

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

GAZ TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN FIRÇA KEÇE GEOMETRİSİNİN VE
ÇALIŞMA ŞARTLARININ KAÇAK DEBİYE ETKİSİNİN HAD ANALİZİ İLE
İNCELENMESİ

Ahmet Serhat BAHAR

NİSAN 2016

Makine Anabilim Dalında Ahmet Serhat BAHAR tarafından hazırlanan “GAZ TÜRBLNLERİNDE KULLANILAN FIRÇA KEÇE GEOMETRİSİNİN VE ÇALIŞMA ŞARTLARININ KAÇAK DEBİYE ETKİSİNİN HAD ANALİZİ İLE İNCELENMESİ” adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin Yüksek Lisans Tezi olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Yahya DOĞU

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Oğuz TURGUT _____

Üye (Danışman) : Prof. Dr. Yahya DOĞU _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tolga DEMİRCAN _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

GAZ TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN FIRÇA KEÇE GEOMETRİSİNİN VE ÇALIŞMA ŞARTLARININ KAÇAK DEBİYE ETKİSİNİN HAD ANALİZİ İLE İNCELENMESİ

BAHAR, Ahmet Serhat

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yahya DOĞU

Nisan 2016, 92 sayfa

Fırça keçeler, gaz ve buhar türbinli motorlarda ileri teknoloji sızdırmazlık elemanları olarak kullanılmaktadır. Fırça keçeler, daha yaygın kullanılan labirent keçelere göre %20'ye varan oranlarda az kaçak debiye sahip olmaları, uzun işletme sürelerinde kararlı çalışmaları, daha az eksenel yer kaplamaları gibi önemli avantajları nedeniyle daha iyi sızdırmazlık performansı sunan sızdırmazlık elemanlarıdır. Fırça keçelerin tasarımları birçok etkileşimli mekanik ve akış kaynaklı fiziği içerdiğinden, tasarım metodolojilerinin gelişimi hala devam etmektedir. Tasarımı uygun olmayan bir sızdırmazlık elemanı motorda artan kaçak debi ve yakıt sarfiyatına, verim düşüşüne, güvensiz işletme şartlarına ve ömür kaybına neden olmaktadır. Bu sebeple, doğrulanmış standart bir fırça keçe tasarım metodolojisi oluşturmak için araştırmacılar çalışmalara devam etmektedir. Bu kapsamda, fırça keçe geometrik tasarım parametrelerinin kaçak debiye etkilerinin araştırılması büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında fırça keçe tasarım parametrelerinden keçe geometrisinin ve çalışma şartlarının sızdırmazlık performansı üzerindeki etkileri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ile sayısal olarak incelenmiştir. Literatürde bu konuda az sayıda çalışma bulunmaktadır, ki bunlarda da sadece birkaç fırça keçe geometri incelenmiştir. Yapılan bu tez çalışmasında ise, fırça keçeye ait eksenel ve radyal yöndeki birçok geometrik uzunluğun ve çalışma şartlarının kaçak debi

üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Keçeye ait incelenen geometrik parametreler aksel yönde sırasıyla, ön plaka kalınlığı, tel paketi ile ön plaka arası mesafe, tel paketi kalınlığı ve arka plaka kalınlığıdır. Radyal yönde ise, ön plaka çit yüksekliği, tel radyal yüksekliği ve arka plaka çit yüksekliğidir. Çalışma şartları olarak ise; basınç oranı, radyal açıklık ve rotor dönme hızı incelenmiştir.

HAD analizleri ANSYS-Fluent v.14 paket programında yapılmıştır. HAD modeli 2-boyutlu aksel simetrik koordinatlarda oluşturulmuştur. Fırça keçeyi oluşturan tel paketi, gözenekli ortam olarak modellenmiştir. Gözenekli tel paketi ortamı için akış direnç katsayıları, literatürdeki deneysel kaçak debi ve basınç verileri kullanılarak kalibre edilmiştir. Hava sıkıştırılabilir akışkan olarak alınmış ve yoğunluğun değişimi ideal gaz denklemi ile tanımlanmıştır. Türbülanslı akış için k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır. Belirlenen sınır şartlarında süreklilik, momentum (Navier-Stokes) ve enerji denklemleri sayısal olarak çözülmüştür. İncelenen parametrelerin sızdırmazlık performansına etkileri hesaplanmış ve değerlendirilmiştir.

HAD analizleri sonucunda, fırça keçe tasarım parametrelerinden özellikle tel paketi kalınlığının ve arka plaka çit yüksekliğinin kaçak debiyi önemli oranda ve tel radyal yüksekliğinin kaçak debiyi az miktarda etkilediği görülmüştür. Tel paketi kalınlığının artırılması kaçak debiyi azaltırken, arka plaka çit yüksekliğinin artırılması ise kaçak debiyi artırmıştır. Artan tel radyal yüksekliğinin de kaçak debiyi az miktarda artırdığı hesaplanmıştır. Bununla birlikte, işletme parametrelerinden keçe radyal açıklığı ile basınç oranının artmasıyla kaçak debinin lineer olarak arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, keçenin pozitif radyal açıklıkta çalışması durumunda, bu açıklığın akışı domine ettiği ve kaçak debi üzerinde fırça keçe geometrisine nazaran daha etkin olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Fırça keçe, kaçak debi, fırça keçe geometrisi, HAD analizi, gözenekli ortam, akış modellemesi.

ABSTRACT

CFD INVESTIGATION OF BRUSH SEAL LEAKAGE DEPENDING ON SEAL GEOMETRY AND OPERATING CONDITIONS FOR GAS TURBINE APPLICATIONS

BAHAR, Ahmet Serhat

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Eng., M.Sc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yahya DOĞU

April 2016, 92 pages

Brush seals have been used as advanced seals in gas and steam turbine engines. Brush seals exhibit better sealing performance due to their advantages of leaking 20% of conventional labyrinth seals, having stable and long operation hours, and occupying less axial assembly space. Brush seal design methodology is still developing since their design contains many interacting mechanical and flow driven physics. An improperly designed sealing element may cause many serious problems such as increase in leakage and fuel consumption, loss of efficiency, unsafe operating conditions, and loss of service life. Therefore, researchers still carry on many studies to reach validated and standardized brush seal design methodologies. Thus, investigation of brush seal leakage performance depending on geometric design parameters has a crucial role.

Within the scope of this thesis, effects of brush seal design parameters, which are geometric dimensions and operating conditions, on the leakage performance were investigated via Computational Fluid Dynamics (CFD) analyses. In literature, there are a few studies which investigated some of brush seal design parameters. In this thesis work, almost all axial and radial dimensions in addition to operating conditions have been investigated to quantify the brush seal leakage. In terms of geometric dimensions, investigated axial parameters are front plate thickness, distance between front plate and bristle pack, bristle pack thickness, and backing plate thickness; while

investigated radial parameters are front plate fence height, bristle free height, and backing plate fence height. Apart from geometric parameters investigated operating conditions are pressure ratio, clearance, and rotor speed.

CFD analyses were carried out by using ANSYS-Fluent v.14 software. The CFD model was built as 2D axisymmetric. The bristle back of the brush seal was treated to be a porous medium. The flow resistance coefficients for the porous bristle pack were calibrated by using leakage and pressure measurements available in literature. Air flow is considered to be compressible flow by assuming ideal gas equation. For turbulent flow, k-epsilon turbulence model was used. Continuity, momentum (Navier-Stokes), and energy equations were numerically solved under described boundary conditions. After the solution, investigated parameters' effects on leakage performance were evaluated and discussed.

As a result of CFD analyses, in terms of geometric conditions; bristle pack thickness and backing plate fence height affect leakage considerably, while bristle free height affect leakage slightly. The increase of bristle pack thickness decreases leakage, however, the increment on backing plate fence height causes to a raise on leakage. In addition to, the increase of bristle free height also leads to a slight increasing on leakage. On the other hand, the aspect of operating conditions, the increase of clearance and pressure ratio increase leakage linearly. Moreover, in case of clearance operating, it is seen that clearance is a more dominant parameter on leakage in comparison with other effective geometric conditions.

