



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**NEWTON TİPİ OLMAYAN AKIŞKAN
KULLANARAK KALP DESTEK POMPASI
PERFORMANSININ SAYISAL VE DENEYSEL
OLARAK BELİRLENMESİ**

Ahmet Mete SABAH

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

OCAK-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet Mete SABAH tarafından hazırlanan "Newton Tipi Olmayan Akışkan Kullanarak Kalp Destek Pompası Performansının Sayısal ve Deneysel Olarak Belirlenmesi" adlı tez çalışması 09/01/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY

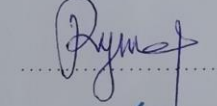
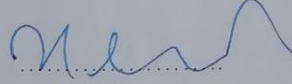
Danışman

Prof. Dr. Rafet YAPICI

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Dilek Nur ÖZEN

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Yakup KARA
Enstitü Müdürü

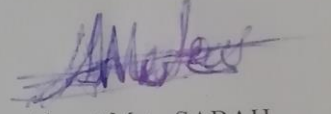
Bu tez çalışması Bilimsel Araştırma Projesi Komisyonu tarafından 18201133 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Ahmet Mete SABAH

Tarih: 09.01.2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NEWTON TİPİ OLMAYAN AKIŞKAN KULLANARAK KALP DESTEK POMPASI PERFORMANSININ SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Ahmet Mete SABAH

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Rafet YAPICI

2019, 31 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Rafet YAPICI
Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY
Dr. Öğr. Üyesi Dilek Nur ÖZEN**

Kalp rahatsızlıkları içerisinde önemli bir yere sahip olan kalp yetmezliği, insan kalbinin çeşitli nedenlerden dolayı vücuda ihtiyaç duyduğu yeterli kanı pompalayamaması durumudur. Bu hastalığa sahip bireylere yardımcı olmak amacıyla ventriküler (karıncık) destek cihazları (VAD) adı verilen mekanik sistemler geliştirilmiştir. Sol ventriküler destek cihazları, kalbin sol karıncığından kanın aort atar damarına pompalamasına yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmada, tasarlanmış olan karışık akışlı bir sol ventriküler kalp destek pompasının hidrodinamik performansı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) metodu ve deneysel çalışmalar ile belirlendi. Analizlerde çalışma akışkanı olarak kana benzer reolojik özellikler gösteren newton tipi olmayan ksantan-su karışımı (kütlece %0,06 ksantan sakızı) kullanıldı. 5000, 6000 ve 7000 dev/dak dönme hızlarında pompanın debisine bağlı olarak basıncını ve verimini gösteren performans eğrileri elde edildi. Sonuçların karşılaştırılması amacıyla newton tipi bir akışkan olan su-gliserin çözeltisi (hacimce %40 gliserin ve %60 su) ile de HAD analizleri ve deneysel çalışmalar yapıldı. Pompa, deneysel çalışma ve sayısal analiz sonuçlarına göre 5 L/dak debide 5000 dev/dak dönme hızında 88,39 mmHg basınç farkı değerine ulaşmıştır. Bu noktadaki pompa hidrolik verimi %52,74, genel verimi ise %18,45 olarak belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Karışık akışlı pompalar, Ksantan-su çözeltisi, Newton tipi olmayan akışkan, Sol ventriküler kalp destek pompası.

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL DETERMINATION OF THE PERFORMANCE OF HEART ASSIST PUMP USING A NON-NEWTONIAN FLUID

Ahmet Mete SABAH

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Rafet YAPICI

2019, 31 Pages

Jury

**Prof. Dr. Rafet YAPICI
Prof. Dr. Halil Kürşad ERSOY
Asst. Prof Dr. Dilek Nur ÖZEN**

Heart failure, which has an important place in heart diseases, is a health condition that human heart cannot pump enough blood for various reasons. Mechanical systems called ventricular assist devices (VADs) have been developed assist individuals with this disease. Left ventricular assist devices help blood to be pumped from the left ventricle to the aorta.

In this study, the hydrodynamics performance of a mixed flow left ventricular heart assist pump was determined by the computational fluid Dynamics (CFD) method and experimental studies. . In the analysis, the working fluid was used a non-newtonian mixture of water and xanthan solution (by mass 0,06% xanthan gum) which has similar rheological properties to blood, was used as the working fluid. Performance curves of pressure, flow and efficiency of the pump were obtained at rotational speeds of 5000, 6000 and 7000 rpm. In order to compare the results, CFD analysis and experimental studies are repeated with water-glycerin solution (40% glycerin and 60% water) with a newtonian fluid. The pump reached a pressue value of 88,39 mmHg at a rotation speed of 5000 rpm at 5L/ min. At this working point, the pump hydraulic efficiency was determined as 52,74% and the overall efficiency was 18,45%.

Keywords: Computational fluid Dynamics (CFD), Left ventricular heart assist pump, Mixed flow pumps, Non-newtonian fluids, Xanthan gum-water solution

ÖNSÖZ

Kalp yetmezliği hastalarının tedavilerinde kullanılan kalp destek pompalarının üretimleri henüz ülkemizde gerçekleştirilmemektedir. Yüksek katma değerlerine sahip bu ürünlerin ülkemizde üretilmesi ve geliştirilmesi ile dünya pazarında, ülke ekonomisinin daha güçlü yerlerde olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın planlanmasında ve gerçekleştirilmesinde tüm ilgisini ve desteğini üzerimden eksik etmeyen danışmanım sayın Prof. Dr. Rafet YAPICI'ya, HAD analizlerinin ve deneylerin yapılmasında bana yol gösteren ve yardımcı olan Arş. Gör. Ömer İNCEBAY'a ve çalışmayı maddi olarak destekleyen Konya Teknik Üniversitesi BAP koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Ahmet Mete SABAH
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| ÖNSÖZ | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | viii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI | 3 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 11 |
| 3.1. Materyal | 11 |
| 3.2. Yöntem..... | 13 |
| 3.2.1. Ksantan sakızının reolojisi | 13 |
| 3.2.2. Deneysel yöntem..... | 15 |
| 3.2.3. HAD simülasyonu..... | 17 |
| 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... | 20 |
| 4.1. Pompanın HAD Analiz ve Deneysel Performansının Belirlenmesi | 20 |
| 4.1.1. Su-gliserin Çözeltilisi ile Yapılan Deneysel Çalışmanın Sonuçlarının HAD Analizi Sonuçları ile Karşılaştırılması | 20 |
| 4.1.2. Ksantan-su Karışımı ile Yapılan Deneysel Çalışmanın Sonuçlarının HAD Analizi Sonuçları ile Karşılaştırılması | 22 |
| 4.1.3. Ksantan-su Karışımı ile Su-gliserin Çözeltilisi Sonuçlarının Yorumlanması | 24 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 28 |
| 5.1 Sonuçlar | 28 |
| 5.2 Öneriler | 28 |
| KAYNAKLAR | 30 |
| ÖZGEÇMİŞ | 32 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ΔP : Toplam Basınç Farkı

Q: Debi

T: Tork (Nm)

ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

μ : Dinamik Viskozite (Pa.s)

Ω : Açısal Hız (rad/s)

TŞ: Türbülans Şiddeti (Boyutsuz)

η : Genel Verim (Boyutsuz)

η_h : Hidrolik Verim (Boyutsuz)

Ψ : Basınç Katsayısı (Boyutsuz)

Φ : Debi Katsayısı (Boyutsuz)

Kısaltmalar

BIVAD: Sağ ve Sol Karıncık Destek Cihazları (Bi Ventricular Assist Device)

HAD: Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği

LVAD: Sol Karıncık Destek Cihazı (Left Ventricular Assist Device)

RVAD: Sağ Karıncık Destek Cihazı (Right Ventricular Assist Device)

VAD: Karıncık Destek Cihazı (Ventricular Assist Device)

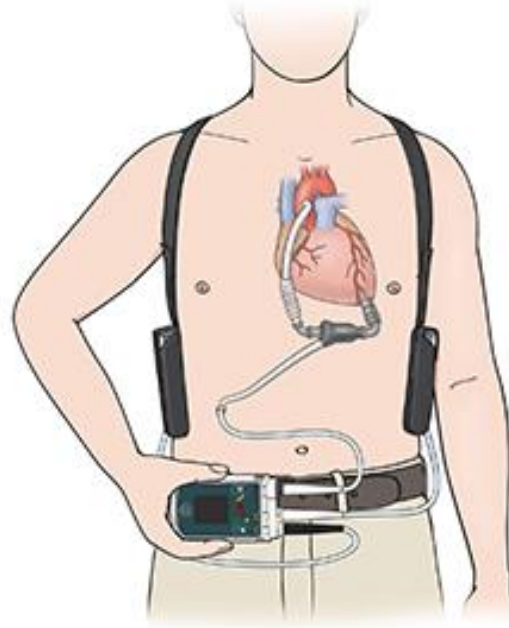
1. GİRİŞ

Kalp-damar hastalıkları dünyada en çok ölüme neden olan rahatsızlıklardan birisidir (WHO,Fact Sheets, 2009). Dünya Sağlık Örgütü tarafından 2015 yılında yapılan bir çalışmada dünyada kalp ve damar hastalıkları nedeniyle 17,7 milyon insanın öldüğü tespit edilmiş ve bu rakam o yıl içerisinde dünyada ölen insanların %31'ine tekabül etmektedir. Kalp ve damar hastalıklarının içeriğinde bulunan formlarda ise bu oranlar değişiklik göstermektedir. Ölüme neden olma açısından sıralandığında felçten (%16,5) sonra en önemli yüzdeyi kalp yetmezliği (%8,5) almaktadır (American Heart Association 2017).

Kalp rahatsızlıkları içerisinde önemli bir yere sahip olan kalp yetmezliği, insan kalbinin çeşitli nedenlerden dolayı vücuda ihtiyaç duyduğu yeterli kanı pompalayamaması olayıdır. Bu hastalığa sahip bireylerde kan akışı vucutta ve kalpte yavaştır ve hastalık ilerledikçe yavaşlamaya devam etmektedir. Bu durum ise doku ve organların ihtiyacı olan besin ve oksijen maddelerinin gerekli sürede taşınamamasına neden olmaktadır. Yeni doğan çocuklardan yetişkin bireylere kadar geniş bir yelpazede görülen bu hastalık kalp nakli gerçekleştirilemediği için genellikle ölüme sonuçlanmaktadır. Ölümlerin önüne geçilebilmesi için araştırmacılar tarafından geliştirilen mekanik sistemlere ventriküler (karıncık) destek cihazları (VAD) adı verilmektedir. Bu sistemler vücutta pompa görevi gören kalbin, akış özelliklerini taklit edebilecek şekilde tasarlanmış cihazlardan oluşmaktadır. Destek cihazları kullanım alanlarına göre çeşitli gruplara ayrılmaktadır. (LVAD, RVAD, BIVAD vb.).

Sağ ventriküler destek cihazları (RVAD), pulmoner arterlerin kanı akciğere pompalamasına yardımcı olan sistemlerdir. Sol ventriküler destek cihazları (LVAD), kalpten aort damarına kanın taşınmasına yardımcı olmak için tasarlanmış elektromekanik sistemlerdir. Bi ventriküler destek cihazları (BIVAD) ise sol ve sağ ventriküler destek cihazlarının pompalama fonksiyonunu uygulamak amacıyla kullanılan sistemlerdir.

Bir sol ventriküler destek cihazı Şekil 1.1'de görüldüğü gibi, pompa, güç kaynağı ve kontrol biriminden oluşmaktadır. Güç kaynağı ve kontrol ünitesi vücudun dışında olurken, pompa vücudun içinde veya dışında olabilmektedir.



Copyright 2013 Thoratec Corporation

Şekil 1.1. Bir sol karıncık destek cihazının vücuttaki yeri ve bağlantısı (Anonim)

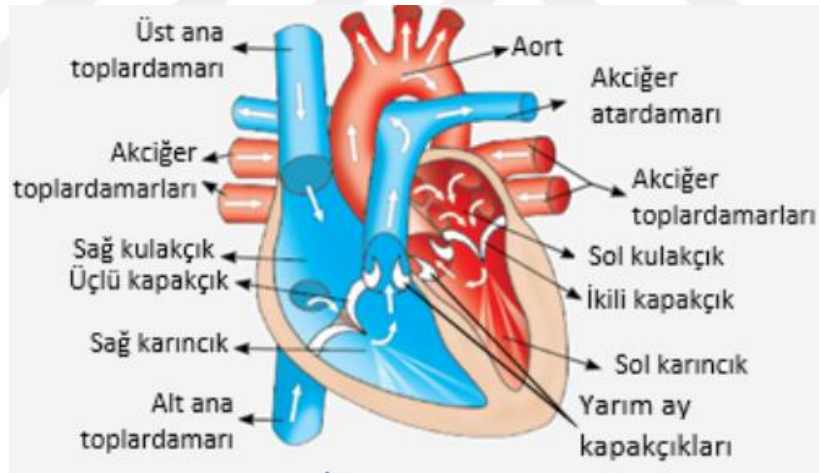
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), akışkanlar mekaniği problemlerinin analizi ve çözümlenmesi için sayısal yöntemlerin kullanıldığı bir akışkanlar mekaniği bilimi dalıdır. Sıvı ve gazların katı yüzeyler ile etkileşimlerini bilgisayar yardımı ile çözümlenmeye olanak sağlamaktadır. HAD tasarım öncesi ve sonrası araştırmacılara büyük avantajlar sunmaktadır. Kalp destek pompalarının tasarımlarının optimizasyonu, iyileştirilmelerinin yapılması ve akış ile ilgili detaylı sonuçların elde edilmesi için HAD metodu günümüzde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. HAD metodlarıyla tasarlanan kalp destek pompalarının çalışma karakteristikleri hakkında ön bilgiler alınmaktadır.

