



**YAPAY DAMAR TESTLERİNDE KULLANILMAK
ÜZERE BİR YAPAY DOLAŞIM DÖNGÜSÜNÜN
GELİŞTİRİLMESİ**

Namık KARAKAŞOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Galip YILMAZ

2025

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

YAPAY DAMAR TESTLERİNDE KULLANILMAK ÜZERE BİR YAPAY
DOLAŞIM DÖNGÜSÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Namık KARAKAŞOĞLU

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Galip YILMAZ

BAYBURT - 2025

KABUL VE ONAY

Dr. Öğr. Üyesi Galip YILMAZ danışmanlığında, Namık KARAKAŞOĞLU tarafından hazırlanan “Yapay Damar Testlerinde Kullanılmak Üzere Bir Yapay Dolaşım Döngüsünün Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışma, 22.01.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Güher Pelin TOKER

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Galip YILMAZ

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Bünyamin ALIM
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Galip YILMAZ danışmanlığında hazırlamış olduğum “Yapay Damar Testlerinde Kullanılmak Üzere Bir Yapay Dolaşım Döngüsünün Geliştirilmesi” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

22.01.2025

Namık KARAKAŞOĞLU



ÖN SÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında desteklerini esirgemeyen danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Galip YILMAZ'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Kendisi, akademik gelişimime büyük katkı sağlamış, yol gösterici tavsiyeleri ve derin bilgi birikimiyle tezimin şekillenmesinde önemli rol oynamıştır. Ayrıca, tezimin hazırlanmasında değerli katkılarını esirgemeyen jüri üyelerim Sayın Dr. Öğr. Üyesi Emin USLU'ya ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Güher Pelin TOKER'e teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin önerileri ve eleştirileri, çalışmamın kalitesini artırmamda büyük rol oynamıştır.

Namık KARAKAŞOĞLU



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPAY DAMAR TESTLERİNDE KULLANILMAK ÜZERE BİR YAPAY DOLAŞIM DÖNGÜSÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ

Namık KARAKAŞOĞLU

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Galip YILMAZ

Bayburt-2025, Sayfa: 37

Yapay Dolaşım Döngüsü (YDD), genellikle yapay damar sistemleri ve benzeri biyomekanik süreçlerin simülasyonu için kullanılan cihazlara verilen addır. Mevcut YDD sistemleri, yüksek maliyetleri ve sınırlı erişilebilirlikleri nedeniyle araştırmacılar için zorluklar yaratmaktadır. Bu sistemler hem elektronik hem de mekanik olarak oldukça karmaşık yapılar içermektedir. Öte yandan, yapay damar ve ilgili alanlarda her geçen gün yeni araştırma projeleri yürütülmekte ve bu süreçlerde hızlı erişilebilecek, deney maliyetlerini düşük tutacak YDD sistemlerine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Düşük maliyetli bir YDD makinesi, her ne kadar tüm deneysel gereksinimleri karşılayamayacak olsa da, araştırma süreçlerinin başlangıcında sıkça kullanılan deneme-yanılma yöntemlerini pratik bir şekilde uygulama imkânı sunabilir. Bunun yanı sıra, bu alanda uzmanlaşmak isteyen öğrenci ve yeni araştırmacılar için düşük maliyetli bir platformda fiziksel ve gerçek deneyim fırsatları sunarak eğitim kalitesinin artırılması da önemli bir ihtiyaçtır. Bu tez çalışmasında, düşük maliyetli, yeterli ölçüm kabiliyetine sahip, üretimi kolay ve tekrar edilebilir bir yapay dolaşım döngüsü tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında dört ana hedef belirlenmiştir: (I) Basit ve düşük maliyetli üretim yöntemleriyle YDD'nin kurulması. (II) Yapay dolaşım döngüsü üzerinde tipik bir yapay damar modeli kullanılarak doğal damar genişlemesinin simüle edilmesi. (III) Pompanın hassas kontrolü ile tipik arteriyel basınç dalga formunun oluşturulması. (IV) Döngüye entegre edilen sensörlerin, damar genişlemesine bağlı olarak oluşan debi ve basınç farklarını ölçebilme kapasitesinin test edilmesi.

Anahtar Kelimeler: Yapay dolaşım döngüsü (YDD), yapay damar, simülasyon sistemleri, düşük maliyetli cihazlar, deneysel araştırma platformları.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

DEVELOPMENT OF A MOCK CIRCULATION LOOP FOR USE IN ARTIFICIAL BLOOD VESSELS' TESTS

Namık KARAKAŞOĞLU

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Galip YILMAZ

Bayburt-2025, Pages: 37

Mock Circulation Loop (MCL) refers to devices commonly used to simulate artificial vascular systems and similar biomechanical processes. Current MCL systems pose challenges for researchers due to their high costs and limited accessibility. These systems are also mechanically and electronically complex. On the other hand, new research projects in artificial vessels and related fields are emerging every day, and there is an increasing need for MCL systems that are affordable, easy to access, and capable of reducing experimental costs. Although a low-cost MCL machine may not meet all experimental needs, it can provide researchers with a practical tool for conducting trial-and-error processes during the initial phases of their studies. Furthermore, it is essential to provide students and new researchers in this field with opportunities to gain hands-on and real-world experimental experience on an affordable platform, thereby enhancing the quality of their education. In this thesis, a mock circulation loop with low cost, adequate measurement capabilities, easy production, and reproducibility has been designed and manufactured. Four main objectives have been set within the scope of this study: (I) to establish the MCL using simple and low-cost production methods, (II) to simulate natural vascular expansion on the MCL using a typical artificial vessel model, (III) to generate a typical arterial pressure waveform through precise control of the pump, (IV) to demonstrate the ability of the integrated sensors to measure flow and pressure differences caused by vessel expansion. This thesis aims to develop a platform that facilitates research processes and contributes to the education of the next generation of researchers.

Keywords: Mock circulation loop (MCL), artificial vessel, simulation systems, low-cost devices, experimental research platforms.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME.....	III
ÖN SÖZ.....	IV
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
TABLOLAR.....	IX
ŞEKİLLER.....	X
KISALTMALAR.....	XI
SİMGELER.....	XI
GİRİŞ.....	1
Artan Kardiyovasküler Hastalıklar ve Gelişen Teknolojiler.....	1
Yapay Dolaşım Döngüsü (YDD) Sistemlerine İhtiyaç.....	1
Bilimsel Gerekçe.....	2
Araştırmada Kullanılan Yöntem ve Teknikler.....	3
Araştırma Süresince Karşılaşılan Sınırlamalar.....	3
Araştırmanın Konusu ve Problemi.....	3
Araştırmanın Amacı.....	4
Araştırmanın Sınırlılıkları.....	5
Varsayımlar.....	5
BİRİNCİ BÖLÜM.....	7
1. KURAMSAL ÇERÇEVE.....	7
1.1. KARDİYOVASKÜLER SİSTEM VE SİMÜLASYON İHTİYACI.....	7
1.2. YAPAY DAMAR TEKNOLOJİLERİNDEKİ GÜNCEL TRENDLER.....	7
1.3. YDD SİSTEMLERİNE OLAN İHTİYAÇ VE LİTERATÜRDEKİ EKSİKLİKLER.....	8
1.4. ÇALIŞMANIN LİTERATÜRE KATKISI.....	8
İKİNCİ BÖLÜM.....	9
2. YÖNTEM.....	9
2.1. DENEYSEL DÜZENEGİN TASARIMI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	9
2.2. POMPA MEKANİZMASI İÇİN MOTOR GÜCÜ ANALİZİ.....	10
2.3. MALZEMELER VE ELEMANLAR.....	11
2.3.1. Mekanizma ve Yapısal Elemanlar.....	12
2.4. DÜZENEGİN CAD TASARIMI.....	18
2.5. SENSÖRLER VE ADIM MOTORUNUN KULLANIMI.....	20
2.5.1. Debi Sensörü.....	20
2.5.2. Debi Sensörünün Programlanması.....	21
2.5.3. Basınç Sensörü.....	22
2.5.4. Basınç Sensörünün Programlanması.....	23
2.5.5. Adım Motorunun Programlanması.....	24
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	26
3. BULGULAR.....	26
3.1. SİSTEMİN ÇALIŞMASI.....	26
3.2. SENSÖRLER VERİLERİ.....	26

3.3. GERİ ÇEKME Lİ PROGRAMRAM İLE ELDE EDİLEN SENSÖR VERİLERİ.....	29
3.4. AYAR DEĞİŞİKLİKLERİ İLE ELDE EDİLEN YENİ VERİLER	31
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	33
KAYNAKÇA.....	34
ÖZ GEÇMİŞ	37



TABLÖLAR

Tablo 1: Gerekli Motor ve Mekanizma Parametreleri.....	10
Tablo 2: Hesaplanan Motor Parametreleri.....	11
Tablo 3: Mekanizma ve Yapısal Elemanların Listesi.....	12
Tablo 4: Motor ve Elektronik Elemanların Parça Listesi	14
Tablo 5: Sıvı Döngü Elemanları Bileşenleri.....	15



ŞEKİLLER

Şekil 1: Yapay Dolaşım Döngüsü (YDD) Sistemlerine Bir Örnek	2
Şekil 2: Tasarlanan YDD' nin Şematik Gösterimi.....	9
Şekil 3: Parçaların Resimleri.....	13
Şekil 4: Krank Biyel Mekanizması ile Oluşturulmuş Düzeneğin 3 Boyutlu Modeli.....	19
Şekil 5: Tamamlanan Montajın 2 Boyutlu Olarak Yeniden Düzenlenmesi.....	20
Şekil 6: Debi Sensöründe Elde Edilen Debi Zaman Verisi.....	26
Şekil 7: Basınç Sensöründen Elde Edilen Basınç Zaman Grafiği.....	27
Şekil 8: Geri Çekmeli Programda Debi Sensöründen Elde Edilen Debi Zaman Verisi	29
Şekil 9: Geri Çekmeli Programda Basınç Sensöründen Elde Edilen Basınç Zaman Grafiği ..	30
Şekil 10: Krank Ölçüsünün Ayarlanış Şekli	31
Şekil 11: Ayar Değişikliklerinden Sonra Elde Edilen Basınç ve Zaman Grafiği	32
Şekil 12: Geri Çekmeli Durum İçin Ayar Değişikliklerinden Sonra Elde Edilen Basınç ve Zaman Grafiği	32

KISALTMALAR

YDD	: Yapay dolaşım d6ngüsü
MCL	: Mock circulation loop
RTV2	: Room Temperature Vulcanizing (Oda Sıcaklığında Kürleşen Silikon)
CNC	: Computer Numerical Control (Sayısal kontrollü imalat)
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
3D	: Üç Boyutlu
ADC	: Analog-Dijital D6nüştürücü
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)

SİMGELER

L	: Litre
s	: Saniye
Pa	: Paskal
m	: Metre
mm	: Milimetre
k	: Kilo
rpm	: Devir/dakika (Revolutions per minute)
W	: Watt
Nm	: Newton-metre
V	: Volt
A	: Amper
Hz	: Hertz
mmHg	: Milimetre civa

GİRİŞ

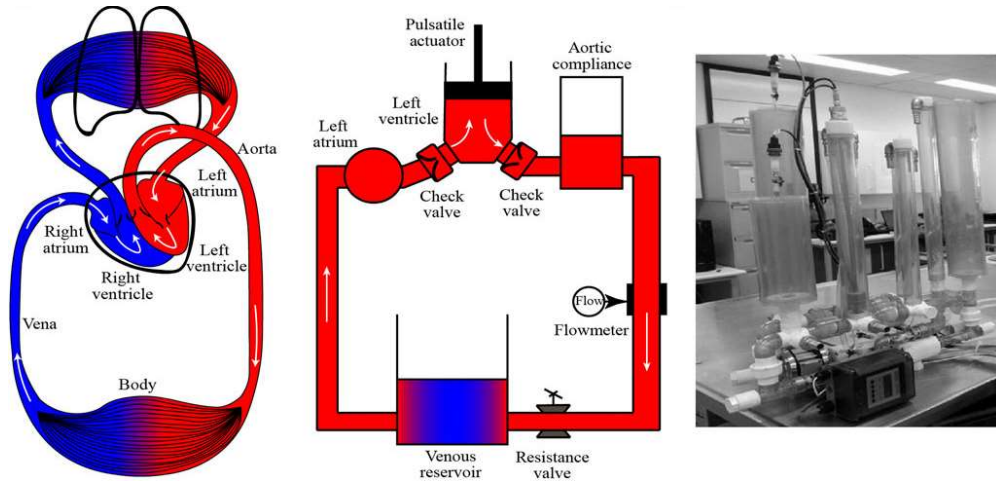
Artan Kardiyovasküler Hastalıklar ve Gelişen Teknolojiler

Kardiyovasküler hastalıklar, günümüzde en yaygın ölüm nedenleri arasında yer almakta ve hem toplum sağlığı hem de ekonomik yük açısından ciddi bir sorun teşkil etmektedir (Mozaffarian vd., 2016; Timmis vd., 2020). Dünya Sağlık Örgütü'nün verilerine göre, her yıl milyonlarca insan kalp hastalıkları nedeniyle hayatını kaybetmektedir (Tsao vd., 2022). Bu durum, kardiyovasküler hastalıkların teşhis ve tedavisinde kullanılacak yeni teknolojilere yönelik ihtiyacı artırmıştır. Yapay damarlar, bu alandaki teknolojik yeniliklerin en önemli örneklerinden biridir ve biyomedikal araştırmaların temel odak noktası haline gelmiştir (Hu vd., 2022; Nemen-Guanzon vd., 2012). Son yıllarda biyomedikal mühendislik ve malzeme bilimi alanlarında yapay damarlar üzerine yapılan araştırmalar önemli ölçüde artmıştır. Bu araştırmaların temel hedefi, damar hastalıklarının tedavisi için biyolojik olarak uyumlu, uzun ömürlü ve fonksiyonel damar greftleri geliştirmektir. Özellikle polimerik malzemeler, biyomateryaller ve biyomekanik süreçlerin optimizasyonu gibi konular bu çalışmaların odak noktaları arasında yer almaktadır (Hoch vd., 2014; Nemen-Guanzon vd., 2012; Niklason & Lawson, 2020; Wang vd., 2020).

Yapay damarlar, genellikle damar tıkanıklığı, anevrizmalar veya arteriyel daralmalar gibi sorunların çözümü için kullanılır. Hastanın kendi donör damarlarında kullanılamaz hale geldiğinde yapay damarlar hayat kurtarmaktadır. Gelişen teknolojiler arasında biyolojik olarak parçalanabilir polimerler, üç boyutlu (3D) baskı teknikleri ve hücreli mühendislik yaklaşımları yer almaktadır. Özellikle 3D baskı teknolojisi, yapay damarların hasta spesifik olarak üretilmesine olanak tanıyarak kişiselleştirilmiş tıp uygulamalarını desteklemektedir (Papaioannou vd., 2019). Ayrıca, biyolojik hücrelerin kullanımıyla üretilen doku mühendisliği temelli damarlar, doğal damarların biyolojik fonksiyonlarına daha yakın sonuçlar sunmaktadır (Moore vd., 2022).

Yapay Dolaşım Döngüsü (YDD) Sistemlerine İhtiyaç

Bu teknolojik ilerlemelere rağmen, yapay damar araştırmalarında karşılaşılan temel sorunlardan biri, deneysel süreçlerin yüksek maliyetli ve karmaşık yapıda olmasıdır. Bu durum, özellikle başlangıç aşamasındaki araştırmacılar için büyük bir engel oluşturmaktadır. Burada biyomekanik testler için yapay dolaşım döngüsü (YDD) düzenekleri, yeni yapay damarlar ve dinamik koşullar altında test edilmesine olanak tanır (Cappon vd., 2021; Ferrari vd., 2019; Franchini vd., 2022; Glynn vd., 2017). Şekil 1'de bu sistemin bir örneği verilmiştir.



