

NEWTON TİPİ OLMAYAN AKIŞKAN KULLANARAK KALP DESTEK POMPASININ PERFORMANSININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANIĞI YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Ahmet Mete SABAH¹ (ORCID: 0000-0001-7425-399X)*
Rafet YAPICI¹ (ORCID: 0000-0002-1109-7480)

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye

Geliş / Received: 30.10.2018
Kabul / Accepted: 26.12.2018

ÖZ

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 ile belirlenmiştir. Analizlerde çalışma akışkanı olarak kana benzer reolojik özellikler gösteren newtoniyen olmayan su-ksantan karışımı (kütlece %0.06 ksantan sakızı) kullanılmıştır. 5000, 6000 ve 7000 dev/dak dönme hızlarında pompanın debisine bağlı olarak basıncını ve verimini gösteren performans eğrileri elde edilmiştir. Sonuçların karşılaştırılması amacıyla newtoniyen bir akışkan olan su-gliserin çözeltisi (hacimce %40 gliserin ve %60 su) ile de HAD analizleri yapılmıştır. Pompanın sayısal performans sonuçlarına göre; yüksek dönme hızında ve düşük debilerde iki akışkan arasındaki basınç farkının yaklaşık %9,2 değerine, yüksek debilerde ise yaklaşık %7'lere düştüğü görülmüştür. Pompa, 5 L/dak debide 5000 dev/dak dönme hızında 88,33 mmHg basınç değerine ulaşmıştır. Bu noktadaki pompa hidrolik verimi ise %52,74 olarak belirlenmiştir.

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

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

ABSTRACT

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 to 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 hydrodynamic performance of a mixed flow left ventricular heart assist pump was determined by the computational fluid dynamics (CFD) method. 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 are repeated with a Newtonian fluid, water glycerin solution (by volume 40% glycerin and 60% water). According to the numerical performance results of the pump, it was seen that the pressure difference between two fluids at high rotational speed and low flow rates is 9,2% and high flow rate it is decreased to about 7%. The pump reached a pressure value of 88,33mmHg at a rotation speed of 5000 rpm at 5L/ min. At this working point, the pump hydraulic efficiency was determined as 52,74%.

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

* Corresponding author / Sorumlu yazar. e-mail / e-posta: ametesabah@gmail.com

1. GİRİŞ

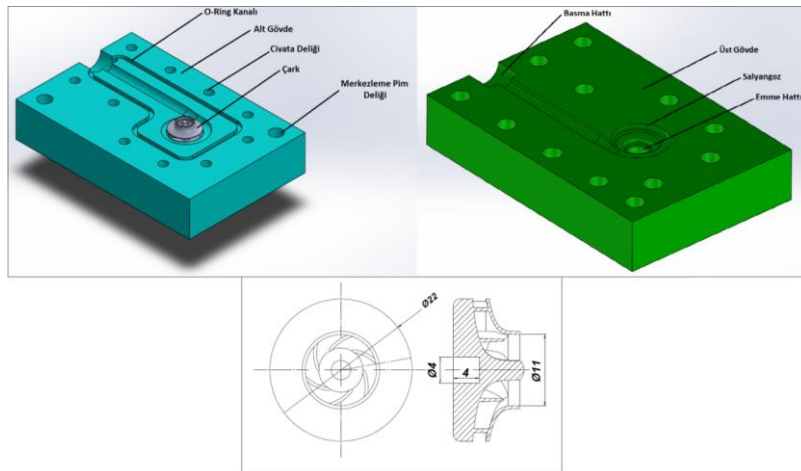
Kalp rahatsızlıkları içerisinde önemli bir yere sahip olan kalp yetmezliği, insan kalbinin çeşitli nedenlerden dolayı vücuda ihtiyaç duyduğu yeterli kanı pompalayamaması olayıdır. Bu hastalığa sahip kişilerde kan akışı vücutta ve kalpte yavaştır ve hastalık ilerledikçe yavaşlamaya devam etmektedir. Bu durum ise doku ve organların ihtiyacı olan besin ve oksijen maddelerinin gerekli sürede taşınmamasına neden olmaktadır. Yeni doğan çocuklardan yetişkin bireylere kadar geniş bir yelpazede görülen bu hastalık kalp nakli gerçekleştirilemediği için genellikle ölümle sonuçlanmaktadır. Ölümlerin önüne geçilebilmesi için araştırmacılar tarafından geliştirilen mekanik sistemlere ventriküler destek cihazları (VAD) adı verilmektedir [1]. Bu sistemler, vücutta pompa görevi gören kalbin akış özelliklerini taklit etmesi için tasarlanan cihazlardan oluşmaktadır. Destek cihazları kullanım alanlarına göre sağ sol ve her iki karıncığa destek vermesi şeklinde üçe ayrılır. Sağ ventriküler destek cihazları (RVAD), pulmoner arterin 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.