Tasarımı ve imalatı yapılmış olan karışık akışlı (heliko-santrifüj) kan pompasının newton tipi ve newton tipi olmayan sıvılarda hidrodinamik davranışlarının analizi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyon teknikleri kullanılarak yapılacaktır. Ardından deneysel çalışmaların yapılması ve elde edilen verilerin HAD çalışmasıyla karşılaştırılması ile doğruluklarının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde, kalbin yapısı ve çalışma prensibi, kalp yetmezliği ve kalp destek pompaları üzerine genel literatür araştırması, üçüncü bölümünde, heliko-santrifüj karışık akışlı kalp destek pompasının tasarımı, HAD simülasyon modellemesi ve deneysel çalışmaları, dördüncü bölümünde HAD simülasyon ve deney sonuçlarının tartışılmasını ve son bölümünde ise çalışma ile ilgili sonuçlar ve önerilerin verilmesi olmak üzere toplam beş aşamadan oluşmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kalp, göğüs boşluğunun merkezinde, göğüs kemiğinin altında sol akciğere daha yakın yer alan, yaklaşık olarak bir yumruk büyüklüğünde kaslı bir organdır. Kalp üstte iki kulakçık, altta iki karıncık olmak üzere dört odacıktan oluşmaktadır. Sol kulakçık ve sol karıncıkta temiz kan (oksijen zengin kan), sağ kulakçık ve sağ karıncıkta ise kirli kan (karbondioksit zengin kan) bulunmaktadır. Kulakçıklar ile karıncıklar arasında ve atardamarların karıncıktan çıktığı noktalarda kapakçıklar bulunmaktadır. Triküspit (Üçlü kapakçık), sağ kulakçık ile sağ karıncık arasında karıncık yönüne açılan kapakçıktır. Kanın sağ karıncıktan sağ kulakçığa geri dönmesini engeller. Biküspit (İki kapakçık=mitral), sol kulakçık ile sol karıncık arasında karıncık yönüne açılan kapakçıktır. Kanın sol karıncıktan sol kulakçığa geri dönmesini engeller. Yarım ay kapakçıkları, kalpten çıkan kanı götüren aort ve akciğer atardamarlarının başlangıcında bulunur (Şekil 2.1). Kalpten atardamlara pompalanan kanın kalbe geri dönmesini engeller (Önal, 2015).



Şekil 2.1. Kalbin Yapısı (Anonim)

Kalp çalışması, kalp kaslarının kasılıp gevşemesi ile gerçekleşir. Kalbin kulakçıkları aynı anda kasılırken bu sırada karıncıklar gevşer, karıncıklar kasıldığında ise kulakçıklar gevşer. Sağlıklı ergin bir insanın kalbi dakikada 70-80 kez atmaktadır (Önal, 2015).

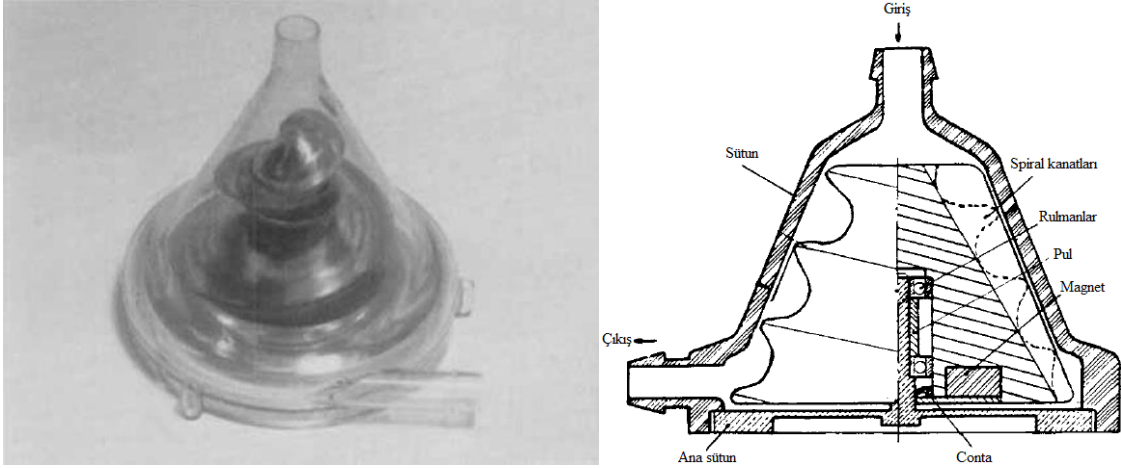
Pompalar sıvıya enerji veren makinalardır. Yani, sıvıların basıncını ve toplam enerjisini arttırarak, bir yerden diğer bir yere taşınmasına yardımcı olan bir araçtır. VAD'lerde ise pompalar kanın aorta veya akciğere ulaştırılmasına yardımcı olan

elemanlardan biridir. Kalp destek pompaları santrifüj, eksenel ve karışık akışlı olmak üzere üç tipten oluşmaktadır. Bu pompalar kullanım alanlarına göre avantajlar ve dezavantajlara sahiptir.

Santrifüj pompalar, güvenli ve daha az travmatiktir. Çünkü büyük miktarda akışkanı pompalayamazlar ve giriş portunda önemli derecede düşük basınç veya çıkış portunda yüksek basınç oluşturmazlar (Leme ve ark., 2013). Genel özellikleri ise debileri düşük, basınçları yüksektir. Eksenel pompalar, küçük hacim, yüksek verimlilik ve ağırlıklarının hafif olması nedeniyle VAD sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang ve ark., 2008). Bu tip pompaların genel özellikleri, debilerinin yüksek ve basınçlarının düşük olmasıdır. Karışık akışlı pompalar ise eksenel ve santrifüj pompaların arasında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Yani orta debi ve orta basınç özelliklerinin istenildiği yerlerde kullanılabilirler (Goncaoğlu, 2012).

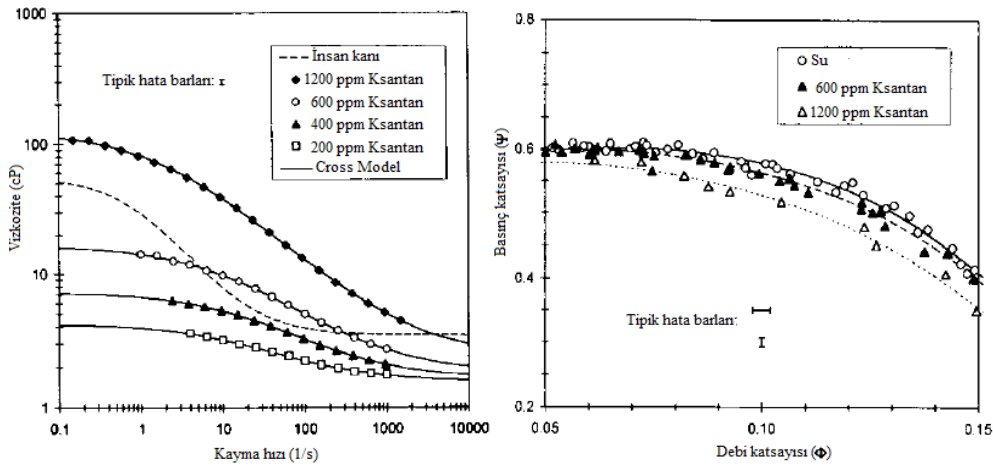
Mann ve ark. (1987) elektrikli ventriküler destek cihazlarında, newton tipi olan su-gliserol çözeltisini, newton tipi olmayan polimer çözeltisini ve sığır kanını hidrodinamik davranışlarını incelemek amacıyla deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada araştırmacılar, su-gliserol çözeltisinin sığır kanına yakın akış özelliklerini doğru olarak modelleyemediğini gözlemlemiştir. Bu durumun aksine newton tipi olmayan polimer çözeltisinin sığır kanına daha yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Fakat sığır kanında orta sistol bölgesinde olağan döngünün devam ettiği görülürken, su-gliserol çözeltisi ve polimer çözeltisinde bu durum gözlemlenmemiştir.

Andrade ve ark. (1996) santrifüj ve eksenel pompa fonksiyonlarını bir arada kullanabilen bir pompa tasarımı gerçekleştirmişlerdir (Şekil 2.2). Prototip üzerinde yapılmış olan deneysel çalışmalarda akışkan olarak sığır kanı ve su-gliserin çözeltisi (%40 oranında gliserin) kullanılmıştır. Çalışmada, çark tasarımı ana çalışma noktasında 1500 dev/dak dönme hızında (Su-gliserin için debi 5 L/dk ve 100 mm Hg basınç, sığır kanı için debi 5 L/dk ve 350 mm Hg basıncın altındaki değerler) laboratuvar ortamında deneysel çalışma ile pompanın hidrodinamik ve hemoliz davranışlarının incelemeleri yapılmıştır. Deney düzeneğinde hidrodinamik davranışları incelemek için pompa gövdesi ile kanatlar arasında 0.5-2 mm arasında 4 farklı boşluk değeri bulunan prototipler hazırlanmıştır. Bu prototipler 1000-3000 dev/dak arasındaki dönme hızlarında çalıştırılmıştır. Çalışma sonucunda pompa gövdesi ile kanatlar arasındaki açıklık arttıkça hidrodinamik performansın azaldığı ve hemoliz etkisinin arttığı gözlemlenmiştir.



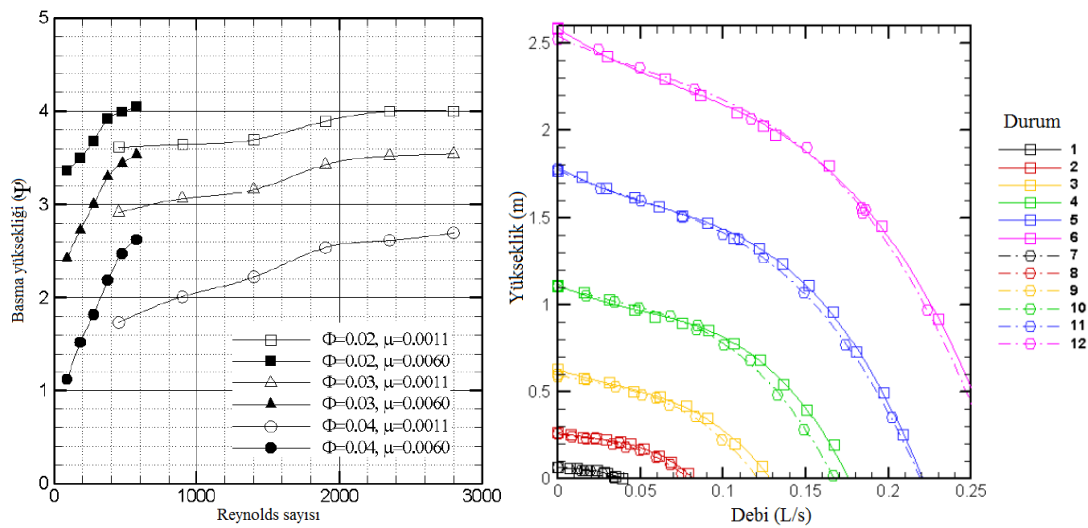
Şekil 2.2. Karışık akışlı çark (Andrade ve ark., 1996).

Miklosovic ve Gregorek (2000), santrifüj pompa performansını newton tipi olmayan sıvılar yardımıyla düşük debili ve düşük özgül hız rejimlerinde deneysel olarak araştırmışlardır. Kana benzer simülasyonlar elde etmek amacıyla newton tipi olmayan sıvı olarak ksantan-su çözeltisi 0-1200 ppm konsantrasyonlarında araştırmacılar tarafından deneylerde kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada newton tipi olmayan sıvıların yerine newton tipi akışkanlar kullanılarak hemen hemen aynı sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 2.3). Elde edilen sonuçlara nazaran büyük geometrilere sahip sistemlerde newton tipi olmayan sıvı yerine newton tipi akışkan kullanılması durumunda elde edilen veriler arasındaki farklılıkların fazla olduğu gözlemlenmiştir.