Şekil 1: Yapay Dolaşım Döngüsü (YDD) Sistemlerine Bir Örnek (Xu vd., 2023)

Bu sistemler, kardiyovasküler süreçleri taklit ederek yapay damarların işlevselliğini ve dayanıklılığını değerlendirmek için güvenilir bir platform sağlar. Ancak mevcut YDD sistemlerinin yüksek maliyetleri, karmaşık üretim süreçleri ve ulaşılabilirlik sorunları, bu teknolojilerin yaygın kullanımını sınırlandırmaktadır (Moyer vd., 2024).

Yapay damar araştırmaları hem akademik hem de endüstriyel düzeyde hızla gelişmektedir (Hu vd., 2022). Ancak bu alandaki ilerlemelerin daha geniş bir uygulama alanına yayılabilmesi için düşük maliyetli, erişilebilir ve esnek bir deney platformuna ihtiyaç duyulmaktadır. YDD sistemleri, yalnızca yapay damar modellerinin biomekanik özelliklerini değil, aynı zamanda yeni ilaçların, biyomalzemelerin, sensörlerin ve cerrahi tekniklerin test edilmesi için de kullanılabilecek çok yönlü bir araçtır. Örneğin, arteriyel basınç dalga formlarının simülasyonu, doğal damar tepkilerinin modellenmesi ve biomekanik streslerin analizi gibi işlevler, YDD sistemlerinin önemini daha da artırmaktadır. Sonuç olarak, yapay damar araştırmaları ile YDD sistemleri arasındaki ilişki hem bilimsel ilerlemeler hem de sağlık teknolojilerinin gelişimi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, düşük maliyetli ve fonksiyonel YDD sistemlerinin geliştirilmesi hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar için büyük bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır (Franchini vd., 2022; Timms vd., 2011).

Bilimsel Gerekçe

Bu çalışmanın temel sorunsalı, mevcut YDD sistemlerinin yüksek maliyetleri ve karmaşık yapıları nedeniyle özellikle başlangıç düzeyindeki araştırma süreçlerinde ve eğitimde yeterince kullanılabilir olmamasıdır. Bu durum hem araştırma süreçlerini hem de bu alandaki insan kaynağının eğitimini olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla, düşük maliyetli, erişilebilir, kolay üretilbilir ve yeniden üretilbilir bir YDD sisteminin geliştirilmesi bilimsel bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır.

Araştırmada Kullanılan Yöntem ve Teknikler

Araştırmada kullanılan yöntemler arasında, basit üretim teknikleri ile bir YDD prototipinin tasarlanması ve üretilmesi, yapay damar modelleri kullanılarak doğal damar genişlemesi simülasyonlarının gerçekleştirilmesi, arteriyel basınç dalga formlarının doğru bir şekilde oluşturulması ve sensörlerin performansının test edilmesi bulunmaktadır. Bu süreçte, düşük maliyetli malzeme ve ekipman kullanımı, prototipin işlevselliği ile maliyet arasındaki dengeyi sağlamak için temel bir öncelik olarak belirlenmiştir.

Araştırma Süresince Karşılaşılan Sınırlamalar

Araştırma sürecinde karşılaşılan sınırlamalar, kullanılan ekipmanların doğruluk ve hassasiyet kapasiteleri ile prototipin yeniden üretilebilirlik sınırları olmuştur. Ancak bu sınırlamalar, araştırmanın kapsamı ve hedefleri göz önünde bulundurulduğunda, çalışmanın temel amacını etkilemeyecek şekilde yönetilmiştir.

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Bu araştırmanın temel konusu, yapay damarların dinamik performansını değerlendirmek ve kardiyovasküler süreçlerin simülasyonu için düşük maliyetli bir Yapay Dolaşım Döngüsü (YDD) sisteminin geliştirilmesidir. Günümüzde kardiyovasküler hastalıklar, dünya genelinde en sık görülen sağlık sorunlarından biri olup, bu hastalıkların tedavisinde kullanılan yapay damarlar ve ilgili teknolojilerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Townsend vd., 2022). Ancak mevcut YDD sistemlerinin yüksek maliyetleri, karmaşık yapıları ve erişim zorlukları, bu sistemlerin yaygın olarak kullanılmasını engellemekte ve araştırmaların önünde ciddi bir engel oluşturmaktadır. Araştırmada ele alınan temel problem, yapay damar araştırmaları ve geliştirme süreçlerinde düşük maliyetli, kolay üretilebilir ve yeterli ölçüm yeteneklerine sahip bir YDD sistemine duyulan ihtiyaçtır. Mevcut sistemlerin yüksek maliyetleri, özellikle başlangıç aşamasındaki araştırmacılar için erişim engeli yaratırken, sofistike tasarımları bakım ve kullanım açısından zorluklar doğurmaktadır. Bu durum, hem araştırma süreçlerini yavaşlatmakta hem de daha geniş bir kullanıcı kitlesinin bu sistemlerden faydalanmasını sınırlamaktadır. Bir diğer önemli problem ise, yapay damarların dinamik koşullar altında performanslarının doğru bir şekilde değerlendirilememesidir. Bu değerlendirmeler, damarların biyomekanik özelliklerini anlamak ve doğal damar davranışlarını simüle etmek için kritik öneme sahiptir. Ancak, mevcut teknolojiler bu ihtiyaçları karşılayacak şekilde yaygınlaştırılmadığı için, araştırmacılar sınırlı test koşulları altında çalışmak zorunda kalmaktadır.

Bu bağlamda, çalışmanın amacı, düşük maliyetli, üretimi kolay ve geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından erişilebilir bir YDD sisteminin geliştirilmesidir. Bu sistem, yapay damar araştırmalarının başlangıç aşamalarındaki deney süreçlerini kolaylaştırmak, eğitim ve öğretim amaçlı kullanılabilir bir platform sunmak ve yeni teknolojilerin geliştirilmesi sürecini hızlandırmak üzere tasarlanmıştır. Araştırmanın sonunda, geliştirilen sistemin, tipik bir yapay damar modeli üzerinde doğal damar genişlemesini simüle etme ve arteriyel basınç dalga formlarını oluşturma gibi temel işlevleri başarıyla gerçekleştirmesi hedeflenmiştir. Bu problemleri çözmek, yalnızca yapay damar araştırmaları için değil, aynı zamanda biyomedikal mühendislik eğitime ve düşük maliyetli sağlık teknolojilerinin yaygınlaştırılmasına da katkı sağlayacaktır.

Araştırmanın Amacı

Bu araştırmanın genel amacı, düşük maliyetli, kolay üretilir ve yeterli ölçüm kabiliyetine sahip bir Yapay Dolaşım Döngüsü (YDD) sistemi geliştirerek, yapay damar modellerinin dinamik performansını değerlendirmek ve kardiyovasküler süreçlerin simülasyonunu sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda araştırmada cevaplanması gereken hedefler şu şekilde belirlenmiştir:

I. Düşük maliyetli ve basit üretim yöntemleriyle bir YDD sisteminin kurulumu: Geliştirilecek sistemin, karmaşık teknolojilere ihtiyaç duymadan kolayca üretilmesi ve araştırmacılar tarafından erişilebilir olması hedeflenmiştir.

II. Yapay damar modeli üzerinde doğal damar genişlemesinin simüle edilmesi: Tipik bir yapay damar modelinin, doğal damar davranışlarını taklit ederek genişleme ve daralma süreçlerinin gerçekçi bir şekilde izlenmesi amaçlanmaktadır.

III. Arteriyel basınç dalga formunun oluşturulması: YDD sisteminde kullanılan pompanın hassas kontrolüyle, gerçekçi bir arteriyel basınç dalga formu oluşturulması hedeflenmiştir. Bu, yapay damarların performansını daha doğru bir şekilde değerlendirmek için kritik bir parametredir.

IV. Damar genişlemesinden kaynaklanan debi ve basınç farklarının ölçülmesi: Sisteme yerleştirilen sensörlerin, damar modeli üzerindeki akış ve basınç değişikliklerini doğru bir şekilde tespit edebilme yeteneği incelenecektir.

Bu araştırma, yalnızca yapay damar modellerinin değerlendirilmesine katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda biyomedikal mühendislik araştırmaları ve eğitimi için düşük maliyetli, pratik bir platform sunmayı hedeflemektedir. Geliştirilen sistemin, başlangıç aşamasındaki

deneylerde ve "trial and error" süreçlerinde araştırmacılara esneklik ve kolaylık sağlayarak bu alandaki bilimsel ilerlemelere önemli katkılar yapması beklenmektedir.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Araştırma sürecinde karşılaşılan sınırlamalar, kullanılan ekipmanların ölçüm doğruluğu ve hassasiyet kapasiteleri ile prototipin yeniden üretilebilirlik sınırları üzerinde yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte, araştırmanın amacı düşük maliyetli ve temel deneysel ihtiyaçları karşılayabilecek bir Yapay Dolaşım Döngüsü (YDD) sistemi geliştirmek olduğundan, bu sınırlamalar, çalışmanın genel hedeflerini etkileyici bir düzeye ulaşmamıştır. Özellikle, kullanılan ekipmanların sınırları, deneylerin tekrarlanabilirliğini bir ölçüde zorlaştırmış olsa da bu zorluklar dikkatli analizler ve optimizasyonlarla aşılmaya çalışılmıştır. Prototipin yeniden üretilebilirliği konusunda karşılaşılan zorluklar ise, basit üretim yöntemleri ve düşük maliyet hedefleri doğrultusunda sistemin tasarımında yapılan bazı tavizlerden kaynaklanmıştır. Ancak bu durum, araştırmanın başlangıç aşamasındaki deneysel süreçleri desteklemek ve maliyet etkin çözümler sunmak amacıyla beklenen bir durum olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında, bu sınırlamaların daha karmaşık ve sofistike sistem tasarımlarıyla giderilmesi planlanmaktadır. Sonuç olarak, araştırma sürecinde ortaya çıkan sınırlamalar, çalışmanın kapsamını ve temel hedeflerini aşırı ölçüde kısıtlamamış, aksine gelecekte yapılacak geliştirme çalışmalarına ışık tutacak değerli veriler sunmuştur.

Varsayımlar

Bu çalışma kapsamında belirlenen varsayımlar, araştırmanın sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi için kabul edilen temel yargılardır. Bu varsayımlar şunlardır:

Kullanılan Yapay Dolaşım Döngüsü (YDD) sisteminin temel ölçüm işlevleri doğru ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Bu sistemin düşük maliyetli bir prototip olması, elde edilen sonuçların araştırmanın başlangıç aşamasında yeterli olduğu varsayımıyla değerlendirilmiştir.

Prototipin üretiminde tercih edilen malzeme ve yöntemlerin, araştırma hedefleriyle uyumlu performans sergileyeceği kabul edilmektedir. Bu bağlamda, basit üretim tekniklerinin yeterli düzeyde hassasiyet sağlayabileceği varsayılmıştır.

Araştırma sırasında kullanılan yapay damar modelleri, doğal damarların fiziksel ve mekanik özelliklerini yeterince temsil etmektedir. Bu, sistemin test sonuçlarının biyolojik sistemler hakkında genel çıkarımlara uygun olduğu varsayımıyla yapılmıştır.

Pompa ve sensör sistemlerinin veri toplama ve kontrol kabiliyeti, deneylerin tutarlılığını sağlayacak düzeydedir. Araştırmada kullanılan ekipmanların sınırlı hassasiyetine rağmen, hedeflenen deneysel koşulları doğru bir şekilde simüle ettiği kabul edilmiştir.

Bu varsayımlar, araştırmanın ilerleyen süreçlerinde ortaya konan sonuçların güvenilirliğini ve geçerliliğini destekleyecek temel dayanak noktaları olarak belirlenmiştir. Ancak bu varsayımlar, araştırmanın sınırları ve kapsamı çerçevesinde değerlendirilmiştir ve çalışmanın genel bulgularını doğrudan ispat etmeye yönelik bir iddia taşımamaktadır.



BİRİNCİ BÖLÜM

1. KURAMSAL ÇERÇEVE

Bu bölümde, Yapay Dolaşım Döngüsü (YDD) sistemleri ve yapay damar teknolojileriyle ilgili temel kavramlar detaylı bir şekilde ele alınmakta; bu alanlarda mevcut literatürdeki bilgiler sentezlenerek çalışmanın dayandığı bilimsel altyapı oluşturulmaktadır. Sunulan kavramlar ve bilgiler, tartışma bölümünde elde edilen bulgularla ilişkilendirilecek ve bu bağlamda çalışmanın önemi daha açık bir şekilde vurgulanacaktır.

1.1. KARDİYOVASKÜLER SİSTEM VE SİMÜLASYON İHTİYACI

Kardiyovasküler sistem, insan vücudunda hayati bir rol oynayan, karmaşık biyolojik ve fiziksel süreçleri içeren bir yapıdır. Kan basıncı, debi, elastisite gibi dinamik özelliklere sahip bu sistemin daha iyi anlaşılabilmesi, tanı ve tedavi süreçlerinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak bu sistemin insan vücudu dışında çalışılabilir bir şekilde modellenmesi, biyomekanik araştırmalar için temel bir gereksinimdir (Huang vd., 2018).

Simülasyon sistemleri, bu ihtiyaç doğrultusunda tasarlanmış olup, hemodinamik süreçlerin ve biyolojik yapıların kontrol edilebilir bir ortamda incelenmesini sağlar. YDD sistemleri, özellikle damar içi basınç, akış hızı ve genişleme gibi kritik parametrelerin kontrol altında test edilebildiği, gerçekçi bir laboratuvar ortamı sunmaktadır. Bu sistemler, yalnızca temel biyomekanik araştırmalarda değil, aynı zamanda yeni tedavi yöntemlerinin ve cihazlarının geliştirilmesinde de etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Malone vd., 2022; Meskin vd., 2024).

1.2. YAPAY DAMAR TEKNOLOJİLERİNDEKİ GÜNCEL TRENDLER

Yapay damarlar, kardiyovasküler hastalıkların tedavisinde kullanılan yenilikçi biyomedikal ürünlerdir. Güncel araştırmalar, yapay damarların, doğal damarların mekanik ve biyolojik özelliklerini taklit edebilmesi yönünde önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Özellikle biyomalzeme mühendisliği alanında yapılan çalışmalar, polimer bazlı malzemelerin geliştirilmesi, yapay damarların esneklik, biyouyumluluk ve uzun ömür gibi özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

Literatürde öne çıkan bazı trendler şunlardır: Biyomalzemelerin İlerlemesi: Poliüretan, silikon ve polietilen tereftalat (PET) gibi malzemelerin yanı sıra, hidrojel ve biyoaktif kaplamalar gibi yenilikçi malzemeler üzerinde çalışmalar artmaktadır (Spadaccio vd., 2013; Wang vd., 2020). Ayrıca 3D baskı teknolojileri de son yıllarda git gide yaygınlaşmaktadır. Yapay damarların bireye özgü tasarımını mümkün kılan 3D baskı yöntemleri, bu alanda büyük

bir devrim yaratmıştır (Choi vd., 2023; Esmaceli vd., 2019). Hücre temelli yaklaşımlar, yapay damarların biyolojik işlevselliğini artırmayı hedeflemektedir (Wang vd., 2020). Bu yeniliklerin geliştirilmesi sırasında, yapay damarların mekanik performansını değerlendirecek sistemlerin rolü kritik öneme sahiptir. YDD sistemleri, bu doğrultuda yapılan araştırmaların vazgeçilmez bir parçasıdır.

1.3. YDD SİSTEMLERİNE OLAN İHTİYAÇ VE LİTERATÜRDEKİ EKSİKLİKLER

Yapay damar araştırmalarında kullanılan mevcut YDD sistemlerinin büyük bir kısmı yüksek maliyetli ve teknik olarak karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu durum, özellikle başlangıç seviyesindeki araştırmalar ve eğitim süreçleri için ciddi sınırlamalar oluşturmaktadır. Ayrıca, mevcut sistemlerin birçoğu, özel laboratuvar altyapısı gerektirdiğinden, yaygın kullanıma uygun değildir.