Kayma hızına bağlı olarak viskozitesi değişen sıvılara newtoniyen olmayan akışkanlar adı verilmektedir. Kan newtoniyen olmayan bir akışkandır ve reolojik davranışı açısından kayma hızı arttıkça viskozitesi düşmektedir. 37°C'de insan kanının yoğunluğu $1.055 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ve görülür viskozitesi ise $3.6 \times 10^{-3} \text{ Pas}$ olarak saptanmıştır [2]. Kalp destek cihazlarında kullanılan kan pompalarının performanslarını incelemek için kana benzer akışkanlar kullanılmaktadır. Çoğu araştırmacı kan pompası performans testlerini newtoniyen sıvılar (su, su-gliserin karışımı, vb.) ile gerçekleştirmiştir [3,4]. Ancak, Miklosovic [5] çalışmasında, newtoniyen olmayan akışkanlarda pompa performansının newtoniyen akışkanlara göre ortalama %11 (basınç ve verim açısından) daha gerçekçi sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir.

Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, kana benzer özellik gösteren su-ksantan çözeltisinin kalp destek pompası performansına etkisinin sayısal olarak belirlenmesidir.

2. MATERYAL VE METOT

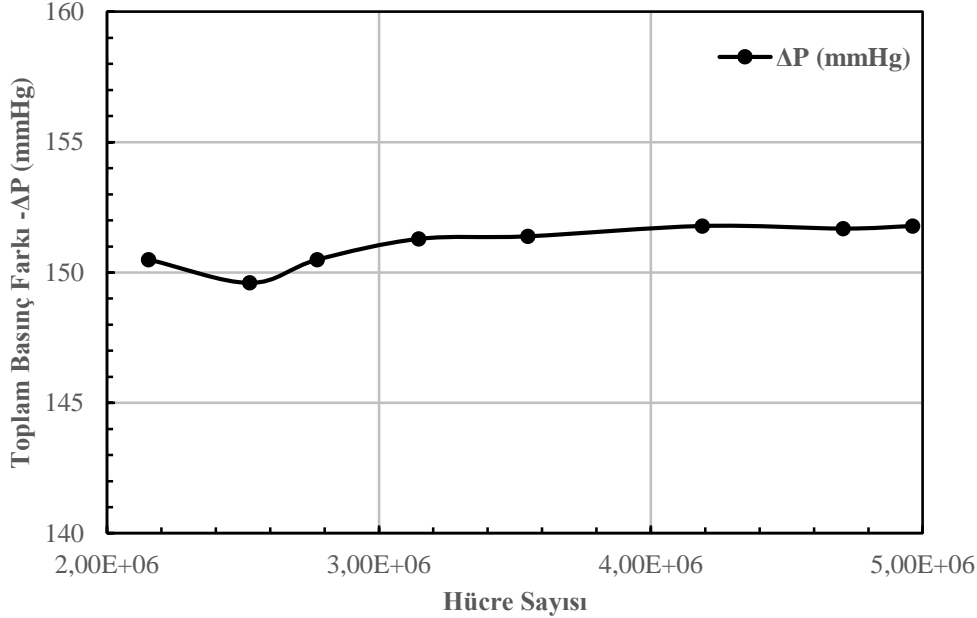
Tasarımı Mutlu ve Yapıcı [6] tarafından yapılmış olan karışık akışlı kalp destek pompasının (Şekil 1) hesaplamalı akışkanlar mekaniği (HAD) simülasyonları Ansys Fluent 18.1 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu yazılım gelişmiş çözücüler sayesinde hızlı ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesine imkân sağlamaktadır. Ayrıca bu yazılım ile, 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 çözülmesine yardımcı olan türbülans modelidir. Analiz sonuçlarının doğruluğunu arttırmak için, duvara yakın bölgelerin iyileştirilmesi seçenekleri arasında 'ölçeklenebilir duvar fonksiyonu' seçilmiştir [7].



