

**T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI TİPLERDE İMAL EDİLEN ÇARK KANATLARININ  
SANTRİFÜJ KALP DESTEK POMPASI PERFORMANSINA  
ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ÜSAME ALİ USCA**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**TEZ DANIŞMANI  
Dr. Öğr. Üyesi Mahir UZUN**

**İKİNCİ TEZ DANIŞMANI  
Prof. Dr. Rafet YAPICI**

**BİNGÖL-2018**

T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TIPLERDE İMAL EDİLEN ÇARK KANATLARININ  
SANTRİFÜJ KALP DESTEK POMPASI PERFORMANSINA  
ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Üsâme Ali USCA

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE  
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 06.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi  
Mahir UZUN  
Jüri Başkanı

Dr. Öğr. Üyesi  
Erdem IŞIK  
Üye

Dr. Öğr. Üyesi  
Adem YAR  
Üye

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Doc. Dr. Zafer SİAR  
Enstitü Müdürü



## ÖNSÖZ

Tez çalışmaları süresince yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mahir UZUN'a candan teşekkür ederim.

Lisans ve lisansüstü eğitimim boyunca bilgi ve desteğini esirgemeyen, bana vermiş olduğu emek için ve ayırmış olduğu zaman için değerli hocam Prof. Dr. Rafet YAPICI'ya candan teşekkür ederim.

Tez döneminde Selçuk Üniversitesi'ne görevlendirilmemde çok büyük kolaylıklar sağlayan bölüm başkanımız, hocam Prof. Dr. Ali İNAN'a ve Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dekanlığı'na teşekkür ederim

Tez çalışmasına desteklerinden dolayı Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne (Proje No: BAP-MMF.2017.00) teşekkür ederim.

Deney sisteminin kuruluş aşamasında ve deneylerin gerçekleştirilmesinde emeği geçen, tez döneminde bilgi ve birikimlerini esirgemeyen Arş. Gör. Ömer İNCEBAY'a göstermiş olduğu ilgi için çok teşekkür ederim. Ayrıca deney çalışmaları esnasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Fehmi MUTLU'ya ve desteklerinden dolayı Arş. Gör. Erdinç İKİNCİOĞULLARI'na teşekkür ederim.

Son olarak bende büyük emekleri olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve dualarını esirgemeyen annem Fatma USCA'ya ve babam Ahmet USCA'ya kardeşim Ömer Faruk USCA'ya, tezin hazırlanması sırasında gösterdiği sabır, fedakârlık ve desteğinden dolayı eşim Ayşe Büşra USCA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

**Üsame Ali USCA**

**Bingöl 2018**

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kalp Yetmezliği.....	1
1.2. Kalp Yapısına Genel Bakış.....	1
1.2.1. Kalp Fizyolojisi.....	1
1.2.2. Kalp Kasının Fizyolojisi ve Kan Basıncı.....	3
1.3. Rotodinamik Pompalar.....	4
1.3.1. Santrifüj Pompalar.....	4
1.3.2. Eksenel Pompalar.....	4
1.3.3. Karışık Akışlı Pomplar.....	5
1.4. Kalp Destek Pompları.....	5
1.4.1. Kalp Destek Pompalarında Tasarım Parametreleri.....	5
1.4.2. Kalp Destek Pompalarının Sınıflandırılması.....	7
1.4.3. Kalp Destek Pompalarına İlişkin Yapılan Çalışmalar.....	9
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	29
3.1. Sayısal Analize Giriş.....	29

3.2. Farklı Kanat Tiplerine Sahip Çarkların Katı Modellemesi.....	33
3.3. Diğer Pompa Elemanlarının Katı Modellemesi.....	35
3.4. HAD Analizi.....	37
3.4.1. Pompa Modellerinin Akışkan ile Doldurulması.....	37
3.4.2. Pompa Modellerine Mesh (Çözüm Ağı) Oluşturma.....	39
3.4.3. Fluent Modelinin Hazırlanması.....	41
3.5. Deneysel Çalışma.....	46
3.5.1. Farklı Kanat Geometrilili Çarkların ve Pompa Milinin İmalatı.....	46
3.5.2. Deney Seti ve Hesaplamalar.....	56
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....</b>	<b>59</b>
4.1. HAD Analizinden Elde Edilen Bulgular.....	59
4.1.1. Pompa İç Akışının Analiz Bulguları.....	59
4.1.2. Pompa Hidrolik Performans Analizinin İncelenmesi.....	82
4.2. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular.....	87
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>94</b>
5.1. Sonuçlar.....	94
5.2. Öneriler.....	95
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>97</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>102</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
VAD	: Ventricular Assist Device
CFD	: Computer Fluid Dynamics
ABD	: Anabilim Dalı
CNC	: Computer Numerical Control
CAD	: Computer Aided Design
CAM	: Computer Aided Manufacturing
NIH	: Normalleştirilmiş Hemoliz Şiddeti
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
DNS	: Doğrudan Sayısal Çözüm
LES	: Büyük Eddy Simülasyonu
$\Delta Hb$	: Serbest Bırakılan Hemoglobin
D	: Hücre Deformasyonu
Hb	: Toplam Hemoglobin
t	: Süre (sn)
$\sigma$	: Kayma Gerilmesi (Pa)
Re	: Reynolds
$\rho$	: Yoğunluk ( $kg/m^3$ )
V	: Akışkan Hızı (m/s)
$D_b$	: Boru Çapı (m)
$\mu$	: Kinematik Vizkozite ( $m^2/sn$ )
k	: Türbülans Kinetik Enerjisi
$\epsilon$	: Türbülans Enerjisi Yayılım Oranı
I	: Türbülans Yoğunluğu
L	: Türbülans Uzunluk Ölçeği
T.I.	: Türbülans Şiddeti
$\Delta P_t$	: Toplam Basınç Farkı (mm-Hg)

$P_{tç}$	: Toplam Çıkış Basıncı (mm-Hg)
$P_{tg}$	: Toplam Giriş Basıncı (mm-Hg)
$P_t$	: Toplam Basınç (mm-Hg)
$N_ç$	: Çark Gücü (W)
$N_s$	: Özgül Hız
$N_a$	: Akışkan Gücü (W)
$T$	: Tork (Nm)
$\eta_h$	: Hidrolik Verim
$\eta_p$	: Pompa Verimi
$N_m$	: Mil Gücü (W)
$N_{motor, \text{yükte}}$	: Yükteki Motor Gücü (W)
$N_{motor, \text{boşta}}$	: Boştaki Motor Gücü (W)
$\omega$	: Açısal Hız (rad/sn)
$Q$	: Debi (l/dk)

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Kalbin yapısı.....	2
Şekil 1.2.	Tansiyon değerleri.....	3
Şekil 1.3.	Santrifüj pompa.....	4
Şekil 1.4.	Eksenel akışlı pompa.....	5
Şekil 1.5.	Heart Ware kalp destek pompası.....	6
Şekil 1.6.	Kalp destek pompalarının sınıflandırılması.....	8
Şekil 1.7.	Santrifüj kalp destek pompalarının sınıflandırılması.....	8
Şekil 1.8.	İkinci nesil kalp destek pompaları.....	10
Şekil 1.9.	Üçüncü nesil kalp destek pompaları.....	10
Şekil 2.1.	Hemoliz deney düzeneği.....	11
Şekil 2.2.	Üç farklı pompanın tasarım parametreleri.....	12
Şekil 2.3.	Beş farklı kanat tipine sahip çark tasarımları (A: ileriye dönük kanat, B-C: radyal kanat, D-E: geriye dönük kanat).....	13
Şekil 2.4.	Kalp destek pompası deney seti.....	13
Şekil 2.5.	İki farklı bloktan oluşan pompa salyangozu.....	14
Şekil 2.6.	Üç farklı kanat tipine sahip santrifüj pompa çarkı.....	15
Şekil 2.7.	Farklı tipte imal edilen çarklar A (sol), B (orta), C (sağ).....	16
Şekil 2.8.	Türbülans modellerinin karşılaştırılması.....	17
Şekil 2.9.	Prototip model analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	17
Şekil 2.10.	16 kanatlı çarka sahip santrifüj kalp destek pompası.....	18
Şekil 2.11.	Üç farklı kanata sahip çark tipleri (A: 16 ileriye dönük kanat B:16 radyal kanat C: 8 geriye dönük kanat).....	19
Şekil 2.12.	A, B ve C kanat tiplerine ait pompa performans verileri.....	19
Şekil 2.13.	Farklı salyangoz geometrileri ve farklı yüksekliklere sahip kanat geometrileri.....	20
Şekil 2.14.	HTC kalp destek prototip pompasının performans eğrisi.....	21



Şekil 2.15.	Farklı kanat tasarımlarına sahip çark modelleri.....	22
Şekil 2.16.	Farklı kanat tasarımlarına sahip deneysel analiz sonuçları.....	23
Şekil 2.17.	Ticari olarak kullanılan pompa ile çarkı 3D yazıcıdan üretilmiş pompanın hemolitik özelliklerinin karşılaştırılması.....	23
Şekil 2.18.	Ticari olarak kullanılan pompa ile çarkı 3D yazıcıdan üretilmiş pompanın hidrolik performansının karşılaştırılması.....	24
Şekil 2.19.	Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.20.	CFD analizinde kullanılan pompa modeli.....	26
Şekil 2.21.	5 l/dk debide gerçekleştirilen CFD analiz sonuçları.....	26
Şekil 2.22.	Dizayn edilen aksel kalp destek pompası.....	27
Şekil 2.23.	Karışık akışlı pompa montajı.....	28
Şekil 3.1.	Anlık hız bileşeni u' nun zamana göre değişimi.....	30
Şekil 3.2.	Enerji şalesi.....	31
Şekil 3.3.	Türbülans modellerinin sınıflandırılması.....	32
Şekil 3.4.	3 boyutlu çark tasarımının 2 boyutlu, örtüsüz ve göbeksiz tasarıma dönüşümü.....	33
Şekil 3.5.	Santrifüj kalp destek pompası için tasarlanan eğri kanat tipine sahip çark.....	34
Şekil 3.6.	Santrifüj kalp destek pompası için tasarlanan radyal kanat tipine sahip çark.....	34
Şekil 3.7.	Santrifüj kalp destek pompası için tasarlanan eğik kanat tipine sahip çark.....	34
Şekil 3.8.	Santrifüj kalp destek pompası için tasarlanan salyangoz gövde.....	35
Şekil 3.9.	Deneysel çalışma için üretilmiş salyangoz gövdenin ön bloğu.....	36
Şekil 3.10.	Deneysel çalışma için üretilmiş salyangoz gövdenin arka bloğu.....	36
Şekil 3.11.	Deneysel çalışma için üretilmiş pompa mili.....	37
Şekil 3.12.	Tasarlanan çark modellerine yapılan sanal örtü.....	38
Şekil 3.13.	Akışkan ile doldurulmuş çark.....	38
Şekil 3.14.	Akışkan ile doldurulmuş pompa montajı.....	39
Şekil 3.15.	Mesh (çözüm ağı) oluşturulması.....	40
Şekil 3.16.	Eğik kanat profilli çarka sahip pompanın mesh bağımsızlık test grafiği ( $\Delta P$ -node sayısı).....	40

Şekil 3.17. Eğik kanat profilli çarka sahip pompanın mesh bağımsızlık test grafiği (tork–node sayısı).....	41
Şekil 3.18. Reynolds sayısı-debi grafiği.....	41
Şekil 3.19. Çark akışkanının hareket özellikleri.....	42
Şekil 3.20. Akışkan giriş sınır koşulları.....	43
Şekil 3.21. Akışkan çıkış sınır koşulları.....	44
Şekil 3.22. Akışkan duvarı sınır koşulları.....	44
Şekil 3.23. Türbülans şiddeti hesaplamaları.....	45
Şekil 3.24. Yakınsama kriteri değişim hesabı.....	45
Şekil 3.25. Çark üretim şeması.....	46
Şekil 3.26. Radyal kanatlı çarka ait kaba ve finiş operasyon takım yolları.....	47
Şekil 3.27. Eğik kanatlı çarka ait kaba ve finiş operasyon takım yolları.....	47
Şekil 3.28. Eğri kanatlı çarka ait kaba ve finiş operasyon takım yolları.....	48
Şekil 3.29. Çarkların arka yüzeyi için oluşturulmuş takım yolları.....	48
Şekil 3.30. Çarkın arka yüzeyi için delik operasyonu.....	49
Şekil 3.31. Manuspost yazılımı ile post dönüşümü.....	49
Şekil 3.32. Ø10 mm karbür parmak freze özellikleri ve kesme değerleri.....	50
Şekil 3.33. Ø3 mm karbür parmak freze özellikleri.....	50
Şekil 3.34. Ø3 mm karbür parmak freze kesme değerleri.....	51
Şekil 3.35. Ø4 mm matkap takım özellikleri.....	51
Şekil 3.36. Ø4 mm matkap kesme değerleri.....	52
Şekil 3.37. Ø4 mm matkap takım ömrü.....	52
Şekil 3.38. Ø5,16 mm matkap takım özellikleri.....	53
Şekil 3.39. Ø5,16 mm matkap kesme değerleri.....	53
Şekil 3.40. Ø5,16 mm matkap takım ömrü.....	54
Şekil 3.41. Geriye dönük eğri kanat profiline sahip çark.....	54
Şekil 3.42. Radyal kanat profiline sahip çark.....	55
Şekil 3.43. Eğik kanat profiline sahip çark.....	55
Şekil 3.44. Kademeli pompa mili.....	55
Şekil 3.45. Radyal kanat profilli çarka sahip pompanın 3850 dev/dk dönme hızında deney tekrarları.....	56
Şekil 3.46. Deney setinin fotoğrafı.....	57

Şekil 3.47.	Deney setinin şematik gösterimi.....	57
Şekil 4.1.	Pompa montajı için akış çizgileri (Eğik kanat-3500 dev/dk-5 l/dk).....	60
Şekil 4.2.	Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğik kanat-3500 dev/dk-5 l/dk).....	60
Şekil 4.3.	Pompa montajı için akış çizgileri (Eğik kanat-3850 dev/dk-5 l/dk).....	61
Şekil 4.4.	Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğik kanat-3850 dev/dk-5 l/dk).....	61
Şekil 4.5.	Pompa montajı için akış çizgileri (Eğik kanat-4250 dev/dk-5 l/dk).....	62
Şekil 4.6.	Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğik kanat-4250 dev/dk-5 l/dk).....	62
Şekil 4.7.	Pompa montajı için akış çizgileri (Eğri kanat-3500 dev/dk-5 l/dk).....	63
Şekil 4.8.	Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğri kanat-3500 dev/dk-5 l/dk).....	63
Şekil 4.9.	Pompa montajı için akış çizgileri (Eğri kanat-3850 dev/dk-5 l/dk).....	64
Şekil 4.10.	Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğri kanat-3850 dev/dk-5 l/dk).....	64
Şekil 4.11.	Pompa montajı için akış çizgileri (Eğri kanat-4250 dev/dk-5 l/dk).....	65
Şekil 4.12.	Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğri kanat-4250 dev/dk-5 l/dk).....	65
Şekil 4.13.	Pompa montajı için akış çizgileri (Radyal kanat-3500 dev/dk-5 l/dk).....	66
Şekil 4.14.	Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğri kanat-3500 dev/dk-5 l/dk).....	66
Şekil 4.15.	Pompa montajı için akış çizgileri (Radyal kanat-3850 dev/dk-5 l/dk).....	67
Şekil 4.16.	Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğri kanat-3850 dev/dk-5 l/dk).....	67
Şekil 4.17.	Pompa montajı için akış çizgileri (Radyal kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)....	68
Şekil 4.18.	Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğri kanat-4250 dev/dk-5 l/dk).....	68
Şekil 4.19.	Tasarım debi ve dönme hızında çark akışkanlarının karşılaştırılması (sırasıyla eğik kanat, eğri kanat ve radyal kanat).....	69
Şekil 4.20.	Tasarım debi ve dönme hızında montaj içi akışkanlarının karşılaştırılması (sırasıyla eğik kanat, eğri kanat ve radyal kanat).....	70
Şekil 4.21.	Pompa montajı için basınç dağılımı (Eğik kanat-3500 dev/dk-5 l/dk)....	71
Şekil 4.22.	Pompa montajı için basınç dağılımı (Eğik kanat-3850 dev/dk-5 l/dk).....	72
Şekil 4.23.	Pompa montajı için basınç dağılımı (Eğik kanat-4250 dev/dk-5 l/dk).....	72
Şekil 4.24.	Pompa montajı için basınç dağılımı (Eğri kanat-3500 dev/dk-5 l/dk).....	73
Şekil 4.25.	Pompa montajı için basınç dağılımı (Eğri kanat-3850 dev/dk-5 l/dk).....	73
Şekil 4.26.	Pompa montajı için basınç dağılımı (Eğri kanat-4250 dev/dk-5 l/dk).....	74
Şekil 4.27.	Pompa montajı için basınç dağılımı (Radyal kanat-3500 dev/dk-5 l/dk...)	74
Şekil 4.28.	Pompa montajı için basınç dağılımı (Radyal kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)..	75
Şekil 4.29.	Pompa montajı için basınç dağılımı (Radyal kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)..	75

Şekil 4.30.	Kayma gerilmesi dağılımı (Eğik kanat-3500 dev/dk-5 l/dk).....	76
Şekil 4.31.	Kayma gerilmesi dağılımı (Eğik kanat-3850 dev/dk-5 l/dk).....	77
Şekil 4.32.	Kayma gerilmesi dağılımı (Eğik kanat-4250 dev/dk-5 l/dk).....	77
Şekil 4.33.	Kayma gerilmesi dağılımı (Eğri kanat-3500 dev/dk-5 l/dk).....	78
Şekil 4.34.	Kayma gerilmesi dağılımı (Eğri kanat-3850 dev/dk-5 l/dk).....	78
Şekil 4.35.	Kayma gerilmesi dağılımı (Eğri kanat-4250 dev/dk-5 l/dk).....	79
Şekil 4.36.	Kayma gerilmesi dağılımı (Radyal kanat-3500 dev/dk-5 l/dk).....	79
Şekil 4.37.	Kayma gerilmesi dağılımı (Radyal kanat-3850 dev/dk-5 l/dk).....	80
Şekil 4.38.	Kayma gerilmesi dağılımı (Radyal kanat-4250 dev/dk-5 l/dk).....	80
Şekil 4.39.	Tasarım noktalarında maksimum kayma gerilmesinin bulunduğu yerlerin dağılımı a) eğik kanat b) eğri kanat c) radyal kanat.....	81
Şekil 4.40.	Eğik kanat profilli çarka sahip pompa için basınç farkı-debi grafiği.....	82
Şekil 4.41.	Eğri kanat profilli çarka sahip pompa için basınç farkı-debi grafiği.....	83
Şekil 4.42.	Radyal kanat profilli çarka sahip pompa için basınç farkı-debi grafiği.....	83
Şekil 4.43.	3850 dev/dk dönme hızında farklı çarklara sahip pompa basınç farklarının karşılaştırılması.....	84
Şekil 4.44.	Eğik kanat profilli çarka sahip pompa için hidrolik verim-debi grafiği.....	84
Şekil 4.45.	Eğri kanat profilli çarka sahip pompa için hidrolik verim-debi grafiği.....	85
Şekil 4.46.	Radyal kanat profilli çarka sahip pompa için hidrolik verim-debi grafiği.....	85
Şekil 4.47.	3850 dev/dk dönme hızında farklı çarklara sahip pompa hidrolik veriminin karşılaştırılması.....	86
Şekil 4.48.	Eğik kanat profilli çarka sahip pompa için basınç farkı-debi grafiği.....	87
Şekil 4.49.	Eğri kanat profilli çarka sahip pompa için basınç farkı-debi grafiği.....	88
Şekil 4.50.	Radyal kanat profilli çarka sahip pompa için basınç farkı-debi grafiği.....	88
Şekil 4.51.	3850 dev/dk dönme hızında farklı çarklara sahip pompa basınç farklarının karşılaştırılması.....	89
Şekil 4.52.	Eğik kanat profilli çarka sahip pompa için pompa verimi-debi grafiği.....	89
Şekil 4.53.	Eğri kanat profilli çarka sahip pompa için pompa verimi-debi grafiği.....	90
Şekil 4.54.	Radyal kanat profilli çarka sahip pompa için pompa verimi-debi grafiği.....	90
Şekil 4.55.	3850 dev/dk dönme hızında farklı çarklara sahip pompa veriminin karşılaştırılması.....	91

Şekil 4.56. Tasarım dönme hızında deneysel çalışma sonuçları ile HAD analizi sonuçlarının karşılaştırılması..... 92



# FARKLI TIPLERDE İMAL EDİLEN ÇARK KANATLARININ SANTRİFÜJ KALP DESTEK POMPASI PERFORMANSINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

## ÖZET

Kalp hastalıkları içerisinde en önemli hastalık olan kalp yetmezliği, hemen hemen her ülkede olduğu gibi ülkemizde de alt ve üst yaş gruplarında görülen hastalıktır. Kalp yetmezliği kalp nakli ile aşılabilesine rağmen her zaman bu imkan sağlanamamaktadır.

Bu çalışmada, rotodinamik kalp destek pompa grubundan olan santrifüj kalp destek pompa çarkı için, farklı kanat tiplerinin pompa performansına olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle farklı kanat tiplerine (radyal, eğik ve eğri) sahip olan pompa çarkları ve diğer pompa elemanları tasarlanarak katı modelleri oluşturulmuştur. Farklı kanat tipine sahip üç pompanın sayısal analizi, farklı dönme hızlarında 2-7 l/dk debi aralığında HAD yazılımı ile yapılarak ön sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar için katı modeli tasarlanan çarklar CNC freze tezgahında üretilmiştir. Farklı kanat tiplerine sahip çarklardan oluşan pompaların; deney setinde (kapalı yapay kalp devresi), farklı dönme hızlarında basınç, debi ve güç ölçümü yapılarak pompa performansları eğrileri oluşturulmuştur. Bu çalışma için 3850 dev/dk dönme hızı, 100 mm-Hg basınç yükü ve 5 l/dk debi tasarım parametresi olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler işlenerek HAD analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Santrifüj kalp destek pompası, kalp yetmezliği, HAD analizi, CNC, hidrodinamik performans, deneysel çalışma.

# **EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTS OF DIFFERENT TYPES OF IMPELLER BLADES IN CENTRIFUGAL HEART SUPPORT PUMP PERFORMANCE**

## **ABSTRACT**

Heart failure, which is the most important disease among heart diseases, is seen in almost every country as well as in upper and lower age groups in our country. Although heart failure can be overcome by heart transplantation, this is not always possible.

In this study, the effect of different blade types on pump performance was experimentally investigated for the centrifugal heart support pump component from the rotodynamic heart support pump group. In this context, firstly solid models were created by designing pump impellers and other pump elements with different blade types (radial, straight and curved). Numerical analysis of three different blade type pumps was performed with HAD software at 2-7 l / min flow rates at different rotational speeds and preliminary results were obtained. For experimental works, impellers which solid models designed, were manufactured in CNC milling machines. Pumps consisting of reeds with different blade types; pump performance curves were created by measuring pressure, flow and power at different rotational speeds in the experimental set (closed artificial heart cycle). For this study, 3850 rpm / min rotation speed, 100 mm-Hg pressure load and 5 l / min flow rate design parameter were chosen. The data obtained as a result of the experimental studies were compared with the HAD analysis results

**Keywords:** Centrifugal heart support pump, heart failure, HAD analysis, CNC, hydrodynamic performance, experimental study.

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Kalp Yetmezliği

Dünyada her yıl binlerce insanda görülen kalp yetmezliği, kalp hastalıkları arasında önemli bir yere sahiptir. Hemen hemen her ülkede olduğu gibi ülkemizde de alt ve üst yaş gruplarında görülen bir hastalıktır. Yaş sınırı arttıkça görülme sıklığı da artan kalp yetmezliği; kalp karıncıklarının vücut için gerekli olan oksijen miktarını karşılayamamasıdır. Bu hastalık, birey sağlığını ilgilendiren en önemli hastalık olmakla birlikte toplum ve ülke açısından da en önemli hastalıklardan biridir. Tedavisi uzun süren ve tedavi başarı oranı tam olarak belli olmayan kalp yetmezliği, bu hastalığa yakalanan fertler ve aileleri üzerinde hatta toplum ve ülke üzerinde de; hem psikolojik hem de ekonomik yönden önemli derecede kötü bir etkiye neden olmuştur.

Kalp yetmezliği kalp nakli ile aşılabilmesine rağmen her zaman bu imkan sağlanamamaktadır. Bu yüzden kalp yetmezliğinin tedavisi için bilim insanları gün geçtikçe daha fazla çalışma yaparak yeni tedavi yöntemleri geliştirmeye çalışmaktadırlar. Bu tedavi yöntemlerinden biri de 1950'li yıllardan beri günümüze kadar olan süre içerisinde sürekli geliştirilerek insanlığın hizmetine sunulan, kalbin kan pompalamasında önemli bir görev üstlenerek kalbe yardımcı olan kalp destek pompalarıdır.

## 1.2. Kalp Yapısına Genel Bakış

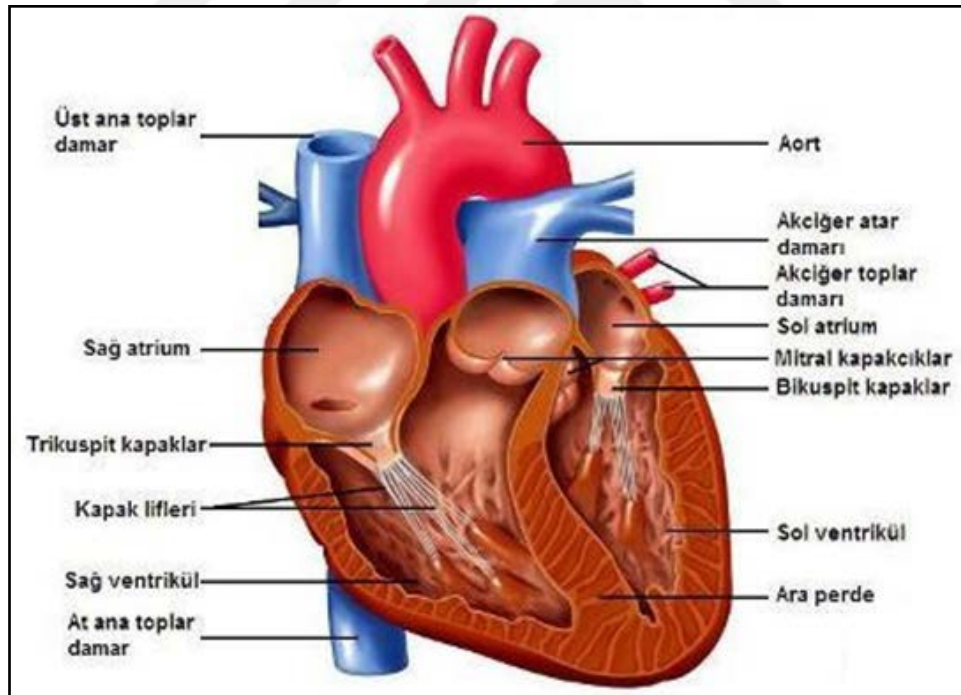
### 1.2.1. Kalp Fizyolojisi

Kalp dolaşım sisteminin (Kardiyovasküler sistem) görevi, vücudumuzda bulunan hücrelere oksijen ve besin maddelerini verip karbondioksit ve atık maddeleri uzaklaştırmaktır. Kardiyovasküler sistem üç önemli ana unsurdan oluşur; kalp, kan ve kan damarları.



İnsan vücudunun dengede kalması için kanın sürekli akmasını sağlayan kalp, bir pompa görevi görmekteyken damarlar ise bu pompanın boru görevini görmektedir. Bir insan kalbi dört odacıktan oluşur. Bunlar; sağ karıncık, sağ kulakçık, sol karıncık ve sol kulakçık. Kardiyovasküler sistemde kan, akciğer atardamarı ile kalbin sağ karıncığından akciğere taşınarak temizlenir. Akciğer toplardamarı ise akciğerde temizlenen kanı kalbin sol kulakçığına getirir, kan buradan kalbin sol karıncığına geçer ve aort atar damarıyla bütün vücuda dağılır. Daha sonra kirlenen kan, toplar damarlar vasıtasıyla sağ kulakçığa getirilir. Kulakçıkla karıncıklar arasında kan geçişi ise karıncık ile kulakçıkları ayıran kapaklar vasıtasıyla olur. Karıncık basıncının artması ile bu kapakçıklar kapanırken karıncık basıncının azalması ile kapakçıklar açılır.

Kanın akciğerdeki dolaşımına pulmoner dolaşım veya akciğer dolaşımı; kan dolaşımının büyük bir bölümünü oluşturan, vücudun diğer bölgelerindeki kan dolaşımına ise sistematik dolaşım denir.



Şekil 1.1. Kalbin yapısı (URL 1)

### 1.2.2. Kalp Kasının Fizyolojisi ve Kan Basıncı

Kalp döngüsü (kalp siklusu), kulakçık ve karıncıkların kasılması olarak bilinen sistol ve kulakçık ve karıncıkların gevşemesi olarak bilinen diyastol evrelerinden oluşmaktadır. Kalp döngüsü yani kalbin bir atımı yaklaşık 0,80 saniye sürer. Bu sürenin 0,5 saniyesi diyastol evresinde geçer ve kalan kısmı ise sistol evresinde geçmektedir (URL 2).

Kalp siklusunun diyastol bölümünde kalbe gelen kanın karıncıklara dolmasıyla karıncık hacminde belirli bir artma meydana gelir. Yine aynı şekilde sistol bölümünde de kalpten belirli miktarda kan çıkmasıyla karıncık hacminde belirli bir oranda azalma meydana gelir. Diyastol zamanının sonunda her bir karıncığın hacmi ortalama 115 ml'ye çıkar ve sistol zamanının sonunda ise bu miktar ortalama 45 ml'ye kadar düşer.

Dinlenme halindeki yetişkin bir insan kalbi, aort atardamarına bir dakikada 60 ila 80 arası çarpma sayısı ile 5 l kan pompalar. Bu değer çocuklarda 2,5 l'ye kadar düşmektedir. Kalbin bir dakikada pompaladığı kan miktarına kardiyak debi denir ve litre/dakika ile ifade edilir. Fiziksel vücut hareketine bağlı olarak kalbin bir dakikadaki pompaladığı kan miktarı 7 kat artabilir (URL 3).

Kanın, damarlarda birim alana uyguladığı kuvvete kan basıncı denir. Dinlenme halindeki erişkin bir insanın kol atardamarındaki kan basıncı 80/120 mm-Hg'dir ve bu değer, yaş arttıkça atardamarların zamanla esnekliklerini kaybetmesinden dolayı artar (URL 4). Gün içerisindeki faaliyetlerden dolayı tansiyon değerleri şekilde gösterildiği gibi değişebilir.

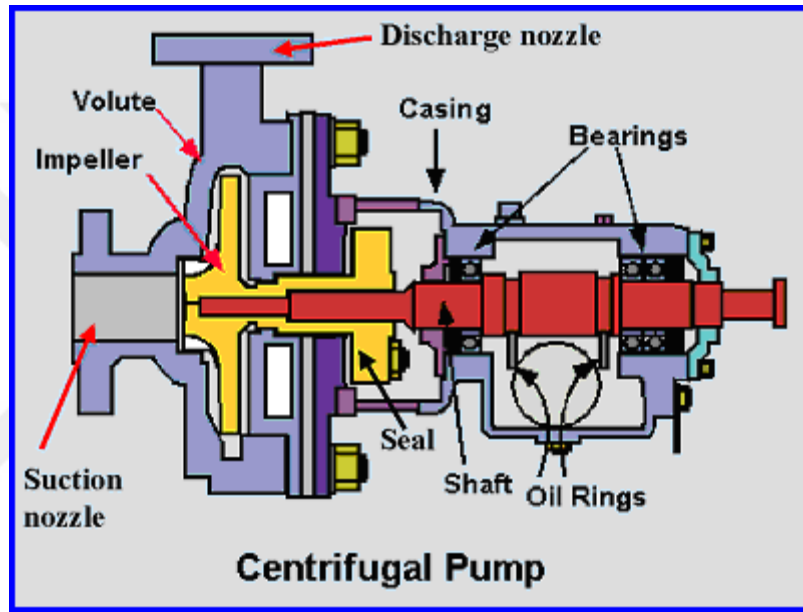
	Sistolik (büyük) tansiyon (mmHg)	Diyastolik (küçük) tansiyon (mmHg)
Toplantı	+20	+15
Çalışma	+16	+13
Seyahat	+14	+9
Yürüyüş	+12	+6
Giyinme	+11	+10
Ev işleri	+11	+10
Telefon konuşması	+10	+7
Yemek	+9	+10
Konuşma	+7	+7
Masa işi	+6	+5
Okuma	+2	+2
Televizyon izleme	0	+1
Uyku	-10	-8

Şekil 1.2. Tansiyon değerleri (URL 5)

### 1.3. Rotodinamik Pompalar

#### 1.3.1. Santrifüj Pompalar

Tahrik motorundan aldığı güç ile belirli bir eksen etrafında dönmekte olan çarkın arasına giren sıvının, basınç ve hızının artırılarak bir sonraki pompa elemanına aktarılma ilkesine dayanan pompalara “radyal akışlı” veya “santrifüj” pompa denir. Bu tip pompalarda boyut arttığı için pompa devri diğer pompalara göre nispeten düşüktür.



Şekil 1.3. Santrifüj pompa (URL 6)

#### 1.3.2. Eksenel Pompalar

Eksenel olarak gelen sıvıyı, gövde içerisindeki eksenel çark tarafından yine eksenel yönde aktaran pompalardır. Pompa çarkı, pervaneye benzeyen çok sayıda kanatçıklardan oluşur. Yüksek debi ve düşük basınç gerektiren uygulamalar için uygun bir pompa tipidir.



Şekil 1.4. Eksenel akışlı pompa (URL 7)

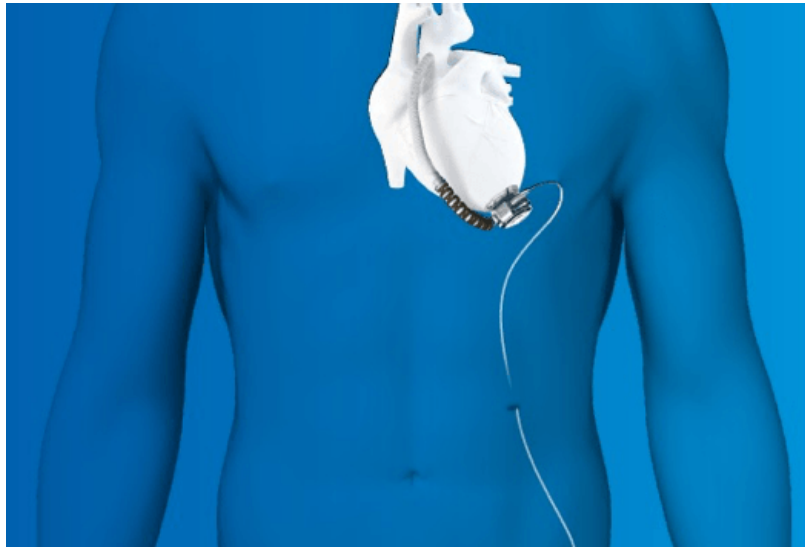
### 1.3.3. Karışık Akışlı Pompalar

Karışık akışlı pompalar, santrifüj pompaların (yüksek basınç ve düşük debi) ve eksenel pompaların (yüksek debi ve düşük basınç) arasında çalışabilecek şekilde tasarlanarak orta basınç ve orta debi işletim kademelerinde çalışmaları uygundur. Bu pompalar heliko santrifüj pompa olarak da isimlendirilir.

## 1.4. Kalp Destek Pompaları

### 1.4.1. Kalp Destek Pompalarında Tasarım Parametreleri

Kalp yetmezliği hastalığı insan vücudunda pompa gibi çalışan kalbin istenilen kan miktarına pompalayamamasından kaynaklanan bir hastalıktır. Dinlenme halinde olan yetişkin bir insan kalbi, bir dakikada ortalama 5 l kan pompalar. Kalp, bu değerin altında kan pompalamaya başladığı zaman kalp yetmezliği adı verilen bu hastalık meydana gelmektedir. Bu hastalığın tedavi edilmesindeki en etkin yöntemlerden birisi de kalp destek pompalarının kullanılmasıdır. Temelde pompa gibi çalışan kalbe destek veren bu pompalar, görevini kısmen yerine getirmeyen kalbin kan pompalamasına yardımcı olan cihazlardır. Şekil 1.4'deki gibi perikardiyal boşluk (kalp çevresindeki kese) içerisine cerrahi bir yöntemle entegre edilen kalp destek pompası sol ventrikül altından doğrudan kalbe bağlanarak oksijence bol kanı alır ve aort atar damarına iletilir.



Şekil 1.5. Heart Ware kalp destek pompası (URL 8)

Bir kalp destek pompasının kalbe yardımcı olarak görevini gerçekleştirebilmesi için çalışma parametrelerinin kalbin çalışma parametrelerine benzer olması gerekmektedir.

Dinlenme esnasındaki yetişkin biri için nominal kan ihtiyacı 5 l/dk ve çocuklar için 2,5 l/dk dır. Yetişkin ve çocuklarda nominal kan basıncı ise 100 mm-Hg pompa yükü ve buna denk gelen hidrodinamik basma yüksekliği ise 1,4 m'dir (Behbahani et al. 2009; İncebay 2017).

Kalp destek pompaları için bir başka önemli parametre ise kayma gerilmeleridir. Yüksek kayma gerilmeleri, kan hücrelerinin parçalanmasına yani hemolize neden olmaktadır. Parçalanmış kan hücreleri damar içi tıkanıklığa yol açarak insan ölümüne neden olabilir. Yapılan araştırmalarda kayma gerilmesinin üst limiti hakkında tam olarak bir sınıra rastlanılmamıştır. Buna rağmen bazı araştırmalarda kayma gerilmesinin, kan hücrelerine zarar vermeyecek üst limiti 150-800 Pa arasında olduğu bulunmuştur (Leverett et al. 1972; Grigioni et al. 2004).

Her ne kadar kayma gerilmesi kan hücreleri için önemliyse de kan hücrelerinin gerilmeye maruz kalma süresi de önemlidir. Giersiepen et al. (1990), yaptıkları bir araştırmada hücre deformasyonunun kayma gerilmesi ve zaman ilişkisini belirtmişlerdir (1.1). Bu eşitlikte, “D” hücre deformasyonu, “Hb” toplam hemoglobin miktarı, “ $\Delta Hb$ ” serbest bırakılan hemoglobin, “t” zaman ve “ $\sigma$ ” ise kayma gerilmesini ifade etmektedir.

$$D = \frac{\Delta Hb}{Hb} = 3.62 \times 10^{-7} \cdot \sigma^{2.416} \cdot t^{0.785} \quad (1.1)$$

Ve yine aynı çalışmada kayma gerilmesinin ve kan deformasyonunun zamanla olan ilişkisini de,

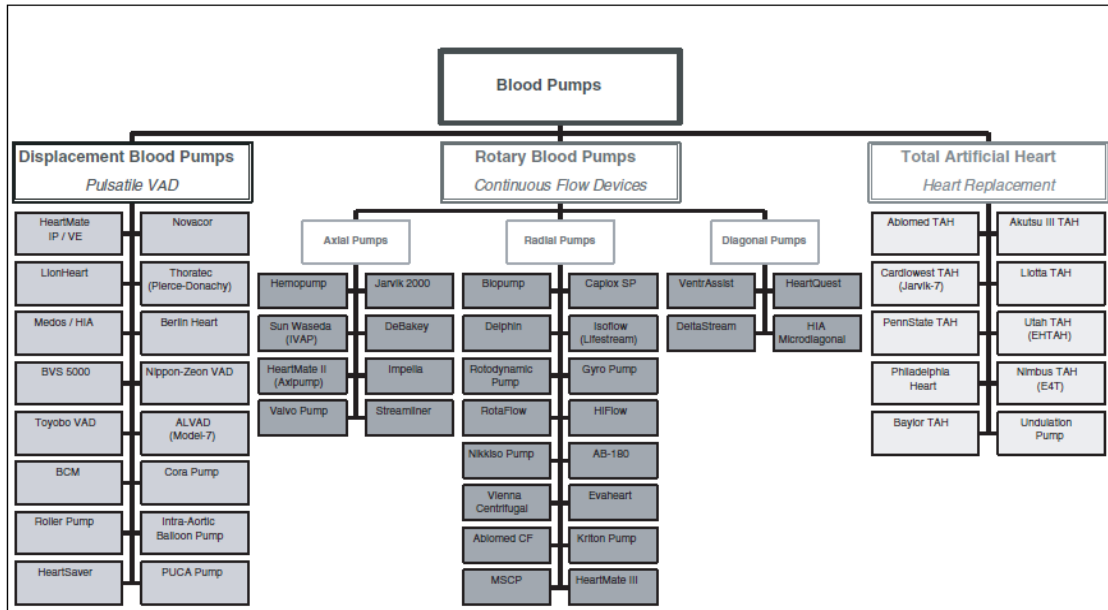
$$\frac{\Delta Hb}{Hb} = HI = A \cdot \tau^\beta \cdot t^\alpha \quad (1.2)$$

olarak ifade etmiştir. Burada da,  $A = 3,62 \times 10^{-7}$ ,  $\alpha = 0,0785$  ve  $\beta = 2,416$  olmak üzere bir sabit;  $t =$  süre (s),  $\tau =$  kayma gerilmesi (Pa),  $Hb =$  toplam hemoglobin miktarı ve  $\Delta Hb =$  serbest bırakılan hemoglobin miktarıdır. “HI” ise 0 ila 1 arasında değişmektedir.

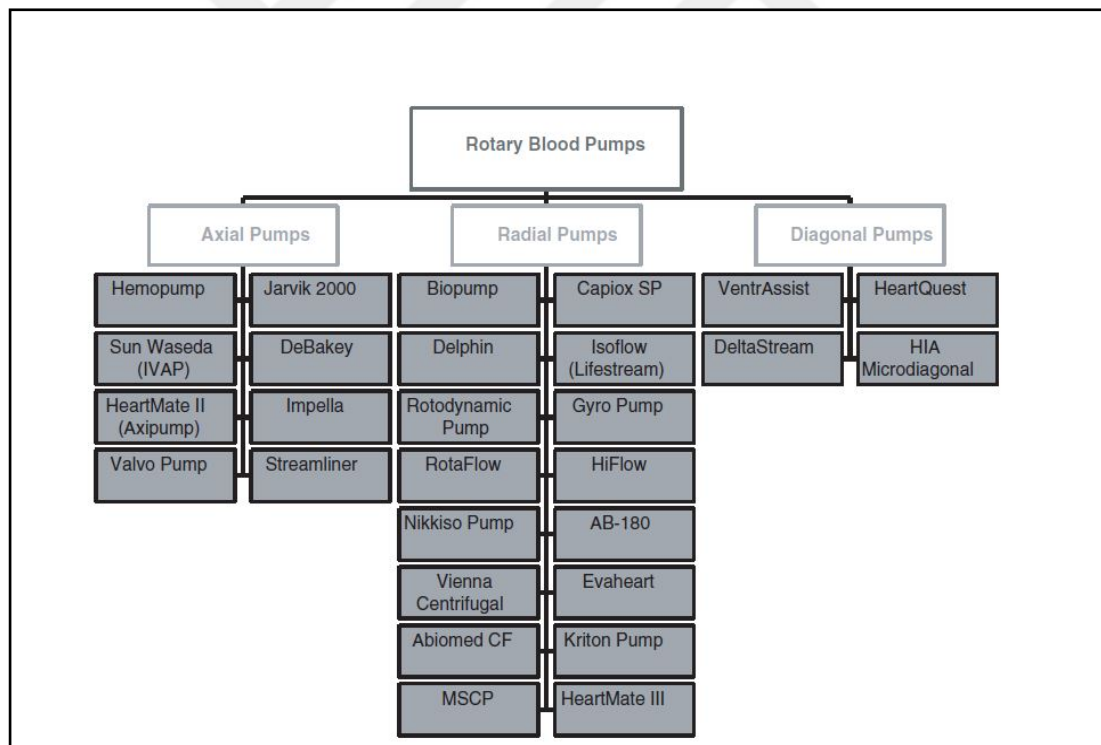
#### 1.4.2. Kalp Destek Pompalarının Sınıflandırılması

Kalp destek pompaları rotodinamik kalp destek pompaları ve deplasmanlı kalp destek pompası olmak üzere ikiye ayrılır. Bunun yanında kalbin yerine kullanılan yapay kalp olarak bilinen kalp pompaları da bu sınıflandırmaya dahil edilebilir. İlk zamanlarda deplasmanlı kalp pompaları kullanılsa da bu pompaların ortaya çıkardığı yan etkilerden dolayı zamanla rotodinamik pompa tipi daha yaygın hale gelmiştir (İncebay 2017).

