



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SANTRİFÜJ POMPA ÇARKINDAKİ AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN HAD VE PIV YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Muharrem Hilmi AKSOY

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalını

Nisan-2018
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SANTRİFÜJ POMPA ÇARKINDAKİ AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN HAD VE PIV YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Muharrem Hilmi AKSOY

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Faruk KÖSE

2018, 150 Sayfa

Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Faruk KÖSE
Prof. Dr. Saim KOÇAK
Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN
Prof. Dr. Hüseyin KURT

Pompa verimlerini azaltan problemlerin üstesinden gelmek ve yeni tasarımlar yapmak için pompa çarkı içerisindeki karmaşık akış yapılarını daha iyi anlamak ve incelemek gerekmektedir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında özel olarak tasarlanan ve kurulan bir test düzeneğinde, pompa çarkı içerisinde, iki kanat arasındaki akış yapısı, çark çıkış genişliğinin tam ortasında deneysel olarak Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) yöntemi ile belirlenmiştir. Çalışmada, tasarım parametreleri 2850 d/d, 12.5m^3/h debi ve 40 metre basma yüksekliğine sahip 3 kademeli santrifüj pompa, tasarım devri yanında, 1900 d/d çalışma şartlarında da denenmiştir. Her bir devir değeri için tasarım debisinin 0.85Q_d-1.0Q_d ve 1.15 Q_d değerlerinde olmak üzere 3 farklı debi oranında deneyler yapılmıştır. Sayısal çalışmalar aynı sınır şartlarında yapılmış, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile elde edilen akış yapısı deneysel elde edilen PIV sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmalar orijinal pompa çarkı olan 6 kanatlı (çark 1) ara kanat ilaveli 4 kanatlı (çark 2), ara kanat ilavesiz 4 kanatlı (çark 3) olmak üzere 3 farklı pompa çarkı kullanılarak yapılmıştır. PIV çalışmalarında çarkın aynı pozisyonda olduğu durağan halde faz ortalamalı 500 görüntü alınmış ve akış özellikleri mutlak hız vektörü, bağıl hız vektörü, mutlak hız konturu, bağıl hız konturu ve Türbülans Kinetik Enerji (TKE) değerleri ile incelenmiştir. Ayrıca çark ve difüzör etkileşimini daha iyi incelemek için 5 farklı çark-difüzör pozisyonunda da çark içerisindeki akış yapısı incelenmiştir. Pompa çarkı içerisinde oluşturulan 16 farklı nokta ile elde edilen PIV-HAD sonuçları arasındaki bağıl fark %5.7-21.2 arasında olduğu bulunmuştur. 12.5 m^3/h debide yapılan deneysel ve HAD çalışmalarında en yüksek pompa genel verimi çark 1 için sırası ile %56.0 ve %56.6 olarak elde edilirken, en yüksek basma yüksekliği çark 2 ile sırasıyla 46.0 m ve 44.2 m olarak bulunmuştur. Çark 3 ise verim değeri bu debide %55.8 olmasına rağmen basma yüksekliği 37.8 m'de kalmıştır. Deneysel çalışmalarda çark 2'nin kullanımı ile orijinal çark olan çark 1'e göre basma yüksekliği %9.7 artış ile 40.3 m'den 44.2 m ye çıkarılırken, genel verim %56'dan %53.7'ye % 4.7 düşüşte kalmıştır. Bunun yanında HAD ve deneysel çalışmalarda elde edilen pompa karakteristik değerleri arasındaki fark %1-9 aralığında olduğu bulunmuştur. Özellikle az kanat sayısına sahip ve PIV ölçümlerine uygun olan çark 2'de mutlak hız değerlerinin PIV ve HAD sonuçları ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Akış yapısı, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Santrifüj pompa, PIV.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

INVESTIGATION OF FLOW CHARACTERISTICS IN A CENTRIFUGAL PUMP IMPELLER BY CFD AND PIV METHOD

Muharrem Hilmi AKSOY

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Assist. Prof. Dr. Faruk KOSE

2018, 150 Pages

Jury
Assist. Prof. Dr. Faruk KOSE
Prof. Dr. Saim KOCAK
Prof. Dr. Halil Kürsad ERSOY
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN
Prof. Dr. Hüseyin KURT

It is necessary to better understand and examine the complex flow patterns in the pump impeller to overcome problems that reduce pump efficiency and to make new designs. For this reason, the flow structure between the two blades in pump impeller, in a specially designed and installed test set in this thesis study, was experimentally determined by the Particle Image Velocity (PIV) measurement method in the middle of the impeller exit width. In the study, a 3-stage centrifugal pump with design parameters of 2850 rpm, 12.5 m³/ h flow rate and 40 m pressure head was also tested at 1900 rpm, in addition to design parameters. Experiments have been carried out at three different flow ratios for the design values of 0.85Qd-1.0Qd and 1.15 Qd for each rpm value. Numerical studies have been carried out under the same boundary conditions, and the flow structure obtained by Computational Fluid Dynamics (CFD) was compared with experimental PIV results. Experimental and numerical studies have been carried out using 3 different pump impellers, original pump impeller 6 blades (impeller 1), 4 main 4 splitter blades (impeller 2), 4 main blades without splitter blades (impeller 3).In the PIV studies, a 500 phase averaged photos was taken at the same impeller position and the flow properties were investigated with the absolute velocity vector, the relative velocity vector, the absolute velocity contour, the relative velocity contour, and the Turbulence Kinetic Energy (TKE) values. In addition, 5 different impeller-diffusers positions have been investigated in order to investigate the flow structure in the impeller and its' interaction between impeller and diffuser. The relative difference between the PIV-CFD results obtained with the 16 different points created in the pump impeller was found to be between 5.7-21.2%. In the experimental and HAD studies performed at 12.5 m³/h, the highest pump overall efficiency was 56.0% and 56.6%, respectively for the impeller 1, while the highest pump height was 46.0 m and 44.2 m for the impeller 2. In the pump used the impeller 3, the pump head remained at 37.8 m even though the pump efficiency was 55.8%. With the use of impeller 2 in the experimental studies, the head increased from 40.3 m to 44.2 m with 9.7% while overall efficiency decreased only from 56.0% to 53.7% by 4.7% compared to impeller 1.In addition, the difference between the pump characteristic values obtained in HAD and experimental studies is found to be between 1-9%. It has been observed that the absolute velocity values are in accordance with the PIV and HAD results in the impeller 2, which has a particularly lower number of blades and is more suitable for PIV measurements.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Flow structure, PIV, Centrifugal pump.

ÖNSÖZ

Günümüzde geliştirilen yazılımlar sayesinde bir akış problemi doğru modellendiğinde ilgili çözüm algoritmaları ile sayısal olarak çözülebilmektedir. Ancak sayısal sonuçların doğrulanması ve modellerin geliştirilebilmesi için deneysel çalışmalara da ihtiyaç vardır.

Pompa ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların çoğu pompa basma yüksekliği, debisi ve pompanın kullandığı elektrik miktarı ile ilgili yapılan ölçümler ile ilgilidir. Ancak deneylerde elde edilen bu karakteristik değerlerle HAD çalışmaları ile elde edilen sonuçların benzer olması, pompa çarkı içerisindeki akış yapısının doğru modellendiği anlamına gelmeyebilir. Bu tez çalışmasında, pompa çarkları içerisindeki akış karakteristikleri 3 farklı pompa çarkında, farklı devir sayıları ve debi değerlerinde, ileri teknoloji bir akış görüntüleme metodu olan PIV ve HAD analizleri ile akış özellikleri belirlenerek karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının kapsamında yapıldığı SAN-TEZ projesi destekleyicisi Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Bilim ve Teknoloji Genel Müdürlüğü'ne, deney sisteminin kurulmasında destek olan proje ortağı Sempa Ltd. Şti'ye, PIV sistemi ve altyapısının kullanılmasına izin veren Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne, deneysel çalışmalarda yardımcı olan arkadaşlarım Arş.Gör. İlker Göktepeli, Arş. Gör. Sercan Doğan ve Arş Gör. Sercan Yağmur'a, proje ekibinden arkadaşlarım Öğr. Gör. Dr. Osman Babayiğit ve Öğr. Gör. Osman Kocaaslan'a da teşekkür ederim.

Tezimin hazırlanmasında beni yönlendiren ve her zaman destekleyen danışmanım Yrd.Doç.Dr. Faruk Köse hocama teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde büyük emekleri olan anne ve babama, çalışmalarımda manevi desteğini ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen eşim Zeynep Aksoy'a oğlum Talha Esat Aksoy'a ve kızım Ahsen Feyza Aksoy'a teşekkür ederim.

Muharrem Hilmi AKSOY
KONYA-2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv

ABSTRACT v

ÖNSÖZ vi

İÇİNDEKİLER vii

1. GİRİŞ 1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 4

3. MATERYAL VE YÖNTEM 21

3.1. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) Metodu ve PIV Deney Düzeneği 22
3.1.1. Pompa ve PIV deney seti 30
3.1.2. PIV sistem elemanları 40
3.1.3. PIV deney yöntemi 44
3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi 49
3.2.1. Çarkın katı modelinin oluşturulması 49
3.2.2. Akış hacimlerinin oluşturulması 52
3.2.3. Sayısal çözüm ağının oluşturulması 54
3.2.4. Ağdan bağımsızlaştırma işlemi 56
3.2.5. Akış probleminin tanımlanması 56
3.2.6. Türbülans modeli 57
3.2.7. Sınır şartları 59
3.3. Santrifüj Pompa Karakteristik Eğrilerin Elde Edilmesi 59
3.3.1 HAD çalışmaları için hesaplamalar 59
3.3.2 Deneysel çalışmalar için hesaplamalar 60
3.4. Belirsizlik Analizi 61
3.5. Akış kontrolü ve pompalarda uygulamalar 62

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 64

4.1. Türbülans Modelleri Karşılaştırması 64
4.2. Pasif Akış Kontrol Çalışmaları 67
4.3. PIV-HAD karşılaştırması 75
4.3.1. Çark 1 için PIV-HAD sonuçları 77
4.3.2. Çark 2 için PIV-HAD sonuçları 93
4.3.3. Çark 3 için PIV-HAD sonuçları 100
4.3.4 Farklı açılarda HAD-PIV karşılaştırmaları 114
4.3.5. PIV-HAD noktasal verilerin karşılaştırılması 122
4.4. Pompa Performans Deneyleri ve HAD Sonuçları 129
4.5. Belirsizlik Analizi 135

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 137

5.1. Sonuçlar 137

5.2. Öneriler **139**

KAYNAKLAR **141**

ÖZGEÇMİŞ **148**

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ω	:Açısal hız (rad/s)
$\dot{Q}$	:Hacimsel debi(m^3/s)
$\dot{n}$	:Devir sayısı (d/d)
e	:Kanat kalınlığı (mm)
Z	:Kanat sayısı (°)
u	:x yönündeki hız bileşeni (m/s)
v	:y yönündeki hız bileşeni (m/s)
ρ	:Yoğunluk(kg/m^3)
k	:Türbülans kinetik enerji (m^2/s^2)
ω	:Özgül türbülans yitim hızı (m^2/s^3)
G_k	:Hız gradyenlerine bağlı olarak meydana gelen TKE üretimi
P	:Akışkan basıncı (Pa)
P_h	:Hidrolik güç (kW)
P_m	:Mil gücü (kW)
η_h	:Hidrolik verim
η_g	:Genel verim
η_s	:Özgül hız
g	:Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
δ	:Sınır tabaka kalınlığı (mm)
δ^*	:Yer değiştirme kalınlığı (mm)
δ_m	:Momentum kalınlığı (mm)
δ_e	:Enerji kalınlığı (mm)
Δx	:x yönünde ortalama yer değiştirme (m)
Δy	:y yönünde ortalama yer değiştirme (m)
Δt	:Zaman farkı (s)
N	:Görüntü sayısı
V_i	:Mutlak hız (m/s)
$V_{i,bağıl}$	: Bağıl hız (m/s)
T_{ij}	:Türbülans gerilmesi
D_0	:Çark Giriş Çapı (mm)
D_1	:Kanat giriş çapı(mm)
b_1	:Çark girişindeki kanat açıklığı(mm)
b_2	:Çark girişindeki kanat açıklığı (mm)
D_m	:Şaft çapı (mm)
D_g	:Çark giriş Çapı (mm)
D_2	:Çark dış çapı (mm)
B_{1k}	:Kanat giriş açısı (°)
β_{2k}	:Kanat çıkış açısı (°)
e	:Kanat et kalınlığı (mm)
e_1	:Ara kanat et kalınlığı (mm)
Z	:Ana kanat sayısı
Z_1	:Ara kanat sayısı
Θ	: Çark-difüzör pozisyonu açısı (°)

Kısaltmalar

HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
TKE	: Türbülans kinetik enerji (J/kg)
PIV	: Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Metodu
Çark 1	: 6 Kanatlı orijinal pompa çarkı
Çark 2	: Ara kanat ilaveli 4 kanatlı pompa çarkı
Çark 3	: Ara kanat ilavesiz 4 kanatlı pompa çarkı

1. GİRİŞ

Günümüzde mühendislik bilim dalının üzerinde durduğu konulardan biri de enerjiyi doğru, verimli ve etkili kullanmaktır. Turbomakinalar, uzun yıllardır hem enerji üretiminde ve hem de tüketiminde kullanılmaları ile mühendislik çalışmalarında önemli yer tutmaktadır. Bu bilim dalının bir parçası pompalarda ise enerjinin etkili kullanımı enerji verimliliği bakımından oldukça önemlidir. En yaygın kullanılan pompa tipi olan santrifüj pompalar; su temininde, hidrofor sistemlerinde, tarımsal sulama sistemlerinde, su şartlandırma ve basınçlandırma vb. sistemlerde oldukça yaygın olarak kullanılmakta ve kullanılan tüm pompa tipleri arasında % 80 gibi bir orana sahiptirler. Santrifüj pompalar bu kadar yaygın kullanıma sahip olmalarına rağmen verimleri %50 - %60 gibi bir aralıktadır. Pompa içerisindeki akış yapısı titreşim ve seslere ve dolayısıyla da akış yapısında bozulmalara neden olabilmektedir. Bu problemlerin üstesinden gelmek, akış yapılarını inceleyerek verimi artırmak için karmaşık akış yapılarını daha iyi anlamak gerekmektedir. Bu amaca uygun olarak, bu alanda deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların birçoğu, karmaşık akış yapısına sahip santrifüj pompa içerisindeki akışta etkin olan akış yapısının fiziğini araştırmaya ve olumsuz etmenlerini giderebilmek için çark difüzör veya salyangoz etkilerinin rolü üzerinde ve akışkan yapı etkileşimi üzerinde yoğunlaşmıştır (Pınarbaşı ve Johnson, 1995; Güleren, 2003; Meng ve ark., 2017). Verilere göre dünya enerji tüketiminin yaklaşık % 20'si, Türkiye'de ise %10'u pompa ve fan gibi dönen ekipmanları tahrik eden motorlarda tüketilmektedir. Bu oranın azaltılması ve enerjinin daha etkin kullanılması için, pompa verimlerinde çok küçük oranda iyileştirme bile önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlayabilecektir (Türkmen, 2009).

Pompa verimlerini azaltan problemlerin üstesinden gelmek için pompa içerisinde karmaşık akış yapılarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Bunun için sayısal çalışmanın yanında deneysel çalışmaların da yapılması, elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve ayrıca doğrulanması açısından büyük öneme sahiptir. HAD yazılımları, özellikle akışkan ve ısı transferi ile alanlarında analizlerinin yapılmasına ve performansının sınanmasında kullanılmaktadır. Bu programlar kullanılarak, süreklilik, momentum ve enerji denklemleri bilgisayar ortamında sayısal olarak çözülmekte, sıcaklık ve akış ile ilgili verilere ulaşılabilmekte ve hız, basınç, sıcaklık ve benzeri değişik parametrelerin dağılımları elde edilebilmektedir. HAD çalışmalarında, sanal ortamda pompa içerisinde akış yapısı belirlenerek performans değeri incelenmekte, prototip veya kalıp üretiminden önce tasarımın beklenen performans değerlerini sağlaması durumu kontrol edilmektedir.

Bu sonuçlara dayanılarak pompanın istenilen koşullarda çalışması ve veriminin iyileştirilmesi için gerekli değişiklikler de yapılabilmektedir. Böylece henüz tasarım safhasında zaman ve maliyet açısından büyük tasarruflar sağlanabilmektedir. HAD yönteminde elde edilen sonuçların doğruluğu, girilen parametrelere ve kullanılan yöntemlere göre farklılık gösterebilir (Karamanoğlu ve ark., 2006; Babayigit ve ark., 2015; Wang ve ark., 2017).

Deneysel çalışmaların en temeli ise pompa karakteristik eğrileri ile temsil edilen basma yüksekliği-debi ve verim değerlerinin elde edilmesidir. Bu veriler pompanın tasarım verileri ile karşılaştırılarak elde edilen değerlerin hedeflenenle uyumlu olması durumunun incelenmesini sağlar. Diğer bir deneysel-sayısal sonuç karşılaştırılması ise pompa karakteristiklerine direkt etki eden pompa içerisindeki akış yapısının belirlenmesidir. Çünkü pompa içerisinde çark-difüzör ve tüm elemanlarda akışkan-yapı etkileşimi ve diğer faktörlerden kaynaklanan, akış yapısındaki bozulmalar, yüksek türbülans değerleri pompa verimini etkilemektedir. Bunun yanında HAD çalışmaları ile düzenlenerek ve verim değerinde artış beklenerek üretilen pompaların deneysel verileri ne kadar karşıladığı ve akış fiziğinde sayısal olarak elde edilen değerleri ne kadar temsil ettiği önemli parametrelerdir.

Parçacık Görüntülemeli Hız ölçüm yöntemi olan PIV (Particle Image Velocimetry), belli bir bölgedeki akışın davranışını incelemek amacı ile kullanılan ileri teknoloji bir ölçüm metodurur. PIV'nin çalışma prensibi, günümüzde akış ölçmelerinde kullanılan rotametre, ventürimetre, orifismetre ve pitot-prob tüpleri gibi yöntemlerden tamamen farklıdır. En temel fark ise ölçümlerin tek noktada değil bir alanda veya hacimde akış yapısını bozmadan yapılabilmesidir. PIV sistemi, temel akışkanlar dinamiği konusundaki araştırmalarda, ürün geliştirme ve optimizasyon çalışmalarında, rüzgar tüneli ve su tünelinde ölçümlerde, taşıt aerodinamiği vb. iç ve dış akış uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Tabatabaei ve ark., 2015; Tian ve ark., 2017). Turbomakinalarda uygulaması ise temel seviyede 20 yıl kadar önce başlamış, gelişen işlemci, kamera, lazer ve senkronizasyon teknolojisi ile son yıllarda daha yaygın hale gelmiş ve PIV'nin bu alana uygulanabilirliği artmıştır.

Bu tez çalışmasında öncelikle tez konusunun önemi, tezin amacı ve yaygın etkisinden bahsedilmiş, konu ile ilgili detaylı kaynak araştırması 2. Bölümde sunulmuştur. Bunun yanında literatürdeki çalışmalarla mevcut çalışmanın benzer ve farklı yönleri ortaya konularak özgünlüğü konusuna değinilmiştir. 3. Bölümde ise PIV sisteminden ve tez çalışması için özel olarak kurulan PIV deney setinden bahsedilmiş,

deneylerde ölçülen değişkenler ve ölçüm aletleri tanıtılmıştır. Ayrıca ANSYS-Fluent programı ile yapılan HAD çalışmaları da bu bölümde açıklanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçların HAD ile farklı türbülans modelleri ile elde edilen akış yapılarının karşılaştırılması gerçekleştirilmiş ve sonuçları 4. Kısımda verilmiştir. Hem deneysel hem HAD çalışmaları için denenen pasif akış kontrol yöntemleri ara kanat ve kanat sayısında değişiklik yapılması olmuştur. Bunun yanında pompa karakteristiklerinin belirlendiği ölçüm aleti için belirsizlik analizleri yapılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar dördüncü bölüm olan araştırma sonuçları ve tartışma bölümünde detaylı olarak değerlendirilmiştir. Sonuç ve öneriler bölümünde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş, karşılaştırılmış ve gelecekte konu ile ilgili yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Santrifüj pompa çarklarında iç akış yapısının ölçümü, uygulama ve test düzeneği oluşturma açısından zor, PIV'nin uygulama alanı açısından ise ilginç araştırma alanlarından biridir. Geçmişte, pompa çarkı içerisindeki akış yapısı, basınç propları ve sıcak tel anemometreleri gibi bazı ölçüm teknikleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu yöntemler, santrifüj pompalardaki akış özellikleri ile ilgili bazı temel bilgiler sağlamıştır (Sharp ve Adrian, 2001; Nataraj ve Ragoth Singh, 2014). Bununla birlikte, çoğu yöntem prop girişi açılması, akış alanına müdahale edilmesi, bir alanda değil belirli noktalarda veri alınması gibi dezavantajlar barındırmaktadır. PIV tekniği, sistem parçaları iyi kurulduğunda ve senkronizasyonu sağlandığında, karmaşık akış alanlarının yerel ve faz-ortalama özelliklerini ve bir pompa çarkı içerisindeki türbülanslı akışları daha ayrıntılı ölçebilen güçlü bir yöntemdir (Zhao ve ark., 2009).

Yapılan literatür araştırmasında, Selçuk Üniversitesi'nin abone olduğu veri tabanlarından elde edilen makaleler, Google Akademik başta olmak üzere temin edilen kaynaklardan faydalanılmıştır. Çalışmalarda pompalar üzerinde PIV ve bazı benzeri akış görüntüleme uygulamaları yanında bazı önemli HAD çalışması yapan yayınlar da listelenmiştir. Yayın tarihi sırasına göre verilen çalışmalarda daha çok son 25 yılda yapılanlara öncelik verilmiştir.

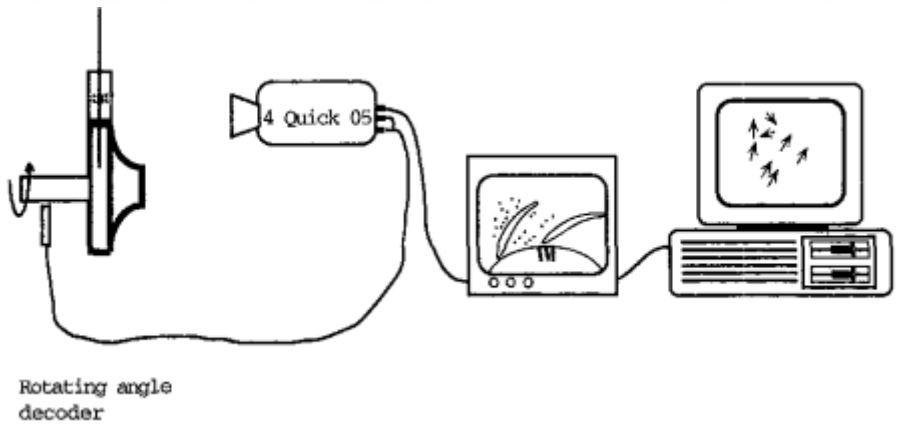
Pompalarda PIV uygulaması ile ilgili literatürdeki ilk çalışmalardan biri Paone ve ark. (1989) tarafından yapılmıştır. Çalışmada, santrifüj pompa çarkından ve salyangoz yapıdaki toplayıcıdan oluşan pompa çarkının çıkışındaki akışın hız değerleri PIV yöntemi ile incelemiştir. Farklı çalışma koşullarında yapılan deneylerde mutlak hız ve bağıl hız değerleri de belirlenmiştir. 300 d/d pompa devrinde yapılan deneyler tek noktada ölçüm yapan bir hız ölçme metodu olan Lazer Doppler Anemometry (LDA) ile karşılaştırılmıştır. LDA de alınan noktasal verilerin PIV deki verilerle uyum içinde olduğu belirtilmiştir. Düşük bir ölçüm alanında, az sayıda debi ve fotoğraf verisi incelenebilen çalışmada, PIV sonuçlarının gelişen teknoloji ile daha büyük alanlarda ölçülebileceği ve turbomakinalarda iç akışın belirlenmesinde kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Eksenel akışlı bir santrifüj pompa içerisinde akış analizi Akin ve Rockwell (1994) tarafından yapılmıştır. Akım çizgisi, hız konturları ve girdap değerleri olarak verilen anlık akış karakterleri ile pompa içerinde akış yapısının PIV ile anlaşılabileceği belirtilmiştir. Büyük boyutlu bir pompada yapılan 2 kanat arasında belirli bir kısmın incelendiği

çalışmada akış kontrol metotlarının kullanılabileceği ve çark çıkış bölgesinde oluşan ters akışların engellenebileceği söylenmiştir.

Visser ve Jonker (1995), çark içerisinde temel akış yapılarını sınırlı alanda LDA ile elde etmeye çalışmışlardır. Konu ile ilgili az sayıda olan deneysel çalışmaların öneminden bahsetmişler. Oniki ve on kanatlı çarkların denendiği ve anlık veriler elde edilen çalışmada pompa çarkı içerisinde dönümsüz bir akış yapısı ve düzgün bir hız dağılımı olduğunu söylemişlerdir.

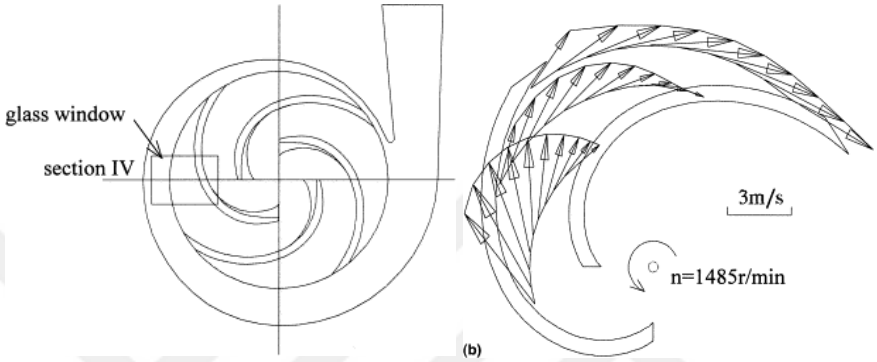
Sulzer pompa firması akışkanlar mekaniği laboratuvarı Ar-Ge çalışanları olan Eisele ve McMurry (1997) tarafından yapılan diğer bir çalışma difüzörlü bir pompa üzerinde akış görüntüleme üzerinde yapılan ilk çalışmadır. Çalışmada öncelikle pompa sanayisinin pompa içerisindeki akış yapısını anlamasının önemine vurgu yapılmıştır. Şekil 2.1'de şematik görünümü verilen deneysel çalışmada LDA ve PIV kullanılmıştır. Pompa çıkış bölgesinden difüzör etkileşimi ile dönümlü akış bölgeleri ve ters akışlar olduğu deneysel olarak ile kez görülmüştür. Akış yapısının pompa karakteristiğine etkisi de incelenmiştir. Çalışmada pompa çarkındaki ölçümler durağan (faz ortalamalı) halde yapılmadığı ve anlık değerler kullanıldığı için girdap vektörleri çıkış bölgesinde oldukça fazla oranda görülmüştür.



Şekil 2.1. Eisele ve McMurry (1997) çalışmalarında PIV deney düzeneği şematik gösterimi.

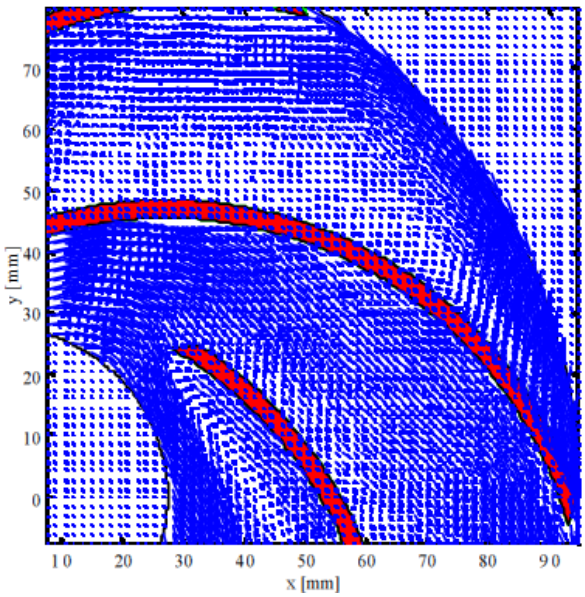
Li (2000), çalışmasında çark içerisindeki akışı inceleyerek viskoz etkilerin akışı nasıl etkilediğini araştırmıştır. LDA metodu ile yapılan ölçümlerde akışkan olarak yağ ve su kullanmıştır. Akışkanların kinematik viskozitelerini 1 ve 48 mm^2/s olarak almıştır. Çalışma sırasında yağın aynı debide suya göre basma yüksekliğinin daha fazla olduğunu ve pompalanması için daha fazla güç gerektirdiğini ancak verim olarak suyun yağa göre daha verimli olduğunu tespit etmiştir. Bunun yanı sıra akışkanların çark içerisindeki

durumlarını incelediği durumda pompanın optimum çalışma noktasında çalışırken çark içerisindeki hızın düzenli bir dağılım gösterdiğini, tasarım noktası üzerindeki farklı çalışma şartlarında ise çark içerisindeki akış yapılarında önemli miktarda bozulmalar meydana geldiğini tespit etmiştir. Sonuç olarak turbomakinaların tasarımı yapılırken kullanılacak akışkanın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin göz önünde bulundurulmasının ve pompanın mümkün olduğunca en verimli noktada çalıştırılmasının gerektiğini vurgulamıştır.



Şekil 2.2. LDV ile iki çark arasında ölçüm bölgesi ve elde edilen hız vektörleri (Li, 2000).

Pedersen ve Jacobsen (2000) 93x94 mm alandan floresan partikül kullanılarak görünür hale getirilen pompa içi akışta deneysel bir çalışmayı PIV ile yapmışlardır. Tasarım debisi dışında çarkın alın ve yanak bölgeleri arasında sabit bir bölgede anlık ve zaman ortalamalı hız değerlerini incelemişlerdir. Pompa içerisinde akışkan hızı ani artan yerlerde yüksek türbülans değerleri tespit etmişlerdir. Difüzörsüz bir pompa kullanıldığı için tasarım debisinde akış potansiyel akışa yakın olduğunu bu debinin dışındaki debi değerlerinde ters akışlar gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Akış alanında elde edilen temel hız vektörleri Şekil 2.3'te verilmiştir. Kameranın düşük çözünürlüğünden dolayı akış yapısı detaylı olarak incelenememiştir.



Şekil 2.3. PIV ile görüntülenen pompa çarkı içerisindeki hız vektörleri (Pedersen ve Jacobsen, 2000).

Sinha ve ark. (2001) difüzörlü bir santrifüj pompa çarkında akış karakteristiklerini incelemişler, pompa içerisindeki akışkanın difüzörle etkileşim bölgesinde oluşan durma noktaları ve ters akıştan dolayı türbülans kinetik enerji değerinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Difüzörlü bir pompa çarkını inceleyen sınırlı sayıda çalışmalardandır.

Uzol ve ark. (2002), iki kademeli bir turbomakina içerisindeki akış yapısını PIV ile incelemişlerdir. Zaman ortalaması kullanılan deneylerde yansımamaları önlemek için kırılma akışkan ve malzeme arasında ışık kırılma indeksi eşleştirmesi yapılmış, ayrıca stator ve rotor şeffaf malzemeden üretilmiştir. Akışkan-yapı etkileşimi ve türbülans değerleri incelenmiştir. 100 adet anlık ölçüm değerin ortalamasının alındığı çalışmada, faz ortalamalı ve anlık değerlerin karşılaştırılması da yapılmıştır. Sonuç olarak PIV'nin turbomakinalarda kullanılabileceği belirtilmiştir.

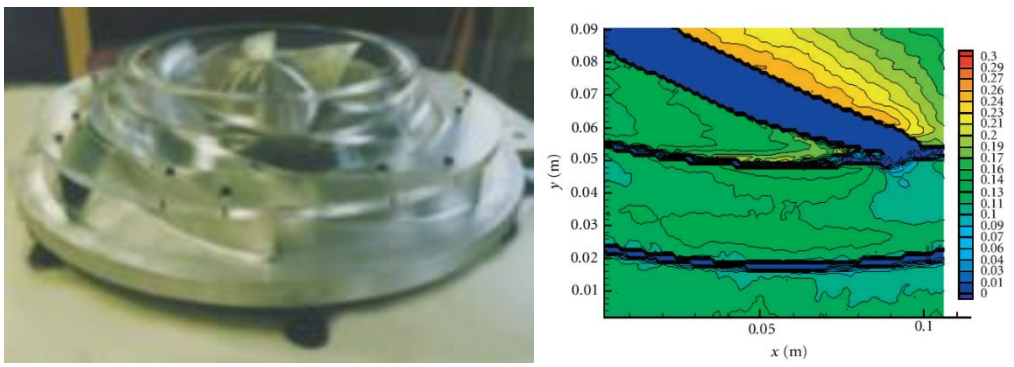
Stickland ve ark. (2003) tarafından yapılan bir çalışmada pompa içerisindeki ikincil akışlar (secondary flow) ilk defa deneysel olarak tespit edilmiştir. Ayna sistemleri ile görüntü alma düzlemleri oluşturulan PIV deney setinde, o günün deney seti imkanları çerçevesinde maksimum 350 d/d devirde 0.143 kg/s debide deneyler yapılmıştır. Elde edilen temel sonuçların önemi vurgulanmış ve bu deneysel sonuçların Ansys-Fluent ve benzeri açık kaynak kodlu programlarda kod yazılması veya modellerin geliştirilmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir.

Friedrichs ve Kosyna (2003), tasarım debisi dışındaki debilerde, farklı geometriye sahip pompa çarklarında kavitasyon oluşumunu PIV ile deneysel olarak incelemişlerdir. Kanat üzerindeki kavitasyon değerinin çark kanadının giriş açısına bağlı olduğunu, artan

kavitasyon oluşumu ile basma yüksekliğinin düştüğünü ve PIV'nin kavitasyon görüntüleme ve yerinin belirlemede de kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Choi ve ark. (2004), 4 ve 6 kanatlı silindirik kanat profiline sahip iki farklı pompa çarkında çok düşük hızlarda ve debilerde akış karakteristiğini PIV ile incelemişlerdir. 6 kanatlı pompa çarkının basma yüksekliği diğerinden yüksek olmasına rağmen verimleri yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Düşük dönme devirlerinden dolayı ikincil akışlar ve dönümlü akışlar gözlenmiştir. Her bir çarkın çıkış bölgesinde kanadın basınç yüzeyinde dışa doğru oluşan akış ve emme yüzeyi boyunca oluşan kanat yüzeyini takip eden akışların karakteristiklerinin çarkın verimine direkt olarak etki ettikleri sonucuna varmışlardır.

Wuibaut ve ark. (2006), çalışmalarında santrifüj pompa için iki farklı optik teknik kullanarak değişken akış hızlarında gerçekleştirdikleri iki ayrı deneysel çalışma sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Birinci teknikte PIV metodu ile akışkan olarak havayı kullanarak ölçüm yapmışlar, ikinci teknikte ise 2 boyutlu LDA metodu ile akışkan olarak su kullanarak ölçüm yapmışlardır. Özellikle pompa çıkış bölgesine odaklanılarak tasarım debisinde deneysel ölçümler yapılmıştır. Filtreleme ve veri işleme adımlarında uygun modeller kullanılmadığından dolayı hız değerlerinde çalkantının oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Pompa çıkış bölgesindeki çalkantının ise difüzör yapısına bağlı olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.4. Wuibaut ve ark. (2006) kullandığı pompa çarkı (solda) ve PIV ile elde ettiği akış yapısı (sağda).

Day ve McDaniel (2005) 3-9 L/d debiye sahip bir kalp pompasının içerisinde alyuvar yıkımı (hemoliz) oluşabilecek potansiyel bölgelerin belirlenmesi için 3 boyutlu PIV yöntemini kullanmışlardır. Hem yüksek hem de düşük debilerde pompa içerisinde ters ve dönümlü akış bölgeleri tespit etmişlerdir. İncelenen pompa içerisinde Reynolds gerilmeleri incelenmiş ve kalp pompasında istenmeyen bir durum olan hemoliz olma eşiğinin altında olduğu görülmüştür.

Krause ve ark. (2006), çalışmalarında pompa çarkı içerisindeki akışı incelemek için zamana bağlı PIV yöntemini kullanmışlardır. Enkoder kullanmadıkları için pompa ile PIV ölçüm sistemini, 50-100Hz aralığında aynı frekansta çalışmasını sağlayarak ölçüm yapmışlardır. Bu yöntem sayesinde durağan rejimde oluşan girdapları görselleştirmeleri mümkün olmuştur. Sonuçları farklı çalışma noktalarından almışlardır. Tasarım debisi dışındaki debilerde dönümlü ve ters akışların olduğunu tespit etmişlerdir.

Qian ve ark. (2007), bir pompa içerisinde hemoliz özelliklerini PIV ile incelemişlerdir. 2-6 L/d arası debilerde yapılan deneylerde 80-120mmHg basma yüksekliği elde edilmiştir. En iyi akış yapısı 4 L/d debide oldukça düşük türbülans ve akış ayrılması bölgesi ile elde edilmiştir. Düşük çözünürlükte yapılan PIV çalışmasında çözünürlük ve kamera özelliklerinden dolayı, az sayıda vektör ve sınırlı bir bölge incelenebilmiştir. Pompada PIV analizin hemoliz oluşabilecek yerlerin tahmin edilebileceği ve bunun hemoliz testlerine göre daha kolay ve uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

Yang ve ark. (2007), akışkan olarak tuzlu su kullanılan bir pompa sistemini PIV ile incelenmiştir. Elde edilen görüntüleri analiz etmek için kendi geliştirdikleri yazılımı kullanmışlardır. Özellikle kanadın basınç yüzeyinde yüksek hız değerleri, emiş yüzeyinde ise düşük hız değerleri elde etmişlerdir. PIV'nin akış modellemede ve modellerin geliştirilmesinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Avrupa'da farklı üniversitelerdeki altyapılar kullanılarak pompalarda PIV incelemelerinde gelinen noktaları değerlendiren çalışmada (Woisetschläger ve Göttlich, 2007) PIV yönteminin kompresör, pompa, türbin gibi turbomakinalarda uygulama yöntemlerinden bahsedilmiş, gelişen teknolojik imkanlar ile daha detaylı çalışmalar yapılabileceği belirtilmiştir.

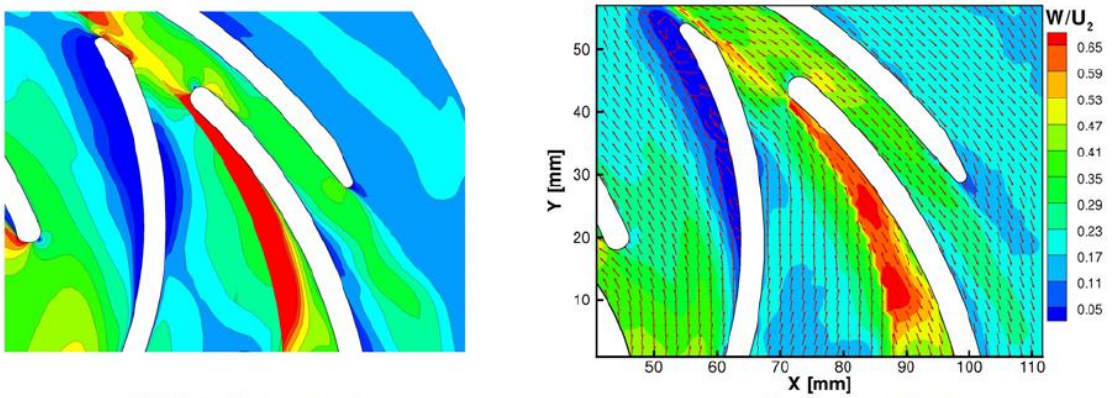
Turbomakinaların içinde 3 boyutlu akış yapısından dolayı geometrilerinde küçük bir değişikliğin bile basma yüksekliği, debi ve pompa performansını etkileyebileceği belirterek pompa çark yapısını optimizasyon teknikleri ile geliştirilen pompa çarkını Westra (2008) PIV ile denemiştir. Düşük devirler için tasarlanmış pompa çarkında deneyler 75 ve 150 d/d için yapılmıştır. Kanadın basınç bölgesinde düşük hız emiş bölgesinde ise nispeten yüksek hızlar elde edilmiştir. Difüzörsüz olan tasarlanan pompada yapılan HAD çalışmalarının PIV sonuçları ile bazı benzerlikler elde etmişlerdir.

Ertürk ve ark. (2008), bir dişli pompa içerisinde türbülanslı akışı zaman çözünürlüklü PIV ile araştırmışlardır. Pompa içerisindeki akış hareketi dişli dönmesinden etkilenmektedir. Dişlileri terk eden akışın hız yapılarının dişlinin yapısına bağlı olarak

değiştiğini, bunun da akış alanını, pompanın performansını ve verimini etkilediğini söylemişlerdir. Dönen bölümler içerisindeki akış çok karmaşık, dönümlü, akış ayrılmasının olduğu, türbülanslı bir yapı oluşturmaktadır. Ayrıca pompa giriş haznesindeki akışın çıkış tarafına göre de daha karmaşık olduğunu belirtmişlerdir.

Tek kanatlı bir çarkın içerisindeki akış yapısı sayısal ve deneysel olarak Benra ve Dohmen (2008) tarafından incelenmiştir. Sayısal çözüm için zamana bağlı Navier Stokes denkleminin çözümü, deneysel yöntem olarak da PIV kullanılmıştır. Ayrıca pompa içerisindeki eksenel ve radyal yükler de sayısal olarak ve özel olarak tasarlanmış ve yataklanmış bir sistem üzerinde ölçülerek de belirlenmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların uyum içinde olduğu ve sayısal çalışmaların sonuçlarının daha detaylı olarak sunulabildiği belirtilmiştir.

Feng ve ark. (2009a) bir pompa çarkı içerisinde akış yapısını PIV ve Detached Eddy Simulation modeli ile ANSYS-CFX ile tasarım debisinin (Q_d) altındaki debi değerlerinde incelemişlerdir. Hem türbülans değerleri hem de akış değerleri deneysel ve sayısal olarak yakın çıktığı belirtilmiştir. 0.25 Q_d ve 0.5 Q_d debilerinde özellikle emiş bölgesinde akış ayrılmaları görülmüştür. 0.75Q_d debisinde ise akış ayrılması oldukça azalmıştır. HAD ile yapılan analizlerde dönümlü akışlar deneysel yöntemde elde edilene benzer şekilde bulunmuştur. Akışın sınır tabakada HAD sonuçları ile uyumlu olmadığı, ayrıca PIV yönteminde kullanılan filtre metodunun da uygun olmadığı görülmüştür. Bunlara rağmen akış yapısının benzerlik durumunun iyi olduğu söylenebilir.



Şekil 2.5. Pompa içerisinde PIV ve HAD sonuçların karşılaştırılması (Feng ve ark., 2009a).

Feng ve ark. (2009b) başka bir çalışmalarında pompa çarkında farklı akış ölçüm teknikleri olan PIV ve LDA analizlerini değerlendirmiş, PIV'nin tüm alanın akış karakteristiğini inceleyebildiği için LDA ye göre daha başarılı olduğunu

vurgulamışlardır. Bunun yanında PIV ile elde edilen sonuçların HAD çalışmalarında türbülans değerlerinin modellenmesi için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Farklı kanat sayılarının etkisinin ele alındığı bir çalışma Shouqi ve Kai (2010) tarafından yapılmıştır. Orijinal olarak 5 kanatlı tasarlanan pompa kanat sayısı 4-7 arasında değiştirilmiş ve akış yapısını sayısal olarak ve pompa deney setinde deneysel olarak incelemişlerdir. Artan kanat sayısı ile basma yüksekliği artmıştır. 7 ve 5 kanatlı kanat profilinde verim değerleri %77.45 ve %75.63 ile diğerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca kanat sayısı değişikliğinin bir pasif akış kontrolü yöntemi olduğu ve çark içinde emiş bölgesinde ve çıkış bölgesinde akış karakteristiğini oldukça etkilediği belirtilmiştir.

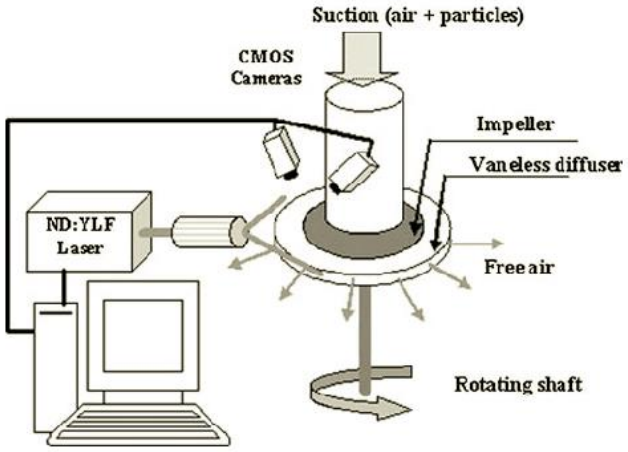
Radyal tip bir pompanın PIV ile analizi akışkanın hava olması durumunda Atif ve ark. (2010) tarafından gerçekleştirilmiştir. PIV tekniği ile tüm pompada yapılan çalışmada tek kamera ile ölçümler almışlardır. Ölçümde tüm alan değerlendirildiği ve difüzörden dolayı yansımalar ve gölgeler oluştuğu için akış bölgesinin analizi az sayıda vektörle yapılabilmiştir. Akışkan- yapı etkileşiminin özellikle çarkın çıkış bölgesinde etkili olduğu belirtilmiştir.

Ertürk ve ark. (2011), bir dişli pompanın emiş bölgesinde türbülanslı akışı, zaman çözünürlüklü PIV ile araştırmışlardır. Pompa içerisindeki akış hareketi dişlilerin dönmesinden etkilenmektedir. Akış görüntülemek için küçük hava kabarcıkları kullanmışlardır. Dönen bölümler içerisindeki akış çok karmaşık, dönümlü, yoğun akış ayrılmasının oluştuğu türbülanslı bir yapı oluşturmaktadır. Pompa giriş haznesindeki akışın çıkış tarafına göre daha karmaşık olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca anlık ve zaman ortalamalı hız değerlerini vererek akıştaki türbülans etkisini incelemişlerdir.

Su içerisine yerleştirilen ve 1500 d/d ile dönen disk şeklinde bir testere dişlinin akış yapısına etkisi PIV sistemiyle incelenmesi Unadkat ve ark. (2011) tarafından gerçekleştirilmiştir. Testereye yakın bölgede mutlak hız değerleri ve türbülans değerleri incelenmiştir. LES modelinde yayılma oranını PIV'den alarak HAD çalışmaları yapmışlardır. Modelde global olarak uygulanan filtreleme modelinin PIV yöntemi ile daha fazla uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir.

Disiplinler arası bir çalışmada difüzörsüz tek kademeli bir kalp pompasının içerisindeki akış yapısı PIV ve HAD ile incelenerek en az hemoliz için yeni bir tasarım Giridharan ve ark. (2011) tarafından yapılmıştır. Girdap değerlerinin sayısal ve PIV ile yapılan deneysel olarak uyum içerisinde olduğu ve kayma gerilmesi değerinin 400Mpa olan hemoliz oluşma değerinden oldukça düşük olduğunu söylemişleridir.

Kanatsız bir difüzör içerisindeki akış yapısı Dazin ve ark. (2011) tarafından incelenmiştir. Oldukça kapsamlı bir literatür çalışması sunulan yayında turbomakinalarda PIV kullanımının önemi vurgulanmış ve alın ile yanak arasında 3 farklı düzlemde akış yapısı 2 boyutlu PIV ile belirlenmiştir. Ayrıca bir basınç sensörü ile farklı bölgelerde ölçümler de yapmışlardır.



Şekil 2.6. PIV ölçüm sistemi şematik gösterimi (Dazin ve ark., 2011).

Scheinherr (2011) radyal pompa modellerindeki akış alanlarını PIV ölçüm tekniği ile deneysel olarak incelemiştir. İncelemeyi yapılabilmek için pompa çarkını pleksiglas (akrilik) malzemeden orijinal boyutlarında imal etmiştir. Çalışma sonucunda PIV ölçüm tekniğinin başarılı bir yöntem olduğunu ve radyal pompalarda kullanımında kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar elde edilebileceğini belirtmiştir.

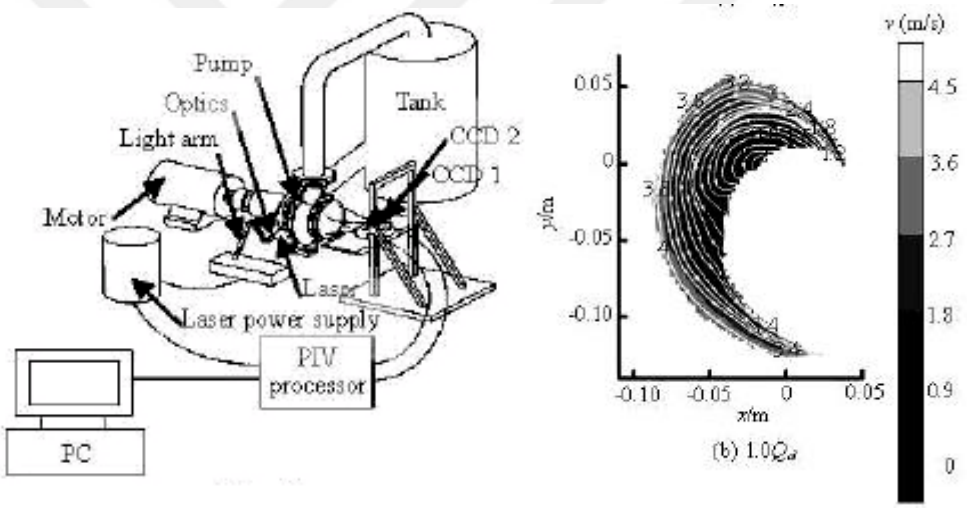
Wu ve ark. (2011), tasarım debisinde çalışan bir santrifüj pompadaki iç akış alanını, floresan boya ve PIV tekniği ile incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda; çark içerisinde hız dağılımlarını belirlemişlerdir. PIV ölçümleri farklı zamanlarda çekilen beş resimde anlık akış dağılımının yaklaşık aynı olduğunu göstermiştir. Bu da tasarım debisi koşullarında ölçümlerin güvenilirliğini gösterdiğini belirtmişlerdir.

Radyal bir kompresörlerde akış karakteristiği zamana bağlı olarak Guillou ve ark. (2012) tarafından incelenmiştir. PIV ile yapılan deneysel çalışmada farklı devirlerde giriş bölgesinde hız değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerlerle ters akışın ve ikincil akışların oluştuğu bölgeler belirlenebilmiş, bu verilerin çarkın yeniden tasarımında dikkate alınabileceği belirtilmiştir.

Tabib ve ark. (2012) dikdörtgen bir tank içerisine yerleştirilmiş açık tip iki farklı çark modeli için HAD ve PIV analizini yaparak türbülans ve akış karakteristiklerini incelemişlerdir. Endüstride oldukça fazla kullanılan bu tip çarkların literatürde çok az

incelendiğini belirtmişlerdir. Zamana bağlı değerler alındığı ve zaman ortalaması alınmadığı için denenen RANS ve LES modellerinden, LES modeli sonuçlarının PIV sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu tip fan ve çark analizlerinde PIV'nin kullanılabileceği de belirtilmiştir.

Liu ve ark. (2012), 2 kanatlı bir santrifüj pompada Q/Q_d (debi/tasarım debisi) 0.8, 1.0 ve 1.2 oranlarındaki farklı debilerde salyangozlu tip pompada akış yapısını deneysel olarak PIV ile ve sayısal olarak OpenFOAM programı ile incelemişlerdir. Deneysel ve sayısal değerlerin özellikle tasarım debisinde uyum içinde olduğu, ayrıca tasarım debisi haricindeki debilerde de akış ayrılmasının oluşabileceğini söylemişlerdir. PIV ile uyum içinde olan HAD çalışmalarının pompa tasarımında kullanılabileceğini vurgulamışlardır. Çalışmada kullanılan deney düzeneği ve mutlak hız vektörleri, tasarım debisi için Şekil 2.7'de verilmiştir.



(a) (b)

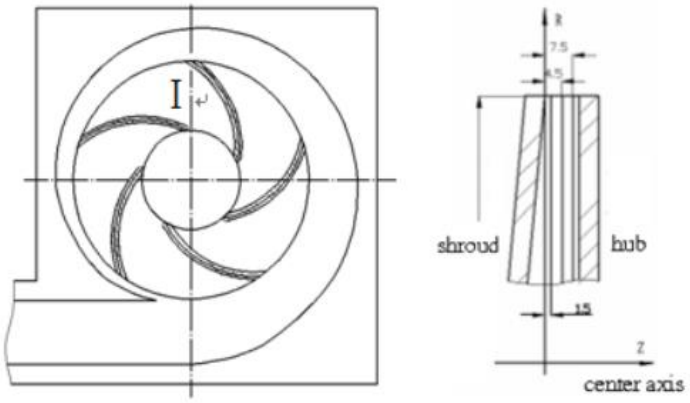
Şekil 2.7. (a) PIV deney düzeneği ve (b) tasarım debisinde elde edilen mutlak hız konturları (Liu ve ark., 2012).

Scheit ve ark. (2012), radyal fanlarda kanat sarım açısının verim ve gürültü açılarından etkilerini HAD ile sayısal, LDA ile akış yapısı, mikrofon ile de gürültü düzeylerini deneysel olarak incelemişlerdir. İki farklı çark sarım açısı incelenen çalışmada deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır. Düşük sarım açılı fanların verim ve akustik olarak daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Campo Sud (2012), Katalonya Teknik Üniversitesinde yaptığı doktora tez çalışmasında dişli pompalarda akış karakteristiklerini sayısal ve deneysel olarak karşılaştırmıştır. Yapılan HAD çalışmasında hacimsel verim değerleri, yapılan bazı kabuller ve basitleştirmelerden dolayı tam olarak deneysel değerlerle uyumlu olmasa da

yaptığı çalışmanın pompa içerisindeki karmaşık akış yapısını modellemekte ve kavitasyon etkilerini görmekte faydalı olduğu belirtilmiştir.

Yang ve ark. (2012a) özel tasarlanmış bir pompa çarkında iki kanat arasında akış akışı görüntülemek için 8-12μm boyutunda partiküller kullanmış ve 3D-PIV ile üç boyutlu PIV ölçümü yapmışlardır. 1125 d/d ve 5.34 L/s'de yapılan çalışmada, farklı pozisyonlar incelenen çalışmada, çark merkezinden artan yarıçap değeri ile hızın çevresel bileşeninin arttığı söylenmiştir. Farklı analiz yöntemleri ile yapılan hata analizinde hata oranının %3.14 civarında olduğu ve bu hata oranı ile pompa çarkında PIV uygulamasının CFD kodları için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.8. Pompa çarkı içerisinde ölçüm bölgeleri.

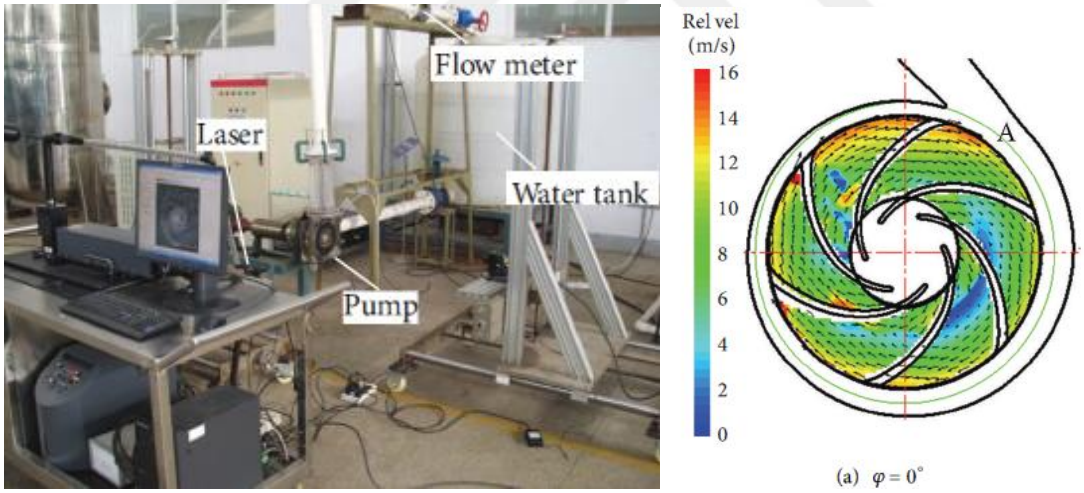
Japon bilim insanları tarafından yapılan bir başka çalışmada (Yamane ve ark., 2013) akış alanının görüntülemek için 3 kat büyütülmüş bir kalp pompasındaki akış karakteristikleri PIV yöntemi ile belirlenmiştir. Akış alanını 4 farklı bölgeye ayırıp birleştirerek 4 kanatlı bir çarkın tüm bölgelerinde akış yapısını elde etmişlerdir. 2-8L/s debilerde ve 2300 d/d devirlerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada sızıntı akış bölgelerinin ve sızıntıların miktarının azalttığını ve kanat bölgelerinde büyük akış ayrılmaları olmadığı için tasarımın uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Ertürk ve ark. (2013), çalışmalarında türbülanslı akışların olduğu durumlarda PIV'nin kullanımının öneminden bahsederek, zaman çözünürlüklü PIV ile dişli bir pompadaki akış karakteristiklerini incelemişlerdir. 32x32 ile 64x64 arasında dört farklı piksel çözünürlüğünde yaptıkları deneylerde, çözünürlüğün türbülans kinetik enerji yayılma oranına etkisinin yüksek olduğunu belirtmişleridir. Belirsizlik analizi de yapılan çalışmada 60-240 arasında farklı sayıda görüntüler kullanılmış en az hata oranının 240 adet alınan görüntüde olduğunu (0.5 piksel) ve farklı imaj değerlerinde %2.8-6 arasında

değiştiğini söylemişlerdir. PIV ile alınan görüntü adeti arttıkça hata oranı düşeceğini belirtmişlerdir.

Bir San-Tez projesinde geliştirilen santrifüj bir fanın üfleme ve emiş bölgeleri stereo-PIV yöntemi kullanılarak Özer ve ark. (2013) tarafından incelenmiştir. Akış alanında periyodik kesitlerde hız bileşenleri elde edilmiştir. Fanın emiş ve üflemesi ağzındaki ortalama akış profilleri sunulmuştur. Günümüz teknolojisi ve enerji verimliliği ihtiyaçları düşünüldüğünde, PIV yönteminin akış yapılarının geliştirilmesinde kullanılabileceği ilave edilmiştir.

Dai ve Dong (2013) düşük özgül hıza sahip salyangozlu bir santrifüj pompada 2 boyutlu PIV ölçümünü kanat açıları 0-50° arasında değiştirilerek incelenmiştir. Çalışmada akışın giriş bölgesinden çıkış bölgesine doğru kademeli olarak yükseldiği belirlenmiştir. Çarkın orta bölgesinde mutlak hız değerlerinin artan debi değerleri ile arttığı belirtilmiştir. 6 kanatlı pompa hız değerlerimin ise kanadın basınç tarafından emiş tarafına doğru arttığı görülmüştür. Tüm pompanın değerlendirildiği çalışmada çözünürlük seviyesi ve vektör adetleri sınırlı sayıda kalmıştır.



(a) (b)

Şekil 2.8. (a) PIV deney düzeneği ve pompa çarkı içerisinde elde edilen bağıl hız konturları (Dai ve Dong, 2013).

Liu ve ark. (2013), yaptıkları bir diğer çalışmada pompa içerisinde daimi olmayan hız değerleri sayısal olarak CFX ile ve deneysel olarak PIV ile belirleyerek karşılaştırılmıştır. Sayısal model olarak Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (URANS) modeli kullanılmıştır. 6 kanatlı Pompa çarkının konumları 0-45° arasında değiştirilerek, mutlak ve bağıl hız değerleri incelenmiştir. Seçilen farklı noktalarda yapılan PIV-HAD hız karşılaştırmalarında değerler arasındaki bağıl hatanın %2.4 ile

%0.76 arasında değiştiği bulmuşlardır. Ancak zaman ortalaması olmayan değerlerde bu kadar düşük hata olması ilginç bir sonuç olması yanında, akış yapısı arasında da farklılıklar gözlenmiş, bu farkın PIV yönteminde yapılacak iyileştirmelerle azalabileceği belirtilmiştir.

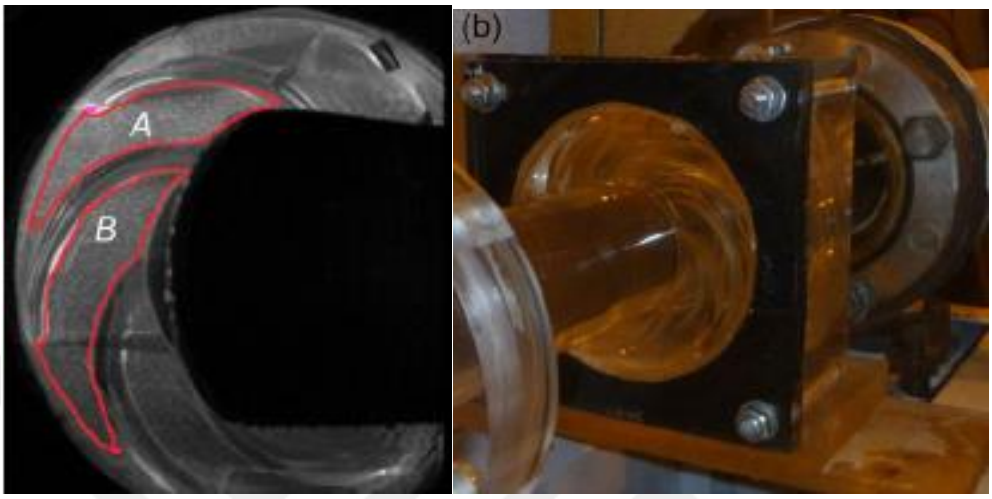
Dupont ve ark. (2014) difüzörlü bir pompa içerisindeki sızıntı akışlarını farklı düzlemlerde PIV ile deneysel ve Star CCM+ programı ile sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada sızıntı akışlarının sadece pompa verimi üzerinde etkisi olmadığı aynı zamanda pompa içerisindeki akış yapısında da oldukça etkili olduğu ve tasarım ve analizlerde dikkate alınması gereken bir fiziksel etkiye sahip olduğunu belirtilmiştir.

Keller ve ark. (2014) salyangoz tip bir santrifüj pompada daimi olmayan akış yapılarını özellikle tasarım debisinin üzerindeki ($1.5Q_d$) değerlerde PIV ile incelemişlerdir. 2 boyutlu silindirik tip bir kanat yapısına sahip pompa çarkı şeffaf malzeme ile üretilmiştir. Florans aydınlatmalı partiküller kullanılan deneylerde birbirine dik eksene yerleştirilen kamera ve lazerle, farklı düzlemlerde çarkın 32 farklı pozisyonda olduğu durumlarda görüntüler alınmıştır. Çalışmada yalnızca hız değerleri değil aynı zamanda HAD çalışmalarında direkt sonuçlardan biri olan TKE değerleri de verilmiş ve HAD analizleri ile karşılaştırılabileceği belirtilmiştir.

Yalçın (2015), çalışmasında santrifüj bir pompa çarkındaki akışı deneysel olarak incelemiştir. Pompa çarkını akışkan olarak havayı kullandığı özel bir deney tesisatında incelemiştir. Salyangoz ya da difüzör gibi elemanların çarkla etkileşim halinde olması istenmediği için bu elemanlar deney tesisatında kullanılmamıştır. Deneylerde yanak kısmı kaldırılmış açık bir radyal pompa çarkı tercih edilmiştir. Çalışmada düzenli olmayan akış koşullarını incelenmek istendiği için çark çıkışına bir sabit engelin konulmuştur. Bu engelin çark çıkışındaki akış koşullarını değiştirdiğini ve akışın aksi yönde olmasına rağmen engelin etkisinin çark ortasına kadar ilerlediğini tespit etmiştir. Difüzörün de pompa iç akışına benzer etkisinin olduğu belirtilmiştir.

Zhou ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada difüzörlü bir pompada gerçek çalışma şartları dışında tasarım debisinin altındaki debi değerleri olan $0.2\ Q_d$ ve $0.4Q_d$ değerlerinde PIV ve HAD sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sayısal modellemede ANSYS-Fluent 14.5 ile SST k-ω modeli, deneysel çalışmada özel tasarlanan deney setinde 2 boyutlu PIV kullanılmıştır. Ölçüm yapılan çark içerisinde maskeleme yapılarak yalnızca 2 kanat aralığı belirlenen bir ölçüm bölgesinde incelenmiştir. Çalışmada çarkın çapı 59.5mm ve motor devri 2850 d/d'dır. Analizler düşük debilerde yapıldığı için dönüm bölgeleri ve ters akışlar görülmüştür. Difüzör kısmı arka bölgede olduğu için çarkın ön

kısmına akış anlamında bir etkisi bulunmamaktadır. Faz ortalamalı yapılan analizlerde 300 fotoğrafın ortalaması alınmıştır. PIV ve HAD karşılaştırılması mutlak hız bağıl hız ve belirli noktalarda çizgiler halinde verilmiştir. Bu alanda yapılan kapsamlı çalışmalardan biridir.



Şekil 2.9. PIV sonuçlarında ölçüm alanı maskeleme ve deney düzeneği (Zhou ve ark., 2015).

Shi ve ark. (2015) tarafından yayınlanan bir çalışmalarında PIV metodunun akış karakteristiğini belirlemede ileri teknoloji ve etkili bir metot olduğunu belirtmişler ancak çalışmada yüksek hızda pompa çarkında yapılan analizlerin proseslerindeki güçlüklerden bahsetmişlerdir. Bunun için partikül boyutu ve görüntüdeki grilik oranını incelemişlerdir. Bunun yanında proses mekanizmasında uygun çapraz korelasyon metodunu kullanılarak yanlış hesaplanan vektörlerin azaltılacağı belirtilmiştir.

Aksoy ve ark. (2015) 750 d/d hızda dönen bir pompa çarkındaki zamana bağlı ve anlık hız değerlerini incelemişlerdir. Anlık hız değerlerinde düzensiz olan akış yapısının zaman ortalama değerlerinde düzeldiğini söylemişlerdir. Ayrıca elde edilen sonuçların HAD sonuçları ile karşılaştırılabileceğini belirtmişlerdir.

Wang ve ark. (2015) farklı profillere sahip pompaların çıkış borularındaki kesitlerde akış karakteristiklerini deneysel PIV ile ve sayısal olarak incelemişlerdir. Borudaki girdapların yapısının ve büyüklüğünün çoğunlukla pompa çıkısındaki difüzüre bağlı olduğu bildirilmiştir. RSM-S türbülans modeli ile elde edilen değerler PIV ile elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır.

Santrifüj bir ekstraktörün salyangozu etrafındaki akış yapısı PIV ile Xu ve ark. (2015) tarafından incelenmiştir. Hız dağılımı, akım çizgileri, duvar bölgelerine yakın ve dönel bölgelerde akış yapılarını tespit etmişlerdir. Dönel referans sistemine göre akış

yönüne paralel yönde akış ayrılmaları ve dönümlü akışlar görülmektedir. İz düşüm hızın büyüklüğü ve radyal yöndeki hız ektraktörün dönüş hızına ve debiye bağlı olarak oldukça değiştiği ifade edilmiştir.

Yapılan bir diğer çalışmada (Li ve ark., 2016a) düşük devirde denenen bir pompada çark bölgesinde ve pompa giriş bölgesinde akış karakteristikleri PIV ile incelenmiştir. Akış karakteristiğinde hız değerleri vektörel ve kontursal olarak ifade edilmiş ayrıca girdap yapıları belirlenmiştir. Akış özelliklerinin debi ile oldukça fazla etkilendiği belirlenmiştir. Akışın temel olarak çark girişinden çıkısına doğru olduğunu ve değişen debilerde giriş bölgesinde maksimum hız değerinin 7.49m/s olduğunu tespit etmişlerdir. Alın ile yanak bölgelerine yakın yerlerde hızın daha az olduğu orta bölümde daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Sabit dönme hızında yanak bölgesine yakın bölgedeki çevresel hız etkileşimde olduğu akışı oldukça yüksek hızlara ulaştırmıştır. Artan debi değeri ile de girdap oluşumunun azaldığı görülmüştür.

Pompa çarkına benzeri geometrik yapıya sahip bir karıştırıcının kullanıldığı tankın içerisinde farklı düzlemlerdeki akış yapısı deneysel olarak PIV ile sayısal olarak HAD metodu RANS ile Zou ve ark. (2016) tarafından yapılmıştır. Çok fazlı akışın incelendiği çalışmada çark dönüş hızı, partikül büyüklüğü ve akış debisinin etkileri incelenmiştir. Tekli ve ikili çarkın denendiği çalışmada ikili çarkın %48 daha fazla enerji tüketmesine rağmen karıştırma oranını %198'e çıkardığı türbülans yapısı incelendiğinde tespit edilmiştir. Bunun yanında homojenliği arttırdığı ve tankın üst bölgesindeki hız değerini de artırdığı gözlenmiştir.

Li ve ark. (2016b) iki farklı partikül kullanarak PIV içerisindeki akış karakteristiklerini belirlemişlerdir. Düşük partikül büyüklüklü yüksek özkütleye sahip alüminyum partikül ve büyük çaplı suya yakın özgül ağırlığa sahip gümüş kaplı küresel partikül kullanılmıştır. Bu partiküller çark içerisinde incelenerek analizler yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Bazı görüntü bölgelerinde, detay geometriye sahip yerler dışındaki alanlarda büyük farklılıklar görülmemiş ve akış karakteristiği yaklaşık aynı olmuştur. Bunun yanında gümüş kaplı partiküllerin çark içerisinde basınç yüzeyinden emiş yüzeyine olan akış yapısını daha iyi yansıttığı belirtilmiştir.

Aksoy ve ark. (2016) 6 kanatlı bir pompa çarkının 1425 d/d da yapılan deneysel PIV deneylerini 5 farklı debi değeri için sunmuşlardır. Çalışmada çark içerisinde bir aralıktaki mutlak hız konturları ve vektörleri, bağıl hız konturları ve vektörleri ve TKE değerleri verilmiştir.