Şekil 1. Pompa çark ve salyangoz katı modeli [6]

NEWTON TİPİ OLMAYAN AKIŞKAN KULLANILARAK KALP DESTEK POMPASININ PERFORMANSININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Pompa içerisindeki hesaplama bölgesi için Fine 50 mertebesinde çözüm ağı oluşturulmuştur. Kaliteli çözüm ağı oluşturmak, hesaplamaların doğruluğunu arttırmak ve çözüm yakınsamasını sağlamak amacıyla modelin ağ yapısına basınç gradyanı ve y+ adaptasyonu uygulanmıştır. Bu uygulamalardan sonra elde edilen veriler Şekil 2’de gösterilmiştir. Yapılan çözüm ağı bağımsızlık testi sonucunda yaklaşık 4.700.000 hücre sayısından sonra basınç farkında değişimlerin olmadığı görülmüştür.



Şekil 2. Hücre sayısı ve toplam basınç farkı arasındaki ilişki

Simülasyonlarda akışkan olarak su-ksantan karışımı (kütlece %0.06 konsantrasyonlu) kullanılmıştır. Yazılım içerisinde newtoniyen olmayan akışkanı tanıtmak için yazı satırına *'define/models/viscous/turbulence-expert/turb-non-newtonian?'* komutu girilmiştir [8]. Daha sonra newtoniyen olmayan akışlar için kullanılan reolojik modeller (Carreau, Cross, Hershel-Bulky, Power law vb.) arasından korelasyon katsayısı en yüksek olan Carreau modeli seçilmiştir [9]. Anton Paar Rheolab QC reometre cihazında su-ksantan karışımının Carreau modeli için gerekli parametreleri okunmuştur.

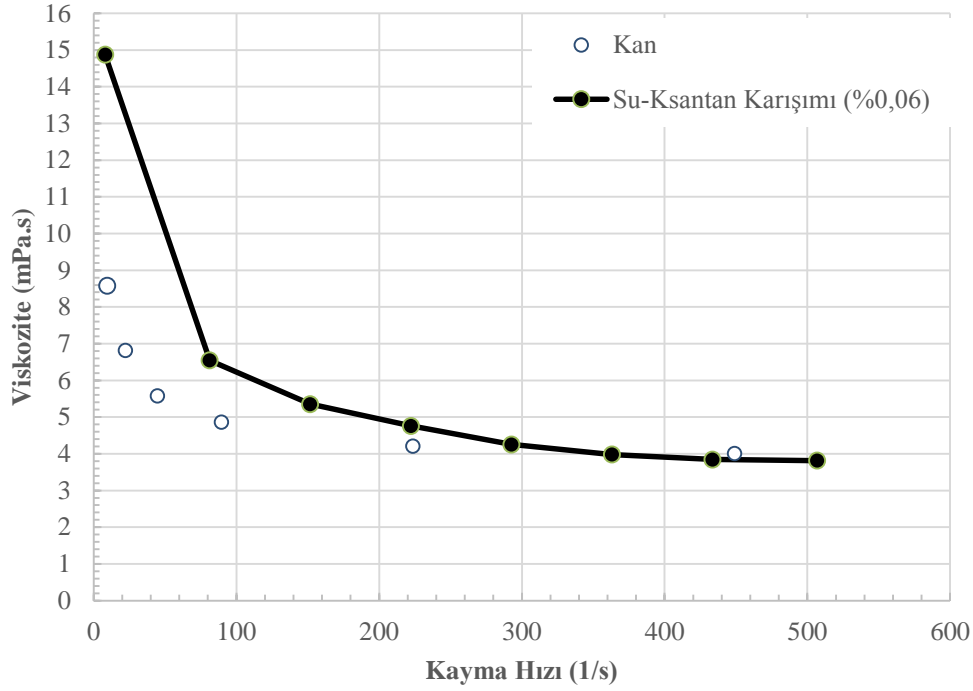
Tablo 1. Su-ksantan karışımının (%0.06) HAD simülasyonları için gerekli olan parametreleri