Reul and Akdis (2000), günümüzde kullanılan ve halen tasarım aşamasında olan pompaların bir sınıflandırmasını yapmıştır. Şekil 1.4’de dünya çapında en çok bilinen kan pompası kategorisine girmiş olan rotodinamik ve deplasmanlı kan pompalarıyla birlikte yapay kalpler sunulmuştur. Ve ayrıca rotodinamik kalp destek pompaları da ayrı bir şemada sunulmuştur (Şekil 1.5).



Şekil 1.6. Kalp destek pompalarının sınıflandırılması (Reul and Akdis 2000)



Şekil 1.7. Santrifüj destek pompalarının sınıflandırılması (Reul and Akdis 2000)

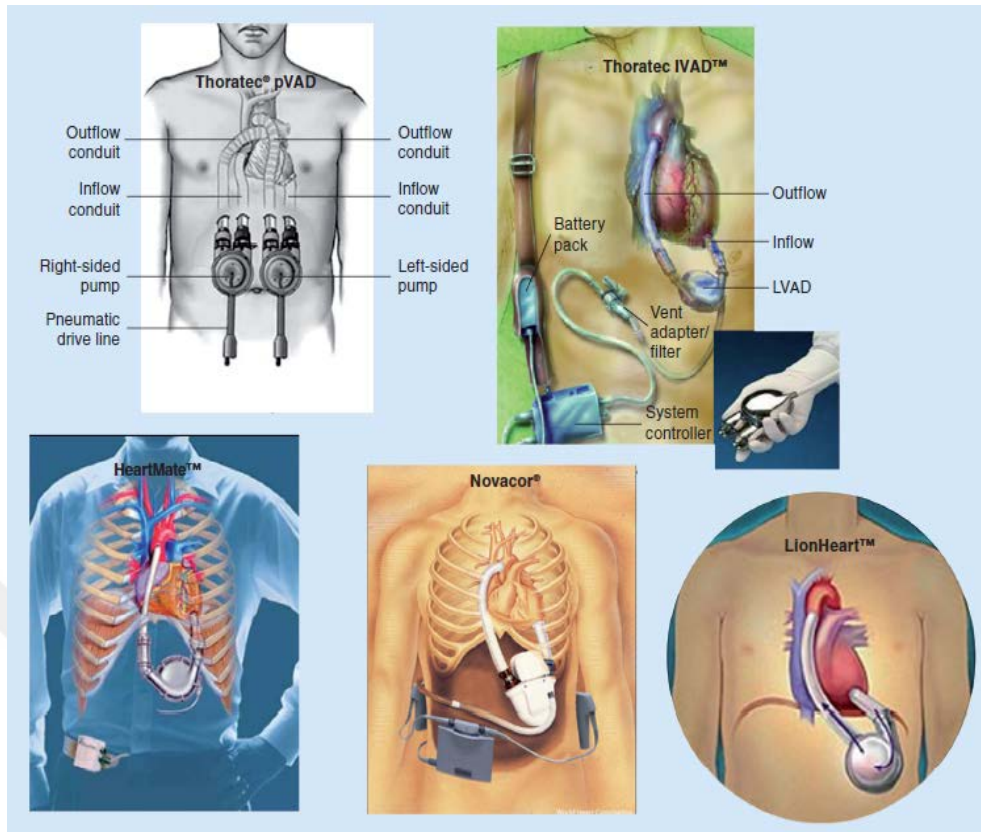
### 1.4.3. Kalp Destek Pompalarına İlişkin Yapılan Çalışmalar

Ventriküler destek sistemiyle ilgili başarılı klinik uygulaması, 1812’de kalp yetmezliği hastalığında bir destek sisteminin kullanılma fikrinin ortaya atılmasından 150 yıl kadar sonra 1966’da DeBakey ve Liotta tarafından yapılmıştır (Eğrican et al. 2010).

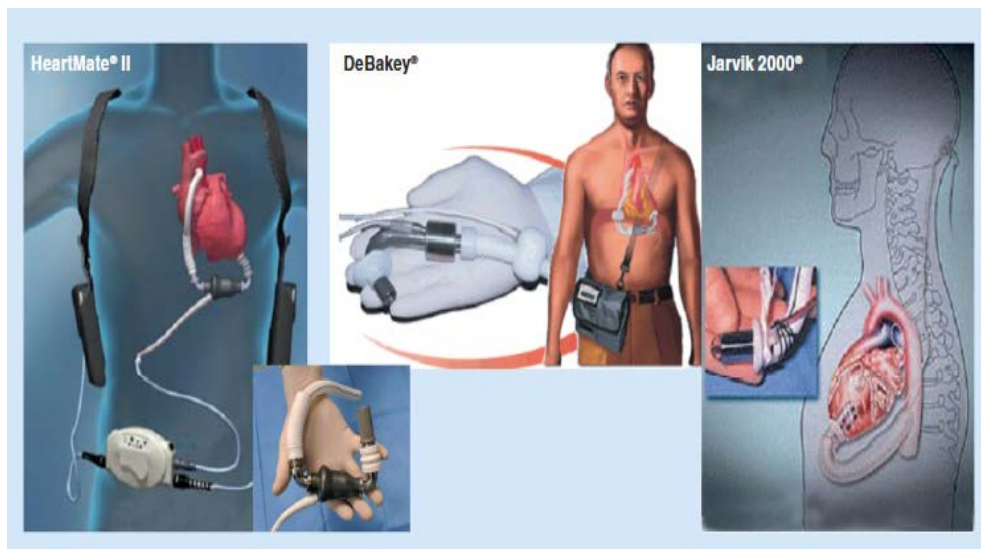
2000’li yıllarda teknolojinin gelişmesinden dolayı kalp destek pompaları konusundaki çalışmalar da hızlanarak daha modern kalp pompaları üretilmiştir. Başlıca modern pompalar;

- VentrAssist LVAD
- Duraheart
- HVAD
- Evaheart
- Pedipump
- HeartQuest
- HeartMate
- Thoratec IVAD
- Thoratec pVAD
- Novacor
- LionHeart
- DeBakey
- Jarvik 2000





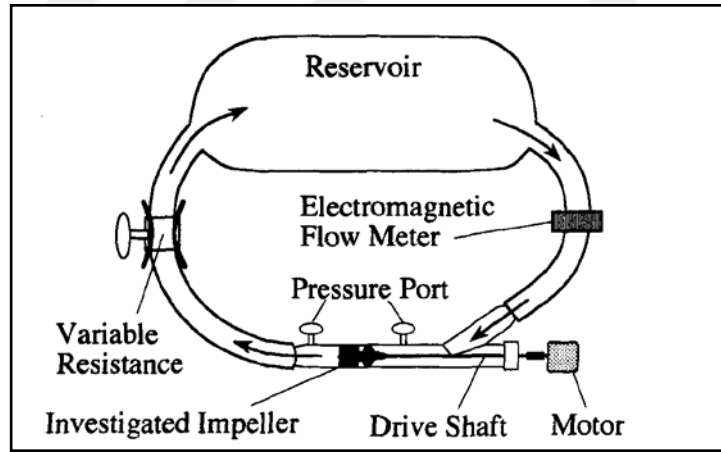
Şekil 1.8. İkinci nesil kalp destek pompaları (Alba and Delgado 2009)



Şekil 1.9. Üçüncü nesil kalp destek pompaları (Alba and Delgado 2009)

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Anai et al. (1996), hemolizin azaltılmasına yönelik yaptıkları bir çalışmada; standart mühendislik aralığı dışı pompa devirleri seçmişler (A, 14000; B, 18000; C, 22000 ve D, 26000 dev/dk) ve pompa performans eğrilerini oluşturarak maksimum pompa verimini tespit etmişlerdir (A, %50; B, 58; C, %52 ve D, %53). Tespit edilen maksimum pompa verimine karşılık gelen özgül hızları ( $N_s$ ) hesaplamışlardır (A, 899; B, 954; C, 1218 ve D, 1951). Hematokrit ve plazmadaki serbest hemoglobin değerleri ölçülerek gerçekleştirilen hemoliz deneyleri ise kapalı yapay kalp dolaşım devresinde, 5 l/dk debide ve 100 mm-Hg basınç yükünde taze keçi kanı ile yapılmıştır (Şekil 2.1). Elde ettikleri bulgulara göre hemoliz miktarıyla pompa devrinin doğru orantılı olduğunu ve hemoliz değerlerin, toplam pompa verimi ile ilişkili olmadığını belirlemişlerdir.



Şekil 2.1. Hemoliz deney düzeneği (Anai et al. 1996)

Araki et al. (1998), santrifüj, karışık akışlı ve eksenel olmak üzere üç turbo pompa geliştirerek test düzeneğinde performansları analiz etmişlerdir.

	Centrifugal pump	Mixed flow pump	Axial flow pump
Impeller design theory	Angular momentum theory	Angular momentum theory	Airfoil cascade theory
Design point	5 L/min, 100 mm Hg, 8,000 rpm	5 L/min, 100 mm Hg, 8,000 rpm	5 L/min, 100 mm Hg, 8,000 rpm
Predicted hydraulic efficiency (impeller input to pump output)	50%	50%	60%
Specific speed at design point	452	452	433
Impeller diameter	20 mm	20 mm	20 mm
Boss diameter			16 mm
Number of vanes	4	4	6
Vane exit angle	12 degrees	13.5 degrees (mean)	
Airfoil			NACA#6409
Angle of attack			4,4-6 degrees
Pressure recovering mechanism	Volute casing	Volute casing	7 guide vanes
Inlet inner diameter	10 mm	10 mm	10 mm
Outlet inner diameter	10 mm	10 mm	10 mm
Shaft sealing	Sealless	Sealless	Sealless
Torque transmission	Magnetic couple driving	Magnetic couple driving	Magnetic couple driving
Magnet material	Neodymium	Neodymium	Neodymium
Motor	Brush DC motor	Brush DC motor	Brush DC motor

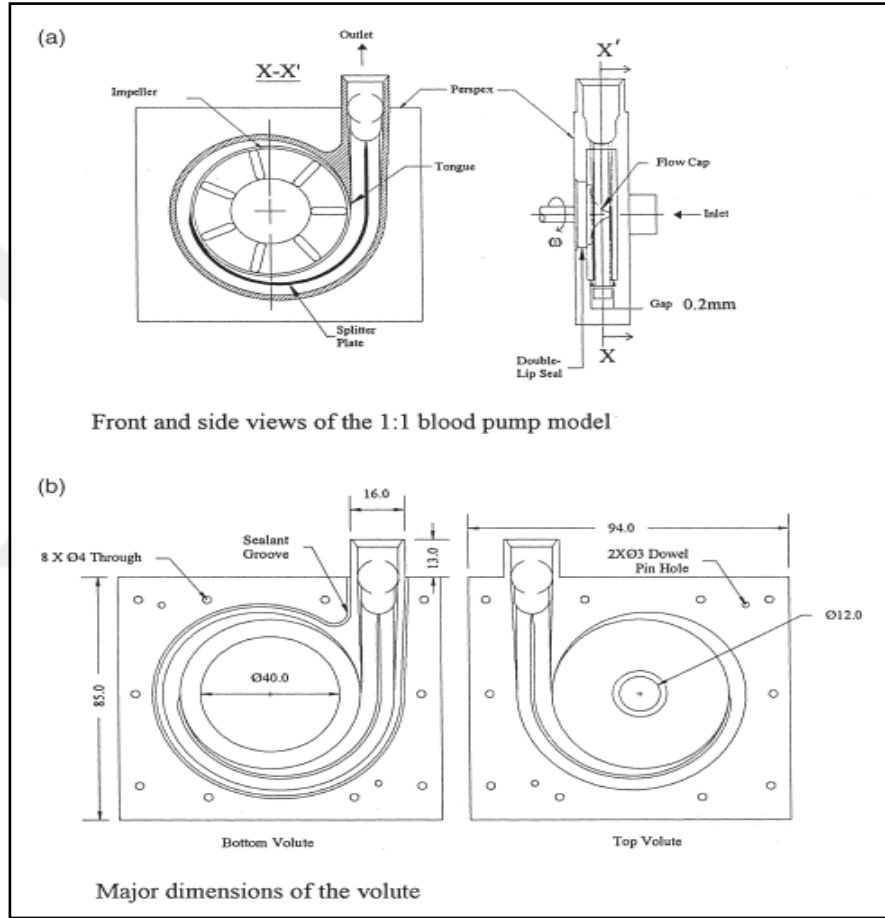
Şekil 2.2. Üç farklı pompanın tasarım parametreleri (Araki et al. 1998)

Şekil 2.2’de verilen tasarım parametrelerine göre üretilen pompaların performanslarını, kapalı yapay kalp dolaşım devresinde heparinli (pıhtılaşmayı önleyen madde) sığır kanı kullanarak ölçmüşlerdir. Motor çıkışından pompa çıkışı arası ölçülen maksimum verimi, santrifüj pompa için; 7000 dev/dk’de 3,17 l/dk debide ve 191 mm-Hg basınç yükünde %44,9 bulmuşlar, karışık akışlı pompa için; 7000 dev/dk’da 6,9 l/dk debide ve 136 mm-Hg basınç yükünde %66,3 bulmuşlar ve eksenel pompa için; 9000 dev/dk’da 5,54 l/dk debide ve 74 mm-Hg basınç yükünde %20,6 bulmuşlardır. Ayrıca yaptıkları hemoliz deneyleri sonucunda normalleştirilmiş hemoliz şiddetini (NIH) en iyi 0,010 g/100 l değeri ile eksenel pompada bulmuşlardır. Santrifüj pompada ise hemoliz değerlerinin pompa çıkışı ile ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Chua et al. (1999), model bir kalp destek pompasını, 5:1 ölçekte büyütürken bir pompa tasarlayarak beş farklı çark tipinde (ileriye dönük kanat, geriye dönük 8 kanatlı, geriye dönük 9 kanatlı, radyal 7 kanatlı ve radyal 16 kanatlı), dört farklı devirde (200, 250, 300 ve 350 dev/dk) ve pompa akışkanını ise su kullanarak pompa performans deneylerini gerçekleştirmişlerdir (Şekil 2.3).



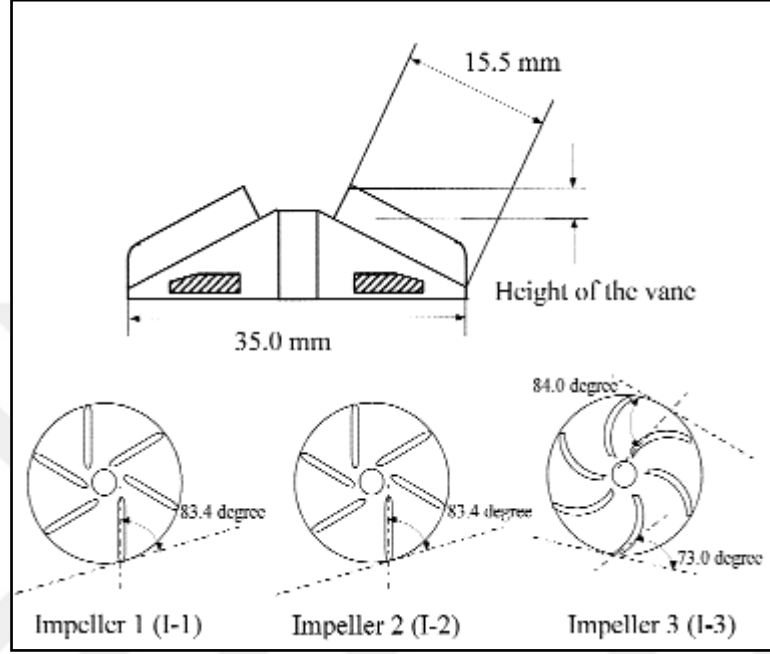
Yu et al. (2000) yaptıkları bir çalışmada çark geometrisinin santrifüj kalp destek pompası üzerinde etkisini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiştir. Her biri yedi kanata sahip dört farklı çark tasarımını (düz radyal kanat ve üç farklı kanat eğrisine sahip geriye dönük kanat) kan benzeri sıvı kullanarak 2000 dev/dk dönme hızında, hidrolik performansını test etmişlerdir. Model pompasını 2 ana parçadan oluşturmuşlardır. Pompa salyangozunu CNC tezgahında 2 ana bloktan üretmişlerdir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. İki farklı bloktan oluşan pompa salyangozu (Yu et al. 2000)

Deney sonuçlarına göre dört farklı tasarımında, başlangıç çalışma parametrelerinde yaklaşık olarak 100 mm-Hg'lik bir basınç yükü meydana getirdiği gözlenmiştir. HAD analizleri ile gerilmeleri tespit etmişler ve bundan kaynaklanan eritrosit hasarı hakkında tahminde bulunmuşlardır. Buna göre kanat bölgelerinde eritrosit hasarının eşik seviyesi olan  $150 \text{ N/m}^2$  basıncın altında olduğunu fakat kanatçıkların başlangıç kenarlarında bu seviyenin %60 üzerinde olduğunu belirlemişlerdir.

Takano et al. (2000), üç farklı kanat tipiyle (4 mm kanat yüksekliğine ve 8 mm kanat yüksekliğine sahip radyal kanat ile 8 mm kanat yüksekliğine sahip eğri kanat) yaptıkları bir çalışmada santrifüj kalp destek pompası için hidrolik performansını karşılaştırmıştır (Şekil 2.6).

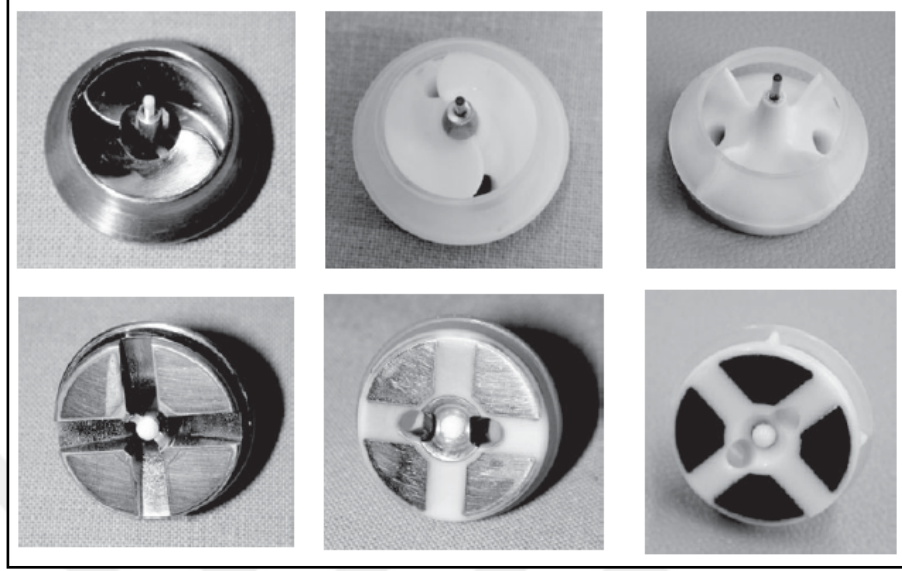


Şekil 2.6. Üç farklı kanat tipine sahip santrifüj pompa çarkı (Takano et al. 2000)

Tasarlanan pompanın hidrolik performans testini, 5 l/dk debiyi ve 100 mm-Hg basınç yükünü sağlamak için çeşitli dönme hızlarında (2400-3200 dev/dk) gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre çark kanat yüksekliklerinin hemoliz açısından çok önemli olmadığını belirtmişler. Ayrıca radyal kanatlı çarklarda tasarım değerlerine, 2900 dev/dk dönme hızında ulaşmışlar; eğri kanatlarda bu değere, 3280 dev/dk dönme hızında ulaşmışlar ve radyal kanatlı çarkların eğri kanatlı çarklara göre, hidrolik performansının daha yüksek olduğunu görmüşlerdir.

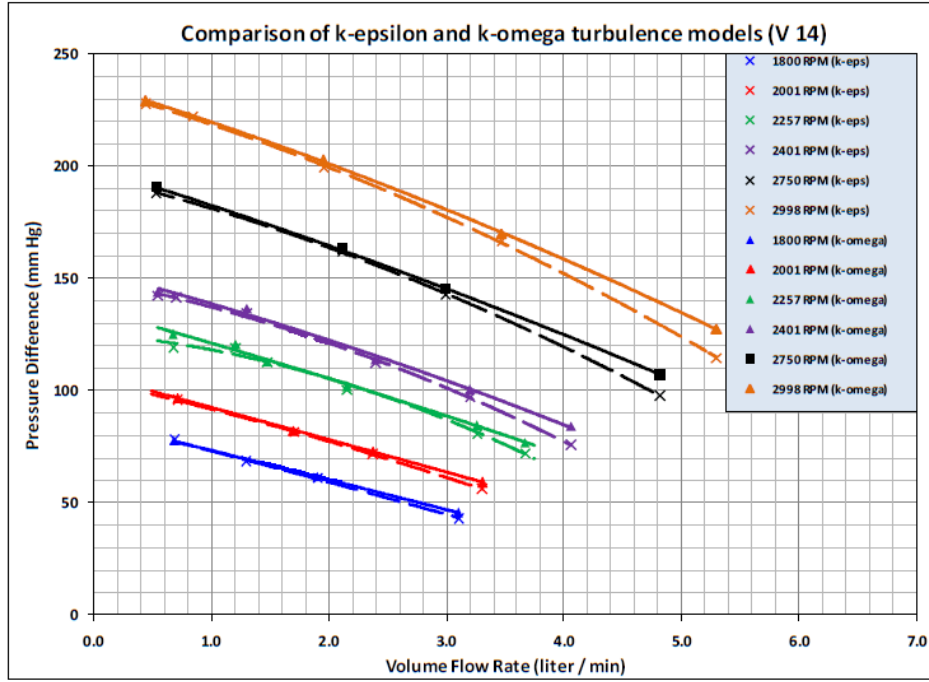
Arvand et al. (2004), farklı çark tasarım geometrilerinin, karışık kalp destek pompası üzerindeki hidrolik ve hemodinamik etkilerini araştırmıştır. HAD analizi programıyla yaptığı sayısal analiz sonuçlarını yapay kalp devresi deney sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonucunda toplam basınç yükünde ve hemoliz deneylerinde mükemmel bir uyum gösterdiğini belirtmişlerdir. Yapılan karşılaştırmalar sonrası hem hidrodinamik

hem de hemodinamik olarak en iyi performansı gösteren C tipi çarkın (Şekil 2.7), karışık akışlı pompa için en uygun çark tipi olduğunu tespit etmişlerdir.

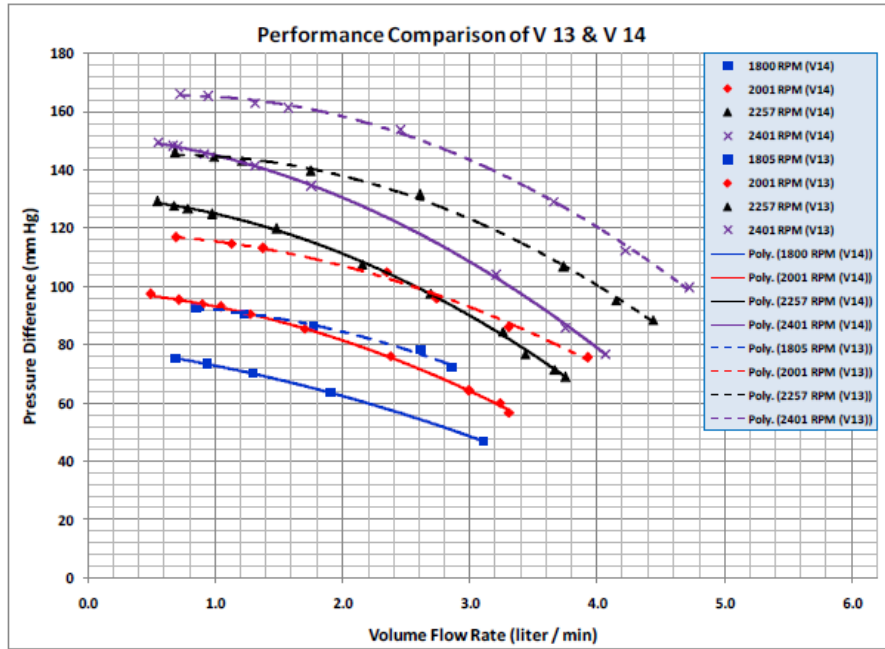


Şekil 2.7. Farklı tipte imal edilen çarklar A (sol), B (orta), C (sağ) (Arvand et al. 2004)

Demir (2009), yüksek lisans tezinde iki farklı prototip santrifüj kalp destek pompasının sayısal ve deneysel olarak pompa karakteristiklerinin üzerinde çalışma yapmıştır. Prototip modellerini pleksiglas (plastik cam) malzemeden CNC tezgahında üretilmiştir. Sayısal çalışmasını iki farklı türbülans modeli (k-omega ve k-epsilon) ile gerçekleştirmiştir. Pompalara ait kapalı devre akış sisteminde gerçekleştirilen deneysel analizlerin sonuçlarını karşılaştırmışlardır (Şekil 2.8 ve Şekil 2.9).



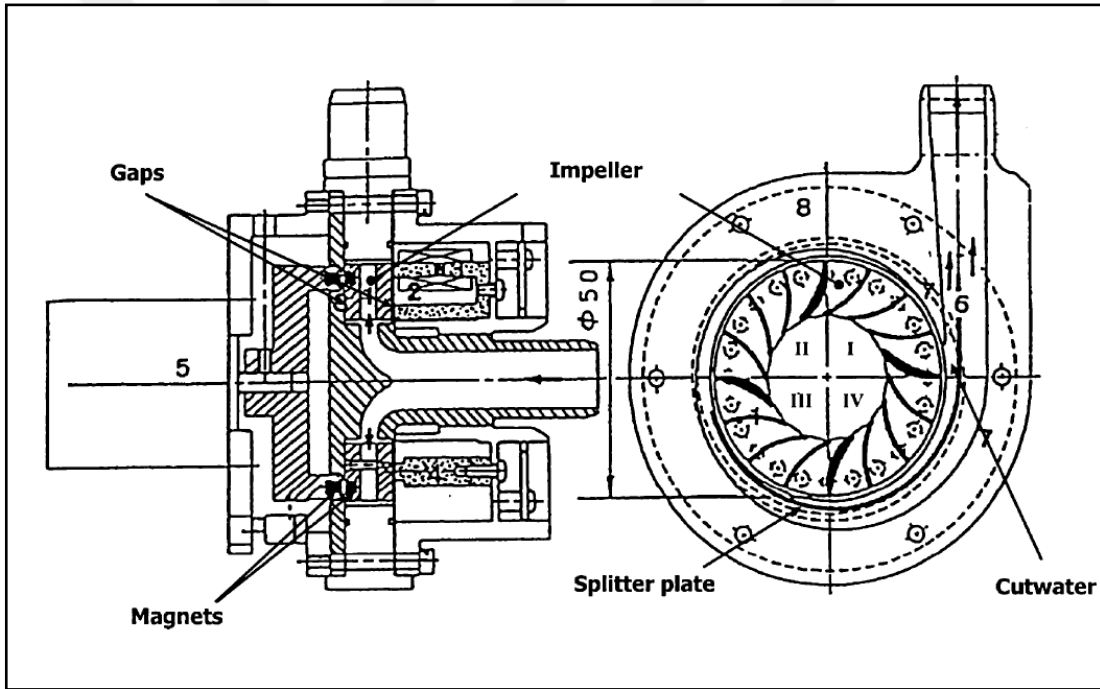
Şekil 2.8. Türbülans modellerinin karşılaştırılması (Demir 2009)



Şekil 2.9. Prototip model analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Demir 2009)

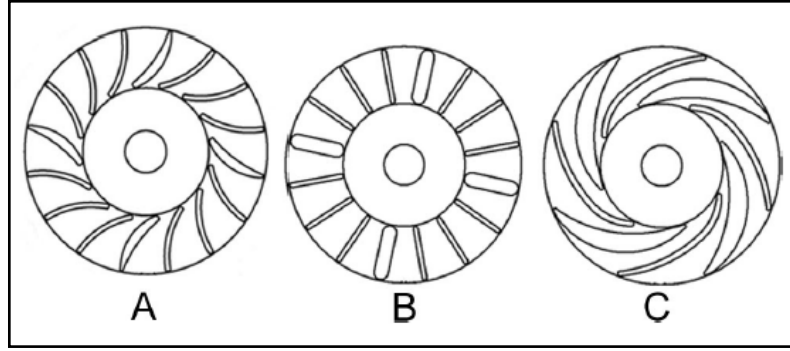


Song et al. (2010a), çalışmalarında manyetik askılı, çift kıvrımlı salyangoz ve 16 kanatlı radyal bir çark sahip santrifüj kalp destek pompasının HAD analizi yardımıyla performans karakteristiklerini incelemiştirlerdir (Şekil 2.10). Analizlerinde kanı, kararsız, türbülanslı ve newtonyen olarak kabul etmişlerdir. Sayısal analiz sonuçlarına göre 5 l/dk debi ve 2000 dev/dk dönme hızında 113,5 mm-Hg basınç yükü elde etmişlerdir. Çark kanatları kanallarında ters akış ve girdap olduğunu tespit etmişlerdir. Pompanın birçok bölgesinde kayma gerilmesinin 90 Pa altında olduğunu, ayrıca çark kanatlarının girişinde ve çıkışında, salyangoz dilinin uç kısmında ve salyangozun çift kıvrımın bulunduğu yerde kayma gerilmesinin yüksek çıktığını tespit etmişlerdir. Kan hasarı yani hemoliz analizlerinde; normalleştirilmiş hemoliz indeksinin, klinik olarak uygulanan santrifüj kan pompalarındaki %0,94 oranı ile yaklaşık olarak aynı olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 2.10. 16 kanatlı çarka sahip santrifüj kalp destek pompası (Song et al. 2010a)

Song et al. (2010b) yaptıkları başka bir çalışmada ise, üç farklı kanat tipi (16 ileriye dönük 16 kanatlı çark, radyal 16 kanatlı çark ve geriye dönük 8 kanatlı çark) tasarlamışlar ve kanat profil ve kanat sayılarının; iç akışı ve santrifüj kalp destek pompa performansını nasıl etkilediğinin araştırmışlardır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Üç farklı kanata sahip çark tipleri (A: 16 ileriye dönük kanat B:16 radyal kanat C: 8 geriye dönük kanat) (Song et al. 2010b)

Deneyle her bir çark tipi için 5 l/dk debide ve 2000 dev/dk dönme hızında gerçekleştirerek elde edilen toplam basınç yüklerini karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre radyal 16 kanatlı çark diğer çarklara göre toplam basınç yükü daha fazla çıktığını gözlemlemişlerdir. Kayma gerilmesi dağılımında hemen hemen her üç çark tipinde de aynı olduğunu ve çarkların birçok bölgesinde 90 Pa değerinin altında olduğunu belirtmişleridir. Kan hücresi hasarı tahminlerinde ise sırasıyla en yüksek ve en düşük değerler A ve B tipi çarklarda olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak ise her ne kadar C tipi çarka göre kan hücresi hasarı biraz daha fazla olmasına rağmen, B tipi çarkın daha fazla basınç yükü sağlamasından dolayı santrifüj kalp destek pompaları için tercih edilebilir olduğu sonucuna varmışlardır (Şekil 2.12).

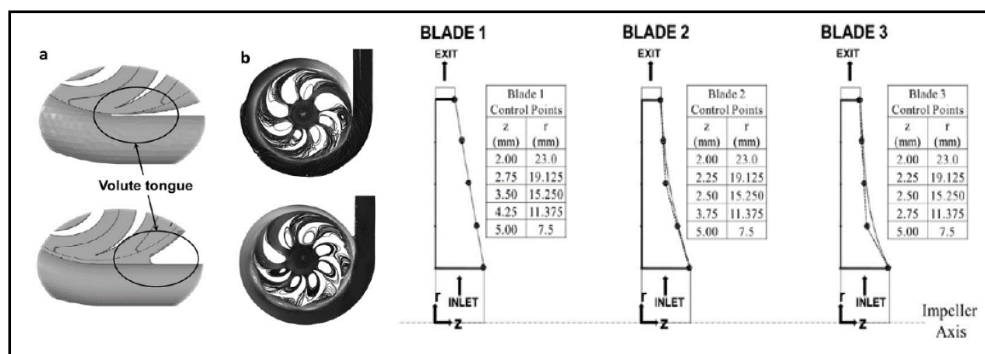
	16FB	16SB	8BB
Pressure head generated at pump flow rate of 5 L/min and impeller rotating speed of 2,000 rpm (mm Hg)	109.4	113.5	98.5
Recirculating flow in the impeller blade channels	Yes	Yes	No
Effect of double volute on the flow in the impeller	Yes	Yes	Yes
Peak shear stress induced in the flow (Pa)	1,150	920	980
Mass percentage of blood with shear stress >250 Pa (%)	0.717	0.502	0.250
Blood damage caused	High	Mild	Low

FB, forward-bending blade; SB, straight blade; BB, backward-bending blade.

Şekil 2.12. A, B ve C kanat tiplerine ait pompa performans verileri (Song et al. 2010b)

Wu et al. (2010), çalışmalarında kalp destek pompalarının tasarımında karşılaşılan zorlukların başında kayma gerilmesinin neden olduğu hemoliz ve damarda kan pıhtılaşması olduğunu belirtmişlerdir. Santrifüj, aksel ve yarı aksel kalp destek pompaları için akış vektörleri, çark kanadının üst yüzey uzunluğu ve çark ile salyangoz arası boşluğu, hemodinamik ve hidrodinamik performansı önemli derecede etkileyen faktörlerden olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları bir çalışmada santrifüj kalp destek pompası için kanat ucu ile salyangoz arasındaki boşluğun hidrodinamik ve Hemodinamik özelliklerine olan etkisini HAD yazılımı aracılığıyla araştırmışlardır. Bu çalışmayı, 2,5 l/dk debide ve 3000 dev/dk dönme hızında; 50, 100 ve 200  $\mu\text{m}$  üç farklı kanat ucu açıklık ölçüsünde ANSYS programında gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre toplam basınç yükünün 50  $\mu\text{m}$ 'den 200  $\mu\text{m}$ 'ye doğru arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca pompa verimliliği en fazla 100  $\mu\text{m}$  açıklığa sahip olan pompada (verim= %23,9) olduğunu tespit etmişler. Çark ucundaki kaçak akışında toplam basınç yüküyle paralel olarak seyrettiğini bulan araştırmacılar kan hasarı değerlerinde en iyi sonucu, 100  $\mu\text{m}$  açıklığa sahip olan pompada bulmuşlardır.

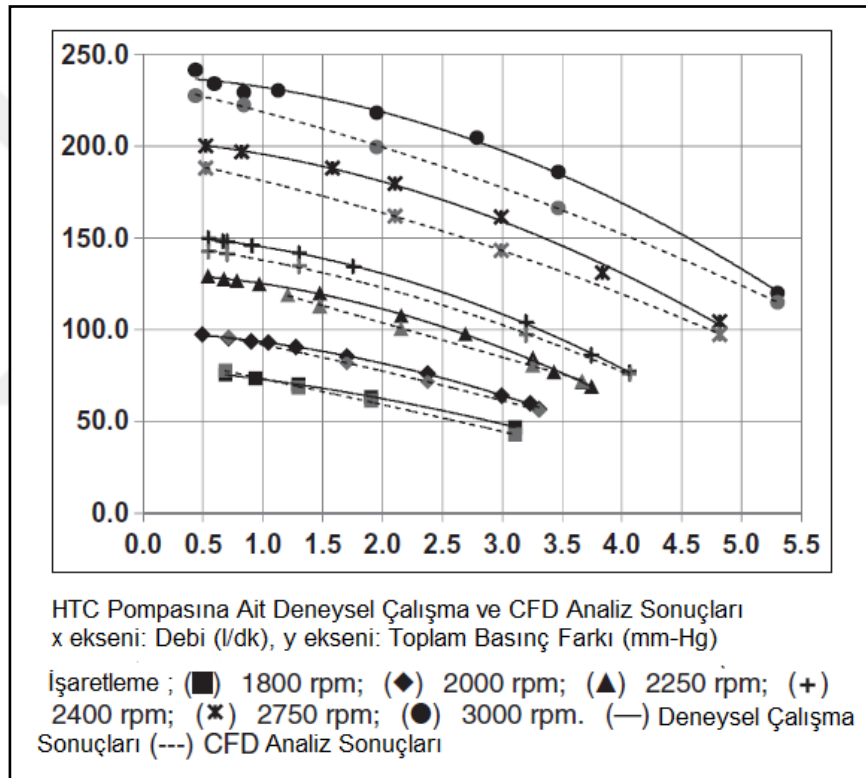
Demir et al. (2011), yaptıkları bir çalışmada kalp yetmezliği tedavisi için prototip bir kalp destek pompası geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu pompada çark kanat yüksekliğinin ve salyangoz dilinin, hidrolik ve hemolitik performansa etkilerini araştırmışlar ve prototip için en uygun kanat yüksekliğini ve salyangoz dili geometrisini kullanmışlardır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Farklı salyangoz geometrileri ve farklı yüksekliklere sahip kanat geometrileri (Demir et al. 2011)

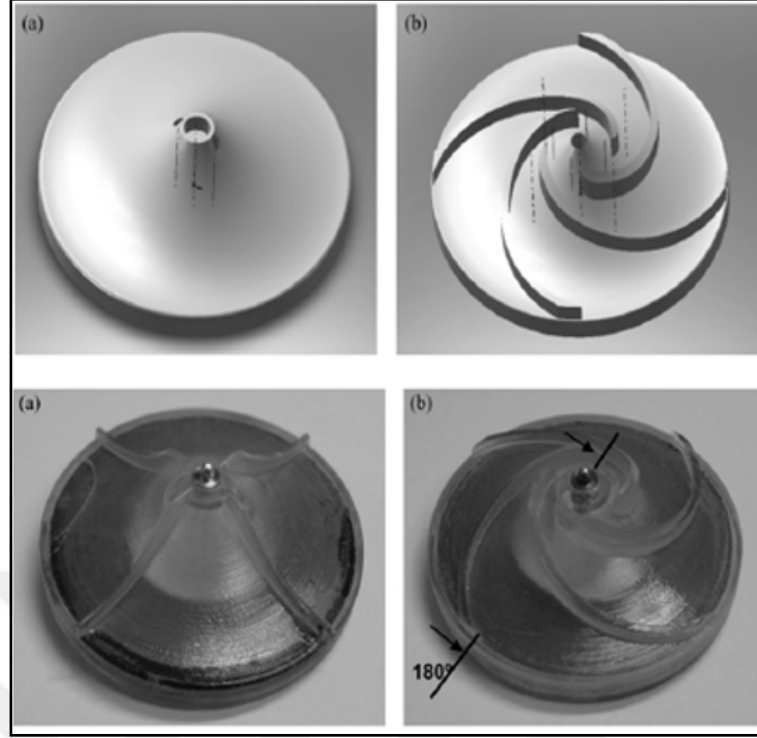
Prototip modelin sayısal analizini HAD yazılımlarından ANSYS, deneysel analizini ise kapalı devre akış sisteminde su ile gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre keskin dile sahip salyangoz 2,22 mm-Hg diğer salyangoza göre daha iyi hidrolik performans

sergilediğini ve kayma gerilmesinde, gerilmenin diğer salyangoza (75 Pa) göre daha fazla çıktığını (243 Pa) fakat diğer salyangozdaki gibi maksimum gerilmelerin 3 farklı bölgeye yayılmasından ziyade tek bir bölgeye yayılarak daha az tespit etmişlerdir. Bu nedenle prototip tasarımında keskin dile sahip salyangozu kullanmışlardır. Çark tasarımında ise üç çark tipinin de hidrolik performanslarının birbirlerine yakın olduğunu (112-122 mm Hg arasında) ve kayma gerilmesinde, maksimum gerilmenin (249 Pa) diğer çarklara göre daha az yerde toplandığını ifade etmişlerdir. Bu nedenle prototip tasarımında 3 numaralı kanat tasarımını kullanmışlardır. Şekil 2.14’de tasarımı yapılan pompanın performans eğrisi verilmiştir.



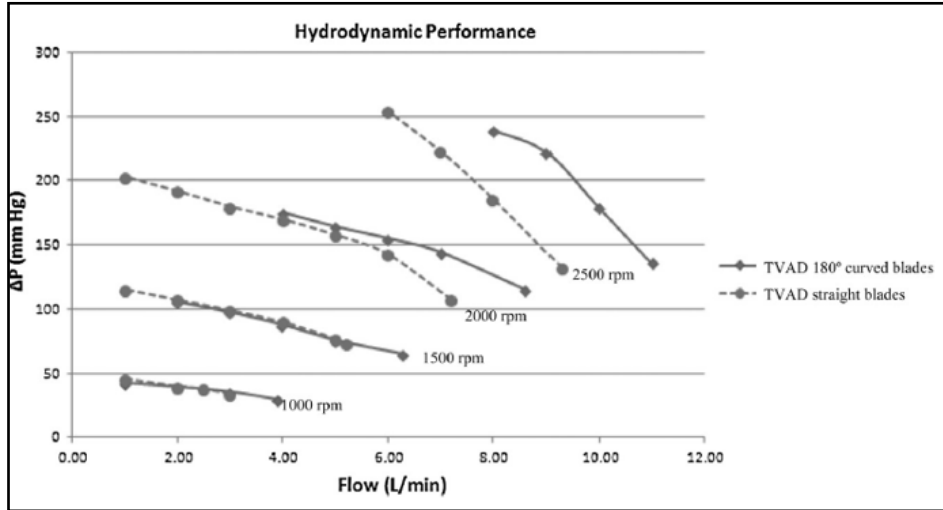
Şekil 2.14. HTC kalp destek prototip pompasının performans eğrisi (Demir et al. 2011)

Leme et al. (2013) yaptıkları bir çalışmada santrifüj kalp destek pompası iki farklı çark tasarlamışlar ve CFD analizlerini gerçekleştirmişlerdir (Şekil 2.15).



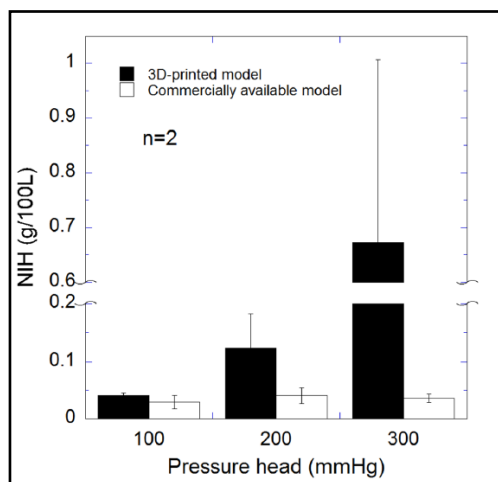
Şekil 2.15. Farklı kanat tasarımlarına sahip çark modelleri (Leme et al. 2013)

Analizlerden sonra bu çarklarla birlikte hızlı prototipleme yöntemiyle (3D yazıcı) pompa prototipini ortaya çıkarmışlardır. Prototip pompanın hem sayısal hem de deneysel analizlerini gerçekleştirip hem hidrolik performans sonuçlarını hem de hemoliz testlerinin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Deneysel analizi, kapalı sistem yapay döngü sisteminde, 1/3 su – 1/3 gliserin – 1/3 alkol karışımıyla ve 1000, 1500, 2000, 2500 ve 3000 dev/dk dönme hızı ile gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre farklı çarklara sahip prototip pompalar hemolize sebep olan büyük vorteksler ve yüksek basınç bölgeleri açısından benzer davranış sergilediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca toplam basınç yükünde ise 1000 dev/dk ve 1500 dev/dk dönme hızlarında benzer davranış sergileyen pompalardan eğri çarka sahip olan pompa, 2000 dev/dk ve 2500 dev/dk dönme hızlarında daha iyi performans sergilediğini tespit etmişlerdir (Şekil 2.16).