Key words: Brush seal, leakage, brush seal geometry, CFD analysis, porous medium, flow modelling.

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sűresince her tűrlű destek ve fedakarlıęı gűsteren sevgili aileme, yűksek lisans eęitimim sűresince birçok açıdan űnemli tecrűbe paylaőımında ve tavsiyelerde bulunan deęerli danıőman hocam Prof. Dr. Yahya DOęU'ya, çalıőma esnasında katkıda bulunan deęerli TEI ekibine ve bu çalıőmayı SANTEZ projesi kapsamında destekleyen "TUSAő Motor Sanayii A.ő. (TEI)" ve "Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlıęı"na en içten teőekkűrlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Turbomakinalar ve Sınıflandırılması.....	2
1.2. Gaz Türbinleri ve Termodinamik Çevrimleri.....	3
1.3. Havacılık Motorları.....	10
1.4. Turbomakinalarda Kullanılan Sızdırmazlık Elemanları.....	16
1.5. Amaç ve Kapsam.....	20
1.6. Literatür Taraması.....	21
2. FIRÇA KEÇE	29
2.1. Fırça Keçe Yapısı ve Bileşenleri.....	29
2.2. Fırça Keçe İmalat Konfigürasyonları.....	32
2.3. Fırça Keçe Dinamik Davranışları.....	34
2.3.1. Tellerin Rotora Akması (Bristle blow-down).....	35
2.3.2. Tel Paketi Sıkılaştırılması (Bristle stiffening).....	35
2.3.3. Tel Paketi Asılı Kalması (Bristle hang-up) ve Histerisis (Hysteresis).....	36
2.3.4. Tel Titremesi (Bristle flutter).....	36
3. FIRÇA KEÇE AKIŞ ANALİZ YÖNTEMLERİ	37
3.1. Deneysel Akış Analiz Yöntemleri.....	37
3.2. Analitik Akış Analiz Yöntemleri.....	38
3.3. Sayısal Akış Analiz Yöntemleri.....	39
3.3.1. Çapraz Akış Modeli.....	40
3.3.2. Gözenekli Ortam Akış Modeli.....	42

4. FIRÇA KEÇE HAD ANALİZLERİ ve SONUÇLAR.....	46
4.1. Analiz Parametreleri ve Analiz Matrisi.....	46
4.2. Fırça Keçe HAD Modellemesi.....	48
4.3. Hız ve Basınç Dağılımı.....	60
4.4. Fırça Keçe Tasarım Parametrelerinin Kaçak Debi Üzerindeki Etkileri.....	68
4.4.1. Ön Plaka Kalınlığı (z_1).....	69
4.4.2. Ön Plaka ile Tel Paketi Arasındaki Mesafe (z_2).....	71
4.4.3. Tel Paketi Kalınlığı (z_3).....	72
4.4.4. Arka Plaka Kalınlığı (z_4).....	73
4.4.5. Ön Plaka Çit Yüksekliği (r_2).....	74
4.4.6. Tel Radyal Yüksekliği (r_3).....	75
4.4.7. Arka Plaka Çit Yüksekliği (r_1).....	76
4.4.8. Açıklık ve Basınç Oranı (r_0, R_p).....	78
4.4.9. Rotor Devir Sayısı (n).....	80
5. FIRÇA KEÇE TESTLERİ.....	82
6. SONUÇLAR.....	85
KAYNAKLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ.....	91

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Turbomakinaların genel sınıflandırma şeması.....	2
1.2. Açık çevrimli gaz türbini şeması.....	4
1.3. Kapalı çevrimli gaz türbini şeması.....	5
1.4. Brayton çevrimi için (a) T-s diyagramı, (b) P-v diyagramı.....	6
1.5. Brayton çevriminde ısı verimin basınç oranına göre değişimi.....	7
1.6. Gerçek-İdeal gaz türbini çevrimlerinin karşılaştırması.....	8
1.7. Tepkili jet motoru şeması ve T-s diyagramı.....	9
1.8. Pistonlu motor tahrikli pervaneli havacılık motoru.....	11
1.9. Tipik gaz türbini çevrim şeması.....	12
1.10. Turbojet motoru ve çevrim şeması.....	12
1.11. Turboprop motoru ve çevrim şeması.....	13
1.12. Propfan motoru ve çevrim şeması.....	14
1.13. Turbofan motoru ve çevrim şeması.....	14
1.14. Tepkili (jet) motorların itki verimlerinin karşılaştırılması.....	15
1.15. Tipik bir gaz türbinindeki ikincil akış sistemi.....	16
1.16. Temsili bir gaz türbini üzerindeki sızdırmazlık elemanları.....	18
1.17. Fırça keçe uygulama örneği.....	19
2.1. Fırça keçe şeması.....	29
2.2. Fırça keçe eksenel ve radyal boyutları.....	31
2.3. Fırça keçe tel paketi ve tel dizilişleri.....	31
2.4. Kaynak birleştirmeli fırça keçe	33
2.5. Halka kenetlemeli fırça keçe.....	34
3.1. Fırça keçe tel paketi.....	39

3.2. Tel paketi içindeki akım yolları	41
3.3. Tel paketi çapraz akış modeli: a) Doğrusal diziliş, b) Çapraz diziliş	42
4.1. HAD model geometrisi ve sınır şartları	48
4.2. Fırça keçe çit bölgesinde çözüm ağı (mesh) yapısı.....	51
4.3. Kaçak debi karşılaştırması.....	57
4.4. Temaslı çalışma için rotor yüzeyindeki aksenal basınç dağılımı.....	58
4.5. Temaslı çalışma için arka plaka yüzeyindeki radyal basınç dağılımı.....	59
4.6. Hız vektörleri.....	64
4.7. Çit bölgesinde hız vektörleri.....	65
4.8. Hız dağılımı.....	66
4.9. Basınç dağılımı.....	67
4.10. Fırça keçe kaçak debi inceleme parametreleri.....	69
4.11. Ön plaka kalınlığının kaçak debiye etkisi.....	70
4.12. Ön plaka ile tel paketi arasındaki mesafenin kaçak debiye etkisi.....	71
4.13. Tel paketi kalınlığının kaçak debiye etkisi.....	73
4.14. Arka plaka kalınlığının kaçak debiye etkisi.....	74
4.15. Ön plaka çit yüksekliğinin kaçak debiye etkisi.....	75
4.16. Tel radyal yüksekliğinin kaçak debiye etkisi.....	76
4.17. Arka plaka çit yüksekliğinin kaçak debiye etkisi.....	77
4.18. Basınç oranı ve açıklığın kaçak debiye etkisi.....	78
4.19. Açıklık çalışmada fırça keçe üzerinden kaçak debi geçiş yolları ve değerleri.....	79
4.20. Rotor dönme hızının kaçak debiye etkisi.....	80
5.1. Statik test sistemi örneği.....	83
5.2. Dinamik test sistemi örneği.....	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Fırça keçe boyutsal tasarım parametreleri	32
4.1. HAD analizi parametrik analiz matrisi	47
4.2. HAD analizi parametrik analiz matrisi.....	48
4.3. Fırça keçe HAD model bilgileri	50