Model	Denklem	Reolojik parametreler			
		n	η ₀	η _∞	λ
Carreau	$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (\lambda\gamma)^2]^{\frac{n-1}{2}}$	-0.36	0.016	0.0035	0.03226679

Burada: γ: kayma hızı [1/s]; η: viskozite [Pa.s]; η₀: sıfır viskozitesi [Pa.s]; η_∞: maksimum viskozite [Pa.s]; n: akış davranış indeksi; λ: zaman sabiti.

Pompa simülasyonları 5000, 6000 ve 7000 dev/dak dönme hızlarında 1-8 L/dak arasındaki debilerde gerçekleştirilmiştir. 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 9×10^{-5} değerine kadar sürdürülmüştür. Deney düzeneğine uygun olacak şekilde +x yönünde 9,81 m/ s² yerçekimi ivmesi tanımlanmıştır.

A. M. SABAH, R. YAPICI



Şekil 3. Su-ksantan karışımı ile kan [10] reolojisinin karşılaştırılması

Pompa performansının değerlendirilmesinde kullanılan pompa çıkışı ve girişi arasındaki toplam basınç farkı Denklem (1) ile hesaplanmıştır.

$$\Delta P = P_{tç} - P_{tg} \quad (1)$$

Hidrolik verimi hidrolik bir yapının veya elemanın minimum enerji kaybı ile akışkanı iletmeye kabiliyetidir. Bu çalışmada pompanın hidrolik verimi Denklem (2) deki gibi hesaplanmıştır. Bu denklemde kullanılan pompa çark gücü Denklem (3), akışkan gücü ise Denklem (4) ile hesaplanmıştır.

$$\eta_h = \frac{\Delta P \cdot Q}{N_{ç}} = \frac{N_a}{N_{ç}} \quad (2)$$

$$N_{ç} = T \cdot \omega \quad (3)$$

$$N_a = \Delta P \cdot Q \quad (4)$$

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. Pompa çarkının su-ksantan ve su-gliserin iş akışkanlarında farklı devirlerdeki Reynolds sayısı aşağıdaki ifadeyle hesaplanmıştır:

