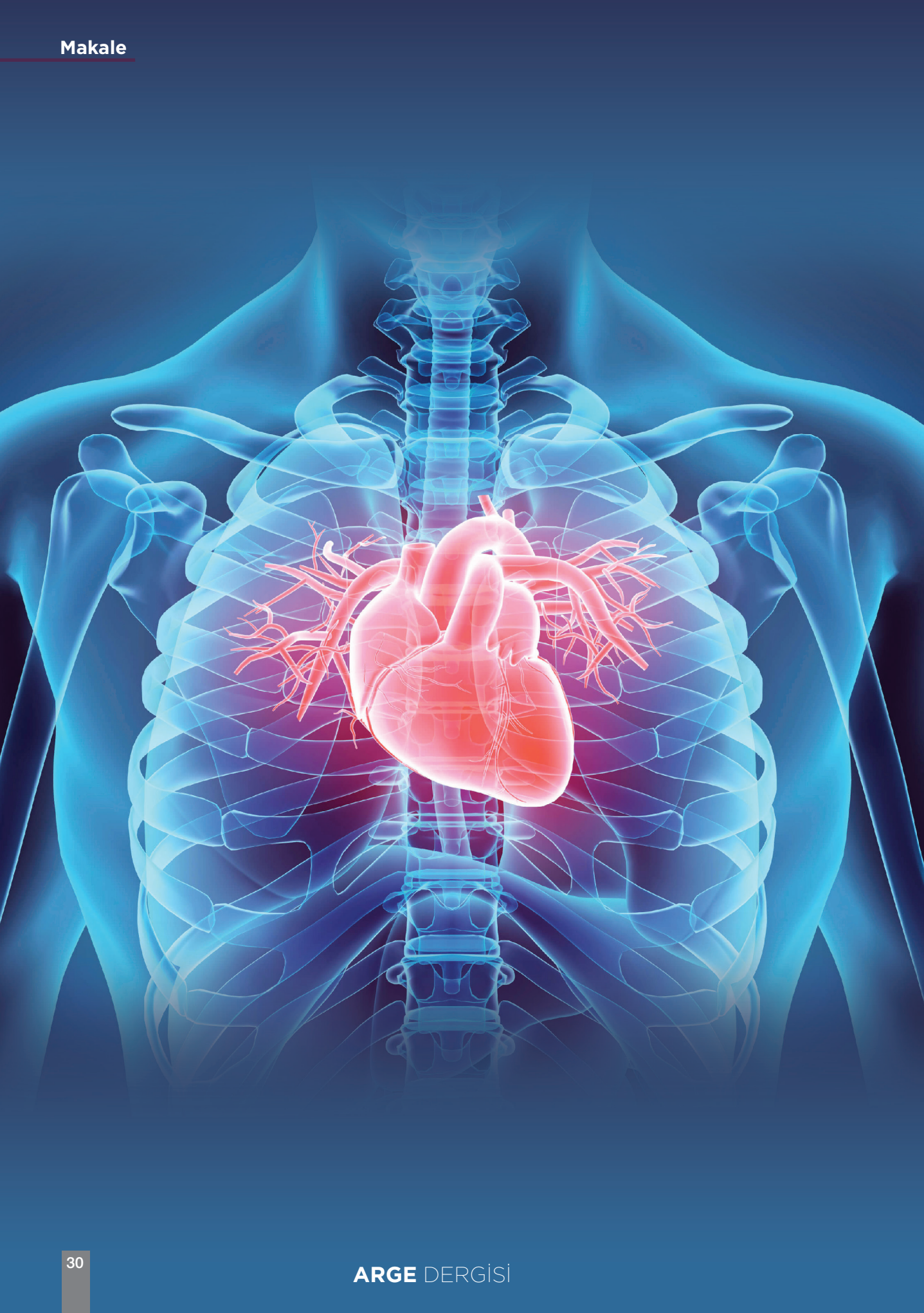




HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE MEKANİK DOLAŞIM DESTEK SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ



Melisa Özakçakaya
ozakcakaya.melisa@gmail.com
YTÜ Biyomedikal Mühendisliği
Yıldız Teknik Üniversitesi



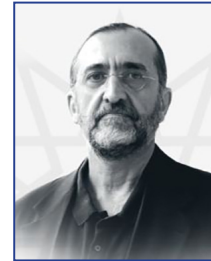
Ahmed Alhajyounis
ahmed.alhajyounis@gmail.com
YTÜ Biyomedikal Mühendisliği
Yıldız Teknik Üniversitesi