SİMGELER DİZİNİ

A_u	Akış kesit alanı
a	Viskoz direnç katsayısı
b	Atalet direnç katsayısı
c_p	Özgül ısı
C	Gözenekli ortam atalet direnç katsayısı
ζ_1	Akışın ıslattığı çevresel uzunluk
d	Tel çapı
D	Gözenekli ortam viskoz direnç katsayısı
E	İç, potansiyel ve kinetik enerjiler toplamı
F	Tepkili motor itki kuvveti
F_x	Momentum denkleminde X yönündeki kaynak terimleri
F_r	Momentum denkleminde R yönündeki kaynak terimleri
G_k	Türbülans kinetik enerji üretimi (Ortalama hız gradyanlarına bağlı)
G_b	Türbülans kinetik enerji üretimi (Kaldırma kuvvetine bağlı)
h	Entalpi
J_j	Difüzyon akısı
k	Isı iletim katsayısı
k_{et}	Etkin ısıl iletkenliği
k_t	Türbülans modeline bağlı ısıl iletkenlik
K	Geçirgenlilik
L	Tel uzunluğu
\dot{m}	Kütleli debi
n	Rotor dönme hızı
P	Basınç
P_1	Toplam giriş basıncı
P_2	Çıkış basıncı

r	Radyal yöndeki uzunluk
r_0	Radyal açıklık (teller ile rotor arasındaki radyal mesafe)
r_1	Ön plaka çit yüksekliği
r_2	Tel radyal yüksekliği
r_3	Arka plaka çit yüksekliği
R_i	Rotor yarıçapı
R_d	Arka plaka çit yarıçapı
R_p	Basıncı oranı (P_1/P_2)
s	Entropi
S	Momentum denklemine eklenen kaynak terimi
S_h	Enerji denklemine eklenen ısı kaynağı terimi
S_k	k türbülans denklemine eklenen kaynak terimi
S_ε	ε türbülans denklemine eklenen kaynak terimi
S_A	Teller arasındaki boyuna adım
S_T	Teller arasındaki enine adım
T	Sıcaklık
T_1	Giriş sıcaklığı
T_2	Çıkış sıcaklığı
T_∞	Akış sıcaklığı
U_∞	Akış hızı
v	Özgül hacim
V_g	Durgun havadaki uçağın seyir hızı
V_φ	Türbinden çıkan yanmış gazların uçağa göre hızı
$V_{uçak}$	Uçak seyir hızı
V_x	Eksenel yöndeki hız bileşeni
V_r	Radyal yöndeki hız bileşeni
V_z	Açısal yöndeki hız bileşeni

V_a	Tel paketi içerisindeki boşluk hacmi
V_k	Tel paketi içerisindeki katı (tellere ait) hacim
Y_M	Türbülans üzerindeki sıkıştırılabilirliğin etkisi olarak değişken genleşmenin genel yitim oranına katkısı
z_1	Ön plaka kalınlığı
z_2	Ön plaka ile tel paketi arasındaki mesafe
z_3	Tel paketi kalınlığı
z_4	Arka plaka kalınlığı
q_g	Birim kütle için sisteme giren ısı
$q_ç$	Birim kütle için sistemden çıkan ısı
w_g	Birim kütle için kompresör işi
$w_ç$	Birim kütle için türbin işi
W_{net}	Türbin net işi
\dot{W}_t	Tepkili motor tepki gücü
x	Eksenel yöndeki uzunluk
α	Atalet direnci
β	Viskoz direnç
θ	Tel yerleştirilme açısı
δ	Çevresel olarak birbirini takip eden iki tel arasındaki mesafe
ε	Gözeneklilik
ϕ	Akış fonksiyonu
η_t	Gaz türbini ısı verimi
η_p	Gaz türbini tepki verimi
μ	Akışkanın dinamik viskozitesi
μ_t	Türbülans viskozitesi
ρ	Akışkanın yoğunluğu

\dot{Q}_g	Tepkili motora birim zamanda verilen ısı enerjisi
τ_{et}	Viskoz ısınmaya sebep olan kayma gerilmesi
σ_k	k için türbülans Prandtl sayısı
σ_ε	ε için türbülans Prandtl sayısı
i	Konuma ait yön (eksenel, radyal ve teğetsel yön)
∇	Del operatörü

KISALTMALAR DİZİNİ

HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
vd.	ve diğerleri

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında gaz türbinli turbomakinalarda kullanılan bir sızdırmazlık elemanı olan fırça keçenin HAD analizleri yapılmıştır. HAD analizleri ile fırça keçe geometrisinin kaçak debi performansındaki etkileri çeşitli çalışma şartları için incelenmiştir. Bu sebeple, konunun takip edilebilirliği ve anlaşılması açısından, fırça keçe uygulama sahası olan turbomakinalar ve sızdırmazlık elemanları hakkında genel bilgiler aşağıda verilmiştir.

Turbomakina ismi, üzerinde kanatlar bulunan ve dönen bir rotora sahip tüm makinalar için kullanılır. Turbomakinada, kanatlar arasından akan akışkan ile rotor arasında bir enerji aktarımı meydana gelir. Turbomakinalar, akışkanın enerjisi ile rotorun mekanik enerjisi arasındaki geçiş yönüne göre enerji üreten ve yutan olmak üzere iki temel sınıfta gruplandırılır. En genel haliyle, akışkanın enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren yani enerji üreten turbomakinalara türbin, rotordan aldığı mekanik enerjiyi akışkana aktaran yani enerji yutan turbomakinalara pompa/kompresör/fan ismi verilir.

Güç üretimi ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan turbomakina teknolojisi hızla gelişmektedir. Turbomakinaların yaygın olarak kullanıldığı sahalara aşağıda listelenmiştir:

- Gaz türbinleri (Enerji üretimi)
- Buhar türbinleri (Enerji üretimi)
- Ticari ve savunmaya yönelik havacılık motorları (Uçak motorları, helikopter motorları, füze motorları vb.)
- Rüzgar türbinleri (Enerji üretimi)
- Endüstriyel uygulamalar (pompa, fan, kompresör, su türbinleri, vb.)

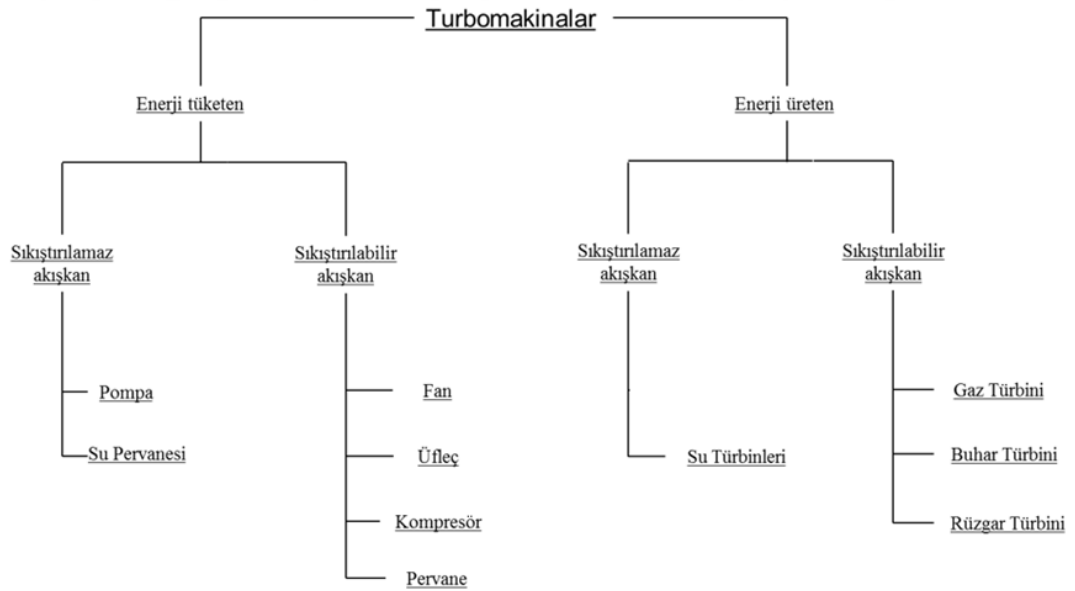
Gaz türbinli turbomakinalar, havacılık ve güç üretimi sahalarında kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasının konusu; özellikle havacılık ve güç üretimi sahasında kullanılan gaz türbinli motorlarda ve buhar türbinlerinde rotor-stator arasında sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan fırça keçe tipinde sızdırmazlık elemanının kaçak debi performansının keçe geometrisine ve çalışma şartlarına bağlı olarak HAD analizleri ile incelenmesi üzerinedir. Konu gereği öncelikli olarak

turbomakinalar ve sızdırmazlık elemanları hakkında genel bilgiler aşağıda verilmiştir.