Bir pompa içerisindeki akış profili TR-PIV ile Mattern ve ark. (2017) tarafından yapılmıştır. Proper Orthogonal Decomposition (POD) analizi de yapılan çalışmada çark içerinde farklı noktalarda akış içerisindeki üçüncü hız bileşeni de hesaplanmıştır. Anlık değerlerdeki gürültü ve hatalardan dolayı düzgün olmadığı, ortalaması alınan değerlerin akış karakteristiğini daha iyi yansıttığı belirtilmiştir.

Pompa içerisinde zamana bağlı değişen akış yapısı, tasarım debisi dışındaki çalışma noktalarında Li ve ark. (2017) tarafından incelenmiştir. Tasarım debisinin %20 debi değerinde PIV ile yapılan deneylerde bağıl hız değerleri ve girdap değerleri verilmiştir. Çarkın çıkış bölgesinde akışkan-yapı etkileşiminin olduğu yerlerde ters akışlar, ikincil akışlar ve girdaplar oluştuğu bildirilmiştir. 7 farklı konumda yapılan analizlerde maksimum bağıl hız 5m/s olarak bulunmuştur.

İki fazlı akışın deneysel olarak incelendiği çalışmada Shi ve ark. (2017) PIV'nin etkili bir metot olduğunu ancak pompalarda uygulamalarda su içindeki baloncuklar, pompa-lazer-kamera yerleşimindeki zorluklar, yansıma problemleri ve senkronizasyon zorluğu yüzünden oldukça zor olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle görüntülerin işlenmesi için farklı modeller kullanarak analiz etmişler ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Yeni geliştirilen modelin analizde standart metotlara göre daha iyi olduğunu ve akış yapısını daha iyi temsil ettiğini söylemişlerdir.

Yapılan literatür araştırmasında santrifüj pompalarda sayısal ve PIV yöntemin uygulanmasına yönelik Türkiye'de herhangi bir çalışmaya rastlanmamış, uluslararası literatürde ise konu ile direkt olarak ilintili sınırlı sayıda çalışma bulunmuştur. Literatürde bulunan pompa çarkında akış görüntüleme alanında yapılan çalışmaların birçoğunda genellikle salyangozu veya difüzörü iptal edilerek incelendiği için pompanın gerçek çalışma koşullarını yansıtmamaktadır. Ayrıca pompalar genellikle pompanın tasarım koşulları dışında oldukça düşük debi ve çark dönme devirlerinde incelenmiştir. Bunun yanında çok kademeli difüzörlü pompalarda pasif akış kontrolünün (ara kanat ilavesi ve kanat sayısında değişiklik gibi) pompa çarkına uygulanması konusunda bir çalışmaya ise rastlanmamıştır. Ayrıca literatürdeki yayınlarda düşük çözünürlüklü kameralar kullanıldığı ve PIV görüntülerine uygun olmayan filtreler kullanıldığı için düzgün görüntüler bazı çalışmalarda elde edilememiştir. Literatürde benzer yayınların bazıları daha iyi anlaşılması için karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Pompada PIV uygulamaları alanında karşılaştırmalı literatür taraması.

Yazar(lar)	Dönme hızı (d/d)	Debi değerleri	Gör. sayısı	Çark çapı (mm)	Pompa tipi	HAD	Faz ort.
Sinha ve ark. (2001)	890	2.52-3.78L/s	4	101.6	Salyangozlu santrifüj	-	-
Wuibaut ve ark. (2006)	1710	0.1 Q_d	-	256.6	Salyangozlu	-	-
Feng ve ark. (2009a)	1450	0.25-0.75	200	75.25	Difüzörlü santrifüj	+ CFX	+
Atif ve ark. (2010)	1710	0.1 Q_d	100	256.6	Difüzörsüz radyal	-	-
Westra (2008)	150	0.8-1.2 Q_d	50	127.5	Difüzörsüz santrifüj	+	-
Dazin ve ark. (2011)	1200	0.2 m^3/h	-	256.6	Radyal difüzörsüz	-	-
Zhou ve ark. (2015)	2850	$Q=0.2\text{-}0.4Q_d$	300	59.5	Difüzörden ölçüm	+ 2 boyutlu RANS	-
Tez çalışması	**1900-2850**	**0.85-1.0-1.15 Q_d (6.7-14.4m^3/h)**	**500**	**252.0**	**3 kademeli santrifüj, difüzörlü**	+	+

Bu tez çalışmasında özel olarak kurulan bir pompa deney düzeneği ile PIV yöntemi kullanılarak 4 kanatlı, ara kanat ilaveli 4 kanatlı ve 6 kanatlı olmak üzere 3 farklı pompa çarkı için 1900 ve 2850 d/d pompa devirlerinde 1200x1600 piksel çözünürlüklü geniş lensli kamera kullanılarak deneysel veriler elde edilmiştir. Ayrıca faz ortalamalı 500 görüntü durağan halde alınarak ortalama değerler sunulmuştur. Pompa çarkları tasarım debisi altında 0.85 Q_d, tasarım debisinde 1.0Q_d ve tasarım debisi üzerinde 1.15Q_d debi değerlerinde denenmiştir. Tez çalışmasında denenen çarklardan 6 kanatlı pompa çarkı aynı zamanda ticari olarak üretilen ve kullanılan bir pompadır. Deneysel elde edilen bu akış yapısı HAD programı olan ANSYS-Fluent ile elde edilerek sonuçlar karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Yapılan bu çalışmanın hem sayısal hem de sadece basma yüksekliği ve verim ifadeleri dışında, akış karakteristiklerini içerecek şekilde deneysel olarak yapılması açısından özgün yanları vardır ve literatüre katkısı olacaktır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasında 3 farklı pompa çarkı için analizler sayısal ve deneysel olarak yapılmıştır. Sayısal çözümde ANSYS-Fluent programı, deneysel çözümde PIV yöntemi kullanmıştır. Ayrıca hem deneysel hem sayısal olarak pompa karakteristik özellikleri de elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen, HAD ile deneysel sonuçlar kıyaslanmıştır. PIV deneyleri tasarlanan ve kurulumu tamamlanan özel bir deney setinde yapılmıştır.

Kullanılan materyal, deneysel çalışmalar için pompa, şeffaf malzemeden yapılan pompa çarkları, difüzör ve kapaklar, elektrik motoru, frekans kontrolcüsü ve bağlantı elemanlarıdır. Bunun yanında PIV sisteminde kullanılan hızlı kamera, lazer, zamanlayıcı, 3 eksenli hareket mekanizmaları, enkoder, gümüş kaplı partiküller ve deney bilgisayarıdır. Performans karakteristiklerinin belirlenmesi için de basınçölçer, debimetre, güç analizörü, akım ve voltaj ölçer kullanılmıştır. PIV ve performans deneylerinin yapıldığı sistemde bulunan borular, fitre, çekvalf, su deposu, vana, filtre sistemi de diğer ekipmanlardır. HAD çalışmaları için sonlu hacimler metodu ile çözüm yapan ANSYS-Fluent 16.1 programı tercih edilmiş ve çalışmalar 96 GB RAM ve 12 çekirdek işlemcisi olan Dell T7500 iş istasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan materyal, uygulanan sayısal ve deneysel yöntemler sonraki bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

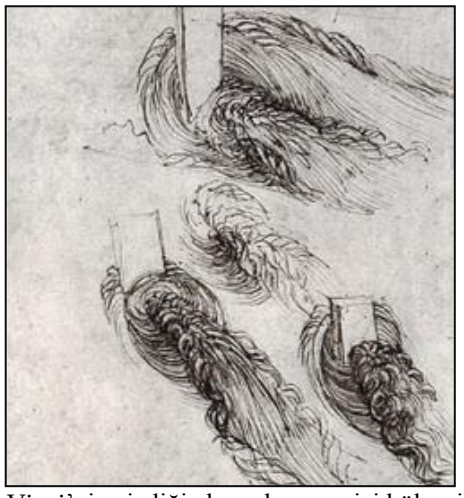
Bu tez kapsamında, ilk olarak Sempa firmasında kurulan deney setinde 6 kanatlı pompa çarkının kullanıldığı santrifüj pompanın deneysel çalışmaları gerçekleştirilerek pompa karakteristik eğrisi çıkarılmıştır. Daha sonra Selçuk Üniversitesi Hidrolik-PIV Laboratuvarına kurulan ve pompada PIV deneyleri yapılması amaçlanan özel bir deney seti, literatürdeki çalışmalar da incelenerek tasarlanmış ve kurulmuştur. Aynı zamanda bu deney setinde de performans deneyleri yapılabilmektedir. PIV deneylerinin ardından santrifüj pompa içerisindeki akış yapısını incelemek için HAD çalışmaları yapılmıştır. Sayısal çalışmalarda kullanılan farklı türbülans modellerinin akış yapısı olarak PIV ile ve deneysel olarak performans verileri ile benzerliği incelenmiştir. Öncelikle 6 kanatlı orijinal pompa çarkı (çark 1) kullanılan pompa için deneyler yapılmıştır. Daha sonra basma yüksekliğinde artış elde etmek için kanat profili aynı olacak şekilde ara kanat ilavesi ile oluşturulan, 4 ana ve 4 ara kanada sahip pompa çarkı (çark 2) ve PIV ile geniş bir akış alanında akış yapısını incelemek ve ölçüm bölgesini büyütmek için ara kanat ilavesiz 4 kanatlı çark (çark 3) ile çalışmalar yapılmıştır. Sonuçlar deneysel sayısal ve

HAD olarak karşılaştırmalı şekilde sunulmuştur. Ayrıca deneysel sonuçlar için belirsizlik analizleri de yapılarak değerlendirilmiştir.

3.1. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) Metodu ve PIV Deney Düzeneği

PIV yöntemi, akış görselleştirmek üzere kullanılan optik bir tekniktir. Bu yöntemle akışkan hızları ölçülebilmekte ve akış karakteristikleri elde edilebilmektedir. Genel manada akışkanlar mekaniği kapsamındaki aerodinamik ve hidrodinamik sahalarında farklı durumların incelenmesinde yararlanılabilmektedir. Birçok akış yapısının daimi olmayan ve çalkantılı doğası gereği, yapılacak deneylerdeki ölçümlerin anlık olarak alınması, gerekli durumlarda ortalama değerler hesaplanması ve çok noktalı olmasına gereksinim duyulabilmektedir. Ölçümler esnasında dikkat edilecek husus, akışa olası en az müdahalenin yapılarak daha doğru sonuçların elde edilmesidir.

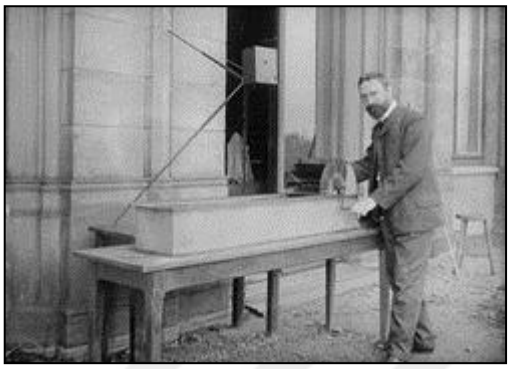
PIV yöntemi her ne kadar modern bir ölçüm tekniği olarak ön plana çıksa da asırlar öncesinde Rönesans döneminin önemli bir bilim insanı olan Leonardo da Vinci, akış içerisindeki farklı cisimleri gözlemledikten sonra bu cisimlerin etrafındaki 3 boyutlu akış alanlarını çizmiştir ve bir anlamda bu yöntemin bilimsel temellerini atmıştır (Soares ve ark., 2013).



Şekil 3.1. Leonardo da Vinci'nin çizdiği akış arkası arz izi bölgesi (Anonymous, 2017d).

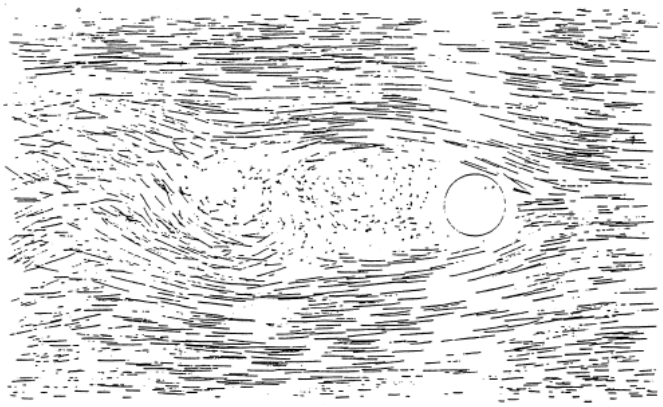
Alman bilim adamı Ludwig Prandtl ise güneş ışığında aydınlatılan bir akış tüneli oluşturmuş ve bu akışı fotoğraflayarak incelemiştir. 1908 yılında yayınladığı bir makalesinde, akış içerisinde sınır tabakayı tarif etmiştir. Bu çalışma sürüklenme ve cisimlerin etrafındaki akışı, akım çizgili hale getirilmesi arasındaki ilişkiyi ortaya

koymuş, hücum açısı ile kaldırma kuvveti arasındaki zıt durumu ifade eden "stall" olayını bu şekilde açıklamıştır (Prandtl ve Murschhauser, 1908). İlave olarak, Prandtl su tankı deneyi ile görünür hale getirilen su akışındaki kanat profilinin etrafındaki ve özellikle art izindeki girdaplarını da incelemiştir.



Şekil 3.2. Ludwig Prandtl ve deney yaptığı su tankı (Anonymous, 2017c).

Ancak parçacık bazlı nicel ölçümün ilk örneği 1917'de yayımlanan bir teknik raporda yer almaktadır. Söz konusu çalışma, Naylor ve Frazier tarafından hazırlanmış olup, silindir etrafındaki iki boyutlu ve daimi olmayan akış yapısının sinematografi kullanılarak incelenmesini içermektedir (Adrian, 2011).



Şekil 3.3. Küt cisim etrafında akış yapısı (Adrian, 2011).

1974 yılı ile birlikte, bu alanda lineer ve yarı logaritmik ölçeklerde gerçekleştirilen çalışmalar ortaya çıkmaya başlamıştır. Ancak akışkanlar mekaniğindeki görüntüleme teknikleri açısından 1977 yılının literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında bir dönüm noktası olduğu söylenebilir. Bu yılların öncesinde hazırlanan çalışmalardaki ölçüm yöntemleri daha çok katı mekaniğinden gelmiştir. Dönüm noktası niteliği taşıyan bu yıldaki dört öncü çalışma "laser speckle velocimetry" konusunda Dudderar ve Simpkins

(1977), ve aynı yıl içerisinde, "holographic particle velocimetry" ile ilgili olarak Royer (1977) ve sonrasında Yano ve Fujita (1977) da çalışma yayımlamışlardır. Bunun yanında Brodkey (1977) ve ayrıca Elkins ve ark. (1977) ise "stereographic photogrammetric velocimetry" üzerine araştırmalar gerçekleştirmişler ve modern PIV tekniğinin temellerini oluşturmuşlardır. Daha sonraki yıllarda, gelişen optik tekniklerin PIV ile kullanımı konusunda genel bir çalışma Meynart (1984) tarafından literatüre sunulmuştur.

PIV tekniği ise ilk kez Grousson ve Mallick (1977), tarafından tarif edilmiştir. O yıllarda başlayan birçok çalışma olmasına rağmen deneysel zorluklar ölçüm alanlarındaki ve ölçüm hızlarındaki sınırlamalar bu akanda kısıtlar oluşturmuştur. Sıvılar içerisinde alüminyum tozu ve lateks küre şeklindeki partiküllerin yüksek derecede partikül dağılım ve yayınım gösterebildiği için Adrian ve Yao (1985) tarafından tercih edilmiş ve bu alanda farklı partiküller kullanılması ve geliştirilmesi konusunda öncülük etmişlerdir. Meynart (1980), hava ortamında bilinen ilk PIV ölçümlerini gerçekleştirmiştir ve çalışmasında darbeli Ruby lazerini kullanmıştır. Grant ve ark. (1986) yöntemin açık deniz mühendisliği gibi bazı mühendislik uygulamalarına tatbik edilmesi üzerine uygulanabilirliğini belirtmişlerdir. Daha sonra küt cisimler etrafındaki akış tanımlanmasında, hava deniz ve kara araçlarının geliştirilmesinde, turbomakinalarda, binalar üzerinde yüklerin ve etrafındaki akışın belirlenmesinde kullanılagelmiştir.

Günümüzde ileri teknoloji bir ölçüm yöntemi olan PIV ile bulunan sonuçlar, akış fiziğinin temelini kavramada, HAD araştırma sonuçlarının değerlendirilmesinde ve tasarım uygulamalarında kullanılmaktadır. Milisaniyeden daha kısa çekim süresinde bütün alan görüntü yakalama kabiliyeti ile birlikte, doğruluğu, esnekliği ve çok yönlülüğü; ses üstü akışlar, patlamalar, alev yayılması, kabarcık büyümesi ve patlaması, türbülanslı akış ve daimi olmayan akış çalışmalarında kullanılması, PIV sistemini değerli kılan bazı özellikleridir (Cengel, 2010). Bu nedenle, PIV yöntemi uygulamalarına; küt cisimler (küre, silindir, elips, kare, bina vb.) etrafındaki akışlarda, içten yanmalı motorlarda, taşıt aerodinamiğinde, daimi olmayan aerodinamik ve türbülanslı akış uygulamalarında, kompleks geometriler içeren akışkanlar mekaniği uygulamalarında, jet akışlarında (lüle veya yayıcılarda), iki fazlı akışlarda, biyo mühendislikte, ısı değiştirici modellerinde, HAD modellerinin deneysel sonuçlarla doğrulanmasında, uçak mühendisliğinde (kanat ve uçak gövdesi tasarımında), çevresel olaylarla ilgili araştırmalarda (dalga akışlarında, kıyı mühendisliği, gel-git akış hareketlerinin modellemesi, nehir hidrolojisi), sığ su akışlarında, boru ve kanal akışlarında, aerodinamik testler için rüzgar tüneli ölçümlerinde (trenler, uçaklar, arabalar binalar, köprüler, rüzgar

türbinleri, fan kanadı tasarımında vb. cisimler etrafındaki akışlarda), hidrolik ve hidrodinamik (pompalar, kavitasyon, gemi gövdesi tasarımı), turbo makineler (fan, kompresör, türbin kanatları çevresindeki akış) gibi bir çok alanda rastlamak mümkündür. Son yıllarda ise yüzebilen veya uçabilen canlıların maruz kaldıkları karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılan biyomimetik uygulamalar da ön plandadır (Aksoy ve ark., 2016; Olcay ve ark., 2017; Yagmur ve ark., 2017; Okbaz ve ark., 2018). Mikroskobik damar içi akışlardan, süpersonik akışlara kadar her türlü hız alanına uygulanabilen PIV sistemleri ile:

- Hız vektörleri,
- Hız konturları,
- Türbülans ölçümleri,

gibi özellikler zaman çözünürlüklü veya zaman ortalamalı olarak yapılabilir. PIV'nin bazı avantajları şu şekildedir.

- Akış fiziğinin deneysel olarak anlaşılmasını sağlar ve akışın fiziksel yapısı hakkında bilgi verir.
- Akıştan dolayı oluşan, dinamik kuvvetler hakkında fikir verir. (basınç, yüzey kuvvetleri, viskoz kuvvetleri…).
- Debi ölçüm cihazı olarak da kullanılabilir.
- Akışın içerisine bir cisim daldırılarak yapılan ölçümlerde (noktasal ölçümler, pitot tüpü ölçümü, sıcak tel anemometresi vb.) akışa müdahale vardır. PIV yönteminde ise akışa müdahale edilmeden ölçüm yapılır. Bu sayede basınç düşüşüne veya akış yapısında bozulmaya neden olmaz. Bu avantaj herhangi bir cismin daldırılmasının veya geometrinin oynanmasının oldukça zor olduğu turbomakinalarda oldukça önemlidir (Lavoie ve ark., 2007).
- Karmaşık yapıya sahip özellikle iki boyutlu veya üç boyutlu akışlarda sadece bir noktada ölçüm yapmak suretiyle elde edilen veriler akışın yapısını yorumlamada yeterli olmamaktadır. Noktasal ölçüm yapan sıcak tel anemometresi gibi cihazlarla sadece bir noktadaki hız değeri ölçülebilirken PIV yönteminde görüntülenen akış alanı içindeki kamera ölçüm kapasitesine bağlı olarak birçok noktada üstelik aynı anda ölçümler alınabilir ve bu değerlerin zamanla veya farklı pozisyonlarda değişimi de incelenebilir.
- Noktasal ölçüm yapan cihazlara göre deney yapma zamanı azalır, kalibrasyonu kolaylaştırır.

- Akışkanla doğrudan temas olmadığı için paslanma, kirlenme veya tıkanma gibi tehlikeler söz konusu değildir.
- Öngörülen hız ölçüm doğrulukları modele göre değişmekle birlikte %2-20 arasında değişebilir (Ertürk ve ark., 2013).

PIV sistemlerinin bazı türleri de aşağıda özetlenmiştir.

2D-3D Stereoskopik PIV: İki veya üç boyutlu akış analizleri için kullanılan standart PIV sistemleridir. Tek kamera ile bir yüzeyden iki hız bileşenini hesaplanabildiği gibi, ikinci bir kamera kullanılarak, üçüncü hız bileşeni hesaplanabilir.

Zaman Çözünürlüklü PIV (Time Resolved -PIV): Sistem temel olarak hızlı kamera ve lazerden oluşmaktadır. Bu yöntem dinamik davranışların zaman çözünürlüklü olarak daha detaylı analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

MicroPIV: Bu sistem mikroskopik akış araştırmalarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Özellikle HAD yazılımlarının, mikroskopik kanallarda verdiği sonuçların doğruluğunun az olması nedeni ile bu çalışmalarda deneysel sonuçlar önemlidir.

Laser Induced Fluoresence (LIF): Araçlarda yakıt tüketiminin azaltılması ve yakıt verimliliğinin artırılması için yapılmakta olan ölçümlerde ve sıcaklık ve yoğunluk ölçümlerinde kullanılmaktadır.

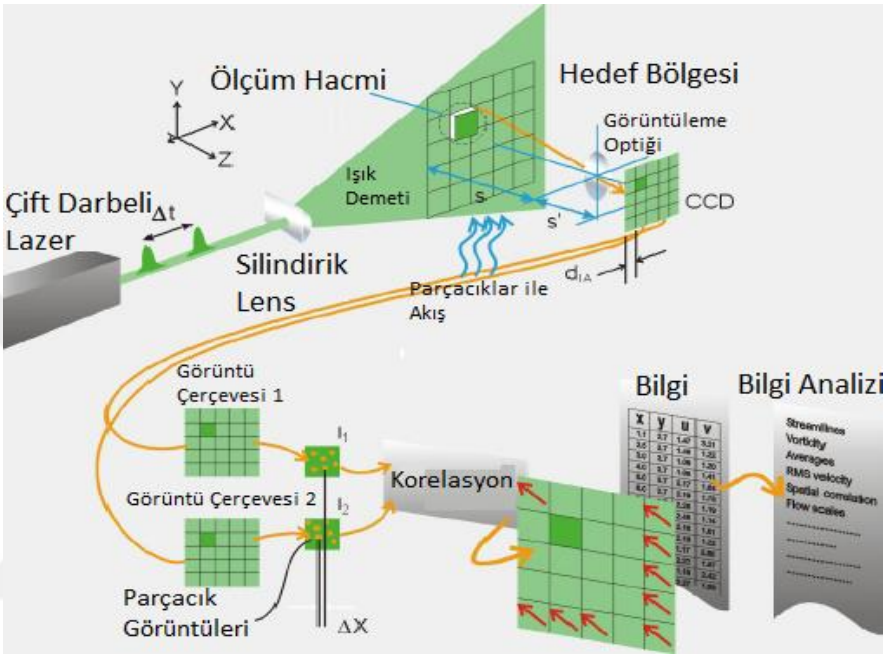
Interferometric Particle Imaging (IPI): Damla (Sprey) ve saydam parçacıkların boyut, hız ve dağılımı ölçümlerinde kullanılır.

Hacimsel PIV: Üç veya daha fazla kamera kullanımı ile bir hacim içerisindeki akış alanı deneysel olarak incelenebilir. Son yıllarda geliştirilen bir metottur (Anonim, 2017).

Bu çalışmada kullanılan PIV tipi ise ortalama değerlerin alındığı zaman çözünürlüklü PIV'dir.

Akışkanlar mekaniğinde yıllardır uygulanan PIV tekniği, bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte dijital PIV olarak da isimlendirilmektedir (Fincham ve Spedding, 1997). Kullanılan PIV ölçüm sisteminin ölçüm ve analiz diyagramı Şekil 3.4'te verilmiştir. PIV ile elde edilen sonuçların işlenmesine yönelik olarak da farklı yöntemler mevcuttur. Temel olarak, kullanılan parçacıklar ile ardışık iki lazer atımı süresi arasında parçacıkların kat ettiği mesafeyi belirlemeye dayanmaktadır. Daha sonraki adım, parçacığı ve bu parçacık demetini tanımlamaktır. Görüntü işleme teknikleri parçacık demetlerini tanımlayabilir. Sistemde öncelikle lazerden ölçüm bölgesine optik lenslerin oluşturduğu lazer perdesi ile iki adet lazer sinyali gönderilir. Burada lazer sinyalleri arasında zaman Δt ile gösterilmiştir. Lazer perdesinin aydınlattığı bölgeye odaklanan

kamera ile ölçümler alınarak kaydedilir. Kaydedilen görüntü bölgesi belli pikseldeki ağlara bölünür ve iki farklı görüntü arasında çekilen iki fotoğraf arasında çapraz-korelasyon (cross-correlation) yöntemi uygulanarak hız bileşenleri ulaşılır. Gerekli filtreleme ve görüntü işleme çalışmaları da yapılarak hız değerleri elde edilir. Günümüzde ise sadece 2 adet olarak değil belirli aralıklarla lazer çiftleri göndererek deneylerin yapılması ve analiz edilmesi mümkündür.



Şekil 3.4. PIV ölçümü akış diyagramı (Anonymous, 2017a).

PIV ile yapılan ölçümlerde ortalama yer değiştirmenin bulunmasından sonra lazer düzlemindeki her bir sanal ağdaki ortalama hız vektörü aşağıdaki formülden hesaplanır.

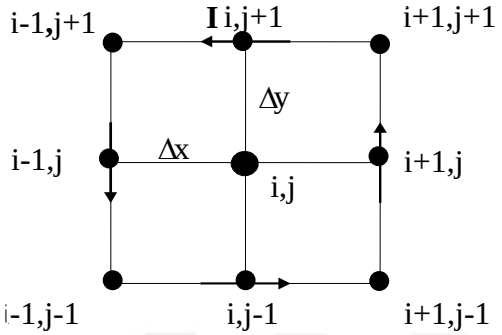
$$\vec{u} = \frac{\Delta x}{\Delta t * M} \tag{3.1}$$

$$\vec{v} = \frac{\Delta y}{\Delta t * M} \tag{3.2}$$

Yukarıdaki eşitlikte $\vec{u}$ ve $\vec{v}$ iki boyutlu hızın vektörel bileşenleridir. Δt ise çapraz korelasyon edilecek iki görüntü çekimi arasındaki zaman farkını (s), Δx ve Δy ise korelasyon ağındaki partiküllerin x ve y yönünde ortalama yer değiştirmesini, M ise alınan görüntülerin büyültme ölçeğini gösterir. Bu ölçek kalibrasyon ile belirlenir. Ölçüm bölgesi içerisinde bir uzunluğun boyutu ölçülerek veya ölçüsü bilenen bir uzunluk referans alınarak belirlenir. Tez çalışmasında ölçülen bu değer 123.5 mm büyüklüğündeki

çark çapı kullanılarak yapılmıştır. Bu değer lazer düzlemi-kamera arasındaki mesafe değiştirilirse yenilenmesi gerekir.

Akış alan düzleminde sonlu farklar uygulaması için oluşturulan ağ örneği Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Burada Δx ve Δy, x ve y yönündeki ağ aralıklarını göstermektedir.



Şekil 3.5. Akış düzleminde sonlu farklar uygulaması için oluşturulan ağ örneği.

x yönünde hız bileşenlerinin ortalaması,

$$\langle u(i,j)\rangle = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} u_n(i,j) \tag{3.3}$$

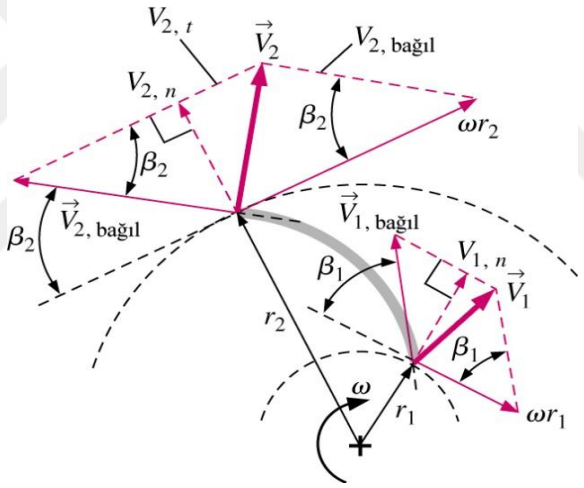
y yönünde hız bileşenlerinin ortalaması,

$$\langle v(i,j)\rangle = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} v_n(i,j) \tag{3.4}$$

Deneylerde her bir deney için enkoder ile tetiklenen lazer ve kameralar ile 500 adet çarkın sabit pozisyonda olduğu görüntü alınarak hız alanı oluşturulmuştur. Bu durum uluslararası literatürde "phase average" olarak adlandırılmaktadır. Tez çalışmasında bu durum; "durağan halde ortalama değerler" veya "faz ortalaması" olarak adlandırılmıştır. PIV ölçümlerinde alınan anlık değerler daimi olmayan ve değişken olan akış koşullarında doğru sonuçlar vermeyebilir. Aynı zamanda daimi olmayan bir akış yapısı ve girdap kopması olması durumlarında ortalama değerler gerekmektedir. Ayrıca pompa çarkı içerisindeki akışta sürekli dönen bir çark ve sürekli sabit duran bir difüzör vardır. Bunun yanında tek bir görüntüde yansımadan partikül dağılımından vb. faktörlerden hatalar olabileceği için anlık görüntüler pompa çarkı uygulamasında yeterli değildir. Bu nedenle pompa içerisinde bir enkoder kullanarak kamera ve lazer tetiklenmiş ve çark ile difüzör hep aynı pozisyonda olduğunda alınan ölçümlerin ortalaması sunulmuştur. Deneyler

sırasında 500 adet çarkın aynı pozisyondaki değeri alınarak ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Pompa çarkından çıkan akışkanın çarkın dönmesinden ve akışkanın santrifüj kuvvet etkisi ile savrulmasından kaynaklanan hızlarının vektörel toplamını gösteren üçgen, pompa hız üçgeni olarak tanımlanır. Şekil 3.6'da akışkanın mutlak hız vektörleri koyu renkli oklarla gösterilmiştir. Çalışmada PIV ile direkt olarak ölçülen değer de mutlak hız vektörleridir. Kanadın girişi (r_1 yarıçapında) ωr_1 çevresel hızıyla hareket eder. Aynı şekilde kanadın çıkışı da (r_2 yarıçapında) ωr_2 çevresel hızıyla hareket eder. Şekilde görüldüğü gibi bu iki çevresel hız, kanat eğiminden ötürü sadece büyüklük olarak değil aynı zamanda yön olarak da farklıdır. Şekildeki gösterim dönme yönü olarak ters kanat profili olan bir pompadan alınmıştır. PIV ile ölçümlerde elde edilen görüntülerde elde edilen hız vektörleri şekilde V_1 ve V_2 olarak gösterilen vektörlerdir.



Şekil 3.6. Pompa hız bileşenleri.

PIV pompa yöntemi ile ölçülen hız değerleri mutlak hız vektörleridir. Bağıl hız vektörlerini elde etmek için PIV sonuçlarından dönme etkisinin (çevresel hız değerinin) çıkarılması ile elde edilir. Bu değerlerden her bir pompa çarkı ve debi değeri için mutlak hız değerleri PIV ile elde edilmiş ve vektörel ve kontursal olarak sunulmuştur.

$$\overrightarrow{V_{ı\,b}} = \vec{V_ı} - \omega r_i \tag{3.5}$$

Tezde pompa deneylerinde akış düzlemi x-y değil mutlak yönde olduğu için ortalama hız değerleri olarak hesaplanır. φ ile gösterilen açı değeri pompa çarkının her bir turunda bir kez görüntü alındığı ve değişmediği için sabit olarak alınmıştır. Durağan haldeki mutlak hız değerleri 3.6 numaralı formül ile elde edilmiştir.

$$\left\langle \overline{V}(i,j,\varphi) \right\rangle = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(V_n(i,j,\varphi) \quad (3.6)$$

Bunun yanında türbülans kinetik enerji (TKE) değerleri de hesaplanmıştır.

$$TKE = \frac{1}{2}(\overline{u'_i{}^2} + \overline{u'_j{}^2}) \quad (3.7)$$

Pompada belli açıda faz değerlerin alınmasında farklı görüntü sayıları denenmiş elde edilen hız değerleri görüntü sayısından bağımsız hale getirilmiştir. 100 adet görüntünün az olduğu 500 çift görüntünün hızdaki çalkantıların ortalama değerlere etkisinin azaltılması ve düzgün bir Gauss dağılımı elde edilmesi için ideal olduğu literatürde de belirtilmiştir (Cavazzini ve ark., 2010; Keller ve ark., 2014). Literatürdeki bu bilgi yanında tez çalışmasında farklı adette görüntüler alınarak ortalama değerleri incelendiğinde 500 adet görüntüye kadar %2-5 arasında değişiklikler olduğu, 500 görüntü üzerinde ise bu farkın %1 seviyesinin altında olduğu tespit edilmiştir.

3.1.1. Pompa ve PIV deney seti

Pompa, sıvıya enerji veren veya enerjisini arttıran bir makinadır. Santrifüj pompa ise merkez kaç kuvvetinden yararlanarak sıvıya enerji aktarılmasını sağlar. Bu tip pompalar, dairesel olarak hareket eden sıvı, merkezden dışarı doğru merkezkaç (santrifüj) kuvvetle itilmesi prensibine göre çalışır. Bu nedenle pompanın çıkış basıncı emme basıncından fazladır. Aynı şekilde pompayı terk eden sıvının enerjisi de girenden fazladır. Sıvıya dönme hareketini veren pompa aksamına çark veya fan (impeller) adı verilir.

Sıvı emme bölgesinden çark merkezine girer. Çark sıvıya dönme hareketi verir. Dönme hareketinin meydana getirdiği merkezkaç kuvvet etkisiyle sıvı dışarı doğru savrulur. Çark ne kadar hızlı dönerse sıvının hareketi de o denli hızlı olur. Fan kanalları veya kanatları sıvının hareket yönünü belirler.

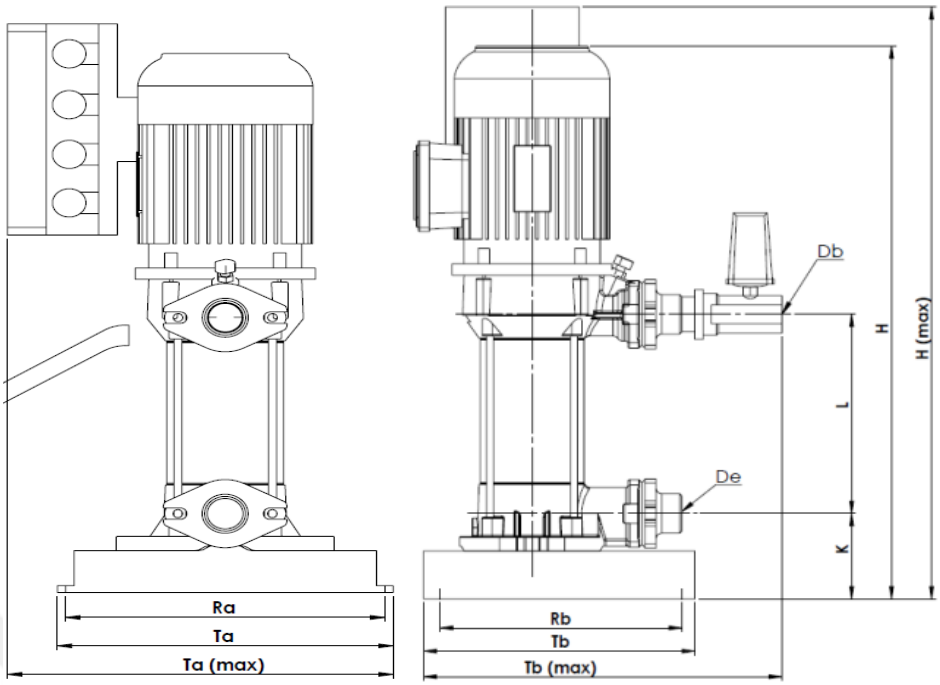
Bir santrifüj pompada sıvının izlediği yol şu şekildedir. Çarkın dönmesiyle emme tarafında meydana gelen vakum nedeniyle sıvı çarkın kanatları arasına girer. Çark kanatları arasından geçen sıvı, çarkın dönüş hareketleriyle büyük çevresel bir hız kazanır. Çark kanatları ile çarkın ön ve arka profili tarafından sınırlanan kanallar arasında sıvı çarkın çıkış tarafına doğru dönme hareketi esnasında meydana gelen santrifüj kuvvetler etkisiyle itilir. Bu şekilde oluşan hareket, sıvının devamlı akışını ve pompanın emme etrafındaki emişini sağlar. Çark kanatları büyük bir çevresel hızla terk eden sıvının

içerdiği kinetik enerji, sabit difüzör kanatları arasında salyangoz boşluğunda basınç enerjisine çevrilir. Belirli bir dönme hızıyla en yüksek basınç elde edilir. Bu tür bir pompanın bir hidrodinamik pompa olduğu söylenebilir. Bütün sıvılarda kullanılmaya elverişlidir. Plastikten, bronzdan, titanyum ve paslanmaz çelik gibi maddelere kadar her türlü maddeden yapılabilir. Bunun yanında santrifüj tip pompalar da diğer pompa türleri arasında önemli bir yer tutmaktadır.



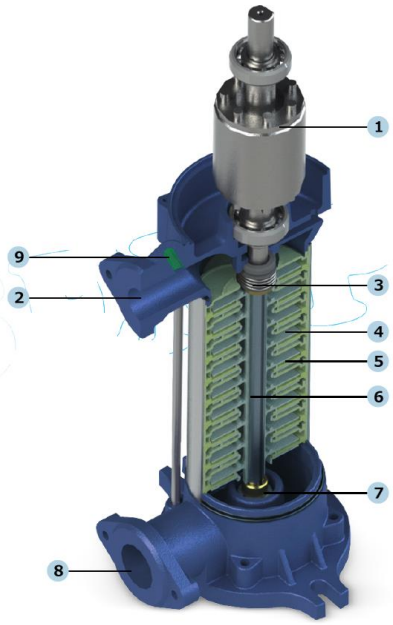
Şekil 3.7. Tez çalışmasında kullanılan SPL 100-3 serisi pompa.

PIV sistemi ile yapılan deneyler için SAN-TEZ projesi ortağı Sempa firmasının proje çalışmaları içerisinde analizleri yapılan bir pompası olan SPL-100 serisi düşey milli, silindirik kanatlı, 3 kademeli santrifüj tip pompa kullanılmıştır. 3 kW gücünde 3 fazlı motor kullanılan bu pompa firmanın ürün gamında en fazla satılan ürünlerden olması yanında silindirik kanat geometrisi sayesinde PIV çalışmalarına uygun yapıdadır. Silindirik olmayan ve 3 boyutlu eğriliği olan pompa kanatları PIV deneylerinde lazer perdesinde ışık kırılmasına neden olmaktadır. Çalışmada kullanılan fotoğrafı Şekil 3.7'de, pompanın dış ölçüleri ve bağlantı noktaları detayları da Şekil 3.8'de verilmiştir.



De	Db	Ra	Rb	Ta	Tb	Ta	Tb	H	H	K	L	Z	Z1	KG
1 1/2"		286	192	320	220	460	380	526	676	50	188	-	-	45

Şekil 3.8. SPL 100-3 pompanın dış ölçüleri (mm biriminde)

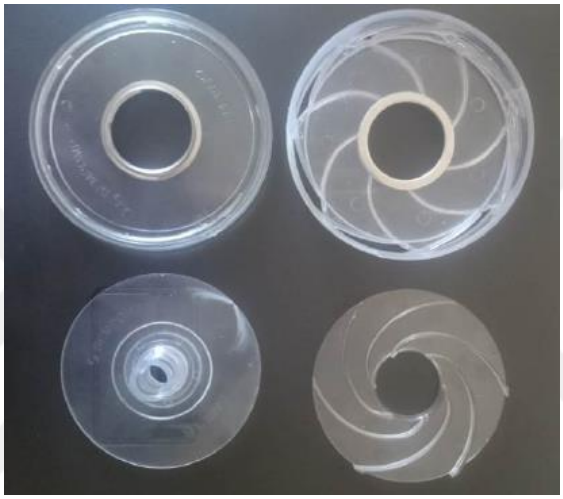


1- Rotor
2- Çıkış
3- Mekanik Salmastra
4- Çark
5- Difüzör
6- Mil
7- Alt Yataklama
8- Giriş
9- Hava Tıpası

Şekil 3.9. Kullanılan SPL 100-3 pompanın ekipmanları.

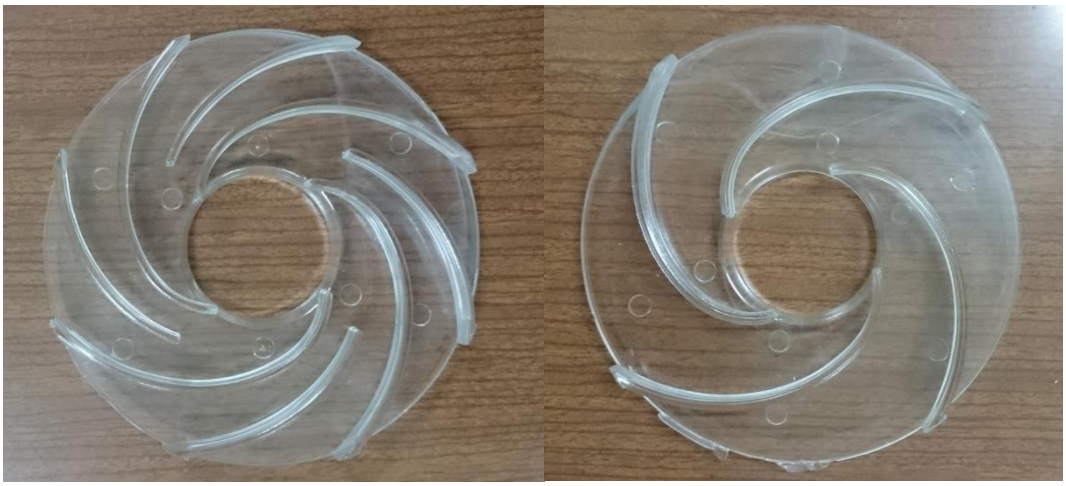
SPL 100-3 pompa, düşey milli ve 3 kademeden oluşmaktadır. Bu serideki pompalarda kademe sayısı istenilen basma yüksekliğine göre artırılabilmektedir.

Pompanın ekipmanları Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Her bir kademede pompa çarkı (2 parçadan oluşmaktadır ve imalat sonrası birleştirilmiştir) difüzör ve difüzör kapağından oluşmaktadır. Orta kısımlara metal bilezikler eklenerek mekanik dayanımları artırılmıştır. Ancak bu bilezik PIV görüntülerin giriş bölgesinde alınmasında engel olsa da dayanım kriteri gereği çalışmalarda da kullanılmıştır. Üretimde bu bilezikler kalıba konmasının ardından enjeksiyon işlemi yapılmaktadır. Bu sayede malzeme ile enjeksiyon sıcaklığında birleşmektedir. SPL 100-3 pompa çarklarının pleksiglas malzemeden yapılmış çark-difüzör ve kapakları Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. 6 kanatlı pompa çarkı, difüzör ve üst kapak (Çark 1).

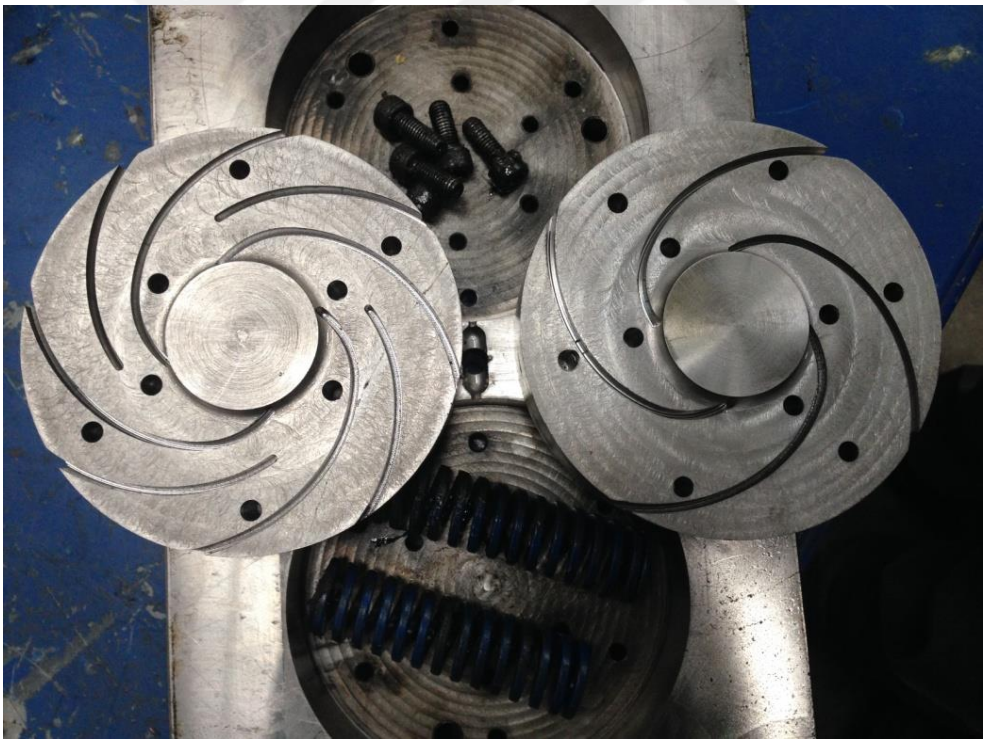
Yapılan PIV çalışmaları sadece tek bir çark için değil aynı zamanda %70 ara kanat ilaveli 4 kanatlı pompa çarkı ve PIV görüntülerinin daha iyi alınabildiği ara kanat ilavesiz 4 kanatlı pompa çarkı kalıpları için de yapılmıştır (Şekil 3.11). Bu kanat sayısı ve yapısına yapılan HAD analizleri neticesinde karar verilmiştir. Bununla ilgili detaylar 4. bölümde açıklanmıştır. Çarklar analizler sonrası üretilen kalıplar ile imal edilmiştir (Şekil 3.12). Pompanın akrilik malzemeden yapılan çarkı şeffaf malzemeden plastik enjeksiyon kalıbında basılarak pompa motoruna monte edilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.11. (a) ara kanat ilaveli 4 kanatlı (çark 2) ve (b) 4 kanatlı (çark 3).

Standart pompa üretiminde, kademelerin ve difüzörün dışına monte edilen metal gömlek ise lazer perdesine engel olmaması için kullanılmamıştır. Normal kullanımda sızdırmazlık sağlayan bu elemanın eksikliği ilave sızdırmazlık elemanları ve fitillerin kullanımı ile sağlanmıştır.



Şekil 3.12. 4 kanat %70 ara kanat (çark 2) ve 4 kanat (çark 3) çarklar için üretilen kalıplar.

Kamera bakış açısında çarkların görülmesi için de PIV deneylerinde pompa alt kısmındaki yataklama da iptal edilmiş, alt parça tornada delinerek o kısmı şeffaf malzeme ile kapatılmıştır (Şekil 3.13). Kamera görüş açısındaki kısmın şeffaf malzeme ile kapatılması ve tam sızdırmazlık sağlanması tezin içinde önemli sorunlardan biri olmuştur.

Birçok alternatif denenmiş en uygun olan ve gereksinimi sağlayan Almanya'dan getirilen Weicon marka metal-pleksi yapıştırıcı ile sağlanmıştır.



Şekil 3.13. Pompa emiş kısmının tornada açılması ve pleksiglas malzeme ile kapatılması.

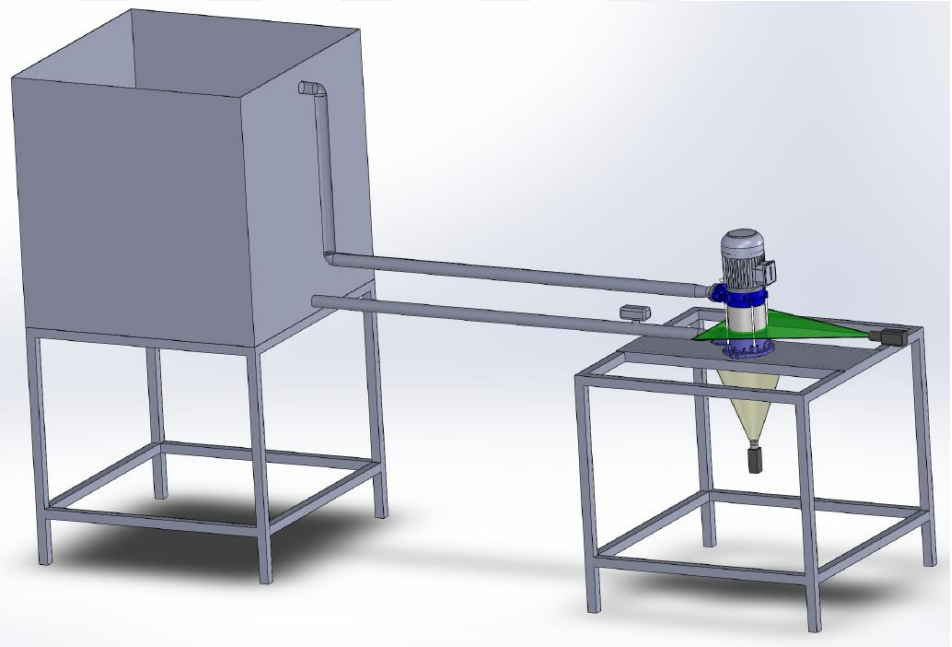


Şekil 3.14. Pompa elemanlarının seramik malzemeler ile kaplanması ve montajı.

Yapılan deneylerde, lazer yansımasının önlenmesi, kamera odaklamasının tam olarak yapılması ve kamera görüntülerinde yanlış hesaplanan istenmeyen vektörlere neden olmaması için, ölçüm yapılan çarkın üst kısımları (2. Çark kademesi kapağı) siyaha boyanmıştır. Çarkların birleştirilmesi ve montajı Şekil 3.14'te verilmiştir. Emiş kısmı ve

diğer metal kısımlar oksitlenmeyi engellemek için seramik kaplama boya ile kapatılmıştır. Seramik malzeme alternatifi olan epoksi kaplamaya göre daha dayanıklı ve kalıcı olduğu için tercih edilmiştir. Ayrıca mavi rengi sayesinde lazer ışınlarının yansımasını da azaltarak ölçümlerin daha sağlıklı olması sağlanmıştır.

Pompa seçiminden ve hazırlanmasından sonra, pompaya uygun bir tesisat ve ölçüm sistemi tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımda hat giriş ve çıkışlarına debileri kontrol etmek için vana, basınç farkını ölçmek için fark basınçölçer, sistemde istenmeyen yabancı partikülleri süzmesi için filtre ve geri akışı önlemek için çek valf konulmuştur. Şekil 3.15'de da görülebileceği gibi lazer ünitesi pompanın yan tarafına, kamera ise alt tarafa yerleştirilmiştir. PIV ile ilgili tasarım yapılırken literatürdeki benzer çalışmalar incelenmiş, PIV ile ilgili çalışmalar ve araştırmalar yapan firmalar ile görüşülerek tasarım aşaması tamamlanmıştır.



Şekil 3.15. PIV-Pompa test sisteminin 3 boyutlu tasarımı.

Pompanın bağlanacağı tesisat hattında oksitlenme probleminin oluşmaması için plastik malzeme seçilmiştir. Rakor, nipel ve vana gibi kısımlar ise yine paslanmazlık özelliği olan pirinç malzeme kullanılmıştır. Debi ve fark basınçölçerler ölçüm montaj standartlarına uygun olacak şekilde ve uygun pozisyonda monte edilmiştir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. PIV düzeneği pompa tesisatı.

Tesisat sisteminde pompanın çalışması sırasında titreşim olmaması için borular kauçuk yüzeyli kelepçelerle sabitlenmiş, ayrıca yükü taşıması için de taşıyıcı bir ayak eklenmiştir. Pompa hattında kullanılan su deposu kapasitesi 1.5 m^3 olup giriş-çıkış ağızları da dahil olmak üzere boyutları paslanmaz sacdan özel imal edilmiştir. Deponun giriş ve çıkışına vana konulmuştur. Tankı ve pompayı taşıması için 50 mm ebatlarında profilden metal taşıyıcı sehpalar yapılmıştır. Bu sehpalar siyah anti-statik boya ile lazer ışığını yansıtmaması için boyanmıştır. Deneylerde önemli bir konu pompanın çalışması esnasında fazla titreşim oluşturmamamadır. Sehpa ayakları pompa çalışması sırasında oluşan titreşimi sönümleyecek şekilde sert kauçukla kaplanmıştır. Sehpaların ayaklarına monte edilen kontrasomun ile yukarı-aşağı yönde hareket ettirilebilen ayaklar 35 cm stroka sahiptir. Bu sayede pompa ve su tankının pozisyonları gerekli olduğunda artırılıp azaltılabilmektedir.

Tesisat sisteminde pompa sisteminde palet tipi debimetre ile debi ve fark basınç transmitteri ile basınç ölçümü yapılmaktadır. Bu cihazlardan ölçülen bilgiler 6 girişli bir datalogger içerisine kaydedilmekte ve aynı zamanda USB çıkışı ile bilgisayara aktarılabilmektedir. Fark Basınç transmitteri (pompa giriş çıkış arası basınç farkını ölçmektedir) 0-10 Bar ölçüm aralığına, 3/8" girişe ve %1 hassasiyete sahiptir. Debi ölçümü için 0-945 L/d ölçüm aralığı ve %1 ölçüm hassasiyeti palet tipi (paddlewheel) bir debimetre kullanılmıştır. Debi ölçümünün hassas ve doğru yapılabilmesi için kendi DN50

bağlantı elemanı ile birlikte alınmıştır. Debimetrenin ölçtüğü değerler dataloggera kaydedilmektedir. Ayrıca anlık değerleri de göstermesi için üzerine bir ekran konulmuştur. Debimetre ve fark basınç transmiterinin sisteme montaj hali Şekil 3.17'de ve özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Fark basınç transmitteri (üstte), debimetre (altta) ve sisteme montaj halleri.

Çizelge 3.1. Debimetre özellikleri.

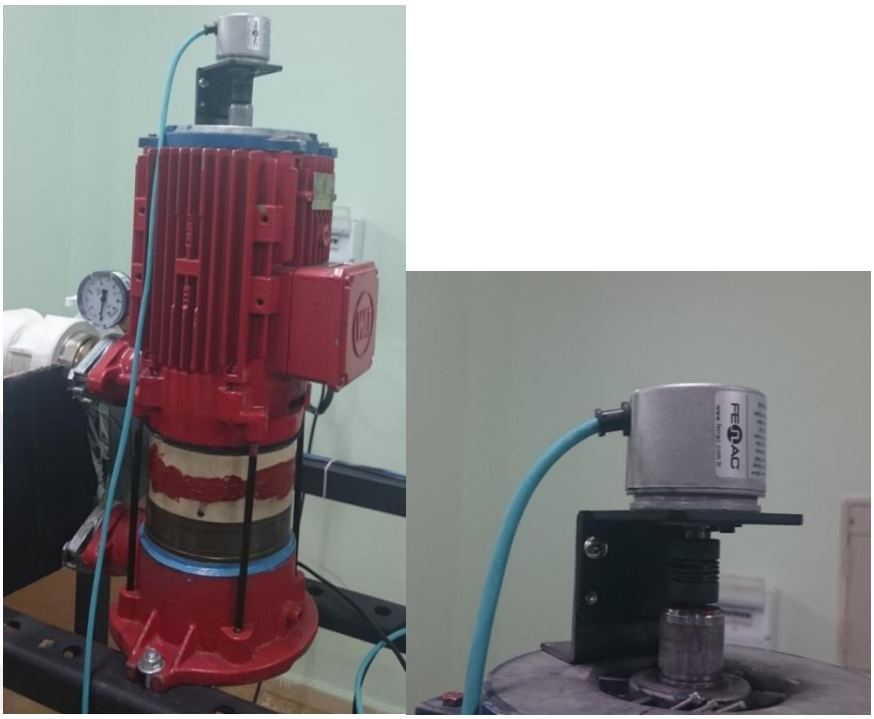
Özellik	Değer
Tipi	Palet tipi
Ölçüm aralığı	0-945 L/d
Giriş-Çıkış çapı	2"
Hassasiyet	%1
Marka	Bass
Çıkış	0-10 mA

Çizelge 3.2. Basınçölçer özellikleri.

Özellik	Değer
Ölçüm aralığı	0-10 Bar
Giriş-çıkış çapı	3/8"
Hassasiyet	%1
Marka	mesens
Çıkış	0-10 mA

Pompalarda kontrolcü üzerinden motor devri de anlık olarak görülebilmektedir. Ancak bu devir geri beslemeli bir kontrol mekanizması olmadığı için pompa basma yüksekliği arttığında devir değişmekte ama kontrolcü üzerinden okunamamaktadır. Bu nedenle pompa kontrolcüsüne bağlanabilmesi ve tam pompa devrinin belirlenmesi için

de bir enkoder sistemi de pompa motorunun üst kısmına monte edilmiş ve Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Ayrıca bu enkoder PIV sisteminin zamanlayıcısı olan timerbox cihazına sinyal vererek her devirde pompa çarkları aynı yerdeyken veri alınmasını sağlamıştır. Bu sayede her devirde aynı yerden alınan verilerin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.18. Pompa miline monte edilmiş enkoder.

Yapılan montajda enkoder önce "Pulse enkoder arayüzü" ile ABB marka pompa sürücüsüne ve PIV sistemindeki zamanlayıcıya bağlanmıştır. Ekran üzerinden pompa devri, motor frekansı, akım değerleri ve pompanın kullandığı toplam enerji (Watt cinsinden) görülmektedir. Pompa 0-2850 d/d aralığında çalıştırılabilmektedir. Pompa kontrolcüsü Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Pompa motor sürücüsü.

Deneylerde kullanılan suya yaklaşık 10 µm boyutlarında gümül kaplı küresel partiküller eklendiği için suyun içerisinde bu boyutlarda başka partiküller olması deneylerin sağlıklı yapılmasını engellemektedir. Bu nedenle deneylerde kullanılması için su tankına doldurulan su yumuşatma ve filtreleme işleminden geçmektedir. Sırasıyla 20-10 ve 5 µm boyutundaki filtrelerden geçen su tanka dolmaktadır. Ayrıca sertliği de azaltılmaktadır. Su filtre sistemi Şekil 3.20'de görülmektedir.

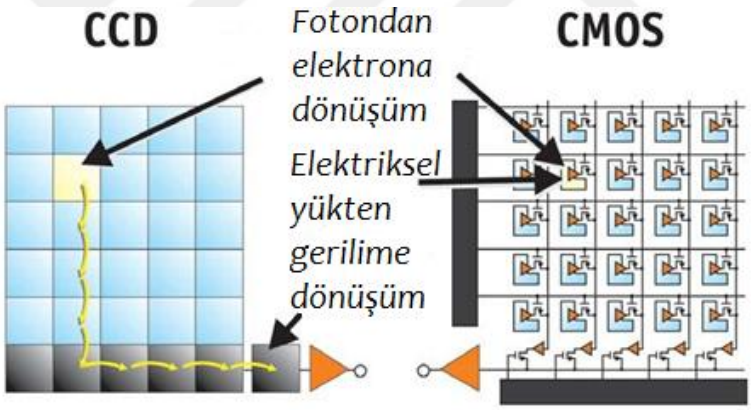


Şekil 3.20. Su filtreleme sistemi.

3.1.2. PIV sistem elemanları

Tez çalışmasında kullanılan PIV sistem ekipmanları bu bölümde özetlenmiştir. Deneylerde kullanılan hızlı kamera, CCD (Charged Coupling Devices) kamerasından

farklı olan CMOS (Complimentary Metal Oxide Semiconductor) kameradır. Şekil 3.21'de CCD ve CMOS dijital kameralarda bulunan ışığı elektronik sinyallere dönüştürmekten sorumlu olan görüntü sensörleri gösterilmiştir. Önceki yıllarda hızlı kameralarda, görüntüleri analog ışık sinyallerinden dijital piksellere çevirmek için CCD teknolojisi kullanılmaktaydı. Bunlar, bozulma olmaksızın çipte dönüştürme sağlayan özel bir üretim işlemiyle yapılmaktadır. CMOS çipleri, yükü geleneksel kablolarda hareket ettirmek için her pikselde yarı bir transistör kullanmaktadır. CCD sensörleri ışığa karşı daha hassastır. CMOS sensörleri düzgün bir ışıklandırmada düşük parazitli görüntü oluşturmak için daha fazla ışığa/aydınlatma alanına ihtiyaç duymaktadır. Bu da daha güçlü lazerlere gereksinim duyulduğu anlamına gelir. Deneylerde kullanılan SpeedSense 1040 kameralar son yıllarda geliştirilen kameraların birçoğu gibi CMOS teknolojisini kullanmaktadır (Şekil 3.22). Bu kamerada saniyede 1000 adet görüntü çifti alınabilmektedir. Kamerada parazit önleyici özelliği ile daha az parazitli ve daha küçük boyutta resimler elde edilebilmektedir.



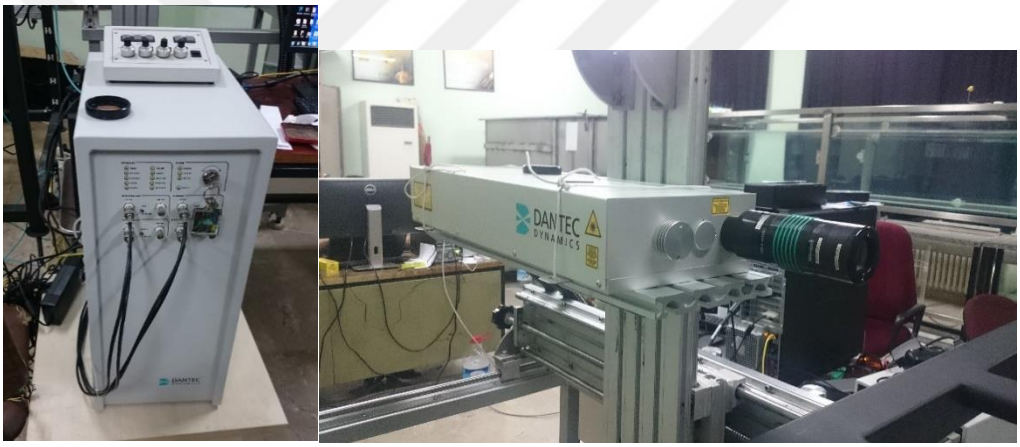
Şekil 3.21. CCD ve CMOS kamera görüntü dönüşüm teknolojileri.

Deneylerde pompa eksenine dik olarak yaklaşık 0.5 mm kalınlık değerinde bir lazer perdesi oluşturulması için maksimum 135 mJ çift kavite 15 Hz 532 nm PIV lazeri kullanılmıştır (Şekil 3.22). Lazer istenen lazer genişliğine göre ayarlanabilir lens ile pompanın ilk kademesinin tam ortasını aydınlatacak şekilde konumlanmıştır. Akışın görünür olması için havada yapılan ölçümlerde sis veya duman jenaratörü, suda yapılacak ölçümlerde ise parçacık kullanılır. Deneyler esnasında Şekil 3.23'de mikroskobik görüntüsü verilen 10 µm çaplı ve yoğunluğu suyun yoğunluk değerine yakın olmasından ötürü su içerisinde askıda kalabilen gümüş kaplı içi boş küresel partiküller kullanılmıştır. Bu partiküllerin yoğunluğu suyun yoğunluğuna yaklaşık eşit olduğu için akışkan nasıl hareket ediyorsa partiküller de öyle hareket eder. Bu sayede lazer aydınlatılan alanda akış

görselleştirilmiş olur. Deneylerde düzgün bir partikül dağılımı, PIV sisteminde hesap yapılabilir bir görüntü alınması açısından oldukça önemlidir.



Şekil 3.22. Üç boyutlu hareket mekanizması ve hızlı kamera.



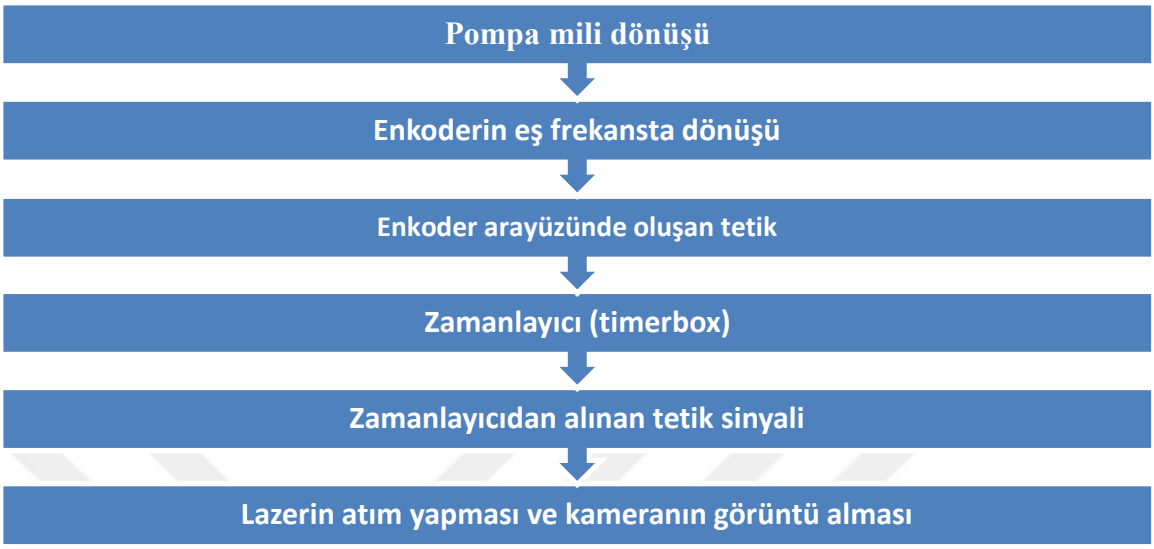
Şekil 3.22. Lazer güç kaynağı (solda) ve lazer ünitesi (sağda).



Şekil 3.23. Gümüş kaplı küresel partiküller ve mikroskobik görüntüsü (Anonymous, 2017a).

Çalışmada, PIV ölçüm sisteminin akış şeması aşağıdaki diyagramda özetlenmiştir. Pompa milinin dönüşü ile aynı eksene bağlı enkoderden sinyal alınmaktadır. Bu sinyal PIV sisteminin zamanlayıcısına gönderilmektedir. Buradan alınan sinyal ile lazer ve kamera aynı anda tetiklenmekte ve üst hız değerini geçmeyen

her hızda bir görüntü alması sağlanmaktadır. Bu şemada belirtilen olaylar milisaniye süresinde gerçekleşmektedir.

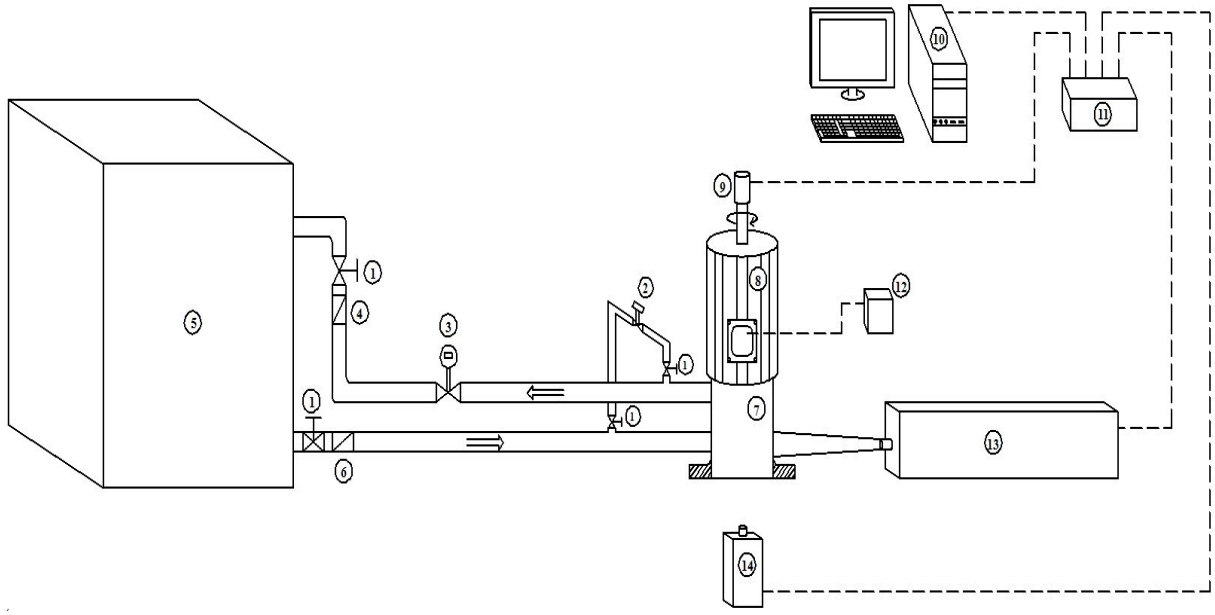


Yüksek hızlı kamera, 15 Hz Nd-Yag lazer, hareket ve sabitleme mekanizması, zamanlayıcı, pompa ve ölçüm sistemlerinden oluşan ve tasarıma uygun olarak kurulan deney setinin tüm parçaları ve deney sırasındaki pozisyonları Şekil 3.24'de verilmiştir. Alınan anlık görüntüler bilgisayara kaydedilmekte ve Dynamic Studio programında veriler işlenmektedir.

