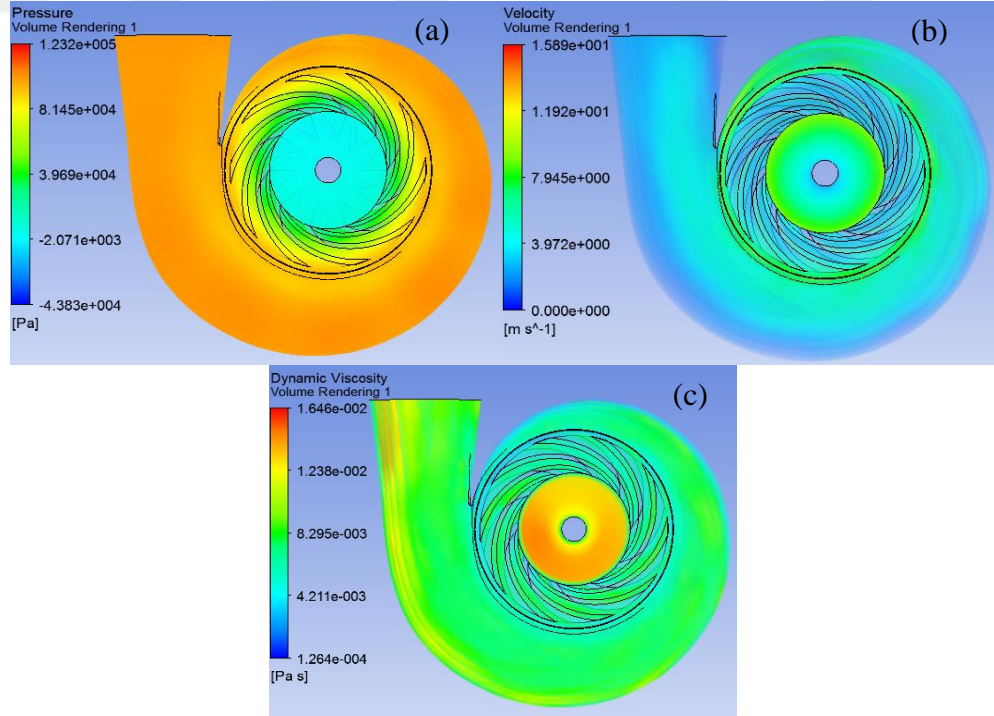
Şekil 4.100’de 500 rpm ve 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21 kg/s’de 2.pompa ve su için nümerik analizlerden elde edilen verim eğrisi gösterilmiştir. 2. pompa için 500 rpm’de verim değerleri 3-21 kg/s arasındaki debi değerleri için sırasıyla %32.7702, %54.4673, %70.3243, %79.0271, %80.5454, %80.1354 ve %78.9606 çıkmıştır.



**Şekil 4. 101.** 2. pompa, 1450 rpm ve 5 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

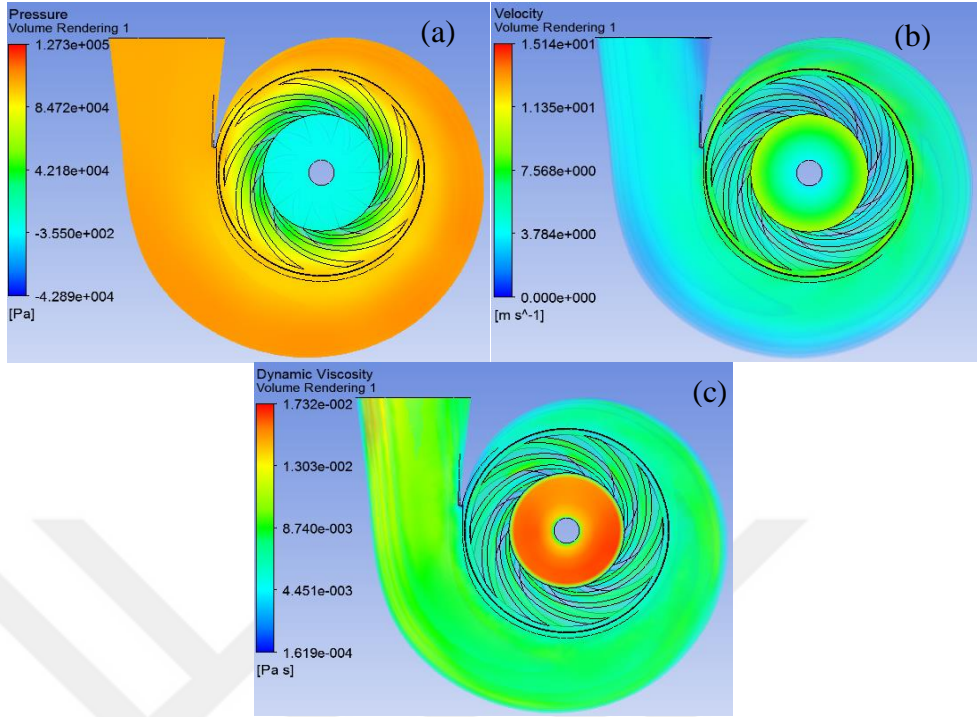


**Şekil 4. 102.** 2. pompa, 1450 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

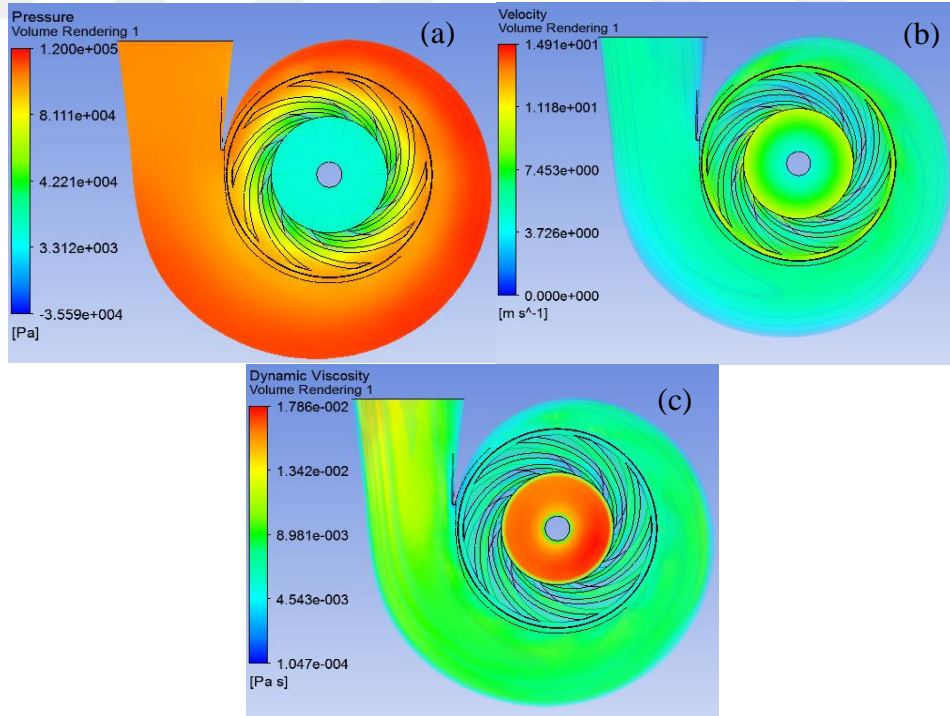


**Şekil 4. 103.** 2. pompa, 1450 rpm ve 25 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

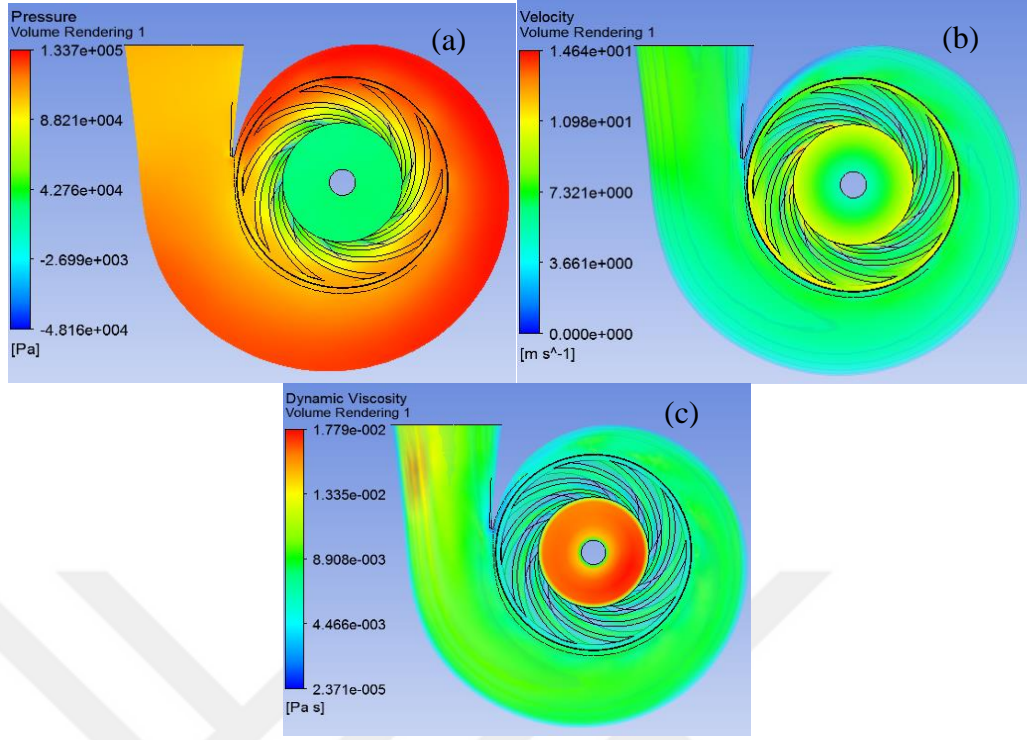




Şekil 4. 104. 2. pompa, 1450 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

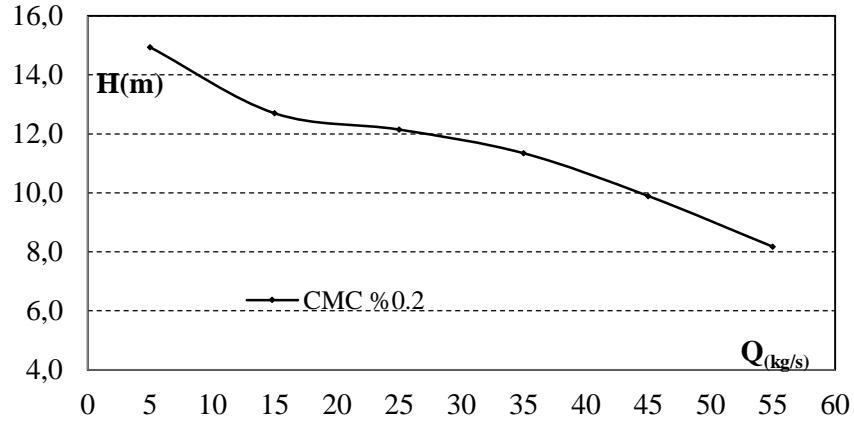


Şekil 4. 105. 2. pompa, 1450 rpm ve 45 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



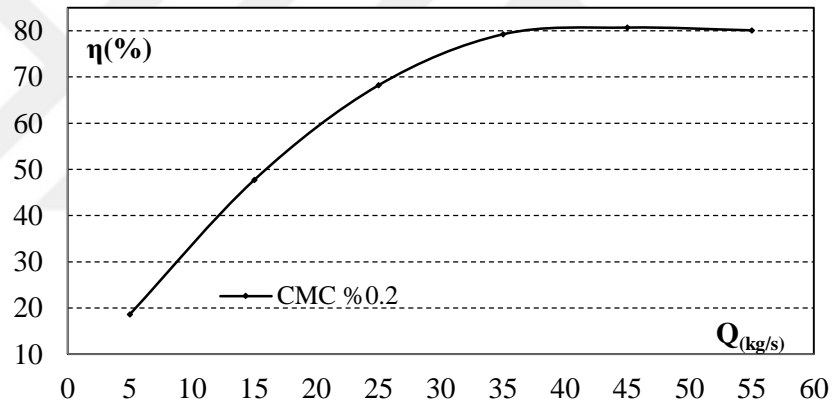
**Şekil 4. 106.** 2.pompa, 1450 rpm ve 55 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

2. pompa, CMC %0.2 ile 1450 rpm'de 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s ile yapılan nümerik analizlerde elde edilen basınç, hız ve viskozite dağılımları Şekiller 4.101-4.106'da görselleştirilmiştir. Maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.167, 1.192, 1.232, 1.273, 1.2 ve 1.337 bar çıkarken, maksimum hız değerleri 17.74, 17.61, 15.89, 15.14, 14.91 ve 14.64 m/s çıkmıştır. Maksimum viskozite değerleri ise 0.01833, 0.01702, 0.01646, 0.01782, 0.01786 ve 0.01779 Pa.s olarak 1450 rpm ve 5-55 kg/s'de CMC %0.2 ile 2. pompa için yapılan nümerik analizlerden elde edilmiştir.



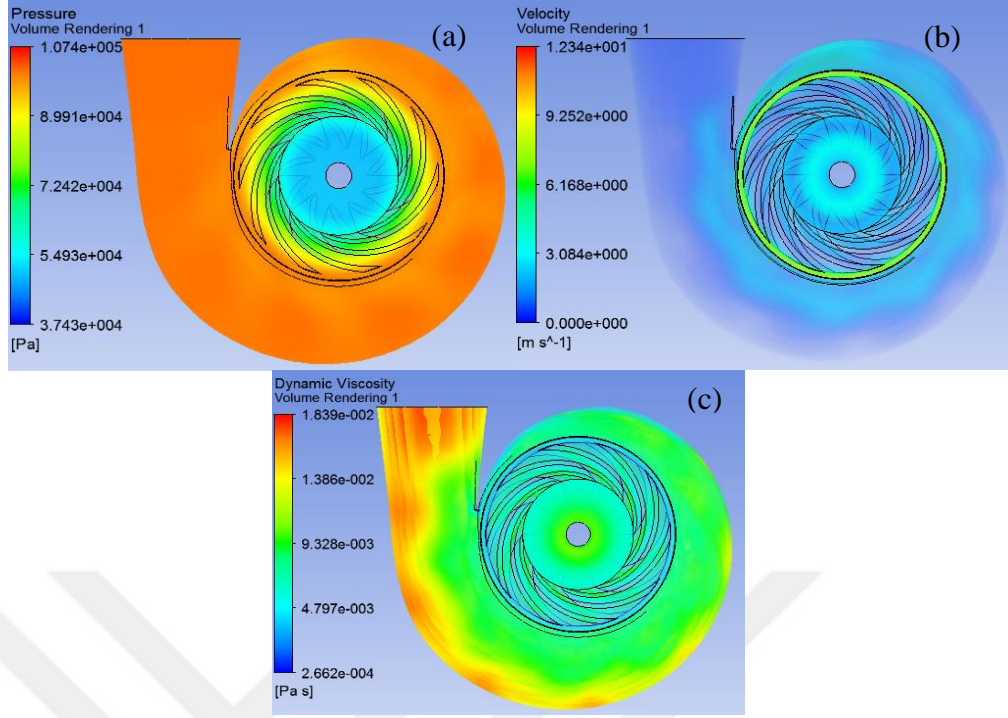
**Şekil 4. 107.** 2.pompa, 1450 rpm'de CMC %0.2 için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.107’de 2. pompa, CMC 0.2% için 1450 rpm’de 6 farklı debi değerinde yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği verilmiştir. 2. pompa ve 1450 rpm’de CMC %0.2 için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s akış oranları için sırasıyla 14.9361, 12.6976, 12.1444, 1.3420, 9.8927 ve 8.1743 m çıkmıştır. Bu değerler gösterdi ki 2.pompa, 1450 rpm de CMC 0.2% ile yapılan analizlerdeki pompa basma yüksekliği su ile yapılanlara göre sırasıyla %-0.31, %0.4, %0.42, %0.71, %0.56 ve %0.49 artış göstermiştir. Literatürde CMC %0.2 ile benzer özelliklere sahip olan Ksantan gam çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada: Zhang ve ark.(2008) kan pompalamak amacıyla geliştirilen santrifüj pompa üzerine deneysel çalışmalarını Newtonian olmayan akışkan Ksantan gam ile gerçekleştirmişlerdir. Düşük rotor hızlarında yüksek rotor hızlarında ise maksimum 7% fark ile daha fazla basma yüksekliği vereceği anlaşılmıştır.

