
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ÇOK SAYIDA ORİFİS İÇEREN RADYAL HAVALI YATAKLARIN DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Görkem AĞÖREN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Görkem AĞÖREN

07/07/2022

ÇOK SAYIDA ORİFİS İÇEREN RADYAL HAVALI YATAKLARIN DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Görkem AĞÖREN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2022

ÖZET

Aerostatik yataklar, hava sürtünmesinin oldukça düşük olmasından dolayı, yüksek hız gerektiren makinelerde, şaftların yataklanmasında tercih edilen makine elemanlarıdır. Yağlayıcı olarak havanın kullanıldığı aerostatik yataklar, düşük yük taşıma kapasitesi, düşük yatak katılığı, yüksek hava tüketimi ve zorlu imalatları yüzünden endüstriyel uygulamalarda yeterince yaygınlaşamamaktadır. Bu çalışmada aerostatik yatakların daha düşük hava tüketimi ile daha yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşması için çok orifisli bir model önerilmiştir. Ancak geleneksel üretim yöntemleri düşünüldüğünde orifis sayısının arttırmak kolay değildir. Bu yüzden yüksek lisans tezi kapsamında çok orifisli yatakların üretilmesi için eklemeli imalat yöntemleri kullanılmıştır. Böylece orifis sayısı arttırılarak basınç dağılımı homojenleştirilecek, yatak performansları iyileştirilecek ve eklemeli imalat yönteminin kolay üretim avantajından faydalanılarak aerostatik yatakların üretimleri de kolaylaştırılacaktır. Bu tez çalışması kapsamında çok orifisli aerostatik yatak tasarımı yapılmıştır. Aerostatik yataklar mikron mertebelerinde radyal boşluklarda çalıştıkları için üretim ve kürleme parametreleri incelenerek boyutsal doğruluk sağlanmıştır. Ayrıca yatakların şaft yüzeyine uyguladığı basınç dağılımını hesaplamak için MATLAB programında geliştirilen algoritmalar ile Reynold's denklemi çözdürülmüş ve yatak performansları incelenmiştir. Yatakların dinamik analizlerini incelemek için MATLAB programı üzerinden hareket denklemleri çözdürülmüş, zaman ve frekans tanım bölgelerinde yatakların analizleri yapılmıştır.

Bilim Kodu : 91422
Anahtar Kelimeler : Basınçlı hava yatakları, çoklu orifis, eklemeli imalat, SLA
Sayfa Adedi : 99
Danışman : Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF RADIAL AIR BEARINGS WITH MULTI ORIFICES

(M. Sc. Thesis)

Görkem AĞÖREN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2022

ABSTRACT

Aerostatic bearings are machine elements that are preferred for bearing shafts in machines that require high speed, due to the very low air friction. Aerostatic bearings, in which air is used as a lubricant, cannot be widely used in industrial applications due to their low load-carrying capacity, low bearing stiffness, high air consumption and demanding manufacturing. In this study, a multi-orifice model is proposed for aerostatic bearings to achieve higher load carrying capacity with lower air consumption. However, considering traditional production methods, it is not easy to increase the number of orifices. Therefore, additive manufacturing methods are used to produce multi-orifice bearings within the scope of the master's thesis. Thus, the pressure distribution will be homogenized by increasing the number of orifices, the bearing performances will be improved and the production of aerostatic bearings will be facilitated by taking advantage of the easy production of the additive manufacturing. Within the scope of this thesis, a multi-orifice aerostatic bearing design is made. Since the aerostatic bearings operate in radial clearances in the micron range, dimensional accuracy is ensured by examining the production and curing parameters. In addition, Reynold's equation is solved with the algorithms developed in the MATLAB program to calculate the pressure distribution applied by the bearings to the shaft surface and the bearing performances are examined. In order to examine the dynamic analysis of the bearings, the equations of motion are solved using the MATLAB program, and the analyses of the bearings are made in the time and frequency domains.

Science Code : 91422
Key Words : Externally pressurized air bearings, multi orifices, additive manufacturing, SLA
Page Number : 99
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY

TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlarken bütün akademik bilgilerini benimle paylaşan, büyük bir sabır ve özveri ile problemlerime çözüm üreten, her konuşması ile ufkumu genişleten değerli hocam Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY'a;

Tezi hazırlama sürecinde, her konuda yardımını benden esirgemeyen, engin tecrübeleri ile yolumu açan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahim DAL'a;

Her türlü konuda yardıma ihtiyacım olduğu her an yanımda olan arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. Fatih AKTAŞ'a, Arş. Gör. Emre Aşkın ELİBOL'a, Arş. Gör. Mahmut KOCAGİL'e, Arş. Gör. Güven Hasret YILMAZ'a;

Aynı laboratuvarı paylaştığım arkadaşlarım Arş. Gör. Mustafa Alper SARİİPEK'e, Arş. Gör. Mahmut Şamil KAYA'ya, Arş. Gör. Ahmet Çağrı ARICAN'a, Arş. Gör. Dr. Burcu KÜÇÜKOĞLU'na ve Gazi Üniversite Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma;

Bu tezde yaptığım çalışmaların yürütülmesi amacıyla proje desteği sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK-1002 "Çok Sayıda Orifis İçeren Radyal Havalı Yatakların Dinamik Karakteristiklerinin Sayısal Ve Deneysel İncelenmesi", Proje No: 121M695);

Her zor zamanımda yanımda olan çok kıymetli eczacı, hukukçu, iktisatçı ve mühendis arkadaşlarıma;

Her zaman sevgi, şefkat ve sabırla yanımda olan, annem Nezaket AĞÖREN'e ve babam Aydoğan AĞÖREN'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 7

2.1. Aerostatik Yatakların Tarihçesi 7

2.2. Farklı Kısıtlayıcılara Sahip Yataklar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar 10

3. MATEMATİKSEL MODELLEME 21

3.1. Giriş 21

3.2. Momentum Denklemleri 21

3.3. Akışkanlar İçin Gerilme-Gerinim İlişkisi 22

3.4. Navier-Strokes Denklemleri 24

3.5. Süreklilik Denklemleri 25

3.6. Reynolds Denklemi 26

3.7. Reynolds Denkleminin Boyutsuz Hali 30

3.8. Reynolds Denklemine Havanın Kütlesel Debisinin Eklenmesi 31

3.9. Aerostatik Hava Yatakları ile Desteklenmiş Yatak-Rotor Sisteminin Hareket Denklemleri 33

3.10. Reynolds Denkleminin Sayısal Çözümü 36

3.10.1. Başlangıç şartları 38

3.10.2. Sınır şartları 38

Sayfa

3.11. Hareket Denklemlerinin Çözümü 39
4. DENEYSEL ÇALIŞMA..... 41
4.1. Aerostatik Yatak Tasarımı 41
4.2. Yatak Muhafazası Tasarımı 43
4.3. Sensör Tutucu Tasarımı 44
4.4. Eksenel Yatak ve Türbinli Şaft ile Birlikte Deney Düzeneği 45
4.5. Farklı Tip Yatak Geometrilerinin Belirlenmesi 48
5. İMALAT YÖNTEMİ VE PARAMETLERİNİN BELİRLENMESİ..... 51
5.1. İmalat Yöntemi Belirlenmesi 51
5.2. Reçine Tipinin Belirlenmesi 52
5.3. Baskı Yönünün Belirlenmesi 52
5.4. Boyut Doğruluğunun Tutturulması 54
5.5. Hatalı Üretilen Parçalar ve Hata nedenleri..... 55
6. BULGULAR, YORUMLAR VE TARTIŞMA 59
6.1. Basınç Dağılımının Hesaplanması 59
6.1.1. Eksantriklik oranının basınç dağılımına etkisi..... 62
6.1.2. Radyal boşluğun basınç dağılımına etkisi..... 63
6.1.3. Besleme basıncının basınç dağılımına etkisi 64
6.2. Yatak Yük Taşıma Kapasitesi ve Yatak Katılığının Hesaplanması..... 66
6.2.1. Eksantriklik oranının yük taşıma kapasitesi ve yatak katılığına etkisi 66
6.2.2. Radyal boşluğun yük taşıma kapasitesi ve yatak katılığına etkileri..... 68
6.2.3. Besleme basıncının yük taşıma kapasitesi ve yatak katılığına etkisi 69
6.3. Yatak-Şaft Sistemlerinin Dinamik Davranışı..... 71
6.3.1. Zaman tanım bölgesi analizleri 71
6.3.2. Frekans tanım bölgesi analizleri 75
6.4. Deneysel Debi Sonuçları..... 80

Sayfa

6.5. Deneysel Pnömatik Çekiç Kararsızlığı Sonuçları 80

6.6. Deneysel Yavaşlama Testi Sonuçları 82

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 85

KAYNAKLAR 89

EK-1. Hareket denklemi çözüm algoritması 98

ÖZGEÇMİŞ ..... **Error! Bookmark not defined.**

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 1.1. Farklı kısıtlayıcı tipleri ve özellikleri 2

Çizelge 4.1. Havanın termodinamik özellikleri ve çalışma koşulları 48

Çizelge 4.2. Farklı modeller için geometrik özellikler 49

Çizelge 5.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları 51

Çizelge 5.2. Reçine özellikleri 52

Çizelge 5.3. Kürleme öncesi ölçümler 55

Çizelge 5.4. Kürleme sonrası ölçümler 55

Çizelge 6.1. Simülasyon çalışma parametreleri 71

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Aerostatik yatakların şematik gösterimi 1

Şekil 1.2. Kısıtlayıcı tipleri ve basınç dağılımları..... 3

Şekil 1.3. Çok orifisli aerostatik yatak..... 4

Şekil 2.1. Scopus taramasına göre hava yatakları ile ilgili çalışmaları..... 9

Şekil 3.1. Birim küp üzerindeki gerilmeler ve yönleri..... 21

Şekil 3.2. Silindirik eksen takımı..... 30

Şekil 3.3. Yatak Üzerindeki hava besleme deliği 32

Şekil 3.4. Boşaltma katsayısı değişimi 32

Şekil 3.5. BHY ile desteklenmiş yatak-şaft sistemi..... 34

Şekil 3.6. Aerostatik yatak rotor sistemi ve yatak kuvvetleri 35

Şekil 3.7. Şaftın hareket eksenleri..... 35

Şekil 3.8. Şaftın dönme eksen takımları 36

Şekil 3.9. Grid görünümü..... 38

Şekil 4.1. Çok orifisli aerostatik yatak..... 41

Şekil 4.2. a) 4 orifisli aerostatik yatak bağlantısı b) 64 orifisli aerostatik yatak bağlantısı..... 42

Şekil 4.3. Yatak muhafazası tasarımı..... 43

Şekil 4.4. Yatak muhafazası ve aerostatik yatak..... 44

Şekil 4.5. Sensör tutucu 45

Şekil 4.6. Üzerinde türbin bulunan şaft 46

Şekil 4.7. Türbin muhafazası 46

Şekil 4.8. Deney düzeneği katı modeli 47

Şekil 4.9. Deney düzeneği pnömatik hat bağlantısı..... 48

Şekil 4.10. Tüm modeller için orifis yerleşimi 50

Şekil 5.1. Farklı reçineler ile üretilen aerostatik yataklar a) Reçine tip 1 b) Reçine tip 2. 53

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.2. Farklı baskı yönleri ile üretim a) minimum temas b) maksimum temas 53

Şekil 5.3. Örnek parça a) Kürlenmemiş b) Kürlenmiş (Üst:-x Ekseni, Orta: -y Ekseni Alt:-z Ekseni) 54

Şekil 5.4. Hatalı üretilen parçalar a) Maksimum baskı yüzeyi teması b) Minimum baskı yüzeyi teması 56

Şekil 5.5. 45° açı ile üretilmiş parça (İç orifisler kapalı) 56

Şekil 5.6. FEP filmi deformasyonu sonucu oluşan hata 57

Şekil 5.7. Katmanın ultraviyole ışığa maruz kalma süresi hatası 57

Şekil 5.8. Aşırı kürleme sonucu oluşmuş yanmalar 58

Şekil 6.1. Basınç dağılımları a) BHY04 b) BHY08 c) BHY16 3 d) BHY32 e) BHY64 60

Şekil 6.2. 32 orifisli modelin farklı hatlarının basınç dağılımı 60

Şekil 6.3. 64 orifisli modelin farklı hatlarının basınç dağılımı 61

Şekil 6.4. Eksenel doğrultu boyunca basınç dağılımı 61

Şekil 6.5. 64 orifisli BHY64'ün farklı eksantrisite oranları için basınç dağılımı a) ε_x =0, ε_y=0 b) ε_x=0.25, ε_y=0 c) ε_x =0, ε_y=0.25 d) ε_x =0.25, ε_y=0.25 62

Şekil 6.6. 64 orifisli model için basınç dağılımı a) Farklı eksantrisite oranları için b) Farklı orifis hatlarındaki basınç dağılımı (ε=0.6) 63

Şekil 6.7. Radyal boşluğun basınç dağılımına etkisi (BHY64) 64

Şekil 6.8. Besleme basıncına göre basınç dağılımı değişimi a) BHY04 b) BHY08 c) BHY16 d) BHY32 e) BHY64 65

Şekil 6.9. Yük taşıma kapasitesinin eksantriklik oranı ile değişimi 67

Şekil 6.10. Yatak katılığının eksantriklik oranı ile değişimi 67

Şekil 6.11. Radyal boşluğun yük taşıma kapasitesine etkisi 68

Şekil 6.12. Radyal boşluğun yatak katılığına etkisi 69

Şekil 6.13. Besleme basıncının yük taşıma kapasitesine etkisi 70

Şekil 6.14. Besleme basıncının yata katılığına etkisi 70

Şekil 6.15. 4 orifisli yatağın (BHY04) zaman tanım bölgesi salınımları (w = 1000 rad/s) 72

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.16. 64 orifisli yatağın (BHY64) zaman tanım bölgesi salınımları (w = 1000 rad/s) 73

Şekil 6.17. Tüm yataklar için orbit eğrileri 74

Şekil 6.18. 4 orifisli modelin zirve-zirve genlikleri 74

Şekil 6.19. 64 orifisli modelin zirve-zirve genlikleri 75

Şekil 6.20. 4 orifisli yatak için x ekseni waterfall diyagramı 77

Şekil 6.21. 4 orifisli yatak için y ekseni waterfall diyagramı 77

Şekil 6.22. 32 orifisli yatak için x ekseni waterfall diyagramı 78

Şekil 6.23. 32 orifisli yatak için y ekseni waterfall diyagramı 78

Şekil 6.24. 64 orifisli yatak için x ekseni waterfall diyagramı 79

Şekil 6.25. 64 orifisli yatak için y ekseni waterfall diyagramı 79

Şekil 6.26. Debi ölçüm sonuçları a) BHY04 b)BHY64 80

Şekil 6.27. x ekseni darbe testi sonucu (BHY64) 81

Şekil 6.28. z ekseni darbe testi sonucu (BHY64) 81

Şekil 6.29. Yavaşlama testi, zaman grafiği (BHY64) 82

Şekil 6.30. Yavaşlama testi, zirve-zirve genlikleri (BHY64) 83

Şekil 6.31. Yavaşlama testi, frekans tanım bölgesi (BHY64) 84

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a	Sol yatak merkezi ve şaft merkezi uzaklık, m
A_d	Orifis kesit alanı, m^2
b	Sağ yatak merkezi ve şaft merkezi uzaklık, m
B	Ayrık matris
c	Radyal boşluk, m
c_x, c_y	Sönüm katsayısı
c_d	Boşaltma katsayısı
d_0	Orifis çapı, m
d_x, d_y, d_z	x, y ve z ekseninde diferansiyel uzaklık, m
D	Yatak çapı, m
e	Yatak ve şaft arası mesafe, m
e_{ij}	Gerinim oranı
g	Yer çekimi ivmesi, m/s^2
F_b	Yer çekimi kuvveti, N
F_s	Yüzey gerilmeleri kuvveti, N
G	Rotor ağırlık merkezi
h(θ, ξ)	Hava filmi kalınlığı fonksiyonu, m
H(θ, ξ)	Boyutsuz hava filmi fonksiyonu (h/c)
I	Kütle atalet momenti
L	Yatak boyu, m
m	Şaft kütlesi, kg
$\dot{m}$	Kütlesel debi, kg/s
$\dot{M}$	Boyutsuz kütlesel debi
n	Zaman adımı
N	Grid sayısı
O	Yatak merkezi
O'	Şaft merkezi

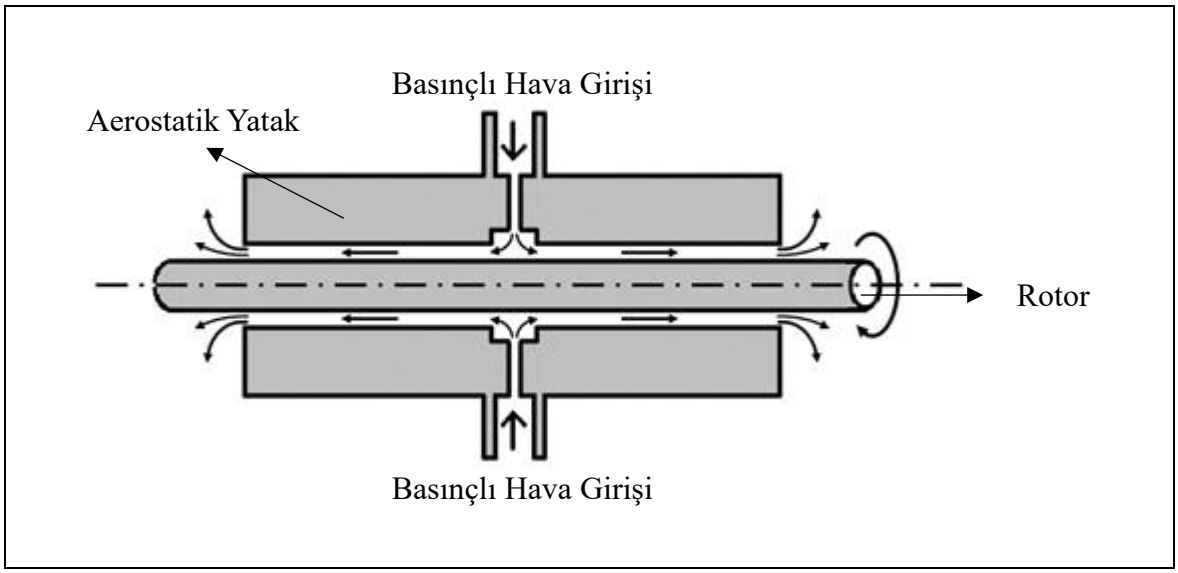
Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{p}$	Radyal boşluk basıncı, Pa
$\mathbf{p_a}$	Atmosfer basıncı, Pa
$\mathbf{p_d}$	Besleme deliği çıkış basıncı, Pa
$\mathbf{p_s}$	Besleme basıncı, Pa
$\mathbf{P}$	Boyutsuz basınç
$\mathbf{r}$	Basınç oranı
$\mathbf{r_p}$	Kritik basınç oranı
$\mathbf{R}$	Yatak yarıçapı, m
$\mathbf{R_0}$	Evrensel gaz sabiti, J/kg °K
$\mathbf{R_a}$	Yüzey pürüzlülüğü ortalaması
$\mathbf{R_t}$	Yüzey pürüzlülüğü profili en yüksek ve en düşük nokta arası fark
$\mathbf{Q}$	Hacimsel debi, m^3/s
$\mathbf{T^0}$	Mutlak sıcaklık, K
$\mathbf{t}$	Zaman, s
$\mathbf{u, v, w}$	Akışkan parçacığın hızları, m/s
$\mathbf{W_{xL}, W_{yL}}$	Sol yatak x ve y ekseni hava film kuvveti
$\mathbf{W_{xR}, W_{yR}}$	Sağ yatak x ve y ekseni hava film kuvveti
$\boldsymbol{\alpha}$	İterasyon kriteri
$\boldsymbol{\Gamma_s}$	Besleme parametresi
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Eksantriklik oranı (e/c)
$\boldsymbol{\delta}$	Akışkan parçacığındaki deformasyon
$\boldsymbol{\delta_{ij}}$	Kronecker deltası
ζ	Boyutsuz silindirik koordinat ekseni
$\boldsymbol{\eta}$	Akışkan viskozitesi
$\boldsymbol{\kappa}$	Havanın ısı kapasitesi
$\boldsymbol{\lambda}$	İkinci viskozite sabiti
$\boldsymbol{\mu}$	Dinamik viskozite, Pa.s
$\boldsymbol{\rho}$	Yoğunluk, kg/m^3
$\boldsymbol{\sigma}$	Normal gerilim, Pa
$\boldsymbol{\tau}$	Kesme gerilmesi, Pa
$\boldsymbol{\Phi(P)}$	Besleme deliği fonksiyonu
$\boldsymbol{\phi}$	Akış distilasyonu

Simgeler	Açıklamalar
ψ	Şaftın y ekseni etrafındaki açısal koordinat ekseni
ω	Şaftın açısal hızı**,** rad/s

Kısaltmalar	Açıklamalar
BHY	Basınçlı hava yatakları
c.s	Kontrol yüzeyi
c.v	Kontrol hacmi
CFD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
DD&SF	Diferansiyel dönüşüm & Sonlu farklar
FDM	Eriyik yığma modellemesi (Fused Deposition Modelling)
PLA	Polilaktik asit
SLA	Stereolitografi

1. GİRİŞ

Aerostatik hava yatakları, yatak ile rotor arasına dışardan basınçlandırılmış havanın iletilmesi ile çalışan makine elemanlarıdır. Dış ortamdan gelen hava, yatak üzerinde bulunan farklı kısıtlayıcılar vasıtası ile şekil 1.1'deki gibi yatak ile rotor arasına iletilir. Yatak ile şaft arasında mikron mertebelerinde (10-50μm) boşluğa iletilen hava, rotoru dengede tutarak dönme hareketi esnasında yatak ve rotorun temas etmesini önler. Yatak ve rotor birbirine temas etmeden çalıştığı için rotorun dönme hareketi esnasında sürtünme kuvvetleri oldukça düşüktür. Hidrodinamik ve hidrostatik yataklarda yağlayıcı olarak sıvı yağlayıcılar kullanıldığı ve sıvı yağlayıcıların dinamik viskozitesinin 10^{-1} Pa.s mertebelerinde olduğu düşünülürse, 10^{-5} Pa.s mertebelerinde viskozitesi olan hava kullanılan aerostatik yataklarda sürtünme kuvveti sıvı yağlayıcılara göre de çok düşüktür.



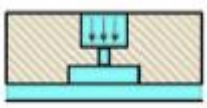
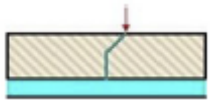
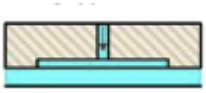
Şekil 1.1. Aerostatik yatakların şematik gösterimi

Aerostatik hava yataklarında sürtünme kuvvetleri çok düşük olduğundan kullanılan şaftların çok daha yüksek hızlara ulaşması mümkündür. Başka bir deyişle yüksek hızlı dönen şaftların yataklanmasında aerostatik yatak kullanılması daha az enerji ile daha yüksek hızlarda şaftın dönmesini sağlayacağı için daha uygun olacaktır. Dolayısıyla aerostatik yataklar türbinler ve güç çevrim makinaları gibi yüksek hızda dönen şaftların yataklanmasında sıkça kullanılmaktadır.

Aerostatik yataklarda şaftın dönme hızı yüksek olmasına rağmen, havanın şafta uyguladığı basınç sıvı yağlayıcılara göre daha düşük olduğu için yatakların yük taşıma kapasiteleri daha düşüktür. Yatak yük taşıma kapasitelerini artırmak için havanın yatağa uyguladığı basınç arttırılabilir, dolayısıyla hava debisinin artması gerekmektedir. Aerostatik yataklarda hava dışardan yatak içerisine beslendiği için hava debisini artırmak aynı zamanda enerji tüketimini artırmak demektir.

Yük taşıma kapasitesini artırmanın diğer bir yolu da şaft yüzeyine etkiyen basınç dağılımını homojenleştirmektir. Şaft yüzeyinde daha homojen bir basınç dağılımı olduğunda şaftın herhangi bir yük altındayken hareketleri daha az olacaktır. Bu da şaftın daha kararlı olması demektir. Böylece yataklar daha yüksek yük taşıma kapasitelerine ulaşacaktır. Bunun için aerostatik yataklarda çizelge 1.1'de görüldüğü gibi farklı tip kısıtlayıcılar kullanılmaktadır.

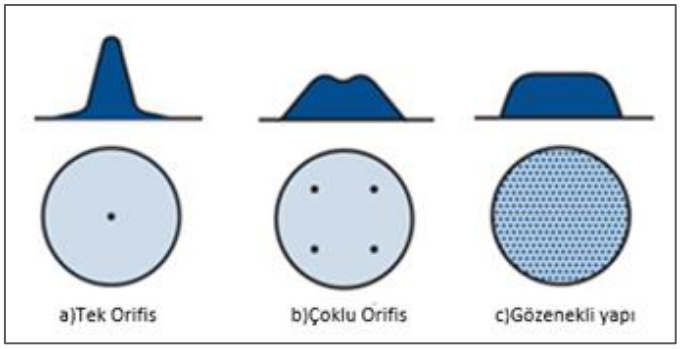
Çizelge 1.1. Farklı kısıtlayıcı tipleri ve özellikleri

Kısıtlayıcı Tipi	Yük Kapasitesi	Yatak Katılığı	Hava Tüketimi	Üretimi
Basit Orifis 	Düşük	Düşük	Az	Kolay
Slot Kısıtlayıcı 	Orta	Orta	Yüksek	Orta
Oluk Kısıtlayıcı 	Yüksek	Yüksek	Orta	Zor
Gözenekli Kısıtlayıcı 	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Zor

Çizelge 1.1'de görüldüğü gibi yüksek yük taşıma kapasitesi ve yatak katılığı oluşturan kısıtlayıcıların hava tüketimi de yüksek olmaktadır. Hava tüketiminin yüksek olması kullanılan aerostatik yatakların daha fazla enerji tüketmesine neden olmaktadır. Son yıllarda dünya çapında enerji krizlerinin yaşanması ve ileriki yıllarda daha büyük enerji krizlerinin

beklenmesi, enerji tüketimi yüksek olan parçaların kullanımını düşürmektedir. Bu yüzden aerostatik yatakların kullanımı yaygınlaşamamaktadır.

Basit yapıda orifis kısıtlayıcıları kullanılan aerostatik yataklarda ise yük taşıma kapasitesi ve yatak katılığı düşük olmasına rağmen hava tüketimi de düşüktür. Ancak aerostatik yatakların üzerinde bulunan orifis sayıları arttırılarak şaft yüzeyine etkiyen basınç homojen hale getirilip, aynı hava tüketimi ile yatakların yük taşıma kapasiteleri arttırılabilir. Şekil 1.2'de orifis sayısının artması ile şaft yüzeyine etkiyen basınç dağılımının homojenleştiği şematik olarak gösterilmiştir. Şaft yüzeyindeki basıncın daha homojen dağılması rotorun dönme hareketi esnasında merkezden kaçıklıklarını engelleyeceğinden yatakların yük taşıma kapasiteleri daha yüksek olacaktır.

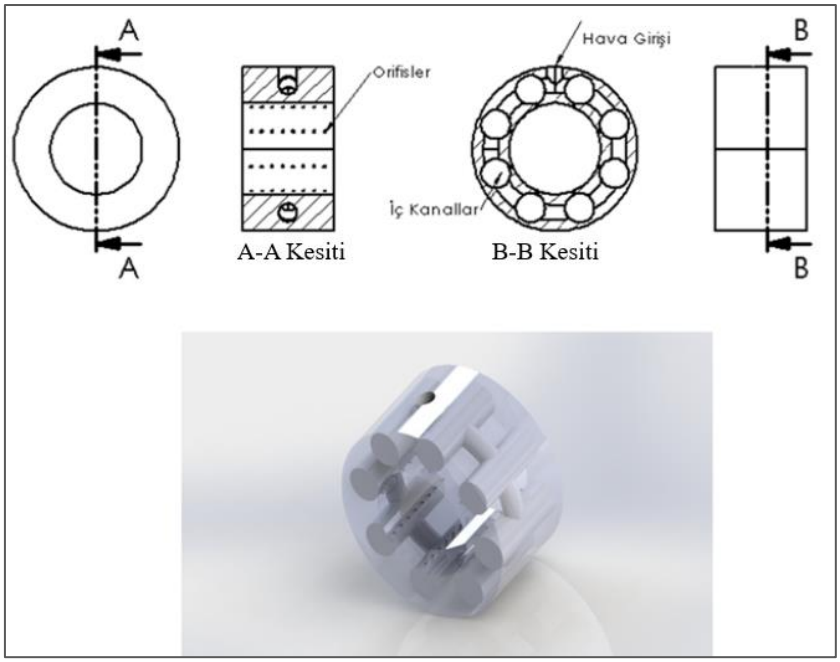


Şekil 1.2. Kısıtlayıcı tipleri ve basınç dağılımları

Aerostatik hava yatakları kullanılan yatak-rotor sistemlerinin kararlılığı basınç dağılımının homojenliğine bağlıdır. Basınç dağılımı ne kadar homojen olursa yük taşıma kapasitesi de o kadar yüksek olacaktır. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi basınç dağılımının en homojen olduğu kısıtlayıcı tipi gözenekli yapıdır. Ancak gözenekli kısıtlayıcıların üretim ve maliyetlerinin yüksek olması ve gözenekli kısıtlayıcılarda hava iletim yolunun karmaşıklığının kendine has problemlerinden dolayı sistem dinamiğinin anlaşılamaması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bu nedenle genellikle aerostatik yataklarda kısıtlayıcı olarak orifis kullanılır. Şekil 1.2a'da görüldüğü gibi tek bir orifis olması durumunda orifis karşısındaki şaft yüzeyi basıncı en yüksek olurken, orifis çevresinden başlayarak yatak dışına doğru hızla atmosfer basıncına yaklaşmaktadır. Bu durum yatak-rotor sisteminin kararlılığını oldukça etkiler. Bunun için yapılan çalışmalarda genellikle orifis sayısı artırılmaya çalışılmıştır. Şekil 1.2b'de görüldüğü gibi orifis sayısı arttıkça şaft yüzeyindeki basınç dağılımı homojenleşir. Ancak konvansiyonel imalat yöntemleri ile (talaşlı imalat) üretilen aerostatik yataklarda

orifis sayısını belirli bir sayının üstüne çıkarmak mümkün olmamaktadır. Her bir orifis için yatak dışından şaftın çalıştığı iç yüzeye kadar delik açılacağından ve bu deliklerin de her birine pnömatik bağlantı ile hava verileceğinden orifis sayısı yatak çevresinin yüzeyi ile kısıtlı kalmaktadır. Yatak yan yüzeylerinden delinecek delikler ile ortak besleme hatları oluşturmak da mümkün olmakla birlikte, bu durumda da yatağın tasarımı ve üretim süreçleri karmaşıklaşmakta, deliklerin körlenmesi için yapılan işleme bağlı olarak sızdırmazlık problemleri yaşanabilmektedir.

Bu yüksek lisans çalışmasında aerostatik yatağını çok sayıda orifis ile beslenmesi için Şekil 1.3'de gösterilen aerostatik hava yatağı tasarlanmıştır. Bu yatakta 64 adet küçük çaplı orifis (mikro yapıda), yatak çevresi ve boyu etrafında homojen olarak dağıtılmıştır. Yatağın tek bir basınçlı hava girişi bulunmaktadır. Yukarıda açıklandığı üzere yatak yüzeyine hem çevresel hem de eksenel olarak homojen dağıtılmış orifisler sayesinde bütün yatak yüzeyinde daha homojen bir basınç dağılımı oluşacağı değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, hava giriş deliğinin tek olması da pnömatik bağlantı ve sızdırmazlık problemleri için büyük kolaylık sağlayacaktır.



Şekil 1.3. Çok orifisli aerostatik yatak

Bu yüksek lisans çalışması kapsamında üretilecek olan 4-8-16-32 ve 64 orifisli aerostatik yatakların konvansiyonel yöntemlerle üretilmesi zor olacağı için eklemeli imalat yöntemlerinden biri ile üretilmesi düşünülmüştür. Aerostatik yataklarda yüzey

pürüzlülüğünün önemi düşünüldüğünde, en yüksek yüzey kalitesine sahip ürünler üretilebilen Stereolitografi (SLA) yöntemi ile üretim yapmak en uygunu olacaktır.

SLA yönteminde parçalar, fotopolimer sıvı reçinenin ultraviyole ışık ile kürlenmesi sonucunda üretildiğinden ve parçalar üretimden sonra dahi güneş ışıklarına maruz kaldığından parçaların boyutlarında çekmeler meydana gelmektedir. Aerostatik yatakların mikrometre mertebelerinde radyal boşluklarda çalıştığı düşünüldüğünde bu çekmeler yatak-rotor sisteminin çalışmasını ciddi şekilde engelleyecektir.

Bu yüksek lisans çalışmasında SLA yöntemi ile üretilecek aerostatik yatakların boyutlarının tutturulmasında üretim parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Üretilen yatakların yük taşıma kapasiteleri, yatak katılıkları ve yatak rotor sisteminin dinamik davranışları teorik olarak incelenmiş ve farklı orifis sayısına sahip yataklar için karşılaştırmalar yapılmıştır. SLA yöntemi ile boyutları tam olarak üretilen polimer aerostatik yatakların deney düzeneğine entegre edilmesi için deney düzeneği üzerinde değişikler yapılmış ve tam boyutlarda üretilen aerostatik yatakların farklı geometrik parametreleri deney düzeneği üzerinde incelenerek teorik veriler ile karşılaştırılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Hareket eden cihazların tasarımında ve yapımında en önemli hususlardan biri her zaman için mekanik sürtünme olmuştur. İnsanlık tarihinin gelişimi ile birlikte kullanılan cihazlarda mekanik sürtünmeyi azaltmak için çokça çalışma yapılmıştır. Sürtünmeyi azaltmaya yönelik ilkel çabalara iki örnek, aslında makaralı rulman olan tekerleğin kullanımı ve Mısırlıların devasa taş bloklarını yerlerine kaydırmak için yağlayıcı olarak zeytinyağı kullanması gösterilebilir [1]. Günümüzde birçok uygulamada tonlarca ağırlıktaki sistemlerin yataklanmasında da sıvı yağlayıcılar ile çalışan yataklar kullanılmaktadır. Sıvı yağlayıcıların sürtünme katsayıları geleneksel makaralı yataklara göre çok düşük olmasına rağmen yüksek hızlarda dönen şaftların kullanıldığı uygulamalarda hala çok yüksek olmaktadır. Sürtünme katsayısını daha da azaltmak ve yatakları aşırı sıcaklıklarda kirlenmeden işlevsel hale getirmek için gaz yağlayıcılar kullanılmaktadır.

Gaz yağlamalı yataklar, aerostatik (dışardan basınçlandırılmış) yataklar ve aerodinamik (kendinden hareketli) yataklar olarak sınıflandırılabilir. Aerostatik yataklar, yük taşıma kapasitelerini yatak yüzeylerinin bağıl hareketinin neden olduğu viskoz hareket yoluyla elde eden aerodinamik yatakların aksine, yük destekleyici gaz filmi basınç dağılımını kompresör tarzında harici bir sıkıştırılmış gaz kaynağından alır.

2.1. Aerostatik Yatakların Tarihçesi

Tribolojinin gelişimi, blokların gresle yağlanmasından hava yağlamalı jiroskoplara doğru ilerlemiştir ve bu gelişmeye başlıca katkı Leonardo da Vinci, Newton, Amantons, Euler, Coulomb, Stokes, Reynolds ve Rayleigh gibi isimlerden gelmiştir [2]. Sanayi devrimine kadar hareketli parçalara sahip makinalar yaygın olarak kullanılmadığı için yataklama elemanlarına verilen önem de çok az olmuştur. Sanayi devrimi ile birlikte yüksek hızlarda dönen makinaların kullanımıyla rulmanlarda yaşanan gelişmeler artmaya başlamıştır.

Gustave Hirn, havayı yağlayıcı olarak kabul eden, akışkan yataklar üzerinde deneyler yapan ve yatakların yağlanmasının (yani yatak sürtünmesinin), yağlama maddesinin viskozitesinin ve şaftın hızının bir işlevi olduğunu fark ederek sıvı yağlayıcılar yerine gazların da kullanılabileceğini söyleyen ilk kişi olarak bilinmektedir [3]. Ancak hava yağlama teknolojisinin ortaya çıkışı için Hirn'den 26 yıl önce, Willis tarafından yapılan paralel iki

plaka yüzeyi arasındaki hava akımının deneysel olarak incelendiği çalışmalar gösterilmektedir [4]. Ortam olarak havanın kullanıldığı bu çalışmada, çeşitli disk çapları için ölçülen brüt itme ve çekme kuvvetlerinin yanı sıra, plakalar arasındaki basınç alanının ayrıntıları da araştırılmış ve rapor edilmiştir.

Nikolay Petroff, Hirn'in deneysel sonuçlarını ve sonuçlarını analiz ettikten sonra, sürtünme ölçümlerinin hidrodinamik teori ile ilişkilendirilmesi gerektiği sonucuna varmıştır [5–7]. Bundan önce, yaygın olarak, yatak sürtünmesinin birbirine geçen iki yüzeyden kaynaklandığına ve bu nedenle temel olarak yatak malzemelerinin bir fonksiyonu olduğuna inanılıyordu. Kimyasal denge konusundaki çalışmalarıyla daha iyi tanınan Margules [8], bundan hemen önce, iki eş eksenli silindir arasındaki sürtünmeyi belirlemek için bir hidrodinamik teori geliştirmişti [9]. Petroff, Margules'in Hirn'in hidrodinamik yatağındaki sürtünmeyi açıklamaya yönelik çalışmalarını ilerletti, ancak yine de sıvı-katı ara yüzeyinde bir dereceye kadar kaymayı belirleyememiştir. Belirleyemediği bu kaymayı Coutte, 1890 yılında yaptığı çalışma ile belirlemiştir. Couette'in belirlediği bu terim 'Couette Akışı' olarak literatüre geçmiştir [10].

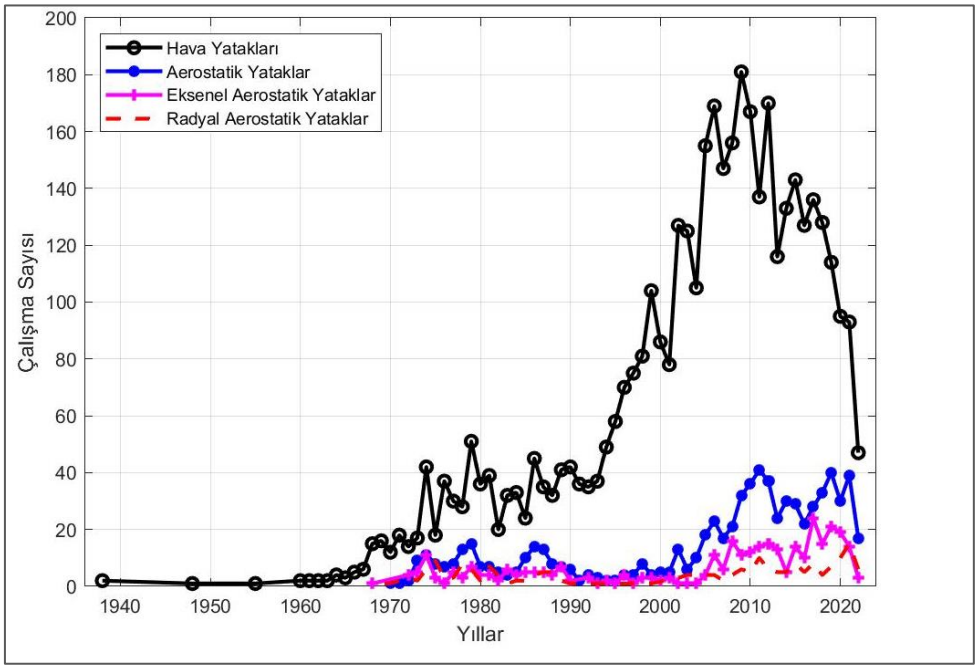
J. Stefan, alkol, su ve hava gibi sıvıların viskozitesini belirlemek için bir deney düzeneği tasarlayarak, kullandığı maddelerin viskozitelerini belirleyerek sıvı film akışını ilk düşünen kişi olmuştur [11]. İki cam diskin belirli bir kuvvet altında belirli bir mesafeye ayrılması için gereken süreyi kaydederek kullandığı sıvıların viskozitesini belirlemeye çalışmıştır. Bir gaz filmi ile ayrılmış paralel disklerin göreli eksenel hareketi ele aldığından, sıkma filmi (squeeze fim) ile ilgili yapılmış ilk deneysel ve analitik çözüm olarak görülebilir.