PIV deneylerinde kameralar, lazer ve pompanın yerleşimi ve tüm sistem elemanları şematik olarak Şekil 3.25'de verilmiştir. PIV deneylerinin yapılması için kamera aşağıda olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Bu nedenle kameranın hem dikey hem de gerektiğinde ayna kullanılarak yatay olarak kullanılabilmesi için 3 boyutlu mekanik hareketli bir mekanizma hazırlanmış ve kullanılmıştır. Deneylerden sistem parçaları uygun konumlarına alınarak terazileme ve hizalama işlemi yapılmaktadır. Daha sonra pompa kontrolcüsü ile ilk hareket verilmekte ve pompa su basmaya başlamaktadır. Uygun dönüş devrine getirildiğinde vanalarla basma yüksekliği ayarlanmakta, bu esnada elde edilen debi ve basma yüksekliği değerleri okunmaktadır. Pompa miline entegre edilen ve eşzamanlı çalışan enkoder ile lazer ve kamera tetiklenmekte ve istenilen adette pompa çarkı ölçümleri durağan pozisyonda yapılmaktadır.



Şekil 3.24. S.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü Hidrolik-PIV laboratuvarında kurulan PIV deney sistemi .



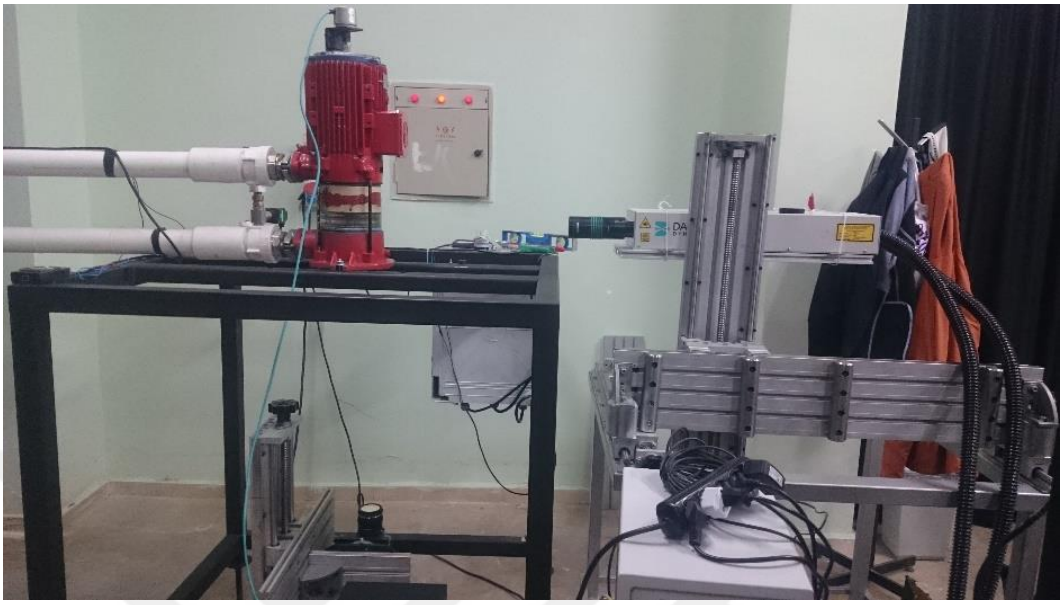
1-Vanalar	2-Basınç sensörleri	3-Akışmetre	4-Çekvalf	5-Su tankı
6-Filtre	7-Pompa kademeleri	8-Motor	9-Enkoder	10-Bilgisayar
11-Senkronizer	12-Pompa kontrolcüsü	13-Lazer	14-Kamera	

Şekil 3.25. PIV pompa sistemi şematik gösterimi.

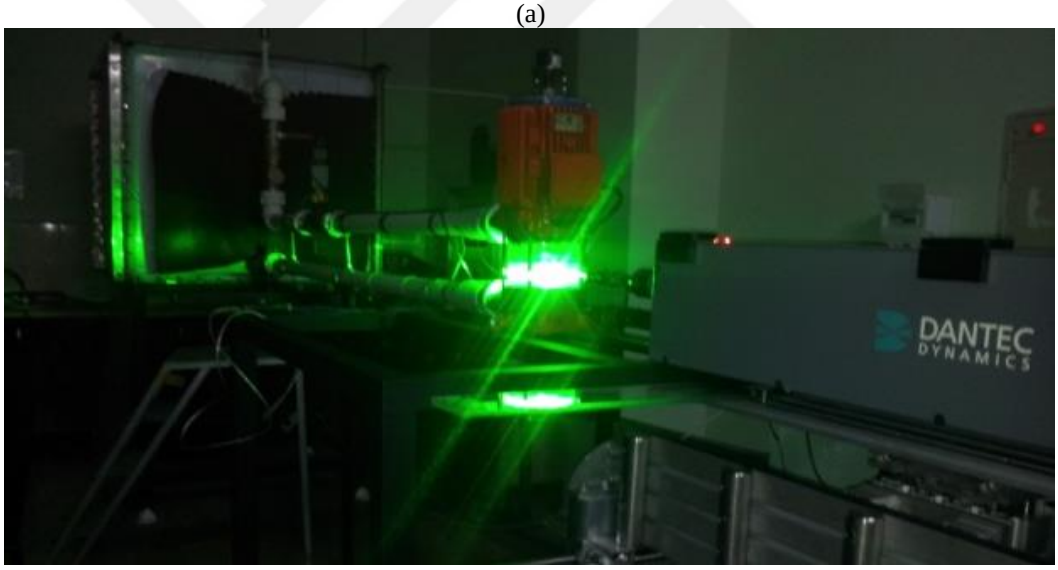
3.1.3. PIV deney yöntemi

PIV deneyleri kameraların ortamdaki lazer dışındaki ışıktan etkilenmemesi için karanlık ortamda yapılmaktadır. Lazer ve kameralar devredeyken deney sırasında çekilmiş bir fotoğraf Şekil 3.26'da verilmiştir. Ortamdan gürültü oluşturacak çevresel ışınların filtre edilmesi için kameralara filtre takılmış ve yalnızca lazerin dalga boyundaki

ışıkların görülmesine imkan sağlamaktadır. Bu sayede pompa çarkı haricindeki yerlerdeki aydınlatmadan dolayı eksik veya yanlış ölçümün önüne geçilmektedir.



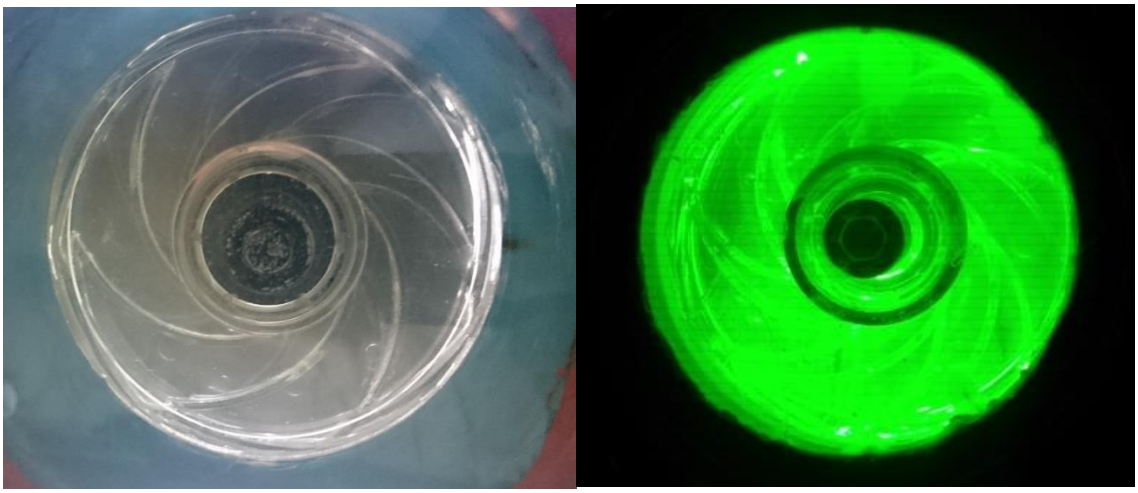
(a)



(b)

Şekil 3.26. (a)Deneyler sırasında lazer-kamera-pompa yerleşimi (b) lazerin pompa çarkını aydınlatması.

Deneyler sırasında kameranın lazer olmadan aydınlık ortamda görünümü, lazer ışığı altında çıplak gözle görünümü ve ölçüm düzlemin aydınlatılması Şekil 3.27'de verilmiştir. Lazer görüntü düzlemini tamamen aydınlatsa da lazer perdesi bozulmadan en uygun görüntüler sadece bir kanat aralığında elde edilmiştir. Literatürde de bu tarz çalışmalar mevcut olup, tüm kanat profilleri yerine tek bir kanat profiline bakılmasının akış yapısın incelemek açısından yeterli olacağı belirtilmiştir (Yang ve ark., 2012a; Dai ve Dong, 2013).

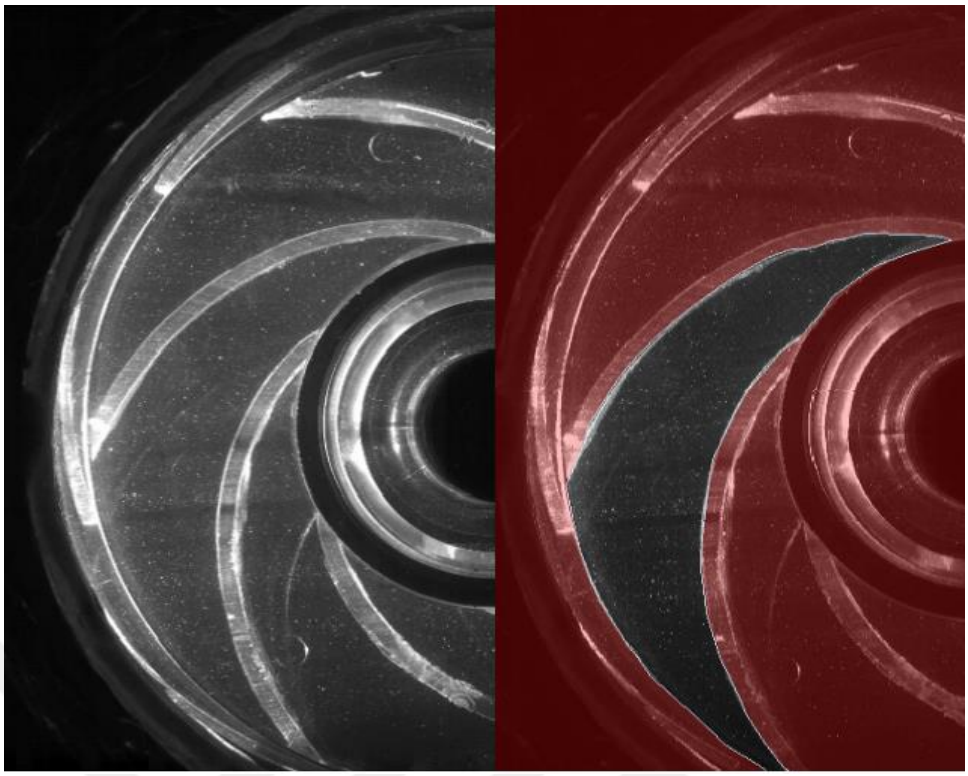


(a) (b)

Şekil 3.27. Kamera bakış açısı ile pompa çarkı (a) aydınlık ortamda lazersiz (b) lazer ile aydınlatıldığı ortamda deney esnasında görüntüleri.

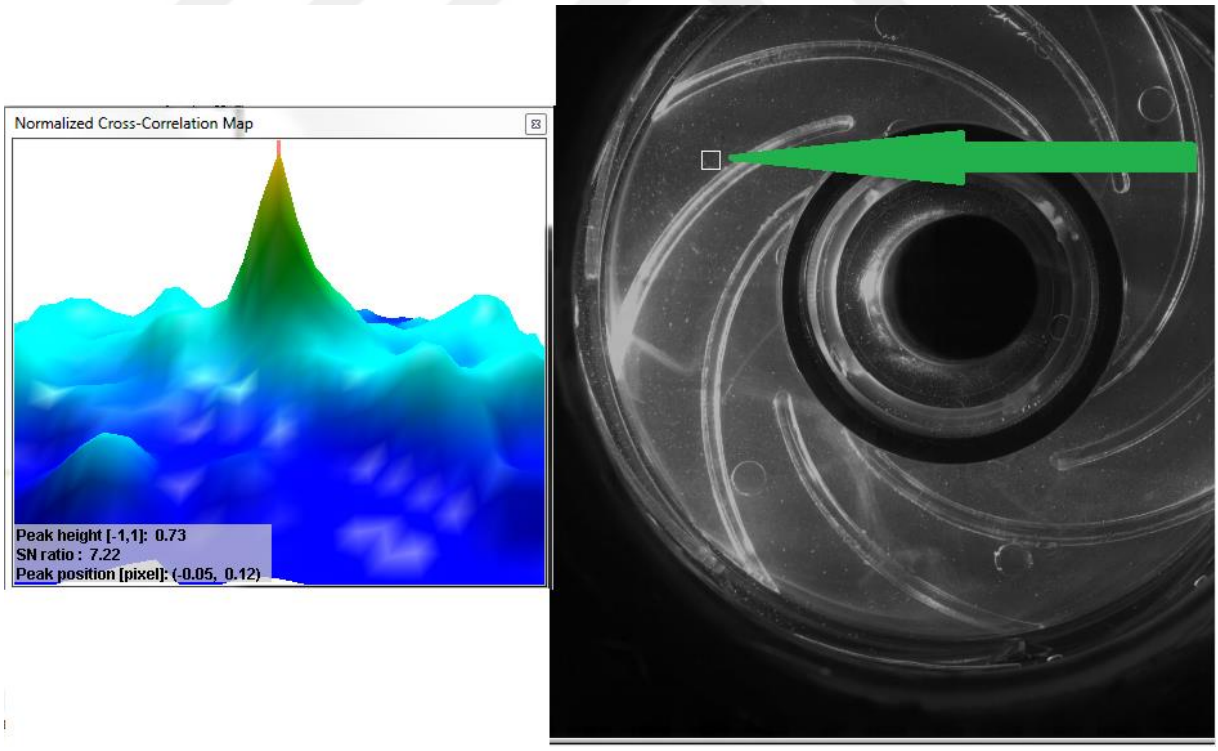
Deney düzeneğinde şeffaf malzemeden yapılmış çark modeli üzerine gönderilen lazer perdesini dik açıdan görüntüleyen CMOS kamera yardımı ile fotoğraflar alınmıştır. Görüntülerin tamamı enkoder sinyali ile alındığı için pompa çarkı durağan halde görüntülenmiştir. PIV deneylerinde kullanılan pompa çarkının ham görüntüsü ve sadece bir kanat aralığının maskelenerek alınan hali Şekil 3.28'deki gösterilmiştir. Uygun kamera pozisyonu lenslerin odak noktası sınırlaması ile görüntü alınacak yere mümkün olduğunca yakın seçilmiştir. Yalnızca bir çark arası görüntü alınacağı için diğer kısımlar maskelenmiş ve bu bölgelerde vektör hesaplanmamıştır. Bu sıralama aşağıda özetlenmiştir. Deneyler Selçuk Üniversitesi Makina Mühendisliği Hidrolik-PIV laboratuvarında bulunan PIV sistem elemanları kullanılarak yapılmıştır. Yüksek görüntü yoğunluğu kriteri için 32 x 32 piksel değerindeki görüntüleme alanının yaklaşık 10-25 partikülü içerecek düzeyde olması sağlanmıştır. Çözünürlüğü 1632 x 1200 piksel olan hızlı kamera, hız alanlarının hesaplanmasında kullanılmak üzere 500 görüntüyü motor miline bağlı olan enkoder tetiği ile elde etmiştir.





(a) (b)

Şekil 3.28. Pompa çarkının (a) CMOS kamerada görüntüsü (b) maskelenmiş görüntüsü.



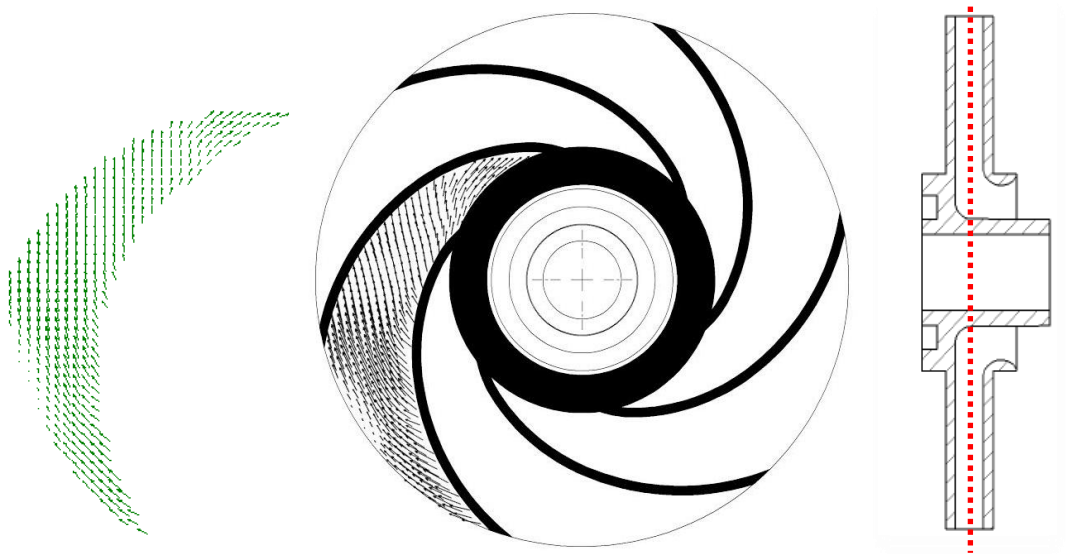
Şekil 3.29 Pompa çarkı içerisinde çapraz korelasyon.

Şekil 3.29'da çark 2 için örnek bir bölgede çapraz korelasyon değeri kontur içerisinde gösterilmiştir. Burada önemli olan çapraz korelasyon haritasından da

görüleceği gibi bir pik noktası elde etmektir. Bu nokta her ölçüm değerinde alınan iki resim arasındaki uyumu gösterir. Bu iki resim arasında partiküllerin uygun hızda ilerlediği ve PIV görüntü işlemesi ile hesap yapılabilmesi için uygun olduğunu göstermektedir (Willert ve Gharib, 1991). Yapılan deneylerde partiküllerin homojen olarak dağılmasına da dikkat edilmiştir.

Geometrinin şekil sınırlarını kapsayacak biçimde maskeleme tanımlandıktan sonra, alınan görüntülere uyarlamalı korelasyon uygulanarak her bir anlık görüntü için hız vektörleri 32x32 piksel alanlarda oluşturulan ağ yapısı ile hesaplanmıştır. Şekil 3.30(a)'da adaptasyon korelasyon tekniği uygulanmış ve vektörler elde edilmiş bir görüntü verilmiştir. Uyarlamalı korelasyon tamamlandıktan sonra ilave bir adım olarak ortalama filtreleme uygulanarak hız vektörleri üzerinde gerekli durumlarda filtreleme yapılmıştır. Bu filtrelerin boyutları ve etki alanları görüntüdeki vektörlere uygun olarak seçilmiştir. Bu filtreleme ile yansımadan, titreşimlerden ve gölgelerden kaynaklanan bozuk hız vektörleri temizlenmiştir. Elde edilen vektör alanlarının anlaşılır olması için Şekil 3.30(b)'de ki gibi çark geometrisi vektörlerin üzerine yerleştirilerek çalışmada sunulmuştur. Şekildeki görüntüler 1 adet görüntüdeki vektör alanıdır. Çalışmada çarkın aynı pozisyonu için 500 adet görüntü alınmış ve bu görüntülerin ortalama değerleri sunulmuştur. PIV ile elde edilen hız vektörleri mutlak hız vektörleridir. Oluşturulan bir algoritma ve yazılan program ile her bir noktadaki hız değerleri dönme etkisi çıkarılarak bağıl hız değerleri de elde edilmiştir. Şekil 30(b)'de siyah renkle görülen bilezik görüntü bölgesinde çark giriş açısının görülmesini engellese de çark mukavemeti için gerekli olduğundan kullanılmıştır. Şekil 3.30(c)'de ise PIV ve HAD görüntülerinin aldığı düzlem kesik çizgi ile gösterilmiştir.

PIV sisteminde hız alanlarının hesaplanmasında ve deneylerde PIV sistem üreticisi Dantec Dynamics tarafından geliştirilen, sisteme entegre şekilde çalışan DynamicStudio yazılımı (Anonymous, 2017b). Bu programda aynı zamanda maskeleme ve verilerin ilk proseslerinin yapılması için kullanılmıştır. Farklı debilerde elde edilen veriler 4. Bölümde detaylı olarak sunulmuştur.



(a) (b) (c)

Şekil 3.30. (a) PIV ile elde edilen anlık hız vektörü (b) Çark geometrisi eklenmiş anlık hız vektörü ve (c) görüntülerin alındığı pompa çark kesiti.

3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi

Pompadaki akışın modellenmesinde akışkanlar mekaniğinin genel denklemleri olan Navier-Stokes ve süreklilik denklemleri kullanılmaktadır. Sıkıştırılamaz ve daimi akış için süreklilik ve momentum denklemleri sırasıyla 3.8 ve 3.9'da verilmiştir (Çengel ve ark., 2008).

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \tag{3.8}$$

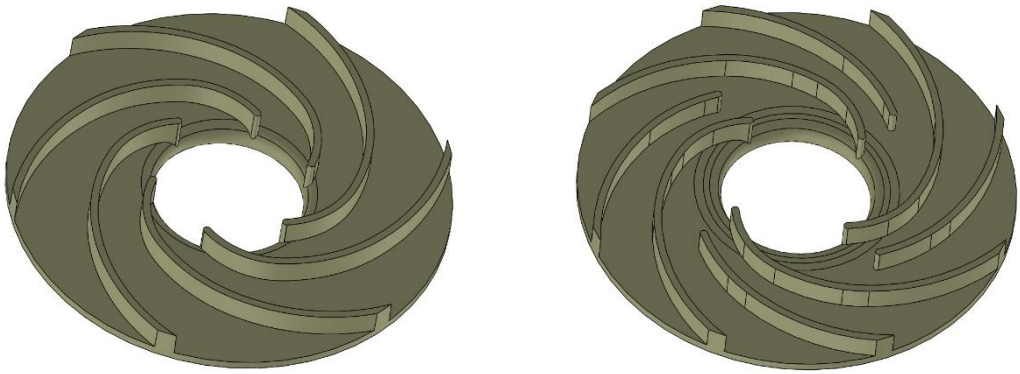
$$\frac{\partial (\overline{u_i}\overline{u_j})}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_i \partial x_j} \tag{3.9}$$

şeklinde verilmektedir. Burada u_i ve u_j, sırasıyla x_i ve x_j kartezyen koordinatları boyunca hız bileşenlerini, p akışkanın basıncını, ρ akışkanın yoğunluğunu, ν akışkanın kinematik viskozitesini ve τ_{ij} türbülans gerilmesini göstermektedir. Zamana bağlı terimler analizlerin daimi koşullarda yapıldığı için sıfır olarak alınır.

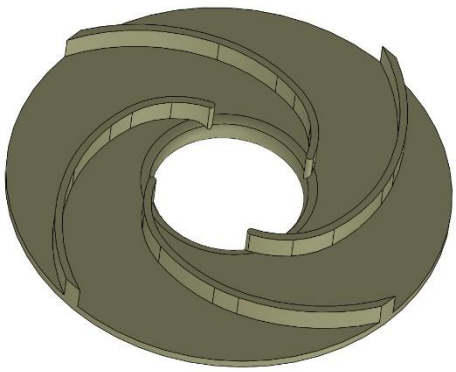
3.2.1. Çarkın katı modelinin oluşturulması

HAD analizlerinin yapılması için tezde kullanılan çarkların katı modelleri SolidWorks programı ile oluşturulmuştur. Analizler yapılan pompa Sempa firması tarafından ticari olarak üretilen SPL100-3 serisi 3 kademeli bir pompadır. Tez

çalışmasında analiz ve deneyler 3 farklı pompa çarkı ile yapılmıştır. Tanımlamanın ve anlatımın kolay olması için orijinal 6 Kanatlı orijinal pompa çarkı **Çark 1**, 4 ana 4 ara kanatlı pompa modeli **Çark 2**, ara kanat ilavesiz 4 kanatlı pompa çarkı ise **Çark 3** olarak nitelendirilmiştir. 3 farklı çark modelinin katı modelleri Şekil 3.40'de verilmiştir. Çark 2 ve Çark 3'ün geometrilerinin belirlenmesi için yapılan analizlerin detayları 4. bölümde açıklanmıştır. Temel olarak, orijinal pompa çarkı olan çark 1 kullanılan pompa ile yapılan analizler sonucu çark içerisinde görülen ters akış,ikincil akış ve düşük hız bölgelerinin önüne geçmek ve basma yüksekliğinde artış elde etmek için kanat profili değiştirilmeden ana kanat sayısı azaltılıp, ara kanat ilave edilerek Çark 2 oluşturulmuş, PIV analizlerinde yansıma ve gölge etkisini azaltmak için de ara kanat ilavesiz 4 kanatlı Çark 3 oluşturularak çalışmalar yapılmıştır. Oluşturulan pompa modelleri gerçek çalışma şartlarına uygun olarak, çark ile santrifüj pompanın diğer elemanları arasında sızıntı kayıplarının meydana gelebileceği şekilde yataklama boşlukları verilerek oluşturulmuştur. Ayrıca Çark 2 ve Çark 3 tasarlanırken orijinal Çark 1'in kanat profili referans alındığı için kanadın ve çarkın geometrik yapısında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Çark 2'de ise ilave edilen ara kanatlar mevcut kanatlardan türetilmiştir. Ara kanat uzunluğunun ana kanat uzunluğuna yüzdesel oranı olarak ara kanatlar oluşturulmuştur. Bu ara kanatlar Çark 2'de iki ana kanat arasındaki pasajın tam ortasına çark çıkışından başlayacak şekilde yerleştirilmiştir.



(a) (b)



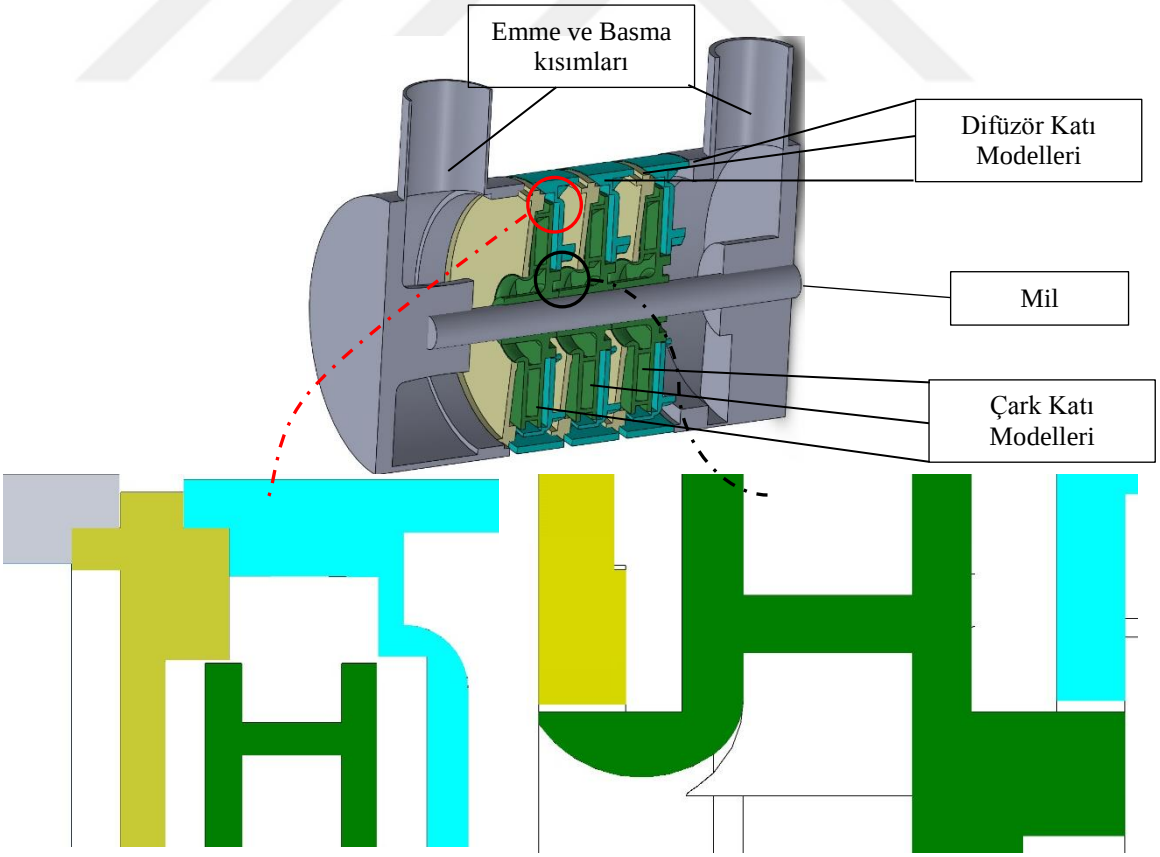
(c)

Şekil 3.40 Analiz ve deneyleri yapılan çarkların katı modelleri (a) Çark 1 (b) Çark 2 (c) Çark 3.

Tez çalışmasında kullanılan 3 farklı pompa çarkının boyutları Çizelge 3.3'de verilmiştir. Tüm pompa çarkları silindirik kanat yapısına sahiptir. Bu tip kanatlı bir pompa seçilme nedeni lazerin yansımaması ve kanadın arka bölgelerinde de lazer perdesinin bozulmadan oluşmasıdır.

Çizelge 3.3 Çalışmada kullanılan çarkların ölçüleri.

Parametre	Simge	Çark 1	Çark 2	Çark 3
Çark giriş çapı	D_0 (mm)		46.5	
Kanat giriş çapı	D_1 (mm)		42.6	
Çark girişindeki kanat açıklığı	b_1 (mm)		9.2	
Çark çıkışındaki kanat açıklığı	b_2 (mm)		7.2	
Şaft çapı	D_m (mm)		18.15	
Göbek çapı	D_g (mm)		25.5	
Çark dış çapı	D_2(mm)		123.5	
Kanat giriş açısı	B_{1k}		22°	
Kanat çıkış açısı	β_{2k}		26.4°	
Kanat et Kalınlığı	e (mm)		2.1	
Ara kanat et kalınlığı	e_1 (mm)		2.1	
Asıl kanat sayısı	Z	6	4	4
Ara kanat sayısı	Z_1	-	4	-



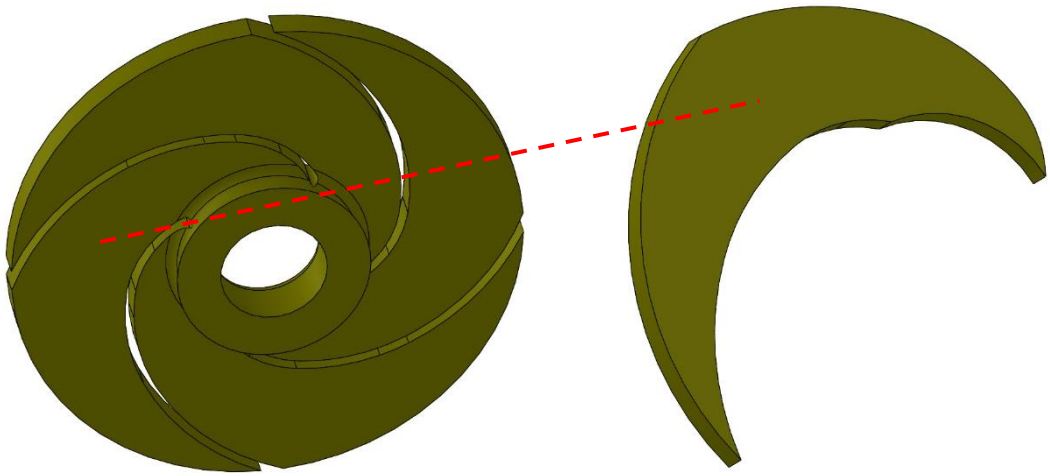
Şekil 3.41. Tüm pompa katı model kesit görüntüsü.

Çarkların tasarımı ile SPL-100-3 santrifüj pompanın mevcut elemanları kullanılarak model üzerinde montajı gerçekleştirilmiştir. Yapılan montaj çalışmalarında Z ekseni dik konumda ANSYS-Fluent programına aktarılmıştır. Şekil 3.41'de oluşturulan katı model kesiti verilmiştir.

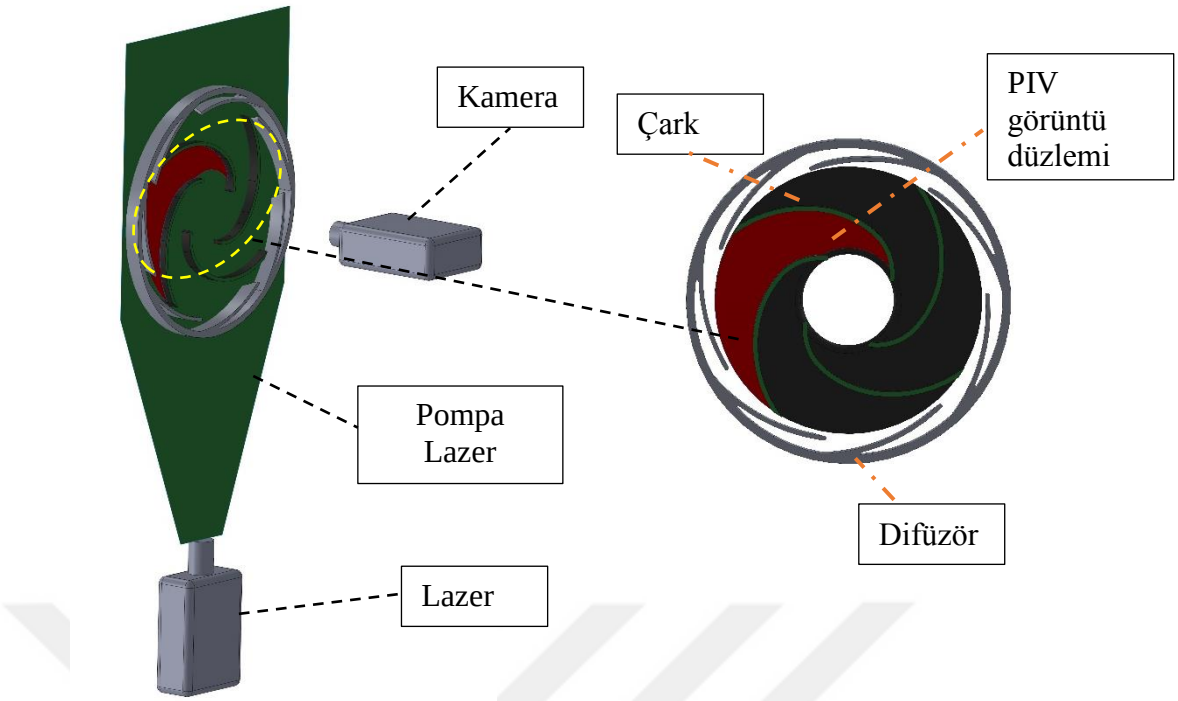
3.2.2. Akış hacimlerinin oluşturulması

Pompanın tüm elemanlarının katı modelleri tamamlandıktan sonra SolidWorks programında montajları yapılmıştır. Akış hacmi oluşturulmadan önce pompa ve giriş ve çıkışları yüzeyler oluşturularak kapatılmıştır. Ayrıca çark akış hacimlerinin pompa akış hacimlerinden ayrılması için çark giriş ve çıkışları da tanımlanan yüzeylerle kapatılmıştır. Daha sonra ANSYS DesignModeler programında akış hacmi türetilmiştir. Bunun yanında çarklarda PIV ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması için Şekil 3.42'de görüldüğü gibi iki kanat arası pasajlar ayrı ayrı oluşturularak tanımlanmıştır.

Çark içerisinde PIV ölçümleri pompanın ilk kademesinde yapılmıştır. Hem sayısal hem deneysel çalışmaların karşılaştırılması için çark çıkış genişliğinin tam ortasında (0.5 span) bir yüzey tanımlanmıştır. Elde edilen HAD sonuçlarını PIV ile karşılaştırmak için bu yüzey üzerinden alınan sonuçlar kullanılmıştır. Bu bölge Lazer-Kamera ve çark yerleşimini de gösterecek biçimde Şekil 3.43'de verilmiştir. PIV ile elde edilen sonuçlar yalnızca bir kanat arasında alınmıştır. Buna benzer çalışmalar literatürde de mevcuttur (Dai ve Dong, 2013).

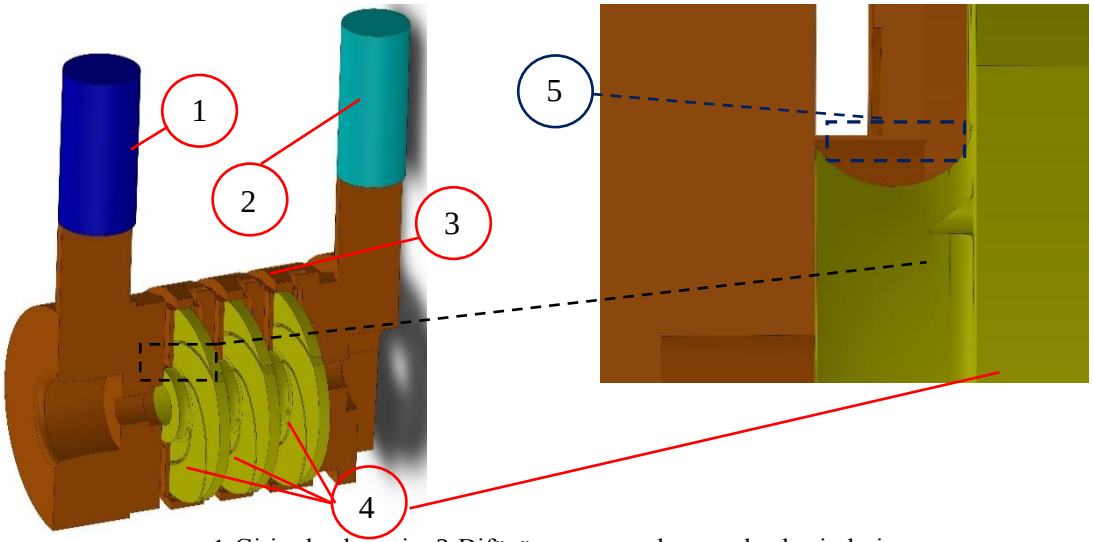


Şekil 3.42. Çark 3'ün akış hacmi ve PIV sonuçlarının karşılaştırıldığı akış pasajı.



Şekil 3.43 Çark 3 için Pompa-Lazer-Kamera düzlemi ve görüntü ekseni.

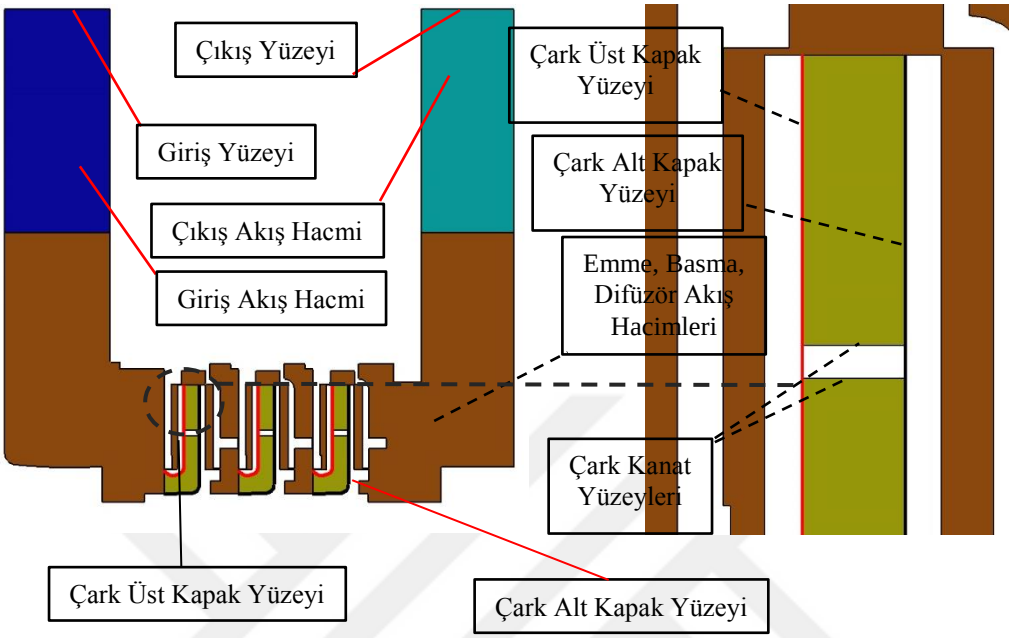
Pompada akış hacimleri dönme ekseni "Z" ekseni olacak şekilde düzlemlere yerleştirilmiştir. Sayısal analizlerin gerçek koşulları temsil etmesi amacıyla Sızıntı kayıplarının gözlemlendiği boşluklar katı modellerde üretime uygun olarak bırakılmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan akış hacimleri Şekil 3.44'de verilmiştir.



1-Giriş akış hacmi 3-Difüzör, emme ve basma akış hacimleri
2-Çıkış akış hacmi 4- Çark akış hacimleri 5-Sızıntı kayıpları

Şekil 3.44. Pompa akış hacimleri.

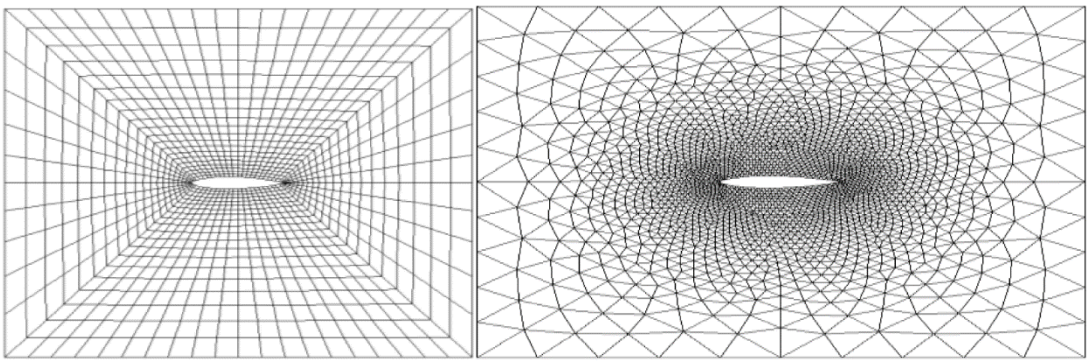
Akış hacimlerinin hazırlanmasının ardından sayısal çözümlemelerde tanımlanacak yüzeyler isimlendirilmiştir. Tanımlanan bu yüzeyler Şekil 3.45'de santrifüj pompa akış hacminin meridyenel düzlemdeki kesit görünümü üzerinde verilmiştir.



Şekil 3.45. Akış hacimlerinin kısmi kesit görüntüleri.

3.2.3. Sayısal çözüm ağının oluşturulması

Akış hacimlerdeki sayısal ağ yapılarının oluşturulmasında kullanılan iki temel çeşit vardır: Bunlar yapısal ve yapısal olmayan ağ yapılarıdır. Yapısal ve yapısal olmayan ağlara birer örnek Şekil 3.46'da görülmektedir.



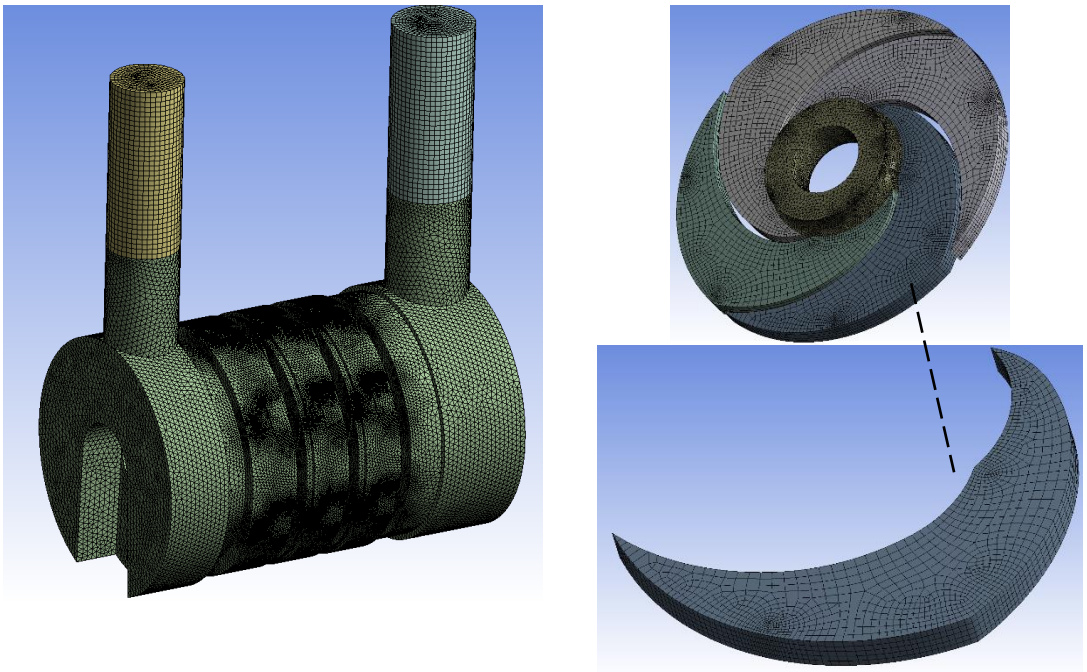
(a) (b)

Şekil 3.46. (a) Yapısal ve (b) yapısal olmayan ağ yapıları.

İki temel ağ çeşidi 3 ekli alt ağ tipini içerir. Bunlar blok-yapısal, overset ve hibrit'dir. Bu ağ çeşitleri yapısal ve yapısal olmayan ağların her ikisinin de özelliklerinin

bazı boyutlarına sahiptirler. Bu yüzden tamamen yapısal ve yapısal olmayan ağların arasında ortadaki bir pozisyonda bulunurlar. ANSYS-Fluent değişik kaynaklardan birçok farklı tipteki ağları alarak kullanabilmektedir. İki boyutta dörtgen ve üçgen hücreler ile üç boyutta altı yüzlü, dört yüzlü, prizma ve piramit hücreler kullanabilir. Tek bloklu ve çok bloklu yapısal ağların yanı sıra dörtgen ve üçgen ya da altı yüzlü, dört yüzlü, piramit ve prizma hücrelerini birlikte içeren hibrit ağlar da kullanılabilmektedir. Çok geniş çeşitlilikte ağ yapılarının kullanılabilmesinin yanı sıra ANSYS-Fluent geometrik ve sayısal çözüm bilgilerine göre, kullanılan ağ yapısını iyileştirme yani ağ adaptasyonu yeteneğine de sahiptir. Bu tez kapsamında üç boyutlu çalışmalarda ise altı yüzlü hücreler kullanan yapısal ağlar ve dörtyüzlü hücreler kullanan yapısal olmayan ağlar birlikte kullanılmıştır.

Pompa gibi karmaşık geometrilere sahip olan yapıların, akış hacimlerinde yapısal çözüm ağı oluşturmak oldukça zordur. Bu nedenle tez çalışmasında kullanılan pompa akış hacimlerinde özellikle difüzör akış hacmi üzerinde bazı yüzeyleri temizleme ve birleştirme işlemleri uygulanmıştır. Böylece hem uygun büyüklükte hücreler kullanılmış hem de yoğun hücre dağılımı olmayan çözüm ağları türetilmiştir (Şekil 3.47). Ayrıca çözüm ağlarında maksimum çarpıklık (skewness) değeri 0.87 olarak sağlanmıştır. Çözüm ağları için giriş ve çark içi bölgelerde 6 yüzlü hücreler, difüzör ve çark girişi gibi yerlerde ise üçgensel dörtyüzlü ağ yapıları kullanılmıştır. Sayısal çözüm ağlarında kullanılan hücre sayısı 5-6x10^6 aralığındadır.



Şekil 3.47. Tüm pompa ve çark üzerinde oluşturulan ağ yapıları.

3.2.4. Ağdan bağımsızlaştırma işlemi

Bu bölümde, HAD programına aktarılan pompa geometrisi sonlu birçok hacme bölünerek çözüme hazır hale getirilir. Tezde kullanılan HAD programı, çözümü gerçekleştirirken sonlu hacimler yöntemini kullanmaktadır. Hacim sayısı artıkça çözüm süresi ve kullanılan bilgisayarda gerekli bellek alanı artar. Yani daha fazla ağ ile analizler gerçekleştirilse de verim değerlerinde önemli bir değişiklik olmayacak, buna karşın çözüm süresi ağ sayısı ile orantılı olarak artacaktır. Bu yüzden çözümde kullanılacak ağ belirlenmeden önce pompa geometrisi için ağ sayısından bağımsız hale getirme çalışmasının yapılması gerekmektedir. Sayısal ağdan bağımsızlaştırma işlemi yapılırken çarkın verim ve basma yüksekliği ifadesinin farklı ağ sayısındaki değişimi tasarım debisi olan 12.5m^3/h debi değerinde incelenmiştir. Bu incelemede Çark 1, Çark 2 ve Çark 3 için öncelikle 5 x10^5 civarında ağ oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Daha sonra ağ sayısı yaklaşık 2 katına çıkarılarak analizler tekrarlanmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda birbirini takip eden farklı ağ sayılarında genel verim değerleri arasındaki fark 5x10^6 ile 10x10^6 ağ sayılarında %0.2 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu farklılık neticesinde çalışmalarda kullanılacak ağ sayısı 5x10^6 olarak belirlenmiştir (Li ve ark., 2018).

3.2.5. Akış probleminin tanımlanması

Bu çalışmada basınca dayalı bir sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Akışın daimi olduğu kabul edilip sıvı akışkan olarak su seçilmiştir. Pompa karakteristik eğrileri ve faz ortalamalı PIV karşılaştırması için daimi olmayan (unsteady) HAD analizleri yerine daimi HAD çalışmaları sonucu ile karşılaştırmanın daha doğru sonuçlar verdiği literatürde sunulmuştur (Zhou ve ark., 2012; Ling ve ark., 2015). Sıvı akışkanın sıcaklığında herhangi bir değişim olmadığı kabul edilip enerji denklemi sayısal analizlere dahil edilmemiştir. Çark akış hacmine Z ekseni etrafında 3 farklı çark modeli için de 1900 ve 2850 d/d değerinde dönme hareketi tanımlanmıştır. Program ara yüzüne difüzör, giriş ve çıkış akış hacimleri ise sabit olarak girilmiştir. Santrifüj pompa sayısal analizleri farklı debilerde yapılmıştır. Ancak PIV ile karşılaştırma yapılan analizlerde verilerin çokluğu nedeniyle 2850 d/d'daki tasarım debisi 12.5m^3/h (Q_{2d}) değerinin altında 0.85Q_{2d} debilerinde, tasarım debisi Q_{2d}'da olan ve tasarım debisinin %15 fazlası olan 1.15Q_{2d}

debilerinde analizler yapılarak PIV ile karşılaştırılmışlardır. Bunun nedeni farklı debilerde akış yapısının belirlenmesi ve sonuçların hem deneysel hem de PIV ile karşılaştırılabilmesidir. 1900 d/d'da ise benzer şekilde 0.85-1.0 ve $1.2Q_{1d}$ debi oranlarında çalışmalar yapılmıştır. Tüm pompa için HAD analizlerinde kullanılan sınır koşulları Çizelge 3.4'de verilmiştir. Kullanılan çarklar yüzeyi parlatılmış kalıplarda plastik enjeksiyon yöntemi ile üretildiği için, döküm ile üretilen yüzeyler de seramik malzeme ile kaplandığı için yüzeyler pürüzsüz kabul edilmiştir. Düşük devirlerde analiz yapılmasının nedeni PIV'de yapılan karşılaştırmaların farklı çarklarda ve farklı debilerdeki uyum değişimini görebilmektir. Ayrıca PIV'nin kısıtlarından dolayı öncelikle düşük devirlerde deneyler yapılabilmiş daha sonra geliştirilen altyapı ve enkoder sayesinde yüksek devirlerde de deneyler yapılabilmiştir. Analizlerde kullanılan debi ve basma yüksekliği değerleri 3 farklı çark için de yapılan deneyler sonrasında elde edilmiştir.

Çizelge 3.4. HAD analizlerinde sınır şartları.

Bölge	Sınır Şartı
Giriş	Kütlesel debi
Çıkış	Statik basınç
Duvarlar	Duvarda kaymama koşulu
Çark	Hareketli referans kontrol hacmi
Arayüz	Genel bağlantı
Duvar fonksiyonu	Standart duvar fonksiyonu
Yüzeyler	Pürüzsüz

3.2.6. Türbülans modeli

Pompalarda akış analizleri yapılırken genellikle akışın daimi ve sıkıştırılamaz olduğu kabul edilir ve akışkan sıcaklığında akım boyunca meydana gelen değişimler göz ardı edilir. Bu yüzden pompa akış analizlerinde enerji denklemi çözümlemelerden çıkarılmaktadır. Pompa içerisindeki akışın türbülanslı olması nedeniyle, türbülans denklemlerinin de çözümlenmesi gerekmektedir. Akış çözümlemeleri için farklı türbülans modelleri literatürde mevcuttur. Daimi seçilme nedeni PIV ile elde edilen değerlerin durağan halde faz ortalama değerleri olmasıdır.

Bu tez çalışmasında türbülans çözümlemelerinde literatürde pompa analizleri için sıklıkla kullanılan realizable k-ε, standard k-ϵ, standard k-ω, SST k-ω, ve RNG modelleri denenmiştir. Farklı türbülans modelleri ile gerçekleştirilen analiz sonuçları ile PIV deney sonuçları karşılaştırılmış ve sayısal analizler için SST k-ω modelinin daha uygun olduğu elde edilen deneysel verilerle tespit edilmiştir. Bu konu ile ilgili analizler ve detaylar 4.1.

bölümünde verilmiştir. Bu modellerden, SST k-ω türbülans modelinin denklemleri, Denklem 3.10 ve 3.11'de sunulmuştur (Anonim, 2015) .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - Y_k + S_k \tag{3.10}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \tag{3.11}$$

Bu denklemlerde, k, türbülans kinetik enerjisi olarak ifade edilmektedir ve ω ise özgül yitim oranıdır. G_k, ortalama hız gradyanı kaynaklı olarak türbülans kinetik enerjisi üretimidir. G_ω ise özgül yitim oranının üretimidir. Γ_k ve Γ_ω ise k ve ω için sırasıyla efektif yayılma gücü (difüziviteyi) temsil etmektedir. Y_k ve Y_ω, sırasıyla k ve ω değerlerinin türbülanstan dolayı yitimini vermektedir. D_ω çapraz difüzyon terimidir. S_k ve S_ω kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir (Anonim, 2015).

Herhangi bir akış probleminde duvar olarak tanımlanan yüzeylerin kayıplar üzerindeki etkisi büyüktür. Bu nedenle akış problemi için doğru bir duvar fonksiyonu seçilmeli ve duvar yakınlarında yer alan hücre dağılımlarının kontrolü gerçekleştirilmelidir. Duvar olarak tanımlanan yüzeylere yakın bölgelerin türbülans üzerine farklı etkileri vardır ve y^+ değerleri kontrol edilmelidir. y^+değeri hesabı için denklem 3.12'de tanımlanan eşitlik kullanılmaktadır. Bu denklemde, "u_*" hücreye en yakın duvar olarak tanımlanan yüzeydeki sürtünme hızı, "y" bu hücrenin en yakın duvar olarak tanımlanan yüzeye olan uzaklığı, "ν" lokal kinematik viskozitedir. Duvar fonksiyonları duvar olarak tanımlanan yüzeylere yakın hücrelerde akışın fiziğini karşılamak amacı ile kullanılan ve çözüm değişkenleri üzerine etki eden yarı ampirik fonksiyonlardır. Bu fonksiyonlar, ortalama hız ve sıcaklık için duvar kanunları ve duvar yakınlarında türbülans miktarı formüllerini içermektedir. Bu çalışmada "standart duvar fonksiyonları" kullanılmıştır (Anonim, 2015).

$$y^+ \equiv \frac{u_* y}{\nu} \tag{3.12}$$

Literatürde SST k-ω modeli için duvar fonksiyonu yakın duvar modeli yaklaşımı kullanılırsa boyutsuz y^+değeri önem arz eder (Anonymous, 2018b). Bu tez çalışmasında olduğu gibi, laminer olmayan bir akış söz konusu ise, duvara yakın bölgede ve cidarda

hassas çözüme ihtiyaç yoksa ve enerji denklemleri de kullanılmıyorsa serbest akım bölgesinde $30 \leq y^{+} \leq 300$ olmalıdır (Zhou ve ark., 2012; Anonymous, 2018a). Çalışmada uygun y^{+} değerleri elde edilmiştir.

3.2.7. Sınır şartları

Pompa analizleri için kullanılan sınır şartları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. HAD analizleri için sınır şartları değerleri.

Sınır koşulları	Giriş	Çıkış	Alt ve Üst kapaklar, Kanatlar	Çark katı modellerinin akış hacmi ile temasta olduğu yüzeyler
Kütlesel debi (m/s)	0.98/4.88	-	-	-
Türbülans yoğunluğu (%)	3.25	3.4	-	-
Hidrolik çap(mm)	47	41.5	-	-
Basma yüksekliği (kPa)	-	20-57	-	-
Yüzeyin bağlı olduğu akış hacmine göre bağıl hızı (d/d)	-	-	0	1900-2850

Analizler sırasında süreklilik, hız ve türbülans değerlerinin yakınsama oranları yapılan çözümleme sayısından bağımsız olarak 10^{-5} değerinin altına inmesi durumunda analizler sonlandırılmıştır. Çözümleme sayısı tamamlandığında ise süreklilik yakınsama değerlerinin 10^{-4} ve daha düşük olması durumunda devam eden analiz sonuçlarında önemli bir değişiklik olmadığı için sayısal çözümlemenin yakınsadığı kabulü de yapılmıştır.

3.3. Santrifüj Pompa Karakteristik Eğrilerin Elde Edilmesi

3.3.1 HAD çalışmaları için hesaplamalar

HAD çalışmaları tamamlandıktan sonra pompanın genel verimi η_g, pompa basma yüksekliği H_m(m), hacimsel debi $\dot{Q}$ (m^3/s), pompa devri $\dot{n}$ (d/d) ve tork T (Nm) değerleri kullanılarak denklemler 3.13-3.17 kullanılarak hesaplanmıştır (Pfleiderer, 1949; Baysal, 1979; Pfleiderer ve Petermann, 1985; Yalçın, 1998; Jafarzadeh ve ark., 2011).

$$P_h = \frac{\rho \, g \, \dot{Q} \, H_m}{1000} \tag{3.13}$$

$$P_m = \frac{T\omega}{1000} \tag{3.14}$$

$$\omega = \frac{\dot{n}\pi}{30} \tag{3.15}$$

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_m} \tag{3.16}$$

$$\eta_g = \eta_h\ \eta_k\ \eta_{em} = \frac{P_h}{P_{mil}} \tag{3.17}$$

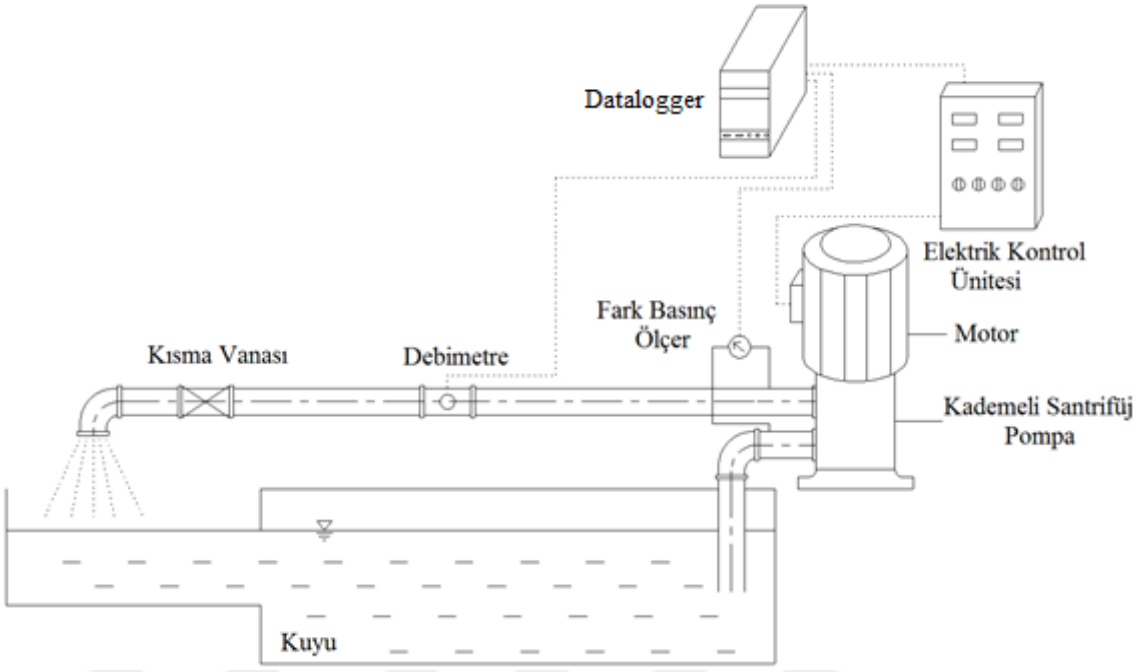
Yukarıdaki formüllerde P_h hidrolik gücü, P_m mil gücünü, ω açısal hızı, η_h hidrolik verimi, η_g genel verimi belirtmektedir. Pompa HAD çalışmalarında ise sızıntı akışları dahil edilmiştir. Pompa HAD çalışmalarında ise kayıp kaçak akışlar dâhil edilmiş ve mekanik verim %95 olarak kabul edilmiştir (Baysal, 1979).

3.3.2 Deneysel çalışmalar için hesaplamalar

Deneysel çalışmalarda da hidrolik güç (P_h) HAD çalışmalarında verilen denklem (3.15) ile hesaplanmıştır. Ancak burada farklılık formüldeki verilerin önceki bölümde anlatılan ölçme aletleri ile deneysel olarak elde edilmesidir. Deneysel çalışmalar için genel verim benzer şekilde HAD çalışmalarında olduğu gibi Denklem (3.17) ile hesaplanmaktadır. Elektrik gücü ise HAD çalışmalarından farklı olarak aşağıda belirtilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$P_e = \frac{\sqrt{3}\ I\ cos\varphi\ V}{1000} \tag{3.18}$$

Burada kullanılan deney setinin doğruluğunu teyit edilmesi amacıyla pompa deneyleri ile ilgili çalışmalar Sempa Ltd. Şti. bünyesinde bulunan TS EN ISO 9906 ve TS EN IS0 9908 standartlarına uygun olarak kurulan deney düzeneğinde de gerçekleştirilmiştir. Deney setinin şematik görünümü Şekil 3.48 verilmiştir. Deneyler fabrikada kullanılan temiz şebeke suyu ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler kısma vanası yardımıyla belirlenen farklı akışkan debilerinde yapılmıştır. Debimetre, fark basınçölçer ve elektrik kontrol panelinden okunan değerler Dataloggerda kayıt edilerek gerekli hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 3.48. Deney setinin şematik görünümü.

Deney düzeneğinde debi ölçümleri Siemens marka debimetre ile yapılmıştır. Basınç ölçümleri için fark basıncı ölçen Pakkens marka basınç ölçerler kullanılmıştır. Sistemdeki ölçüm aletlerinin kalibrasyonlu cihazlar olup belli periyotlarla kontrolleri de yapılmaktadır. Deneylerin gerçekleştirildiği debi değerleri referans alınarak pompa HAD analizleri tamamlanmış ve deneysel sonuçlar ile HAD sonuçları karşılaştırılmıştır.

3.4. Belirsizlik Analizi

Birçok bilim dalında yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen değerler, ölçülen büyüklüklerin fiziksel gerçek değerine yaklaşımlardır. Bütün deneysel çalışmalarda, çeşitli sebeplerden dolayı hatalar meydana gelmektedir. Bu hataları üç grupta toplamak mümkündür. Bu hatalardan birincisi, ölçüm yapan kişinin dikkatsizliği gibi durumlardan meydana gelen hatalardır. İkinci hata grubu, sabit ve sistematik olarak adlandırılan hatalardır. Deney düzeneğinin ve ölçüm araçlarının tasarımından kaynaklanan hatalar, sabit ve sistematik hatalar ve ölçümlerin alınması sırasında oluşan insan kaynaklı hatalar gibi çeşitli nedenlerden hatalar oluşmaktadır. Ölçümlerin doğruluğu, ölçülen büyüklüğün gerçek değerine yakınlığı ile tanımlanır. Duyarlılık ise değerlerin kendi içinde tutarlığı ve yinelenebilirliği olarak tanımlanabilmektedir. Tüm etkilerin alınan ölçüm sonuçlarına etkilerinin ortaya konması, deney tasarımı ve cihaz seçimi konularında daha doğru yaklaşımların yapılabilmesi, deneysel sonuçlardan elde edilen verilerin doğru

yorumlanması açısından belirsizlik analizinden (uncertainity analysis) yararlanılmıştır (Holman ve Gajda, 2001; Aksoy, 2011). Bu hassas yöntem Kline ve McClintock (1953) tarafından ortaya konulmuştur.

Denklem 3.20'de ifade edilen verim ifadesinin belirsizlik değeri ölçülen debi, basma yüksekliği, akım voltaj ve cos φ değerlerinin değişimi ile ifade edilmektedir. Bu denklem 3.20'de verilmiştir.

$$w_{\eta_g} = \pm\left[\left(\frac{\partial \eta_g}{\partial \mathrm{H_m}}\omega_{\mathrm{H_m}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial \dot{Q}}\omega_{\dot{Q}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial I}\omega_I\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial V}\omega_V\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial \varphi}\omega_\varphi\right)^2\right]^{1/2} \quad (3.20)$$

Belirsizlik yüzdesi ise denklem 3.21 ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{\omega_{\eta_g}}{\eta_h} x\ 100 \quad (3.21)$$

3.5. Akış kontrolü ve pompalarda uygulamalar

Aerodinamik uygulamalarda akış yapısını iyileştirmek için akış kontrolü uygulamaları yapılmaktadır. Akış kontrolü aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılır. Pompada da akış kontrolü ile ilgili verim iyileştirilmesi çalışmaları yapılabilir.

Akış kontrolüne ilişkin Gad-el-hak (1996) akış yapısını istenilen şekilde etkileyen işlemlerin pratik olarak çok önemli olduğunu ifade etmiştir. Akış kontrol işlemleri aktif ve pasif işlemler olup, serbest kayma tabakaları veya sınır tabaka akışlarında önemli oranda faydalı değişimler sağlamaktadır. Akış kontrolü laminerden türbülanslı akışa geçmeyi geciktirmekle veya hızlandırmakla, akış yapısını sönümlemekle, akış ayrılmasını önlemekle veya geciktirmekle, kaldırma kuvvetini arttırmakla, karışımı arttırmakla, ısı transferi iyileştirmek ve akıştan kaynaklanan gürültüleri azaltmak için bir çok farklı alanda uygulanmaktadır. Pasif kontrol yöntemi sabit cihazlar aracılığıyla uygulanmaktadır ve bunlardan bazıları pürüzlülük, ayırıcı plaka, tetikleme teli, doğal ventilasyon, cismin kalınlık uzunluk oranını arttırmak, helis şeklinde elemanlarla cisim yüzeylerine ekleme yapmak gibi geometride değişiklikler ile yapılabilmektedir. Aktif kontrol ise akışa dışarıdan enerji vererek yapılan bir uygulamadır ve bunlar MEMS, küçük jetler, emme, üfleme, salınım yaptırma gibi uygulamalardır (Gad-el-Hak, 1996).