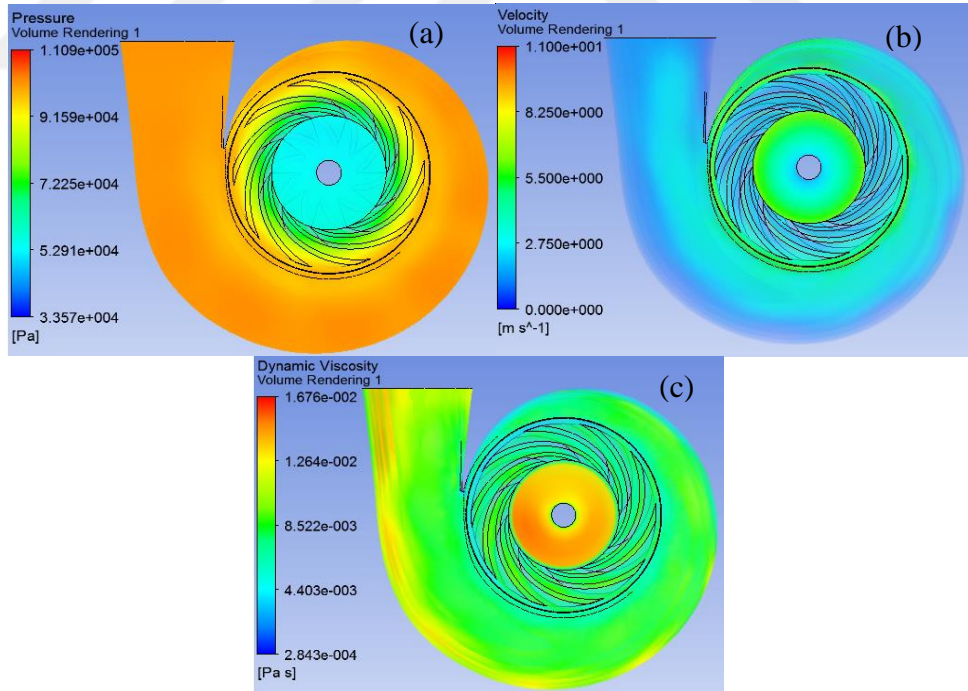


**Şekil 4. 108.** 2. pompa, 1450 rpm’de verim CMC %0.2 için verim değerleri

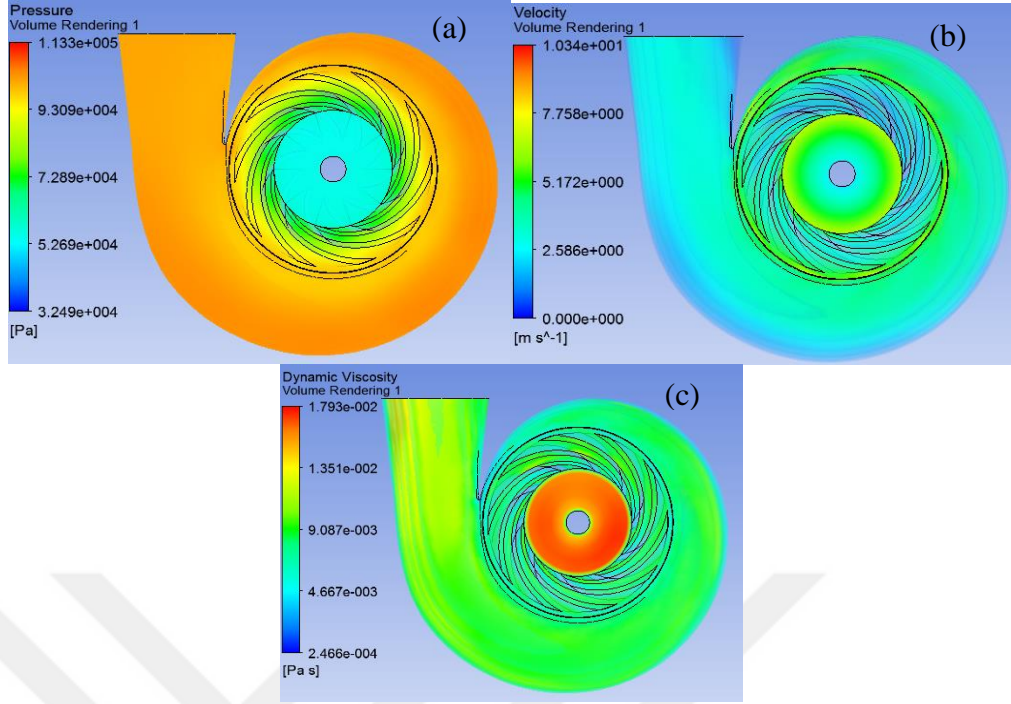
Şekil 4.108’de 1450 rpm ve 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s de 2.pompa ve CMC %0.2 için nümerik analizlerden elde edilen verim değerleri verilmiştir. 2. pompa için verim değerleri 5-55 kg/s debi aralığında CMC %0.2 için sırasıyla %18.6086, %47.6865, %68.1863, %79.2088, %80.6648 ve %80.0698 çıkmıştır.



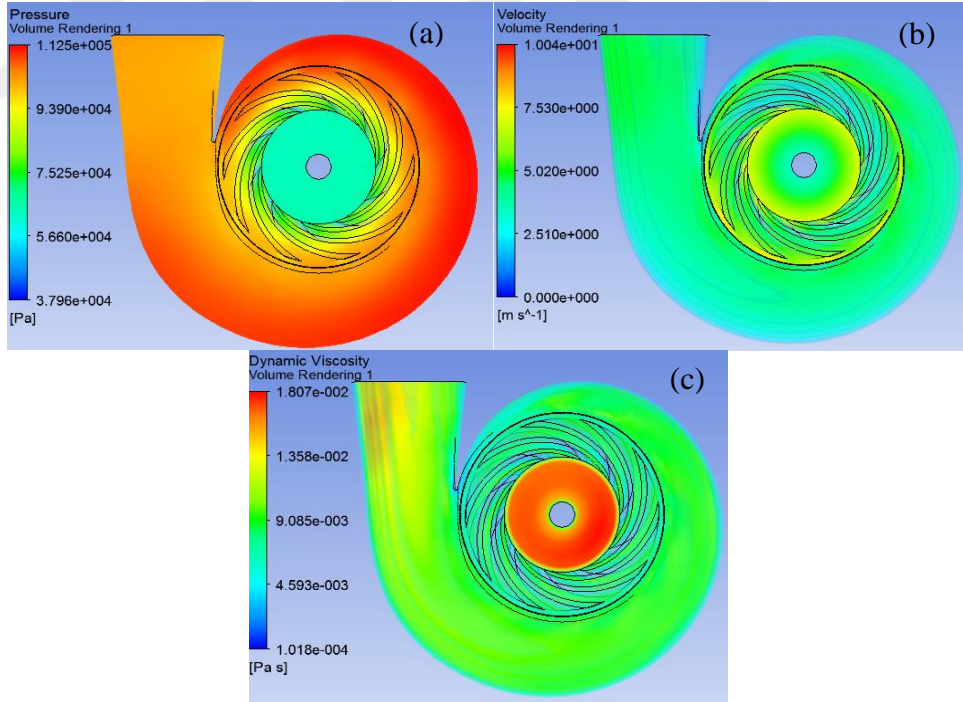
**Şekil 4. 109.** 2. pompa, 1000 rpm ve 5 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



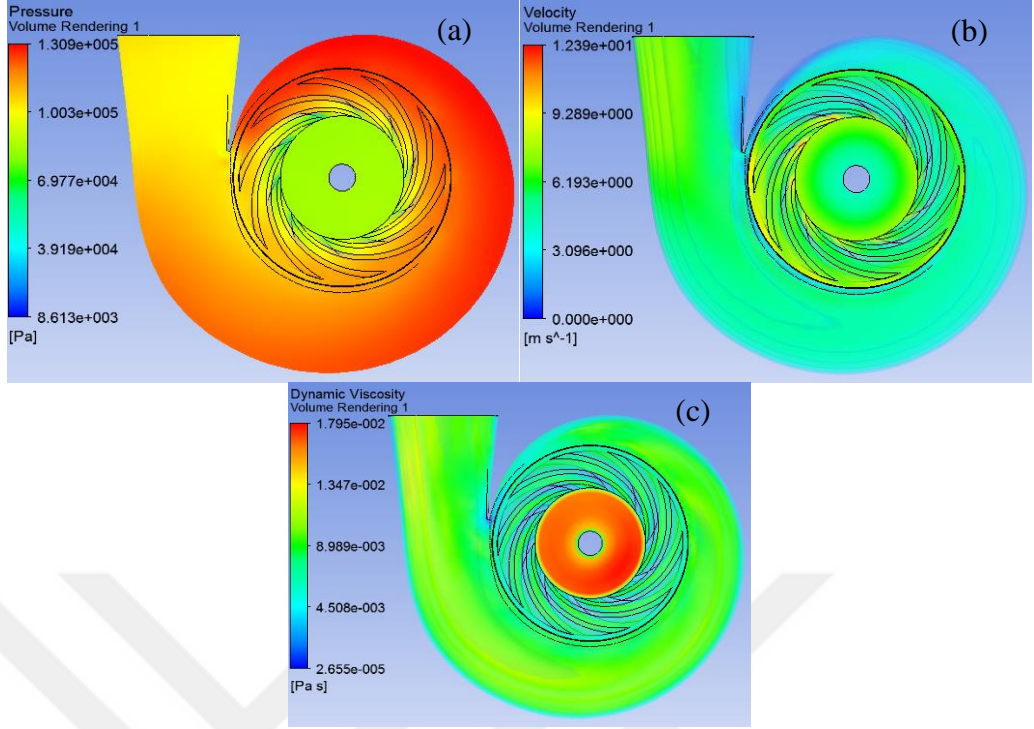
**Şekil 4. 110.** 2. pompa, 1000 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



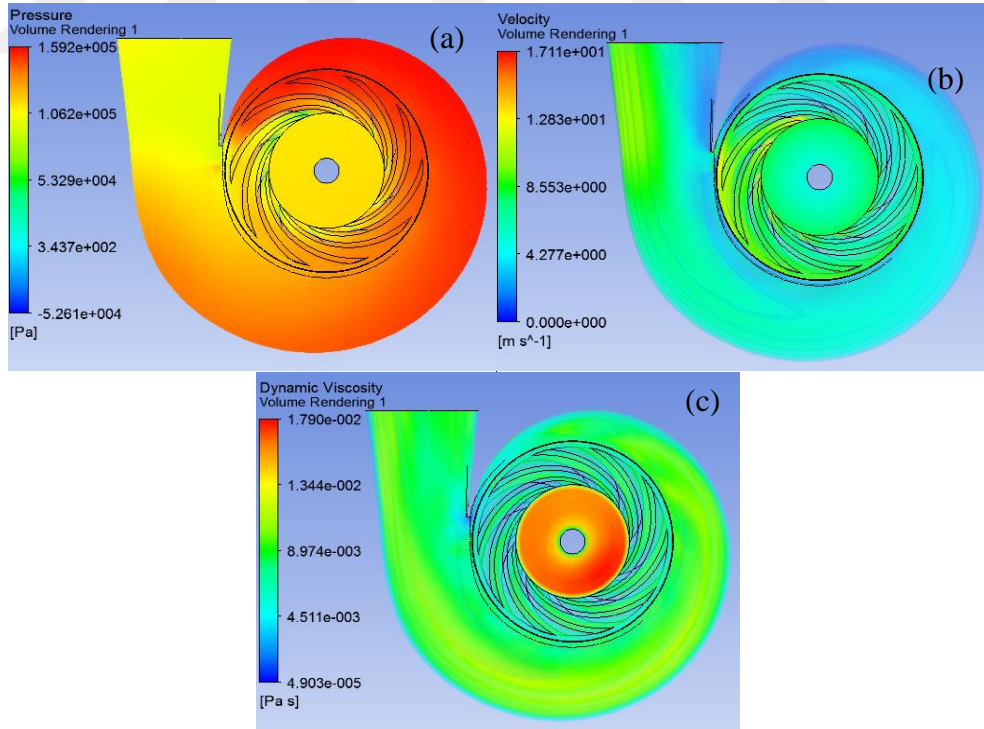
Şekil 4. 111. 2. pompa, 1000 rpm ve 25 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



Şekil 4. 112. 2. pompa, 1000 rpm ve 35 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

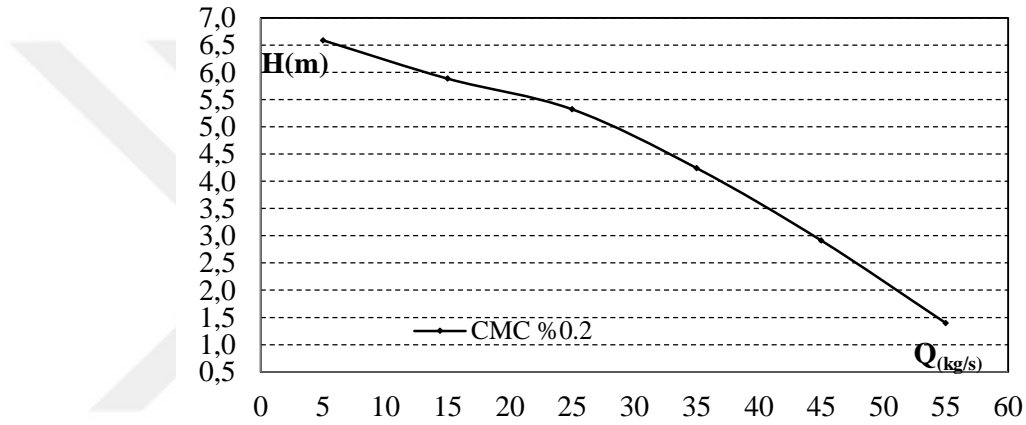


**Şekil 4. 113.** 2. pompa, 1000 rpm ve 45 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



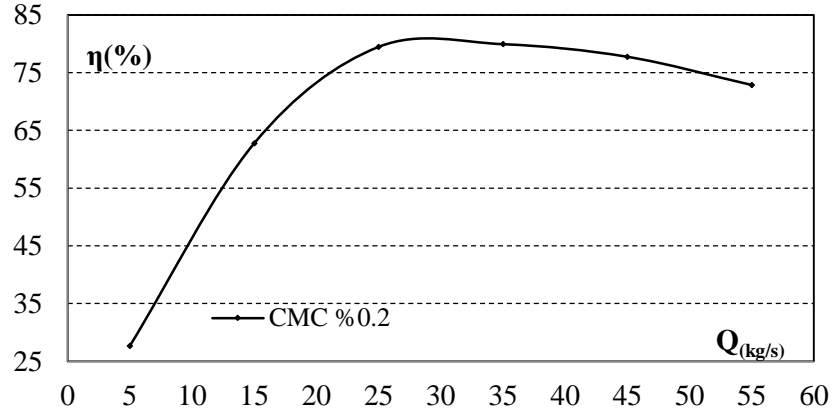
**Şekil 4. 114.** 2. pompa, 1000 rpm ve 55 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

2.pompa, CMC %0.2 ile 1000 rpm'de 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s ile yapılan nümerik analizlerde elde edilen basınç, hız ve viskozite dağılımları Şekiller 4.109-4.114'te görselleştirilmiştir. 1000 rpm ve 5-55 kg/s'de CMC %0.2 ile 2. pompada maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.074, 1.109, 1.133, 1.125, 1.309 ve 1.592 bar çıkmıştır. Maksimum hız değerleri 12.34, 11, 10.34, 10.04, 12.39 ve 17.11 m/s çıkarken, maksimum viskozite değerleri ise 0.01839, 0.01676, 0.01793, 0.01807, 0.01795 ve 0.01779 Pa.s olarak yapılan nümerik analizlerden elde edilmiştir. 2. pompa'da CMC %0.2 ile elde edilen santrifüj pompadaki basınç ve hız dağılımı yapılan bütün analizlerle benzer çıkmıştır.