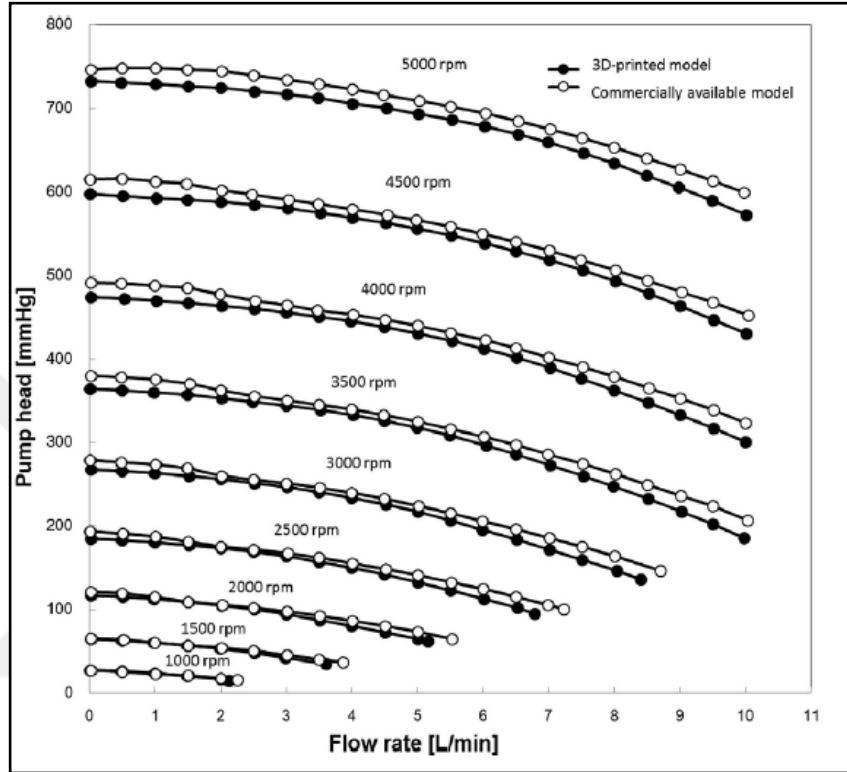
Şekil 2.16. Farklı kanat tasarımlarına sahip deneysel analiz sonuçları (Leme et al. 2013)

Nishida et al. (2016b), ticari olarak kullanılan bir pompa çarkının geometrisi ile aynı geometriye sahip bir çarkı 3D yazıcı ile üretmişlerdir. Üretilen çark, bu pompanın gövdesine entegre edilmiştir. Araştırmacılar, ticari olarak kullanılan pompa ile çarkı 3D yazıcı ile üretilen pompayı; hidrolik performanslarına ve hemolitik özelliklerine göre deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre 3D yazıcı ile üretilen çarkın yüzey pürüzlülüğü daha fazla olmasına rağmen düşük basınç yükünde ticari olarak kullanılan pompa ile hemolitik özelliklerinin hemen hemen benzer olduğunu, artan basınç yüklerinde ise hemolitik özelliklerinin daha kötü olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Ticari olarak kullanılan pompa ile çarkı 3D yazıcıdan üretilmiş pompanın hemolitik özelliklerinin karşılaştırılması (Nishida et al. 2016b)

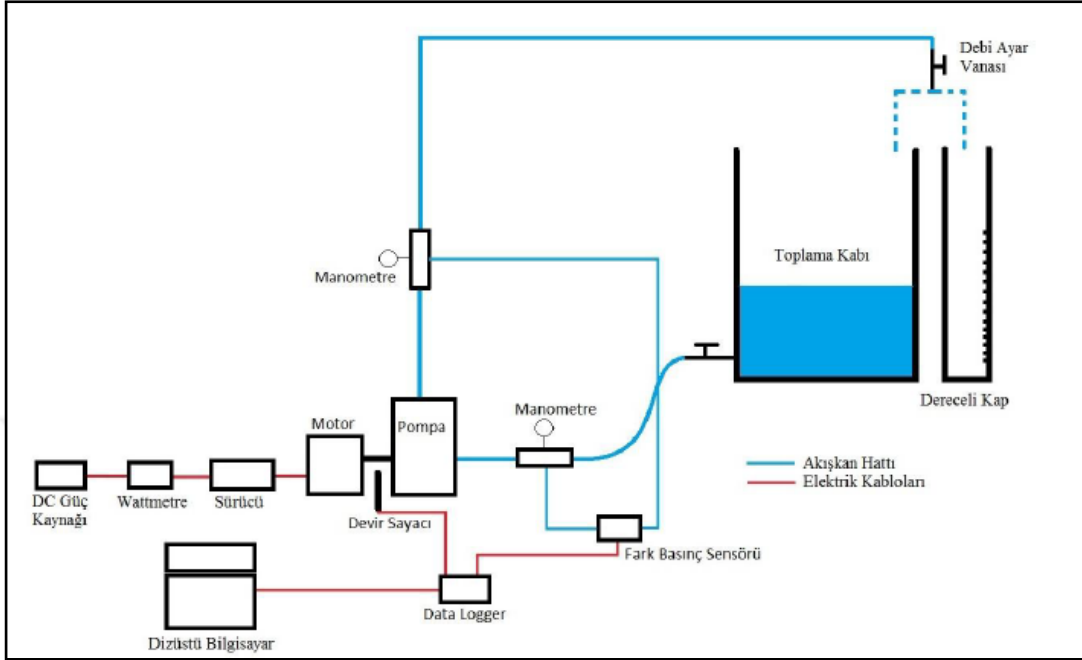
Hidrolik performanslarını incelediklerinde ise düşük dönme hızlarında her iki pompanın da hidrolik performansının neredeyse birebir örtüştüğü yüksek dönme hızlarında ise ticari olarak kullanılan pompanın hidrolik performansının daha iyi olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Ticari olarak kullanılan pompa ile çarkı 3D yazıcıdan üretilmiş pompanın hidrolik performansının karşılaştırılması (Nishida et al. 2016b)

İncebay and Yapıcı (2017), konvansiyonel yöntemle tasarladıkları prototip santrifüj kalp destek pompasının performans eğrilerini ve pompa cidarındaki kayma gerilmelerini, bir HAD yazılımı olan ANSYS Fluent 15 ile tespit etmişler ve deneysel olarak doğrulamasını yapmışlardır (Şekil 2.19). Fluent programında türbülans modeli olarak “Transition SST” modelini seçmişler ve 1-7 l/dk arasında 7 noktada çözüm yapmışlardır. Tasarım parametreleri olarak 100 mm-Hg basınç yükü, 5 l/dk debi ve 3000 dev/dk dönme hızı seçmişlerdir. Akışkan olarak su ile yapılan deneylerde, seçilen parametreler yapılan sayısal ve deneysel sonuçların arasındaki uyumun iyi olduğunu belirtmişler; akışkan olarak %40 gliserin-%60 su çözeltisi olduğu deneylerde ise yaklaşık %15 fark olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca HAD yazılımıyla yaptıkları deney sonucunda, akışkan olarak su

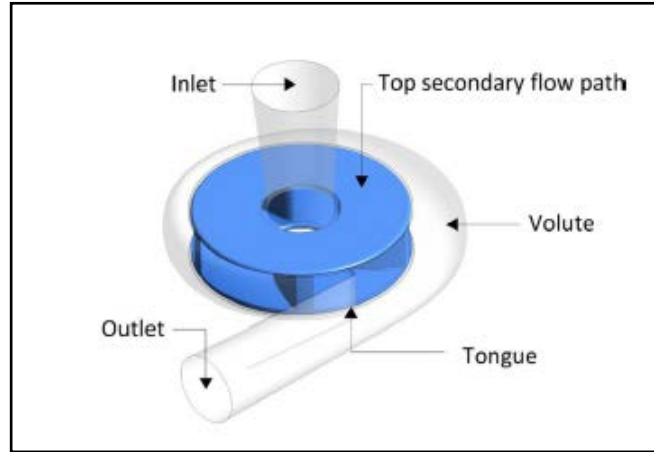
kullanıldığında kayma gerilmesi değerini 664,7 Pa; gliserin-su çözeltilisinde ise kayma gerilmesi değerini 1271 Pa bulmuşlardır.



Şekil 2.19. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (İncebay and Yapıcı 2017)

Paul et al. (2017), küre uçlu parmak freze ile tek parçadan işlenebilecek, örtülü santrifüj pompa çarkları geometrilerini belirlemek için ve bu çark geometrilerinin pompa performansını tahmin edebilmek için HAD yazılımıyla bir çalışma yapmışlardır (Şekil 2.20). Bu kesici takım ile 3-9 kanat sayısı arasında işlenebilirliği sağlayacak maksimum açıyı belirlemeye çalışmışlardır. HAD analizi için 5 l/dk debi ve 100 mm-Hg basınç yükü değerleri seçilmiştir. Ayrıca çalışmalarında kanat derinliğinin rotor hızına ve pompa verimliliğine etkisini de incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre 6-7 kanata sahip çark geometrilerinin ve düşük kanat açılara sahip çark geometrilerinin maksimum verimle ve minimum rotor hızıyla çalıştığını belirlemişlerdir.





Şekil 2.20. CFD analizinde kullanılan pompa modeli (Paul et al. 2017)

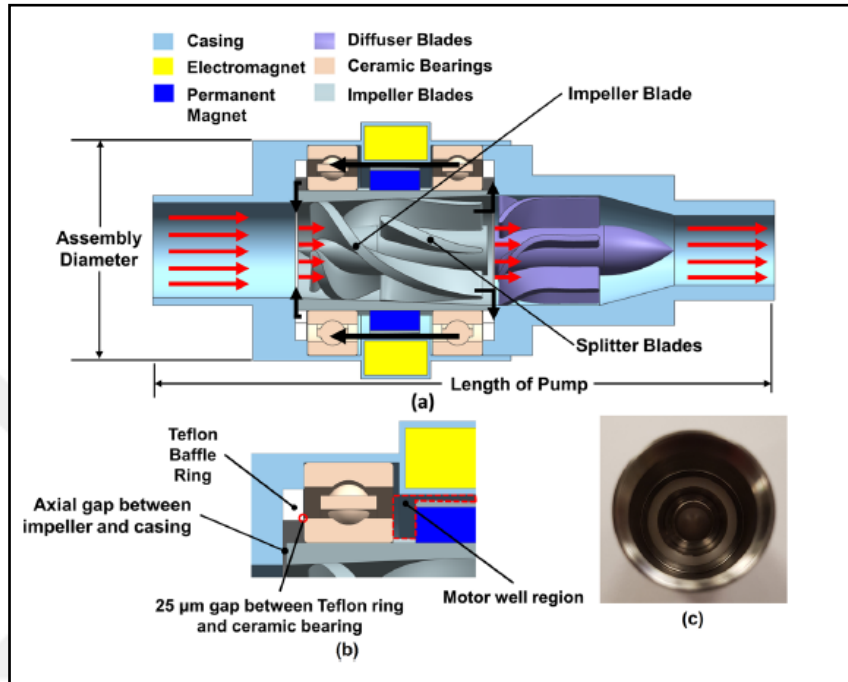
Mozafari et al. (2017), santrifüj pompaları kalp üzerinde uygulanmasının; çark geometrisinde birtakım sınırlamalar gerektirdiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında bu sınırlamaların etkilerini görmek için kanat çıkış açıları  $15^{\circ}$ - $45^{\circ}$  arasında değişecek şekilde ve kanat sayıları 3-9 arasında değişecek şekilde farklı özelliklere sahip 15 çark geometrisi tasarlamışlar. Her bir parametrenin pompa performansını, kayma gerilmesini ve normalleştirilmiş hemoliz şiddetini (NIH) hesaplayarak araştırmışlardır (Şekil 2.21). HAD analizlerini ANSYS CFX üzerinden gerçekleştirirken türbülans modeli olarak k-epsilon türbülans modelini kullanmışlar ayrıca bu modelin sağlamlığını ve doğruluğunu arttırılması amacıyla ölçeklenebilir cidar fonksiyonu da kullanmışlardır. Yapılan deney sonuçlarına göre 5-6 kanat sayısının,  $15^{\circ}$ - $30^{\circ}$  kanat çıkış açılarının ve gerekli basınç artışı karşılayabilecek en küçük çıkış boşluğunun kan ile uyumlu en verimli sonuçlar olduğunu ortaya koymuşlardır.

Number of Blades	Pressure (mm Hg)	Efficiency (%)	NIH (g/100L)
3	65.1	63.38	0.006578
4	70.3	56.47	0.007205
5	71.4	65.17	0.007964
6	80.5	70.87	0.008422
7	92.0	61.89	0.009897
8	96.7	54.66	0.010117
9	107.2	45.23	0.017881

NIH, normalized index of hemolysis.

Şekil 2.21. 5 l/dk debide gerçekleştirilen CFD analiz sonuçları (Mozafari et al. 2017)

Khan et al. (2018) yaptıkları bir çalışmada hemolize neden olan yüksek gerilme bölgelerinin azaltılması ve akış resirkülasyonun en aza indirilmesi için farklı tasarım özelliklerine ve parametre optimizasyonuna sahip örtülü çark tipi kalp destek pompası geliştirmişlerdir (Şekil 2.22).

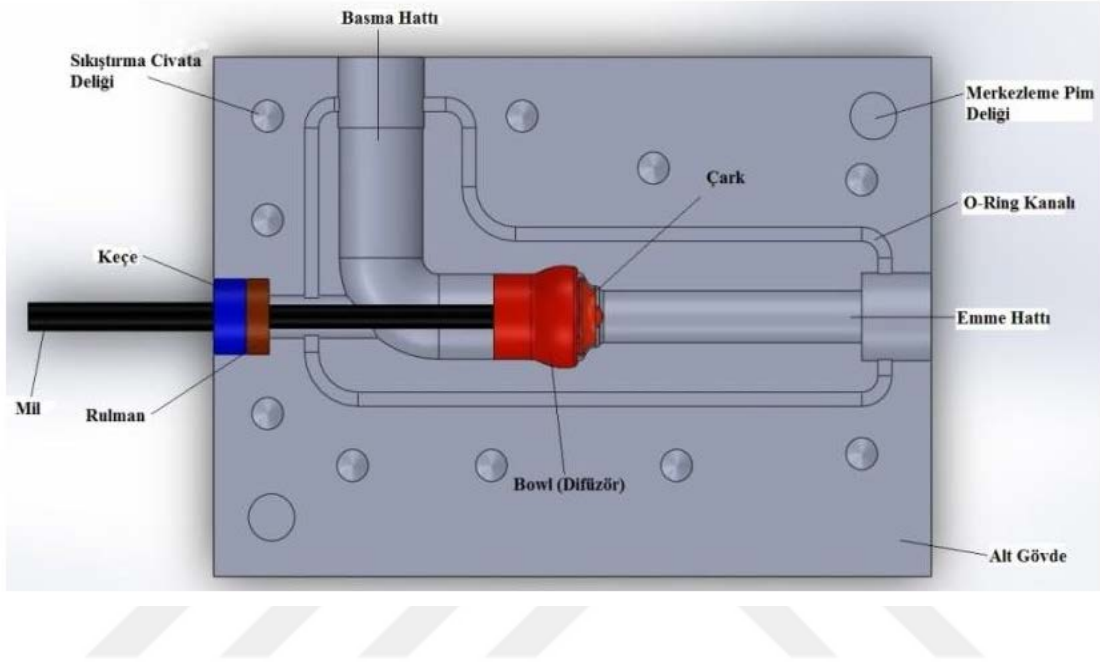


Şekil 2.22. Dizayn edilen aksel kalp destek pompası (Khan et al. 2018)

Optimize edilmiş pompa tasarımı, HAD analiz programı ANSYS Fluent' de yapılmıştır. Prototip üretimi için biyo-uyumlu paslanmaz çelik tercih etmişlerdir. CFD ve gerçek deneyleri gerçekleştirip sonuçları kıyaslamışlardır. CFD analizinden elde ettikleri sonuçlara göre 9000-11000 dev/dk dönme hızına ve 0,5-3 l/dk debiye karşılık gelen basınç aralığı 29-90 mm-Hg olurken; gerçek deneylerde ise 8000-12000 dev/dk dönme hızına ve 0,5-3,5 l/dk debiye karşılık gelen basınç değeri ise 30-105 mm-Hg olmuştur. Hemodinamik performans verileri ise normalize edilmiş hemoliz indeksi (NIH) tahmini değeri 0,0048 g / 100 l olarak belirlemişler, deney sonrası ise bu değer 0,00674 g / 100 l olarak bulmuşlardır. Çıkan sonuçlara göre veriler arasında bir uyum gözlemleyen araştırmacılar, bu çalışmanın hayvan deneyleri için uygulanabilirliğini belirtmişlerdir.

Çınar and Yapıcı (2018), yaptıkları bir çalışmada karışık akışlı bir pompa tasarlamışlardır (Şekil 2.23). Daha sonra HAD yazılımıyla bu pompanın pompa karakteristiklerini

belirlemişler ve deneysel olarak doğrulamasını yapmışlardır. Pompa tasarım parametreleri olarak 5 l/dk debi, 100 mm-Hg basınç yükü farkı ve 10000 dev/dk dönme hızı seçmişlerdir. Çark ve difüzörün üretimi lazer sinterleme yoluyla imal edilmiş, gövde üretimi ise alüminyum malzemedan 3 eksen CNC freze tezgahında imal edilmiştir.



Şekil 2.23. Karışık akışlı pompa montajı (Çınar and Yapıcı 2018)

Pompa performans deneylerinde akışkan olarak su ve hacimce %60 gliserin-%40 su kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre HAD analiz değerleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırarak tasarım debi ve dönme hızında tasarım basıncına göre 8 torr'luk basınç farkı verdiğini ifade etmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Sayısal Analize Giriş

Deneysel analiz ve sayısal analiz yani HAD analizi; günümüz mühendisliğinin akışkan alanlarında, sistemlerin tasarımında ve analizinde vazgeçilmez iki unsurdur. Kayma gerilmeleri, hız vektörleri, akış çizgileri vb. gibi akış ile ilgili ayrıntı bilgiler HAD analizi ile elde edilirken toplam basınç, güç, debi gibi genel özellikler deneysel çalışmayla elde edilebilir. HAD analizi, gerekli deneysel çalışmaların sayısını azaltarak tasarım sürecini kısaltırken; deneysel çalışma ise HAD analizlerinin sonuçlarını doğrular (Çengel and Cimbala 2008).

Üç hız bileşeninde (x, y ve z) dalgalanma olan düzensiz ve süreksiz akış hareketi, türbülanslı akış olarak bilinir. Bir akışın türbülanslı akış veya laminar akış olup olmadığı Reynolds sayısı ile tespit edilir. Eğer;

- \*  $Re < 2,000$  ise akış, laminar akış
- \*  $2,000 < Re < 4,000$  ise akış, geçiş akışı
- \*  $Re > 4,000$  ise akış, türbülanslı akış

olarak nitelendirilir. Reynolds sayısı ise;

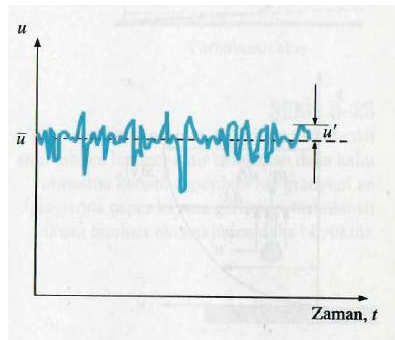
$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.1)$$

formülü ile hesaplanır. Bu ifadede  $\rho$ : yoğunluk,  $V$ : akışkan hızı,  $D$ : boru çapı ve  $\mu$ : kinematik vizkozite olarak tanımlanır (Yapıcı 2012).

HAD analizleri ile laminer akışlar kolay bir şekilde çözülebilirken türbülanslı akışlar ise türbülans modelleri kullanılarak çözülebilir. Günümüzde cebirsel, tek denklemlilik, iki denklemlilik ve Reynolds gerilme modelleri olmak üzere çok sayıda türbülans modeli bulunmaktadır. İki denklemlilik türbülans modellerinden olan  $k-\varepsilon$  modeli, en yaygın ve doğrulanmış kullanılabilir bir türbülans modelidir. Fakat genel bir türbülans modeli olmamakla birlikte halen kullanılmakta olan türbülans modelleri (Spalart-Allmaras, Standart  $k-\varepsilon$ , RNG  $k-\varepsilon$ , Realizable  $k-\varepsilon$ , Standart  $k-\omega$ , SST  $k-\omega$ , Reynolds Stress Model,  $k-k\ell-\omega$  Transition Model, SST Transition Model,) bir çok mühendislik uygulaması için kabul edilebilir çözümler sunmaktadır (Çengel and Cimbala 2008).

İki denklemlilik türbülans modellerinden olan bu  $k-\varepsilon$  modeline; çözülmesi gerekiyorsa enerji denklemi, kütle denklemleri, doğrusal momentum denklemleri ve giriş ve çıkıştaki türbülans özelliklerinin belirlenebilmesi için ilave edilen sınır şartları da yani ekstra iki transport denklemi eklenir. Örnek olarak  $k-\varepsilon$  modelinde,  $k$  (türbülans kinetik enerjisi) ve  $\varepsilon$  (türbülans yitim hızı, türbülans enerjisi yayılım oranı) değerleri girilir. Fakat bu değerler her zaman bilinemeyebilir. Bu nedenle, bu değerlerin yerine  $I$  (türbülans yoğunluğu) ve  $l$  (türbülans uzunluk ölçeği) değerleri belirtilir (Çengel and Cimbala 2008).

Laminer akış için yazılan temel denklemler (Navier-Stokes ve momentum denklemleri) türbülanslı akışlar içinde yazılabilir. Fakat türbülanslı akışlar, girdap adı verilen dönen bölgelere sahip olduğu için laminer akışa göre hız, sıcaklık, basınç ve hatta yoğunluk gibi özelliklerde önemli değişiklikler meydana gelir (Şekil 3.1) (Çengel and Cimbala 2008).



Şekil 3.1. Anlık hız bileşeni  $u'$  nun zamana göre değişimi (Çengel and Cimbala 2008)

Bu durumda ise türbülanslı akışlar için,  $u = \bar{u} + u'$  notasyonu yazılabilir. Bu notasyonda  $y$  yönündeki hız bileşeni  $v$  gibi diğer özellikler ( $w$  ve  $p$ ) için de yazılabilir. Böylece laminer akış için yazılan süreklilik denklemi ve transport denklemleri formül (3.2)-(3.5) gibi yazılabilir (Şekil 3.2) (Yüksel 2007; Çengel and Cimbala 2008).

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} + u') + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} + v') + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w} + w') \quad (3.2)$$

X doğrultusundaki denklem;

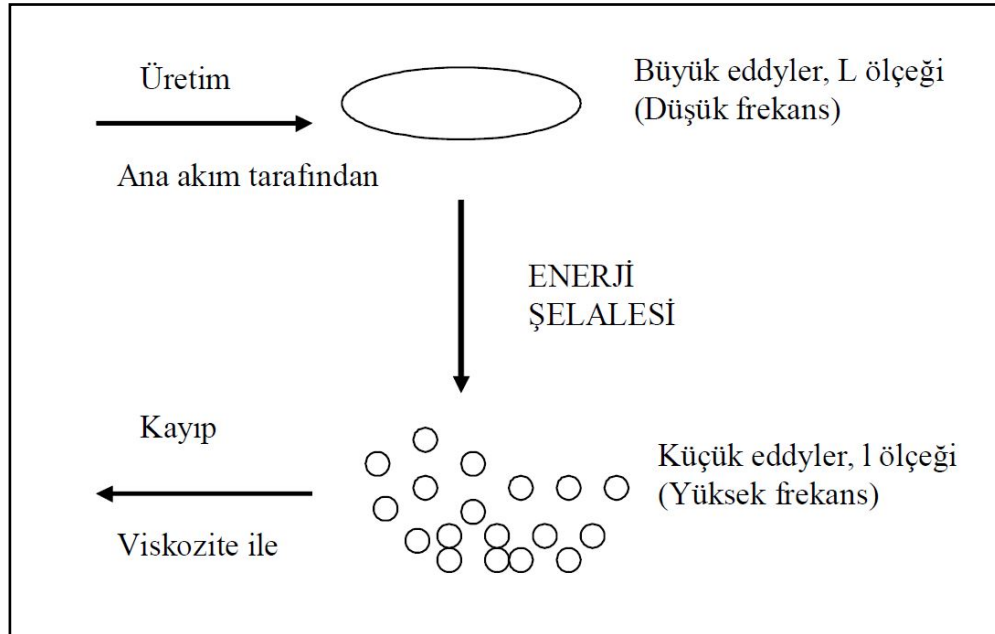
$$\rho \left( \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \right) = \rho X - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'^2}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{u'w'}) \quad (3.3)$$

Y doğrultusundaki denklem;

$$\rho \left( \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right) = \rho Y - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{v'^2}) + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{v'u'}) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{v'w'}) \quad (3.4)$$

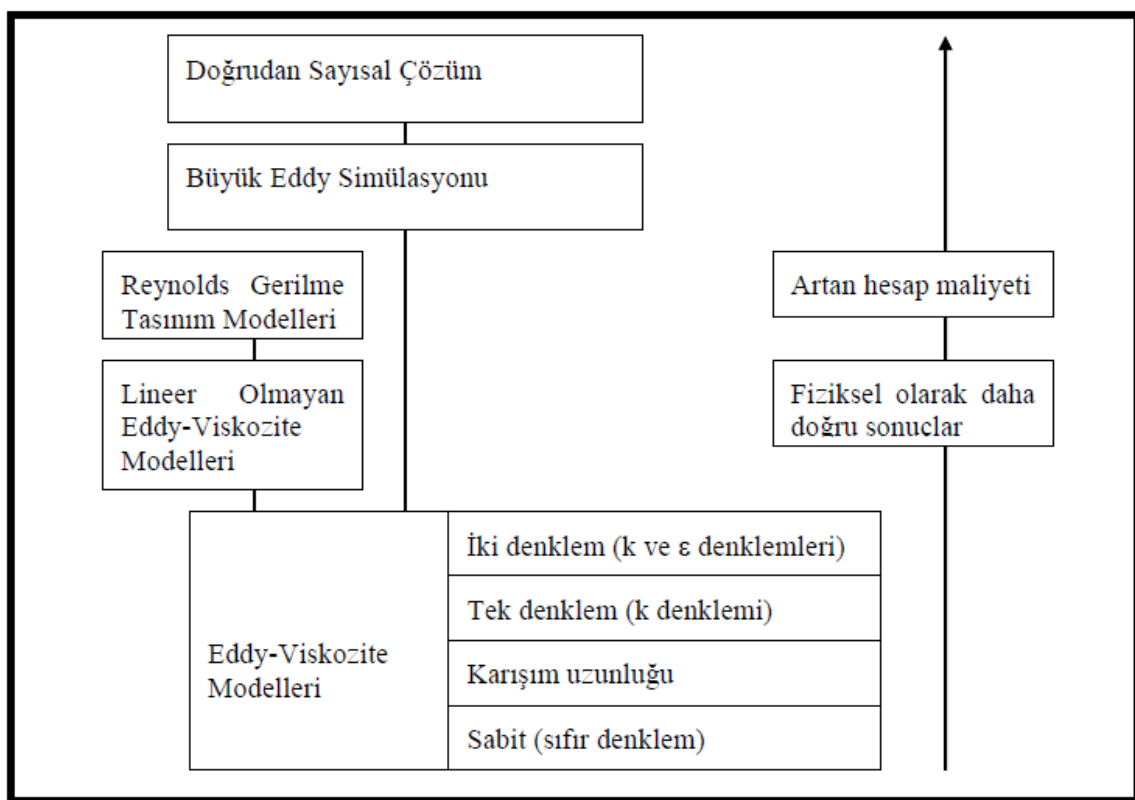
Z doğrultusundaki denklem;

$$\rho \left( \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} \right) = \rho Z - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{w} + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \overline{w'^2}) + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{w'u'}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{w'v'}) \quad (3.5)$$



Şekil 3.2. Enerji şelalesi (Apsley 2003; Yüksel 2007)

Bu denklemlerdeki Reynolds gerilmeleriyle beraber ortaya on adet bilinmeyen çıkmıştır. Fakat dört adet denklem (süreklilik denklemi ve Navier-Stokes hareket denklemleri) olduğundan dolayı türbülanslı akışların çözümü neredeyse imkansız hale gelmiştir. Bu nedenle, türbülanslı akış denklemlerindeki bu zorluk kapatma (closure) veya kapama problemi olarak bilinir. Bu tür zorluğun (kapatma problemi) çözümü için başlıca üç grupta toplanan türbülans modelleri geliştirilmiştir. Bunlar; Doğrudan sayısal çözüm (DNS), Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) ve Büyük Eddy simülasyonu (LES) (Şekil 3.3) (Yüksel 2007).



Şekil 3.3. Türbülans modellerinin sınıflandırılması (Apsley 2003; Yüksel 2007)

Bu tez çalışmasında yapılan literatür araştırmaları sonucunda ANSYS Fluent programı için Eddy-viskozite modellerinden iki denklemlilik k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

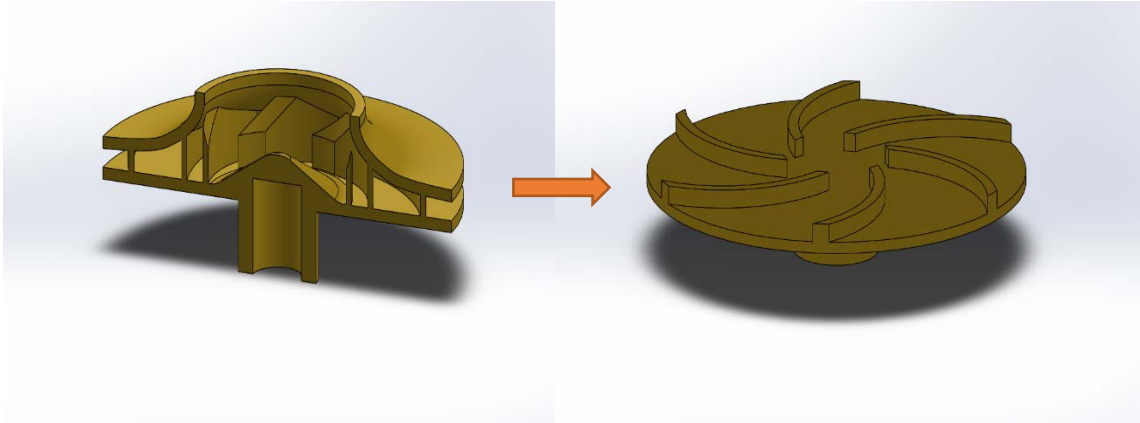
Bu tez çalışmasında HAD analizi için öncelikle pompa çarkları tasarlanmıştır. Tasarlanan çarklarla birlikte pompa montajı, 3D katı modelleme programında yapılarak ANSYS Fluent programında modellenerek çözüm sonuçlarına ulaşılmıştır.

### 3.2. Farklı Kanat Tiplerine Sahip arkların Katı Modellemesi

Tasarlanmış olan santrifüj kalp destek pompasında, istirahat halindeki bir insan kalbinin çalışma şartları dikkate alınmıştır. Kanın debisi için 5 l/dk, nominal aortik basınç için 100 mm-Hg (1,4 m hidrodinamik basma yüksekliği) ve pompa devri için 3850 dev/dk dönme hızı seçilmiştir.

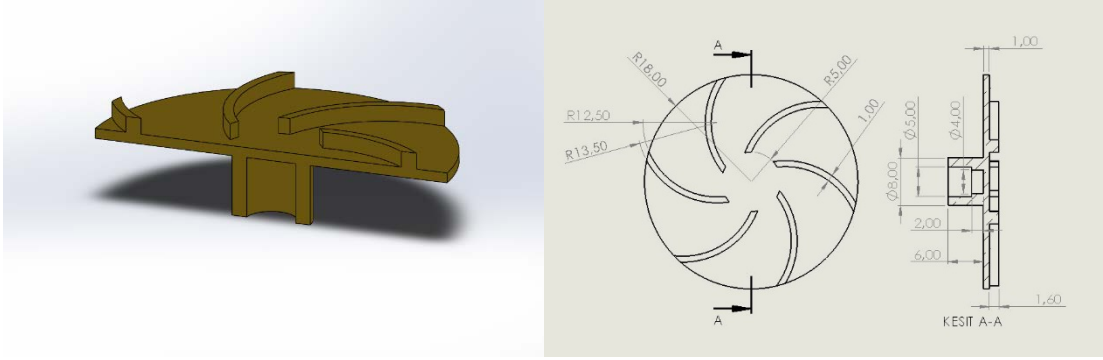
Bu çalışma da üç farklı kanat tipinin santrifüj kalp destek pompası performansına etkisini incelendiği için; radyal, eğik ve eğri kanat tipine sahip üç farklı çark tasarlanmıştır. Mekanik destek cihazlarında karşılaşılan sorunlardan birisi de maliyetle ilgili sorundur. Bu sorunun alt başlıklarından olan üretim maliyetini minimize edebilmek için çark tasarımlar yapılırken literatürde bulunan çarklardan farklı olarak iki boyutlu, örtüsüz ve göbeksiz olarak yapılmıştır.

İlk olarak klasik hesaplama metoduyla (Stepanoff metodu) eğri kanat tipi çark Solidworks katı modelleme programında tasarlanmış ve yine aynı programda bu çark kanat eğri profilini korumak üzere iki boyutlu, örtüsüz ve göbeksiz hale getirilmiştir (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5).



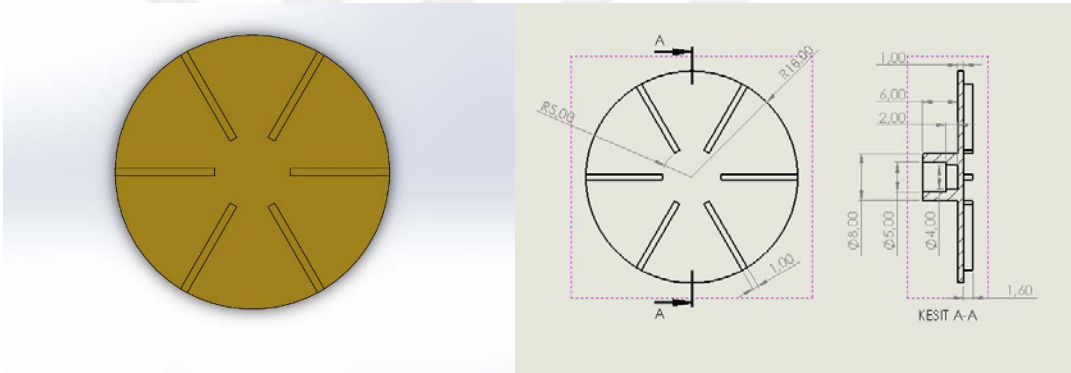
Şekil 3.4. 3 boyutlu çark tasarımının 2 boyutlu, örtüsüz ve göbeksiz tasarıma dönüşümü



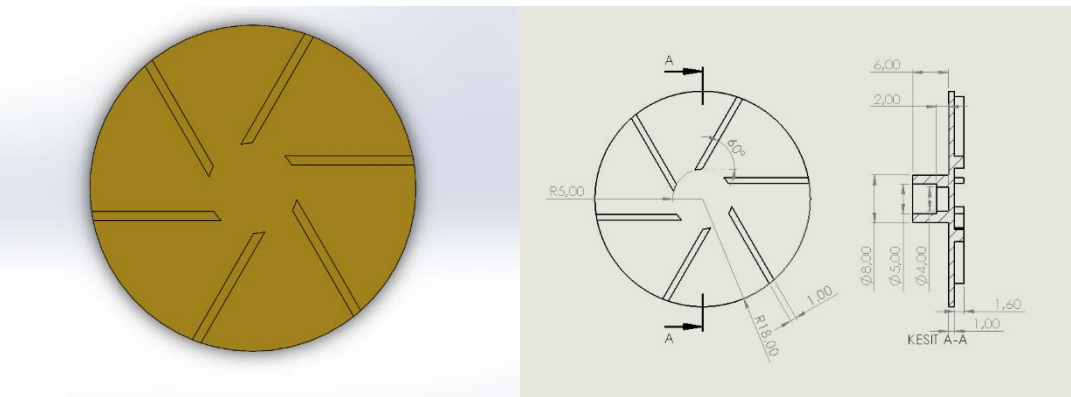


Şekil 3.5. Santrifüj kalp destek pompası için tasarlanan eğri kanat tipine sahip çark

Eğri kanat tasarımından sonra literatürde, bu konuyla ilgili bilimsel çalışmalarda en çok kullanılan radyal ve eğik kanat tipine sahip çark kanatlarının tasarımları Solidworks 3D katı modelleme programı yardımıyla yapılmıştır (Şekil 3.6 ve Şekil 3.7).



Şekil 3.6. Santrifüj kalp destek pompası için tasarlanan radyal kanat tipine sahip çark

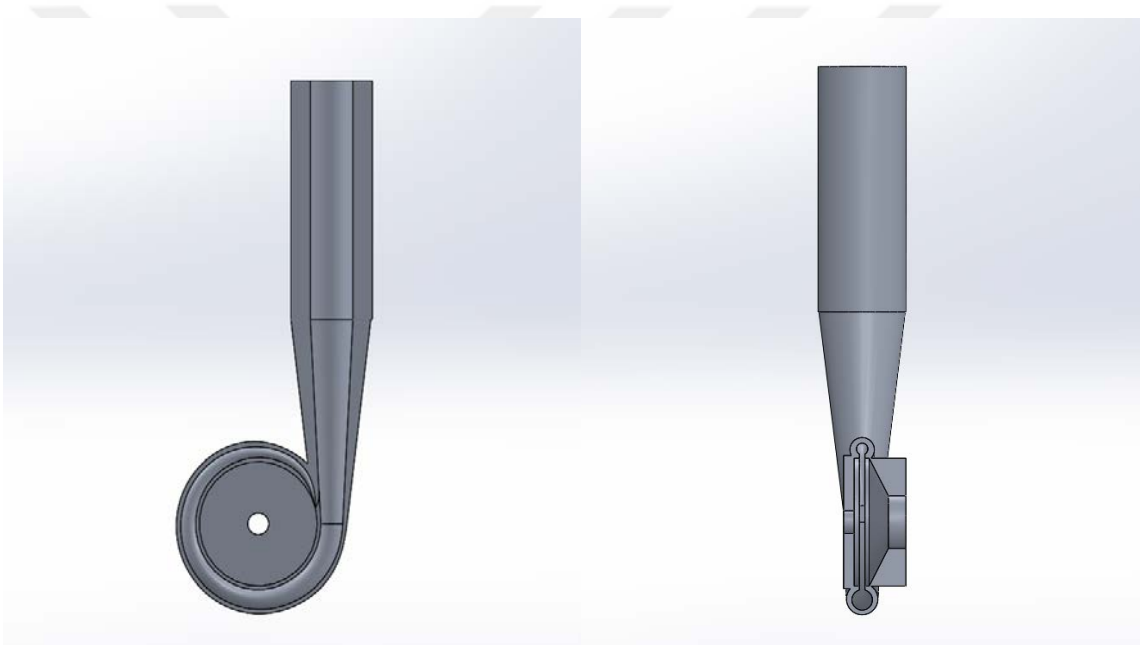


Şekil 3.7. Santrifüj kalp destek pompası için tasarlanan eğik kanat tipine sahip çark

### 3.3. Diğer Pompa Elemanlarının Katı Modellemesi

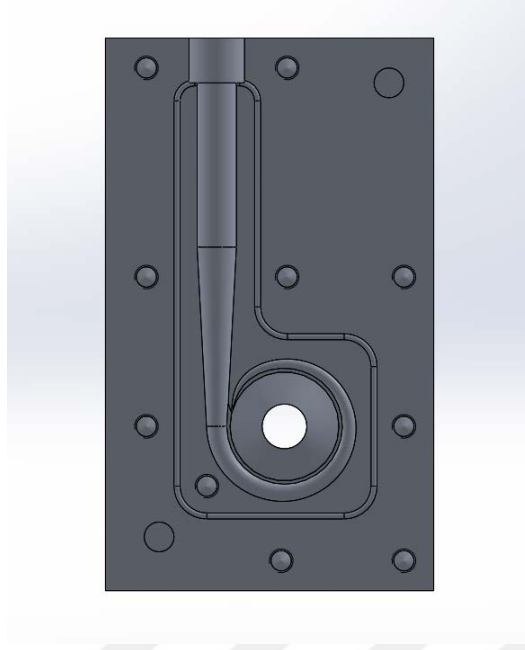
Bu çalışmada, çark kanat profillerinin pompa performansına olan etkisi incelenmiş ve bu nedenle modellemesi yapılan pompa elemanlarından sadece çark üretilmiştir. Bu sebeple, İncebay (2017)'in yaptığı bir çalışmadaki pompa salyangoz gövde bloğu kullanılmış olup yeni bir pompa salyangoz gövdesi tasarlanmamıştır.

İncebay (2017), yaptığı çalışma salyangoz tasarımı için 8 farklı salyangoz geometrisi denemiştir. Pompa salyangoz gövdesini 10 kesit olmak üzere ve her bir kesit için salyangoz profili hesaplayarak 5 l/dk akış debisini sağlayacak şekilde tasarlamıştır (Şekil 3.8).

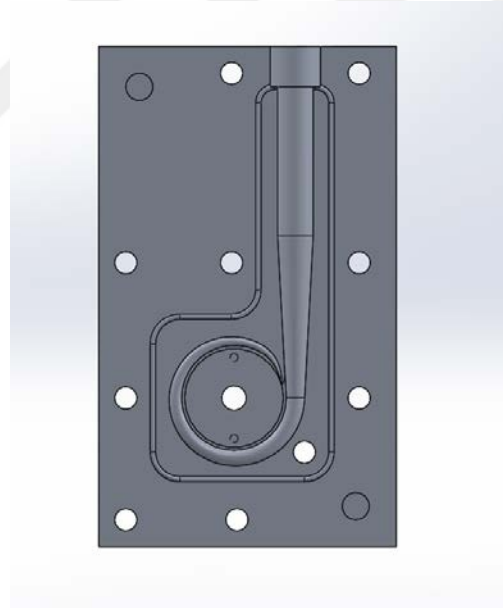


Şekil 3.8. Santrifüj kalp destek pompası için tasarlanan salyangoz gövde (İncebay 2017)

Tasarlanan model üzerinde salyangoz çıkış çapında küçültme ve salyangoz dil profilinde değiştirme yaparak nihai pompa salyangoz gövdesi modeline ulaşmıştır. Modellenen salyangoz gövdeyi, işlenebilirliğin kolay olması ve paslanmaz olması sebebiyle CNC dik işleme merkezinde iki blok halinde üretmiştir (Şekil 3.9 ve Şekil 3.10).