Bu eksiklikler, özellikle düşük maliyetli, taşınabilir ve kullanıcı dostu YDD sistemlerinin geliştirilmesi ihtiyacını açıkça ortaya koymaktadır. Bu çalışmada önerilen YDD sistemi, bu ihtiyaca yanıt vermek üzere tasarlanmıştır.

1.4. ÇALIŞMANIN LİTERATÜRE KATKISI

Bu çalışma, YDD sistemlerinin düşük maliyetli ve erişilebilir bir alternatifini sunarak, literatürdeki mevcut boşlukları doldurmayı hedeflemektedir. Sistemin temel avantajları şunlardır: Ekonomik Çözüm: Karmaşık ve pahalı sistemlerin aksine, bu cihazın üretim maliyeti düşüktür. Eğitim ve Araştırma Amaçlı Kullanım: Geliştirilen sistem, araştırmacıların ve öğrencilerin temel deneysel ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Gerçekçi Simülasyon Yeteneği: Arteriyel basınç dalgalarını ve doğal damar davranışlarını simüle etme kapasitesine sahiptir.

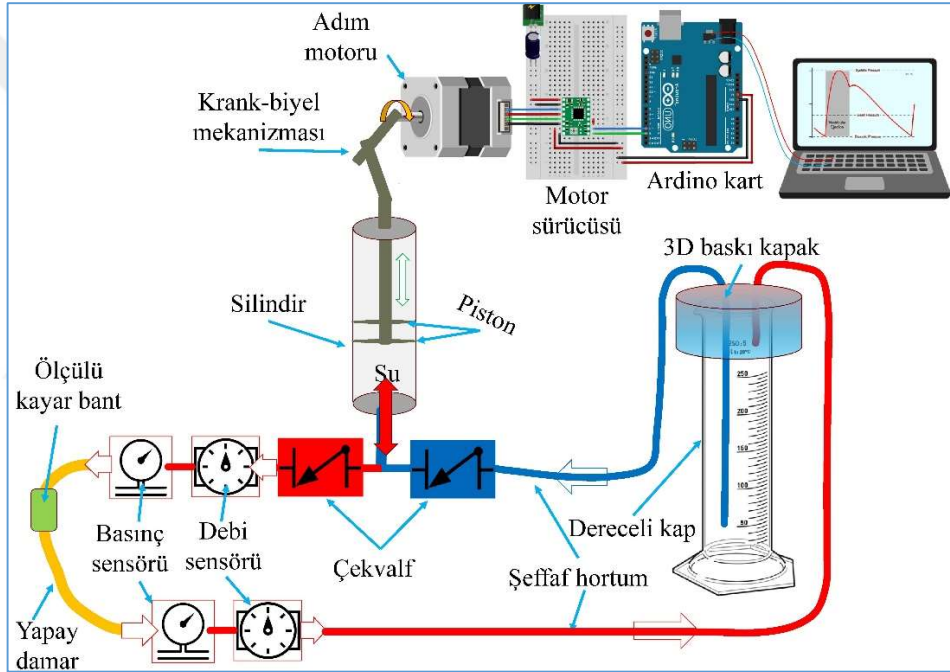
Bu bağlamda, çalışma yalnızca yapay damar araştırmalarını desteklemekle kalmayacak, aynı zamanda bu alandaki eğitim kalitesinin artırılmasına da katkı sağlayacaktır. Ayrıca, sistemin kullanım alanının genişletilmesiyle, biyomedikal cihaz geliştirme süreçlerinde yeni bir standart oluşturulması mümkün olacaktır.

İKİNCİ BÖLÜM

2. YÖNTEM

2.1. DENEYSEL DÜZENEGİN TASARIMI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Bu çalışmada tasarlanan yapay dolaşım döngüsü (YDD), biyomedikal mühendisliği ve akışkanlar mekaniği alanlarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar için özel olarak geliştirilmiştir. Sistem, sıvı akışını dinamik olarak kontrol eden mekanik ve elektronik bileşenlerden oluşmakta olup hem akış karakteristiklerinin ölçülmesine hem de farklı parametrelerin incelenmesine olanak tanımaktadır. Şekil 2’de gösterilen düzenek, sistemin bileşenlerini, çalışma prensibini ve veri toplama sürecini detaylı bir şekilde görselleştirmektedir.



Şekil 2: Tasarlanan YDD' nin Şematik Gösterimi

Düzenek, adım motoru tarafından tahrik edilen krank-biyel mekanizması aracılığıyla çalışmaktadır. Bu mekanizma, doğrusal hareket üreten bir piston ile entegre edilerek silindir içinde sıvının periyodik olarak sıkıştırılmasını ve serbest bırakılmasını sağlamaktadır. Bu itme-çekme hareketi, sıvının belirlenen akış yönünde ilerlemesine olanak tanımaktadır. Akış yönü ve sürekliliği, sistemde yer alan çekvalfler aracılığıyla düzenlenmekte olup, geri akışı engelleyen bu valfler sıvının kontrollü bir şekilde hareket etmesini sağlamaktadır. Sıvının akış dinamikleri ve sistem üzerindeki etkileri, basınç ve debi sensörleri kullanılarak anlık olarak ölçülmektedir. Sensörlerden elde edilen veriler, Arduino kartı tarafından işlenerek bilgisayara aktarılmakta ve analiz edilmektedir. Böylece, sistemin farklı parametreler altındaki performansı değerlendirilebilmekte, akış profilleri detaylı bir şekilde incelenebilmektedir.

Sistemin sıvı taşıma elemanları, şeffaf hortumlar ve dereceli bir kap ile tamamlanmıştır. Dereceli kap, sıvı hacmindeki değişimleri gözlemlemeye olanak tanırken, 3D baskı yöntemiyle üretilen özel kapak, sistemin bütünlüğünü sağlayarak sıvı transferinin bir döngü halinde tamamlanması için gerekli olan bağlantıyı sağlamaktadır.

Bu düzenek, özgün olarak geliştirilmiş olup, deneysel yapay damar sistemleri üzerine gerçekleştirilecek araştırmalar için yenilikçi bir test platformu sunmaktadır. Düşük maliyetli ve modüler tasarımı sayesinde, farklı deney senaryolarına kolayca adapte edilebilmekte ve akışkanlar mekaniği tabanlı araştırmalar için güvenilir bir model oluşturmaktadır. Sistemin esnek yapısı, ilerleyen çalışmalar kapsamında daha gelişmiş ölçüm teknikleri ve simülasyonlar ile desteklenerek biyomekanik alanındaki potansiyel uygulamalar için önemli bir temel oluşturacaktır.

2.2. POMPA MEKANİZMASI İÇİN MOTOR GÜCÜ ANALİZİ

Sistemin çalışması için gerekli motor gücü hesabı yapıldı. Hesap için gerekli parametreler Tablo 1’de verildi. Bu hesaba göre bir adım motoru temin edildi. Adım motoru düzgün harmonik hareketi yapabilmesi, hızlı ve kolay (düşük maliyet) elde edilebilmesi açısından tercih edildi. Motor sürücüsü DM556 model, yüksek akım dayanımlı ve düşük maliyetli kolay elde edilebilir olmasından dolayı tercih edildi.

Tablo 1: Gerekli Motor ve Mekanizma Parametreleri

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Tipik basınç	Pt	16	kPa
Pompa basınç kapasitesi	Pc	16×4=64	kPa
Krank uzunluk	Kr	20	mm
Piston çap	D	50	mm
Gerekli debi	Q	5	L/dk

Debi hesabı krank uzunluğun iki hareket eden pistonun kesit alanına bağlı olarak Denklem 1’de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır. Bu formülde, pistonun pompa hareketini 1,0 saniyede tamamlaması kabulü yapılmıştır.

$$Debi (Q) = 2Kr(\pi D^2)/4 \quad (1)$$

Motor ve piston mekanizmasının ölçüleri, $8,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ debi değerini sağlayacak şekilde seçilecektir. Bu debi için belirlenen ölçüler kullanılarak kranka gelen dik kuvvetin ve gerekli motor torku ile gücünün hesaplanması gerekmektedir. Denklem 2’de yaklaşık bir hesap yapmaya yarayan formül kullanılarak ve biyelin yeterince uzun olduğunu varsayarak bir kuvvet

hesabı yapılmıştır. Bu hesap piston alanıyla üretilmek istenen basıncın çarpılmasıyla yapılmaktadır.

$$Kuvvet (F) = Pc \cdot \pi \cdot D^2 / 4 \quad (2)$$

Motorun en zorlanacağı pozisyon, pistondan gelen kuvvetin krank'a dik açıyla geldiğinde yaşanacaktır. Tam bu nokta için Denklem 3'teki formül kullanılarak bir hesaplama yapılmıştır. Bu kuvvetin krank uzunluğuyla çarpılması ile motor için gerekli tork ihtiyacı hesaplanacaktır.

$$Tork (T) = Kuvvet(F) \cdot Kr \quad (3)$$

Motor gücü ise basitçe debi ile basıncın çarpılmasıyla hesaplanabilir. Denklem 4'te bu hesap için kullanılan formül verilmiştir.

$$Güç (W) = Debi(Q) \cdot Pc \quad (4)$$

Tablo 1'deki parametreler kullanılarak Tablo 2'deki değerler hesaplanmıştır. Bu değerlere göre gerekli motor torku 2,5 Nm olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2: Hesaplanan Motor Parametreleri

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Debi	Q	0,000085	m ³ /s
Kranka gelen dik kuvvet	F	125,6	N
Gerekli motor torku	T	2,5	Nm
Gerekli motor gücü	W	5,4	W

Motor satan internet siteleri incelendiğinde NEMA 23 standardına sahip adım motorunun bu proje için uygun olduğu görülmektedir. Bu motorun çalışma torku 2,2 Nm ile hesaplanandan biraz az olsa da bu değere en yakın motor olduğundan NEMA 23 seçilmiştir. Bu motor ayrıca 10 Watt güç değeriyle de istenilen gücü rahatlıkla sağlamaktadır. Ayrıca kaynaklar incelendiğinde adım motorunun çalışma anında torku özellikle 50 ile 100 rpm arasında yüksek kalmaktadır. Buda 60 rpm'de çalıştırılması planlanan pompanın tork sorunu yaşamayacağını göstermektedir. Bu iş paketi kapsamında yapılan hesaplamalar daha detaylı ve ileri düzeyde yapıldıktan sonra bir sonraki iş paketine geçilecektir.

2.3. MALZEMELER VE ELEMANLAR

Tekrar edilebilirliği sağlamak amacıyla, projede kullanılan tüm malzemeler üç ana kategoriye ayrılarak tablolandırılmıştır: Mekanizma ve yapısal elemanlar, motor ve elektronik bileşenler ile sıvı döngü elemanları, mekanizma ve yapısal elemanlar kategorisinde krank

mekanizması, piston bağlantıları ve taşıyıcı çerçeve gibi sistemin hareketini sağlayan bileşenler yer alırken, Motor ve Elektronik Bileşenler kategorisinde adım motoru, motor sürücüsü (DM556), güç kaynağı ve kontrol kartı gibi otomasyon ve hareket kontrolünü sağlayan parçalar bulunmaktadır. Sıvı Döngü Elemanları ise pistonlu pompa, sıvı haznesi, boru bağlantıları ve valfler gibi sıvı transferini gerçekleştiren bileşenlerden oluşmaktadır. Ayrıca, kullanılan tüm parçaların ve malzemelerin görselleri Şekil 3'te detaylı olarak sunulmuş olup, bu sınıflandırma sistemin bileşenlerini daha iyi analiz etmeye, gerektiğinde bireysel olarak incelemeye ve benzer çalışmalara referans oluşturmaya olanak tanımaktadır.

2.3.1. Mekanizma ve Yapısal Elemanlar

Tablo 3'te yapay dolaşım döngüsünün mekanik bileşenleri listelenmiştir. Kullanılan malzemeler arasında piston, krank-biyel mekanizması, mekanizma sabitleme ayağı, rulman, sabitleme tablası, silindir sabitleme çemberi ve cıvata-somunlar yer almaktadır. Malzemeler genellikle 304 kalite paslanmaz çelikten seçilmiştir. Üretim yöntemleri arasında CNC lazer kesim ve hazır olarak temin edilen parçalar bulunmaktadır. Seçilen malzemeler, mekanizmanın sağlam, dayanıklı ve korozyona karşı dirençli olmasını sağlamak amacıyla belirlenmiştir.

Tablo 3: Mekanizma ve Yapısal Elemanların Listesi

S. N.	Parça	Özelliği	Miktarı
1	Piston	R27x2mm ölçülerinde 304 kalite paslanmaz çelik plakadan CNC lazer kesim yöntemi ile imal edildi.	4 Adet
2	Krank-Biyel Mekanizması	2mm kalınlıkta 304 kalite paslanmaz çelik plakadan CNC lazer kesim yöntemi ile imal edildi.	4 Adet
3	Mekanizma Sabitleme Ayağı	20x40x700mm. Ölçülerinde Sigma Alüminyum Profil malzemeden hazır olarak alındı.	2 Adet
4	Rulman	Tek sıra bilyeli 22x7x8mm. ölçülerinde rulman.	2 Adet
5	Silindir	Şeffaf polimer malzemeden 4x60x400mm. ölçülerinde hazır olarak alındı.	1 Adet
6	Sabitleme Tablası	410x310x2mm. ölçülerinde 304 kalite paslanmaz çelik plakadan CNC lazer kesim yöntemi ile imal edildi.	2 Adet
7	Silindir Sabitleme Çemberi ve Ara Elemanlar	2mm. ölçülerinde 304 kalite paslanmaz çelik plakadan CNC lazer kesim yöntemi ile imal edilmiştir.	1 Takım
8	Cıvata-Somun	Farklı ebatlarda, sabitleme ve birleştirme için cıvata-somun kullanıldı.	1 Takım



Şekil 3: Parçaların Resimleri, a) Piston, b) Krank ve Biyel, c) Sigma Profiller, ç) Rulmanlar, d) Plastik Tüp, e) Delikli Altık, f) Piston Sabitleme Aparatları, g) Vida ve Kelepçeler, ğ) Adım Motoru, h) Motor Sürücü, ı) Arduino Prototip Kartı, i) Arduino Uno, j) Bağlantı Kabloları, k) Debi Sensörü, l) Basınç Sensörü, m) Çek Valf, n) Hortum Rakoru, o) Plastik Hortum Bağlantıları, ö) 3D Baskı Rezervuar Kapağı, p) Ara Hortumlar, r) Rezervuar, s) Yapay Damar Modeli, ş) Motor Sabitleme Aparatları, ve t) Düzeneğin Genel Görünümü

Tablo 4, yapay dolaşım döngüsünde kullanılan motor ve elektronik bileşenleri içermektedir. Listede adım motoru, motor sürücüsü, Arduino Uno kart, Arduino prototip kart, zayıf akım kabloları, debi sensörü ve basınç sensörü bulunmaktadır. Adım motoru, sistemin hareketini sağlamak için kullanılırken, motor sürücüsü motorun kontrolünü

gerçekleştirmektedir. Arduino Uno kart ve prototip kart, sensörlerin ve motorun entegre edilerek veri toplanmasını ve sistemin çalışmasını sağlamaktadır. Debi sensörü sıvı akış miktarını, basınç sensörü ise sistemdeki basıncı ölçmek için eklenmiştir. Kullanılan bileşenler, sistemin düşük maliyetli ve işlevsel olmasını hedefleyerek seçilmiştir.