Pompalarda aktif kontrol uygulaması teknik olarak oldukça zorken, yapılabilecek pasif akış kontrol uygulamalarından bazıları çarktaki kanat sayısının değiştirilmesi ve ara kanat uygulamasıdır. Bu tez çalışmasında 6 kanatlı pompa içerisinde akış ayrılması tespit edilen bölgelerde yarık uygulanması denenmiştir. Ayrıca basma yüksekliğinde artış elde etme amacıyla ara kanat ve PIV de daha iyi görüntüler almak için kanat sayısı azaltılarak 4 kanatlı çarklar denenmiştir. Bu denemelerle ilgili sonuçlar 4. bölümde sunulmuştur.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

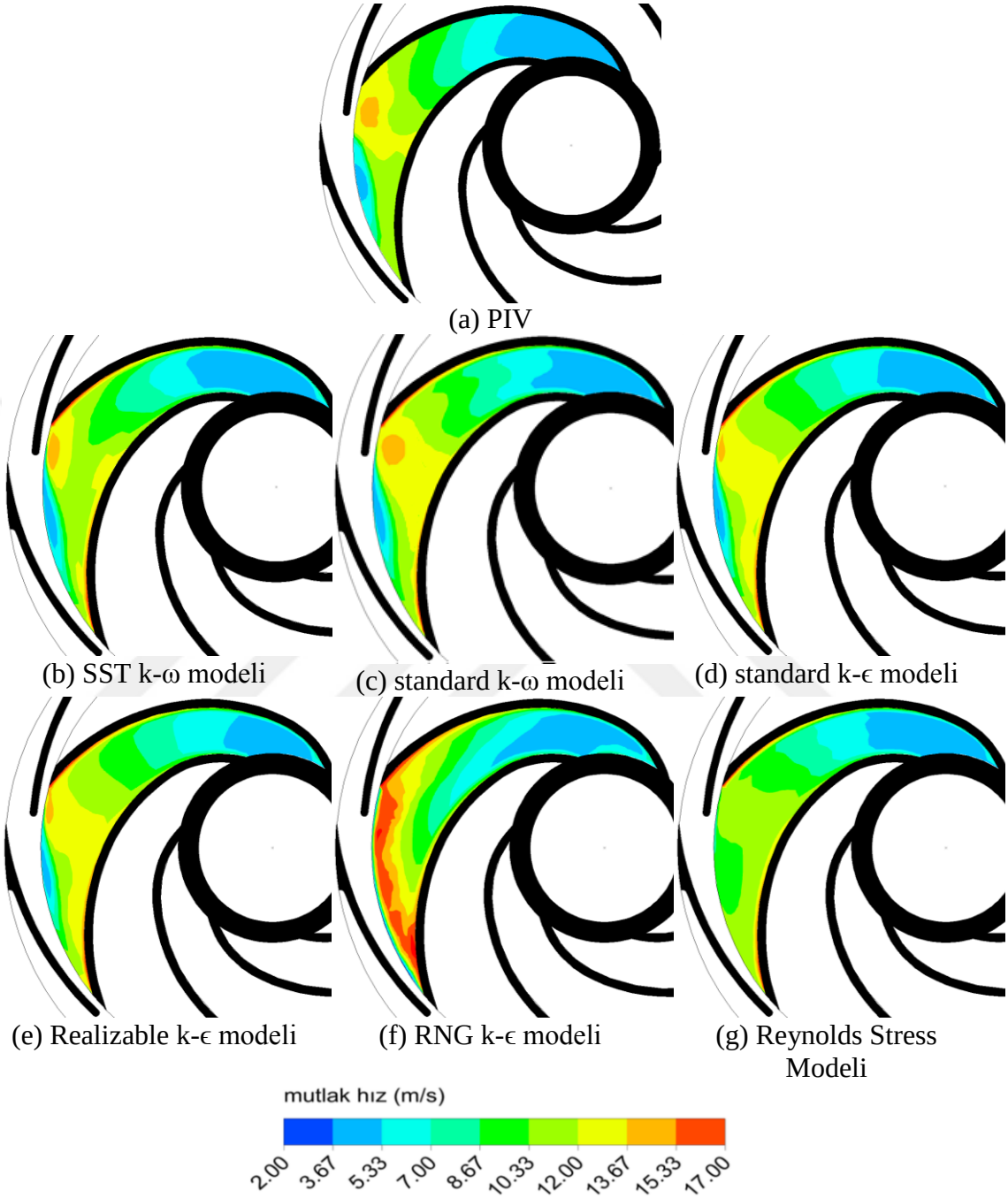
Çalışmada ilk önce orijinal çark olan Çark 1 (6 kanatlı ara kanat ilavesiz) kullanılan pompanın, PIV sonuçları ile farklı türbülans modelleri kullanılarak gerçekleştirilen HAD analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde PIV sonuçlarına en yakın türbülans modeli belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen türbülans modeli ile orijinal pompa çarkına pasif akış kontrolü (ara kanat ilavesi ve kanat sayısı değişikliği) uygulanarak HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve ara kanat geometrisi belirlenerek çark 2 ve çark 3 elde edilmiştir. HAD analizleri neticesinde tespit edilen pasif akış kontrolü uygulanan çarklar ve orijinal çark kullanılarak 3 farklı çark modelinin kullanıldığı pompalar için farklı devir ve debilerde PIV-HAD ile elde edilen akış karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Aynı pozisyonda durağan halde faz ortalamalı değerlerin incelendiği çalışmalar yanında farklı çark difüzör pozisyonlarında da HAD-PIV karşılaştırması yapılmıştır. Daha sonra 2850 d/d'da çark 1, çark 2 ve çark 3 için noktasal hız değerlerinin PIV ve HAD ile değişimi karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Son olarak da 3 farklı pompa çarkının kullanıldığı pompalar için HAD ve deneysel olarak elde edilen pompa karakteristik eğrileri ve bu deneyler için belirsizlik analizi sunulmuştur.

4.1. Türbülans Modelleri Karşılaştırması

Yapılan bir HAD analizinin fiziksel olarak tutarlı olması için aynı zamanda sayısal çözüm prosedürünün doğru kurgulanmış ve uygulanmış olması gerekir. Bunun için uygun ağ yapısının oluşturulmasının, seçilen türbülans modelinin akış yapısına uygun olmasının ve sınır şartlarının dikkatli bir şekilde tanımlanmasının büyük önemi vardır. Yapılan HAD analiz sonuçları deneysel sonuçlarla kıyaslandığında deneysel sonuçlara en yakın sonuçların elde edildiği türbülans modelinin fiziksel yapıya en yakını olduğu söylenebilir (Bradshaw, 1996).

Tasarım debisinde (12.5 m^3/h) Çark 1 kullanılan pompada, çark içerisindeki mutlak hız konturlarının dağılımları, PIV ile ve ANSYS-Fluent programında farklı türbülans modelleri kullanılarak gerçekleştirilen HAD analizleri ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 4.1'de verilmiştir. Deneyler ve analizlerde çark ve difüzör aynı pozisyona getirilerek yapılmıştır. Pompa HAD analizlerinde sıklıkla kullanılan 6 farklı türbülans modeli 2850 d/d'da incelenmiştir. HAD sonuçlarına göre

elde edilen hız değerlerinin PIV sonuçlarına göre karşılaştırması ve farklılıklarının nedenleri aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 4.1. 2850 d/d tasarım debisinde farklı Türbülans modelleri ile PIV sonucunun karşılaştırılması.

Standard k-ε türbülans modeli (Şekil 4.1.d) türbülanslı akış çalışmalarında başlangıç türbülans modeli, özellikle dönümlü akışlarda ve ince kayma tabakası olan akışlarda rahatlıkla seçilebilir. Standard k-ε, basit bir türbülans modeli olmakla birlikte akış rejimine ve geometriye bağlılığı oldukça azdır. Bir çok ticari paket yazılımında varsayılan türbülans modeli olarak seçilmekle birlikte, bir çok endüstriyel uygulamada

doğru sonuçlar vermektedir. Çok kullanışlı olmasına rağmen bu türbülans modelinin zayıf olduğu taraf ise katsayılarının farklı deneysel sonuçlarla karşılaştırılması durumlarında değiştirilmesi gerekliliği doğabilmesidir. Ayrıca bu türbülans modeli yüksek basınç gradyanları içeren, akış ayrılması, tekrar birleşmesi ters akışların olduğu, karmaşık akış yapılarında verdiği sonuçların doğruluğunu kontrol için deneysel sonuçlarla karşılaştırılması gerekir. Bu çalışmada özellikle çark giriş bölgesinden çıkış bölgesine doğru akışın hızlanma konturlarını doğru şekilde takip edebilmektedir. Ancak çark içerisindeki hız profilini ve çark çıkışındaki akış yapısının tam yansıtamamıştır. Bununla birlikte, Standard k-ε modeli pompa analizlerinde ve verim hesaplamalarında diğer modellere göre daha hızlı sonuçlar verebilmektedir. Bu nedenle endüstriyel analizlerde kullanılabileceği söylenebilir.

Realizable k–ε modeli (Şekil 4.1.e) karmaşık kayma tabakalı akışlarda ve yerel olarak geçiş rejimli akışlarda kullanımı için geliştirilmiş olmasına rağmen pompa içinde de uygun sonuçlar verebilmektedir. Literatürde tavsiye edilen bu model için akış tiplerine örnek olarak; sınır tabaka akışları, büyük akış ayrılmaları bulunduran akış alanları, küt cisimler etrafında girdap kopmaları, yüksek açılı yayıcılar verilebilir. Burada elde edilen pompa çarkı içindeki akış yapısı sonucu standard k- ε modeliyle elde edilen sonuçtan çok farklı değildir. Ancak deneysel sonuçlarla genelde Realizable k–ε modeli daha uygun sonuçlar verebilmektedir. Ayrıca PIV-HAD karşılaştırmalarında literatürde bazı çalışmalarda önerilmektedir (Ranade ve ark., 2001). Deneysel sonuçlara ve akış yapısına uyum açısından omega modellerine alternatif olarak tercih edilebilir.

RNG k-ε modeli, (Şekil 4.1.g) Navier-Stokes denklemlerinin renormalizasyonu için Re-Normalizasyon Grubu (RNG) yöntemleri kullanılarak daha küçük ölçekli hareketlerin etkilerini hesaba katarak geliştirilmiştir. Standard k-epsilon modelinde, girdap viskozitesi tek bir türbülans uzunluk ölçeğinden belirlenir, bu nedenle hesaplanan türbülanslı difüzyon, yalnızca belirtilen ölçeğe göre olan difüzyondur, oysa gerçekte tüm hareket ölçekleri türbülant difüzyona katkıda bulunur. k-ε benzer bir türbülans modeli elde etmek için kullanılabilen bir matematiksel teknik olan RNG yaklaşımı, epsilon denkleminin, üretim terimindeki değişiklikler yoluyla farklı hareket ölçeklerini hesaba katmaya çalışan modifiye bir formuyla hesaplamalar yapar. Ancak RNG k-ϵ modeli çözümde özellikle çark çıkışında PIV ile en uyumsuz sonucu vermiştir.

Sınır tabaka akışlarında, serbest kayma tabakalı akışlarda ve düşük Reynolds sayılı akışlarda k-ε türbülans modellerine göre, k-ω modelleri daha üstündür. Özellikle pompa çarkında bulunan farklı basınç gradyanları bulunan veya büyük akış ayrılmalarının

olduğu akışlarında (dış akışta aerodinamik ve turbomakina uygulamalarda) k-ω modellerinin kullanımı uygundur. Bu modellerden standard k-ω modeli (Şekil 4.1.c), hızın en yüksek olduğu yerleri doğru modellese de çark girişinden çark çıkışına olan hız gradyanlarını modellemede başarılı olmadığı görülmüştür. Ayrıca geçiş bölgesi değil türbülanslı akış olduğu için bunun yerine SST k-ω modelinin daha uygun olduğu söylenebilir.

SST k-ω modelinin (Şekil 4.1.b), standard k-ω modeli ile aynı avantajları sağlamakla birlikte giriş sınır şartlarına hassas biçimde bağlı olmaması önemli avantajlarından biridir. Diğer RANS modellerine göre akış ayrılmalarını, ani basınç ve hız değişimlerini çözmede daha başarılıdır. Bu modeldeki iyileştirmeler sayesinde serbest akış bölgelerinde daha iyi çözüm vermekte ve özellikle akış ayrılmasının oluşma noktası ve ayrılmış akışın gelişimi ve farklı hız gradyanlarının fazla olduğu bölgelerde kayma gerilmesi transportunu daha iyi hesaplamaktadır. Bu nedenle pompa çarkı içerisinde deneysel sonuçlara göre standard k-ω modeline göre daha iyi yanıt verdiği söylenebilir. Bulunan bu sonuç yanında SST k-ω birçok turbomakina uygulamasında literatürde özellikle son yıllardaki çalışmalarda en fazla önerilen modeldir (Simoes ve ark., 2009; Choi ve ark., 2013; Xuelong ve ark., 2013). Ayrıca PIV-HAD karşılaştırmalarında da tavsiye edilen bir modeldir (Zhou ve ark., 2015).

Reynolds Stress modelinde (Şekil 4.1.h) ise akış yapısı tam olarak temsil edilememiş, bunun yanında çözülen ilave denklemlerde olduğu için çözüm de diğer modellere göre daha fazla olmuştur.

Bu çalışmada seçilen 6 farklı türbülans modelinden akış yapısını en iyi temsil eden, literatürde önerilen, ayrıca performans değerlerinde de deneysel verilerle uyum içinde olan modelin SST k-ω modeli olduğu sonucuna varılmış ve diğer analizlere bu model ile devam edilmiştir. Diğer modellere göre daha yeni olan 2 denklemli modellerden SST k-ω, hız geçişlerini ve dağılımını daha iyi modellemektedir.

4.2. Pasif Akış Kontrol Çalışmaları

4.2.1. Ara Kanat Çalışmaları

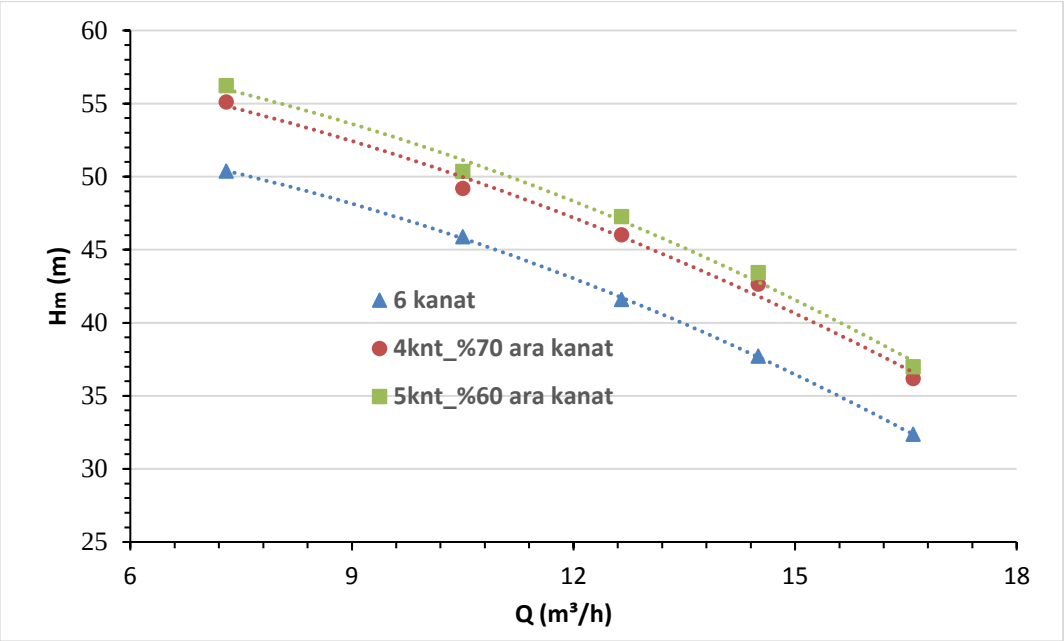
PIV deney düzeneğinde denenecek ara kanat ilaveli çark modellerinin belirlenebilmesi için orijinal 6 kanatlı pompa çarkının kanat profili değiştirilmeden, çarklar 4 ve 5 ana kanatlı olarak tasarlanmıştır. Ara kanat ilavesinde ana kanat sayıları

düşürülmesinin nedeni, akış geçiş bölgesinin daralmaması için ve çarpma kayıplarının artmaması için yapılmaktadır (Korkmaz ve ark., 2017). Ara kanat ilave uygulamalarında, ana kanat sayısının düşürülmediği bu nedenlerle pompa performansının düştüğü görülmüştür. Bu nedenle ara kanat ilave uygulamaları için ana kanat sayıları 4 ve 5 olarak belirlenmiştir.

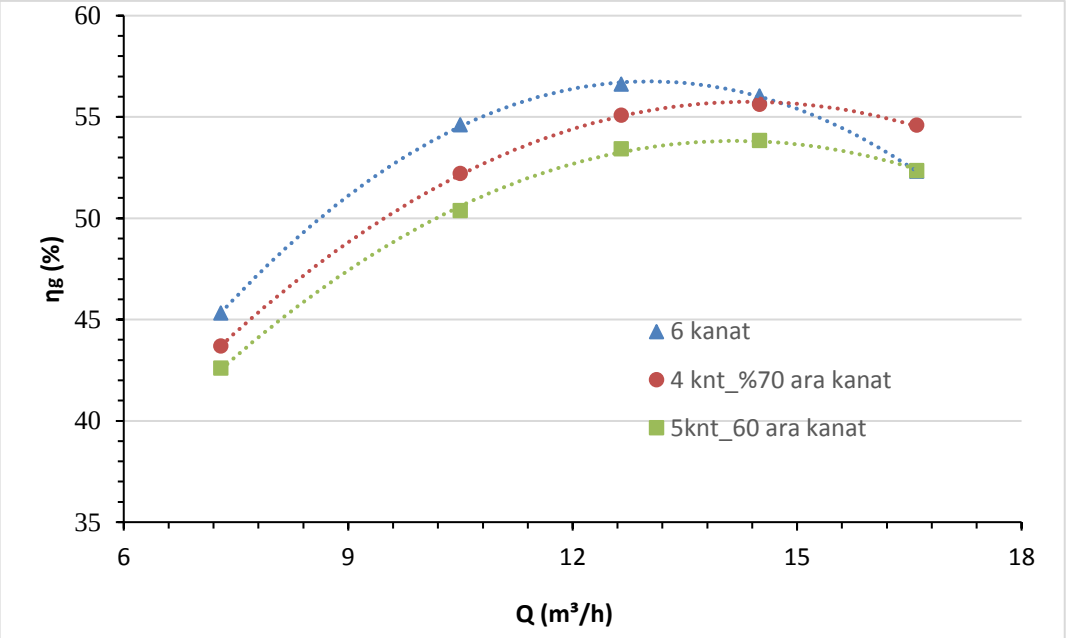
Ara kanat ilavesi için ara kanat uzunluğunun ana kanat uzunluğuna oranı, ara kanat ilave oranı olarak nitelendirilmiş ve hem 4 hem de 5 kanatlı çarklarda ilave ara kanat oranları %40, %50, %60, %70 ve %80 olacak şekilde denenmiştir. Çark çizimleri üzerinden akış hacimleri elde edilmiş, uygun ağ yapıları oluşturulduktan sonra da HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD çalışmalarında ilk olarak belirlenen farklı ara kanat ilave oranlarında 4 ve 5 kanatlı çarkların tek kademe olarak sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde yapılan çark analiz çalışmasının nedeni, ara kanat ilaveli 4 ve 5 kanatlı çarklarda en yüksek verim ve basma yüksekliği elde edilebilecek çark modellerinin daha hızlı tespit edilmesidir. Gerçekleştirilen HAD çalışmaları neticesinde en yüksek verim değerleri, 4 kanatlı çark için %70, 5 kanatlı çark için ise %60 oranında ara kanat ilavesi yapılan çark modellerinde elde edilmiştir. En yüksek verim elde edilen bu iki çark modeli kullanılarak tüm pompa akış hacimleri oluşturulmuş ve pompa HAD analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan pompa HAD analizleri ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Pompa tasarım debisi 12.5 m^3/h debisinde hesaplanan basma yüksekliği ve verim değerleri ise ayrıca Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. En yüksek basma yüksekliği, ara kanat ilave oranı %60 olan 5 kanatlı çarkın kullanıldığı pompada elde edilmiştir. Bu pompa ile ara kanat ilavesiz 6 kanatlı çarka (orijinal çark) göre, tasarım debisinde (12.5 m^3/h) basma yüksekliği 41.6 m'den 47.2 m'ye yükselirken verim ise %56.6'dan %53.4'e düşmüştür.

Çark 1 kullanılan pompa verim değerlerine en yakın verimler ise ara kanat ilave oranı %70 olan 4 kanatlı çarkının kullanıldığı pompada elde edilmiştir. Bu pompa ile orijinal çarklı pompaya göre tasarım debisinde, basma yüksekliği 41.6 m'den 46.0 m'ye çıkarılırken verim ise %56.6'den %55.1'e düşmüştür.



Şekil 4.2. Farklı çarkların kullanıldığı pompalarda basma yüksekliğinin debiye göre değişimi.



Şekil 4.3. Farklı çarkların kullanıldığı pompalarda genel verimlerin debiye göre değişimi.

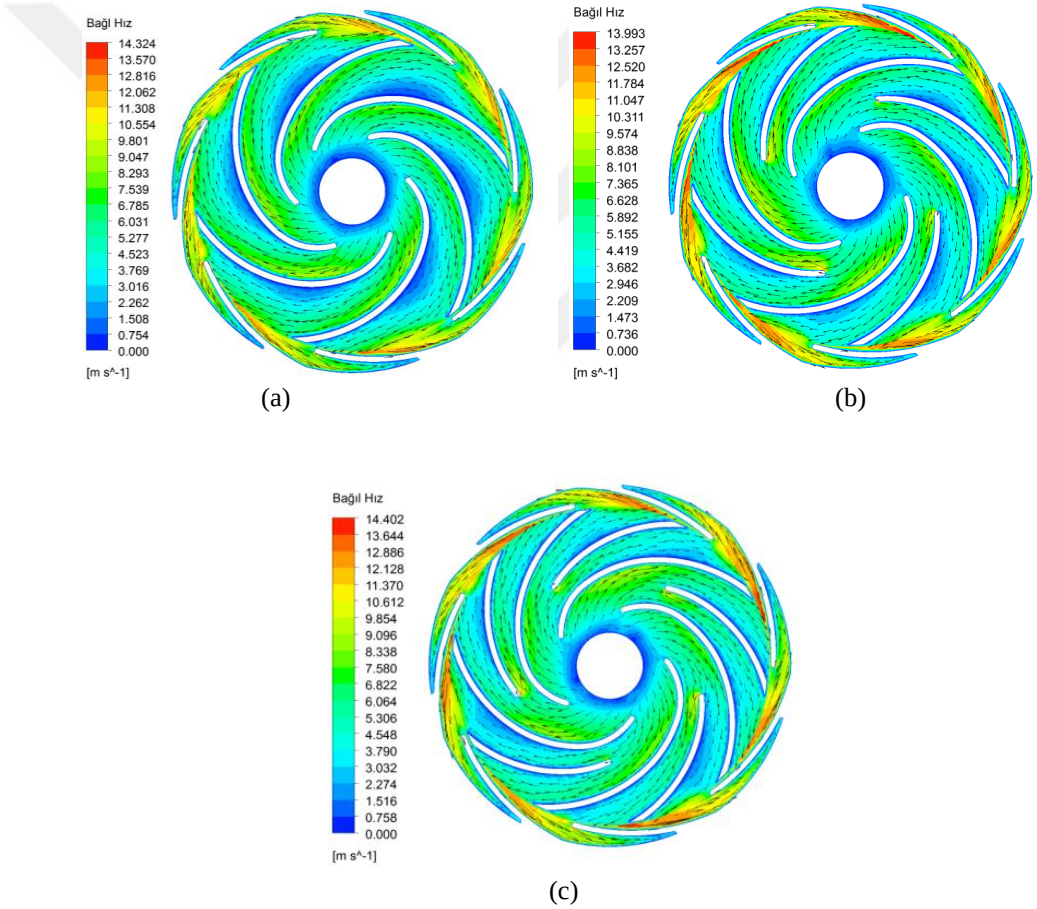
Tasarım debisinde, ara kanat ilavesi yapılan çarkların kullanıldığı pompalarda orijinal çarklı pompaya göre daha yüksek verim değeri elde edilememiştir, ancak daha yüksek basma yükseklikleri elde edilmiştir. 4 Kanat ara kanatlı pompa çarkında, 5 kanatlı ara kanat ilaveli çark kullanılan pompaya göre daha düşük basma yüksekliği oluşmasına rağmen, daha yüksek verim değerleri elde edildiği tespit edilmiştir. 4 ara kanatlı pompanın 5 ara kanatlı pompaya göre diğer bir avantajı da tasarım debisi üzerindeki debilerde 6 kanatlı orijinal pompaya göre daha yüksek verimde çalıştığı debiler de

olmasıdır. Böylece %70 ara kanat ilaveli 4 kanatlı pompa geometrisi Çark 2 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı kanat yapılarındaki HAD ile elde edilen basma yüksekliği-verim değerleri.

Kanat geometrisi	Hm (mSS)	η_h (%)
6 kanatlı orijinal çark (çark 1)	41.6	56.6
4 kanat + %70 ara kanat ilavesi (çark 2)	46.0	55.1
5 kanat + %60 ara kanat ilavesi	47.3	53.4

HAD analizlerinde, çark 1 ve çark 2 ve 5 kanatlı çarkların kullanıldığı pompaların 3. kademelerindeki çarkların çıkış genişliklerinin ortasından geçen düzlemde bağıl hız dağılımları Şekil 4.4'te verilmiştir.



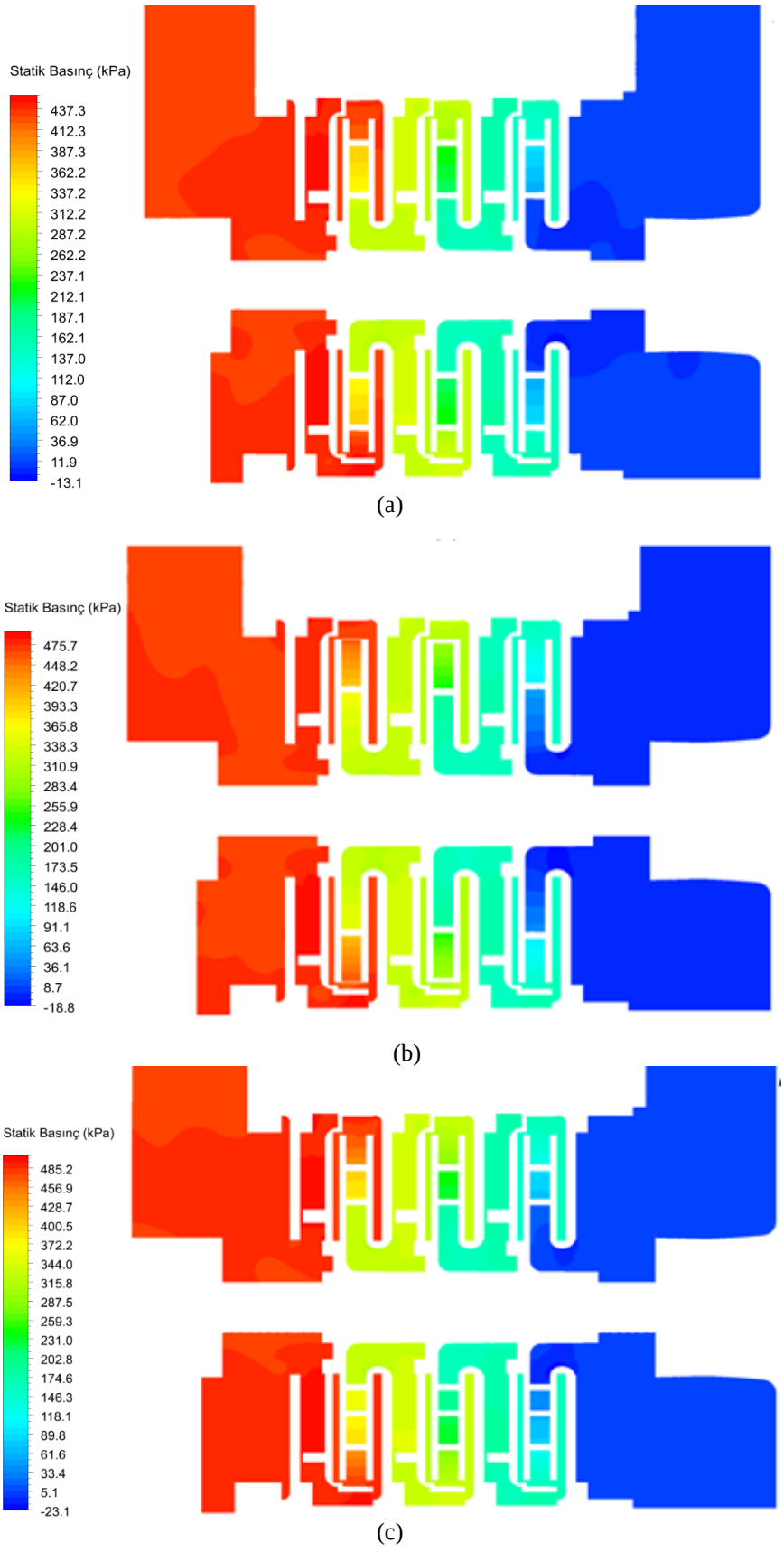
Şekil 4.4. (a) Çark 1 (orijinal çark), (b) Çark 2 ve (c) %60 ara kanat ilaveli 5 kanatlı pompa çarkında bağıl hız dağılımları.

Şekilde çark 1 üzerinde tespit edilen bağıl hız dağılımı incelendiğinde kanatların basma yüzeylerinin ortalarında mavi renk skalası ile gösterilen bölgede hız azalması ve buna bağlı olarak düşük hız bölgeleri meydana geldiği görülmektedir. Pasif akış kontrolü metotlarından biri olan ara kanat ilave uygulaması denenmesinin nedenlerinden biri de

bu düşük hız bölgesinin azaltılması veya giderebilmesidir. Belirlenen ara kanat ilave uygulamalarının yapıldığı çarklarda bağıl hız dağılımları incelendiğinde meydana gelen bu düşük hız bölgelerinin azaldığı görülmektedir. Yani ara kanat uygulaması ile çark içerisindeki akış yapısının daha düzenli hale getirildiği söylenebilir. Bunun yanında ara kanat ilave edilen çark uygulamalarında (Şekil 4.4 b ve Şekil 4.4 c) çark çıkışında ani hız değişimleri meydana geldiği ve buna bağlı olarak da türbülans değerlerinin arttığı dolayısıyla da verimin azaldığı söylenebilir. Çark 1 içerisindeki diğer bölgelerde bağıl hız değerlerinde büyük farklar görülmemektedir.

Çok kademeli pompalarda giriş-çıkış ve difüzör etkileri göz ardı edildiğinde hız değerlerinin tüm çarklarda aynı çark-difüzör pozisyonunda benzer olması beklenir. Ancak basınç değerlerinin her kademede artması gerekir. 3 farklı pompa çarkının kullanıldığı tüm pompalarda Y-Z düzleminde statik basınç değerleri Şekil 4.5'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi incelenen pompalarda statik basınç, pompa girişinden çıkışına doğru düzenli olarak artmaktadır. Çark içlerinde tüm kademelerde girişten çıkışa statik basınç değerlerinin arttığı da gözlenmektedir. Pompa girişi ile çıkışı arasındaki basınç farkları incelendiğinde en yüksek basınç farkının 5 kanatlı ara kanat ilavesi yapılan çarkın kullanıldığı pompada olduğu görülmektedir. Bu da basma yüksekliğinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. En düşük basınç değerleri, pompa girişindeki vakum etkisinden dolayı emici kısmına giriş bölgelerinde görülmektedir.

Farklı çarkların denendiği ara kanat çalışmalarında yapılan HAD analizleri neticesinde, kalıp ve çark imalatı için 4 kanatlı % 70 oranında ara kanat ilaveli (Çark 2) pompa çarkı, basma yüksekliğinde artış elde edilmesi yanında daha düşük verim kaybı olduğu için seçilmiştir. Pompa HAD analizlerinde elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi ara kanat ilavesi ile basma yüksekliği artarken verim düşmektedir. Ara kanat ilavesinde kanat sayısının artırılması genelde motor gücünde de bir artış gerektirmektedir. Ara kanat ilavesinin diğer bir dezavantajı ise akışın geçeceği kesitin azaltılmasıdır. Bununla birlikte akış ekseninde kanat giriş sayısı da artacağı için çarpma kayıpları da artar. Ancak akış alanında motordan gelen gücün akışkana aktarılması için kullanılan kanatların basınç yüzeyinin toplam alanı artırılmış olur. Başka bir deyişle enerji aktarım yüzeyi artırılır. Toplam momentumu artan akışın çark çıkışında daha yüksek basınç değerlerine ulaşır. Fiziksel anlamda aktarılan enerji miktarı artışı ile basma yüksekliği artsa da verimle ilgili genel bir yorum yapmak güçtür. Bazı durumlarda farklı debilerde verim artışı bile elde edilebilmektedir. Genel olarak verimden ziyade basma yüksekliğinin önemli olduğu uygulamalarda ve tasarımlarda ara kanat ilaveli pompa çarkı tipleri kullanılabilir.



Şekil 4.5. (a) 6 kanatlı (b) %70 ara kanat ilaveli 4 kanatlı ve (c) %60 ara kanat ilaveli 5 kanatlı geometrilerin tüm pompa tasarım debisi analizlerinde Y-Z düzlem kesitinde statik basınç dağılımları.

Üretim için seçilen Çark 2'nin kullanıldığı pompada verim değerlerinin 14.5 m^3/h debide 6 kanatlı çarkın verimine yaklaştığı, tasarım debisinin yaklaşık %33 üzerinde olan 16.6 m^3/h debide ise 6 kanatlı orijinal çarktan daha yüksek verim elde edildiği görülmüştür.

5 kanatlı ara kanat ilaveli çarkta iki kanat arasındaki akış alanı oldukça küçülmüş ve PIV uygulamasını ve lazer perdesi oluşumunu zorlaştırır boyuta getirdiği için de bu çark tipi imal edilmemiştir. Diğer bir dezavantajı ise verim değerlerinin daha düşük olmasıdır.

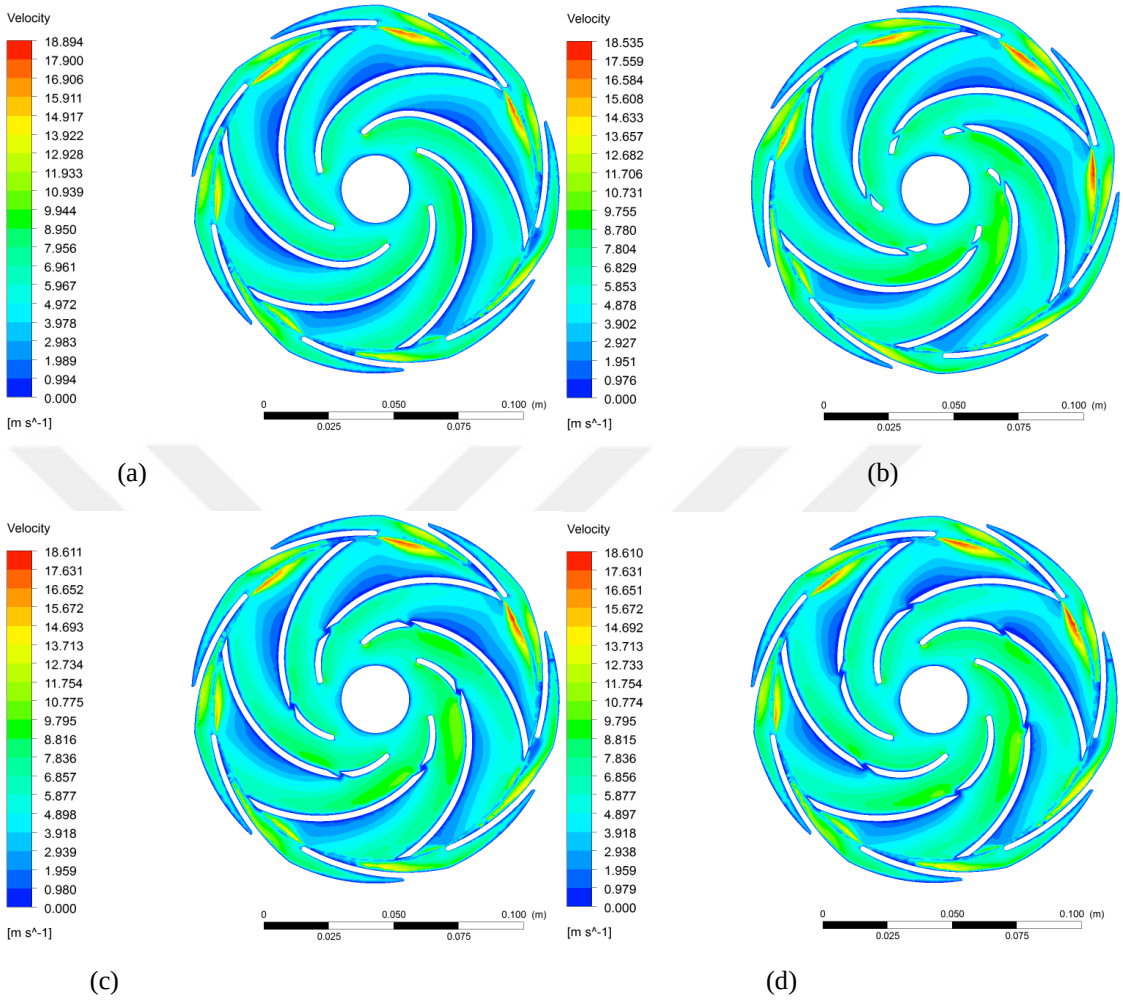
Çalışmada 3. Çark geometrisi olarak da ara kanat ilavesiz 4 kanatlı pompa çarkı kalıp imalatı yaptırılarak imal edilmiştir. Bu çarkın üretilmesinin nedeni ise iki kanat arasındaki akış alanı genişliğinin PIV tekniği ile görüntüleme açısından oldukça uygun olmasıdır. Böylece PIV görüntüsü ile HAD sonuçlarının karşılaştırılmasının daha uyumlu sonuç vereceği düşünülmüştür. Bu geometri de çalışmada çark 3 olarak tanımlanmıştır.

4.2.2 Yarık çalışmaları

SPL100-3 pompa çarkında Şekil 4.6'da görüldüğü gibi tasarım debisinde çark kanatlarının orta kısımlarında basınç yüzeylerinde 1-3 m/s değerlerinde bağıl hızlarda düşük hız bölgeleri görülmüştür. Bu hız bölgelerini azaltmak için ara kanat ilavesi gibi kanat geometrisinde yapılabilecek bir diğer pasif akış kontrol uygulaması da kanat geometrisinde oluşturulacak yarıktır. Bu uygulama literatürde bazı kompresör uygulamalarında görülmüş, pompa üzerinde herhangi bir uygulamasına rastlanmamıştır. Tez çalışmasında denenen pompanın tasarım debisi olan 12.5m^3/h debide pompa çarkında akış ayrılmasının başladığı yerden, düşük hız bölgelerinin ortalarına kadar farklı yerlerde 2 mm genişliğinde yarıklar açılarak pompa çark içerisinde bağıl hız dağılımına etkileri incelenmiştir. Şekil 4.6(a)'da yarık olmayan 6 kanatlı pompa çarkındaki akış alanı görülmektedir.

Çark merkezinden sırasıyla 52 mm, 64 mm, 74.5 mm uzaklıktaki çap değerleri baz alınarak açılan 2 mm genişliğinde yarıkların akış yapısına etkisi sırasıyla 4.7 (b), 4.7(c) ve 4.7(d)'de verilmiştir. Şekil 4.6(b)'de açılan yarık pompa çarkında giriş bölgesinde düşük hız bölgesinin oluşumunu bir miktar geciktirse de genel akış yapısında kayda değer bir değişiklik oluşturmamıştır. Şekil 4.6(c)'de düşük hız bölgesinin oluşturduğu alan bir miktar azalmıştır. Şekil 4.6(d)'de ise düşük hız bölgesinin ortasına

açılan yarıktan pompa dönüş yönü tersine kanatların basınç yüzeyinden emme yüzeyine gelen akışın oluşturduğu momentum ve jet akışın etkisi ile oldukça azaldığı görülmüştür.

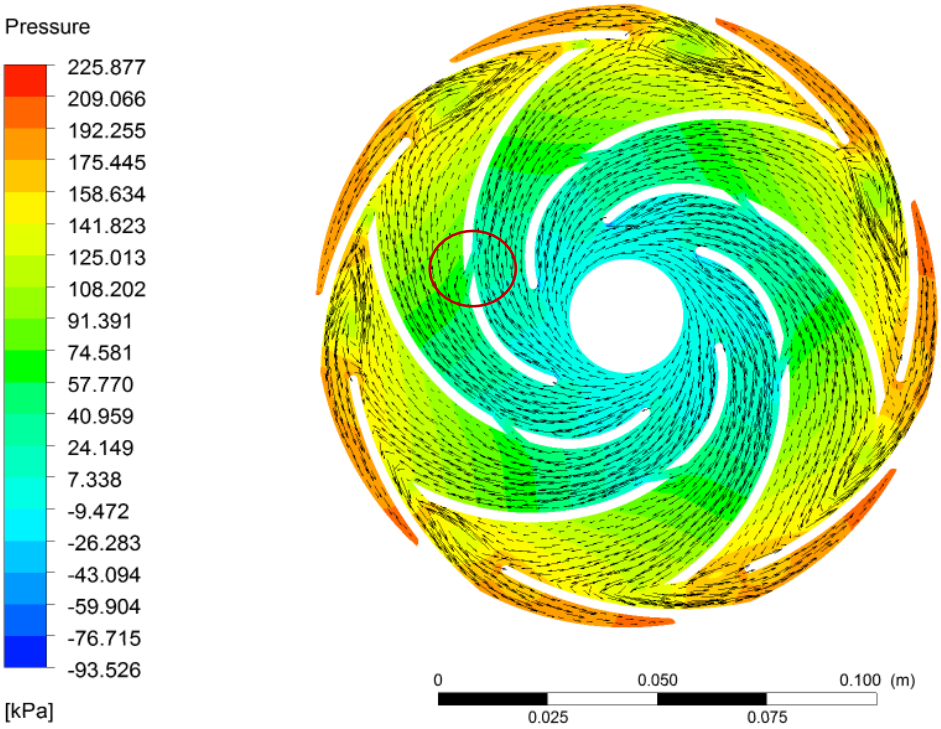


Şekil 4.6. Farklı bölgelerde açılan yarıkların pompa çarkında bağıl hız değerleri dağılıma etkisi

Şekil 4.7'de akış yapısında en olumlu değişimi veren 74.5 mm çapta yarıklı pompa çarkında basınç konturları üzerine bağıl hız değerleri vektörel olarak çizilmiştir. Burada pompa basınç yüzeylerinden oluşturulan emme etkisi ile vektör dağılımın kanat profilini daha iyi takip etmiş, cidar bölgesinde ise ara kanatsız pompa çarkına göre daha büyük hız vektörleri elde edilmiştir.

Tek kademede yapılan ve çark-difüzör içeren bu çalışmada elde edilen değerlerden basma yüksekliği ve verim değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde yarık çalışmasının uygulandığı pompa çarklarında hem basma yüksekliği hem de verim değerlerinde önemli düşüşler olmuştur. Bu da pompa içerisindeki akış yapısının düzgün olmasının pompa tasarımında önemli bir parametre olması ile birlikte verim ve basma yüksekliğinde farklı sonuçlara neden olabileceğini göstermiştir. Bu

düşüşün nedeni pompa çarklarının dönüşünde enerjinin akışkana aktarıldığı yüzeyin sürekliliğinin ve toplam uzunluğunun azalmasıdır.



Şekil 4.7. Merkezden 74.5 mm uzaklıktaki yarıçapta açılan yarığın statik basıncın ve bağıl hızın dağılımı.

Çizelge 4.2. Çark 1 (orijinal çark) üzerine çark merkezinden farklı uzaklıklarda kanat üzerinde açılan 2mm yarıkların tasarım debisinde tek kademede basma yüksekliği-verim değerlerine etkisi

Kanat Geometrisi	H_m (mSS)	η_h (%)
Yarık yok	16.9	65.6
Merkez çap 74.5mm	15.9	62.8
Merkez çap 64mm	15.2	62.1
Merkez çap 52mm	15.1	62.0

Yapılan yarık çalışması sonunda basma yüksekliğinde düşüşler yanında verimde de düşüşler olduğu için yarık çalışmaları sadece HAD ile yapılmış, bu incelenen pompa çarkının imalatı ve deneyleri yapılmamıştır.

4.3. PIV-HAD karşılaştırması

Tez çalışmalarında en önemli kısımlardan olan pompa çarkı içerisinde PIV ve HAD görüntülerinin karşılaştırılması, 3 farklı pompa çarkı Çark 1, Çark 2 ve Çark 3 (sırasıyla 6 kanatlı, ara kanat ilaveli 4 kanatlı ve 4 kanatlı) için yapılmıştır. Çalışmalar,

tasarım devri olan 2850 d/d yanında tasarım devrinin 2/3'ü olan 1900 d/d'da da yapılmıştır.

HAD-PIV sonuçlarının karşılaştırmalı olarak verildiği görüntülerde, difüzör bölgesi akış ölçüm alanı dışında olmasına rağmen, elde edilen HAD ve PIV çalışmalarında, difüzör kanatları görüntülere eklenerek akış yapısının daha iyi anlaşılabilmesi ve yorumlanabilmesi amaçlanmıştır. Difüzör bölgesi, PIV ölçümlerinde, görüntü bölgesi dışında yer aldığı için o bölgede akış yapısı sadece çark pasajı içerisinde verilmiştir. HAD ile de difüzör bölgesinde de çözüm yapılmasına rağmen, PIV ile tam karşılaştırma yapılabilmesi için HAD için de difüzör bölgesi akış yapısı sunulmamıştır. PIV deneyleri neticesinde elde edilen ilk datalar, mutlak hız değerleri olduğu için tüm çark ve debilerde öncelikle bu değer, daha sonra mutlak hız vektörlerinden hesaplanan bağıl hız vektörleri sunulmuştur. Sonra hız değişim bölgelerinin ve değerlerinin temsil edildiği ve değerlerin renk skalası ile ifade edildiği mutlak ve bağıl hız konturları verilmiştir. Son olarak da akışın içindeki türbülans değerlerinin temsil edildiği TKE değerleri sunulmuştur.

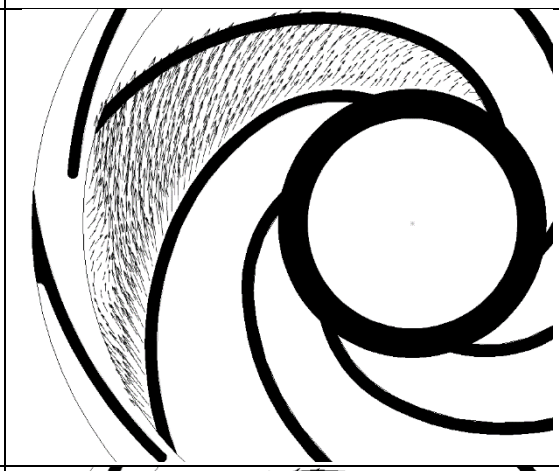
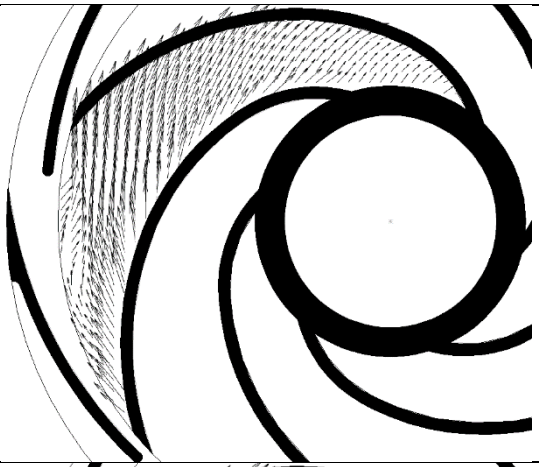
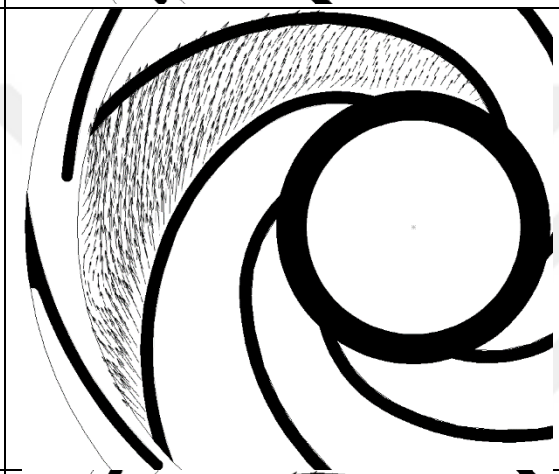
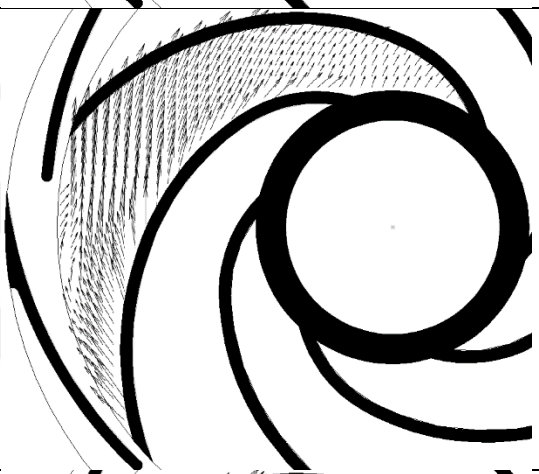
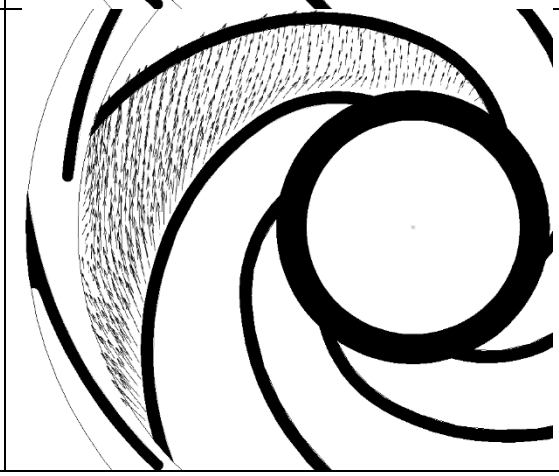
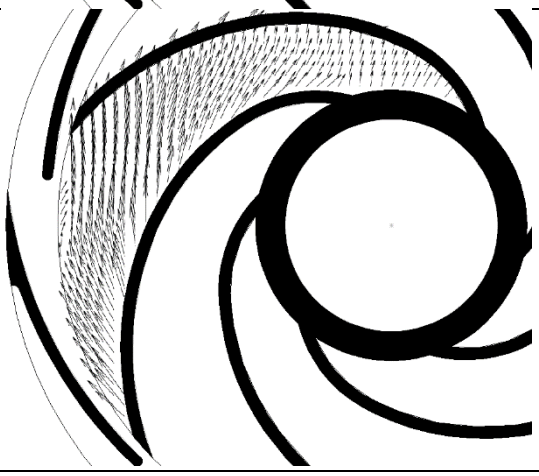
PIV sonuçları, durağan halde ortalama (faz ortalamalı) değerlerle yapılan deneylerle elde edilmiştir. Literatürde benzer çalışmalardan 60-240 arasında görüntü alan Ertürk ve ark. (2013) PIV ile alınan görüntü sayısı arttıkça hata oranı düşeceğini belirtmişlerdir. Her bir deney durumu için tekrar edilebilirliğini görmek için farklı deneyler yapılmış ve her birinde 500 çift fotoğraf alınarak ortalama değerleri sunulmuştur. Ayrıca PIV sonuçları görüntü sayısından da bağımsız de hale getirilmiştir. Daha sonra PIV ile elde edilen bu veriler işlenmiş ve görüntüler hazırlanmıştır.

HAD analizleri için PIV deneylerinin yapıldığı debiler ve deney setinde ölçülen basma yüksekliği değerleri sınır şartları olarak verilmiştir. Farklı türbülans modeli denemeleri sonrasında en uygun modelin olduğu tespit edilen SST k-ω ile HAD çalışmaları yapılmıştır. Bu bölümde sadece kanat çıkış genişliğinin orta düzlemindeki bölgede sonuçlar verilmiştir. Bu bölgenin seçilme nedeni alt ve üst kapakların etkisinden uzak olarak çark içerisindeki akışın en iyi temsil edildiği bölge olmasıdır. Şekil 4.8'de görülen çark-difüzör pozisyonu durağan halde ortalama görüntüler alındığı için sabittir. Her bir çark tipi için HAD analizlerinde PIV deneylerinde elde edilen pozisyon kullanılarak geometri, akış hacmi ve ağ yapısı oluşturularak çalışmalar yapılmıştır.

4.3.1. Çark 1 için PIV-HAD sonuçları

Şekil 4.8'de 1900 d/d'da Çark 1 için mutlak hız vektörlerinin PIV ve HAD ile 3 farklı debi oranında karşılaştırılması verilmiştir. Debi değerleri seçilirken 1900 d/d'da en yüksek verime sahip olduğu noktadaki debi olan $\dot{Q}_{1d}$ =7.9 m³/h referans alınmıştır. Sonuçlar bu debinin yanında, $\dot{Q}/\dot{Q}_{1d}$ = 0.85 (6.7 m³/h) ve $\dot{Q}/\dot{Q}_{1d}$ =$1{,}2\dot{Q}_{1d}$ (9.5 m³/h) debilerinde de verilmiştir. Tüm karşılaştırma şekillerinde sol sütunda HAD, sağ sütunda ise PIV akış görselleri konulmuştur.

Şekil 4.8'de verilen mutlak hız vektör yapılarının, pompa dönüş yönü olan saat yönünde olduğu hem HAD hem de PIV sonuçları ile görülmektedir. HAD ile elde edilen vektörlerin, oluşturulan ağ yapısına bağlı olarak daha fazla sayıda olduğu ve düzenli aralıklı bir dağılım göstermediği görülmektedir. PIV ile elde edilen vektörlerin ise hesaplamada kullanılan ızgara ağ yapısına uyumlu dağılımda olduğu, vektörlerin başlangıç noktaları arasındaki mesafenin aynı olduğu ve veri sayısının HAD değerlerine göre daha az olduğu görülmektedir. Çark çıkış bölgesinde difüzör içerisindeki akışın etkisi ile ters yönde akış vektörleri hem HAD hem de PIV ile elde edilmiştir. Literatürde çark çıkışından çark içerisine geri gelen akışlkar genelde "reverse flow" yani ters akış olarak kullanılmıştır. Türkçe literatürde bu tarz akışa ikincil akışlar da dense de sızıntı kayıplarından oluşan akışlar da bu sekilde tanımlanmıştır. Anlatımda karışıklık olmaması için "ters akış" ifadesi kullanılmıştır. Bu ters akış değerleri özellikle 0.85 debi oranında etkilidir. Bu etkinin, artan debi değerleri ile çark çıkışına giden akışın momentumunun da artması nedeniyle azaldığı da görülmektedir. Ayrıca çark çıkış bölgesinin orta kısmında oluşan bu ters akışın etkisi hem sayısal hem deneysel çalışmalarda tespit edilmiştir. 1.2 debi oranında ise ters akış değerinin diğer debi oranlarına göre daha az olduğu görülmüştür. Burada ölçülen ters akışın, akış fiziği açısından nedeni, difüzör bölgesinde toplanan akışkanın, bu bölgede akışkan-yapı etkileşimi ve toplayıcının alt kısmına giden akışkanın momentumunun oluşturduğu etkiden dolayıdır. Ayrıca artan debi miktarı ile hız vektörlerinin yatayla yaptığı açı değeri de azalmaktadır. Kontur olarak ifade edilmeden önce akışın yönünün hem HAD hem de PIV ile benzer bölgelerde aynı yönde olması önemlidir. Burada HAD ve PIV ile elde edilen vektörlerin yönlerinin uyumu da dikkat çekmektedir.

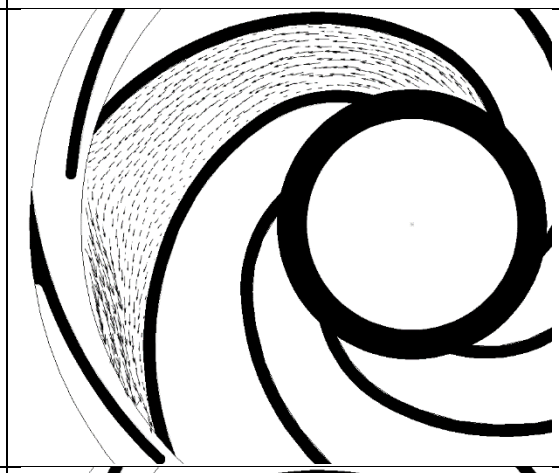
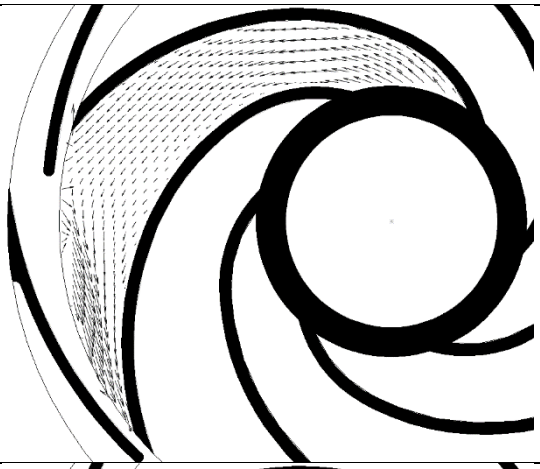
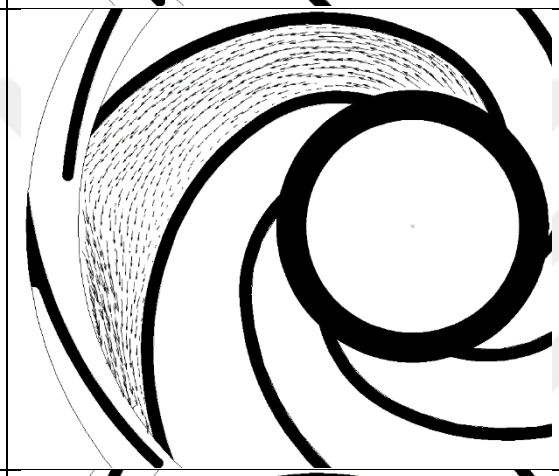
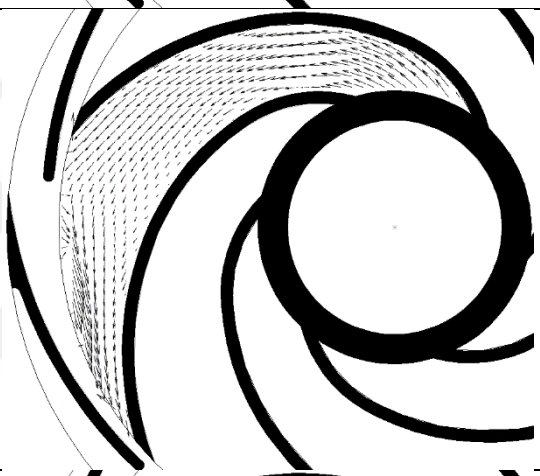
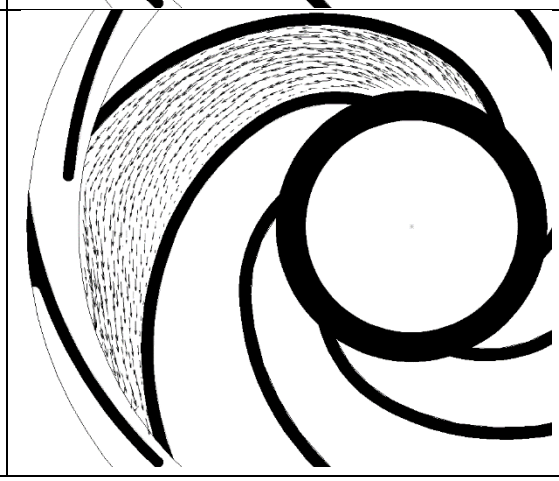
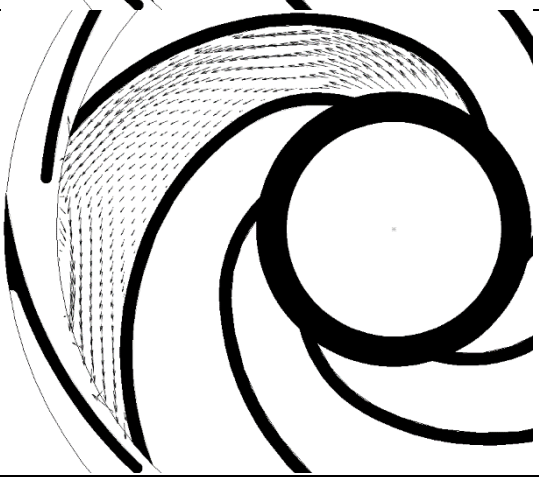
Debi Q/Q_{1d}	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.2		

Şekil 4.8. 1900 d/d motor devrinde Çark 1 (orijinal çark) için mutlak hız vektörleri.

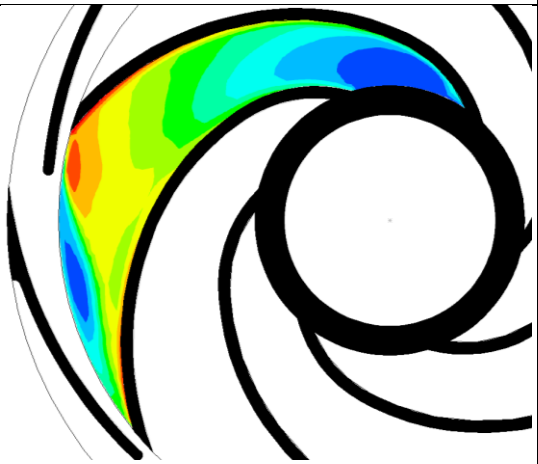
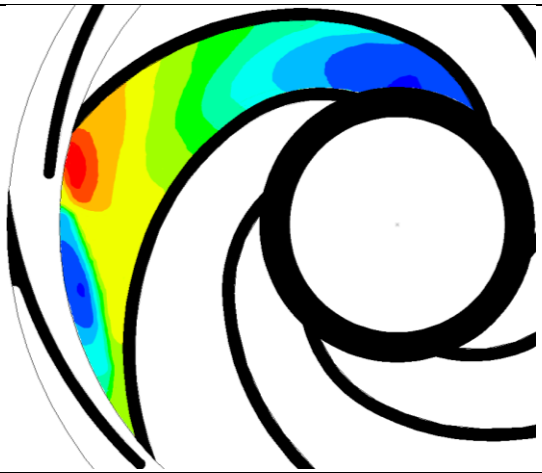
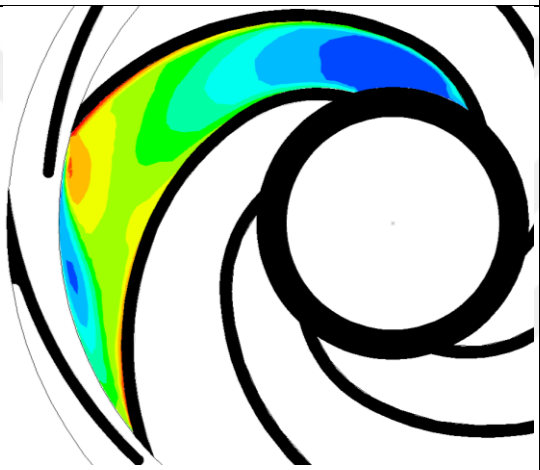
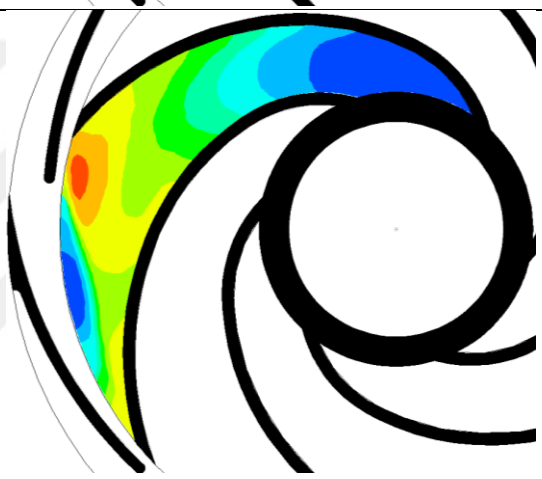
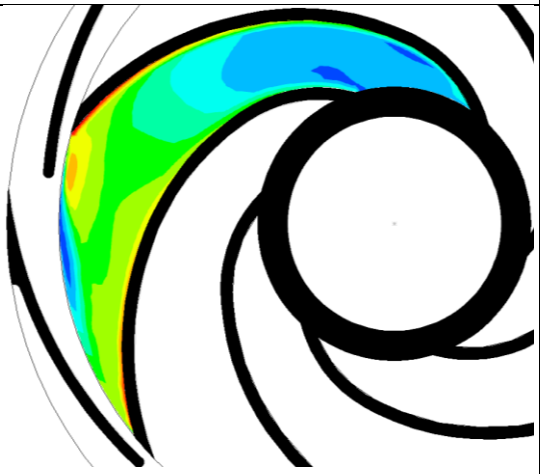
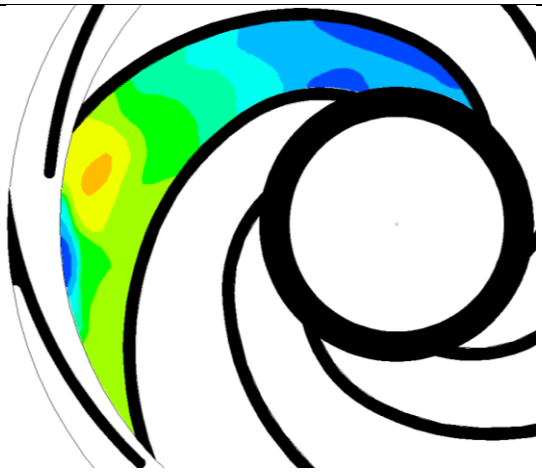
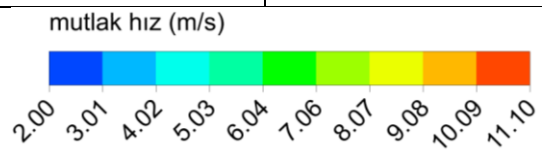
Şekil 4.9'da 1900 d/d motor devrinde Çark 1 için bağıl hız vektörleri verilmiştir. Bağıl hız değerleri, mutlak hız değerlerinden çarkın dönme etkisinden dolayı oluşan çevresel hız değerinin çıkarılması ile elde edilmiştir. Şekilde tüm debilerde çarka giriş kısmından giren akışın, kanat profilini takip ederek ilerlediği ve çıkışa doğru yöneldiği görülmektedir. Düşük debilerde kanadın basma yüzeyinde oluşan düşük hız değerlerinin

artan debi ile azaldığı, özellikle $\dot{Q}/\dot{Q}_{1d}$=1.2 değerinde etkisinin oldukça az olduğu görülmüştür. Bunun en önemli nedeni debi değerinin artması ile sabit çark pasajından geçen akış miktarının da artmasıdır. Diğer bir nedeni ise 1950 d/d'nın tasarım devri dışında düşük bir devir olmasıdır. Çark çıkışında oluşan ters akışların özellikle düşük debi değerlerinde daha etkili olduğu görülmektedir. Çark çıkış bölgesinde oluşan ters akış yapısına PIV sonuçlarında daha fazla görüldüğü ve yönünün de çark içerisine doğru daha baskın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bağıl hız değerlerinde çarkın emme bölgesinin çıkış kısmında difüzör yönünde akış olması da PIV ile elde edilen ve fiziksel olarak da beklenen bir sonuçtur. Bunun dışında akışın çark girişinden çıkış yönüne hareket ettiği ve bu vektörlerin PIV yöntemi ile başarıyla ölçülebildiği de kayda değer sonuçlardandır.