Mert Yiğit
mert.yigit@aol.com
YTÜ Biyomedikal Mühendisliği
Yıldız Teknik Üniversitesi



Yiğit Aydoğan
yigit.aydogan@aol.com
YTÜ Biyomedikal Mühendisliği
Yıldız Teknik Üniversitesi



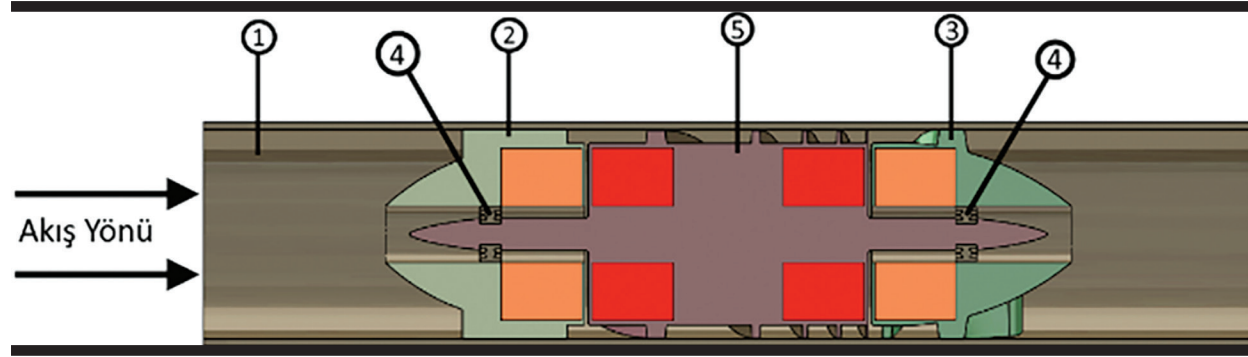
Doç. Dr. Kamuran Kadıpaşaoğlu
kamuran@yildiz.edu.tr
YTÜ Biyomedikal Mühendisliği
Yıldız Teknik Üniversitesi

GİRİŞ

Mekanik Dolaşım Destek (MDD) sistemleri son dönem kalp yetmezliğinde kalp nakline köprü olarak veya yaşam boyu dolaşım sistemine mekanik destek sağlamakta başarıyla kullanılmaktadır. ¹En çok kullanılan MDD sistemi olan Sol Ventrikül Destek Pompası (SVDP) hemodinamik yetmezliğe giren sol karıncığın hacim yükünü azaltmak için kullanılır. ²SVDP sistemik dolaşıma kan basan bir pompa, pompayı hareket ettiren bir eyleyici, pnömatik veya elektromekanik bir güç kaynağı, kontrol ünitesi ve gref, konektör, kablo gibi çeşitli aksesuarlar ve sistemlerden oluşmaktadır. Bu aksesuarlar ve sistemler günümüzde minyatürize edilmiş, taşınabilir, vücut içi, dayanıklı, güvenilir ve akıllı teknolojilere dönüştürülmüştür. Bu pompaların Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde yerli imkanlarla üretilmesi tıbbi, bilimsel, ekonomik ve toplumsal bir ihtiyaçtır.

Yapılan proje, bu soruna yerli ve özgün bir çözüm sunmak amacıyla, yenilikçi bir SVDP oluşturmak hedefiyle hazırlanmıştır. Tek kademeli bir eksenel türbin ve türbin rotorunu hareketlendiren fırçasız doğru akım motoru, SVDP'nin iki Alt Bileşenini oluşturmaktadır. Projenin amaçları, SVDP'nin iki Alt Bileşenini ayrı ayrı tasarlamak, tasarımları sanal ve fiziki ortamlarda sınamak, bulguları geometrik iterasyonlarla yakınsamak, optimize edilen bileşenleri üretmek ve entegre etmektir. Tasarım isterleri pompanın tamamının vücut içine sığması (anatomik); anlık metabolik oksijen gereksinimine uygun kan basıncı ve debisi sağlaması (hemodinamik); alyuvarlara hasar vermemesi ve pıhtılaşmaya yol açmaması (hematolojik); eksenel akışlı, tek kademeli, rotoru kanla yıkanan mekanik rulmanlar üzerinde dönmesi (dinamik); ve dayanıklı ve güvenilir olması (mekanik) şeklinde belirlenmiştir.