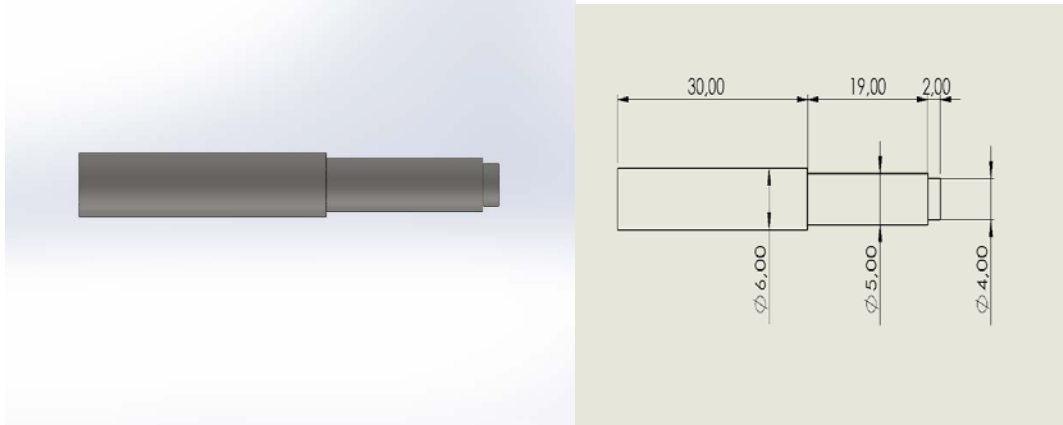


Şekil 3.9. Deneysel çalışma için üretilmiş salyangoz gövdenin ön bloğu (İncebay 2017)



Şekil 3.10. Deneysel çalışma için üretilmiş salyangoz gövdenin arka bloğu (İncebay 2017)

Son olarak pompa mili, paslanmazlık özelliğinden dolayı paslanmaz çelik malzeme ile CNC tornada imal edilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Deneysel çalışma için tasarlanan pompa mili

Tasarlanan çarklarla birlikte pompa elemanlarının montajı katı modelleme programında oluşturularak HAD analizi için hazır hale getirilmiştir.

### 3.4. HAD Analizi

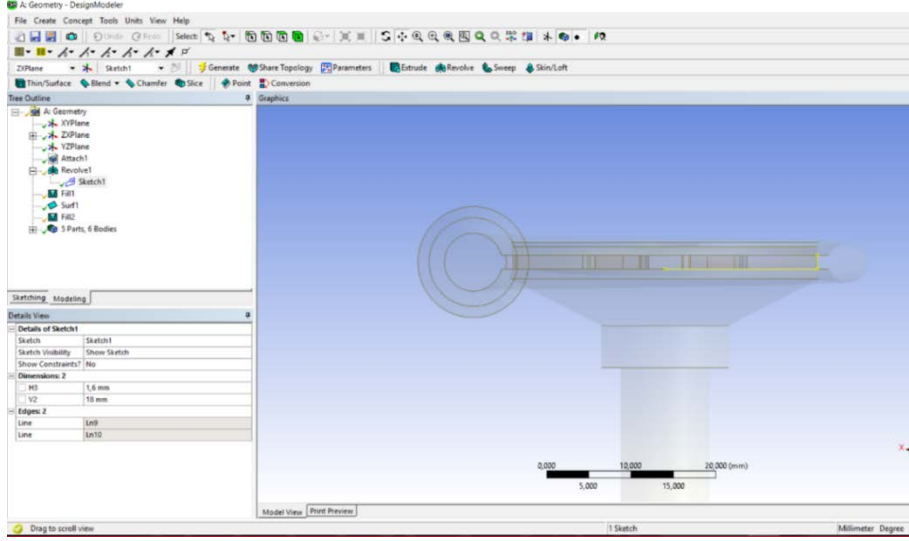
Bu aşamada montajı yapılan pompalar için ANSYS Fluent paket programı ile sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal analiz genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır;

- Modelin akışkan ile doldurulması
- Mesh (Çözüm Ağı) oluşturma
- Fluent modelinin hazırlanması

#### 3.4.1. Pompa Modellerinin Akışkan ile Doldurulması

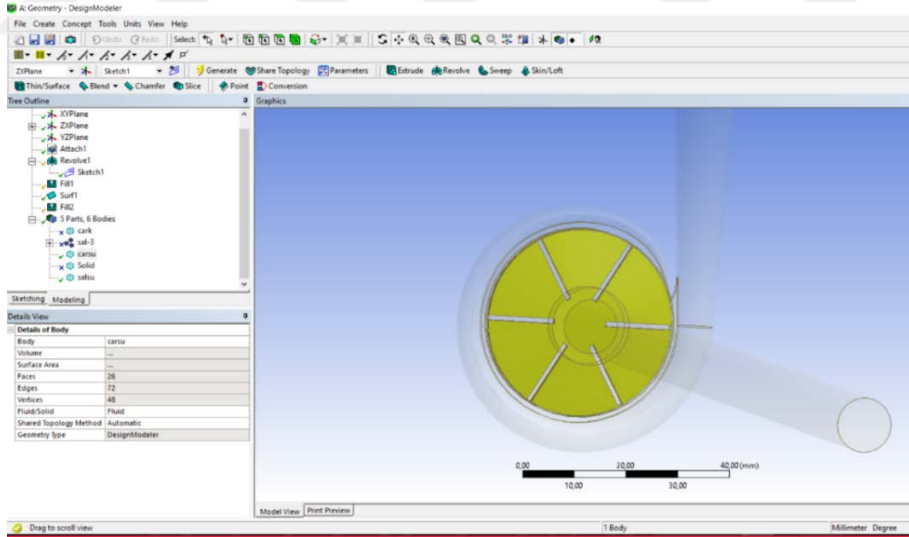
3D katı modelleme programında montaj işlemleri yapılan farklı pompa modelleri, Solidworks programı içerisinde ANSYS programına aktarılarak akışkan dolumu yapılmak üzere ANSYS Design Modeler için hazır hale getirilmiştir.

ANSYS Design Modeler kısmında akışkan dolumu için öncelikle pompa içerisindeki örtüsüz çarka akışkan kapağı oluşturabilmek amacıyla “Revolve” komutu ile sanal örtü yapıldı (Şekil 3.12).



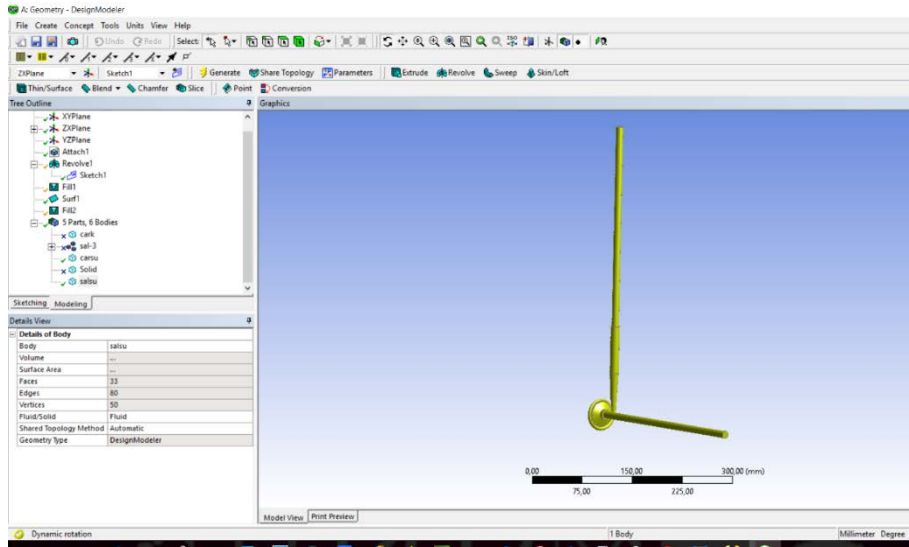
Şekil 3.12. Tasarlanan çark modellerine yapılan sanal örtü

“Revolve” komutu ile örtü yapılan çarkı akışkan ile doldurma için akışkan giriş ve çıkış yerlerine “Surface From Edge” komutu ile kapak atılmıştır. Daha sonra “Fill” komutu ile çark içerisindeki hacim akışkan ile doldurulmuştur (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Akışkan ile doldurulmuş çark

Pompa salyangoz gövdesine ise akışkan giriş ve çıkış yerlerine kapak atılarak gövde hacmi akışkan ile doldurulmuştur. Böylece pompa montajının akışkan girişinden çıkışına kadarki hacmi akışkan ile doldurulmuş oldu (Şekil 3.14)

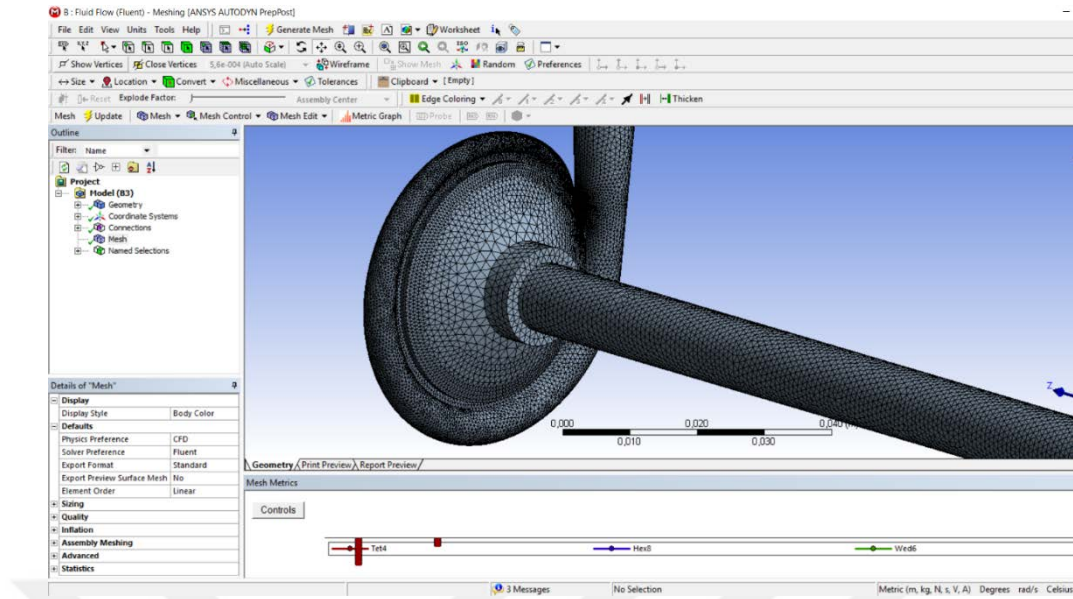


Şekil 3.14. Akışkan ile doldurulmuş pompa montajı

Bu işlemler radyal, eğri ve eğik kanat tipine sahip çark modelleriyle oluşturulan bütün pompa montajlarına ayrı ayrı uygulanmıştır.

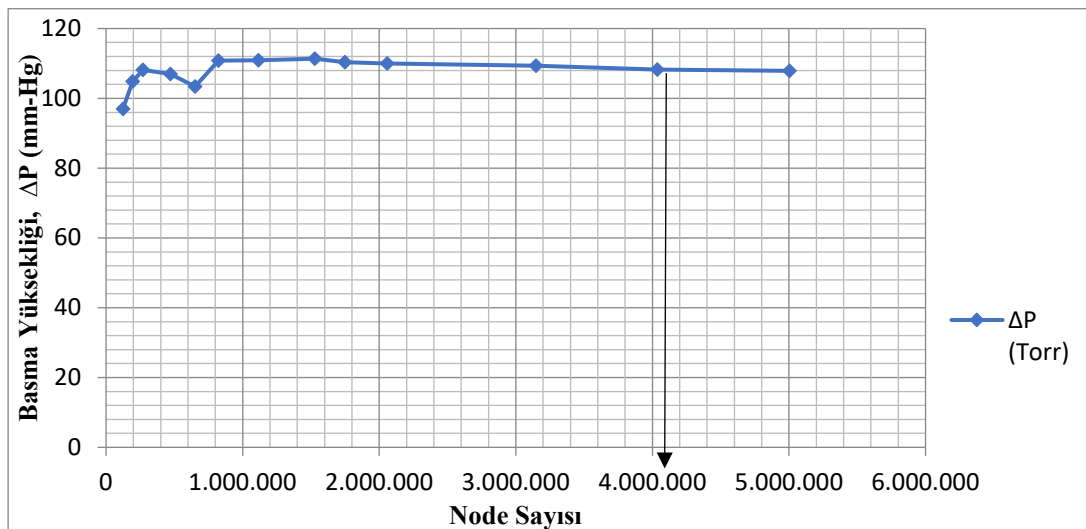
### 3.4.2. Pompa Modellerine Mesh (Çözüm Ağı) Oluşturma

Pompa geometrisi için akışkan oluşturulduktan sonra akışkan analizinin yapılabilmesi, bir takım denklemlerin çözümüne bağlıdır. Sonuçların ortaya çıkması için çözülmesi gereken denklemlerin çözümünü kolaylaştırma amacıyla akışkanın küçük elemanlara bölünmesi gerekmektedir. ANSYS Meshing bölümünde akışkan geometrisine ilk olarak Coarse 0 mertebesinde mesh oluşturuldu fakat oluşturulan mesh, “Skewness” ve “Orthogonal Quality” değerlerinde istenilen seviyeye ulaşmayınca sırasıyla Fine 0, Fine 50 ve Fine 100 mertebesinde mesh oluşturuldu. İstenilen “Skewness” değeri (maksimum 0.9) ile ve “Orthogonal Quality” değeri (minimum %3), Fine 100 mertebesinde yakalanarak bu çözüm ağı akışkan modellerinde kullanılmıştır (Şekil 3.15).

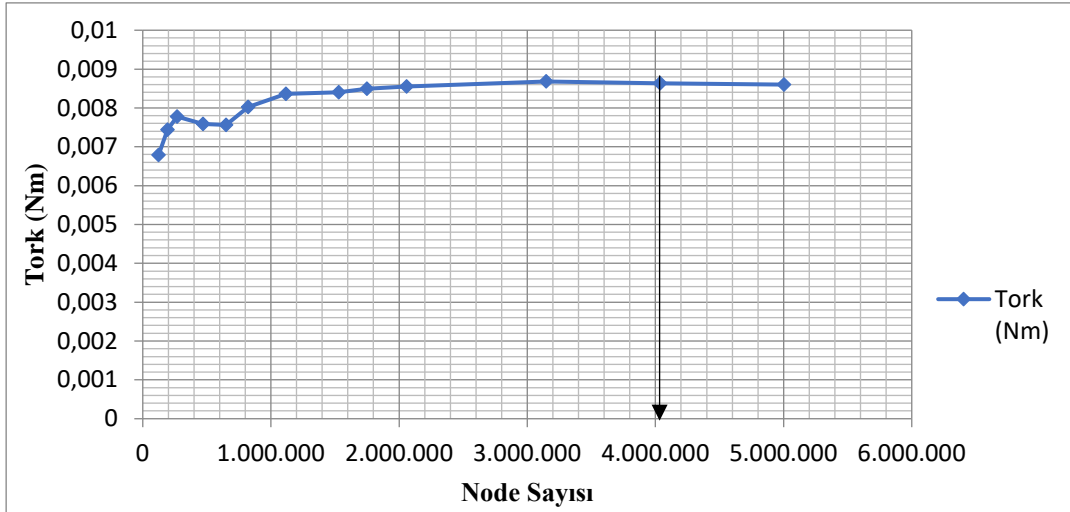


Şekil 3.15. Mesh (çözüm ağı) oluşturulması

“Name Selection” bölümünde akışkan modelin giriş yüzeyi, çıkış yüzeyi ve çark ile salyangoz arasında kalan dönen yüzeylerin tanımlanarak fluent modeline hazır hale getirilmiştir. Son olarak farklı çark geometrilerine sahip pompa akışkan modeli için, her mesh (çözüm ağı) bağımsızlık testi yapılarak analiz sonucunun mesh sayısından bağımsız olduğu tespit edildi (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17). Test sonucunda elde edilen verilere göre farklı çark geometrilerine sahip pompanın akışkan analizleri, yaklaşık 4,000,000 node sayısında yapıldı.



Şekil 3.16. Eğik kanat profilli çarka sahip pompanın mesh bağımsızlık test grafiği (ΔP – node sayısı)



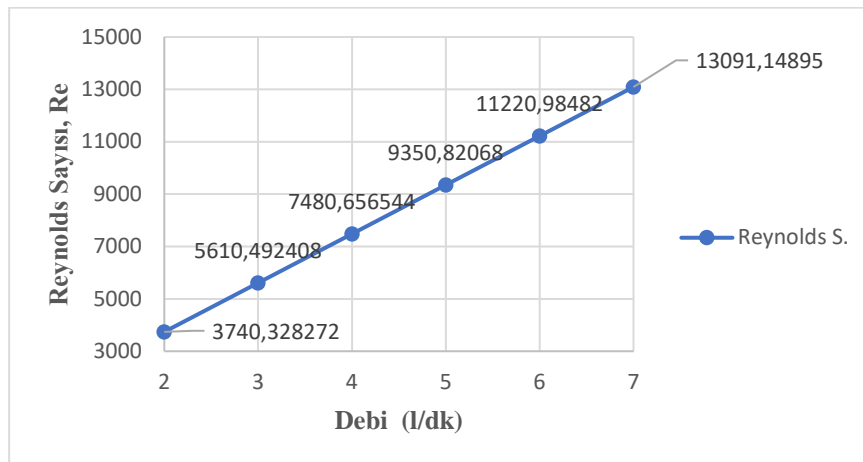
Şekil 3.17. Eğik kanat profilli çarka sahip pompanın mesh bağımsızlık test grafiği (tork-node sayısı)

### 3.4.3. Fluent Modelinin Hazırlanması

ANSYS Meshing kısmında mesh oluşturulduktan sonra bu bölümde, pompa akışkan modellerinin çözüm ayarları sırasıyla yapılmıştır.

Basınç bazlı çözümün seçildiği genel ayarlarda ayrıca yer çekimi ivmesi +y yönünde 9,81 olarak tanımlanmıştır.

Türbülans ayarlarında, tasarım debi noktasında ve diğer noktalarda akışkan türbülanslı olduğu için öncelikle pompa akışkan modeli için türbülans modeli seçilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Reynolds sayısı-debi Grafiği



Kalp destek pompalarıyla ilgili daha önce yapılmış çalışmalar incelendiği zaman HAD analizlerinde türbülans modeli k-ε olarak seçilmiştir. Türbülans modelleriyle ilgili çalışmalarda küçük ölçekli santrifüj pompalarda, k-ε türbülans modelinin gerçeğe en yakın sonuçlar verdiği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Arvand et al. 2004; Chan et al. 2005; Chua et al. 2007; Sorguven et al. 2008; Song et al. 2010b; Demir et al. 2011; Koochaki and Niroomand-Oscuii 2013; Chopski et al. 2016; Nishida et al. 2016a; Mohammadi and Fakharzadeh 2017; Mozafari et al. 2017).

Bu çalışmada ise yapılan literatür incelemesi sonucunda k-ε türbülans modelinin kullanılmasında karar kılınmıştır.

“Material” bölümünde ise akışkan modelinin sıvısı, deneysel çalışmalar su ile yapılacağından dolayı su olarak ayarlanmıştır ve çözümler buna göre yapılmıştır.

“Cell Zone Conditions” bölümünde çark akışkanına sırasıyla analizlerde 3500, 3850 ve 4250 dev/dk dönme hızı verildi (Şekil 3.19). Ayrıca sağ el kuralı ile dönme yönü tespit edilerek dönme hareketi -z yönünde tanımlandı.

Fluid

Zone Name  
carsu

Material Name: water-liquid [Edit...]

Frame Motion  3D Fan Zone  Source Terms  
 Mesh Motion  Laminar Zone  Fixed Values  
 Porous Zone

Reference Frame | Mesh Motion | Porous Zone | 3D Fan Zone | Embedded LES | Reaction | Source Terms | Fixed Values | Multiphase

Relative Specification: UDF  
Relative To Cell Zone: absolute | Zone Motion Function: none

Rotation-Axis Origin  
X (mm): 0 | constant  
Y (mm): 0 | constant  
Z (mm): 0 | constant

Rotation-Axis Direction  
X: 0 | constant  
Y: 0 | constant  
Z: -1 | constant

Rotational Velocity  
Speed (rpm): 3850 | constant

Translational Velocity  
X (m/s): 0 | constant  
Y (m/s): 0 | constant  
Z (m/s): 0 | constant

Copy To Mesh Motion

OK Cancel Help

Şekil 3.19. Çark akışkanının hareket özellikleri

“Boundary Conditions” bölümünde giriş-çıkış sınır koşulları ayarlanmıştır. Ayrıca ANSYS Meshing bölümünde tanımlanan dönen yüzeylerin de koşulları ayarlanmıştır. Giriş tipi “mass-flow inlet” ve çıkış tipi “pressure-outlet” olarak seçilmiş ve salyangoz ile çark arasında kalan dönen yüzey ise (çarkdisduvar) “wall” şeklinde ayarlanmıştır (Şekil 3.20, Şekil 3.21 ve Şekil 3.22).

Mass-Flow Inlet

Zone Name  
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Reference Frame Absolute

Mass Flow Specification Method Mass Flow Rate

Mass Flow Rate (kg/s) 0.0832 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (torr) 10 constant

Direction Specification Method Normal to Boundary

Turbulence

Specification Method Intensity and Hydraulic Diameter

Turbulent Intensity (%) 5.085 [P]

Hydraulic Diameter (mm) 11 [P]

OK Cancel Help

Şekil 3.20. Akışkan giriş sınır koşulları

**Pressure Outlet** ×

Zone Name  
outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Backflow Reference Frame Absolute

Gauge Pressure (torr) 110 constant

Pressure Profile Multiplier 1 [P]

Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification Total Pressure

Radial Equilibrium Pressure Distribution

Average Pressure Specification

Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method Intensity and Hydraulic Diameter

Backflow Turbulent Intensity (%) 5.085 [P]

Backflow Hydraulic Diameter (mm) 11 [P]

OK Cancel Help

Şekil 3.21. Akışkan çıkış sınır koşulları

**Wall** ×

Zone Name  
carkdisduvar

Adjacent Cell Zone  
salsu

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Wall Film Potential

Wall Motion

Stationary Wall

Moving Wall

Motion

Relative to Adjacent Cell Zone

Absolute

Speed (rpm) 3850 constant

Rotation-Axis Origin

X (mm) 0 [P]

Y (mm) 0 [P]

Z (mm) 0 [P]

Rotation-Axis Direction

X 0 [P]

Y 0 [P]

Z -1 [P]

Shear Condition

No Slip

Specified Shear

Specularity Coefficient

Marangoni Stress

Wall Roughness

Roughness Models

Standard

High Roughness (Icing)

Sand-Grain Roughness

Roughness Height (mm) 0 constant

Roughness Constant 0.5 constant

OK Cancel Help

Şekil 3.22. Akışkan duvarı sınır koşulları

Giriş-çıkış sınır koşullarındaki türbülans şiddeti (3.6) formülü kullanılarak hesaplandı ve hesaplanan değer “Turbulent Intensity (%)” bölümüne girildi (Şekil 3.23). Ayrıca hidrolik çap için ise deneysel çalışmada kullanılan akışkan borusunun çapı girildi.

$$T.I. = 0,16 + Re^{-1/8} \quad (3.6)$$

Q (l/dak)	Q (kg/s)	Q (m <sup>3</sup> /h)	Re	T.I. (%)
2	0,0332667	0,12	3841,7848	5,7023432
3	0,0499	0,18	5762,6772	5,4205324
4	0,0665333	0,24	7683,5696	5,2290718
5	0,0831667	0,3	9604,462	5,0852329
6	0,0998	0,36	11525,354	4,9706501
7	0,1164333	0,42	13446,247	4,8757884

Şekil 3.23. Türbülans şiddeti hesaplamaları

“Solution Methods” kısmında çözüm ayarları için “Coupled” çözüm yolu kullanıldı ve “Spatial Discretization” bölümü için ikinci mertebeden çözüm ayarları kullanıldı.

“Residual” bölümünde yakınsama ayarları yapıldı (Şekil 3.24). Bu kısım için yapılan deneylerin sonucunda  $1 \times 10^{-3}$  değeri sonrası deney sonuçlarının değişmediği görülmüştür. Fakat deney sonuçlarının daha hassas bir şekilde bulunması amacıyla yakınsama kriteri olarak  $1 \times 10^{-4}$  değeri kullanıldı.

Yakınsama Değeri	P <sub>gir</sub> (torr)	P <sub>çık</sub> (torr)	ΔP (torr)	Değişim
1,0E-01	14,15	113,8	99,65	-
1,0E-02	9,88	113,74	103,86	4,05353
1,0E-03	9,88	113,79	103,91	0,04812
1,0E-04	9,84	113,79	103,95	0,03848
1,0E-05	9,84	113,79	103,95	-

Şekil 3.24. Yakınsama kriteri değişim hesabı

Bu ayarlamalarla birlikte çözüm başlatılarak HAD analizi gerçekleştirildi. Bu ayarlar üç farklı çark tipi için, 2-7 l/dk debilerde ve 3500, 3850 ve 4250 dev/dk dönme hızlarında tekrarlanarak HAD analizleri gerçekleştirildi.

HAD analizlerinden elde edilen verilerle pompa performansı toplam basınç farkı (3.7), toplam basınç (3.8), pompa çark gücü (3.9), akışkan gücü (3.10) ve hidrolik verim (3.11) formülleriyle hesaplanmıştır.

$$\Delta P_t = P_{tç} - P_{tg} \quad (3.7)$$

$$P_t = P + \rho \frac{v^2}{2} \quad (3.8)$$

$$N_{ç} = T * \omega \quad (3.9)$$

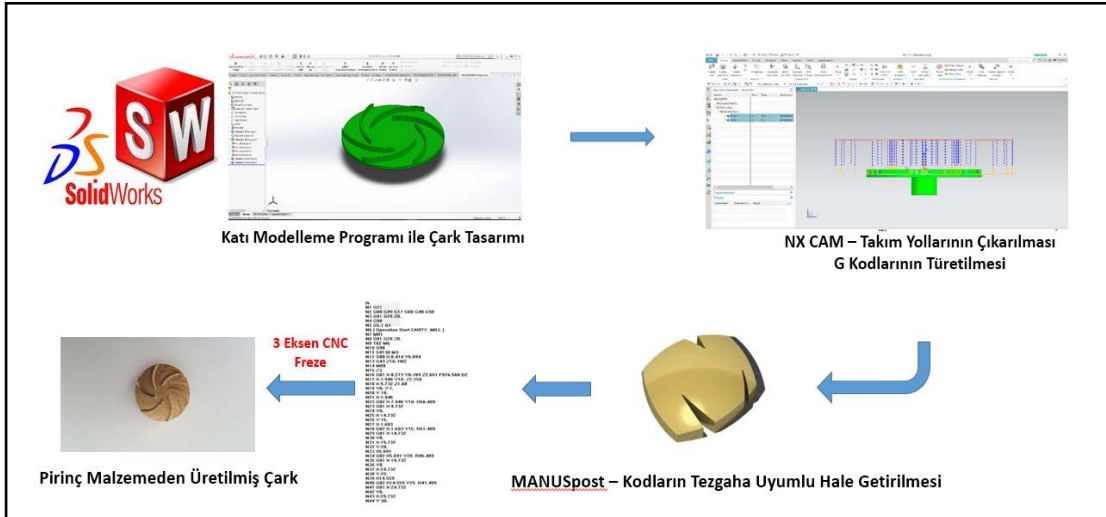
$$N_a = \Delta P_t * Q \quad (3.10)$$

$$\eta_h = \frac{N_a}{N_{ç}} \quad (3.11)$$

### 3.5. Deneysel Çalışma

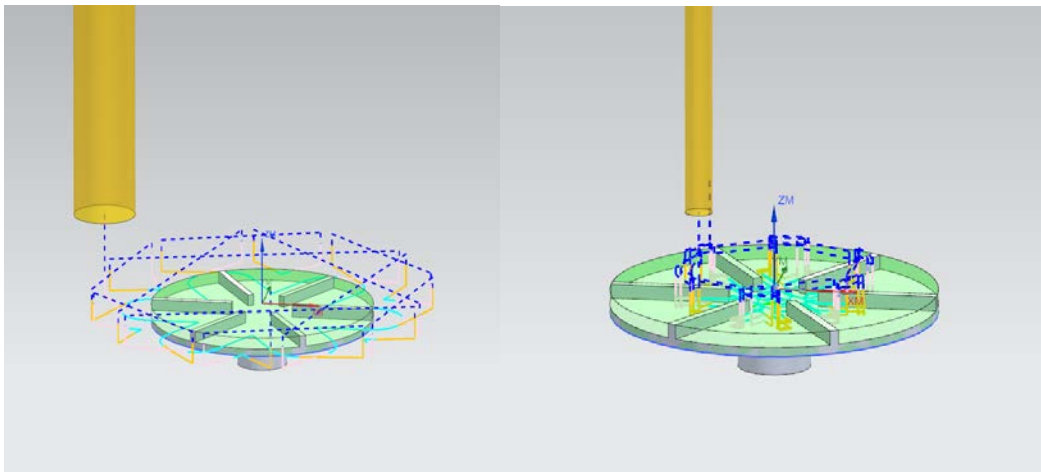
#### 3.5.1. Farklı Kanat Geometrili Çarkların ve Pompa Milinin İmalatı

Farklı kanat profillerine sahip çarkların HAD analizi için katı modelleme programı ile tasarımı yapılan farklı kanat profillerine sahip çarkların, HAD analizlerini doğrulama amacıyla yapılan deneysel çalışmalar için imalatı yapılmıştır (Şekil 3.25).

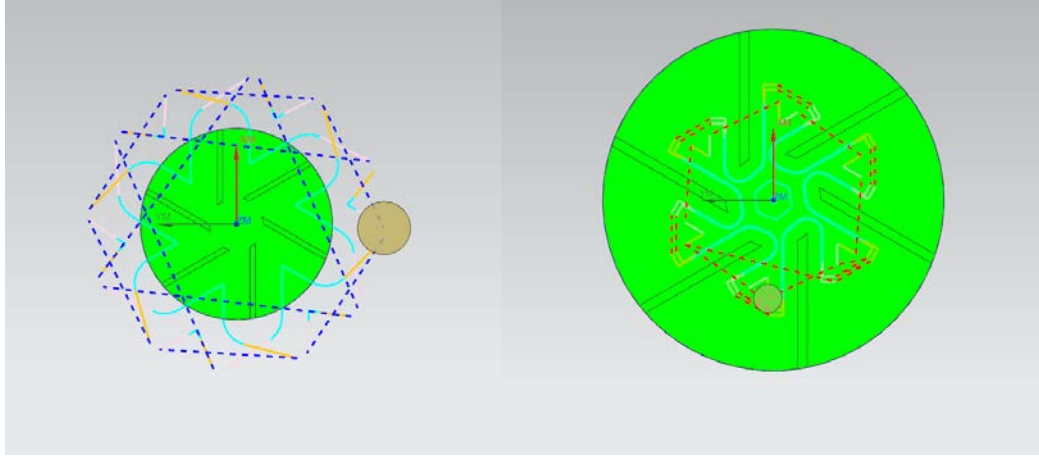


Şekil 3.25. Çark üretim şeması

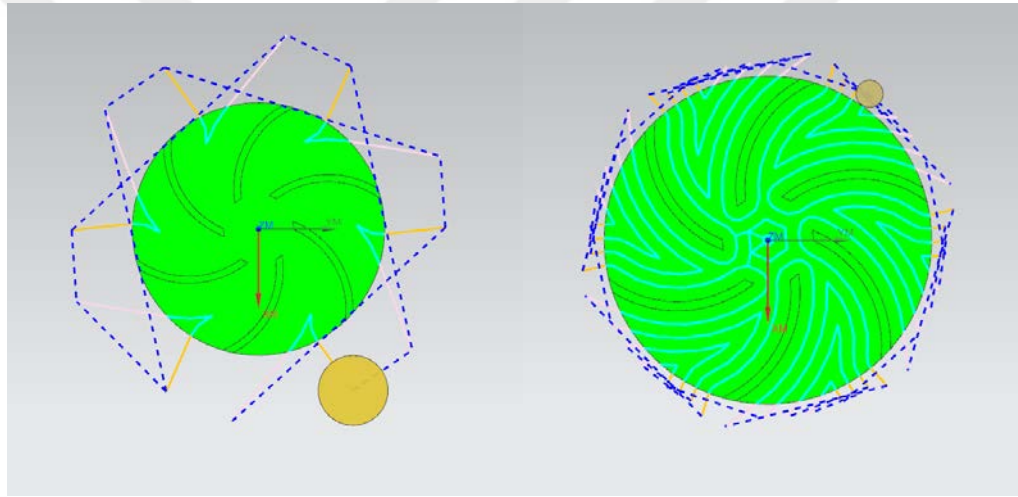
İmalat için öncelikle NX CAM paket programı ile çarkların takım yolları dört ayrı operasyon ile çıkarılmıştır. Çarkların ön yüzü için “Cavity Mill” operasyonu kullanılarak “Follow Part” takım yolu stratejisi ile kaba ve finiş işlemleri yapılmıştır (Şekil 26, Şekil 27 ve Şekil 28). Çarkın arka yüzü ise “Cavity Mill” operasyonu kullanılarak “Follow Part” kaba işlemi yapılmış, “Drilling” operasyonu ile de delik işlemleri yapılmıştır (Şekil 29 ve Şekil 30).



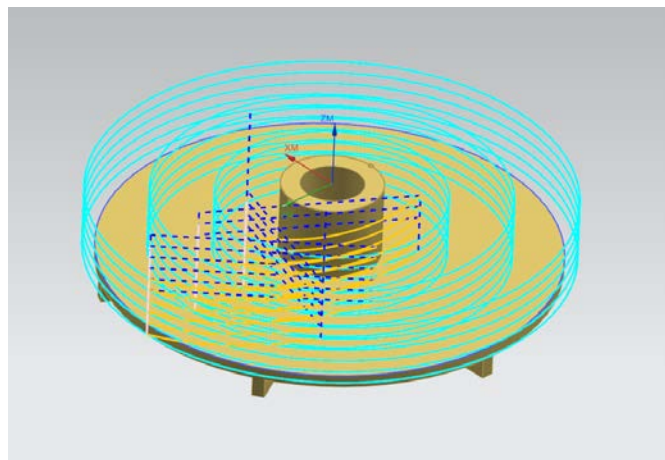
Şekil 3.26. Radyal kanatlı çarka ait kaba ve finiş operasyon takım yolları



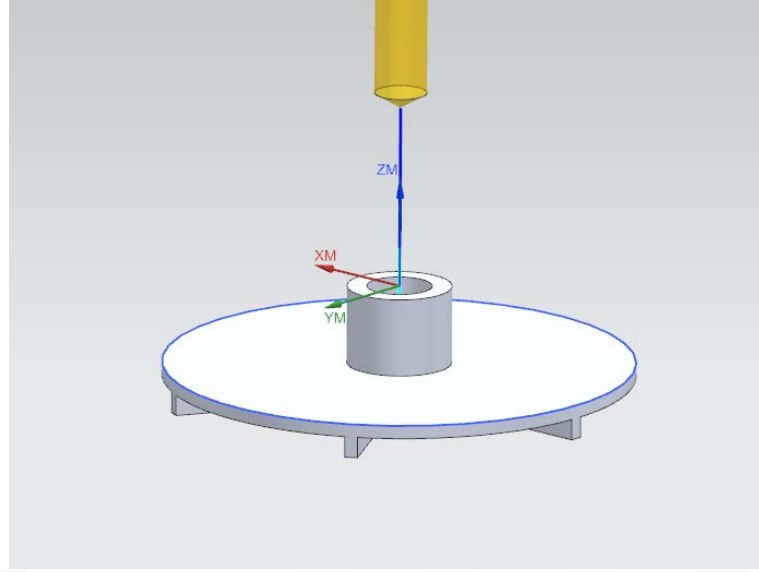
Şekil 3.27. Eğik kanatlı çarka ait kaba ve finiş operasyon takım yolları



Şekil 3.28. Eğri kanatlı çarka ait kaba ve finiş operasyon takım yolları



Şekil 3.29. Çarkların arka yüzeyi için oluşturulmuş takım yolları



Şekil 3.30. Çarkın arka yüzeyi için delik operasyonu

NX CAM ile takım yolları üretilen çarkları ait “g code”ları “.cls” formatı ile alınmıştır. Daha bu dosyalar, Dahlih-MCV 720/860 markalı ve Fanuc Oİ-MD kontrol ünitesi ile uyumlu hale getirilebilmesi için “Manuspost” yazılımına aktarılmıştır (Şekil 3.31). Bu programda gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra dosya USB aracılığı ile CNC dik işleme merkezine aktarılmıştır. Aynı işlemler mil üretimi için de Goodway – GLS 1500 markalı Fanuc OI-TD kontrol ünitesi ile CNC torna tezgahı için de geçerlidir.

 A screenshot of the MANUSpost - mil software interface. The window title is "MANUSpost - mil". The menu bar includes "Dosya", "Düzenle", "Görünüm", "Ayarlar", "Post", "Pencere", "Yardım", "Kontrol". The main area displays a list of G-code commands for a lathe operation. The commands are as follows:
 

```

  TOOL PATH\ALIN_TORNALAMA.TOOL_T0101
  TLDATA/TURN.LEFT.OUTSIDE.MCSZ.1.0000,4.0000,5.0000,5.0000,150.0000,257.5000
  MSYS/0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000
  $$ centerline data
  PAINT/PATH
  PAINT/SPEED,10
  TURRET/FACE.1
  SPINDL/SMM,20
  PAINT/COLOR,18
  FROM/14.6785,0
  SPINDL/SMM,20
  RAPID
  GOTO/14.6785,0
  RAPID
  GOTO/8.0000,0
  PAINT/COLOR,21
  RAPID
  GOTO/8.0000,0
  RAPID
  GOTO/11.4949,0
  PAINT/COLOR,42
  FEDRAT/MMPR,0
  N25 G0 Z2.571
  N26 X2.3
  N27 Z-0.857
  N28 G1 X2.2
  N29 X-1
  N30 X-2
  N31 G0 Z2.143
  N32 X2.3
  N33 Z-1.286
  N34 G1 X2.2
  N35 X-1
  N36 X-2
  N37 G0 Z1.714
  N38 X2.3
  N39 Z-1.714
  N40 G1 X2.2
  N41 X-1
  N42 X-2
  N43 G0 Z1.286
  N44 X2.3
  
```

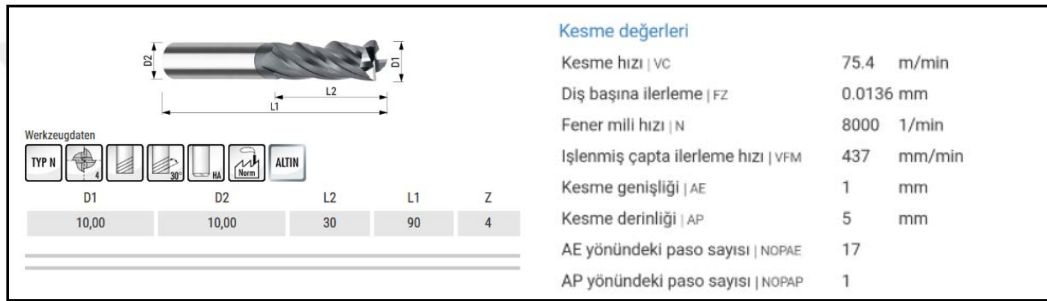
 The status bar at the bottom shows "Hazır" and "NUM |".

Şekil 3.31. Manuspost yazılımı ile post dönüşümü

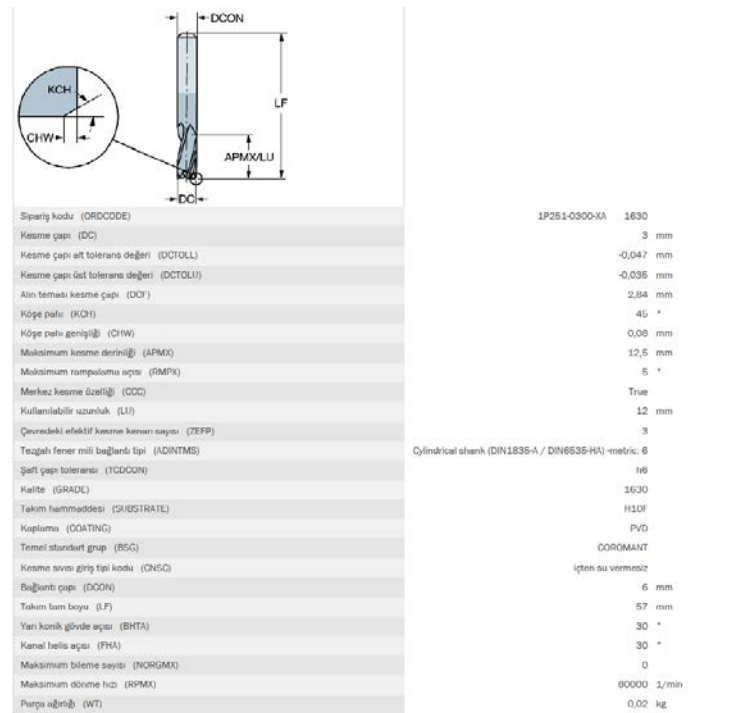


Çarklar, hem paslanmaz özelliğinin bulunmasından dolayı ve hem de kolay işlenebilir olmasından dolayı pirinç malzemeden işlenmiştir. Kütük olarak Ø40 mm çapında çubuk pirinç malzeme kullanılmış ve CAM programından elde edilen takım yollarıyla nihai parçaya ulaşılmıştır.






Çarkların ön yüzeyleri işlenirken operasyon sırasına göre Ø10 mm karbür parmak freze ve Ø3 mm karbür parmak freze kullanılmıştır. Ø10 mm karbür parmak freze ve Ø3 mm karbür parmak freze için takım özellikleri, kesme ve ilerleme hızları şekil 3.32, şekil 3.33 ve şekil 34'de verilmiştir.



Şekil 3.32. Ø10 mm karbür parmak freze özellikleri ve kesme değerleri (URL 9)

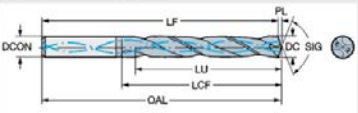


Şekil 3.33. Ø3 mm karbür parmak freze özellikleri (Sandvik 2017)

Kesme değerleri			
			
Açıklama			
 Helisel Frezeleme			
 Ön işleme			
			
Kesme genişliği (AE)	3	3	mm
Kesme derinliği (AP)	0,667	2	mm
AE yündündeki paso sayısı (NOPAE)	1		
AP yündündeki paso sayısı (NOPAP)	3	5	
İşlenmiş çap başlangıcı (DMS)	6		mm
Etkin rampalama açısı (RMP)	4,05		°
Kesme hızı (VC)	75,4	75,4	m/min
Fener mili hızı (N)	8000	8000	1/min
Diş başına ilerleme (FZ)	0,0305	0,0305	mm
İşlenmiş çapta ilerleme hızı (VFM)	732	732	mm/min
İlerleme hızı (VF)	366		mm/min
Kesme gücü (PPC)	0,0295	0,0884	kW
Kesme torku (MMC)	0,0352	0,105	Nm
Malzeme kaldırma oranı (QQ)	0,732	4,39	cm <sup>3</sup> /min
Toplam işleme süresi (TCCT)	00:23,160	05:20,400	dak:sn
Takım ömrü uzunluğu (TLFEL)	290	290	m
Takım ömrü süresi (TLFET)	400	400	min

Şekil 3.34. Ø3 mm karbür parmak freze kesme değerleri (Sandvik 2017)

Çarkların ön yüzeyleri işlenirken operasyon sırasına göre Ø10 mm karbür parmak freze, Ø4 mm karbür matkap ve Ø5,16 mm karbür parmak freze kullanılmıştır. Bu takımlara ait kesme değerleri, kesici takım ve takım ömürlerine ait özellikler şekil 3.35 ve şekil 3.36, şekil 3.37, şekil 3.38, şekil 3.39 ve şekil 3.40'da verilmiştir.