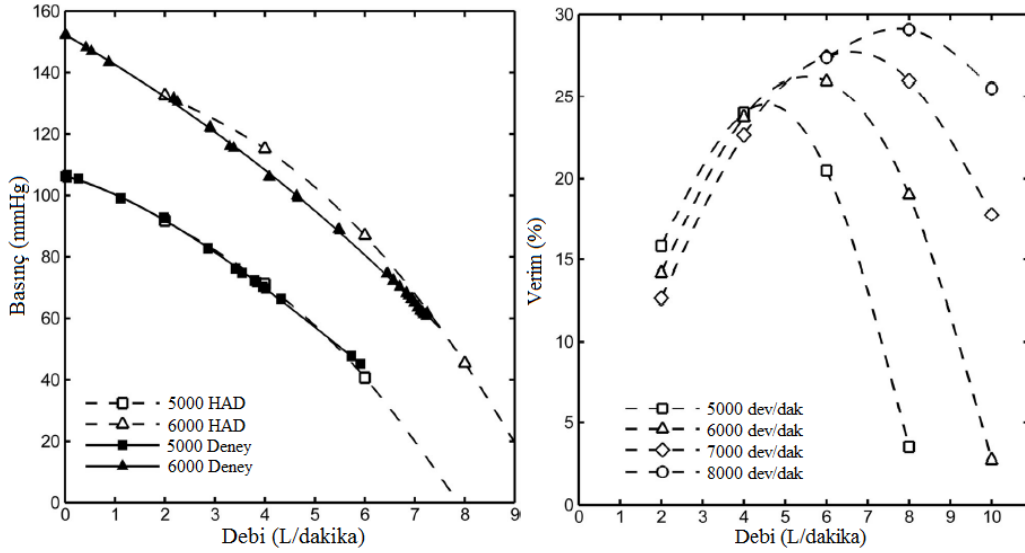
Şekil 2.3. (a) Ksantan-su karışımının 4 farklı konsantrasyonun kan ve kan modeli (cross modeli) ile viskozite-kayma hızı açısından karşılaştırılması ve (b) basınç katsayısı ve akış katsayısına göre ksantan-su karışımının 600ppm ve 1200ppm konsantrasyonlarının su ile ilişkisi (Miklosovic ve Gregorek, 2000).

Day ve ark. (2003) bir santrifüj kan pompasında Reynolds sayısı ile karakterize edilen viskoz etkilerin, pompa performansı üzerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmada çalışma sıvısı olarak su ve su-gliserin çözeltisi kullanılmıştır. Pompanın performansı 500-3000 dev/dak'lık dönme hızlarında incelenmiştir. Çalışmada, düşük Reynold sayılarında akışların geleneksel pompa tahmini yaklaşım formüllerinde (pump affinity laws) öngörülenden daha düşük performansa sahip olduğu, yüksek Reynold sayılarında ise pompanın performansının arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.4).



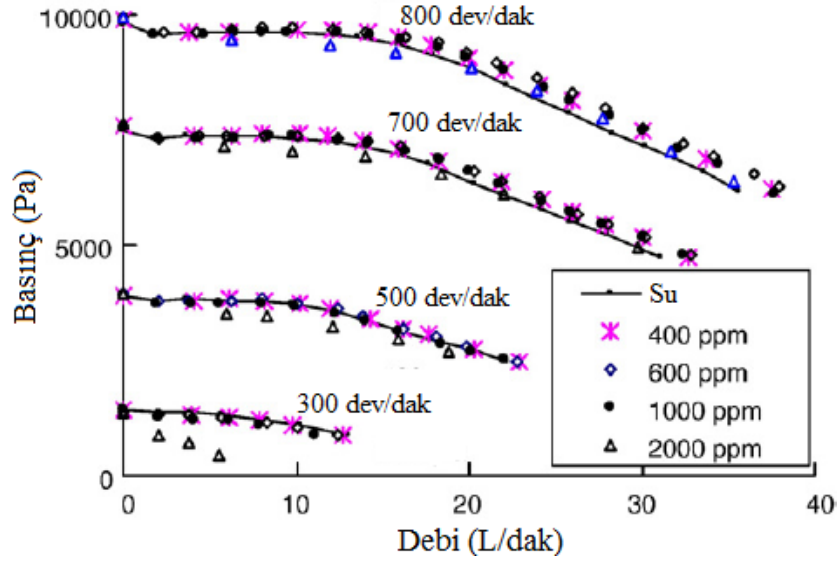
Şekil 2.4. (a) Farklı konsantrasyon ve viskoziteye sahip akışkanların pompa basma yüksekliği ile Reynolds sayısı arasındaki ilişkinin karşılaştırılması, (b) su ve su-gliserin karışımı ile basma yüksekliği-debi eğrileri ve pompa performansının karşılaştırılması (Day ve ark., 2003).

Untaroiu ve ark. (2005) tasarlamış oldukları manyetik pervaneli aksenal akışlı ventriküler destek cihazının HAD analizleri ve deneysel çalışmalarını karşılaştırmak amacıyla domuz ve koyuna yerleştirdikleri pompa sistemini incelemişlerdir. 30 kg domuzda yerleştirdikleri pompa büyük olması nedeniyle araştırmacılar domuzun iki kaburga kemiğini çıkarmak zorunda kalmışlardır. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak amacıyla üçüncü denek olarak 70 kg'lık bir koyun kullanılmıştır. Koyuna yerleştirilen pompa sistemi sorunsuz bir şekilde çalıştığından, araştırmacılar ileriki araştırmalarda deneylerde koyunların kullanılması gerekliliğini savunmuşlardır. Bu çalışmada, çarkın 6300 dev/dak'lık bir dönme hızında 6 L/dak ve 100 mmHg akışın gerçekleştiği ve makul dönme hızları için fizyolojik basınçlar üzerinde yeterli akış sağlama yeteneğine sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.5).



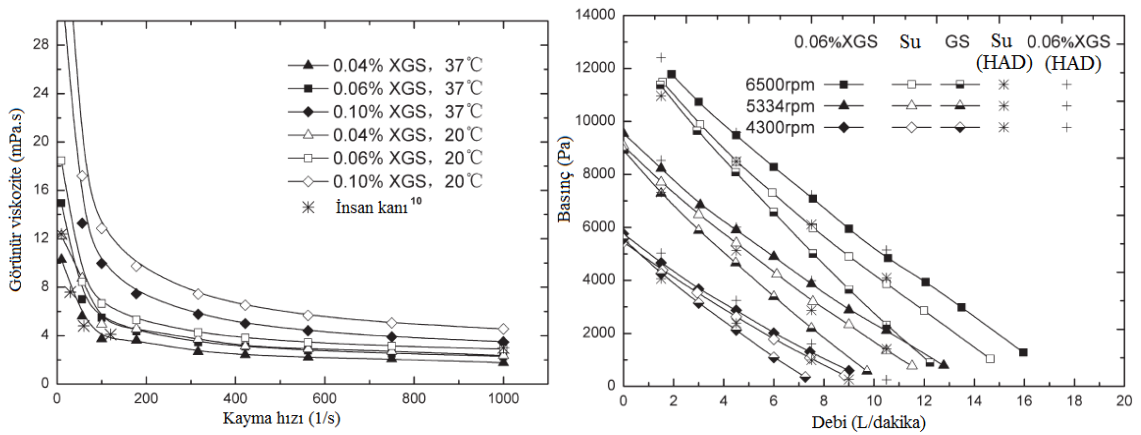
Şekil 2.5. (a) İki farklı dönme hızında deneysel ve HAD basma yüksekliğinin-debi performans eğrilerinin karşılaştırılması, (b) Dört farklı dönme hızında HAD verim-debi performans eğrileri (Untaroiu ve ark., 2005).

Manyetik olarak askıya alınmış çark santrifüj kan pompasının geliştirildiği bir başka araştırmada (Zhang ve ark., 2008), pompanın 2:1 ölçekli modelin hidrodinamik performansı incelenmiştir. Deneylerde çalışma sıvısı olarak su ve newton tipi olmayan ksantan-su karışımları (600 ppm, 1000 ppm ve 2000 ppm konsantrasyonlu) kullanılmıştır. Düşük pompa dönme hızlarında çalışıldığında, ksantan çözeltilerinde basma yüksekliğinin suya göre daha düşük çıktığı görülmüştür. Yüksek dönme hızlarında ise, ksantan çözeltisinin sudan %7'lik bir farkla daha yüksek basma yüksekliğine çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 2.6). Ayrıca, araştırmacılar prototip pompanın performansını en iyi simüle eden ksantan konsantrasyonunun 600 ppm olduğunu belirlemişlerdir.



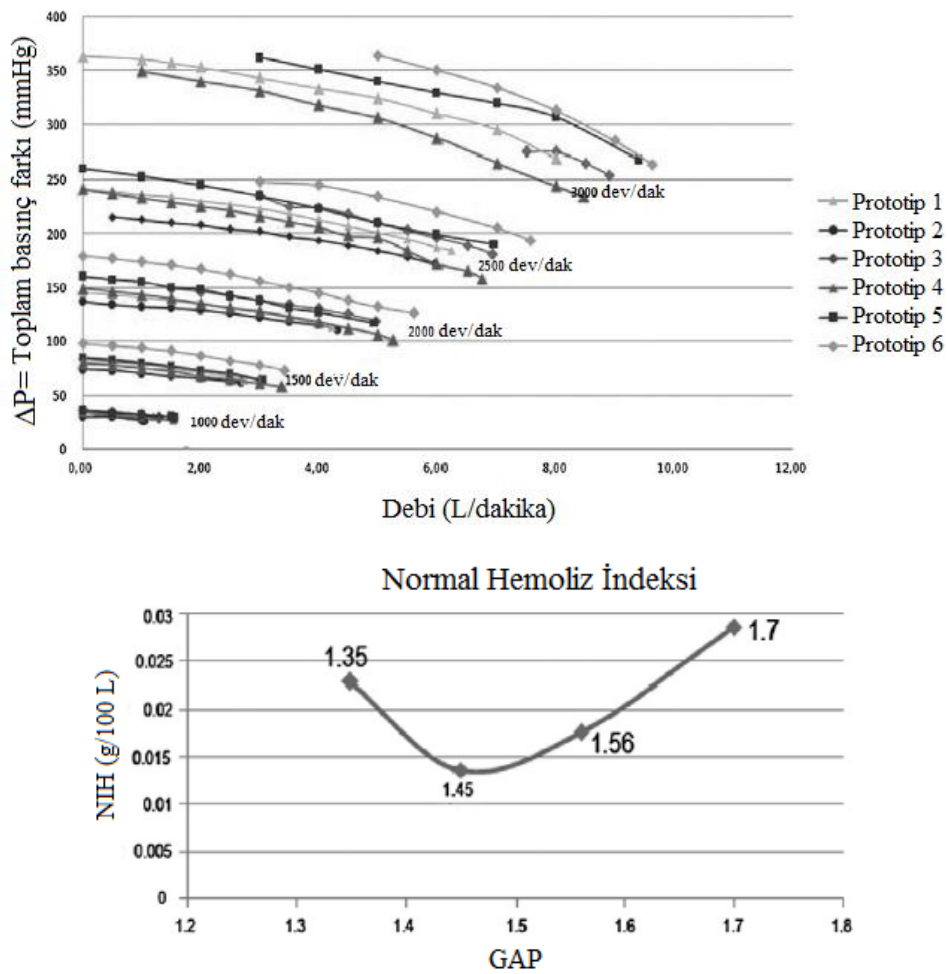
Şekil 2.6. Ksantan-su karışımı ve suyun farklı dönme hızlarının gösterdiği basma yüksekliği eğrileri (Zhang ve ark., 2008).

Hu ve ark. (2012) tarafından yeni geliştirilen bir eksenel kan pompasının hidrodinamik performansı, 4300-6500 dev/dak arasındaki beş farklı dönme hızında incelenmiştir. Bu çalışmada; su, %39 sulu gliserin çözeltisi ve %0.04, %0.06, %0.10 konsantrasyonlarında üç farklı ksantan-su karışımı kullanılmıştır. Akışkan olarak pompada kullanılan gliserin çözeltisinde, her dönme hızında sudan daha düşük bir basma yüksekliği eğrisi elde edilmiştir. Buna karşılık, viskoelastik ksantan-su karışımının kullanıldığı pompa deneylerinde ise sudan daha yüksek bir basma yüksekliği eğrisi elde edilmiştir (Şekil 2.7). Bunun, ksantan viskoelastisitesinin sürtünme-azaltma etkisinden kaynaklandığı araştırmacılar tarafından tahmin edilmiştir.



Şekil 2.7. (a) İnsan kanı ile ksantan su karışımının farklı konsantrasyon ve sıcaklıklarda viskozitesinin karşılaştırması, (b) su, gliserin karışımı ve ksantan-su karışımının deneysel ve HAD analizlerinin basma yüksekliği eğrileri ile karşılaştırılması (Hu ve ark., 2012).