Türbin indüsr, rotor ve difüzör olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır (**Şekil 1**). Bu parçaların içerisinde iki adet eksenel akıllı motor bulunmaktadır. İndüsr ve difüzörün kanatları mahfazaya (shroud) sabitlenmiş olup rotor ise motorlar tarafından eksen etrafında döndürülmektedir. Rotorun dönmesiyle sıvıya kazandırılan kinetik enerji, sabit difüzör kanatlarında basınç enerjisine dönüşmektedir.



▲ Şekil 1. Sol Karıncık Destek Pompasının (SVDP) kesiti: Mahfaza (shroud, 1), stator bileşenleri (indüsr, 2; difüzör, 3), ve rulmanlar (4) üzerinde dönen rotor (5). Eksenel akıllı elektromanyetik motor bileşenleri: Rotor gömülü sabit mıknatıs halkaları (kırmızı) ve statora gömülü sarımlar (turuncu).

Tasarım Aşaması

İlk olarak Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) programı kullanılarak türbin geometrisi oluşturulur. Ardından, tasarlanan türbin, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak sanal performans testine tabi tutulur. Bu testte kesme gerilimi (Shear Stress), verimlilik, basınç artışı, tork, geri akış, strese maruz kalma süresi, alyuvar hasarı (hemoliz) ve pıhtılaşma (tromboz) parametrelerine bakılır. Bu testin sonuçlarına göre türbin geometrisinde iyileştirmeler yapılır ve sanal performans testleri tekrar edilir. Bu iteratif sürecin sonunda parametrelere en uygun geometri seçilerek fiziki prototip üretilir.

Kalp-Damar sisteminin basitleştirilmiş bir analog devresine bağlanan fiziki prototip, Parçacık Hızı Görüntüleme (PHG) testlerine tabi tutulur, 3sonuçlar HAD sonuçlarıyla karşılaştırılır ve iterasyonlarla tasarım yakınsanır.

Tezgah üstü fiziki performans testlerini başarıyla geçen prototip, sonraki aşamalarda sırasıyla analog devreden kan geçirilerek yapılan ex vivo hemoliz testlerine, hayvanlarda yapılan in vivo deneylere ve insanlarda yapılan klinik deneylere tabi tutularak seri üretime sunulur. Bu süreçte gerekirse iterasyonlara başvurulur.

Bu makalede yukarıda bahsedilen sürecin sanal ortamda yürütülen tasarım, optimizasyon ve performans testi adımları açıklanacaktır.

Teorik Arka Plan

Bernoulli Denklemi, akış çizgisinin üzerinde herhangi bir n kesiti için dışarıdan etki olmadığı sürece akan sıvının toplam enerjisinin sabit kaldığını gösterir. 4Aşağıda enerji denklemi, sıvının sabit hacmine bölünerek basınç cinsinden ifade edilmiştir. Denklemde ρ sıvının yoğunluğunu, g yerçekimi kuvvetini, V sıvının hızını, h yüksekliği göstermektedir. Türbin boyunca sıvı yüksekliği anlamlı derecede değişmemektedir.

$$P_n + \frac{1}{2} \rho V_n^2 + \rho g h_n = c$$

$\downarrow$ Statik Basınç $\downarrow$ Dinamik Basınç $\downarrow$ Potansiyel Basınç $\downarrow$ Sabit

Bu projede tasarlanan kalp pompasında indüsr, yüzeyinden geçen kanın akışını düzleştirerek rotora aktarmaktadır. Rotor kanatlarının devinimsel hareketiyle teğetsel yönde hız kazanan kanın dinamik basıncı yükselmektedir. Difüzör kanatları seviyesinde teğetsel hız sıfıra düştüğünden bu yöndeki dinamik enerji hızdan basınca dönüşmektedir. Eksenel hız ve potansiyel basınç ise türbin boyunca sabit kalmaktadır.