1.1. Turbomakinalar ve Sınıflandırılması

Turbomakinalar, dönen bir çark üzerine yerleştirilmiş kanatlar arasından sürekli akan bir akışkan ile iş üreten ya da akışkana enerji kazandıran enerji dönüşüm makinalarıdır. Turbomakina, içinden geçen akışkana enerji veriyorsa bu makinalar pompa, fan, kompresör olarak adlandırılır. Bu makinalar, mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye dönüştüren makinalardır. Diğer taraftan, eğer turbomakina içinden geçen akışkanın enerji seviyesini düşürerek mekanik enerji üretiyorsa bu makinalar türbin olarak adlandırılır. Türbinler, hidrolik enerji yanında ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünü sağlarlar.

Enerji tüketme ve üretme açısından ve kullanılan akışkanın cinsine göre turbomakinaların genel bir sınıflandırması Şekil 1.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Turbomakinaların genel sınıflandırma şeması

Enerji tüketen turbomakinalardan pompalar, sıvıların enerji seviyesinin artırılmasında ve transferinde kullanılır. Fan, üfleç, kompresör ve pervane ise gazların enerji seviyesinin artırılmasında kullanılan turbomakinalardır. Fan ve pervaneler, düşük basınç artışı sağlayan yüksek debili makinalardır. Üfleçler ise orta seviye ile yüksek seviye arasında basınç artışı ve debi sağlayan makinalardır. Kompresörler ise düşük ve orta seviye arasındaki debileri çok yüksek basınca basan turbomakinalardır.

Enerji üreten turbomakinalardan türbinler içerisinden geçen akışkanın cinsine göre isimlendirilirler. Sıkıştırılmaz akışkan olarak davranan sıvıların, ki bu sıvı uygulamada çoğu zaman sudur, hidrolik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümü su türbinlerinde gerçekleşmektedir. Su türbinleri, karakteristik bir özellik olan özgül hızlarına göre genel olarak, Francis türbini, Kaplan türbini, Pelton türbini ve Banki türbini şeklinde sınıflandırılır.

Hava akımının (rüzgarın) sahip olduğu kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren türbinler rüzgar türbinleridir.

Yüksek basınç ve sıcaklıktaki kızgın buhar enerjisinin, sıcaklık ve basınç düşüşü şeklinde mekanik enerjiye dönüşümü buhar türbinlerinde gerçekleştirilir.

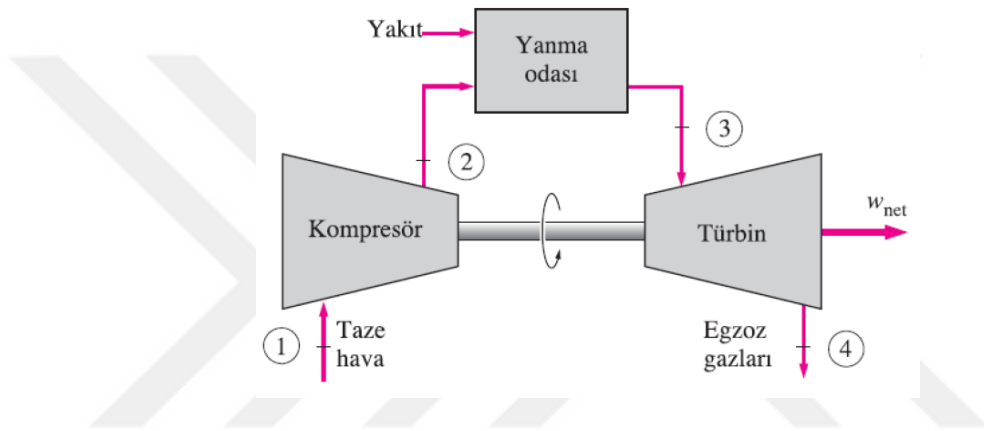
Basıncı ve sıcaklığı artırılmış havanın yanma odasında yakılmasıyla elde edilen yüksek basınç ve sıcaklıktaki yanma gazlarının enerjilerindeki düşüşün mekanik enerjiye dönüşümleri ise gaz türbinlerinde gerçekleştirilir.

Gaz türbinleri, elektrik üretiminde ve hava araçlarının motoru olarak kullanılmaktadır. Bir sonraki bölümde gaz türbinleri, çalışma prensipleri ve termodinamik analizlerine genel olarak yer verilmiştir.

1.2. Gaz Türbinleri ve Termodinamik Çevrimleri

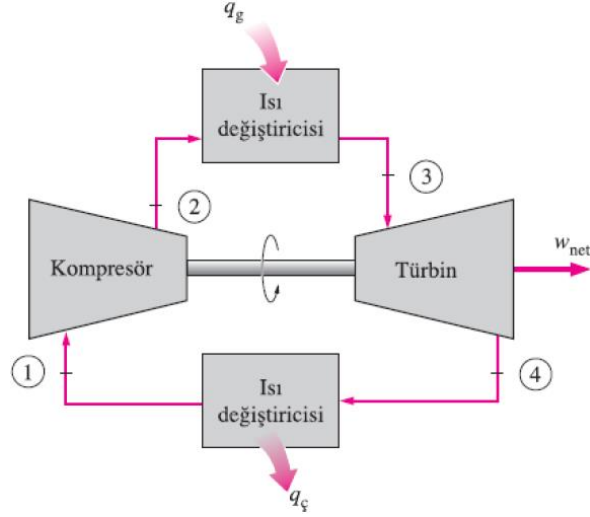
Gaz türbini; kompresör, yanma odası ve türbin olmak üzere 3 temel kısımdan oluşur. Şekil 1.2'de açık çevrim olarak çalışan bir gaz türbininin şeması görülmektedir [1]. Açık çevrimli gaz türbinlerinde, çevre şartlarındaki hava kompresörde sıkıştırılarak basıncı ve sıcaklığı yükseltilir. Yüksek basınçtaki hava yanma odasında yakıtın yanmasında kullanılır ve elde edilen yüksek basınç ve

sıcaklıktaki yanmış gazlar türbine yönlendirilerek çevre basıncına kadar genişlemesi sağlanır. Jet motorlarında, türbindeki genişleme atmosfer basıncına kadar olmayıp, kompresörün tahrik edilmesi için gerekli enerjinin sağlandığı basınca kadardır. Sonrasında yanmış gazlar bir lüle içerisinde atmosfer basıncına kadar genişler. Böylelikle hem kompresör ve yardımcı elemanların tahriki için gerekli enerji hem de hava aracının hareketi için gerekli itki sağlanmış olur. Türbinden sonra da yanmış gazlar atmosfere atılarak açık çevrim gerçekleşmiş olur. Açık gaz türbini çevrimi hava standardı kabulleri altında kapalı bir çevrim olarak da modellenebilir.



Şekil 1.2. Açık çevrimli gaz türbini şeması

Kapalı çevrim ise açık çevrimden farklı olarak, iş akışkanı havanın kompresörde sıkıştırılması, ısı değiştiricide ısı alması, türbinde genişlemesi, yine bir ısı değiştiricide ısı atması ve tekrardan kompresöre dönmesiyle tamamlanan çevrimdir. İş akışkanının ideal bir çevrimde dolaştığı kapalı çevrim, Brayton çevrimi olarak da anılır. Şekil 1.3’de kapalı çevrimli gaz türbini şeması verilmiştir [1].



Şekil 1.3. Kapalı çevrimli gaz türbini şeması

Brayton çevrimi 4 adet içten tersinir hal değişiminden oluşur ve aşağıda listelenmiştir.