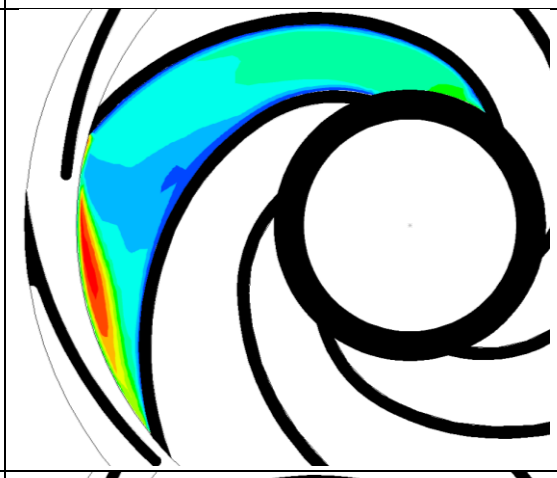
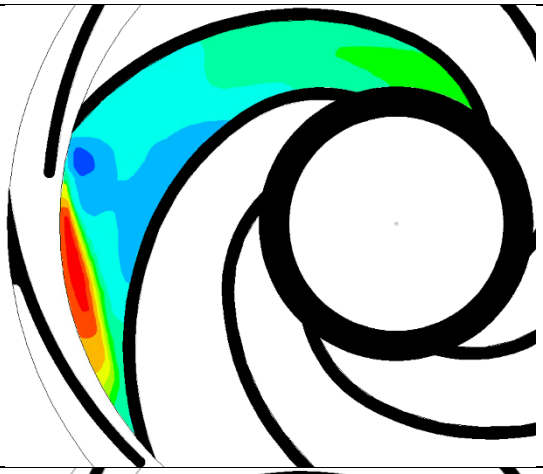
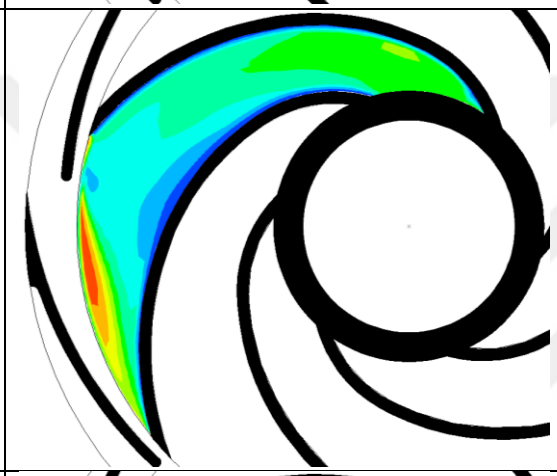
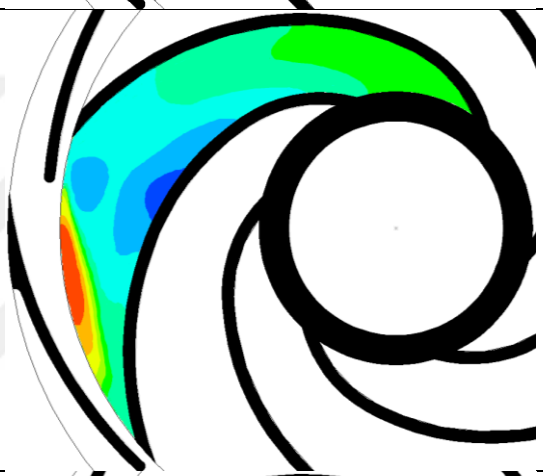
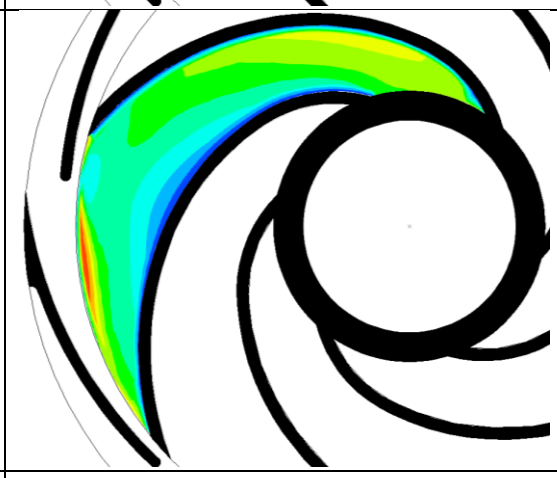
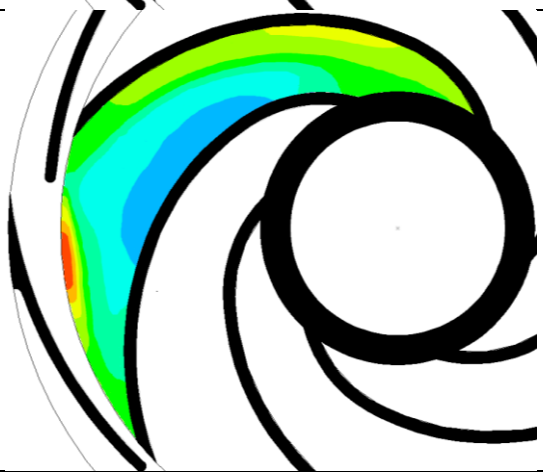
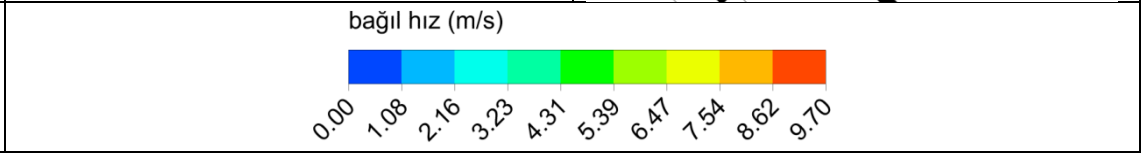
Pompa çarkı içerisinde hız vektörleri yön olarak fikir verse de hız vektörlerinin büyüklüğü ve hız bölgelerinin değişim yerleri, hız konturları ile daha anlaşılır şekilde temsil edilebilmektedir. Çark 1 için 1900d/d'da Şekil 4.10'da PIV ve HAD ile elde edilen mutlak hız konturları 2-11.1 m/s aralıklarında ve $\dot{Q}/\dot{Q}_{1d}$ =0.85, 1.0 ve 1.2 debi oranlarında ortak skalalarda verilmiştir. Skala aralığı ve genişliği her bir ölçüm debisi ve çark için farklı verildiğinde, hız yapısı benzer, hız büyüklükleri farklı ise yanıltıcı görseller elde edilebilmektedir. Bu nedenle tez çalışmasında aynı pompa devri içerisindeki tüm görseller ortak skalada hazırlanmıştır. Farkların ve hız değişim yerlerinin daha iyi anlaşılması için skala sayısı tüm çalışmada 10 ile sınırlandırılmıştır. Şekil 4.10 incelendiğinde PIV ile elde edilen görüntülerde en yüksek hız skalasının temsil edildiği kırmızı değerlerin büyüklüğünün, HAD sonuçlarından elde edilen görüntülere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca alttaki kanadın basma yüzeyinde ve üstteki kanadın emme yüzeyinde kanatlara yakın bölgede sınır tabaka içerisinde HAD sonuçlarında tespit edilen düşük ve yüksek hız değerleri PIV ile elde edilememiştir. Çünkü PIV, cidar bölgelerinde ve sınır tabaka içerisinde yeterince çözüm ağı sayısı oluşturamamaktadır. Mutlak hız değerlerinin çark girişinden çıkışına doğru çevresel hız değerinin de artması ile arttığı gözlenmektedir. Çark çıkışında difüzör kanadının olduğu yerlerdeki yüksek hız değerleri, artan debi miktarı ile azalmaktadır. Deneysel ve sayısal sonuçların özellikle 0.85 debi oranında büyüklük değerleri farklı olsa da akış yapısının uyumlu olduğu dikkat çekmektedir. Çark çıkış bölgesinde oluşan yüksek hız bölgesinin, çarkı bu bölgede terk eden akıştan dolayı olduğu, düşük hız bölgesinin ise çark çıkışında toplayıcı içindeki akıştan kaynaklı ters akıştan kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

Debi $\dot{Q}/\dot{Q}_{1d}$	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.2		

Şekil 4.9. 1900 d/d motor devrinde Çark 1 (orijinal çark) için bağıl hız vektörleri.

Debi $\dot{Q}/\dot{Q}_{1d}$	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.2		
		

Şekil 4.10. 1900 d/d motor devrinde Çark 1 (orijinal çark) için mutlak hız konturları.

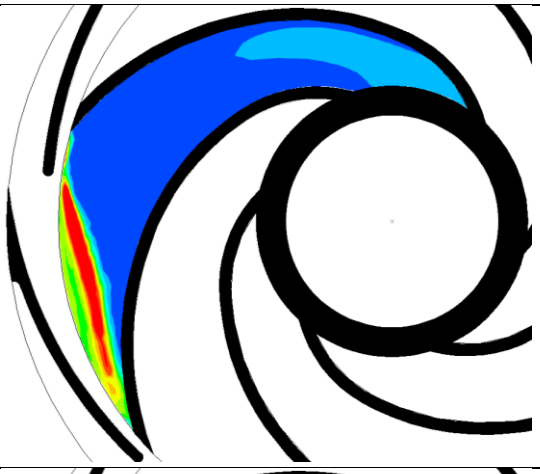
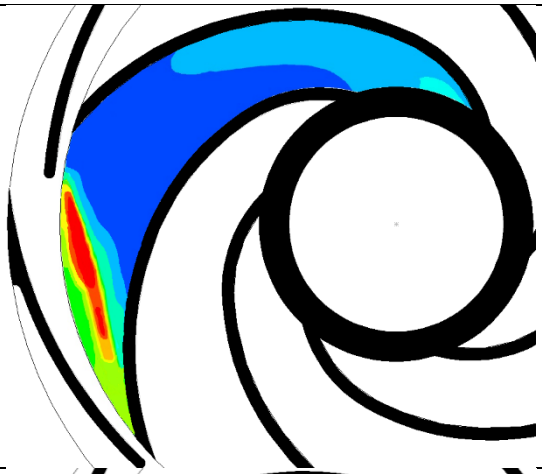
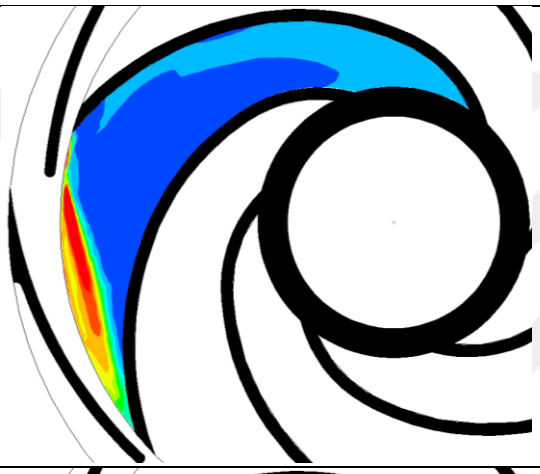
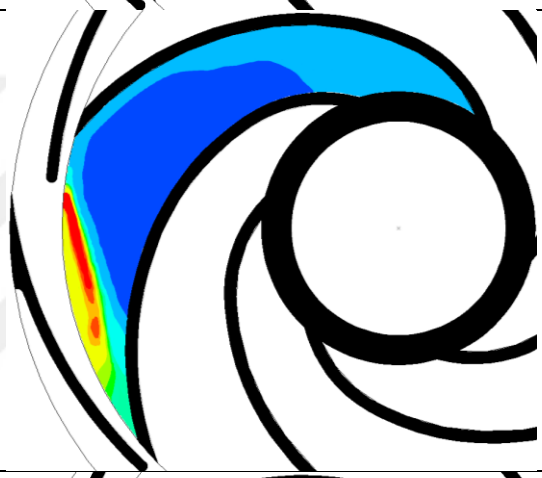
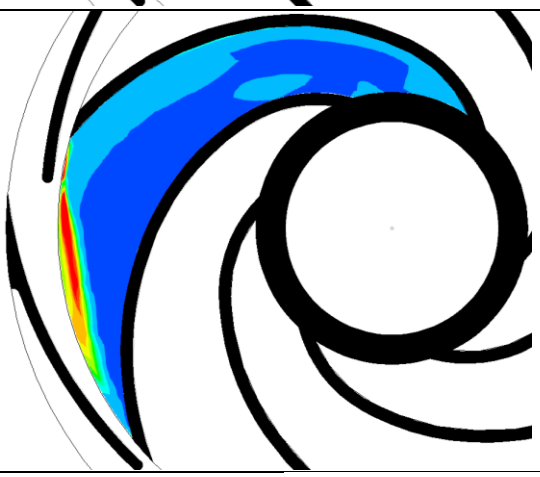
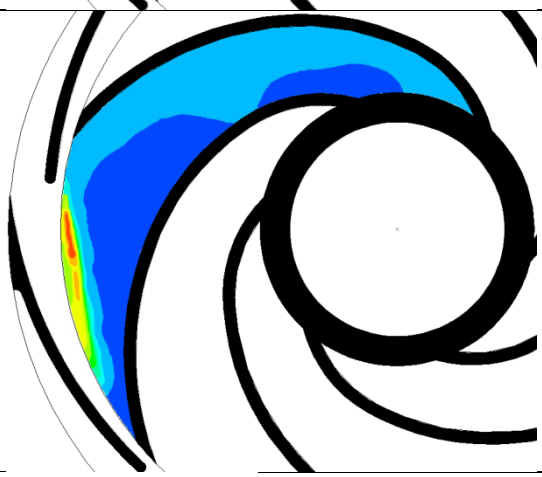
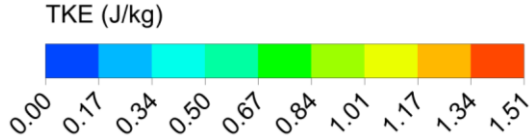
Debi $\dot{Q}/\dot{Q}_{1d}$	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.2		
		

Şekil 4.11. 1900 d/d motor devrinde Çark 1 (orijinal çark) için bağıl hız konturları.

Şekil 4.11'de bağıl hız konturları 0-9.7 m/s aralıklarında $\dot{Q}/\dot{Q}_{1d}$ =0.85, 1.0 ve 1.2 debi oranlarında ortak skalada verilmiştir. Özellikle çarkın basma yüzeyinin orta

kısmında artan debi değerleri ile azalan düşük bağıl hız bölgeleri oluşmaktadır. Mavi renk tonları ile gösterilen bu düşük hız bölgeleri PIV ile nispeten daha büyük ölçülmüştür. HAD-PIV karşılaştırmasında özellikle çark giriş bölgesindeki uyum dikkat çekmektedir. Bu bölge çıkış etkisi dışında akışın çarkın geometrisine uygun ilerlemeye başladığı ilk alandır. Çark çıkış bölgesinde ise yüksek hız değerleri bağıl hız vektörlerinde görüldüğü gibi mevcuttur. Bununla birlikte, hız vektörlerinde çark çıkışında oluşan ters akış hem deneysel hem sayısal çalışmada tespit edilmiştir. Artan debi ile bu de etki azalmaktadır. Akışkan-yapı etkileşiminin olduğu yerlerdeki farklılıklar, PIV sisteminde verilerin belli ızgara yapısında ve sınırlı sayıda ölçüm noktasından alınırken HAD analizlerinde daha fazla noktadan veri alınmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca çarkın emme ve basma yüzeylerinde sınır tabaka diye tabir edilen bölgede hem bağıl hem de mutlak hız vektörlerinde HAD analizlerinde görülen düşük ve yüksek akış bölgeleri PIV sonuçlarında ölçülememektedir. Çalışmada kanadın basınç yüzeyinde düşük hız değerleri, emiş yüzeyinde ise yüksek hız değerleri elde etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar bu yönüyle Yang ve ark. (2007) ve Westra (2008)'in yaptığı çalışmalarla benzer niteliktedir.

Şekil 4.12'de akışkanlar dinamiğinde, akıştaki girdaplarla ilişkili birim kütle başına ortalama kinetik enerji olarak tanımlanan türbülans kinetik enerji (TKE) değerleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi çark girişi ve ortasında akıştaki hız çalkantıları açısından önemli değişiklikler olmamış ve TKE değerlerin 0.34 J/kg değerinin altında ölçülmüştür. Bu da çark girişinden sonra akışın düzenli ilerlemesi açısından beklenen bir sonuçtur. Bu düşük TKE bölgesinde, kontur haritalarının şekli HAD ve PIV ile benzer çıkmaktadır. 1.2 debi oranında ise PIV ile çark giriş ve orta kısmında hız değerlerinde de olduğu gibi HAD değerlerine göre daha yüksek TKE değerleri elde edilmiştir. Çalışmada, HAD ve PIV sonuçlarında, yüksek TKE değerlerinin beklenildiği gibi çark çıkışlarında oluştuğu görülmüştür. Çark çıkışları incelendiğinde ise yüksek TKE değerlerinin başlangıç bölgesinin, PIV sonuçlarında HAD sonuçlarına göre daha önce olduğu görülmektedir. Bunun nedeni PIV ile bu bölgede sınırlı hız değeri elde edildiği ve hesaplamada komşu bölgedeki hız vektörlerinin de etkili olduğu içindir. Verilen akış özelliklerinin 1900d/d da olduğu ve tasarım şartları dışında incelendiği de bunda etkilidir. İfade edilen bazı farklılıklar olsa da TKE değerlerin HAD ve PIV ile uyumlu olduğu görülmektedir.

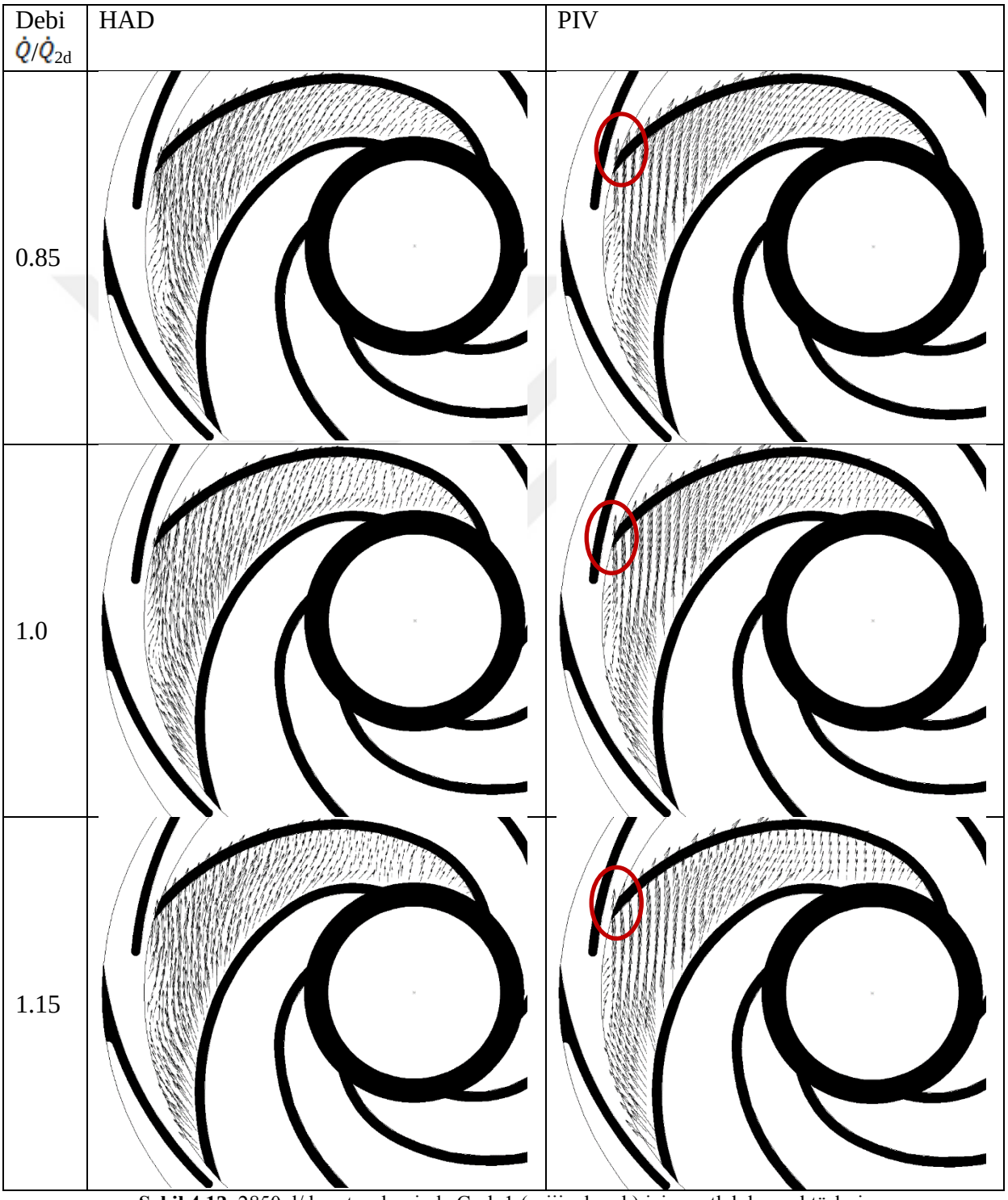
Debi $\dot{Q}/\dot{Q}_{1d}$	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.2		
		

Şekil 4.12. 1900 d/d motor devrinde Çark 1 (orijinal çark) için TKE konturları.

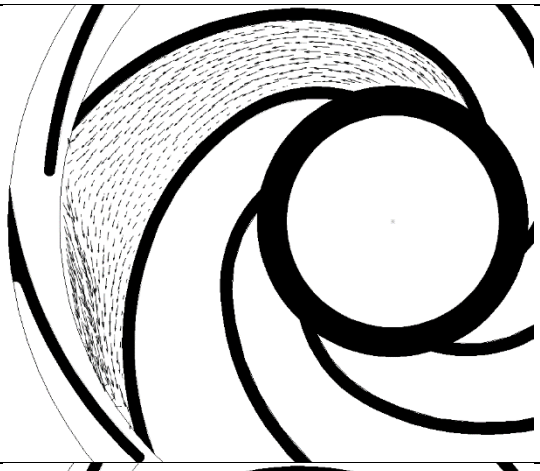
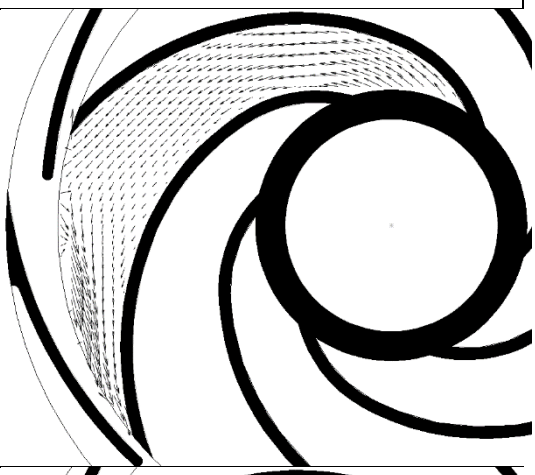
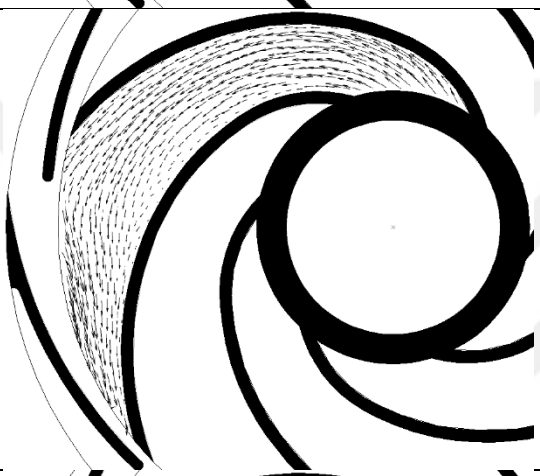
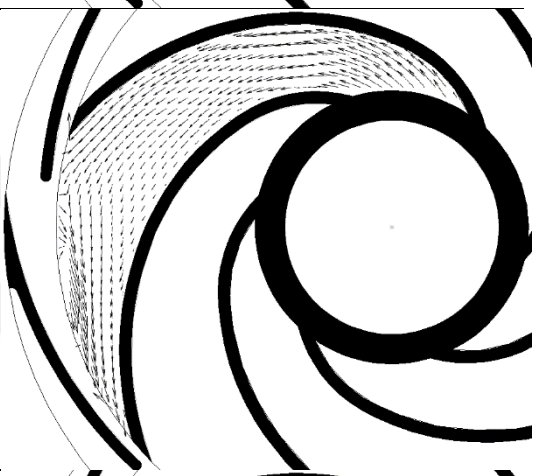
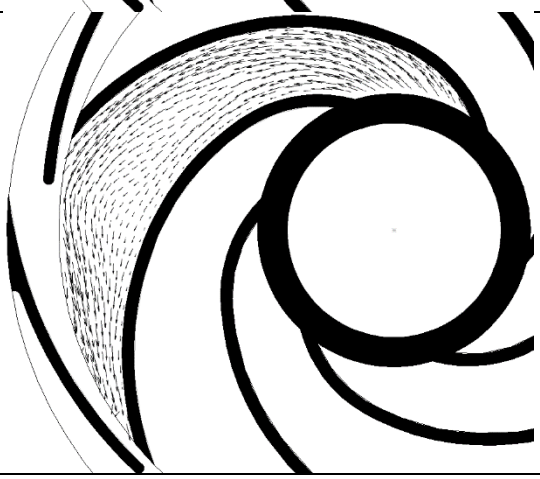
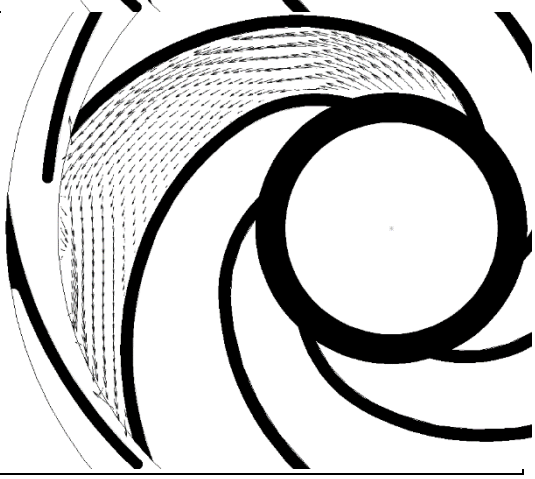
2850 d/d'da Çark 1'in kullanıldığı pompada mutlak hız vektörleri Şekil 4.13'de verilmiştir. 2850 d/d bu pompa için tasarım devri olması açısından bu bölümdeki sonuçlar önemlidir. Tez çalışması içerisinde incelenen çark 1 aynı zamanda üretimde olan ve ticari olarak Sempa Ltd. tarafından satılan SPL 100-3 serisi pompada aynı geometride kullanılmaktadır. Şekilde çark giriş bölgelerinde küçük uzunlukta görülen hız vektörlerinin boyutları, çark çıkış bölgesine doğru gidildikçe artmaktadır. Debi oranları $\dot{Q}/\dot{Q}_{2d}$ değerleri deneysel ve sayısal çalışmalardaki debinin, tasarım debisi olan $\dot{Q}_{2d}$ =12.5m³/h değerine oranı olarak ifade edilmiştir. Artan debi değerleri ile hız vektörlerinin yatay eksenle yaptığı açı değerleri azalmaktadır. 1900 d/d'da görüntülere benzer şekilde çark çıkışında ters akışlar olduğu, ancak bu ters akışın bölgesel büyüklük olarak ve vektör büyüklüğü açısından daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni 2850 d/d'nın tasarım devri olduğu ve geometrinin bu devre uygun olmasıdır. Ayrıca bu ters akışın büyüklüğünün devir sayısı ile değişebildiği de görülmüştür. Çark çıkışında kanadın basma yüzeyi üzerinde difüzör bölgesine doğru çarkı terk eden hız vektörleri özellikle 1.15 debi oranında PIV ile elde edilen görüntülerde görülmektedir. Ayrıca kanadın emme yüzeyinde çark çıkısında difüzörün kanadının etkisi en fazla 0.85 debi oranında hem HAD hem de PIV ile görülmektedir. 6 kanatlı çark ve 7 kanatlı difüzör bulunan tasarımda, kanadın emme yüzeyinde çark çıkışında difüzör açıklığına doğru ilerleyen akış tüm PIV sonuçlarında görülmüştür.

Şekil 4.14'de 2850 d/d motor devrinde 3 kademeli santrifüj pompanın birinci kademesinde Çark 1 için bağıl hız vektörleri verilmiştir. Özellikle $\dot{Q}/\dot{Q}_{2d}$ =0.85 değerinde çark çıkışında difüzör bölgesi içerindeki dönümlü ve ters akışın etkin olduğu, PIV ve HAD sonuçlarında görülmektedir. Bu ters akış şekilde görülen mevcut çark-difüzör pozisyonunda bu şekilde oluşmaktadır. Farklı çark-difüzör pozisyonları sürekli dönen pompa çarkında değişken açılarda oluşmaktadır. Bunun detaylı incelemesi ve farklı çark-difüzör pozisyonunda pompa çarkı içerisindeki akış yapıları 4.3.4 bölümünde incelenmiştir. Şekilde dönme etkisinden dolayı oluşan çevresel hız değerlerinin çıkarılarak elde edilen bağıl hız değerlerinde, akışın çark girişinden gelerek çark çıkışına hareket ettiği ve kanat profilini takip ettiği görülmektedir. Debi oranının 0.85 olduğu değerde çarkın orta kısmında emme yüzeyine yakın yerlerde yüksek hız değerleri görülürken basma yüzeyine yakın yerlerde ise düşük büyüklükte hız vektörleri vardır. Bu bölgelerde çarkın emme ve basma yüzeyleri arasında hız büyüklüklerinin yaklaşık aynı olması akış fiziği açısından istenen bir durumdur. Bu bölgeler arası hız değişimlerinin 1.0

ve 1.15 debi oranlarında azaldığı görülmektedir. Özellikle debi oranının 1.0 olduğu durumda çark çıkışına kadar olan bölgede PIV ile düzenli bir akış olduğu görülmüştür. HAD değerlerinde 1.0 ve 1.15 debi oranlarında çark çıkışında görülen ters akış PIV'de de görülmektedir. Ancak PIV ile özellikle çark çıkışının orta kısımda vektörlerin HAD'dan farklı olarak akışa ters yönde bir bölgede toplandığı görülmüştür.



Şekil 4.13. 2850 d/d motor devrinde Çark 1 (orijinal çark) için mutlak hız vektörleri.

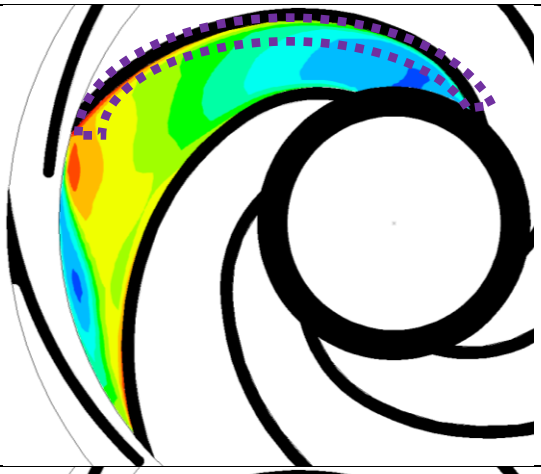
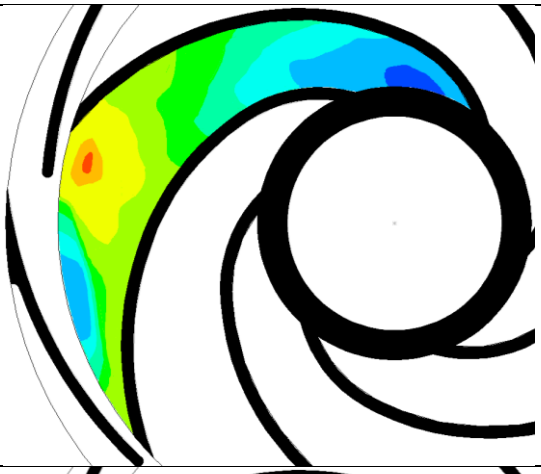
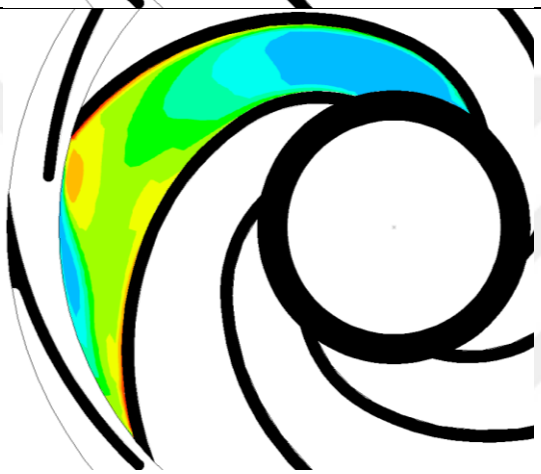
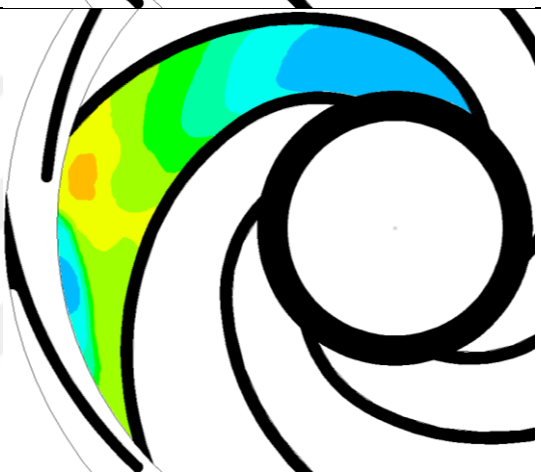
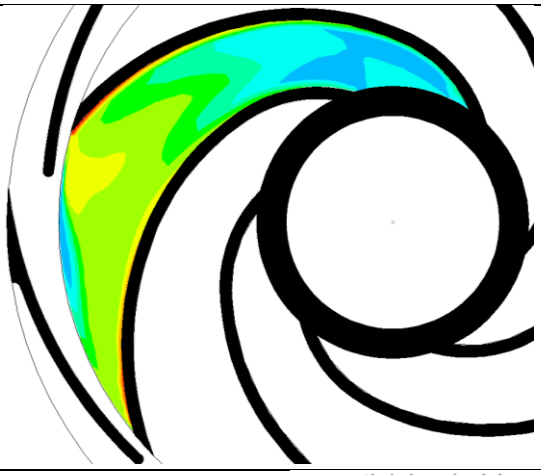
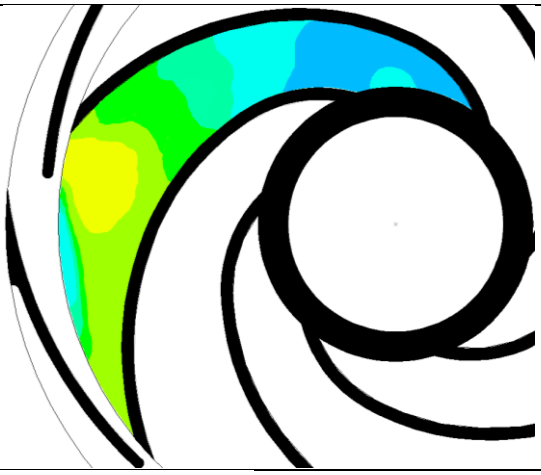
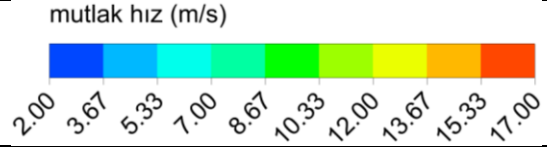
Debi $\dot{Q}/\dot{Q}_{2d}$	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.15		

Şekil 4.14. 2850 d/d motor devrinde Çark 1 (orijinal çark) için bağıl hız vektörleri.

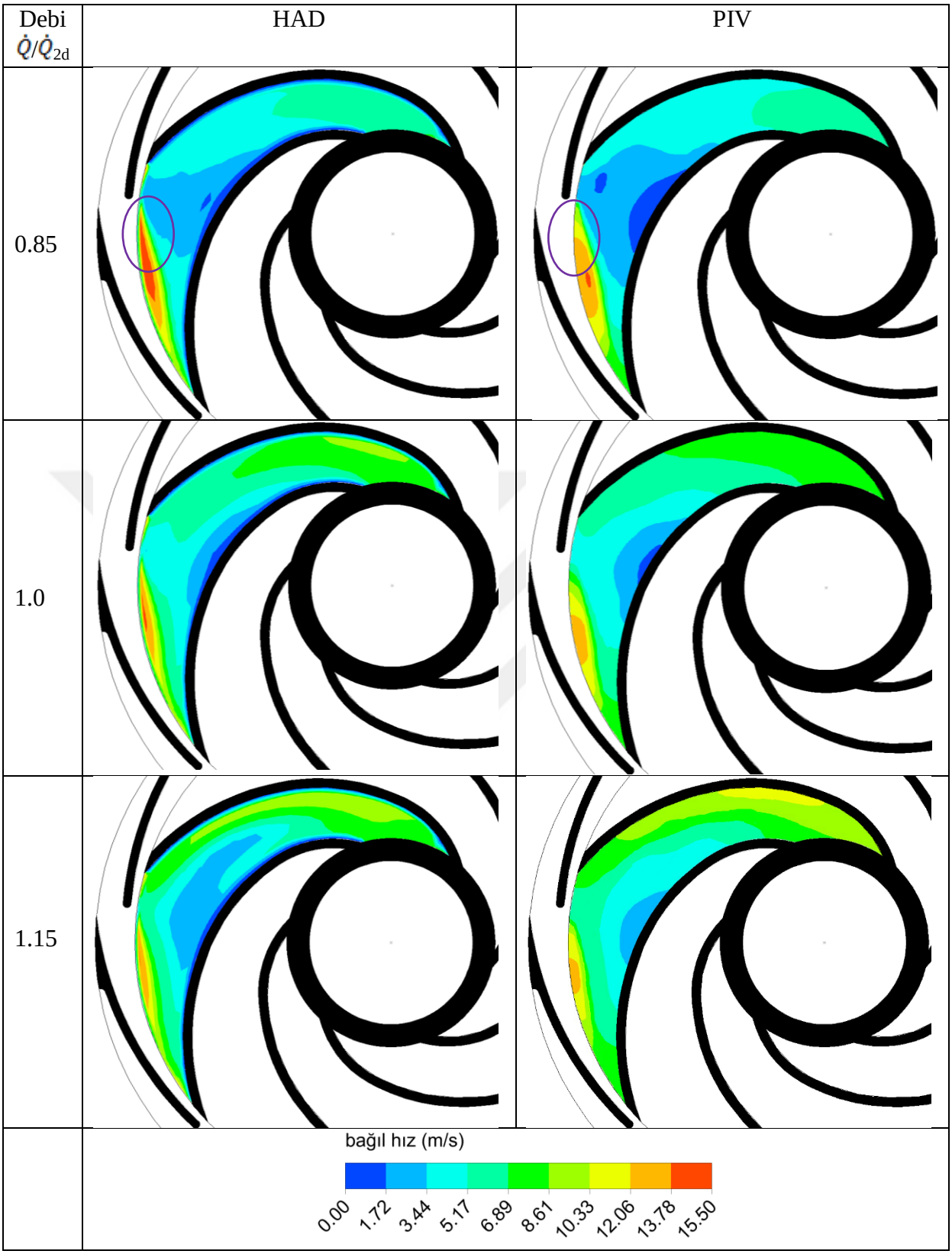
Çark 1 için 2850d/d'da mutlak hız konturları 3 kademeli pompanın ilk kademesinde çark çıkış genişliğinin tam ortasındaki düzlemde Şekil 4.15'de verilmiştir. 1900d/d'da skalada 2.0-11.1 m/s aralığında iken artan devir sayısı ile bu mutlak hız aralığı 2.0-17.0 m/s arasında ortak skalada temsil edilmektedir. Bu skala belirlenirken öncelikle her bir çark için aynı devirdeki tüm PIV ve HAD sonuçları incelenerek en düşük ve en yüksek değerler uygun görsel oluşturacak şekilde belirlenmiştir. HAD sonuçlarında çark

girişlerinde mavi renk görülen düşük hız bölgeleri ile üstteki çarkın emme yüzeyi arasında sınır tabaka içerisinde kalan ve alttaki mavi renkli bölgeye göre hız değeri daha yüksek olan kanat profili boyunca ilerleyen ve 0.85 debi oranında HAD değerlerinde gösterilen bir hat vardır. Bu hız değeri kanadın emme yüzeyi boyunca çark girişinden çıkışına doğru artarak devam etmekte ve çark çıkışında kırmızı ile gösterilen yüksek hız değerlerine ulaşmaktadır. Çark sabit devirde dönerken çarka yakın bölgedeki akışkan da mutlak olarak daha yüksek hız değerinde olması beklenir. Bu hız çizgisi tez çalışmasında PIV ile hiçbir debide ve devirde görülememiştir. Bunun nedeni bu bölgedeki HAD da bu bölgede sık ağ yapısı oluşturulmuşken, PIV'nin ölçüm hassasiyetinin, toplam pompada 4-6 milyon hücre sayısı gibi bir hassasiyette çözülen hız değerlerine göre daha düşük olmasıdır. Bu hız çizgisi alttaki kanadın üzerinde basma yüzeyi boyunca da oluşmaktadır. Bu bölge çark emme ve basma yüzeyleri arasında birkaç milimetre ilerlendiğinde kaybolduğu için çark içerisindeki genel akış yapısının incelenmesinde çok büyük önem arz etmemektedir. PIV ile bu bölgeler haricindeki ölçümlerde akış yapısı olarak benzerlik ve HAD analizleri ile uyum dikkat çekmektedir. Ayrıca, yüksek türbülanslı ve sınır tabaka kalınlığının düşük olduğu bu akışlarda cidardaki akışın serbest akım bölgesine etkisi düşüktür.

Şekil 4.16'da 2850 d/d'da hem HAD hem de PIV ile elde edilen bağıl hız konturları 0-15.5 m/s arasındaki 10 skalada ve debi oranları $\dot{Q}/\dot{Q}_{2d}$ =0.85, 1.0 ve 1.15'de verilmiştir. Tasarım debisi olan 1.0 debi oranında çark girişinde yeşil renk ile gösterilen hız değeri çarkın orta kısmında artan kesit alanı değerleri ile bir miktar azalmıştır. Çarkın orta kısmında kanadın basma yüzeyinde oluşan ve mavi renk ile gösterilen düşük hız bölgesi dikkat çekmektedir. Bu bölge aynı zamanda akış kontrol çalışmasında azaltılması için yarık açılan bölgedir. 0.85 debi değerinde çark giriş bölgesinde akış yapısı benzer olsa da çark orta kısmında ve çark çıkışında farklılıklar PIV-HAD karşılaştırmasında görülmektedir. Tez çalışmasında PIV ile yapılan tüm çalışmalarda hız konturlarında dikkat çeken oluşum; HAD ile ağ yapısına bağlı olarak keskin köşeli olan kontur geçişleri PIV ile filtre ve veri işleme işlemlerine de bağlı olarak yuvarlak hatlı olarak oluşmaktadır. Bu duruma örnek olarak 0.85 debi oranında PIV-HAD karşılaştırılması gösterilebilir. Burada çark çıkışında keskin hatlı ve çark çıkış ağzı boyunca HAD analizlerinde oluşan ve kırmızı renk skalası ile temsil edilen bölge PIV ile daha yuvarlak hatlı ve uzunluğu azdır.

Debi $\dot{Q}/\dot{Q}_{2d}$	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.15		
		

Şekil 4.15. 2850 d/d motor devrinde Çark 1 (orijinal çark) için mutlak hız konturları.

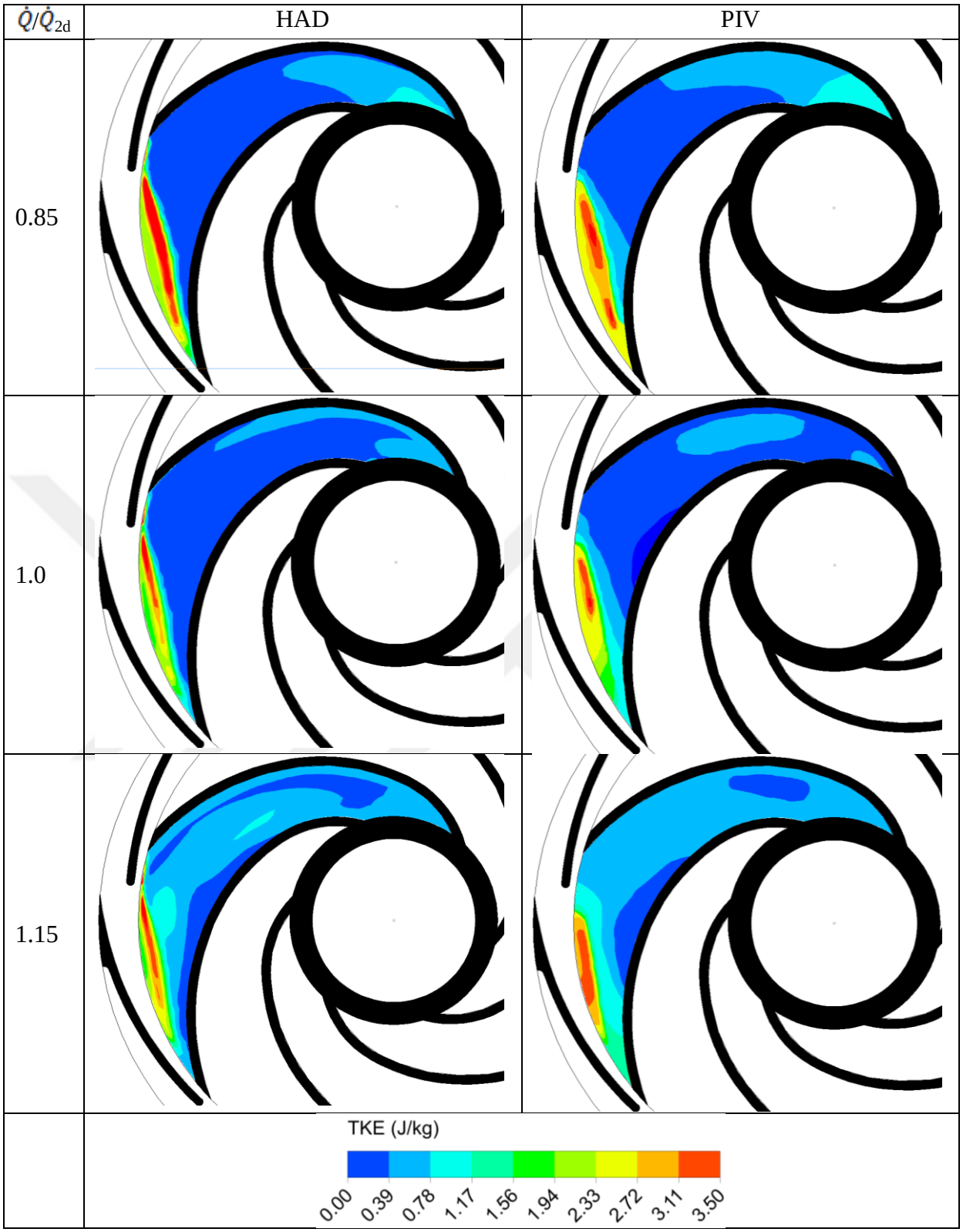


Şekil 4.16. 2850 d/d motor devrinde Çark 1 (orijinal çark) için bağıl hız konturları.

Ayrıca Şekil 4.16'da bağıl hız değerlerinde tüm debi oranlarında HAD-PIV değerlerinin akış yapısı olarak uyumlu olduğu dikkat çekmektedir. Bağıl hız değerlerinde özellikle HAD değerlerinde görülen cidara yakın düşük hız değerleri oluşmaktadır. Genel

olarak bu çalışmada elde edilen bağıl hız değerleri sonuçları, Dai ve Dong (2013)'ün yaptığı 6 kanatlı pompa çarkını inceledikleri çalışmada, çark içerisindeki hız değerleri kanadın basınç tarafından emiş tarafına doğru arttığını belirttikleri çalışma ile de uyumludur.

Çark içerisindeki akışın türbülans değerini tarif etmek için TKE değerleri kullanılmıştır. TKE çalkantı hız bileşeninin birim kütle başına kinetik enerjisi olup HAD ile türbülans modelinde hesaplanmıştır. Türbülans çalkantılarının değişiminin elde edildiği PIV değerleri de bu HAD sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.17'de 2850 d/d değerinde farklı debi değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hız değerlerinden türetilen bu değerlerde türbülans değerleri debinin 0.85 ve 1.0 olduğu değerlerde çark girişinde 0.78-1.12 J/kg değerinde bir miktar yüksek olarak ölçülmüştür. Görüntülerde çark giriş bölgesinde gösterilen siyah yuvarlak şekildeki bilezikten dolayı TKE değerlerinin yüksek olması beklenen ve kanat başlangıç bölgelerinde oluşmaya başlayan çarpma etkilerinden de kaynaklandığı söylenebilir. Çark içerisinde ani değişimler ve çalkantı olmadığı için TKE değerleri çıkış bölgesine kadar düşük seviyede kalmıştır. Ancak çark çıkışında oluşan ters akışlar nedeni ile bazı bölgelerde TKE değerlerinin 3.11 J/kg değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Bu değerler pompa çarkı içerisinde türbülans değerlerini asıl etki eden faktörün difüzör kanadından çok, difüzör akış bölgesinin etkisi olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Çünkü yüksek devirde dönen akış bu bölgede bir anda durağan olan difüzör bölgesinin etkisine maruz kalmaktadır. Ayrıca 3 J/kg değeri pompa içerisinde yüksek bir türbülans değeri olup pompa verimine olumsuz etkisi olacaktır. Pedersen ve Jacobsen (2000) ve Sinha ve ark. (2001)'in de çalışmalarında belirttiği gibi durma noktası oluşan (çark girişi) akışkan yapı etkileşimi oluşan veya dönümün oluştuğu (çark çıkışı) bölgelerde yüksek TKE değerleri bulunmuştur. Bu da elde edilen sonuçların literatürle ve akış fiziği ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

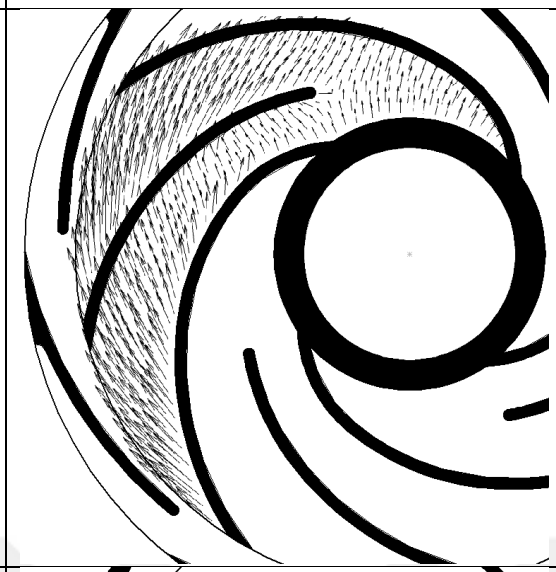
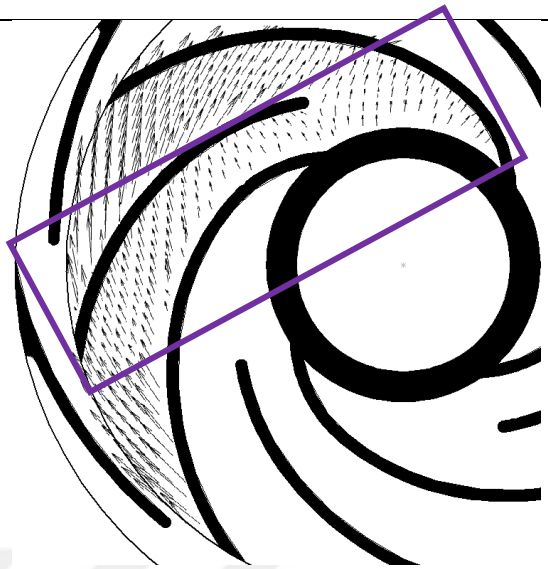
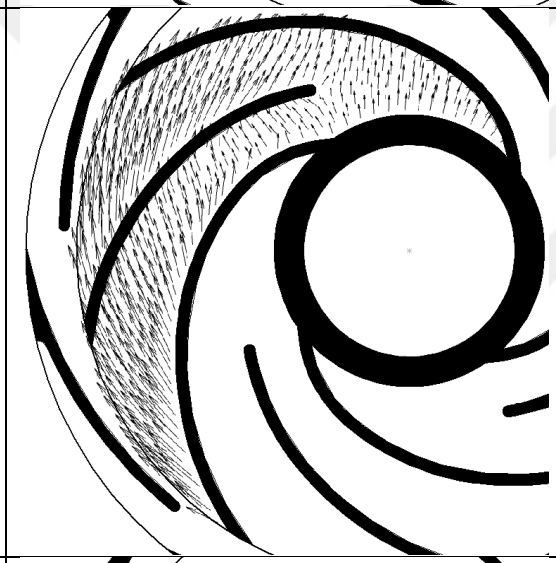
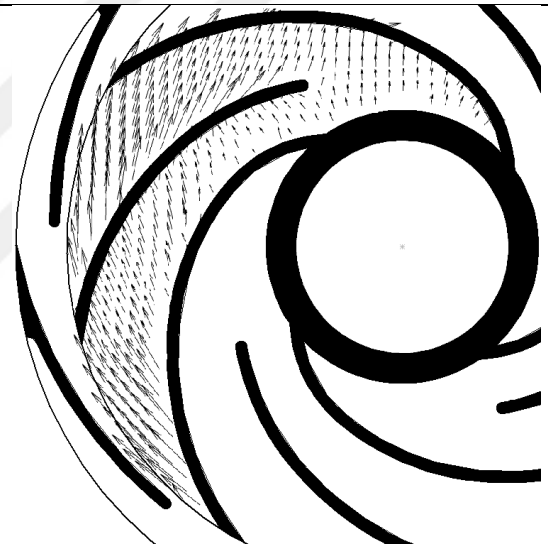
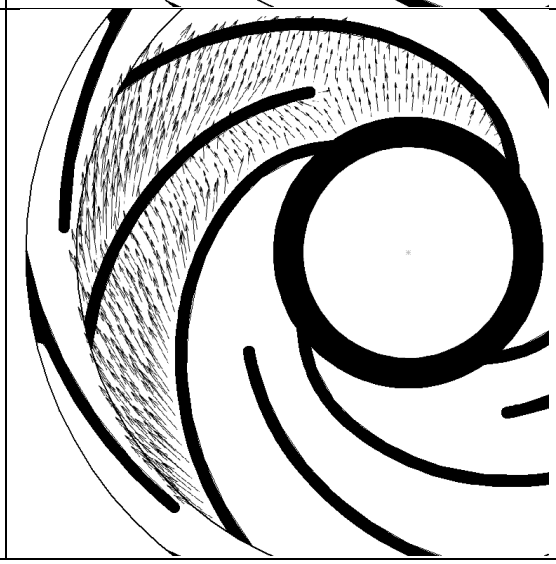
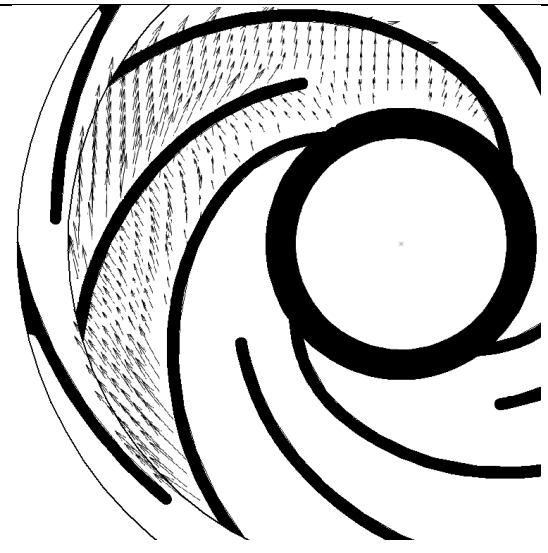


Şekil 4.17. 2850 d/d motor devrinde Çark 1 (orijinal çark) için TKE konturları.

4.3.2. Çark 2 için PIV-HAD sonuçları

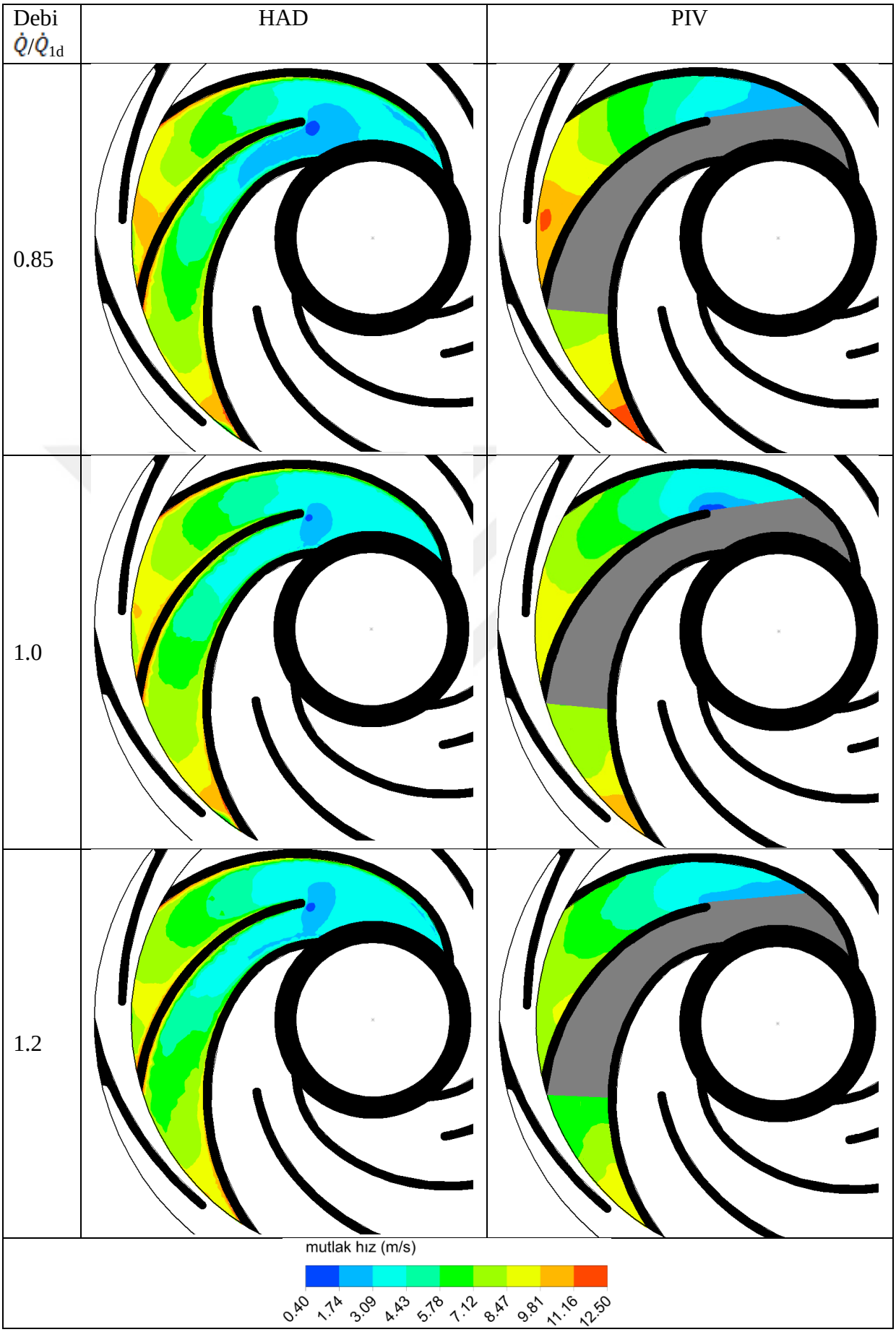
4.2. bölümünde açıklanan pasif akış kontrol metodu ile HAD çalışmaları yapılan analizler sonucunda geometrisi belirlenen ve üretilen diğer bir çark geometrisi olan Çark 2 için 1900 d/d elde edilen mutlak hız değerleri Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekilde çark geometrisinde bakış yönümüze göre sol taraftan sağa doğru lazer kaynağından genişleyerek gelen lazer perdesi, ara kanadın arka bölgesinde yansımadan dolayı ara kanadın arkasında düşük kuvvette oluşmuş, kırılmış ve ekseni bozulmuştur. Ölçüm alabilmek için önemli bir parametre olan lazer perdesi tam olarak oluşmadığı için ara kanadın alt kısımda 500 görüntünün birçoğunda yeterli veri alınamamış veya yanlış yönde veya büyüklükte vektörler hesaplanmıştır. Ortalaması alınan görüntülerde bazı ölçümlerin oluşmamasıyla elde edilen vektörler de düşük büyüklükte olmuştur. Bu durum ayrıca tez çalışmasında PIV ile yalnızca bir çark arasında görüntü alınmasının nedenini göstermektedir. Şekilde lazer ışığının kırılmadan ve bozulmadan geçtiği üst bölgede akış yapısı ve vektörler görüntülenebilmiş ve hesaplanabilmiştir. Ancak, ara kanadın alt kısmında ve çark girişinde elde edilen az sayıda vektörün her ne kadar yönü bir miktar doğru olsa da, şekilden de görüldüğü gibi hız vektörü sayısı ve büyüklüğü oldukça farklıdır. Bu lazer perdesi oluşmayan bölge dışındaki yerlerde HAD ile PIV sonuçlarının uyum içerisinde olduğu söylenebilir. Bu geometride ve motor devrinde ara kanattan dolayı, ara kanat alt kısmında difüzör etkisi görülmemektedir. Ara kanadın üst kısmında ise çarkı terk eden hız vektörleri hem HAD hem de PIV de elde edilmiştir.

1900 d/d motor devrinde Çark 2'nin kullanıldığı pompa kademesi için mutlak hız konturları Şekil 4.19'da verilmiştir. Ölçüm bölgesinde sağlıklı veri alınamayan ara kanadın sağındaki bölgeler gri renk ile maskelenmiştir. Ölçüm yapılamayan düşük hız bölgelerine komşu yerlerde de PIV ölçüm prensibinden dolayı bir miktar düşük hız bölgeleri elde edilmiştir. 0.85 debi oranında çark girişinden çark çıkışına doğru düzenli hız artışı görülmektedir. PIV görüntüsünde çark çıkışında ara kanat üst kısmında difüzör kanadının etkisi baskın bir şekilde görülmektedir. Bu bölgede değerler akışkan-yapı etkileşiminden dolayı oluşan ters akış nedeni ile yüksek çıkmaktadır. 1.0 debi oranında difüzör kanadının etkisi kısmen azalmış ve kırmızı ile gösterilen yüksek hız değeri oluşmamıştır. Çarkın ara kanadının üst kısmında kırmızı ile gösterilen en yüksek hız kontur büyüklükleri artan debi miktarı ile deneysel ve sayısal çalışmalarda azalırken, yüksek hız konturlarının büyüklükleri çıkış kısmına doğru yaklaşmaktadır.

Debi $\dot{Q}/\dot{Q}_{1d}$	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.2		

Şekil 4.18. 1900 d/d motor devrinde Çark 2 için mutlak hız vektörleri.

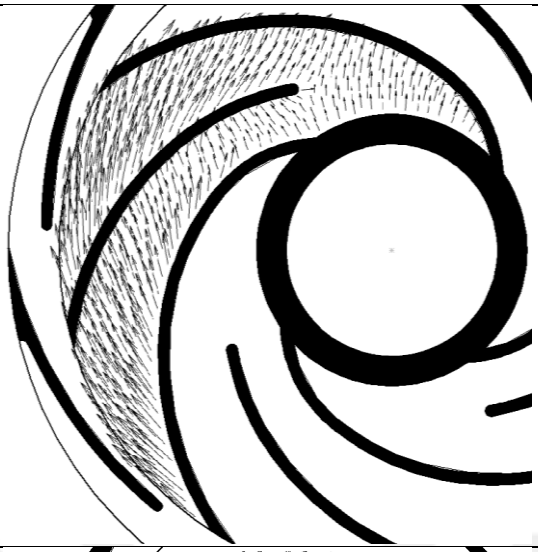
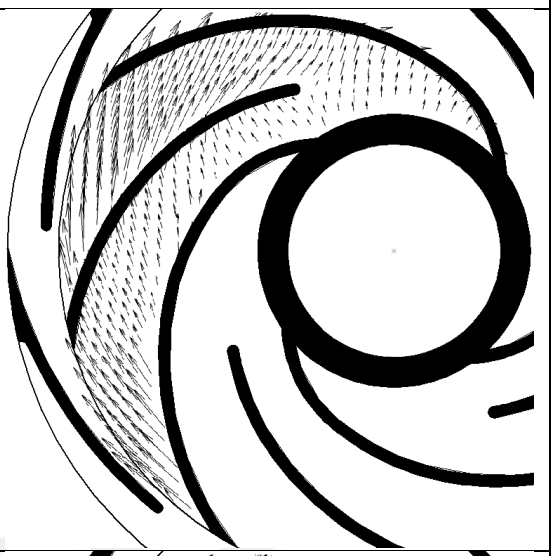
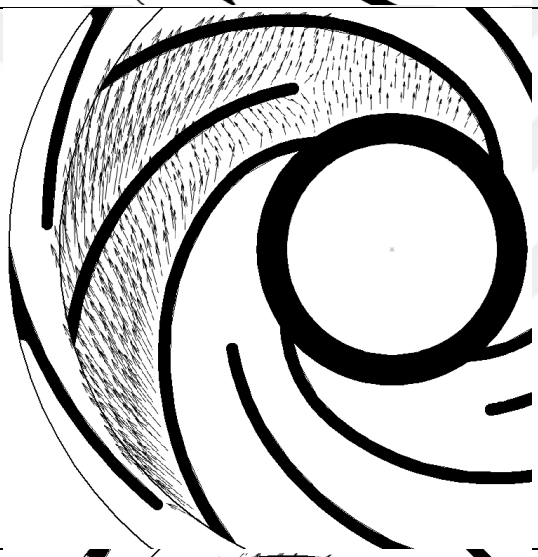
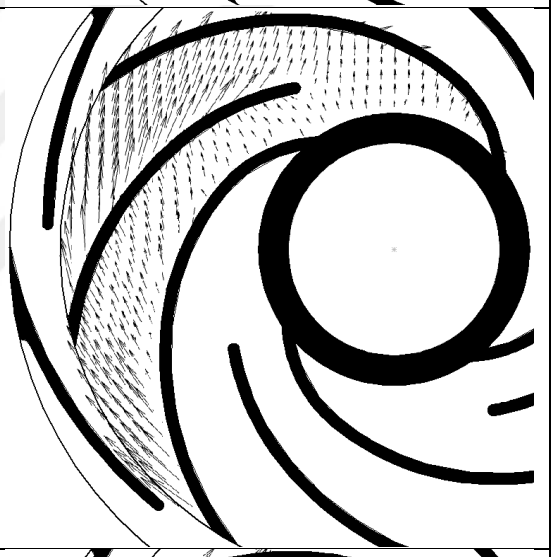
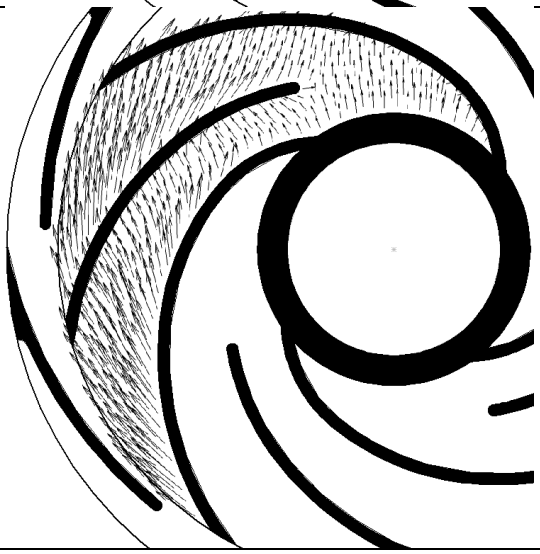
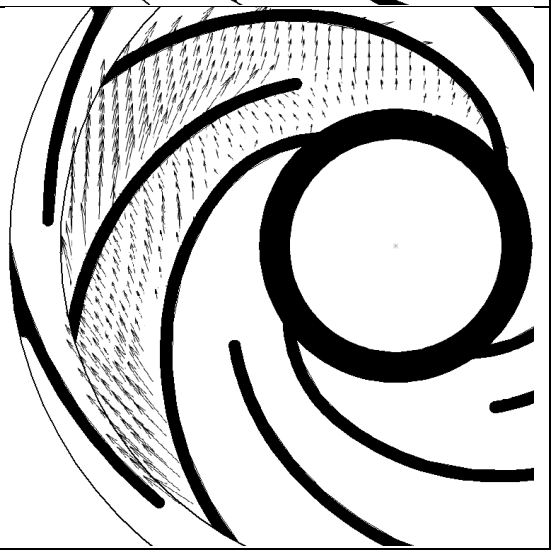
Alttaki asıl kanadın basma yüzeyinde çıkış kısmına yakın bölgede alttaki difüzör kanadının etkisi hem HAD hem de PIV ile görünse de, alttaki difüzör kanadının alt kısmında HAD ile görülen akış yapısı PIV ile daha az detaylı elde edilebilmiştir. Özellikle 1.0 ve 1.2 debi oranlarında HAD ve PIV verilerinin uyum içinde olduğu söylenebilir. Mutlak hız değerlerinden hesaplanan bağıl hız değerleri ve TKE değerleri kanadın alt kısmındaki maskeli yerde mutlak hız değerleri sağlıklı ölçülemediği için bu geometri için diğer akış karakteristikleri hesaplanmamıştır. Burada skala değerleri 0.4-12.50 m/s hız değerleri arasında oluşmuştur. Çark 1 için oluşan mutlak hız skalasından daha düşük olma nedeni ara kanat görüntüsünün görüntü bölgesi içerisinde kalması ve bu bölgede kanat girişinde oluşan çarpma etkisi ve durma noktası oluşmasıdır. Durma noktasında hız değerleri oldukça düşük olduğu için renk skalası da daha düşük değerlerden başlamıştır.



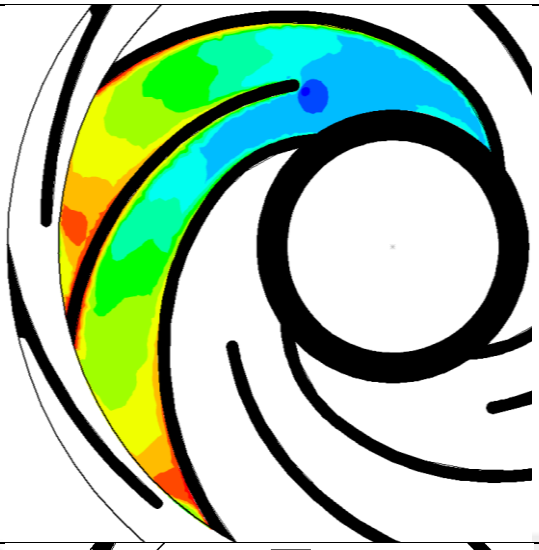
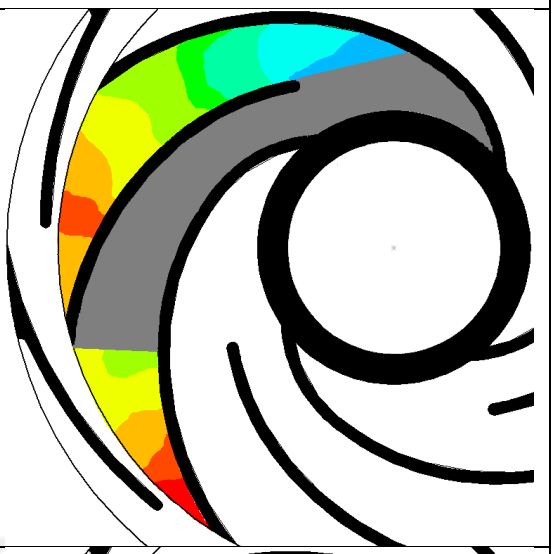
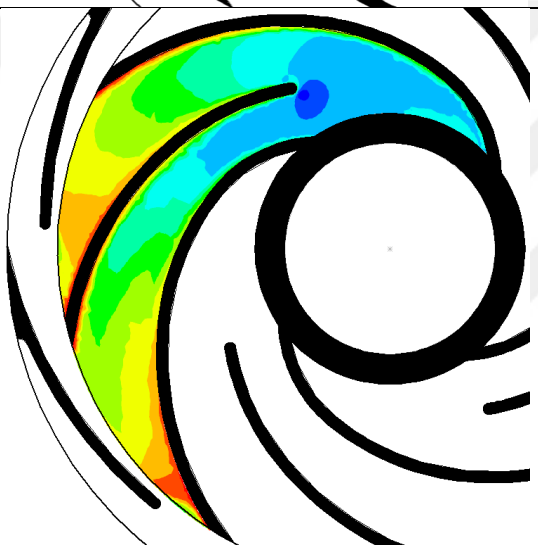
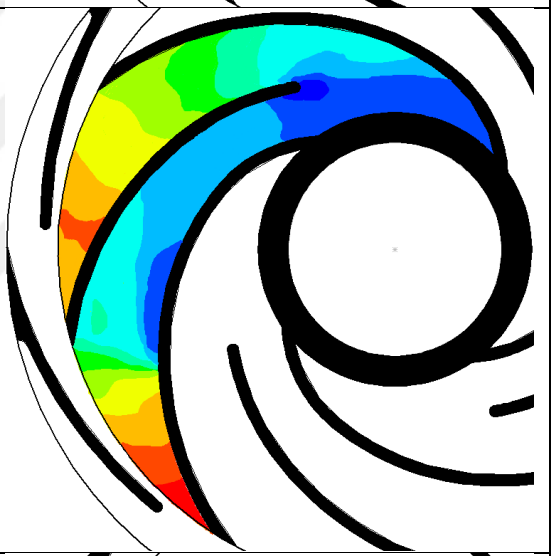
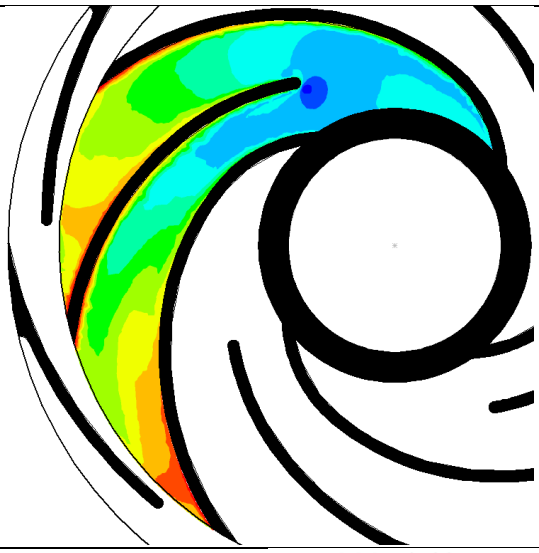
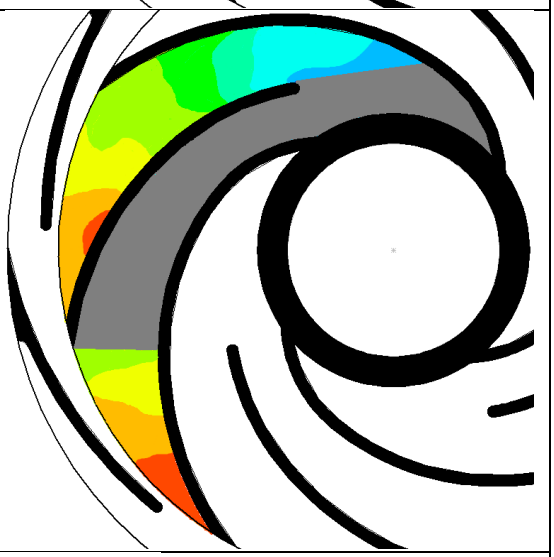
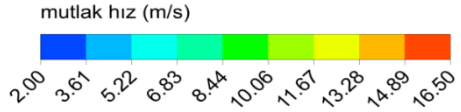
Şekil 4.19. 1900 d/d motor devrinde Çark 2 için mutlak hız konturları.