Rayleigh ve Froude'un eski bir laboratuvar asistanı olan Tower, sıvı yağlayıcılar ile yağlanan bir radyal yatakta çok yüksek yerel basınçların meydana geldiğini gösterdiği çalışmasında oldukça basit bir şekilde doğrudan sürtünme ölçümleri yaptığından hidrodinamik yatakların incelenmesi farklı bir boyut kazanmıştır [12 - 13].

Osborne Reynolds, Tower'ın sonuçlarını kullanarak oluşturduğu teorik çalışmayı geliştirerek yağlama teorisinin temel denklemi olan Reynolds denklemini türeterek yağlama teorisini gelişimine çok büyük katkıda bulunmuştur [14]. Aynı makalede Reynolds, kaymazlık (no-slip) koşulunu da ortaya koymuş, Stefan'ın yukarıda bahsedilen çalışmasının eliptik bir örneğini ve sürgülü (slider), radyal ve diğer yatak türlerinin özelliklerini analiz

etmiştir. Sonrasında ise Albert Kingsbury (1897) , hava ile yağlanan radyal yataklar ve döner balatalı baskı yatakları ile yağlama teknolojisinde 20 yıllık bir faaliyet sonucunda Reynolds denklemini Bessel fonksiyonlarında değişkenlerin ayrılması tekniği ile çözen ilk kişi olmuştur [15-16]. Lord Rayleigh, kaymalı yatağın yük taşıma şeklini optimize etmek için varyasyon hesabını kullanarak dışarıdan basınçlandırılmış dairesel baskı yatağının akış özelliklerini analiz etmiştir. Dairesel hidrostatik yatakların viskoz ağırlıklı kararlı durum çalışması hakkındaki bu kısa makale, basınç dağılımının türetilmesini, film kalınlığı-yük-kütle akış hızı ilişkisini içermektedir [17-18].

Harrison'un, 1913'te hava ile yağlanan eksenel ve radyal yataklar üzerine klasik bir makale yazmasına rağmen [19], bu 20 yıllık dönemin en önemli iki yağlama makalesi, Reynolds'un bazı çalışmalarını düzelten ve sağlam temeller atan Sommerfold (1904) tarafından yazılmıştır [20]. Diğeri ise yağlama teorisi ve itme bloğu üzerine Michell (1905) tarafından yazılmış bir başka makaledir [21]. Sonraki otuz yıl boyunca (1917'den 1947'ye kadar), yağlama alanı, özellikle dairesel hidrostatik yataklar için çok az ilerlemiştir. Fuller'in çoğunlukla Reynolds, Rayleigh ve diğerleri tarafından yapılan çalışmaların bir derlemesi olan hidrostatik yağlama üzerine 1947 serisi makaleleri [22], bugün devam eden gaz yağlama konusunda yeni araştırma faaliyetlerinin başlangıcını işaret etmiştir.



Şekil 2.1. Scopus taramasına göre hava yatakları ile ilgili çalışmaları

1939-1945 yılları arasında yaşanan 2. Dünya Savaşı sonrasında yüksek hızlı dönen şaftların kullanımı iyice arttığından hava yataklarına olan ihtiyaç da gün geçtikçe artmıştır. Şekil 2.1'de yıllara göre hava yatakları ile ilgili yapılan çalışmalar gösterilmektedir. Buradaki grafik farklı anahtar kelimeler ile Scopus araması yapılarak yıllara göre yayınlanan makale sayılarının alınması sonucunda oluşturulmuştur [23]. Bu şekilde de görüldüğü gibi 2. Dünya Savaşı sonrası hava yatakları ve aerostatik yataklar ile ilgili çalışmalar artmıştır. Ancak Reynolds denkleminin karmaşık teorisi ve çözüm yöntemlerinin yetersizliği nedeniyle kısıtlı bir artış yaşanmıştır. 21. Yüzyıla gelindiğinde ise bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ve hızlı işlem yapılabilmesi sayesinde Reynolds denkleminin çözümü kolaylaştığı için 2000'li yıllardan sonra hava yatakları ile ilgili yapılan çalışma sayısı çok daha fazla olmuştur. 2020 yılının başlarında dünya çapında yaşanan pandemi sonucunda çalışmalarda azalma görülmesine rağmen, enerji ihtiyacının artması ve enerji krizlerinin gündeme gelmesi sonucunda yüksek hızlı şaftların yataklanmasında kullanılacak olan aerostatik yataklar çok daha yaygın olarak kullanılacaktır.

2.2. Farklı Kısıtlayıcılara Sahip Yataklar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Dışardan basınçlandırılmış hava yataklarında (Aerostatik yataklarda), hava kaynağından çekilen havanın hızlı bir şekilde tükenmesi ve yatakların yük taşıma kapasitelerinin sıvı yağlayıcılı yataklara göre daha düşük olması nedeniyle günümüzde yapılan çalışmalar genellikle bu dezavantajları iyileştirmek üzerine olmuştur.

Powell'ın 1970 yılında bu kapsamda hidrostatik, hidrodinamik, aerostatik ve bilyalı rulmanları kıyaslayarak aerostatik yatakların avantajlarını ve kısıtlamalarını belirtmiştir. Yatakların yük taşıma kapasitesi, radyal sertlik, güç tüketimleri, eksenel tanımlarını ve aşınma özelliklerini inceleyerek yaptığı bu çalışma rulman seçiminde kılavuz sağlamak amacı ile yapılmasına rağmen aerostatik yatakların eksiklerini en detaylı inceleyen çalışma olduğundan daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalara öncü olmuştur [24].

Majumdar 1975 yılında gaz yataklarında orifis kısıtlayıcı yerine gözenekli yapı kullanarak şaft üzerine etkiyen basınç dağılımını daha homojen hale getirerek yük taşıma kapasitesinin arttığını göstermiştir. Aynı yıl yaptığı iki çalışma ile boyutsuz sıkışma kuvveti, moment, yük ve moment faz açıları, besleme parametreleri gibi parametrelerin radyal yatak titreşimine

etkilerini teorik olarak incelediği çalışmalarında, pertürbasyon metodu ile çözüm yapmıştır [25-26].

Pink ve Stout aerostatik yatak tasarımları için yöntem sundukları çalışmalarında, tasarım prosedürlerini, farklı yatak konfigürasyonları için yatak sertliği, yük taşıma kapasitesi ve hava debisi açısından değerlendirmişler. Yatakların yük taşıma kapasitesini artırmak için orifislerin nasıl konumlandırılacağını belirtmiştirler. Uygun toleranslar dahilinde üretilecek olan yataklarda pnömatik kararsızlığı en aza indirmek için orifis çıkışlarında açılacak ceplerin geometrik özelliklerini de matematiksel model içerisine dahil ederek çözüm yapmışlardır [27].

Markho, Grewal ve Stowel, boy/çap oranları 1 olan aerostatik yataklar da imalattan sonra meydana gelen eksen kaçıklıklarını ve yönlülük etkilerini incelemişler. Aerostatik yataklarda eksen kaçıklıklarında, yatakların çalışması için gerekli olan boşluk sağlandığında bu hataların yatak performanslarını çok etkilemediğini, nadiren bu hataların en fazla 10 % üzerinde yatak performansına etki edeceğini belirtmişlerdir [28].

Rao gözenekli kısıtlayıcı ile hava beslemesi yaptığı dikdörtgen eksenel aerostatik yataklar için statik yük kapasitesi, gaz akışının kütlesel debisi, statik katılık ve yatak-rotor arası boşluk ifadeleri ile değiştirilmiş Reynolds denklemi ve sonlu farklar yöntemi kullanarak çözmüştür. Bu özelliklerin farklı besleme basıncı ve yatak geometrisi ile olan değişimlerini incelemiştir [29].

Boffey, Waddel ve Dearden, deneysel ve teorik olarak yaptıkları çalışmada, tek ve çift orifisli eksenel aerostatik yataklarda, cep uzunluğunun yatak performansına etkilerini incelemişlerdir. Deneysel ve teorik sonuçları arasındaki farkın çok az olduğunu belirttikleri çalışmalarında, orifis besleme aerostatik yataklarda, orifis çıkışlarına açılacak olan cepler ile yük taşıma kapasitesi ve yatak katılığının arttırılabileceğini belirtmişlerdir [30].

Bryant, Velinsky, Beacley ve Fronczak yatağın geometrik parametrelerinin doğru seçilmesiyle sonsuz sertliğe ulaşabilecek olan özel bir eksenel aerostatik yatak önerisi yapmışlardır. Bu makalede geleneksel yapıdan farklı olarak, yatak; yatak muhafazası ve yükteki değişikliklerle eğilen esnek zardan oluşmaktadır. Sızdırmazlık kenarını esnek

malzemeden yapılmış olması ve sızdırmazlık kenarının deformasyonu ile yatağın sonsuz sertlik elde edeceğini bildirmişlerdir [31].

Yoshimoto ve Yoshiro tasarladıkları kendinden kontrollü kısıtlayıcıya sahip eksenel aerostatik yataklar tasarlamışlar. Yatakların besleme sistemleri içerisinde yüzen bir disk bulunmaktadır. Böylece, hava boşluğunu besleyen hava akışını kontrol etmek için yüzer diskin iki tarafında etki eden basınçtan yararlanılır. Sonuçlar, bu yöntemi kullanarak rulmanların, geleneksel eksenel aerostatik yataklardan on kat daha yüksek bir statik sertlik seviyesi sergileyeceğini göstermektedir [32].

Kassab, Noureldeen ve Shawky yaptıkları çalışmalarında, farklı çalışma koşulları altında çalışan dışardan basınçlandırılmış hava yataklarında orifis çıkışlarına açtıkları yuvalar ile basınç dağılımını homojenleştirmişler. Çeşitli film kalınları ve besleme basınçlarında yaptıkları deneyler sonucunda yatak yük taşıma kapasitelerini, çıkış basıncını ve kütle akış hızını ölçmüşlerdir. Sonuç olarak besleme deliği çapının yatak uzunluğuna oranının arttırılması ile girinti basıncı ve yük taşıma kapasitesini arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, kullandıkları yataklarda film kalınlığı arttıkça yük taşıma kapasitesinin düşeceğini, kütlesel debinin artacağını göstermişlerdir [33].

Tian yaptığı çalışmada gözenek kısıtlayıcılı yatakların sabit durum özelliklerini hesaplamak için hızlı modifiye edilmiş üç boyutlu bir akış modeli sunmuştur. Darcy denkleminden ve değiştirilmiş Reynolds denkleminden elde edilen matematiksel modeli, sonlu elemanlar yöntemi ile ayrıklaştırmıştır ve literatürdeki doğrusal olmayan iki denklem yerine sadece bir doğrusal olmayan denklem seti çıkarmıştır. Böylece üç boyutlu akış modelinin hesaplanması için gereken sürenin yalnızca yaklaşık % 30'u ile hesaplamaları yapmanın mümkün olduğunu belirtmiştir. Kullandığı matematiksel modeli deneysel veriler ile doğrulamıştır ancak düşük film kalınlıklarında ve büyük R/H değerlerinde kesinliğin olmadığını belirtmiştir [34].

Yoshimoto ve Kohno, grafit gözenekli aerostatik yataklarda, gözenekli yapının artması ile oluşan havanın rotor yüzeyine taşınamama problemini azaltmak için yaptıkları çalışmada, iki farklı tip kısıtlayıcı ile gözenekli aerostatik yatakları birleştirerek hibrit bir yatak tasarımı yapmışlardır. Yatakların gözenekli kısımlarında uç keçesi kullanmışlar. Sonuç olarak düşük radyal boşluklarda daha yüksek yatak performansı elde ettiklerini belirtmişler ancak, boşluk

miktarı düştükçe uç keçesinin yatakların yük taşıma kapasitelerine olan etkisinin arttığını vurgulamışlardır [35].

Fan, Ho ve Mou, gözenekli yapı yerine çok sayıda küçük orifise sahip doğrusal yatak prototipi geliştirmişler. Geliştirdikleri yataklarda orifislerin olduğu yerlerde yüzey kalitesi düşük olduğundan, yüzey kalitesini artırmak için farklı işlemler uygulamışlardır. Çapı düşük olan orifisleri üretirken mikrofabrikasyon teknolojilerini kullanmışlardır [36].

Su ve Lie, çoklu orifis beslemelerine sahip hibrit eksenel hava yataklarının dönme etkilerini sayısal olarak incelendikleri çalışmalarında gözenekli hava yataklarını da karşılaştırma için matematiksel olarak çözmüşlerdir. Sonuç olarak yatak yük taşıma kapasitesinin dönüş hızından daha çok eksantriklik oranıyla arttığını belirtmişler. Orifis beslemeli yataklarda yük taşıma kapasitesinin, orifisin geometrik özellikleri ve besleme parametreleri ile alakalı olduğunu ancak gözenekli besleyicilerde yük taşıma kapasitesinin yalnızca çalışma parametreleri ile alakalı olduğunu bildirmişlerdir [37].

Lo ve Lee, yaptıkları çalışmada, yüksek hızlı aerostatik yatakların performansı ve gaz besleme basıncı, orifis çapı, gaz filmi kalınlığı ve eksantriklik oranının farklı dönme hızlarında çalışan bir eksenel hava yatağının yük kapasitesi, sertliği ve hacim akış hızı değişimi üzerindeki etkileri araştırmışlar ve büyük eksantriklik oranları, küçük yatak-rotor boşluğu ve küçük orifis çaplarında yatakların performanslarının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [38].

Luong, Potze, Post, Ostayen ve Beek gözenekli yüzeye sahip eksenel aerostatik yatakların performanslarını tahmin etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. D'Arcy yasasından türetilen 1B ve 3B kaynak akış modeliyle elde edilen sonuçlar, sonsuz genişliğe sahip dikdörtgen gözenekli hava yatakları için karşılaştırılmıştır. Pratik tasarım parametreleri için 1B akış modelinin yeterli olduğu ortaya çıkarılmıştır. Dairesel bir aerostatik gözenekli baskı yatağı için çeşitli matematiksel modellerle hesaplanan sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yatak yüzeyinin düzensizliğini ve deformasyonunu içeren nispeten basit bir model, deneysel olarak belirlenen yatak performansı ile iyi bir korelasyon gösterdiğini belirtmişlerdir [39].

Wang, Jang ve Yeh, yatak-rotor arası mesafesi düşük olan esnek rotorun çatallanma ve doğrusal olmayan davranışını inceledikleri çalışmalarında, zamana bağlı bir matematiksel model sunarak, SOR (Successive Over Relaxation) metodunu Reynolds denkleminin çözümü için kullanmışlar. Sistem durum yörüngelerini, Poincare haritalarını, güç spektrumlarını ve çatallanma diyagramlarını rotor ve şaft merkezinin dinamik davranışını farklı çalışma koşulları altında şaftın yatay ve dikey konumlarını incelemek için kullanmışlar. Rotor ve şaft merkezinin periyodik ve alt harmonik tepkisini içeren karmaşık dinamik davranışının, rotor kütlesi ve farklı dönme hızında nasıl değiştiğini göstermişlerdir [40].

Belforte, Raparelli, Viktorov ve Trivella, dışardan basınçlandırılmış gaz yataklarının besleme deliği boşaltım katsayısını belirlemek için deneysel çalışma yapmışlar. Hava tüketimi ve basınç dağılımını farklı delik boyutları için besleme basıncı ve yatak boşluğunun bir fonksiyonu olarak ölçmüşlerdir. Boşaltma katsayısını Reynolds sayısı ve besleme sistemi geometrisine bağlı deneysel bir formülle yaklaşık olarak hesaplamışlardır [41].

Miyatake, Yoshimoto ve Sato, gözenekli aerostatik yatakların pnömatik çekik etkisini azaltmak için yüzeye yakın bölgelerde gözenek yapılarındaki geçirgenliği azaltmışlar ve bu sistemin dinamik davranışını deneysel ve teorik olarak incelmişler. Yüzeyi sınırlı tabakaya sahip olan gözenekli eksenel aerostatik yatakların, yatak katılığı ve dönme kararlılığının büyük ölçüde iyileştiğini bildirmişlerdir [42].

Farid, aerostatik filmlerin dinamik özelliklerini modellemek için harmonik pertürbasyon yönteminin yeterli olduğunu teorik ve deneysel olarak doğrulamış. Öte yandan, genel aktif dinamik kompanzasyon problemi ana hatlarıyla belirtmiş ve bu metot kullanılarak elde edilebilen yüksek performans seviyelerini göstermiştir [43].

Wei ve Gang, üç boyutlu modeller oluşturarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizi yapmışlar ve farklı cep yapıları ile aerostatik yatakların yatak boşluğundaki basınç dağılımını ve kütle akış hızını hesaplamışlardır. Farklı kısıtlayıcı tiplerinde eksenel aerostatik yatakların farklı statik özellikler sergilediğini ortaya koymuşlardır [44].

Howard, aerodinamik yataklarda merkez kaçıklıklarını incelediği çalışmasında, lazer tabanlı şaft hizalama sistemi kullanmış ve deneysel sonuçlarını bilyalı rulmanlar ile karşılaştırmıştır.

Gaz yataklarının merkez kaçıklıklarının rotor dinamiği üzerinde etkisi olduğunu göstermiştir [45].

Chen, Chiu ve Cheng, basit orifis yapılı ve cepli orifisli radyal aerostatik yatakların dinamik davranışlarını incelemek için yeni bir matematiksel model oluşturarak yatak katılıklarını farklı çalışma parametreleri ve farklı yatak geometrik özellikleri ile çözdürmüşlerdir. Sonuç olarak cepli orifise sahip radyal yatakların basit orifise sahip olan yataklara göre, yatak katılıklarının her bir parametre için daha iyi olduğunu belirtmişlerdir [46].

Zhang ve Lin, gözenekli kısıtlayıcıya sahip aerostatik yatakların nümerik analizini sonlu elemanlar yöntemi ile yapmışlar. Tek boyutlu ve üç boyutlu modelleri D'Arcy yasalarına göre oluşturmuşlar ve çözümlerini diğer çözüm yöntemleri ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak tek boyutlu modelin daha az bellek kullanımı olduğunu ve diğer çözücüler ile arasındaki farkın büyük olmadığı için kullanılabilir olduğunu savunmuşlardır [47].

Sun, Yu, Liu ve Liang kısmi gözenekli eksenel aerostatik yatakların dinamik sertliğini ve sönümünü matematiksel olarak inceledikleri çalışmalarında, dinamik katılığın artan besleme basıncı ile belirgin bir şekilde arttığını, düşük frekans bandında negatif sönüm olduğunu ve besleme basıncının yatak kararlılığı üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermişlerdir [48].

Nishio, Somaya ve Yoshimoto, 0.05mm'den daha küçük orifis çaplarına sahip yatakları incelemişler. Orifis çıkışlarında boşaltma katsayısını hesaplamak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemini kullanırken, yatak karakteristiğini incelerken sonlu farklar metodunu (FDM) kullanmışlardır. Bu derece küçük çapa sahip orifisleri lazer ışınıyla işleme ve mikro matkaplar kullanarak üretmişlerdir. Yatak katılıklarının orifis sayısı arttıkça arttığını göstermişler, ayrıca orifis çapı büyüdükçe yatak katılığının düştüğünü belirtmişlerdir [49].

Otsu, Miyatake ve Yoshimoto gözenekli radyal aerostatik yataklarda pnömatik çekiç kararsızlığını azaltmak için yatak yüzeyinde gözenekli malzemenin kütlesinden daha düşük bir katman oluşturmuşlar. Grafit ve metali gözenekli malzeme olarak kullanmışlar ve büyük geçirgenliğe sahip aerostatik yatakların daha büyük dinamik sertlik ve sönümleme katsayısına sahip olduklarını doğrulamışlardır [50].

Belforte, Colombo, Raparelli, Trivella ve Viktorov üç besleme deliğine (orifise) sahip aerostatik yataklar ile çevresel bir oluk açılmış aerostatik yatakları karşılaştırdıkları çalışmalarında, basınç dağılımı, hava tüketimi ve sertlik üzerindeki etkiyi analiz etmişlerdir. Yatakların statik özelliklerini radyal ve çevresel yönler boyunca yük dağılımını deneysel olarak hesaplayarak belirlemişlerdir ve oluk yapısı olduğunda basınç daha homojen olduğu için yük taşıma kapasitesinin yükseldiğini belirtmişlerdir [51].

Shie ve Shih bir aerostatik yatak tasarımında, yük taşıma kapasitesi, sertlik, havanın kütlesel debisi ve homojen basınç dağılımı parametrelerinin önemine vurgu yapmışlar. Sonlu farklar metodunu kullanarak farklı yatak tasarımları için çözümler yapmışlar ve basınç dağılımlarını hesaplayarak optimal bir denge elde etmeye çalışmışlar. Sonuç olarak yatak-rotor arasındaki boşluğun 10μm olduğunda en iyi yatak performanslarının olduğunu teorik ve deneysel olarak göstermişlerdir [52].

Cappa, Reynaerts, Al-Bender, aerostatik yataklarda radyal boşluklarda üretim hataları dolayısıyla meydana gelen kaçıklıkları nanometre mertebelerine indirmek için çalışma yapmışlardır. Üretim hatalarının, yatakların geometrik özelliklerinin ve besleme parametrelerinin, aerostatik yatakların radyal hatalarına olan etkilerini incelemişler ve besleme deliklerinin artmasıyla, eşit olarak dağıtılmış bir hava filmi ile sonuçlanacağından radyal hataların en etkili şekilde azalmasına neden olacağını bildirmişler [53].

Du, Zhang, Liu ve To, dışardan basınçlandırılmış radyal gaz yataklarının yük taşıma kapasitesini artırmak için orifis çıkışlarına basınç dengeleyici oluklar açmışlar ve bu olukların, uzunluk, derinlik, sayı ve konumları gibi yapısal parametrelerinin yük taşıma kapasitesi ve yatak sertliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Eksenel açılan olukların çevresel olarak açılan oluklara göre yük taşıma kapasitesini daha fazla artırdığını ve açılan olukların derinliklerinin yatak-rotor arası boşluk miktarı kadar olması gerektiğini teorik hesaplamalar ile göstermişler ve deneysel olarak doğrulamışlardır [54].

Huang, Shen, Lin ve Hsu, gözenek kısıtlayıcı hava yataklarının basınç dağılımlarını, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımları ile hesaplamışlardır. Sonuç olarak orifis çıkışlarında düşük vakum basıncı olduğunu, hava besleme deliklerinin üzerindeki yüksek basıncın ise paraboloidal dağılım oluşturduğunu göstermişlerdir. Hava filmindeki basınç

dağılımını iyileştirmek için hava beslemesi ve hava tahliye deliklerinin yeniden düzenlenmesi veya yeniden konumlandırılması gerektiğini söylemişlerdir [55].

Dal ve Karaçay, dışardan basınçlandırılmış hava yataklarının düşük radyal boşluklar nedeniyle üretiminin zorluğuna vurgu yapmışlar ve 125μm gibi yüksek radyal boşluklu yataklar için Reynolds denklemini çözerek orifis çapı, orifis sayısı, radyal boşluk değeri ve besleme basıncı değerlerinin yatakların yük taşıma kapasitesine etkilerini simüle etmişlerdir. Sonuç olarak 125μm radyal boşluğa sahip aerostatik yatakların, yük taşıma kapasitelerinin daha düşük olacağını ancak üretim maliyetlerinin çok daha az olacağından, düşük yük taşıyan rotorların yataklanmasında kullanılabileceğini söylemişlerdir [56].

Hosokawa, Somaya, Miyatake ve Yoshimoto gözenekli eksenel aerostatik yataklarda kullanılan gözenek sisteminin üretiminde büyük fırınlar kullanıldığından, parçalı ve çok sayıda gözenekli malzeme olan aerostatik yatak tasarımı önermişlerdir. Önerdikleri yatakların yük taşıma kapasitesini ve yatak katılığını matematiksel olarak ve teorik olarak hesaplamışlar ve tamamı gözenekli malzemeden oluşan yataklara yakın sonuçlar elde etmişlerdir [57].

Wang ve Lee, gözenekli kısıtlayıcılar ile beslenen eksenel aerostatik yatakların doğrusal olmayan davranışını azaltmak için yaptıkları çalışmada, Reynolds denkleminin çözümü için DD&SF yöntemlerini kullanmışlar. Doğrusal olmayan dinamik davranışı anlamak için çatallanma diyagramlarını, Poincare kesitlerini ve spektral yanıtları kullanmışlar. Rotor merkezinin kütle ile birlikte değiştiğini ve yatak sayısının eş zamanlı olarak normal ve alt harmonik titreşimin yanı sıra periyodik ve yarı periyodik olan karmaşık hareketler oluşturduğunu söylemişlerdir [58].

Cui, Wang, Yue, Ming, Huang ve Wang gözenek kısıtlayıcılı radyal aerostatik yatakların çevresel dalgalılık, koniklik, içbükeylik ve dışbükeylik gibi üretim hatalarının taşıyıcı film kalınlığı üzerindeki etkisini deneysel sonuçlara göre modellemişlerdir. Darcy-Forchheimer yasası ve Navier-Strokes denklemlerini oluşturdukları modele göre çözdürerek hataların, hava filmi basıncı, yük taşıma kapasitesi ve yatak rijitliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak oluşacak hataların yük taşıma kapasitesi ve yatak rijitliğini artırdığını, dolayısıyla sayısal hesaplamalarda imalat hatalarının dikkate alınmasının gereksiz olduğunu vurgulamışlardır [59].

Dal ve Karaçay, BHY ile desteklenmiş rotor sisteminde açısal sapmaların sistemin parametrelerine olan etkisini incelemek için radyal aerostatik yataklara dikey yönlerde ayrı ayrı ve birleşik olacak şekilde açısal sapma vermişlerdir. Oluşturulan sapma fonksiyonu ile Reynolds denklemini DD&SF hibrit sayısal çözüm yöntemi ile çözdürmüşler ve sonuç olarak açısal sapma ile yatakların şafta uyguladığı basınç profilindeki bozulma arttığı için yatakların yük taşıma kapasitelerinin arttığını göstermişlerdir. Sonuçlara göre açısal sapma iki yönde aynı anda olduğunda en yüksek yatak performansı olduğu görülmektedir [60].

Cui, Wang, Wang, Yang ve Xia eksenel aerostatik yataklarda, yatak katılığı ve stabilite arasındaki ilişkiyi anlamak için basit orifis, çoklu orifis ve gözenekli tip kısıtlayıcıya sahip aerostatik yatak tasarımları yapmışlardır. Hem sertlik hem de kararlılık basınç dağılımı ile bağlantılı olduğu için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanarak basınç dağılımlarını farklı yataklar için hesaplamışlardır. Sonuç olarak yatak katılığının ve stabilitesinin yatakların geometrik ve malzeme parametreleri ile önemli ölçüde etkilendiğini göstermişlerdir. Orifis kısıtlayıcılı yatakların mikro titreşiminin gözenekli kısıtlayıcılara göre çok daha fazla olduğunu söylemişlerdir [61].

Wen, Wu ve Tan oluk bulunan orifis kısıtlamalı eksenel aerostatik yataklarda, olukların derinliklerinin hava filmi basıncı, yatak yük taşıma kapasitesi ve yatak sertliği gibi yatak performansları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak olukların şaft yüzeyindeki türbülansı azaltması nedeniyle yatak performanslarını yükselttiğini göstermişlerdir [62].

Dal ve Karaçay, radyal aerostatik yatakların pnömatik çekiç kararsızlığını teorik ve deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında farklı orifis konfigürasyonları oluşturmuşlar ve farklı rotor hızları için deneysel sonuçlar ile teorik sonuçları karşılaştırmışlardır. Modellenen sistemin pnömatik çekiç kararsızlık bölgesini belirlemek için waterfall grafikleri, çatallanma diyagramları, yörünge grafikleri, faz portresi ve Poincare haritası kullanarak analiz etmişlerdir. Sonuç olarak basınç dağılımının homojenleşmesi yani orifis sayısının artması ile pnömatik çekiç frekansının arttığını göstermişlerdir [63].

Sato, Wei, He, Imran, Hai ve Weiwei gözenekli, basit orifisli ve çok orifisli (2 orifis) gibi farklı kısıtlayıcı tiplerine sahip eksenel aerostatik yatakların yük taşıma kapasitesi ve yatak sertliğini hesaplamalı akışkanlar mekaniği simülasyonu ortamında Navier-Strokes denklemlerini çözdürerek hesaplamışlardır. 5-10μm boşluğa sahip yataklar için yaptıkları

simülasyonlarda sonuç olarak gözenekli kısıtlayıcıların diğerlerine göre daha yüksek yatak katılıkları sağladığını, ancak en yüksek yük taşıma kapasitesinin çok orifisli yataklarda elde edildiğini söylemişlerdir [64].

Görüldüğü gibi son yıllarda aerostatik yataklar ile yapılan çalışmalarda genellikle yatak performanslarının arttırılması konusuna odaklanılmıştır. Bu çalışmaların hepsinde [63,66–72] yatak-rotor arası boşlukta havanın yatağa uyguladığı basınç dağılımının homojenleştirilerek yani orifis sayısı arttırılarak ya da yüzeylerdeki pürüzlülük arttırılarak daha yüksek yük taşıma kapasitelerine ulaşılmak hedeflenmiştir.

Literatürde orifis sayısının artırılması ile ilgili çalışmalar olmasına rağmen geleneksel yöntemler ile üretilen aerostatik yataklarda orifis sayısının artırılmasının bir limiti bulunmaktadır. Literatürde bulunan çoklu orifis kısıtlayıcılı aerostatik yataklarda genellikle 4-8 orifis bulunmaktadır, nadiren de 16 orifis bulunan yataklar ile çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılacak olan yataklardaki orifis sayılarına üretim kısıtlamaları nedeniyle neredeyse hiç yer verilmemiştir.

3. MATEMATİKSEL MODELLEME

Aerostatik yataklar kullanılan yatak-rotor sistemlerinde, mikron mertebesindeki radyal boşluklarda hareket eden havanın matematiksel modelinin oluşturulması hava yataklarının dinamik davranışlarını anlamak için oldukça önemlidir. Bu bağlamda bu bölümde akışkanın hareketi ve rotor sisteminin hareket denklemleri modellenmesi anlatılmıştır.

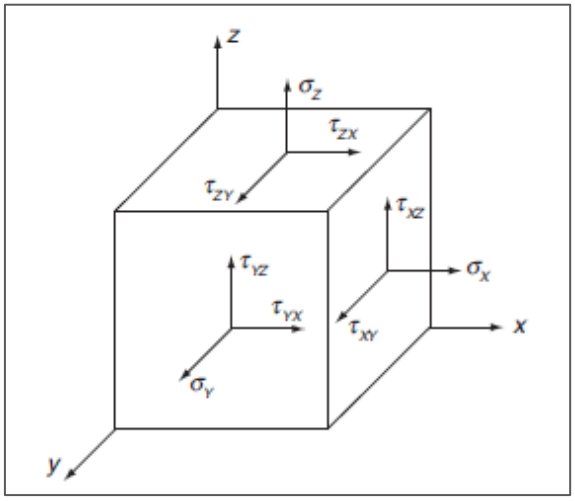
3.1. Giriş

Yatak-şaft arasındaki boşluğa yağlayıcı (hava) akışı, akışkanların akış yasalarına göre aşağıdaki dört kanun ile modellenir [72];

1. Süreklilik denklemi şeklinde ifade edilen kütlenin korunumu
2. Momentum denklemi olarak ifade edilen Newton'un ikinci hareket yasası veya momentumun korunumu
3. Enerji denklemi olarak ifade edilen termodinamiğin birinci yasası kullanılarak türetilen enerjinin korumu
4. Sıkıştırılabilir akış için (gaz-hava yağlayıcı) mükemmel gaz denklemi

3.2. Momentum Denklemleri

Momentum denklemlerini ifade etmek için şekil 3.1' de gösterilen birim küp kullanılmıştır. Küpe etkiyen gerilmelerin yönleri simetrik olması gerektiğinden [73];



Şekil 3.1. Birim küp üzerindeki gerilmeler ve yönleri

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$
$$\tau_{xz} = \tau_{zx} \quad (3.1)$$
$$\tau_{yz} = \tau_{zy}$$

Toplam kuvvet 'F', yüzey gerilmelerinden oluşan 'F_s' ve birim hacim başına yer çekiminden kaynaklanan kuvvet olan 'F_b' kuvvetinden oluşur. Kontrol hacimdeki momentum denklemi şu şekilde olur;

$$F_s + \underbrace{\oint F_b dv}_{hacim} = \frac{\delta}{\delta t}\oint \vec{V} p dv + \underbrace{\oint \vec{V}\rho\vec{V}.dA}_{y\ddot{u}zey} \quad (3.2)$$

Burada, $\vec{V}$: Hız vektörü dv: birim hacim olarak ifade edilir. Bu denklem sadece eylemsizliğin olmadığı referans eksenlerde geçerlidir.

Kartezyen koordinatlarda, -x ekseni yönünde momentum denklemi şu şekilde yazılabilir;

$$\rho\frac{Du}{Dt} = \rho\left(\frac{du}{dt} + u\frac{du}{dx} + v\frac{du}{dy} + w\frac{du}{dz}\right) = \frac{\partial\sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\delta\tau_{xz}}{\delta z} + F_{bx} \quad (3.3)$$

Benzer şekilde -y ve -z eksenlerinde momentum denklemleri sırasıyla;

$$\rho\frac{Dv}{Dt} = \rho\left(\frac{dv}{dt} + u\frac{dv}{dx} + v\frac{dv}{dy} + w\frac{dv}{dz}\right) = \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_y}{\partial y} + \frac{\delta\tau_{yz}}{\delta z} + F_{by} \quad (3.4)$$

$$\rho\frac{Du}{Dt} = \rho\left(\frac{dw}{dt} + u\frac{dw}{dx} + v\frac{dw}{dy} + w\frac{dw}{dz}\right) = \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\delta\sigma_z}{\delta z} + F_{bz} \quad (3.5)$$

Burada $\frac{Du}{Dt}$, $\frac{Dv}{Dt}$ ve $\frac{Dw}{Dt}$ sırasıyla x, y ve z eksenlerindeki eylemsizlik kuvvetlerini F_{bx}, F_{by} ve F_{bz} ise sırasıyla yerçekimi kuvvetlerini ifade etmektedir.

3.3. Akışkanlar İçin Gerilme-Gerinim İlişkisi

Newtonyen akışkanlar için gerilme-gerinim oranı doğrusaldır ve Kartezyen koordinatlarda genel ilişki şu şekilde ifade edilebilir [74];

Gerinim oranı: $e_{ij} = \frac{\delta u_i}{\delta x_j}$, dönme olmayan akışlar,

Gerilme: $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\eta e_{ij} + \delta_{ij}\lambda\phi$

Burada ϕ akış distilasyonu olarak ifade edilir, yani sıvının her birinden dışarı akma hızını veya sıvının genleşmesini ölçer. λ ikinci viskozite sabiti ve δ_{ij} ise Kronecker deltasıdır.

Akışkan basıncı üç normal gerilmenin ortalamasıdır ve dolayısıyla doğası gereği $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -P$ olacaktır.

$$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = -3P \tag{3.6}$$

$$\sigma_{xx} = -P + \lambda\Phi + 2\eta\frac{\delta u}{\delta x} \tag{3.7}$$

$$\sigma_{yy} = -P + \lambda\Phi + 2\eta\frac{\delta v}{\delta x} \tag{3.8}$$

$$\sigma_{zz} = -P + \lambda\Phi + 2\eta\frac{\delta w}{\delta x} \tag{3.9}$$

Burada;

$$\Phi = \left(\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta x}\right) \tag{3.10}$$

Denklem 3.7, 3.8 ve 3.9 toplandığında;

$$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = -3P + (3\lambda + 2\eta)\Phi \tag{3.11}$$

Dolayısıyla; $3\lambda + 2\eta = 0$ ya da $\lambda = -2\frac{\eta}{3}$ olacaktır. Stoke durumu [75] olarak bilinen bu durum sıkıştırılabilir akışkanların durağan durumda iken basınçlarının, normal gerilmelerin ortalamasına eşit olduğunu kanıtlar. $\lambda = 2\frac{\eta}{3}$ terimi; bulk viskozite sabiti olarak adlandırılır ve '0' a eşittir.

Akışkanlar için e_{ij} geriniminin normal bileşeninin, gerçek normal gerinim ile doğrudan tanımlandığı bilinmektedir. Böylece;

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \tag{3.12}$$

Olacaktır. Ayrıca kesme gerinimi oranları ise kesme gerinimi bileşenlerinin gerçek oranlarının yarısına eşittir.

$$e_{xy} = e_{yx} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \tag{3.13}$$

$$e_{yz} = e_{zy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \tag{3.14}$$

$$e_{xz} = e_{zx} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right) \tag{3.15}$$

Öyleyse; newtonyen akışkanlar için kesme gerilmeleri, kesme gerinimleri ile şu şekilde ilişkilendirilebilir;

$$\tau_{ij} = \eta\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{3.16}$$

Sonuç olarak;

$$\tau_{xy} = \eta\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \tag{3.17}$$

$$\tau_{yz} = \eta\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \tag{3.18}$$

$$\tau_{xz} = \eta\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right) \tag{3.19}$$

olacaktır.

3.4. Navier-Strokes Denklemleri

Denklem 3.3, 3.4 ve 3.5 ile denklem 3.7, 3.8, 3.9 ve denklem 3.17, 3.18, 3.19 için aynı anda çözüm yapılırsa Navier-Strokes denklemleri elde edilir [76].

$$\rho\frac{Du}{Dt} = F_{Bx} - \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{2}{3}\frac{\partial(\eta\Phi)}{\partial x} + 2\frac{\partial}{\partial x}\left(\eta\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[\eta\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\eta\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] \quad (3.20)$$

$$\rho\frac{Dv}{Dt} = F_{By} - \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{2}{3}\frac{\partial(\eta\Phi)}{\partial y} + 2\frac{\partial}{\partial y}\left(\eta\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\eta\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\eta\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)\right] \quad (3.21)$$

$$\rho\frac{Dw}{Dt} = F_{Bz} - \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{2}{3}\frac{\partial(\eta\Phi)}{\partial z} + 2\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial w}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\eta\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\eta\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)\right] \quad (3.22)$$

Akışkanlar dinamiğindeki tüm analitik çalışmaların temelini oluşturan bu denklem, sıkıştırılabilir, değişken viskoziteli Newton tipi akışkanın viskoz akışı için geçerlidir. Bu nedenle, bu denklemler yataklarda, keçelerde ve neredeyse tüm mekanik bileşenlerde yağlama mekaniğinin geliştirilmesi için temel oluşturur.

3.5. Süreklilik Denklemleri

Süreklilik denklemi integral formunda yazılan şu denklem yazılarak geliştirilebilir;

$$\underbrace{\oint}_{c.s} \rho\vec{V}.dA = -\underbrace{\oint}_{c.v} \rho dv \quad (3.23)$$

Gauss teoremi kullanılarak şu bağıntı yazılabilir;

$$\underbrace{\oint}_{c.v} \nabla(\rho\vec{V})dv + \frac{d}{dx}\underbrace{\oint}_{c.v} \rho\vec{V} = \underbrace{\oint}_{c.v}\left[\nabla\rho\vec{V} + \frac{d\rho}{dt}\right] \quad (3.24)$$

Burada integral indisi c.v, kontrol hacmini belirtmektedir. Dolayısıyla hacim isteğe bağlı olduğundan integral ifadeleri sıfır olmalıdır. Böylece süreklilik denklemi diferansiyel formda şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla(\rho\vec{V}) = 0 \quad (3.25)$$

Durağan akış için $\frac{d\rho}{dt} = 0$ olacağından süreklilik denklemi;

$$\nabla(\rho\vec{V}) = 0 \quad (3.26)$$

Olacaktır. Sonuç olarak Kartezyen koordinatlarda süreklilik denklemi şu hali alacaktır;

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d(\rho u)}{dx} + \frac{d(\rho v)}{dy} + \frac{d(\rho w)}{dz} = 0 \tag{3.27}$$

Akışkan problemleri, kütle akışı süreklilik denklemlerinin sağlanması ve uygun sınır şartları ile Navier-Strokes denklemlerinin çözülmesini gerektirir.