- 1-2 : İzentropik sıkıştırma ($s=\text{sabit}$)
- 2-3 : Sabit basınçta ısı girişi ($p=\text{sabit}$)
- 3-4 : İzentropik genişleme ($s=\text{sabit}$)
- 4-1 : Sabit basınçta ısı çıkışı ($p=\text{sabit}$)

Toplamda 4 içten tersinir hal değişiminden oluşan Brayton çevrimine ait T-s ve P-v diyagramları aşağıda Şekil 1.4'de gösterilmiştir [1].

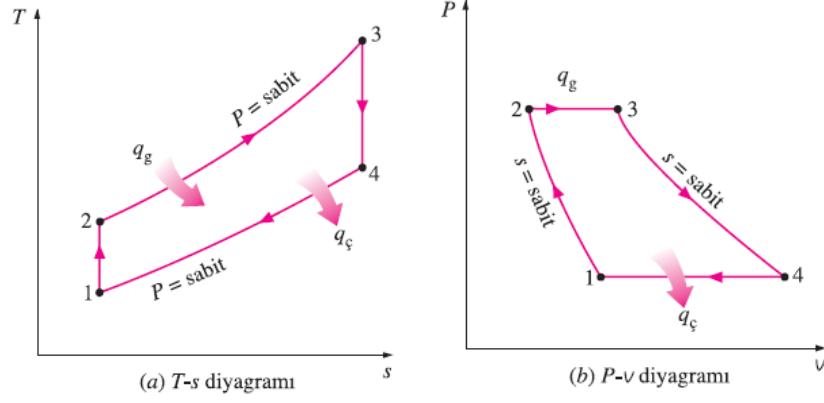
Brayton çevrimi için birim kütle bazında enerji korunumu denklemi (sürekli-akışlı bir sistem için, kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edildiğinde) aşağıdaki gibi yazılır.

$$(q_g - q_ç) + (w_g - w_ç) = h_ç - h_g \quad (1.1)$$

İş akışkanının aldığı ve verdiği ısılar ise soğuk hava standardı kabulleri altında aşağıda denklemlerle hesaplanır.

$$q_g = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2) \quad (1.2)$$

$$q_ç = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1) \quad (1.3)$$



Şekil 1.4. Brayton çevrimi için (a) T-s diyagramı, (b) P-v diyagramı

Böylelikle Brayton çevriminin ısı verimi aşağıda denklem ile hesaplanır.

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_g} = \left(1 - \frac{q_{\dot{\chi}}}{q_g}\right) = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (1.4)$$

1-2 hal değişimindeki sıkıştırma ile 3-4 hal değişimindeki genişleme prosesleri izentropik olduğu için $P_2=P_3$ ve $P_4=P_1$ şeklinde yazılır, ki bu sayede aşağıdaki izentropik hal değişimi eşitlikleri elde edilir.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4} \quad (1.5)$$

Bu durumda $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$ olur. Bu bağıntılar aşağıda verilen ısı verim bağıntısında

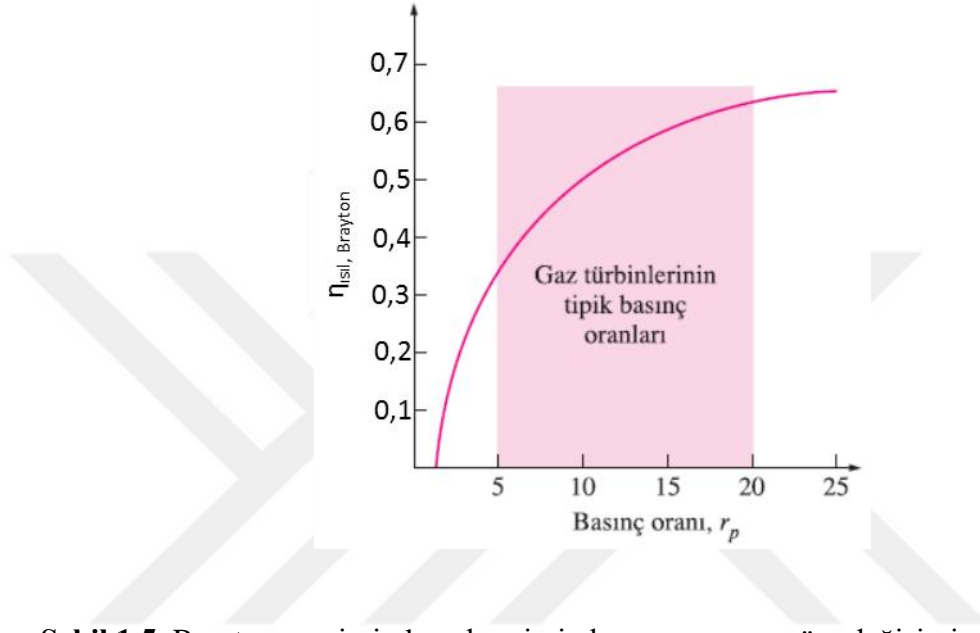
yerine yazılırsa ısı verim denklemi aşağıdaki hali alır.

$$\eta = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k}} \quad (1.6)$$

P_2/P_1 ifadesi aynı zamanda basınç oranı ve sıkıştırma oranı olarak da isimlendirilir ve r_p olarak gösterilir. Bu düzenlemeden sonra ısı verim denklemi,

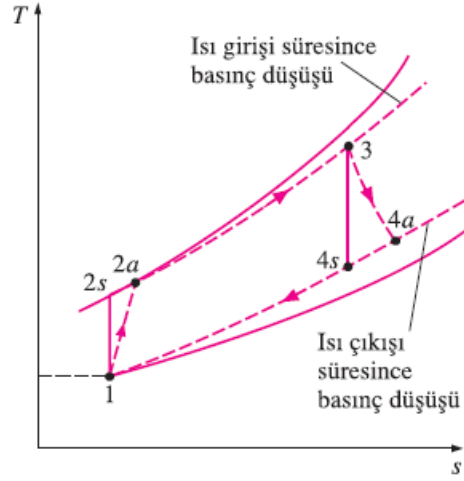
$$\eta = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \quad (1.7)$$

halini alır. Denklem 1.7’de görüldüğü gibi, Brayton çevriminin ısı verimi, basınç oranına (r_p) ve iş akışkanının özgül ısılar oranına (k) bağlıdır. Bu iki oran arttıkça verim artacaktır ki bu durum gerçek gaz türbinlerinde de söz konusudur. Şekil 1.5’de Brayton çevriminin ısı veriminin, basınç oranına göre değişimi görülmektedir [1].



Şekil 1.5. Brayton çevriminde ısı veriminin basınç oranına göre değişimi

İdeal gaz türbini çevrimi olarak bilinen Brayton çevriminde, kompresör ve türbindeki sıkıştırma ve genişleme işlemlerinin tersinir adyabatik (izentropik) prosesler olarak ve ısı geçişlerinin ise sabit basınç prosesleri olarak gerçekleştiği kabul edilir. Ancak gerçek gaz türbini çevrimlerinde tersinmezlikler nedeniyle kompresöre verilmesi gereken enerji daha fazla olurken, türbinden alınacak enerji de daha düşük olur ki bunun sonucunda gerçek durumdaki kompresör verimi ve türbin verimi düşer. Ayrıca ısı geçişleri sırasında az da olsa basınç kayıpları meydana gelir. Şekil 1.6’da gerçek gaz türbini çevriminin ideal gaz türbini çevriminden farkı genel olarak gösterilmiştir [1].



Şekil 1.6. Gerçek-İdeal gaz türbini çevrimlerinin karşılaştırması

Şekil 1.6’da, gerçek kompresör ve türbin çıkışları sırasıyla 2a ve 4a ile ve izentropik çıkışlar 2s ve 4s ile gösterilmiştir. Tersinmezlikler sonucunda oluşan kompresör ve türbin verimleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanır.