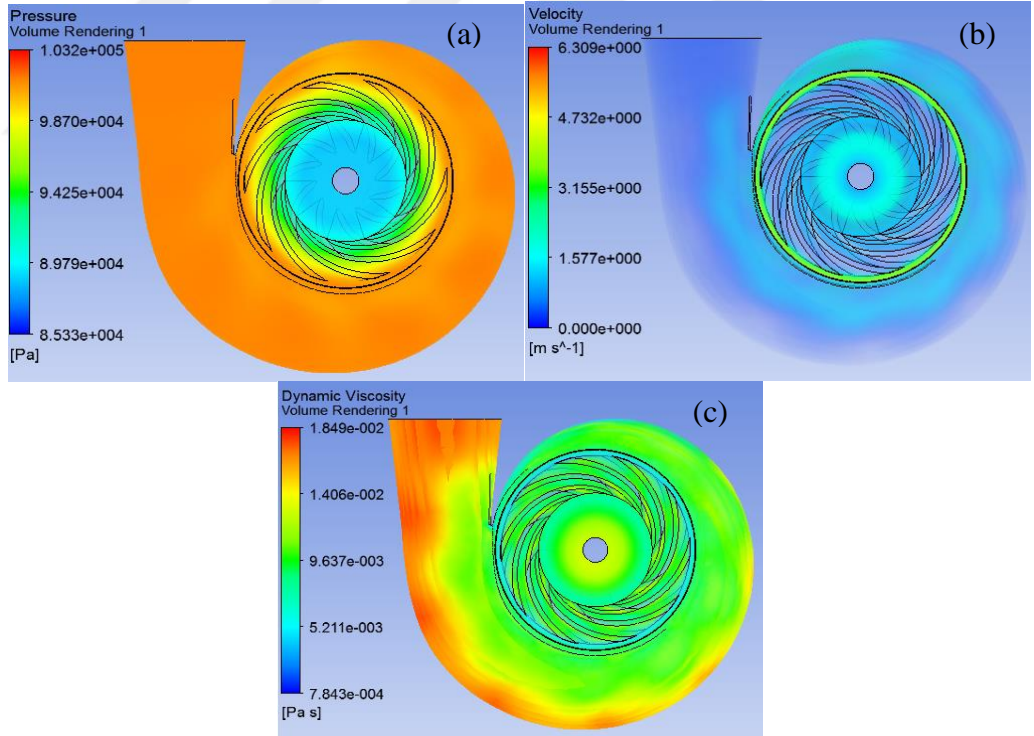
**Şekil 4. 115.** 2. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.2 için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.115'te 2.pompa için 1000 rpm'de 6 farklı debi değerinde CMC %0.2 ile yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği değerleri verilmiştir. 1000 rpm'de CMC %0.2 için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s için sırasıyla 6.5901, 5.8862, 5.3222, 4.2415, 2.9121 ve 1.3955 m çıkmıştır. 2. pompa, 1000 rpm'de CMC %0.2 ile yapılan analizlerdeki pompa basma yüksekliği su ile yapılanlara göre sırasıyla %0.15, %0.4, %0.61, %0.26, %-0.08 ve %-0.42 daha büyük çıkmıştır.



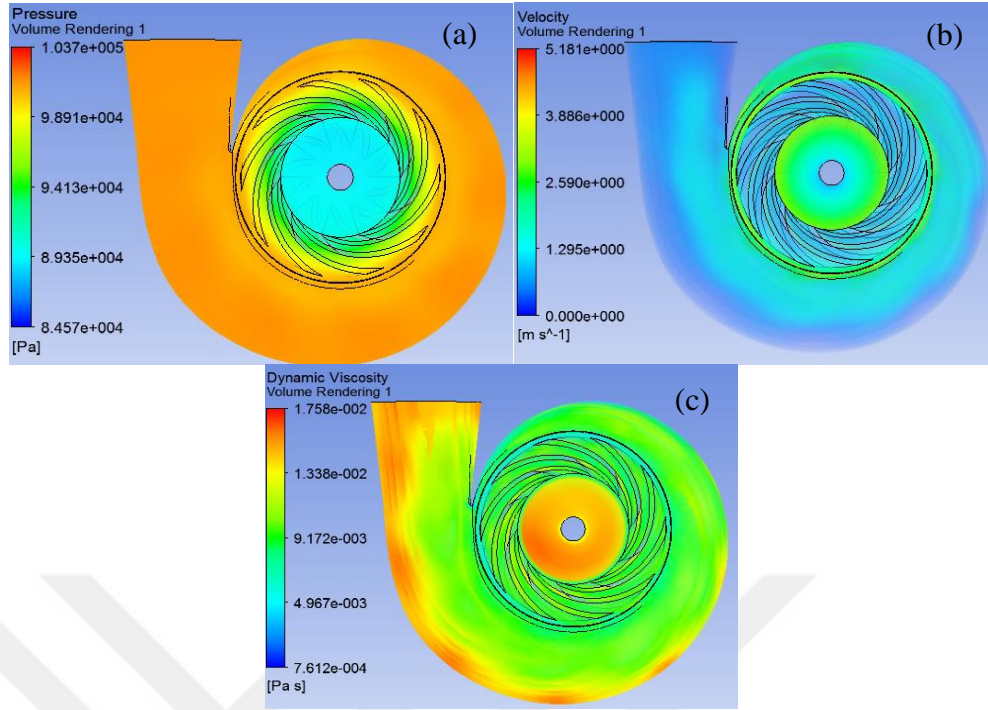
**Şekil 4. 116.** 2. pompa, 1000 rpm’de CMC %0.2 için verim değerleri

Şekil 4.116’da 1000 rpm ve 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s de 2. pompa ve CMC %0.2 için nümerik analizlerden elde edilen verim eğrisi gösterilmiştir. 2. pompa için 1000 rpm’de verim değerleri 5-55 kg/s arasındaki debi değerlerinde CMC %0.2 için sırasıyla %27.6618, %62.7354, %79.4331, %79.9032, %77.7242 ve %72.8496 çıkmıştır.

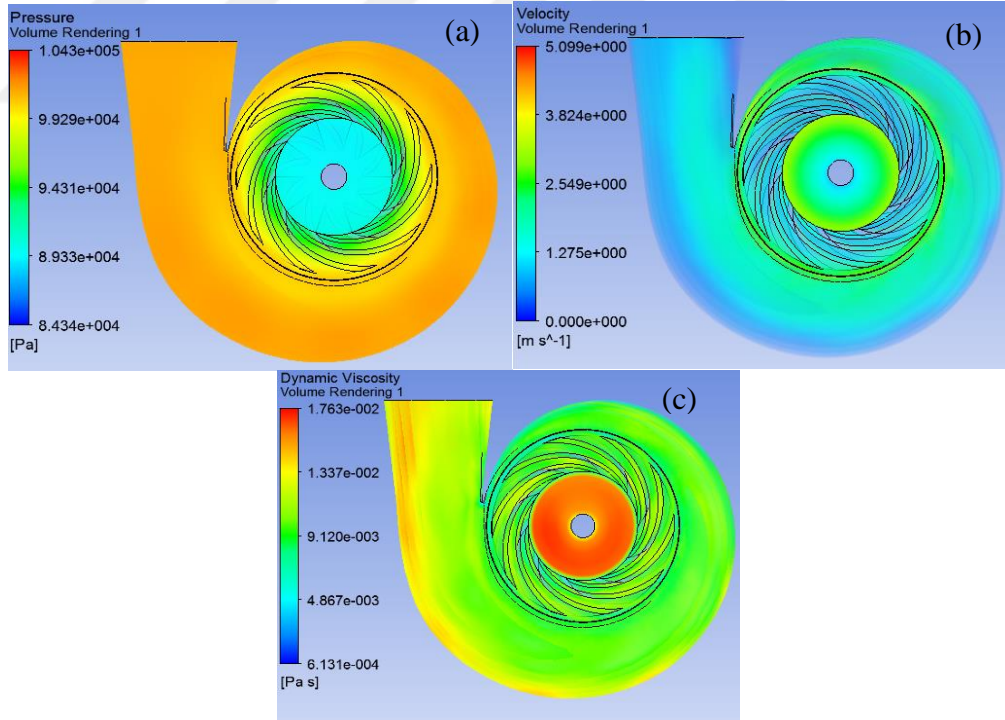


**Şekil 4. 117.** 2. pompa, 500 rpm ve 3 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

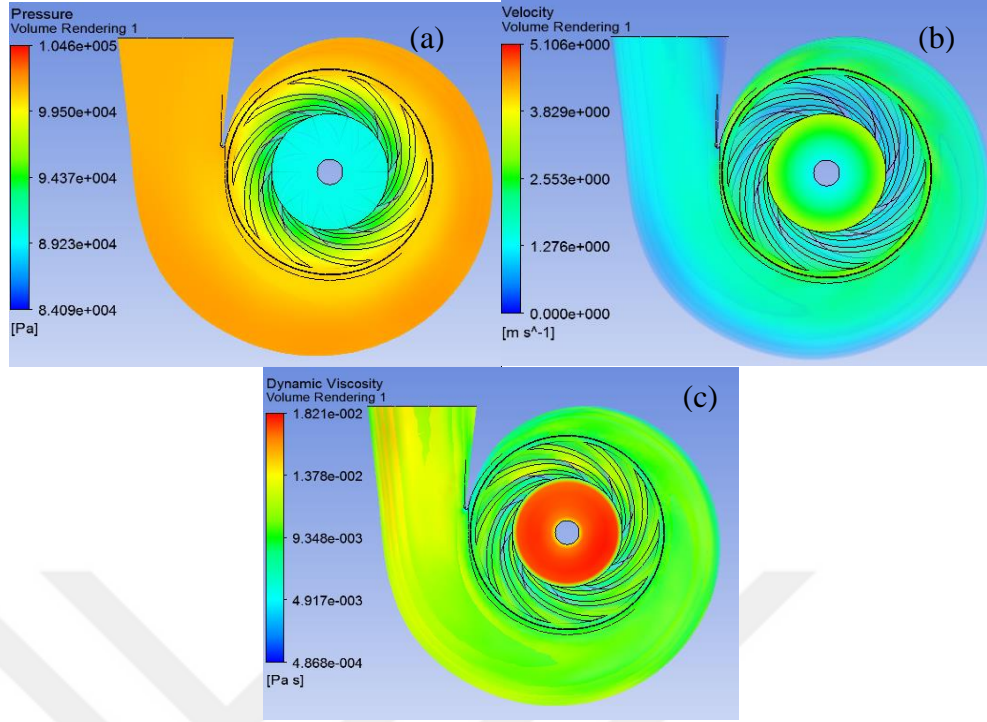




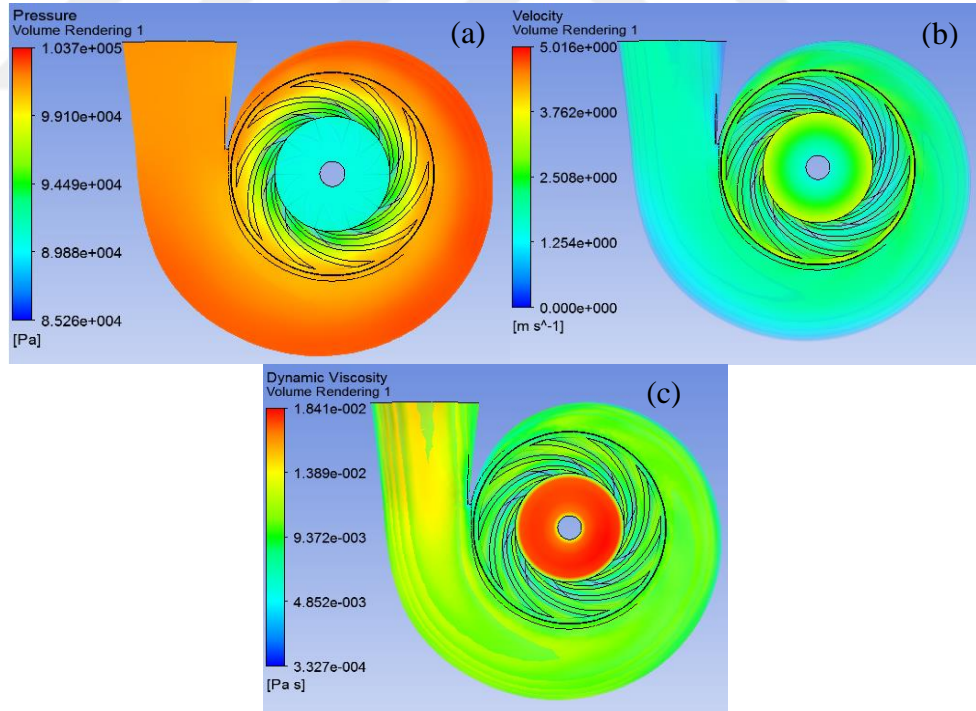
Şekil 4. 118. 2. pompa, 500 rpm ve 6 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



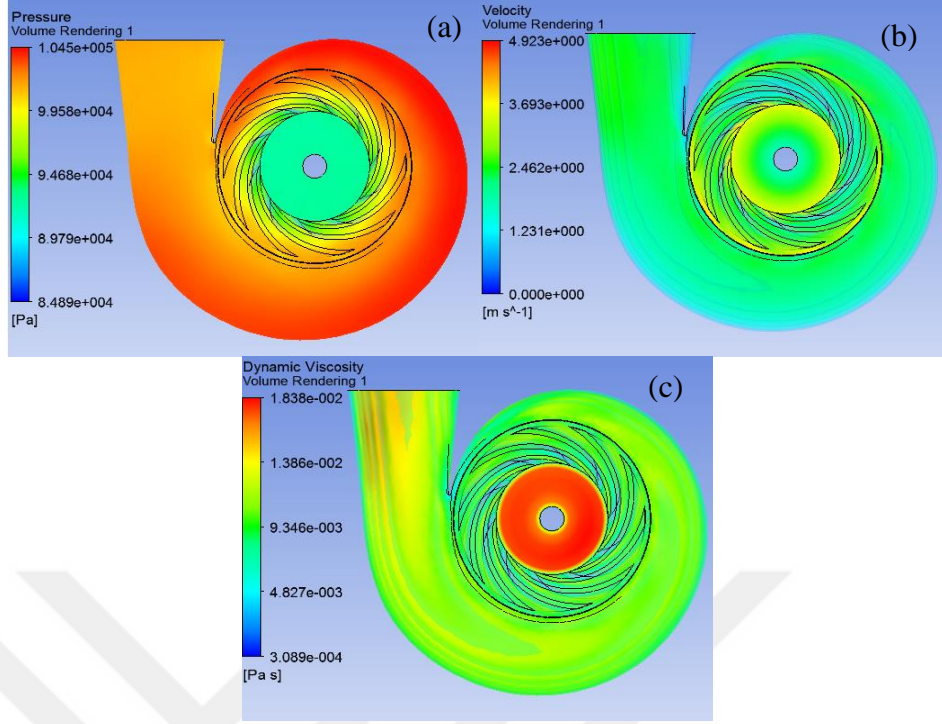
Şekil 4. 119. 2. pompa, 500 rpm ve 9 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



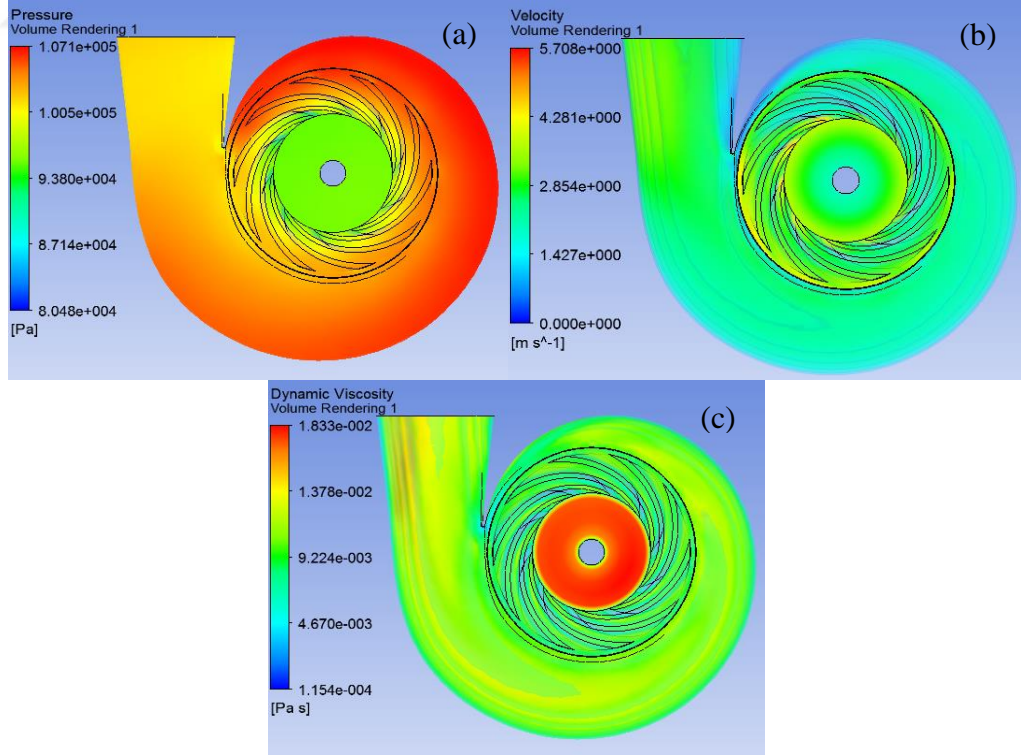
Şekil 4. 120. 2. pompa, 500 rpm ve 12 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



Şekil 4. 121. 2. pompa, 500 rpm ve 15 kg/s’de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