3.6. Reynolds Denklemi

Osborne Reynold 1886'da, yatakların boşluk alanında sıkıştırılamaz akış için Reynolds denklemini türetmiştir. Reynolds bu denklemleri oluştururken Tower'ın [77] 1883 de yaptığı radyal yatağın şaft ile arasındaki boşlukta oluşan akışkan filmde kama hareketi nedeniyle oluşan akışan film basınç oluşumunu gösteren deneyleri referans almıştır. Reynolds denklemi kendiliğinden hareket nedeniyle oluşan sıvı filmdeki basınç dağılımı hesaplayan bir diferansiyel denklemdir.

Akışkanlar mekaniği açısından bir yatağın şaft ile arasındaki boşlukta viskoz bir akışkanın akışı, viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetleri üzerinde baskın olduğu yavaş viskoz bir akış olarak kabul edilir [75].

Navier-Strokes denklemlerine basit ihmaller yapılarak, Navier-Strokes ve süreklilik denklemlerinin birleştirilmesiyle Reynolds denklemi türetilir.

Reynolds denklemi artık yağlama teorisindeki temel varsayımlar olarak bilinen aşağıdaki varsayımlar yapılarak türetilebilir [72];

- Yağlayıcı akışkan laminerdir.
- Hem geçici hem de konvektif atalet ihmal edilebilir.
- Film kalınlığı boyunca viskozite ve yoğunluk değişmez, yani film kalınlığı boyunca viskozite sabittir ve sıcaklığa ve basınca bağlı değildir.
- Film kalınlığı boyunca basınç gradyanı sıfırdır ya da film kalınlığı boyunca basınç sabittir $\left(\frac{\partial P}{\partial z} = 0\right)$.

- Akışkanın akış yönü boyunca tüm hız gradyanları, film kalınlığı boyunca hız gradyanlarına kıyasla ihmal edilebilir $\left(\frac{du}{dx}, \frac{du}{dy}, \frac{dv}{dx}, \frac{dv}{dy}, \frac{dw}{dx}, \frac{dw}{dy} \ll \frac{du}{dz}, \frac{dv}{dz}, \frac{dw}{dz}\right)$. Film kalınlığı genellikle uzunluk boyutlarından 10^{-2}, 10^{-3} kat daha düşük olduğundan, bu koşullar genellikle sağlanır.
- Cisim kuvvetleri ihmal edilebilir.
- Akışkan-katı sınırların kayma yoktur, yani akışkan tabakalar yüzeylere yapışır ve yüzeylerin hızlarına sahip olurlar.

Yukarıdaki kabuller Navier-Strokes denklemlerine uygulandığında;

$$-\frac{\delta p}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta x}\left(\eta \frac{\partial u}{\partial z}\right) = 0 \tag{3.28}$$

$$-\frac{\delta p}{\delta y} + \frac{\delta}{\delta z}\left(\eta \frac{\partial v}{\partial z}\right) = 0 \tag{3.29}$$

$$\frac{\delta p}{\delta z} = 0 \tag{3.30}$$

Haline gelir. Eş. 28 ve Eş. 29'da bulunan ifadelerin z'ye göre iki defa integrali alındığında;

$$u = \frac{z^2}{2\eta}\frac{\partial p}{\partial x} + c_1 \frac{z}{\eta} + c_2 \tag{3.31}$$

$$v = \frac{z^2}{2\eta}\frac{\partial p}{\partial y} + c_3 \frac{z}{\eta} + c_4 \tag{3.32}$$

olur. Burada $c_1, c_2, c_3\ ve\ c_4$ integral sabitleridir. Akışkan hızları $u\ ve\ v$ için sınır şartlarının şu şekilde olduğu kabul edilirse;

$z = 0 \Rightarrow u = u_1\ , v = 0$

$z = h \Rightarrow u = u_2\ , v = 0$

Sınır şartları ile birlikte yağlayıcı film hız profilleri şu şekilde yazılabilir;

$$u = \frac{1}{2\eta}\frac{\partial p}{\partial x}(z^2 - zh) + \left(1 - \frac{z}{h}\right)u_1 + \frac{z}{h}u_2 \tag{3.33}$$

$$v = \frac{1}{2\eta}\frac{\partial p}{\partial y}(z^2 - zh) \tag{3.34}$$

Oluşturulan hız profili denklemlerini, süreklilik denklemlerinde yerine koyarsak;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\rho}{2\eta}\frac{\partial p}{\partial x}(z^2 - zh) + \rho\left(1 - \frac{z}{h}\right)u_1 + \rho\frac{z}{h}u_2\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\rho}{2\eta}\frac{\partial p}{\partial y}(z^2 - zh)\right] + \frac{\delta(\rho w)}{\delta z} = 0 \tag{3.35}$$

Hız profili fonksiyonlarının ‘h’ film kalınlığı boyunca integrali alınırsa;

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\rho}{2\eta}\frac{\partial p}{\partial x}\int_0^h (z^2 - zh)\,dz\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\partial p}{\partial y}\int_0^h (z^2 - zh)\,dh\right] + \frac{\partial}{\partial x}\left[\rho\int_0^h (1 - zh)\,udh + \int_0^h \frac{\partial \rho}{\partial t}\,dz\right] = 0 \tag{3.36}$$

Ve aşağıdaki genel integral kuralı kullanılırsa;

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial x}[f(x,y,z)]\,dz \;=\; -f(x,y,h)\frac{dh}{dx} + \frac{\partial}{\partial x}\int_0^h [f(x,y,z)]\,dz \tag{3.37}$$

Sıkıştırılabilir akışkanlar için Reynolds denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\rho h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial y}\right) = \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho h + \frac{u_1+u_2}{2}\right) + \rho(w_2 - w_1) - \rho u_2\frac{\partial \rho}{\partial x} + h\frac{\partial \rho}{\partial t} \tag{3.38}$$

Halini alır. Burada $(w_2 - w_1) = \frac{\partial h}{\partial t}$ olacaktır. O halde Reynolds denklemi şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\rho h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial y}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left[\rho h\left(\frac{u_1+u_2}{2}\right)\right] + \rho\frac{\partial h}{\partial t} - \rho u_2\frac{\partial h}{\partial x} + h\frac{\partial \rho}{\partial t} \tag{3.39}$$

Olur. Sıkıştırılamayan akışlar için Reynolds denklemi ise;

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\rho h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial y}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\{(u_1 + u_2)h\} + \frac{\partial h}{\partial t} + u_2\frac{\partial h}{\partial x} \tag{3.40}$$

Şeklinde yazılabilir. Denklem 3.37'de bulunan ifadeler şu şekilde özetlenebilir [72]:

- Reynolds denkleminin sık tarafındaki $\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial x}\right)$ ve $\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\rho h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial y}\right)$ terimleri Poiseuille akışı ya da basınç kaynaklı akış olarak bilinir.
- Denklemin sağ tarafındaki $\frac{\partial}{\partial x}\left[\rho h\left(\frac{u_1+u_2}{2}\right)\right]$ Couette akışı olarak bilinir ve üç kısma ayrılır;

  - $\rho\left(\frac{u_1+u_2}{2}\right)\frac{\partial h}{\partial x}$: fiziksel sıkıştırma terimi ya da sıkıştırma olayından kaynaklı akış ifadesidir. Bunun nedeni yüzey hızının ve yüzey hızı yönündeki film kalınlığının değişimidir. Yüzey hareketi yönünde film kalınlığının azalması veya yakınsak film şekli nedeniyle pozitif basınç oluşmasını sağlar.
  - $h\left(\frac{u_1+u_2}{2}\right)\frac{\partial \rho}{\partial x}$ yoğunluk sıkışması olarak bilinir. Akış yönünde yoğunluk değişiyorsa pozitif basınçlar oluşabilir. Sıcaklık arttığında akış yönünde yoğunluğun beklendiği gibi azalması gerekir. Bu durum, paralel film şekli durumunda, yani sabit film kalınlığı için bile basınç oluşumuna neden olabilir.
  - $\rho\left(\frac{h}{2}\right)\frac{\partial}{\partial x}(u_1+u_2)$ uzatma terimi olarak bilinir. Yatay yüzeyleri elastikse ya da uzatılabilir ise pozitif basınç oluşabilir. Akış yönünde hızlar düşmek zorundadır. Yatak yüzeyleri genellikle rijit olduğundan bu terim sıfır olur.

- $\rho\frac{\partial h}{\partial t}-\rho u_2\frac{\partial h}{\partial x}$ terimi sıkıştırma akışı olarak bilinir ve yüzeyler birbirine yaklaşırsa pozitif basınç oluşumuna yol açabilir.
- $h\frac{\partial \rho}{\partial t}$ terimi genişleme terimi olarak bilinir. Bu terim yatak yüzeyleri arasındaki yağlayıcının termal genleşmesi ile alakalıdır. Geçici (Transient) bir süreç olduğundan yağlama analizinde genellikle bir sonucu yoktur.

Yatak yüzeylerinin hareket etmeyeceği ($u_1 = 0$), $p = \rho R^0 T^0$ olacağı ve yukarıdaki açıklamalar göz önüne alınırsa denklem 3.37 şu hali alacaktır:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{ph^3}{\eta}\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{ph^3}{\eta}\frac{\partial p}{\partial y}\right)=6U\frac{\partial}{\partial x}(ph)+12\frac{\partial}{\partial t}(ph) \tag{3.41}$$

Burada U hızı x ekseni yönündeki hızı, p yüzeyler arasındaki basıncı, x ve y koordinat eksenlerini η ise viskoziteyi ifade etmektedir. Radyal aerostatik yatakların basınç dağılımını

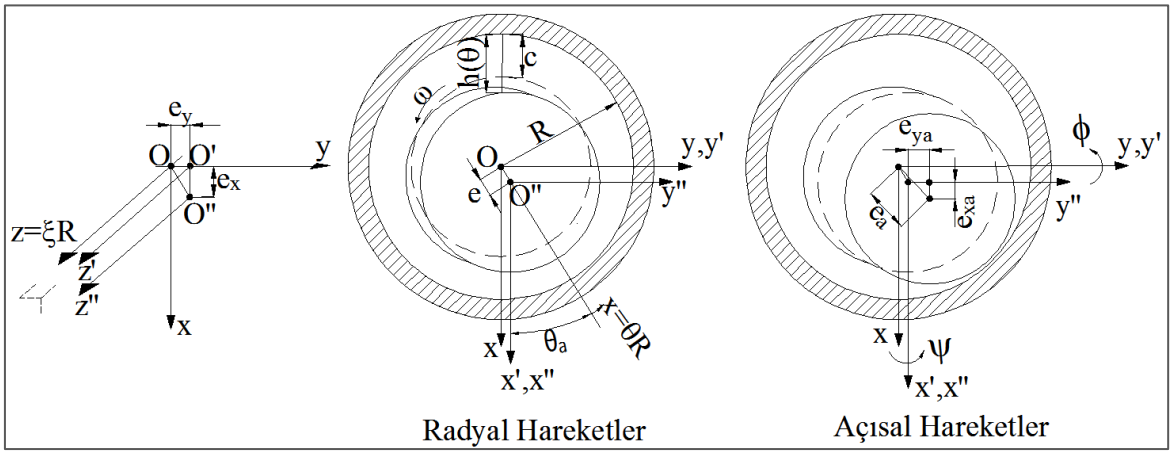
hesaplamak için Reynolds denkleminin silindirik koordinat sistemlerinde ifade edilmesi gerektiğinden $\theta = x/R$ ve $\xi = y/R$ dönüşümleri yapılırsa, Reynolds denklemi silindirik koordinat takımlarında Eş. 40'daki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial}{R\partial\theta}\left(\frac{ph^3}{\eta}\frac{\partial p}{R\partial\theta}\right)+\frac{\partial}{R\partial\xi}\left(\frac{ph^3}{\eta}\frac{\partial p}{R\partial\xi}\right)=6U\frac{\partial}{R\partial\theta}(ph)+12\frac{\partial}{\partial t}(ph) \tag{3.42}$$

Burada R, yatak çapını ifade etmektedir. Ayrıca Reynolds denkleminde geçen h yüzeyler arasındaki hava filmi kalınlık fonksiyonu olarak ifade edilmektedir ve şaftın yatak içerisindeki konumuna bağlı olarak şu şekilde yazılabilir;

$$h(z,\theta) = c + e\cos(\theta-\theta_a) + e_{xa}\cos\theta + e_{ya}\sin\theta \tag{3.43}$$

burada c şekil 3.2'de gösterildiği gibi yatak ve rotor arasındaki radyal boşluğu, θ_a hücum açısını, e_{xa} ve e_{ya} açısal hareketten kaynaklanan eksantrikliği ifade etmektedir. Yatak boyu L ile ifade edilirse e_{xa} ve e_{ya} sırasıyla $\left(\frac{L}{2}-z\right)\phi$ ve $\left(\frac{L}{2}-z\right)\psi$ olacaktır. Burada ϕ ve ψ yuvarlanma açılarını ifade etmektedir.



Şekil 3.2. Silindirik eksen takımı [78]

3.7. Reynolds Denkleminin Boyutsuz Hali

Reynolds denklemi nümerik çözüm metotlarının uygulanabilmesi için boyutsuz hale getirilmelidir. Böylece her parametrenin etkisi incelenebilecektir. Reynolds denkleminin boyutsuz hale getirilmesi için aşağıdaki dönüşümler kullanılmıştır [79].

$$P = \frac{p}{P_a}, H = \frac{h}{c}, U = r\omega, \Lambda = \frac{6\mu\omega}{P_a}\left(\frac{R}{c}\right)^2, \sigma = \frac{12\mu}{P_a}\left(\frac{R}{c}\right)^2 \quad (3.44)$$

Burada P, H, U Λ ve σ sırasıyla boyutsuz formda basıncı, film kalınlık fonksiyonunu, hızı, yatak sayısını ve sıkıştırılabilirlik sayısını ifade etmektedir. Yatak sayısı ve sıkıştırılabilirlik sayısı aerostatik yatakların geometrik özelliklerine bağlıdır ve hava yatakları için önemli birer parametredir.

Yatak-rotor arasındaki radyal boşluk c ile ve eksantriklik oranı $\varepsilon = \frac{1}{c}\sqrt{{e_x}^2 + {e_y}^2}$ ile ifade edilirse H boyutsuz film kalınlık fonksiyonu;

$$H(\xi, \theta) = 1 + \varepsilon\cos\theta + \left(\frac{L}{2} - \xi\right)(\phi\cos\theta + \psi\sin\theta) \quad (3.45)$$

Eşitliği ile ifade edilebilir. Böylece silindirik koordinatlarda boyutsuz formda Reynolds denklemi şu şekilde oluşturulabilir;

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\left(PH^3\frac{\partial P}{\partial\theta}\right) + \frac{\partial}{\partial\xi}\left(PH^3\frac{\partial P}{\partial\xi}\right) = \Lambda\frac{\partial}{\partial\theta}(PH) + \sigma\frac{\partial}{\partial t}(PH) \quad (3.46)$$

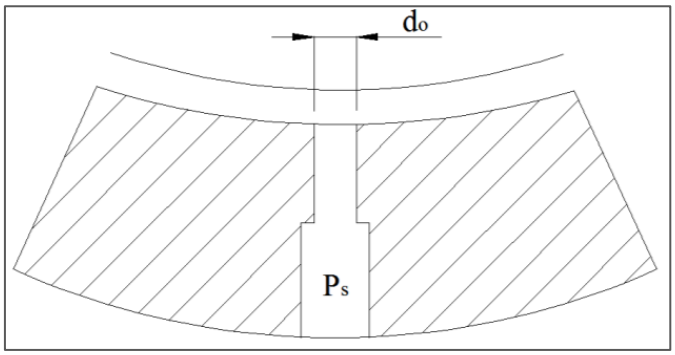
3.8. Reynolds Denklemine Havanın Kütlesel Debisinin Eklenmesi

Denklem 3.44'te dışardan beslenen havanın yatak-rotor arası boşluktan geçip rotor yüzeyine etkilediği basınç dağılımını hesaplamak için Reynolds denkleminin en genel hali bulunmaktadır. Yatak-rotor sistemi çalışırken yatak üzerinde bulunan orifislere vasıtası ile sürekli olarak şaft yüzeyine hava akışı olacağından, bu kütle akışının etkisini hesaba katmak için Reynolds denklemine havanın kütlesel debisinin etkisinin eklenmesi gerekir. Böylelikle eşitlik 44'te verilen Reynolds denklemi kütle debisi ile beraber [78];

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\left(PH^3\frac{\partial P}{\partial\theta}\right) + \frac{\partial}{\partial\xi}\left(PH^3\frac{\partial P}{\partial\xi}\right) + \dot{M} = \Lambda\frac{\partial}{\partial\theta}(PH) + \sigma\frac{\partial}{\partial t}(PH) \quad (3.47)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Burada $\dot{M}$ boyutsuz kütle debisi olup eşitlik 46'da görüldüğü gibi besleme parametresi, besleme deliği fonksiyonu, besleme basıncı ve radyal boşluk fonksiyonuna bağlı olarak değişmektedir.

$$\dot{M} = \Gamma_s P_s H \Phi(P) \tag{3.48}$$

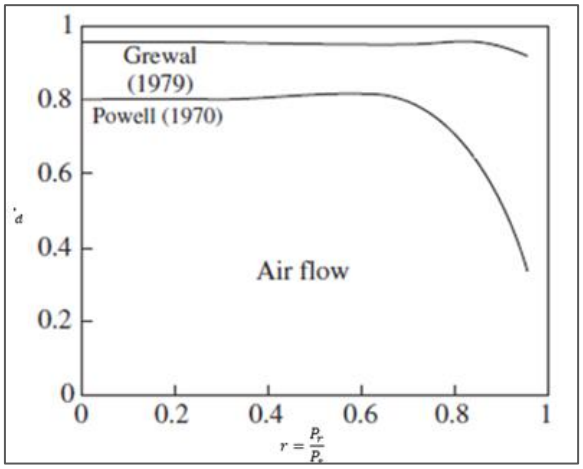


Şekil 3.3. Yatak Üzerindeki hava besleme deliği [80]

Burada Γ_s besleme deliği parametresi olarak ifade edilir ve yatağın geometrik özelliklerine bağlı olarak hava debisini belirleyen parametrelerden bir tanesidir. Şekil 3.3'de besleme deliğinin şematik gösterimi bulunmaktadır, gösterilen besleme deliği için besleme parametresi;

$$\Gamma_s = \frac{12\mu c_d \sqrt{R^0 T^0}\pi d_0}{P_a c^2 \Delta\theta \Delta\xi} \tag{3.49}$$

Şeklinde ifade edilir. Burada d_0 besleme deliği çıkış çapını, R^0 gaz sabitini, T^0 mutlak sıcaklığı, c radyal boşluğu, P_a atmosfer basıncını ifade etmektedir. Denklem 3.47'de bulunan c_d ise boşaltma katsayısını ifade etmektedir. Boşaltma katsayısı orifis çıkış basıncının giriş basıncına oranı ile değişmekte olup şekilde olup deneysel veriler ile oluşturulan şekil 3.4'deki grafikle ifade edilmektedir [82-83].



Şekil 3.4. Boşaltma katsayısı değişimi [83]

Denklem 3.46'da ifade edilen $\Phi(P)$ ise besleme deliği fonksiyonudur. Dışardan beslenen hava şekil 3.3'de gösterildiği gibi çapı büyük olan ortamdan çapı küçük ortama geçerken Bernoulli prensibine göre hızında artıp basıncı bir miktar düşmektedir. Bu basınç düşüşü $\Phi(P)$ ifadesi ile gösterilir ve denklem 3.48'de görüldüğü gibi parçalı fonksiyon ile ifade edilmektedir;

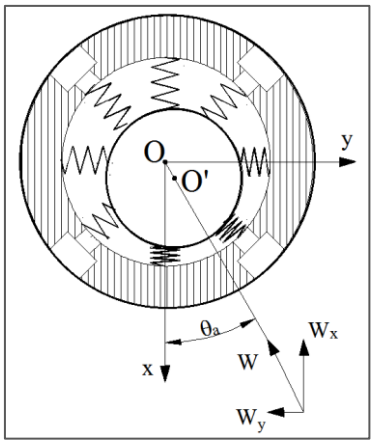
$$\Phi(P)\begin{cases}\frac{2\kappa}{\kappa-1}\left[\left(\frac{P_r}{P_s}\right)^{2/\kappa}-\left(\frac{P_r}{P_s}\right)^{(\kappa+1)/\kappa}\right], & \frac{P_r}{P_s}>\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\kappa/(\kappa-1)}\\ \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1}}\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{1/(\kappa-1)} & , \quad \frac{P_r}{P_s}\leq\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\kappa/(\kappa-1)}\end{cases} \tag{3.50}$$

Burada $\frac{P_r}{P_s}$ ifadesi kritik basınç oranını ifade etmektedir. Parçalı fonksiyonun ikinci ifadesinde $\frac{P_r}{P_s}\leq\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\kappa/(\kappa-1)}$ olması, akışın ses üstü hıza ulaştığını ve orifis çıkış basıncının besleme basıncına göre oldukça düştüğünü göstermektedir. Aerostatik yataklarda yağlayıcı olarak hava kullanıldığından ve havanın ısı kapasitesi (κ) 1,4'e eşit olduğundan kritik basınç oranı yaklaşık olarak 0.528'dir.

3.9. Aerostatik Hava Yatakları ile Desteklenmiş Yatak-Rotor Sisteminin Hareket Denklemleri

Aerostatik yataklarda yatak-rotor arasına iletilen hava şaftı destekleyip dengede durmasını sağladığından şaft dinamiğini doğrudan etkilemektedir. Yatak ve rotor arasındaki boşlukta hareket eden hava şekil 3.5'deki gibi saf bir yay olarak ifade edilebilirken, havanın doğrusal olmayan davranışı nedeniyle yay katılığı doğrusal olmayan bir şekilde ifade edilmektedir [84].

Reynolds denklemi uygun başlangıç ve sınır şartları ile çözümlendikten sonra rotor yüzeyine etki eden basınç dağılımı hesaplandıktan sonra, basınç dağılımının yatak boyu ve çevresi boyunca integrali alınarak yataklara etkiyen hava filmi kuvvetleri hesaplanabilir. Şaft yataklar içerisinde açısal hareketler yapacağından sağ ve solda bulunan aerostatik yatakların yatak içerisindeki konumları farklı olacaktır. Farklı konumlarda bulunan yataklar için film kalınlık fonksiyonu farklı olacağından sağ ve sol yataklardaki toplam hava film kuvveti de farklı olacaktır. Sağ ve sol yatağa etki eden hava film kuvvetleri x ve y ekseninde şu şekilde ifade edilebilir;



Şekil 3.5. BHY ile desteklenmiş yatak-şaft sistemi

$$W_{xL} = P_a \int_0^{2\pi} \int_0^{L/R} P(\xi,\theta)_L \cos\theta_L d\xi d\theta \tag{3.51}$$

$$W_{xR} = P_a \int_0^{2\pi} \int_0^{L/R} P(\xi,\theta)_R \cos\theta_R d\xi d\theta \tag{3.52}$$

$$W_{yL} = P_a \int_0^{2\pi} \int_0^{L/R} P(\xi,\theta)_L \sin\theta_L d\xi d\theta \tag{3.53}$$

$$W_{yR} = P_a \int_0^{2\pi} \int_0^{L/R} P(\xi,\theta)_R \sin\theta_R d\xi d\theta \tag{3.54}$$

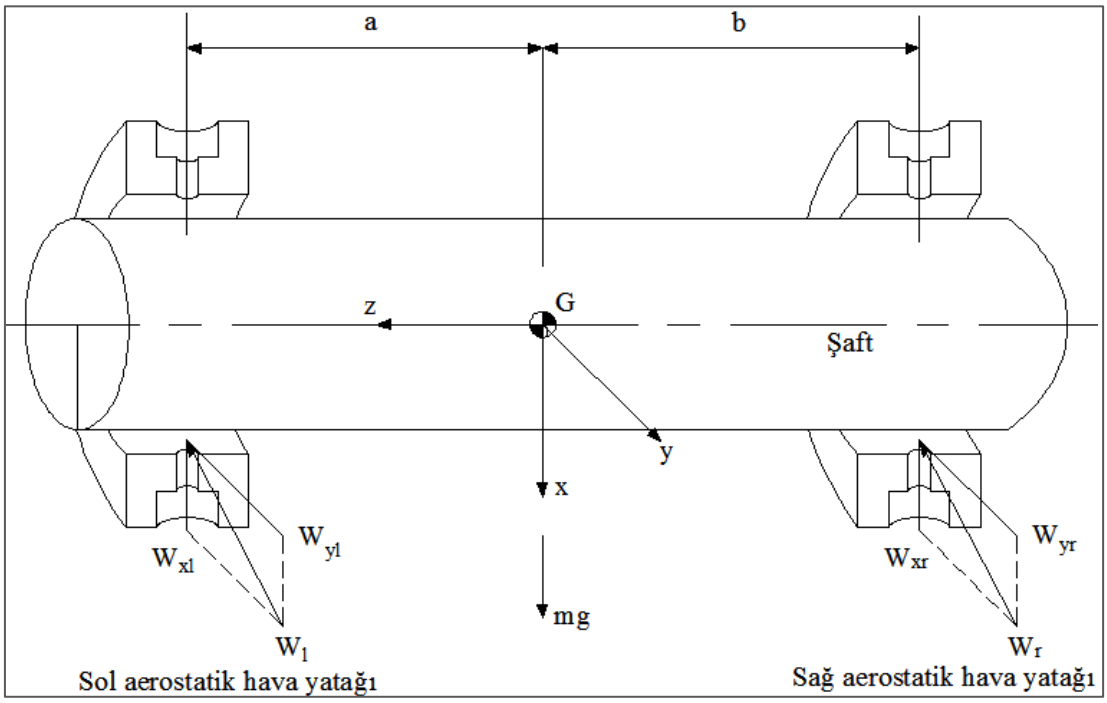
Burada $P(\xi,\theta)$ basınç dağılımı fonksiyonunu ifade etmektedir. Şekil 3.6'da yatak şaft sistemine etkiyen kuvvetler gösterilmektedir. Buradaki kuvvetler ve şekil 3.7 ve şekil 3.8'de eksen takımları ile dört serbestlik dereceli sistem için Newton'un ikinci hareket yasasına göre hareket denklemleri yazılabilir [85].

$$m\ddot{x} + (c_{xL} + c_{xR})\dot{x} + P_a R^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{L/R} P(\xi,\theta)_L \cos\theta_L d\xi d\theta + P_a R^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{L/R} P(\xi,\theta)_R \cos\theta_R d\xi d\theta - mg = 0 \tag{3.55}$$

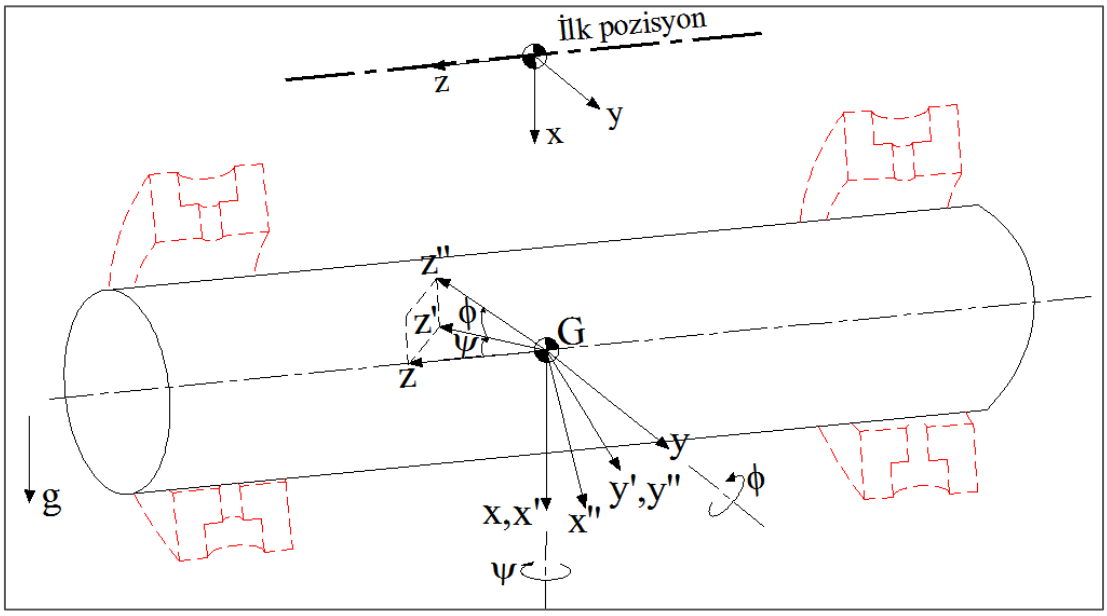
$$m\ddot{y} + \left(c_{yL} + c_{yR}\right)\dot{y} + P_a R^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{L/R} P(\xi,\theta)_L \sin\theta_L d\xi d\theta + P_a R^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{L/R} P(\xi,\theta)_R \sin\theta_R d\xi d\theta = 0 \tag{3.56}$$

$$I_{xx}\ddot{\phi} + (c_{xL}a + c_{xR}b)\dot{x} + (c_{xL}a^2 + c_{xR}b^2)\dot{\phi} + \left(P_a R^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{L/R} P(\xi,\theta)_L \cos\theta_L d\xi d\theta\right) a - \left(P_a R^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{L/R} P(\xi,\theta)_R \cos\theta_R d\xi d\theta\right) b - I_{zz}\dot{\psi}\omega = 0 \tag{3.57}$$

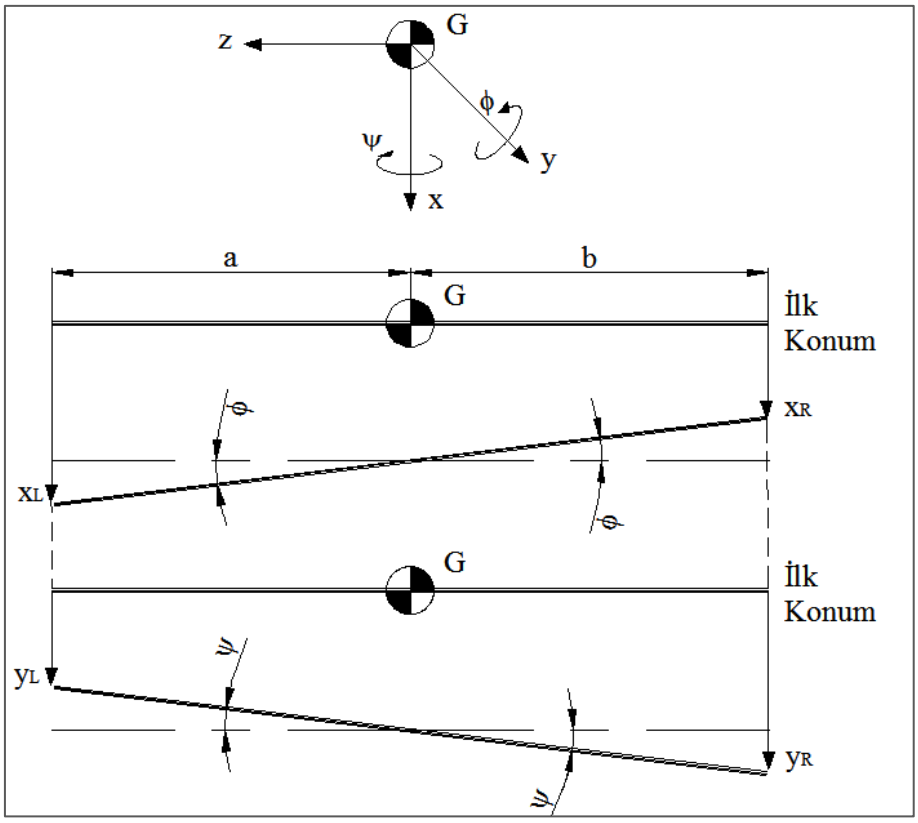
$$I_{xx}\ddot{\psi} + \left(c_{yL}a + c_{yR}b\right)\dot{y} + \left(c_{yL}a^2 + c_{yR}b^2\right)\dot{\phi} + \left(P_a R^2 \int_0^{2\pi}\int_0^{L/R} P(\xi,\theta)_L \sin\theta_L d\xi d\theta\right)a - \left(P_a R^2 \int_0^{2\pi}\int_0^{L/R} P(\xi,\theta)_R \sin\theta_R d\xi d\theta\right)b - I_{zz}\dot{\phi}\omega = 0 \quad (3.58)$$



Şekil 3.6. Aerostatik yatak rotor sistemi ve yatak kuvvetleri [86]



Şekil 3.7. Şaftın hareket eksenleri



Şekil 3.8. Şaftın dönme eksen takımları

3.10. Reynolds Denkleminin Sayısal Çözümü

Aerostatik yataklar ile desteklenmiş yatak-rotor sistemlerinin dinamik davranışlarının hesaplanabilmesi için yataklar üzerine etkiyen basınç kuvvetlerinin hesaplanması gerekir. Basınç kuvvetlerinin hesaplanması için ise Reynolds denkleminin çözülmesi gerekmektedir. Reynolds denkleminin analitik bir çözümünün olmadığı için sonlu farklar [40-88], sonlu elemanlar [88], Newton-Rapson [89] ve pertürbasyon metodu [91-92] gibi farklı nümerik çözüm yöntemleri kullanılmıştır. Ancak bu yöntemlerle çözümün yakınsama hataları yüksek olmaktadır ve çözüm süreleri oldukça uzamaktadır. Bu sebeple Artarda Gevşetme & Sonlu Farklı (Successive Over Relaxation & Finite Difference) ve Diferansiyel Dönüşüm & Sonlu Farklar (Differential Transform & Finite Difference) gibi hibrit çözüm yöntemleri geliştirilmiştir [92]. Bu yüksek lisans çalışması kapsamında dört serbestlik dereceli sistem modeli DD&SF hibrit metodu ile çözülmüştür. Buna göre t zaman kümesinden k tanım kümesine dönüştürülmüş Reynolds denklemi şu şekilde ifade edilebilir;

$$-3A_{i,j} - B_{i,j} - 3C_{i,j} - D_{i,j} + 2\Lambda E_{i,j} + 2\Lambda F_{i,j} + 4\Lambda G_{i,j} + 4\Lambda H_{i,j} = 2\dot{M} \tag{3.59}$$

Buradaki ifadeler sırasıyla şu şekilde tanımlanabilir [93];

$$A_{i,j} = \sum_{l=0}^{k} I_{i,j}(k-l) \sum_{m=0}^{l} \left(\left[\frac{H_{i,j+1}(l-m) - H_{i,j-1}(l-m)}{2\Delta\theta} \right] \left[\frac{\Theta_{i,j+1}(m) - \Theta_{i,j-1}(m)}{2\Delta\theta} \right] \right) \quad (3.60)$$

$$B_{i,j} = \sum_{l=0}^{k} J_{i,j}(k-l) \left[\frac{\Theta_{i,j+1}(l) - 2\Theta_{i,j}(l) - \Theta_{i,j-1}(l)}{\Delta\theta^2} \right] \quad (3.61)$$

$$C_{i,j} = \sum_{l=0}^{k} I_{i,j}(k-l) \sum_{m=0}^{l} \left(\left[\frac{H_{i+1,j}(l-m) - H_{i-1,j}(l-m)}{2\Delta\xi} \right] \left[\frac{\Theta_{i+1,j}(m) - \Theta_{i-1,j}(m)}{2\Delta\xi} \right] \right) \quad (3.62)$$

$$D_{i,j} = \sum_{l=0}^{k} J_{i,j}(k-l) \left[\frac{\Theta_{i+1,j}(l) - 2\Theta_{i,j}(l) - \Theta_{i-1,j}(l)}{\Delta\xi^2} \right] \quad (3.63)$$

$$E_{i,j} = \sum_{m=0}^{l} \left[\frac{H_{i,j+1}(k-l) - H_{i,j-1}(k-l)}{2\Delta\theta} \right] P_{i,j}(l) \quad (3.64)$$

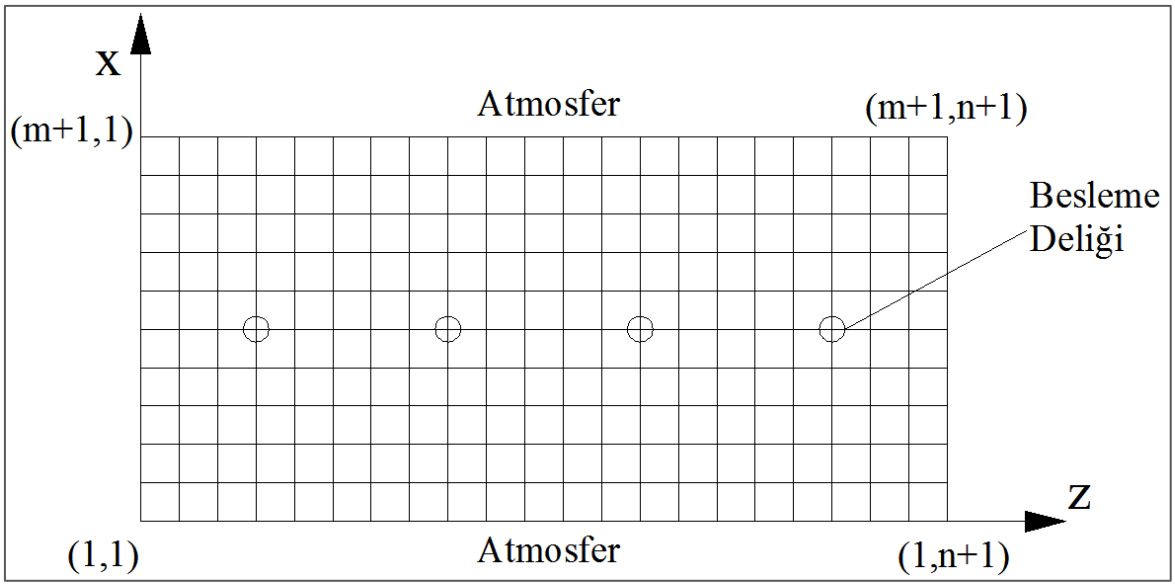
$$F_{i,j} = \sum_{l=0}^{k} \left[\frac{P_{i,j+1}(k-l) - P_{i,j+1}(k-l)}{2\Delta\theta} \right] H_{i,j}(l) \quad (3.65)$$

$$G_{i,j} = \sum_{l=0}^{k} \left[\left(\frac{l+1}{\Delta\tau} \right) H_{i,j}(-l) P_{i,j}(l+1) \right] \quad (3.66)$$

$$H_{i,j} = \sum_{l=0}^{k} \left[\left(\frac{l+1}{\Delta\tau} \right) P_{i,j}(-l) H_{i,j}(l+1) \right] \quad (3.67)$$

Denklem 3.58-3.65 arasında geçen k, l ve m terimleri dönüşüm terimleridir. İteratif yöntemle eşitlik 57 çözülerek her bir grid noktası için basınç ($P_{i,j}$) hesaplanır.

Şekil 3.9'da gösterildiği gibi, radyal aerostatik yatak herhangi bir noktasından açılarak ξ ve θ eksenlerinde gridlere ayrılmıştır. ξ ekseni boyunca 0-L arasında, θ ekseni boyunca ise 0-2π arasında değişmektedir.



Şekil 3.9. Grid görünümü

3.10.1. Başlangıç şartları

Bu yüksek lisans çalışması kapsamında kullanılacak olan farklı orifis sayılı aerostatik yataklar için başlangıç şartları belirlenirken şunlara dikkat edilmiştir.

- Orifis bulunmayan gridlerde başlangıç basıncı atmosfer basıncına eşittir. $(P(\xi,\theta) = P_a)$
- Başlangıç durumunda orifislerin karşısındaki grid noktalarında basınç besleme basıncına eşittir. $\left(P(\xi,\theta)_{Orifis} = P_s\right)$
- Orifis bulunan gridlerde Reynolds denkleminin sağ tarafı kütle debisine eşittir.
- Orifis bulunmayan gridlerde Reynolds denkleminin sağ tarafı sıfıra eşittir.

3.10.2. Sınır şartları

Radyal aerostatik yatakların sağ ve sol tarafının atmosfere açık olduğu düşünülürse, bu noktalarda basınç değerinin sürekli olarak atmosfer basıncına eşit olacağı anlaşılacaktır. Yani ξ ekseninde 0 ve L konumunda her grid noktası için basınç değeri sürekli olarak atmosfer basıncına eşittir $(P(\theta,0) = P(\theta,L) = P_a)$.

Ayrıca radyal aerostatik yatakların herhangi bir noktasından dikdörtgen olacak şekilde açıldığı varsayılırsa, tam orta noktadan (L/2) basınç dağılımının simetrik olması

gerekmektedir. Ayrıca yatağın silindirik şekilden açılarak dikdörtgene çevrilmesi nedeniyle de gridlerin iki ucu birbirine eşit olmalıdır. Yani basınç dağılımı periyodik olacaktır.