$$Re = \frac{\rho \Omega D^2}{\mu} \quad (5)$$

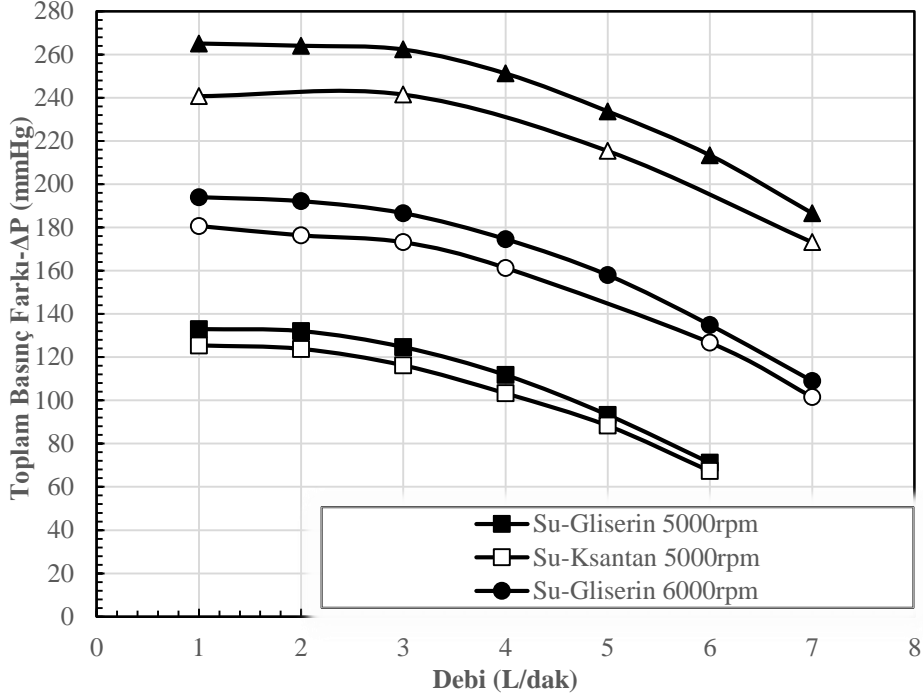
Burada μ dinamik viskoziteyi (Pa.s), Ω çarkın dönme hızını (rad/s), D çark çapını (m) ve ρ akışkan yoğunluğunu (kg/m^3) göstermektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kalp destek pompasının performansının değerlendirilmesi için su-ksantan karışımı (kütlece %0,06 ksantan sakızı) ve su-gliserin (hacimce %40 gliserin ve %60 su) kullanılarak HAD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Newtoniyen bir akışkan olan su-gliserin çözeltisi kana benzer akışkan olarak düşünülmüştür. Akışkanın yoğunluğu ve viskozitesi sırasıyla $1,1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ve $3,5 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ olarak alınmıştır [11]. Karışık akışlı kalp

NEWTON TİPİ OLMAYAN AKIŞKAN KULLANILARAK KALP DESTEK POMPASININ PERFORMANSININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

destek pompasının 5000, 6000 ve 7000 dev/dak dönme hızlarında, su-ksantan karışımı ve su-gliserin çözeltisinin hidrodinamik performans eğrileri Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Su-gliserin çözeltisi ile su-ksantan karışımı için HAD sonuçlarının karşılaştırılması

5000 dev/dak dönme hızındaki iki akışkan arasındaki farkın en yüksek olduğu yerde (1 L/dak debide) basınç farkının yaklaşık %6 civarlarında çıktığı görülmüştür. 7000 dev/dak dönme hızında ise bu değer yaklaşık %9,2’ye çıkmaktadır. Çalışmanın yapıldığı dönme hızlarında yüksek debilere çıkıldıkça iki akışkan türü arasındaki basınç farkının azaldığı (5000 dev/dak da %3, 7000 dev/dak da %7’lere indiği) görülmüştür. Bu farkların yüksek debilerde azalmasının sebebi, yazılımda seçilen RNG $k-\epsilon$ türbülans modelinin çözümünde diferansiyel viskozite opsiyonunun kullanılmamasıdır. Uygulanan türbülans modeli literatür verileri [6, 12] ile uyum içindedir.