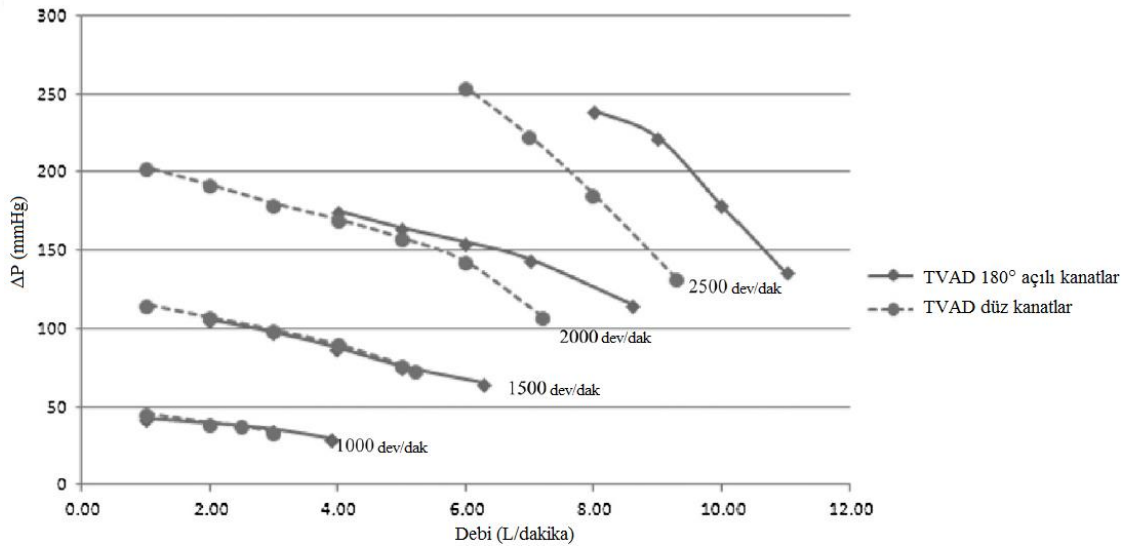
Leme ve ark. (2011) tarafından yeni geliştirilen bir spiral pompanın performansı, 1000-3000 dev/dak devir hızlarında debi ve basınç değişimlerine bağlı olarak hidrodinamik açıdan incelenmiştir (Şekil 2.8). Ayrıca, su-gliserin çözeltisi (kanla eşit viskozite ve yoğunluğuna sahip) kapalı döngü içerisinde kullanılarak hemoliz açısından incelenmiştir. Geliştirilen yeni spiral pompanın 6 farklı prototipi üzerinde çalışmalar yapılmış, pompanın dış kısmı (gövdesi) ile kanatları arasındaki boşluğun en az olduğu (1.45 mm) prototipte en iyi hemoliz sonuçlarının elde edildiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada dizayn edilen yeni spiral pompanın aksenal ve santrifüj pompalar göre daha yüksek performans gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 2.8. (a) Altı prototip pompanın hidrodinamik performansları, (b) 6 numaralı prototipin hemoliz test sonuçları (Leme ve ark., 2011).

Akış yolu geometrisini optimize etmek, hidrolik performansı en üst düzeye çıkarmak, kayma gerilmelerini en aza indirmek ve hemolizi azaltmak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak yapılan bir çalışmada, Leme ve ark. (2013) tarafından

bir santrifüj kan pompası tasarlanmış ve deneylerde üç farklı prototip pompa kullanılmıştır. Bu prototiplerde akışkan olarak newton tipi olan su-gliserin çözeltileri kullanılmıştır. Prototiplerin performansı 1000-3000 dev/dak arasındaki dönme hızlarında incelenmiştir. Ayrıca rotorda kullanılacak kanat çıkış açıları için dört farklı değerinde hidrodinamik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda dört farklı kanat çıkış açılarının hidrodinamik performansı etkilemediği tespit edilmiştir. 180° kavisli kanatlara sahip pervaneli pompaların düşük dönme hızlarında düz kanatlı pompalarla benzer sonuçlar verdiği, ancak kavisli kanatların düz kanatlı pompalara göre yüksek dönme hızlarında daha iyi hidrodinamik performans sergilediği görülmüştür (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Düz ve 180° kanatlı pompaların basma yüksekliği-debi eğrilerinin hidrodinamik performansının karşılaştırılması(Leme ve ark., 2013).

(Aldi ve ark., 2017) santrifüj pompa performansına newton tipi ve newton tipi olmayan sıvıların etkilerini deneysel ve HAD analizleri yardımıyla inceledikleri araştırmada, üç farklı konsantrasyonda newton tipi olmayan kaolin-su karışımları kullanılmış, 2000, 2500 ve 2900 dev/dak'lık dönme hızlarında çalışılmıştır. Yüksek konsantrasyona sahip kaolin çözeltisinde, su eğrilerine kıyasla pompa performansının yüksek bir değer kaybına uğradığı tespit edilmiştir. Daha düşük dönme hızlarında ise pompa performansını önemli derecede etkileyen pompa yükünde (manometrik basma yüksekliğinde) azalma gözlemlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında kanın reolojik yapısına benzeyen akışkan olarak ksantan-su karışımı kullanılmıştır. Ksantan sakızının fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Ksantan sakızı fiziksel ve kimyasal özellikleri.

| | |
|--|----------------------------|
| Üretim Adı | Ksantan sakızı FF(Fine) XN |
| Uluslararası ürün numarası | E 415 |
| Rengi | Beyaz veya sarıdışi-beyaz |
| Partikül boyutu | 80/120/200 mesh |
| Viskozite (%1 KCl'de %1'lik çözelti) Brookfield LVTD, spindle 3, 60 dev/dak, 25°C | 1200-1600 mPa.s |
| Kurutmada kütle kaybı | <% 13 |
| pH (%1'lik çözelti) | 6.0-8.0 |
| Nem | Maks. %15 |
| Kül | Maks. %13 |
| Azot (%) | Maks. %1,5 |
| Pirüvik asit | Min. %1,5 |
| Ağır metaller | Maks. 20 ppm |
| Kurşun | Maks. 2 ppm |
| Arsenik | Maks. 2 ppm |
| Etanol ve izopropil Alkol | Maks. 500 ppm |
| Toplam canlı sayısı | En fazla 2000 cfu/g |
| Maya/ Küf | En fazla 100 cfu/ g |
| E. Coli. | Yok/ 25 g |
| Salmonella | Yok/ 25 g |
| Kadmiyum | Maks. 1mg/ kg |

Tasarımı yapılmış olan (Mutlu ve Yapıcı, 2018) sol ventriküler destek pompası üzerinde sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yetişkin insanlarda kullanılan kalp destek pompalarının yaygın çalışma noktası olarak 5 L/dak debi ve 100 mmHg basınç değeri alınmaktadır. Karışık akışlı kalp destek pompası için bu değerler, 5 L/dak debi 100mmHg basınç ve 6000 dev/dak dönme hızı alınmıştır. Pompanın boyutsuz hız ve özgül çap parametreleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır:

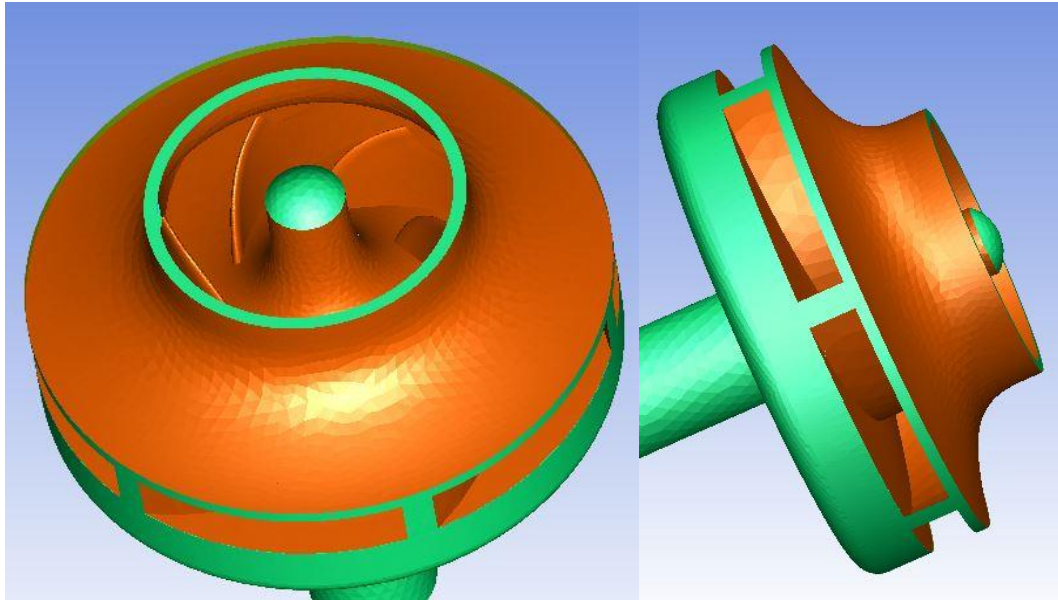
$$n_s = \frac{N_s Q^{0.5}}{\left(\frac{\Delta P}{\rho}\right)^{0.75}}$$

(3.1)

$$d_s = \frac{D \left(\frac{\Delta P}{\rho} \right)^{0.25}}{Q^{0.5}} \quad (3.2)$$

Denklemlerde, ρ yoğunluğu (kg/m^3), ΔP pompa basıncını (Pa), Q debiyi (m^3/s), N_s pompa hızını (rad/s) ve D çapı (m) ifade etmektedir. Çizelge 3.2’de verilen boyutsuz özgül hız ve özgül çap değerleri, Mozafari ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmadaki 0,88 özgül hız değeri için 4,63 özgül çap değerine uygun olduğu belirlenmiştir. (Mutlu ve Yapıcı, 2018).

Katı modeli programları yardımıyla oluşturulan çark modeli Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

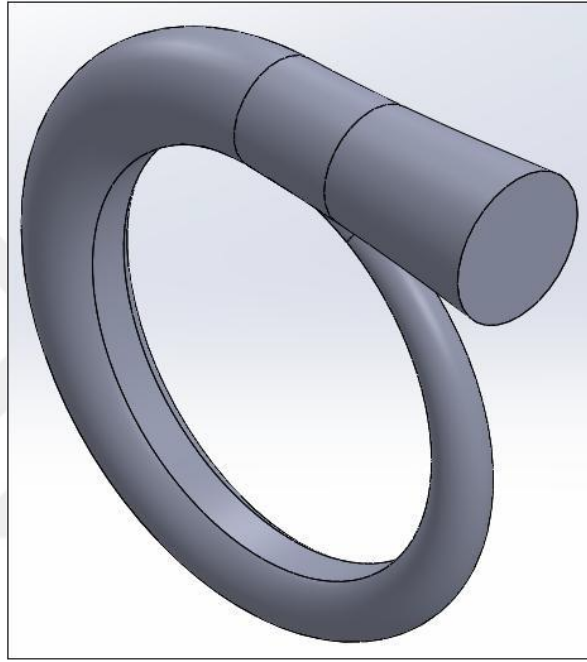


Şekil 3.1. Çarkın Katı Modeli (Mutlu ve Yapıcı, 2018).

Çizelge 3.2. Çark boyutları ve pompanın tasarım parametreleri (Mutlu ve Yapıcı, 2018).

| Çark Boyutları | |
|------------------------------|-------------------|
| Kanat Sayısı | 6 |
| Çark Giriş Çapı | 11 mm |
| Çark Çıkış Çapı | 22 mm |
| Çark Boyu | 10,96 mm |
| Göbek Çapı | 3 mm |
| Mil Çapı | 4 mm |
| Çıkış kanat yüksekliği | 2,06 mm |
| Kanat kalınlığı | 0,5mm |
| Tasarım parametreleri | |
| Debi | 5 L/dak |
| Basınç | 100 mmHg |
| Pompa Hız Aralığı | 5000-7000 dev/dak |
| Boyutsuz Özgül hız (n_s) | 0,85 |
| Boyutsuz Özgül çap (d_s) | 4,60 |

Salyangozun giriş çapı, çarkın çapından 0,6 mm büyük yapılmıştır. Çapın büyük değerlerde alınması pompa veriminde düşümlere, küçük değerlerde seçilmesi ise kayma gerilmelerinin artmasına neden olmaktadır. Giriş kısmının yüksekliği ise çark çıkış kanat yüksekliği ile aynı uzunlukta seçilmiştir. Salyangoz çıkışındaki genişleme açısı $5,5^\circ$ olarak ayarlanmıştır. Salyangoz dil kısmında keskin köşelerin olmaması amacıyla radyüslü salyangoz dili seçilmiştir. Elde edilen salyangoz katı modeli Şekil 3.2’de gösterilmiştir (Mutlu ve Yapıcı, 2018).

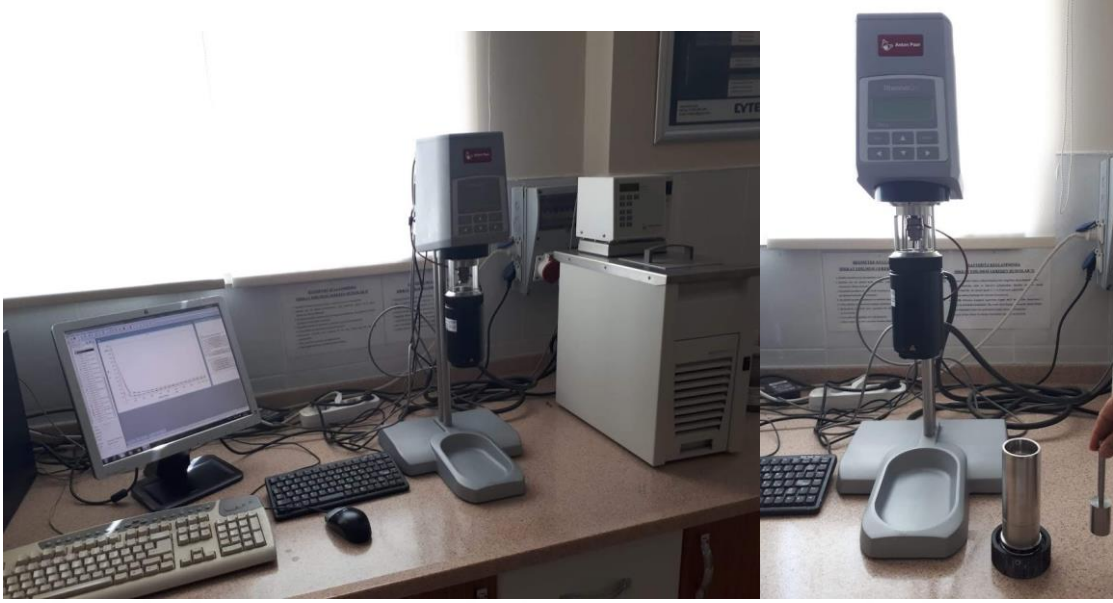


Şekil 3.2. Salyangoz Katı Modeli (Mutlu ve Yapıcı, 2018).