460.1-0400-030A1-XM GC34	
	
Sipariş kodu (ORDCODE)	460.1-0400-030A1-XM GC34
Kesme çapı (DC)	4 mm
Ergilebilir delik toleransı (TOHA)	H9
Kullanılabilir uzunluk (LU)	32,6 mm
Kullanılabilir çaplı boy oranı (LUDR)	8,15
Tezgahlı fener mili bağlantı tipi (ADINTMS)	Cylindrical shank (DIN1835-A / DIN6625-HA)-metric 6
Şaft çapı toleransı (TDCOON)	H6
Kalite (GRADE)	GC34
Takım hammaddesi (SUBSTRATE)	HM
Kaplama (COATING)	PVD
Temel standart grup (BGG)	DOROMANT
Kesme sist. giriş tipi kodu (CHSC)	dairede aksanal eş merkezli giriş
Kesme sist. basıncı (CP)	30 bar
Bağlantı çapı (DCOON)	6 mm
Uç açısı (SK)	140 °
Matkap işleme boyu (PL)	0,6 mm
Toplam takım boyu (OAL)	90 mm
Takım bari boyu (LF)	89,4 mm
Talay kanalı uzunluğu (LCF)	48 mm
Maksimum bileme sayısı (NORGMX)	3
Maksimum döme hızı (RPMX)	25800 1/min
Piyasa işi (WT)	0,027 kg

Şekil 3.35. Ø4 mm matkap takım özellikleri (Sandvik 2017)

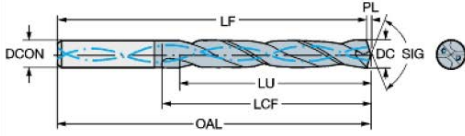
Kesme değerleri	
Kesme hızı (VC)	101 m/min
Fener mili hızı (N)	8000 1/min
Devir başına ilerleme (FN)	0,15 mm
İlerleme hızı (VF)	1200 mm/min
Delik adedi (TLIFEC)	5120 Delikler
Takım ömrü süresi (TLIFET)	34 min
Takım ömrü uzunluğu (TLIFEL)	41 m
Kesme gücü (PPC)	0,235 kW
Kesme torku (MMC)	0,28 Nm
İlerleme kuvveti (FFF)	110 N



Şekil 3.36. Ø4 mm matkap kesme değerleri (Sandvik 2017)



Şekil 3.37. Ø4 mm matkap takım ömrü (Sandvik 2017)

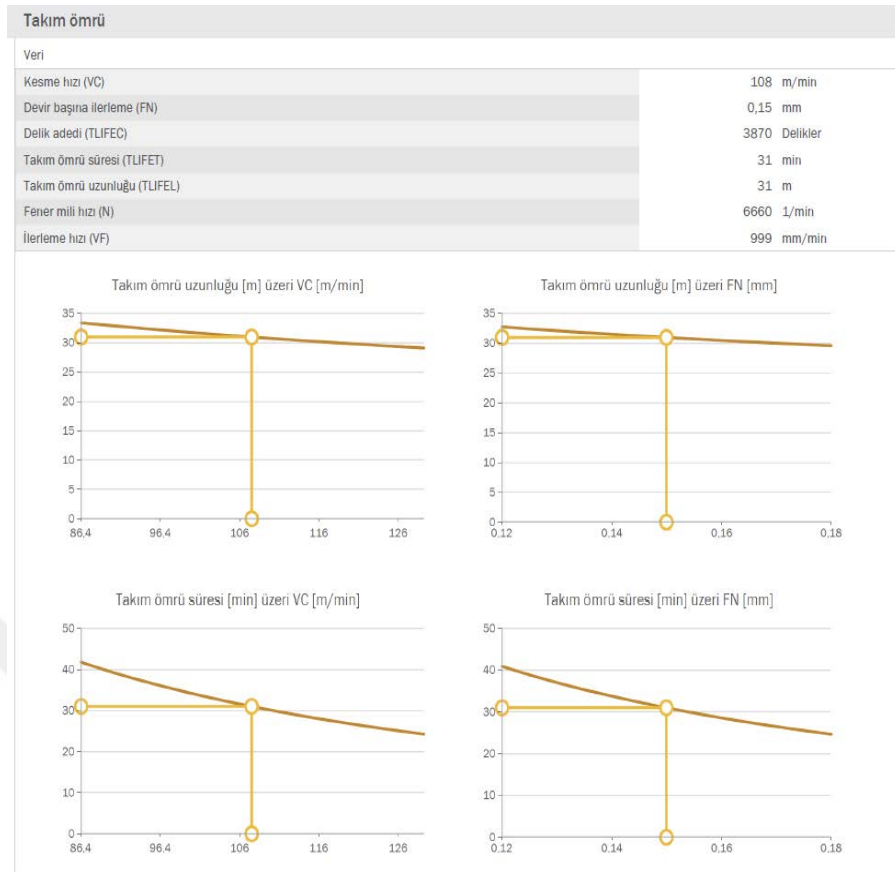
460.1-0516-039A1-XM GC34	
	
Sipariş kodu (ORDCODE)	460.1-0516-039A1-XM GC34
Kesme çapı (DC)	5,16 mm
Erişilebilir delik toleransı (TCHA)	H9
Kullanılabilir uzunluk (LU)	42 mm
Kullanılabilir çapboy oranı (ULDR)	8,14
Tezgah fener mili bağlantı tipi (ADINTMS)	Cylindrical shank (DIN1835-A / DIN6535-HA) -metric: 6
Şaft çapı toleransı (TCDCON)	h6
Kalite (GRADE)	GC34
Takım hammaddesi (SUBSTRATE)	HM
Kaplama (COATING)	PVD
Temel standart grup (BSG)	COROMANT
Kesme sıvısı giriş tipi kodu (CN5C)	dairede eksenel eş merkezli giriş
Kesme sıvısı basıncı (CP)	20 bar
Bağlantı çapı (DCON)	6 mm
Uç açısı (SIG)	140 °
Matkap ağızlama boyu (PL)	0,8 mm
Toplam takım boyu (OAL)	104 mm
Takım tam boyu (LF)	103 mm
Talaş kanalı uzunluğu (LCF)	62 mm
Maksimum bileme sayısı (NORGMX)	3
Maksimum dönme hızı (RPMX)	20000 1/min
Parça ağırlığı (WT)	0,03 kg

Şekil 3.38. Ø5,16 mm matkap takım özellikleri (Sandvik 2017)

Kesme değerleri	
Kesme hızı (VC)	108 m/min
Fener mili hızı (N)	6660 1/min
Devir başına ilerleme (FN)	0,15 mm
İlerleme hızı (VF)	999 mm/min
Delik adedi (TLIFEC)	3870 Delikler
Takım ömrü süresi (TLIFET)	31 min
Takım ömrü uzunluğu (TLIFEL)	31 m
Kesme gücü (PPC)	0,333 kW
Kesme torku (MMC)	0,478 Nm
İlerleme kuvveti (FFF)	145 N



Şekil 3.39. Ø5,16 mm matkap kesme değerleri (Sandvik 2017)



Şekil 3.40. Ø5,16 mm matkap takım ömrü (Sandvik 2017)

Bu işlemlerden sonra üretilen çarklar şekil 3.41, şekil 3.42 ve şekil 3.43’de verilmiştir.



Şekil 3.41. Geriye dönük eğri kanat profiline sahip çark



Şekil 3.42. Radyal kanat profiline sahip çark



Şekil 3.43. Eğik kanat profiline sahip çark

Hizmet alımı yoluyla daha önce üretilmiş olan kademeli pompa mili için ise paslanmazlık özelliğinden dolayı paslanmaz çelik kullanılmıştır (Şekil 3.44).

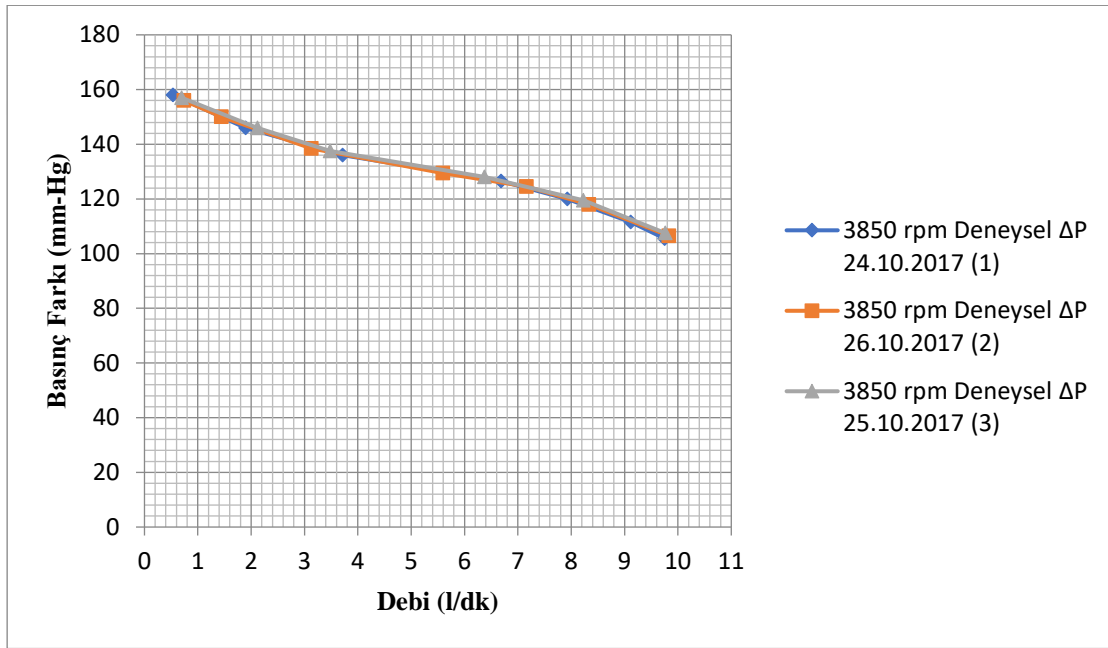


Şekil 3.44. Kademeli pompa mili

### 3.5.2. Deney Seti ve Hesaplamalar

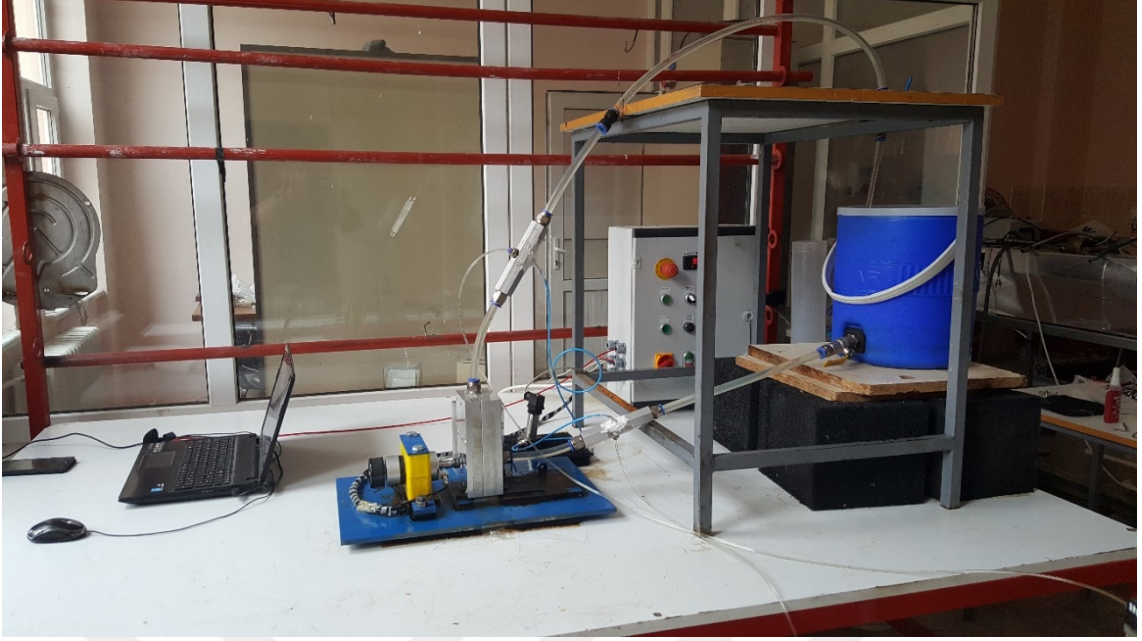
Bu çalışmada, deneysel çalışmalar için Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik ABD laboratuvarı kullanılmıştır. Bu çalışma için yeni bir deney seti kurulmayıp, daha önce yapılan bir çalışma sonucu kurulan deney seti kullanılmıştır.

Deney setinde gerçekleştirilen deneyler üçer kez yapılarak deney tekrarlanabilirliğinin kontrolü yapılmıştır (Şekil 3.45).

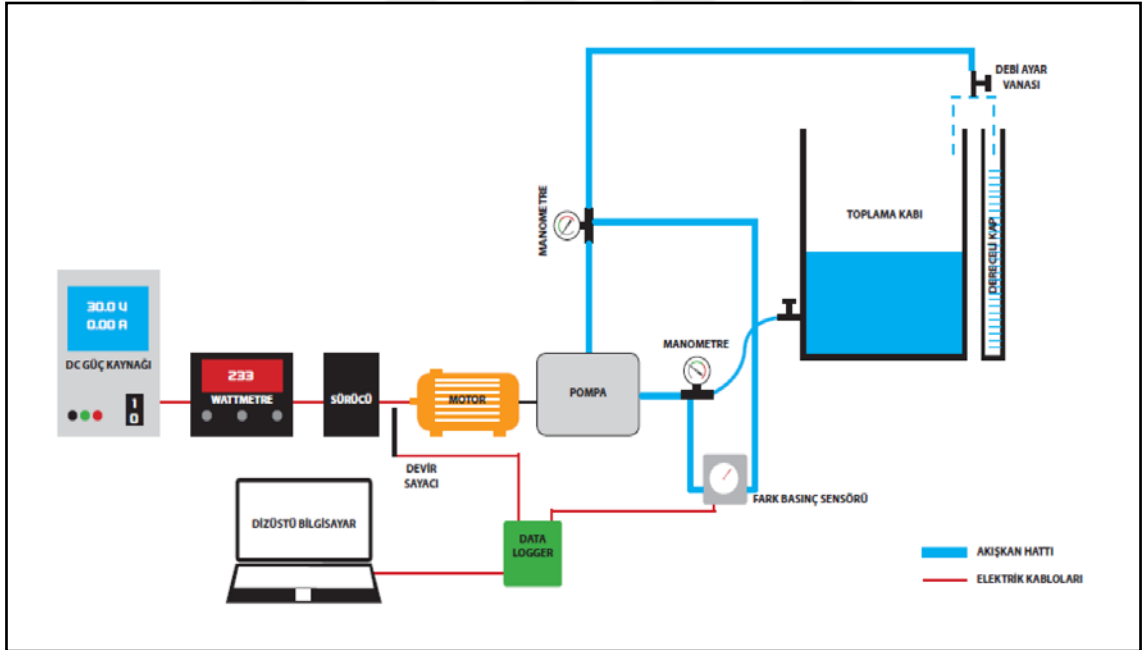


Şekil 3.45. Radyal kanat profilli çarka sahip pompanın 3850 dev/dk dönme hızında deney tekrarları

Deney seti, daha önce santrifüj kalp destek pompası tasarımı ve nümerik analizinin yapılması çalışması esnasında kurulmuştur (İncebay 2017) (Şekil. 3.46 ve Şekil 3.47).



Şekil 3.46. Deney setinin fotoğrafı



Şekil 3.47. Deney setinin şematik gösterimi (Çınar 2017)

Bu deney setinde;

- 12-15 litrelik atmosfere açık akışkan toplama kabı,
- Akış için iç çapı 10,5 mm olan şeffaf hortum,



- Toplanan akışkanın hacmini ölçmek amacıyla 20 ml hassasiyetli dereceli kap,
- Elektronik ve manuel olarak basınç değişimi ölçümünün yapılabilmesi amacıyla emme-basma hatları üzerine monte edilmiş çift delikli alüminyum malzemeli iki adet basınç prizi,
- Akışkanın debisini ayarlamak için debi ayar vanası,
- Elektronik olarak efektif basınç değişiminin ölçümünü yapmak üzere %0,25 hassasiyetli Valcom 27D fark basınç sensörü,
- Efektif basınç değişimi ölçümünün kontrolü yapılma üzere iki adet manometre,
- Pompa motoru olarak 400 W gücünde, maksimum 12000 dev/dk dönme hızına sahip fırçasız 48 V DC elektrik motoru,
- Pompa motorunun devir sayacı olarak Sick IME1603 endüktif proximity sensörü,
- Pompanın güç ölçümü için dijital göstergeli %1 hassasiyetli wattmetre

kullanılmıştır (İncebay 2017).

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler kullanılarak aşağıdaki formüllerle birlikte pompa mil gücü (3.12) ve pompa verimi (3.13) hesaplandı.

$$N_m = N_{motor,yükte} - N_{motor,boşta} \quad (3.12)$$

$$\eta_p = \frac{N_a}{N_m} \quad (3.13)$$

## **4. BULGULAR VE TARTIŞMA**

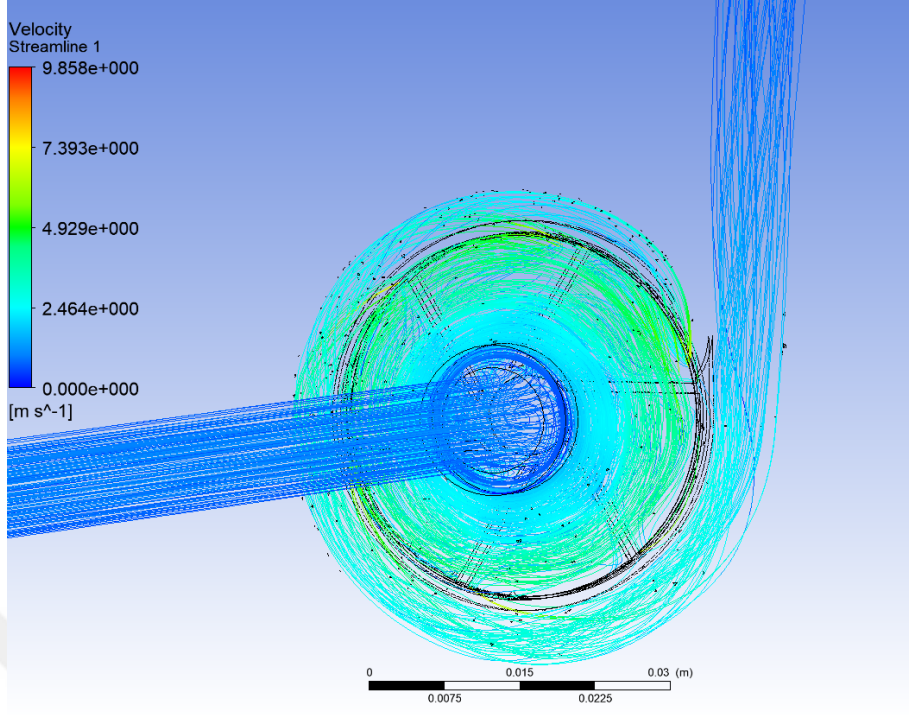
Bir önceki bölümde üç farklı kanat geometrisine sahip çark tasarımı ve üretimi açıklandıktan sonra bu çarklara sahip pompaların HAD analizlerinin ve deneysel çalışmaların yapıldığı ifade edilmiştir. Bu bölümde ise yapılan HAD analizlerin sonuçları ve deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuştur.

### **4.1. HAD Analizinden Elde Edilen Bulgular**

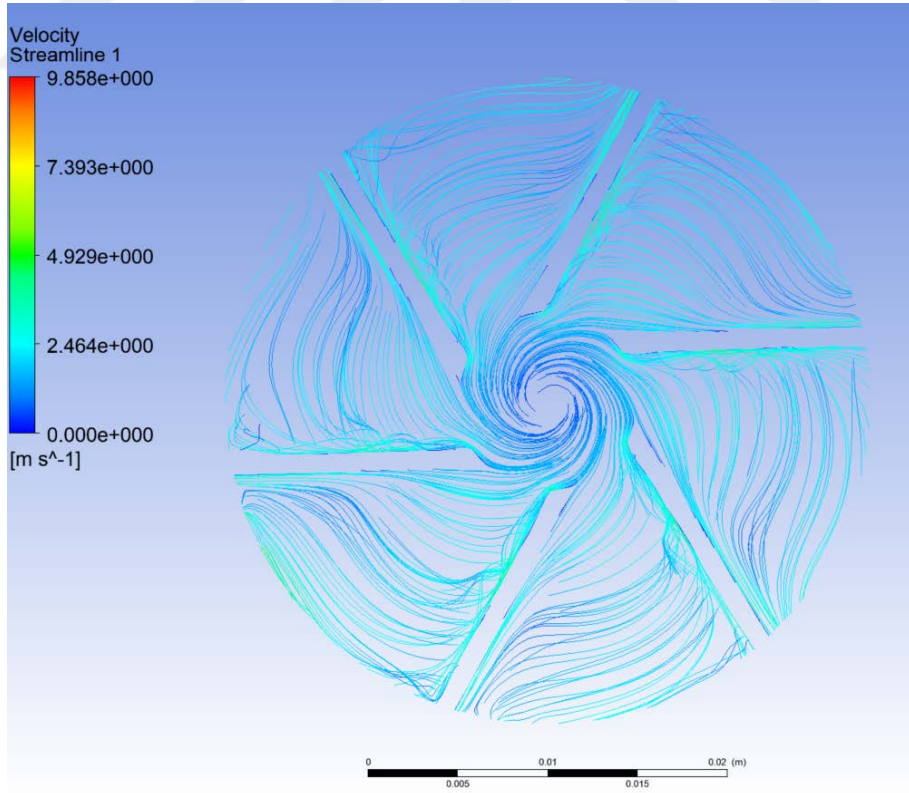
#### **4.1.1. Pompa İç Akışının Analiz Bulguları**

Ersanlı (2009) yaptığı bir çalışmada akış çizgilerinin ve basınç dağılımının yorumlanmasıyla, pompa hidrolik performansının tahmin edilebileceğini belirtmiştir. Buna ilaveten HAD analizlerinden ve deneysel çalışmalarından elde edilen verilerle oluşturulan pompa performans eğrileri, pompanın hidrolik performansı konusunda daha net bilgi vermiştir.

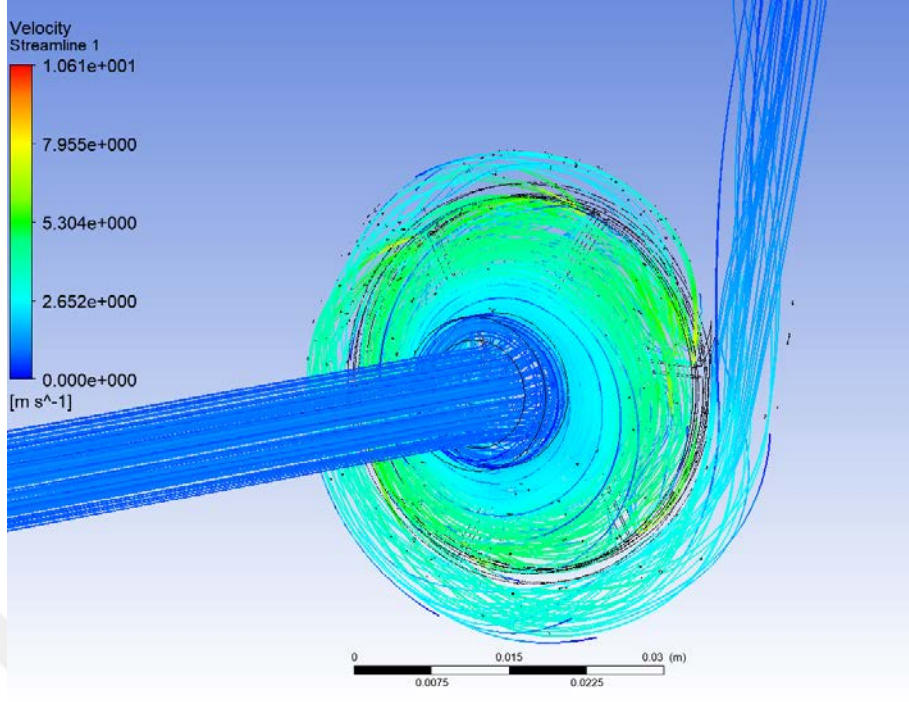
HAD analizlerinden elde edilen sonuçlara göre program içerisinde, farklı kanat geometrilerine ve farklı dönme hızlarına ait 5 l/dk tasarım debisinde iç akış çizgileri elde edilmiştir (Şekil 4.1-Şekil 4.20). Ayrıca akış çizgilerinin, pompa performansına olan etkisinin yanında kan hasarına olan etkisi de önemlidir. Bu yüzden buradan elde edilen verilerle akışta kaos veya karmaşıklık olup olmadığı ve kanat geometrisine uygun bir yol izleyip izlemediği tespit edildi.



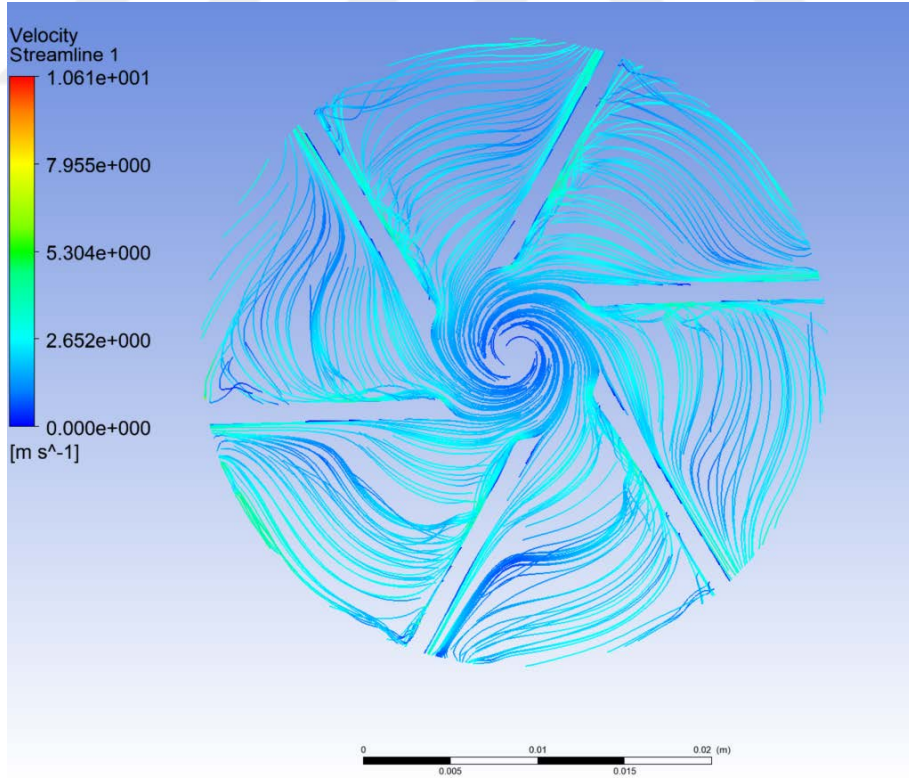
Şekil 4.1. Pompa montajı için akış çizgileri (Eğik kanat-3500 dev/dk-5 l/dk)



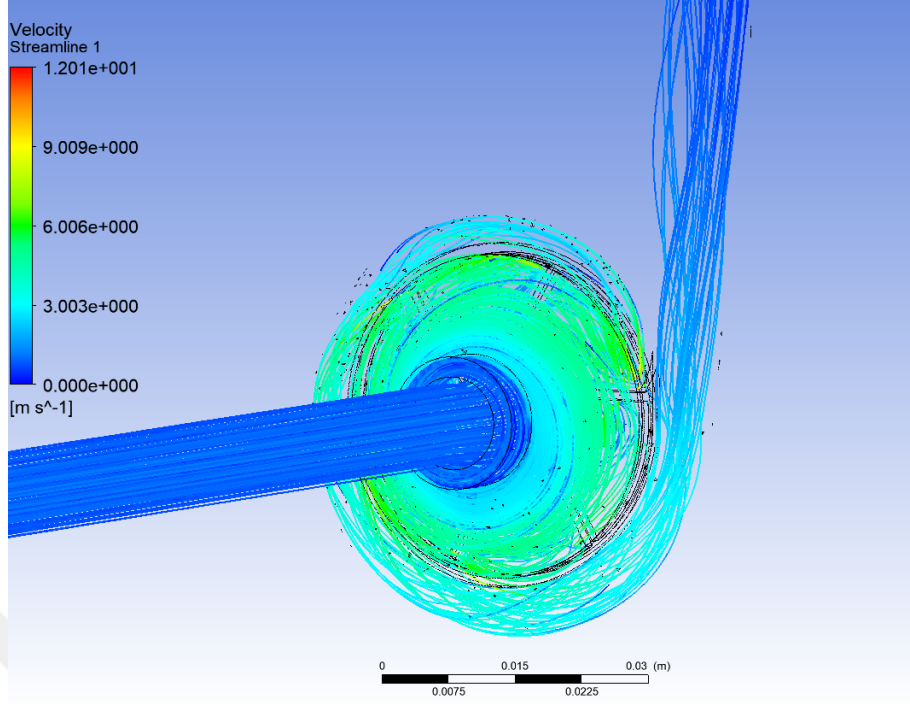
Şekil 4.2. Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğik kanat-3500 dev/dk- 5 l/dk)



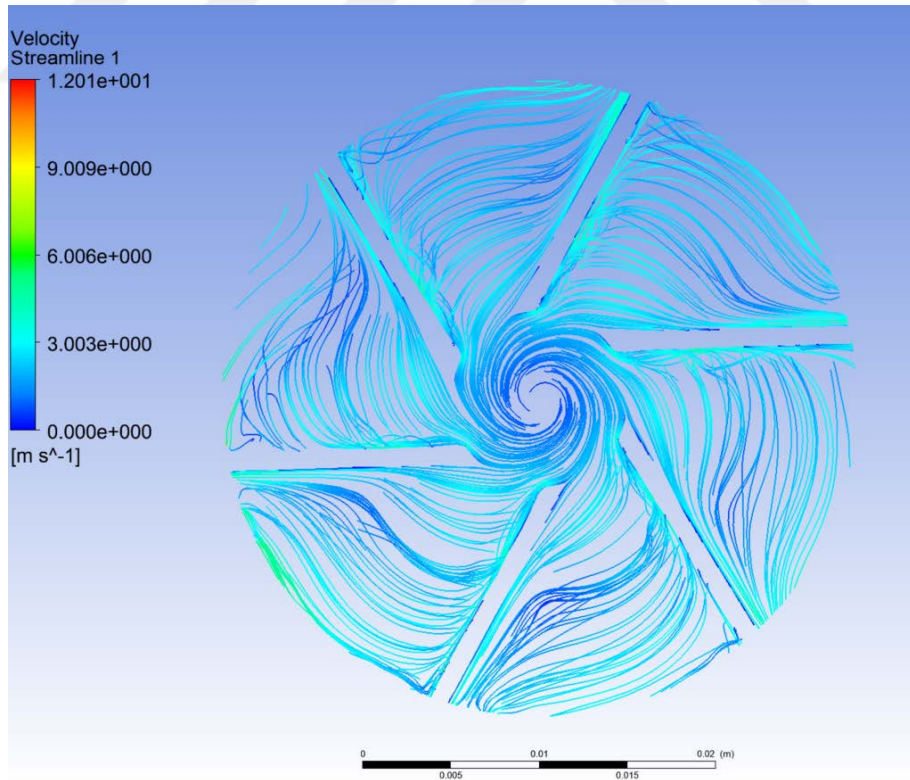
Şekil 4.3. Pompa montajı için akış çizgileri (Eğik kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)



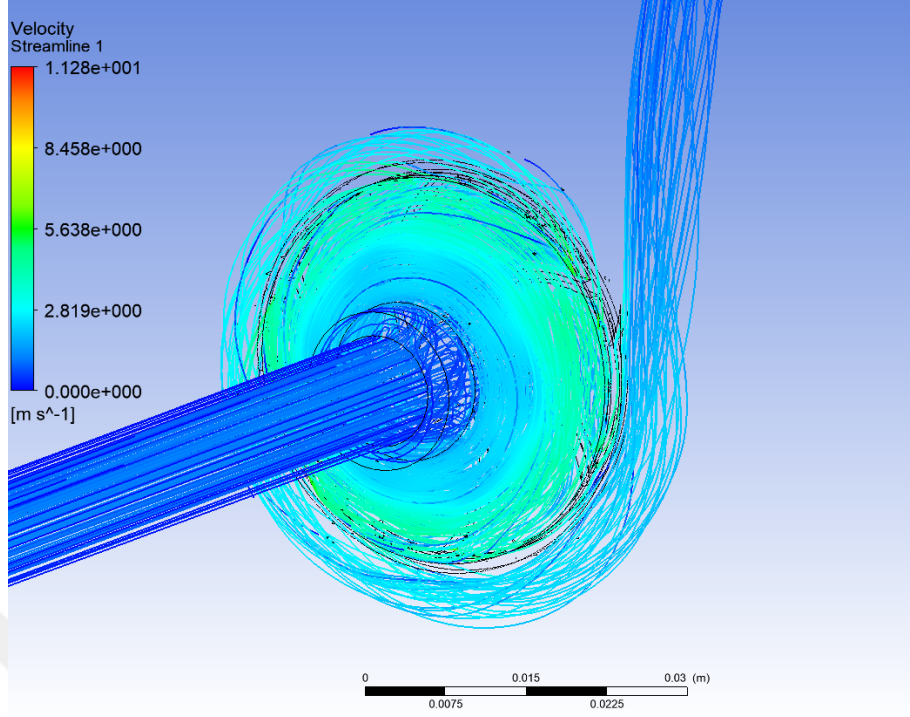
Şekil 4.4. Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğik kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)



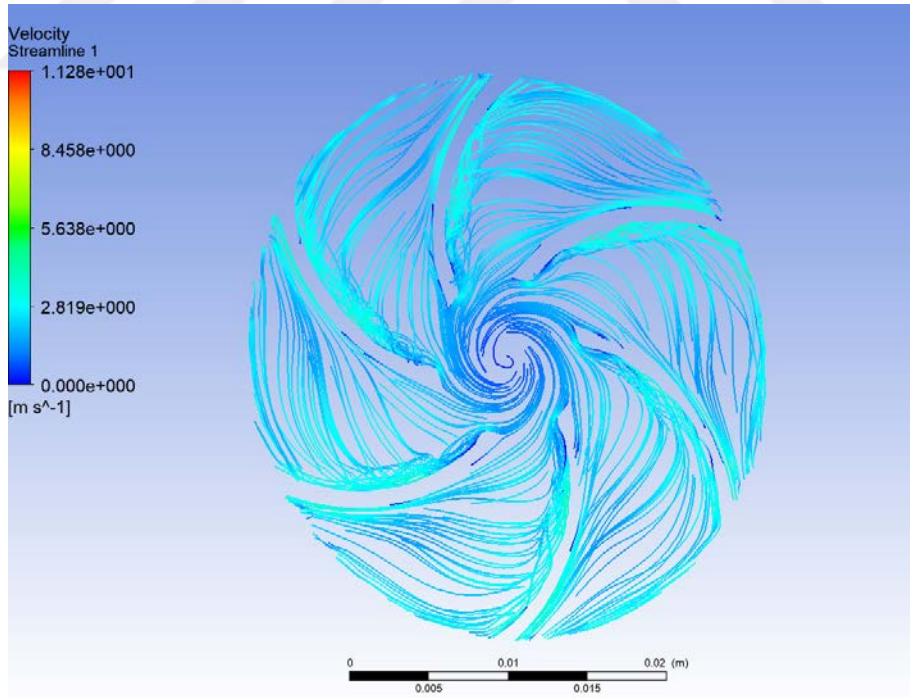
Şekil 4.5. Pompa montajı için akış çizgileri (Eğik kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)



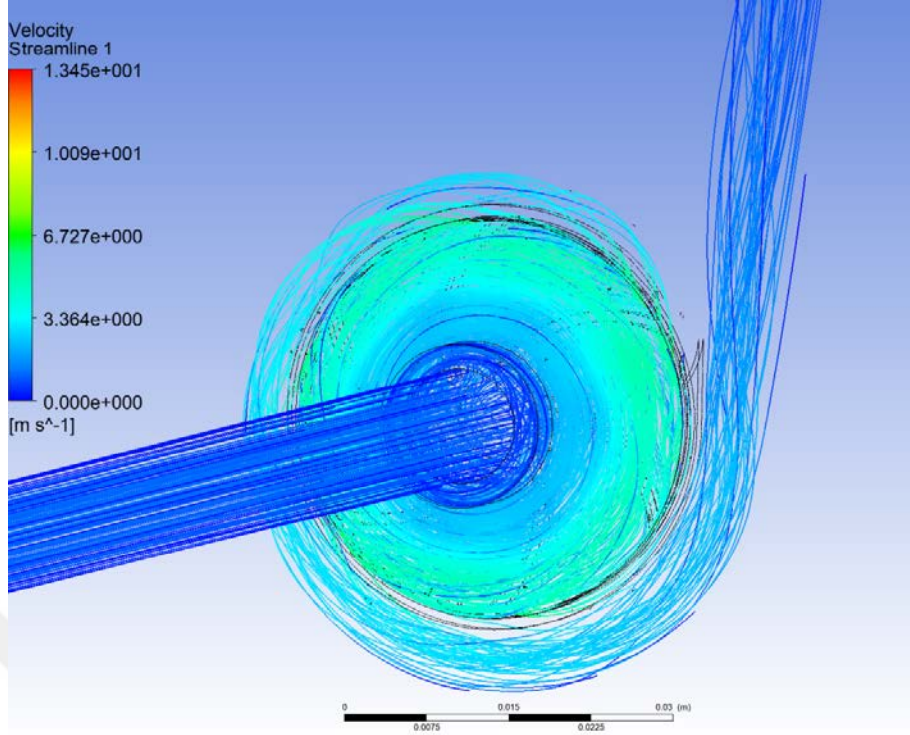
Şekil 4.6. Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğik kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)



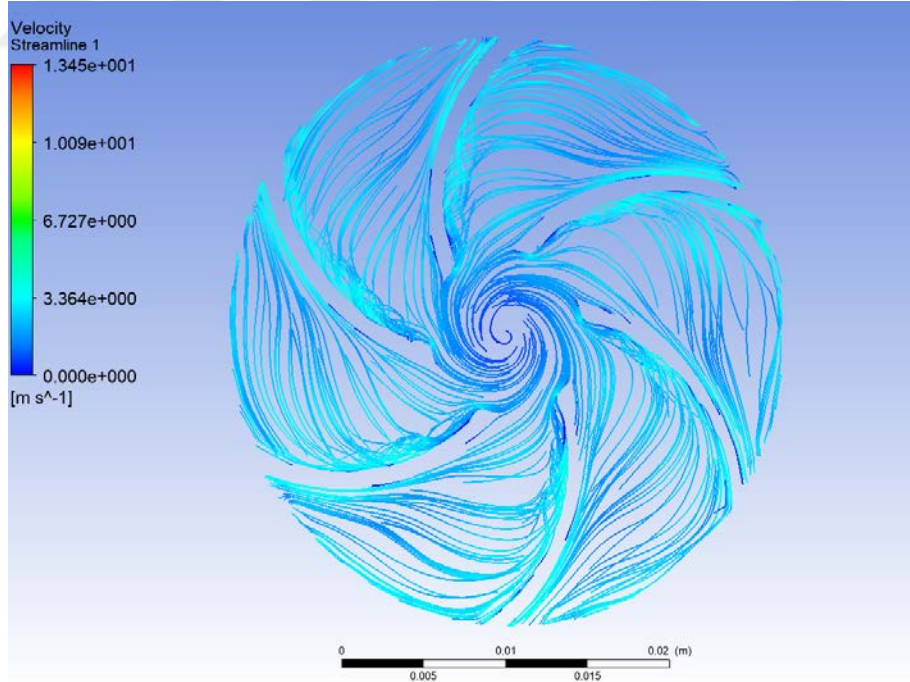
Şekil 4.7. Pompa montajı için akış çizgileri (Eğri kanat-3500 dev/dk-5 l/dk)



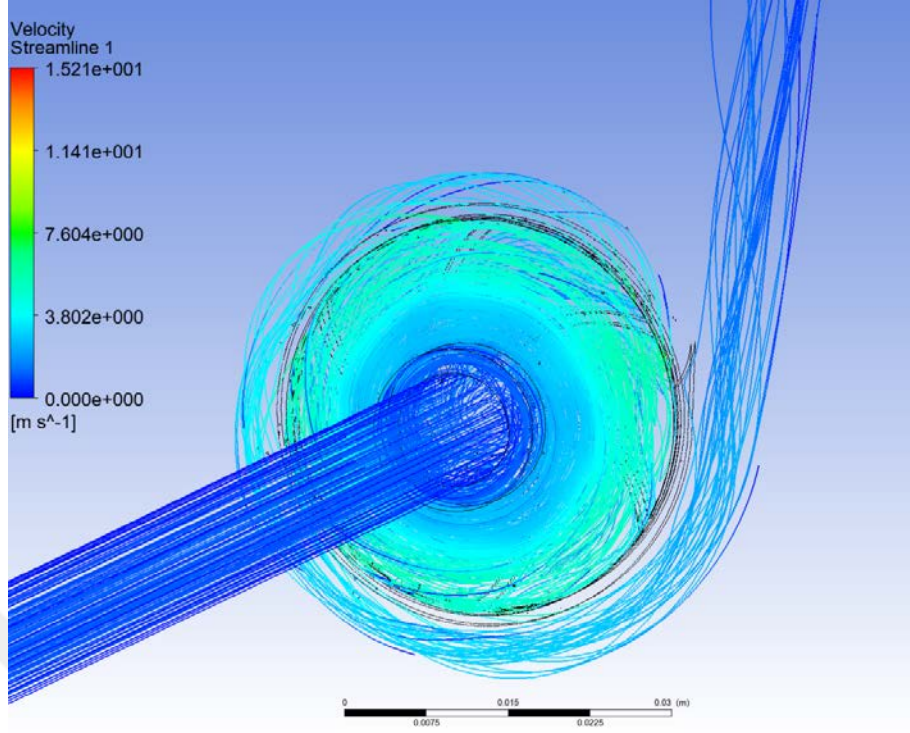
Şekil 4.8. Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğri kanat-3500 dev/dk-5 l/dk)



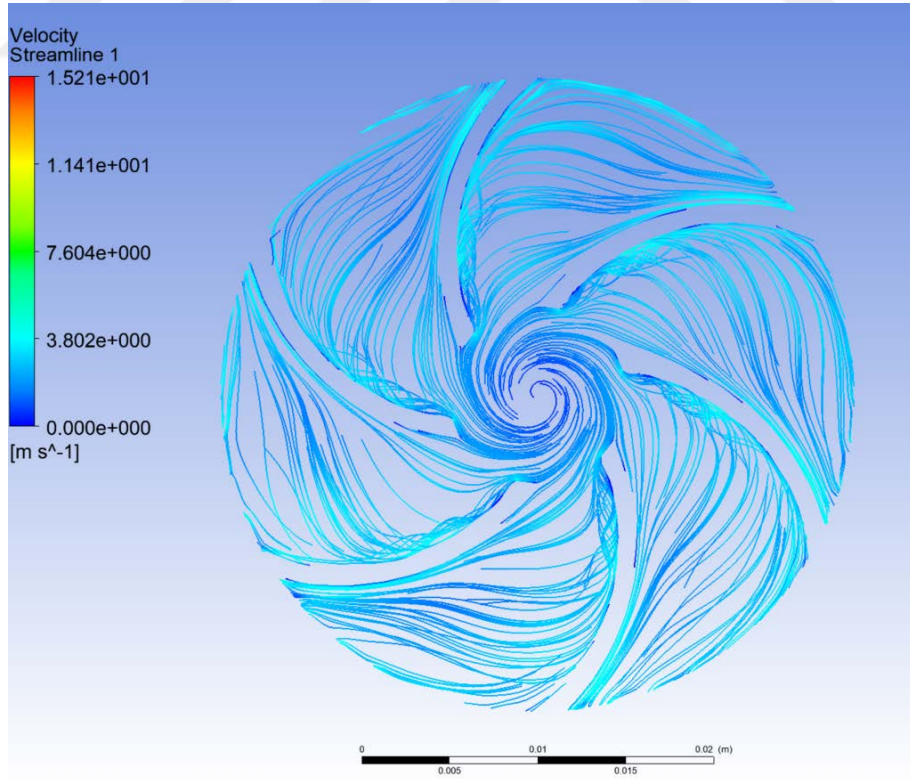
Şekil 4.9. Pompa montajı için akış çizgileri (Eğri kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)