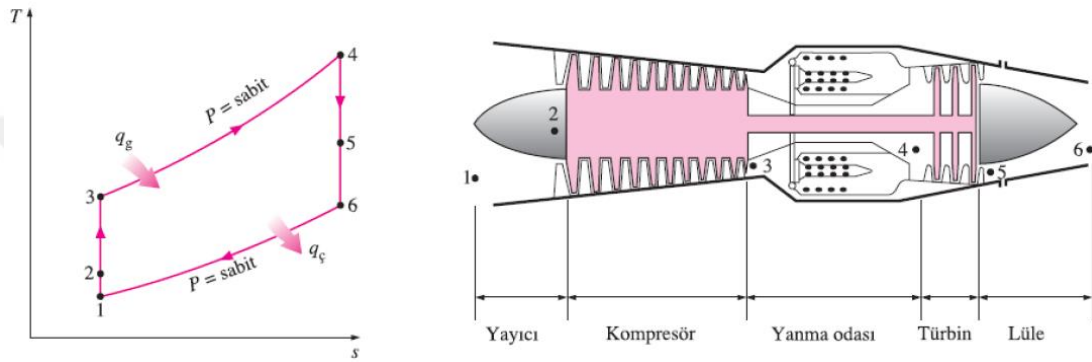
$$\eta_K = \frac{W_s}{W_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (1.8)$$

$$\eta_T = \frac{W_a}{W_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (1.9)$$

Gerçek gaz türbinlerinde kompresör ve türbin bileşenlerindeki verim düşüşü, komple türbinin ısıl verimini de ciddi oranlarda düşürmektedir. Gaz türbinlerinde ısıl verimlerin artırılması için Brayton çevriminde birtakım değişiklikler yapılmaktadır. Bunlar arasında; türbin çıkışındaki yüksek sıcaklıktaki gazların ısısının kompresör çıkışındaki iş akışkanına verilmesiyle yakıt sarfiyatını düşüren ön ısıtmanın gerçekleştirildiği rejeneratörün (ısı değiştirici) eklenmesi verimi önemli oranda artırmaktadır. Yine kompresör çıkışındaki akışkana uygulanacak ara soğutmalar ve türbin çıkışında uygulanacak ara ısıtmalar ile birlikte kullanılacak rejeneratörler sayesinde ısıl verim daha da artırılabilir [1].

Bu tez çalışmasının daha çok uygulama alanı olabilecek havacılık motorlarından tepkili bir motor (jet motoru) olan gaz türbinine ait şema ve T-s

diyagramı Şekil 1.7’de gösterilmiştir [1]. Motora giren hava yayıcıda yavaşlayarak basıncı biraz artırılır (1-2). Ardından kompresörde sıkıştırılarak basıncı ve sıcaklığı artırılarak yanma odasına gönderilir (2-3). Yanma odasında yakıtın yanması sonucunda oluşan yüksek sıcaklıktaki yanma gazları türbine yönlendirilir (3-4). Türbine yönlendirilen gazlar kompresör ve diğer elemanları çalıştıracak kadar gerekli enerjiyi sağlayacak basınca kadar genişletilir (4-5). Türbinden sonra egzoz gazları bir lüleden geçirilerek de uçak için gerekli itki sağlanır (5-6).



Şekil 1.7. Tepkili jet motoru şeması ve T-s diyagramı

Tepkili bir motorda meydana gelen itki, motora giren düşük momentumdaki hava ile motordan çıkan yüksek momentumdaki gazların, momentum farklarından kaynaklanmaktadır. Giriş ve çıkışta, yakıt girişinden kaynaklanan bir debi farklılığı olacaktır, ancak genellikle tepkili motorlardaki hava/yakıt oranı çok yüksek olduğundan hesaplamalarda giren ve çıkan kütleli debi olarak havanın debisi alınabilir [1]. Momentum denklemi ile tepkili bir motorda meydana gelen itki kuvveti aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$F = \left(\dot{m}V \right)_{\zeta} - \left(\dot{m}V \right)_{g} = \dot{m}(V_{\zeta} - V_{g}) \quad (1.10)$$

Bu denklemde, V_{ζ} egzoz gazlarının uçağa göre çıkış hızını ve V_g havanın uçağa göre giriş hızını (uçağın seyir hızı) göstermektedir. Tepkili motorlarda uçağın tepkisiyle

oluşan güce tepki gücü denir (\dot{W}_T) ve tepki kuvveti ile uçağın seyir hızının çarpımı ile hesaplanır.

$$\dot{W}_T = F.V_{uçak} = \dot{m}(V_\zeta - V_g).V_{uçak} \quad (1.11)$$

Tepkili bir motorun net işi 0'dır. Böylelikle diğer gaz türbinlerindeki gibi bir verim ifadesinden burada bahsedilememektedir. Tepkili motorlardan istenen tepki gücüdür (\dot{W}_T). Bunun için harcanan enerji ise yakıtın ısıl değeridir (\dot{Q}_g). Bu iki ifadenin oranı tepkili motorların itki verimini verir.

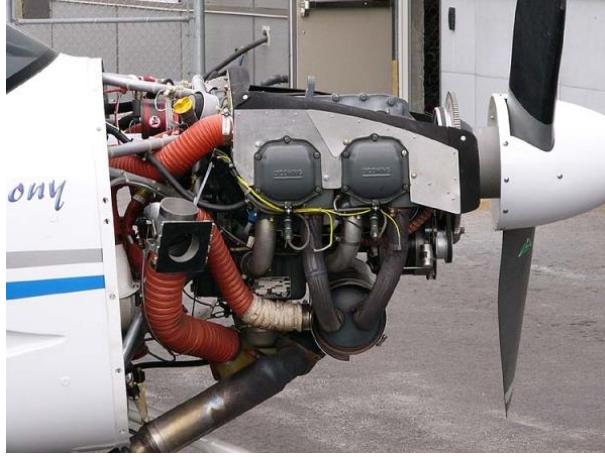
$$\eta_p = \frac{\dot{W}_T}{\dot{Q}_g} \quad (1.12)$$

İtke verimi, yakıtın yanması ile açığa çıkan enerjinin ne kadarının tepki enerjisine dönüştüğünün bir ölçüsüdür. Tepki enerjisi haricinde yakıttan sağlanan enerji egzoz gazlarının kinetik enerjilerini ve entalpilerini de artırıcı rol oynamaktadır [1].

Bir sonraki bölümde pervaneli uçak motorları haricinde gaz türbinlerinin kullanıldığı havacılık motorlarından bahsedilmiştir. Bu motorlar turbojetler, turbopropeller (propjetler), turbofanlar, propfanlar ve çeşitli füze motorlarından sırasıyla kısa olarak bahsedilmiştir.

1.3. Havacılık Motorları

Havacılıkta ilk olarak pistonlu motor ve pervane grubundan oluşan pervaneli uçaklar kullanılmıştır. Şekil 1.8'de pervaneli uçaklarda kullanılan pistonlu bir motor görülmektedir. Pervaneli uçaklar kullanım amaçlarına göre ekonomik görünmesine rağmen, bu uçakların uçuş irtifalarının ve hızlarının limitli olması havacılık sektörünü jet motorlarına yöneltmiştir. Bununla birlikte günümüzde yüksek irtifaların gerekli olmadığı İHA'larda (İnsansız Hava Aracı) pistonlu motorlar kullanılmaktadır.



Şekil 1.8. Pistonlu motor tahrikli pervaneli havacılık motoru

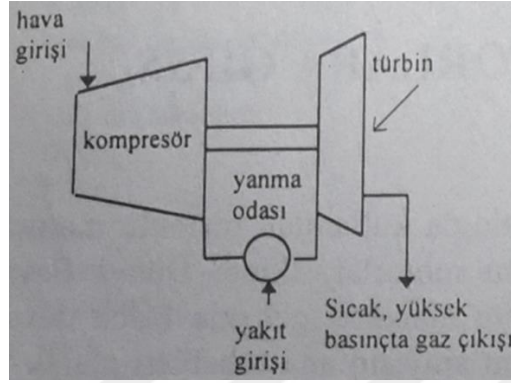
Havacılıkta kullanılan gaz türbinli motorlar itkinin sağlanmasına bağlı olarak aşağıdaki gibi isimlendirilir.