3.2. Yöntem

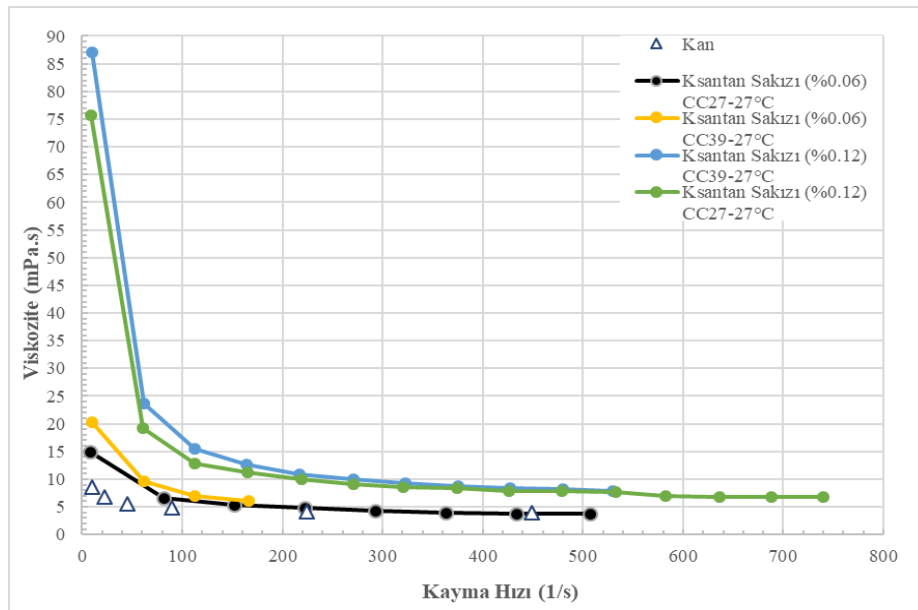
3.2.1. Ksantan sakızının reolojisi

Kana benzer reolojik özellik gösteren %0.06’lık ksantan-su karışımının reolojik ölçümleri, endüstride yaygın olarak kullanılan, programlanabilir Anton Paar Rheolab QC model reometrede (Şekil 3.3) $27\pm 1^\circ\text{C}$ ’de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Anton Paar Rheolab QC reometre.

Bu tür seyreltik çözeltilerin reolojik özelliklerinin belirlenmesinde, uygun hız ve spindile seçiminin önemi büyüktür. Bu nedenle Anton Paar reometresinde uygun kayma hız- kayma gerilimi ölçümü için maksimum ve minimum aralıkları dikkate alınarak CC27 ve CC39 spindil ile çalışılmıştır. 0-800 (1/s) hızında CC 27 spindile ile yapılan ölçümlerde viskozite aralığı 0-80 mPa.s olarak, CC 39 spindile da ise 5-100 mPa.s aralığında alınmıştır.



Şekil 3.4. Anton Paar Rheolab QC reometre cihazındaki değişik uçlar ile farklı konsantrasyonlardaki ksantan-su karışımı değerlerinin kan ile karşılaştırması.

Şekil 3.4’de görüldüğü gibi kana en yakın sonucu CC27 spindle ucu ile alınan değerler vermiştir. HAD analizlerinde newton tipi olmayan akışkanların programlara tanıtılabilmesi için reolojik modellerden (Carreau, Cross, Hershel-Bulky, Power law, vb.) yardım alınması gereklidir. Cao ve ark. (2016) tarafından yapılan bir araştırmada ksantan-su karışımı için en iyi modelin korelasyon katsayısı en yüksek olan Carreau modeli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle reometre cihazından yapılan ölçümlerden sonra modelin programa girilebilmesi için Çizelge 3.3’de gösterilen Carreau modelinin parametreleri çıkartılmıştır.

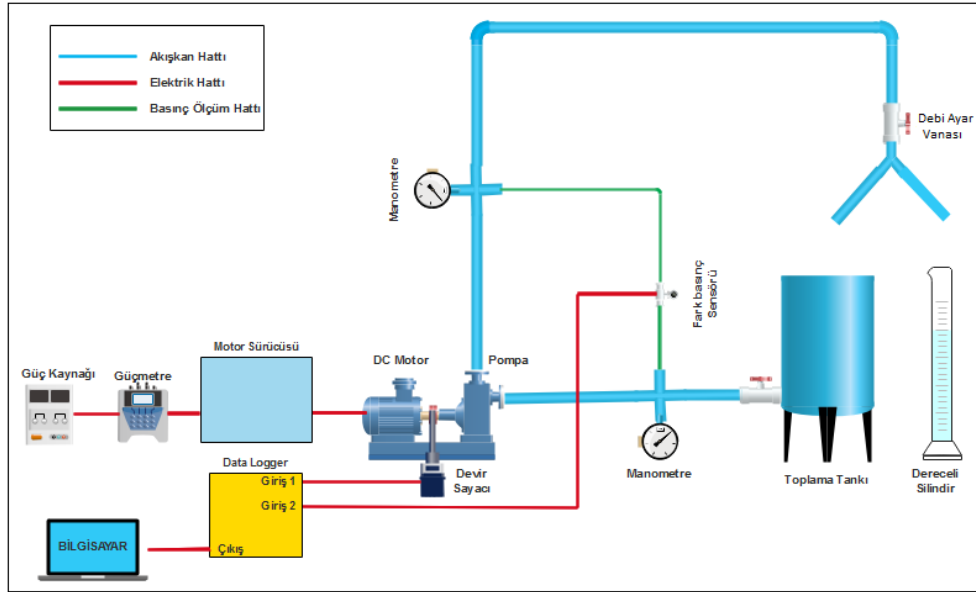
Çizelge 3.3. Su- ksantan karışımının (%0.,06) HAD simülasyonları için gerekli olan parametreleri.

| Model | Denklem | Reolojik parametreler | | | |
|---------|---|-----------------------|----------|---------------|------------|
| | | n | η_0 | η_∞ | λ |
| Carreau | $\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = [1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}}$ | -0.36 | 0.016 | 0.0035 | 0.03226679 |

Burada; $\dot{\gamma}$: kayma hızı [1/s]; η : viskozite [Pa.s]; η_0 : sıfır viskozitesi [Pa.s]; η_∞ : maksimum viskozite [Pa.s]; n: akış davranış indeksi; λ : zaman sabiti.

3.2.2. Deneysel yöntem

Mutlu ve Yapıcı (2018) tarafından üretilmiş olan heliko-santrifüj kalp destek pompasının deneysel performansını ölçmek için kurulan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.5’de verilmiştir. Akışkan deposu olarak kullanılan tank atmosfere açık halde bulunmakta ve yaklaşık 15 litre hacme sahiptir. Tanktan pompa gövdesine çalışma sıvısının giriş ve çıkışları için iç çapı 10,5mm dış çapı 16mm olan esnek ve şeffaf borular kullanılmıştır. Basma hattına debi ayarının yapılabilmesi için bir vana konulmuştur. Debi ölçümünün yapılabilmesi için akışkan esnek bir hortum yardımıyla dereceli kaba (2000mL \pm 20mL hassasiyetli) yönlendirilmiştir. Bir kronometre yardımıyla akışkanın dereceli kaba alınma süresi ölçülmüştür. Dereceli kaba biriken akışkanın hacmi ve alınan süreler yardımıyla debi hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Mutlu ve Yapıcı, 2018).

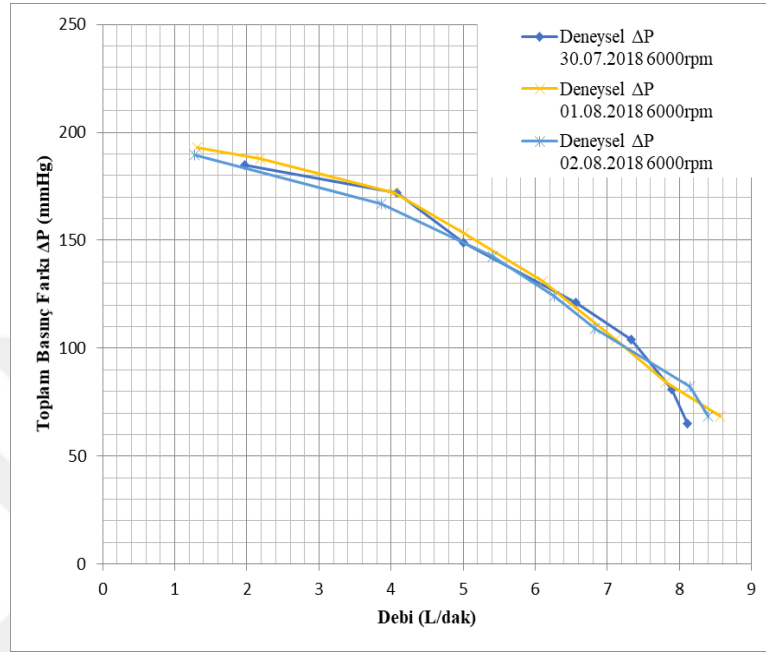
Basınç ölçümlerinin yapılması için pompanın giriş ve çıkışına 2 mm çapında delikleri olan iki alüminyum basınç prizi takılmıştır. Ayrıca aynı bölgelerde ki efektif basınç ölçümlerinin kontrolleri için manometre kullanılmıştır. Giriş ve çıkışlarda bulunan prizlerin yerden yükseklik farkları yaklaşık 50 cm'dir. Basınç ölçümleri için Valcom 27D (%25 hassasiyete sahip) fark basınç sensörü kullanılmıştır.

Deney düzeneğinde pompanın çalışması için 400 W gücünde 48V DC elektrikli 12000 dev/dak maksimum hıza sahip fırçasız bir motor kullanılmıştır. Deneylerde motorun devrini ölçmek için Sick IME1603 endüktif proximity sensör kullanılmıştır. %0.05 hassasiyete sahip Lutron DT2236 dijital foto takometre ile sensörün doğruluğu ölçülerek kontrol edilmiştir.

Deneylerde güç ölçümlerinin yapılması için, motor güç hattına bağlanmış olan dijital göstergeli %1 hassasiyete sahip bir wattmetre kullanılmıştır. Her devir ölçümünden sonra motor pompadan ayrılarak sadece motorun tükettiği güç ölçülmüştür.

Deney düzeneğinin kurulumu gerçekleştirildikten sonra çalışma sıvısı olarak öncelikle su tercih edilmiştir. Bunun nedeni ise sistemin doğruluğunun kanıtlanmasıdır. (Mutlu ve Yapıcı, 2018) yapmış oldukları deneylerde aynı deney sistemini ve aynı akışkan tipini kullanılarak çeşitli basma yüksekliği eğrileri elde etmişlerdir. Elde edilen veriler daha önce yapılan deney verileri ile karşılaştırıldığında aynı sonuçları vermiştir. Deneylerin tekrarlanabilirliğini kontrol edilmesi için farklı tarihlerde 6000 dev/dak dönme hızında deneyler yapılmıştır. Bu testlerin sonuçları Şekil 3.6'te verilmiştir. Daha sonra iş akışkanı olarak ksantan-su karışımı kullanılmıştır. Deneyler, ağırlıkça %0.06

ksantan-su karışımında ve 5000, 6000, 7000, dev/dak dönme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ksantan-su karışımında ksantan çökeleği oluşup-oluşmadığını belirlemek için ağırlıkça %0.06 oranında hazırlanan ksantan-su karışımı 4 gün bekletilmiş ve herhangi bir çökelmenin veya çözünmenin olmadığı görülmüştür.



Şekil 3.6. Deneyin tekrarlanabilirliğinin kontrolü (ksantan-su karışımı için).

3.2.3. HAD simülasyonu

Kalp destek pompasının HAD simülasyonlarında Ansys Fluent 18.1 yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım gelişmiş çözümleri sayesinde hızlı ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca bu çözümler, hareket edebilen ve deforme olabilen sayısal ağların (mesh) kullanımını ve paralel işlemlerdeki üstün performans kabiliyetlerini endüstriyel ve bilimsel çalışmalara destek olmak amacıyla kullanıcılarına sunmaktadır. HAD simülasyonlarında RNG $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. RNG (renormalizasyon grup) metodu olarak bilinen bir matematiksel teknik, anlık Navier-Stokes denklemlerinin çıkartılmasına yardımcı olan türbülans modelidir. RNG modeli, Yakhot ve Orszag (1986) tarafından geliştirilmiştir. Yakhot ve Smith (1992) tarafından bu geliştirilen model yeniden formüle edilmiştir. Analiz sonuçlarının doğruluğunu

arttırmak için, duvara yakın bölgelerin çözüm ağını iyileştirilmesi seçenekleri arasından ‘ölçeklenebilir duvar fonksiyonu’ seçilmiştir (Mozafari ve ark., 2017).