Tablo 4: Motor ve Elektronik Elemanların Parça Listesi

S. N.	Parça	Özelliği	Miktarı
1	Motor	1,8°-3 A-12,6 Watt gücünde adım motor.	1 Adet
2	Motor Sürücüsü	DM556 model, yüksek akım dayanıklı motor sürücüsü.	1 Adet
3	Ardino Uno Kart	Standart tip ardino uno kart.	1 Adet
4	Ardino Prototip Kart	Çoklu sensör bağlantıları için prototip kart.	1 Adet
5	Zayıf Akım Kabloları	0,75mm. Çapında farklı renklerde, ara bağlantılar için kablo.	1 Takım
6	Debi Sensörü	1-30L/dk. aralığında ve $\leq 1,75$ Mpa a kadar okuma yapabilen debi sensörü.	1 Adet
7	Basınç Sensörü	Hava ile çalışabilen standart tip basınç sensörü	

Tablo 5, yapay dolaşım döngüsünde sıvı akışını sağlayan elemanları içermektedir. Listede çekvalf, rekor, T bağlantı parçası, körtapa, rezervuar kabı başlığı, şeffaf hortum, dereceli rezervuar kabı, yapay damar, manşon ve kelepçe gibi elemanlar yer almaktadır. Çekvalf, sıvının tek yönlü akışını sağlarken, rekor ve T bağlantı parçaları sistemin bileşenlerini birbirine bağlamak için kullanılmaktadır. Körtapa, basınç sensörlerinin bağlantısını yapmak için tercih edilmiştir. Şeffaf hortum, rezervuar ile yapay damar arasında sıvı akışını sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Dereceli rezervuar kabı, sıvı seviyesinin gözlemlenmesini mümkün kılarken, yapay damar şeffaf RTV2 malzemesinden laboratuvar ortamında üretilmiştir. Manşon ve kelepçeler, sıvı bağlantılarını sabitlemek için sisteme entegre edilmiştir. Seçilen malzemeler, sistemin düşük maliyetli ve kolay monte edilebilir olmasını sağlamak amacıyla belirlenmiştir.

Tablo 5: Sıvı Döngü Elemanları Bileşenleri

S. N.	Parça	Özelliği	Miktarı
1	Çekvalf	Pirinç malzemeden üretilmiş ½" çapında standart mekanik tesisat çekvalfi.	2 Adet
2	Rekor	Pirinç malzemeden üretilmiş ½ " çapında mekanik tesisatlarda kullanılan hortum bağlantı rekoru, hazır alındı.	1 Adet
3	T	PPRC malzemeden üretilmiş, Ø20 çapında mekanik tesisat bağlantı elemanı, hazır alındı.	3 Adet
4	Körtapa	PPRC malzemeden üretilmiş, Ø20 çapında mekanik tesisat bağlantı elemanı, hazır alındı.	2 Adet
5	Rezervuar Kabı Başlığı	Çizimleri Solidworks da tasarlanarak, ABS malzeme kullanılarak 3D yazıcıdan, 3 parça halinde üretildi.	3 Parça
6	Şeffaf Hortum	Ø20 Çapında şeffaf tesisat hortumu, hazır alındı.	2 Adet
7	Dereceli Rezervuar kabı	1000 ml hacminde, dereceli ölçüm kabı, hazır alındı.	1 Adet
8	Yapay Damar	Şeffaf RTV2 malzemesi kullanılarak Ø20 çapında, 400mm. boyunda laboratuvar ortamında üretildi.	1 Adet
9	Manşon	PPRC malzemeden üretilmiş, Ø20 çapında mekanik tesisat bağlantı elemanı, hazır alındı.	2 Adet
10	Kelepçe	Ø20 çapında, tesisat kelepçesi, hazır alındı	2 Adet

Bilgisayarda çizimleri tamamlanan paslanmaz çelik plakalar, lazer kesim yöntemiyle kesilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Standart olarak 2 mm kalınlığında 304 kalite paslanmaz çelik tercih edilmiştir. Bu malzemenin seçilme nedeni, yüksek mukavemeti sayesinde piston ve krank-biyel mekanizması gibi bileşenlerde dayanıklılık sağlaması ve sistemin sıvı (genellikle su) ile çalışması nedeniyle korozyona karşı yüksek direnç göstermesidir. Ayrıca, 2 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik plaka, lazer kesim işlemlerinin tek seferde kolay ve hassas bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanırken, düşük maliyet avantajı da sunmaktadır.

Projede piston-silindir düzeneğinde kullanılacak silindir, şeffaf polimer malzemeden hazır olarak temin edilmiştir. Tasarım gereksinimlerine uygun olarak, 4 × 60 × 250 mm boyutlarında torna tezgahında hassas kesim yapılarak gerekli ayarlamalar gerçekleştirilmiştir. Şeffaf polimer malzemenin tercih edilme nedeni, pistonun hareketinin gözlemlenebilmesine olanak tanınması, düşük maliyetli olması ve çalışma sırasında gerekli basınç mukavemetini sağlayacak yeterli dayanıklılığa sahip olmasıdır.

Projede kullanılan sıvı (su) depolama haznesi için gerekli kap, 1000 ml hacminde şeffaf PP malzemeden hazır olarak temin edilmiştir. Bu malzemenin tercih edilme nedeni, düşük maliyetli olması ve döngüdeki sıvı akışının görsel olarak izlenmesine olanak sağlamasıdır.

Ø20 çapında, sıhhi tesisatlarda kullanılan hortum hazır olarak temin edilmiştir. Projede, rezervuar kabı ile yapay damar numunesi arasındaki sıvı akışını sağlamak ve sistemdeki döngüyü tamamlamak amacıyla kullanılmıştır. Bağlantı gereksinimlerine uygun olarak belirlenen ölçülerde kesilerek sisteme entegre edilmiştir. Bu malzemenin tercih edilme sebebi, kolay temin edilebilir olması, düşük maliyetli yapısı ve görselliği artıran şeffaf formuyla akışın gözlemlenmesine olanak tanınmasıdır.

Mekanik tesisatlarda kullanılan ½” çapında, sarı malzemeden üretilmiş çalpara tip çekvalf hazır olarak temin edilmiştir. Çekvalf, akışkanın yalnızca tek yönde geçişine izin veren bir mekanik tesisat elemanıdır. Bu projede, insan vücudundaki kalbin kan basıncını taklit edebilmek ve kalbin pompalama ile geri çekme hareketini simüle edebilmek amacıyla farklı yönlerde iki adet çekvalf kullanılmıştır. Seçilen çekvalf modeli, sistem gereksinimlerine uygun olması ve düşük maliyetli yapısıyla avantaj sağlaması nedeniyle tercih edilmiştir.

Mekanik tesisatlarda kullanılan Ø20 çapında PPRC malzemeden üretilmiş T bağlantı aparatı hazır olarak temin edilmiştir. Projede, basınç ve debi sensörlerinin bağlantılarının yapılması ile piston-silindir düzeneğindeki sıvı akışının sisteme yönlendirilmesi amacıyla üç adet kullanılmıştır. Sistemde bağlantı yapılacak diğer malzemeler dişli olduğundan, T bağlantı aparatlarına el paftasıyla diş açılmıştır. Bu malzemenin tercih edilme nedeni, düşük maliyetli olması ve kolay temin edilebilirliği sayesinde sistemin hızlı ve pratik bir şekilde kurulmasına olanak sağlamasıdır.

Mekanik tesisatlarda kullanılan Ø20 çapında PPRC malzemeden üretilmiş dişli körtapa hazır olarak temin edilmiştir. Projede, basınç sensörlerinin T bağlantı parçasının çıkış kısmındaki dişli bölüme sabitlenmesi amacıyla iki adet kullanılmıştır. Bu malzeme, bağlantının güvenli bir şekilde yapılmasını sağlaması, düşük maliyetli olması ve kolay temin edilebilmesi nedeniyle tercih edilmiştir.

Rezervuarın giriş ve çıkış hortumlarını sabitlemek ve sızdırmayı önlemek amacıyla, ABS malzeme kullanılarak üç parça halinde 3D yazıcıda üretilmiştir. ABS filament, yüksek mukavemeti ve dayanıklılığı sayesinde mekanik yüklere karşı direnç göstermekte olup, darbe ve çekme mukavemeti açısından PLA'ya kıyasla üstün performans sunmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle, rezervuar bağlantılarının güvenli ve uzun ömürlü olmasını sağlamak amacıyla ABS malzeme tercih edilmiştir.

Damar modeli, şeffaf RTV2 malzemesi kullanılarak Ø20 çapında laboratuvar ortamında üretilmiştir. Şeffaf yapısı, içinden geçen akışkanın görsel olarak izlenmesine olanak tanırken, elastik özelliği farklı basınç seviyelerinde damar modelinin genleşme davranışını gözlemlemeyi mümkün kılmaktadır. Bu özellikler, sistemin akış ve basınç değişimlerine verdiği tepkilerin analiz edilmesini sağlamaktadır.

Tasarımdaki yapay damar modelinin giriş ve çıkışındaki sıvı akış miktarını litre-zaman cinsinden ölçmek ve giriş-çıkış farkını kıyaslamak amacıyla, 1-30 L/dk aralığında ve $\leq 1,75$ MPa basınca kadar ölçüm yapabilen iki adet debi sensörü hazır olarak temin edilmiştir. Sensörlerden biri yapay damar modelinin sıvı girişine, diğeri ise sıvı çıkışına yerleştirilmiş olup, bağlantılar sızdırmazlığı sağlamak amacıyla teflon bant kullanılarak yapılmıştır. Bu sensörler, sistemdeki akış dinamiklerini izlemek ve performans değerlendirmesi yapmak için kullanılmaktadır. Tasarımdaki yapay damar modelinin giriş ve çıkışındaki sıvı akış basıncını kPa cinsinden ölçmek ve giriş-çıkış farkını kıyaslamak amacıyla, sisteme uygun iki adet basınç sensörü temin edilmiştir. Bu sensörler, sistemde kullanılan PPRC dişli körtapanın üst kısmına, sensör başlığının çıkış çapına uygun şekilde delinerek monte edilmiş ve güçlü yapıştırıcı ile sabitlenmiştir. Bu yerleşim, sensörlerin güvenli ve sızdırmaz bir şekilde çalışmasını sağlamakta olup, basınç değişimlerinin hassas bir şekilde izlenmesine olanak tanımaktadır.

Mekanik tesisatlarda kullanılan, hortum bağlantı rekoru diye bildiğimiz bağlantı elemanı hazır olarak alındı. Projede kullanılan şeffaf hortumların ve yapay damar modelinin bağlantılarını yapabilmek için $\frac{1}{2}$ " çapında sarı malzemeden 4 adet rekor kullanıldı. Sistemde sıvı (genellikle su) kullanacağımızdan korozyon etkisini azaltmak maksadıyla ve ihtiyaca uygun olmasından sarı rekor kullanıldı.

Elektronik bileşenler arasında iletimi sağlamak amacıyla, $0,75 \text{ mm}^2$ ile $1,5 \text{ mm}^2$ arasında değişen kesitlere sahip farklı renklerde standart kablolar kullanılmıştır. Arduino kartı üzerindeki bağlantılarda karışıklığı önlemek ve bağlantıların düzenli olmasını sağlamak amacıyla renk kodlaması tercih edilmiştir. Ayrıca, tasarımdaki bağlantı noktalarında sıvı ve hava kaçağını önlemek amacıyla teflon bant, silikon conta, RTV2 silikon ve yüksek polikloropren esaslı yapıştırıcılar kullanılarak sızdırmazlık sağlanmıştır.

Bu çalışmada, sistemin kontrolünü sağlamak ve motor sürücüsünü yönetmek amacıyla Arduino Uno mikrodenetleyici kartı kullanılmıştır. ATmega328P mikrodenetleyicisine sahip olan Arduino Uno, 14 dijital giriş/çıkış pini ve 6 analog giriş pini ile genişletilebilir bir platform sunmakta olup, açık kaynaklı yapısı ve kullanıcı dostu programlama ortamı sayesinde deneysel çalışmalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Arduino Uno kartının üzerine "Prototip Shield" eklenerek, ek bağlantıların yapılması ve sistem bileşenlerinin kolayca entegre edilmesi

sağlanmıştır. “Prototip Shield”, devre elemanlarının lehimlenmesine olanak tanıyan bir alan sunmasının yanı sıra, motor sürücüsü, sensörler ve diğer elektronik bileşenlerin Arduino ile doğrudan bağlantısını kolaylaştırmaktadır. Bu düzenek, adım motorunun sürülmesi, hız ve konum kontrolünün sağlanması ve sistemden alınan verilerin işlenerek gerektiğinde geri besleme mekanizmasının çalıştırılması amacıyla kullanılmıştır. Böylece, sistemin programlanabilir ve modüler bir yapıya sahip olması sağlanarak, deneysel çalışmalar için esneklik ve uyarlanabilirlik artırılmıştır.

2.4. DÜZENEGİN CAD TASARIMI

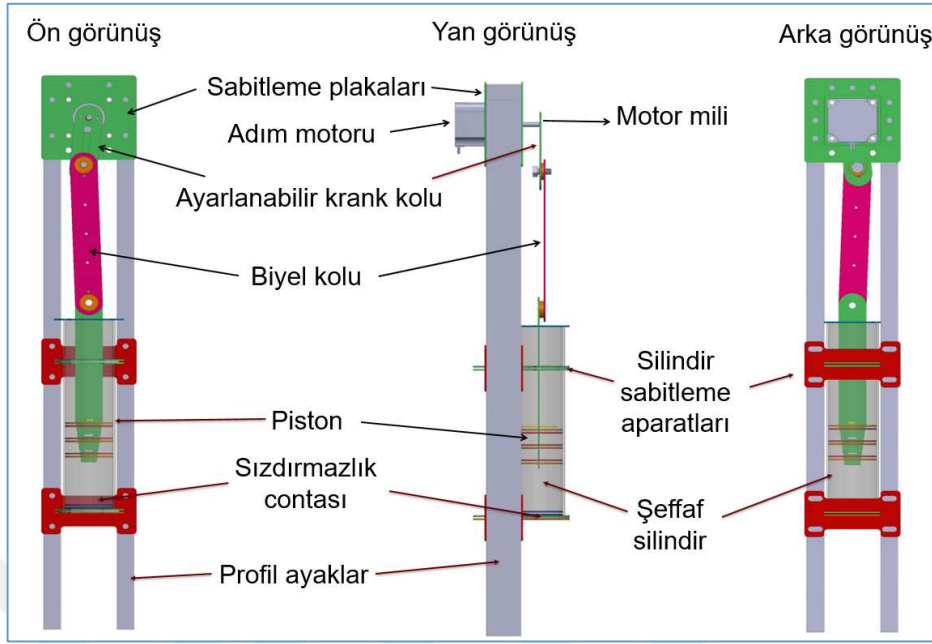
Projede kullanılacak olan paslanmaz çelik malzemeler ve diğer parçaların tasarımı için bilgisayarlı katı modelleme programı SolidWorks 2021 kullanıldı. Şekil 4’te oluşturulan montajın elemanları gösterilmiştir. SolidWorks katı modelleme programı, mühendislik ve endüstriyel tasarım alanlarında yaygın olarak tercih edilmekte olup, kullanım kolaylığı ve güçlü montaj araçları sayesinde kompleks mekanizmaların tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Tasarım sürecinde öncelikle mekanizmayı oluşturan tüm parçalar tek tek modellenmiş, ardından bu parçalar montaj ortamında birleştirilerek sistemin genel yapısı oluşturulmuştur.

Mekanizmanın tasarım aşamasında adım motoru, krank kolu, biyel kolu, piston, silindir ve bağlantı elemanları gibi tüm bileşenler gerçek ölçülerıyla modellenmiştir. Malzeme özellikleri tanımlanarak, parçaların ağırlık, mukavemet ve üretilebilirlik açısından uygunluğu değerlendirilmiştir. Ayrıca, montaj esnasında bileşenlerin uyumlu çalışması için bağlantı noktaları, vida delikleri ve toleranslar belirlenerek sistemin doğru şekilde birleştirilmesi sağlanmıştır.