- Turbojet
- Turboprop
- Turbofan

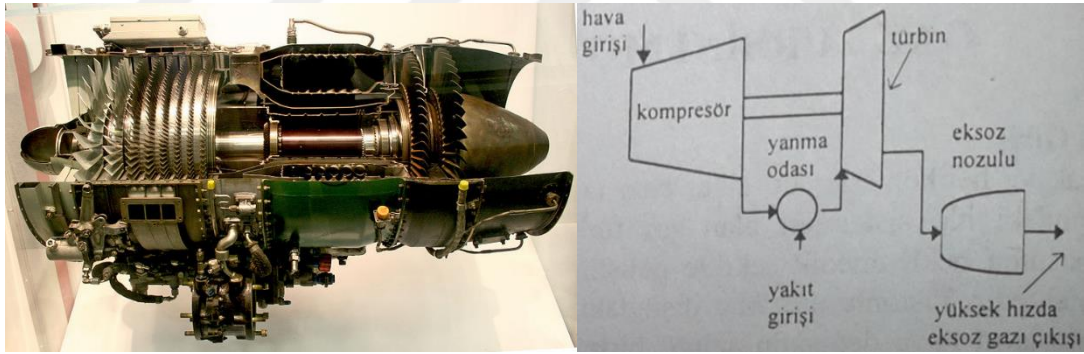
Turbojet:

Jet motorları (tepkili motorlar) esas olarak kompresör, yanma odası ve türbin parçalarını barındıran bir gaz türbininden oluşmaktadır. Gaz türbinleri, genel olarak bir kompresör vasıtasıyla sıkıştırılan havanın yanma odasında yakıtın yanmasıyla sıcaklığının artırılması sonucu oluşan yanmış gazların türbine yönlendirilmesi ile çalışır. Şekil 1.9'da çevrim şeması gösterilmiştir [2]. Havacılıktaki tepkili motorlarda kullanılan gaz türbinlerinin esas amacı uçağı itecek tepkinin sağlanmasıdır. Bu ise türbinden çıkan sıcak gazların bir lüleden genişleyerek, hız kazanması sonucu uçağı itecek momentumun (itkinin) sağlanması ile mümkündür. Bu sebeple, gaz türbini çıkışına sıcak gazların genişleyip hızlandığı bir egzoz nozulunun eklenmesiyle turbojet motorları oluşmaktadır. Şekil 1.10'da sırasıyla bir turbojet motoru ve bu motorun genel hatlarıyla ifade edilmiş çevrim şeması [2] verilmiştir. Turbojet

motorlarının geliştirilmesiyle daha yüksek hızlara ulaşılmış (süpersonik) ve uçuş menzili de artmıştır. Bu motorlar, uzun menzilli yolcu uçakları ve yüksek hızlara ve ani manevra kabiliyetlerine gereksinim duyan savaş uçaklarında kullanılmaktadır.



Şekil 1.9. Tipik gaz türbini çevrim şeması



Şekil 1.10. Turbojet motoru ve çevrim şeması

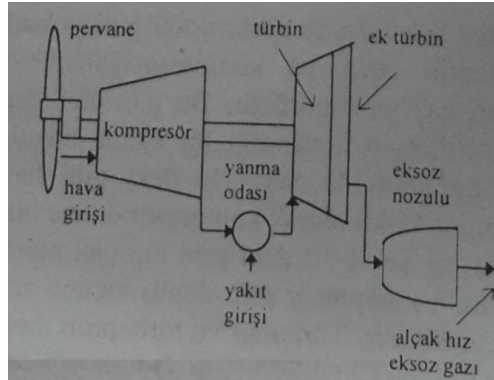
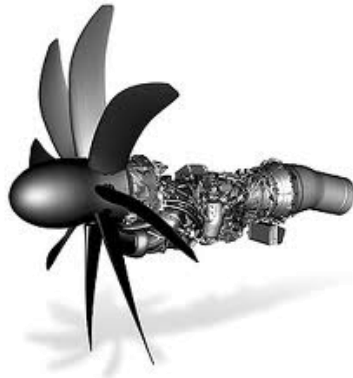
Turboprop:

Pervaneli motorlara sahip uçakların hareketi büyük bir akışkan kütlelerinin yavaş bir şekilde ivmelendirilmesiyle sağlanırken, turbojet motorlarının hareketi daha az bir kütleyle büyük bir ivme kazandırılmasıyla sağlanmaktadır. Her iki

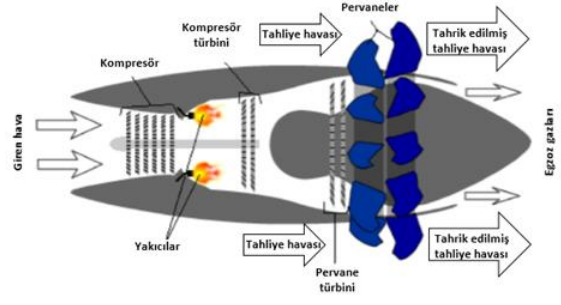
yöntemin üstünlüğünün kullanılması amacıyla turboprop (propjet) motorlar geliştirilmiştir. Turboprop motoru, turbojet motorunun önüne bir pervane ve türbin-kompresör şaftı ile dönüş hızının azaltıldığı bir dişli kutusunun eklenmesi sonucu oluşur. Şekil 1.11’de sırasıyla bir turboprop motoru ve bu motorun genel hatlarıyla belirtilmiş çevrim şeması [2] verilmiştir.

Turbofan (ve turboprop) motorlarda yanma odasının dışından geçen havanın kütleli debisinin yanma odasından geçen havanın debisine oranına fan debi oranı (by-pass oranı) denilir ki bu oranın artırılması motorun ürettiği tepkiyi de artırmaktadır. Turbofan motorlarda bu oran 5 veya 6 iken, turboprop motorlarda 100’e kadar çıkabilmektedir. Bu da turboprop motorlarının itki verimlerinin genel olarak yüksek olduğunu göstermektedir.

Turboprop motorların yüksek itki verimlerine rağmen yüksek hızlarda ve irtifalarda verimlerinin düşmesi nedeniyle yeni tip turboprop (propfan) motorlar geliştirilmiştir. Şekil 1.12’de sırasıyla bir propfan motoru ve bu motorun genel hatlarıyla belirtilmiş çevrim şeması [2] verilmiştir. Propfan motorlar daha yüksek hızlarda ve irtifalarda çalışabilmektedir. Bu sayede orta büyüklükteki bir propfan motoru aynı şartlarda çalışan daha büyük bir turbofan motorundan daha az yakıt sarfiyatıyla uçabilmektedir.