Şekil 4.10. Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğri kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)

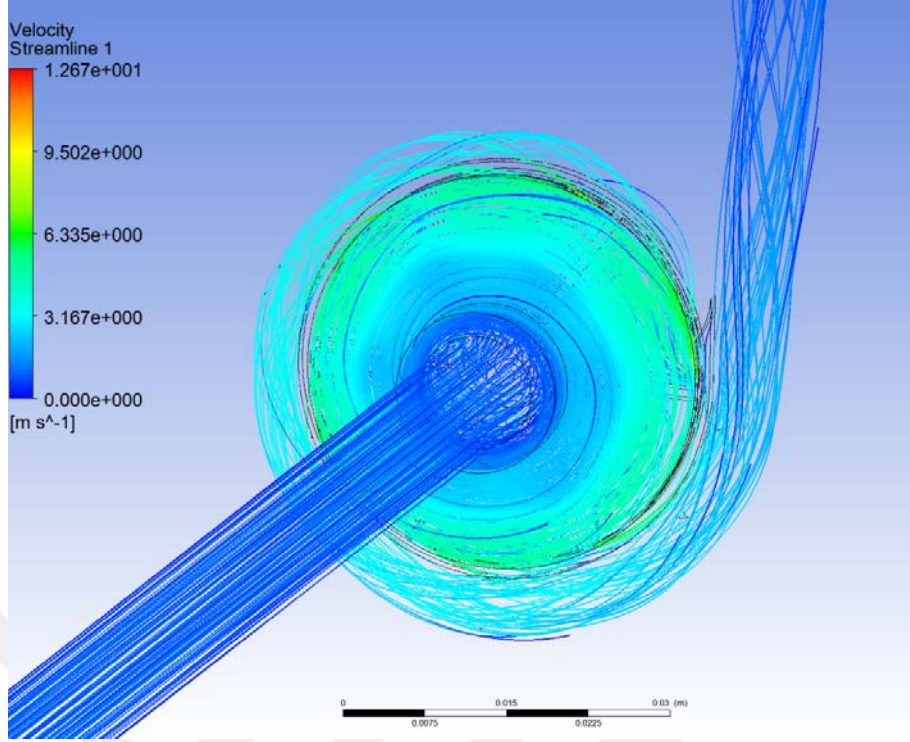


Şekil 4.11. Pompa montajı için akış çizgileri (Eğri kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)

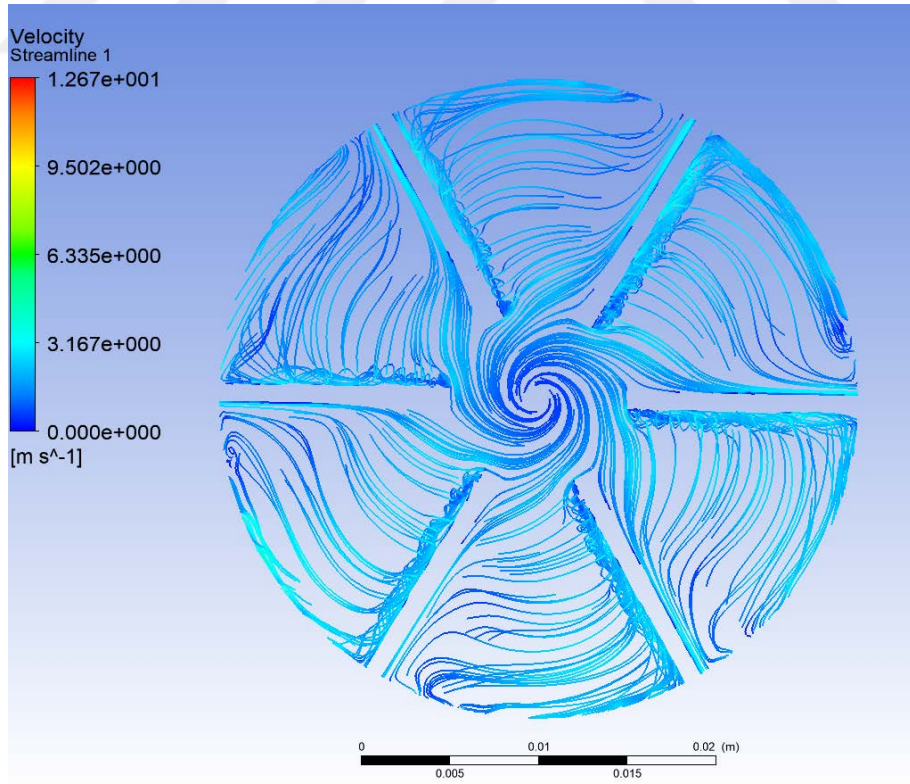


Şekil 4.12. Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğri kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)

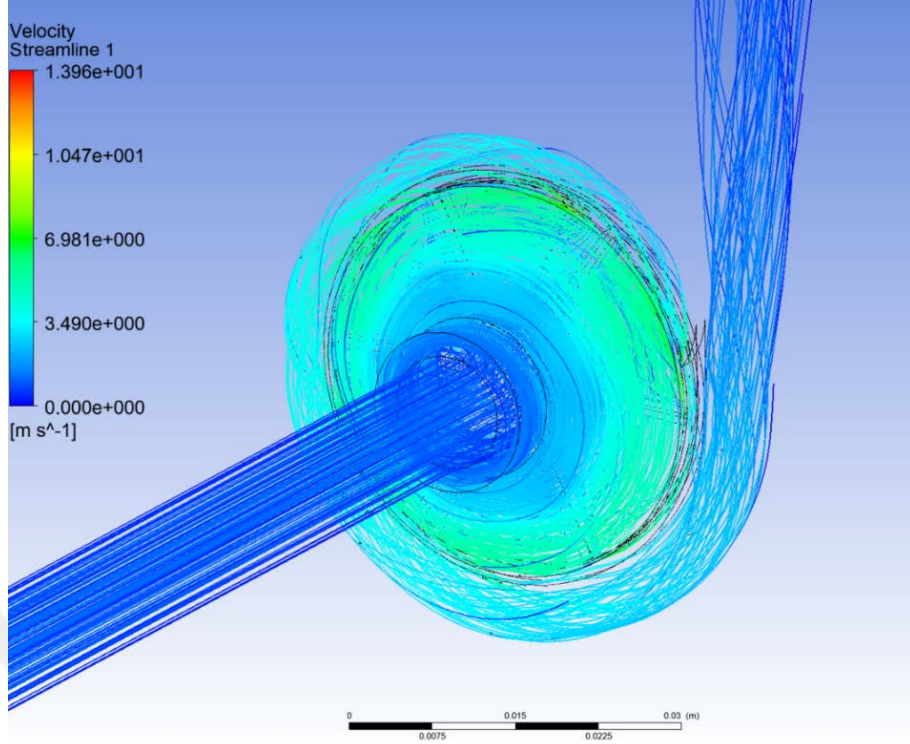




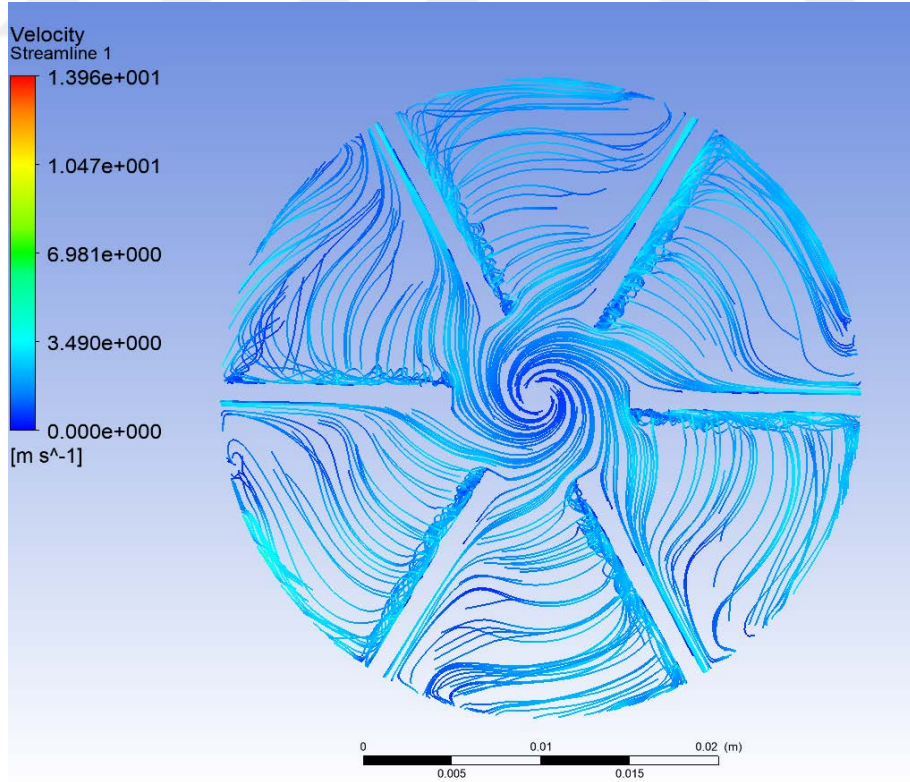
Şekil 4.13. Pompa montajı için akış çizgileri (Radyal kanat-3500 dev/dk-5 l/dk)



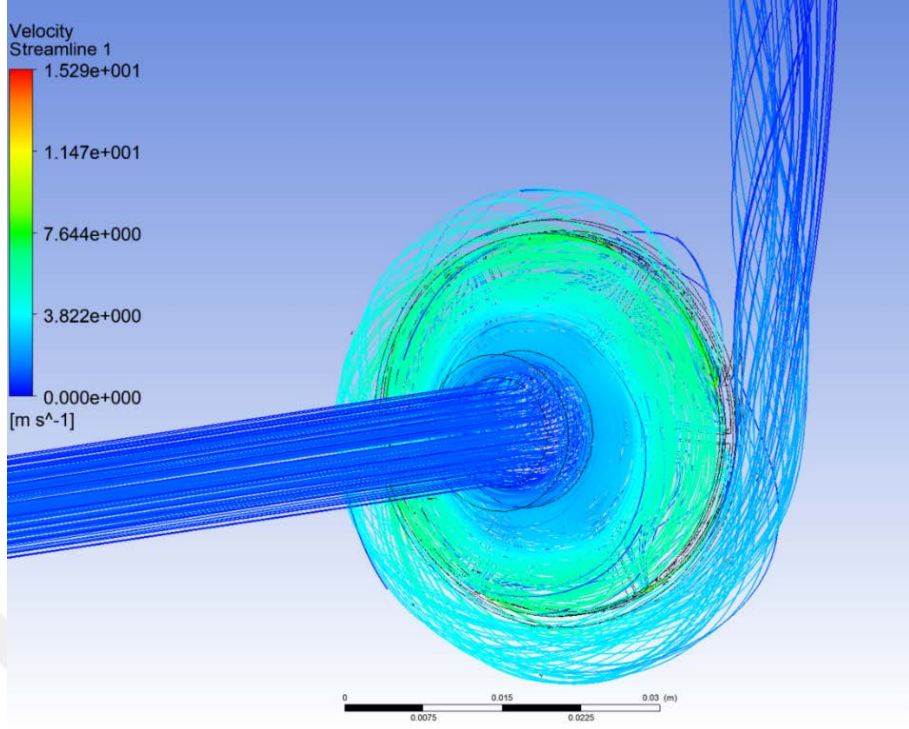
Şekil 4.14. Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğri kanat-3500 dev/dk-5 l/dk)



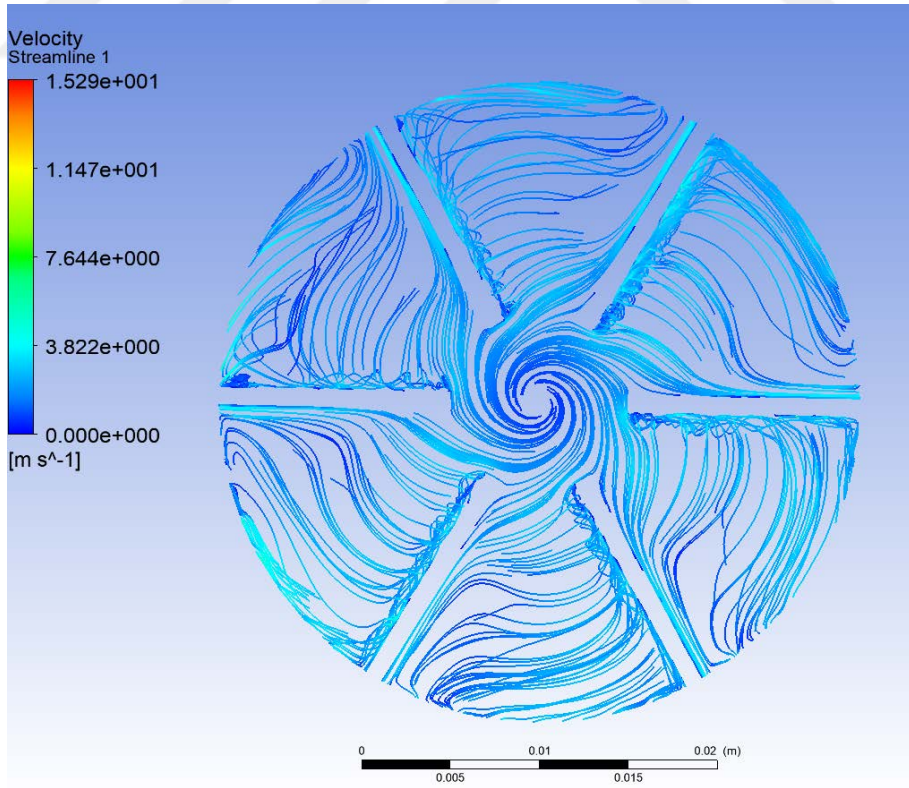
Şekil 4.15. Pompa montajı için akış çizgileri (Radyal kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)



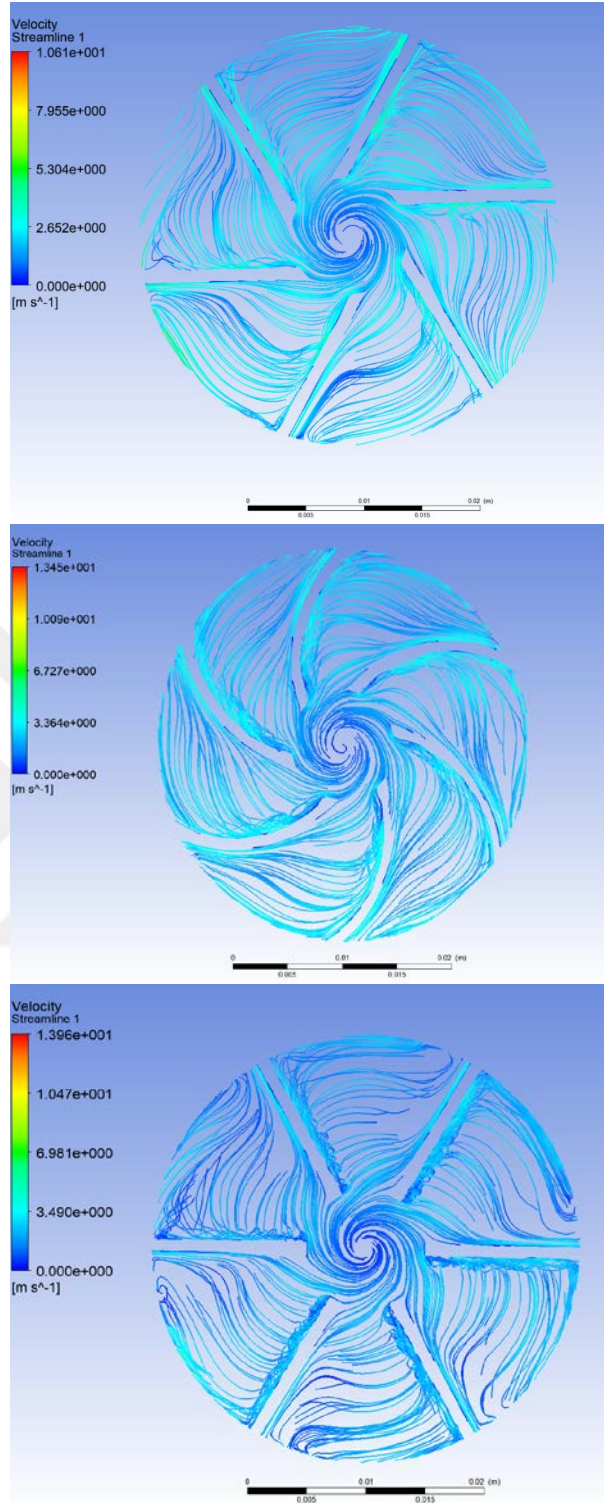
Şekil 4.16. Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğri kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)



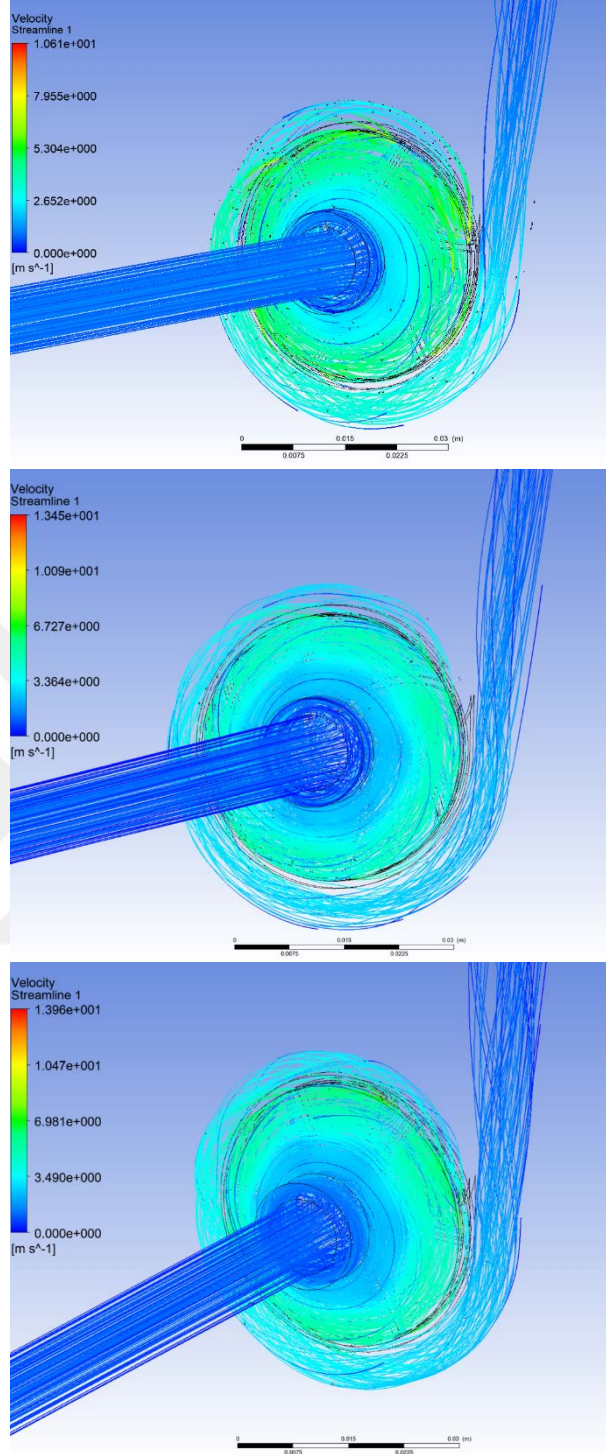
Şekil 4.17. Pompa montajı için akış çizgileri (Radyal kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)



Şekil 4.18. Çark akışkanı için akış çizgileri (Eğri kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)



Şekil 4.19. Tasarım debi ve dönme hızında çark akışkanlarının karşılaştırılması (sırasıyla eğik kanat, eğri kanat ve radyal kanat)

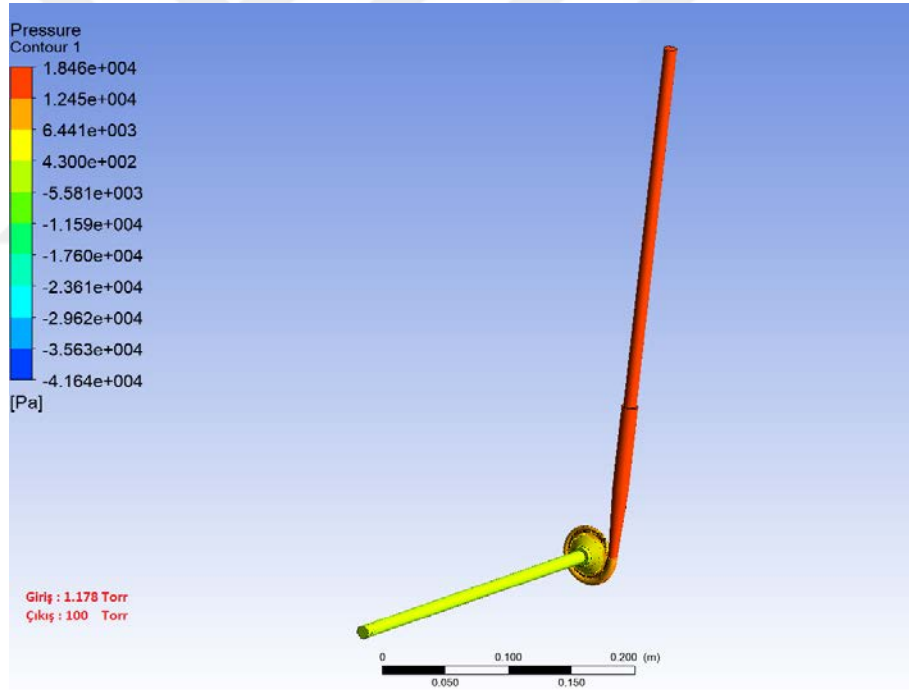


Şekil 4.20. Tasarım debi ve dönme hızında montaj içi akışkanlarının karşılaştırılması (sırasıyla eğik kanat, eğri kanat ve radyal kanat)

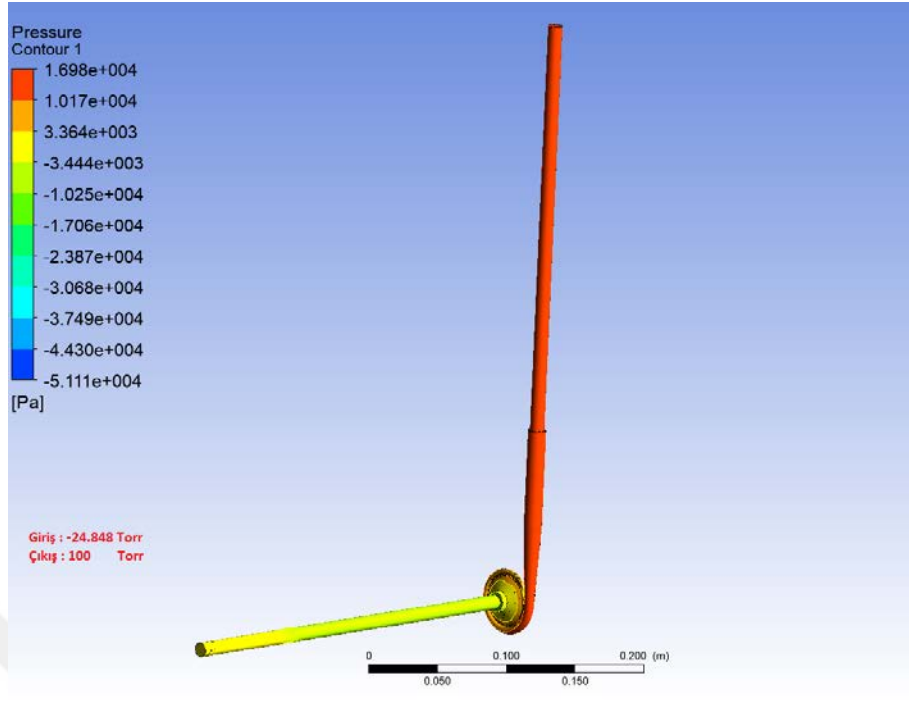
Elde edilen akış çizgilerine göre çarkın dönme hızı arttıkça çark kanatları kenar bölgelerinde ve salyangoz akışkan çıkış bölgesinde akış düzensizliğinin arttığı görülmüştür. Salyangoz çıkışında akışın en düzenli olduğu yer eğik kanat profilinde 3500

dev/dk dönme hızında olduğu belirlenmiştir. Kanat tiplerine göre aynı dönme hızlarında radyal ve eğri kanat tiplerinde akış hızının yaklaşık olarak aynı olduğu ve eğik kanat tipine göre akış hızının yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kanat tipi profilini en iyi takip eden akış çizgileri ise eğri kanat tipinde 3850 ve 4250 dev/dk dönme hızlarında olduğu tespit edilmiş ve çarklar göbeksiz olarak tasarlandığı için çark ortalarında düşük hızlarda girdapların olduğu da tespit edilmiştir.

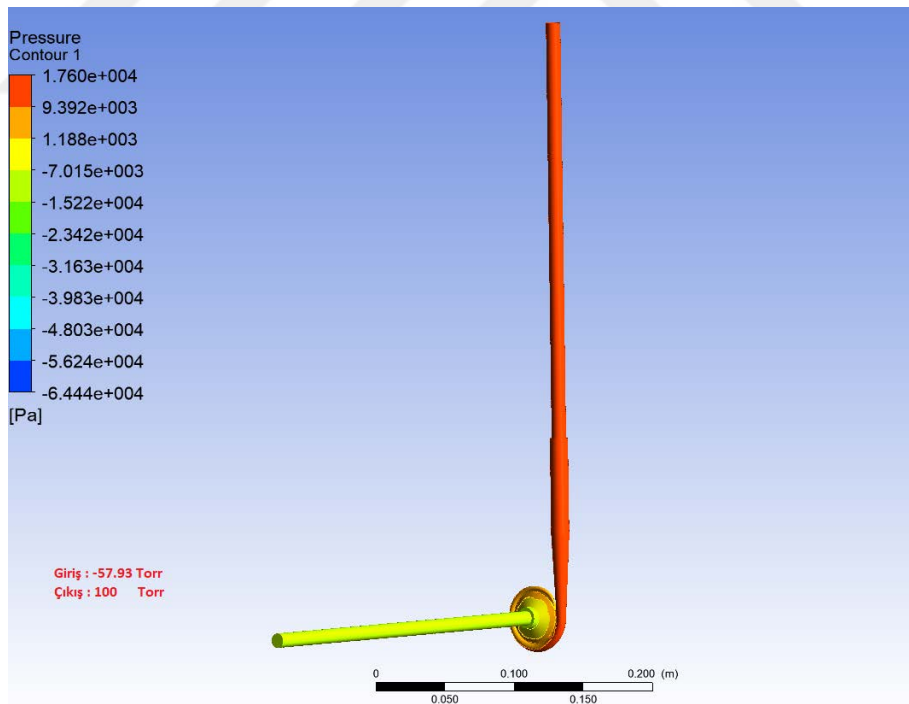
HAD analizi boyunca pompa iç akışında, akışkan giriş ve çıkış yerlerindeki toplam basınç farkı değerinin gözlenebilmesi için ve pompanın hidrolik performansı hakkında bilgi verebilmesi için basınç dağılımı görüntülenmiştir. Şekil 4.21-4.29 arasında 5 l/dk akışkan debisinde ve farklı dönme hızlarında her bir farklı kanat profili için basınç dağılımı görüntülenmiştir.



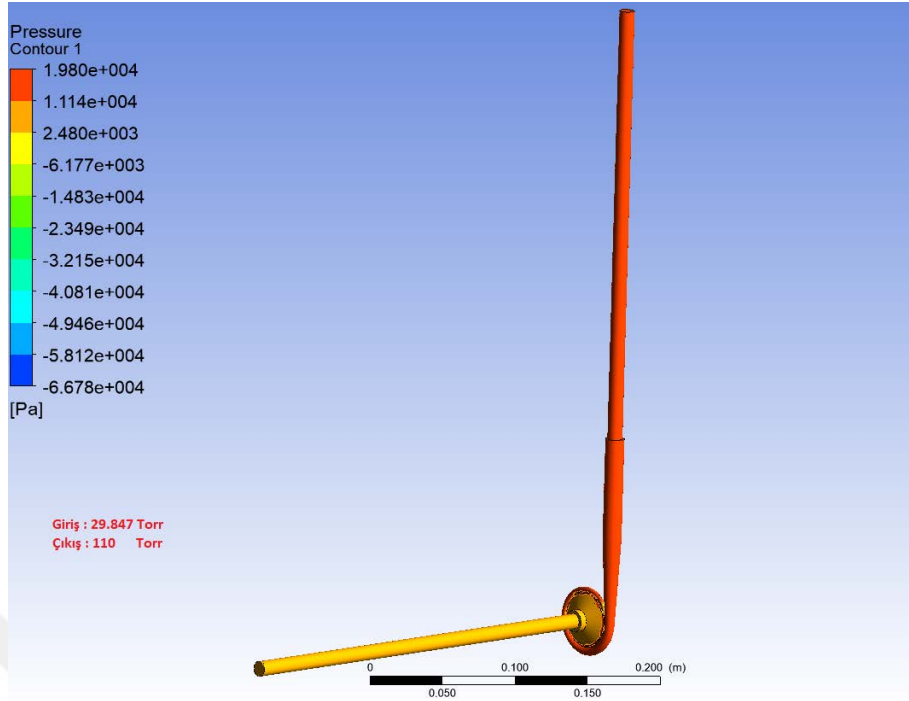
Şekil 4.21. Pompa montajı için basınç dağılımı (Eğik kanat-3500 dev/dk-5 l/dk)



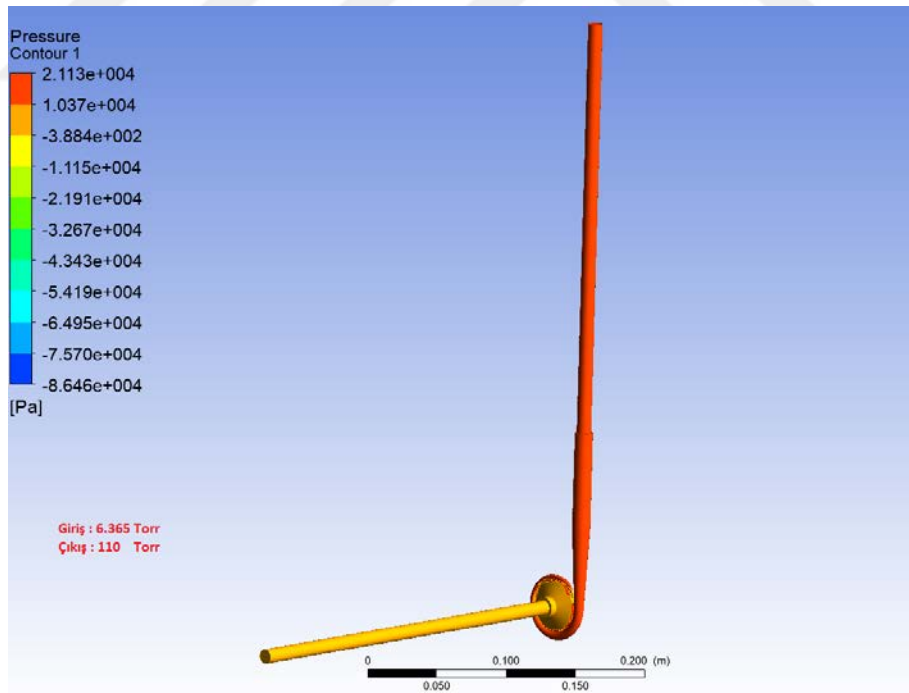
Şekil 4.22. Pompa montajı için basınç dağılımı (Eğik kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)



Şekil 4.23. Pompa montajı için basınç dağılımı (Eğik kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)

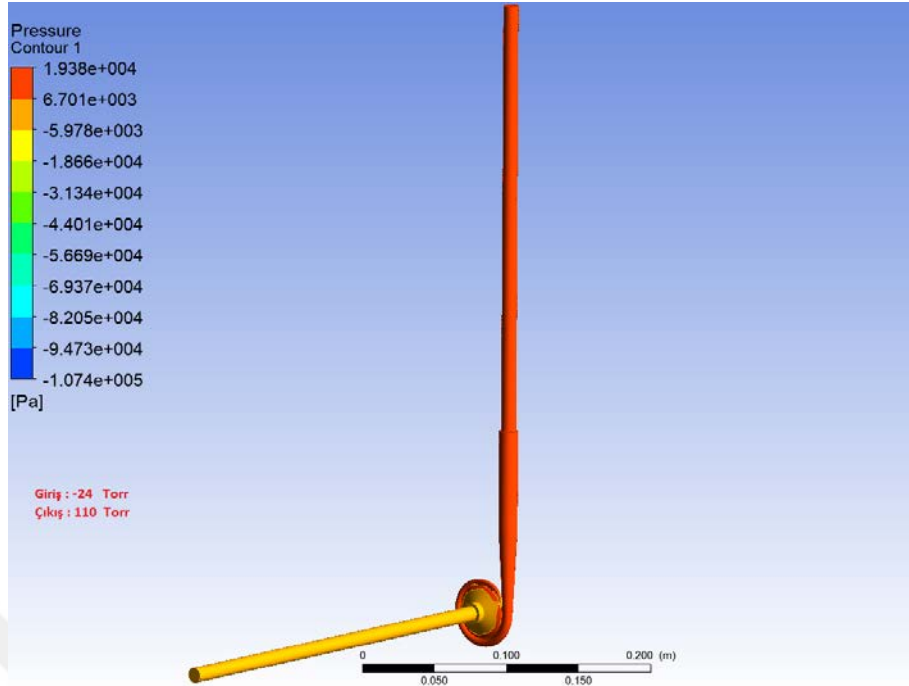


Şekil 4.24. Pompa montajı için basınç dağılımı (Eğri kanat-3500 dev/dk-5 l/dk)

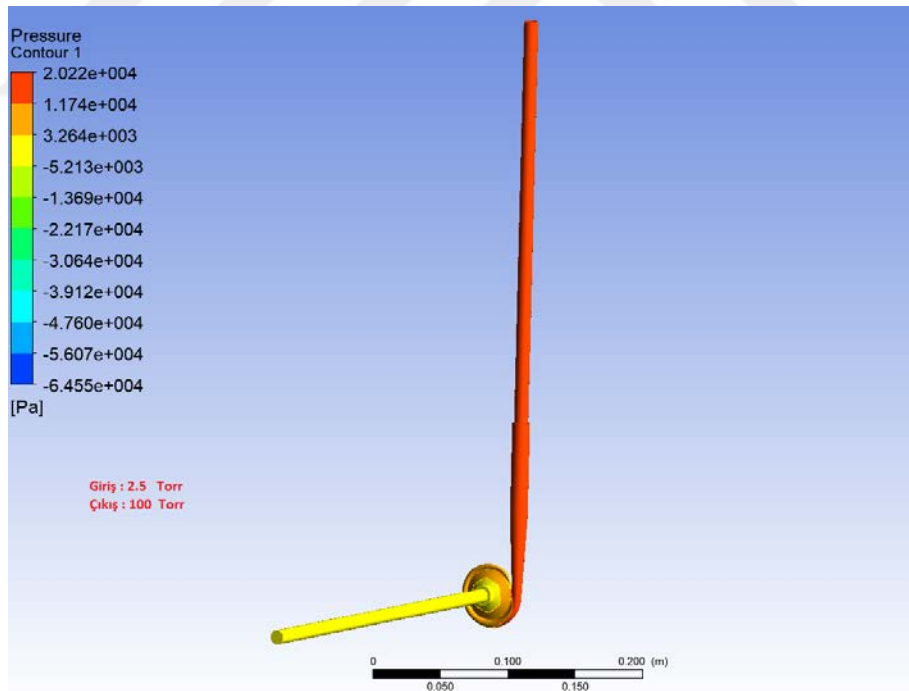


Şekil 4.25. Pompa montajı için basınç dağılımı (Eğri kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)

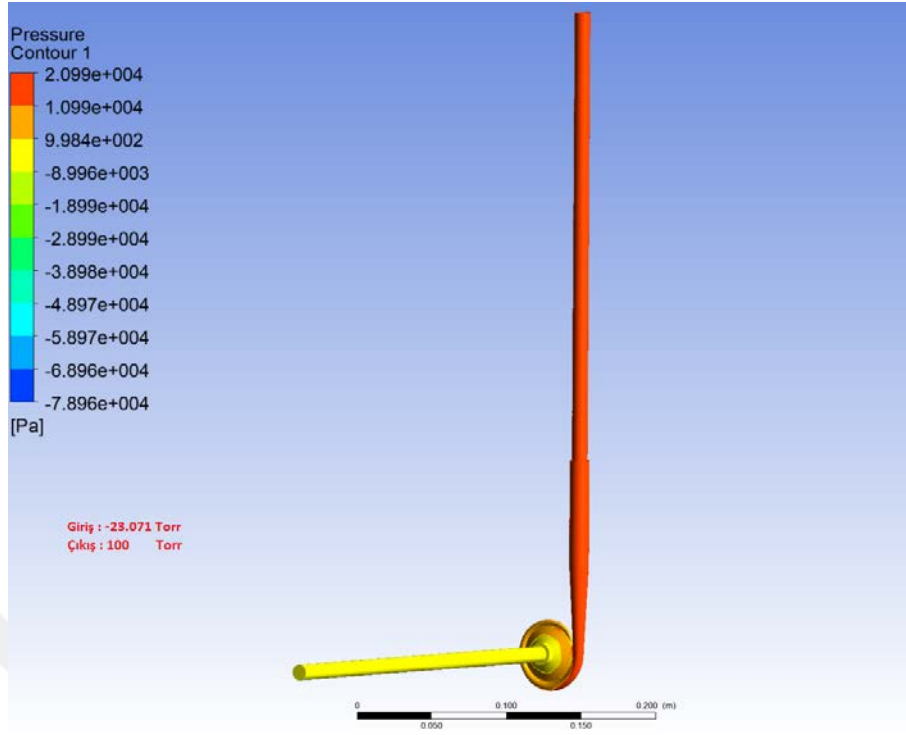




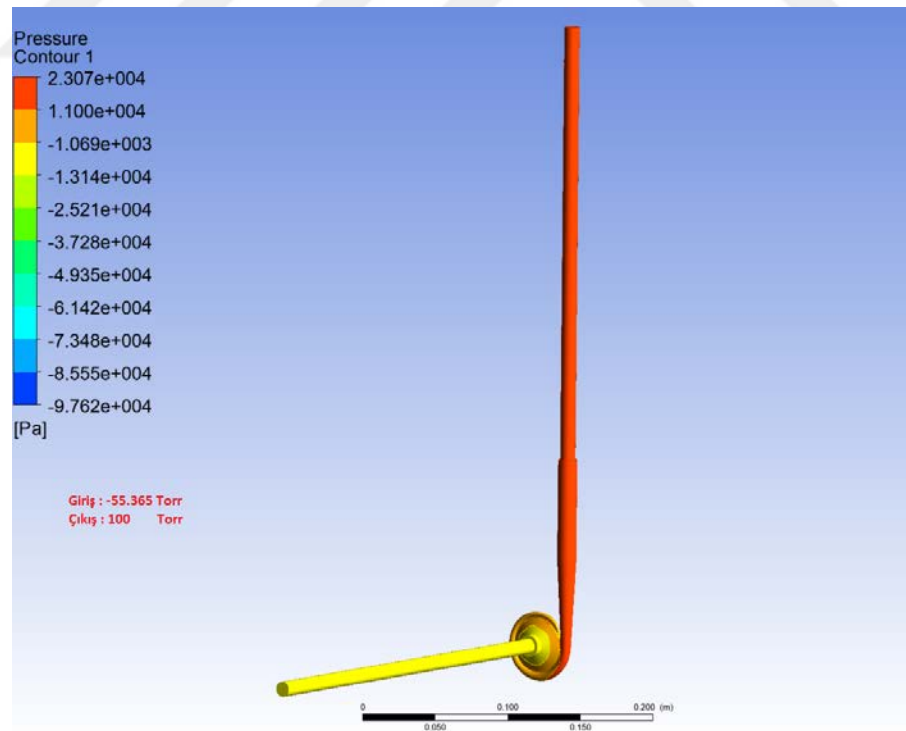
Şekil 4.26. Pompa montajı için basınç dağılımı (Eğri kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)



Şekil 4.27. Pompa montajı için basınç dağılımı (Radyal kanat-3500 dev/dk-5 l/dk)



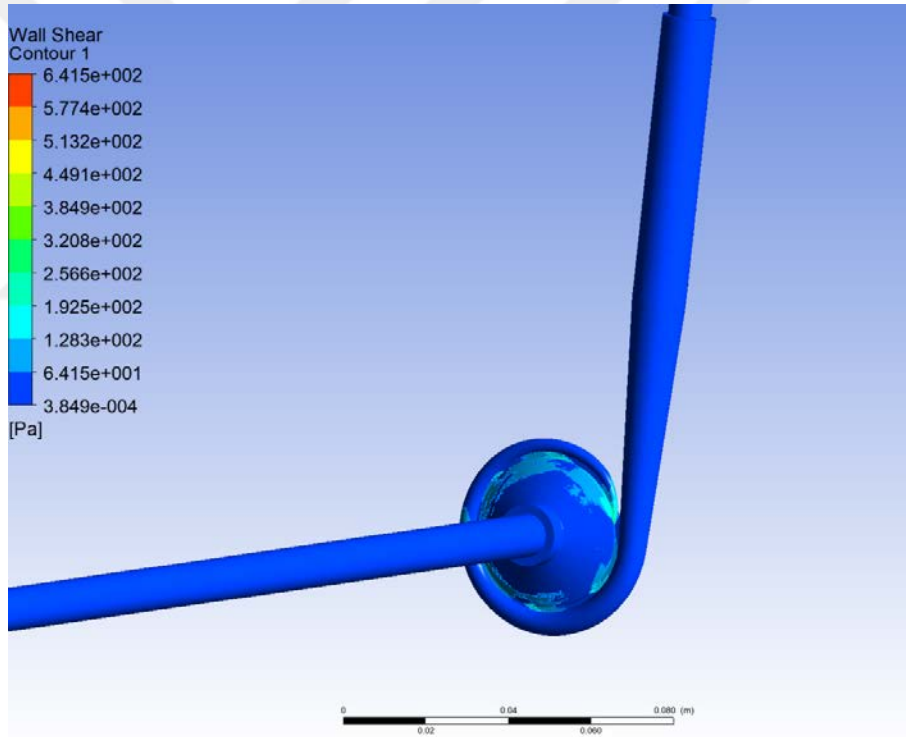
Şekil 4.28. Pompa montajı için basınç dağılımı (Radyal kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)



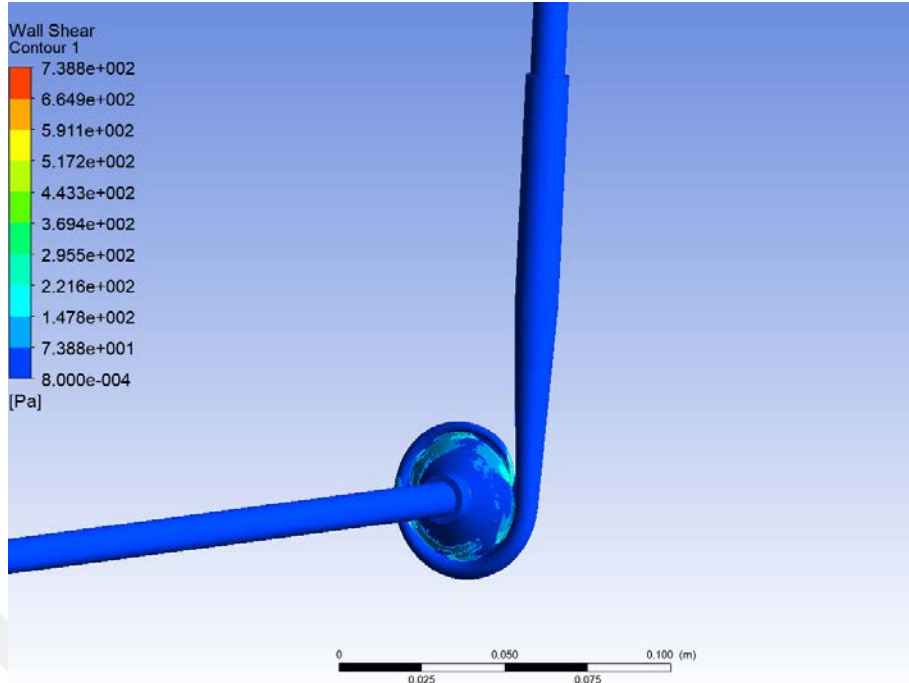
Şekil 4.29. Pompa montajı için basınç dağılımı (Radyal kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)

HAD analizinden elde edilen basınç dağılımı incelendiğinde, beklenildiği üzere en yüksek basınç farkı; tüm kanat tipleri için en yüksek dönme hızında meydana gelmiştir. Farklı kanat geometrileri arasında ise eğik kanat tipinde 4250 dev/dk dönme hızında yaklaşık 158 torr ile en yüksek basınç farkı elde edilmiştir. Tasarım debi ve dönme hızında en yüksek basınç farklı ise yine eğik kanat geometrisine sahip çarkta elde edilmiştir.