METOD

Tasarım Kriterleri ve Kısıtları

Türbin mahfaza çapı 30 mm olarak sabit tutulmuştur. İndüsr ve difüzör dörder kanatlı, uzunlukları 28.5 mm ve kanat çıkış açıları 0° olarak tasarlanmıştır. Rotor uzunluğu 40 mm, rotor gövde çapı 26 mm, rotor kanat yüksekliği 1.8 mm, mahfaza ve rotor kanat ucu arasındaki boşluk mesafesi ise 0.2 mm'dir. İndüsr-rotor ve rotor-difüzör arasındaki boşluk 0.5 mm'dir. Rotora gömülü sabit mıknatıs halkalarının (Şekil 1, kırmızı) ve statora gömülü sarımların (Şekil 1, turuncu) eksenel uzunluğu gerekli torku verecek şekilde 10 mm olarak hesaplanmıştır.

Geometrik tasarım değişkenleri kesit alanı (A_c) rotor ve difüzör kanat giriş ve çıkış açıları (θ_g, θ_c) kanat geometrileri ve kanat sayısıdır (n). Bağımsız tasarım değişkenleri rotor açısal hızı (ω), akış miktarı (Q), mil torku (T), basma yüksekliği (ΔH), hidrolik verimlilik (η_h) ve alan ortalamalı rotor mahfaza kesme gerilimidir (SS_{sh}). Ayrıca geri akış (BF) ve ileri akış (FF) toplam sıvı akışı miktarına bölünerek yüzde olarak gösterilmiştir.

Nominal pompa operasyon noktası $Q = 5L/dk$, $\Delta H = 80$ mm Hg olarak ayarlanmıştır. Kabul edilebilir verimlilik $\eta_h > \%20$ 'dir. Hemolizi engellemek için kabul edilebilir maksimum alan ortalamalı rotor mahfaza stresi 550 Pa'dır. Türbülans minimize etmek için rotorun giriş ve çıkışında geri akış sırasıyla maksimum %15 ve %35 olmalıdır.

Tasarım iterasyonları

Parametre optimizasyonu yapılırken iyileştirmelerin simülasyon sonuçları üzerindeki et-

kisini en iyi şekilde gözlemleyebilmek için her seferinde sadece bir parametre değiştirilerek ilerlenmiştir. En yüksek verimlilik değerini veren ve türbülans minimize eden değerler tasarımın optimal değerleri olarak seçilmiştir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi

Momentum ve Navier-Stokes denklemlerini çözmek için sıvı alanı yaklaşık 46 milyon sonlu eleman hücrelerine (mesh) bölünmüştür. Rotor girişinde ve difüzör kanatları boyunca türbülans karakteristikleri Reynolds sayısı 10000'den büyük olacak şekilde varsayılarak simülasyonda kullanmak için k- ϵ türbülans modeli seçilmiştir. Simülasyon sonuçlarının daha gerçekçi olması için viskoz alt tabakaya en yakın düğümlerin (node) yerlerinin tespit edilmesinde Geliştirilmiş Duvar İşlemi kullanılmıştır.

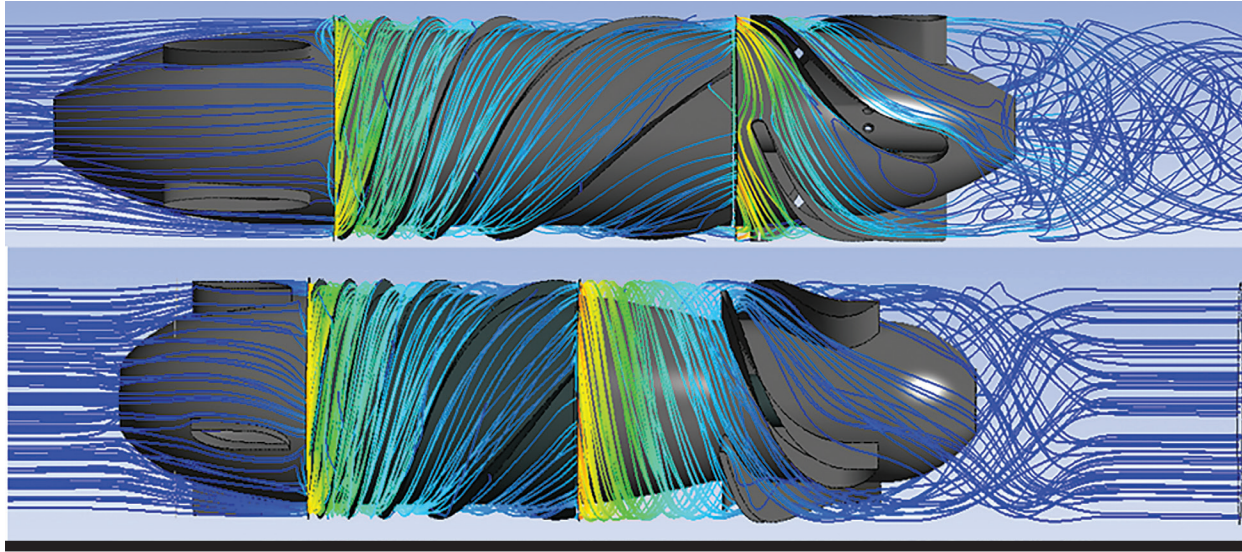
SVDP'nin akış alanı indüsr, rotor ve difüzörü temsil eden 3 bölgeye ayrılmıştır. Rotor bölgesine gövdesel dönüş uygulanmış ve rotor kanatlarının sınırları sıfır bağıl hıza sahip, dönerek hareket eden duvarlar olarak tanımlanmıştır. Diğer tüm yüzey sınırları kütle-akış girişi olarak, pompa çıkışının kesit alanı ise basınç çıkışı olarak tanımlanmıştır.