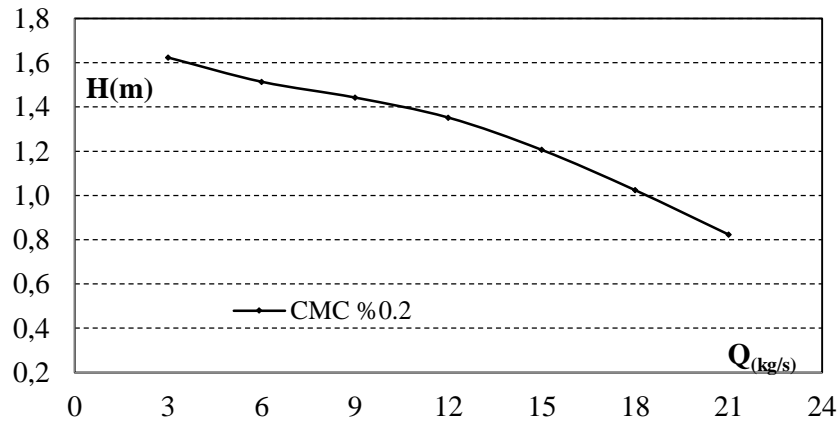


Şekil 4. 122. 2. pompa, 500 rpm ve 18 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



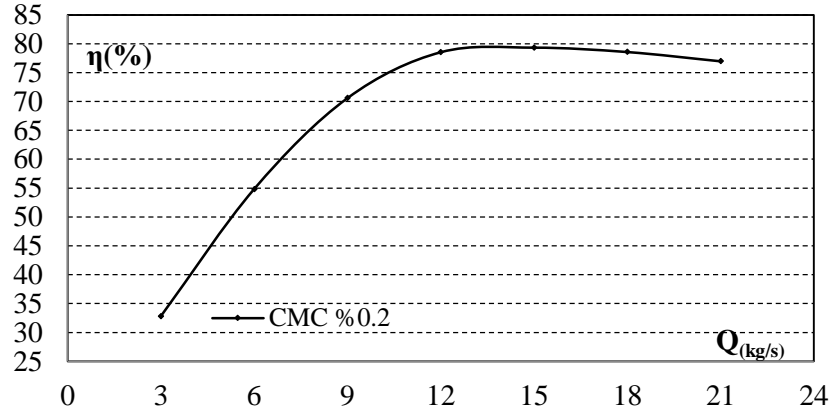
Şekil 4. 123. 2. pompa, 500 rpm ve 21 kg/s'de CMC %0.2 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

2.pompa, CMC 0.2% ile 500 rpm için 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21 kg/s ile yapılan nümerik analizlerde elde edilen basınç ve hız dağılımı Şekiller 4.117-4.123'te verilmiştir. 500 rpm ve 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21 kg/s de CMC %0.2 ile 2. pompa'da maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.032, 1.037, 1.043, 1.046, 1.037, 1.045 ve 1.071 bar çıkmıştır. Maksimum hız değerleri 6.309, 5.181, 5.099, 5.106, 5.016, 4.923 ve 5.706 m/s, maksimum viskozite değerleri ise 0.01849, 0.01758, 0.01763, 0.01821, 0.01841, 0.01838 ve 0.01833 Pa.s olarak yapılan nümerik analizlerden elde edilmiştir.



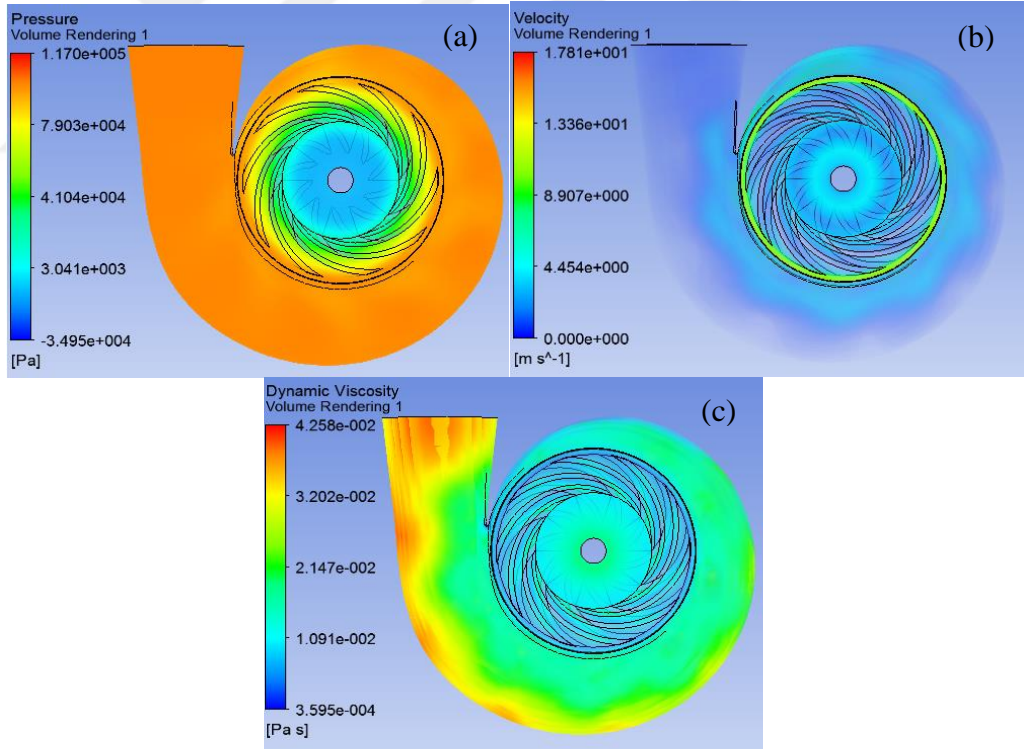
**Şekil 4. 124.** 2. pompa, 500 rpm'de CMC 0.2% için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.124'te 2. pompa için 500 rpm'de 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21 kg/s debi değerinde CMC %0.2 ile yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği eğrisi verilmiştir. 500 rpm'de CMC %0.2 için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri sırasıyla 1.6234, 1.514, 1.4427, 1.352, 1.206, 1.0238 ve 0.8233 m çıkmıştır. 2. pompa 500 rpm'de 15 kg/s de CMC %0.2 ile çıkan pompa basma yüksekliği değeri 1.206 m çıkarken, 2. pompa 500 rpm'de 15 kg/s de su çıkan pompa basma yüksekliği değeri 1.2043 m çıkmıştır.

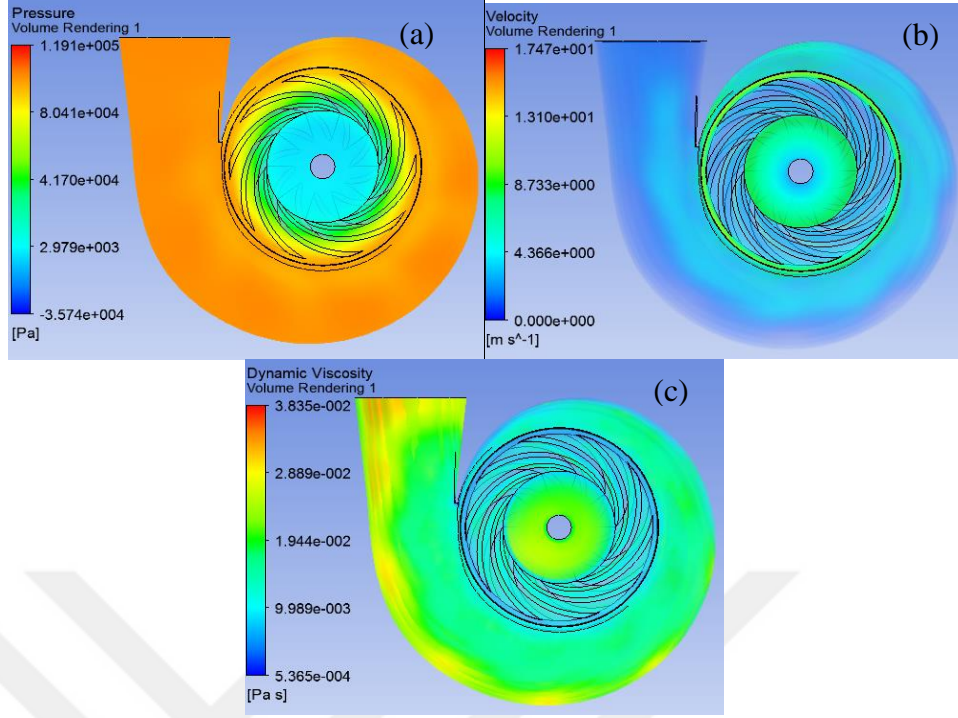


**Şekil 4. 125.** 2. pompa, 500 rpm’de CMC %0.2 için verim değerleri

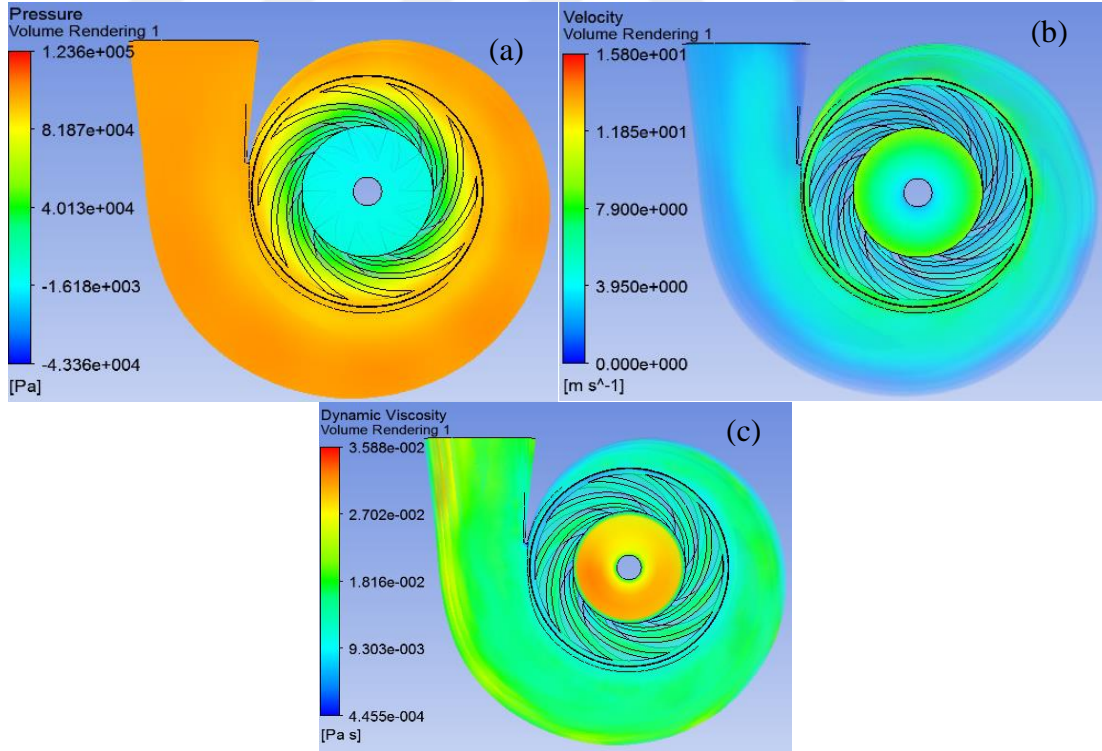
Şekil 4.125’te 500 rpm ve 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21 kg/s de 2. pompa ve CMC %0.2 için nümerik analizlerden elde edilen verim değerleri verilmiştir. 500 rpm’de CMC %0.2 için verim değerleri 3-55 kg/s debi değerlerinde sırasıyla %32.7918, %54.833%, %70.5887%, %78.5491%, %79.3414%, %78.581% ve %76.9744% çıkmıştır.



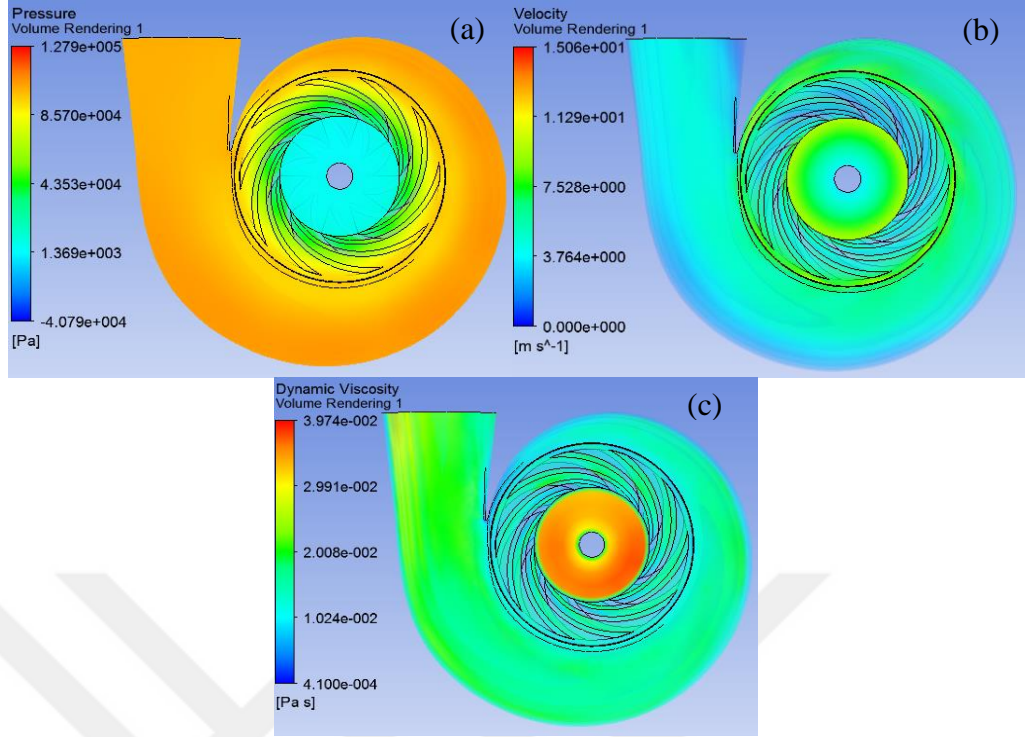
**Şekil 4. 126.** 2. pompa, 1450 rpm ve 5 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



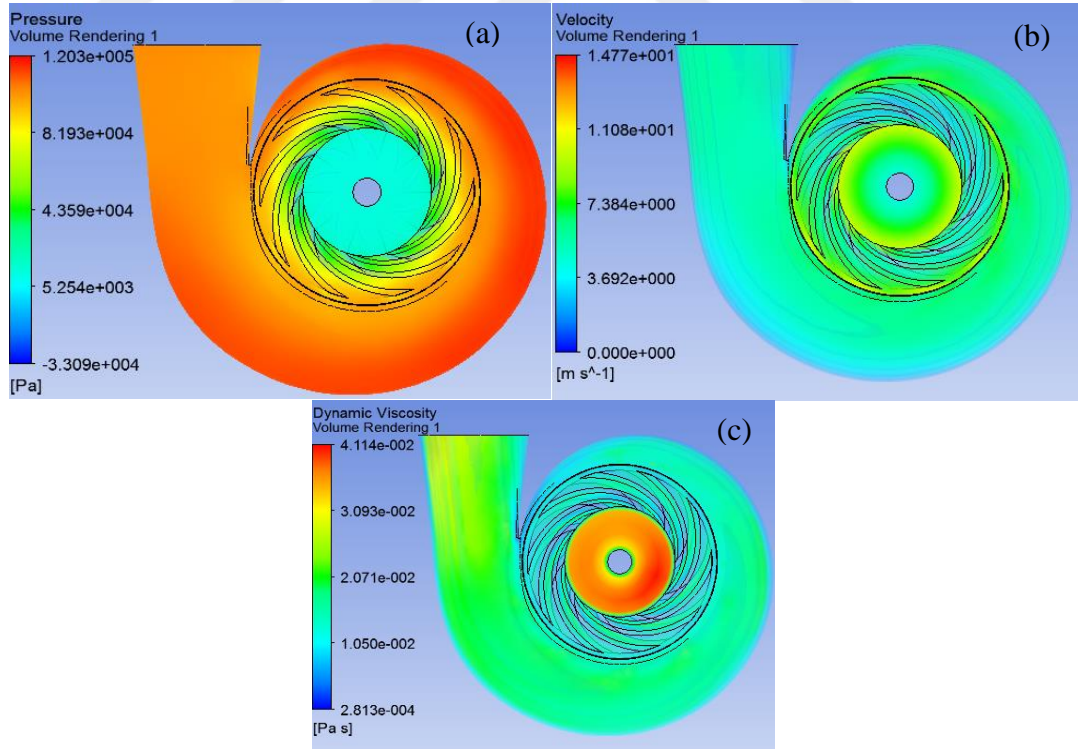
Şekil 4. 127. 2. pompa, 1450 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