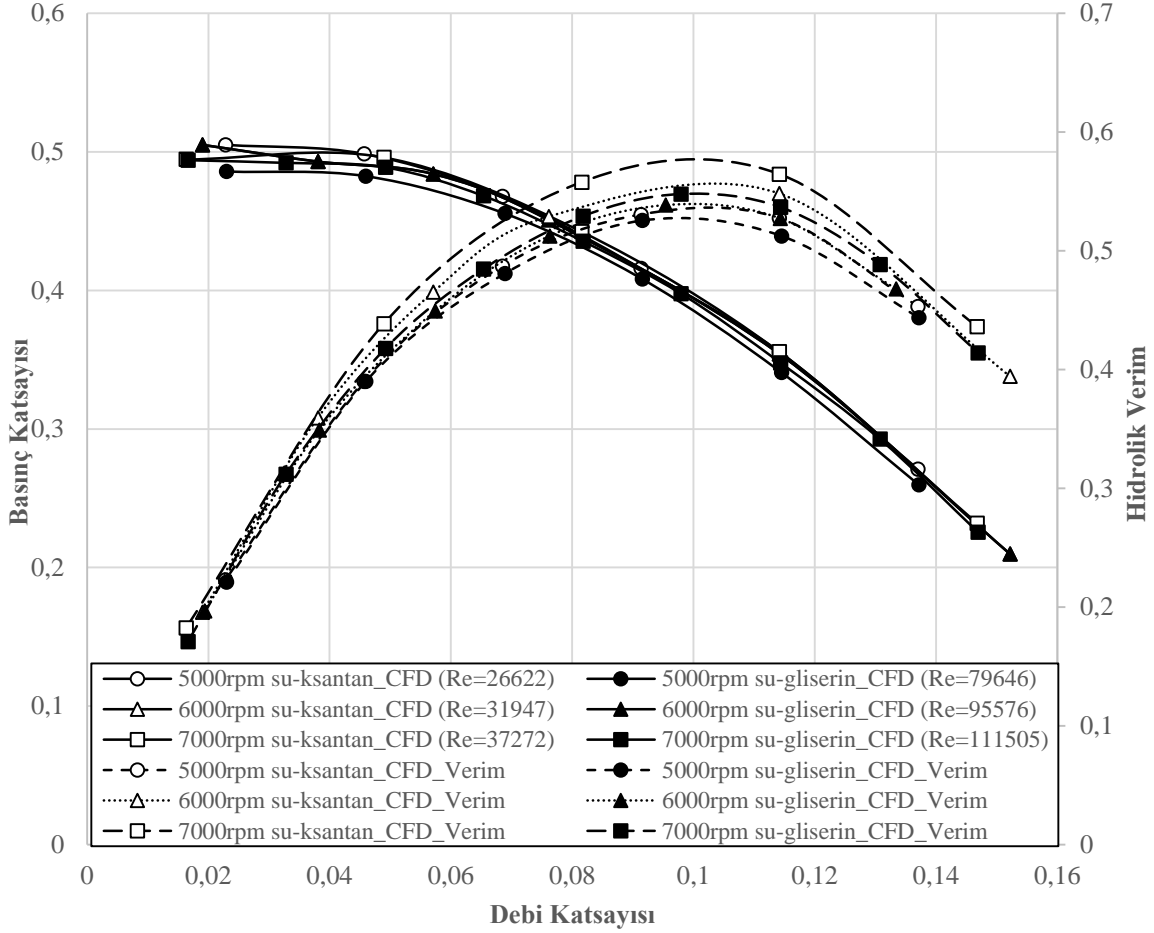
Pompaların performanslarını daha az sayıda parametreyle ifade etmek ve genelleştirmek için debi ve basınç katsayıları gibi boyutsuz parametreler kullanılır. Pompaların HAD analiz sonuçlarının değerlendirilmesi için iki boyutsuz performans parametresi olan basınç katsayısı (ψ) ve debi katsayısının (Φ) literatürdeki çalışmalarda da kullanıldığı görülmüştür [13,14]. Bu parametrelerin boyutsuz ifadeleri aşağıda verilmiştir:

$$\psi = C_{\psi} \left(\frac{\Delta P}{\rho N^2 R^2} \right) \tag{5}$$

$$\Phi = C_{\phi} \left(\frac{Q}{NR^3} \right) \tag{6}$$

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 $1,5195 \times 10^{55}$ ’dir [15].