3.11. Hareket Denklemlerinin Çözümü

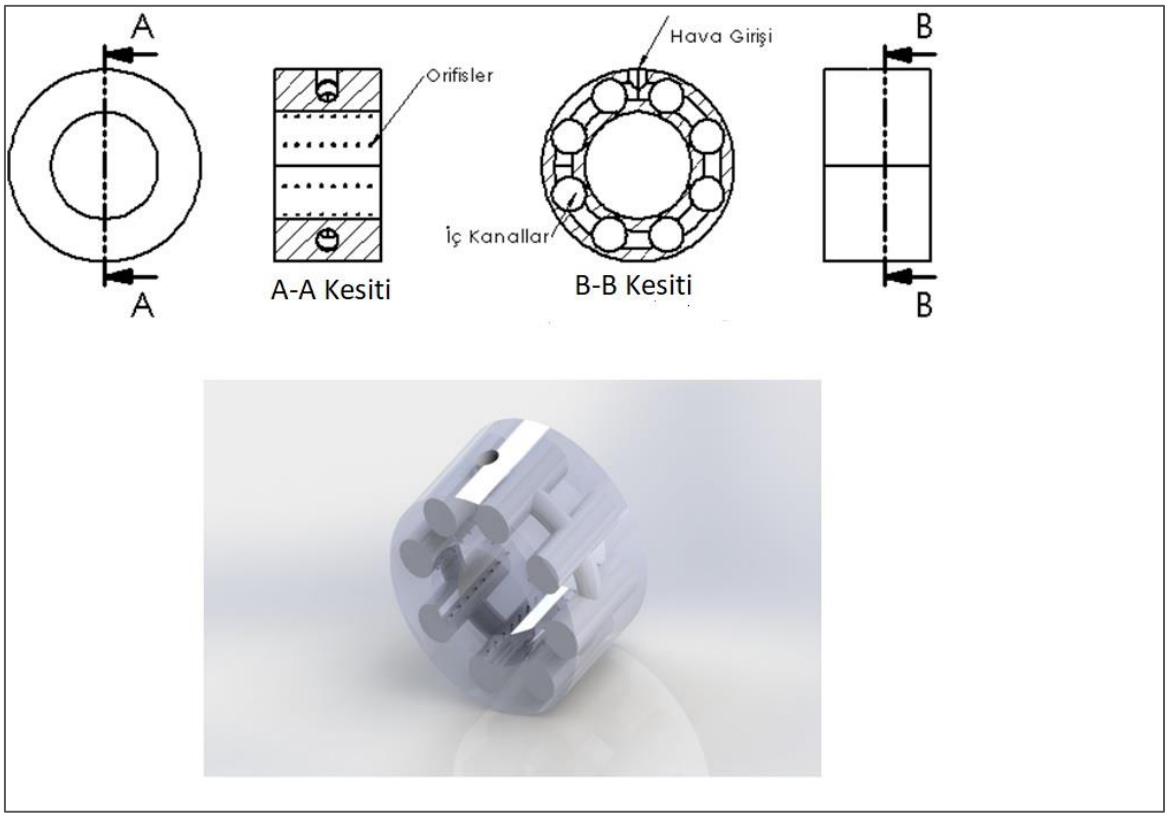
İki ucundan aerostatik yataklar ile desteklenmiş şaft-yatak sistemi için oluşturulan matematiksel model Ek 1'de verilen algoritma ile MATLAB programında çözdürülerek şaftın yatak içerisindeki konumları hesaplanmıştır. Dört serbestlik dereceli matematiksel model çözdürülürken hava film kuvvetlerini ve yatak konumunu eş zamanlı olarak çözümleyen bir algoritma kullanılmıştır (EK 1).

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekanizmalar ve Makine Dinamiği Laboratuvarında bulunan ve daha önceden Tübitak 1001 projesi [84] ile temin edilen deney düzeneği, plastik aerostatik yatakların denenebilmesi için revize edilerek kullanılmıştır. Bu bölümde yapılan yenilikler, yeni tip aerostatik yatak tasarımı ve tasarlanan aerostatik yatakların üretim süreçleri anlatılacaktır.

4.1. Aerostatik Yatak Tasarımı

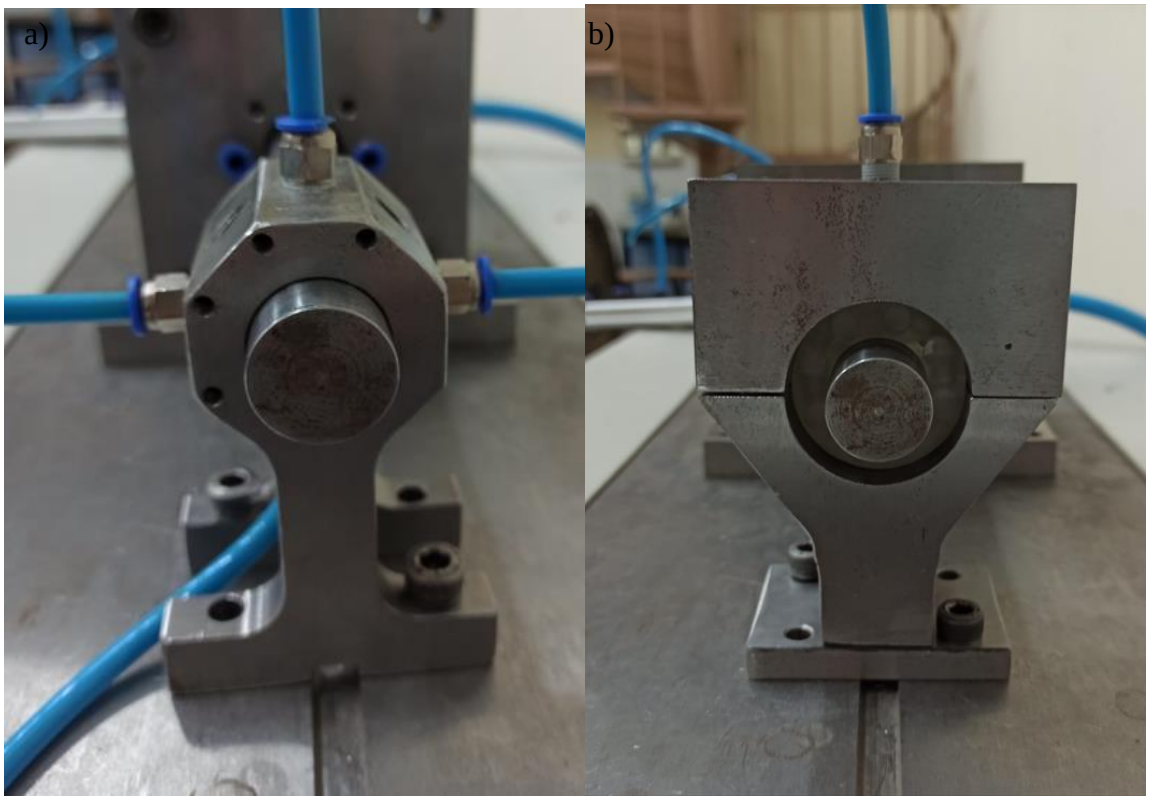
Literatürde görüldüğü gibi aerostatik yatakların yük taşıma kapasitesi ve yatak katılığını artırmak için, şafta etkiyen basınç dağılımı homojenleştirilmeye çalışılmıştır. Basınç dağılımı homojenleştirilirken, tüketilen hava debisinin de arttığı görülmektedir. Bu da sistemin verimini düşürmektedir. Bu nedenle aynı hava debisi ile daha homojen basınç dağılımı elde etmek için yatakların yüzeyinde bulunan orifis sayısı arttırılmaktadır. Ancak bunun da konvansiyonel üretim yöntemleri ile bir limiti bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Çok orifisli aerostatik yatak

Bu yüksek lisans çalışması kapsamında çok orifisli aerostatik yatak tasarımı yapılmıştır. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi tasarlanan aerostatik yatak boy/çap (L/D) oranı 1 olacak şekilde 64 taneye kadar orifis bulundurmaktadır. İçerisinde bulunan hava kanalları vasıtasıyla havanın her bir orifise dağılmasına izin verecek bir tasarım yapılmıştır.

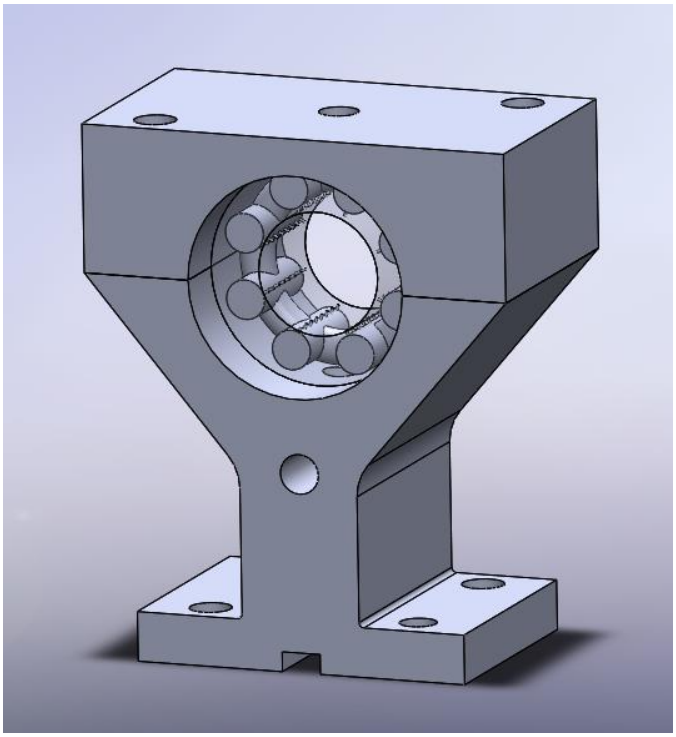
Çok orifisli aerostatik yatak tasarımı yapılırken, pnömatik bağlantıda karmaşıkları önlemek adına tek hava girişi olması gerektiği düşünülmüştür. Şekil 4.2a'da önceki çalışmalarda [94] kullanılan 4 orifisli aerostatik yataklarda 4 hava girişi bulunmasına rağmen 4 adet pnömatik hortum kullanıldığı görülmektedir. Deney süreci boyunca 4-8-16-32 ve 64 orifis bulunan aerostatik yatakların kullanılacağı ve ölçüm almak için de sensörlerin ekleneceği düşünüldüğünde tek hava girişi olmasının pnömatik hortumların ve deney düzeneğindeki diğer bağlantıların karışıklığını arttıracaktır. Bu sebeplerden ötürü şekil 4.2b'de görüldüğü gibi tek bir hava girişi olacak şekilde tasarlanan aerostatik yataklar deney düzeneğindeki karmaşıklığı da önleyecektir.



Şekil 4.2. a) 4 orifisli aerostatik yatak bağlantısı b) 64 orifisli aerostatik yatak bağlantısı

4.2. Yatak Muhafazası Tasarımı

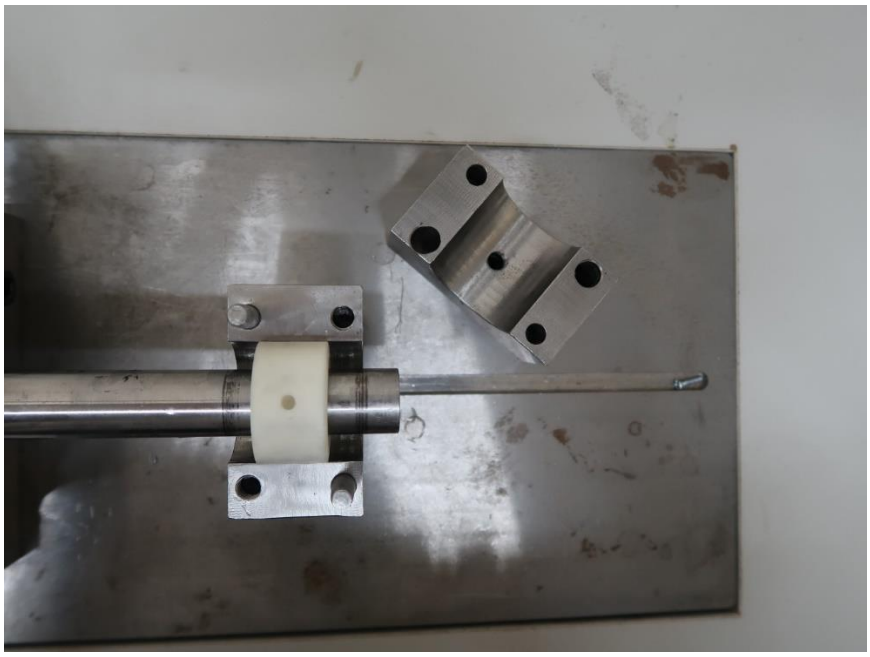
Önceki çalışmalarda [79-95] kullanılan deney düzeneğinin, yeni tasarlanan SLA yöntemi ile üretilmiş aerostatik yataklarla çalıştırılması için, rulmanlı yatakların montajında da sıklıkla kullanılan yatak tasarımdan esinlenilerek, alt ve üst parçalı olarak şekil 4.3'de ki deney düzeneği aparatı tasarımı yapılmıştır. Deney düzeneği ile şaftı destekleyen aerostatik yatağın bağlantısını sağlayacak olan parçanın tasarımı yapılırken, oluşabilecek kaçıklıkları önlemek açısından bağlantı aparatının alt kısmına kama yuvası açılmıştır. Deney düzeneğinde bulunan kama kanalı ile sıkı geçme olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca eksenel kaçıklıkları önlemek için deney düzeneği tablasına çapraz iki ucundan cıvata bağlantısı diğer çapraz uçlardan ise pim ile bağlantı olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Alt ve üst parçadan oluşan deney düzeneği aparatında iki parçayı birleştirmek için de aynı yöntemle bağlantı yapılacak şekilde tasarım yapılmıştır. Böylece eksenel kaçıklıklar önlenmiş olacaktır.



Şekil 4.3. Yatak muhafazası tasarımı

Deney düzeneği aparatında şekil 4.3'de görüldüğü gibi alt ve üstten hava beslemesi yapılacak şekilde 2 adet delik bulunmaktadır. Mevcut tasarımdaki aerostatik yatakta tek hava giriş deliği bulunmasına rağmen ileride oluşabilecek muhtemel farklı tasarımlar da kolaylıkla bu aparat ile desteklenebilecektir.

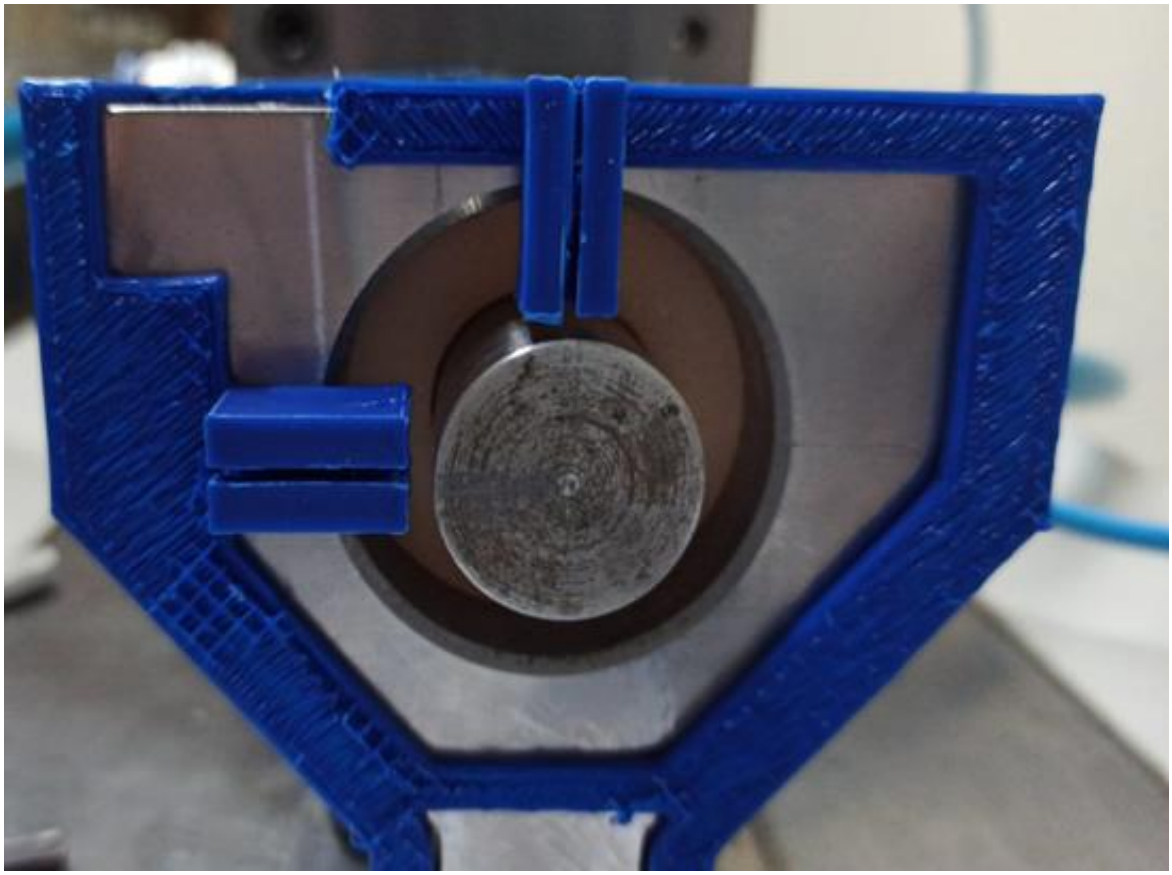
Alt kısım deney düzeneği tablasına bağlanacak, üst kısım açılarak şekil 4.4'deki gibi aradaki yuvaya aerostatik yatak bir kartuş gibi yerleştirilecektir. Bağlantı parçasının ortasında görülen aerostatik hava yatağının farklı boy/çap oranlarında olan versiyonları kullanılacağından, tasarlanan aparatın boyu, aerostatik yatağın boyunun iki katı olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Montajının kolay olması nedeniyle aerostatik yatakların farklı parametreleri deneysel olarak araştırılırken kolayca bağlanabilecektir.



Şekil 4.4. Yatak muhafazası ve aerostatik yatak

4.3. Sensör Tutucu Tasarımı

Deney düzeneği ile yapılacak deneyler boyunca şafttan sensörler vasıtası ile konum bilgileri alınacaktır. Aerostatik yatakların çok düşük radyal boşluklarda çalıştığı düşünüldüğünde, şaftın bu düşük boşluklarda eksenel hareketlerinin ölçümünün de hassas sensörler vasıtası ile yapılması gerekmektedir. Bu nedenle Micro-Epsilon Eddy3300 serisi ES1/200 yakınlık ölçer sensörler kullanılmıştır. Doğrusallığı ±2 μm olan bu sensörlerin çözünürlüğü 0.05 μm ve çalışma aralığı 0.1mm-1.4mm arasındadır. Bu sensörler Eddy (Faucault) akım prensibine göre çalıştığından manyetik alandan etkilenmektedir. Dolayısıyla sensörler deney düzeneği üzerinde konumlandırılırken, şaftın konum verilerini alacağı düşey ve yatay eksende 0.1-1.4mm mesafede bulunmalı ve bu mesafelerde şafttan başka manyetik alan oluşturacak bir metalin bulunmaması gerekmektedir.



Şekil 4.5. Sensör tutucu

Bu kapsamda şekil 4.5'de gösterilen sensör tutucu tasarımı yapılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi yatak muhafazasına yandan geçecek şekilde tasarlanan sensör tutucular sistemle birlikte titreşim yapacaktır. Üzerlerinde bulunan sensör konumlarını belirleyecek kısımlar sayesinde şafta istenilen 0.1-1.4mm mesafelerde yaklaşacak ve şaftın bağıl konumunu iki eksende ölçebilecektir. Manyetik alan oluşturmaması amacıyla da eklemeli imalat yöntemlerinde FDM (Fused Deposition Melting) yöntemi ile PLA (Polylactic Acid) malzemeden üretilmiştir.

4.4. Eksenel Yatak ve Türbinli Şaft ile Birlikte Deney Düzeneği

Kullanılacak olan deney düzeneğinde iki tarafından çok orifisli aerostatik yataklarla desteklenecek şaft şekil 4.6'da görüldüğü gibi üzerinde türbin bulundurmaktadır. Önceki çalışmalarda da kullanılan bu şaft, üzerinde bulunan türbinin dışardan verilen hava ile döndürülmesi ile dönme hareketini sağlayacaktır.



Şekil 4.6. Üzerinde türbin bulunan şaft

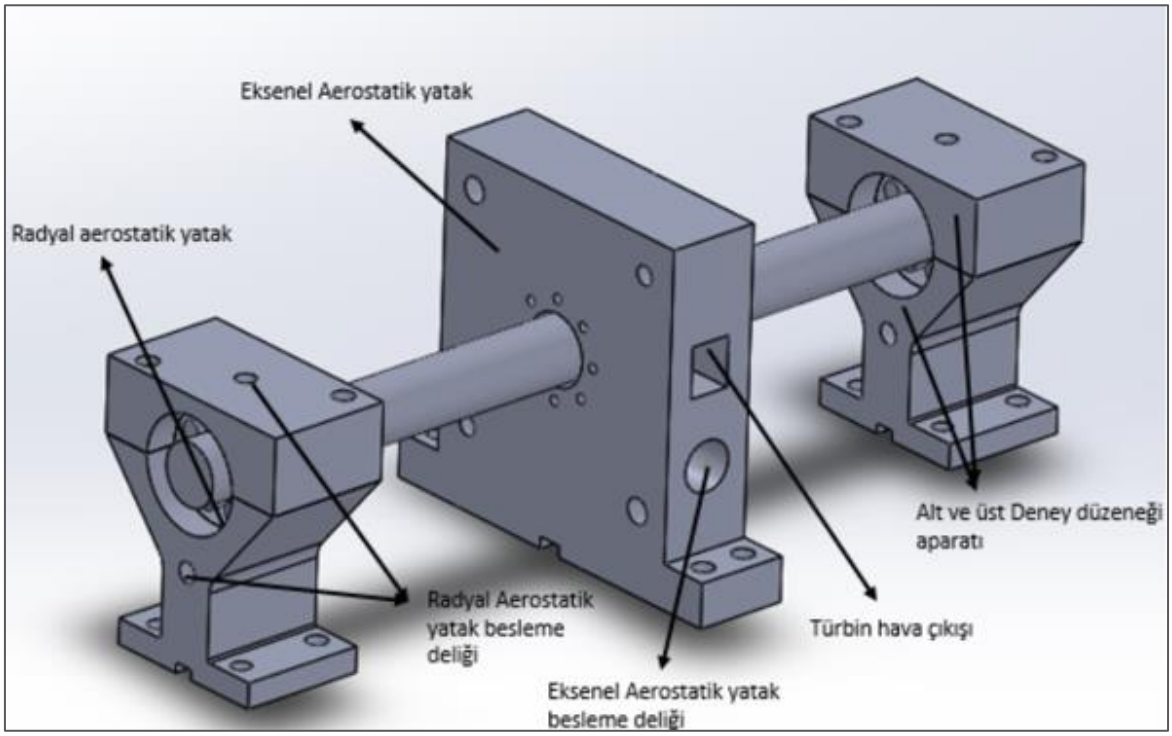
Şaftın eksenel hareketlerini önlemek ve türbine havanın iletimini sağlamak için şekil 4.7'de görülen eksenel hava yatağı ve türbin muhafazası görevi gören parça kullanılmıştır. Bu parça üzerinde bulunan 4 adet hava girişi türbin üzerine havanın karşılıklı olarak çarpmasını sağlayarak şaftın eksenel hareketlerini önleyecektir. Ayrıca parça üzerinde bulunan nozul sayesinde kompresörden beslenen hava türbine çarparak rotorun dönmesini sağlayacaktır.



Şekil 4.7. Türbin muhafazası

Yukarıda belirtilen parçalar ile birlikte deney düzeneğinin katı modeli şekil 4.8'de gösterildiği gibi olacaktır. Şekilde görüldüğü gibi şaft iki tarafından radyal aerostatik yataklarla desteklenmektedir. Aerostatik yataklar deney düzeneğine üzerinde iki tane hava giriş deliği bulunan yatak muhafaza parçası ile bağlanmıştır. Üzerinde bulunan türbine

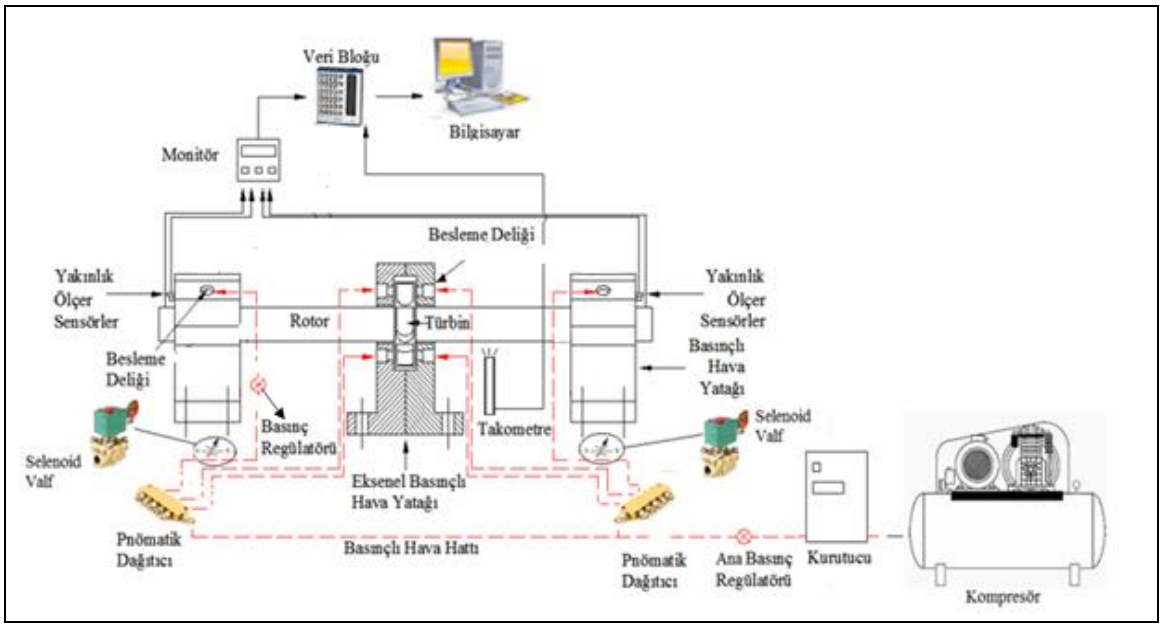
havanın iletilmesi ve şaftın eksenel hareketlerinin önlenmesi için türbin muhafazası bulunmaktadır.



Şekil 4.8. Deney düzeneği katı modeli

Ayrıca deney düzeneğinde radyal ve eksenel aerostatik hava yataklarına, dolayısıyla türbine basınçlı hava iletmek için pnömatik hat tasarımı yapılmıştır [78]. Bu pnömatik hat Şekil 4.9'da görüldüğü gibi; pistonlu bir kompresör, hava kurutucu, basınç regülatörü, ayırıcı ve yönlendirici vanalardan ve akış kısıcılardan oluşmaktadır. Pistonlu kompresör ile basınçlandırılan hava öncelikle kurutucuya girer. Kurutucunun içerisindeki filtreler sayesinde kompresörden gelen havanın içerisindeki toz, nem ve diğer parçacıklardan arındırılmaktadır. Basınçlı hava filtrelendikten sonra ana basınç regülatörüne girerek deney koşulları için basıncı ayarlanır ve pnömatik dağıtıcılar aracılığıyla eksenel ve radyal doğrultudaki besleme deliklerine iletilmektedir.

Sonuç olarak deney düzeneğinin tasarlanan tüm parçalarının montajı yapılmıştır. Bu deney düzeneğinin yukarıda belirtilen avantajları sayesinde SLA yöntemi ile üretilecek olan aerostatik yataklar hızlı bir şekilde deney düzeneğine dahil edilip istenilen parametrelerin yatak performansı üzerine etkileri incelenebilecektir.



Şekil 4.9. Deney düzeneği pnömatik hat bağlantısı

4.5. Farklı Tip Yatak Geometrilerinin Belirlenmesi

Bu tez çalışması kapsamında orifis sayısı ve orifis diziliminin aerostatik yatakların yük taşıma kapasitesi ve yatak katılıklarına etkileri, farklı yatak geometrisi parametreleri ve çalışma koşulları için araştırılmıştır. Simülasyonlarda, farklı besleme deliklerine sahip aerostatik yataklar kullanılmış ve farklı giriş basıncı değerleri için benzetim yapılmıştır. Havanın termodinamik özellikleri ve çalışma koşulları çizelge 4.1'de verilmiştir. Çalışma koşulları tüm aerostatik yataklar için aynı olacaktır.

Çizelge 4.1. Havanın termodinamik özellikleri ve çalışma koşulları

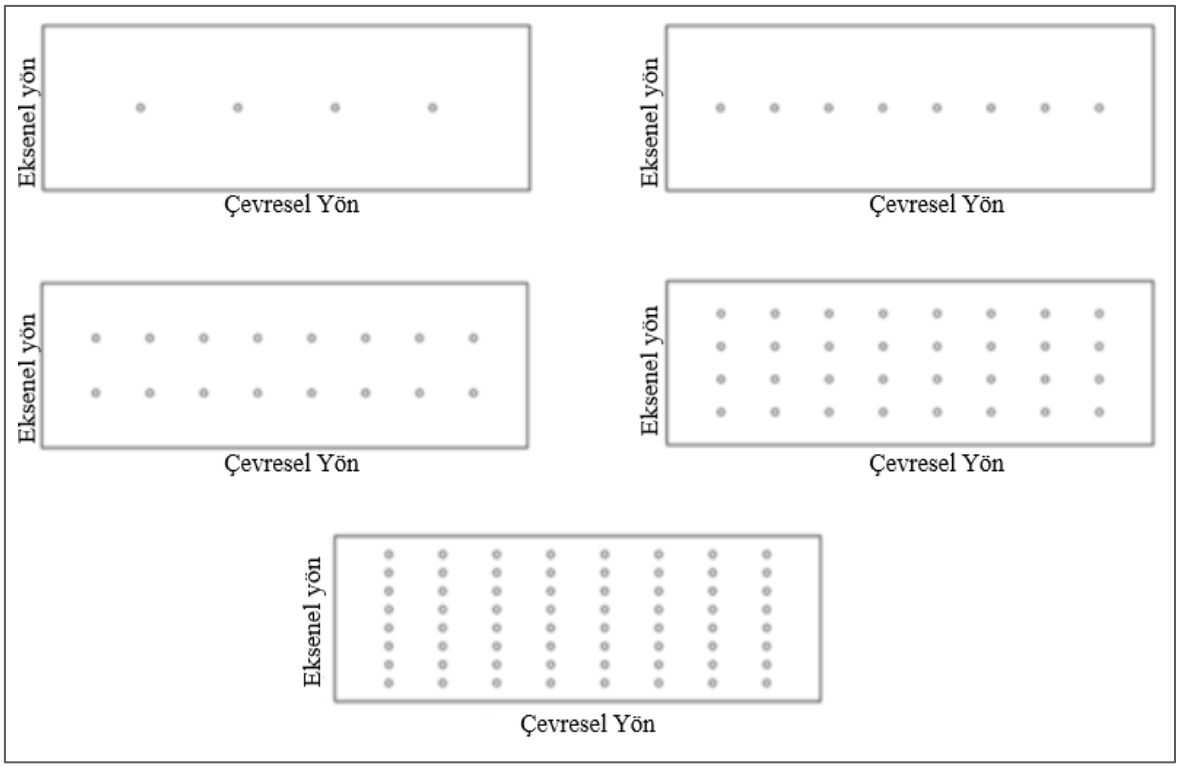
Parametre	Değer
Aerostatik yatak çapı (D)	25 mm
Aerostatik yatak boyu (L)	25 mm
Radyal boşluk (c)	75 μm
Rotorun boyu (L_r)	380 mm
Şaft kütlesi (m)	1.6 kg
Atmosfer basıncı (P_a)	$1.013x10^5 N/m^2$
Havanın dinamik viskozitesi (μ)	18.4×10^{-6} Pa.s
Hava sıcaklığı (T^0)	298.15 K
Havanın yoğunluğu (ρ)	$1.204\ kg/m^3$
Evrensel gaz sabiti (R^0)	287.6 J/kg°K

Aerostatik yatakların geometrik özelliklerinin yatak performanslarına olan etkilerinin araştırılması için farklı sayıda orifis içeren 5 adet orifis tasarımı yapılmıştır. Bu yatakların çevresel ve eksenel yöndeki orifis sayıları çizelge 4.2'de gösterildiği gibi olacaktır. Çizelge 4.2'de görülen orifis çapları tüm yataklarda toplam hava debisinin eşit olacağı şekilde belirlenmiştir. Dolayısıyla 64 orifisli modelde en düşük orifis çapı olurken, 4 orifisli modelde en yüksek orifis çapı olmaktadır. Burada yatak isimleri belirlenir BHY (Basınçlı hava yatağı) ve orifis sayısı olacak şekilde düşünülmüştür.

Çizelge 4.2. Farklı modeller için geometrik özellikler

Yatak Tipi	Orifis Sayısı	Orifis Çapı (μm)
BHY04	4	1000
BHY08	8	750
BHY16	16	530
BHY32	32	365
BHY64	64	250

Çizelge 4.2'de geometrik özellikleri verilen yatakların bir ucundan açarak dikdörtgen hale geldiğini düşündüğümüzde orifislerin konumları şekil 4.10'da gösterildiği gibi olacaktır. Burada görüldüğü gibi model 1'de çevresel yönde toplam 4, model 2'de çevresel yönde 8, model 3'de eksenel yönde bulunan 2 sıra boyunca toplam 16, model 4'de 4 sıra boyunca toplam 32 ve model 5'de toplam 64 tane olacak şekilde orifis bulunmaktadır.



Şekil 4.10. Tüm modeller için orifis yerleşimi

5. İMALAT YÖNTEMİ VE PARAMETLERİNİN BELİRLENMESİ

Bölüm 4.1'de tasarlanan yeni tip aerostatik yatağın konvansiyonel imalat yöntemleri ile üretilmesi çok maliyetli ve zor olacağından yatağın üretimi yapılırken son zamanlarda hızla gelişmekte olan üretim teknolojilerinden biri olan eklemeli imalat yöntemi kullanılacaktır.

5.1. İmalat Yöntemi Belirlenmesi

Eklemeli imalat yöntemlerinde genellikle yüzeyler çok düzgün olmadığı gibi, çoğu eklemeli imalat yönteminde üretilen parçalar ikincil işleme tabii tutulmaktadır. Ancak aerostatik yatakların mikron mertebesindeki boşluklarda çalıştığı düşünüldüğünde ikincil işlemler boyut toleransları açısından risk teşkil etmektedir. Ayrıca yatakların şaft ile bağlantılı yüzeylerinde yüzey pürüzlülüğü yüksek olursa, bu bölgelerde havanın sürekliliği değişeceğinden rotoru taşımama ihtimali artacaktır. Böylece yatağın yük taşıma kapasitesi düşecek ve sistemin verimliliği azalacaktır. Onun için üretilen aerostatik yatakların yüzey kalitelerinin çok düzgün olması gerekmektedir. Bu nedenlerden dolayı çizelge 5.1'de görüldüğü gibi FDM ile üretilen ve SLA ile iki farklı reçineden üretilen yatakların yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüklerinde aritmetik ortalama (R_a) ve tepenin en yüksek noktası ve vadinin en dip noktası arasındaki fark olan (R_t) değerleri incelenmiştir. Çizelge 5.1'de ölçüm sonuçları gösterilen sonuçlar neticesinde SLA ile üretilen yatakların yüzey pürüzlülüklerinin FDM ile üretilen yataklara göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca iki tip reçine arasında yaklaşık 2.5 kat fark bulunmaktadır.

Çizelge 5.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları

FDM			SLA 1. Reçine			SLA 2. Reçine		
Derece	R_a (µm)	R_t (µm)	Derece	R_a (µm)	R_t (µm)	Derece	R_a (µm)	R_t (µm)
0°	16.362	100.3	0°	3.948	24.34	0°	1.135	10.88
45°	15.015	66.83	45°	3.606	32.16	45°	1.436	14.38
90°	18.609	132.16	90°	4.066	20.39	90°	1.181	8.91
135°	19.38	110.65	135°	3.262	20.61	135°	1.461	11.96
180°	17.391	121.87	180°	3.694	22.05	180°	1.731	13.5
225°	15.54	101.13	225°	4.657	59.45	225°	1.678	13.29
270°	16.312	99.52	270°	4.501	69.62	270°	1.898	41.97
315°	16.631	73	315°	4.332	57.6	315°	2.074	13.04
Ort.	16.905	100.68	Ort.	4.00825	38.2775	Ort.	1.57425	15.9913

5.2. Reçine Tipinin Belirlenmesi

Çizelge 5.1'de tip 1 ve tip 2 olarak gösterilen reçine özellikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Burada görüldüğü gibi iki reçinenin arasında ciddi mukavemet farkları bulunmaktadır. Ancak buradaki yüzey pürüzlülüğünü etkileyen reçinelerin mekanik özellikleri değil viskozite ve yoğunluk gibi fiziksel özellikleridir.

Çizelge 5.2. Reçine özellikleri

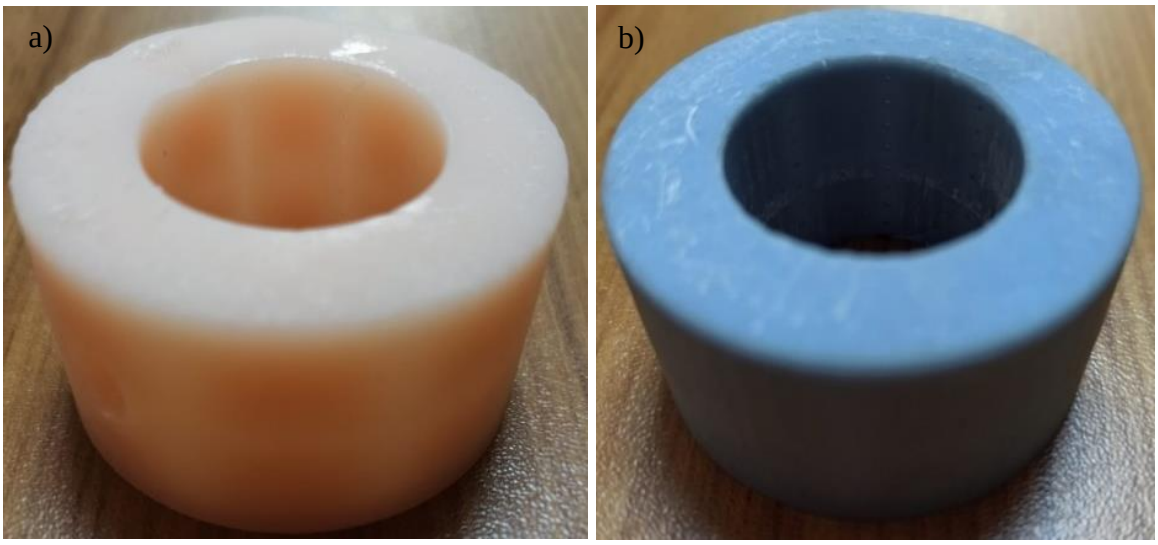
Reçine Parametresi/Reçine Tipi	Reçine Tip 1	Reçine Tip 2
Katılaşma Dalga Boyu	405nm	405nm
Sertlik (D)	79	88
25°C'de viskozitesi	525-575 mPa.s	150-200 mPa.s
Sıvı Yoğunluğu	1.15-1.20 g/cm^3	1.05-1.14 g/cm^3
Çekme Mukavemeti	21-27 MPa	36-52 MPa
Kopma Uzaması	11-17 %	11-20 %

Aerostatik yataklarda yüzey pürüzlülüğünün çok fazla olması yatak-rotor yüzeyindeki havanın sürekliliğini önleyecektir ancak uygun ölçülerde yüzey pürüzlülüğünün olması yatak performansını iyileştirebilir [96]. Bu nedenle Çizelge 5.2'de gösterilen reçine tiplerinin iki ile de aerostatik yatak üretilmiştir. Ancak tip 1 olarak gösterilen reçinenin yoğunluğu ve viskozitesinin tip 2'ye göre çok daha yüksek olması nedeniyle yatakların iç yüzeylerinde bulunan 250 μm çaplı orifislerin üretimi mümkün olmamıştır. Yüksek viskozite ve yoğunluğa sahip olan sıvı reçine bu deliklerden tam olarak temizlenemediği için üretimden sonra buralarda kalan reçineler şekil 5-1a'da görüldüğü kürlenmiş ve orifisler kapalı olarak kalmıştır. Şekil 5.1'b de ise 2. tip reçine ile üretilen aerostatik yatak görünmektedir. Herhangi bir temizleme işlemi yapılmadan üretilen yatak tüm orifisler açık olacak şekilde imal edilebilmiştir.