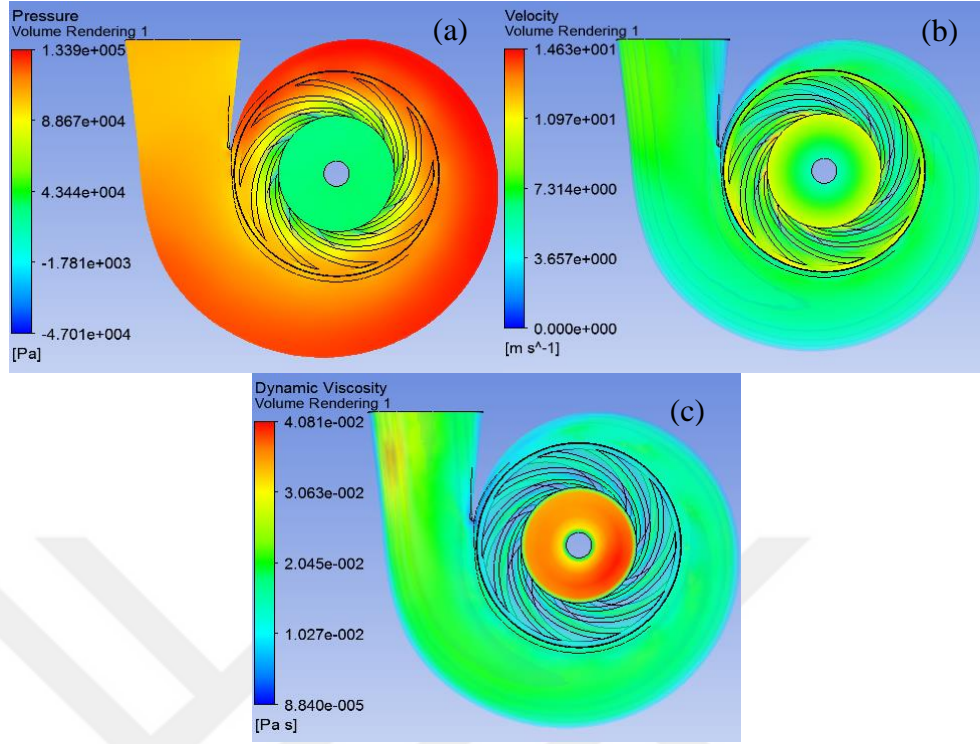
Şekil 4. 128. 2. pompa, 1450 rpm ve 25 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



Şekil 4. 129. 2. pompa, 1450 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



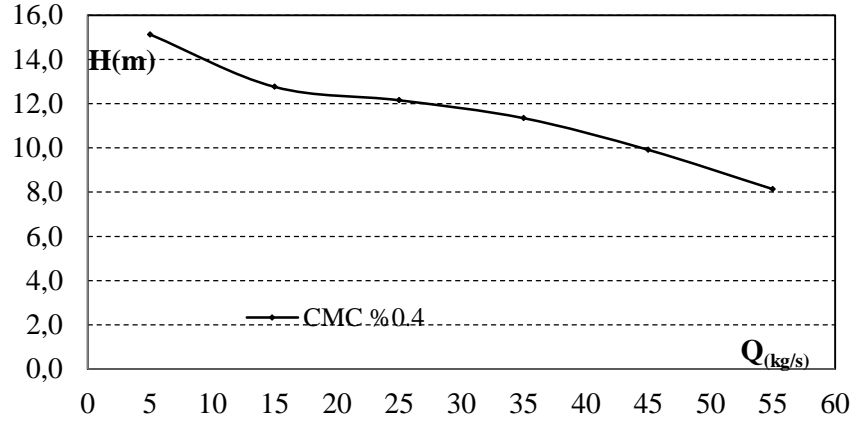
Şekil 4. 130. 2. pompa, 1450 rpm ve 45 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



**Şekil 4. 131.** 2. pompa, 1450 rpm ve 55 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

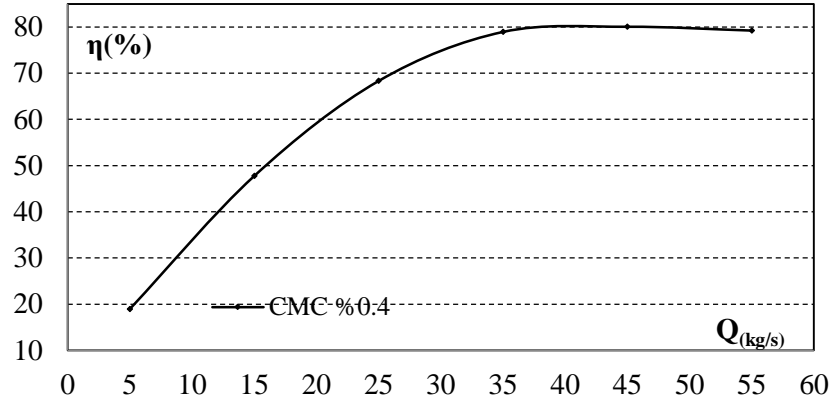
2. pompa, CMC %0.4 ile 1450 rpm ve 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s’de yapılan nümerik analizlerde elde edilen basınç, hız ve viskozite dağılımları Şekiller 4.126-4.131’de görselleştirilmiştir. 1450 rpm ve 5-55 kg/s de CMC %0.4 ile 2. pompa’da maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.170, 1.191, 1.236, 1.279, 1.203 ve 1.339 bar çıkmıştır. Maksimum hız değerleri 17.81, 17.47, 15.80, 15.06, 14.77 ve 14.63 m/s çıkarken, maksimum viskozite değerleri ise 0.04258, 0.03835, 0.03558, 0.03974, 0.4114 ve 0.04081 Pa.s olarak yapılan nümerik analizlerden elde edilmiştir.





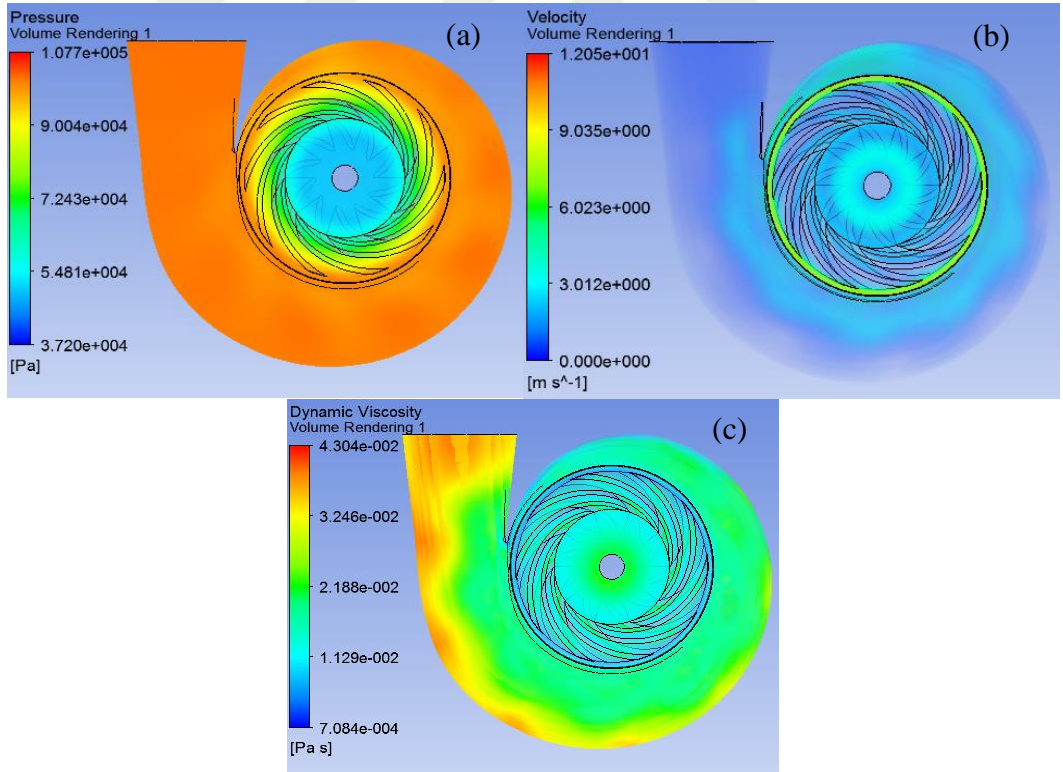
**Şekil 4. 132.** 2. pompa, 1450 rpm’de CMC %0.4 için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.132’de 2. pompa, CMC %0.4 için 1450 rpm’de 6 farklı debi değerinde yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği değerleri verilmiştir. CMC %0.4 için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s için sırasıyla 15.1271, 12.7607, 12.1553, 11.3467, 9.8774 ve 8.1433 m çıkmıştır. 2.pompa, 1450 rpm çalışma şartlarında CMC %0.4 ile yapılan analizlerdeki pompa basma yüksekliği CMC 0.2% ile yapılanlara göre sırasıyla %1.27, %0.5, %0.09, %0.04, %-0.15 ve %-0.38 artış göstermiştir. Elde edilen veriler genel olarak literatürle benzer sonuçlar vermesine rağmen bazı çalışmalardan çıkarılan sonuçların her zaman geçerli olmadığını göstermiştir. Buratto ve ark.(2017) tarafından yapılan çalışmada Newtonian olmayan akışkanların birbirinden farklı tipte 2 santrifüj pompa ile nümerik analizler gerçekleştirmişlerdir. Düşük özgül hızlı pompanın sıvı viskozitesine karşı daha hassas olduğunu söylemişlerdir. Ancak bu tez çalışmasında çıkan sonucun Buratto ve ark.(2017) yaptığı çalışmanın aksine daha büyük özgül hızlı pompanın daha düşük özgül olana göre akışkan viskozitesine karşı daha hassas olduğu görülmüştür. Bunun sebebi aynı çark çapında olan bu iki pompadan daha yüksek özgül hızlı olanın rotodinamik hareketi esnasında akışkana uygulayacağı kayma kuvveti alanının daha büyük oluşudur. Bu durum akışkanın pseudoplastik davranışını daha fazla tetiklediği bulunmuştur. Sonuçta 2. pompa’da dizayn parametrelerinde Newtonian olmayan akışkanların basma yüksekliği suya göre daha yüksek çıkarken 1. pompa’da su ile dizayn parametresinde yapılan analizde daha yüksek basma yüksekliği elde edilmiştir.

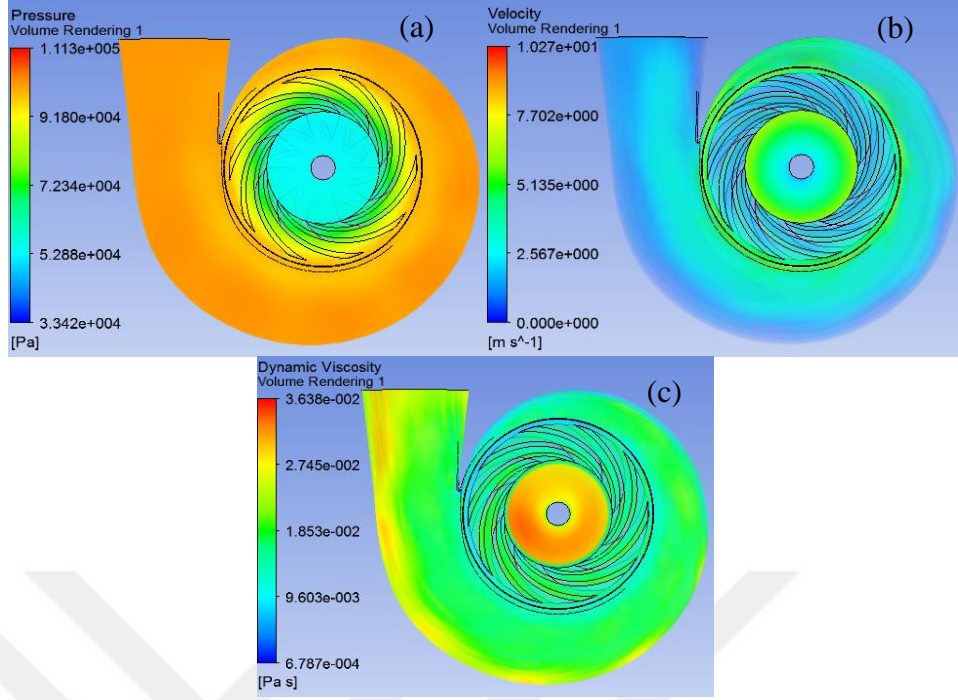


**Şekil 4. 133.** 2. pompa, 1450 rpm’de verim CMC %0.4 için değerleri

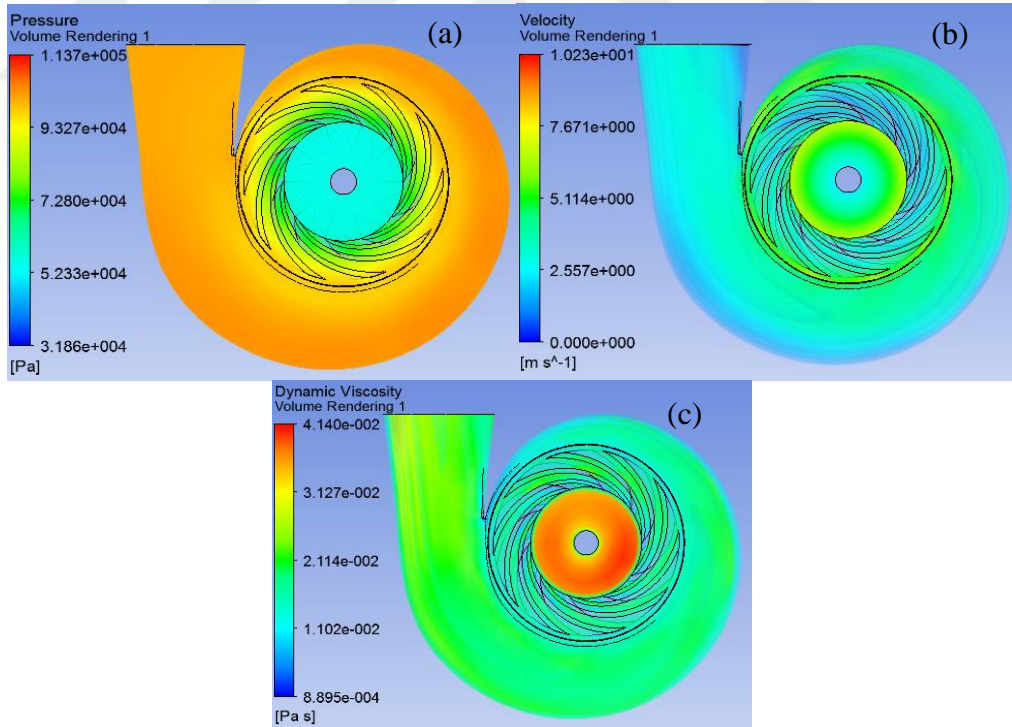
Şekil 4.133’te 1450 rpm ve 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s de 2.pompa ve CMC %0.4 için nümerik analizlerden elde edilen verim değerleri verilmiştir. 2. pompa’da verim değerleri 5-55 kg/s arasındaki debi değerlerinde CMC %0.4 için sırasıyla %18.9557, %47.7497, %68.3233, %78.9484, %80.0661 ve %79.2421 çıkmıştır.