Parçaların tek tek modellenmesinin ardından, montaj modülünde mekanizmanın birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, sistemin temel iskeletini oluşturan profil ayaklar ve sabitleme plakaları monte edilmiştir. Daha sonra, adım motoru sabitleme plakalarına yerleştirilmiş ve motor milinin krank koluna bağlantısı sağlanmıştır. Krank kolu ile biyel kolunun eklenmesiyle, motordan gelen dönme hareketinin pistona iletilmesi mümkün hale getirilmiştir. Şeffaf silindir montajlanarak içindeki sıvı akışının gözlemlenmesi sağlanmış, piston ve sızdırmazlık contaları eklenerek sistemin verimli çalışması için gerekli önlemler alınmıştır. Son olarak, cıvatalar, sabitleme aparatları ve contalar gibi bağlantı elemanları eklenerek mekanizmanın stabilitesi artırılmıştır.

Montaj işlemi tamamlandıktan sonra, SolidWorks’ün hareket simülasyonu özelliği kullanılarak mekanizmanın çalışma prensibi test edilmiştir. Bu sayede olası mekanik sorunlar

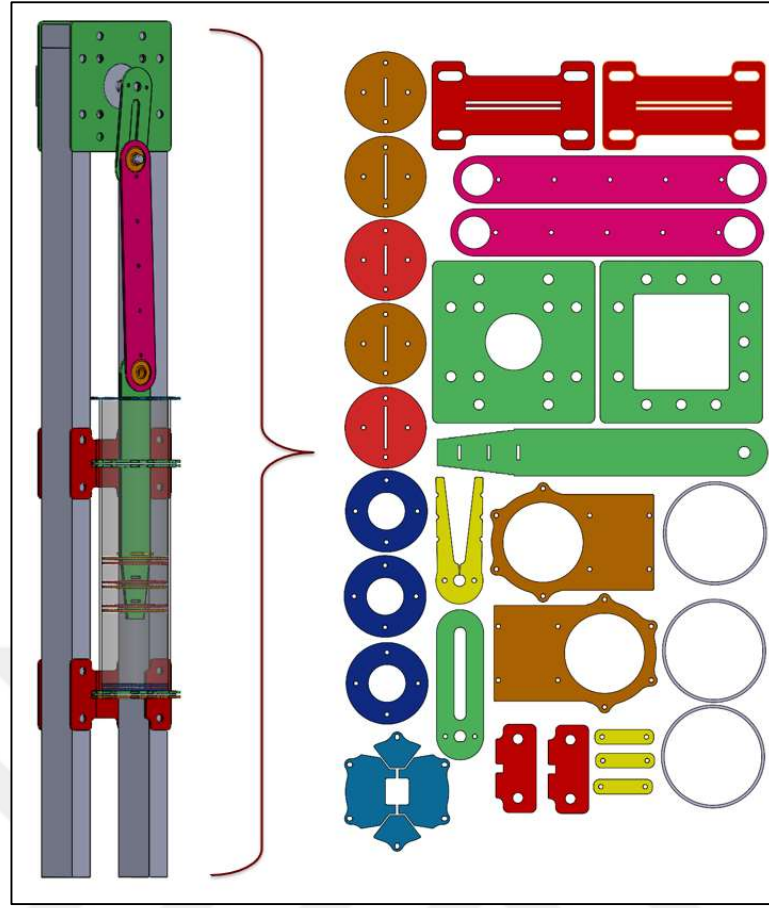
tespit edilmiş ve tasarım üretime geçmeden önce optimize edilerek en verimli yapı elde edilmiştir.



Şekil 4: Krank Biyel Mekanizması ile Oluşturulmuş Düzeneğin 3 Boyutlu Modeli

Mekanizmanın 3D montaj aşamasında yapılan inceleme ve testler tamamlandıktan sonra, üretim sürecine geçiş için parçaların lazer kesime uygun hale getirilmesi sağlanmıştır. SolidWorks 2021’de gerçekleştirilen montaj sonrası, her bir bileşen manuel olarak 2D düzleme aktarılmış ve kesim planı oluşturulmuştur. Bu aşamada, parçaların üretim kolaylığı, malzeme tasarrufu ve kesim doğruluğu göz önünde bulundurularak en uygun yerleşim düzeni belirlenmiştir. Lazer kesim işlemi için tüm paslanmaz çelik ve diğer metal bileşenlerin iki boyutlu teknik çizimleri oluşturulmuş, kesim yolları belirlenmiş ve uygun tolerans değerleri atanmıştır. Bu sayede, bağlantı noktalarının uyumlu olması ve montaj esnasında herhangi bir hizalama sorunu yaşanmaması sağlanmıştır. Özellikle delik çapları, vida yuvaları ve bağlantı noktaları gibi kritik detaylar kesim hassasiyeti göz önünde bulundurularak düzenlenmiştir.

Şekil 5’te gösterildiği gibi, 3D montajdan elde edilen bileşenler, lazer kesim için 2D düzlemde optimize edilmiş bir düzene sokulmuştur. Bu düzenleme, üretim aşamasında malzeme israfını en aza indirmek ve kesim sürecini hızlandırmak amacıyla yapılmıştır. Böylece, tasarımın dijital ortamda tamamlanmasının ardından üretim aşamasına sorunsuz bir geçiş sağlanmıştır.



Şekil 5: Tamamlanan Montajın 2 Boyutlu Olarak Yeniden Düzenlenmesi

2.5. SENSÖRLER VE ADIM MOTORUNUN KULLANIMI

Bu çalışmada, sıvı akışını ve basıncını ölçmek için iki farklı sensör türü kullanılmıştır: debi sensörleri ve basınç sensörleri. Debi sensörleri, yapay damar modelinin giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilerek, sıvı akış miktarını litre/dakika (L/dk.) cinsinden ölçmek ve giriş-çıkış farklarını kıyaslamak amacıyla kullanılmıştır. Basınç sensörleri ise, akışkanın farklı noktalardaki basınç değişimlerini kPa cinsinden ölçerek sistemin performans analizini yapmak için kullanılmıştır.

2.5.1. Debi Sensörü

Bu projede kullanılan YF-S201 su akış sensörü, sıvı akış hızının hassas ölçümünü sağlayan kompakt ve yüksek performanslı bir sensördür. Endüstriyel ve ticari uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen bu sensör, su ısıtıcıları, su otomatları, genel akış ölçüm cihazları gibi sistemlerde güvenilir ölçümler sunmaktadır. Sensör, bir plastik valf gövdesi, su rotoru ve Hall etkisi sensöründen oluşmaktadır. Akışkan, rotorun içinden geçtiğinde rotor döner ve dönüş hızı akış oranına bağlı olarak değişir. Bu hareket, Hall etkisi sensörü tarafından darbeli bir sinyal olarak algılanır ve böylece akış hızı hassas bir şekilde ölçülür.

Teknik özellikleri arasında 4,5V ila 24V çalışma gerilimi, 1-30 L/dk. akış hızı aralığı ve maksimum 1,75 MPa basınç dayanımı yer almaktadır. Ayrıca, 80°C'ye kadar çalışma sıcaklığına sahiptir. %35 ila %90 bağıl nem aralığında çalışabilmesi, 1250 V/dk. elektrik dayanımı ve 100 MΩ'nin üzerinde izolasyon direnci sayesinde uzun ömürlü ve güvenilir bir kullanım sunmaktadır. Malzeme yapısı açısından, sensör PVC kablolar, PA valf gövdesi ve POM malzemeden üretilmiş rotor kanatçıkları içermektedir. Bu projede, yapay damar modelinin giriş ve çıkış noktalarındaki sıvı akış miktarını ölçmek ve giriş-çıkış farklarını analiz etmek amacıyla iki adet YF-S201 sensörü kullanılmıştır. Sensörler, teflon bant kullanılarak sızdırmazlık sağlanmış şekilde sisteme entegre edilmiştir. Kompakt tasarımı ve üstün sızdırmazlık performansı sayesinde, sistemin akış dinamiklerini güvenilir bir şekilde analiz etme imkânı sunmaktadır. RoHS uyumlu oluşu ise çevresel standartlara uygunluğunu desteklemektedir. Sonuç olarak, YF-S201 su akış sensörü, yüksek hassasiyetli ölçüm kapasitesi ve dayanıklı yapısıyla bu projede etkin bir şekilde kullanılmıştır.

2.5.2. Debi Sensörünün Programlanması

Bu çalışmada, Arduino IDE 2.3.4 yazılımı kullanılarak debi sensöründen elde edilen frekans verisi işlenmiş ve buradan anlık debi değeri hesaplanmıştır. Kodlama sürecinde, sensörün ürettiği sinyal değişiklikleri (düşükten yükseğe veya tam tersi geçişler) belirli bir zaman dilimi içinde sayılarak debi değeri elde edilmiştir. Bu işlem tekrar edilerek zaman bazlı debi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin güvenilir olması için üç temel zaman parametresi kullanılmıştır. Bunlar, sensör verisinin belirli aralıklarla okunmasını sağlayan sinyal değişim kontrol sıklığı (preTimeDebi), ölçülen frekans değerlerinin belirlenen periyotlarla seri port üzerinden ekrana yazdırılmasını sağlayan ekrana yazdırma sıklığı (preTimeDebiWrite) ve ölçüm doğruluğunu artırmak için kullanılan düzeltme katsayısıdır.

Kodlama süreci başlangıç, kurulum (setup) ve ana döngü (loop) olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Başlangıç aşamasında, zaman ölçümleri için kullanılan millis() fonksiyonu ile zaman sayaçları başlatılmıştır. Arduino'nun sensörlerden veri okuyabilmesi için analog giriş pinleri tanımlanmış ve ilgili değişkenler atanmıştır. Sensörlerden elde edilen analog sinyal değerlerinin yorumlanması için gerekli olan değişkenler de bu aşamada belirlenmiştir. Kurulum aşamasında, Arduino'nun bilgisayarla haberleşmesini sağlamak amacıyla 9600 baud hızında seri iletişim başlatılmıştır. Bu adım, elde edilen verilerin gerçek zamanlı olarak izlenmesine olanak tanımaktadır. Ana döngüde, sensörlerden elde edilen veriler belirli aralıklarla okunarak analiz edilmiştir. Sensörlerden gelen analog veriler belirli bir eşik değeri ile karşılaştırılmış ve bu değerin üzerinde olup olmadığı kontrol edilerek sinyal değişimi tespit edilmiştir. Hesaplanan frekans değerleri belirlenen zaman aralığında işlenerek, debi frekansı

hesaplanmıştır. Sensörün ürettiği darbelerin debi ile ilişkilendirilmesini sağlamak amacıyla sensör dökümanından elde edilen 2,4 katsayısı kullanılmıştır. Elde edilen veriler, seri port üzerinden ekrana yazdırılmış ve her ölçüm periyodunun sonunda sayaçlar sıfırlanarak yeni ölçümler için döngü devam ettirilmiştir.

Giriş ve çıkış debi sensörleri arasındaki yapay damar modeli çıkarıldıktan sonra, yerine rijit kabul edilen örgülü şeffaf sert bir hortum yerleştirilmiştir. Bu hortum 15 cm uzunluğunda olup, giriş kısmına ev tipi musluktan su bağlantısı sağlanmıştır. Çıkış debisini ölçmek amacıyla, darası 284 gram olan bir su bidonu tartıldıktan sonra çıkış noktasına konumlandırılmıştır. Deneyin ilk aşamasında, musluk kademeli olarak açılarak iki debi sensörü arasında bir fark olup olmadığı Arduino Serial Plotter ekranında gözlemlenmiştir. Bu süreçte, sensörlerin verdiği anlık ölçümler karşılaştırılarak sistemin doğruluğu analiz edilmiştir. Ardından, musluk bir miktar kısıldıktan sonra bidona 2 dakika boyunca su dolumu yapılmış ve dolan suyun toplam ağırlığı 2930 gram olarak ölçülmüştür. Buradan hareketle, sistemdeki ortalama debi değeri 24,4 gram/saniye olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplanan değer, Arduino kodunda düzeltme katsayısı olarak girilmiş ve ölçümlerin daha hassas hale getirilmesi sağlanmıştır.

2.5.3. Basınç Sensörü

Bu projede, HX710B hava basıncı sensör modülü kullanılarak sistemdeki basınç değişimlerinin hassas bir şekilde ölçülmesi sağlanmıştır. HX710B, 0-40 kPa aralığında hava basıncı ölçebilen, yüksek doğruluklu bir sensördür ve entegre 24 bit ADC (Analog-Dijital Dönüştürücü) çipi sayesinde basınç verilerini dijital sinyallere dönüştürerek hassas ölçüm imkanı sunmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle, yapay damar modelinde basınç değişimlerini gözlemlemek ve analiz etmek için tercih edilmiştir. Basınç sensörü, 3,3V-5V çalışma voltajı ile düşük güç tüketimi sağlamakta olup, kompakt yapısı sayesinde sistemin farklı noktalarına kolayca entegre edilebilmektedir. 2,5 mm hortum bağlantısını desteklemesi, sensörün sıvı ve hava basıncı ölçümlerinde esnek kullanım imkanı sunmasına olanak tanımaktadır. Sensörün basınca duyarlı membranı, sistemdeki anlık basınç değişimlerini algılayarak 24 bit çözünürlükle yüksek doğrulukta veri sağlamaktadır.

Bu çalışmada, HX710B basınç sensörleri yapay damar modelinin giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilmiştir. Bu sayede, giriş ve çıkış arasındaki basınç farkı sürekli olarak izlenerek sistemin dinamikleri analiz edilmiştir. Sensörlerin stabil çalışmasını sağlamak için PPRC dişli körtapaların üst kısmı sensör bağlantısına uygun şekilde delinmiş ve sensörler güçlü bir yapıştırıcı ile sabitlenmiştir. Ayrıca, bağlantı noktalarında herhangi bir sızıntıyı önlemek amacıyla sızdırmazlık malzemeleri kullanılmıştır.

Arduino ile entegrasyonu sağlanan sensör, basınç verilerini dijital olarak ileterek sistemin seri port üzerinden gerçek zamanlı olarak izlenmesine olanak tanımıştır. Düşük akım tüketimi ve yüksek doğruluk seviyesi sayesinde sistemin genel enerji verimliliğine katkıda bulunmuş ve uzun süreli ölçümler için ideal bir çözüm sunmuştur. Yapılan testlerde, sensörün milibar (mBar) ve Pascal (Pa) cinsinden ölçüm yapabilme kapasitesi doğrulanmış, ölçülen verilerin sistem dinamikleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

HX710B sensörünün altimetreler ve varyometreler için optimize edilmiş olması, yüksek çözünürlüklü basınç ölçümleri sağlamasına olanak tanımaktadır. Sensörün dahili kalibrasyon katsayıları, doğrusal ölçüm performansını artırarak güvenilir veri elde edilmesini sağlamıştır. Dijital çıkış sinyali, Arduino ile programlanarak basınç ölçümlerinin grafiksel olarak izlenmesine ve sistemin basınca verdiği tepkinin analiz edilmesine imkan tanımıştır.

2.5.4. Basınç Sensörünün Programlanması

HX710B hava basıncı sensörünün Arduino ile entegrasyonu sağlanarak, basınç ölçümlerinin dijital olarak işlenmesi ve seri port üzerinden okunması gerçekleştirilmiştir. Sensör, 24 bit çözünürlüğe sahip ADC modülü ile donatılmış olup, basınç değişimlerini yüksek hassasiyetle algılayarak Arduino'ya veri aktarımını sağlamaktadır. Bu projede kullanılan kod, giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilen iki adet HX710B basınç sensörünün ölçüm yapmasını mümkün kılmıştır. Arduino kodunda, üç temel zaman parametresi tanımlanmıştır. `preTime1`, sensörlerin belirli aralıklarla veri okumasını sağlayan zaman değişkenidir. `preTimePressure`, basınç sensörlerinin ölçüm sıklığını belirleyerek verilerin güncellenmesini sağlar. `preTimePressureWrite` ise ölçülen basınç verilerinin belirli aralıklarda ekrana yazdırılmasını sağlayarak seri port üzerinden analiz yapılmasına olanak tanır. Kurulum (setup) aşamasında, HX710B basınç sensörlerinin giriş ve çıkış noktalarına bağlantıları yapılmıştır. Sensör 1 için OUT pini Arduino'nun 12. pinine, SCK pini 13. pinine bağlanırken; Sensör 2 için OUT pini Arduino'nun 10. pinine, SCK pini 11. pinine bağlanmıştır. Sensörlerin stabil çalışabilmesi için `pinMode()` fonksiyonu kullanılarak veri giriş ve çıkış pinleri uygun şekilde yapılandırılmıştır. Aynı zamanda `Serial.begin(9600);` komutu ile Arduino'nun bilgisayarla haberleşmesi başlatılmış ve verilerin seri port üzerinden okunabilmesi sağlanmıştır.