Çözümlerde akışkan olarak ksantan-su karışımı kullanılmıştır. Yazılım içerisine newton tipi olmayan akışkanı tanıtmak için özel kodlamalar yapılmıştır (Ansys, 2017). Kodlamalar tamamlandıktan sonra newton tipi olmayan akış için gerekli olan Carreau modeli parametreleri, reometreden elde edilen değerler kullanılarak akışkan yazılıma tanıtılmıştır.

5000, 6000, 7000, dev/dak dönme hızlarında 1-8 L/dak arasındaki debilerde modellemeler yapılarak çözümlenmeler tamamlanmıştır. Basınç bazlı çözücüde yöneten denklemleri (süreklilik ve momentum) ve türbülans denklemleri üçüncü mertebeden doğruluktaki ayrıklaştırma şemaları kullanılarak çözdürülmüştür. Analizlerde akış, ‘daimî bir akış’ olarak kabul edilmiştir. Çözüm, yakınsama kriteri olarak ise 9×10^{-5} değerine kadar sürdürülmüştür.

Deney düzeneğine uygun olacak şekilde +x yönünde $9,81 \text{ m} / \text{s}^2$ yerçekimi ivmesi tanımlanmıştır. Pompaya giriş ve çıkışlarda türbülans şiddetini tanımlamak için aşağıdaki denklem kullanılmıştır:

$$T\zeta = 0,16. \text{Re}^{-1/8} \quad (3.3)$$

Pompa performansının değerlendirilmesinde kullanılan Pompa çıkışı ve girişi arasındaki toplam basınç farkı (3.4) denklemiyle hesaplanmıştır.

$$\Delta P = P_{t\zeta} - P_{t\zeta} \quad (3.4)$$

Hidrolik verim, hidrolik bir yapının veya elemanın minimum enerji kaybı ile akışkanı iletmesi kabiliyetidir. Bu tez çalışmasında pompanın hidrolik verimi (3.5) denklemiyle hesaplanmıştır. Bu denklemde kullanılan pompa çark gücü (3.6) formülüyle, akışkan gücü ise (3.7) formülüyle hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan pompanın genel verimi, pompanın tükettiği güç ile (3.8) formülüyle hesaplanmıştır.

$$\eta_h = \frac{\Delta P * Q}{N_\zeta} = \frac{N_a}{N_\zeta} \quad (3.5)$$

$$N_\zeta = T * \omega \quad (3.6)$$

$$N_a = \Delta P * Q \quad (3.7)$$

$$\eta = \frac{Q\Delta P}{W_{mil}} \quad (3.8)$$

Burada η_h pompanın hidrolik verimini, Q birimi (m^3/s) cinsinden pompanın debisini, ΔP toplam basınç farkını (Pa), T mil torkunu (Nm) ve ω açısal hızını (rad/s) temsil etmektedir. Mil gücü (W_{mil}), kullanılan motorun yükte ve boşta çektiği güçlerin farkı ile hesaplanmıştır.

Pompaların performanslarını daha az sayıda parametreyle ifade etmek ve genelleştirmek için debi ve basınç katsayıları gibi boyutsuz parametreler kullanılır. Pompaların HAD analiz sonuçlarının değerlendirilmesi için iki boyutsuz performans parametresi olan basınç katsayısı (ψ) ve debi katsayısının (Φ) literatürdeki çalışmalarda da (Wu ve ark., 2001), (Kafagy ve ark., 2015) kullanıldığı görüldü. Bu parametrelerin boyutsuz ifadeleri aşağıda verilmiştir:

$$\psi = C_\psi \left(\frac{\Delta P}{\rho N^2 R^2} \right) \quad (3.9)$$

$$\Phi = C_\Phi \left(\frac{Q}{NR^3} \right) \quad (3.10)$$

Bu ifadeler içerisinde ΔP pompa basıncını (mmHg), ρ yoğunluğu (kg/m^3), N çarkın dönme hızını (dev/dak), R çark yarıçapını (mm), ve Q debiyi (L/dak) temsil etmektedir. C_ψ sabiti basınç faktörü ve C_Φ sabiti ise debi faktörüdür. Bu faktörlerin değerleri ise sırasıyla $1,2157 \times 10^{10}$ ve $1,5195 \times 10^5$ 'tir (Chopski ve ark., 2016).

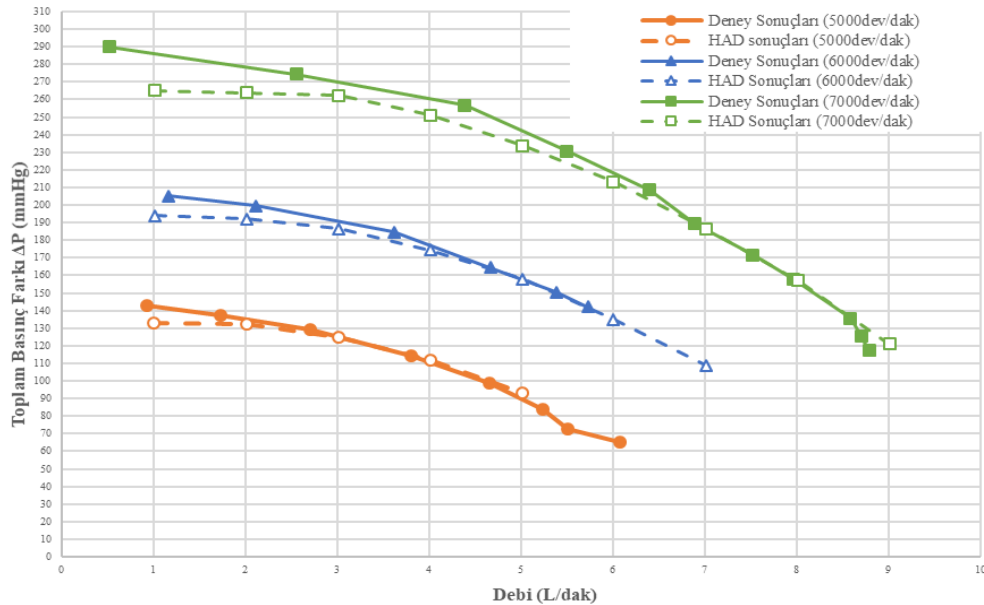
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, tasarlanmış olan karışık akışlı bir kalp destek pompasının performansının incelenmesi amacıyla; debiye bağlı olarak pompa basıncı, pompa hidrolik verimi ve pompa genel verimi boyutlu ve boyutsuz olmak üzere iki farklı biçimde incelenmiştir. Hidrodinamik performans eğrileri ksantan-su karışımı ve su-gliserin çözeltisi olmak üzere iki farklı iş akışkanında yapılarak pompanın newton tipi ve newton tipi olmayan akışkanlardaki performansı belirlenmiştir.

4.1. Pompanın HAD Analiz ve Deneysel Performansının Belirlenmesi

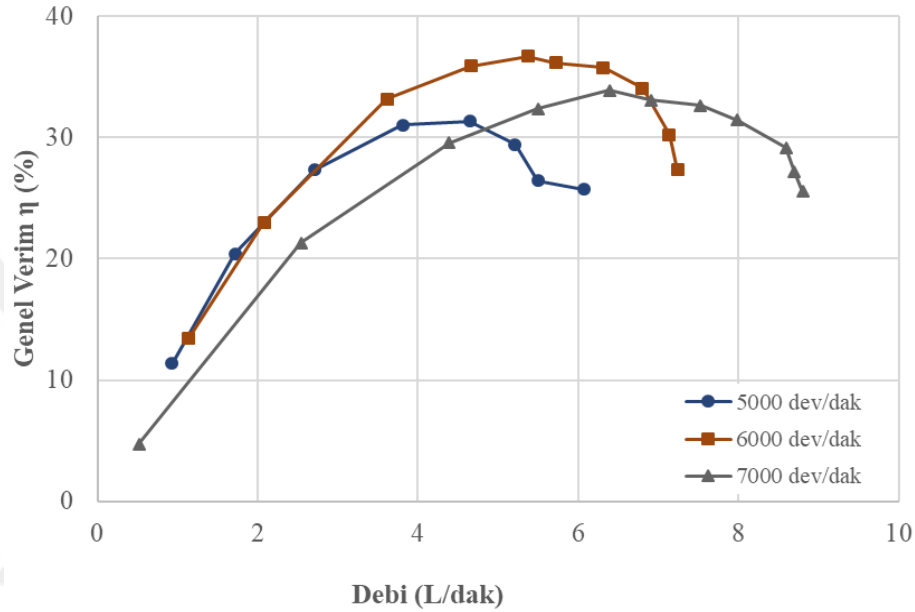
4.1.1. Su-gliserin Çözeltisi ile Yapılan Deneysel Çalışmanın Sonuçlarının HAD Analizi Sonuçları ile Karşılaştırılması

Karışık akışlı bir pompa da çalışma sıvısı olarak su-gliserin çözeltisi kullanılarak 3 farklı dönme hızında deneysel ve HAD simülasyonlarından elde edilen bilgilere göre değişen debiye karşılık gelen toplam basınç farklarının karşılaştırılması Şekil 4.1’de verilmiştir.



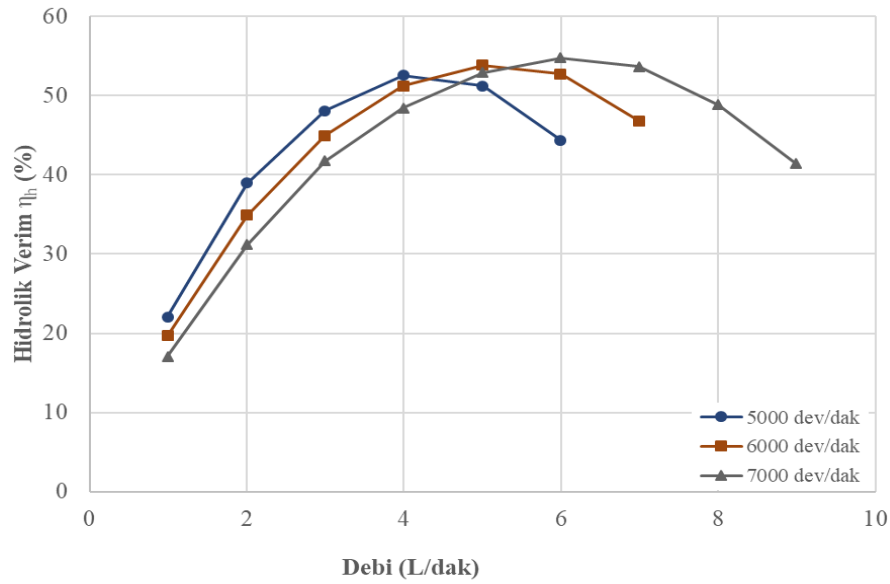
Şekil 4.1. Su-gliserin çözeltisi ile yapılan deneysel çalışmanın HAD simülasyonu ile karşılaştırılması.

Deneylerde pompanın performansını değerlendirmek için kullanılan su-gliserin çözeltisi ile elde edilen genel verim eğrileri Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Genel verim içerisinde pompa milinin yataklanmasında kullanılan rulman ve sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan mil keçesinin sebep olduğu mekanik kayıplar bulunmaktadır. Eğriler incelendiğinde maksimum genel verimin 6000 dev/dak dönme hızında %36,6 olduğu görülmektedir. 5 L/dak debide 100 mmHg basıncın elde edildiği 5000 dev/dak dönme hızında genel verim %29,44 olarak elde edildi.



Şekil 4.2. Su-gliserin çözeltisi ile yapılan deneysel çalışmada elde edilen genel verim eğrileri.

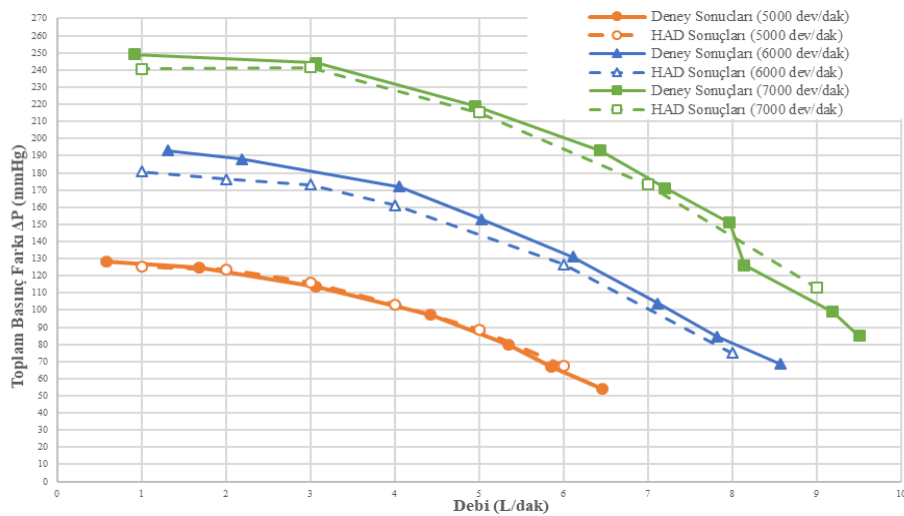
Su-gliserin çözeltisi ile yapılan HAD simülasyonlarında elde edilen sonuçlar doğrultusunda Şekil 4.3’te pompanın hidrolik verimleri gösterilmiştir. Analizlerde hidrolik verim hesaplamalarına, mekanik kayıplar dahil edilmemiştir. Elde edilen HAD verilerine göre maksimum hidrolik verim, 7000 dev/dak dönme hızında 6 L/dak debide %54,77 olarak elde edildi. 5 L/dak debide 100 mmHg basıncın elde edildiği 5100 dev/dak dönme hızında hidrolik verim, %52,1 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. Su-gliserin çözeltisi ile yapılan HAD simülasyonlarından elde edilen hidrolik verim eğrileri.