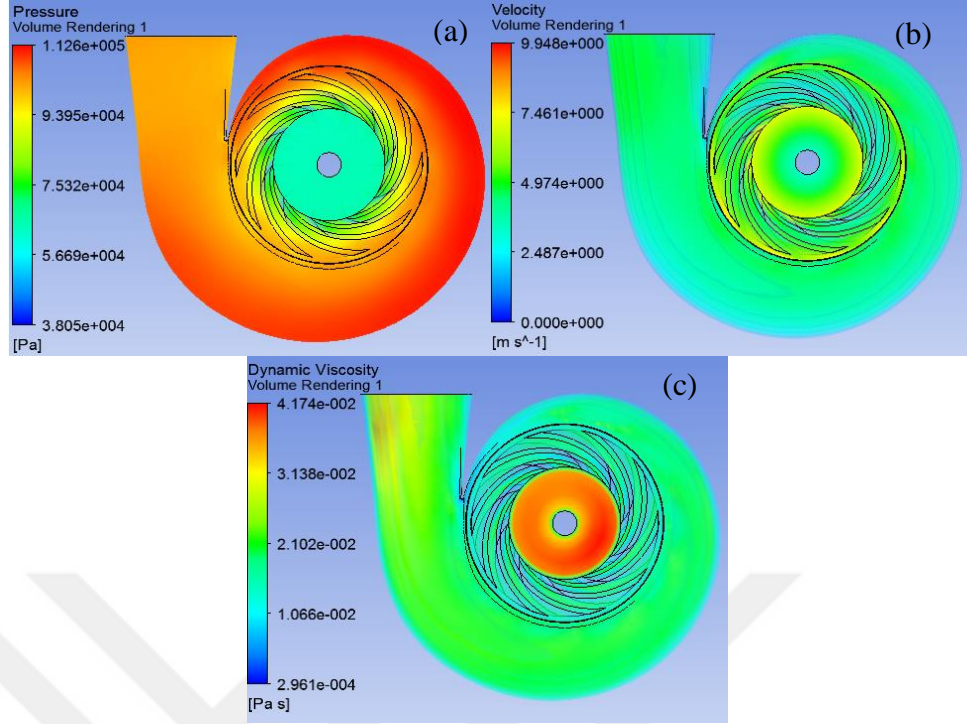
**Şekil 4. 134.** 2. pompa, 1000 rpm ve 5 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



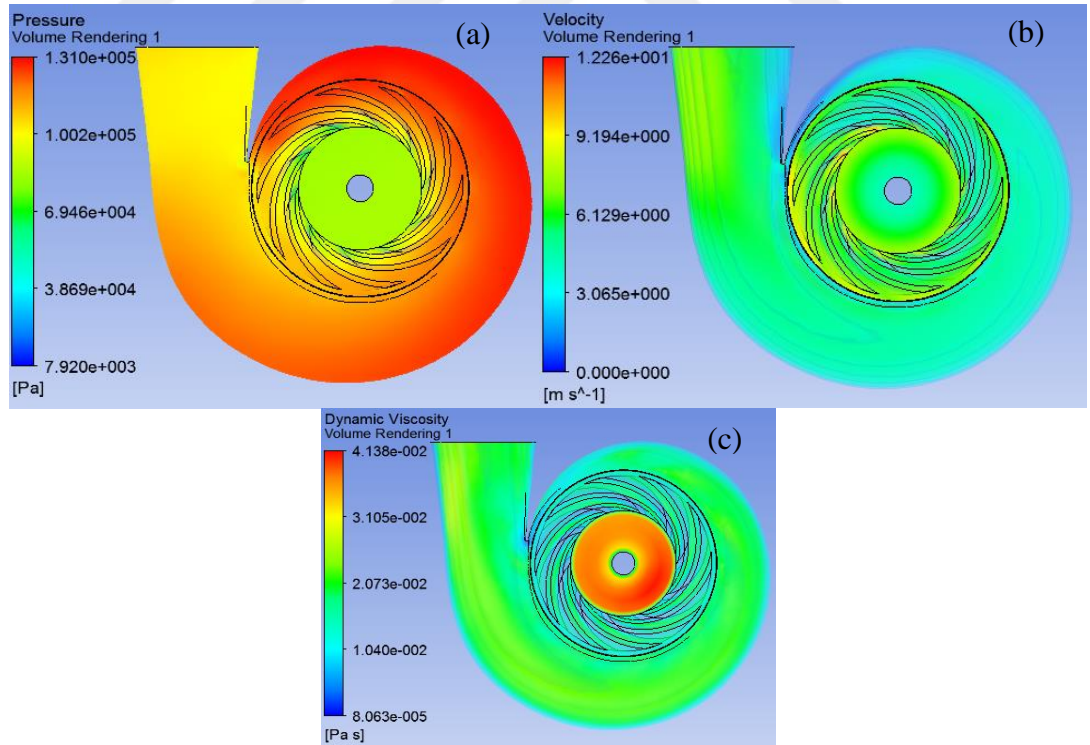
Şekil 4. 135. 2. pompa, 1000 rpm ve 15 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



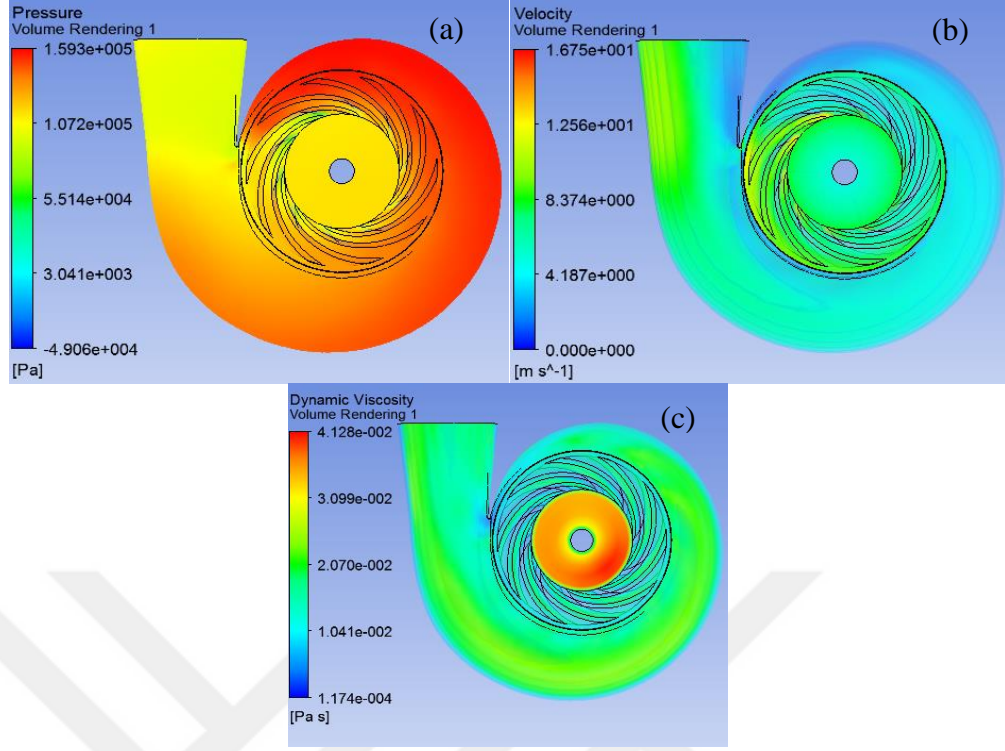
Şekil 4. 136. 2. pompa, 1000 rpm ve 25 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



Şekil 4. 137. 2. pompa, 1000 rpm ve 35 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

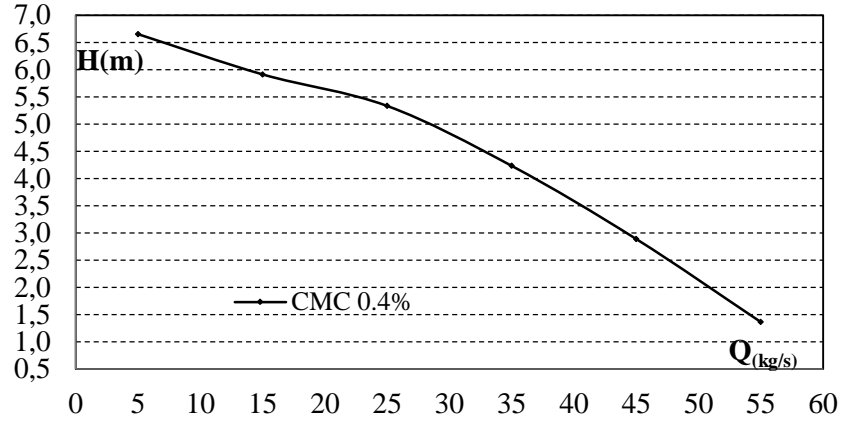


Şekil 4. 138. 2. pompa, 1000 rpm ve 45 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



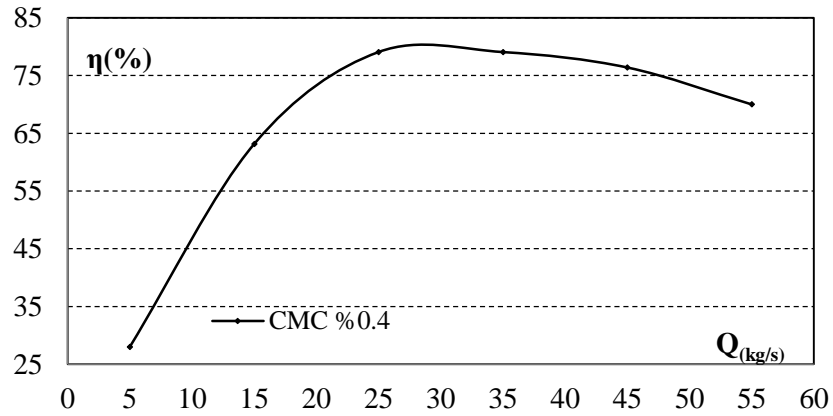
**Şekil 4. 139.** 2. pompa, 1000 rpm ve 55 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

2.pompa, CMC 0.4% ile 1000 rpm de 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s ile yapılan nümerik analizlerde elde edilen basınç, hız ve viskozite dağılımları Şekiller 4.134-4.139’da görselleştirilmiştir. CMC %0.2 ile elde edilen maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.077, 1.113, 1.137, 1.126, 1.310 ve 1.593 bar, maksimum hız değerleri 12.05, 10.27, 10.23, 9.948, 12.26 ve 16.75 m/s çıkmıştır. Maksimum viskozite değerleri ise 0.04304, 0.03638, 0.0414, 0.04174, 0.04138 ve 0.04128 Pa.s olarak yapılan nümerik analizlerden elde edilmiştir.



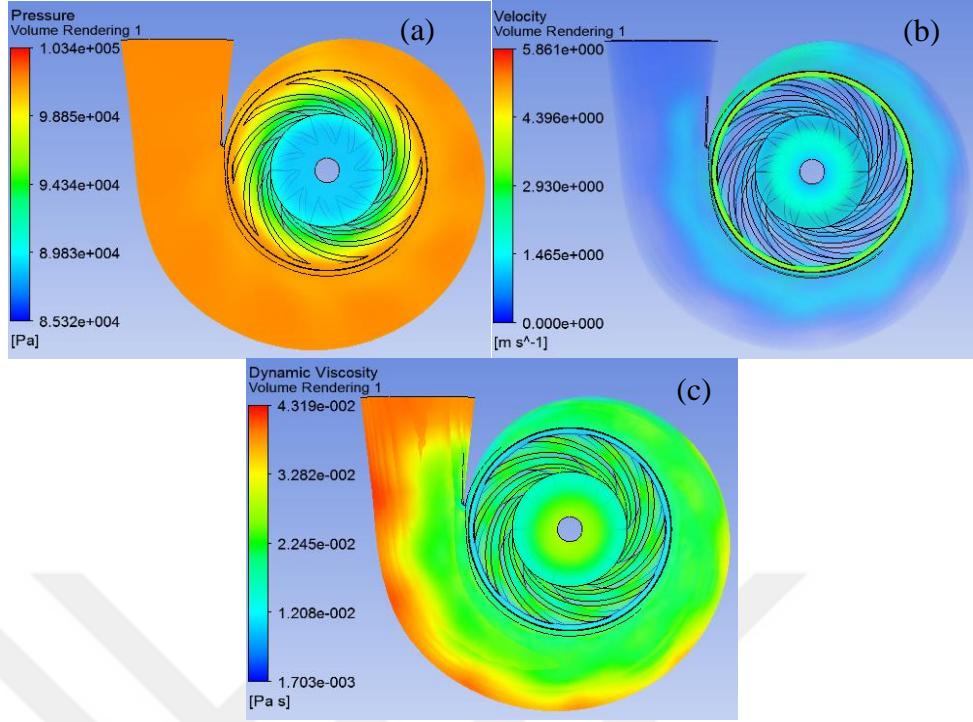
**Şekil 4. 140.** 2. pompa, 1000 rpm’de CMC %0.4 için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.140’da 2. pompa için 1000 rpm’de 6 farklı debi değerinde CMC %0.4 ile yapılan analizlerden elde edilen santrifüj pompa basma yüksekliği değerleri verilmiştir. 1000 rpm’de CMC %0.4 için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s için sırasıyla 6.6497, 5.911, 5.3327, 4.233, 2.8904 ve 1.3677 m çıkmıştır. 2.pompa, 1000 rpm ve CMC %0.4 ile yapılan analizlerdeki pompa basma yüksekliği CMC %0.2 ile yapılanlara göre sırasıyla %0.9, %0.42, %0.19, %-0.2, %-0.74 ve %-1.99 daha büyük çıkmıştır.

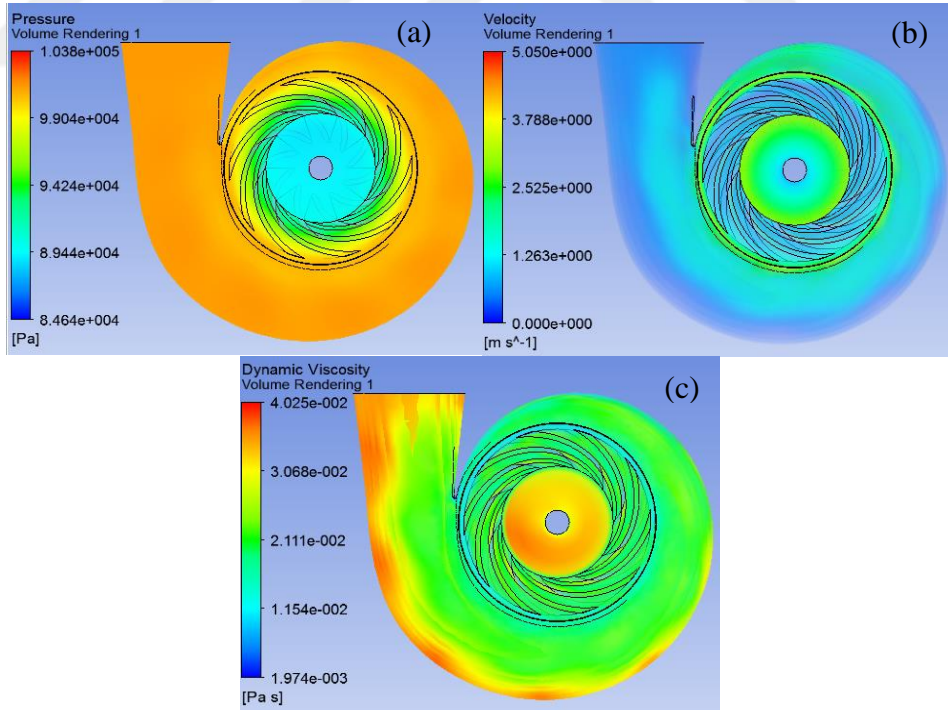


**Şekil 4. 141.** 2. pompa, 1000 rpm’de CMC %0.4 için verim değerleri

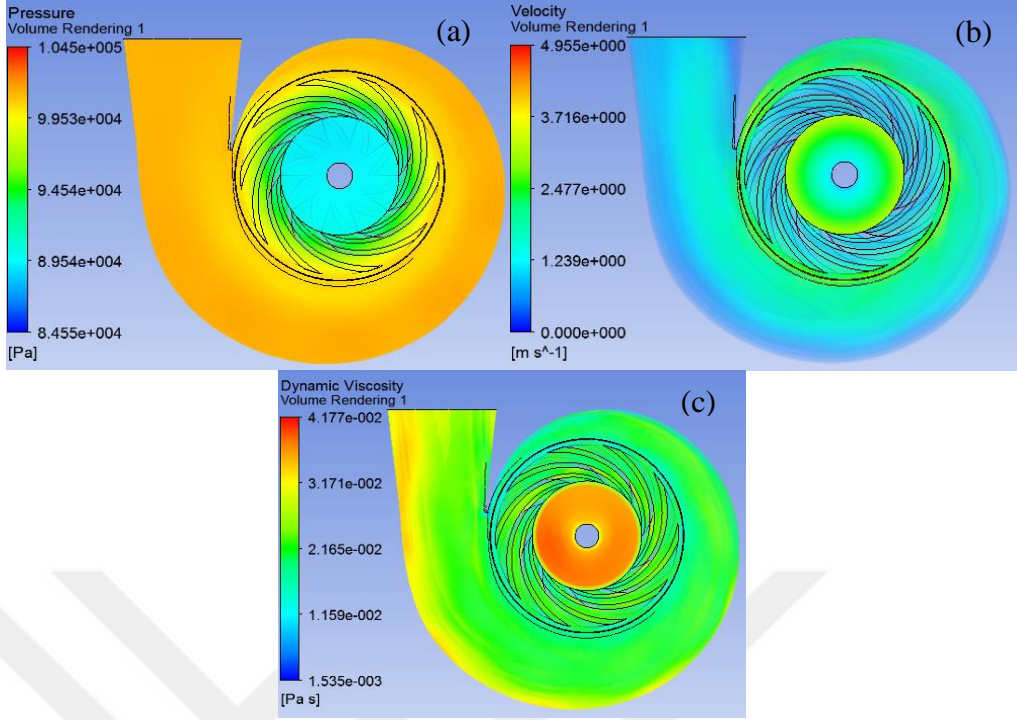
Şekil 4.141’de 1000 rpm ve 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s çalışma koşullarında 2.pompa ve CMC %0.4 için nümerik analizlerden elde edilen verim değerleri verilmiştir. 2. pompa için 1000 rpm’de verim değerleri 5-55 kg/s arasındaki debi değerlerinde CMC %0.4 için sırasıyla %27.9845, %63.1514, %79.0898, %79.0806, %76.4072 ve %70.0118 çıkmıştır.