Ana döngü (loop) aşamasında, belirli zaman aralıklarında `millis()` fonksiyonu kullanılarak basınç verileri okunmuştur. Sensörler, 24 bit veri ilettiği için her bir bit sırayla okunarak birleştirilmiş ve sonucu bir tam sayı değeri olarak depolanmıştır. Verinin iki sensörden de aynı anda okunabilmesi için `digitalWrite()` ve `digitalRead()` fonksiyonları kullanılmıştır. Veri okuma sürecinde, sensörden gelen ikilik tabanlı veri (binary data), XOR işlemi uygulanarak negatif değerleri işleyebilecek hale getirilmiş ve 2's tamamlayıcısı (2's

complement) alınarak doğru basınç değeri elde edilmiştir. Bu işlem, ADC'nin ürettiği ham veriyi fiziksel anlam taşıyan bir basınç değeri haline getirmek için gereklidir. Kodun sonunda, her ölçüm periyodunun ardından seri port üzerinden elde edilen basınç değerleri yazdırılmış ve sayaç sıfırlanarak yeni ölçümler için döngü devam ettirilmiştir. Bu sayede, HX710B sensörlerinden gelen veriler sürekli olarak güncellenmiş ve sistemdeki basınç değişimleri anlık olarak takip edilebilmiştir.

2.5.5. Adım Motorunun Programlanması

Bu projede, DM556 motor sürücüsü ile kontrol edilen bir adım motoru kullanılmıştır. Adım motorları, hassas hareket kontrolü sağladıkları için endüstriyel ve deneysel sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Arduino üzerinden motor sürücüsüne gönderilen dijital sinyallerle, motorun hızı ve yönü belirlenerek sistemin mekanik bileşenleri hassas bir şekilde kontrol edilmiştir. Arduino kodunda, motorun dönüş yönü ve hızının ayarlanması için temel değişkenler ve pin bağlantıları tanımlanmıştır. pulsePin (8. pin) motorun adım sinyalini, dirPin (9. pin) ise motorun dönüş yönünü belirlemektedir. stepsPerRevolution (400 adım) değişkeni, motorun bir tam devir tamamlaması için gerekli adım sayısını belirlemekte olup, bu değer sürücü ayarlarına göre değiştirilebilir. “direction” (HIGH veya LOW) değişkeni ise motorun saat yönünde veya tersi yönde dönmesini sağlamaktadır.

Kurulum (setup) aşamasında, motor kontrol pinleri OUTPUT olarak tanımlanmış ve motor sürücüsü ile iletişim kurulacak şekilde yapılandırılmıştır. Loop (ana döngü) aşamasında, motorun dönüş hızı ve yönü belirlenerek adım sinyalleri gönderilmiştir. RPM değeri, motorun dakikadaki dönüş hızını ayarlamak için kullanılmakta olup, burada 20 RPM olarak belirlenmiştir. Kullanıcı ihtiyacına göre bu değer artırılıp azaltılabilir. Motorun hareketi için belirlenen RPM değerine bağlı olarak calculateDelay() fonksiyonu kullanılarak adımlar arasında gerekli gecikme süresi hesaplanmıştır. Gecikme süresinin ikiye bölünmesi, motorun her adımı için “HIGH” ve “LOW” darbelerinin oluşturulması gerekliliğinden kaynaklanmaktadır.

Motorun çalıştırılması için, for döngüsü kullanılarak belirlenen adım sayısı kadar sinyal gönderilmiştir. Her adımın tamamlanması için dört temel işlem sırasıyla gerçekleştirilmiştir: Motorun adım atması için pulse pini “HIGH” yapılır, belirlenen süre boyunca beklenir, pulse pini “LOW” yapılarak motorun adımı tamamlanır ve tekrar belirlenen süre kadar beklenerek bir sonraki adım başlatılır. Bu işlemler belirlenen stepsPerRevolution (400 adım) kadar tekrar edilerek motorun bir tam tur tamamlaması sağlanmıştır. Kodun sonunda, motorun yönünü değiştirmek için direction değişkeni ters çevrilebilir, böylece motor saat yönünün tersine dönebilir. Bu kod yardımıyla Arduino üzerinden adım motorunun hız ve yön kontrolü

gerçekleştirilmiş, böylece motorun istenilen hassasiyette çalışması sağlanmıştır. Motorun hareketi sistemin mekanik bileşenleriyle senkronize edilerek, yapay dolaşım döngüsü içindeki piston mekanizmasının doğru şekilde çalışması sağlanmıştır.

Ayrıca bu çalışmada kullanılan adım motorunun temel hız ve yön kontrolünün yanı sıra, kısa süreli geri hareket (retract) işlemi gerçekleştiren bir program da uygulanmıştır. Bu hareket kontrolü, motorun belirlenen bir açıda ileri hareket ettikten sonra kısa bir süre geri gitmesini ve ardından tekrar ilk yönünde hareketine devam etmesini sağlamaktadır. Bu tür bir kontrol mekanizması, özellikle piston sistemlerinde sıkıştırma ve gevşetme hareketlerini simüle etmek, motorun yüklenmesini dengelemek veya mekanizmanın içsel hareket dinamiklerini optimize etmek için kullanışlıdır. Motor sürücüsüne gönderilen adım sinyalleri ile motorun hareketi belirlenmektedir. Rotation1 değişkeni, motorun ileri yönde hareket edeceği adım sayısını tanımlar ve açı değeri ile adım cinsinden aynıdır. Rotation2 ise motorun tamamlayacağı toplam adımların geri kalan kısmıdır. Retract değişkeni, motorun belirlenen açıda kısa süreli geri gitmesini sağlayan adımsal hareket miktarını belirlemektedir. Kodun başlangıcında, motor sürücüsüne bağlı pinler “OUTPUT” olarak tanımlanmıştır. Loop (ana döngü) içinde, motor önce rotation1 kadar ileri hareket ettirilir, ardından 200 milisaniye duraklatılarak kısa bir bekleme süresi eklenir. Daha sonra motor yönü tersine çevrilerek, retract kadar geri hareket ettirilir. Motorun geri gitme işlemi tamamlandıktan sonra, tekrar kısa bir duraklama yapılır ve motor tekrar retract miktarı kadar ileri hareket ettirilerek başlangıçtaki konumuna varır. Bu işlemin ardından, motorun geri kalan yolu tamamlaması için rotation2 kadar adım atarak hareketi tamamlaması sağlanır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

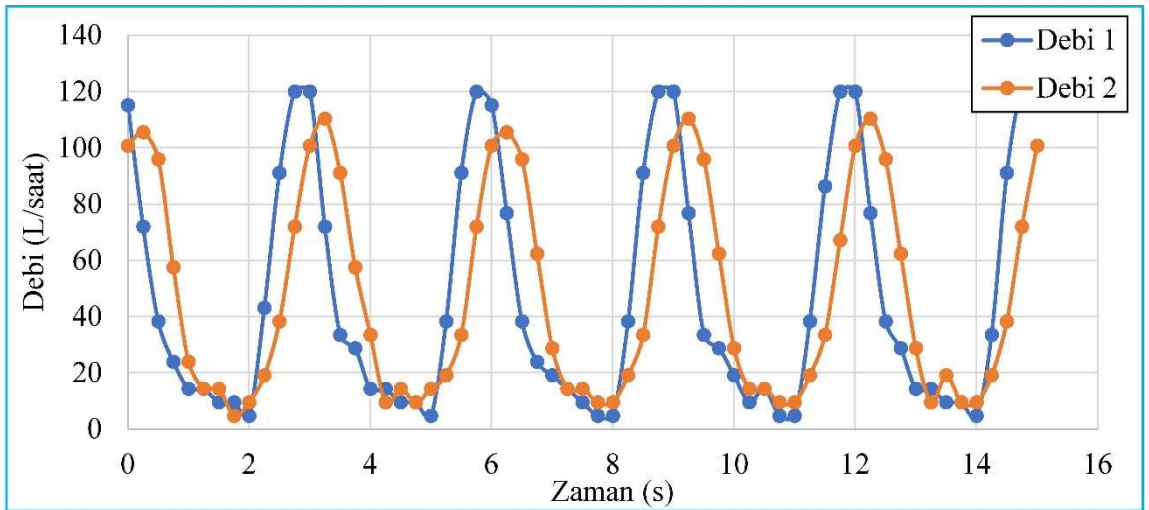
3.1. SİSTEMİN ÇALIŞMASI

Rezervuar içine su doldurulduktan sonra çalıştırılmaya başlanan sistemde, suyun yapay damar modeline basıldığı ve sonrasında tekrar rezervuara geri dolduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, sistemde kullanılan tek yönlü valflerin doğru şekilde çalıştığını ve suyun yalnızca tek yönde hareket ettiğini doğrulamaktadır. Valflerin düzgün açılıp kapanarak suyun akışını yönlendirdiği açıkça görülmüştür.

Ayrıca, sistemdeki hava, rezervuarın tepe kısmındaki deliklerden atılarak düzenli bir şekilde su akışının sağlandığı tespit edilmiştir. Bu, suyun düzgün bir şekilde dolaşımını sağlayan bir mekanizma olduğunu ve sistemin tasarımının etkili bir şekilde havayı boşaltarak suyun rahatça geçişini sağladığını göstermektedir. Bu gözlemler, sistemin düzgün çalıştığını ve tasarımının suyun akışını optimize etmek için gerekli önlemleri alacak şekilde yapılandırıldığını ortaya koymaktadır.

3.2. SENSÖRLER VERİLERİ

Şekil 6'da sistemdeki debinin zamanla değişimi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Giriş debisi "Debi 1" ve çıkış debisi "Debi 2" olarak işaretlenmiştir. Grafik, pompanın basma ve çekme hareketlerinin etkisini açıkça göstermektedir. Bu hareketler, sistemin tek yönlü vanalarının düzgün çalışması sayesinde ölçülebilir ve düzenli bir debi profili oluşturmuştur. Vanaların işlevselliği, elde edilen grafik dalgalanmalarının birbirini tekrar eden ve tutarlı bir yapıda olmasıyla doğrulanmaktadır.

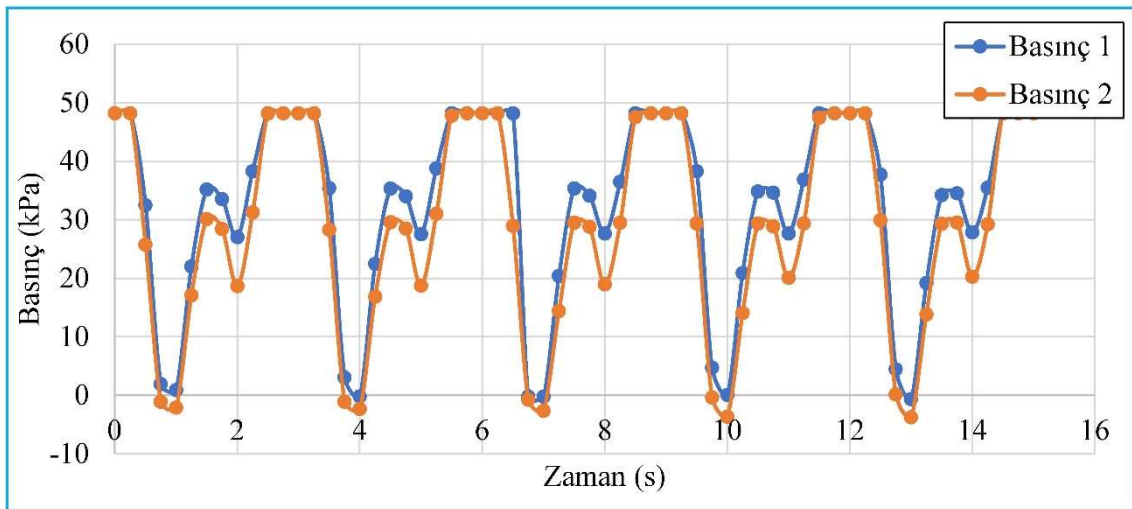


Şekil 6: Debi Sensöründe Elde Edilen Debi Zaman Verisi

Grafikteki dalgalanmalar, sistemin kararlı ve tekrar edilebilir bir şekilde çalıştığının önemli bir göstergesidir. Ancak, debinin düşük olduğu anlarda belirli dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Bu dalgalanmalar, akış hızının azalmasıyla birlikte sensörün algıladığı hattın akış profilinde oluşan düzensizliklerden kaynaklanıyor olabilir. Özellikle düşük akış hızlarında akış rejiminin daha hassas hale gelmesi, bu dalgalanmaların ortaya çıkmasında etkili bir faktördür.

Debi çıkış tepkisi, giriş tepkisine göre zaman olarak belirgin bir kayma göstermektedir. Bunun yanı sıra, çıkış debisinin tepe noktalarının daha düşük seviyelerde olduğu ve alan olarak giriş debisinden biraz daha küçük olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, sistemde yerleştirilen damar modelinin şişerek bir miktar suyu geçici olarak depoladığına işaret etmektedir. Damar modelinin esnek yapısı, bu depolama sürecini tetiklemekte ve suyun akışını kısa bir süreliğine geciktirmektedir. Sonuç olarak, grafik analizleri, sistemin sağlıklı ve işlevsel bir şekilde çalıştığını ve yerleştirilen yapay damar modelinin davranışlarının simülasyon amacına uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, sistemin gelecekteki optimizasyon süreçleri için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Şekil 7’de basıncın zamanla değişimini gösteren grafik sunulmaktadır. Bu grafikte "Basınc 1" giriş basıncını, "Basınc 2" ise çıkış basıncını temsil etmektedir. Özellikle 50 kPa'nın biraz altındaki düz tepe noktaları, sensör limitine ulaşıldığını göstermektedir. Bu durum, sistemin sensör kapasitesini zorladığını ve basınç değerlerinin güvenilir şekilde ölçülebilmesi için daha yüksek kapasiteli sensörlerin kullanılmasının gerekebileceğini ortaya koymaktadır. Sensör limitinin aşılması, sistemin performans sınırlarının netleşmesi açısından önemli bir veri sunarken, istenmeyen yüklenmelerin optimizasyon sürecinde dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.



Şekil 7: Basınc Sensöründen Elde Edilen Basınc Zaman Grafiği

Düşük basınç değerlerinde ise dikkat çekici bir şekilde negatif basınç gözlemlenmiştir. Bu durum, akışkanın geri akış eğilimleri veya sistem içindeki ani yavaşlamalardan kaynaklanabilir. Özellikle çıkış basıncında bu negatif değerlerin daha belirgin olması, yapay damar modelinin çıkış ucundaki akış profilinde dalgalanmalar yaşandığını göstermektedir. Bu dalgalanmalar, akışkan dinamiklerinde hat üzerinde oluşabilecek düzensizlikleri yansıtmaktadır. Negatif basınç, bir yandan sistem içindeki basınç dengelemelerinin iyileştirilmesi gerektiğine işaret ederken, diğer yandan sensör hassasiyet sınırlarının değerlendirilmesi için bir referans oluşturabilir.

Grafikteki basınç seviyeleri, insan nabzına kıyasla geniş bir aralıkta dalgalanmakla birlikte, nabız dalga formuna benzeyen bir dinamik sergilemektedir. Bu durum, sistemin basınç üretim kapasitesinin insan nabzını taklit etme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. İnsan nabızı için tipik olarak 80-120 mmHg aralığında bir dalgalanma göz önüne alındığında, yapay damar modelinin bu aralığı başarılı bir şekilde simüle edebilmesi için ince ayarların yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Grafikte dikkat çeken bir diğer nokta, basıncın belli bir noktada artış trendini kaybetmesi, ardından hafif bir düşüş yaşayıp tekrar yükselme trendine devam etmesidir. Bu durum, özellikle adım motorunun mekanik zorlanmasından kaynaklanabilir ve motor kontrol mekanizmasında adım kayıplarına yol açabilir. Adım kayıpları, sistemin hassasiyetini olumsuz etkileyebileceği gibi, sistem performansını artırmak için daha kararlı bir kontrol algoritmasının uygulanması gerektiğini göstermektedir.