Rotor girişindeki ve çıkışındaki sınır kesişimleri arayüz olarak belirlenmiştir. Mahfazanın kesme gerilimi, gerilimin 400 Pascal'ı aştığı alanlarda ortalama alınarak hesaplanmıştır. HAD kullanılarak yapılan simülasyon sonucunda türbin parçaları üzerinde sıvı akış çizgileri incelenmiş, akışta oluşan türbülans ve düşük basınç alanları gözlemlenmiştir.

İterasyonlara başlamak için nominal değerleri turbo-dinamik denklemlerle bilgisayar ortamında çözüp bir başlangıç tasarımı oluşturulmuş ve onun üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır. 5Optimal değeri bulunan parametreler sonraki iterasyonlarda sabit tutulmuş ve diğer parametreler incelenmiştir. Turbo-dinamik denklemlere göre kullanılan ω aralığı 250-500 rad/s olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla HAD testleri, ω değeri üst sınırdan sabit tutularak gerçekleştirilmiştir.

SONUÇLAR VE ÇIKARIM

Modelde oluşan türbülans, HAD ile yapılmış simülasyonda sıvı akış çizgilerinden yararlanılarak incelenmiş, giriş açısının büyük olduğu tasarımlarda verimliliğin daha yüksek olduğu ve türbülansın daha az gözlemlendiği görülmüştür. (Şekil 2)



▲ Şekil 2 Hesaplamalı Akışkanlar ile belirlenen akış çizgileri (streamline) ve difüzör tasarımının türbin çıkışındaki türbülansa etkisi açıkça görülebilmektedir

Difüzör giriş açısının verimliliğe ve basma yüksekliğine etkisi A1-A2-A3 modellerinde denenmiş ve Tablo 1’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 1: Difüzör giriş (θ_g) açısının basma yüksekliği (ΔH) ve verimliliğe (η_h) etkisi

Model	A1	A2	A3
θ_g	65	73	79
θ_ϕ	0	0	0
ΔH (mmHg)	24,35	67,33	67,78
η_h %	7,42	20,21	21,06

Tablo 1’deki değerler incelenerek ve HAD programıyla türbülansa bakılarak giriş açısının büyük olduğu tasarımlarda verimliliğin daha yüksek olduğu ve türbülansın daha az gözlemlendiği görülmüştür. Verilerden yola çıkılarak, difüzör giriş açısı A3 modelindeki gibi seçilmiştir. Difüzör kanat sayısının verimliliğe etkisi B1-B2 modellerinde kanatların geometrisi sabit tutularak denenmiştir.

Tablo 2: Difüzör kanat sayısının verimliliğe etkisi ($\bar{A}_c$: ortalama kesit alanı)

Model	B1	B2
n_i	5	4
$(\bar{A}_c)(mm^2)$	279,3	290,53
ΔH (mmHg)	78,45	85,06
η_h %	21,72	22,31

Kanat arasındaki alan arttığından sıvının daha serbest hareket ettiği gözlemlenmiş, bu verimliliğin artmasına ama aynı zamanda türbülans oluşmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla verimliliğin ve türbülansın kabul edilebilir bir seviyede olduğu B2 modelinin kanat sayısı, tasarımın optimal değeri olarak seçilmiştir.