Tasarım devri olan 2850 d/d'da ve tasarım debisin 0.85-1.0 ve 1.15 oranlarındaki mutlak hız vektörleri Şekil 4.20'de verilmiştir. 1900d/d ile aynı pozisyonda ve düzlemde olduğu için bu düzlemde de ara kanadın alt kısmındaki akış özellikleri lazer perdesinin tam oluşamadığı için görülememiştir. Özellikle PIV görüntülerinde asıl kanadın basma yüzeyinde, oluşan gölge etkisinden dolayı bu bölgede küçük hız değerleri elde edilmiştir. Elde edilen vektörler de kanat çıkış genişliğinin ortasında değil, farklı düzleme ait de olabilmektedir. Yani doğruluğu konusunda hataları olmaktadır. Ara kanat altındaki bölgede, gölge etkisinden çıkıldığı alttaki ana kanadın basma yüzeyinde çıkış kısmında hız vektörlerinin aniden büyüdüğü ve bu bölgede vektörlerin HAD ile benzer yapıda olduğu görülmektedir. Artan debi değeri ile birlikte, sabit büyüklükte olan akış alanından çark çıkışına ilerleyen akışın miktarı artacağı için ara kanadın üst kısmındaki mutlak hız vektörlerinin yatay x ekseni ile yaptığı açının arttığı beklenen bir fiziksel sonuç olarak gözlemlenmektedir. HAD değerlerinde ara kanadın alt ve üst kısmının farklı akış karakteristikleri olduğu da görülmektedir. Ara kanat uygulamasının kanattaki çarpma kayıplarını artıracağı ve kavitasyon riskini de artıracağı diğer bir dezavantajı olarak söylenebilir. Ancak toplam enerji transfer yüzeyini artıracağı için gerekli tork değerinin artacağı gibi basma yüksekliğinde de artış elde edileceği söylenebilir.

2850 d/d motor devrinde Çark 2 için mutlak hız konturları Şekil 4.21'de verilmiştir. HAD değerleri incelendiğinde ara kanat giriş bölgesinde oluşan ve mavi ile gösterilen düşük hız bölgesi kanat girişinde bir çarpma kaybı oluşturmakta ve durma noktası oluşturmaktadır. Bu çarpma ve durma etkisi pompa çark analizlerinde genellikle görülen bir durumdur. Tüm debi değerlerinde oluştuğu da görülmektedir. Şekil 4.21'te PIV kısmında 1.0 debi oranında örnek olarak bir görüntüde ölçüm yapılamayan bölge oluşan düşük hızların görülebilmesi için maskelenmemiştir. Bu düşük hız bölgesinde ortalama hız değerleri HAD analizlerinde 3.61-10.06 aralığında gösterilirken PIV ölçümlerinde 2.0-6.8 m/s arasında değiştiği görülmüştür. Bu bölge dışındaki yerlerde akış yapılarının giriş kısmında çıkışa doğru arttığı, akış hızının kanadın basma yüzeyinde emme yüzeyine göre daha yüksek olduğu ve sonuçların da uyumlu olduğu görülmüştür.

Debi $\dot{Q}/\dot{Q}_{2d}$	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.15		

Şekil 4.20. 2850 d/d motor devrinde Çark 2 için mutlak hız vektörleri.

Debi $\dot{Q}/\dot{Q}_{2d}$	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.15		
		

Şekil 4.21. 2850 d/d motor devrinde Çark 2 için mutlak hız konturları.

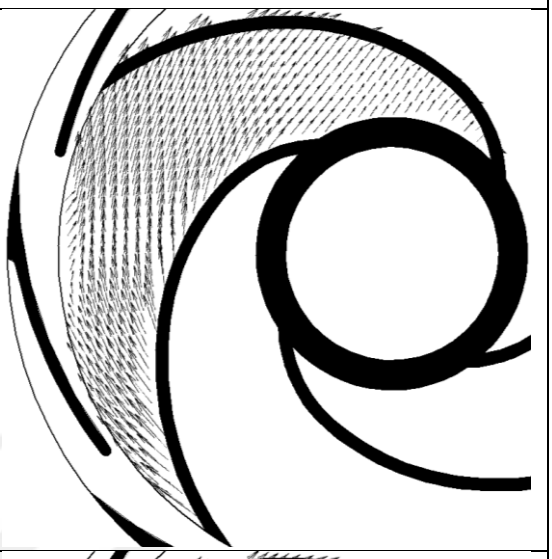
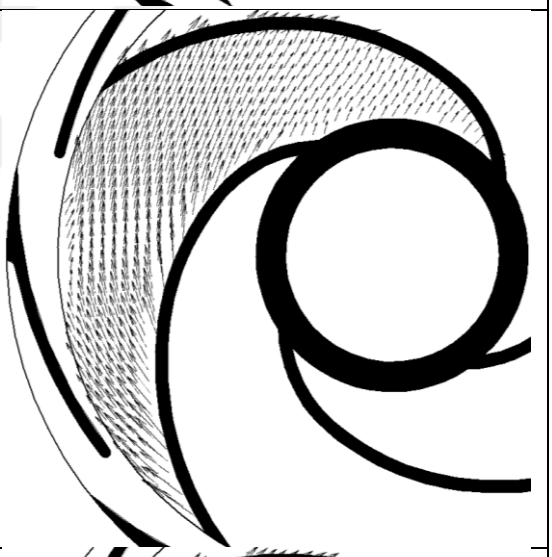
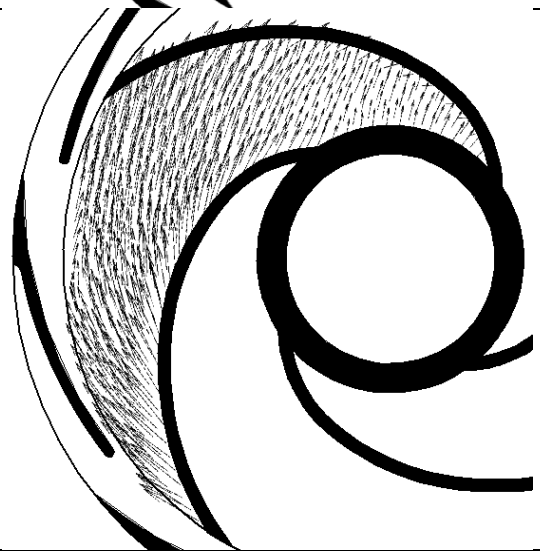
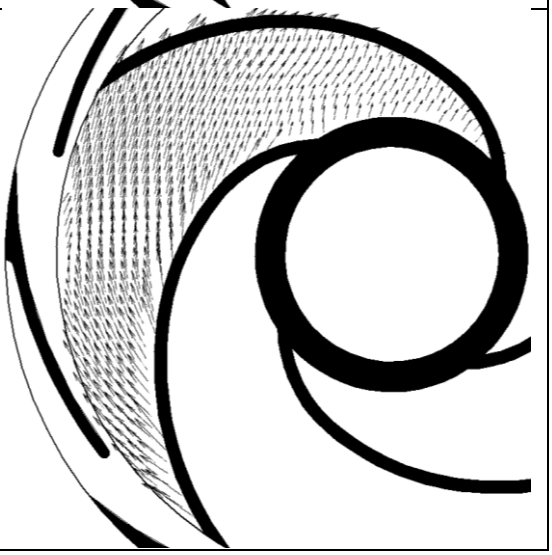
4.3.3. Çark 3 için PIV-HAD sonuçları

Ara kanatlı çark geometrisi olan Çark 2'de PIV ile bazı bölgelerde düzgün ölçümler alınamaması üzerine bu çark tasarımında ara kanat kaldırılarak Çark 3 geometrisi oluşturulmuştur. Toplamda 4 kanattan oluşan bu çark şeffaf malzemeden üretilerek deneyler yapılmıştır. Deneyler tüm 2850 d/d motor devrinde olduğu gibi 12.5 m^3/h, 10.6 m^3/h ve 14.4 m^3/h debilerinde yapılmıştır. Çark 3, geometri olarak PIV ölçüm yöntemine en uygun modeldir. Kanatlar arası mesafe fazla, lazer perdesi önünde ise bir engelleyici yoktur.

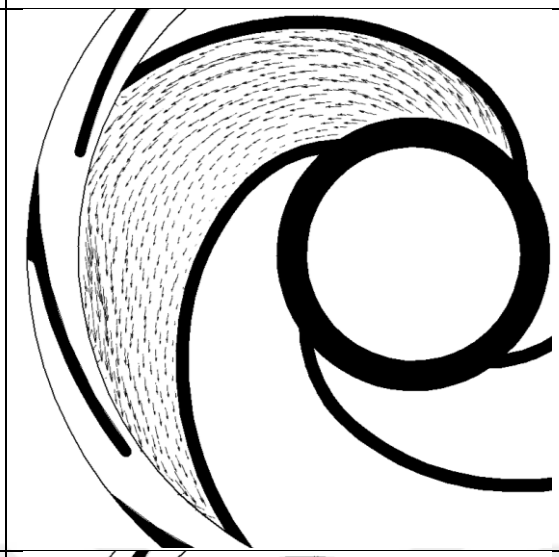
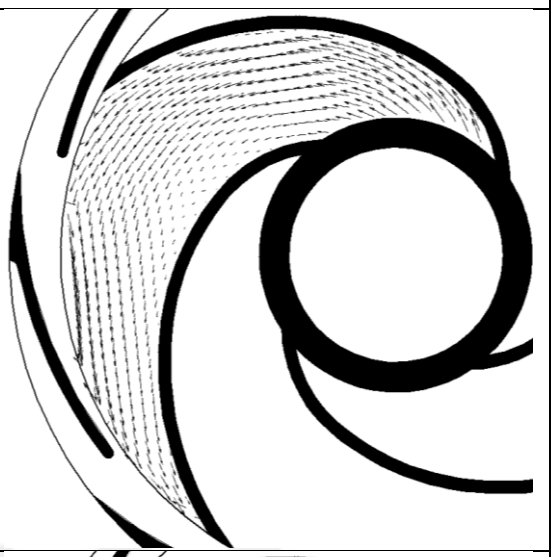
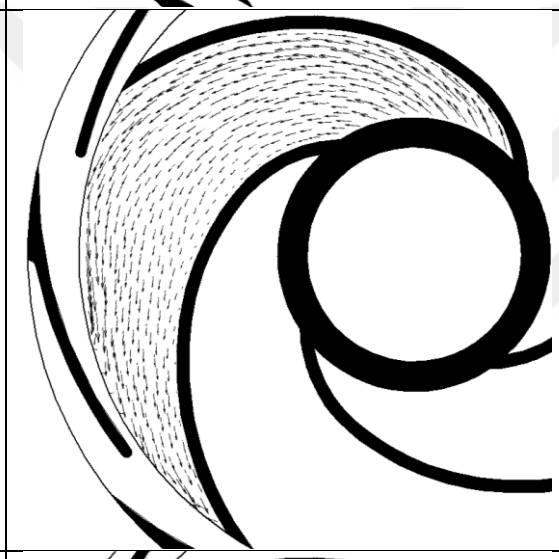
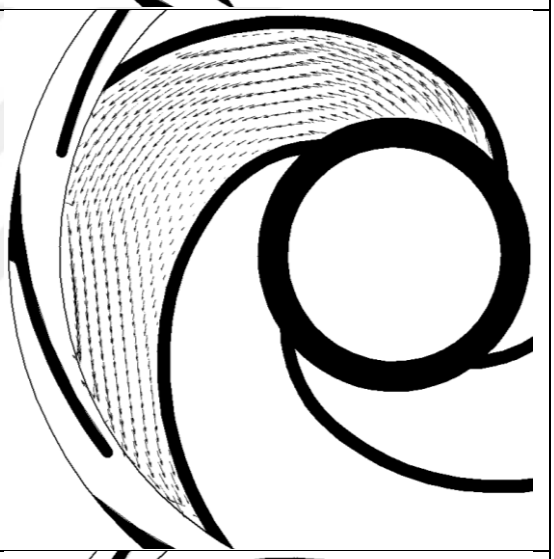
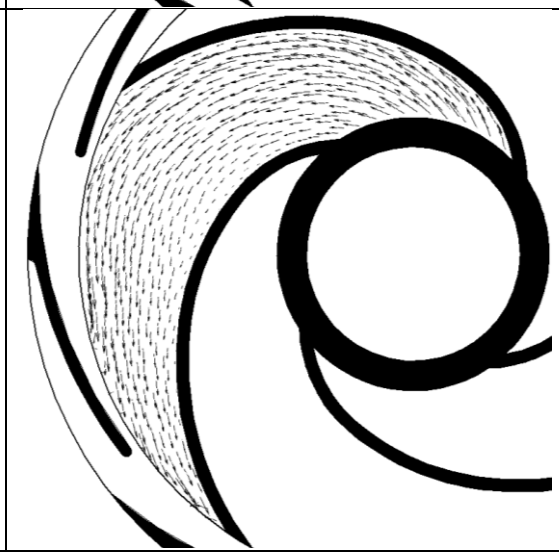
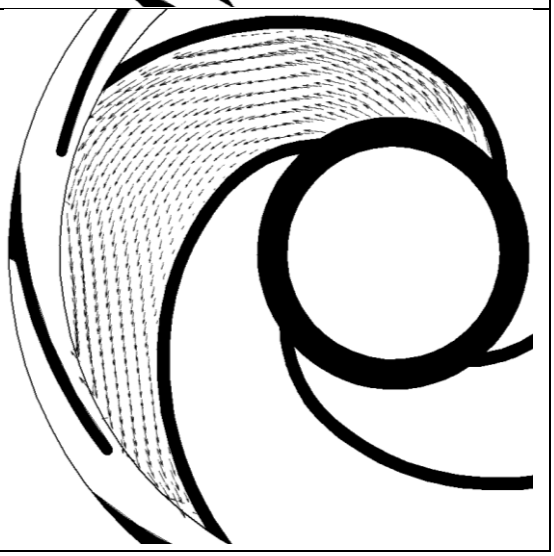
Şekil 4.22'de 1900 d/d'da çark 3 için mutlak hız vektörleri HAD ve PIV ile verilmiştir. Deneylerde ve HAD analizinde elde edilen görüntüler resim olarak alındıktan sonra çarkın kanat modeli ve difüzör geometrisi SolidWorks programı üzerinde geometri aynı olacak şekilde eklenmiştir. Şekilde tüm PIV hız vektörlerinde çark girişinden çıkışına düzenli bir dağılım görülmektedir. Diğer geometrilerde görülen difüzör etkisi burada da görülmekle birlikte etki ettiği alan ve oluşturduğu ters akış açısından bu etkinin daha düşük olduğu söylenebilir. Bunun nedeni akışkan-yapı etkileşimi benzer şekilde devam etse de kanatlar arası mesafe arttığı için geometrilerin akış üzerindeki etkisi daha az olmuş ve düzgün bir dağılım tüm debilerde elde edilebilmiştir. HAD sonuçları incelendiğinde özellikle 1.0 debi oranında ise çark çıkışında akışın geri dönüşünün oldukça az olduğu görülmüştür. Bu debi oranındaki PIV görüntüsünde ise HAD'a göre bu geri dönümlü akışın daha baskın olduğu görülmektedir.

Şekil 4.23'te ise 1900 d/d debide 4 kanatlı çark 3 için bağıl hız değerleri vektörel olarak verilmiştir. Akışın çark girişinden ilerleyerek çark çıkışına doğru yöneldiği hem HAD hem de PIV sonuçlarından görülmektedir. 0.85 debi oranında HAD değerlerinde çark çıkışında önemli bir ters akış meydana gelmektedir. PIV analizlerinde de kullanılan yanında çapraz korelasyon metodu ile yanlış hesaplanan vektörler azaltılmış bu yöntemin kullanımı literatürde de tavsiye edilmiştir (Shi ve ark., 2015). Kanadın basma yüzeyinde görülen düşük hız değerleri tüm debi değerlerinde görülmektedir. Pompa tasarımında amaçlardan biri çark içerisinde bölgesel düşük hız bölgesinin büyüklüğünü azaltmak veya tamamen yok etmektir. Çünkü bu bölge akış pasajının tam olarak kullanılamadığı ve kanat eğriliğinin veya kanat sayısının uygun olmadığı şeklinde de yorumlanabilir. Bu düşük hız bölgesi artan debi miktarı ile küçük bir miktar azalmıştır. Bu çalışmada görüldüğü ve Liu ve ark. (2010) tarafından da belirttiği gibi, bir pasif akış kontrol yöntemi olan kanat sayısındaki değişiklik, akış yapısı açısından oldukça önemlidir ve özellikle

çarkın emiş ve çıkış bölgelerinde akış karakteristiğini önemli ölçüde etkilemiştir. HAD sonuçları deneysel olarak elde edilen PIV sonuçlarını vektörel olarak doğrulayabilmiştir.

Debi Q/Q_{1d}	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.2		

Şekil 4.22. 1900 d/d motor devrinde Çark 3 için mutlak hız vektörleri.

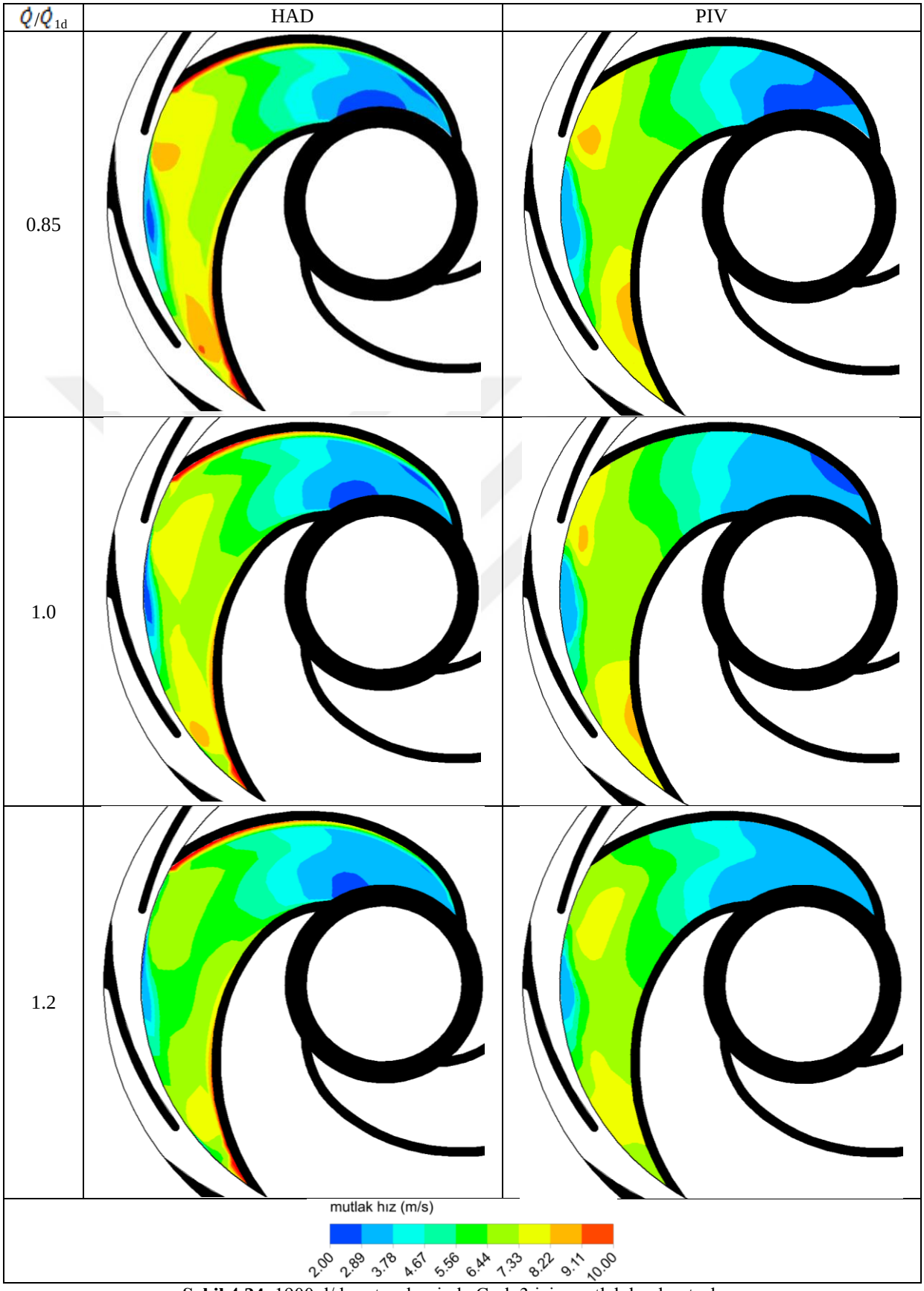
Debi Q/Q_{1d}	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.2		

Şekil 4.23. 1900 d/d motor devrinde Çark 3 için bağıl hız vektörleri.

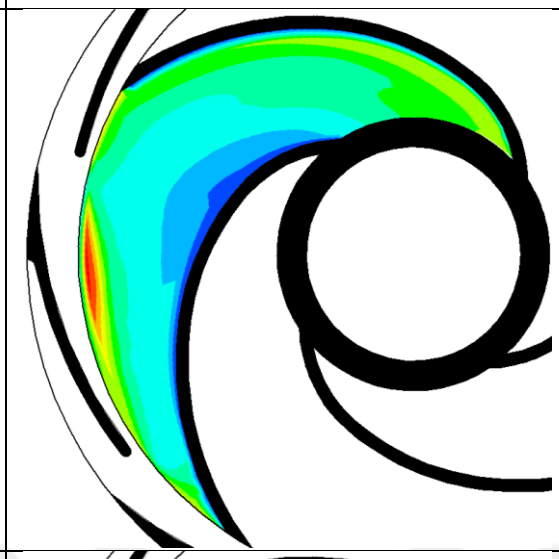
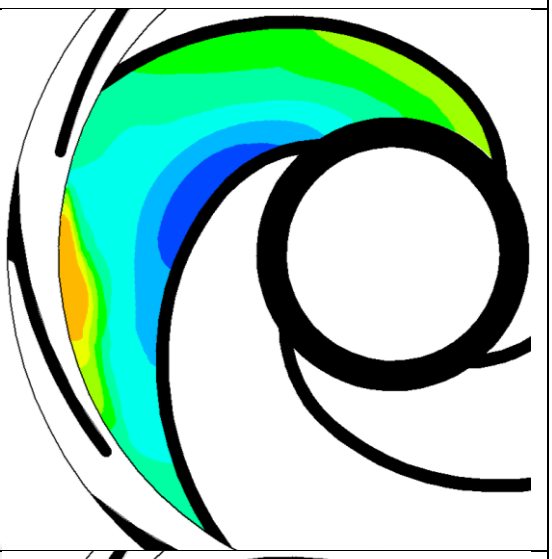
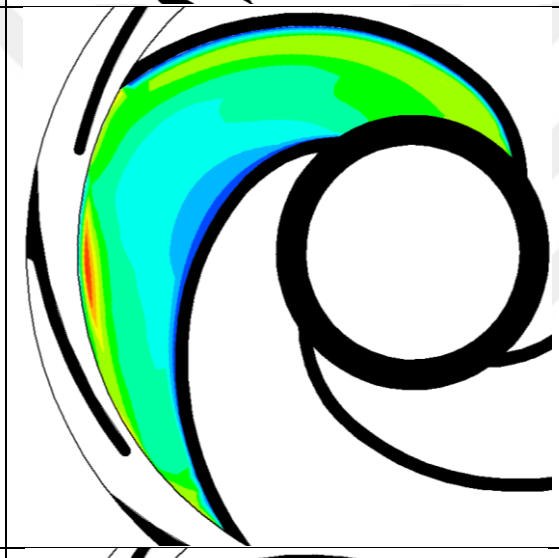
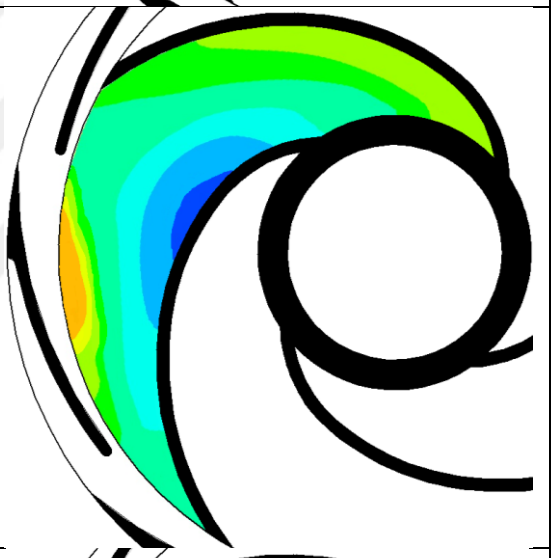
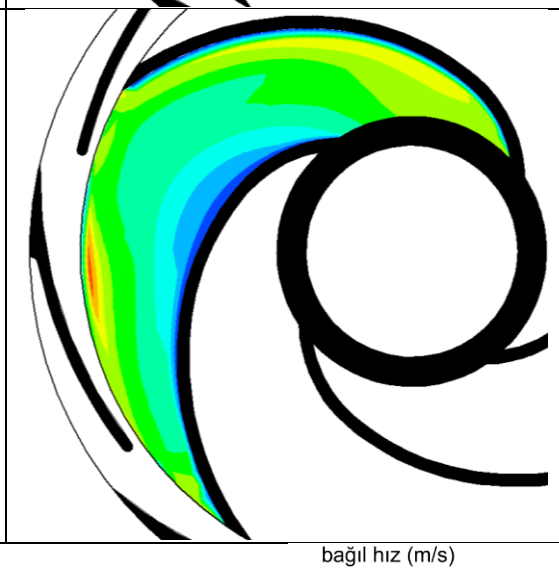
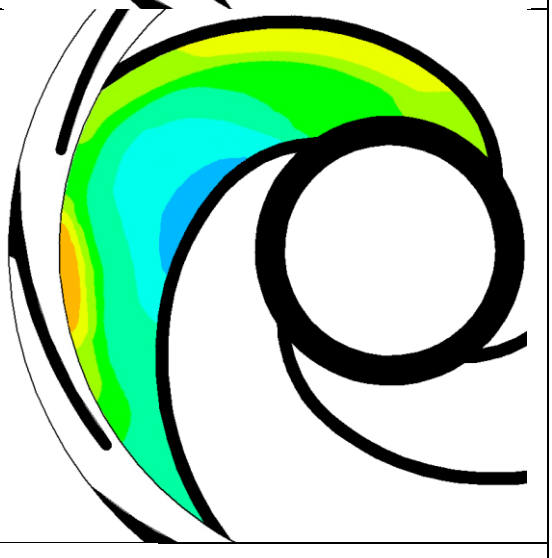
1900 d/d'da çark 3 için elde edilen mutlak hız değerleri kontur haritası olarak Şekil 4.24'de gösterilmiştir. Oldukça yakın olduğu gözlenen HAD-PIV ile elde edilen vektörel değerler konturdaki büyüklük değerleri ile ifade edilmiştir. Özellikle 0.85 debi değerinde çark girişinde ve çıkış bölgesinde oldukça benzer görüntüler elde edilmiştir. Bu bölgede çark girişinde 2-3.78 m/s değerleri arasında hız değerleri elde edilmiştir. Çarkın hem emme hem basma yüzeyinde benzer görüntüler bu debi değerinde de görülmektedir. 1.0 debi oranında ise özellikle çarkın çıkış kısmında emme yüzeyine yakın bölgede sarı renkle gösterilen ve 7.33-8.22 m/s arasında hızları değişen bölgenin yeri arasında fark göze çarpmaktadır. 1.2 debi değerinde ise yaklaşık %15 civarında hız değeri farklılıkları ile daha fazla görülmektedir. Difüzörün etkisi ile çark çıkışı emme bölgesinde PIV ile elde edilen sarı renkle gösterilen bölge HAD ile de temsil edilse de büyüklüğünün daha küçük olduğu görülmüştür. Buradaki değerlerde önemli bir fark da hız konturlarının gelişme şekli ile ilgilidir. Her bir debi değerinde HAD ve PIV değerleri incelendiğinde HAD değerlerinde elde edilen keskin hatlı ve köşeli kontur geçişleri, PIV de daha yumuşak geçişli ve yuvarlak hatlıdır. Bunun fiziksel nedeni PIV'de kullanılan filtre ve veri işleme metotları yanında, HAD ile oldukça fazla ağ sayısında çözüm elde edilebilmesidir. Benra ve Dohmen (2008)'in de belirttiği gibi PIV ile elde edilen verilerde PIV'nin kısıtlarından dolayı, sayısal çalışmaların sonuçlarının daha detaylı olarak sunulabildiği burada elde edilen verilerin niteliğine benzer şekilde belirtilmiştir. Elde edilen görüntüler 6 kanattaki akış yapısına göre farklı olmuştur. Bunun nedeni kanat sayısı değişikliğinin ile yapılan pasif akış kontrolü yönteminin çark içinde emiş bölgesinde ve çıkış bölgesinde akış karakteristiğini etkilemesidir (Houlin ve ark., 2010).

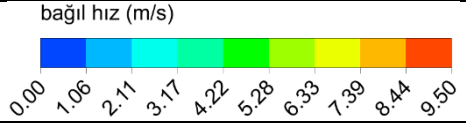
Şekil 4.25'de çark 3 için bağıl hız konturları verilmiştir. 0.85 debi oranında çarkın orta kısmında basma yüzeyinde hem PIV hem de HAD ile büyük bir alanda mavi ile gösterilen ve 0-1.06 değerleri arasında ölçülen düşük hız bölgesi görülmektedir. Bu bölge vektörel olarak verilen sonuçlarda da benzer şekilde küçük vektör uzunlukları ile temsil edilmiştir. Düşük hız bölgesinin PIV verilerinde daha da az olduğu tüm debilerde görülmektedir. Çark çıkışındaki dönümlü bölgenin etkisini yine görmek mümkündür. Bu dönüm ile oluşan ve kırmızı ile gösterilen 8.44 m/s üzerindeki değerlerin artan debi değeri ile bölgesel olarak azaldığı da görülmektedir. Genel olarak çark tasarımında beklenen; bağıl hız değerlerinin tüm kanadın basma yüzeyinden emme yüzeyine farklığın az olması beklenirken, bu şartı çark 3'ün sağlamadığı görülmektedir. Artan debi ile bu mavi bölge azalsa da, üst kısımdaki kanadın emme yüzeyinde sarı renk ile gösterilen 6.33-7.39 m/s

arasında hız değerleri oluşmuştur. Çark 3 ile elde edilen tüm değerlerde difüzör etkisinin en az olduğu geometri olduğu söylenebilir.

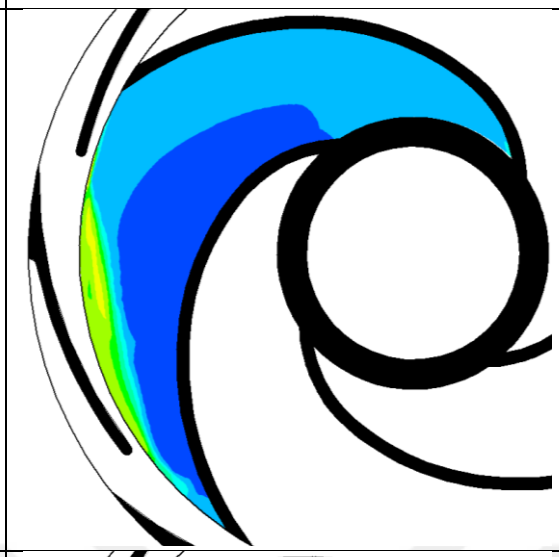
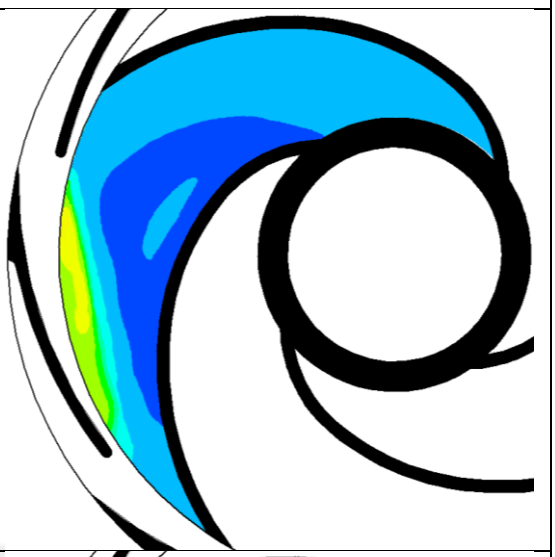
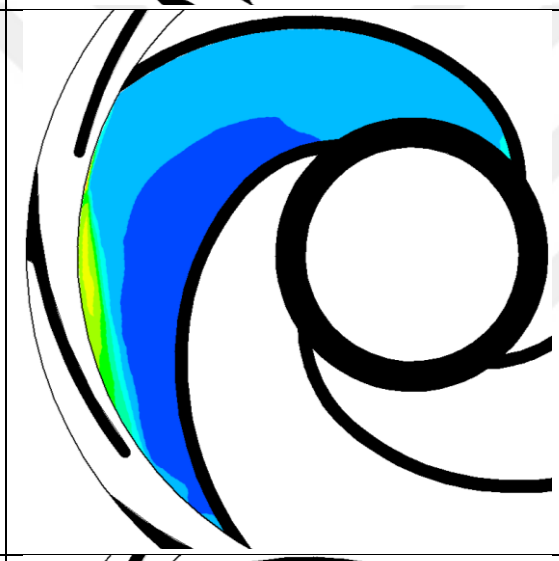
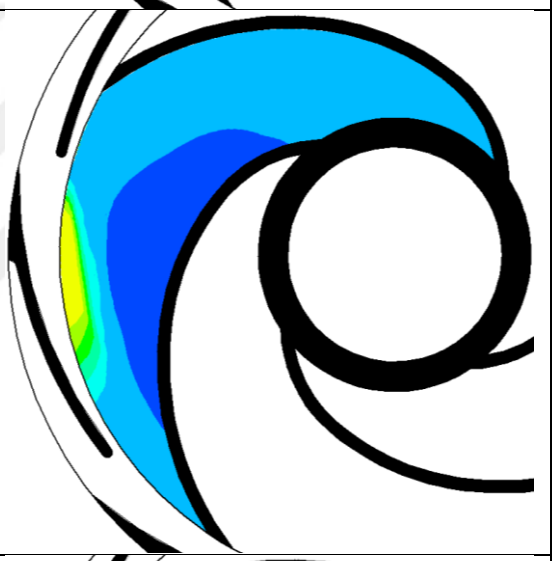
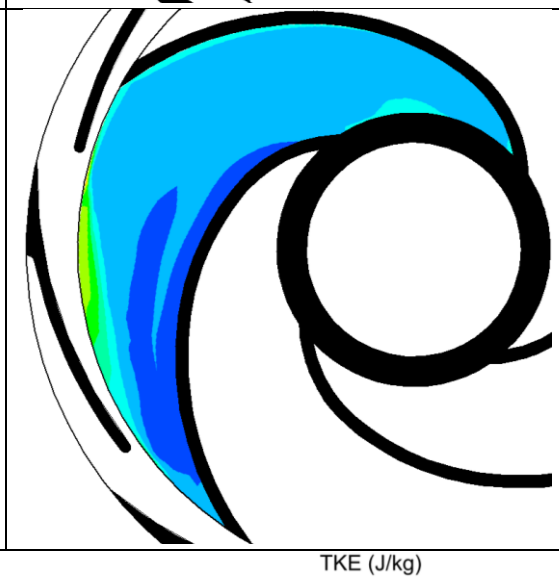
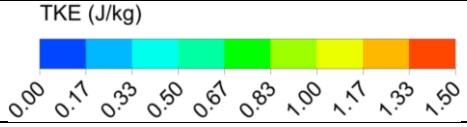


Şekil 4.24. 1900 d/d motor devrinde Çark 3 için mutlak hız konturları.

Debi Q/Q_{1d}	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.2		



Şekil 4.25. 1900 d/d motor devrinde Çark 3 için bağıl hız vektörleri.

Debi Q/Q_{1d}	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.2		
		

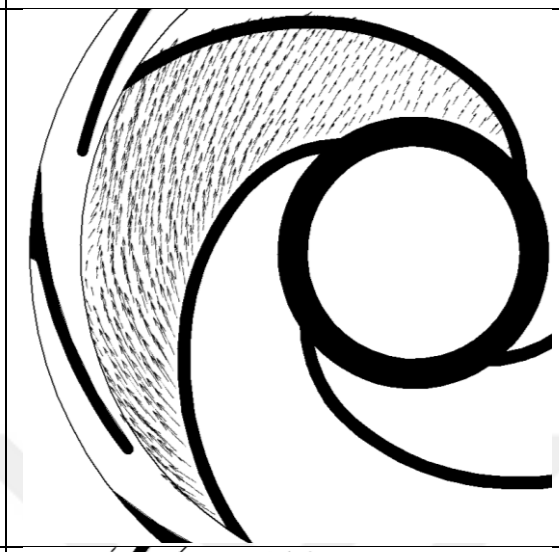
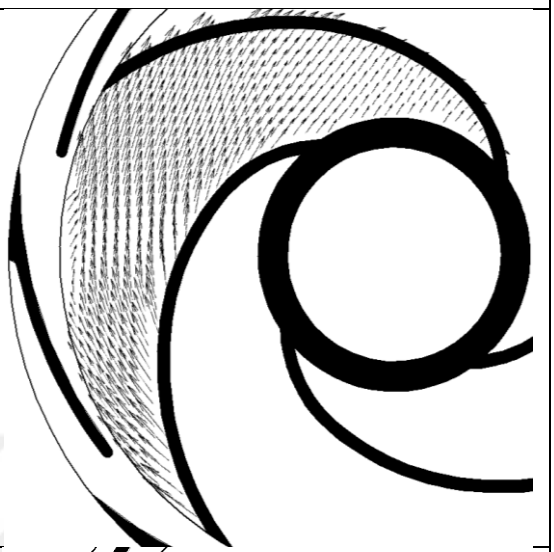
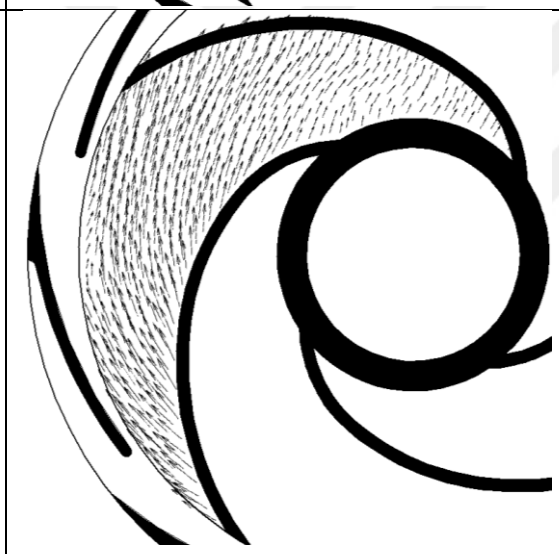
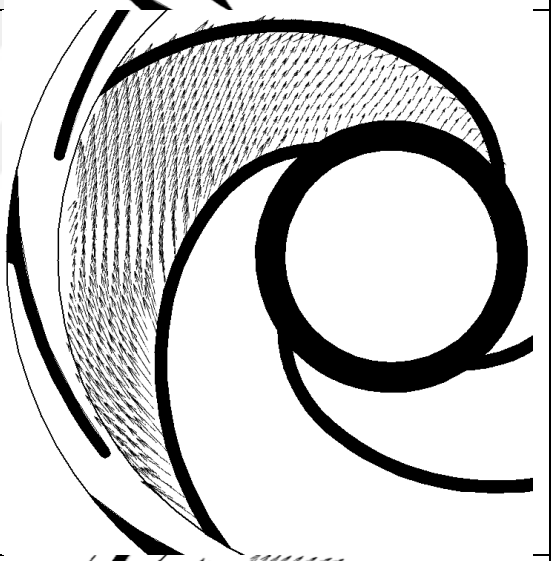
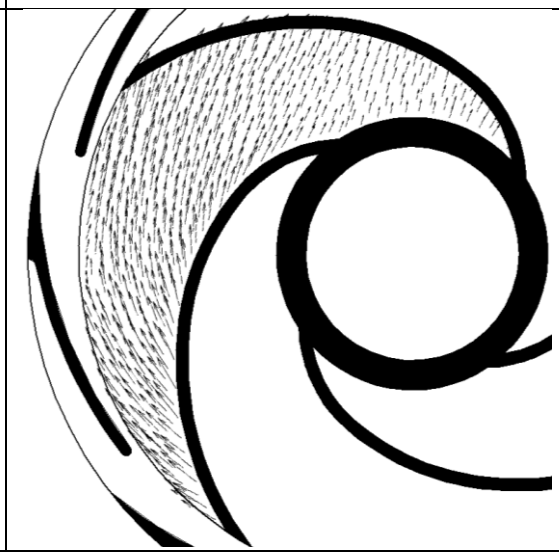
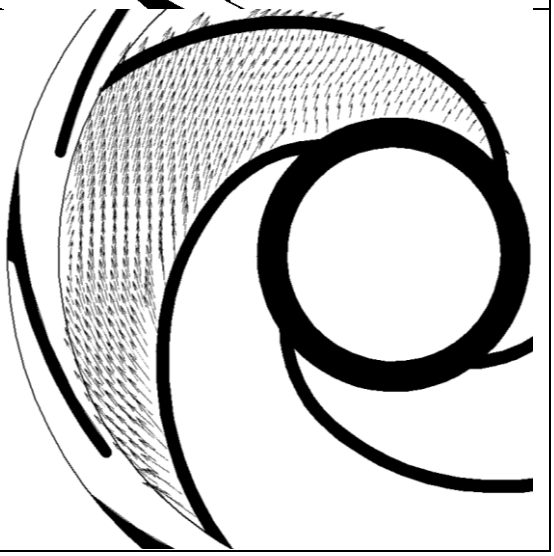
Şekil 4.26. 1900 d/d motor devrinde Çark 3 için TKE konturları.

Şekil 4.26'da çark 3 için 1900 d/d'da elde edilen TKE değerleri verilmiştir. Düşük hızların olduğu bölgelerde türbülans değerleri de oldukça düşük olarak ölçülmüştür. Tüm debilerde çark çıkış bölgesinde 0.67 J/kg değerinin üzerinde türbülans değerleri görülmektedir. En yüksek türbülans değerleri de 1.5 J/kg büyüklüğünde oluşmuştur. Türbülans değerlerinde değişimin genelde çark çıkışında olduğu için HAD-PIV uyumu bu akış özelliği için oldukça yüksektir. Ayrıca dönüm etkisinin daha az olduğu için türbülans değerleri diğer çarklara göre daha düşük çıkmıştır.

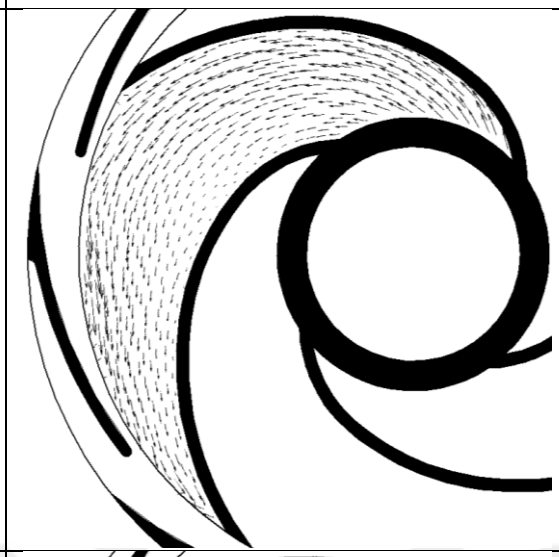
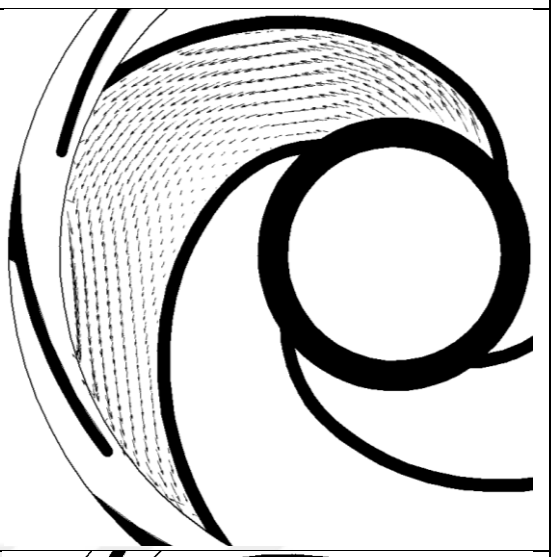
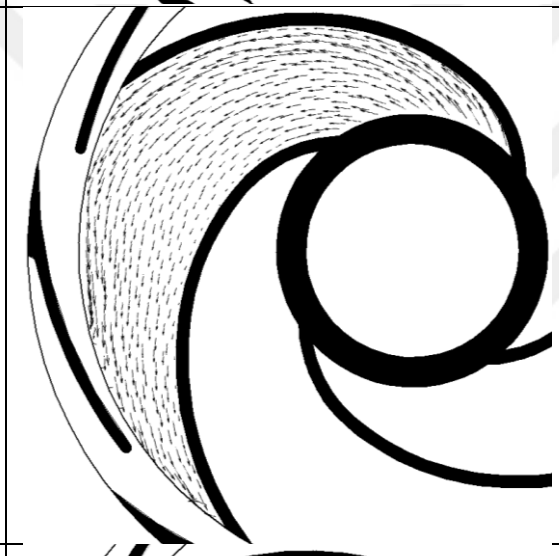
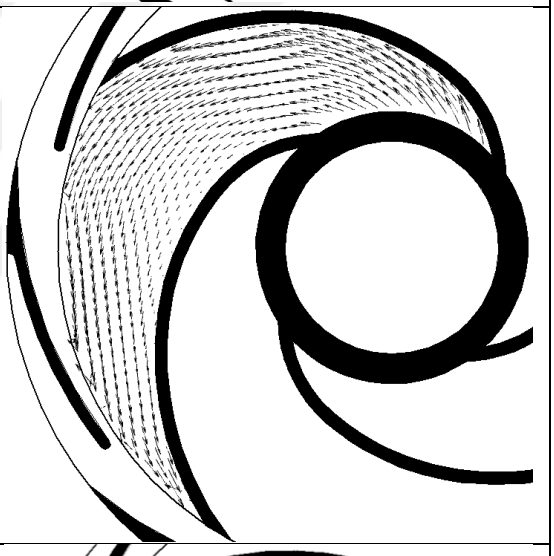
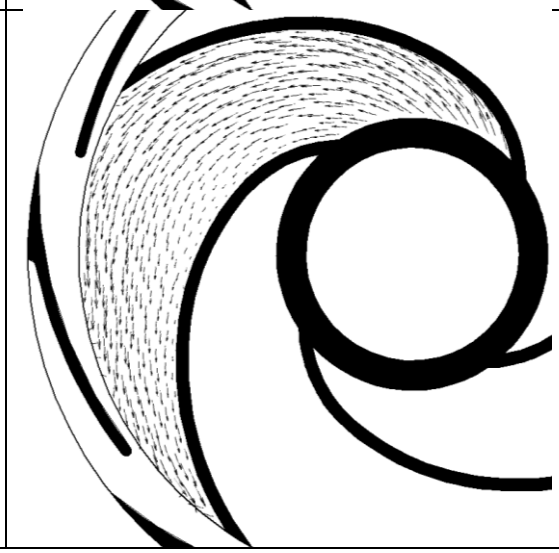
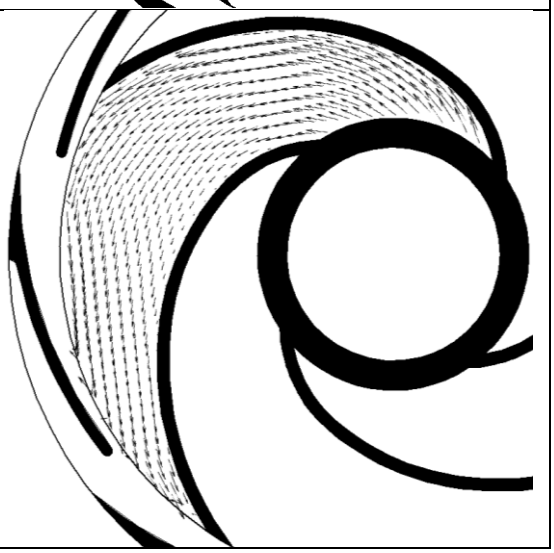
Şekil 4.27'de çark 3 için tasarım devri 2850 d/d'da farklı debilerde mutlak hız vektörleri deneysel olarak PIV ile sayısal olarak HAD ile elde edilen görüntüler verilmiştir. Bu kanat yapısında akışkan-yapı etkileşimi en az olduğu için çark içerisinde genellikle hızlarda düzgün bir dağılım elde edilmiştir. HAD ve PIV ile elde edilen vektörler pompa dönüş yönü olan saat yönündedir ve çark girişinden çıkışına doğru çevresel hız değerleri arttığı için hız vektörlerinin de büyüklüğü artmaktadır. Bu geometride kanat çıkışında kanat arası açıklığından dolayı iki farklı difüzör ile karşılaşıldığı için tüm debilerde difüzör kanatlarının arasında olan bölgeden bir miktar ters akış görülmektedir. Bu akış büyüklüğü diğer çark geometrilerine göre daha azdır. PIV sonuçlarında ızgara ağ yapısının her birinde dağılım düzgün bir şekilde elde edilirken, HAD ile elde edilen vektörlerde ağ yapısına bağlı olarak dağınık bir yapı elde edilmiştir. Çevresel hız değeri aynı devirde sabit kalırken bağıl hız değerlerinin artan debi değeri artması ile hız vektörlerinin yatayla yaptıkları açı değeri de artmaktadır.

2850 d/d'da çark 3 için elde edilen bağıl hız vektörleri Şekil 4.28'de görülmektedir. Diğer çark geometrilerine de benzer şekilde çark çıkışında görülen ters akışın etkisi HAD sonuçlarında daha detaylı, PIV sonuçlarında ise daha sınırlı bölgede ve vektör sayısı ile tespit edilmiştir. Ancak bu akışın bölgesinin hem deneysel hem de sayısal çalışmalarda tespit edilmiş olması ve ters akışın konumunun doğru tespiti açısından yapılan çalışmalar oldukça başarılıdır. 0.85 debi oranında PIV ile çarkın orta kısmında basma yüzeyinde elde edilen düşük hız bölgesinin artan debi miktarı ile azaldığı gözlenmiştir. Buna bağlı olarak da çarkın emme yüzeyinde orta kısımda da hız değerlerinde artış göze çarpmaktadır. Bağıl hız vektörleri çark girişinden çark çıkışına doğru incelendiğinde, çark girişindeki düzenli dağılımın çark akış pasajının orta kısımlarına gelindiğinde bozulduğu ve üst tarafa, yani kanadın emme yüzeyine yaklaştığı görülmektedir. Tasarım devrinde olan bu analizde elde edilen bu farklılığın fiziksel nedeni kanadın bu debilerde eğriliğinin istenilen şekilde olmadığından kaynaklandığı söylenebilir. Burada elde edilen hız vektörleri büyüklükleri çarkın çark-difüzör

pozisyonlarında değişiklik gösterebilir. Bununla birlikte bu konumda elde edilen PIV-HAD sonuçları da oldukça uyumludur.

Debi Q/Q_{2d}	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.15		

Şekil 4.27. 2850 d/d motor devrinde Çark 3 için mutlak hız vektörleri.

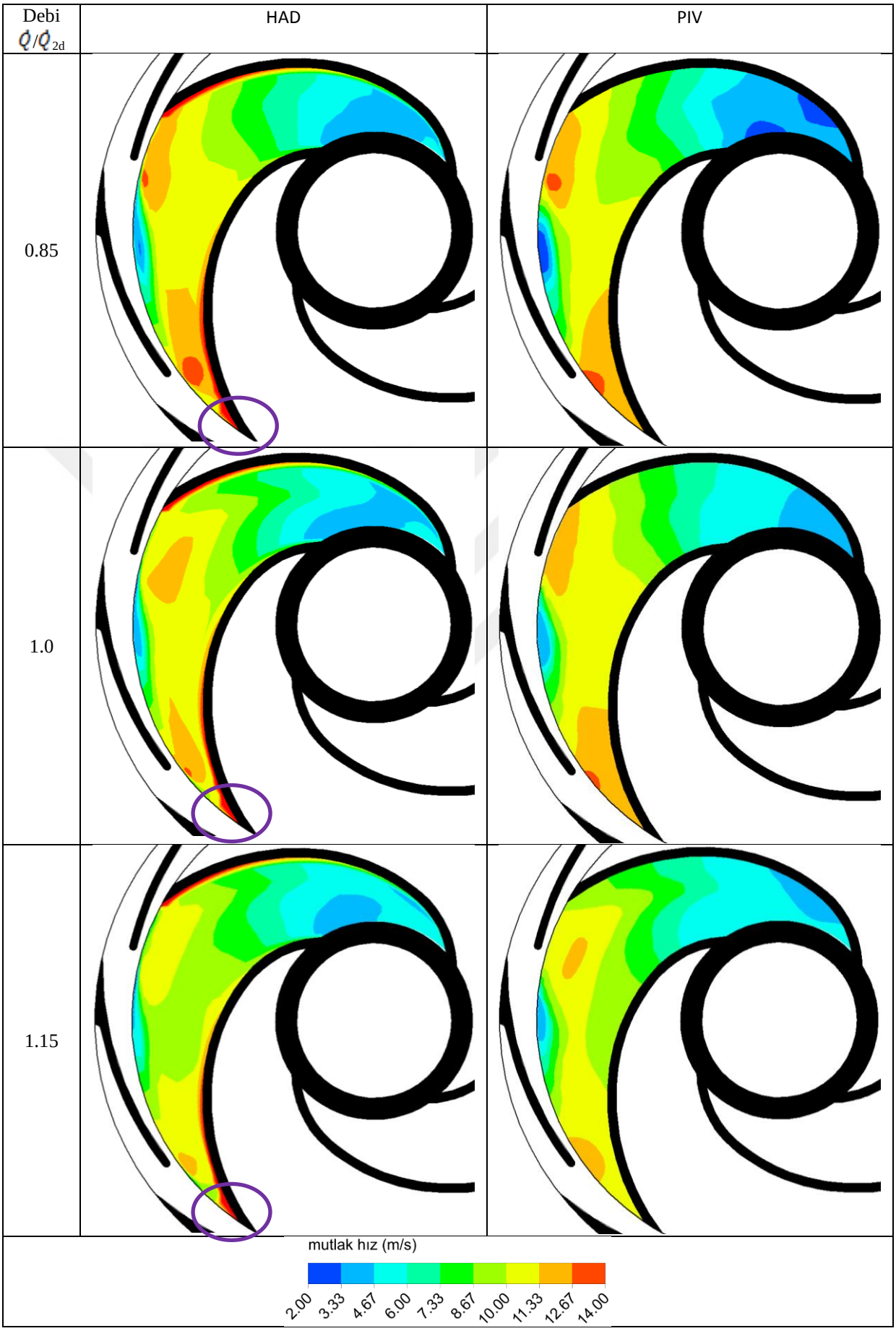
Debi Q/Q_{2d}	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.15		

Şekil 4.28. 2850 d/d motor devrinde Çark 3 için bağıl hız vektörleri.

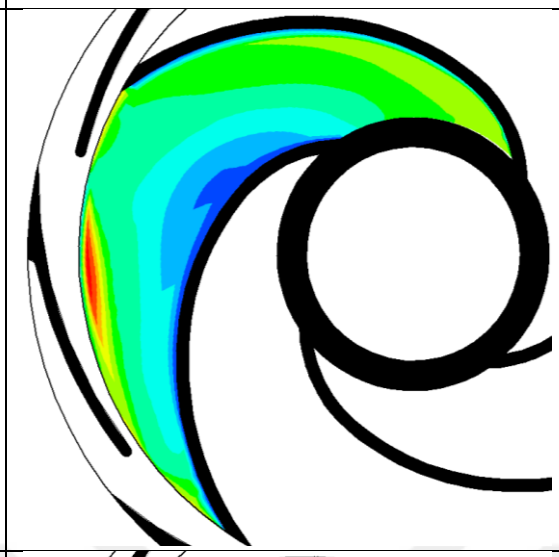
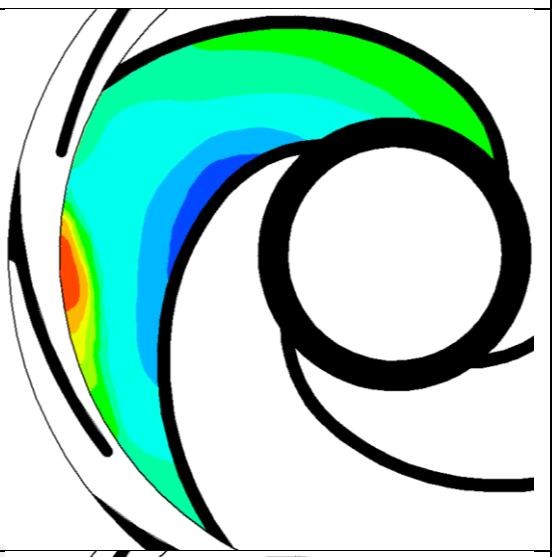
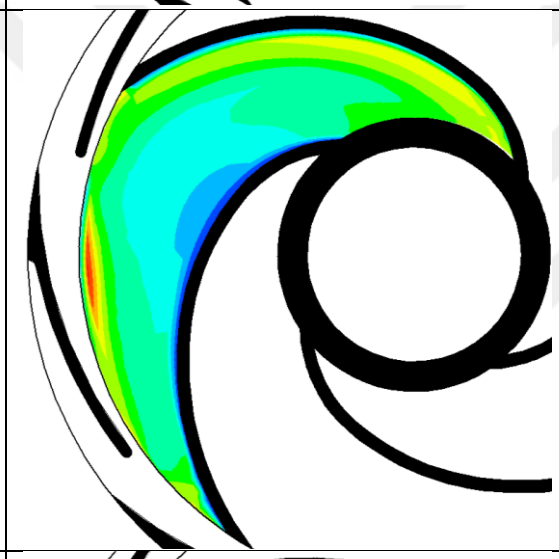
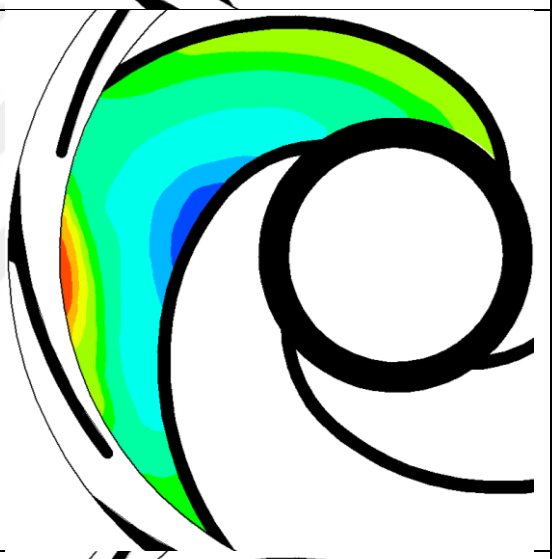
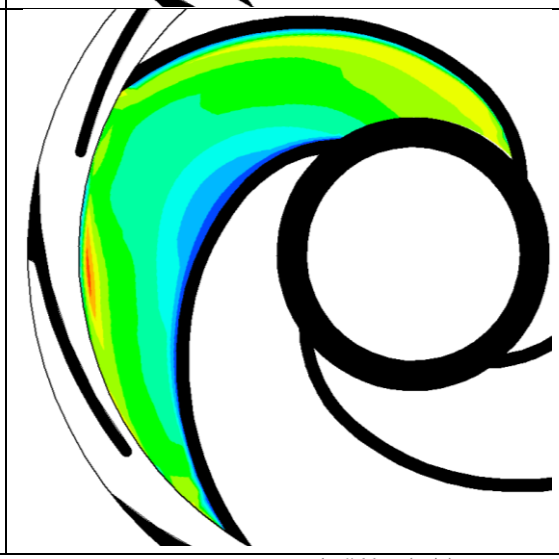
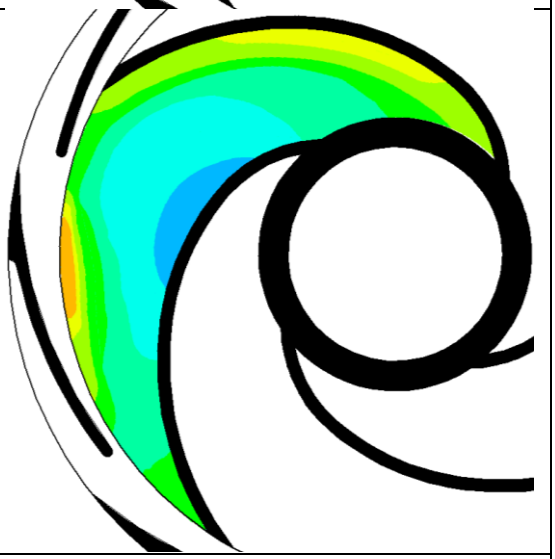
Şekil 4.29'da Çark 3 için 2850 d/d'da elde edilen mutlak hız konturları verilmiştir. Diğer analiz sonuçlarına da benzer şekilde kanadın basma yüzeyinde çıkış kısmında yuvarlak ile gösterilen HAD ile gözlemlenebilen yerel yüksek hız değerleri ve hız farklılıkları PIV ile elde edilememiştir. Bu deneylerde ve analizlerde çarkın çıkış yüzeyinde hem basma hem de emme yüzeylerinde iki farklı yerde 14m/s hız değerlerini bulan ve kırmızı ile gösterilen bölgeler 0.85 ve 1.0 debi oranlarında oluşmuştur. Genel olarak Çark 3 için 0.85 debisinde PIV-HAD değerleri arasında uyum elde edilirken 1.15 debi değerinde benzerlik daha azdır. Bu farklılıklar hız vektörü görsellerinde farkedilemezken, hız konturlarında açık şekilde görülmektedir. 1.0 debi oranında ise çarkın giriş kısmından orta kısımlara doğru gelişen akış yapısı arasında farklılıklar HAD ve PIV değerleri incelendiğinde görülmektedir. Geriye doğru eğimli bir akış konturu hesaplanan 1.0 debi oranındaki HAD değerinde üstteki difüzöre yakın bölgede elde edilen ve 11.33-12.67 m/s arasında olan değerler, PIV ile çarkın emme yüzeyine ve çıkışa yakın olacak şekilde elde edilmiştir.

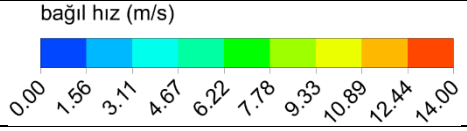
Şekil 4.30'da çark 3 için 2850d/d'da bağıl hız değerleri verilmiştir. Pompa çarkı içerisindeki hız değerleri açısından en önemli verileri veren bağıl hız dağılımı elde edilen bu haliyle en düşük basma yüksekliğinin beklendiği çark olmuştur. Bunun nedeni kanat sayısının az olması nedeniyle enerji transfer yüzeylerinin az olması yanında, çark kanadın basma yüzeyinde görülen ve mavi ile gösterilen düşük hız bölgelerinin büyüklüğüdür. 0-3.11 m/s arasında ölçülen bu bölgeler en fazla 0.85 debi oranında görülürken 1.15 debi oranında bir miktar azalmıştır. 1.15 debi oranında artan akış debi miktarı ile kanadın basma yüzeyindeki mavi kısım azalırken kanadın emme yüzeyinde ise 9.33-10.89 arasında hız değerleri elde edilmiş. Burada mutlak hız değerlerinde farklılık görülen bölgelerde bağıl hız değerlerinde de farklılıklar görülmüştür. Bunun yanında akış yapısı ve dağılımı açısından HAD-PIV uyumu göze çarpmaktadır.

Şekil 4.31'de çark 3 için elde edilen TKE değerleri 0.85-1.15 debi aralığında ve HAD-PIV sonuçları olarak karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Elde edilen TKE değerleri hem skala 0-3.0 j/kg arasında olmasından hem de çark çıkışında görülen kırmızı bölgelerin diğer çark yapılarına kıyasla daha az olmasından dolayı 2850 d/d'da en düşük çalkantı ve TKE değerlerinin oluştuğu çark olarak göze çarpmaktadır. Çark içerisinde türbülans değerleri çıkış bölgesi dışındaki yerlerde 1.0 J/kg değerinin de altında olmaktadır. Bu düşük değerler basma yüksekliğinde azalmaya neden olsa da verim değerlerinde olumlu katkı sağlayacaktır.

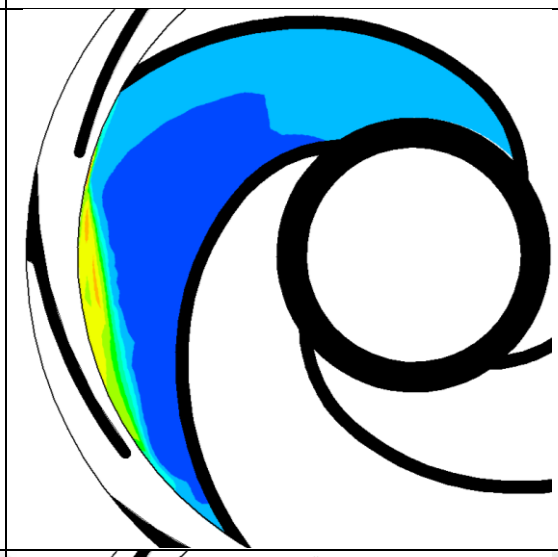
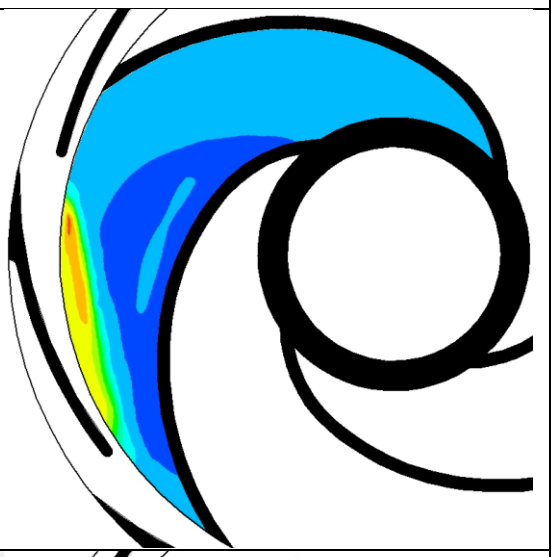
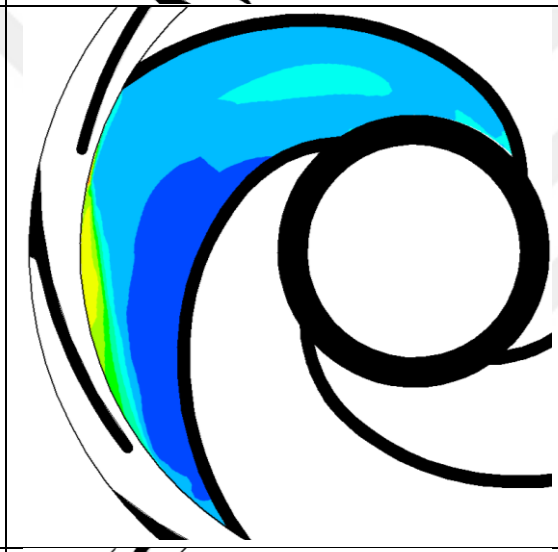
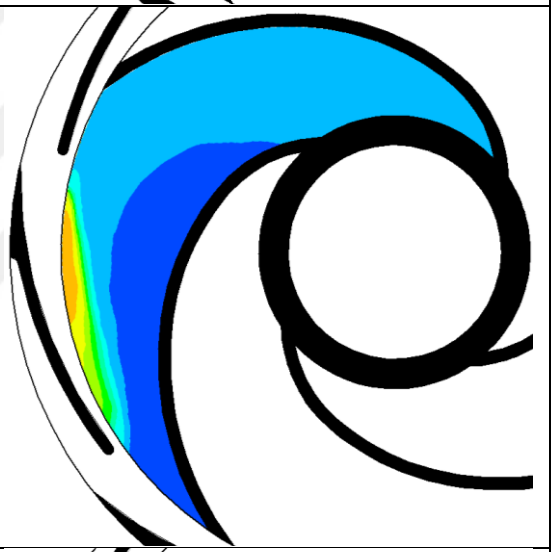
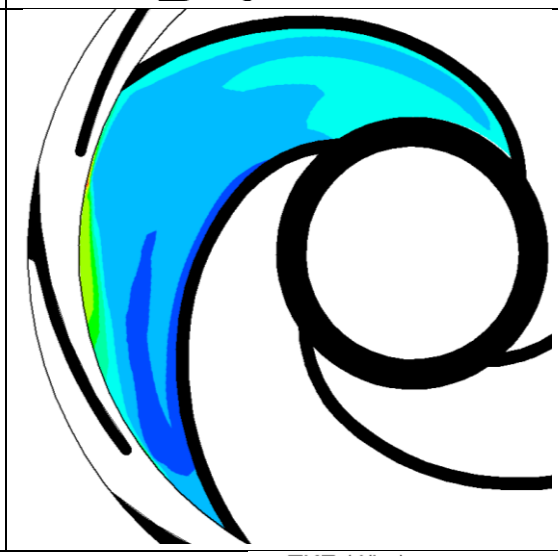
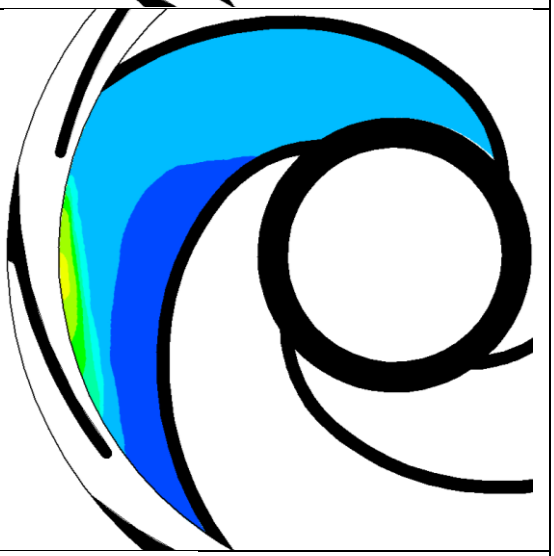


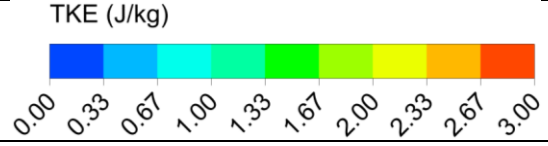
Şekil 4.29. 2850 d/d motor devrinde Çark 3 için mutlak hız konturları.