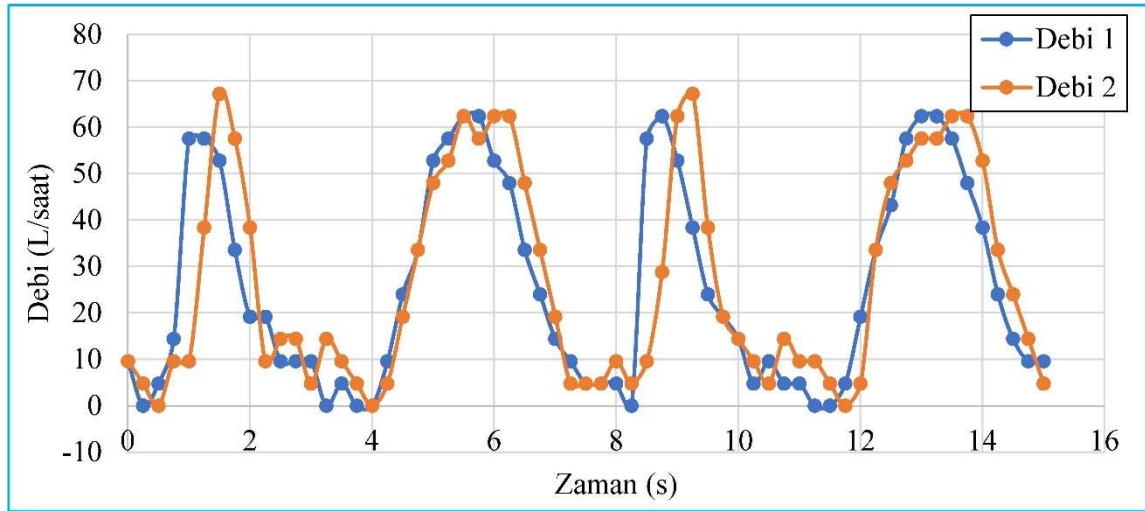
Giriş ve çıkış basınçlarının birbiriyle uyumlu bir şekilde hareket ettiği ve grafik üzerinde büyük oranda üst üste bindiği gözlemlenmiştir. Bu durum, yapay damar modelinin iç direnç oluşturmadan sağlıklı bir akış gerçekleştirdiğini ve basınç aktarımında herhangi bir kayıp yaşanmadığını göstermektedir. Eğer yapay damar modelinde iç direnç unsurları bulunmuş olsaydı, giriş ve çıkış basınçları arasında belirgin farklar oluşması beklenirdi. Bununla birlikte, modelin açık tüp yapısı sayesinde basınç iletiminin etkili bir şekilde sağlandığı ve sistemdeki akışkanın doğru bir şekilde yönlendirildiği anlaşılmaktadır.

Ayrıca, çıkış basıncının giriş basıncına göre biraz zaman kaymasıyla ilerlediği ve tepe noktalarının hem yükseklik hem de alan açısından bir miktar daha düşük olduğu fark edilmiştir. Bu durum, yapay damar modelinin şişerek belirli bir miktarda sıvıyı depoladığını ve bu depolamanın akışı kısa bir süre geciktirdiğini göstermektedir. Bu gecikme, modelin elastik özellikleri ve akış direnci arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu grafik analizleri, yapay damar modelinin hem giriş ve çıkış basınçlarını etkili bir şekilde ilettiğini hem de potansiyel olarak insan nabzını taklit edebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte,

sistemin daha hassas çalışabilmesi için sensör kapasiteleri, motor kontrol mekanizmaları ve akış profilinin daha ayrıntılı bir şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Bu bulgular, yapay dolaşım döngüsü sistemlerinin gelişimi ve kardiyovasküler simülasyonların hassasiyeti açısından değerli bir referans sunmaktadır.

3.3. GERİ ÇEKME Lİ PROGRAMRAM İLE ELDE EDİLEN SENSÖR VERİLERİ

Doğal damar iç basıncında aort kapağının kapanmasından kaynaklanan basınç dalgalanmasının benzerini bu sistemde oluşturma potansiyelini değerlendirmek amacıyla, motor açısı 270° 'ye ulaştığında 45° geri çekme uygulanmış, ardından tekrar yön değiştirilerek tam tur tamamlanmıştır. Şekil 8, bu geri çekmeli program sırasında debi sensöründen elde edilen debi-zaman verileri sunulmaktadır.



Şekil 8: Geri Çekmeli Programda Debi Sensöründen Elde Edilen Debi Zaman Verisi

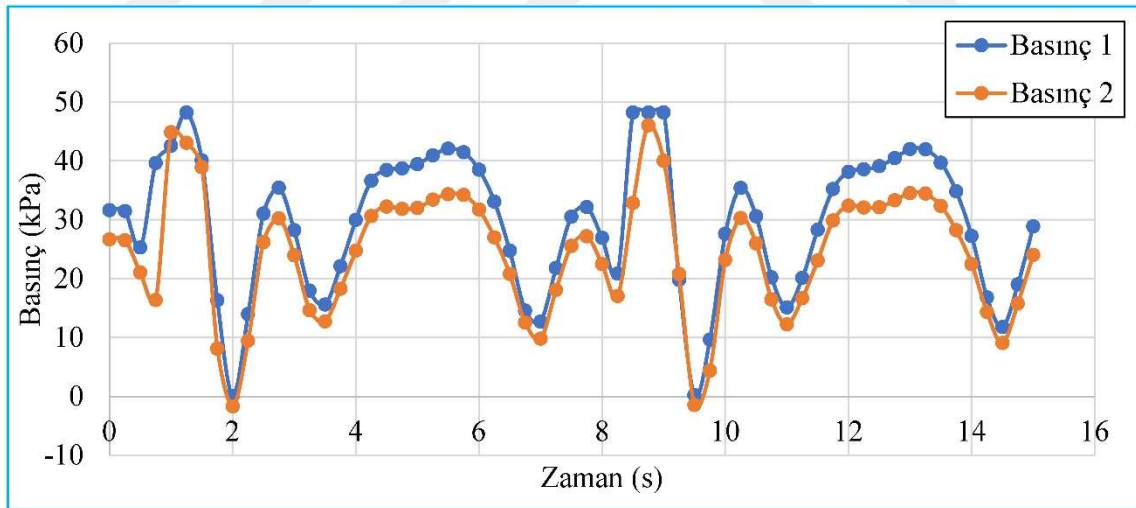
Geri çekme uygulanmayan grafiklerle karşılaştırıldığında, bu programdaki debi değerlerinin daha düzensiz bir dağılım sergilediği açıkça görülmektedir. İstenilen debi profilinde, özellikle pompanın geri çekilme anında (270° 'de duraklayarak) tekrar bir miktar içeriye sıvı basma hareketinin net bir şekilde gözlemlenmesi beklenmektedir. Ancak grafikte, bu hareketin yalnızca kısmen gerçekleştiği ve yeterince belirgin bir şekilde kendini göstermediği fark edilmektedir. Debi grafiğinde düzensiz yükselişler ve inişler gözlemlenmiştir. Bu durum, akışın kontrol mekanizmalarındaki eksiklikleri ve sistemdeki düzenli hareketin henüz tam anlamıyla sağlanamadığını göstermektedir. Özellikle geri çekme sırasında oluşan dalgalanmaların, sistemin genel performansını etkileyebileceği ve istenilen basınç ve debi profilinin oluşturulmasında ek ayarların yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Geri çekmenin uygulandığı bu programın mevcut sonuçları, aort kapağının kapanmasından kaynaklanan doğal basınç dalgalanmasını taklit etme konusunda henüz başarılı olunamadığını göstermektedir. Bu nedenle, farklı motor açılarında ve çeşitli geri çekme

programlarında testler yapılarak sistem performansının optimize edilmesi gerekmektedir. Bu denemeler hem debi profili hem de basınç dalgalanmalarının kontrolünü sağlama açısından önemli bilgiler sunacaktır.

Sonuç olarak, bu testler, yapay dolaşım sisteminin biyolojik nabız benzeri hareketleri daha iyi taklit edebilmesi için gelecekteki iyileştirmelere ışık tutmaktadır. Geri çekme hareketinin daha hassas bir şekilde uygulanması, sistemin kardiyovasküler süreçleri daha doğru bir şekilde simüle edebilmesi için kritik bir rol oynayacaktır.

Şekil 9’da geri çekmeli program sırasında basınç sensöründen elde edilen basınç-zaman grafiği sunulmaktadır. Grafikte giriş ve çıkış basınçlarının hemen hemen birbirinin üzerinde örtüştüğü görülmektedir. Ancak, çıkış basıncının giriş basıncına kıyasla biraz daha düşük olduğu fark edilmektedir. Bu durum, yapay damar modelinin şişme davranışıyla ilişkilendirilebilir. Damar, girişten gelen basıncı bir miktar absorbe ederek çıkış basıncını azaltmış olabilir. Geri çekilme hareketi, basınç grafiğinde belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. Grafikte iki farklı karakteristik yapı dikkat çekmektedir: biri keskin tepeli, diğeri ise daha yatay tepeli bir yapıdadır. Bu farklılıkların nedenleri, daha fazla araştırma ve analizle netleştirilmelidir. Ancak, motorun geri çekildiği anların grafikte açıkça görülebilir olması, sistemin geri çekme hareketini başarıyla gerçekleştirdiğini göstermektedir.



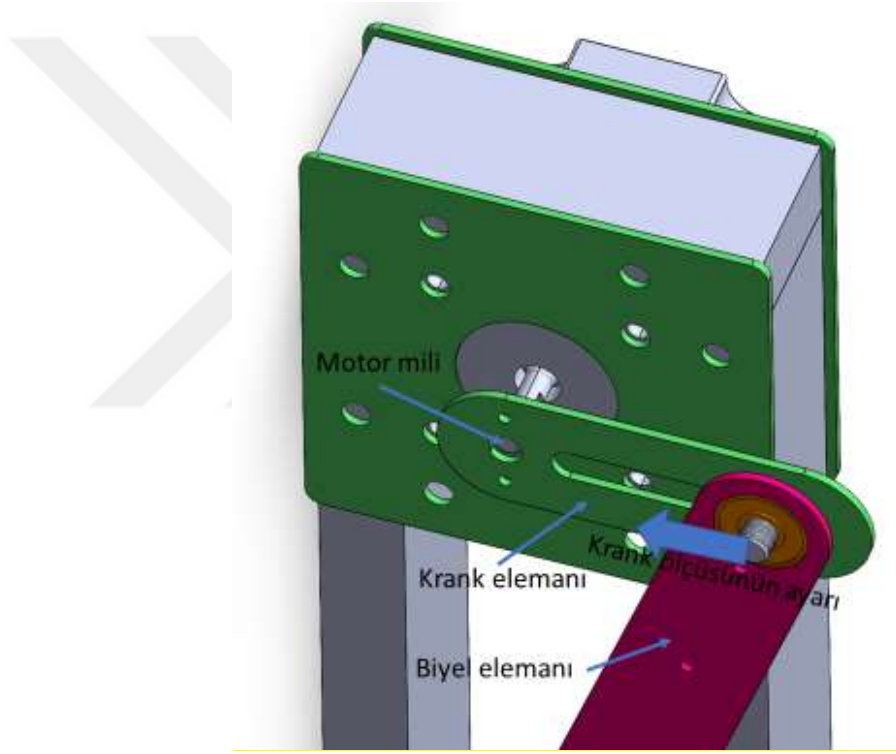
Şekil 9: Geri Çekmeli Programda Basınç Sensöründen Elde Edilen Basınç Zaman Grafiği

Bununla birlikte, geri çekilme anlarının zamansal olarak daha keskin ve hızlı bir başlangıç yapması gerektiği de anlaşılmaktadır. Bu durum, mevcut programlamanın iyileştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Daha hassas bir programlama, hem basınç değişimlerinin daha net bir şekilde kontrol edilmesini sağlayacak hem de sistemin performansını optimize edecektir. Sonuç olarak, bu grafikler, yapay damar modelinin şişme davranışı ve geri çekilme hareketinin etkilerini anlamak için değerli bilgiler sunmaktadır.

İlerleyen çalışmalarda, farklı geri çekme hızlarının ve motor programlarının etkileri incelenerek sistemin doğruluğu ve biyolojik süreçlere benzerliği artırılabilir.

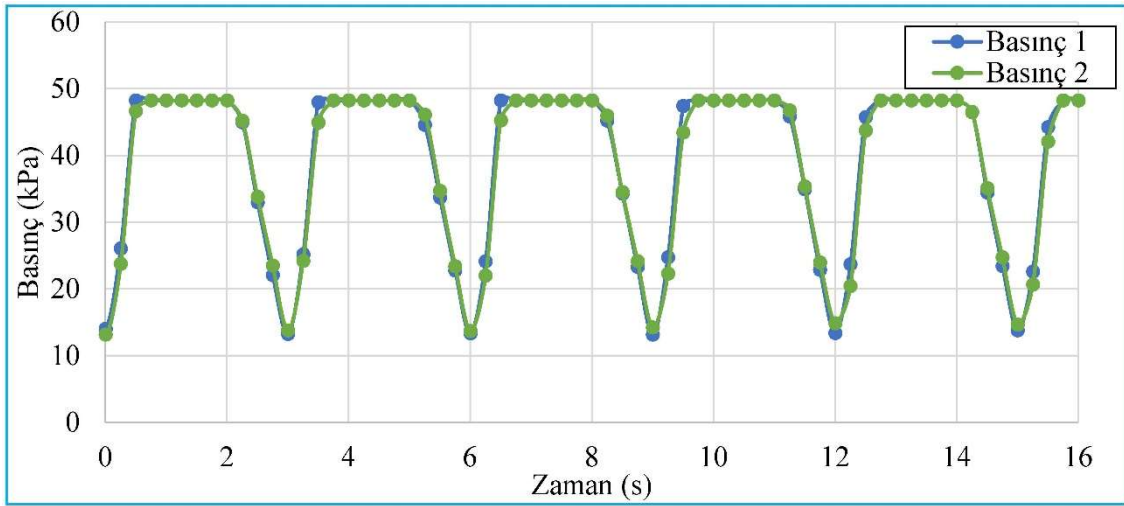
3.4. AYAR DEĞİŞİKLİKLERİ İLE ELDE EDİLEN YENİ VERİLER

Basınç sensör verilerindeki dalgalanmalar ve düzensizlikler ile birlikte alt/üst sınır verilerinin istenilen sınırların dışında kalması nedeniyle sisteme bazı müdahaleler yapıldı. Bunlardan ilki, krank kolu boyunun 30 mm'den 23 mm'ye (pratikte olabilecek en küçük değer) indirilmesi oldu. Şekil 10'da, bu ayarlanmanın CAD modelinde nasıl yapıldığı görselleştirilmiştir. Bu ayar sayesinde basıncın üst değer kısmının azaltılması hedeflendi. Alt değer kısmının istenilen seviyeye getirilmesi ve aynı zamanda basınç dalgalanmalarının azaltılması amacıyla, yapay damar modelinin çıkışına bir bilyeli, özel yapım valf yerleştirildi.