Su-ksantan karışımı ve su-gliserin çözeltisi ile HAD simülasyonları gerçekleştirilen karışık akışlı pompanın 3 farklı dönme hızında hidrodinamik performans eğrileri Şekil 5’te gösterilmiştir. Su-ksantan karışımı kullanılan akışta en yüksek hidrolik verim 7000 dev/dak de yaklaşık %56,45 olarak hesaplanmıştır. Su-gliserin çözeltisinde ise aynı dönme hızında hidrolik verimin yaklaşık olarak %53,66 olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Boyutsuz parametrelere göre farklı devirlerde HAD sonuçlarının karşılaştırılması

Karışık akışlı pompaların hidrodinamik performanslarını belirleyebilmek için yapılan çalışmalarda deney ve simülasyonların daha rahat ve kolay olmasını sağlamak amacıyla, araştırmacılar kana benzeyen newtoniyen sıvılar kullanmaktadır. Bu çalışmalarda [14, 16, 17] karışık akışlı pompaların hidrolik verimleri genellikle %25 ile %45 arasında değişiklik göstermektedir. Bir diğer karışık akışlı pompalar üzerine yapılan çalışmada [6], 5100 dev/dak dönme hızında 5 L/dak debide 100mmHg basınçta hidrolik verim yaklaşık olarak %52,1 olarak hesaplanmıştır. Aynı karışık akışlı pompanın performansını incelemek için newtoniyen olmayan bir akışkan kullandığımız da ise 5000 dev/dak dönme hızında 5 L/dak debide 88,30 mmHg basınçta yaklaşık olarak hidrolik verim %52,74 olarak belirlenmiştir. Genel olarak literatürdeki karışık akışlı pompalar için yapılan çalışmalar ile bu çalışmanın sonuçları karşılaştırıldığında newtoniyen olmayan akışkanın pompa verimini artırdığı görülmüştür.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada pompa analiz programı kullanılarak daha önce tasarlanmış olan karışık akışlı bir kalp destek pompasının hidrodinamik performansının HAD simülasyonu ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen performans eğrileri üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Analiz çalışmalarında iş akışkanı olarak su-gliserin ve su-ksantan karışımları kullanılarak pompanın newtoniyen ve newtoniyen olmayan akışkanlarda göstermiş olduğu hidrodinamik performansları belirlenmiştir. Karışık akışlı pompaların performansları üzerine yapılan literatürdeki çalışmalarda akışkan olarak su-ksantan karışımına rastlanmadığı görülmüştür. Bu nedenle yapılan bu çalışma ile literatüre yeni bir bilgi sunulmuştur. Çalışma sonunda kalp destek pompasının hidrolik veriminin literatürdeki verim değerlerinin üst sınırına yakın olduğu görülmüştür.

Kalp destek pompasının performansının belirlenebilmesi için kana benzer akışkana ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle literatürde yapılan araştırmalarda su-ksantan karışımının reolojik özelliklerinin kana benzer özellikler

NEWTON TİPİ OLMAYAN AKIŞKAN KULLANILARAK KALP DESTEK POMPASININ PERFORMANSININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