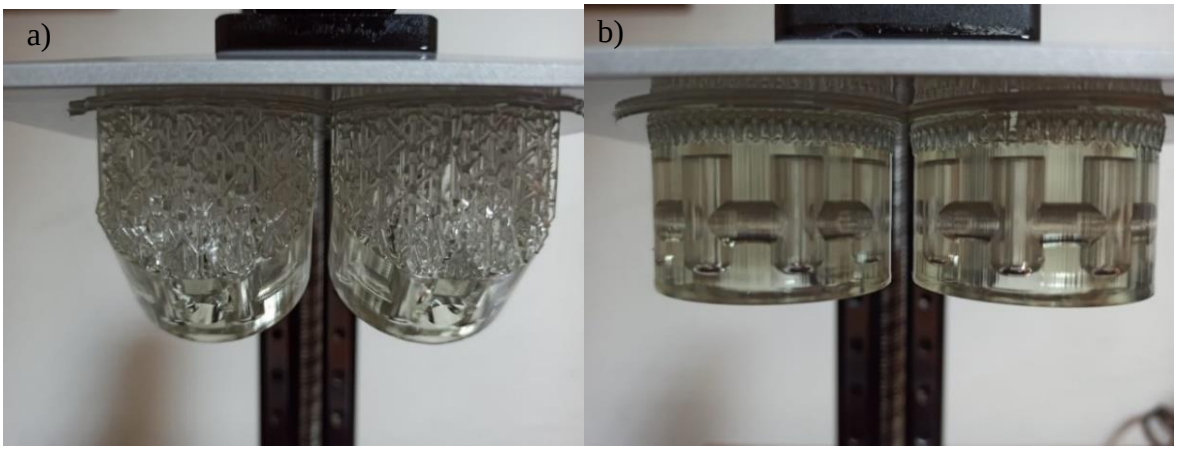
5.3. Baskı Yönünün Belirlenmesi

SLA ile parça üretilirken dikkat edilmesi gereken hususlardan en önemlisi boyutların doğruluğudur. Sıvı reçine tankının içinde fotopolimerizasyon ile katman katman üretilen parçalarda üretimden sonra genellikle mikron mertebesinde çekmeler meydana gelmektedir. Aerostatik yatakların çalışmasında mikron mertebelerindeki radyal boşluk değerleri sistemin çalışmasını ciddi etkileyeceğinden tam boyutun tutturulması önemlidir. Bu bağlamda,

üretilecek olan parçanın şekil 5.2'de gösterildiği gibi farklı oryantasyonlarda üretimi yapılmıştır ve boyutların ana boyuta en yakın olduğu oryantasyonun minimum temas yüzeyi ya da maximum platform teması şeklinde imalat ile mümkün olduğu görülmüştür. Ancak minimum temas yüzeyi ile üretildiğinde iç kısımlara da destek malzemesi atılacağından iç yüzeylerin yüzey kalitesi düşmektedir. Ayrıca iç yüzeylerde bulunan orifislerin konumlarında destek malzemesi olması durumunda orifisler kapalı olabilmektedir. Böylece havanın yatak-rotor arası boşlukta dağılması engelleneceğinden en uygun üretim yöntemi Z ekseninde düz üretim olarak belirlenmiştir.



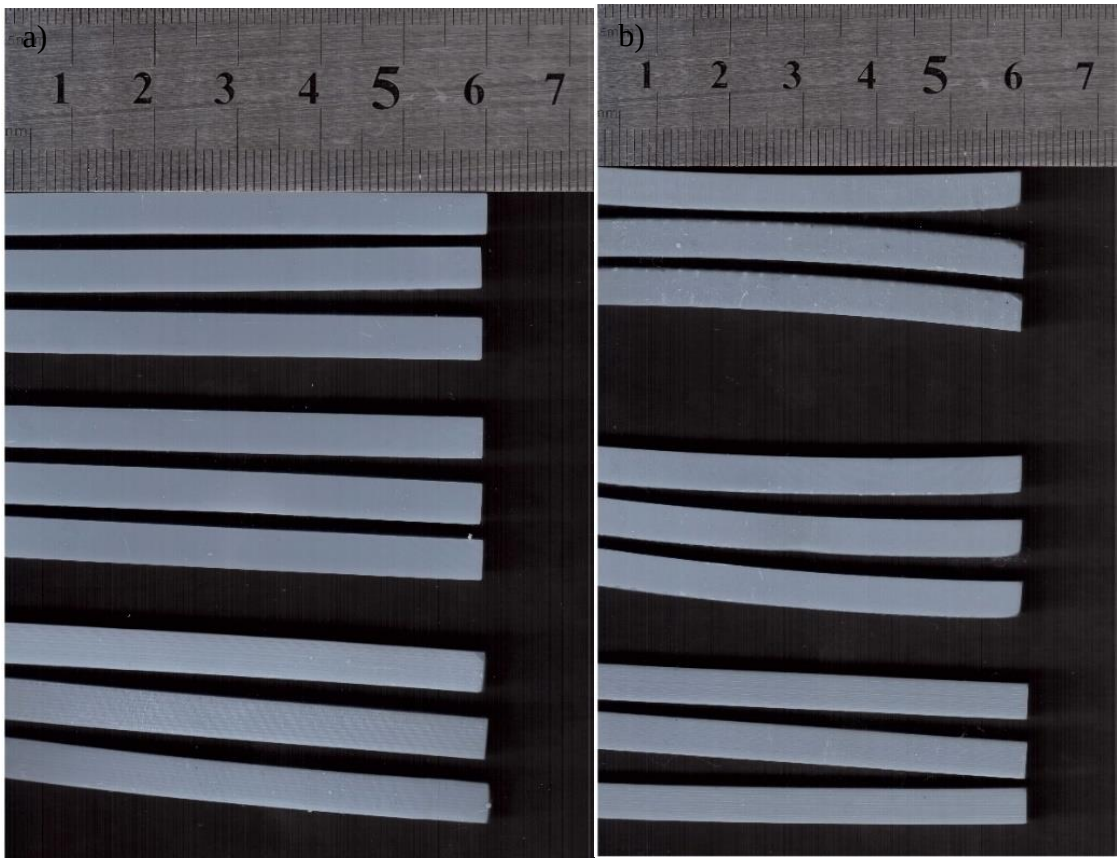
Şekil 5.1. Farklı reçineler ile üretilen aerostatik yataklar a) Reçine tip 1 b) Reçine tip 2



Şekil 5.2. Farklı baskı yönleri ile üretim a) minimum temas b) maksimum temas

5.4. Boyut Doğruluğunun Tutturulması

Baskı yüzeyi ile aynı eksende üretilmesi kararlaştırılan parçanın üretimden sonraki çekmesini incelemek için X,Y ve Z eksenleri doğrultusunda üçer tane 60mm boyunda çubuklar üretilmiş (Şekil 5.3), her eksende meydana gelen kürleme öncesi (çizelge 5.3.) ve kürleme sonrası (çizelge 5.4) çekmeler ölçülmüştür ve ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekil 5.3'de görüldüğü gibi parçalarda kürleme sonrası çekmeler meydana gelmektedir. Meydana gelen çekmeler sonucunda parçanın mukavemet değerleri istenilen değerlere çıkmasına rağmen boyutlarında çekmeler meydana gelmektedir. Ayrıca şekil 5.3b'de görüldüğü gibi özellikle –x ve –y eksenleri doğrultusunda üretilen parçalar üretildikten sonra kürleme yapıldığında eğilmeye başlamaktadır. Tabloda çubuklar için ölçülen hata oranları aerostatik yatakların SLA ile üretiminde de aynı şekilde meydana gelebileceği için aerostatik yatakların tasarımlarının boyutları bu oranlar doğrultusunda değiştirilmiştir. Yatakların boyutları radyal boşluğun tam olarak doğru tutturulması için büyütülmüş ve iç çap tam 25mm olacak şekilde üretilmiştir.



Şekil 5.3. Örnek parça a) Kürlenmemiş b) Kürlenmiş (Üst:-x Ekseni, Orta: -y Ekseni Alt:-z Ekseni)

Çizelge 5.3. Kürleme öncesi ölçümler

	-x Ekseni	-y Ekseni	-z Ekseni
Ölçüm 1	59.77 mm	59.70 mm	60.01 mm
Ölçüm 2	59.77 mm	59.71 mm	59.98 mm
Ölçüm 3	59.78 mm	59.68 mm	60.02 mm
Ortalama Değer	59.773 mm	59.70 mm	59.99 mm
% Hata	-0.38	-0.5	0

Çizelge 5.4. Kürleme sonrası ölçümler

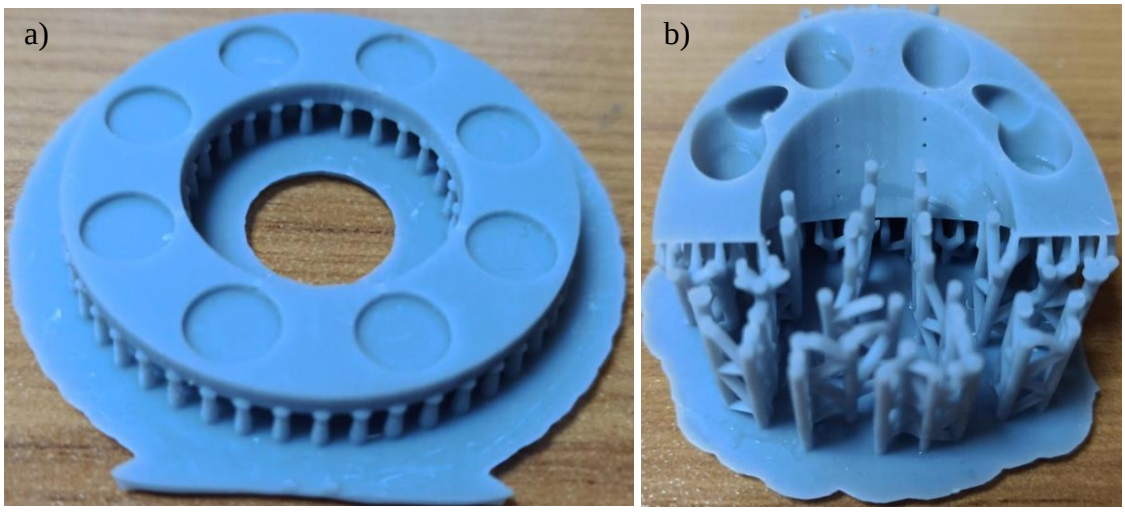
	-x Ekseni	-y Ekseni	-z Ekseni
Ölçüm 1	59.66 mm	59.62 mm	60.01 mm
Ölçüm 2	59.67 mm	59.54 mm	59.97 mm
Ölçüm 3	59.65 mm	59.58 mm	60.02 mm
Ortalama Değer	59.66 mm	59.58 mm	60.00 mm
% Hata	-0.56	-0.7	0

5.5. Hatalı Üretilen Parçalar ve Hata nedenleri

SLA yöntemi ile üretim yaparken 90 % gibi yüksek oranlarda düzgün baskı alınabildiği gibi bazı durumlarda hatalı ürünler alınabilmektedir. Bu hatalardan en çok meydana geleni baskı yüzeyine ilk katmanın yapışmamasıdır. İlk katmanın yapışmaması durumunda baskı, reçine havuzunun alt kısmında bulunan FEP filme yapışmaktadır. Bu durumda tek bir katmanda tüm üretimin yapıldığı gibi filme yapışık bir parça üretimi olmaktadır.

Hatalardan bir diğeri de üretim esnasında cihazın çalışmasının elektrik kesilmesi gibi çevresel nedenlerden dolayı kapanmasıdır. Bu durumda parçalar şekil 5.4'de görüldüğü parçalar yarım kalmaktadır. Şekil 5.4a'da maksimum baskı yüzeyi teması ile üretilen aerostatik yatak, 5.4b'de ise minimum baskı yüzeyi teması ile üretilen aerostatik yatak gösterilmektedir.

Şekil 5.5'de ise 45° açı ile minimum baskı yüzeyi teması ile üretilen parça görülmektedir. Görüldüğü gibi parçanın iç yüzeyinde eksenel hat boyunca bulunan 8 adet orifisin bazıları, bu bölgelere destek malzemesi denk geldiği için kapalı olmuştur. Bu durumda dışardan beslenen hava yatak yüzeyine iletilemeyeceği için aerostatik yatak kullanılamamaktadır.

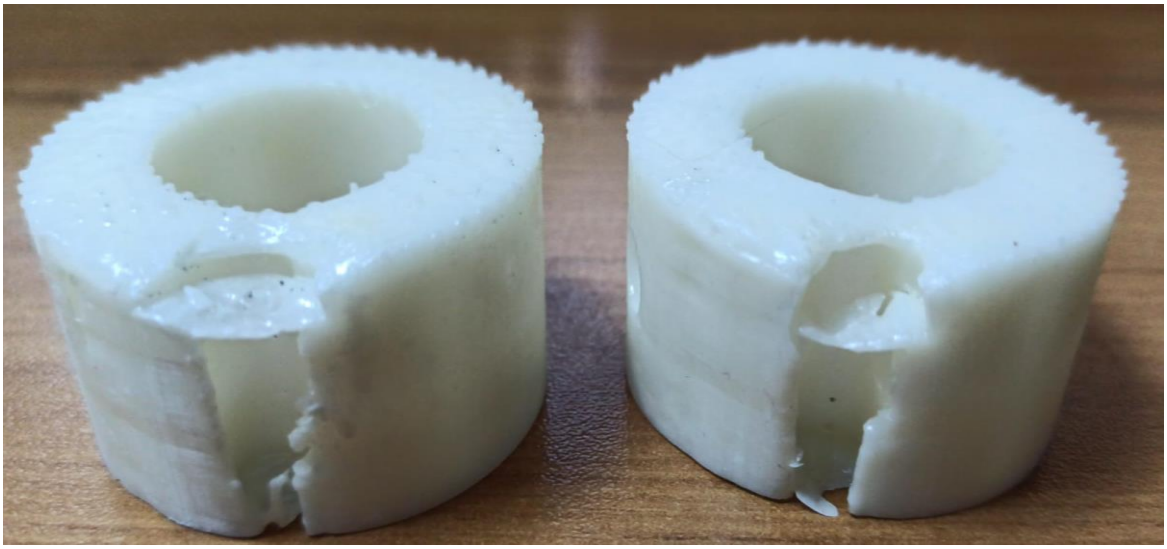


Şekil 5.4. Hatalı üretilen parçalar a) Maksimum baskı yüzeyi teması b) Minimum baskı yüzeyi teması

SLA yöntemi ile üretim yapılırken meydana gelen hatalardan bir diğeri ise, sıvı reçine havuzunun alt kısmında bulunan FEP filminin kirlenmesi ve ya deforme olması gibi sebeplerden ortaya çıkan, ultraviyole ışığın üst katmana geçememesinden oluşur. Şekil 5.6'da gösterilen parçalar, iki ayrı üretim sonucu meydana gelmiştir. Görüldüğü gibi FEP filmin hasar gören alanı boyunca ultraviyole ışık reçineye nüfuz edemediğinden aynı bölgede üretim yapılmamış ve parça yarım kalmıştır.

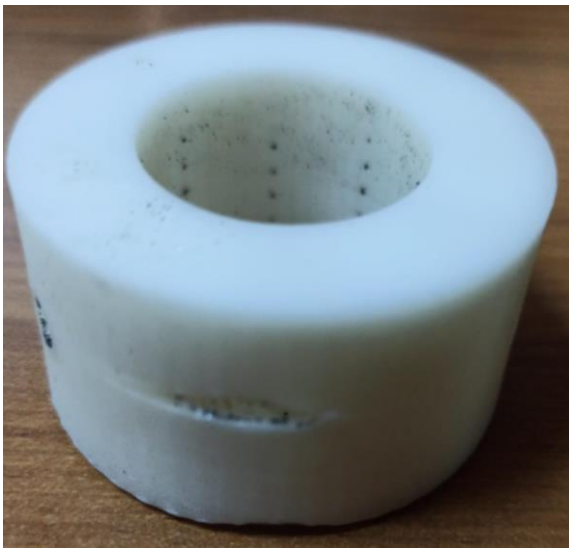


Şekil 5.5. 45° açı ile üretilmiş parça (İç orifisler kapalı)



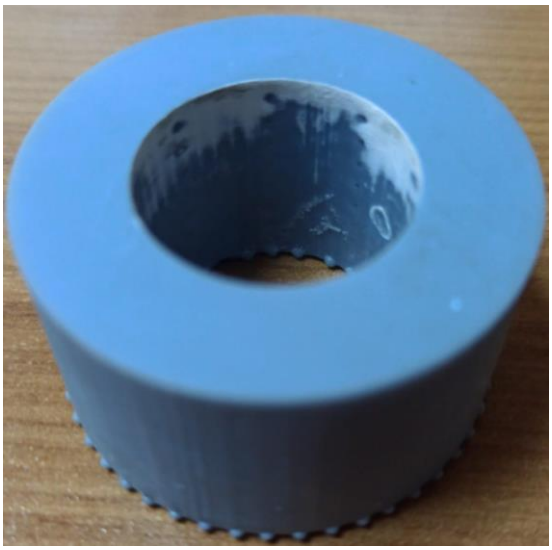
Şekil 5.6. FEP filmi deformasyonu sonucu oluşan hata

Üretim hatalarından bir diğeri ise üretim sırasında katman başına düşen ultraviyole ışık süresinin az olmasıdır. Bu durumda bazı katmanlar reçine içinde homojenliğin olmaması nedeniyle tam anlamıyla kürlenememektedir. Sonuç olarak bazı katmanların boş olarak üretildiği son ürünler meydana gelmektedir. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi bu hata sadece bazı katmanların üretilememesine neden olmaktadır. Ancak aerostatik yatak tasarımında iç kanallar ve hava sürekliliği düşünüldüğünde bu hatalı parçaların kullanılması mümkün olmamaktadır.



Şekil 5.7. Katmanın ultraviyole ışığa maruz kalma süresi hatası

SLA yöntemi ile üretilen parçalar, üretimden sonra son işlem olarak kürleme işlemine tabi tutulmaktadır. Kullanılan reçineler fotopolimer malzeme olduğundan ultraviyole ışık ile kürlenmektedir. Dolayısıyla bir ultraviyole ışık kaynağı kullanılması gerekmektedir. Ultraviyole ışık kaynağı olarak, ultraviyole ampuller kullanılabileceği gibi güneş ışığı da kullanılabilir. Ancak kürleme işleminin süresi çok önemlidir. Az kürleme olduğunda parçanın mukavemet değerleri düşeceği gibi çok kürleme yapıldığında da parçalar gevreyerek kırılgan hale gelmektedir. Şekil 5.8'de aşırı kürlenmeye maruz kalmış bir parça görülmektedir. Buradan kürleme sonucunda mekanik özellikleri değişen parçaların fiziksel özelliklerinin de değiştiği anlaşılmaktadır. Görüldüğü gibi aşırı ultraviyole ışığa maruz kalan bölgeler beyazlamış adeta yanmış gibi görünmektedir.



Şekil 5.8. Aşırı kürleme sonucu oluşmuş yanmalar

6. BULGULAR, YORUMLAR VE TARTIŞMA

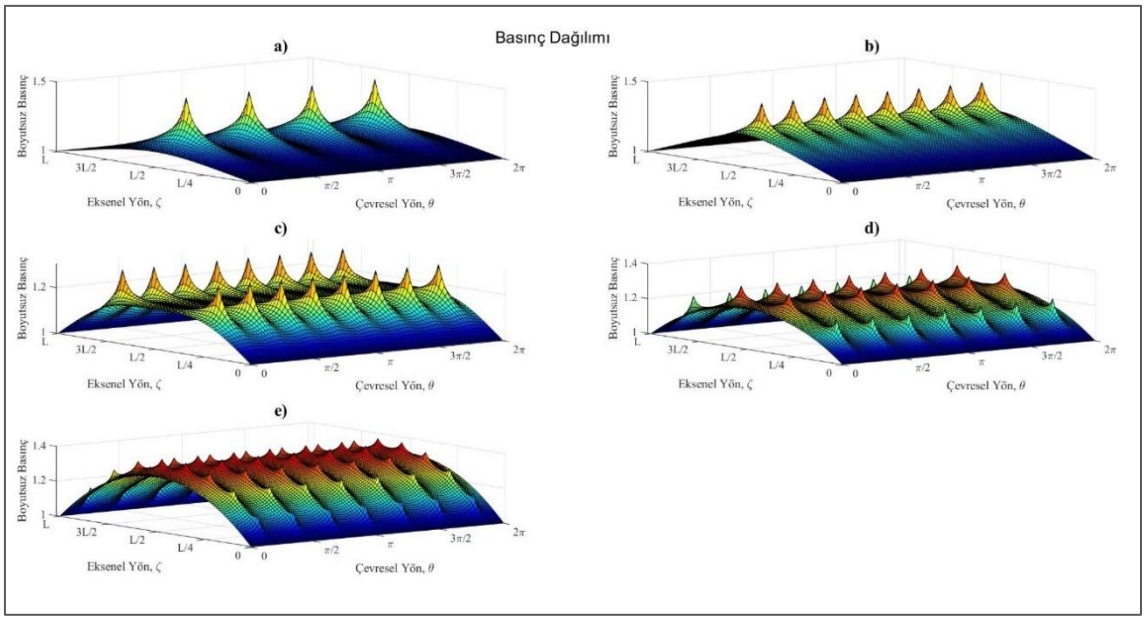
Simülasyonlar sırasında DD&SF hibrit metodu kullanılarak denklem 3.47'de verilen boyutsuz formdaki Reynolds denklemi çözdürülerek şaft ve yatak yüzeyleri arasındaki basınç dağılımı hesaplanmıştır. DD&SF hibrit çözüm metodu kullanılırken aerostatik yatak uniform ağ ile ayrıklaştırılmıştır.

4-8-16 orifisli yataklar için 64x96 (eksenel ve çevresel eksenlerde) düğüm ile uygun çözümler alınırken, 32 ve 64 orifisli yataklar için 64x96 düğüm yetersiz kaldığından 96x128 düğüm kullanılarak basınç dağılımı hesaplanmıştır.

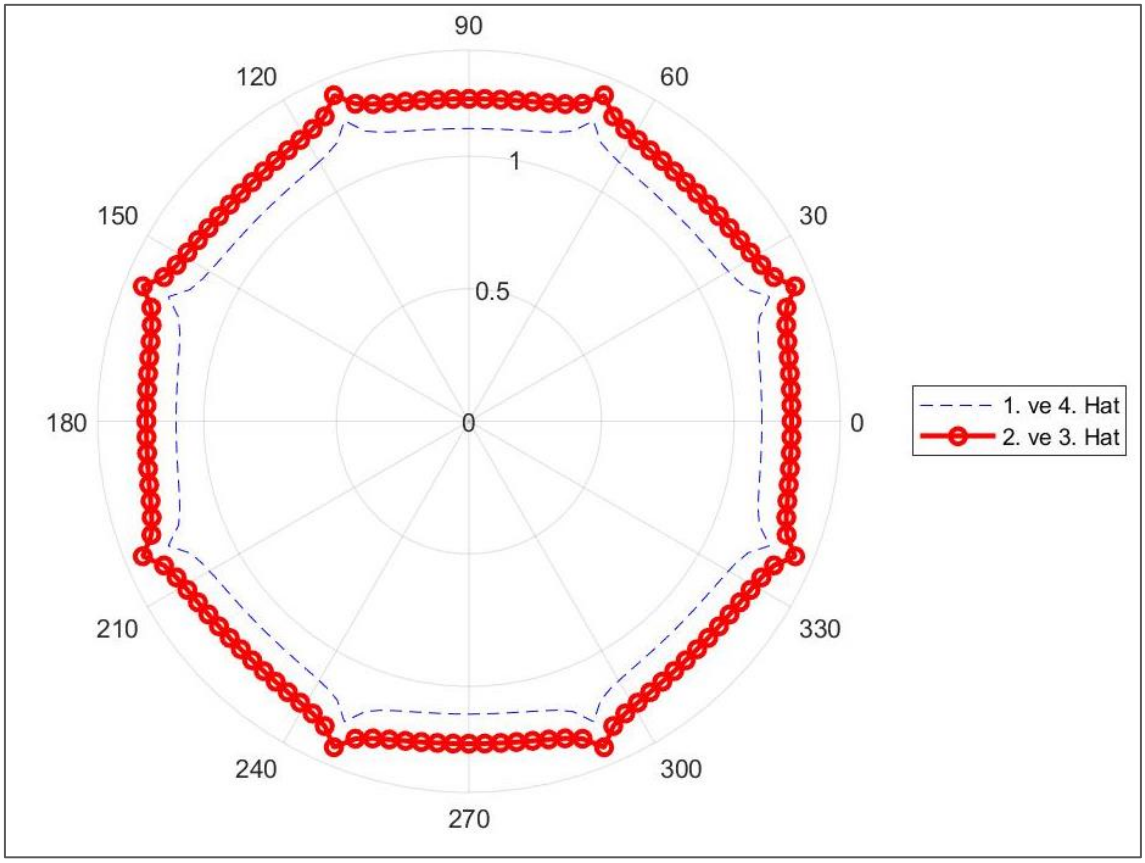
6.1. Basınç Dağılımının Hesaplanması

Aerostatik yataklar ile desteklenmiş yatak-rotor sistemlerinin dinamik özellikleri, hava yatağının şaft üzerine uyguladığı basınç dağılımı ile doğrudan alakalıdır. Aerostatik yatağın şaft üzerine uyguladığı basınç dağılımını hesaplamak için denklem 3.47'de verilen boyutsuz Reynolds denkleminin nümerik olarak çözülmesi gerekir ancak denklemde de görüldüğü gibi yatak parametrelerinin rotor dinamiğine olan etkileri doğrusal değildir. Besleme deliklerinin sayılarının ve yerleşim yönlerinin basınç dağılımına etkilerini incelemek için çizelge 4.2'de geometrik özellikleri verilen yataklar için Reynolds denklemi çözdürülmüştür. Şekil 6.1'de gösterilen 4-8-16-32 ve 64 orifisli yatakların basınç dağılımları hesaplanırken besleme basıncı $P_s = 4bar$, açısal hız $w = 0\ rad/s$ ve eksantriklik oranı $\epsilon = 0$ değerleri kullanılmıştır. Şekil 6.1'de, orifis karşılarında maksimum basınç oluşurken, yatak ve şaft arasında dolanan havanın atmosfere atıldığı yerlerde minimum basınç oluştuğu görülmektedir. Buradaki aerostatik yataklarda orifis sayısı arttıkça şaft yüzeyine etkiyen basınç dağılımı daha homojen hale gelmektedir ve böylece aerostatik yatakların yük taşıma kapasitelerinin artması beklenmektedir.

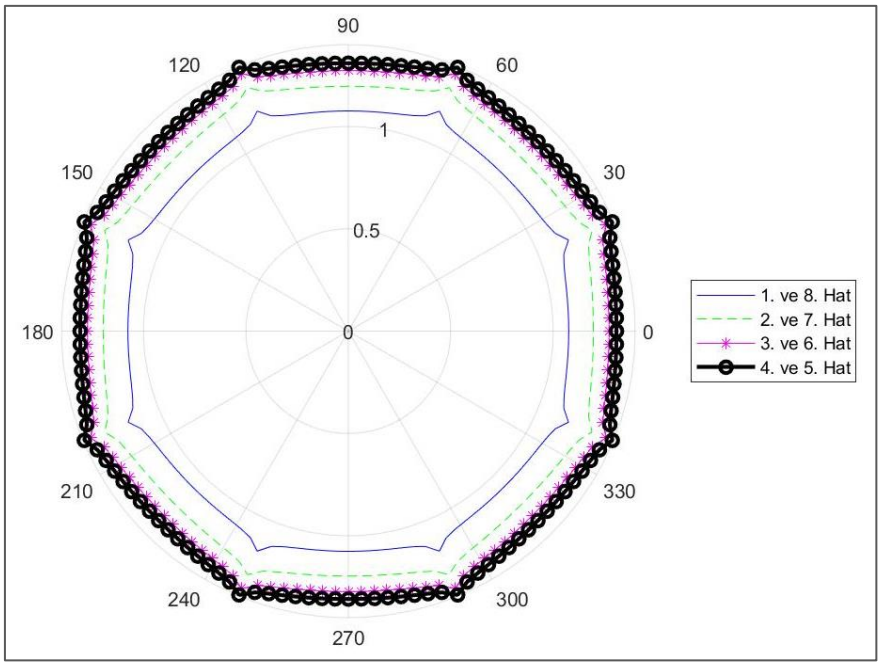
Burada dikkat çekici nokta 4,8 ve 16 orifisli modelde eksantriklik yokken tüm orifislerin karşısında oluşan basınç eşit olmasına rağmen 32 ve 64 orifisten oluşan modelde giderek atmosfer basıncına yakınlaşmasıdır. 32 ve 64 orifisli modellerde de basınç dağılımı simetrik olmasına rağmen eksenel yön boyunca orifis karşılarındaki basınçlar azalmaktadır. Bunun sebebi eksenel yönde (yatak çıkış noktalarında) çıkan havanın hızlı bir şekilde atmosfer basıncına eşit olmasıdır.



Şekil 6.1. Basınç dağılımları a) BHY04 b) BHY08 c) BHY16 3 d) BHY32 e) BHY64

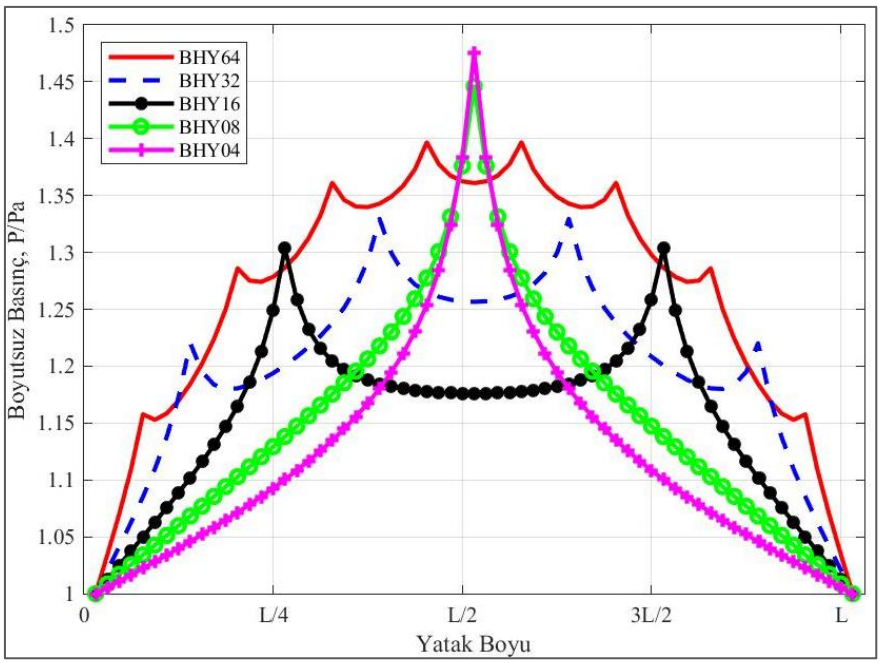


Şekil 6.2. 32 orifisli modelin farklı hatlarının basınç dağılımı



Şekil 6.3. 64 orifisli modelin farklı hatlarının basınç dağılımı

Şekil 6.2'de 32 orifisli modelin, 6.3'de ise 64 orifisli modelin farklı hatlarının basınç dağılımları polar koordinatlarda gösterilmiştir. Görüldüğü gibi eksenel hat boyunca atmosfer basıncına yaklaştıkça orifislerden gelen havanın şafta uyguladığı basınç atmosfer basıncına yaklaşmaktadır. Bu durum frekans tanım bölgesinde yapılacak olan analizlerde değerlendirilecektir.

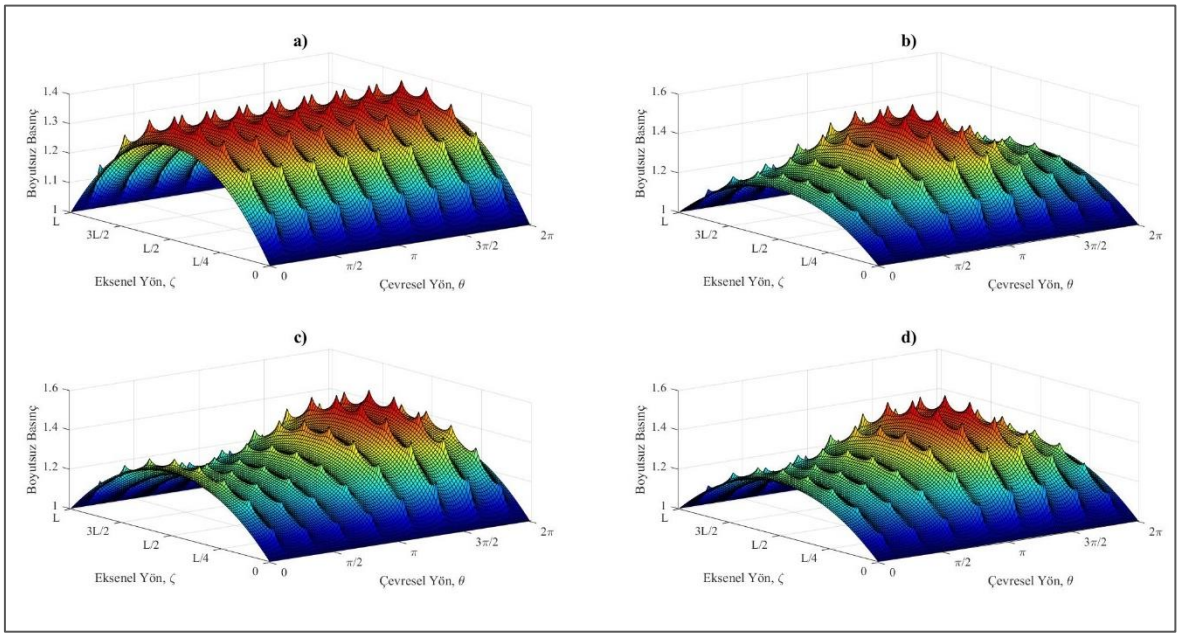


Şekil 6.4. Eksenel doğrultu boyunca basınç dağılımı

Çizelge 1.1'de farklı tip kısıtlayıcılar kullanılan yatakların şaft yüzeyine uyguladıkları basınç dağılımları gösterilmişti. Şekil 6.4'de ise sabit debide orifis sayısı arttığında basınç dağılımının nasıl değiştiği gösterilmektedir. Şekil 6.4 açıkça orifis sayısının artması ile yatakların şafta uyguladığı basıncın homojenleştiğini göstermektedir. Yani orifis sayısının artması ile basınç dağılımları gözenekli kısıtlayıcılardaki gibi homojen olmaktadır. Ancak kullanılan havanın kütlesel debisi tek orifisli model ile aynıdır.

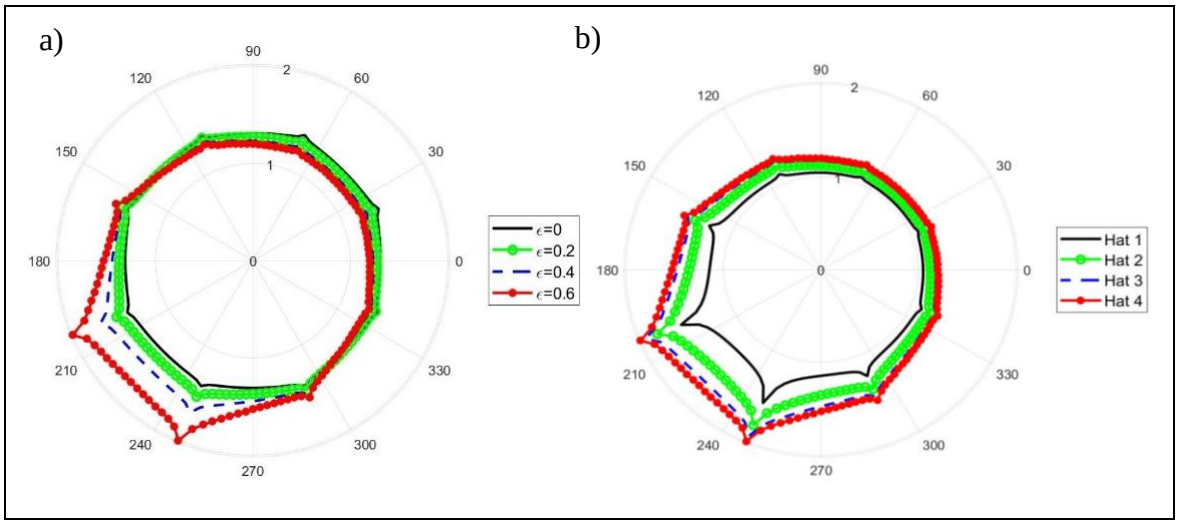
6.1.1. Eksantriklik oranının basınç dağılımına etkisi

Şekil 6.2'de gösterilen basınç dağılımları şaft ile yatak merkezinin aynı olduğu yani eksantrikliğin olmadığı durumlardaki havanın şafta uyguladığı basınç dağılımlarını göstermektedir. Ancak çalışma esnasında aerostatik yataklar her zaman şaft ile aynı eksende olmayabilir. Bu eksenel kaçıklıklara eksantrisite denmektedir. Bu bölümde Reynolds denklemi farklı eksantriklik oranları ile çözdürülecek ve bunların basınç dağılımına olan etkileri incelenecektir.



Şekil 6.5. 64 orifisli BHY64'ün farklı eksantrisite oranları için basınç dağılımı a) ε_x =0, ε_y=0 b) ε_x=0.25, ε_y=0 c) ε_x =0, ε_y=0.25 d) ε_x =0.25, ε_y=0.25

Şekil 6.5'da 64 orifis bulunan model için farklı yönlerde eksantrisite verilerek Reynolds denklemi çözdürülmüş ve basınç dağılımı grafikleri çizdirilmiştir. Görüldüğü gibi eksantriklik oranlarının değişmesi ile bazı orifislerin karşısındaki noktalarda basınç artarken bazı orifislerin karşısında basınç düşmektedir.