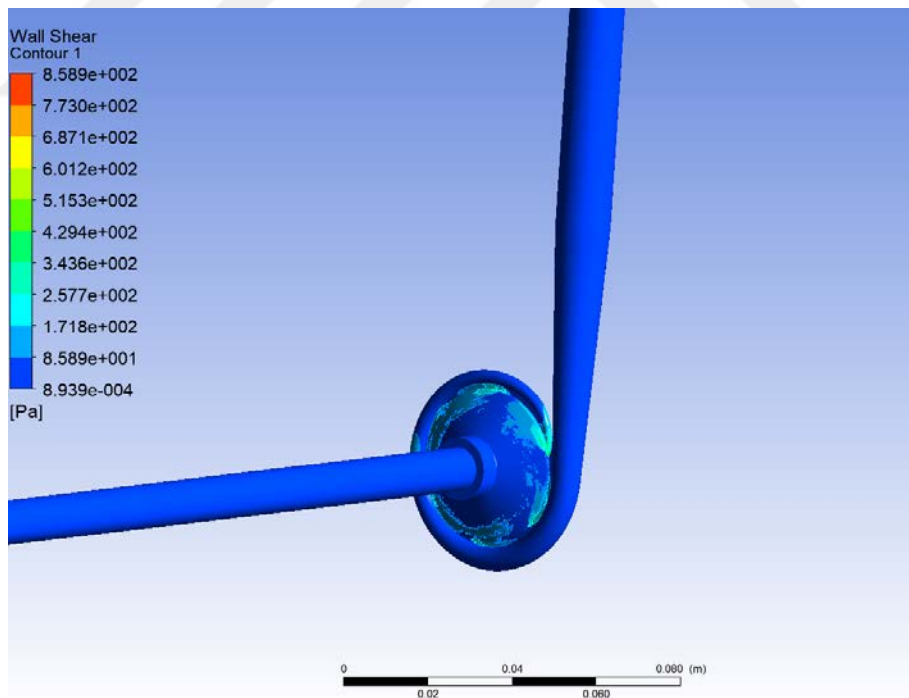
Ayrıca kalp destek pompaları tasarlanırken dikkat edilecek en önemli hususlardan birisi de kan hasarıdır. Patel et al. (2005), çalışmalarında kan hasarı (hemoliz) için kabul edilebilir minimum kayma gerilmesi değerinin 300 Pa olduğunu belirtmişlerdir. Hemoliz hakkında ön bilgi edinmek amacıyla 5 l/dk akışkan debisinde ve farklı dönme hızlarında her bir kanat profili için kayma gerilmeleri görüntülenmiştir (Şekil 4.30-Şekil 4.39).



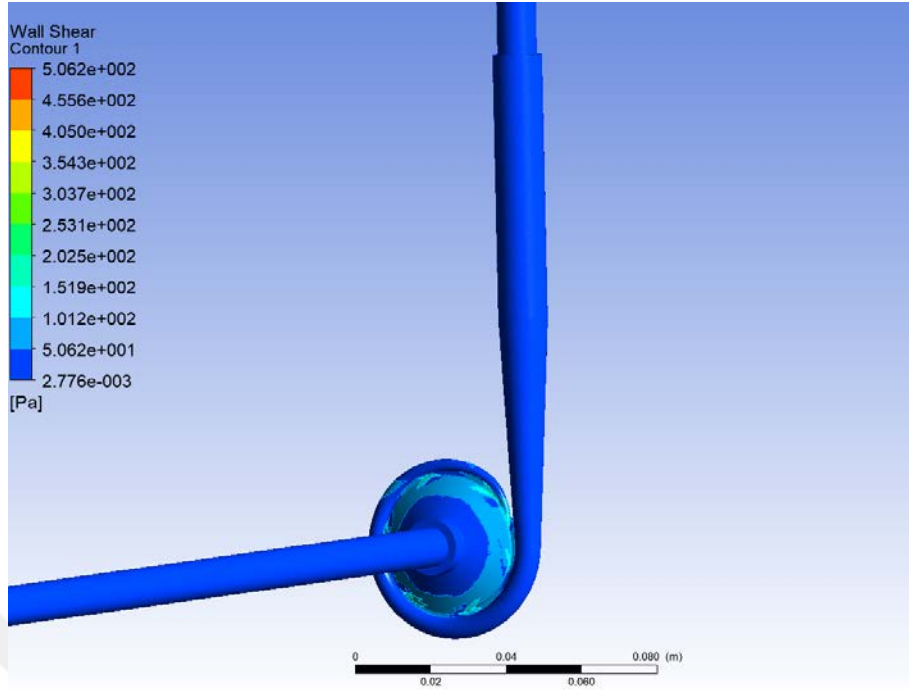
Şekil 4.30. Kayma gerilmesi dağılımı (Eğik kanat-3500 dev/dk-5 l/dk)



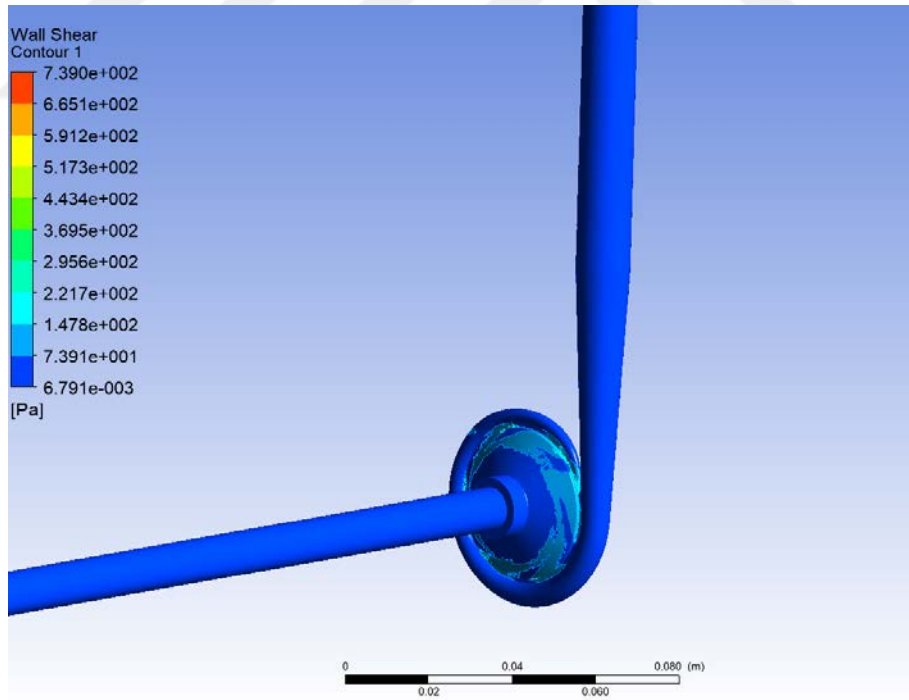
Şekil 4.31. Kayma gerilmesi dağılımı (Eğik kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)



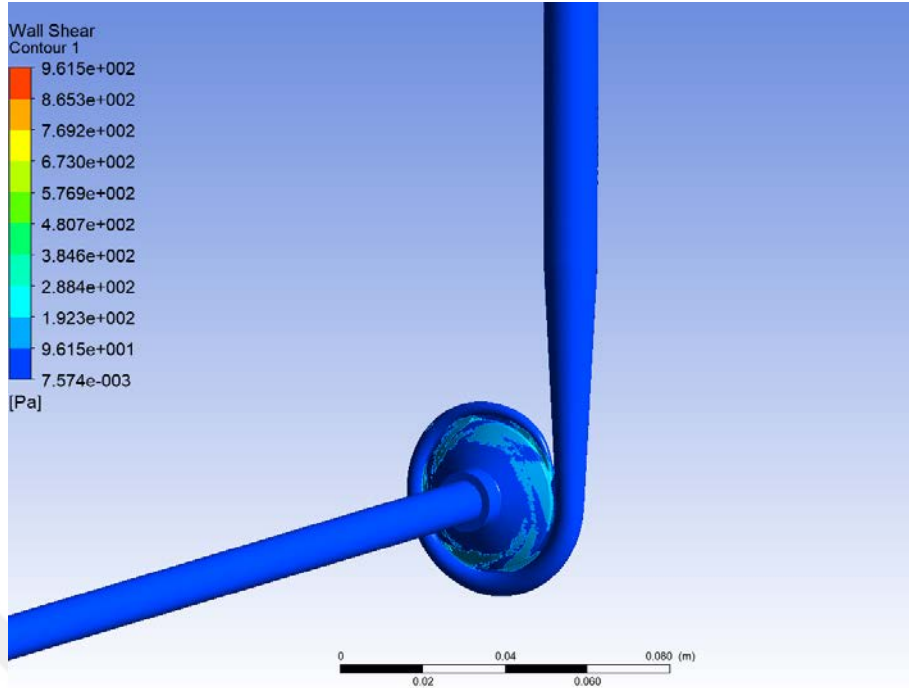
Şekil 4.32. Kayma gerilmesi dağılımı (Eğik kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)



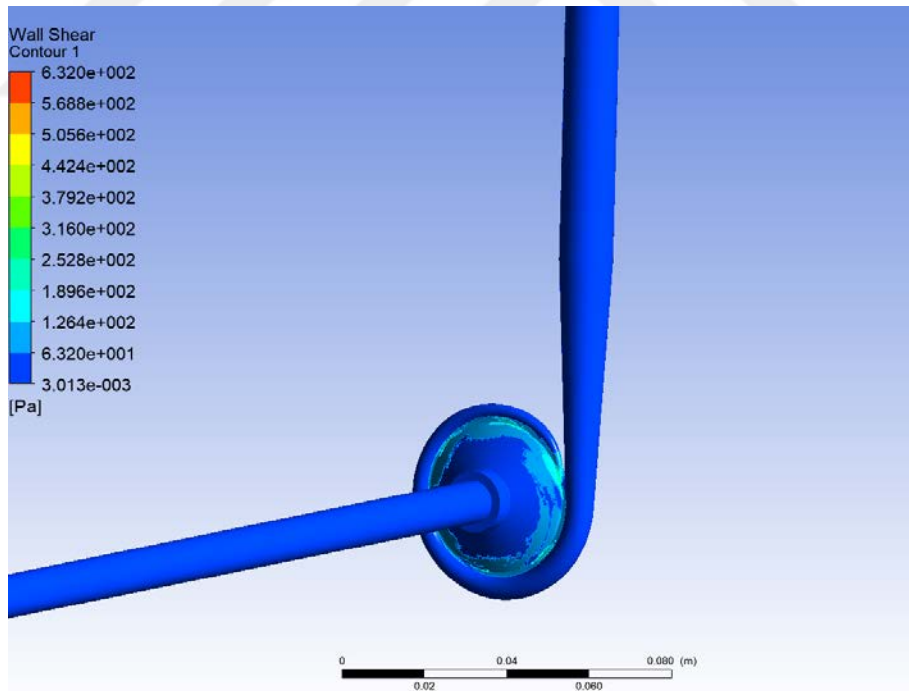
Şekil 4.33. Kayma gerilmesi dağılımı (Eğri kanat-3500 dev/dk-5 l/dk)



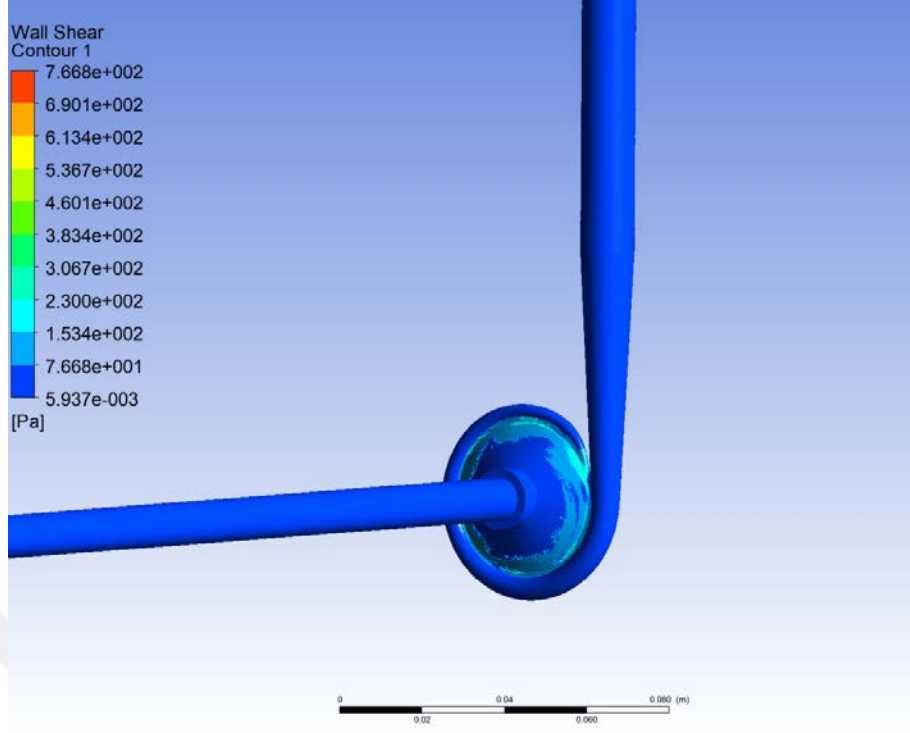
Şekil 4.34. Kayma gerilmesi dağılımı (Eğri kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)



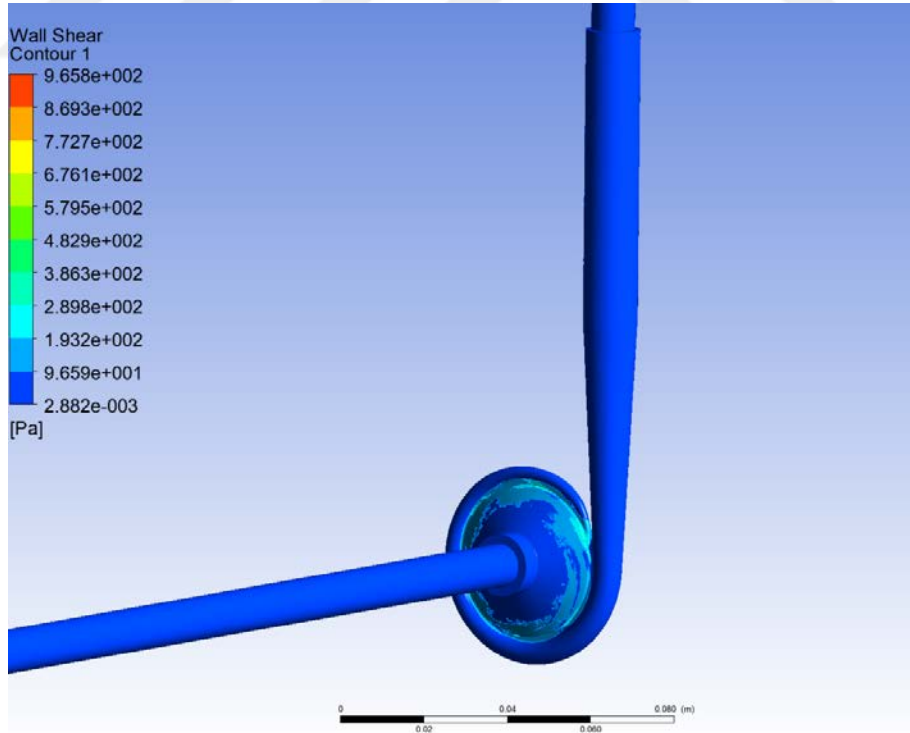
Şekil 4.35. Kayma gerilmesi dağılımı (Eğri kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)



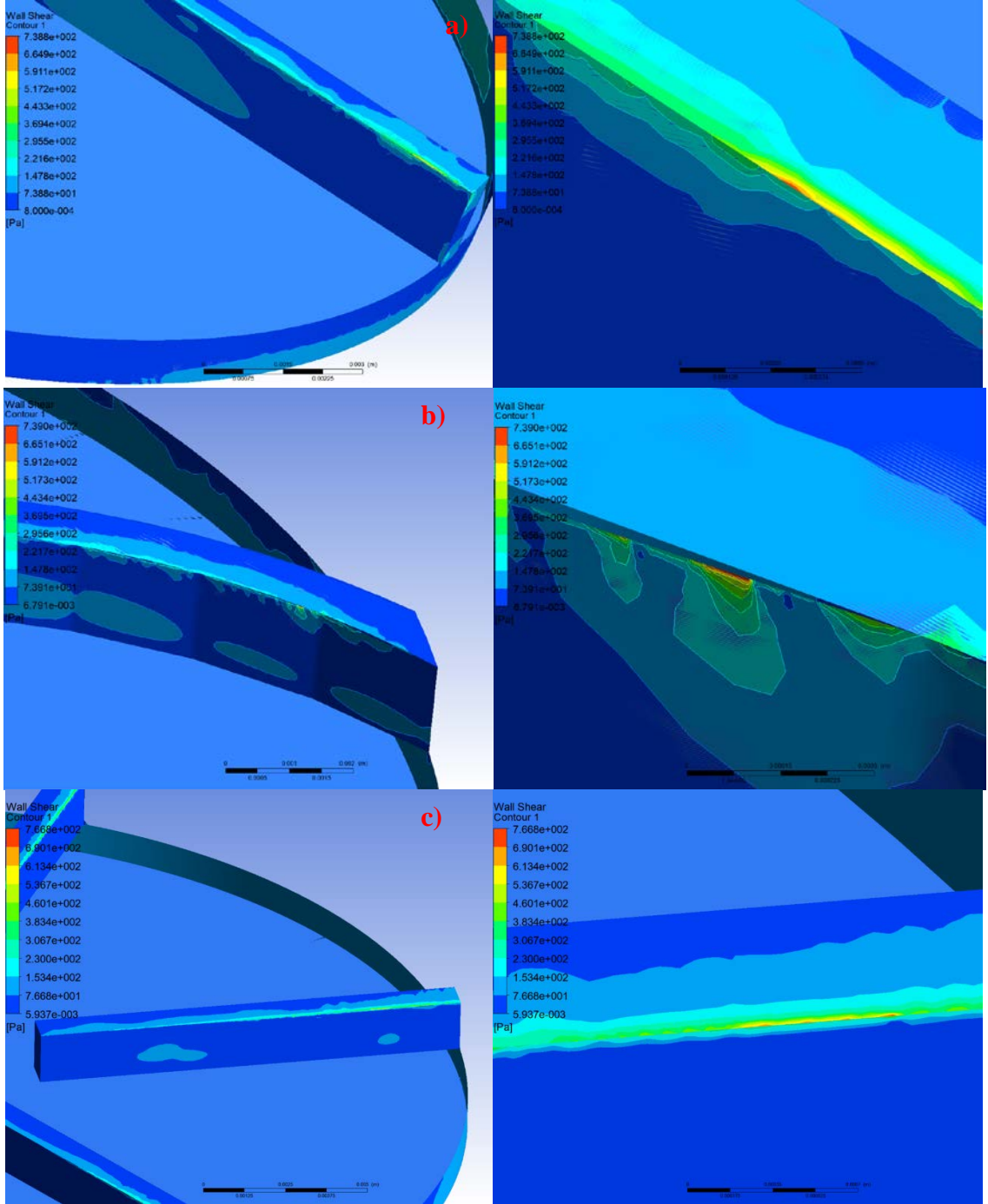
Şekil 4.36. Kayma gerilmesi dağılımı (Radyal kanat-3500 dev/dk-5 l/dk)



Şekil 4.37. Kayma gerilmesi dağılımı (Radyal kanat-3850 dev/dk-5 l/dk)



Şekil 4.38. Kayma gerilmesi dağılımı (Radyal kanat-4250 dev/dk-5 l/dk)



Şekil 4.39. Tasarım noktalarında maksimum kayma gerilmesinin bulunduğu yerlerin dağılımı a) eğik kanat b) eğri kanat c) radyal kanat

Elde edilen sonuçlara göre santrifüj kalp destek pompası tasarımı için belirlenen minimum kayma gerilmesinin oldukça üzerinde gözükmesine rağmen, yüksek kayma gerilmesi değeri çok küçük bir alanda bulunduğu şekil 4.39'dan anlaşılabilir. Fakat tasarım noktasında kayma gerilmesi değeri bütün pompa için değerlendirilecek olursa bu değer

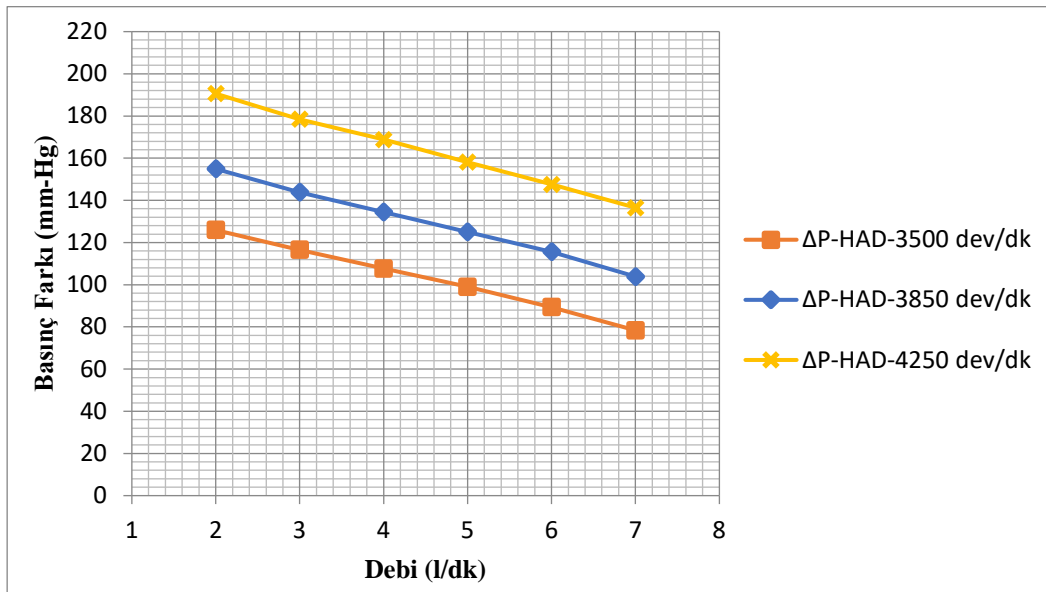


200 Pa geçmediği görülecektir. Verilen şekiller pompa montajı için incelendiğinde dönme hızı arttıkça kayma gerilmesinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca salyangoz içinde de salyangoz dili bölgesinde kayma gerilmesinin yüksek olduğu görülmüştür. Farklı kanat geometrilerine sahip çarklar, tasarım debisi ve dönme hızında incelendiğinde; en yüksek kayma gerilmesi, 766,8 Pa değeri ile radyal kanat geometrili çarkta gözlemlenirken yaklaşık 739 Pa değeri ile eğik kanat ve eğri kanat geometrili çarkta gözlemlenmiştir.

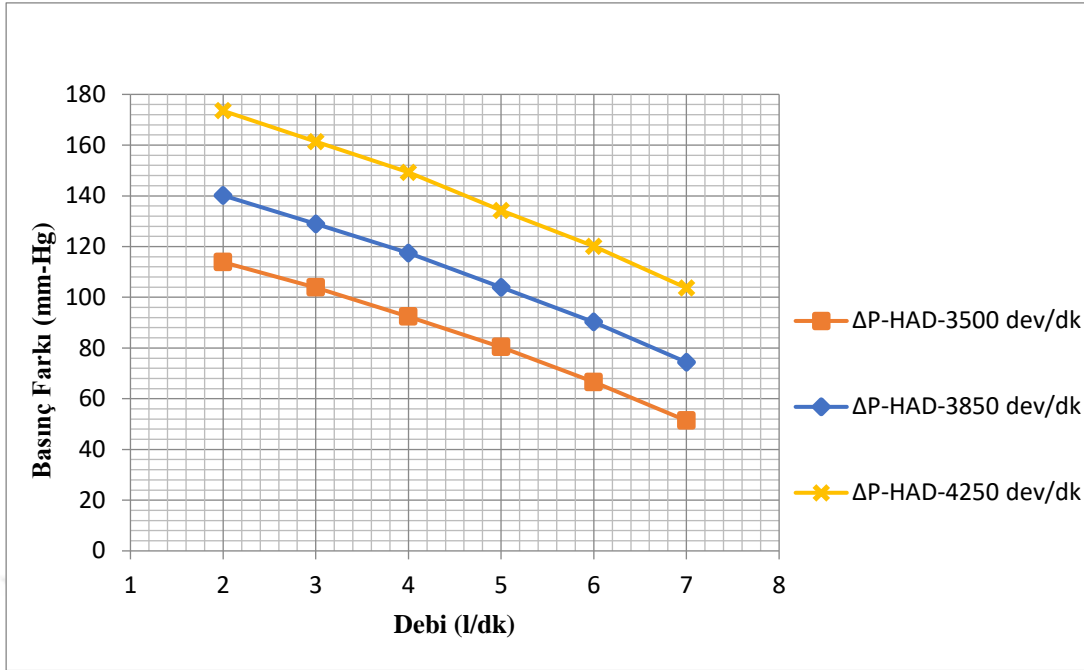
İncebay (2017) yaptığı bir çalışmada santrifüj kalp destek pompası prototipi için, üç boyutlu eğri kanat geometrisine sahip örtülü bir çark tasarlayıp akışkanın su olduğu HAD analizlerini gerçekleştirmiştir. 3000 dev/dk dönme hızı ve 5 l/dk tasarım değerleri için analizlerden elde ettiği kayma gerilmesi maksimum 664,7 Pa olmuştur.

#### 4.1.2. Pompa Hidrolik Performans Analizinin İncelenmesi

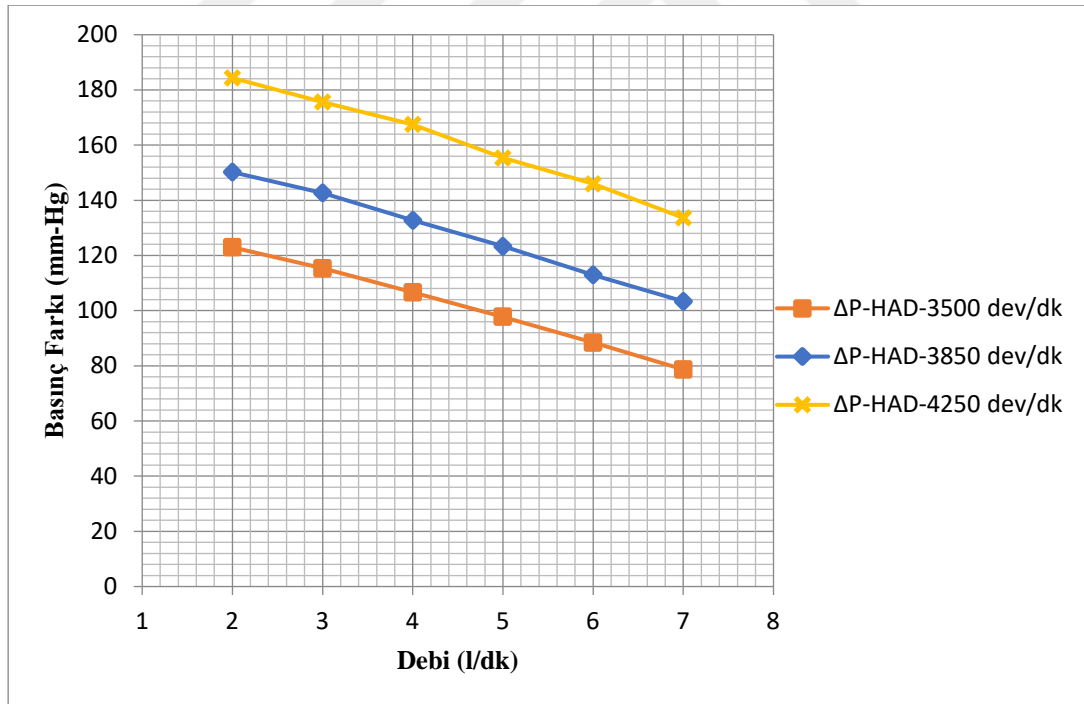
Farklı geometrili çarklara sahip pompaların HAD analizleriyle birlikte giriş-çıkış sınır bölgesindeki basınçlar ve tork değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerlerle birlikte materyal ve metot bölümündeki (3.3)-(3.7) arasında bulunan formüller kullanılarak; toplam basınç farkı, pompa çark gücü, akışkan gücü ve hidrolik verim hesaplanmıştır. Bu veriler kullanılarak toplam basınç farkı-debi ve hidrolik verim-debi grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.40-Şekil 4.47).



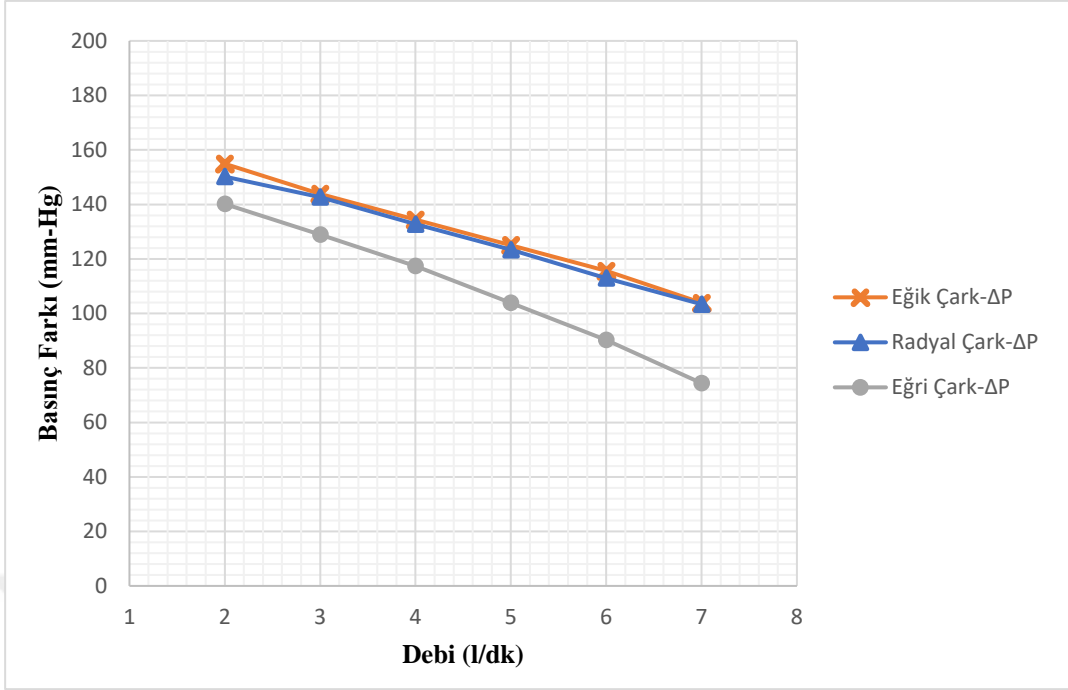
Şekil 4.40. Eğik kanat profil çarka sahip pompa için basınç farkı-debi grafiği



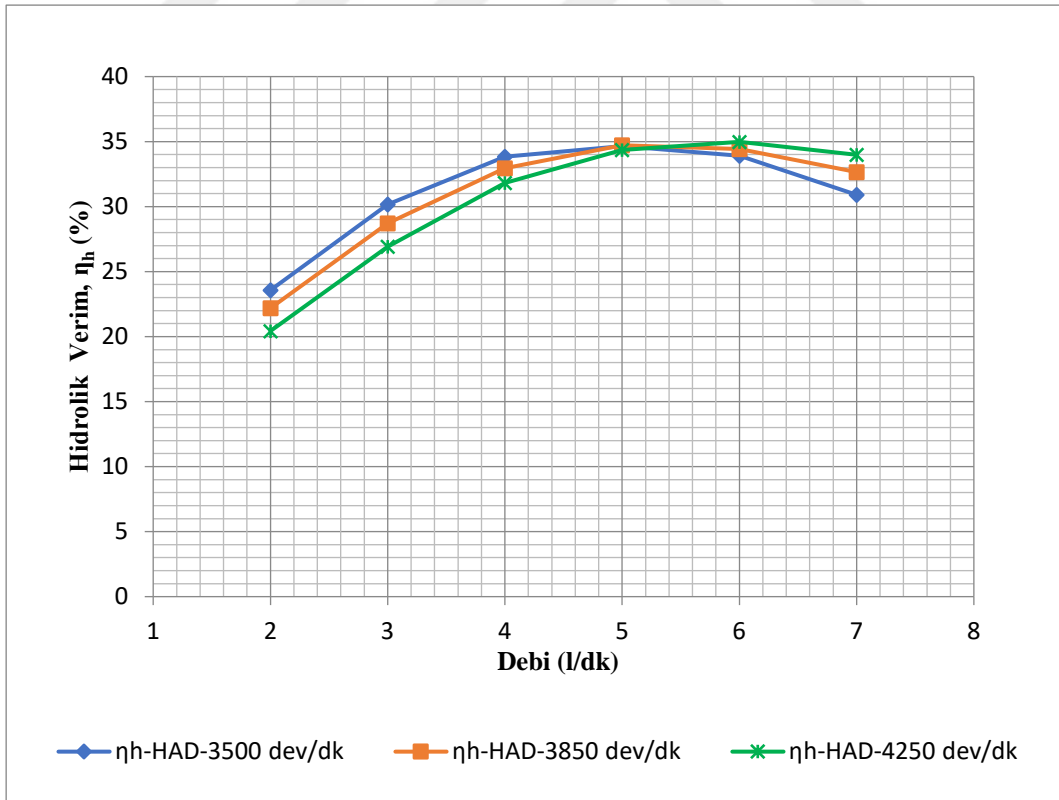
Şekil 4.41. Eğri kanat profilli çarka sahip pompa için basınç farkı-debi grafiği



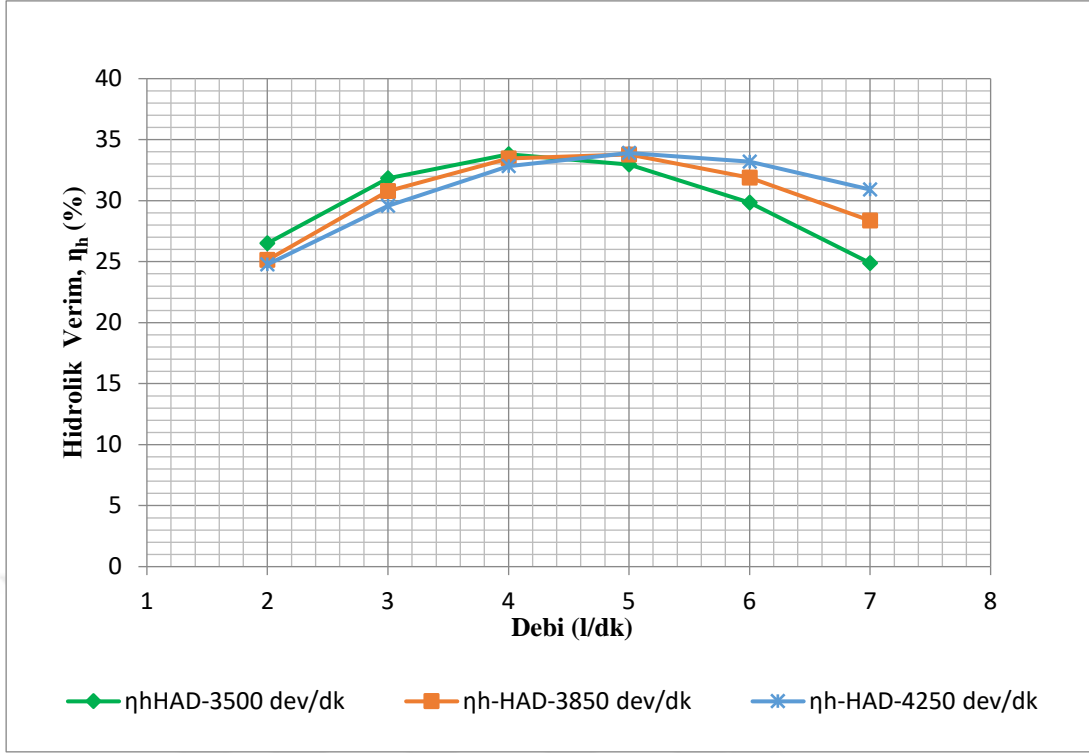
Şekil 4.42. Radyal kanat profilli çarka sahip pompa için basınç farkı-debi grafiği



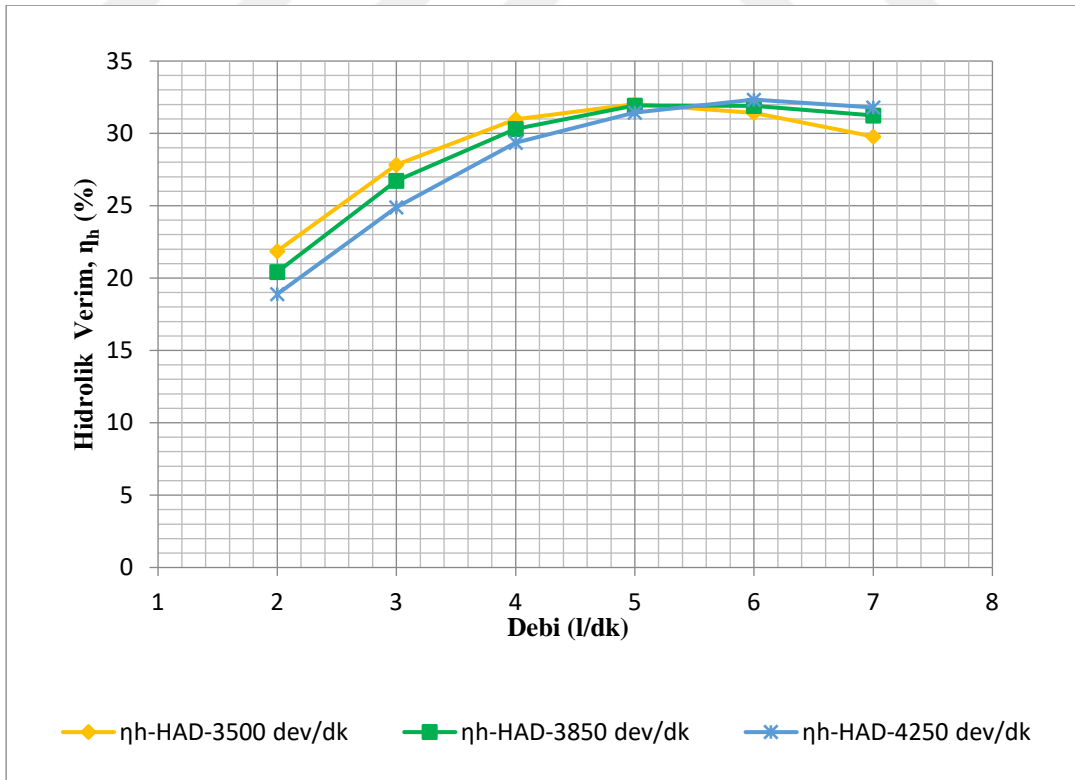
Şekil 4.43. 3850 dev/dk dönme hızında farklı çarklara sahip pompa basınç farklarının karşılaştırılması



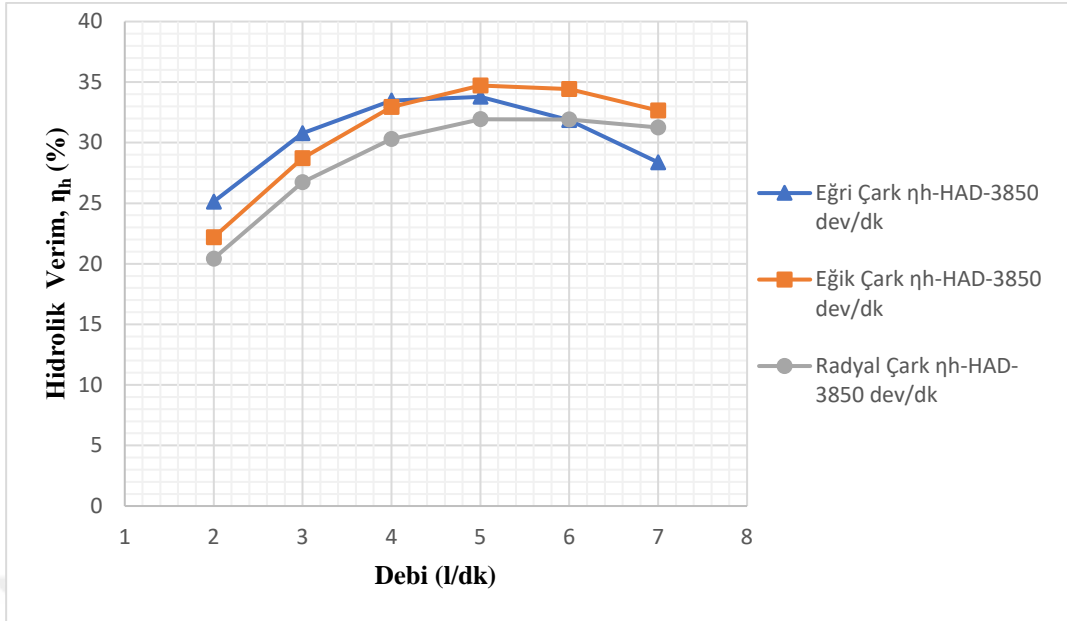
Şekil 4.44. Eğik kanat profilili çarka sahip pompa için hidrolik verim-debi grafiği



Şekil 4.45. Eğri kanat profilili çarka sahip pompa için hidrolik verim-debi grafiği



Şekil 4.46. Radyal kanat profilili çarka sahip pompa için hidrolik verim-debi grafiği



Şekil 4.47. 3850 dev/dk dönme hızında farklı çarklara sahip pompa hidrolik veriminin karşılaştırılması

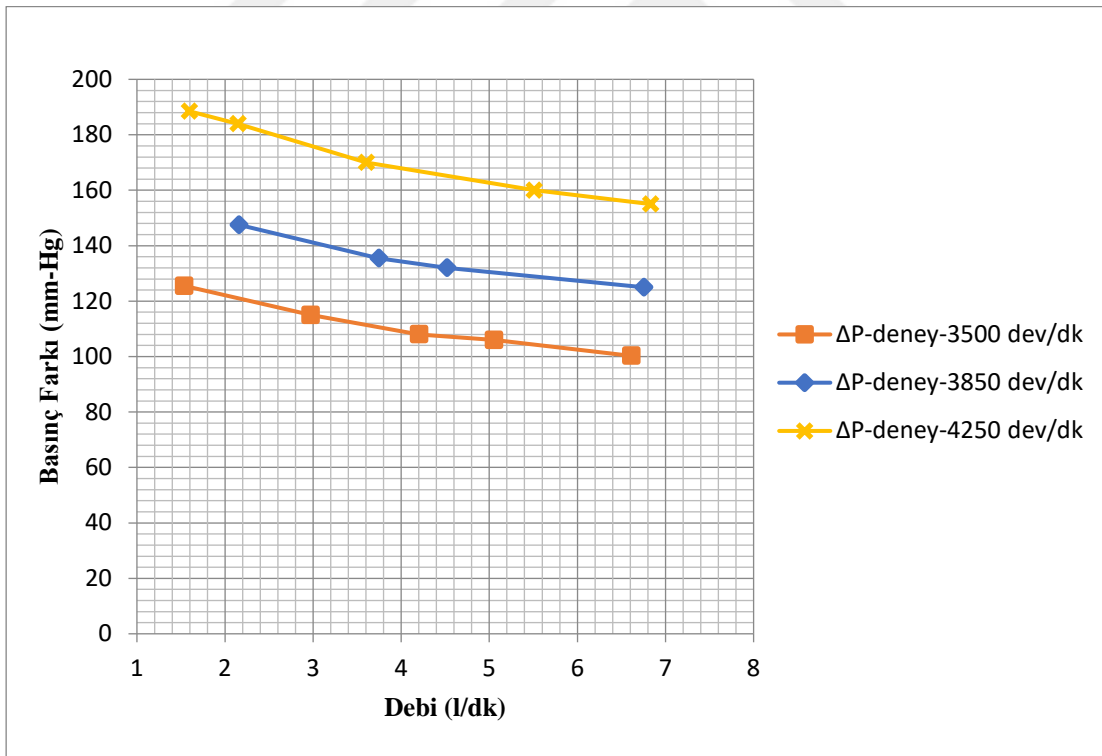
Verilen grafikler incelendiğinde basınç farkı – debi grafikleri incelendiğinde beklenildiği üzere çarkın dönme hızı arttıkça basınç farkının arttığı ve ayrıca debi arttıkça da basınç farkının azaldığı görülmüştür. Tasarım parametreleri için üç farklı çark tipinin karşılaştırıldığı grafik incelendiğinde ise radyal çarka sahip pompanın eğik çarka sahip pompaya göre basınç farkı maksimum %3 daha fazla olduğu görülmüştür. Eğri çarka sahip pompa da ise diğer pompalara göre daha az basınç farkı elde edilmiştir. 5 l/dk ve 3850 dev/dk tasarım noktası ise yaklaşık 100 mm-Hg basınç değeri ile eğri kanat profiline sahip çark ile yakalanmıştır. Radyal ve eğik kanat profilli çarklarda ise bu değer, yaklaşık 120 mm-Hg olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle radyal ve eğik kanat profilli çarklarda tasarım devrinden daha düşük bir devirle 5 l/dk debide yaklaşık 100 mm-Hg değerine ulaşılabileceği kanısına varılmıştır.