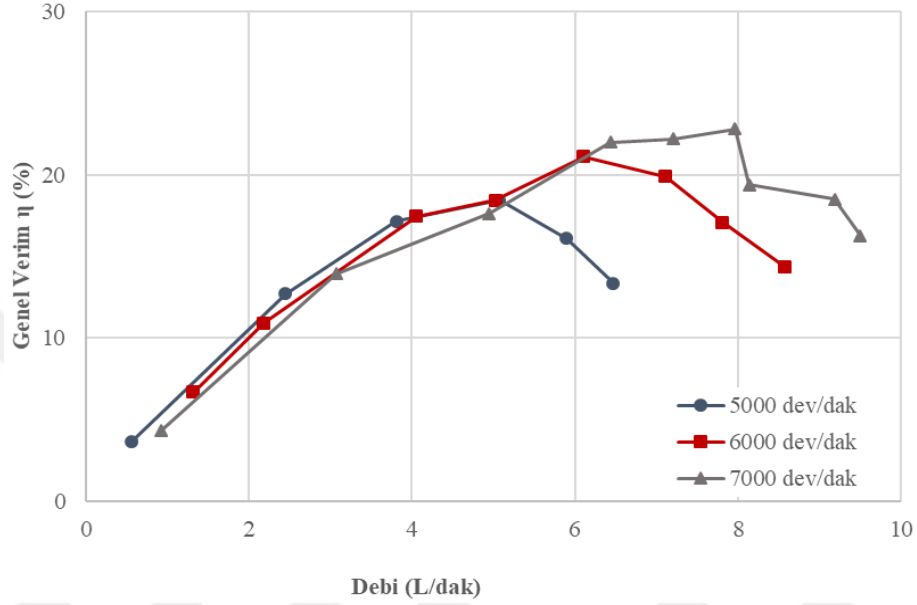
4.1.2. Ksantan-su Karışımı ile Yapılan Deneysel Çalışmanın Sonuçlarının HAD Analizi Sonuçları ile Karşılaştırılması

Karışık akışlı bir pompa da çalışma sıvısı olarak ksantan-su karışımı kullanılarak 5000, 6000 ve 7000 dev/dak dönme hızlarında, deneysel ve HAD simülasyonlarından elde edilen bilgilere göre değişen debiye karşılık gelen toplam basınç farklarının karşılaştırılması Şekil 4.4'de verilmiştir. Dizayn edilen kalp destek pompasındaki hidrolik toplam basınç farkı değeri, 5 L/dak debide 5000 dev/dak dönme hızında 86 mmHg olarak bulundu.



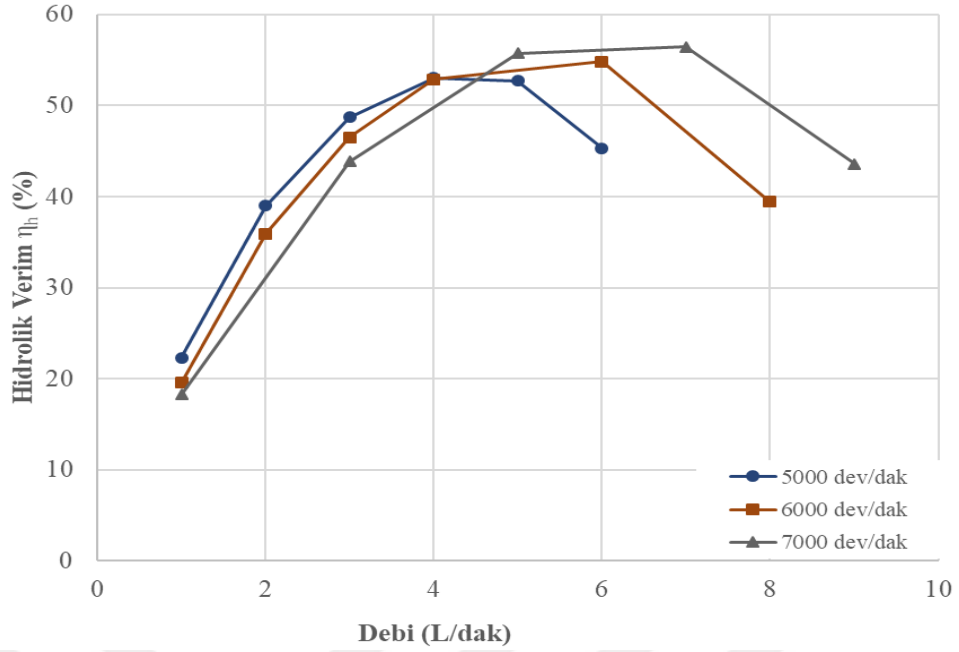
Şekil 4.4. Ksantan-su karışımı ile yapılan deneysel çalışmanın HAD simülasyonu ile karşılaştırılması.

Deneylerde pompanın performansını değerlendirmek için kullanılan ksantan-su karışımı ile elde edilen genel verim eğrileri Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Eğriler incelendiğinde maksimum genel verimin 7000 dev/dak dönme hızında %22,81 olduğu görülmektedir. 5 L/dak debide 86 mmHg basıncın elde edildiği 5000 dev/dak dönme hızında genel verim %18,45 olarak elde edildi.



Şekil 4.5. Ksantan-su karışımı ile yapılan deneysel çalışmada elde edilen genel verim eğrileri.

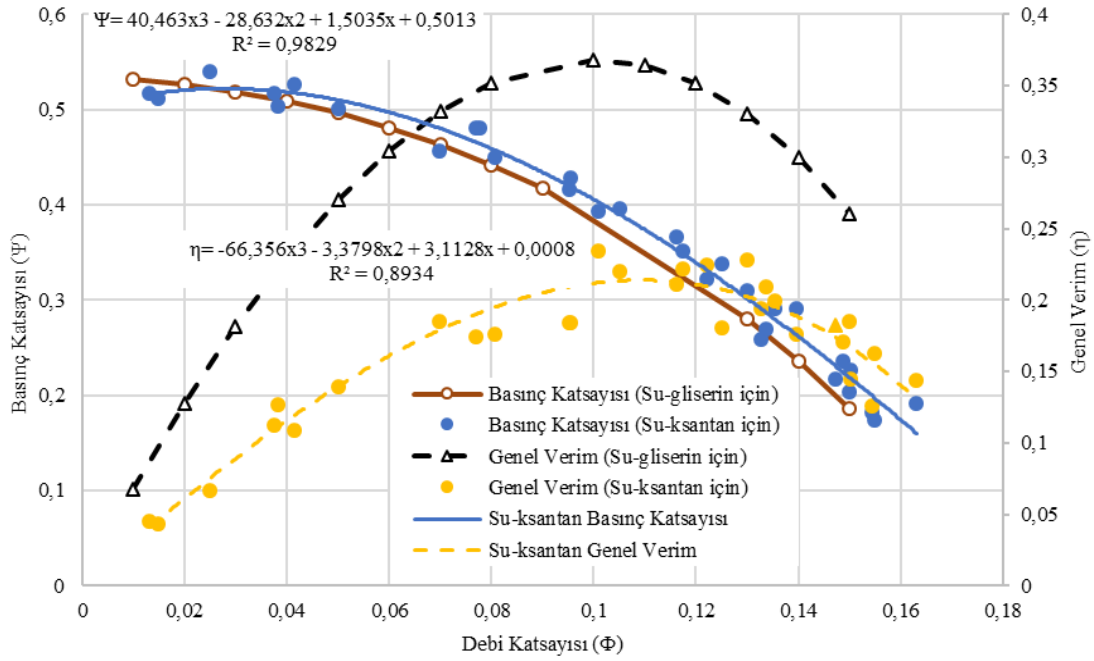
Ksantan-su karışımı ile yapılan HAD simülasyonlarında elde edilen sonuçlar doğrultusunda Şekil 4.6'da pompanın hidrolik verimleri gösterilmiştir. Elde edilen HAD verilerine göre maksimum hidrolik verim, 7000 dev/dak dönme hızında 7 L/dak debide %56,45 olarak elde edildi. 5 L/dak debide 86 mmHg basıncın elde edildiği 5000 dev/dak dönme hızında hidrolik verim, %52,74 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.6. Ksantan-su karışımı ile yapılan HAD simülasyonlarından elde edilen hidrolik verim eğrileri.

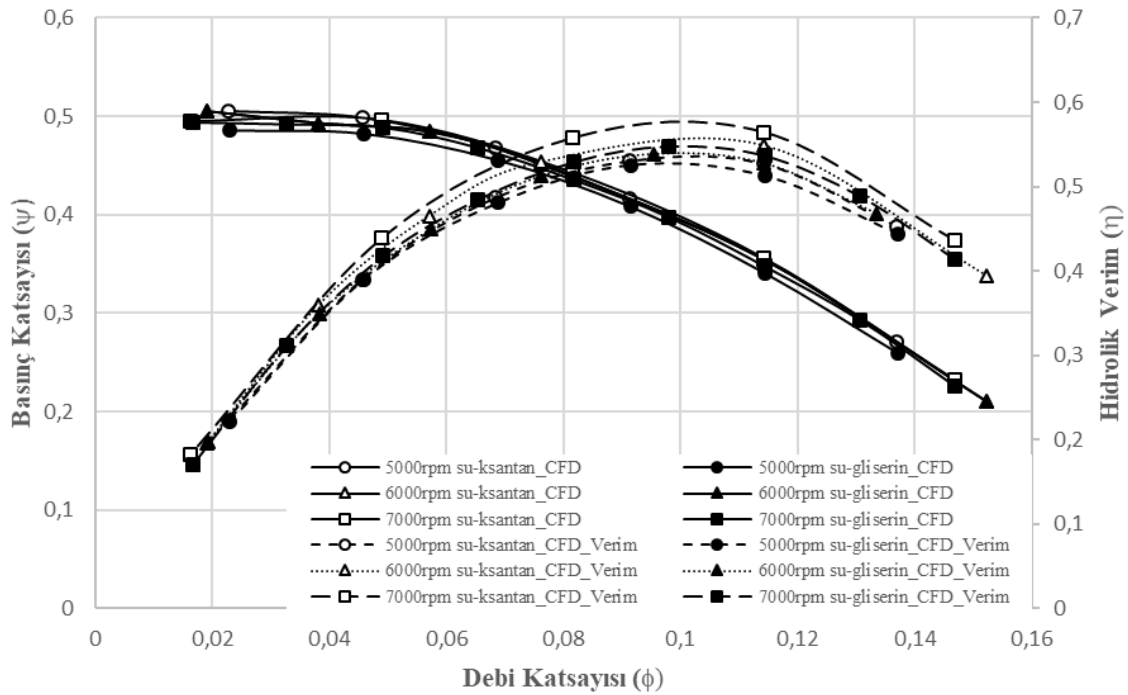
4.1.3. Ksantan-su Karışımı ile Su-gliserin Çözeltisi Sonuçlarının Yorumlanması

Ksantan-su karışımı ve su-gliserin çözeltisinin deneysel sonuçlarından elde edilen veriler yardımı ile boyutsuz hidrodinamik performans eğrileri oluşturuldu ve bu eğrilere uydurulan 3. Dereceden polinom denklemleri Şekil 4.7’de gösterildi. Burada bulunan performans eğrilerinde, pompa basınç katsayısı ve genel verimin debi katsayısı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 4.7. Tüm deneysel verilere göre uydurulan hidrodinamik performans eğrileri.

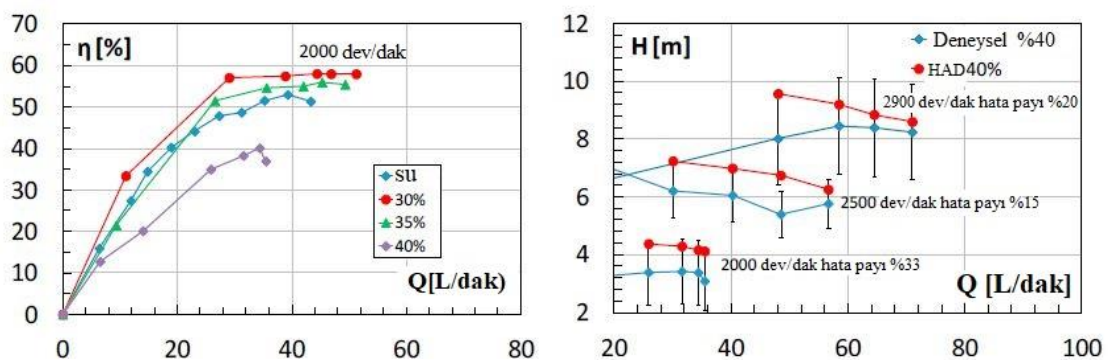
Şekil 4.8'deki grafikte karışık akışlı kalp destek pompasının su-gliserin çözeltisi ve ksantan-su karışımında 5000, 6000 ve 7000 dev/dak dönme hızlarında HAD simülasyonlarının boyutsuz hidrodinamik performans eğrileri verildi.