Şekil 6.6. 64 orifisli model için basınç dağılımı a) Farklı eksantrisite oranları için b) Farklı orifis hatlarındaki basınç dağılımı (ε=0.6)

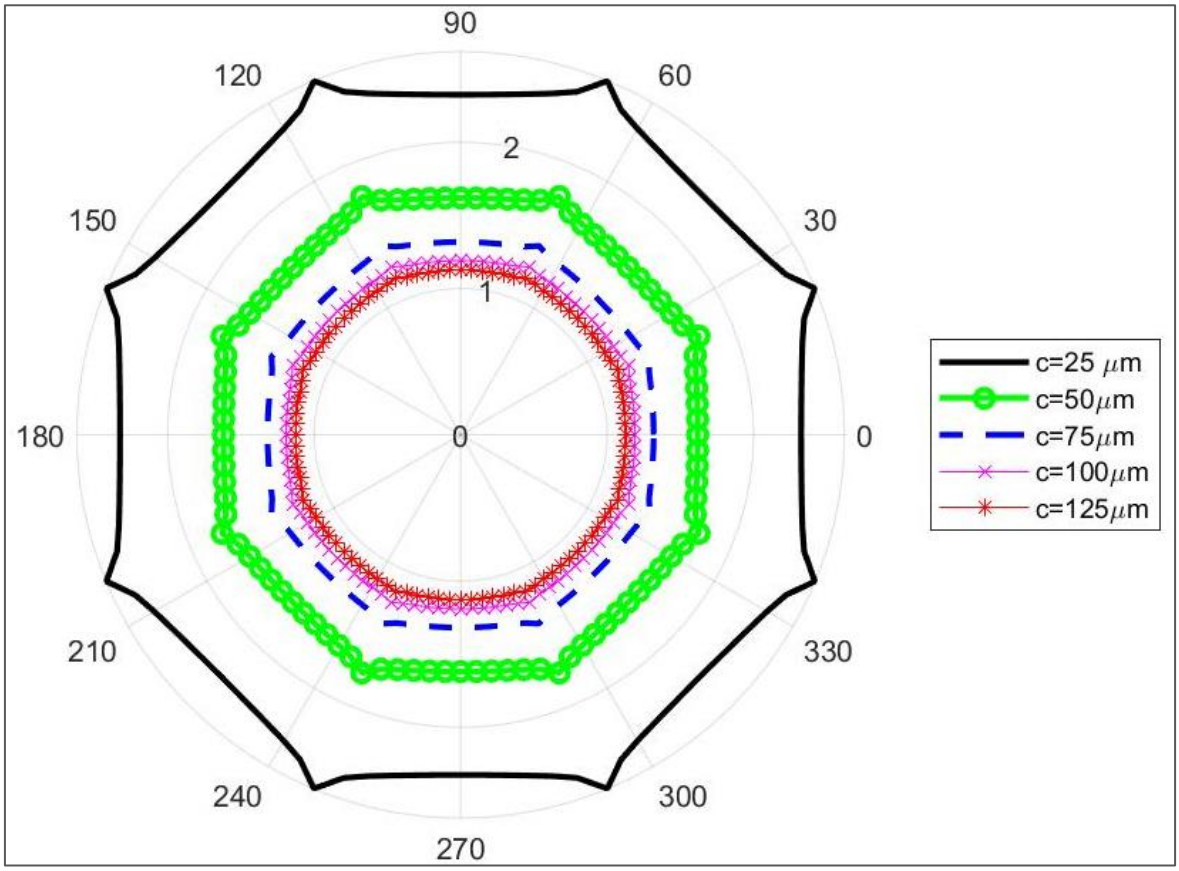
Şekil 6.6a'da 64 orifisli model 5'in farklı eksantrisite oranlarında basınç dağılımları polar koordinatlarda gösterilmiştir. Görüldüğü gibi eksantriklik oranı arttıkça yüksek basınç olan orifis gruplarında basınç yükselmekteyken, alçak basınç olan orifis hatlarında basınç düşmektedir. Şekil 6.6a'dan da görüldüğü gibi basınç düşüşleri az olmasına rağmen basınç artışları çok daha fazladır. Bu da aynı debide belli noktalara fazla basınç gelmesine sebep olmakta dolayısıyla yatak performanslarını iyi yönde değiştirmektedir.

Şekil 6.6b'de ise eksantriklik oranı 0.6 olan 64 orifisli aerostatik yatağın farklı çevresel orifis hatları boyunca basınç dağılımları polar koordinatlarda gösterilmiştir. Burada eksenel doğrultu boyunca simetri olduğundan ilk 4 hattın grafiği verilmiştir. Hat 1 eksenel doğrultu boyunca en başta olan hattı, hat 4 ise ortadaki hattı ifade etmektedir. Görüldüğü gibi hat 1 atmosfer basıncına yakın olduğundan daha düşük basınç olurken yatağın eksenel hat boyunca ortalarına gidildiğinde basınç dağılımı tüm noktalarda yükselmektedir.

6.1.2. Radyal boşluğun basınç dağılımına etkisi

Aerostatik yataklarda basınç dağılımını etkileyen diğer bir parametre ise radyal boşluk miktarıdır. Bilindiği gibi aerostatik yataklar mikrometre mertebelerinde radyal boşluklarda çalışmaktadır. Şekil 6.7'de besleme basıncı P_s=4bar, eksantrisite oranı, ε=0 durumu için 64 orifisli yatak modelinde radyal boşluğun değişimi ile basınç dağılımının değişimi polar koordinatlarda gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi 25 μm radyal boşluk için Reynolds

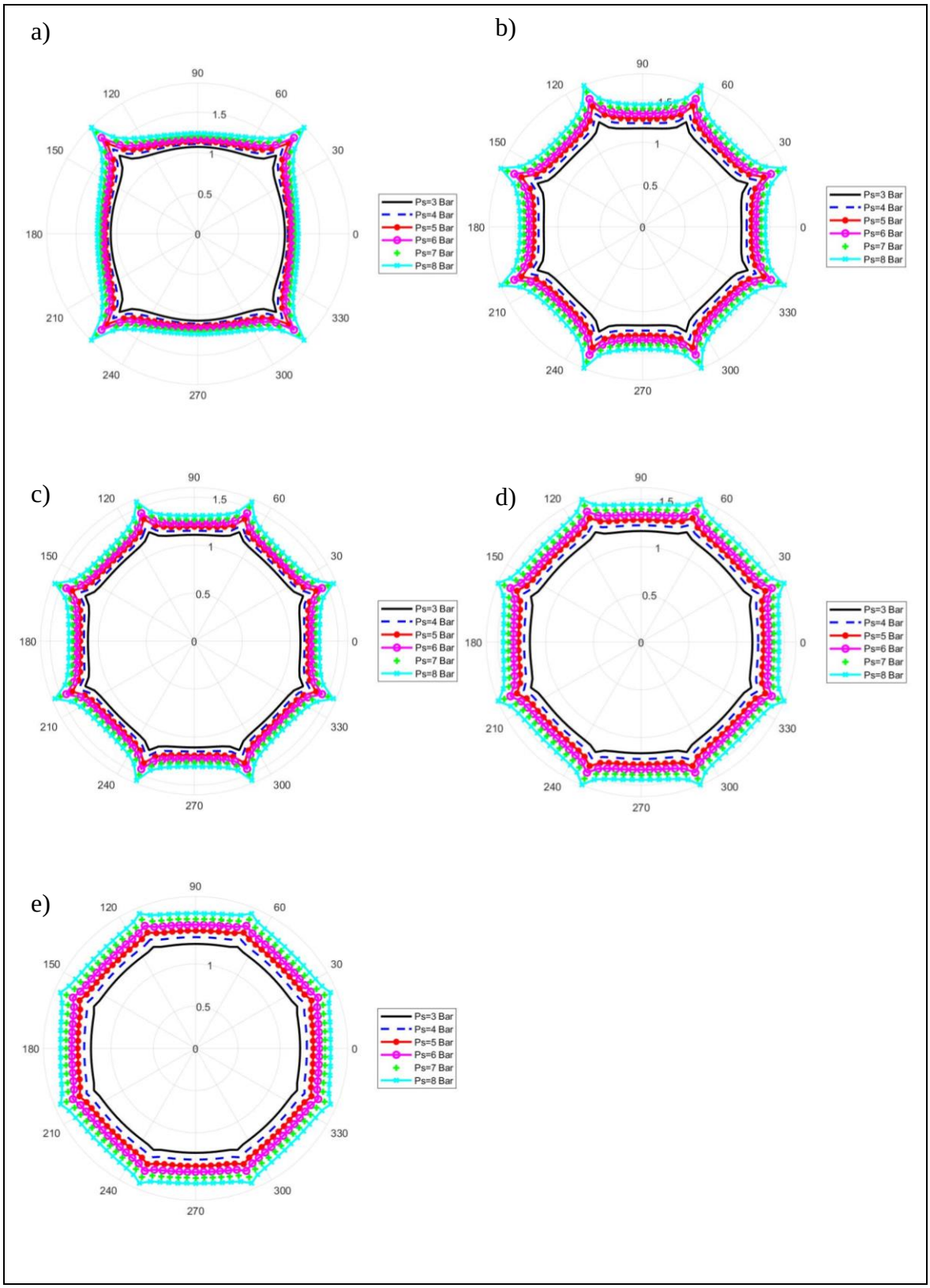
denklemi çözdürüldüğünde en yüksek basınç dağılımı olmaktadır. Radyal boşluğun artması ile havanın şafta uyguladığı basınç hızlı bir şekilde düşmektedir.



Şekil 6.7. Radyal boşluğun basınç dağılımına etkisi (BHY64)

6.1.3. Besleme basıncının basınç dağılımına etkisi

Aerostatik yataklarda yatak performansını etkileyen diğer bir parametre de besleme basıncıdır. Reynolds denklemi farklı besleme basıncı değerleri için çözdürülerek sonuçlar polar koordinatlarda çizdirilmiştir. Radyal boşluk c = 75 μm ve eksantrisite oranı, ε=0 için yapılan simülasyon sonuçları şekil 6.8'da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi besleme basıncı arttıkça tüm yataklar için şafta etkiyen basınç dağılımında artış meydana gelmektedir. Ayrıca farklı modeller için de orifis sayısı arttıkça, basınç dağılımının da 6.8a'dan 6.8e'ye doğru giderek homojenleştiği de görülmektedir.



Şekil 6.8. Besleme basıncına göre basınç dağılımı değişimi a) BHY04 b) BHY08 c) BHY16 d) BHY32 e) BHY64

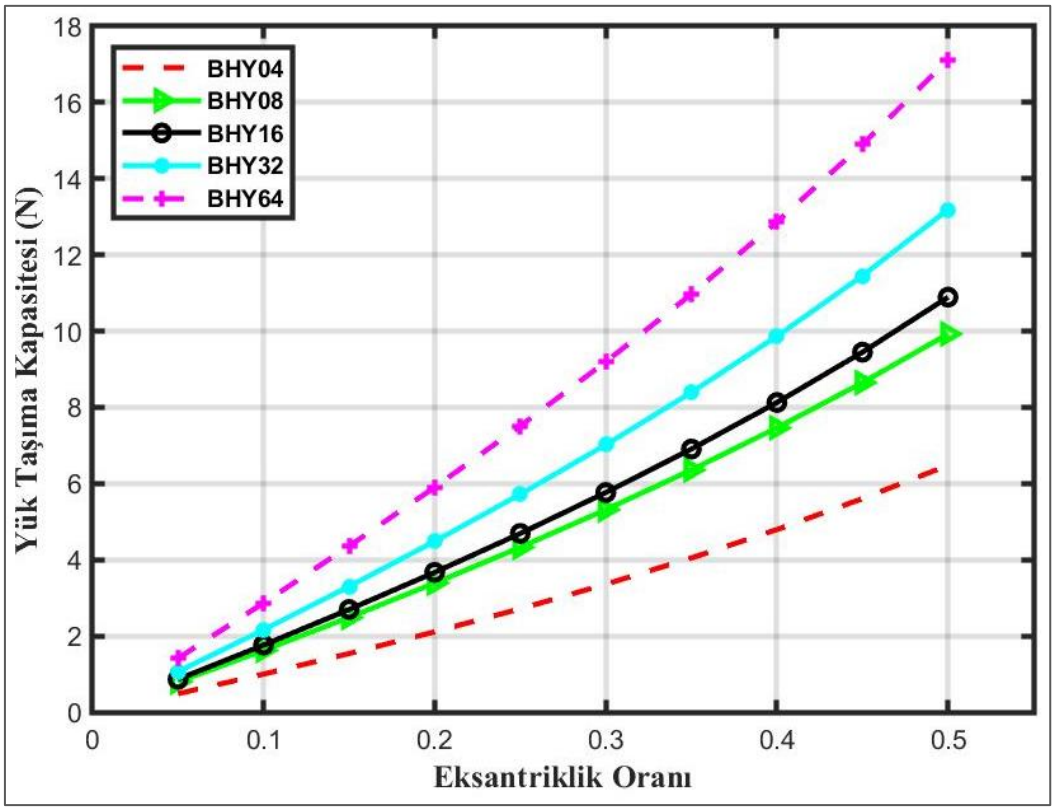
6.2. Yatak Yük Taşıma Kapasitesi ve Yatak Katılığının Hesaplanması

Bu bölümde aerostatik yatakların yük taşıma kapasitesine ve yatak katılığına yatakların geometrik özellikleri ve çalışma parametrelerine etkileri tartışılacaktır. Yük taşıma kapasitesi hesaplanırken MATLAB üzerinden Reynolds denklemi DD&SF hibrit metodu ile çözdürülerek basınç dağılımı hesaplanmış ve Denklem 3.51'den denklem 3.54'e kadar olan denklemler kullanılmıştır.

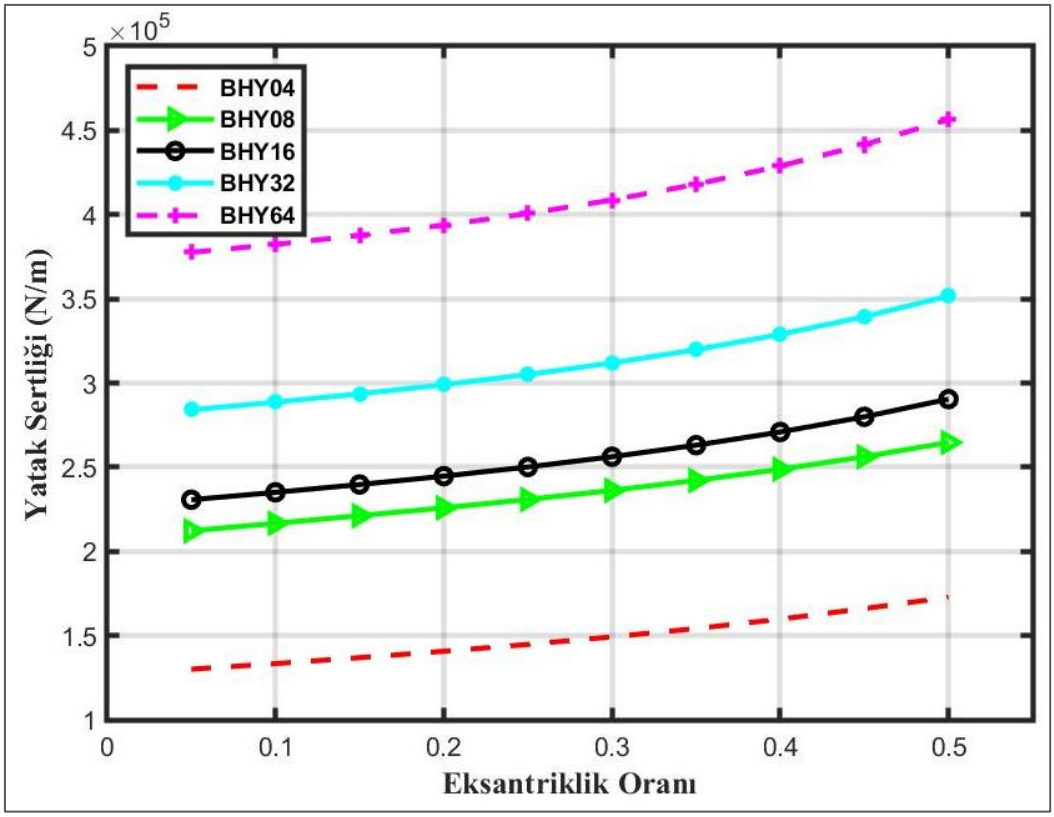
6.2.1. Eksantriklik oranının yük taşıma kapasitesi ve yatak katılığına etkisi

Denklem 3.51'de görüldüğü gibi aerostatik yataklarda yatak yük taşıma kapasitesini hesaplamak için basınçlı havanın yatak yüzeyine uyguladığı film kuvvetlerini toplamak gerekir. Aerostatik hava yataklarında film kuvvetleri havanın şafta uyguladığı basıncın toplamıdır, dolayısıyla besleme basıncı ve hava debisiyle doğrudan ilişkilidir. Çizelge 4.2'deki yatakların, yatak yük taşıma kapasitesini gösteren grafikler besleme basıncı, $P_s = 4bar$ ve radyal boşluk, $H = 75\mu m$ için Reynolds denklemi çözdürülerek çizdirilmiştir ve şekil 6.9'da gösterilmektedir. Burada görüldüğü gibi orifis sayısı arttıkça şaft yüzeyine etkileyen basınç dağılımı daha homojen hale geldiğinden aynı hava debisinde orifis sayısı çok olan yatakların yük taşıma kapasiteleri daha yüksektir. Tüm orifis tipleri için yatakların eksantriklik oranları arttıkça yatak yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmektedir. Düşük eksantriklik oranlarında yük taşıma kapasiteleri oldukça düşük olmasına rağmen eksantriklik oranları arttıkça şekil 6.6a'da görüldüğü gibi şafta uygulanan basınç arttığı için yük taşıma kapasiteleri de ciddi miktarlarda artmaktadır.

Şekil 6-10'de ise yatak katılığının eksantriklik oranı ile değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi yük taşıma kapasitesi ile paralel olarak, eksantriklik oranı arttıkça yatak katılığı da artmaktadır. Ayrıca model 1'den model 5'e doğru gidildikçe orifis sayısının artması ile yatak katılıkları da artmaktadır.



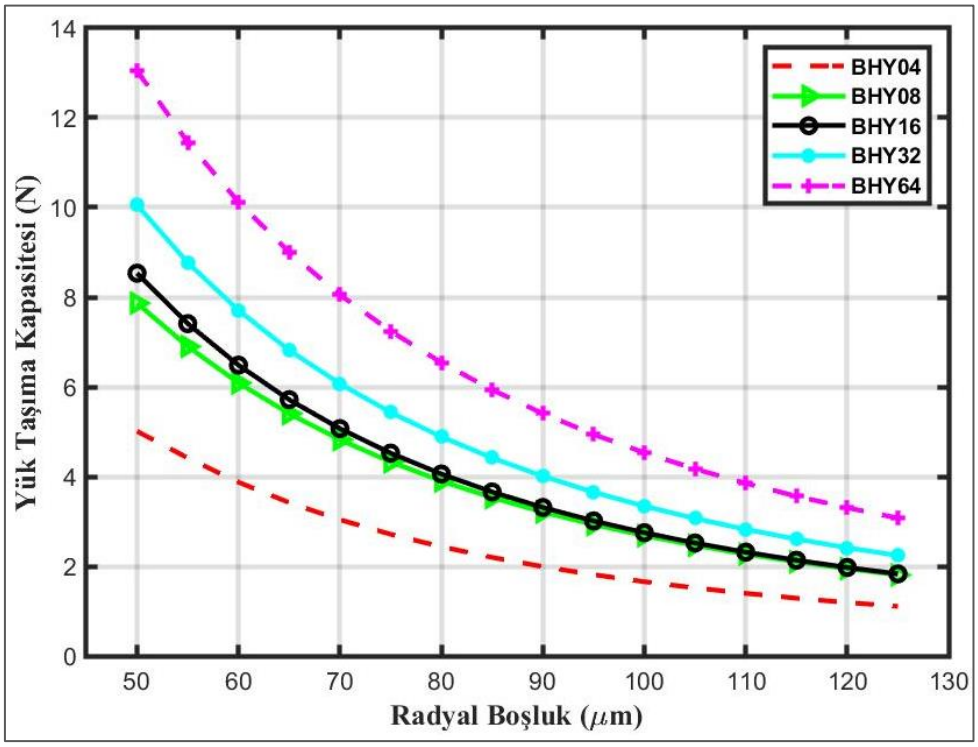
Şekil 6.9. Yük taşıma kapasitesinin eksantriklik oranı ile değişimi



Şekil 6.10. Yatak katılığının eksantriklik oranı ile değişimi

6.2.2. Radyal boşluğun yük taşıma kapasitesi ve yatak katılığına etkileri

Dışardan basınçlandırılmış aerostatik yataklarda, diğer bir geometrik parametre yatak-rotor arasındaki boşluktur. Reynold's denklemi yatak ve rotor arasındaki boşluğun bir fonksiyonu olduğundan yatak-rotor arası boşluk yatağın yük taşıma kapasitesini ve yatak katılığını etkilemektedir. Yatak ve rotor arasındaki boşluk arttıkça, basınçlı hava yataklarında kullanılan havanın sıkıştırılabilirlik karakteristiğine bağlı olarak rotora etkiyen kuvvetler de doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Şekil 6.11'de tüm yatak tipleri için radyal boşluğun yük taşıma kapasitesine etkileri gösterilmektedir, simülasyonlar $P_s = 4\ bar$ ve $\epsilon = 0.25$ için yapılmıştır. Şekil 6.11'de de beklendiği gibi radyal boşluk miktarı arttığında yük taşıma kapasitesinin doğrusal olmayan bir şekilde düştüğü görülmektedir. Şekil 6.11'de görüldüğü gibi 64 orifisli modelin yüksek radyal boşluklardaki yük taşıma kapasiteleri bile 4-8 ve 16 orifisli modellerin düşük radyal boşluklardaki yük taşıma kapasitelerinden yüksektir. Düşük radyal boşluklara sahip aerostatik yatakların üretiminin zorluğu dolayısıyla maliyetinin yüksekliği nedeniyle kullanılması çok avantajı olmayacağı bilindiğine göre radyal boşluk miktarı arttırılarak ve şaft yüzeyine etkiyen basınç dağılımı homojenleştirilerek 75µm-125µm gibi yüksek radyal boşluk miktarları için daha yüksek yük taşıma kapasitesi değerleri sağlanabilir.



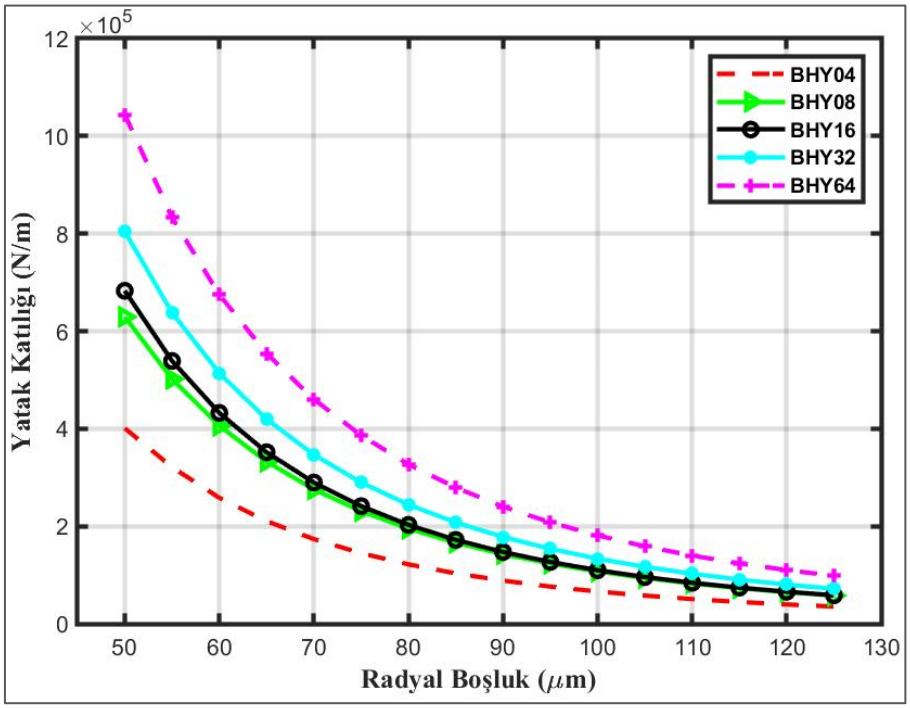
Şekil 6.11. Radyal boşluğun yük taşıma kapasitesine etkisi

Şekil 6.12'de ise radyal boşluk ile yatak katılığının değişimi gösterilmektedir. Beklenildiği gibi radyal boşluk arttıkça şafta uygulanacak olan basınç düşecek, dolayısıyla yük taşıma kapasitesi ve yatak katılığı düşecektir. Şekil 6.12'de de tüm modeller için radyal boşluk miktarı arttıkça yatak katılığı düşmektedir. Yine en yüksek katılığı en fazla orifis bulunan modelden en az orifis bulunan modele doğru gidildikçe düşmektedir.

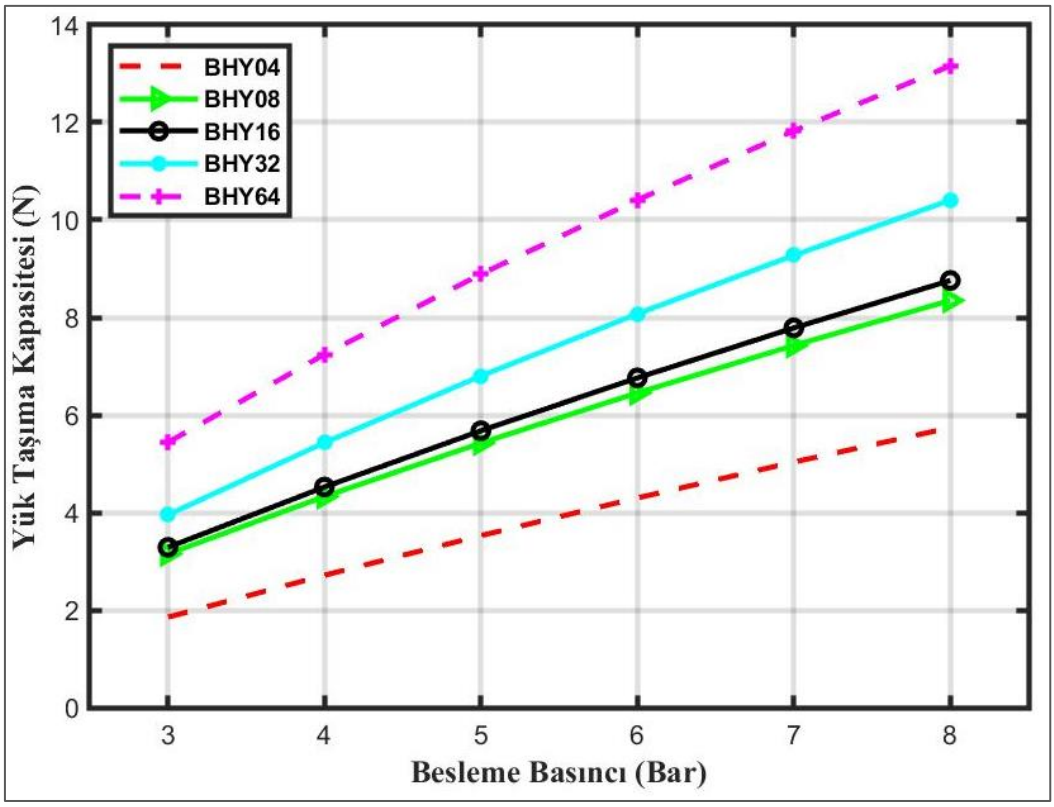
6.2.3. Besleme basıncının yük taşıma kapasitesi ve yatak katılığına etkisi

Denklem 3.48'de görüldüğü gibi aerostatik yataklarda besleme basıncı arttıkça kütlesel debi doğrusal olarak artar ve dolayısıyla yatak-rotor arasındaki basınç dağılımı fonksiyonu değişir, yatak yük taşıma kapasitesi ve yatak katılığı değişir. Şekil 6.13'de $c = 75\mu m$ radyal boşluk ve eksantriklik oranı, $\varepsilon = 0.25$ değerleri için farklı besleme basınçlarında yük taşıma kapasitesi değerleri gösterilmiştir. Şekil 6.8'da görüldüğü gibi tüm yatak tipleri için besleme basıncı arttıkça şaft yüzeyine etkiyen basınç artacağından yatak yük taşıma kapasitesi artmıştır.

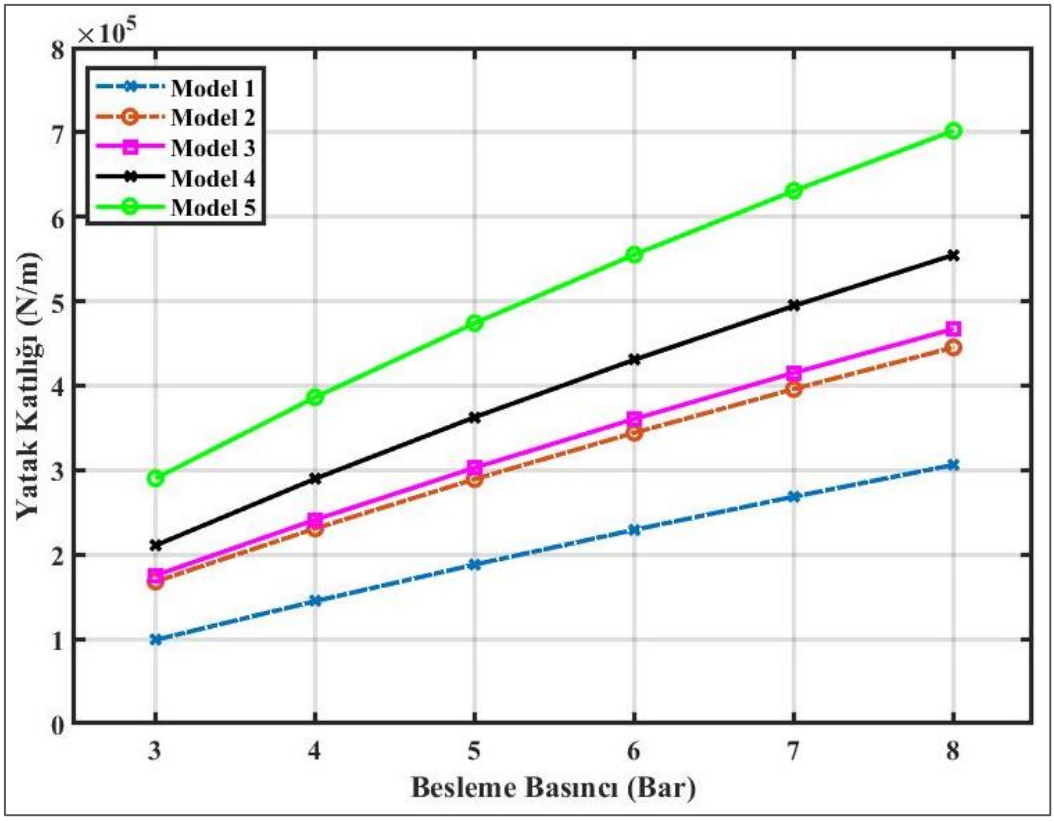
Şekil 6.14'de ise besleme basıncının yatak katılığına etkisi görülmektedir. $c = 75\mu m$ radyal boşluk ve $\varepsilon = 0.25$, eksantriklik oranı için Reynolds denklemlerinin çözdürülmesi ile elde edilen grafik besleme basıncının yatak katılığını tüm modellerde arttırdığını göstermektedir.



Şekil 6.12. Radyal boşluğun yatak katılığına etkisi



Şekil 6.13. Besleme basıncının yük taşıma kapasitesine etkisi



Şekil 6.14. Besleme basıncının yata katılığına etkisi

6.3. Yatak-Şaft Sistemlerinin Dinamik Davranışı

Farklı orifis sayılarına sahip Tablo 4-2'de belirlenen yatakların dinamik davranışı anlamak için önceki çalışmalarda [78] geliştirilen MATLAB algoritması revize edilerek tüm modeller için uygun hale getirilmiştir. Yeniden oluşturulan MATLAB algoritması 1s'lik simülasyonlar için çizelge 6.1.'deki parametreler ile çözdürülerek yatak-şaft sistemlerinin zaman ve frekans tanım bölgelerinde analizleri yapılmıştır.

6.3.1. Zaman tanım bölgesi analizleri

Çizelge 4.2.'de gösterilen beş farklı yatak için MATLAB algoritması çizelge 6.1'de verilen çalışma parametreleri ve geometrik parametreler için çözdürülmüştür. Burada simülasyonlar yapılırken tüm orifislerin toplam tükettiği hava debileri eşit olacak şekilde ayarlanmıştır. Dolayısıyla aynı debide farklı orifis sayıları ile yatakların dinamik özelliklerindeki değişmeler incelenebilecektir.

Şekil 6.15'de 4 orifisli yatağın (BHY04) 1000 rad/s devir hızında dört eksende konum grafikleri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi yatak x ekseninde yatak merkezinden 40 mikrometre uzaklıkta salınım yapmaktadır ancak diğer eksenlerde çok düşük salınımlar olmakla beraber yatak merkezine yakın bir konumda salınım yapmaktadır.

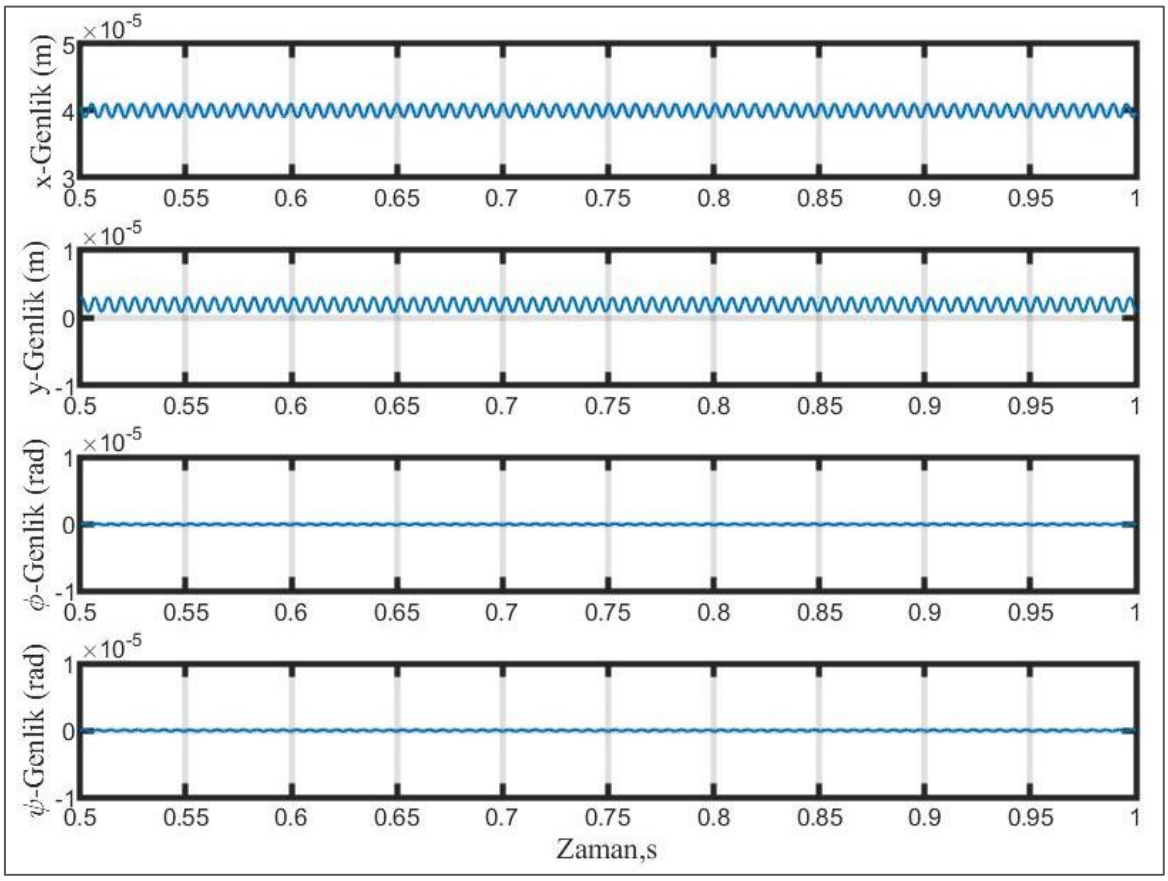
Çizelge 6.1. Simülasyon çalışma parametreleri

Parametre	Değer
Boy/Çap oranı (L/D)	1
Besleme Basıncı	4 Bar
Radyal Boşluk	75µm
Yatak Boyu, L	25 mm
Yatak Çapı, D	25 mm
Şaft Hızı	0-1500 rad/s

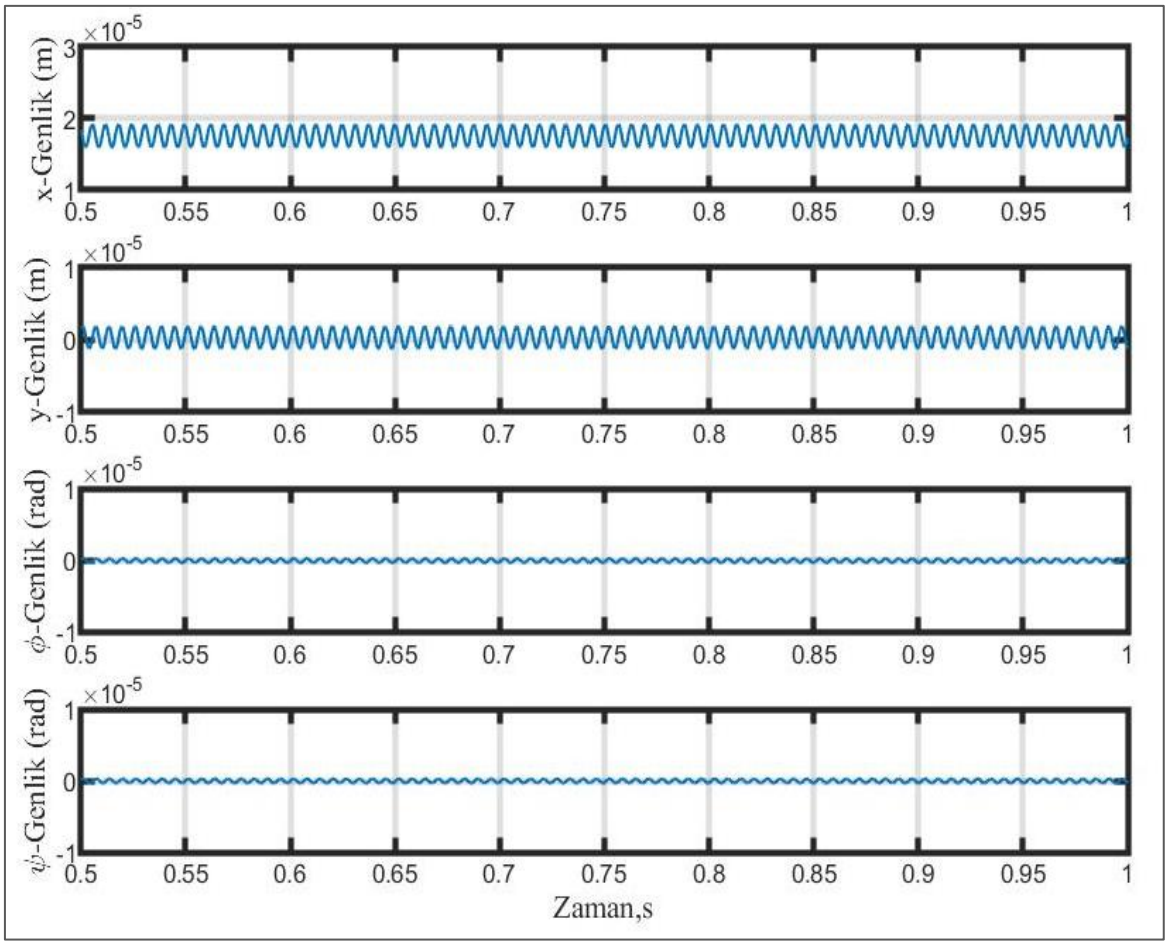
Şekil 6.16'de ise 64 orifisli BHY64 yatağının zaman tanım bölgesi salınımları tüm eksenlerde görülmektedir. Görüldüğü gibi yerçekiminin etkisi ile yatağın hareket ettiği x ekseninde yaklaşık yatak merkezinden $1.8x10^{-5}$m uzaklıkta rotor dengeye gelerek salınım yapmaktadır. Diğer eksenlerde ise yine yatak merkezinde düşük salınımlar meydana gelmektedir.

Şekil 6.15 ve şekil 6.16'da zaman tanım bölgesi salınımları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi yataklarda aynı hava debisi için orifis sayısı arttıkça salınımlar yatak merkezine yaklaşmaktadır. Sistem ne kadar yatak merkezine yakın konumda salınımlar yaparsa kararlılığı o kadar artacaktır. Dolayısıyla 1000 rad/s hız için en kararlı sistem olarak 64 orifisli yatak bulunan sistem demek mümkün olacaktır. Orifis sayısı azaldıkça sistemin kararlılığı azalmaktadır. Bu da en kararsız sistem için 4 orifisli BHY04 yatağı demektir.

Şekil 6.17'de tüm yataklar için orbit eğrileri görülmektedir. Yatakların y ekseni salınımlarının x ekseni salınımlarına göre değişimini ifade eden orbit eğrilerinin, yataklarda orifis sayısı arttıkça yatak merkezine yaklaştığı görülmektedir. Şekil 6.17'de görüldüğü gibi BHY04 yatağının orbit eğrisi yer çekiminin etkisinden dolayı x ekseninde yatak merkezinden yaklaşık $4x10^{-5}$m kaymışken, orifis sayısı arttıkça orbit eğrileri yatak merkezine doğru yaklaşmaktadır. Yatak merkezine en yakın olan orbit eğrisinin ise BHY64 yatağında olduğu görülmektedir.