HAD analizinden elde edilen verilerle hesaplanan pompa hidrolik verimi-debi grafiğine bakıldığında, hidrolik veriminin, 3500-3850-4250 dev/dk devirleri arasında dönme hızıyla birlikte önemli bir derecede değişmediği gözlemlenmiştir. İncebay (2017), yaptığı çalışmada bu duruma benzer bir durum olarak 3000-3300-3500 dev/dk dönme hızlarında hidrolik verimde kayda değer bir değişme olmadığını göstermiştir. Tasarım debisi için farklı çark geometrileri incelendiğinde zaman, eğik kanat profilli çarka ait hidrolik verim ile eğri kanat profilli çarka ait hidrolik verimin benzerlik gösterdiği ve %32-35 aralığında

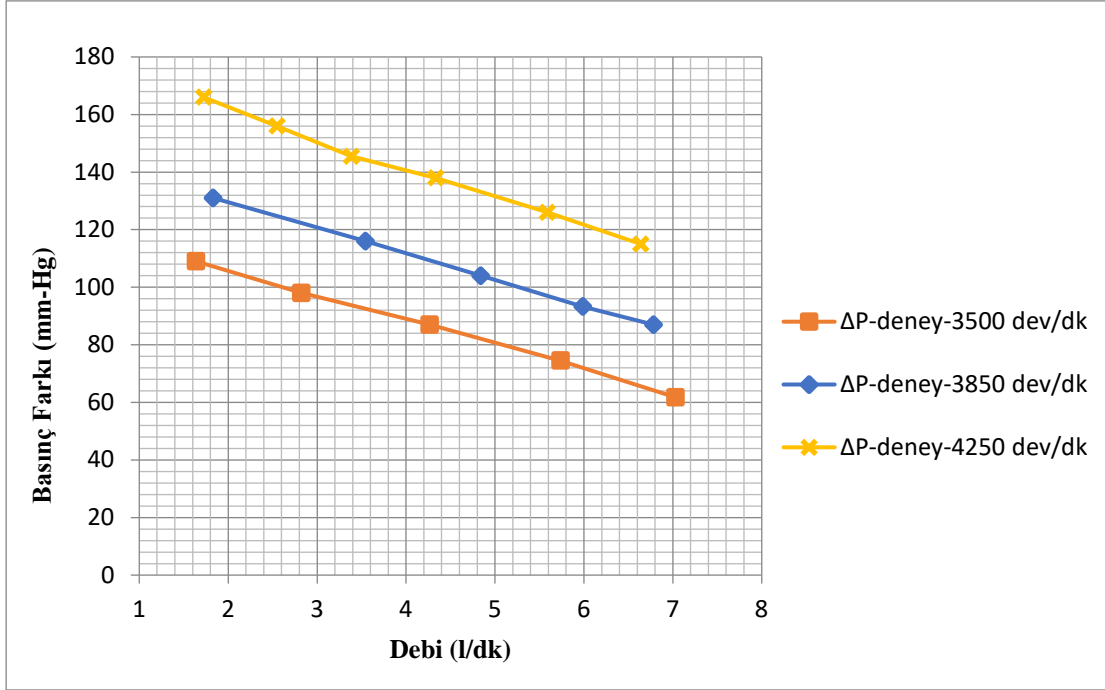
olduğu görülmüştür. Radyal kanat profilli çarka ait hidrolik verim ise diğer çarklara ait hidrolik verimden daha düşük ve bu değer %29-31 aralığında olduğu görülmüştür.

#### 4.2. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

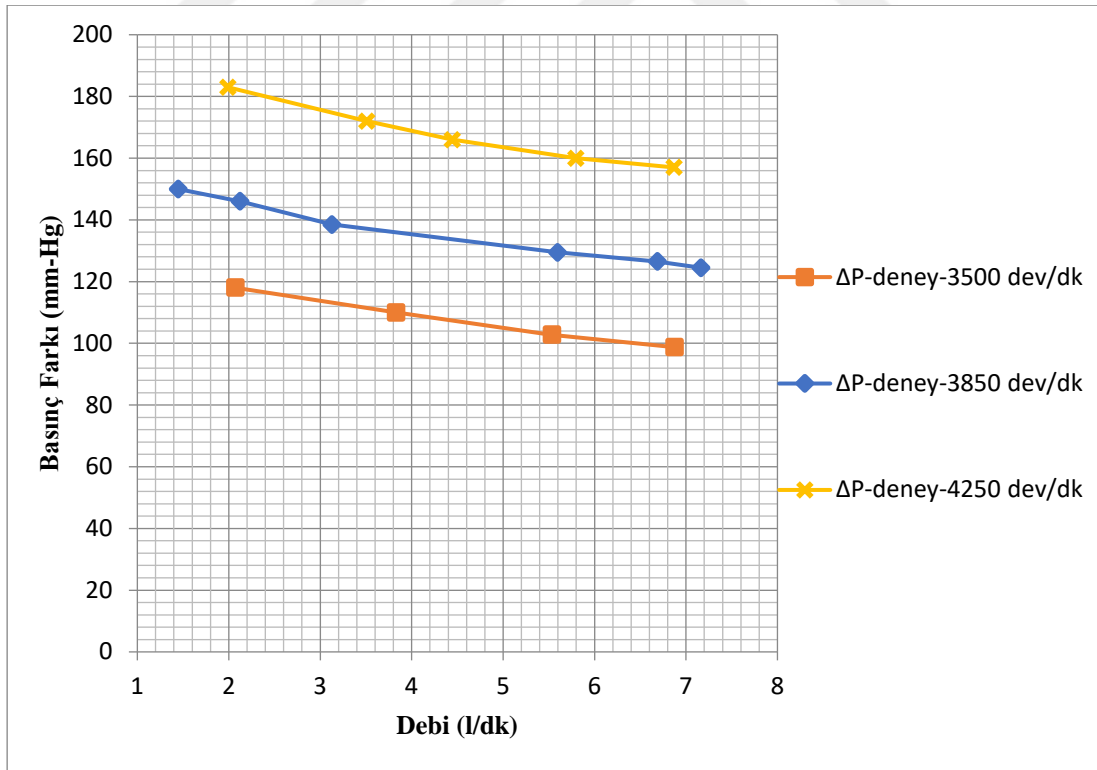
Akışkan olarak su kullanılan deneysel çalışmalar; 3500, 3850 ve 4250 dev/dk dönme hızlarında çeşitli debilerde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerden, akışkan giriş ve çıkışındaki basınç ve güç değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerlerle birlikte materyal ve metot bölümündeki (3.3), (3.6), (3.8) ve (3.9) formülleri kullanılarak; toplam basınç farkı, pompa gücü ve pompa verimi hesaplanmıştır. Pompa gücü değeri için, öncelikle deney setinin boşta tükettiği güç ölçülmüştür ve deney setine prototip pompanın entegre edilmesiyle elde edilen güç ölçülmüştür. Daha sonra bu iki değer farkının alınmasıyla pompa gücü değeri hesaplanmıştır. Bu veriler kullanılarak toplam basınç farkı-debi ve pompa verimi-debi grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.48-Şekil 4.55).



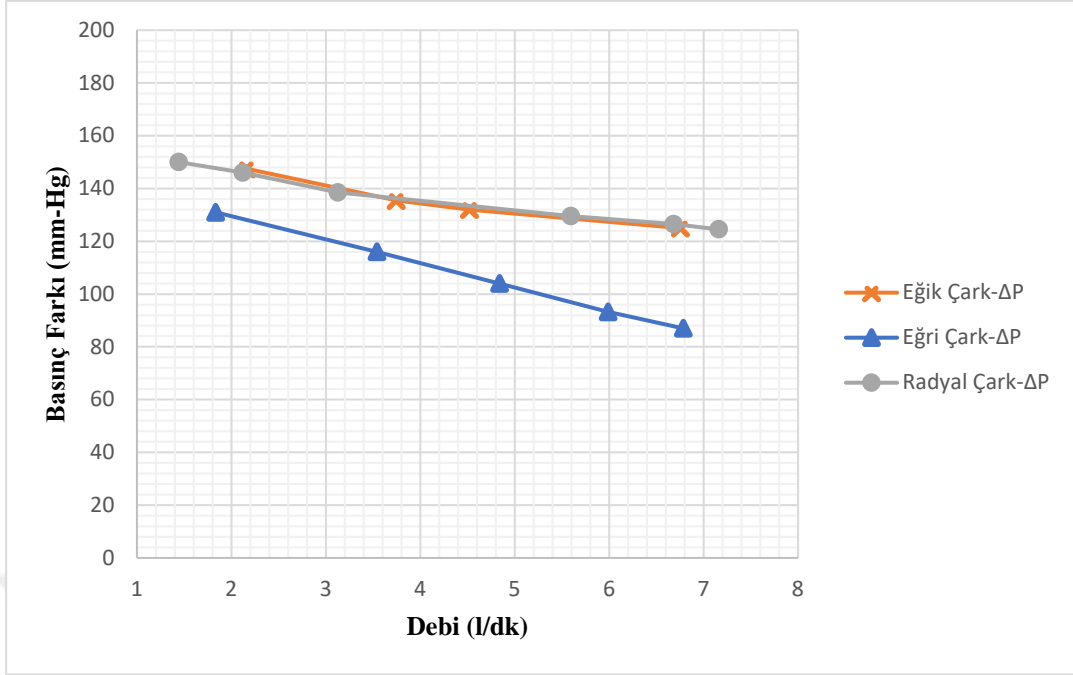
Şekil 4.48. Eğik kanat profilli çarka sahip pompa için basınç farkı-debi grafiği



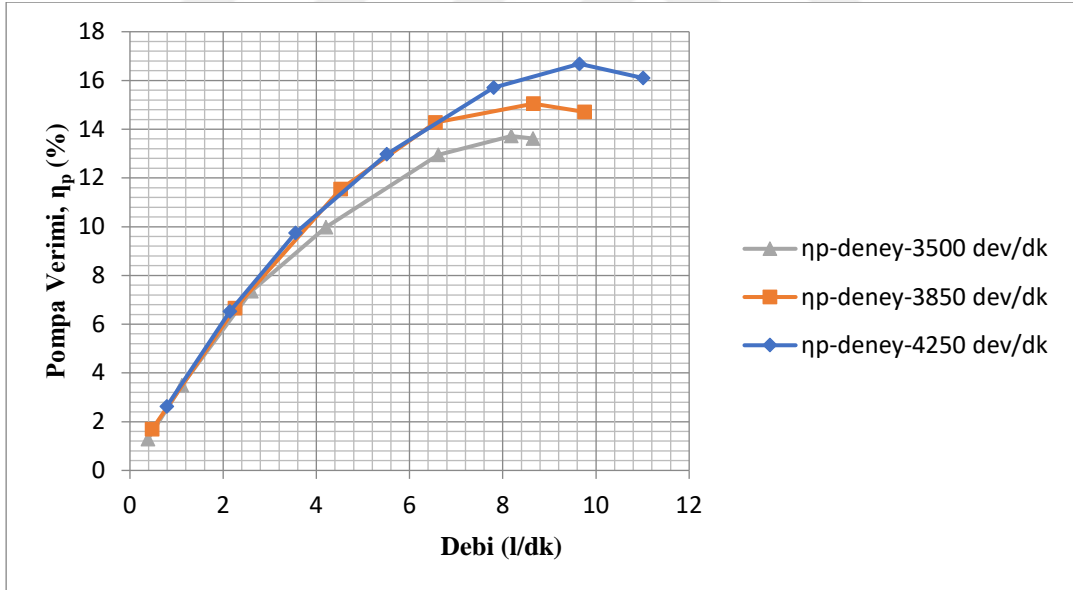
Şekil 4.49. Eğri kanat profilli çarka sahip pompa için basınç farkı-debi grafiği



Şekil 4.50. Radyal kanat profilli çarka sahip pompa için basınç farkı-debi grafiği

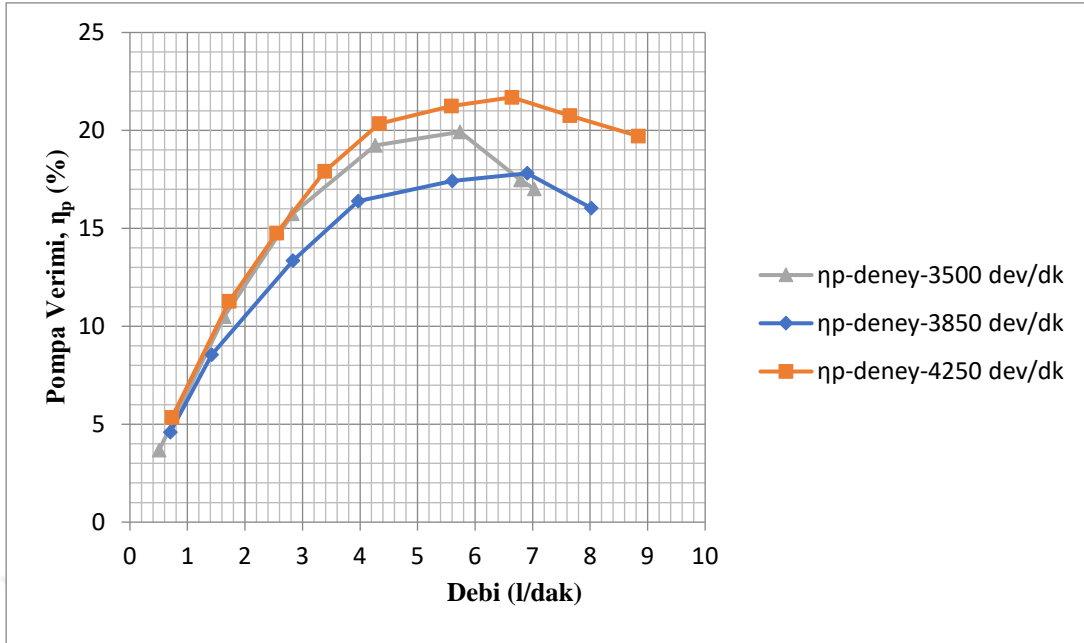


Şekil 4.51. 3850 dev/dk dönme hızında farklı çarklara sahip pompa basınç farklarının karşılaştırılması

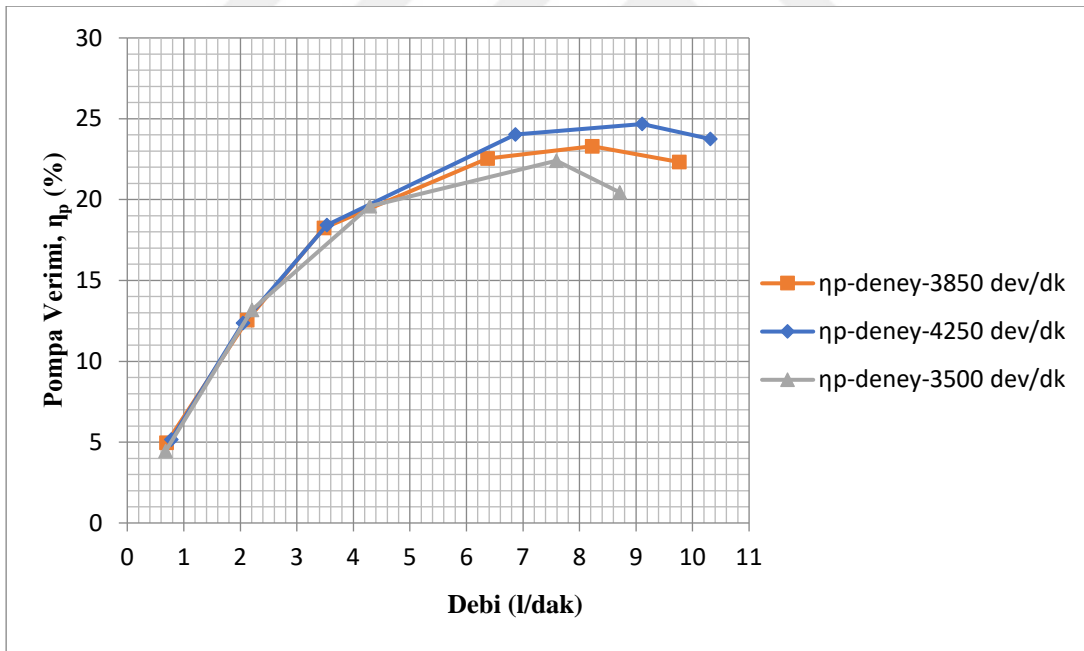


Şekil 4.52. Eğik kanat profilli çarka sahip pompa için pompa verimi-debi grafiği

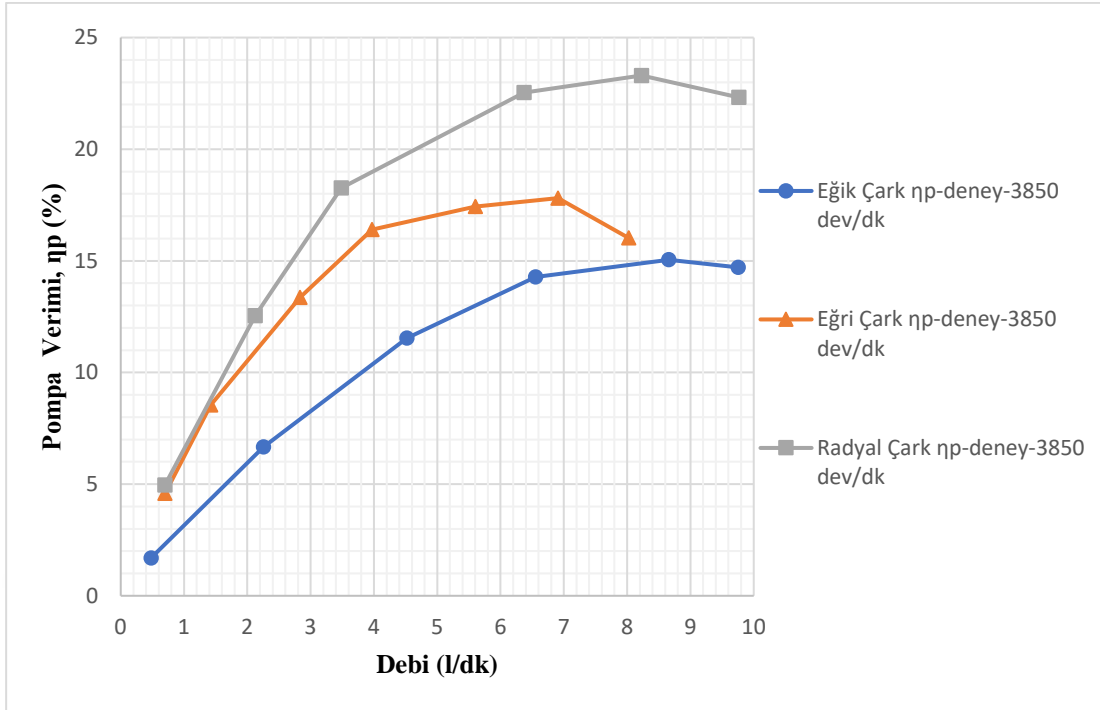




Şekil 4.53. Eğri kanat profilli çarka sahip pompa için pompa verimi-debi grafiği



Şekil 4.54. Radyal kanat profilli çarka sahip pompa için pompa verimi-debi grafiği



Şekil 4.55. 3850 dev/dk dönme hızında farklı çarklara sahip pompa veriminin karşılaştırılması

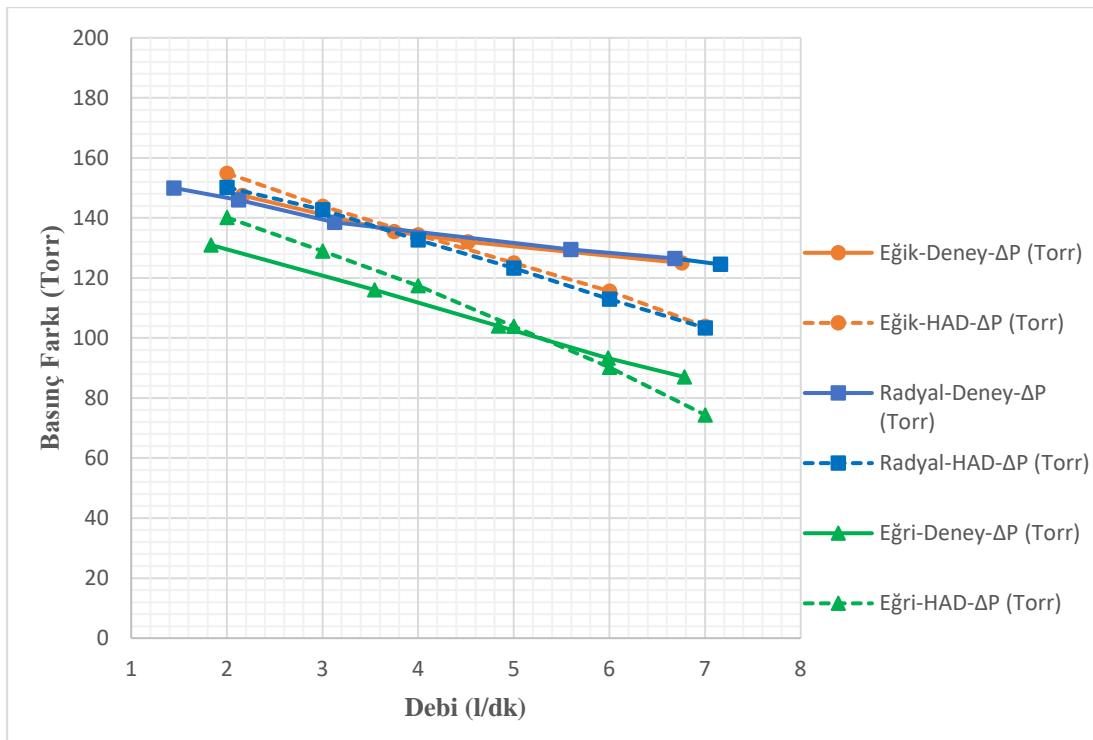
Grafiklerden elde edilen bilgilere göre HAD analizinde olduğu gibi deneysel çalışmalarda da sonuçlar, Bernoulli ilkesine uygun olarak çıkmıştır. Basınç farkının, pompa çarkı dönme hızı ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. Yine bu ilkeye uygun bir şekilde debinin artmasıyla basınç farkının da azaldığı görülmüştür. Elde edilen değerlerle oluşturulan grafik eğrilerine bakıldığında ise eğri kanat profilli çarka sahip pompanın tasarım noktasını yaklaşık 100 mm-Hg değeri ile yakaladığı görülmüştür. Tasarım noktasında (3850 dev/dk ve 5 l/dk) farklı çark geometrileri karşılaştırıldığında, eğik kanat profilli çarka sahip pompa ile ve radyal kanat profilli çarka sahip pompanın basınç farkı değeri yaklaşık 130 mm-Hg değeri ile aynı olup eğri kanat profilli çarka sahip pompanın basınç farkından fazla olduğu görülmüştür.

Pompa verimi-debi grafikleri incelendiğinde pompa veriminin çarkın dönme hızına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Mizunuma and Nakajima (2007), 1500-3000 dev/dk dönme hızları arasında yaptıkları bir çalışmada pompa veriminin dönme hızının artışına bağlı olarak arttığını tespit etmişlerdir. Şekil 4,52-4,54 arasındaki grafikler eğik kanat profilli çarka sahip pompa için incelendiğinde maksimum verim değeri, 4250 dev/dk dönme hızı ve 9,6 l/dk debi için %16,8 olduğu görülmüş, eğri kanat profilli çarka sahip pompa için

4250 dev/dk dönme hızı ve 6,8 l/dk debi için %22 olduğu görülmüş ve radyal kanat profilli çarka sahip pompa için ise 4250 dev/dk dönme hızı ve 9,1 l/dk debi için %24 olduğu görülmüştür. Tasarım noktasında (3850 dev/dk ve 5 l/dk), farklı kanat geometrili çarka sahip pompalar karşılaştırıldığında ise maksimum verim %20,5 değeri ile radyal kanat profilli çarka sahip pompaya ait olduğu görülmüştür. Bunu %17 verim değeri ile eğri kanat profilli çarka sahip pompa ve %12 verim değeri ile eğik kanat profilli çarka sahip pompa takip etmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verimlerle HAD analizinden elde edilen verimler karşılaştırıldığında ortaya büyük bir fark çıktığı görülmüştür. Deneysel çalışmalardan elde edilen pompa verimi genel bir olduğum için pompa içindeki tüm verimleri içermektedir (volumetrik verim ve mekanik verim). HAD analizlerinden elde edilen verim ise sadece hidrolik verimi içermektedir. Bu sebeple verimler arasındaki farklılığın büyük olduğu düşünülmektedir (Çınar 2017).

Son olarak deneysel çalışmalardan elde edilen toplam basınç farkı ve HAD analizinden elde edilen toplam basınç farkı karşılaştırılmıştır (Şekil 4.56).



Şekil 4.56. Tasarım dönme hızında deneysel çalışma sonuçları ile HAD analizi sonuçlarının karşılaştırılması

Verilen grafik incelendiğinde basınç farkları eğrileri arasında düzenli bir uyum olmadığı görülmüştür. Deneysel çalışma ve HAD analiz sonuçları arasında maksimum farklar yaklaşık olarak 7 l/dk debi de görülmüştür. Genel olarak debi arttıkça aradaki fark da artmıştır. Maksimum fark değeri, eğik kanat profilli çarka sahip pompada %15, eğri kanat profilli çarka sahip pompada %10 ve radyal kanat profilli çarka sahip pompada %17 olarak hesaplanmıştır. Tasarım noktası incelendiğinde ise eğri kanat profilli çarka sahip pompada değerlerin birbiriyle uyduğu, eğik kanat profilli çarka sahip pompada bu değer %3 olduğu ve radyal kanat profilli çarka sahip pompada ise bu değer %7 olduğu görülmüştür.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, santrifüj kalp destek pompaları için, çark kanat geometrisinin pompa performansına etkisi incelenmiştir. Pompa tasarımına başlamadan önce dinlenme halindeki yetişkin bir insan kalbinin çalışma parametreleri tespit edilerek pompa tasarımı için de kullanılmıştır (100 mm-Hg basınç farkı ve 5 l/dk debi). Çalışma parametreleriyle birlikte radyal, eğik ve eğri kanat geometrilerine sahip çarkların tasarımı yapılmıştır. Çarkların tasarımı, kolay imal edilebilirlik kriteri göz önünde bulundurularak; örtüsüz ve göbeksiz olarak yapılmıştır. Klasik yöntemle salyangoz gövdesinin tasarımı da yapıldıktan sonra üç farklı pompa montajı ortaya çıkarılmıştır. Pompa montajıyla birlikte, pompanın hidrodinamik performansı hakkında ön bilgi edinebilmek amacıyla pompaların HAD analizleri yapılmıştır. Üç farklı devirde ve 2-7 lt/dk debi aralığında gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlarla birlikte gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra pompa performans eğrileri elde edilmiştir. HAD analizlerinden sonra deneysel çalışmalar yapılmak üzere üç farklı çark geometrisinin üretimi yapılmıştır. Pompa çarkları için işlenebilirliğin kolay olması ve paslanmaz özelliğinin bulunmasından dolayı pirinç malzeme kullanılmıştır. Çarkların üretilmesiyle beraber deneysel çalışmalar da üçer kez tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar alınarak HAD analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan şu sonuçlar çıkarılmıştır;

- HAD analizleri sonucunda elde edilen performans eğrilerinden ve verim grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre tasarım noktasında toplam basınç farkının en yüksek değeri radyal kanat geometrisine sahip çarklı pompada ve eğik kanat geometrisine sahip çarklı pompada ulaşılmıştır. Yine tasarım noktasında hidrolik verim yaklaşık olarak bütün çark tiplerinde aynı olsa da eğik kanat geometrisine sahip çarklı pompada daha yüksek olduğu görülmüştür.

- HAD analiziyle elde edilen iç akış görüntüleri ve kayma gerilmeleri, kan hasarı açısından kalp destek pompaları için oldukça önemli bir yere sahiptir. HAD analizi sonucunda çark geometrileri arasında maksimum kayma gerilmeleri açısından kayda değer bir farklılık gözlemlenemese de bu değer, eğik kanat geometrili çarka sahip pompada en düşük çıkmıştır. Tüm pompa tiplerinde maksimum değer kanatların üst keskin köşe kısımlarında, küçük bir alanda tespit edilmiştir. Ayrıca salyangoz dil kısmı bölgesinde de kayma gerilmesinde maksimum istenilen değerden fazla olduğu yerler görülmüştür. Bu bölgeler için ince bir çözüm ağı (mesh) çalışma yapılarak ya da tasarım noktasında daha yumuşak geçişler sağlanarak bu değer azaltılabileceği düşünülmektedir.
- Deneysel çalışmalar sonucunda ise toplam basınç farkı, HAD analizi sonuçlarına paralel olarak en yüksek eğik ve radyal kanat profilli çarka sahip pompalarda olduğu tespit edilmiştir. Fakat genel pompa verimlerine bakıldığında tasarım noktasında radyal kanat profilli çarka sahip pompanın en yüksek verime sahip olduğu ve HAD analizinden elde edilen hidrolik verimin aksine en düşük pompa verimi ise eğik kanat profilli çarka sahip pompada tespit edilmiştir. HAD analizinden elde edilen verimle deneysel çalışmadan elde edilen verimlerin paralel olmadığı görülmüştür. Buna, deney setinde pompa mili yataklamasının yani merkezlemenin yeteri kadar iyi olmaması ve üretilen pompa çark çaplarının tolerans aralığının geniş olması gibi nedenlerin sebep olduğu düşünülmektedir.

## 5.2. Öneriler

Bu çalışma yazarın kalp destek pompalarıyla alakalı ilk çalışmasıdır. Bu sebeple;

- Salyangoz dil geometrisinin ve çark kanat geometrisinin keskin kenarları için tasarım değişikliği yapılarak pompa içi maksimum kayma gerilme değerleri azaltılabilir.
- Deney seti için, salyangoz gövde ve çarklar daha hassas toleranslarda üretim yapılarak ve daha düzgün yataklama yapılarak (manyetik yataklama gibi) daha stabil sonuçlar alınabilir. Böylece HAD analiz sonuçlarıyla daha uyumlu sonuçlar elde edilebilir.

- Hem HAD analizi hem de deneysel çalışmalar kana yakın bir sıvı (su-gliserin çözeltisi) ile yapılarak gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilir. Ve ayrıca daha sonra kan ile yapılacak deneyler öncesi pompa performansı hakkında ön bilgi edinilebilir.
- Aynı çark geometrilerinin örtülü ve göbekli şekillerinin de tasarımı yapılarak hem deneysel hem de sayısal olarak karşılaştırılmaları yapılabilir.
- Çark kanatları ile salyangoz arasındaki boşluk miktarı düşürülerek pompa performansına olan etkisi sayısal analiz ve deneysel çalışmalarla incelenebilir.
- Çark kanatçıklarının kalınlığı ve yüksekliği değiştirilerek pompa performansına olan etkisi hem sayısal analizle hem de deneysel çalışmalarla incelenebilir.



## **KAYNAKLAR**

Alba AC, Delgado DH (2009) The future is here: ventricular assist devices for the failing heart. *Expert Review of Cardiovascular Therapy* 7: 1067-1077

Anai H, Wakisaka Y, Nakatani T, Taenaka Y, Takano H, Hadama T (1996) Relationship between pump speed design and hemolysis in an axial flow blood pump. *Artificial Organs* 20: 564-567

Apsley D (2003) Ders notları

Araki K, Anai H, Oshikawa M, Nakamura K, Onitsuka T (1998) In vitro performance of a centrifugal, a mixed flow, and an axial flow blood pump. *Artificial Organs* 22: 366-370

Arvand A, Hahn N, Hormes M, Akdis M, Martin M, Reul H (2004) Comparison of hydraulic and hemolytic properties of different impeller designs of an implantable rotary blood pump by computational fluid dynamics. *Artificial Organs* 28: 892-898

Behbahani M, Behr M, Hormes M, Steinseifer U, Arora D, Coronado O, Pasquali M (2009) A review of computational fluid dynamics analysis of blood pumps. *European Journal of Applied Mathematics* 20: 363-397

Chan WK, Wong YW, Hu W (2005) Design considerations of volute geometry of a centrifugal blood pump. *Artificial Organs* 29: 937-948

Chopski SG, Fox CS, McKenna KL, Riddle ML, Kafagy DH, Stevens RM, Throckmorton AL (2016) Physics-driven impeller designs for a novel intravascular blood pump for patients with congenital heart disease. *Medical Engineering & Physics* 38: 622-632

Chua LP, Su BY, Lim TM, Zhou TM (2007) Numerical simulation of an axial blood pump. *Artificial Organs* 31: 560-570

Chua LP, Yu SCM, Leo HL, Chan WK (1999) Comparison of flow characteristics of enlarged blood pump models with different impeller design. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 26: 369-378



Çengel Y, Cimbala JM (2008) Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları. Engin T, Güven Bilimsel, İzmir, s. 817-88Çınar H (2017) Yarı eksenel kalp destek pompasının sayısal ve deneysel analizi. Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Selçuk Üniversitesi, Konya, s. 72

Çınar H, Yapıcı R (2018) Yeni bir yüksek hızlı kalp destek pompasının sayısal e deneysel analizi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi 6: 38-54

Demir O (2009) Development of an implantable left ventricular assist device: heart turcica centrifugal. Master of Science, Graduate School of Engineering Koc University Koc University, İstanbul, s. 135

Demir O, Biyikli E, Lazoglu I, Kucukaksu S (2011) Design of a centrifugal blood pump: Heart Turcica Centrifugal. Artificial Organs 35: 720-725

Eğrican N, Küçükaksu S, Akgün M, Lazoğlu İ, Cıblak N, An E, Sorgüven E, Şafak K, Okyar AF, Uçak C, Şehirlioğlu M (2010) Minyatür bir yapay kalp pompa sisteminin tasarımı, analizi ve prototip üretimi. TÜBİTAK Proje No: 106M309, İstanbul: 79

Ersanlı Ç (2009) Development of a miniature and implantable heart pump as the left ventricular assist system: Heart Turcica Centrifugal. Master of Science, Graduate School of Engineering Koc University Koc University, İstanbul, s. 106

Giersiepen M, Wurzinger LJ, Opitz R, Reul H (1990) Estimation of shear stress-related blood damage in heart-valve prostheses - invitro comparison of 25 aortic valves. International Journal of Artificial Organs 13: 300-306

Grigioni M, Daniele C, Morbiducci U, D'Avenio G, Benedetto GD, Barbaro V (2004) The power-law mathematical model for blood damage prediction: analytical developments and physical inconsistencies. Artificial Organs 28: 467-475

İncebay Ö (2017) Santrifüj kalp destek pompası tasarımı ve nümerik analizinin yapılması. Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Selçuk Üniversitesi, Konya, s. 46

İncebay Ö, Yapıcı R (2017) Santrifüj bir kalp destek pompası prototipinin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi 5: 472-484

Khan TI, Sheh Zad H, Lazoglu I, Yalcin O (2018) Development of a novel shrouded impeller pediatric blood pump. Journal of Artificial Organs 21(2): 142-149

Koochaki M, Niroomand-Oscuii H (2013) A new design and computational fluid dynamics study of an implantable axial blood pump. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine* 36: 417-422

Leme J, da Silva C, Fonseca J, da Silva BU, Uebelhart B, Biscegli JF, Andrade A (2013) Centrifugal blood pump for temporary ventricular assist devices with low priming and ceramic bearings. *Artificial Organs* 37: 942-945

Leverett LB, Hellums JD, Alfrey CP, Lynch EC (1972) Red blood cell damage by shear stress. *Biophysical Journal* 12: 257-273

Mizunuma H, Nakajima R (2007) Experimental study on shear stress distributions in a centrifugal blood pump. *Artificial Organs* 31: 550-559

Mohammadi N, Fakharzadeh M (2017) Analysis of effect of impeller geometry including blade outlet angle on the performance of multi-pressure pumps: Simulation and experiment. *Mechanika* 23: 107-119

Mozafari S, Rezaenia MA, Paul GM, Rothman MT, Wen P, Korakianitis T (2017) The effect of geometry on the efficiency and hemolysis of centrifugal implantable blood pumps. *Asaio Journal* 63: 53-59

Nishida M, Nakayama K, Sakota D, Kosaka R, Maruyama O, Kawaguchi Y, Kuwana K, Yamane T (2016a) Effect of Impeller Geometry on Lift-Off Characteristics and Rotational Attitude in a Monopivot Centrifugal Blood Pump. *Artificial Organs* 40: E89-E101

Nishida M, Negishi T, Sakota D, Kosaka R, Maruyama O, Hyakutake T, Kuwana K, Yamane T (2016b) Properties of a monopivot centrifugal blood pump manufactured by 3D printing. *Journal of Artificial Organs* 19: 322-329

Patel SM, Throckmorton AL, Untaroiu A, Allaire PE, Wood HG, Olsen DB (2005) The status of failure and reliability testing of artificial blood pumps. *Asaio Journal* 51: 440-451

Paul G, Rezaenia A, Avital E, Korakianitis T (2017) Machinability and optimization of shrouded centrifugal impellers for implantable blood pumps. *Journal of Medical Devices-Transactions of the Asme* 11(2): 021005-7

Reul HM, Akdis M (2000) Blood pumps for circulatory support. *Perfusion* 15: 295-311

Sandvik Coromant (2017) CoroPak 16.2, Sandvik Coromant ToolGuide™

Song G, Chua LP, Lim TM (2010a) Numerical study of a bio-centrifugal blood pump with straight impeller blade profiles. *Artificial Organs* 34: 98-104

Song G, Chua LP, Lim TM (2010b) Numerical study of a centrifugal blood pump with different impeller profiles. *Asaio Journal* 56: 24-29

Sorguven E, Ciblak N, Okyar AF, Akgun MA, Egriçan AN, Safak KK, Ahn H, Lazoglu I, Kucukaksu S (2008) Flow simulation and optimization of a left ventricular assist device. *Proceedings of the Asme International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2007, Vol 8, Pts a and B: 1401-1407*

Takano T, Schulte-Eistrup S, Yoshikawa M, Nakata K, Kawahito S, Maeda T, Nonaka K, Linneweber J, Glueck J, Fujisawa A, Makinouchi K, Yokokawa M, Nose Y (2000) Impeller design for a miniaturized centrifugal blood pump. *Artificial Organs* 24: 821-825

URL-1 <http://www.dolasim.gen.tr/kalp-dolasim-sistemi.html> (erişim tarihi: 28.12.2016)

URL-2 <http://80.251.40.59/sports.ankara.edu.tr/koz/ana-fiz/dolasim.fizyoloji.pdf> (erişim tarihi: 27.12.2016)

URL-3 <http://tip.uludag.edu.tr/temel-tip-bilimleri/fizyoloji/ders-notlari/spor-fizyolojisi-notlari-01.pdf> (erişim tarihi: 26.12.2016)

URL-4 [https://tr.wikipedia.org/wiki/Kan\\_basinci](https://tr.wikipedia.org/wiki/Kan_basinci) (erişim tarihi: 25.12.2016)

URL-5 <http://akdagi.home.uludag.edu.tr/hastalarim/tansiyon01.doc> (erişim tarihi: 24.12.2016)

URL-6 <http://www.bilgirotasi.com/denizcilik/wp-content/uploads/2011/05/centrifugalpumps.gif> (erişim tarihi: 30.12.2016)

URL-7 <http://www.thesisat.org/rotodinamik-pompa-tipleri-kullanim-alanlari.html> (erişim tarihi: 01.01.2017)

URL-8 <https://www.heartware.com/tr/hastalar-ve-hasta-yakinlari/vad-nedir> (erişim tarihi: 01.01.2017)

URL-9 <https://inoshop.inovatools.eu/index.php?page=product&info=2525> (erişim tarihi: 19.05.2018)

Wu JC, Paden BE, Borovetz HS, Antaki JF (2010) Computational fluid dynamics analysis of blade tip clearances on hemodynamic performance and blood damage in a centrifugal ventricular assist device. *Artificial Organs* 34: 402-411

Yapıcı R (2012) Türbülans modelleri. Akışkanlar mekaniği ders notu. Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Yu SCM, Ng BTH, Chan WK, Chua LP (2000) The flow patterns within the impeller passages of a centrifugal blood pump model. *Medical Engineering & Physics* 22: 381-393

Yüksel A (2007) Batık duvar jeti etkisinde kazık ve taban etkileşiminin modellenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 360

## ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Bursa’da doğdu. İlk ve ortaokulu Girne, Hakkari, Konya ve İstanbul’da, liseyi İstanbul Köy Hizmetleri Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2009 yılında Selçuk Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nü kazandı ve 2013 yılında mezun oldu. 2011 yılından itibaren part time olarak çalıştığı ASC Hidrolik firmasında “Metot Mühendisi” olarak tam zamanlı işe başladı. 2015 yılında Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’ne “Araştırma Görevlisi” olarak atandı. 2016 yılında Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD yüksek lisans programına kayıt yaptırdı. Medeni durumu evlidir.