Debi Q/Q_{2d}	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.15		



Şekil 4.30. 2850 d/d motor devrinde Çark 3 için bağıl hız konturları.

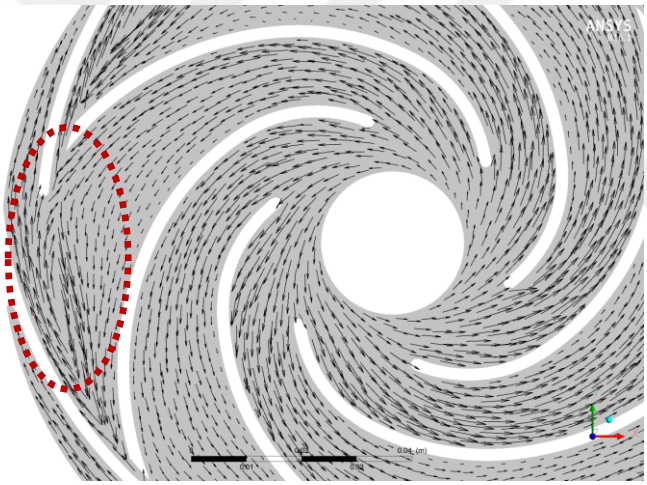
Debi Q/Q_{2d}	HAD	PIV
0.85		
1.0		
1.15		



Şekil 4.31. 2850 d/d motor devrinde Çark 3 için TKE konturları.

4.3.4 Farklı açılarda HAD-PIV karşılaştırmaları

Daha önceki bölümlerde çark 1, çark 2 ve çark 3 için 1900 d/d ve 2850 d/d değerlerinde 3 farklı debi değerinde sonuçlar verilmiştir. Sonuçlarda çark ve difüzör etkileşiminin etkin olduğu belirlenmiş ve çark çıkışındaki bu akışkan-yapı etkileşiminden dolayı oluşan akış yapısı tüm deney değerlerinde görülmüştür. Bu bölümde ise 2850 d/d motor devrinde tasarım debisi 12.5 m^3/h debide 6 kanatlı orijinal çark olan Çark 1 için, çark-difüzör pozisyonu farklı açılarda olduğunda, çark içerisindeki akış yapısına etkisi incelenmiştir. Bu çalışma ticari olarak da üretilen pompa çark 1 olması nedeniyle sadece bu çark için yapılmıştır. Şekil 4.32'de HAD ile elde edilen ve difüzör içerisindeki akışı da gösteren bağıl hız vektörlerinin dağılımı verilmiştir. Şekil incelendiğinde çark çıkışında oluşan dönümün nedenin difüzör bölgesinde oluşan akış yapısı ile direkt ilgili olduğu anlaşılmaktadır. Çark çıkışında orta bölgede oluşan bir girdap da görülmektedir.

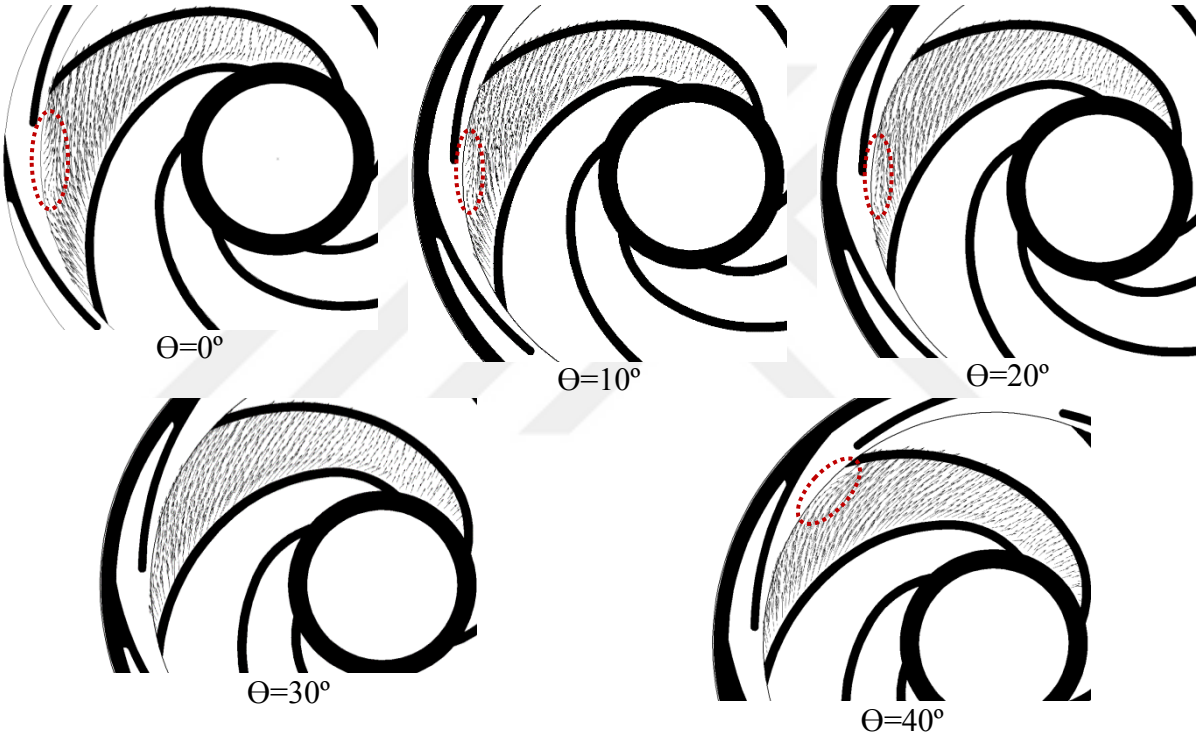


Şekil 4.32. 2850 d/d'da ve 12.5m^3/h debide çark 1 (orijinal çark) için HAD ile elde edilen bağıl hız vektörleri.

Bu nedenle 7 kanatlı olan difüzör sayısı, 6 kanatlı çarkın pozisyonu 0°'den başlayarak 40° açıya kadar, saat yönünde yaklaşık 10'ar derece açı ile artırılmıştır. 51.4 derece döndüğünde çark ile difüzör pozisyonu 0°'deki pozisyon ile aynı olacağı için toplam 5 farklı pozisyon incelenmiş ve en yüksek açı değeri 40° yeterli olmuştur. Bu açı çalışmada Θ olarak tanımlanmıştır. Çark çıkış genişliğinin tam ortasındaki düzlemde verilen görüntülerde çark-difüzör pozisyonu değiştiğinde özellikle çark çıkış bölgesindeki akış yapısının nasıl değişeceği ve bu durumlarda HAD-PIV uyumunun değişimi de incelenmiştir. Yalnızca bir kanat aralığından görüntü alınabildiği için değişen açılarda deneylerde lazer cihazının pozisyonu da gerektiğinde değiştirilmiştir. Liu ve ark.

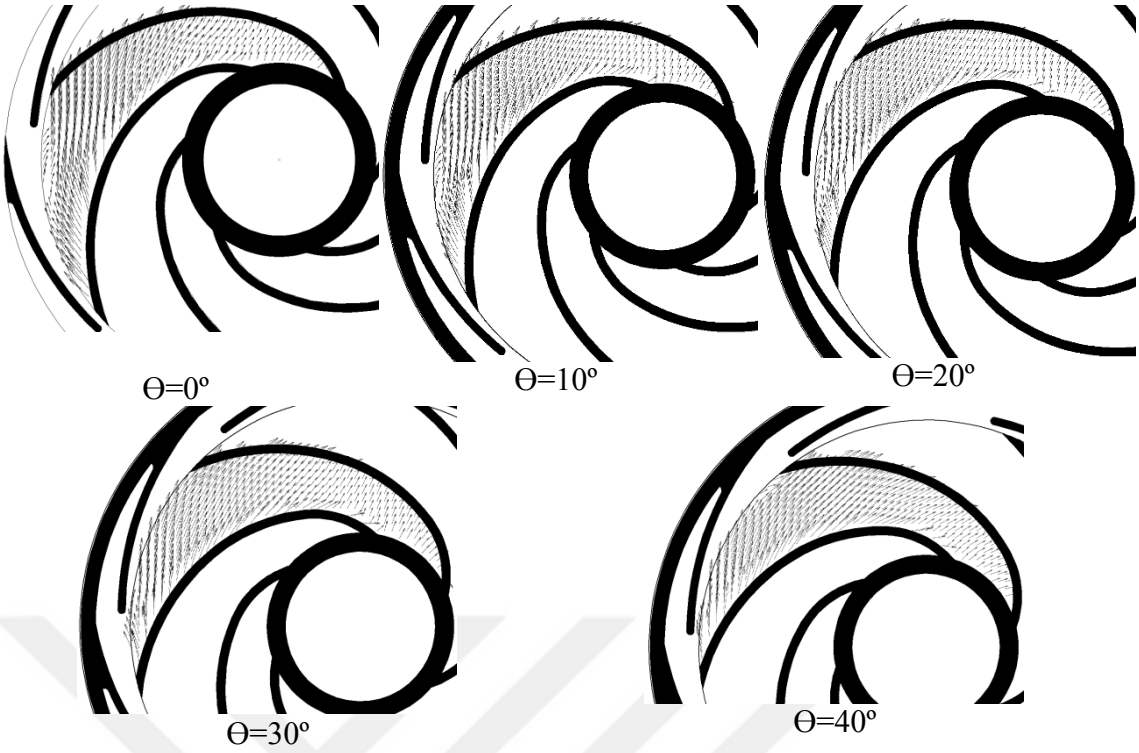
(2013) literatürde de farklı pozisyonlarda HAD-PIV karşılaştırılması sınırlı sayıda çalışmalardan birini yapmıştır.

Şekil 4.33'de 2850 d/d motor devrinde ve 12.5 m^3/h debide farklı açılarda HAD ile elde edilen mutlak hız vektörleri verilmiştir. Θ=0° olarak verilen sonuçlar önceki bölümde incelenen çark-difüzör pozisyonu ile aynıdır. Mutlak hız vektörlerinde çark girişinde önemli bir fark görülmemektedir. Çark çıkışında ise 10° ve 20°açılarda azalan difüzör etkisi 30° açıya geldiğinde mevcut pozisyonlarda elde edilen en düşük akışkan-yapı etkileşimi olan görüntü elde edilmiştir. Θ=40° açıya gelindiğinde ise çark çıkışında emme yüzeyine yakın bölgede difüzör bölgesinden kaynaklanan etki görülmektedir.



Şekil 4.33. 2850 d/d'da ve 12.5m^3/h debide farklı açılarda HAD ile elde edilen mutlak hız vektörleri.

Şekil 4.34'de ise farklı açılarda çark 1'de PIV ile elde edilen mutlak hız konturları görülmektedir. Seçilen türbülans modeli ile elde edilen HAD görüntülerinin PIV sonuçlarını büyük oranda yansıttığı ve uyumlu olduğu görülmektedir. PIV sonuçlarında akış yapısı daha az vektör sayısında temsil edilmektedir. PIV sonuçlarında çıkış bölgesindeki ters akışlar daha belirgin ve baskın şekilde görülmektedir. Tüm PIV değerlerinde çark çıkışı hariç düzgün bir dağılım elde edilebilmiştir. HAD sonuçlarına benzer şekilde 30° olan pozisyonda çıkış bölgesi kaynaklı etki en az olarak ölçülmüştür.

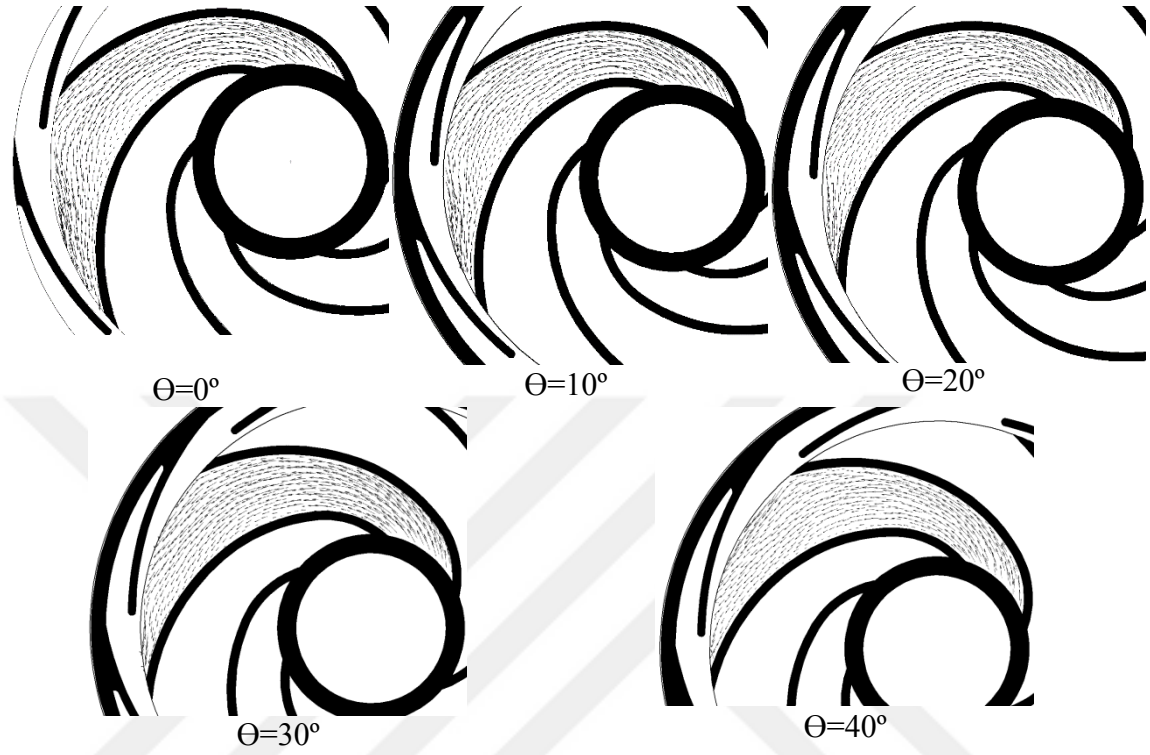


Şekil 4.34. 2850 d/d'da ve 12.5m^3/h debide farklı açılarda PIV ile elde edilen mutlak hız vektörleri.

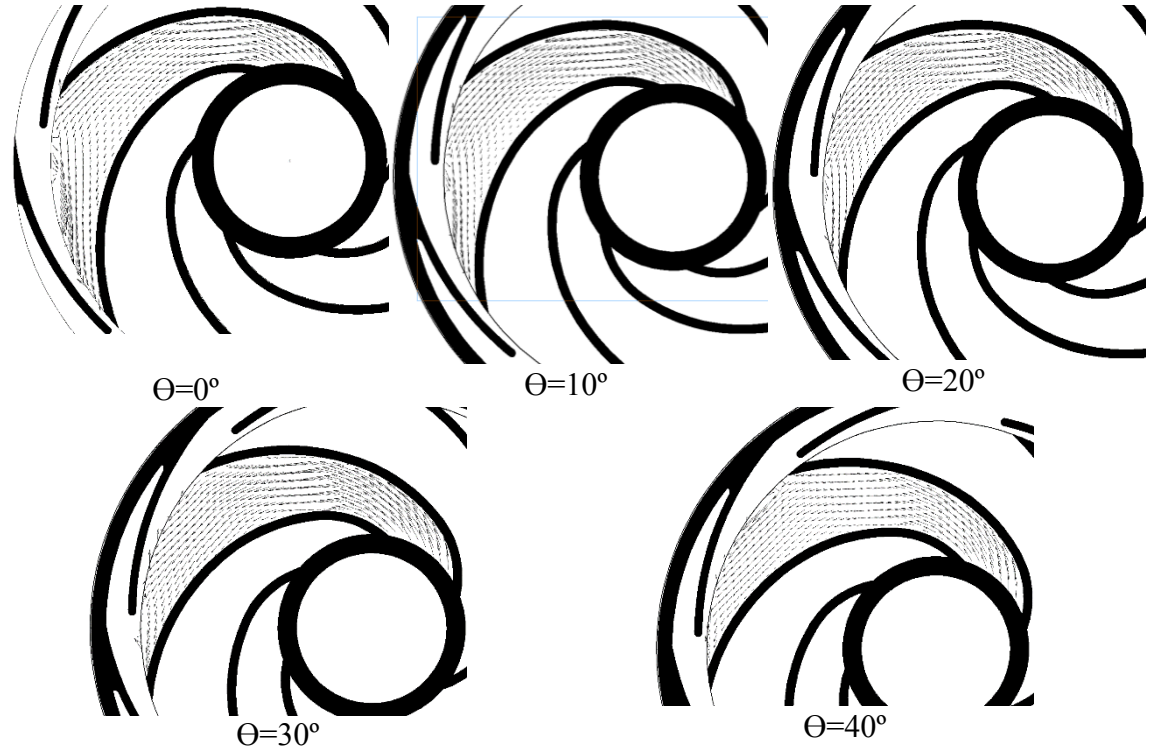
Şekil 4.35'de 2850 d/d'da ve 12.5m^3/h debide çark 1 için HAD ile farklı açılarda elde edilen bağıl hız vektörleri verilmiştir. Akışın çark girişinden girerek çark çıkışına doğru hareket ettiği görülmektedir. 0° açı değerinde, çark çıkışında oluşan ters akış kaynaklı yüksek büyüklükte hız vektörleri 10°'de bir miktar azalmış 20°'de ise sadece kanadın basma yüzeyinde çıkış kısmında bir miktar görülmüştür. 30° açıda akışın düzgün bir şekilde çarkı terk ettiği ve çıkıştaki dönüm etkisinin bu konumda mutlak hız vektörlerine benzer şekilde en az etkili olduğu görülmüştür. 30° pozisyondaki akış yapısı akış fiziği açısından bağıl hız değerlerinin dağılımın hem çark girişinden çark çıkışına hem de çarkın basma yüzeyinden emme yüzeyine en düzenli ve yüksek verim açısından en uygun dağılım olduğu söylenebilir. Sadece çarkın basma yüzeyinde orta kısımdaki hız vektörlerinin çark çıkışındaki etkiden bağımsız olarak düşük olduğu görülmektedir. Durağan halde faz ortalamalı değerler ile sonuçları sunulan çalışmada, gerçek çalışma şartlarında çark sürekli dönmekte ve dönüşün her bir anında çark-difüzör pozisyonları sürekli olarak değişmektedir. Burada özellikle görülen durum önceki bölümlerde çıkış bölgesindeki ters akışın nedeninin çark tasarımı değil çark-difüzör pozisyonundan kaynaklandığı görülmüştür. Bu şekilde pompa çarkında tespit edilen ters akışlar literatürde de mevcuttur (Pavesi, 2006; Zhu ve ark., 2010).

Şekil 4.36'da verilen PIV sonuçlarının HAD sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Özellikle 30° pozisyonda çark içerisindeki akış yapısı oldukça düzgündür.

PIV deneylerinde özellikle ters akışın az olduğu yerlerde ölçüm yapmak HAD uyumu açısından daha doğru ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Ancak PIV ile bu çalışmada da olduğu gibi ters akışın olduğu yerlerde de benzer sonuç alınabilmektedir.

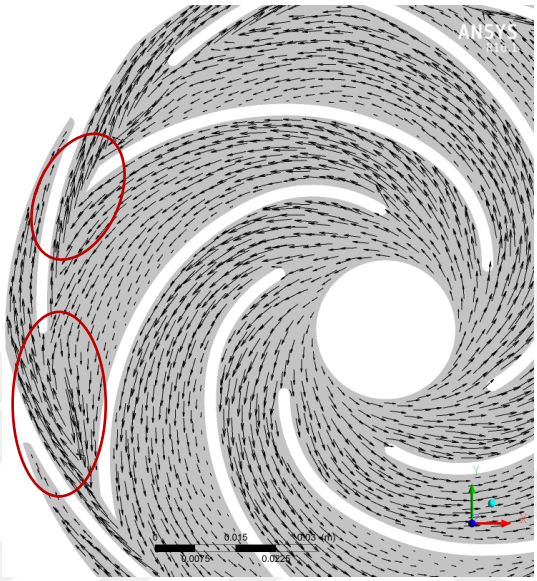


Şekil 4.35. 2850 d/d'da ve 12.5m^3/h debide farklı açılarda HAD ile elde edilen bağıl hız vektörleri.



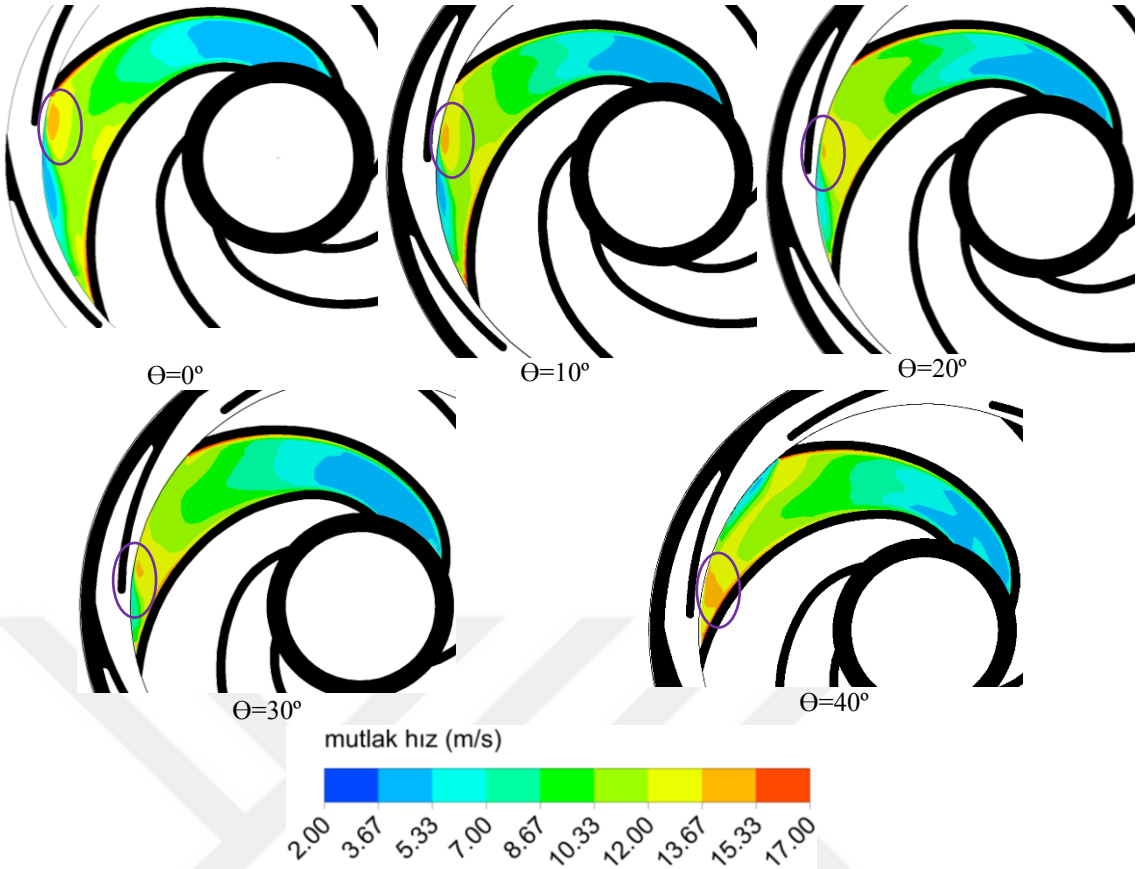
Şekil 4.36. 2850 d/d'da ve 12.5m^3/h debide farklı açılarda PIV ile elde edilen bağıl hız vektörleri.

Şekil 4.37'de ise 2850 d/d motor devrinde ve 20° derece açıda difüzör hacminden kesiti de içerecek şekilde örnek bir HAD görüntüsü olarak verilmiştir. Burada difüzör içerisindeki akış yapısının yönü ve ters akış bölgesi de görülebilmektedir. PIV ile görülemeyen bu kısımlardaki akış yapısının HAD ile elde edilebilmesi akış fiziğinin yorumlanabilmesi açısından önemlidir. Ayrıca burada üstteki çarkın emme yüzeyinde çıkış bölgesinde üstteki difüzörün olduğu bölgede akış da görülmektedir.

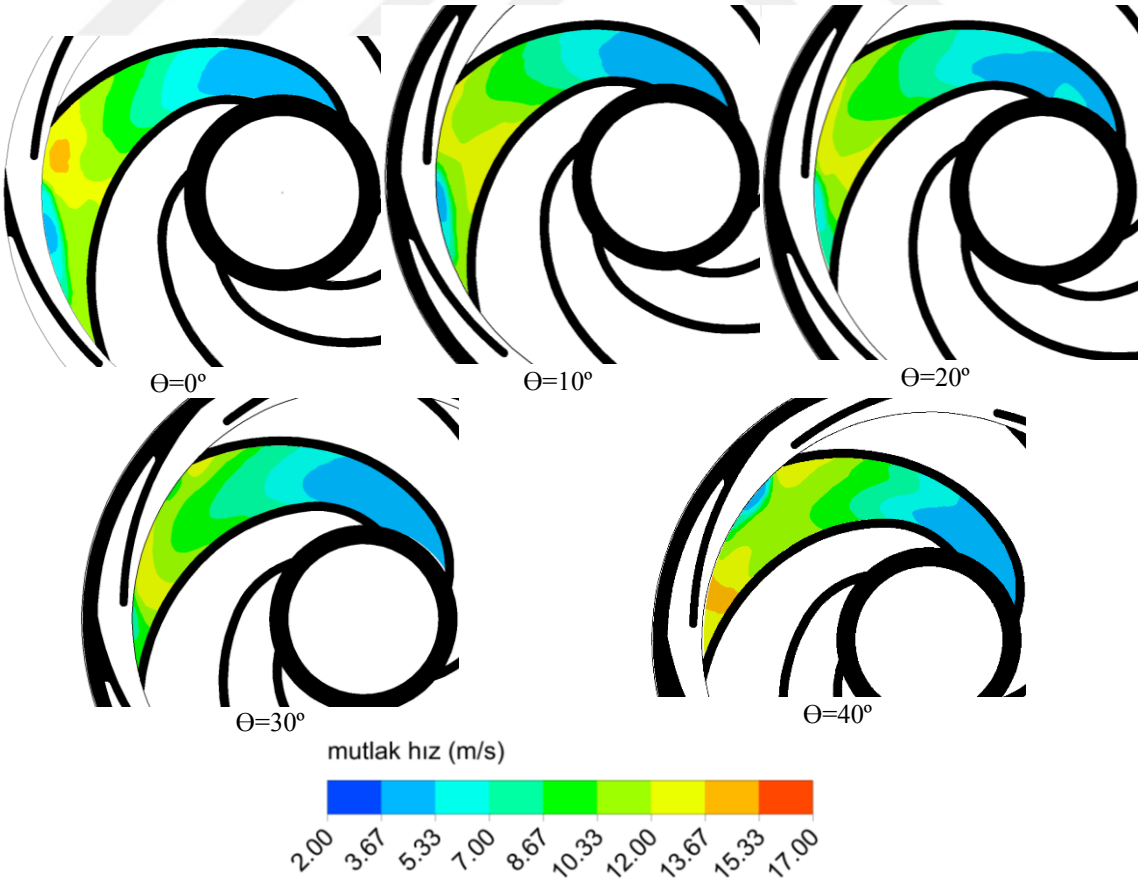


Şekil 4.37. 2850 d/d 12.5 m³/h debide Θ=20°'de bağıl hız vektörleri.

Şekil 4.38'de çark 1 için mutlak hız değerleri farklı açılarda kontur haritası olarak verilmiştir. Tüm açı değerlerinde çark girişinde düşük olan hız değeri çark çıkışına doğru artmaktadır. Burada görülen en önemli husus çark çıkışındaki akışkan yapı etkileşiminin sadece çark çıkışını değil çark girişindeki mavi renk ile gösterilen hız bölgesini de etkilemesidir. Ayrıca çarkın orta kısmında da akışın kontur profilinin gelişimi de buna bağlı olarak değişmesi önemli sonuçlardandır. Çark çıkışında oluşan ve 13.67-15.33 m/s arasında temsil edilen yüksek hız değerleri çark içerisinde açı değişse de hep difüzör kanadı civarında bir bölgede kalmaktadır. Bu bölgenin büyüklüğü kanat ucu difüzör kanadına yakınken artmakta, uzaklaşınca ise azalmaktadır.



Şekil 4.38. 2850 d/d'da ve 12.5m^3/h debide farklı açılarda HAD ile elde edilen mutlak hız konturları.

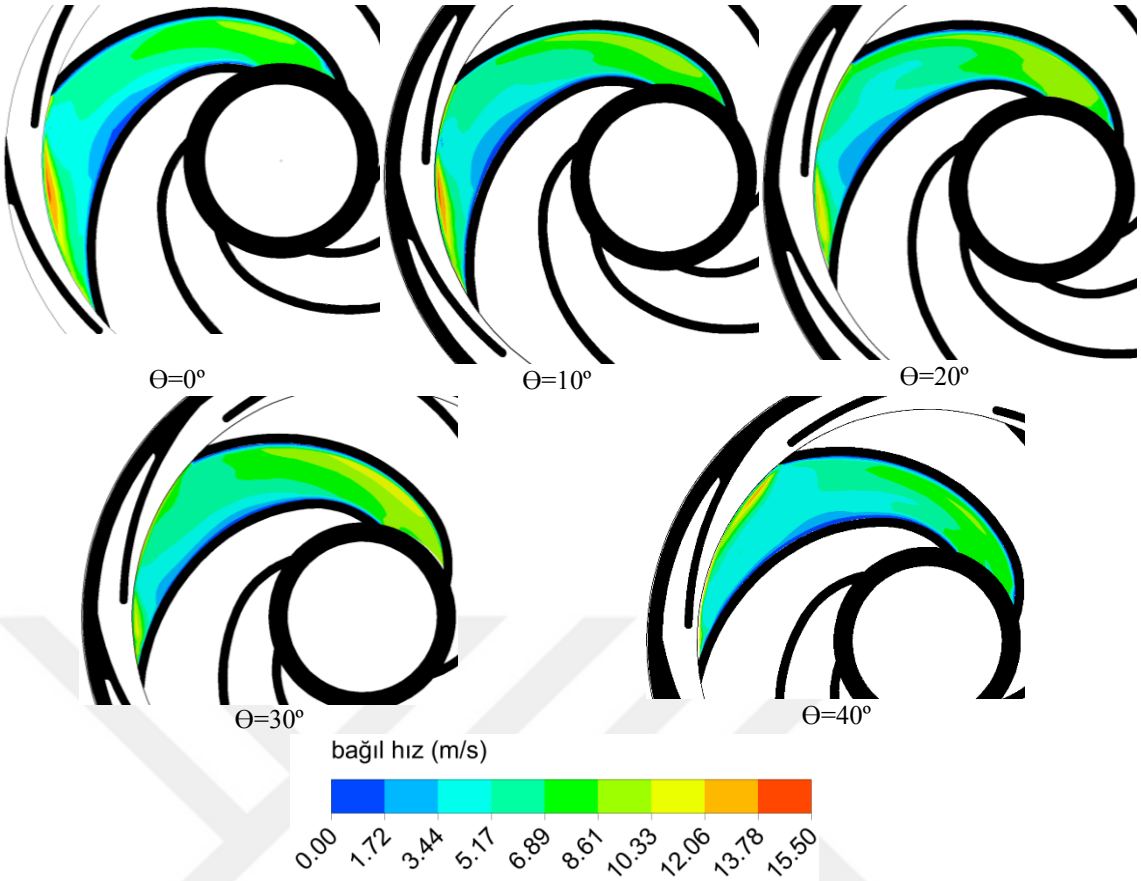


Şekil 4.39. 2850 d/d'da ve 12.5m^3/h debide farklı açılarda PIV ile elde edilen mutlak hız konturları.

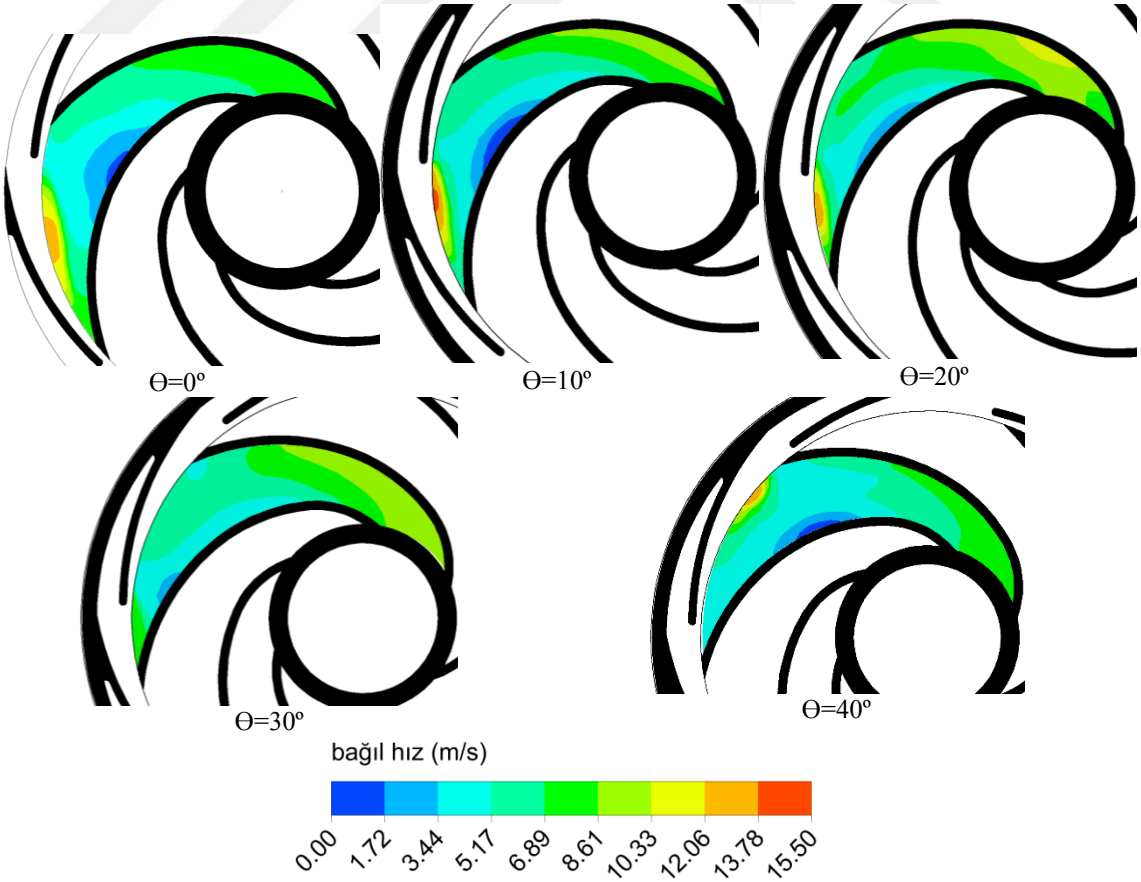
Şekil 4.39'da verilen PIV ile elde edilen mutlak hız konturları incelendiğinde Ɵ=10º-20º ve 30º değerlerinde HAD ile elde edilen ve kırmızı renk skalası ile gösterilen bölgenin oluşmadığı görülmektedir. Bunun nedeni bu bölgedeki lazer dağılımın diğer açı değeri ile bozulmasından kaynaklandığı söylenebilir. HAD değerleri ile PIV değerleri arasındaki benzerlik ve farklılıklar kontursal değerlerde açıkça görülmektedir. Tüm açı değerlerinde çark girişindeki hız dağılımı benzer şekildedir. Diğer sonuçlarda da olduğu gibi sınır tabakadaki akış yapısı hiçbir PIV sonucunda yakalanamamıştır. Bunun yanında yüksek ve düşük hız bölgelerinin sayısal ve deneysel sonuçlarda genelde uyumlu olmakla birlikte büyüklük değerleri farklılık göstermektedir.

Şekil 4.40'da ise çark 1 için farklı Ɵ değerlerinde HAD ile elde edilen bağıl hız konturları verilmiştir. Çark çıkışındaki dönümlü bölgenin konumunun ve büyüklüğünün değişen açı değerleri ile oldukça farklılaştığı görülmektedir. Bunun yanında çark içerisinde de bağıl hız dağılımının da farklı çark-difüzör pozisyonunda oldukça değiştiği tespit edilmiştir. Kanadın basma yüzeyindeki düşük hız bölgesinin ise vektör dağılımında en uygun açı olarak görülen Ɵ=30º değerinde en düşük olduğu ve bağıl hız dağılımında da en uygun akış yapısının bu pozisyonda elde edildiği görülmüştür. Bağıl hız değerinde en fazla değişimin ise Ɵ=30º'de olduğu görülmüştür.

Çark çıkışında 15.50 m/s değerlerini bulan yüksek hız değerlerinin PIV ile de elde edildiği farklı açılardaki deneysel verilerin sonuçları Şekil 4.41'de sunulmuştur. Ancak kontur yapısı ve büyüklüğü açısından deney sonuçlarının HAD değerleri ile karşılaştırıldığında genelde uyumlu olduğu ancak bazı farklılıklar da gösterdiği tespit edilmiştir. Bunlar 20° pozisyonu hariç diğer açılarda kanadın basma yüzeyindeki düşük hız bölgesinin PIV ile daha büyük olarak ölçülmesidir. Bununla birlikte çark çıkışındaki yüksek bağıl hız bölgeleri HAD ile ince uzun bir kontur olarak görülürken PIV ile daha geniş ve yuvarlak hatlı olarak ölçülmüştür. Bu bölümde elde edilen önemli sonuçlardan biri de literatüre benzer şekilde (Yalçın, 2015) çark çıkışındaki difüzör gibi bir engelin çark çıkışındaki akış koşullarını değiştirdiğini ve akışın aksi yönde olmasına rağmen engelin etkisinin çark ortasına kadar ilerlediğinin tespit edilmesidir.



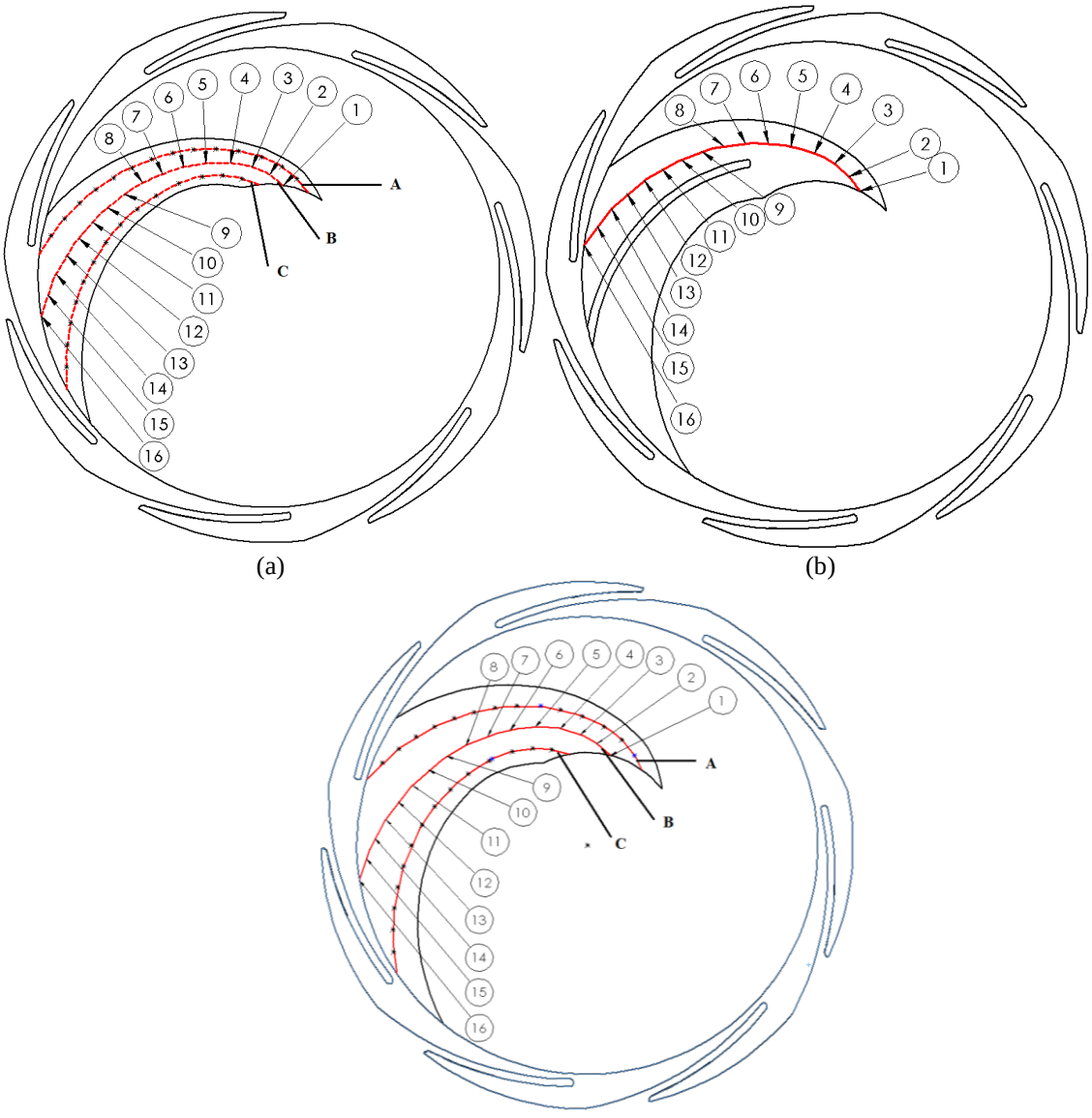
Şekil 4.40 2850 d/d'da ve 12.5m^3/h debide farklı açılarda HAD ile elde edilen bağıl hız konturları.



Şekil 4.41 2850 d/d'da ve 12.5m^3/h debide farklı açılarda PIV ile elde edilen bağıl hız konturları.

4.3.5. PIV-HAD noktasal verilerin karşılaştırılması

Çalışmada verilen kontur görsellerinde kontur skalası ile belirli bölgelerdeki hız değerleri ve hız alanları görülmektedir. Ancak PIV ve HAD ile elde edilen değerlerin belli noktalarda farklarının ölçülmesi ve karşılaştırılması sayısal olarak farkın ölçülmesi açısından önemlidir. Bu bölümde noktasal ölçüm değerleri örnek olarak tasarım debisi olan 12.5 m^3/h debide ve 2850 d/d'da çark 1, çark 2 ve çark 3 için akış pasajı içerisinde belirli eğriler boyunca noktalar oluşturulmuştur. Çark girişinden çıkışına eşit aralıklarla oluşturulan 16 ayrı nokta 3 çark için de Şekil 4.42'de verilmiştir.

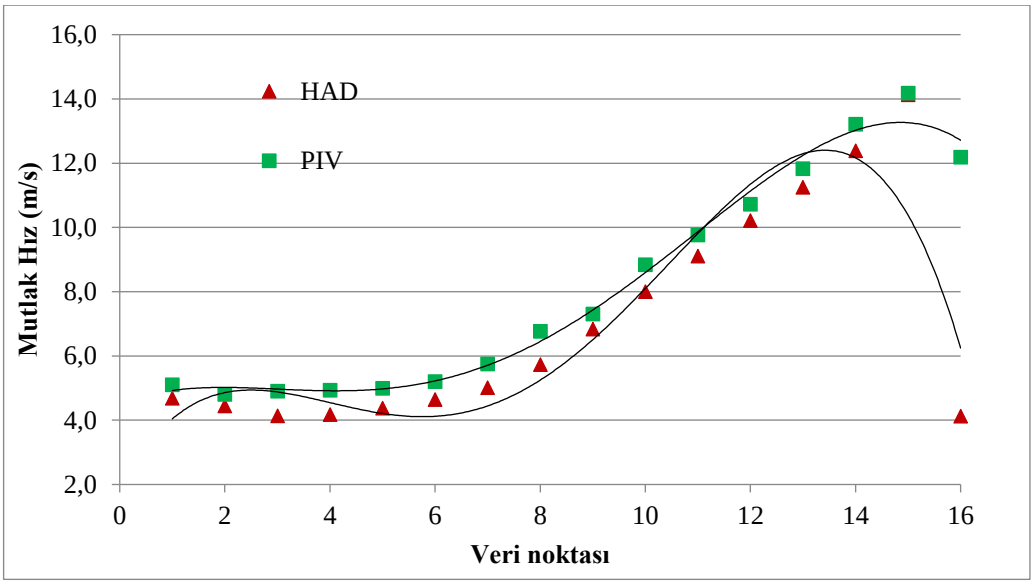


Şekil 4.42. a)Çark 1 (orijinal çark) b) Çark 2 ve c) Çark 3 üzerinde veri almak için oluşturulan eğriler ve noktalar.

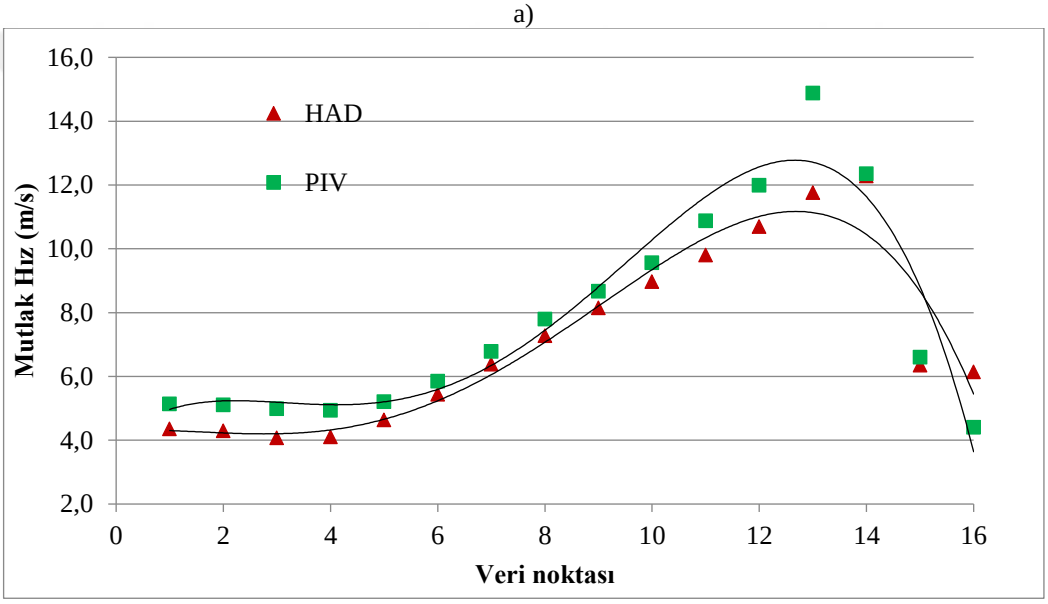
Çark 1 ve çark 3 için çarkın tam ortasından geçen biz eğri yanında, çarkın emme ve basma yüzeyine yakın bölgelerde 3 farklı eğri boyunca belirlenen noktalarda mutlak hız değerler okunmuştur. Çark 2'de ara kanadın alt kısmında lazer düzleminin bozulmasından dolayı sağlıklı ölçüm yapılamadığı için sadece ara kanat üzeri ile üstteki asıl kanadın altında 1 numaralı eğride verilerin alınması yeterli olmuştur. Bu noktalar SolidWorks programı içerisinde oluşturularak koordinatları kaydedilmiştir.

Koordinatları kaydedilen noktalar CFD-Post programında da oluşturulmuş ve bu noktaların olduğu yerlerde mutlak hız değerleri yazdırılmıştır. Bu noktalar aynı zamanda PIV dosyalarında da en yakın veri değerinde okutularak mutlak hız değerleri kaydedilmiştir. Şekil 4.42'de çark 1 için PIV ve HAD ile elde edilen noktasal hız değerleri sunulmuştur. Şekil 4.43.a'da çark 1 için A eğrisi üzerinde verilen 16 noktada mutlak hız değerleri verilmiştir. Orijinal pompa çarkı olan çark 1'in emme yüzeyine yakın bölgede olan eğri boyunca çark girişinde benzer olan akış hızlarının çark ortalarına gelindiğinde bir miktar değiştiği görülmüştür. Çark çıkışında ise özellikle 16. noktada PIV-HAD hız değerleri karşılaştırmasında da görülen büyük bir fark göze çarpmaktadır. Bu nokta çark çıkışında difüzör etkisinin en yüksek olduğu bölge olduğu için hem ölçülmesi hem de hesaplanması zor bir nokta olması bu farkın nedenlerinden olduğu söylenebilir. A eğrisi boyunca HAD ile 7.08 m/s PIV ile de 8.15 m/s ortalama hız değeri elde edilmiştir. 16 nokta boyunca ortalama bağıl fark ise %12.70 olmuştur.

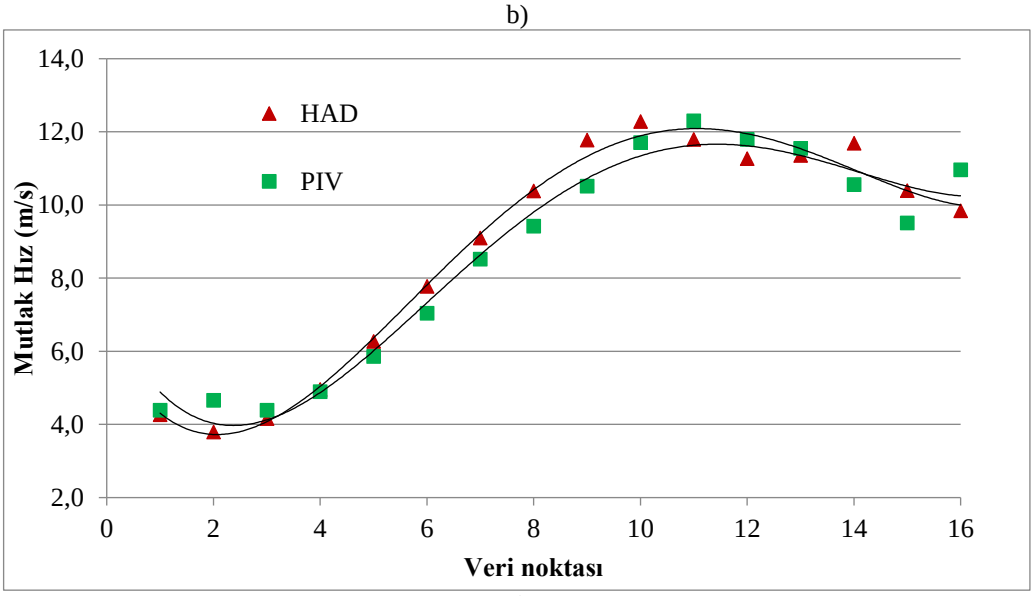
Şekil 4.43.b'de çark 1 için B eğrisi boyunca ortalama hız değerlerinin dağılımı hem HAD hem de PIV ile verilmiştir. Bu eğri boyunca hız değerlerinin benzer bir eğri izlediği görülmektedir. Bu bölgede ise PIV ile elde edilen ortalama hız değeri 7.82 m/s olurken HAD ile 7.14 m/s olmuştur. 16 nokta boyunca da bağıl fark değeri %12.22 olarak hesaplanmıştır. Çarkın tam ortasında olan bu eğri de farkın en önemli nedeni çıkış bölgesinde difüzör içinden olan ters akışların etkisi sonucu oluşan yüksek ve düşük hız bölgesinin PIV ve HAD ile farklı ölçülmesidir.



a)



b)

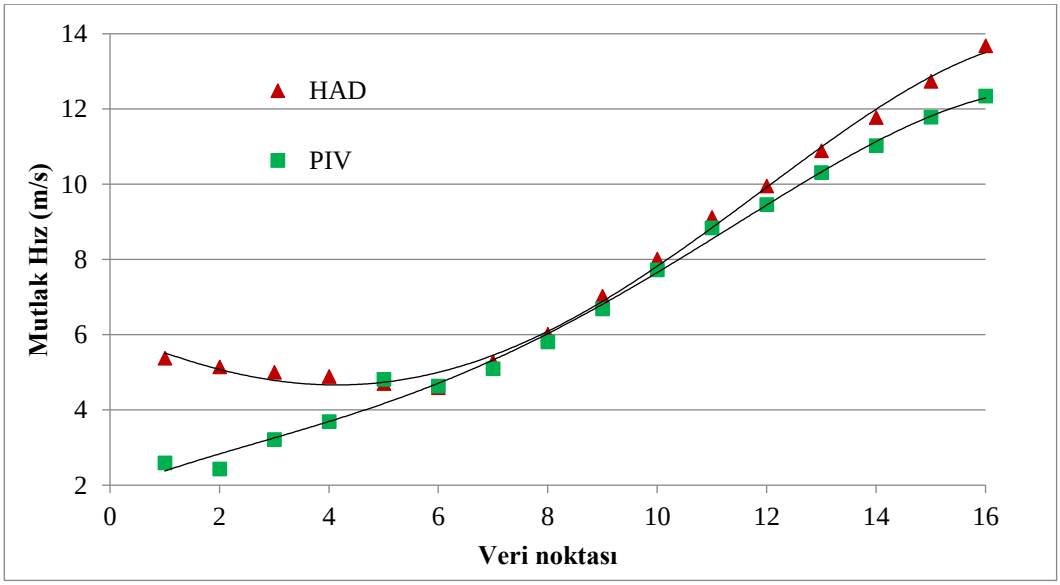


c)

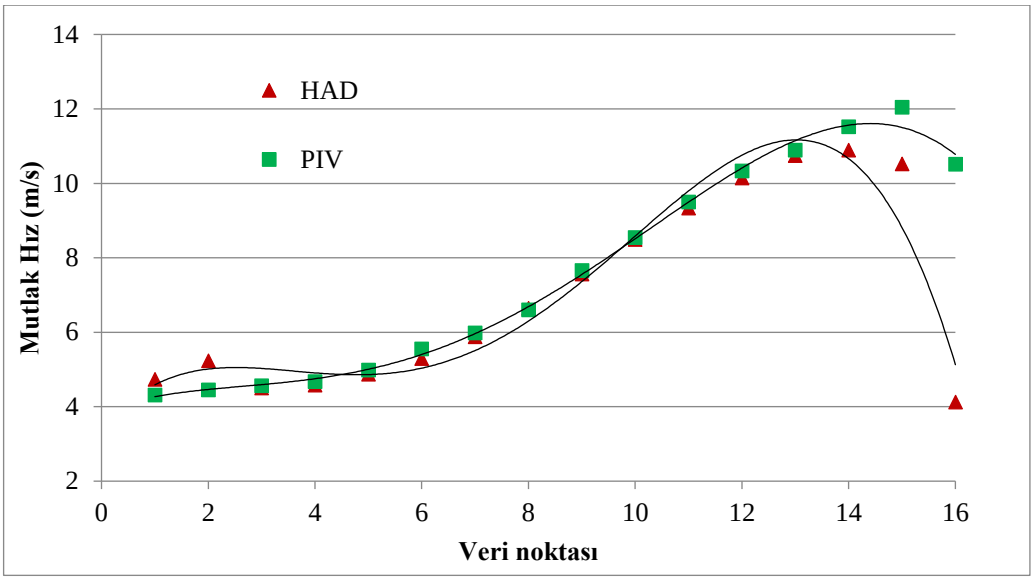
Şekil 4.45. Çark 1 (orijinal çark) için a) A eğrisi b) B eğrisi ve c) C eğrisi boyunca 16 farklı noktada HAD ve PIV ile elde edilen mutlak hız değerlerinin değişimi.

Şekil 4.43.c'de ise çark 1'in basma yüzeyine yakın C eğrisi boyunca PIV ve HAD ile elde edilen mutlak hız değerleri verilmiştir. Bu bölgede hız değerleri girişten çıkışa kadar uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bunun en önemli nedeni C eğrisi boyunca ani hız değişimlerinin olamamasıdır. PIV ile ortalama 8.63 m/s HAD ile ise ortalama 8.82 m/s mutlak hız değeri elde edilmiştir. Eğri boyunca 16 noktada ortalama fark değeri ise % 7.47 ile bu çark için en düşük değer olmuştur. Ortalama hız değerleri oldukça yakınken ortalama farkın yüksek çıkma nedeni, bu farkın her bir noktada hesaplanıp 16 nokta için ortalamasının alınmasıdır.

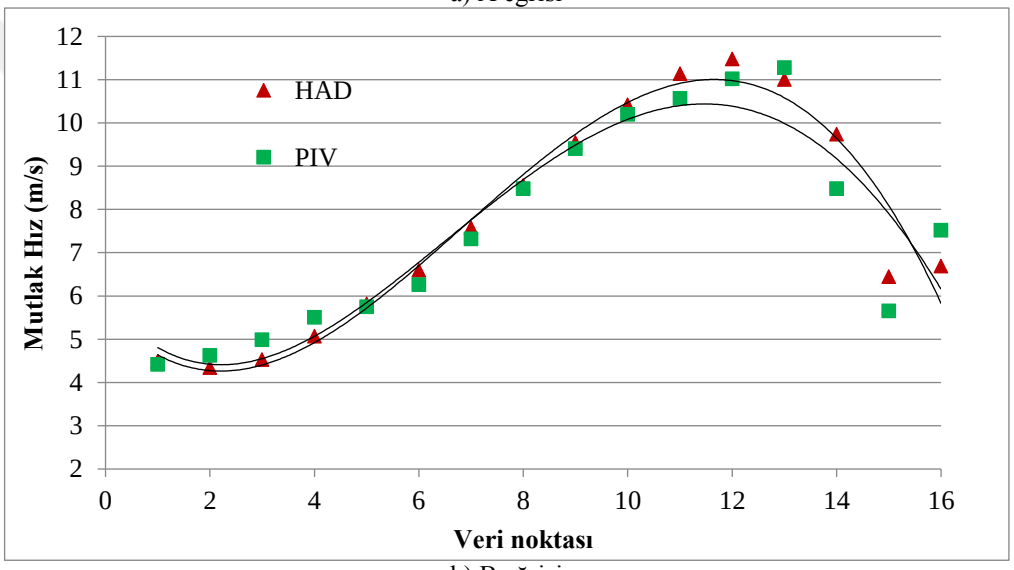
Şekil 4.44'de ise çark 2 için ortalama hız değerleri PIV ve HAD ile yalnızca ara kanadın üst bölgesi için sunulmuştur. Ara kanadın alt kısmında PIV ölçümleri uygun şekilde yapılamadığı için bu bölge için noktasal hız değerleri verilmemiştir. Şekil incelendiğinde çark girişinde PIV ile ölçülen düşük hız değerleri 5. noktadan sonra lazer perdesinin düzenli olduğu bölgeye gelmiş ve bu bölgede fark değerleri %3 civarında olmuştur. Çark çıkış kısmına gelindiğinde ve türbülans değerleri artmaya başladığında ise bu fark yine artmıştır. Eğri boyunca HAD ile 7.76 m/s, PIV ile ise 6.95 m/s ortalama hız değerleri ölçülmüştür. Ortalama hız değerleri farkı ise 16 nokta boyunca % 21.24 olarak hesaplanmıştır.



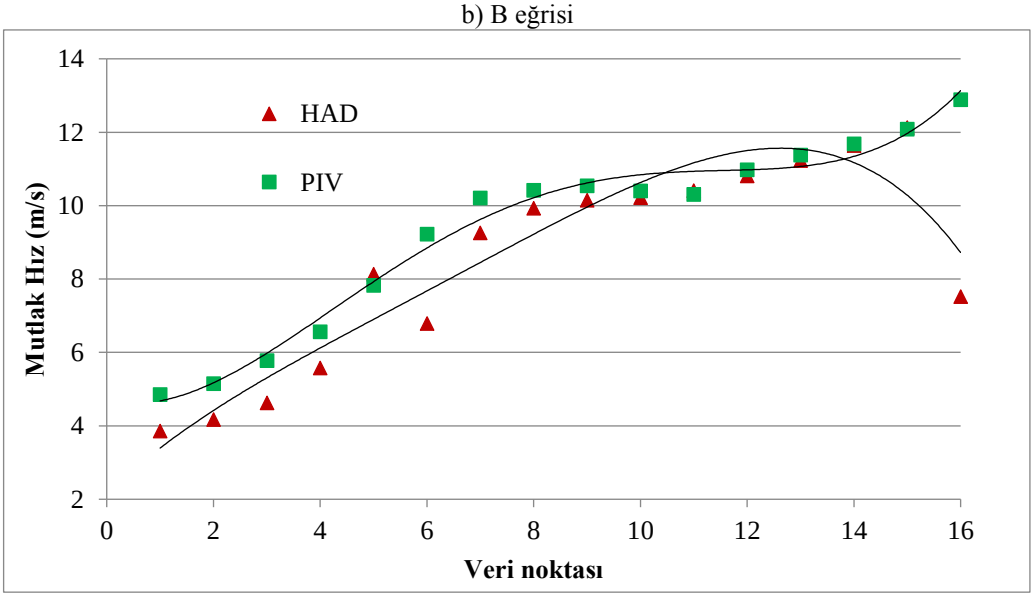
Şekil 4.44. Çark 2 için 16 farklı noktada HAD ve PIV ile elde edilen mutlak hız değerlerinin değişimi.



a) A eğrisi



b) B eğrisi



c) C eğrisi.

Şekil 4.45. Çark 3 için a) A eğrisi b) B eğrisi ve c) C eğrisi üzerinde 16 farklı noktada HAD ve PIV ile elde edilen mutlak hız değerlerinin değişimi.

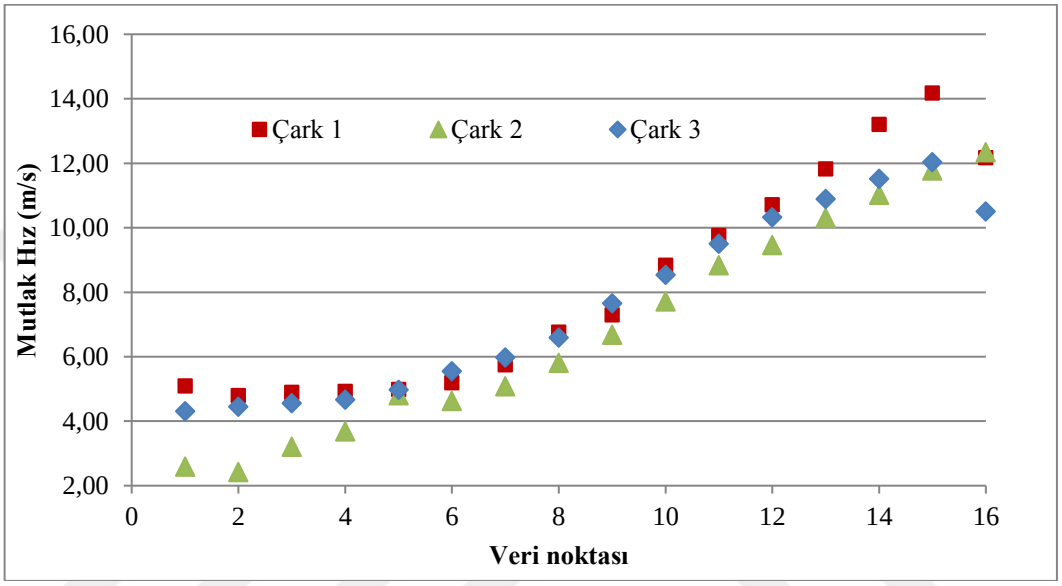
Şekil 4.45.a'da sunulan veriler Şekil 4.42.c'de verilen çark 3 üzerindeki A eğrisinde 16 noktadaki HAD-PIV karşılaştırmasıdır. Bu eğri boyunca HAD ile elde edilen ortalama mutlak hız değeri 7.09m/s olurken PIV ile elde edilen ortalama değer 7.63 m/s olmuştur. Çark giriş ve orta kısmında değerlerin oldukça uyumlu olduğu görülürken çark çıkışında HAD ile elde edilen ani hız değişimlerinin PIV'de daha düşük olarak temsil edildiği görülmüştür. Ortalama hız farkı ise %7.64 olarak hesaplanmıştır. Bu farklar Ertürk ve ark. (2013) yayınlarında buldukları farklı imaj değerlerinde %2.8-6 arasında civarı fark ile benzer şekildedir.

Şekil 4.45.b'de çark 3 için çark pasajının tam ortasından geçen B eğrisinde PIV-HAD hız değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Benzer şekilde çark girişinde uyumlu olan değerler türbülans değerlerinin de arttığı çark çıkışına gelindiğinde farklılık göstermektedir. Bu eğride PIV ile elde edilen ortalama hız değerleri 7.59 m/s olurken HAD ile elde edilen değerler 7.72 m/s olmuştur. Ortalama değerler oldukça yakın çıkmakla birlikte her bir nokta için bağıl fark değerleri hesaplandığında da %5.71 gibi oldukça düşük bir değer çıkmıştır. 4 kanatlı olan bu pompada farkın az çıkmasının nedeni özellikle çarkın orta kısmında akışkan-yapı etkileşiminin en az olması ve kanatlar arası mesafenin oldukça fazla olmasındandır. PIV ölçümünün oldukça zor olduğu çark içi akışın en kolay ölçülebildiği yansımanın en az olduğu çark da Çark 3 olmuştur. Değerler açısından sağlanan bu uyum deney ve HAD görselleri sonuçlarına göre de beklenen bir sonuçtur.

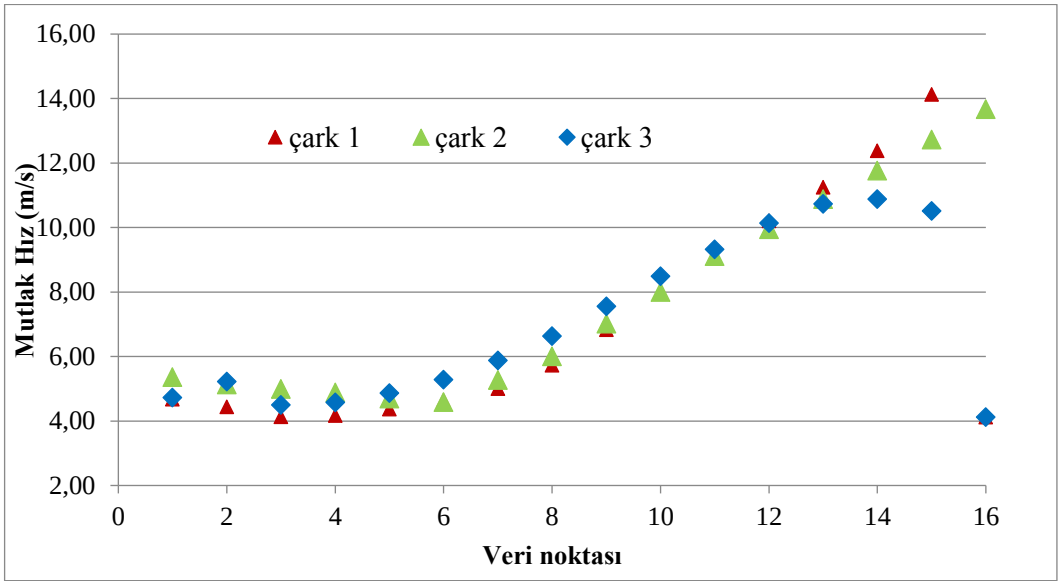
Şekil 4.45.c'de ise çark 3 için çark kanadının basma yüzeyinin ortasından geçen C eğrisinde PIV-HAD hız değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu bölgede hem çark girişinde hem de çarkın orta kısmında önemli farklılıklar görülmektedir. Çark çıkış bölgesinde ise 16. Nokta dışında bu değerler uyumludur. Bu bölgede ise PIV ile elde edilen ortalama hız değeri 9.39 m/s olurken HAD ile hesaplanan mutlak hız 8.53 m/s olmuştur. 16 noktadaki hız değerlerinin ortalama farkı ise %10.64 olarak hesaplanmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan tüm çark kanatlarının emme yüzeylerine yakın bölgede PIV ile elde edilen noktasal mutlak hız değerleri Şekil 4.46'da, HAD ile elde edilen noktasal mutlak hız değerleri Şekil 4.46'da verilmiştir. PIV ile elde edilen verilerde çark 1 içerisindeki mutlak hız dağılımının çark 2 ve çark 3'e göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni çark 1'de bulunan 6 kanat sayısının çark 3'e göre kanat sayısının fazla olmasından dolayı akışın daha dar bir alandan geçtiği için değerinin artmasıdır. Çark 2'de ise ana ve ara kanat sayısının 8 olmasına rağmen kanat profiline göre akışın ara kanadın alt kısmından daha fazla geçmesine nedeniyle üst kısımdaki

mutlak hız değerleri diğer iki farklı çark geometrisine göre daha az olmuştur. Şekil 4.47'de HAD ile elde edilen noktasal hız değerleri incelendiğinde hız dağılımlarının PIV ile elde edilen değerlere benzer olduğu ancak özellikle çark 2 için hız değerlerinin daha fazla hesaplandığı görülmüştür. Üç farklı çark arasında çarka giriş ve akışın gelişme bölgelerinde kanat profininin aynı olmasından dolayı önemli farklılıklar görülmemiştir. Ancak çarkın çıkış bölgelerinde çark-difüzör pozisyonları farklı olduğu için hız değerlerinde farklılıklar gözlemlenmiştir.