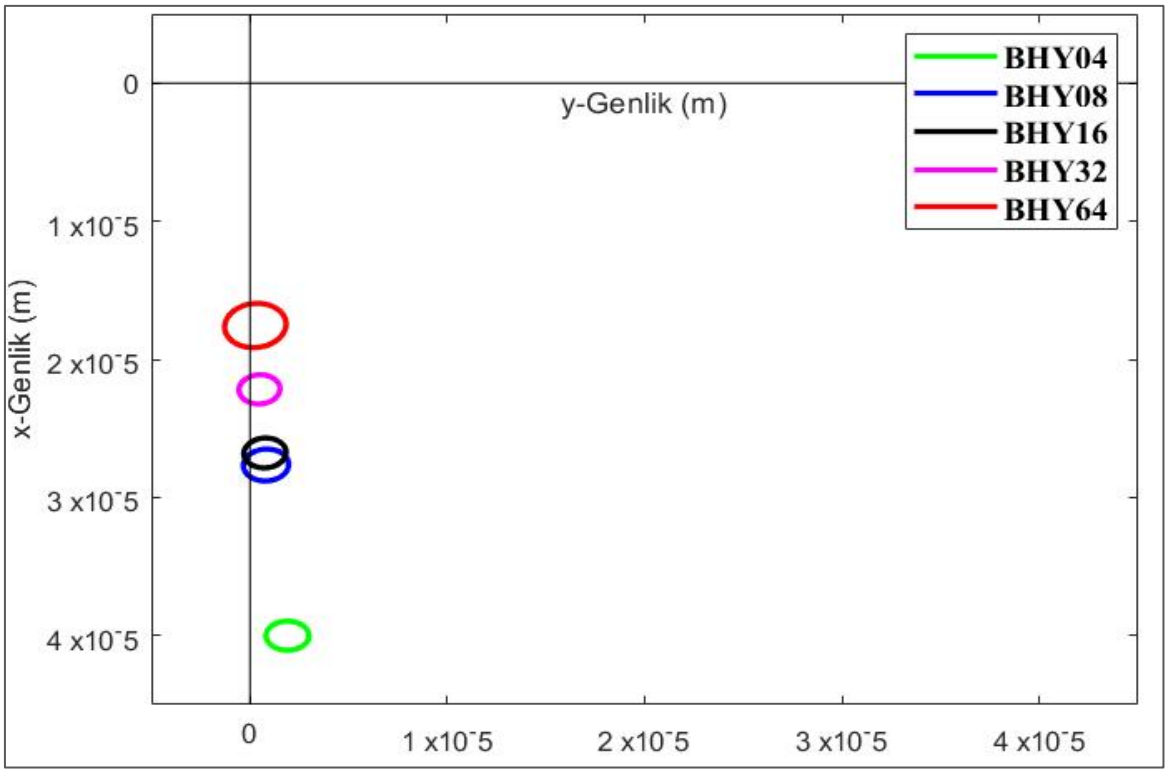
Şekil 6.15. 4 orifisli yatağın (BHY04) zaman tanım bölgesi salınımları (w = 1000 rad/s)



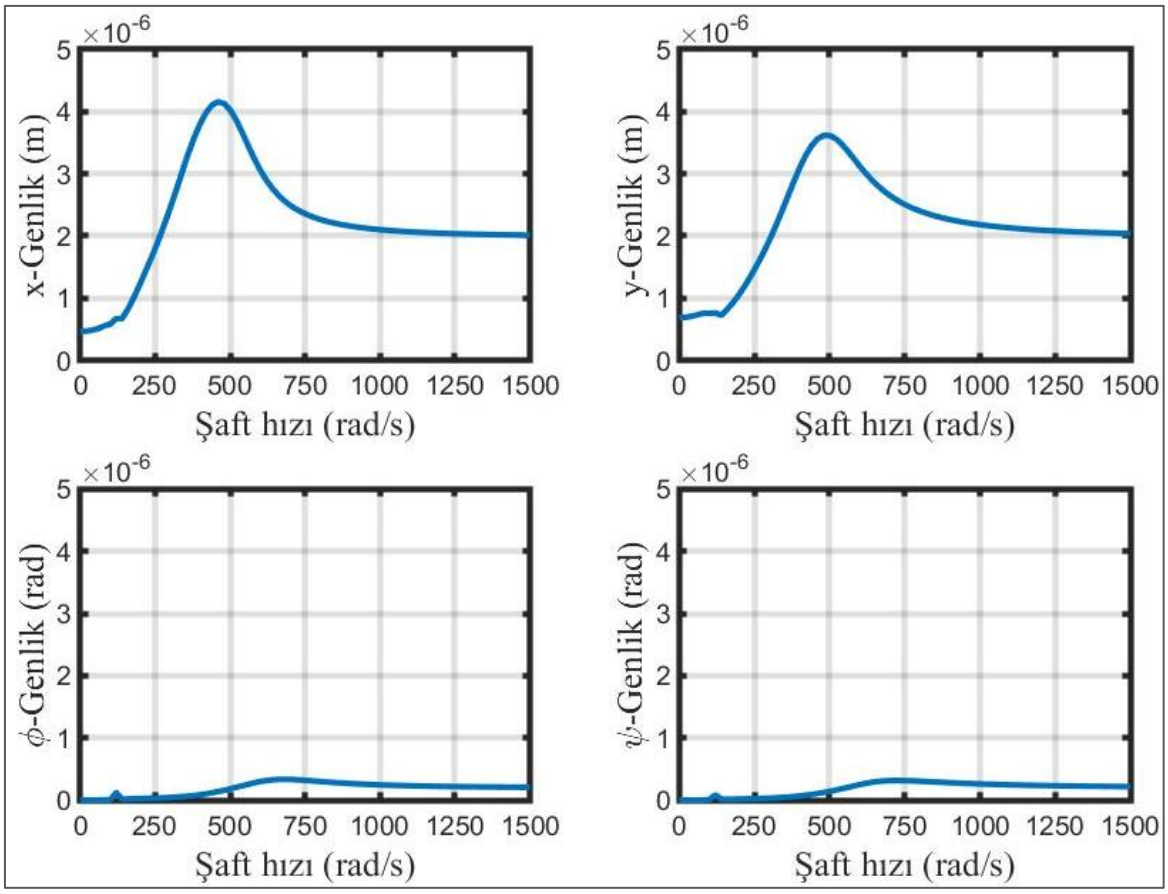
Şekil 6.16. 64 orifisli yatağın (BHY64) zaman tanım bölgesi salınımları (w = 1000 rad/s)

Çizelge 4.2'de gösterilen 5 farklı yatak için 1500 rad/s hıza kadar 20 rad/s aralıklarla tüm hızlarda hareket denklemleri çözdürülmüştür. Böylece tüm yataklar için doğal frekans değerleri artan genliklerin olduğu yerde olacak şekilde hesaplanabilecektir. Bunun için tüm yatakların zirve-zirve genlik grafikleri çizdirilmiştir.

Şekil 6.18'de 4 orifisli BHY04 yatağı için dört eksende zirve-zirve genlikleri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi x ekseninde 480 rad/s şaft hızında en yüksek genlikler oluşmaktadır. 120 rad/s de yerel tepe oluşumu görülmektedir. Bu durum pnömatik çekiç kararsızlığından meydana gelen bir kararsızlık durumudur. Şaft hızı arttıkça pnömatik çekiç kararsızlığının etkisi azalmaktadır. Şekil 6.18'de y genliğine bakıldığında ise 500 rad/s şaft hızından maksimum genlik oluştuğu görülmektedir. Bu da yatağın y ekseninde 500 rad/s de rezonans frekansına girdiğini göstermektedir. Şaftın dönme ve yalpalama eksenlerindeki grafiklerine bakıldığında ise genliklerin 10^{-7}rad mertebelerine düştüğü görülmektedir.

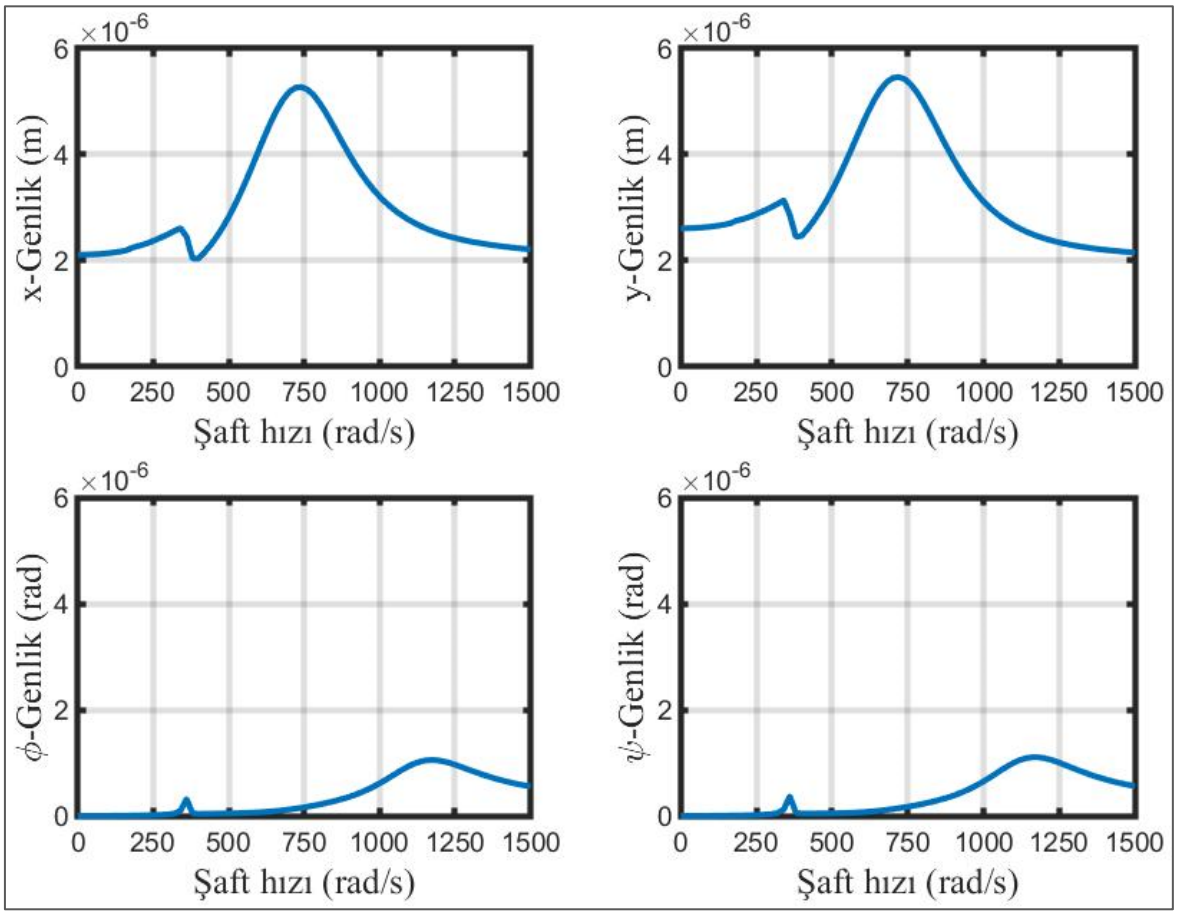


Şekil 6.17. Tüm yataklar için orbit eğrileri



Şekil 6.18. 4 orifisli modelin zirve-zirve genlikleri

64 orifisli BHY64 yatağının doğal frekansını hesaplamak için zirve-zirve genlikleri çizdirildiğinde ise şekil 6.19'da görüldüğü gibi x ve y ekseninde pnömatik çekiç kararsızlığının etkisinin 320 rad/s şaft hızına kadar devam ettiğini yalpalama ve dönme eksenlerinde ise 340 rad/s şaft hızına kadar devam ettiğini görmekteyiz. Ayrıca şekilde görüldüğü gibi 64 orifisli yatak-şaft sistemi x ve y eksenlerinde 720 rad/s şaft hızında en yüksek genliğe çıkmaktadır. Dönme ve yalpalama eksenlerinde ise 1200 rad/s şaft hızında en yüksek genliğe çıkmaktadır.



Şekil 6.19. 64 orifisli modelin zirve-zirve genlikleri

6.3.2. Frekans tanım bölgesi analizleri

Zaman tanım bölgesi analizlerinde olduğu gibi frekans tanım bölgesi analizlerinde de 20 rad/s -1500 rad/s şaft devir hızları için 20 rad/s aralıklarla yapılan simülasyon sonuçları kullanılmıştır. Zaman tanım bölgesinden frekans tanım bölgesine getirilen simülasyon sonuçları arka arkaya çizdirilerek waterfall eğrileri tüm eksenler için oluşturularak incelenmiştir.

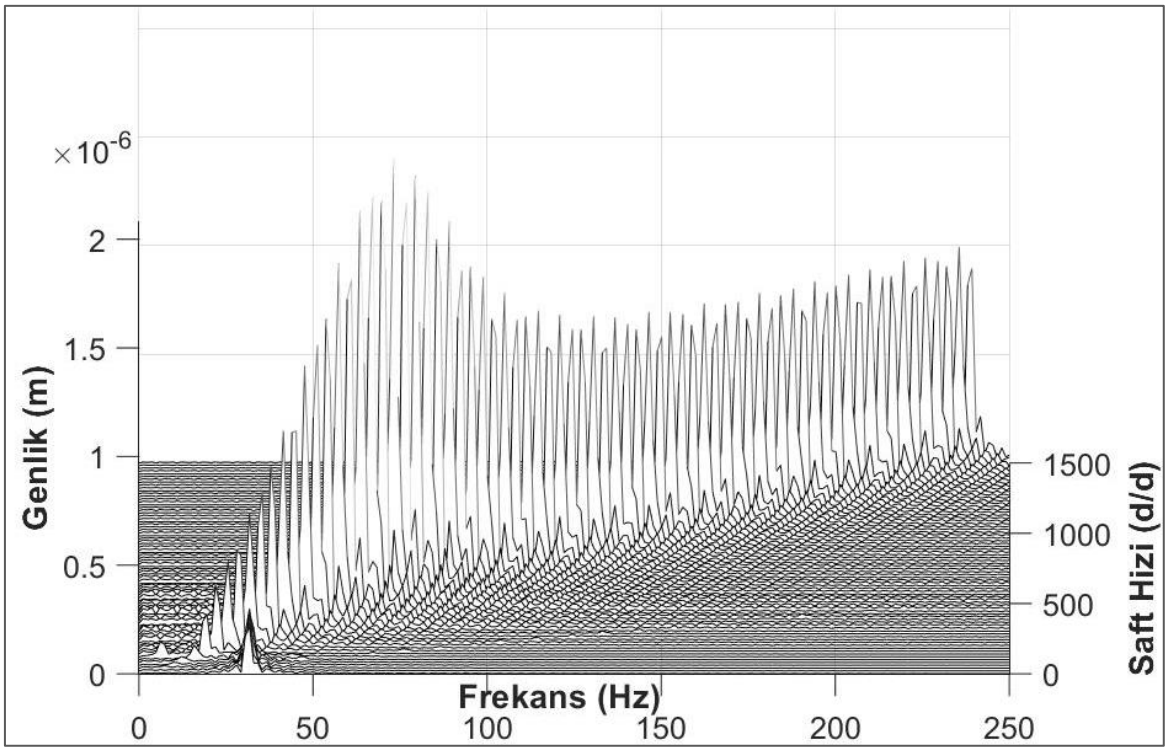
Şekil 6.20'de 4 orifisli BHY04 yatağının x eksenindeki spektrum analizleri görülmektedir. Şaft devri 20 rad/s'den 1500 rad/s'ye 20 rad/s arttırılarak çizdirilen spektrumlardan açıkça görülmektedir ki 4 orifisli yatak-şaft sistemi yaklaşık 73Hz civarında doğal frekans ile zorlanmaktadır. Ayrıca şekil 6.31'de 31Hz civarında pnömatik çekiç kararsızlığının etkisi görülmektedir.

Şekil 6.21'de ise 4 orifisli BHY04 yatağının y ekseni spektrum analizleri görülmektedir. Yer çekimi kuvvetinin olduğu x ekseni ile aynı şekilde yaklaşık 31Hz civarında pnömatik çekiç kararsızlığı görülürken 79 Hz civarında ise sistemin rezonans bölgesine ulaştığı için genliklerinin arttığı görülmektedir. Daha yüksek şaft hızlarında ise doğrusal olmayan bir şekilde azalmalar görülmektedir.

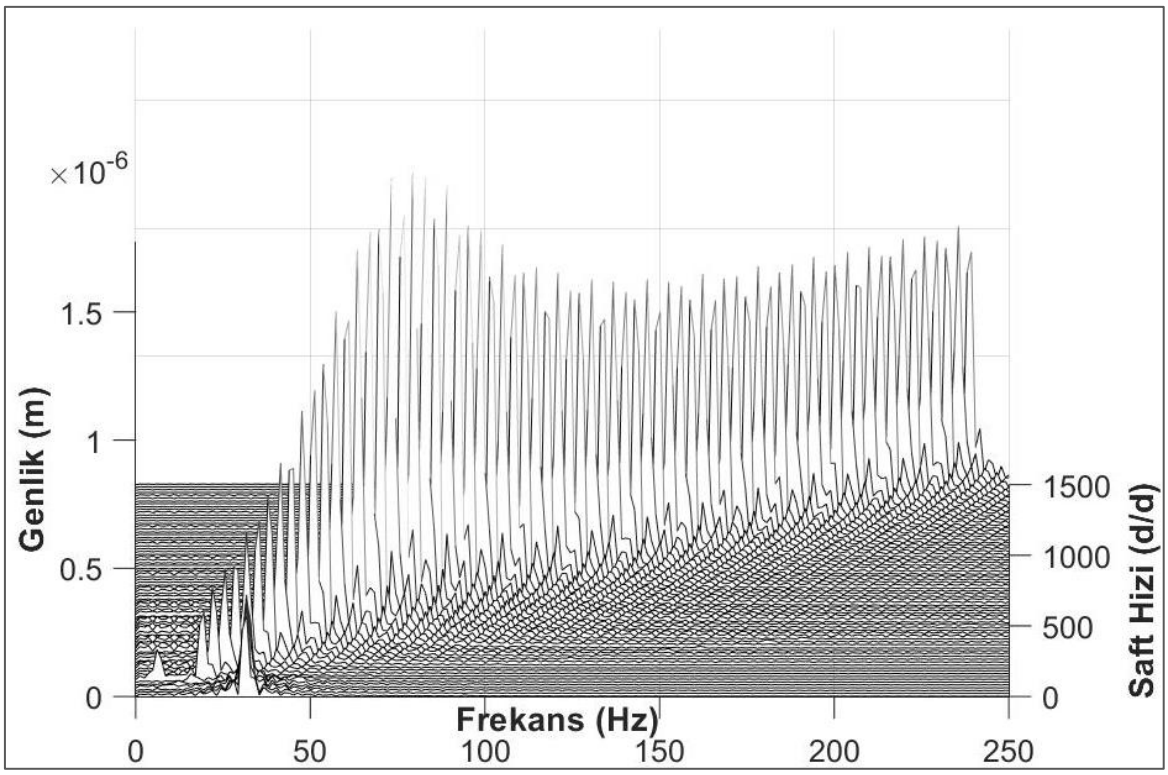
Şekil 6.22'de ise 32 orifisli BHY32 yatağının x ekseni waterfall diyagramları görülmektedir. Görüldüğü gibi 32 orifisli modelin x ekseninde 105Hz'de doğal frekans değeri bulunurken 68Hz'de pnömatik çekiç kararlılığının etkisi görülmektedir. 105Hz'den sonra artan şaft hızlarıyla birlikte spektrum genlikleri doğrusal olmayan bir şekilde azaldığı görülmektedir. Aynı yatağın y ekseni spektrum genlikleri ise şekil 6.23'de görülmektedir. Görüldüğü gibi 98 Hz civarında sistemin y ekseni doğal frekansı bulunurken, 68Hz civarında ise pnömatik çekiç kararsızlığı görülmektedir.

64 orifisli BHY64 yatağının waterfall diyagramları x ve y eksenlerinde çizildiğinde ise şekil 6.24'de görüldüğü gibi 120Hz civarında sistemin x ekseni doğal frekansı bulunduğu ve 87Hz civarında ise pnömatik çekiç kararsızlığının etkisi görülmektedir. Şekil 6.25'te ise aynı yatağın y ekseni waterfall diyagramı görülmektedir. Burada görüldüğü gibi 114Hz civarında sistem y ekseninde rezonans frekansına ulaşırken yine 87Hz'de pnömatik çekiç kararsızlığının etkisi görülmektedir.

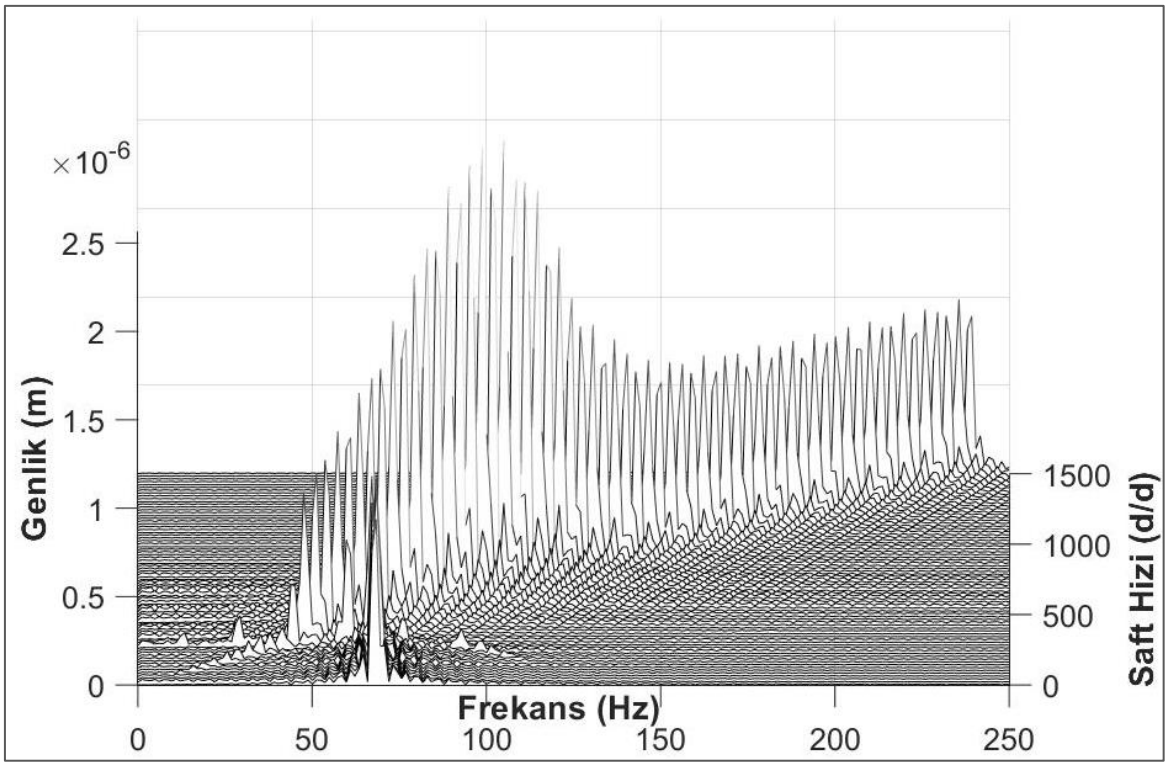
Waterfall diyagramlarından görüldüğü gibi orifis sayısı arttıkça pnömatik çekiç kararsızlığının etkisi artmaktadır. En yüksek genlik ve frekansta pnömatik çekiç kararsızlığı ise 64 orifisli model 5 yatağında görülmektedir. Ancak tüm yataklar için bu etki en fazla 300 d/d şaft hızına kadar devam etmektedir, daha sonra sistemin zorlamaları yalnızca şaft hızının etkisi altında değişmektedir. Aerostatik yatakların genellikle 10 000 d/d şaft hızı ve üstünde çalıştığı düşünülürse pnömatik çekiç kararsızlığının etkisinin orifis sayısının artması ile artmasının önemi oldukça düşük olacaktır.



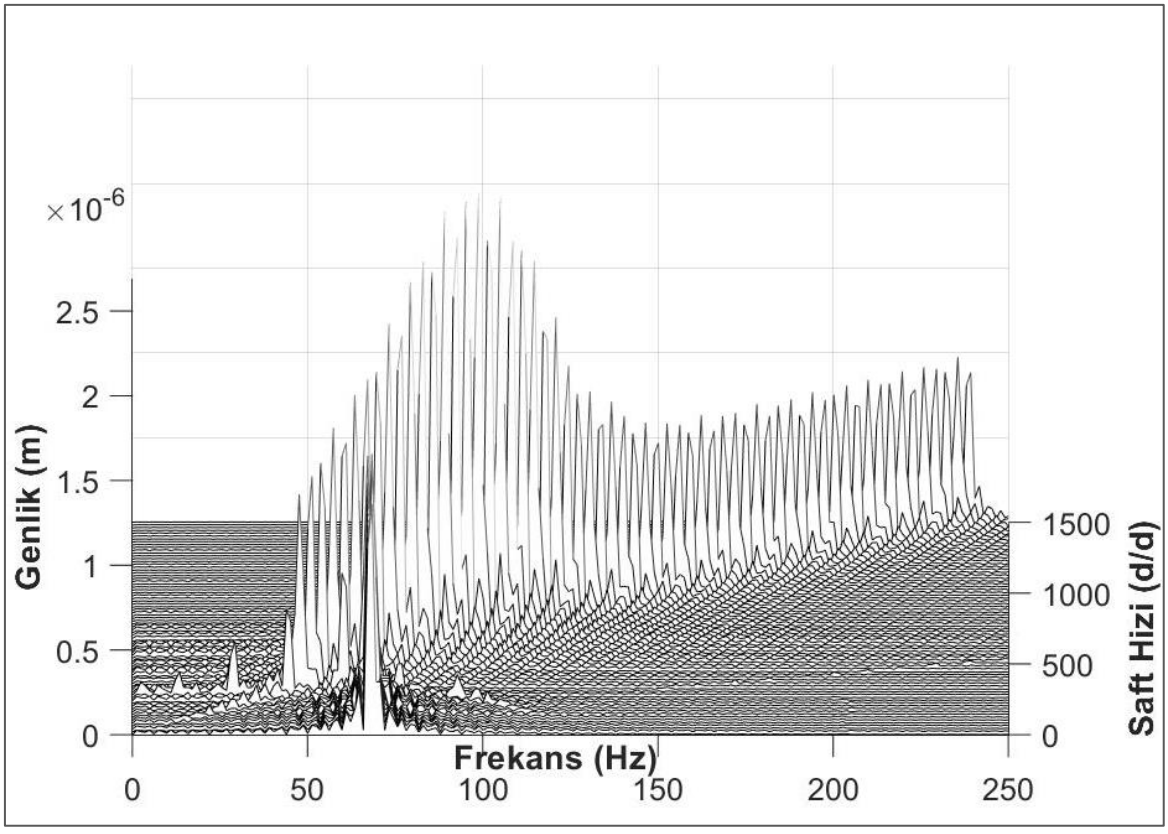
Şekil 6.20. 4 orifisli yatak için x ekseni waterfall diyagramı



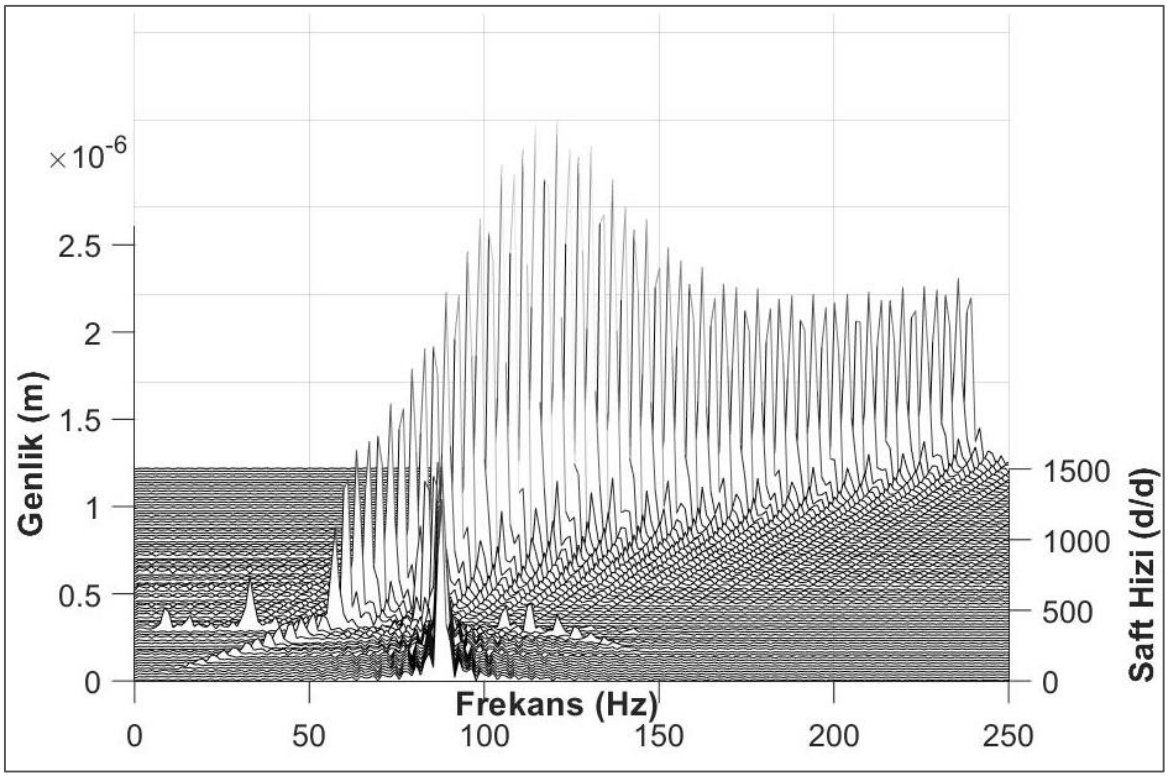
Şekil 6.21. 4 orifisli yatak için y ekseni waterfall diyagramı



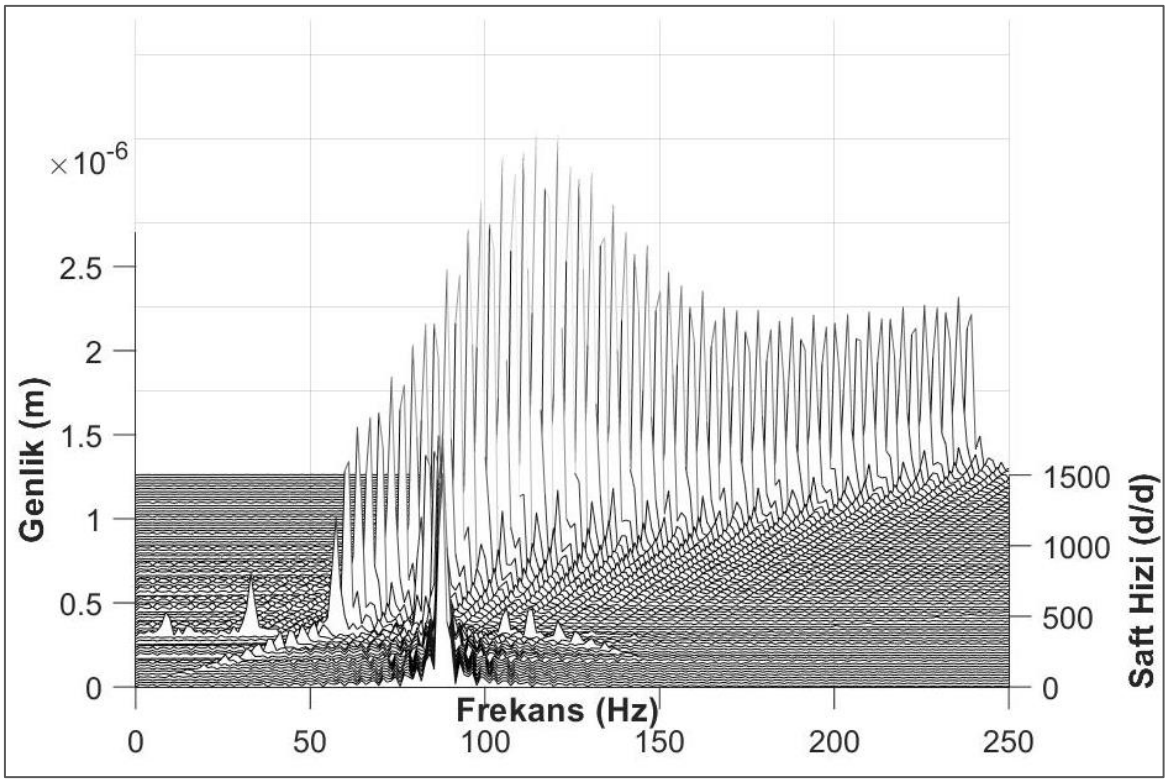
Şekil 6.22. 32 orifisli yatak için x ekseni waterfall diyagramı



Şekil 6.23. 32 orifisli yatak için y ekseni waterfall diyagramı



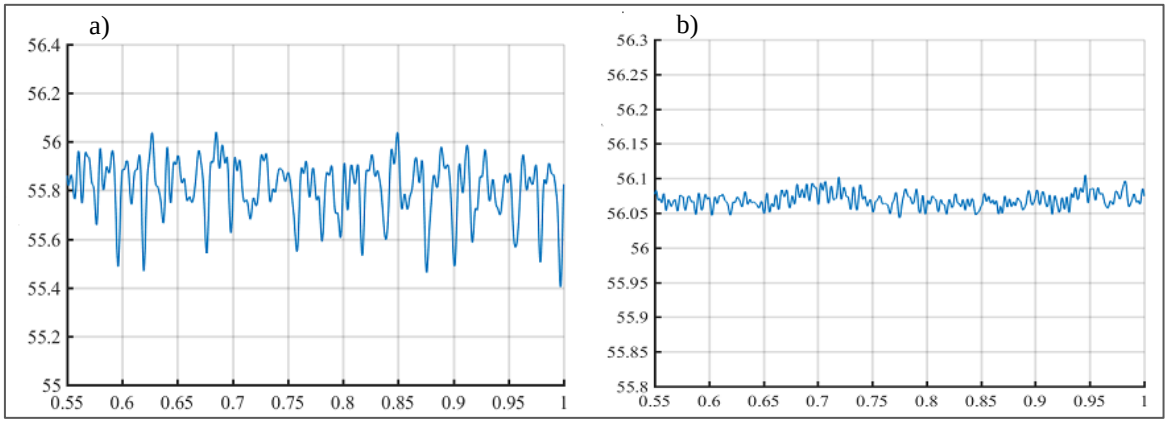
Şekil 6.24. 64 orifisli yatak için x ekseni waterfall diyagramı



Şekil 6.25. 64 orifisli yatak için y ekseni waterfall diyagramı

6.4. Deneysel Debi Sonuçları

Analizleri yapılan aerostatik yatakların, hesaplanan debi değerlerinin doğrulanması adına $\omega = 0$, (durgun şaft) yataklara hava verilerek debileri ölçülmüştür. BHY04 ve BHY64 yatakları için yapılan debi ölçümlerinin sonucu şekil 6.26'da görülmektedir. Yarı statik durumda yapılan deneylerde, yataklar yer çekimi etkisi altında olan 1.6 kg'lık şaftı kaldırmaktadır. Görüldüğü gibi BHY04 ve BHY64 yataklarının 1sn'lik simülasyon sonucunda ortalama debi tüketimleri eşit olmasına rağmen, BHY64 yatağında BHY04 yatağına göre debi değerinin azalıp artması yani dalgalanması oldukça düşüktür. Bu durum da BHY64 yatağının stabilitesinin daha iyi olduğunu göstermektedir.

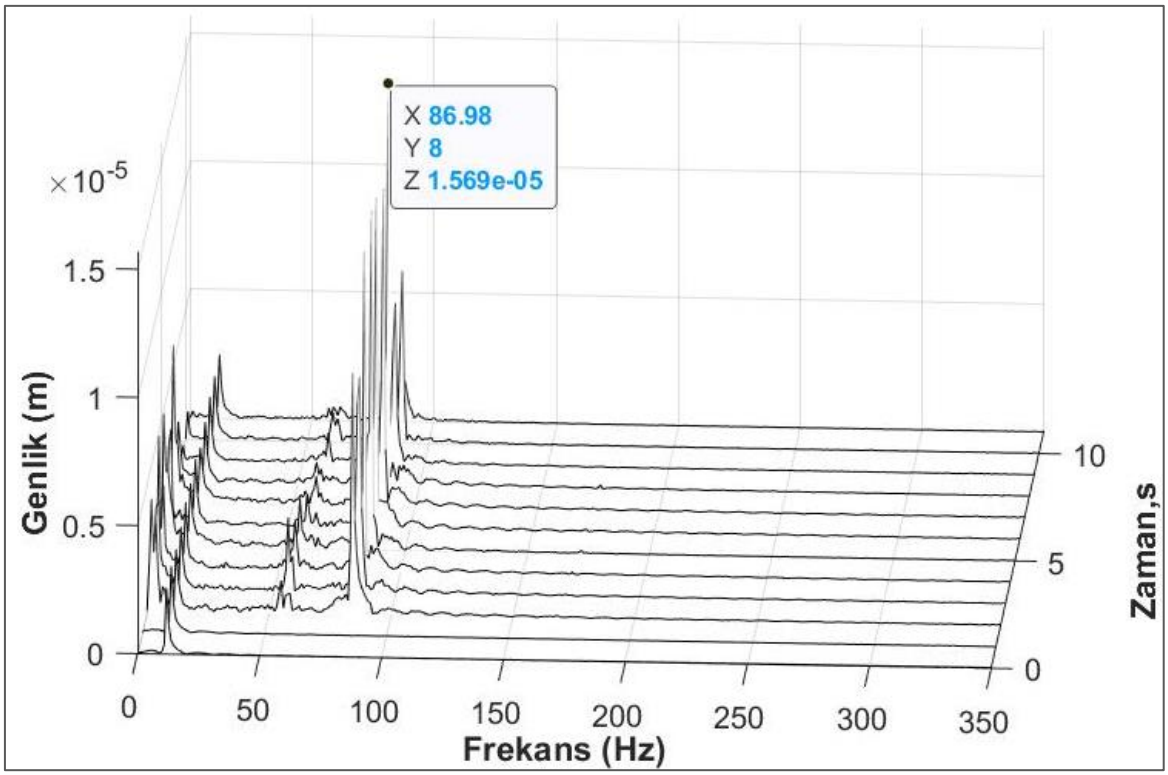


Şekil 6.26. Debi ölçüm sonuçları a) BHY04 b)BHY64

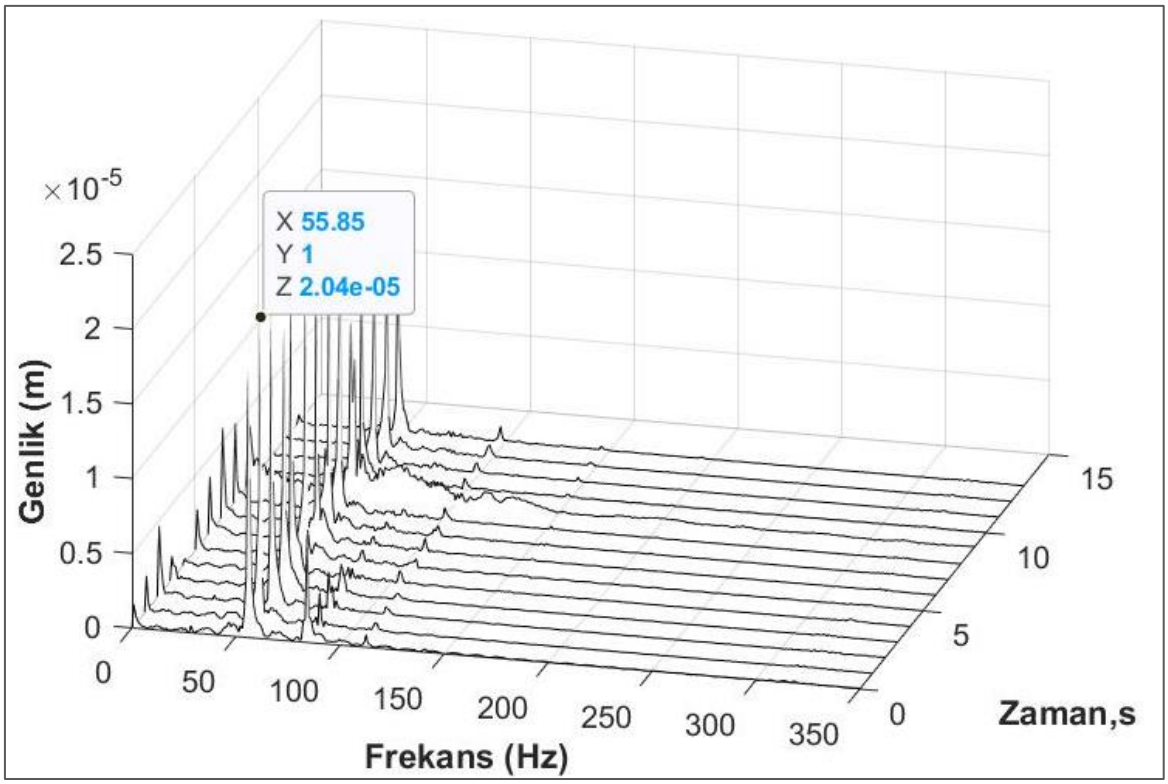
6.5. Deneysel Pnömatik Çekiç Kararsızlığı Sonuçları

BHY64 ile yataklanmış yatak-şaft sisteminde pnömatik çekiç kararlılığını deneysel olarak bulmak için, türbine hava verilmeden (şaft döndürülmeden), yataklara hava verilmiş ve daha sonra 10sn boyunca veri alınmıştır. Şaftın sağ ve solunda bulunan yataklar, rotoru dengeleyerek merkeze getirdikten sonra hangi eksende şaft doğal frekansı öğrenilmek isteniliyorsa o eksende şafta vurularak darbe testi yapılmıştır.