Şekil 4.8. HAD performans simülasyonlarının boyutsuz hidrodinamik performans eğrileri.

Ksantan-su karışımı newton tipi olmayan bir akışkan olması nedeniyle değişen bir viskoz yapıya sahiptir. Su-gliserin ise sabit viskoziteli bir akışkandır. Şekil 4.1 ve 4.4'de görüldüğü gibi, ksantan-su ve su-gliserin karışımlarının debisi yükseldikçe 5000 dev/dak dönme hızı hariç diğer dönme hızlarından elde edilen toplam basınç farkları arasında az miktarda yaklaşma, düşük debilerde ise az miktarda uzaklaşma görülmektedir. Bunun sebebi, düşük debilerde viskoz kuvvetlerin etkisinin artması ile akışkanın viskozitesinin artmasıdır. Aynı durumun deneysel ve HAD simülasyonları arasında görülmesinin sebebi ise, RNG $k-\varepsilon$ türbülans modeliyle yapılan çözümlemede diferansiyel viskozite modeli opsiyonunun kullanılmamasıdır.

Ksantan-su karışımı için simülasyonlardan elde edilen hidrolik verim ile deneylerden elde edilen genel verim arasında çok yüksek bir farklılık görülmüştür (Şekil 4.5-4.6). Bu durum, newton tipi olmayan akışkanların HAD analizlerinin yapıldığı yazılım programının basınç farklılıklarını (kanalın pürüzlülük etkileri, basınç bağlantılarının konumu vb.) az tahmin etmesinden kaynaklanmaktadır. Nitekim, Aldi ve ark. (2017) tarafından newton tipi olmayan akışkanların pompa performansına etkileri üzerine yapılan bir çalışmada da bu büyük farklılığa (2000 dev/dak'da %33) vurgu yapılmıştır. Newton tipi (su) ve newtonyeni olmayan (kaolin süspansiyonu) akışkanlarla yapılan bu araştırmada, su ve üç farklı konsantrasyonda hazırlanan kaolin süspansiyonları ile 2000 dev/dak, 2500 dev/dak ve 2900 dev/dak dönme hızlarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler ile HAD analizlerinden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Tüm dönme hızlarında su, %30 ve %35 katı oranında kaolin süspansiyonları için, deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen veriler arasındaki sapma çok düşük (max. %6) kalırken, %40 katı oranında kaolin süspansiyonu yapılan çalışmadan elde edilen sapma %33 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Aldi ve ark. tarafından elde edilen verim-debi ve basınç farkı-debi eğrileri

Newton tipi ve newton tipi olmayan akışkanlar ile yapılan çalışmalar sonucunda verimler arasında farklılıklar gözlemlenmiştir (Şekil 4.7). Bu farklılık ile kana benzer reolojik özellik gösteren akışkanların pompa performansını etkilediği görülmüştür. Pompa performans değerleri açısından iş akışkanı olarak su-gliserin çözeltisi kullanılması pompa hakkında yanlış yorumlamalarda bulunulmasına neden olabilir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışması tasarlanmış olan bir karışık akışlı kalp destek pompasının HAD analizi ve deneysel performans testleri gerçekleştirildi. HAD ve deneysel çalışmalarda iş akışkanı olarak ksantan-su karışımı ve su-gliserin çözeltisi kullanıldı. Bu iki farklı akışkan türünün pompa performansını nasıl etkilediği belirlendi.

Sayısal ve deneysel çalışmalarda, ksantan-su karışımının genel veriminin su-gliserin çözeltisinde elde edilen verimden düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu pompanın newton tipi bir akışkana göre tasarlandığı düşünülürse newton tipi olmayan bir akışkanda beklenildiği gibi verim düşük çıkmıştır. Bunun dışında simülasyondan elde edilen hidrolik verimin deneylerden elde edilen genel verimden çok yüksek çıkmasının nedeni analizi gerçekleştiren programların newton tipi olmayan akışkanlarda çeşitli basınç kayıplarını az tahmin etmesidir. Bununla beraber toplam basınç farklarında ksantan-su karışımının değerlerinin düşük olmasının sebebi akış içerisinde viskoz kuvvetlerin artarak newton tipi olmayan akışkanın kayma incelmeye (shear thinning) özelliğini göstermesiyle açıklanabilir.

İlerleyen çalışmalarda pompa performanslarının incelenmesinde newton tipi akışkanlar yerine kana benzer özellik gösteren akışkanların kullanılarak deney düzeneklerinin iyileştirilmesi ve simülasyon için kullanılan programlarda oluşabilecek hataların iyi araştırılması gerekmektedir.

5.2 Öneriler

Bu çalışma sonucunda ilerleyen zamanlarda kalp destek pompası üzerine çalışmalarda bulunacak araştırmacılar için önerilerde bulunulacaktır.

HAD analizleri için kullanılacak programların hangisinin, kullanılan akışkanlara göre daha doğru tahmin yaptığının araştırılması düşünülmektedir.

Pompa performansının değerlendirilmesinde kana benzer özellik gösteren newton tipi akışkanlar yerine newton tipi olmayan akışkanların kullanılması daha gerçekçi bilgilerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Ayrıca pompa tasarımı gerçekleştirilirken newton tipi olmayan akışkanlara göre hesaplamaların yapılması gereklidir.



KAYNAKLAR

- Aldi, N., Buratto, C., Casari, N., Dainese, D., Mazzanti, V., Mollica, F., Munari, E., Occari, M., Pinelli, M., Randi, S., Spina, P. R. ve Suman, A., 2017, Experimental and Numerical Analysis of a Non-Newtonian Fluids Processing Pump, *Ati 2017 - 72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association*, 126, 762-769.
- Andrade, A., Biscegli, J., Dinkhuysen, J., Sousa, J. E., Ohashi, Y., Hemmings, S., Glueck, J., Kawahito, K. ve Nose, Y., 1996, Characteristics of a blood pump combining the centrifugal and axial pumping principles: The spiral pump, *Artificial Organs*, 20 (6), 605-612.
- Ansys, 2017, Ansys Fluent User's Guide.
- Cao, X. Q., Zhao, Z. D., Cheng, L. ve Yin, W. Q., 2016, Evaluation of a transparent analog fluid of digested sludge: Xanthan gum aqueous Solution, *Selected Proceedings of the Tenth International Conference on Waste Management and Technology*, 31, 735-742.
- Chopski, S. G., Fox, C. S., Riddle, M. L., McKenna, K. L., Patel, J. P., Rozolis, J. T. ve Throckmorton, A. L., 2016, Pressure-Flow Experimental Performance of New Intravascular Blood Pump Designs for Fontan Patients, *Artificial Organs*, 40 (3), 233-242.
- Day, S. W., Flack, R. D., Lemire, P. P. ve McDaniel, J. C., 2003, Effect of reynolds number on performance of a small centrifugal pump, *4TH ASME_JSME Joint Fluids Engineering Conference*, FEDSM2003-45686, 1893-1899.
- Goncaoglu, B., 2012, Pompaların Seçimi Nasıl Yapılır [online], http://www.erimsever.com/MakMuh/Pompa/PompaSecimiNasilYapilir_Sulama.pdf [Ziyaret Tarihi: 18.08.2018].
- Hu, Q. H., Li, J. Y., Zhang, M. Y. ve Zhu, X. R., 2012, An Experimental Study of Newtonian and Non-Newtonian Flow Dynamics in an Axial Blood Pump Model (vol 36, pg 429, 2012), *Artificial Organs*, 36 (6), 572-572.
- Kafagy, D. H., Dwyer, T. W., McKenna, K. L., Mulles, J. P., Chopski, S. G., Moskowitz, W. B. ve Throckmorton, A. L., 2015, Design of Axial Blood Pumps for Patients With Dysfunctional Fontan Physiology: Computational Studies and Performance Testing, *Artificial Organs*, 39 (1), 34-42.
- Leme, J., Fonseca, J., Bock, E., da Silva, C., da Silva, B. U., dos Santos, A. E., Dinkhuysen, J., Andrade, A. ve Biscegli, J. F., 2011, A New Model of Centrifugal Blood Pump for Cardiopulmonary Bypass: Design Improvement, Performance, and Hemolysis Tests, *Artificial Organs*, 35 (5), 443-447.
- Leme, J., da Silva, C., Fonseca, J., da Silva, B. U., Uebelhart, B., Biscegli, J. F. ve Andrade, A., 2013, Centrifugal Blood Pump for Temporary Ventricular Assist Devices With Low Priming and Ceramic Bearings, *Artificial Organs*, 37 (11), 942-945.
- Mann, K. A., Deutsch, S., Tarbell, J. M., Geselowitz, D. B., Rosenberg, G. ve Pierce, W. S., 1987, An Experimental-Study of Newtonian and Non-Newtonian Flow Dynamics in a Ventricular Assist Device, *Journal of Biomechanical Engineering-Transactions of the Asme*, 109 (2), 139-147.
- Miklosovic, D. S. ve Gregorek, G. M., 2000, An experimental evaluation of non-newtonian scaling effects in a centrifugal LVAD., *American Institute of Aeronautics or Published with Permission of Author(s) and/or Author(s)' Sponsoring Organization*, AIAA 2000-2301.

- Mozafari, S., Rezaenia, M. A., Paul, G. M., Rothman, M. T., Wen, P. ve Korakianitis, T., 2017, The Effect of Geometry on the Efficiency and Hemolysis of Centrifugal Implantable Blood Pumps, *ASAIO Journal*, 63 (1), 53-59.
- Mutlu, F. ve Yapıcı, R., 2018, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak karışık akışlı bir kalp destek pompasının tasarımı ve performansının incelenmesi, *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology*, 6 (3), 504-518.
- Önal, E., 2015, Kalbin Yapısı ve Çalışma Şekli [online], <http://www.biyolojiportali.com/konu-anlatimi/24/Kalbin-Yapisi-ve-Calisma-Sekli> [Ziyaret Tarihi: 15.08.2018].
- Untaroiu, A., Wood, H. G., Allaire, P. E., Throckmorton, A. L., Day, S., Patel, S. M., Ellman, P., Tribble, C. ve Olsen, D. B., 2005, Computational design and experimental testing of a novel axial flow LVAD, *ASAIO Journal*, 51 (6), 702-710.
- Wu, Z. J., Gottlieb, R. K., Burgreen, G. W., Holmes, J. A., Borzelleca, D. C., Kameneva, M. V., Griffith, B. P. ve Antaki, J. F., 2001, Investigation of fluid dynamics within a miniature mixed flow blood pump, *Experiments in Fluids*, 31 (6), 615-629.
- Yakhot, V. ve Orszag, S. A., 1986, Renormalization-Group Analysis of Turbulence, *Physical Review Letters*, 57 (14), 1722-1724.
- Yakhot, V. ve Smith, L. M., 1992, The renormalization group, the ε -expansion and derivation of turbulence models, *Journal of Scientific Computing*, 7 (1), 35-61.
- Zhang, G. G., Zhang, M. Y., Yang, W. Y., Zhu, X. R. ve Hu, Q. H., 2008, Effects of non-Newtonian fluid on centrifugal blood pump performance, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35 (5), 613-617.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmet Mete SABAH
Uyruğu : Türk
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara/17.04.1993
Telefon : 05413655714
Faks :
e-mail : ametesabah@gmail.com

EĞİTİM

| Derece | Adı, İlçe, İl | Bitirme Yılı |
|---------------|---|-----------------------|
| Lise | : Ali Çağlar Anadolu Lisesi, Merkez, Afyonkarahisar | 2011 |
| Üniversite | : Uludağ Üniversitesi, Görükle, Bursa | 2015 |
| Yüksek Lisans | : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Söğütözü, Ankara | 2018 (Yatay Geçiş) |
| Yüksek Lisans | : Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya | - |
| Doktora | : | - |

İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl | Kurum | Görevi |
|------|--|------------------|
| 2013 | Ford Otosan Kamyon, Motor ve Aktarma Organları Fabrikası, İnönü, Eskişehir | Stajyer |
| 2015 | TKİ Garp Linyitleri İşletmesi Müessesesi Makine İşletme Şube Müdürlüğü, Ağır Makine İmalat İşletme Bakım ve Onarım Atölyeleri, Tunçbilek, Kütahya | Stajyer |
| 2017 | ATECO Tank Technology Engineering Services Co., Tavşanlı, Kütahya | Kalite Mühendisi |

UZMANLIK ALANI

Akışkanlar Mekaniği
 Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
 Pompalar

YABANCI DİLLER

İngilizce (Yurtdışında eğitim)

YAYINLAR

Sabah. A. M., Yapıcı R., 2018, Newton Tipi Olmayan Akışkan Kullanarak Kalp Destek Pompasının Performansının Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği Yöntemi İle İncelenmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (Yüksek Lisans Tezinden Yapılmıştır).