Şekil 4.46. Çarkların emme yüzeyine yakın A eğrisi boyunca farklı çarklarda PIV ile elde edilen mutlak hız değerlerinin değişimi



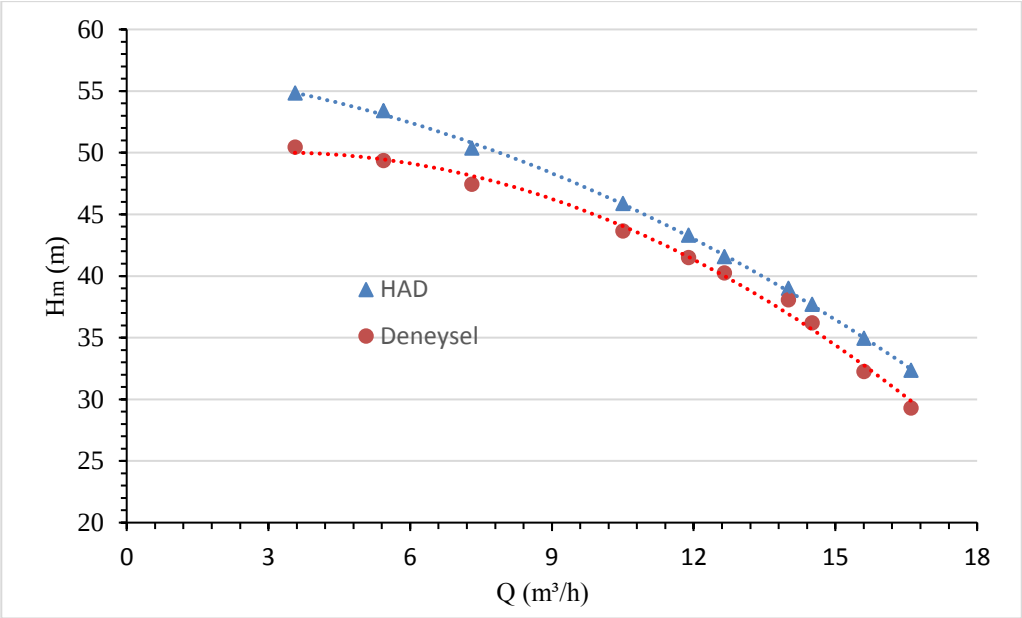
Şekil 4.47. Çarkların emme yüzeyine yakın A eğrisi boyunca farklı çarklarda HAD ile elde edilen mutlak hız değerlerinin değişimi

4.4. Pompa Performans Deneyleri ve HAD Sonuçları

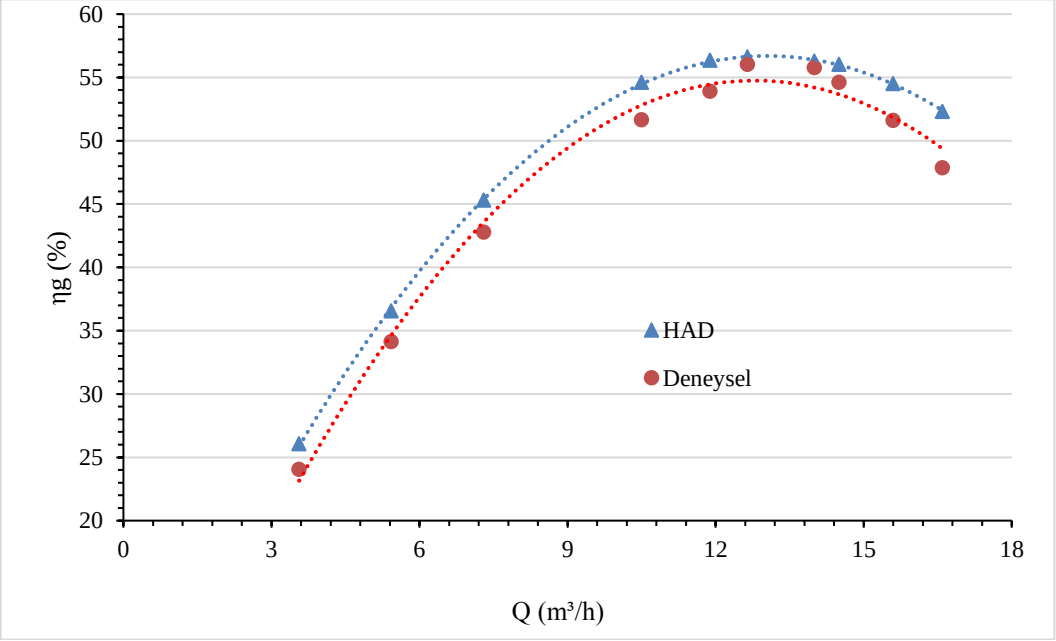
Tez çalışması içerisinde yapılan analizler sonucu belirlenen çark 1, çark 2 ve çark 3 geometrileri katı model çizimi tamamlanmış ve çark üretimi için her bir çarkın kalıbı imal edilmiştir. Kalıp üretiminin ardından plastik enjeksiyon yöntemi ile üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen pompa çarkı kullanılarak pompa montajı gerçekleştirilmiş ve Sempa firmasındaki Şekil 3.48'de şematik resmi gösterilen deney setinde pompa deneyleri gerçekleştirilmiştir. PIV deneylerinin yapıldığı deney setinde de debi ve basma yüksekliği ölçülebilmekte ama elektrik değerlerinin ölçüm hassasiyeti düşük olmaktadır. O nedenle tez çalışmasında Sempa firmasın kalibrasyonlu ölçüm aletleri ile yapılan deneylerin sonuçları kullanılmıştır. Deney sonucunda elde edilen veriler datalogger ile kaydedilerek pompa karakteristik eğrileri belirlenmiştir. Yapılan deney çalışmaları sonucunda, 3.56 ile 17.60 m³/h arasında 11-13 farklı debi değerinde gerçekleştirilmiştir. Hem deneysel hem de HAD sonuçlarına göre tüm debiler için 3 farklı çarkın kullanıldığı pompa karakteristikleri Şekil 4.48-4.53 arasında verilmiştir.

Deneysel çalışmada tespit edilen tüm debi değerlerinde pompanın HAD analizleri ANSYS-Fluent programında SST k-ω türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD sonuçlarına göre her debi için pompa basma yüksekliği ve genel verim hesaplanmıştır.

Şekil 4.48'de çark 1'in kullanıldığı pompada basma yüksekliğinin farklı debilerde değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde artan debi ile basma yüksekliğinin azaldığı görülmektedir. Deneysel basma yüksekliğinin tüm noktalarda HAD ile hesaplanan basma yüksekliği değerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak analizlerde sızıntı akışlar dahil edilmesine rağmen, pompanın çalışma şartlarında oluşan titreşim, yataklama, sürtünme kaybı olduğu söylenebilir. Ayrıca düşük debilerde HAD sonuçlarının yakınsama zamanı ve oranı tasarım debilerine göre daha düşük olmaktadır. Şekilde özellikle tasarım debisi 12.5 m³/h civarında deneysel ve HAD ile elde edilen farkların azaldığı ve farkın %3 civarında olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 4.48. Çark 1'in (orijinal çark) kullanıldığı pompada farklı debilerde deneysel ve HAD ile ölçülen basma yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması.



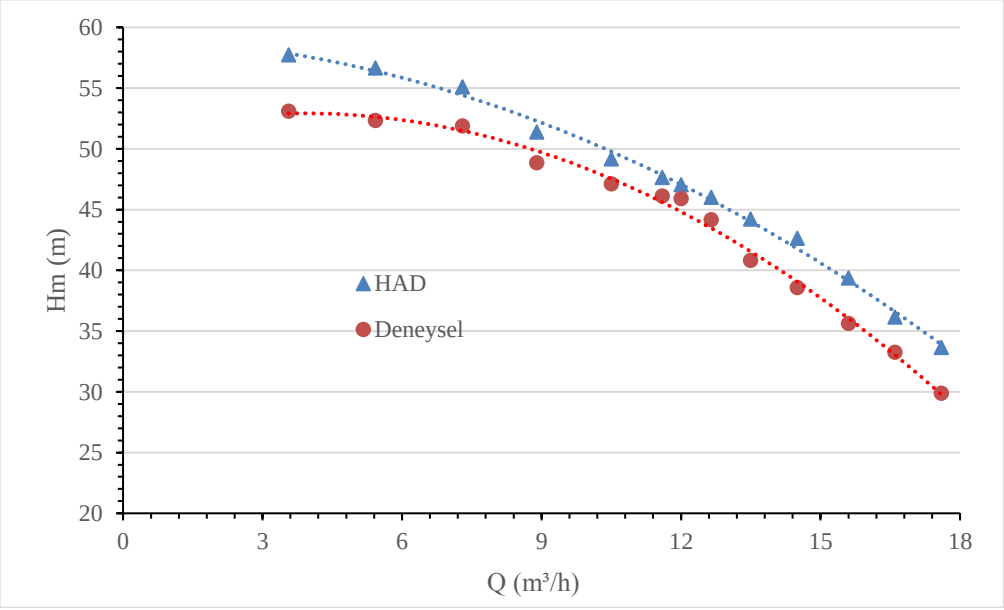
Şekil 4.49. Çark 1'nin (orijinal çark) kullanıldığı pompada farklı debilerde HAD ve deneysel ile ölçülen genel verim değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.49'da Çark 1 için deneysel ve sayısal olarak elde edilen değişen debilerde verim grafiği verilmiştir. Deneysel elde edilen verilerin ardından aynı debilerde yapılan analizlerle HAD sonuçları da eklenmiştir. Genel verim değerlerinin 12.5 m³/h debi değerine kadar debi arttıkça arttığı bu debiden itibaren ise azaldığı hem HAD hem de deneysel sonuçlarda görülmüştür. Deneysel sonuçlar ve HAD sonuçları arasındaki en düşük farklılık, tasarım debisi olan 12.5 m³/h debi değeri civarında gerçekleşmiştir. En

verimli noktadaki debi değerinden daha düşük ve daha yüksek debilerde ise karmaşık akış fiziğinden dolayı deneysel sonuçlar ve HAD sonuçları arasındaki farklılık artış göstermektedir. HAD analizlerinde şekilde görülenden daha yüksek debi değerlerinde de sonuçlar alınırken deneysel sonuçlarda verim değerlerinde ani düşüşler yaşanmaktadır.

Basma yüksekliği ve genel verim için bulunan deneysel sonuçlar ve HAD sonuçları arasındaki farklılığın, belirlenen tüm debilerde %10'dan daha düşük olduğu hesaplanmıştır. En verimli nokta olan 12.5 m³/h debi için hesaplanan farklılıklar basma yüksekliği için %3.3 verim için ise %1.0 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar HAD çalışmalarının pompa performansını belirlemede kabul edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir (Yang ve ark., 2012b; Zhou ve ark., 2012).

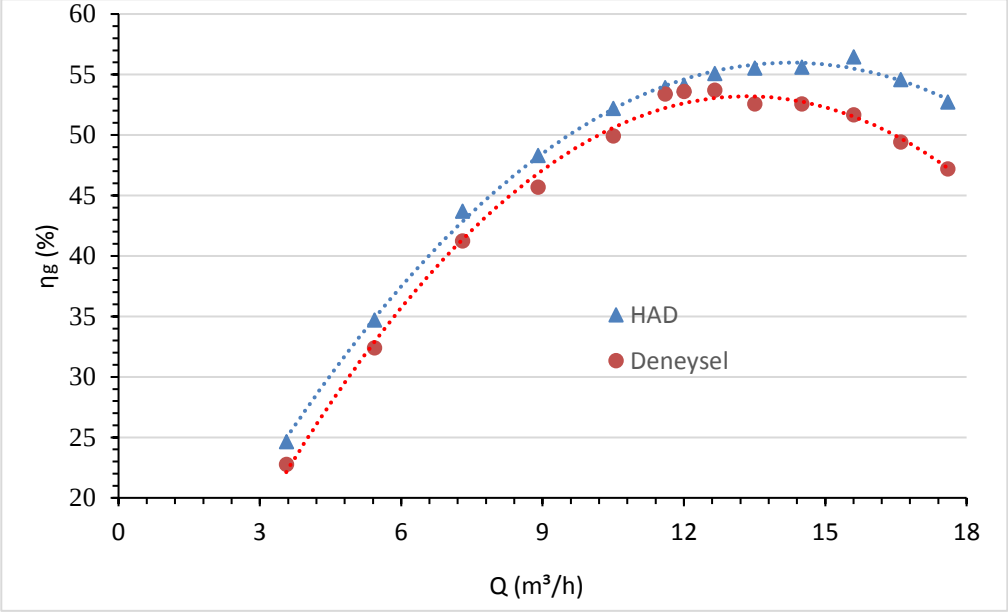
Şekil 4.50'de ara kanat ilaveli pompa çarkı olan çark 2'nin kullanıldığı pompada deneysel ve sayısal basma yükseklikleri verilmiştir. Deneysel basma yükseklikleri tüm debilerde HAD ile elde edilen verilerin altında kalmıştır. Çark 1 ile kıyaslandığında tüm debilerde basma yüksekliği değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Yani ara kanat ilavesi ile toplam enerji transfer alanının artırılması ile tüm debilerde beklenen basma yüksekliğindeki artış sağlanmıştır. Çark 1 kullanılan pompada 12.5 m³/h debide sayısal sonuçlarda 41.6 m, deneysel sonuçlarda 40.3 m basma yüksekliği elde edilirken, çark 2 kullanılan pompada HAD sonuçlarında aynı debide 46.0 m deneysel sonuçlarda ise 44.2 m basma yüksekliği elde edilmiştir. Houlin ve ark. (2010)'un da belirttiği gibi artan toplam kanat sayısı ile basma yüksekliği de artmıştır.



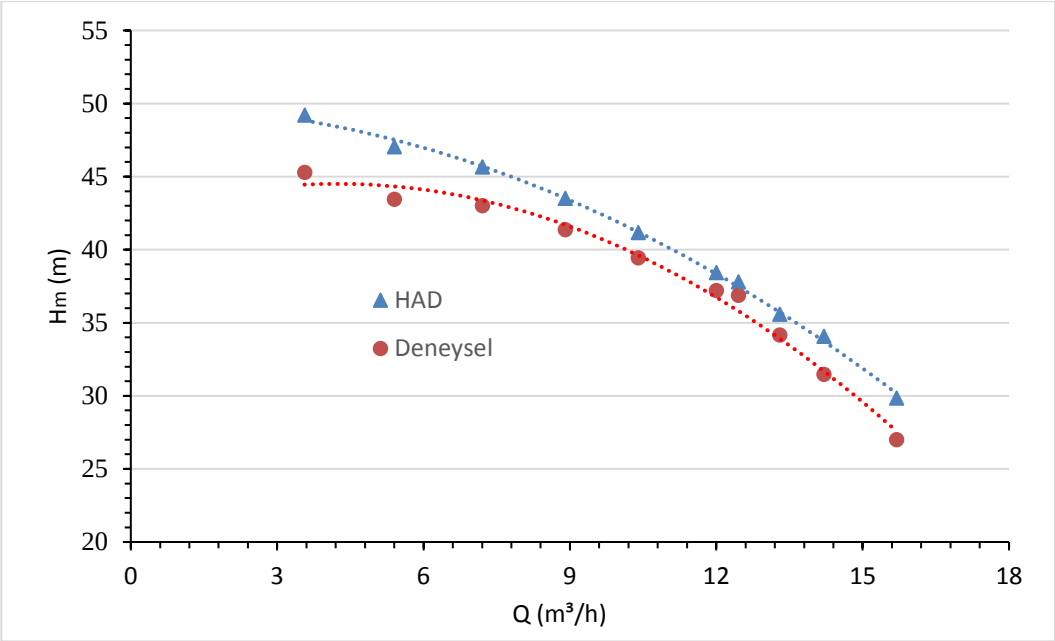
Şekil 4.50. Çark 2'nin kullanıldığı pompada farklı debilerde HAD ve deneysel olarak basma yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.51'de ise çark 2'nin kullanıldığı pompa çarkında verim değerlerinin değişimi görülmektedir. 12.5 m³ debide çark 1 de verim değeri HAD ile %56.6 deneysel sonuçlarda ise %56.0 olurken, çark 2 için HAD ile elde edilen verim değeri %55.1 deneysel sonuçlarda ise %53.7 olarak bulunmuştur. Böylelikle ara kanat ilaveli pompa çarkında basma yüksekliğinde artış elde edilse de verim değerlerinde düşme görülmektedir. Bunun nedeni ara kanat girişlerinde oluşan çarpma kayıpları, pompa çarkı içerisinde artan türbülans seviyesi gibi nedenlerle gerekli tork değerinin basma yüksekliği değerlerine kıyasla daha fazla artması olduğu söylenebilir. Çark 2'nin bir avantajı ise tasarım debisinden yüksek debilerde verim değeri çark 1'e göre daha geç düşmekte ve pompanın daha geniş bir kullanım aralığı sunmaktadır. Deneysel çalışmalarda çark 2'nin kullanımı ile orijinal çark olan çark 1'e göre basma yüksekliği %9.7 artış ile 40.3 m'den 44.2 m ye çıkarılırken, genel verim %56.0'dan %53.7'ye % 4.7 düşüşte kalmıştır.

4 kanatlı yapısı olan Çark 3 için farklı debilerde basma yüksekliğinin deneysel ve sayısal olarak elde dilen sonuçlarla karşılaştırması Şekil 4.52'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi hem deneysel hem de sayısal sonuçlarda basma yüksekliğinde diğer çarklara göre düşük çıktığı görülmektedir. 12.5 m³/h debide çark 1 ve çark 2 de deneysel basma yükseklikleri sırası ile 40.3 m ve 44.2 m olurken çark 3 için 36.9 m olmuştur. 40 metre basma yüksekliği değerinin altında kalan çark 3 ticari olarak kullanılabilir değildir.

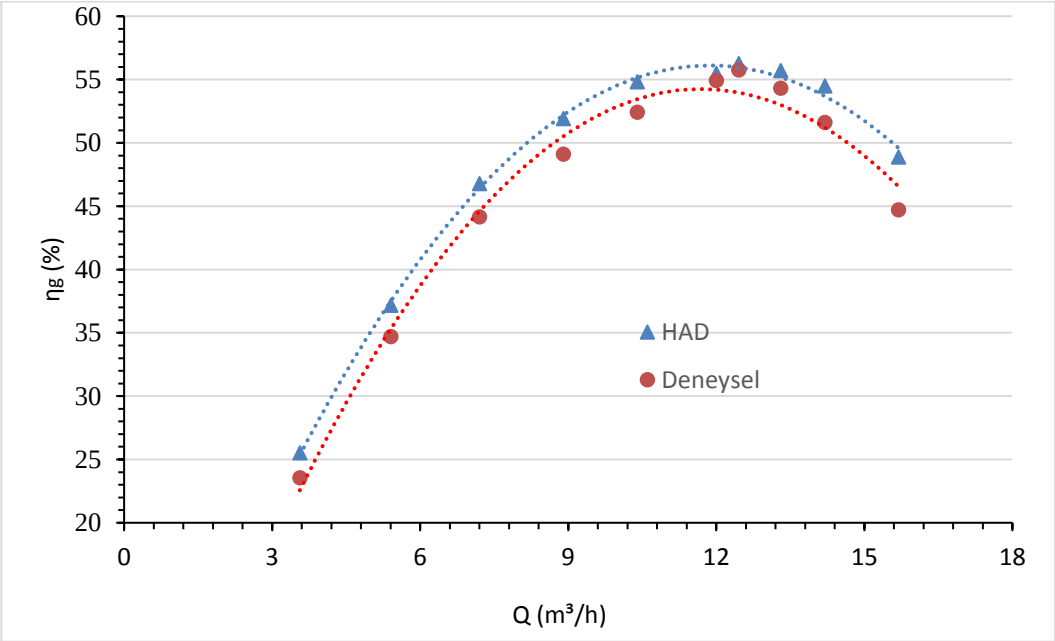


Şekil 4.51. Çark 2'nin kullanıldığı pompa çarkında farklı debilerde HAD ve deneysel olarak genel verim değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.52 Çark 3'ün kullanıldığı pompa çarkında farklı debilerde HAD ve deneysel olarak basma yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması.

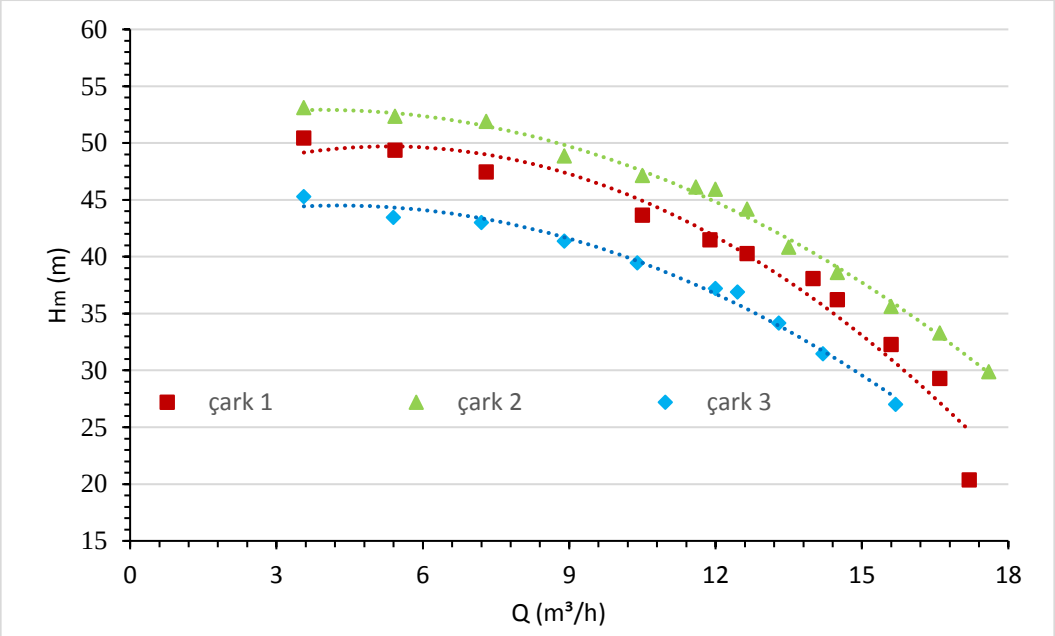
Şekil 4.53'de çark 3 için HAD ve deneyler ile elde edilen pompa verimi değişimi verilmiştir. Şekilde en yüksek verim değerinin %56.3 değeri ile çark 1'e göre düşük çark 2'ye göre ise aynı debi değerine göre yüksek olduğu görülmüştür. Verim değerleri kabul edilebilir olsa da çok düşük basma yüksekliği olan çark 3 üretim açısından uygun nitelikte değildir. Yine buradaki çalışmalarda da deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki farkın kabul edilebilir değerlerde olduğu görülmüştür.



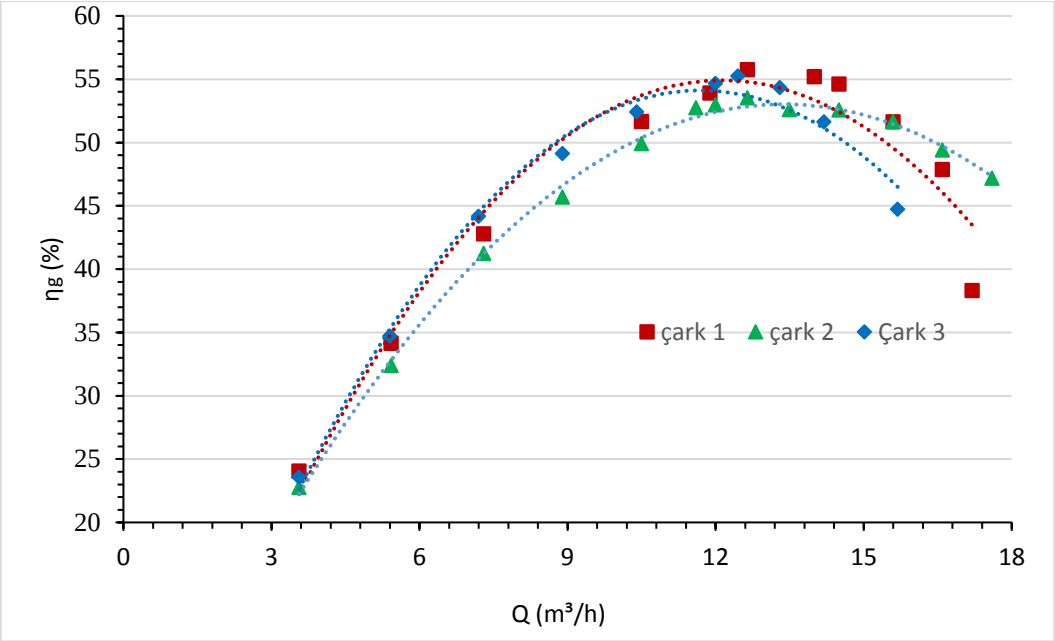
Şekil 4.53. Çark 3'ün kullanıldığı pompa çarkında farklı debilerde HAD ve deneysel olarak genel verim değerlerinin karşılaştırılması.

Pompalar basma yüksekliği, debi ve devir sayısına göre tasarlanmaktadır. Pompa içerisindeki akışkanın sahip olduğu değişken basınç ve hız dağılımı tasarım debisine olan uzaklığa bağlı olarak akış ayrılması, ters akış, dolanımlı akış ve kavitasyon gibi problemlere sebep olabilmektedir. Tasarım dışı debilerde türbülans etkisinin artması nedeniyle HAD da kullanılan türbülans modeli ile elde edilen sonuçların doğruluğu, meydana gelen türbülans etkisinin belirlenebilme seviyesine bağlıdır. Ayrıca HAD analizleri fiziksel olarak oluşan tüm etkileri içermez. Bu nedenle HAD analiz sonuçlarının genelde daha yüksek olması beklenir. Bu sebeple Şekil 4.48-53 arasında da görüldüğü gibi deneysel ve HAD değerleri arasındaki farklılık tasarım dışı debilerde artmaktadır.

Şekil 4.54'de üç farklı çarkın kullanıldığı farklı pomplaarda basma yüksekliği değerlerinin hacimsel debi ile değişimi görülmektedir. Çark 3'ün tüm debi değerlerinde en düşük basma yüksekliği değeri elde edilirken arakanat ilaveli çark 2 ile en yüksek basma yüksekliği değerlerine ulaşılmıştır. Orijinal çark olan çark 1 ise tasarım debisi ve diğer debi oranlarında çark 2'ye göre %9 civarında daha düşük değerler vermiştir. Basma yüksekliklerinde bu değerler fiziksel olarak nedeni enerji transfer yüzeyleri ile ilgilidir. Yani ara kanat ilavesi ve ana kanat sayısındaki artış basma yüksekliğinde de artışlar sağlamaktadır.



Şekil 4.54. Farklı çarkların kullanıldığı pompalarda deneysel elde edilen basma yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.55. Farklı çarkların kullanıldığı pompalarda deneysel elde edilen genel verim değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.55'de üç farklı çarkın kullanıldığı pompalarda genel verim değerlerinin debi ile değişimi görülmektedir. Orijinal çarkın verim değerleri ile çark 3'ün verim değerleri tasarım debisinin altındaki değerlerlerde genelde benzer olduğu görülmüştür. Tasarım debisi altındaki değerlerde en düşük verim değerine sahip olan çark 2'nin 14 m^3/h değerlerinin üzerindeki debi değerlerinde en verimli çark olduğu yapılan deneysel çalışmalarla elde edilmiştir. Ayrıca çark 3'ün 16 m^3/h ve çark 1'in de 17 m^3/h değerlerinin üzerindeki debilerde kavitasyona bağlı verim düşüşleri gözlenirken çark 2'nin kullanıldığı pompa 18 m^3/h değerine kadar kavitasyonsuz kullanılabilmektedir.

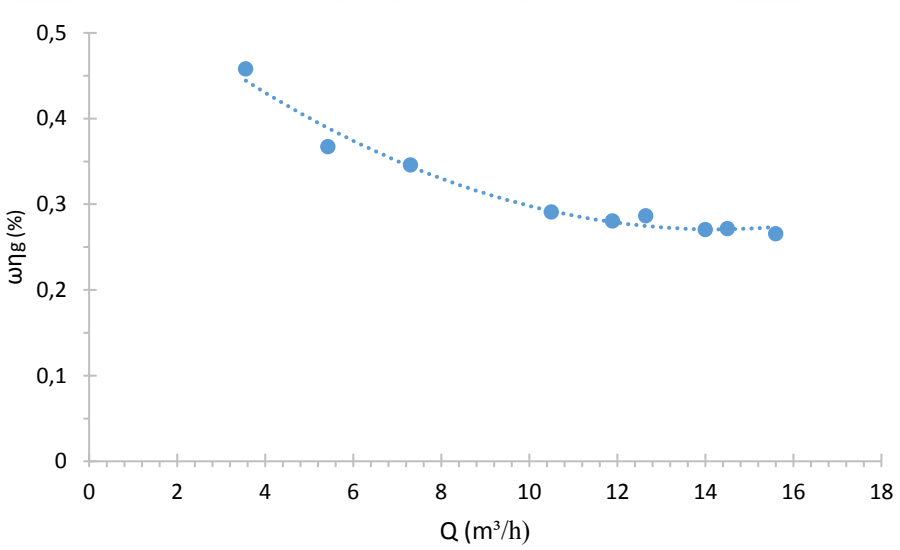
4.5. Belirsizlik Analizi

Deneysel sonuçların güvenilirlik oranının tespiti için belirsizlik analizi adı verilen bir yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemde ölçülmesi gereken büyüklük R, bu büyüklüklere etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$ olduğunda $R = (x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n)$ yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_{x1}, w_{x2}, w_{x3}, \ldots, w_{xn}$ olduğunda R büyüklüğünün hata oranı w_r olarak tanımlanır (Genceli, 2000). Belirsizlik analizinde genel verimde meydana gelen hata oranın bulunabilmesi için Çizelge 4.3'de yer alan doğruluk değerleri kullanılmıştır. Buradaki hesaplamalar için formüller 3.3.2. bölümünde açıklanmıştır.

Çizelge 4.3. Belirsizlik analizinde kullanılan bağımsız değişkenler.

Bağımsız değişkenler	Doğruluk (%)
Basınç ölçümleri (w_{Hm})	±0.5
Hacimsel debi ölçümleri (w_Q)	±1
Akım ölçümleri (w_I)	±1
Gerilim ölçümleri (w_V)	±1
Cosφ ölçümleri (w_φ)	±1

Şekil 4.52'de kullanılan pompa deneyi için genel verim değerinin belirsizlik analiz sonucu verilmiştir. Şekilde artan hacimsel debi miktarı hata oranlarında düşüşler meydana geldiği görülmektedir. Deneyin gerçekleştirildiği tüm debilerde mutlak hata oranının ±%0.5'ten daha düşük olduğu görülmektedir. Bu neticeyle de deneysel çalışma ile elde edilen sonuçların güvenilirliğini açıkça ortaya koyulmaktadır.



Şekil 4.52. Pompa deneyinde genel verim için belirsizlik değerinin hacimsel debi ile değişimi.

Belirsizlik analizinin üstünlüklerinden biri de en büyük hataya neden olan değişkenin hemen tespit edilebilmesidir. Böylelikle en büyük hataya neden olan ölçüm cihazı tespit edilebilir. Daha az etkiye sahip diğer değişkenler de tespit edilir ve inceleme ile en fazla hataya neden olan cihaz üzerine yoğunlaşabilir (Genceli, 2012).

Bu analizde pompa genel veriminde sistemin toplam belirsizlik hatasına etki eden en büyük faktör cosφ değeri olmaktadır. Bu hesapta daha hassas analizler yapılmak istenirse öncelikle bu ölçümler daha hassas şekilde tespit edilmelidir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Tez çalışmasında orijinal çark olan orijinal 6 kanatlı çark 1, ara kanat ilaveli 4 kanatlı çark 2 ve ara kanat ilavesiz 4 kanatlı çark 3'ün kullanıldığı 3 farklı pompa için HAD analizleri, PIV ile akış görüntüleme deneyleri ve pompa performans deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen, HAD, PIV ve deneysel performans sonuçları kıyaslanmıştır. PIV deneyleri tasarlanan ve kurulumu tamamlanan özel bir deney setinde yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- SST k-ω, standard k-ω, standard k-ϵ, Realizable k-ϵ, RNG k-ϵ ve Reynolds Stress modelleri ile yapılan HAD analizleri tasarım debisi 12.5 m^3/h ve 2850 d/d'da denenmiş, PIV ile en uyumlu modelin literatürde de tavsiye edilen SST k-ω modeli olduğu bulunmuştur.
- Akış kontrol çalışmalarında ara kanat ve yarık uygulamaları çalışmaları yapılmıştır. Orijinal 6 kanatlı çark 1'e ana kanat sayısı 4'e düşürülüp ana kanadın %70 boyutunda 4 adet ara kanat eklendiğinde verimde bir miktar düşüş olsa da basma yüksekliğinde önemli bir artış elde edildiği görülmüştür. Böylece çark 2 geometrisi elde edilmiştir.
- Ara kanat ilavesinin PIV ölçümlerini zorlaştırdığı için ara kanat ilavesiz 4 kanatlı çark 3 elde edilmiştir.
- Çark 1 geometrisi üzerine yapılan yarık çalışmalarında çark içerisinde akış yapısında görsel olarak iyileşme elde edilse de, hem basma yüksekliğinde hem de verim değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Bu da pompa içerisindeki akış yapısının düzgün olmasının pompa tasarımında önemli bir parametre olması ile birlikte verim ve basma yüksekliğinde farklı sonuçlara neden olabileceğini göstermiştir. Bu nedenle yarık çalışması sadece HAD olarak yapılmış, yarıklı çarkın imalatına gerek duyulmamıştır.
- Çark 1, çark 2 ve çark 3 ile 1900 ve 2850 d/d motor devirlerinde ve tasarım debilerinin 0.85-1.0 ve 1.15 oranlarında HAD ve PIV çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada akış özelliklerinden mutlak hız vektörleri, bağıl hız

vektörleri, mutlak hız konturları, bağıl hız konturları ve TKE değerleri karşılaştırılmıştır.

- HAD-PIV karşılaştırmalı sonuçlarının uyumlu olduğu belirlenmiştir. Ancak çark 2'nin ara kanadın arka kısmında lazer perdesi oluşmadığı için bu bölgede ölçüm ve karşılaştırma yapılamamıştır.
- Genel olarak HAD ile sınır tabakada ve kanadın difüzöre yakın kısımlarında elde edilen hız değerlerinin daha az sayıda ağ ile analiz yapan PIV ile elde edilemediği görülmüştür. Ayrıca difüzör etkisinin tüm çark modellerinde çark çıkışındaki akış yapısını akışkan-yapı etkileşimi ile etkilediği de belirlenmiştir.
- Çark çıkışındaki difüzör etkisinin yüksek olması nedeniyle, 5 farklı çark-difüzör pozisyonunda sayısal ve PIV deneyleri yapılarak verilmiştir. Onar derece değiştirilerek yapılan çalışmada difüzörün sadece çark çıkışındaki değil çark orta bölgesinde hatta çark girişindeki akış yapısını bile etkilediği tezin önemli sonuçlarından biridir. Literatüre elde edilen durağan halde sabit görüntüler yanında farklı açılarda da tez çalışmasında elde edilmesi de önemlidir.
- Noktasal ölçümlerle mutlak hız değerlerinin HAD ve PIV ile karşılaştırılması örnek olarak tasarım debisi olan 12.5 m^3/h debide ve 2850 d/d'da çark 1, ve çark 3 için 3'er çark 2 de ise 1 eğri boyunca 16 noktada verilmiştir. Akış pasajı içerisinde belirli eğriler boyunca noktalar oluşturulmuştur. En yüksek ortalama hız değerleri farkı çark 2 için % 21.24 olarak bulunurken, en uyumlu sonuç da 4 kanatlı çark 3'ün orta düzleminde % 5.71 olarak hesaplanmıştır. PIV'nin kanat ve difüzör etkisinin olmadığı yerlerde daha doğru ölçümler aldığı, aynı zamanda türbülans modellerinin de buralarda daha doğru sonuçlar verdiği bulunmuştur.
- Pompa karakteristik eğrileri de 3 pompa çarkı için de sunulmuş, en yüksek verimin çark 1'de, en yüksek basma yüksekliğinin çark 2'de elde edilirken çark 3'ün verim değerleri diğer çarklara yakın olmasına rağmen basma yüksekliğinin oldukça düşük olduğu görülmüştür.
- 4 kanatlı pompa çarklarında çark çıkışında difüzör bölgesinden olan akış miktarı azalmasına ve çark çıkışında daha düşük türbülans değerleri elde

edilmesine rağmen, verim ve basma yüksekliği değerleri daha düşük elde edilmiştir. Bunun nedeni çark içerisinde basma yüzeylerinde orta kısımlarda oluşan düşük hız bölgeleridir. Diğer bir etken ise toplam enerji transfer yüzeyinin azalması olduğu sonucuna varılmıştır.

- Pompa performans deney çalışmaları için belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz neticesinde deneylerdeki belirsizlik değerinin tüm debilerde ±%0.5'in altında olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle elde edilen deneysel verilerin doğruluğu ortaya konmuştur.
- Sonuç olarak çalışmada HAD-PIV analizlerinin uyumu ve deney setinin veri almaya uygun olarak tasarlanması açısından oldukça başarılı olduğu da görülmüştür. Elde edilen PIV-HAD benzer sonuçları literatürde daha önceki çalışmalarda elde edilen doğruluk oranı ile de uyumlu olduğu görülmüştür.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada 3 farklı pompa çarkı için difüzörlü ve kademeli bir pompada sonuçlar verilmiştir. Deneylerde lazer düzlemi oluşturulması konusunda oldukça zorlanılmış ve çark 2'de ise ara kanat düzlemi arkasında PIV deneylerinde görüntü elde edilememiştir. Lazer kırılmasından dolayı oluşan hataları gidererek, PIV-HAD sonuçları arasındaki farka neden olan bu etkinin azaltılması ile difüzörsüz bir pompa çarkında çalışmalar yapılabilir.

Tez çalışmasında tüm görsel sonuçlar çark çıkış genişliğinin tam ortasındaki düzlemde verilmiştir. Başka bir çalışmada çarkın alt ve üst kapaklarına yakın yüzeylerde analizler ve PIV deneyleri yapılarak bu bölgelerdeki akış yapısına kapakların etkisi de incelenebilir.

Yeni bir PIV ölçüm tekniği olan ve en az 3 kamera ile aynı anda ölçüm yapılabilen hacimsel PIV ölçümleriyle özellikle çark içerisinde ve difüzör-toplayıcı kısmında ölçümler yapılarak bu alanda dünyadaki ilk çalışmalara imza atılabilir.

Özellikle çok kademeli pompalarda akışkanın henüz çark emiş bölgesine girmediği bölgelerde emme haznesinde akış ölçümleri yapılarak buradaki girdap yapısı farklı uzaklıklarda HAD ve PIV ile incelenerek karşılaştırılabilir.

PIV sonuçları ile doğrulama çalışmaları CFX yazılımları ile de yapılabilir ve sonuçlar karşılaştırılabilir.

Optimum çözüm için çarkların en genel tasarımından basşlanarak geometrilerin oluşturulması, parametreler belirlerek ve çeşitli algoritmalar kullanılarak HAD ve deneysel çalışmaların sırasıyla yapılması önerilir.

PIV-HAD sonuçları arasındaki farklılık nedenlerinden birisi olarak pompa alt yatağın kaldırılması gösterilebilir. Zira bununla birlikte titreşim ve stabilite artırıldığı için hatalar meydana gelebilmektedir. Yeni çalışmalarda tam yataklı bir pompada çalışmalar yapılabilir.

Çalışmada deneysel olarak PIV ile elde edilen akış yapılarının türbülans modellerinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi için kullanılabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

Adrian, R. J. ve Yao, C.-S., 1985, Pulsed laser technique application to liquid and gaseous flows and the scattering power of seed materials, *Applied optics*, 24 (1), 44-52.

Adrian, R. J., 2011, Bibliography of Particle Image Velocimetry Using Imaging Methods: 1917-1995; Prepared for the Symposium 25 Years of Particle Image Velocimetry in Aerodynamics, Institute of Aerodynamics and Flow Technology, Göttingen, September 23-25, 2009, DLR, Bibliotheks-und Informationswesen, p.

Akin, O. ve Rockwell, D., 1994, Flow structure in a radial flow pumping system using high-image-density particle image velocimetry, *Journal of fluids engineering*, 116 (3), 538-544.

Aksoy, M., Ozgoren, M., Babayİgİt, O. ve Kocaaslan, O., 2015, PIV Investigation of Flow Structures in a Multistage Centrifugal Pump Impeller. The 6th International Congress of Energy and Environment Engineering and Management (CIIEM15). Paris.

Aksoy, M., Ozgoren, M., Babayİgİt, O. ve Kocaaslan, O., 2016, Experimental flow structures in a centrifugal pump via PIV, *International Symposium of ISB-INMA TEH. Agricultural and mechanical engineering, 27-29 October 2016, Bucharest, Romania. Proceedings*, 301-310.

Aksoy, M. H., 2011, Güneş ve rüzgâr enerjisi ile çalışan su pompalama sisteminin deneysel incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Anonim, 2015, FLUENT User's Guide Version 16.5, *ANSYS Inc.*

Anonim, 2017, http://www.bias.com.tr/: [05.04.2017].

Anonymous, 2017a, https://www.dantecdynamics.com/: [05.05.2017].

Anonymous, 2017b, www.dantecdynamics.com/dynamicstudio:

Anonymous, 2017c, http://opensourcepiv.weebly.com: [04.04.2017].

Anonymous, 2017d, http://www.sciencegallery.com/sts: [04.04.2017].

Anonymous, 2018a, https://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-solving/86855-near-wall-treatment-k-omega-sst.html: [02.02.2018].

Anonymous, 2018b, http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node101.htm: [01.02.2018].

Atif, A., Benmansour, S. ve Bois, G., 2010, Numerical investigation of velocity flow field inside an impeller air model of a centrifugal pump with vaned diffuser interactions and comparison with PIV measurements, *International Journal of Rotating Machinery*, 2010.

Babayigit, O., Kocaaslan, O., Aksoy, M. H., Guleren, K. M. ve Ozgoren, M., 2015, Numerical identification of blade exit angle effect on the performance for a multistage centrifugal pump impeller, *EPJ Web of Conferences*, 02003.

Babayigit, O., Ozgoren, M., Aksoy, M. H. ve Kocaaslan, O., 2017, Experimental and CFD investigation of a multistage centrifugal pump including leakages and balance holes, *Desalination and Water Treatment*, 67, 28-40.

Baysal, B., 1979, Tam Santrifüj Pompalar hesap çizim ve konstrüksiyon özellikleri, *İstanbul*, p. 1-55.

Benra, F.-K. ve Dohmen, H. J., 2008, Investigation on the time-variant flow in a single-blade centrifugal pump, *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics (FLUIDS'08)*.

Bradshaw, P., 1996, Turbulence modeling with application to turbomachinery, *Progress in Aerospace Sciences*, 32 (6), 575-624.

Brodkey, R. S., 1977, Stereoscopic visual studies of complex turbulence shear flows, *International Symposium on Flow Visualization*, 45-49.

Campo Sud, D. d., 2012, Analysis of the suction chamber of external gear pumps and their influence on cavitation and volumetric efficiency.

Cavazzini, G., Pavesi, G. ve Ardizzon, G., 2010, Validation of an analysis method for particle image velocimetry of turbulent unsteady flows in turbomachinery, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 224 (5), 679-689.

Cengel, Y. A., 2010, Fluid mechanics, Tata McGraw-Hill Education, p.

Choi, H.-J., Zullah, M. A., Roh, H.-W., Ha, P.-S., Oh, S.-Y. ve Lee, Y.-H., 2013, CFD validation of performance improvement of a 500 kW Francis turbine, *Renewable Energy*, 54, 111-123.

Choi, Y.-D., Nishino, K., Kurokawa, J. ve Matsui, J., 2004, PIV measurement of internal flow characteristics of very low specific speed semi-open impeller, *Experiments in fluids*, 37 (5), 617-630.

Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. ve Engin, T., 2008, Akışkanlar mekaniği: temelleri ve uygulamaları, Güven Kitabevi, p.

Dai, C. ve Dong, L., 2013, Flow in a low specific speed centrifugal pump using piv, *Advances in Mechanical Engineering*, 5, 178214.

Day, S. W. ve McDaniel, J. C., 2005, PIV measurements of flow in a centrifugal blood pump: steady flow, *Journal of biomechanical engineering*, 127 (2), 244-253.

Dazin, A., Cavazzini, G., Pavesi, G., Dupont, P., Coudert, S., Ardizzon, G., Caignaert, G. ve Bois, G., 2011, High-speed stereoscopic PIV study of rotating instabilities in a radial vaneless diffuser, *Experiments in fluids*, 51 (1), 83-93.

Dudderar, T. ve Simpkins, P., 1977, Laser speckle photography in a fluid medium, *Nature*, 270 (5632), 45.

Dupont, P., Bayeul-Laine, A.-C., Dazin, A., Bois, G., Roussette, O. ve Si, Q., 2014, Leakage flow simulation in a specific pump model, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012012.

Eisele, F. ve McMurry, P., 1997, Recent progress in understanding particle nucleation and growth, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 352 (1350), 191-201.

Elkins, R. E., Jackman, G. R., Johnson, R. R., Lindgren, E. R. ve Yoo, J. K., 1977, Evaluation of stereoscopic trace particle records of turbulent flow fields, *Review of Scientific Instruments*, 48 (7), 738-746.

Ertürk, N., Vernet, A., Ferré, J. A., Castilla, R. ve Codina, E., 2008, Analysis of the turbulent flow of an external gear pump by time resolved particle image velocimetry, *Proceedings of the 14th International Symposium on Application Laser Techniques of Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July*, 7-10.

Ertürk, N., Vernet, A., Castilla, R., Gamez-Montero, P. J. ve Ferre, J. A., 2011, Experimental analysis of the flow dynamics in the suction chamber of an external gear pump, *International Journal of Mechanical Sciences*, 53 (2), 135-144.

Ertürk, N., Vernet, A., Pallares, J., Castilla, R. ve Raush, G., 2013, Small-scale characteristics and turbulent statistics of the flow in an external gear pump by time-resolved PIV, *Flow Measurement and Instrumentation*, 29, 52-60.

Feng, J., Benra, F.-K. ve Dohmen, H.-J., 2009a, Unsteady flow visualization at part-load conditions of a radial diffuser pump: by PIV and CFD, *Journal of visualization*, 12 (1), 65-72.

Feng, J., Benra, F.-K. ve Dohmen, H., 2009b, Comparison of periodic flow fields in a radial pump among CFD, PIV, and LDV results, *International Journal of Rotating Machinery*, 2009.

Fincham, A. ve Spedding, G., 1997, Low cost, high resolution DPIV for measurement of turbulent fluid flow, *Experiments in fluids*, 23 (6), 449-462.

Friedrichs, J. ve Kosyna, G., 2003, Unsteady PIV flow field analysis of a centrifugal pump impeller under rotating cavitation, *Proceedings of CAV2003, Boulder, CO, July*, 8-12.

Gad-el-Hak, M., 1996, Modern developments in flow control, *Applied Mechanics Reviews*, 49 (7), 365-379.

Genceli, O., 2000, Ölçme Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, *ÖZGEÇMİŞ C. Murat Dora*, 6 (1982), 2004-2006.

Genceli, O. F., 2012, Ölçme tekniği:(boyut, basınç, akış ve sıcaklık ölçmeleri), Birsen Yayınevi, p.

Giridharan, G., Lederer, C., Berthe, A., Goubergrits, L., Hutzenlaub, J., Slaughter, M., Dowling, R., Spence, P. ve Koenig, S., 2011, Flow dynamics of a novel counterpulsation device characterized by CFD and PIV modeling, *Medical Engineering and Physics*, 33 (10), 1193-1202.

Grant, I., Smith, G. ve Barnes, F., 1986, Measurement of vortex shedding by particle image velocimetry using a pulsed ruby laser, *3rd International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics*, 19.16.

Grousson, R. ve Mallick, S., 1977, Study of flow pattern in a fluid by scattered laser light, *Applied optics*, 16 (9), 2334-2336.

Guillou, E., Gancedo, M., Gutmark, E. ve Mohamed, A., 2012, PIV investigation of the flow induced by a passive surge control method in a radial compressor, *Experiments in fluids*, 53 (3), 619-635.

Güleren, M., 2003, Santrifüj Pompadaki Durgunluğun Nümerik Analizi, *Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye*.

Holman, J. P. ve Gajda, W. J., 2001, Experimental methods for engineers, McGraw-Hill New York, p.

Houlin, L., Yong, W., Shouqi, Y., Minggao, T. ve Kai, W., 2010, Effects of blade number on characteristics of centrifugal pumps, *Chinese Journal of Mechanical Engineering-English Edition* (6), 742.

Jafarzadeh, B., Hajari, A., Alishahi, M. ve Akbari, M., 2011, The flow simulation of a low-specific-speed high-speed centrifugal pump, *Applied Mathematical Modelling*, 35 (1), 242-249.

Karamanoğlu, Y., Mobedi, M. ve Ertöz, A. Ö., 2006, Pompa Tasarımının Geliştirilmesinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Kullanılması, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 91, 46-55.

Keller, J., Blanco, E., Barrio, R. ve Parrondo, J., 2014, PIV measurements of the unsteady flow structures in a volute centrifugal pump at a high flow rate, *Experiments in fluids*, 55 (10), 1820.

Kline, S. ve McClintock, F., 1953, Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments,'Mechanical Engineering, Vol. 75.

Korkmaz, E., Gölcü, M. ve Kurbanoğlu, C., 2017, Effects of Blade Discharge Angle, Blade Number and Splitter Blade Length on Deep Well Pump Performance, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 10 (2), 529-540.

Krause, N., Pap, E. ve Thévenin, D., 2006, Investigation of off-design conditions in a radial pump by using time-resolved-PIV, *13th International Symposium on*

Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, June, 26-29.

Lavoie, P., Avallone, G., De Gregorio, F., Romano, G. ve Antonia, R., 2007, Spatial resolution of PIV for the measurement of turbulence, *Experiments in fluids*, 43 (1), 39-51.

Li, D., Wang, H., Qin, Y., Wei, X. ve Qin, D., 2018, Numerical simulation of hysteresis characteristic in the hump region of a pump-turbine model, *Renewable Energy*, 115, 433-447.

Li, W.-G., 2000, Effects of viscosity of fluids on centrifugal pump performance and flow pattern in the impeller, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21 (2), 207-212.

Li, W., Ji, L., Shi, W., Zhou, L. ve Zhang, Y., 2016a, PIV measurement of internal flow in mixed-flow pump under different flow rate conditions, *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32 (24), 82-88.

Li, W., Zhou, L., Shi, W.-d., Ji, L., Yang, Y. ve Zhao, X., 2017, PIV experiment of the unsteady flow field in mixed-flow pump under part loading condition, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 83, 191-199.

Li, Y., Yuan, S., Wang, X., Tan, S. K. ve Mao, J., 2016b, Comparison of flow fields in a centrifugal pump among different tracer particles by particle image velocimetry, *Journal of fluids engineering*, 138 (6), 061105.

Ling, Z., Weidong, S., Weidong, C. ve HongBin, Y., 2015, CFD investigation and PIV validation of flow field in a compact return diffuser under strong part-load conditions, *Science China Technological Sciences*, 58 (3), 405-414.

Liu, H.-l., Yun, R., Kai, W., WU, D.-h., RU, W.-m. ve TAN, M.-g., 2012, Research of inner flow in a double blades pump based on OpenFOAM, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 24 (2), 226-234.

Liu, H., Wu, X. ve Tan, M., 2013, Numerical investigation of the inner flow in a centrifugal pump at the shut-off condition, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 51.

Mattern, P., Gabi, M. ve Kriegseis, J., 2017, A plane-to-plane comparison of Common Averaged vs. POD patterns of Time-Resolved Stereo-PIV data within a pump, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 61, 321-329.

Meng, F., Zhang, H., Yang, F., Hou, X., Lei, B., Zhang, L., Wu, Y., Wang, J. ve Shi, Z., 2017, Study of efficiency of a multistage centrifugal pump used in engine waste heat recovery application, *Applied Thermal Engineering*, 110, 779-786.

Meynart, R., 1980, Flow velocity measurement by a speckle method, *2nd European Congress on Optics Applied to Metrology*, 25-29.

Meynart, R., 1984, Diffraction halo in speckle photography, *Applied optics*, 23 (14), 2235-2236.

Nataraj, M. ve Ragoth Singh, R., 2014, Analyzing pump impeller for performance evaluation using RSM and CFD, *Desalination and Water Treatment*, 52 (34-36), 6822-6831.

Okbaz, A., Pınarbaşı, A., Olcay, A. B. ve Aksoy, M. H., 2018, An experimental, computational and flow visualization study on the air-side thermal and hydraulic performance of louvered fin and round tube heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121, 153-169.

Olcay, A. B., Malazi, M. T., Okbaz, A., Heperkan, H., Firat, E., Ozbolat, V., Gokcen, M. G. ve Sahin, B., 2017, Experimental and Numerical Investigation of a Longfin Inshore Squid's Flow Characteristics, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 10 (1), 21-30.

Özer, Ö., Kumlutaş, Dilek ve Karadeniz, Ziya Haktan, 2013, BİR SANTRİFÜJ FANIN PARÇACIK GÖRÜNTÜLEMELİ HIZ ÖLÇÜMÜ (PIV) YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ.

Paone, N., Riethmuller, M. ve Van den Braembussche, R., 1989, Experimental investigation of the flow in the vaneless diffuser of a centrifugal pump by particle image displacement velocimetry, *Experiments in fluids*, 7 (6), 371-378.

Pavesi, G., 2006, Impeller volute and diffuser interaction, *PADOVA UNIV (ITALY)*.

Pedersen, N. ve Jacobsen, C., 2000, 'PIV Investigation of the Internal Flow Structure in a Centrifugal Pump Impeller, *Proceedings of the 10th Intl. Symp. on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 28.23.

Pfleiderer, C., 1949, Centrifugal Pump for Liquids and Gases, Springer, Berlin, Germany.

Pfleiderer, C. ve Petermann, H., 1985, Turbomacchine, Tecniche nuove, p.

Pınarbaşı, A. ve Johnson, M., 1995, A Study of Reynolds Stress Dissipation and Loss Generation in a Centrifugal Compressor Vaneless Diffuser, ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition.

Prandtl, W. ve Murschhauser, H., 1908, Über das Spratzen der sauren Vanadate einwertiger Metalle.(Nachtrag), *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 60 (1), 441-445.

Qian, K., Feng, Z., Ru, W., Zeng, P. ve Yuan, H., 2007, PIV pictures of stream field predict haemolysis index of centrifugal pump with streamlined impeller, *Journal of medical engineering & technology*, 31 (4), 239-242.

Ranade, V., Perrard, M., Le Sauze, N., Xuereb, C. ve Bertrand, J., 2001, Trailing vortices of Rushton turbine: PIV measurements and CFD simulations with snapshot approach, *Chemical Engineering Research and Design*, 79 (1), 3-12.

Royer, H., 1977, Holographic velocimetry of submicron particles, *Optics Communications*, 20 (1), 73-75.

Scheinherr, A., 2011, Usage Of Pıv In Radıal Pump Model, *Západočeská univerzita v Plzni Univerzitní*, 8 (14), 306-3011.

Scheit, C., Karic, B. ve Becker, S., 2012, Effect of blade wrap angle on efficiency and noise of small radial fan impellers—a computational and experimental study, *Journal of Sound and Vibration*, 331 (5), 996-1010.

Sharp, K. ve Adrian, R., 2001, PIV study of small-scale flow structure around a Rushton turbine, *AIChE Journal*, 47 (4), 766-778.

Shi, B., jia Wei, J. ve Zhang, Y., 2015, Phase discrimination and a high accuracy algorithm for PIV image processing of particle–fluid two-phase flow inside high-speed rotating centrifugal slurry pump, *Flow Measurement and Instrumentation*, 45, 93-104.

Shi, B., Wei, J. ve Zhang, Y., 2017, A novel experimental facility for measuring internal flow of Solid-liquid two-phase flow in a centrifugal pump by PIV, *International Journal of Multiphase Flow*, 89, 266-276.

Shouqi, L. H. W. Y. Y. ve Kai, T. M. W., 2010, Effects of Blade Number on Characteristics of Centrifugal Pumps, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 23 (6), 1.

Simoes, M. R., Montojos, B. G., Moura, N. R. ve Su, J., 2009, Validation of turbulence models for simulation of axial flow compressor, *20th International Congress of Mechanical Engineering*.

Sinha, M., Pinarbasi, A. ve Katz, J., 2001, The flow structure during onset and developed states of rotating stall within a vaned diffuser of a centrifugal pump, *Journal of Fluids Engineering*, 123 (3), 490-499.

Soares, R., Barbosa, H., Braga, R., Botega, J. ve Horgan, G., 2013, Biospeckle PIV (Particle Image Velocimetry) for analyzing fluid flow, *Flow Measurement and Instrumentation*, 30, 90-98.

Stickland, M., Scanlon, T., Waddell, P., Fernandez-Francos, J. ve Blanco, E., 2003, Measurement of rotating flows using PIV and image derotation, *Experiments in fluids*, 34 (2), 304-306.

Tabatabaei, M. M., Okbaz, A. ve Olcay, A. B., 2015, Numerical investigation of a longfin inshore squid's flow characteristics, *Ocean Engineering*, 108, 462-470.

Tabib, M. V., Lane, G., Yang, W. ve Schwarz, M. P., 2012, CFD study of single phase and multiphase (liquid–liquid) pump-mixer: Analyzing design parameters, flow structures and turbulence, *Chemical engineering science*, 80, 55-69.

Tian, Y., Ma, H. ve Ma, R., 2017, Stereoscopic PIV measurements of the flow field in a turbine cascade, *Journal of Thermal Science*, 26 (1), 89-95.

Türkmen, B., 2009, Pompa Tesisatlarında Enerji Verimliliği ve Sistem Seçimi, *Pompa, Boru ve Tesisat Yaklaşımı, Tesisat Mühendisliği* (121), 5-8.

Unadkat, H., Rielly, C. D. ve Nagy, Z. K., 2011, PIV study of the flow field generated by a sawtooth impeller, *Chemical engineering science*, 66 (21), 5374-5387.

Uzol, O., Chow, Y.-C., Katz, J. ve Meneveau, C., 2002, Experimental investigation of unsteady flow field within a two stage axial turbomachine using particle image velocimetry, *ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*, 1201-1214.

Visser, F. ve Jonker, J. B., 1995, Investigation of the relative flow in low specific speed model centrifugal pump inpeller using sweep-beam particle image velocimetry, *Proceedings Seventh International symposium on Flow Visualization*.

Wang, A., Yan, X., Wang, L., Cao, Y. ve Liu, J., 2015, Effect of cone angles on single-phase flow of a laboratory cyclonic-static micro-bubble flotation column: PIV measurement and CFD simulations, *Separation and Purification Technology*, 149, 308-314.

Wang, C., Shi, W., Wang, X., Jiang, X., Yang, Y., Li, W. ve Zhou, L., 2017, Optimal design of multistage centrifugal pump based on the combined energy loss model and computational fluid dynamics, *Applied Energy*, 187, 10-26.

Westra, R. W., 2008, Inverse-design and optimization methods for centrifugal pump impellers.

Willert, C. E. ve Gharib, M., 1991, Digital particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, 10 (4), 181-193.

Woisetschläger, J. ve Göttlich, E., 2007, Recent Applications of Particle Image Velocimetry to Flow Research in Thermal Turbomachinery, In: Particle Image Velocimetry, Eds: Springer, p. 311-331.

Wu, Y., Liu, S., Yuan, H. ve Shao, J., 2011, PIV measurement on internal instantaneous flows of a centrifugal pump, *Science China Technological Sciences*, 54 (2), 270-276.

Wuibaut, G., Bois, G., El Hajem, M., Akhras, A. ve Champagne, J., 2006, Optical PIV and LDV comparisons of internal flow investigations in SHF impeller, *International Journal of Rotating Machinery*, 2006.

Xu, Y., Wang, J.-g., Zhao, S.-l. ve Bai, Z.-s., 2015, PIV experimental study on the flow field in the rotor zone of an annular centrifugal contactor, *Chemical Engineering Research and Design*, 94, 691-701.

Xuelong, Y., Xinping, L. ve Longzhou, X., 2013, Influence of different turbulence models on simulation of internal flow field of jet pump, *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 31 (2), 98-102.

Yagmur, S., Dogan, S., Aksoy, M. H., Goktepeli, I. ve Ozgoren, M., 2017, Comparison of flow characteristics around an equilateral triangular cylinder via PIV and Large Eddy Simulation methods, *Flow Measurement and Instrumentation*, 55, 23-36.

Yalçın, K., 1998, Hacımsal ve Santrifüj Pompalar, *İstanbul*, p. 229-520.

Yalçın, M., 2015, Radyal Pompa Çarklarındaki Daimi Olmayan Akışın Deneysel İncelenmesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Yamane, T., Nishida, M., Kawamura, H., Miyakoshi, T. ve Yamazaki, K., 2013, Flow visualization for the implantable ventricular assist device EVAHEART®, *Journal of Artificial Organs*, 16 (1), 42-48.

Yang, H., Xu, H. ve Liu, C., 2012a, Flow measurements in a model centrifugal pump by 3-D PIV, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 062053.

Yang, M. G., Liu, D., Yang, B. ve Kang, C., 2007, Research of the PIV Technology Used to Measure the Liquid-solid Two-phase Flow in the Pump, *AIP Conference Proceedings*, 425-429.

Yang, S.-S., Derakhshan, S. ve Kong, F.-Y., 2012b, Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance, *Renewable Energy*, 48, 507-513.

Yano, M. ve Fujita, I., 1977, Holographic flow velocity analysis, *Proceedings of International Symposium on Flow Visualization (in English), Tokyo*, 271-276.

Zhao, B., Yuan, S., Liu, H., Huang, Z. ve Liu, D., 2009, Numerical simulation and particle image velocimeter measurement for unsteady turbulent flow in double-channel pump, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 45 (9), 82-84.

Zhou, L., Shi, W., Lu, W., Hu, B. ve Wu, S., 2012, Numerical investigations and performance experiments of a deep-well centrifugal pump with different diffusers, *Journal of Fluids Engineering*, 134 (7), 071102.

Zhou, L., Shi, W., Cao, W. ve Yang, H., 2015, CFD investigation and PIV validation of flow field in a compact return diffuser under strong part-load conditions, *Science China Technological Sciences*, 58 (3), 405-414.

Zhu, L., Zhang, X. ve Yao, Z., 2010, Shape optimization of the diffuser blade of an axial blood pump by computational fluid dynamics, *Artificial organs*, 34 (3), 185-192.

Zou, Y., Ye, S.-S., Wang, Y.-D. ve Fei, W.-Y., 2016, CFD simulation and PIV measurement of liquid–liquid two-phase flow in pump-mix mixer, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 60, 15-25.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Muharrem Hilmi Aksoy
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Konya-1985
Telefon	**:**	0555 202 73 21 – 0332 223 27 20
Faks	**:**	
e-mail	**:**	muharremaksoy@selcuk.edu.tr muharremaksoy@gmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	**Meram Anadolu Lisesi, Meram, Konya**	**2003**
Üniversite	:	**Başkent Ün. Makine Mühendisliği (Burslu), Ankara**	**2008**
Yüksek Lisans	:	**Selçuk Üniversitesi Makina Müh. A.B.D.**	**2011**
Doktora		**Selçuk Üniversitesi Makina Müh. A.B.D.**	**Devam ediyor**

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2008-2009	**Selmak Mühendislik**	**Tesisat Mühendisi**
2009-….	**S.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü**	**Araştırma Görevlisi**

UZMANLIK ALANI

Yenilenebilir Enerji Sistemleri,
Deneysel Akışkanlar Mekaniği.

YABANCI DİLLER

İngilizce YÖKDİL 2017: 81.25 Puan

YAYINLAR

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

Kose F, **Aksoy M.H.**, Ozgoren M. An Assessment of Wind Energy Potential to Meet Electricity Demand and Economic Feasibility in Konya, Turkey, International Journal of Green Energy, 11(6), 559-576, 2014. **(SCI)**

O. Solmaz, M. Ozgoren, **M.H. Aksoy**, Hourly cooling load prediction of a vehicle in the southern region of Turkey by Artificial Neural Network, Energy Conversion and Management, 82, 177-187, 2014. ISSN 0196-8904. **(SCI)**

O. Kocaaslan, M. Ozgoren, **M. H. Aksoy**, O. Babayigit "Experimental and Numerical Investigation of Coating Effect on Pump Impeller and Volute" Journal of Applied Fluid Mechanics. Vol. 9, No. 5, pp. 2475-2487, 2016. **(SCI)**

Babayigit O, Ozgoren M, **Aksoy M.H.**, Kocaaslan O, Experimental and CFD Investigation of A Multistage Centrifugal Pump Including Leakages and Balance Holes, Desalination and Water Treatment 67 (2017) 28–40.**(SCI)**

M. Ozgoren, **M.H. Aksoy,** C. Bakir, S. Dogan, "Experimental Performance Investigation of Photovoltaic/Thermal (PV-T) System", European Physical Journal EPJ Web of Conferences 45 01106 (2013) DOI: http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20134501106

M. Ozgoren, S. Dogan, A. Okbaz, **M. H. Aksoy,** B. Sahin and H. Akıllı, Comparison of Flow Characteristics of Different Sphere Geometries Under the Free Surface Effect, European Physical Journal EPJ Web of Conferences 45 01022 (2013) DOI: http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20134501022)

O. Babayigit, **M. H. Aksoy**, M. Ozgoren and O. Solmaz, "Investigation of Absorption Cooling Application Powered by Solar Energy in the South Coast Region of Turkey", European Physical Journal EPJ Web of Conferences, 45 01100 (2013) DOI: http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20134501100)

O. Babayigit, O. Kocaaslan **M.H. Aksoy**, K.M. Güleren M. Ozgoren "Numerical identification of blade exit angle effect on the performance for a multistage centrifugal pump impeller" European Physical Journal Web of Conferences Volume 92, 2015 http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20159202003

S Yagmur, S Dogan, **M.H. Aksoy**, E Canli , M. Ozgoren Experimental and Numerical Investigation of Flow Structures around Cylindrical Bluff Bodies. The European Physical Journal Conferences 2015; 92,02113. DOI: 10.1051/epjconf/20159202113

B. Akdemir, S Doğan, **M.H. Aksoy**, E Canli, M Özgören "Artificial frame filling using adaptive neural fuzzy inference system for particle image velocimetry dataset." Proceedings of the SPIE, Volume 9443, id. 94431R 8 pp. (2015) doi:10.1117/12.2179689.

M. N. Kaya, **M. H. Aksoy**, Kose F. Renewable Energy In Turkey: Potentıal, Current Status And Future Aspects, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 2017, 15(1), 65-69, ISSN: 1584-2665.

Dogan S, Yagmur S., **Aksoy M.H.**, Göktepeli İ. Ozgoren M (2017). Comparison of flow characteristics around an equilateral triangular cylinder via PIV and large eddy simulation methods. flow measurement and instrumentation, 55, 23-36., 2017, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2017.04.001 **(SCI)**

Abdulkerim Okbaz, Ali Pınarbaşı, Ali Bahadır Olcay, **Muharrem Hilmi Aksoy**, (2018) An experimental, computational and flow visualization study on the air-side thermal and hydraulic performance of louvered fin and round tube heat exchangers International Journal of Heat and Mass Transfer 121, 153-169, 2018 **(SCI)**

Tez Çalışmasından Yapılan Uluslararası Bildiriler

Muharrem H. Aksoy, M. Ozgoren, O. Babayigit, O. Kocaaslan, Particle Image Velocimetry Measurements of Internal Flow Structures in a Centrifugal Pump, International Conference on the Sustainable Energy and Environment

Development, May 17th– 19th, 2016, Krakow, Poland. Book of abstract pp25. (Doktora Tez çalışmasından yapılmıştır.)

Aksoy M. H., Ozgoren M. Babayigit O, Kocaaslan O.,Experimental Flow Structures In A Centrifugal Pump Via PIV, ISB-INMA TEH International Symposium of Agricultural And Mechanical Engineering, Proseedings Book 301-310, 27-29 October 2016, Bucharest, Romania. (Doktora Tez çalışmasından yapılmıştır.)