Yıldız Teknik Üniversitesi Fizyolojik Kontrol Laboratuvarı

Kamuran Kadıpaşaoğlu’nun yürütücülüğünü yaptığı “Mekanik Dolaşım Destek Sistemi Geliştirilmesi” projesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Fizyolojik Kontrol Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmektedir.

Laboratuvar multidisipliner olup farklı bölümlerden ve sınıflardan doktora, yüksek lisans ve lisans öğrencilerinin ekip halinde çalıştığı bir ortamdır. Laboratuvarında bir doktora, bir yüksek lisans öğrencisinin yanı sıra 17 lisans öğrencisi araştırmalarda aktif görev almaktadır. Laboratuvarında geliştirilen projenin yapım aşamasında çalışan öğrenciler türbin tasarımı ve performans testleri, Kalp-Dolaşım Sistemi Benzetim Devresi tasarımı ve yapımı, kontrol ünitesinin tasarımı ve kontrol algoritmaların yazımı olmak üzere çeşitli çalışma alanlarında çalışmaktadırlar. Bu çeşitlilik sayesinde laboratuvara katılan her öğrenci kendi ilgi alanında gelişme ve çalışma imkanına sahip olmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK (Proje No: 118S098) tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Holley CT, Harvey L, John R. Left ventricular assist devices as a bridge to cardiac transplantation. J Thorac Dis 2014;6(8):1110-1119.
- [2] Eisen, Howard J. “Left Ventricular Assist Devices (LVADS): History, Clinical Application and Complications.” Korean circulation journal vol. 49,7 (2019): 568-585.
- [3] Houston G Wood, Amy L Throckmorton, Alexandrina Untaroiu and Xinwei Song. “The medical physics of ventricular assist devices”, Reports on Progress in Physics 68 545. 31 January 2005
- [4] Ruqiong Qin and Chunyi Duan, “The principle and applications of Bernoulli equation”, Journal of Physics: Conference Series 916 012038. 2017
- [5] Toptop, K, Kadipasaoglu KA. Design and numeric evaluation of a novel axial-flow left ventricular assist device. ASAIO J. 2013 May-Jun;59(3):230-9.

YTÜ Biyomedikal Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Kamuran Kadıpaşaoğlu, “**Mekanik Dolaşım Destek Sistemi Geliştirilmesi**” başlıklı TÜBİTAK 1003 projesiyle yerli bir mekanik dolaşım desteğine duyulan ihtiyaca yönelik yenilikçi bir sistem geliştiriyor!



Mekanik Dolaşım Destek Sistemi Geliştirilmesi

Türkiye’de yerli ve rekabetçi mekanik dolaşım desteği (MDD) sistemlerinin geliştirilmesi tıbbi, insani ve toplumsal bir ihtiyaç olduğu kadar bilimsel, teknolojik ve ekonomik bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Önerilen proje, bu soruna yerli ve özgün bir çözüm sunmak amacıyla, yenilikçi bir MDD sistemi oluşturmak hedefiyle hazırlanmıştır. Tek kademeli bir eksenel türbin ve türbin rotorunu hareketlendirilen fırçasız doğru akım motoru, Destek Sisteminin 1. Temel Teknolojisi (TT1) olan Sol Ventrikül Destek Pompası’nın (SVDP) iki Alt Bileşenini (AB) oluşturacaktır. İkinci Alt Proje kapsamında geliştirilecek olan Kontrol Ünitesinin (TT2) iki Alt Bileşeni ergonomik hasta arayüzü ve çift yönlü veri iletişim protokolu olacaktır. Projenin 3. Temel Teknolojisini oluşturan ve Ana Proje Kapsamında geliştirilecek olan benzetim devresinde, sol karıncığın zamanla değişen elastansı (hacim basınç ilişkisi) Pontryagin Maximum Prensipli (PMP) uygulamasıyla sol karıncık hidrolik verimini maksimize edecek şekilde modellenecektir. Literatürde şimdiye kadar yalnızca çeşitli empirik elastans girdileriyle belirlenebilen sol karıncık fonksiyonun önerilen projede Optimum Kontrol Teorisinin en etkili yöntemlerinden biri olan PMP ile analitik yoldan benzetilecek olmasının, MDD sistemlerinin performans testine yönelik etkin, uygulanabilir ve özgün bir test platformu sunacağı umulmaktadır.

#ArGedeLiderYTÜ