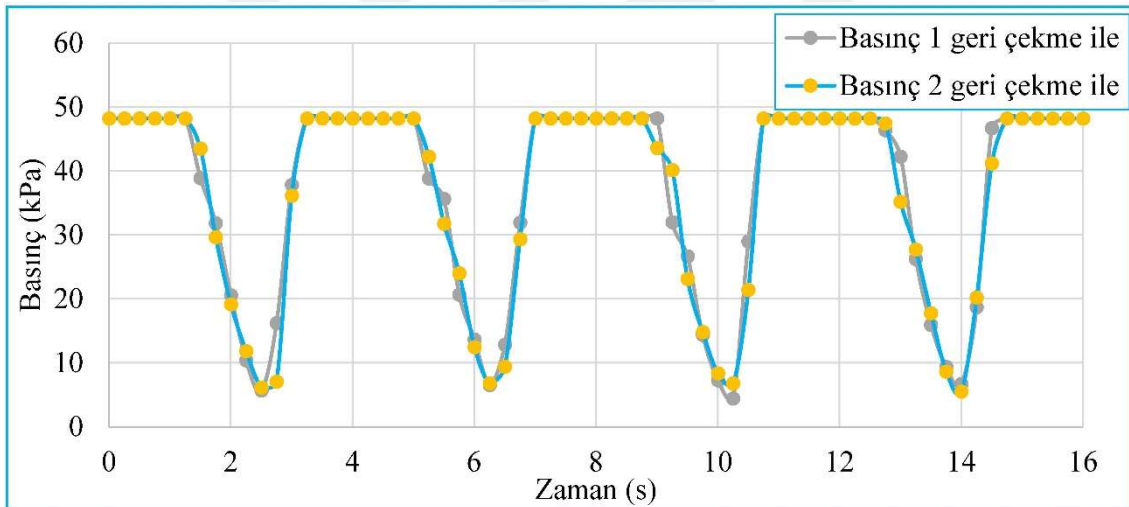
Şekil 10: Krank Ölçüsünün Ayarlanış Şekli

Bu yöntemle elde edilen sonuçlar Şekil 11'de sunulmuştur. Bu grafikte, iki basınç verisinin birbirine benzer bir trend izlediği açıkça gözlemlenmektedir. Alt sınır için hedeflenen ideal basınç değeri 10,7 kPa (80 mmHg) ve üst sınır için ise 16,0 kPa (120 mmHg) olarak belirlenmiştir. Görüldüğü üzere, alt sınır değeri bir miktar yükseltilerek ideal değere daha yakın bir sonuç elde edilmiştir. Bu değişiklik, alt sınırın daha istenilen seviyeye ulaşmasını sağlamıştır. Ancak, üst sınırda hala yüksek bir basınç değeri gözlemlenmektedir. Krank kolunun uzunluğunun azaltılması, üst sınırdaki bu yüksek basınç değerinin düşürülmesinde beklenen etkiyi tam olarak gösterememiştir. Bu durum, sistemin diğer bileşenlerinde yapılacak ilave ayarlamalar veya farklı optimizasyon stratejilerinin gerekli olabileceğini göstermektedir.



Şekil 11: Ayar Değişikliklerinden Sonra Elde Edilen Basınç ve Zaman Grafiği

Ayrıca geri çekmeli programda bazı ayar değişiklikleri yapılmıştır. Bunlardan ilki geri çekme açısının 22,5 dereceden 10 dereceye indirilmesi oldu. Ayrıca motor milinin yön değiştirme anlarına 0,1 saniye beklemler konularak sistemin yön değişimlerinde daha az titreşim üretmesi amaçlandı. Bu ayar değişikliklerinden sonra elde edilen basınç ve zaman grafiği Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12: Geri Çekmeli Durum İçin Ayar Değişikliklerinden Sonra Elde Edilen Basınç ve Zaman Grafiği

Grafik incelendiğinde, geri çekmenin basınç üzerindeki etkisinin net bir şekilde ortaya çıkmadığı anlaşılmıştır. Giriş ve çıkış basınçlarının birbirine yakın değerler olarak benzer bir trend izlediği dikkat çekmektedir. Yapay damarın hacimsel genişlemesi ile birlikte, giriş ve çıkış basınçları arasında bir fark oluşması beklenirken, bu durumun gerçekleşmemesi, sistemde istenilenin üzerinde bir basınç değerinin üretilmesiyle ilişkilendirilebilir. Ayrıca, ölçülemeyen üst limit değerindeki veri noktalarının önceki ölçümlere göre fazla olması, geri çekme etkisinin basınç üzerinde ölçülemeyen bölgede etkili olmuş olma ihtimalini güçlendirmektedir.

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, düşük maliyetli yapay dolaşım döngüsünün tasarım ve uygulanabilirliği ele alınmış ve yapılan testler sonucu sistemin doğru şekilde çalıştığı belirlenmiştir. Yapay damar modeli üzerinden gerçekleştirilen su sirkülasyonu, tek yönlü valflerin doğru çalışmasıyla sorunsuz şekilde sağlanmıştır. Ancak, bu sonuçların yalnızca modelin başlangıç aşamasındaki başarısı ile sınırlı kaldığı ve sistemin daha geniş çaplı testlere tabi tutulması gerektiği gözlemlenmiştir. Bu tür sistemlerin verimliliği ve uzun süreli dayanıklılığı üzerine daha fazla araştırma yapılması gereklidir. Bu bağlamda, yapay damarların davranışlarını daha iyi simüle edebilecek yeni nesil malzemelerin kullanımına yönelik araştırmaların artırılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Yapay damar simülasyonu üzerine yapılan araştırmaların çoğu, mevcut sistemlerin yüksek maliyetlerinden dolayı sınırlı kalmaktadır. Bu çalışmada önerilen düşük maliyetli yapay dolaşım döngüsü, benzer araştırmalarla karşılaştırıldığında daha basit bir yapıya sahip olmasına rağmen benzer sonuçlar vermektedir. Çalışmada kullanılan malzemelerin ve tasarımın sistemin verimliliğini olumsuz yönde etkilemediği gözlemlenmiştir. Ancak, alanda yapılan diğer araştırmaların çoğunda kullanılan daha sofistike sensörler ve kontrol sistemlerinin, bu çalışmanın modelinden daha hassas sonuçlar verebileceği söylenebilir. Bu bağlamda, mevcut tasarımın ilerleyen aşamalarda daha yüksek hassasiyetli sensörler ve veri işleme sistemleriyle güçlendirilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Yapılan bu çalışma, düşük maliyetli ve erişilebilir sistemlerin geliştirilmesi açısından önemli bir katkı sağlamaktadır, ancak daha ileri düzeydeki uygulamalar için kapsamlı araştırmalara ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada geliştirilen düşük maliyetli yapay dolaşım döngüsünün verimli olduğu gözlemlenmiş olsada, sistemin daha ileri testlere ve optimizasyona ihtiyaç duyduğu açıktır. Gelecek araştırmacılar için, özellikle sensör doğruluğunu artırmaya yönelik çalışmalara ve farklı yapay damar modellerinin test edilmesine yönelik önerilerde bulunulabilir. Ayrıca, sistemin uzun vadede dayanıklılığını inceleyen araştırmalar yapılmalıdır. Uygulayıcılar içinse, bu düşük maliyetli modelin klinik öncesi testler ve eğitim alanlarında kullanılabileceği düşünülmektedir. Çalışmada çözülmeyen bazı sorunlar, özellikle sistemin gerçek zamanlı verilerle daha hassas analiz yapabilmesi ve daha dayanıklı malzemelerle test edilmesi konularında, gelecekteki araştırmalarla çözülebilir. Bu tür araştırmalar, yapay damar simülasyon sistemlerinin klinik uygulamalara entegrasyonu noktasında büyük bir adım olabilir.

KAYNAKÇA

- Cappon, F., Wu, T., Papaioannou, T., Du, X., Hsu, P. L., & Khir, A. W. (2021). Mock circulatory loops used for testing cardiac assist devices: A review of computational and experimental models. *International Journal of Artificial Organs*, 44(11). <https://doi.org/10.1177/03913988211045405>
- Choi, J., Lee, E. J., Jang, W. B., & Kwon, S. M. (2023). Development of biocompatible 3D-printed artificial blood vessels through multidimensional approaches. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/jfb14100497>
- Esmaeili, S., Shahali, M., Kordjamshidi, A., Torkpoor, Z., Namdari, F., Saber-Samandar, S., Nejad, M. G., & Khandan, A. (2019). An artificial blood vessel fabricated by 3D printing for pharmaceutical application. *Nanomedicine Journal*, 6(3). <https://doi.org/10.22038/nmj.2019.06.00005>
- Ferrari, G., Balasubramanian, P., Tubaldi, E., Giovannello, F., & Amabili, M. (2019). Experiments on dynamic behaviour of a Dacron aortic graft in a mock circulatory loop. *Journal of Biomechanics*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.01.053>
- Franchini, G., Giovannello, F., & Amabili, M. (2022). Viscoelasticity of human descending thoracic aorta in a mock circulatory loop. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105205>
- Glynn, J., Song, H., Hull, B., Withers, S., Gelow, J., Mudd, J., Starr, A., & Wampler, R. (2017). The OregonHeart total artificial heart: Design and performance on a mock circulatory loop. *Artificial Organs*, 41(10). <https://doi.org/10.1111/aor.12959>
- Hoch, E., Tovar, G. E. M., & Borchers, K. (2014). Bioprinting of artificial blood vessels: Current approaches towards a demanding goal. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 46(5). <https://doi.org/10.1093/ejcts/ezu242>
- Hu, K., Li, Y., Ke, Z., Yang, H., Lu, C., Li, Y., Guo, Y., & Wang, W. (2022). History, progress and future challenges of artificial blood vessels: A narrative review. *Biomaterials Translational*, 3(1). <https://doi.org/10.12336/biomatertransl.2022.01.008>
- Huang, P., Huang, Z., Dang, W., Wang, Y., & Xu, B. (2018). A review on mock circulatory systems for in vitro hemodynamic performance evaluation of ventricular assist devices. *Yiyong Shengwu Lixue/Journal of Medical Biomechanics*, 33(4). <https://doi.org/10.16156/j.1004-7220.2018.04.014>
- Malone, A., Gallagher, S., Saidi, J., Rizq, G., O'Dowd, E., Vallence, D., & Hameed, A. (2022). In vitro benchtop mock circulatory loop for heart failure with preserved ejection fraction emulation. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, 9. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.910120>
- Meskin, M., Starkey, P. A., Kaspersen, A. E., Ringgaard, S., Sand, S. G., Nygaard, J. V., Jensen, J. A., Traberg, M. S., & Johansen, P. (2024). Investigating the importance of left atrial compliance on fluid dynamics in a novel mock circulatory loop. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52327-6>

- Moore, M. J., Tan, R. P., Yang, N., Rnjak-Kovacina, J., & Wise, S. G. (2022). Bioengineering artificial blood vessels from natural materials. *Trends in Biotechnology*, 40(6). <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.11.003>
- Moyer, J. C., Chivukula, V. K., Taheri-Tehrani, P., Sandhu, S., Blaha, C., Fissell, W. H., & Roy, S. (2024). An arteriovenous mock circulatory loop and accompanying bond graph model for in vitro study of peripheral intravascular bioartificial organs. *Artificial Organs*, 48(4). <https://doi.org/10.1111/aor.14682>
- Mozaffarian, D., Benjamin, E. J., Go, A. S., Arnett, D. K., Blaha, M. J., Cushman, M., Das, S. R., de Ferranti, S., Després, J.-P., Fullerton, H. J., Howard, V. J., Huffman, M. D., Isasi, C. R., Jiménez, M. C., Judd, S. E., Kissela, B. M., Lichtman, J. H., Lisabeth, L. D., Liu, S., ... Turner, M. B. (2016). Executive summary: Heart disease and stroke statistics—2016 update. *Circulation*, 133(4), 447-454. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000366>
- Nemeno-Guanzon, J. G., Lee, S., Berg, J. R., Jo, Y. H., Yeo, J. E., Nam, B. M., Koh, Y. G., & Lee, J. I. (2012). Trends in tissue engineering for blood vessels. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/956345>
- Niklason, L. E., & Lawson, J. H. (2020). Bioengineered human blood vessels. *Science*, 370(6513). <https://doi.org/10.1126/science.aaw8682>
- Papaioannou, T. G., Manolesou, D., Dimakakos, E., Tsoucalas, G., Vavuranakis, M., & Tousoulis, D. (2019). 3D bioprinting methods and techniques: Applications on artificial blood vessel fabrication. *Acta Cardiologica Sinica*, 35(3), 284-289. [https://doi.org/10.6515/ACS.201905_35\(3\).20181115A](https://doi.org/10.6515/ACS.201905_35(3).20181115A)
- Spadaccio, C., Rainer, A., Barbato, R., Chello, M., & Meyns, B. (2013). The fate of large-diameter Dacron® vascular grafts in surgical practice: Are we really satisfied? *International Journal of Cardiology*, 168(5), 5028-5029. <https://doi.org/10.1016/J.IJCARD.2013.07.165>
- Timmis, A., Townsend, N., Gale, C. P., Torbica, A., Lettino, M., Petersen, S. E., Mossialos, E. A., Maggioni, A. P., Kazakiewicz, D., May, H. T., De Smedt, D., Flather, M., Zuhlke, L., Beltrame, J. F., Huculeci, R., Tavazzi, L., Hindricks, G., Bax, J., Casadei, B., ... Bardinet, I. (2020). European Society of Cardiology: Cardiovascular disease statistics 2019. *European Heart Journal*, 41(1), 12-85. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz859>
- Timms, D. L., Gregory, S. D., Greatrex, N. A., Percy, M. J., Fraser, J. F., & Steinseifer, U. (2011). A compact mock circulation loop for the in vitro testing of cardiovascular devices. *Artificial Organs*, 35(4), 384-391. <https://doi.org/10.1111/J.1525-1594.2010.01088.X>
- Townsend, N., Kazakiewicz, D., Lucy Wright, F., Timmis, A., Huculeci, R., Torbica, A., Gale, C. P., Achenbach, S., Weidinger, F., & Vardas, P. (2022). Epidemiology of cardiovascular disease in Europe. *Nature Reviews Cardiology*, 19(2). <https://doi.org/10.1038/s41569-021-00607-3>
- Tsao, C. W., Aday, A. W., Almarzooq, Z. I., Alonso, A., Beaton, A. Z., Bittencourt, M. S., Boehme, A. K., Buxton, A. E., Carson, A. P., Commodore-Mensah, Y., Elkind, M. S. V., Evenson, K. R., Eze-Nliam, C., Ferguson, J. F., Generoso, G., Ho, J. E., Kalani, R., Khan, S. S., Kissela, B. M., ... Martin, S. S. (2022). Heart disease and stroke statistics-

2022 update: A report from the American Heart Association. *Circulation*, 145(8).
<https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000001052>

- Wang, D., Xu, Y., Li, Q., & Turng, L.-S. (2020). Artificial small-diameter blood vessels: Materials, fabrication, surface modification, mechanical properties, and bioactive functionalities. *Journal of Materials Chemistry B*, 8(9), 1801-1822.
<https://doi.org/10.1039/C9TB01849B>
- Wang, D., Xu, Y., Lin, Y. J., Yilmaz, G., Zhang, J., Schmidt, G., Li, Q., Thomson, J. A., & Turng, L. S. (2020). Biologically functionalized expanded polytetrafluoroethylene blood vessel grafts. *Biomacromolecules*, 21(9), 3807-3816.
https://doi.org/10.1021/ACS.BIOMAC.0C00897/SUPPL_FILE/BM0C00897_SI_001
- Xu, K. W., Gao, Q., Wan, M., & Zhang, K. (2023). Mock circulatory loop applications for testing cardiovascular assist devices and in vitro studies. *Frontiers in Physiology*, 14.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1175919>



ÖZ GEÇMİŞ

Namık KARAKAŞOĞLU, ...'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini ...'nda, lise eğitimini ise ...'nde tamamladı. 2009 yılında Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Öğretmenliği bölümünü bitirdi. Daha sonra Bayburt Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun olduktan sonra, 2021 yılında aynı üniversitenin Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.

İş hayatına özel sektörde başladı ve farklı alanlarda mühendislik ve yönetim tecrübeleri edindi. 2021 ve 2025 yılları arasında Bayburt Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nde vekil öğretmen olarak görev yaptı.