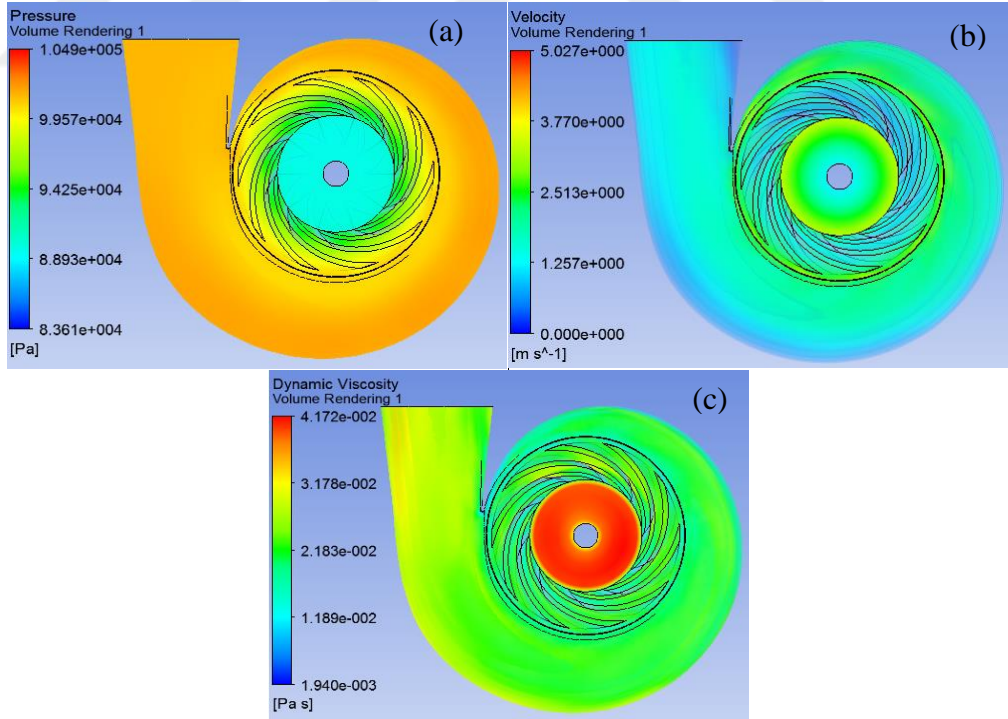
Şekil 4. 142. 2. pompa, 500 rpm ve 3 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



Şekil 4. 143. 2. pompa, 500 rpm ve 6 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

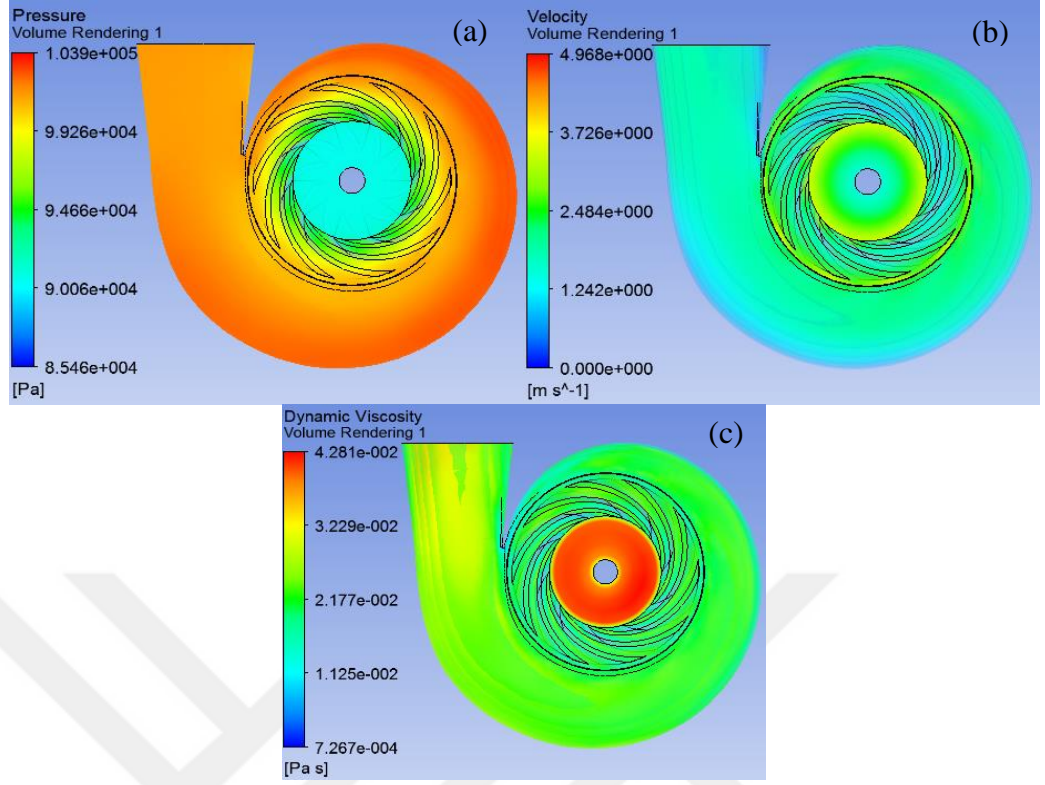


Şekil 4. 144. 2. pompa, 500 rpm ve 9 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

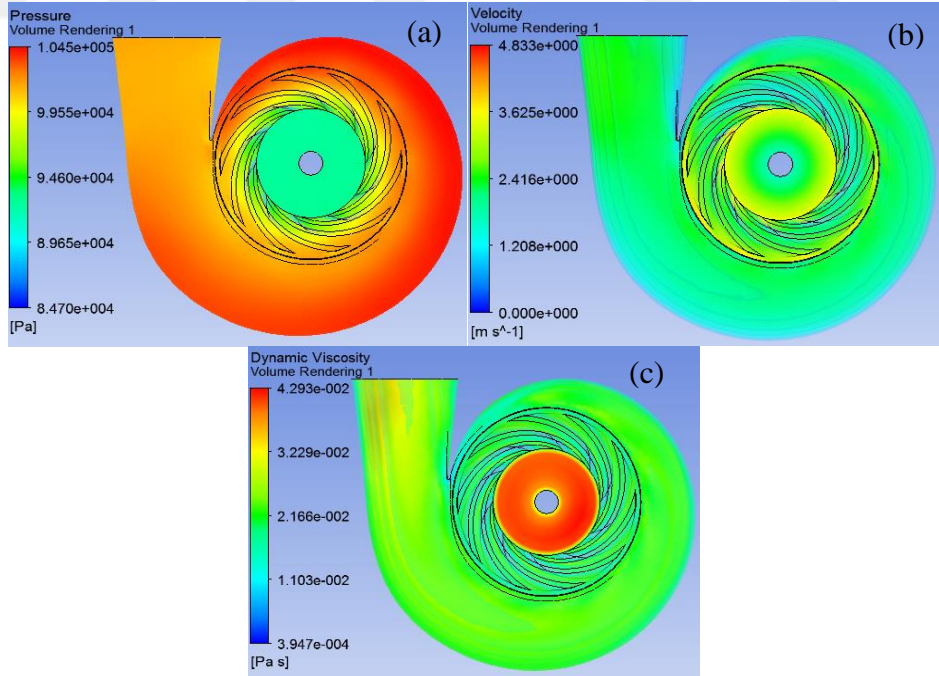


Şekil 4. 145. 2. pompa, 500 rpm ve 12 kg/s’de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

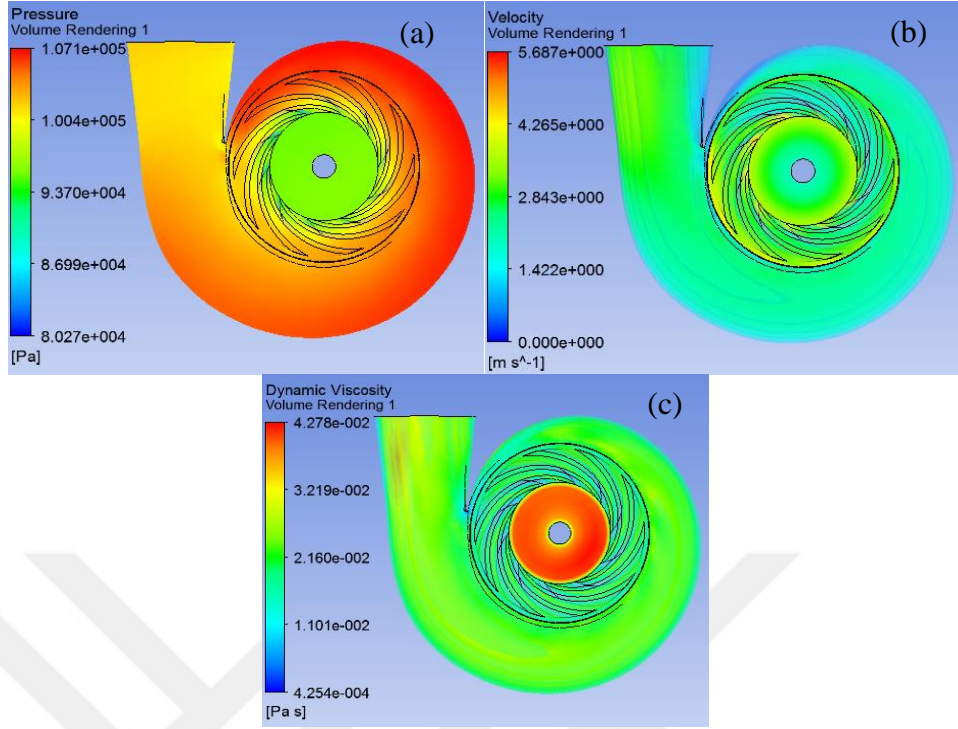




Şekil 4. 146. 2. pompa, 500 rpm ve 15 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

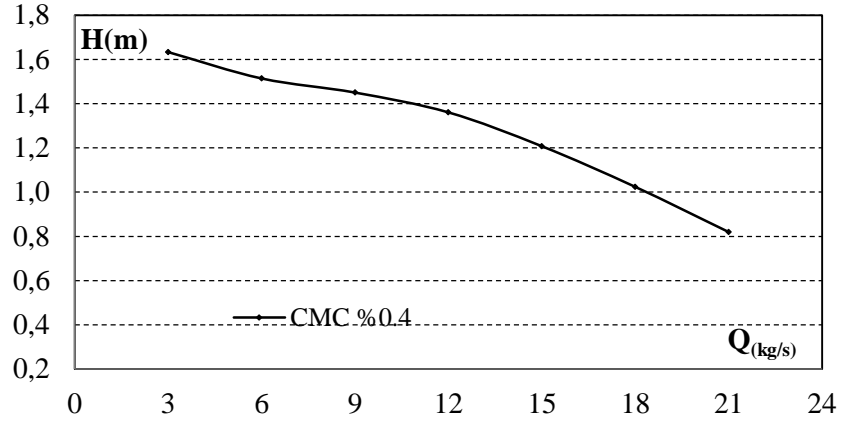


Şekil 4. 147. 2. pompa, 500 rpm ve 18 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı



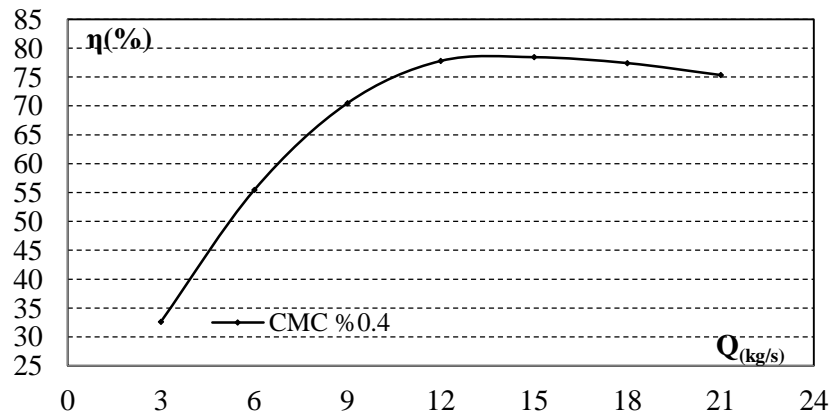
**Şekil 4. 148.** 2. pompa, 500 rpm ve 21 kg/s'de CMC %0.4 için (a) basınç ve (b) hız (c) viskozite dağılımı

Şekiller 4.142-4.148'de 2. pompa, CMC %0.4 ile 500 rpm için 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21 kg/s debi değerlerinde yapılan nümerik analizlerde elde edilen basınç, hız ve viskozite dağılımı görselleridir. 3-21 kg/s'de CMC %0.4 ile maksimum basınç değerleri sırasıyla 1.034, 1.038, 1.045, 1.049, 1.039, 1.045 ve 1.071 bar çıkarken, maksimum hız değerleri 5.05, 5.861, 4.955, 5.027, 4.968, 4.833 ve 5.687 m/s çıkmıştır. Maksimum viskozite değerleri ise 0.04025, 0.04319, 0.04177, 0.04172, 0.04281, 0.04293 ve 0.04278 Pa.s olarak yapılan nümerik analizlerden elde edilmiştir.



**Şekil 4. 149.** 2. pompa, 500 rpm’de CMC %0.4 için pompa basma yükseklikleri

Şekil 4.149’da 2. pompa için 500 rpm’de 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21 kg/s debi değerinde CMC %0.4 ile yapılan analizlerden elde edilen basma yüksekliği verilmiştir. Pompa basma yüksekliği 500 rpm için diğer yapılan tüm analizlerde olduğu gibi sürekli düşmüştür. 2. pompa ve 500 rpm çalışma koşullarında CMC %0.4 için yapılan pompa basma yüksekliği değerleri belirtilen debi değerleri için sırasıyla 1.6329, 1.5137, 1.4499, 1.3602, 1.2072, 1.0233 ve 0.8192 m çıkmıştır. Elde edilen verilerin literatürle uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Nitekim Burlon ve ark. (2017) polimer (polyox wsr301) kullanımının pompa performansı üzerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Düşük konsantrasyonlarda Newtonian olarak davranan akışkan suya göre verimlilik benzer yapıda, pompa basma yüksekliği ise hafif bir düşüş sergilemiştir. Yüksek konsantrasyonlarda ise Newtonian olmayan akışkan ile basma yüksekliğinde %3.5 artış görmüşlerdir.



**Şekil 4. 150.** 2. pompa, 500 rpm’de CMC %0.4 için verim değerleri

Şekil 4.150'de 500 rpm ve 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21 kg/s de 2. pompa ve CMC %0.4 için nümerik analizlerden elde edilen verim değerleri verilmiştir. 2. pompa, 500 rpm'de CMC %0.4 için verim değerleri 3-55 kg/s debi aralığında sırasıyla %32.619, %55.421, %70.477, %77.7903, %78.4437, %77.4166 ve %75.3484 çıkmıştır



## 5. SONUÇ

Bu çalışmada Newtonian olmayan akışkanların farklı dizayn parametrelerine sahip iki santrifüj pompa performansı üzerine etkisi farklı rotor hızı ve debi değerlerinde nümerik olarak incelenmiştir. Bu iki farklı pompa temel tasarım parametrelerinin üzerine kanat sayısı ve kanat çıkış açısında bir optimizasyon gerçekleştirilerek tasarlanmıştır. Analizler her iki pompa içinde 1450, 1000, 500 rpm rotor hızlarında gerçekleştirilmiştir. 1. pompada 1450 ve 1000 rpm rotor hızlarında 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 kg/s debi değerleri kullanılırken, 500 rpm rotor hızında ise 3, 6, 9, 12 ve 15 kg/s debi değerleri kullanılmıştır. 2. pompa ise 1450 ve 1000 rpm rotor hızlarında 5, 15, 25, 35, 45 ve 55 kg/s debi değerleri alınırken, 500 rpm rotor hızında 3, 6, 9, 12, 15, 18 ve 21 kg/s değerleri alınmıştır. Pompa dizayn parametrelerinde her iki pompa için de Newtonian olmayan akışkanları tanımlayan modellerden olan Cross model ve Power-Law modelleri kullanılarak bu iki model karşılaştırılmıştır. Son olarak da Newtonian olmayan akışkanlar ile elde edilen veriler su verileri kıyaslanmıştır.