gösterdiği tespit edilmiştir. Newtoniyen olmayan akışkan kullanıldığında newtoniyen akışkana göre pompa performansında değişimlere rastlanılmıştır. İleriki çalışmalarda ksantan-su karışımının tasarlanan pompaların performans değerlendirmelerinde kullanılarak daha gerçekçi sonuçların alınmasına yardımcı olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] <https://www.tkd.org.tr/kalp-yetersizligi-calisma-grubu/sayfa/toplum-icin-bilgiler> (erişim tarihi 16.10.2018)
- [2] HUANG, C.R., FABİSIAK, W.A., “A Rheological Equation Characterizing Both The Time Dependent and Steady State Viscosity of Human Blood”, *AIChE Symp Ser*, 74:19-21, 1978.
- [3] AKAMATSU, T., TSUKİYA, T., “Development of a Centrifugal Blood Pump with Magnetically Suspended Impeller and The Related Fluid Mechanical Problems”, *Indian Academy of Sciences*, 23, 597-603, 1998.
- [4] OGAMI, Y., MATSUOKA, D., HORIE, M., “Computational Study of Magnetically Suspended Centrifugal Blood Pump”, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 3, 102-112, 2010.
- [5] MIKLOSOVIC, D.S., GREGOREK, G.M., “An Experimental Evaluation of Non-newtonian Scaling Effects in a Centrifugal LVAD”, *American Institute of Aeronautics or Published with Permission of Author(s) Sponsoring Organization*, 1-9,2000.
- [6] MUTLU, F., YAPICI, R., “Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Kullanılarak Karışık Akışlı Bir Kalp Desteği Pompasının Tasarımı ve Performansının İncelenmesi”, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 504-518,2018.
- [7] MOZAFARI, S., REZAIENIA, M.A., PAUL, G.M., ROTHMAN, M.T., WEB, P., KORAKIANITIS, T., “The Effect of Geometry on the Efficiency and Hemolysis of Centrifugal Implantable Blood Pumps”, *ASAIO Journal*, 63, 53-59, 2017.
- [8] ANSYS, “Ansys Fluent User’s Guide 18.0 edition”, ANSYS Inc, Cannonsburg, 2017.
- [9] CAO, X., ZHAO, Z., CHENG, L., YIN, W., “Evaluation of a transparent analog fluid of digested sludge: Xanthan gum aqueous Solution”, *Procedia Environmental Sciences* 31, 735-742, 2016.
- [10] COMPLETEO, C., GERALDES, V., SEMIAO, V., “Micro-PIV Characterization of Laminar Developed Flows OF Newtonian and Non-Newtonian Fluids in a slit channel”, *Engineering Mechanics*, 19, 3-13, 2012.
- [11] HU, O., LI, J.Y., ZHANG, M.Y., ZHU, X.R., “An experimental study of Newtonian and non-Newtonian flow Dynamics in an axial blood pump model.”, *Artificial Organs*, 36(4), 429-433, 2012.
- [12] FRASER, K. H., TASKİN, M. E., GRIFFITH, B. P., WU, Z. J., “The use of computational fluid dynamics in the development of ventricular assist devices”, *Medical Engineering & Physics*, 33(3): 263-280, 2011.
- [13] KAFAGY, D.H., DWYER, T.W., MCKENNA, K.L., MULLES, J.P., CHOPSKI, S.G., MOSKOWITZ, W.B., THROCKMORTON, A.L., “Design of axial blood pumps for patients with dysfunctional fontanphysiology: computational studies and performance testing”, *Artificial Organs*, 39(1), 34-42, 2015.
- [14] WU, Z.J., GOTTLIEB, R.K., BURGREN, G.W., HOLMES, J.A., BORZELLECA, D.C., KAMENEVA, M.V., GRIFFITH, B.P., ANTAKI, J.F., “Investigation of fluid Dynamics within a miniature mixed flow blood pump”, *Experiments in Fluids*, 31(6), 615-629, 2001.
- [15] CHOPSKİ, S.G., FOX, C.S., RIDDLE, M.D., MCKENNA, K.L., PATEL, J.P., ROZOLIS, J.T., THROCKMORTON, A.L., “Pressure-Flow Experimental Performance of New Intravascular Blood Pump Designs for Fontan Patients”, *Artificial Organs*, 40(3), 233-242, 2016.
- [16] ARVAND, A., HANH, N., HORMES, M., AKDIS, M., MARTIN, M., REUL, H., “Comparison of hydraulic and hemolytic properties of different impeller designs of an implantable rotary blood pump by computational fluid dynamics”, *Artificial Organs*, 28(10): 892-898, 2004.
- [17] CARRIERİ M.İ FARINASİ M. I., GARON, A., “Hemodynamics characteristics of a mixed flow pump prototype progress report of in vitro and acute animal experiments”, *ASAIO Journal*, 52 (4), 373-377, 2006.