Şekil 6.27'de 1sn'lik test sonuçlarının frekans tanım bölgesinde, arka arkaya çizdirilmesiyle oluşan waterfall diyagramı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, 2.sn şafta x ekseninde vurulduktan sonra, 86 Hz civarında şaftın doğal frekansı ile zorlama olmaktadır. Şekil 6.24'de benzetim sonuçlarında 87 Hz olarak bulunan pnömatik çekiç kararsızlığı ile burada bulunan doğal frekans örtüşmektedir.



Şekil 6.27. x ekseni darbe testi sonucu (BHY64)

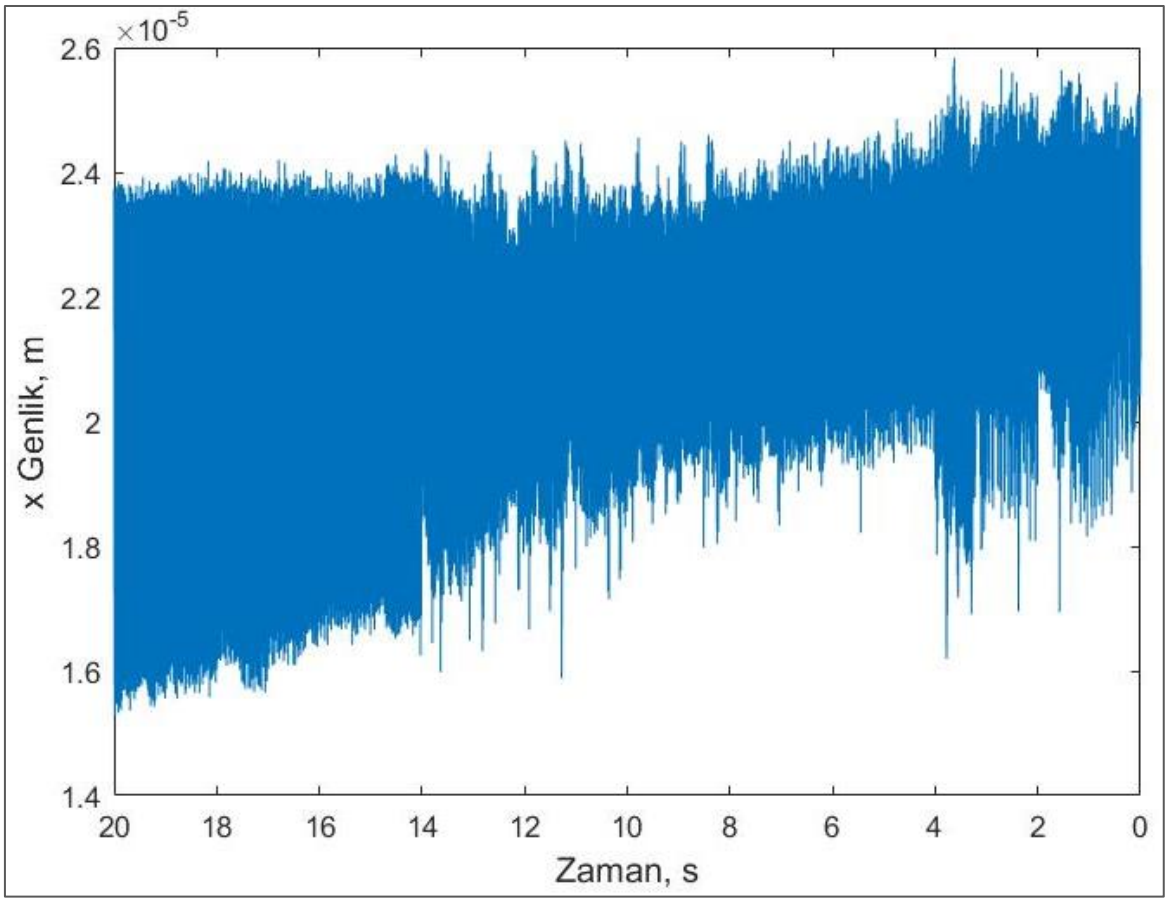


Şekil 6.28. z ekseni darbe testi sonucu (BHY64)

BHY64 yatağı için z ekseninde aynı test uygulandığında ise şekil 6.28'de görüldüğü gibi yaklaşık 55 Hz civarında, şaftın doğal frekansı olduğu görülmektedir. Yani şaftın z ekseninde hareket etmesi 55 Hz civarında bulunan bir zorlama ile görülmektedir.

6.6. Deneysel Yavaşlama Testi Sonuçları

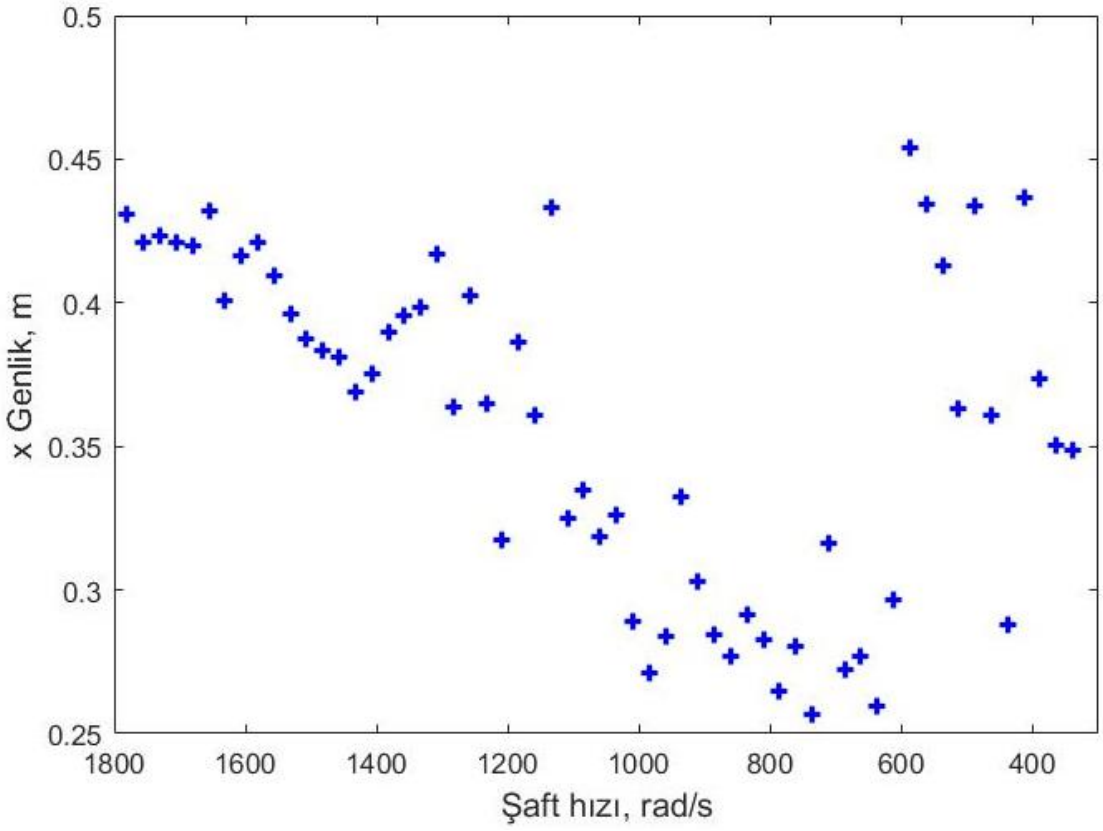
Simülasyon sonuçlarını doğrulamak adına yapılan deneysel yavaşlama testinde, iki ucundan radyal aerostatik yatakla desteklenmiş şaft 17 000 d/d hıza kadar çıkarılmış ve daha sonra türbine giden hava kesilerek yavaşlaması sağlanmıştır. BHY64 ile yapılan deneylerde 1s'lik veriler toplanarak şaftın yavaşlama esnasında dinamik davranışları incelenmiştir. Şaft hızı 17 000 d/d'dan yaklaşık 20sn'de 3 000 d/d'ya düşmüştür. Yavaşlama testinin zaman grafiği çizdirildiğinde şekil 6.29'daki gibi olmaktadır.



Şekil 6.29. Yavaşlama testi, zaman grafiği (BHY64)

Yavaşlama testi sonucunda beklenen genliklerin sürekli olarak azalması olmasına rağmen şekil 6.29'da görüldüğü gibi 17.sn, 11.sn, 8.sn ve 4.sn'de genlikler artmaktadır. Yani bu saniyelerdeki şaft hızı, kritik şaft hızıdır.

Şekil 6.29'da ise şaftın 1800 rad/s'den 350 rad/s hıza düşerken yaptığı salınımların, zirve-zirve genlikleri çizdirilmiştir. Şekil 6.29'dan 1300 rad/s de şaftın genliklerinin hızlı bir şekilde arttığı açıkça görülmektedir. Daha sonra genlikler belirgin bir şekilde düşerken 600 rad/s şaft hızından sonra hızlı bir şekilde yükselmektedir. Yani şaft, yavaşlama testine göre yatak-rotor sistemi yaklaşık 600 rad/s devir hızında rezonans bölgesine girmektedir. Daha sonra hızlı bir şekilde şaftın yatağa çarpıp durmasıyla deney sona ermiştir.

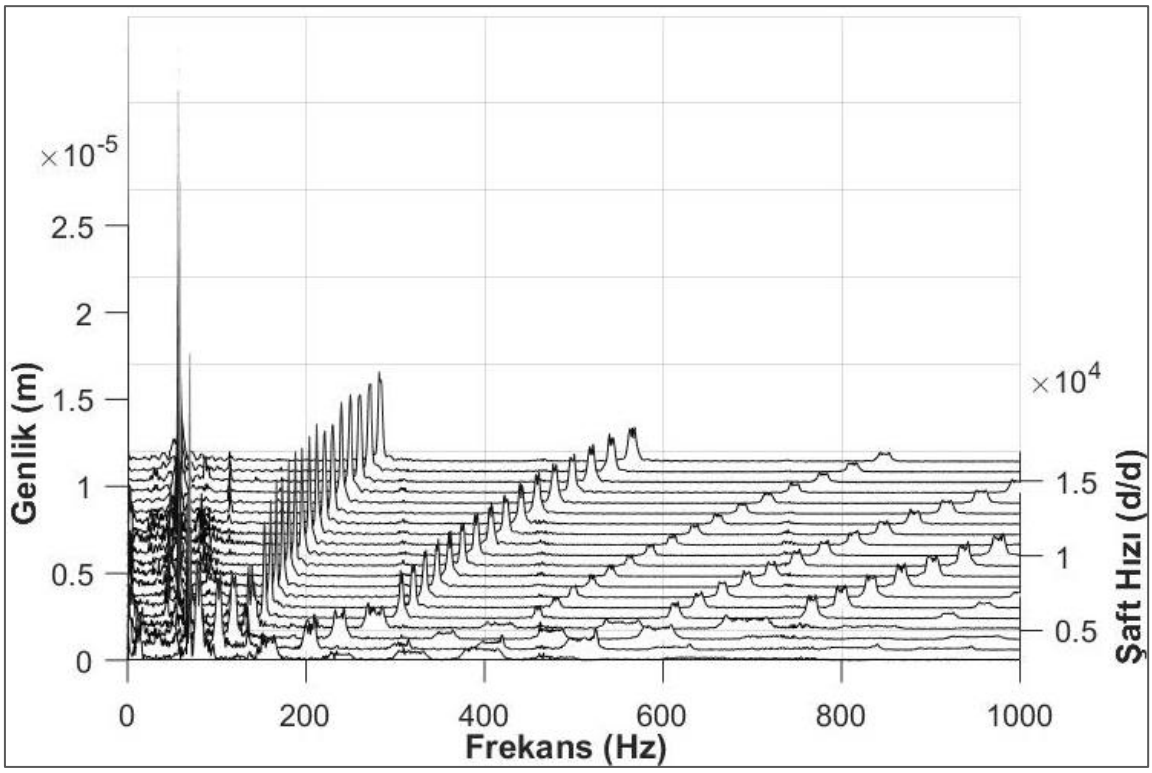


Şekil 6.30. Yavaşlama testi, zirve-zirve genlikleri (BHY64)

Şekil 6.31'de ise BHY64 ile yataklanmış rotorun, 17 000 d/d'dan 3 000 d/d'ya kadar düşerken yaptığı salınımlar frekans tanım bölgesinde gösterilmiştir. Şaftın ortasında bulunan eksenel aerostatik hava yataklar deneyler esnasında tam performans ile çalıştırılamadığı için, şaftın z eksenindeki hareketleri önlenememiştir. Dolayısıyla şekil 6.31'de görüldüğü gibi z ekseni hareketlerini ifade eden yaklaşık 56 Hz'de yüksek genlikli frekanslar bulunmaktadır.

Ayrıca şaftın hareketinin iki katı ve üç katında oluşan dallanmalar açık bir şekilde görülmektedir.

Eksenel yatakların tam olarak kullanılamaması, yüksek hızlarda şaftın eksenel yönde daha hızlı hareket etmesine neden olmaktadır. Sürtünmeler arttığı için, şaft doğal frekans geçiş bölgesine geldiğinde hızlı bir şekilde çarparak durmaktadır. Dolayısıyla bu bölgede şaftın dinamik davranışları incelenememiştir.



Şekil 6.31. Yavaşlama testi, frekans tanım bölgesi (BHY64)

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında çok sayıda orifis içeren aerostatik yatakların performansları incelenmiştir. Konvansiyonel yöntemlerle üretilen aerostatik yataklarda orifis sayısı sınırlı olduğu için eklemeli imalat yöntemi ile üretilen çok sayıda orifis içeren yataklar üretilmiş ve üretim parametreleri incelenmiştir.

Çok orifisli olarak tasarlanan yataklar için Reynold's denklemi MATLAB ortamında oluşturulan algoritma ile çözdürülerek yatakların şaft yüzeyine uyguladıkları basınç dağılımları hesaplanmıştır. Her bir yatak için basınç dağılımlarının yatakların performanslarına etkileri araştırılmıştır. Hesaplanan basınç dağılımları hareket denklemleri içerisinde çözdürülerek yatak-şaft sistemlerinin her birinin zaman tanım bölgesi ve frekans tanım bölgesinde dinamik davranışları incelenmiştir. Sonuç olarak aşağıdaki bilgilere ulaşılmıştır:

- SLA yöntemi ile aerostatik yataklar üretilebilir ancak aerostatik yatakların çok düşük radyal boşluklarda çalışması yüksek hassasiyetli üretimler gerektirmektedir. SLA yönteminde en büyük problemlerden biri üretilen parçaların boyutsal toleransları sağlamaması olduğundan her bir yatağın yatak çapı ve radyal boşluk miktarı için çalışma yapılmalıdır.
- SLA yönteminde üretim parametrelerini incelemek için tekrar tekrar üretim yapılmasına rağmen günümüzde reçinelerin giderek fiyatlarının düştüğü düşünüldüğünde, hala yüksek hassasiyet gerektiren metal yataklardan oldukça uygun fiyatlara üretim sağlanabilir.
- Parça üretilirken kullanılan fotopolimer reçinenin özellikleri boyutsal doğruluğun sağlanması adına çok önemlidir. Ayrıca yüksek yoğunluğa sahip reçineler kullanıldığı zaman mikro kanallardan geçemediği için sonradan kürlenerek orifislerin kapanmasına neden olabilmektedir.
- SLA yöntemi ile üretilen parçaların, metallere göre mukavemetlerinin çok daha düşük olmasına rağmen aerostatik yataklarda şaft ile yatak temas etmeden çalıştığından yatağa sadece havanın basıncı etkimektedir. Dolayısıyla reçine ile üretilen polimer aerostatik yatakların mukavemet değerleri yeterlidir.
- SLA yöntemi ile üretilen parçalarda, fotopolimer malzemenin doğası gereği çekmeler meydana gelmektedir. Bu çekmeler her noktadan eşit olmadığında tam yuvarlak olarak tasarlanan ürünler, elips şeklini almaktadır. Bu durumda yatakların her tarafından aynı

radyal boşluk olmadığından gelen hava şaftı bir tarafa vurarak sistemin çalışmasını engellemektedir. Bu durumdan kaçınmak için yatakların kürlenmesi esnasında mastar kullanılabilir.

- Üretilen radyal aerostatik yataklarda yalnızca iç çap önemli değildir, dış çapın boyutsal doğruluğu da ciddi öneme sahiptir. İstenilenden küçük olması durumunda muhafaza sistemi içerisinde oynayabileceği gibi istenilenden büyük olması durumunda baskı nedeniyle sehim yaparak şaftın çalışmasına engel olmaktadır.
- Bu çalışma kapsamında aerostatik yataklar SLA yöntemi ile üretilebileceği ve üretilen yatakların kullanılabileceği gösterilmiştir. Dolayısıyla aerostatik yatakların farklı çalışma parametreleri hızlı bir şekilde tasarlanabilecek, üretilebilecek ve denenebilecektir.
- Aynı hava tüketimine sahip olan yatak modelleri seçilerek Reynold's denklemi çözdürüldüğünde orifis sayısının artması ile basınç dağılımının homojenleştiği görülmektedir. Gözenekli yapılar ile de bu homojenlik sağlanabilir ancak hava tüketimi artacağından orifis sayısını artırmak daha basit bir yol olacağı gibi hava tüketimi az olacağından enerji tasarrufu da daha yüksektir.
- Orifis sayısı arttığında yataklar şaft yüzeyine daha homojen basınç uyguladığı için eşit hava debisi ile çok orifisli yatakların yük taşıma kapasiteleri ve yatak katılıkları az orifisli modellere göre çok daha yüksektir.
- Aerostatik yataklarda bulunan orifisler eksenel yönde yatak merkezine ne kadar yakın ise bir diğer deyişle atmosfere açılan yatak yüzeylerinden ne kadar uzaksa yatak performansları o kadar yüksektir. Dolayısıyla ileriki çalışmalarda 64 orifisli model için eksenel yönde orifisler ne kadar yatak merkezine çekilirse yatakların performansları o kadar yükselecektir.
- Aerostatik yataklarda aynı hava debisine sahip yataklardan, çok orifisli olan modellerin çalışma esnasında yatak merkezinden kaçıklıkları daha azdır. Dolayısıyla çok orifisli modellerin stabiliteleri daha yüksektir.
- Aerostatik yataklarda orifis sayısı arttıkça pnömatik çekiç kararsızlığının sistem dinamiği üzerinde etkisi artmaktadır. Ancak bu durum düşük şaft hızlarında olmaktadır.
- Pnömatik çekiç kararsızlığını çok orifisli modellerde azaltmak için orifis çıkışlarına basınç dengeleyici oluk tarzı yapılar tasarlanabilir. Böylece orifislerden çıkan hava direkt olarak şaft yüzeyine çarpmayacak önce basınç dengeleyici oluklara dolacağından pnömatik çekiç kararsızlığının etkisi azalacaktır.

- Bu çalışma ile birlikte aerostatik yataklar eşit hava debisinde daha fazla yük taşıyabilecek şekilde tasarlanmıştır ancak hava tüketimi aerostatik yatakların gelişmesinde hala çok büyük bir problem teşkil etmektedir. Aerostatik yatakların kullanımının yaygınlaşması için hava tüketiminin çok daha aza indirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. Warinner, D. K. (1973). *The dynamics and gas dynamics of a circular aerostatıc thrust bearing*. Doktora Tezi, Purdue University, West Lafayette, 1-19.

2. Fuller, D. D. (1956). *Theory and practice of lubrication for engineers*. New York: John Wiley and Sons, 30-72.

3. Hirn, G. (1854). Sur les principaux phénoménes qui preséntent les forttementes médiats. *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse*, 26, 188–277.

4. Willis, R. (1828). On the pressure produced on a flat plate when opposed to a stream of air issuing from an orifice in a plan surface. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 3(1), 40.

5. Petroff, N. (1883). Friction in machines and the effect of the lubricant. *Inzhenernii Zhurnal (St. Petersburg)*, 22, 71–140.

6. Petroff, N. (1884). Concerning the friction of solid bodies and principal results of experiments relative to the internal and external friction of lubricants. *Zhurnal Russkoe Fiziko-Kimicheskoe Obshchestvo*, 16, 14–20.

7. Petroff, N. (1886). Friction in machines. *Izvestiia St. Petersburg Praktika Tekhnoloy Institution*, 1, 119.

8. Margules, M. (1881). Über die bastimmug der reinbug und gleitungs coefficienten aus ebenen bewegungen einer flüssigkeit. *Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften*, 83, 558–605.

9. Dowson, D. (1978). Men of tribology. *Journal of Lubrication Technology*, 100, 311–315.

10. Couette, M. (1890). Studies relating to the friction of liquids. *Annales de Chimie et de Physique*, 21(6), 433-510.

11. Stefan, J. (1874). Versuche über die scheinbare Adhäsion. *Akademie der Wissenschaften*, 69, 713–735.

12. Tower, B. (1884). First report on friction experiments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 632, 58–70.

13. Tower, B. (1885). Second report on friction experiments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 632, 29–35.

14. Reynolds, O. (1886). On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 177, 157–234.

15. Kingsbury, A. (1931). On problems in the theory of fluid film lubrication, with an experimental method of solution. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 53, 59-75.

16. Kingsbury, A. (1987). Experiments with an air lubricated journal bearing. *Journal of the American Society for Naval Engineers*. 9(2), 267-292.

17. Rayleigh, L. (1917). A simple problem in forced lubrication. *Engineering, 104*, 617-697.

18. Rayleigh, L. (1918). A simple problem in forced lubrication. *Philosophical Magazine*, 6, 1–12.

19. Harrison, W. J. (1913). The hydrodynamical theory of lubrication with special reference to air as a lubricant. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 22, 39–54.

20. Sommerfold, A. (1904). The hydrodynamic theory of lubrication friction. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, 50(1-2), 97-155.

21. Michell, A. G. M. (1905). The lubrication of plane surfaces. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, 52, 123–137.

22. Fuller, D. D. (1947). Hydrostatic lubrication: I. Oild-Pad Bearings, II. Oil Lifts, III. Step Bearings, IV. Oil Cushions, *Machine Design*, 127, 31.

23. İnternet: Scopus. Elsevier BV. Scopus - document search. URL: https://www.scopus.com/term/analyzer, Son Erişim Tarihi: 12.07.2021.

24. Powell J. W. (1970). Application of high performance gas bearings. *Machinery and Production Engineering*, 116(2994), 499–506.

25. Majumdar, B. C. (1975). Analysis of externally pressurized porous gas journal bearings - II. *Wear*, 33(1), 37–43.

26. Majumdar, B. C. (1975). Analysis of externally pressurized porous gas journal bearings - I. *Wear*, 33, 25–35.

27. Pink, E. G. and Stout, K. J. (1978). Design procedures for orifice compensated gas journal bearings based on experimental data. *Tribology International*, 11(1), 63–75.

28. Markho, P. H., Grewal, S. S. and Stowel, T. B. (1979). Experimental investigation of the effect of misalignment and directionality on the performance of an externally-pressurized, orifice-compensated air journal bearıng. *Journal of Lubrication Technology Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 101(1), 28–37.

29. Rao, N. S. (1980). Analysis of aerostatic porous rectangular thrust bearings with offset loads. *Wear*, 59(2), 333–344.

30. Boffey, D. A., Waddell, M. and Deardent, J. K. (1985). A theoretical and experimental study into the steady-state performance characteristics of industrial air lubricated thrust bearings. *Tribology International*, 18(4) 229–233.

31. Bryant, M. R., Velinsky, S. A., Beachley, N. H. and Fronczak, F. J. (1986). A design methodology for obtaining infinite stiffness in an aerostatic thrust bearing. *Journal of Mechanical Design Transactions ASME*, 108(4), 448–453.

32. Yoshimoto S. and Anno, Y. (1994). Aerostatic thrust bearing with a self–controlled restrictor employing a floating disk (Static Characteristics)," *The Japan Society of Mechanical Engineers International Journal Series C, Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing*, 37(2), 369–375.

33. Kassab, S. Z., Noureldeen, E. M. and Shawky, M. A. (1997). Effects of operating conditions and supply hole diameter on the performance of a rectangular aerostatic bearing. *Tribology International*, 30(7), 533–545.

34. Tian, Y. (1998). Static study of the porous bearings by the simplified finite element analysis. *Wear*, 218(2), 203–209.

35. Yoshimoto S. and Kohno, K. (2001). Static and dynamic characteristics of aerostatic circular porous thrust bearings (effect of the shape of the air supply area). *Journal of Tribology*, 123(3), 501–508.

36. Fan, K. C., Ho, C. C. and Mou, J. I. (2002). Development of a multiple-microhole aerostatic air bearing system. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12(5), 636–643.

37. Su, J. C. T., Lie, K. N. (2003). Rotation effects on hybrid air journal bearings. *Tribology International*, 36(10), 717-726.

38. Lo, Y., Wang, C. C., Lee, Y. H. (2005). Performance analysis of high-speed spindle aerostatic bearings. *Tribology International*, 38(1), 5-14.

39. Luong, T. S., Potze, W., Post, J. B., Van Ostayen, R. A. J. and Van Beek, A. (2004). Numerical and experimental analysis of aerostatic thrust bearings with porous restrictors. *Tribology International*, 37(10), 825–832.

40. Wang, C., Jang, M. J., Yeh, Y. L. (2007). Bifurcation and nonlinear dynamic analysis of a flexible Ṣaft supported by relative short gas journal bearings. *Chaos, Solitons & Fractals*, 32(2), 566-582.

41. Belforte, G., Raparelli, T., Viktorov, V. and Trivella, A. (2007). Discharge coefficients of orifice-type restrictor for aerostatic bearings. *Tribology International*, 40(3), 512–521.

42. Miyatake, M., Yoshimoto, S. and Sato, J. (2006). Whirling instability of a rotor supported by aerostatic porous journal bearings with a surface-restricted layer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 220(2), 95-103.

43. Al-Bender, F. (2009). On the modelling of the dynamic characteristics of aerostatic bearing films: From stability analysis to active compensation. *Precision Engineering*, 33(2), 117–126.

44. Wei, L. and Gang, B. (2008).*Theoretical study of effects on static characteristics of orifice compensation aerostatic bearings with different structures of pockets*. 2008 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, Harbin, 20–24.

45. Howard, S. A. (2009). Misalignment in gas foil journal bearings: An experimental study. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 131(2), 1–7.

46. Chen, Y. S., Chiu, C. C. and Cheng, Y. D. (2010). Influences of operational conditions and geometric parameters on the stiffness of aerostatic journal bearings. *Precision Engineering*, 34(4), 722-734.

47. Zhang, X., Lin, B. and Wang, T. (2009). Finite-element analysis of aerostatic lubrication with porous restrictors based on HYPERMESH. *Journal of Vacuum Science & Technology B Microelectronics and Nanometer Structures*, 27(3), 1555.

48. Sun, Y., Yu, X., Liu, H. and Liang, Y. (2009). Analysis of dynamic stiffness and damping of partial porous aerostatic thrust bearings. A*pplied Mechanics and Materials*, 19, 596–600.

49. Miyatake M. and Yoshimoto, S. (2010). Numerical investigation of static and dynamic characteristics of aerostatic thrust bearings with small feed holes. *Tribology International*, 43(8), 1353–1359.

50. Otsu, Y., Miyatake, M. and Yoshimoto, S. (2011). Dynamic characteristics of aerostatic porous journal bearings with a surface-restricted layer. *Journal of Tribology*, 133(1), 011701.

51. Belforte, G., Colombo, F., Raparelli, T., Trivella, A. and Viktorov, V. (2011). Comparison between grooved and plane aerostatic thrust bearings: Static performance. *Meccanica*, 46(3), 547–555.

52. Shie J.S. and Shih, M.C. (2012). A study on optimization design and performance test of an aerostatic. *Advanced Materials Research*, 541, 3182–3186.

53. Cappa, S,. Reynaerts, D. and Al-Bender, F. (2014). Reducing the radial error motion of an aerostatic journal bearing to a nanometre level: Theoretical modelling. *Tribology Letters*, 53(1), 27–41.

54. Du, J., Zhang, G., Liu, T. and To, S. (2014). Improvement on load performance of externally pressurized gas journal bearings by opening pressure-equalizing grooves. *Tribology International*, 73, 156-166.

55. Huang, T., Shen, S., Lin, S. and Hsu, S. (2014). Pressure distribution in the air film and the porous conveyor air bearing, *Applied Mechanics and Materials*, 479-480, 380–384.

56. Dal A. and Karaçay, T. (2014). On dynamics of an externally pressurized air bearing with high values of clearance: Effect of mass flow rate. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2(7), 1350–1355.

57. Dal, A., Karaçay, T. (2014). *Dynamics of externally pressurized air bearing with high values of clearanc*, Presented at ASME 12th Biennial Conferencen on Engineering System Design and Analysis, Copenhagen, Denmark.

58. Hosokawa, T., Somaya, K., Miyatake, M. and Yoshimoto, S. (2015). Static characteristics of aerostatic thrust bearings with multiple porous inlet ports. *Journal of Tribology*,137(2), 1–8.

59. Wang C. C. and Lee, T. E. (2017). Nonlinear dynamic analysis of bi-directional porous aero-thrust bearing systems. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(12), 1–11.

60. Cui, H., Wang, Y., Yue, X., Huang, M. and Wang, W. (2017). Effects of manufacturing errors on the static characteristics of aerostatic journal bearings with porous restrictor. *Tribology International*, 115, 246-260.

61. Dal, A., Karaçay, T. (2017). Effects of angular misalignment on the performance of rotor-bearing systems supported by externally pressurized air bearing. *Tribology International*, 111, 276-288.

62. Cui, H. L., Wang, Y., Wang, B. R., Yang, H. and Xia, H. (2018). Numerical simulation and experimental verification of the stiffness and stability of thrust pad aerostatic bearings. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 31(2), 1-12.

63. Wen, Z., Wu, J. and Tan, J. (2020). An adaptive modeling method for multi-throttle aerostatic thrust bearing. *Tribology International*, 149, 105830.

64. Dal A. and Karaçay, T. (2021). Pneumatic hammer instability in the aerostatic journal bearing–rotor system: A theoretical and experimental analyses. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 235(3), 524–543.

65. Sahto, M. P., Wang, W., Imran, M., He, L., Li, H. and Weiwei, G. (2020). Modelling and simulation of aerostatic thrust bearings. *The Institute of Electrical and Electronics EngineersAccess*, 8, 121299–121310.

66. Li, W., Wang, G., Feng, K., Zhang, Y. and Wang, P. (2021). CFD-based investigation and experimental study on the performance of novel back-flow channel aerostatic bearings. *Tribology International*, 165(10), 107319.

67. Feng, K., Wang, P., Zhang, Y., Hou, W., Li, W., Wang, J. and Cui, H. (2021). Novel 3-D printed aerostatic bearings for the improvement of stability: theoretical predictions and experimental measurements. *Tribology International*, 163, 107149.

68. Colombo, F. Della Santa, F. and Pieraccini, S. (2020). Multi-objective optimisation of an aerostatic pad: design of position, number and diameter of the supply holes. *Journal of Mechanics*, 36(3), 347–360.

69. Ding, J. Chang, Y. Guo, K. Liu, Y. Zhao, X. and Dong, H. (2019). Effect of surface waviness on aerostatic bearing with speed. *Materials Science and Engineering*, 470, 012010.

70. Maamari, N., Krebs, A., Weikert, S., Wild, H. and Wegener, K. (2019). Stability and dynamics of an orifice based aerostatic bearing with a compliant back plate, *Tribology International*, 138(3), 279–296.

71. Li, W., Liu, M., Ren, Y. H. and Chen, Q. (2019). A high-speed precision micro-spindle use for mechanical micro-machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9–12), 3197–3211.

72. Chen, X., Chen, H., Zhu, J. and Jiang, W. (2017). Vortex suppression and nano-vibration reduction of aerostatic bearings by arrayed microhole restrictors. *Journal of Vibration and Control*, 23(5), 842–852.

73. Ghosh, M., Majumdar, B., Sarangi, M. (2013). *Theory of lubrication*, Yeni Delhi-Hindistan: Tata McGraw-Hill, 16-69.

74. Fox, R. W. and McDonald, A. T. (1994). *Inroduction to fluid mechanics.* (Fourth edition). USA: John Wiley & Sons, 596-616.

75. Harnoy, A. (2003). *Bearing design in machinery*. New York: Engineering Tribology and Lubrication, 111-134.

76. Khonsari, M. and Booser, E. (2017). *Applied tribology (Third Edition)*. USA: Wiley, 189-221

77. Tower, B. (1983). First and second report on friction experiments (friction of lubricated bearings). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 34(35), 58–70.

78. Szeri, A. Z., Spencer, R. L. Engineer, M.and Engineering, M. (1999). Fluid film lubrication: theory and design. *Choice Reviews*, 36(10), 5720.

79. Dal, A. (2017). *Radyal aerostatik hava yatakları ile destekleniş şaftın hibrid çözüm yaklaşımı ile dinamik analizi ve deneysel araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 29-70.

80. Camoeron, A. (1981). *Basic lubrication thoery*. UK: Ellis Horwood Ltd, 19-122.

81. Dal, A. (2014). *Basınçlı hava yatağı ile desteklenmiş yatak-rotor sisteminin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 11-71.

82. Powell, J. W. (1970). *The design of aerostatic bearings*. UK: Machinery Publishing Co. Limited, 110-160

83. Grewal, S. S. (1979). *An investigation of externally-pressurised orifice-compensated air journal bearings with particular reference to misalignment and inter-orifice variations*. Ph. D. Thesis, Open UniversityLiverpool Polytechnic, Milton Keynes, 275-276.

84. Brian Rowe, W. (2012). *Hydrostatic, aerostatic and hybrid bearing design*. UK: Butterworth-Heinemann, 25-48.

85. Karaçay, T., Aktürk, N. Dal, A. ve Atagün, O. (2015). *Basınçlı hava yataklı rotor dinamiğinin teorik ve deneysel incelenmesi*. Tübitak 1001, Proje NO 112M847.

86. Czolczynski, K. (1999). *Rotordynamics of gas-lubricated journal bearing systems*. NewYork: Springer, 1-48.

87. Dal A. ve Karaçay, T. (2015). On the numerical and experimental analysis of ınternal pressure in air bearings. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 9(7), 1221–1226.

88. Majumdar, B. C. (1970). The numerical solution of aerostatic journal bearings with several supply ports. *Wear*, 15(5), 331-340.

89. Peng J. P. and Carpino, M. (1993). Calculation of stiffness and damping coefficients for elastically supported gas foil bearings. *Journal of Tribology*, 115(1), 20-27.

90. Zhang, W., Zhou, J., Meng, G. (2011). Performance and stability an alysis of gas lubricated journal bearings in MEMS. *Tribology International*, 44(7), 887–897.

91. Powell, J. W. (1963). Gas behaviour and load capacity of hydrodynamic gas journal bearings. *Wear*, 6(6), 11.

92. Park, J., Kim, K. (2004). Stability analyses and experiments of spindle system using new type of slot-restricted gas journal bearings. *Tribology International*, 37(4), 451–462.

93. Dal, A., Karaçay, T. (2015). *Basınçlı hava yataklarında Reynold's denkleminin sayısal çözümü için diferansiyel transform sonlu farklar hibrid metodu uygulaması*. XIX. Ulusal Mekanik Kongresinde sunuldu, Trabzon, Türkiye.

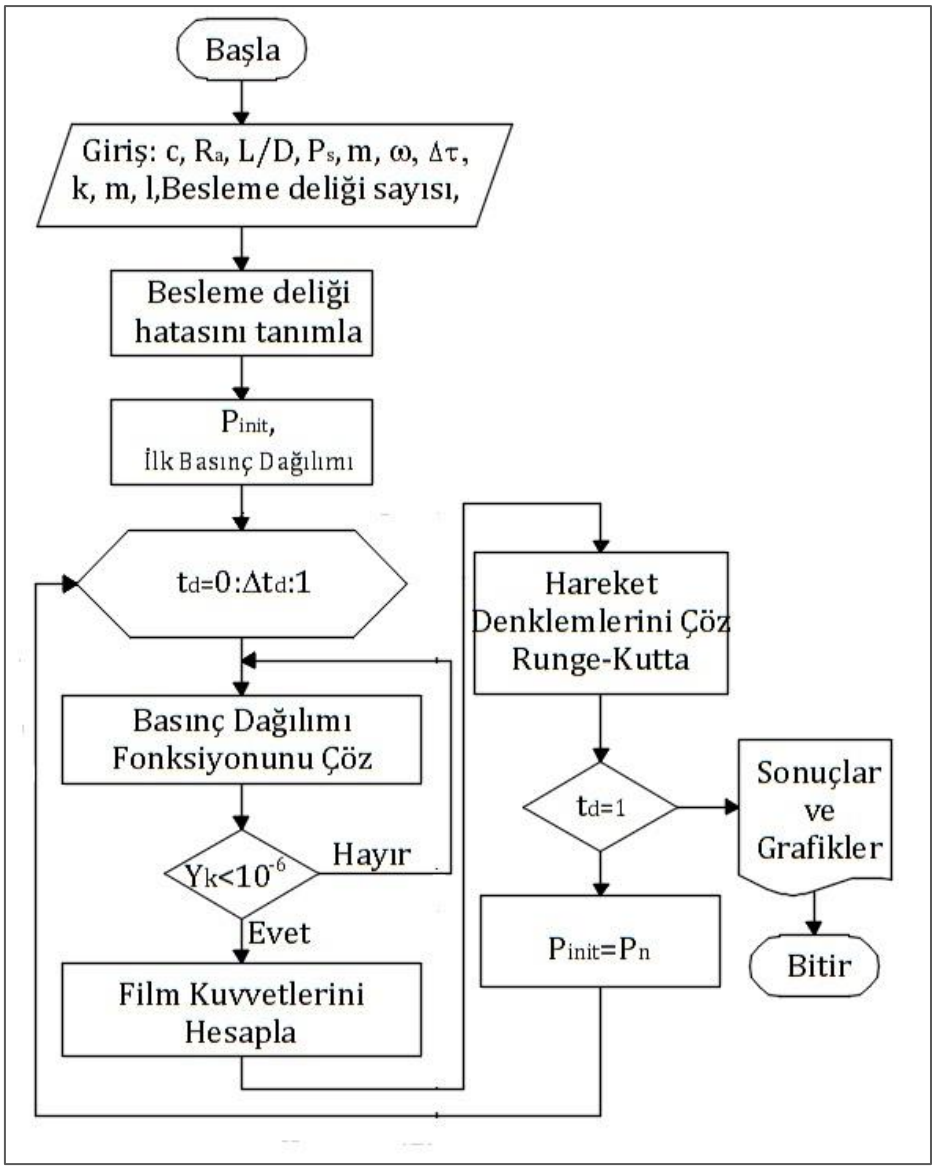
94. Dal, A., Karaçay, T. (2021). Performance characteristics of an aerostatic journal bearing with partially blocked orifices. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology,* 235(11), 2440-2454.

95. Atagün, O. (2018). *Basınçlı hava yataklarında orifis sayısı ve özelliklerinin rotor titreşimlerine etkisinin deneysel incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-29.

96. Dal, A. ve Karaçay, T. (2017). Effect of surface roughness of a radial aerostatic bearing on the load carrying capacity of a rotor-bearing system. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(4), 383–389.

EKLER

EK-1. Hareket denklemi çözüm algoritması



Şekil 1.1: Hareket denklemi çözüm algoritması



GAZİ GELECEKTİR..