Tasarımı yapılan 1. pompada en iyi basma yüksekliğini 6 kanatlı pompa tasarımının verdiği görülmüştür. 6 kanatlı tasarım için basma yüksekliği 10.001 m çıkarken, 5 kanatlı tasarımda 9.41662 m ve 7 kanatlı tasarımda 9.7824 m çıkmıştır. Bu durum kanat sayısında sadece bir değişiklik pompa basma yüksekliğinin yaklaşık %7 değişebileceğini göstermiştir. En iyi pompa basma yüksekliği veren kanat çıkış açısı tasarlanan 6 kanatlı çark için  $25^0$  olarak belirlenmiştir.  $25^0$  için pompa basma yüksekliği 10.001 m olarak elde edilirken,  $20^0$  çıkış açısı için 9.76645 m ve  $30^0$  için 9.61284 m olarak tespit edilmiştir.

2. pompa için optimizasyon çalışmasında santrifüj pompa basma yükseklikleri 6, 7, 8, 9, 10 ve 11 kanatlı tasarımlar karşılaştırıldığında en yüksek basma yüksekliği değeri 10 kanatlı santrifüj pompa tasarımı için çıkmıştır. 11 kanatlı pompa tasarımında basma yüksekliği 9.67056 m çıkarke, 6, 7, 8, 9 ve 11 kanatlı tasarımlar için sırasıyla 9.3514 m, 9.42829 m, 9,49456 m, 9,61298 m ve 9,40713 m olarak elde dilmiştir. Optimizasyon çalışmasının sonucunda en iyi pompa basma yüksekliği veren kanat çıkış açısı 10 kanatlı çark için  $19^0$  olarak belirlenmiştir.  $19^0$  için pompa basma yüksekliği 9.83739 m olarak elde edilirken,  $17^0$ ,  $20^0$ ,  $25^0$  ve  $30^0$  çıkış açısı için sırasıyla 9.8317 m, 9.79685 m, 9.67056 m ve 9.64235 m olarak elde edilmiştir.

CFD programlarıyla akış alanının detayları çıkarılmış ve performansa etki eden bölgelerin kolayca saptanmasına olanak sağlandığı görülmüştür. Her iki pompada da tüm çalışma koşullarında basınç dağılımı çarkın girişinden çıkışına doğru artarken, salyangoz girişinden çıkışına doğru azalmıştır. Ayrıca salyangoz içindeki basınç düşüşü debi artışıyla beraber artmıştır. Tüm rotor hızlarında debi artışıyla salyangoz içerisindeki basınç düşüşü artmıştır. Hız dağılımı her iki pompada da çark girişinden çıkışına doğru artarken, çark kanadının çıkış ucunda da ani bir artış gözlemlenmiştir. Rotor hızlarının hepsinde debi artışıyla beraber salyangoz dil ve boğaz bölgesine yakın bölgelerde hız değerinde daha büyük artışlar gerçekleşmiştir. Santrifüj pompadaki bu basınç ve hız dağılımı temel olarak çarkın rotodinamik hareketinden kaynaklanmaktadır.

1. pompa için dizayn parametrelerinde (90 m<sup>3</sup>/sa. ve 1450 rpm) en yüksek verim ve basma yüksekliği değeri su için elde edilmiştir. 1. pompa, 1450 rpm ve 90 m<sup>3</sup>/sa. çalışma koşullarında su için elde edilen basma yüksekliği ve verim değerleri sırasıyla 10.001 m ve %77.3134 iken, CMC %0.2 için bu değerler 9.9648 m ve %77.2032 ve CMC %0.4 için 9.9529 m ve %76.7156 olarak çıkmıştır. Bu sonuçlara göre, dizayn parametrelerinde suyun basma yüksekliği CMC %0.2 ve CMC %0.4' e göre sırasıyla %0.3632 ve 0.4832% daha yüksektir. Suyun verim değerleri ise yine dizayn parametrelerinde CMC %0.2 verim değerinden %0.1427 ve CMC %0.4 değerinden %0.7779 daha yüksektir. Ancak ilk pompada 1450 rpm rotor hızında her debi değerinde en yüksek pompa basma yüksekliği ve verim değeri su için çıkmamıştır. Bu noktada 1450, 1000 ve 500 rpm' de ortak debi noktası olarak alınan 15 kg/s' de sonuçlar değerlendirilmiştir. 1450 rpm ve 15 kg/s' de su, CMC %0.2 ve CMC %0.4 için elde edilen basma yüksekliği sırasıyla 12.0423, 12,9205 ve 12.9327 m ve verim değerleri sırasıyla %69.4921, %73.1331 ve %73.2496 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre , 1450 rpm ve 15 kg/s' de en yüksek basma yüksekliği ve verim değerleri CMC %0.4' de elde edilirken, en düşük değerler suda elde edilmiştir. 1000 rpm ve 15 kg/s de su, CMC %0.2 ve CMC %0.4 için elde edilen basma yüksekliği değerleri sırasıyla 5.0944, 5.08 ve 5.0767 m olarak elde edilmiş ve en yüksek değer 1450 rpm' de elde edilenin aksine suda olduğu tespit edilmiştir. Buna göre pompa rotor hızı 1450' den 1000 rpm düşürüldüğünde pompa basma yüksekliği de azalmıştır ve bu azalma miktarı su ve

Newtonian olmayan akışkanlarda aynı oranda olmamıştır. Rotor hızı 1450 rpm' den 1000 rpm' e düşürüldüğünde su, CMC %0.2 ve CMC %0.4 için pompa basma yüksekliğindeki düşüş miktarı sırasıyla %57.6957, %57.8772 ve %57.967 olarak saptanmıştır. Su, CMC %0.2 ve CMC %0.4' nin 500 rpm' deki pompa basma yükseklikleri 1000 rpm' deki değerlerine göre sırasıyla %87.1427, %87.4527 ve %87.6159 azalarak 0.655 m, 0.6374 m, ve 0.6287 m değerlerini almıştır.

2. pompa ilk pompaya göre daha yüksek debi değerlerinde çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. 1. pompa için dizayn parametrelerinde en yüksek basma yüksekliği değeri su için çıkmasına rağmen, 2. pompa için dizayn parametrelerinde (160 m<sup>3</sup>/sa. ve 1450 rpm) en yüksek basma yüksekliği değeri CMC %0.2 için elde edilmiştir. İkinci pompa dizayn koşullarında en düşük pompa yüksekliği ve en yüksek verim suda olduğu görülmüştür. Su için elde edilen basma yüksekliği ve verim değerleri sırasıyla 9.8374 m ve %80.7802 iken, CMC %0.2 için bu değerler 9.9127 m ve %80.6648 ve CMC %0.4 için 9.8774 m ve %80.0661 olarak tespit edilmiştir. Bu verilere göre suyun basma yüksekliği CMC %0.2 ve CMC %0.4 kullanılarak elde edilen değerlere göre sırasıyla %0.7596 ve %0.4049 daha azdır. Verim değeri ise tasarım koşullarında su için CMC %0.2 göre %0.143 ve CMC %0.4' ye göre %0.8919 daha yüksektir. Ayrıca ilk pompayla benzer şekilde ikinci pompada da 1450 rpm çalışma koşulunda her debide en yüksek pompa basma yüksekliği CMC %0.2 için ve verim değeri su için çıkmamıştır. Bu nedenle 1450, 1000 ve 500 rpm' de ilk pompada olduğu gibi ortak debi noktası 15 kg/s alınarak sonuçlar bu debide değerlendirilmiştir. 1450 rpm ve 15 kg/s de su, CMC %0.2 ve CMC %0.4 için elde edilen basma yüksekliği değeri sırasıyla 12.6462, 12.6976 ve 12.7607 m olarak çıkmıştır. Sonuç olarak, 1450 rpm ve 15kg/s' de ilk pompada olduğu gibi en yüksek basma değeri CMC %0.4 için elde edilirken, en düşük basma değeri su ile yapılan analizlerde elde edilmiştir. 1450 rpm ve 15 kg/s de su, CMC %0.2 ve CMC %0.4 için elde edilen verim değeri ise sırasıyla %47.8251, %47.6865 ve %47.7497 olarak çıkmıştır. Bu değerlere göre, basma yüksekliğinin aksine en yüksek verim değeri su için elde edilirken, en düşük verim değeri CMC %0.2 için elde edilmiştir. 1000 rpm ve 15 kg/s' de su, CMC %0.2 ve CMC %0.4 için elde edilen basma yüksekliği değeri sırasıyla 5.8626, 5.8862 ve 5.911 m olarak elde edilmiştir. Rotor hızı 1450 rpm' den 1000 rpm'e düşürüldüğünde su, CMC %0.2 ve CMC %0.4 için meydana gelen pompa basma yüksekliğindeki azalma miktarı sırasıyla %53.6414,

%53.6432 ve %53.678 olarak tespit edilmiştir. 500 rpm' deki pompa basma yükseklikleri ise su, CMC %0.2 ve CMC %0.4 için sırasıyla 1.2043, 1.206 ve 1.2072 m olarak elde edilmiştir ki bu değerler 1000 rpm' deki değerlerden sırasıyla %79.4579, %79.5114 ve %79.5770 daha azdır. İkinci pompa, 15 kg/s de rotor hızının 1000 rpm' den 500 rpm' e düşmesiyle pompa basma yüksekliğindeki azalma oranı, 1450 rpm' den 1000 rpm' e düşmesiyle olan azalmadan daha büyük çıkmıştır.

Analizleri yapılan bu iki pompa da tasarım koşullarında daha düşük özgül hızlı olan ilk pompada en yüksek basma yüksekliğine ve verim değerine sahip akışkan su olurken, ikince pompada en yüksek basma yüksekliğine sahip akışkan CMC %0.2 fakat en iyi verim değerine sahip akışkan su olmuştur. Aynı rotor hızlarında ikinci pompanın birim miktar akışkana kazandırdığı basma yüksekliği ilk pompadan daha büyüktür. Dizayn parametrelerinde daha düşük özgül hızlı olan ilk pompanın suyu basma verimi %77.3634 iken daha büyük özgül hızlı olan ikinci pompanın verimi %80.7802' dir. Her iki pompada farklı rotor hızlarında yapılan analizlere göre rotor hızı değişiminden en fazla etkilenen akışkan CMC %0.4' tür.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında görülmüştür ki Newtonian olmayan akışkan kullanımıyla elde edilen pompa basma yüksekliği ve verim değerleri pompa geometrisine, rotor hızına ve debi değerlerine göre değişmektedir. Ayrıca daha büyük özgül hızlı ikinci pompanın akışkanın viskozitesine karşı daha hassas davrandığı görülmektedir. Bu durum aynı çapa sahip çarklardan kanat sayısının daha fazla olanın akışkan viskozitesine karşı daha hassas olması ile açıklanabilir.



## KAYNAKLAR

- Abazariyan S., Rafee R., Derakhshan S. 2018.** Experimental study of viscosity effects on a pump as a turbine performance. *Renewable Energy*, 127:539-547.
- Aldi N., Buratto C., Casari N., Dainese D., Mazzanti M., Mollica F., Munari E., Occari M., Pinelli M., Randi S., Spina P.R. Suman A., 2017.** Experimental and numerical analysis of a non-newtonian fluids processing pump. 72nd Conference Of The Italian Thermal Machines Engineering Association, 6-8 September, 2017, Lecce, Italy.
- Bacharoudis E.C., Filios A.E., Mentoz M.D., Margaris D.P. 2009.** Parametric study of a centrifugal pump impeller by varying the outlet blade angle. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2:75-83.
- Blanco, E., Fernandez, J., Gonzalez. J., Santolaria, C. 2000.** Numerical flow simulation in a centrifugal pump with impeller-volute interaction. Fluid Engineering Division Summer Meeting, 11-15 June, 2000, Boston, Massachusetts, USA.
- Buratto C., Occari M., Aldi N., Casari N., Pinelli M., Spina PR., Suman A. 2017.** Centrifugal pumps performance estimation with non-newtonian fluids: review and critical analysis, Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics, 3-7 April, 2017, Stockholm, Sweden.
- Burlon F., Micheli D., Furlanetto R., Simonato M., Cucit V. 2017.** Influence of polymer solution on pump performance. 72<sup>nd</sup> Conference of The Italian Thermal Machines Engineering Association, 6-8 September 2017, Lecce, Italy
- Chakraborty S., Choudhari D., Dutta C., Debbarma B. 2013.** Prediction of centrifugal pumps with variations of blade number. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 72:373-378.
- Chakraborty S., Pandey K.M., Roy B. 2012.** Numerical analysis on effects of blade number variations on performance of centrifugal pumps with various rotational speeds. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2:143-152.
- Cellek M.S., Engin T. 2016.** 3-D Numerical investigation and optimization of centrifugal slurry pump using computational fluid dynamics. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 36:69-83.
- Gonzalez, J., Fernandez, J., Blanco, E., Santolaria, C. 2002.** Numerical simulation of the dynamic effect due to impeller-volute interaction in a centrifugal pump. *Journal of Fluid Engineering*, 124:348-355.
- Gülich J.F. 2010.** Centrifugal pumps. Springer, Berlin, 964 pp.
- Hancıoğlu, E., Ataş, S. 2004.** Radyal akışlı santrifüj çark tasarımında optimum meridyonel profilin çiziminde teorik ve deneysel yaklaşım. Pompa-Vana Kongresi, 22-24 Kasım, Hilton, İstanbul.
- Ozturk A., Aydin K., Sahin B. ve Pinarbasi A., (2013),** Effect of impeller diffuser radial gap ratio in a centrifugal pump. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 68:203-213.
- Houlin L., Yong W., Shouqi Y., Minggao T., Kai W. 2010.** Effects of blade number on characteristics of centrifugal pumps. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 23:1-6.
- Hussein, Mohammed A.M. 2013.** Effect of rotational speed variation on the static pressure in the centrifugal pump. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 8:83-94.

- Jafarzadeh B., Hajari A., Alishahi M.M., Akabri M.H. 2011.** The Flow simulation of a low-specific-speed high-speed centrifugal pump. *Applied Mathematical Modelling*, 35:242-249.
- Kaewnai S., Chamoot M., Wongwises S. 2008.** Prediction performance of radial type impeller of centrifugal pump using CFD. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23:1620-1627.
- Kaewnai S., Wongwises S. 2013.** Analysis of flow through a double- acting impeller with a straight radial blades using CFD. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*, 3:37-43.
- Khalili G.A.H., Mostoufi N., Sadeghi F., Hosseinzadeh M., Fataurechi H., Sarrafzadeh M.H., Mehrnia M.R. 2011.** Comparison between different models for characterization of activated sludge. *Iran J. Environ. Health. Sci. Eng.*, 8(3):255-264
- Konuralp, O., Özkelemci H., Albayrak K., Açıkgoz A. 2005.** Düşey milli çok kademeli bir pompanın performans değerlerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımı ile belirlenmesi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması. 5. Pompa Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, İstanbul.
- Pinho F.T., Whitelaw J.H. 1990.** Flow of non-Newtonian fluids in a pipe. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 34:129-144.
- Rajendran S., Purushothaman K. 2012.** Analysis of a centrifugal pump impeller using ANSYS-CFX. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 1:3.
- Sagban M.K. 2014.** A CFD Investigation of the Hydrodynamic Characteristics of Fluid Flow through an Impeller and Multi-Objective Design Optimization of a Centrifugal Pump. Yüksek Lisans Tezi. Embry-Riddle Aeronautical University, Florida.
- Shojaeefard M.H., Tahani M., Ehghaghi M.B., Fallahian M.A., M. Beglari. 2012.** Numerical study of the effects of some geometric characteristics of a centrifugal pump impeller that pumps a viscous fluid. *Computer and Fluid*, 60:61-70.
- Yassine K. C., Hammoud A. H., Khalil M.F. 2010.** Experimental investigation for centrifugal slurry pump performance. Proceedings of the 10th International Congress of Fluid Dynamics, December 2010, Ain Soukhna, Egypt,
- Yeğiner Y.,2014.** Yerçekimi Etkili Newtonyen Olmayan Düşen Film Akışı. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Zhang G., Zhang M., Yang W., Zhu X., Hu Q. 2008.** Effects of non-Newtonian fluid on centrifugal blood pump performance. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35:613–617.
- Zhou L., Shi W., Wu S. 2013.** Performance optimization in a centrifugal pump impeller by orthogonal experiment and numerical simulation. *Advances in Mechanical Engineering*, 3:1-7.
- Zhou. W., Zaho, Z., Lee, T.S., Winito, S.H. 2003.** Investigation of flow through centrifugal pump impellers using computational fluid dynamics, *International Journal of Rotating Machinery*, 9(1): 49-61.