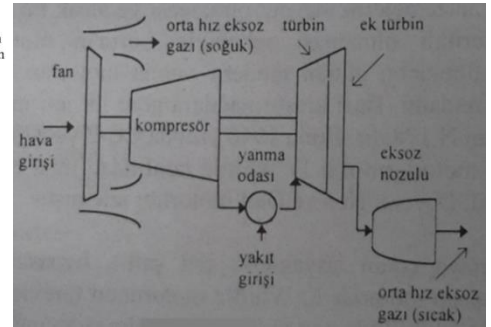
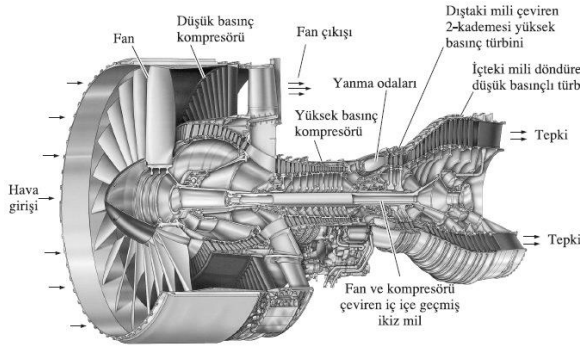
Şekil 1.11. Turboprop motoru ve çevrim şeması



Şekil 1.12. Propfan motoru ve çevrim şeması

Turbofan:

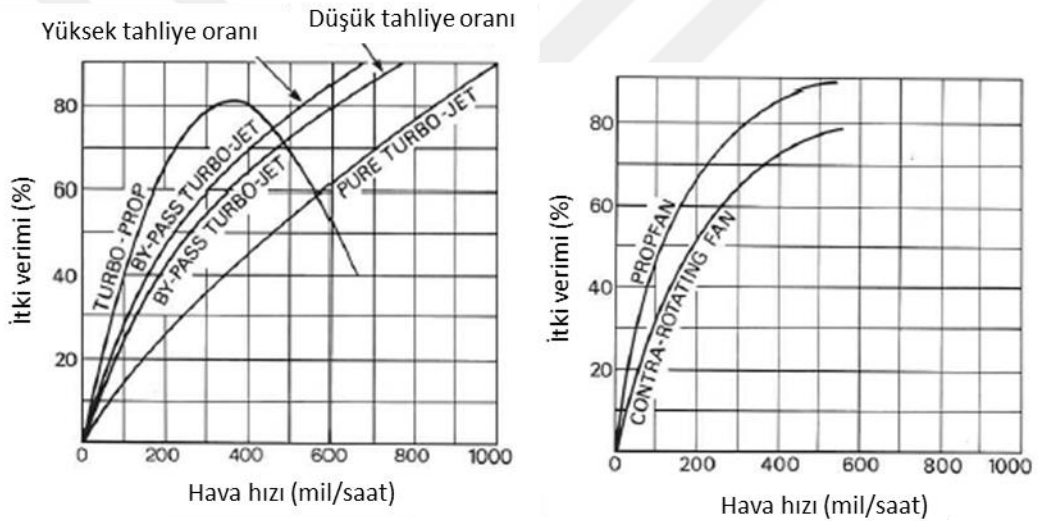
Turbofan motorunda, kompresör önündeki fan ile alınan havanın büyük bir kısmını fan kanalından geçerek türbinin çıkışındaki egzoz gazlarıyla birleştirir. Bu sayede motorun tepkisi artırılırken ayrıca fan kanalından daha düşük hızda geçen hava yüksek hıza sahip egzoz gazlarıyla birleşerek motor gürültüsü de azaltılmış olur. Şekil 1.13’de sırasıyla bir turbofan motoru ve bu motorun genel hatlarıyla belirtilmiş çevrim şeması [2] verilmiştir.



Şekil 1.13. Turbofan motoru ve çevrim şeması

Havacılık sektöründeki uçak motorları verim, yakıt sarfiyatı ve artan taleplere bağlı olarak geliştirilmiş ve hala da geliştirilmektedir. Şekil 1.14’de havacılıktaki tepkili motorlara ait itki verimleri karşılaştırılmıştır [3].

Belirli bir hız değerine kadar turboprop motorlar turbofan ve turbojet motorlara göre daha yüksek itki verimine sahip olmaktadır. Turbofan motorlarda fan debi oranına bağlı olarak itki veriminin arttığı görülmektedir. Yeni nesil turboprop motorlar olan propfan motorlarda itki veriminin daha da arttığı görülmektedir. Ayrıca turboprop motorların yüksek hızlarda verimlerinin düşmesi nedeniyle kullanımlarındaki sınırlama ise propfan motorlarda görülmemektedir. Bu durum propfan motorların kullanımlarını avantajlı hale getirmektedir.



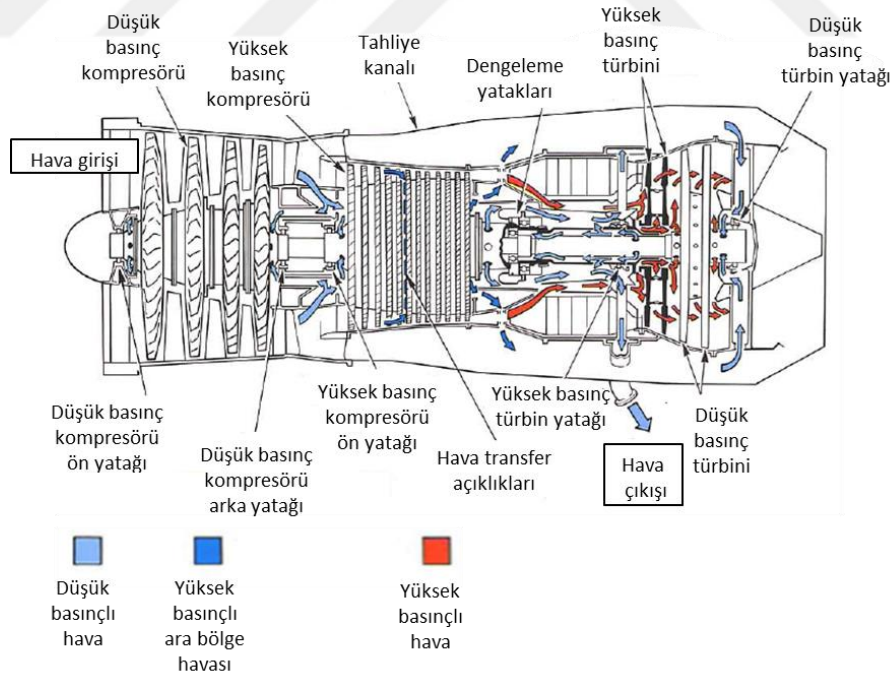
Şekil 1.14. Tepkili (jet) motorların itki verimlerinin karşılaştırılması [3]

Uçak motorlarının gelişim süreçlerinden de görüleceği üzere, bir turbomakina açısından verim çok önemli bir parametredir. Bu nedenle de yakıt sarfiyatı kilit bir rol oynamaktadır. Bunun yanında turbomakinanın ömrü ve güvenilirliği de turbomakina için çok önemli konulardır. Böylelikle turbomakinaların yakıt tüketimini, verimini, ömrünü ve güvenilirliğini etkileyen sızdırmazlık elemanlarının

doğru bir şekilde kullanılmasının büyük öneme sahip olduğu görölmektedir. Bu tez çalışmasının da konusu olan sızdırmazlık elemanlarının önemi ve çeşitleri hakkında genel bilgiler aşağıdaki bölümde verilmiştir.

1.4. Turbomakinalarda Kullanılan Sızdırmazlık Elemanları

Havacılıkta kullanılan turbomakinalarda güç çevriminin gerçekleştiği motorda, ana hava akış hattı haricinde ikincil hava akış hatları vardır. Bu ikincil hava akış hatlarından geçen ve yaklaşık olarak toplamdaki ana akışın 1/5'ine varabilecek akışkan debisi, kullanıldıkları turbomakinaların verimli ve güvenli çalışmalarına yardımcı olacak şekilde önemli fonksiyonları yerine getirirler [3]. Bu fonksiyonlar arasında; yatakların soğutulması, kanat ve çeşitli ekipmanların soğutulması, aksenal yük dengelemesi, ters akış önlenmesi, vb. gösterilebilir. Şekil 1.15'de tipik bir gaz türbinindeki ikincil hava akış hatları gösterilmiştir [3].



Şekil 1.15. Tipik bir gaz türbinindeki ikincil akış sistemi [3]

Ana akış hattı ve ikincil hava akışı hatları üzerindeki sabit stator ve dönen rotor arasındaki kaçak debiyi kontrol etmek amacıyla çeşitli sızdırmazlık elemanları kullanılır. Bu sızdırmazlık elemanları, içten yanmalı motorlarda kullanılan piston segmanlarına benzer şekilde yüksek basınç bölgelerinin oluşumunda ve korunmasında hayati bir görev gerçekleştirir.

Böylelikle, sabit parçalar ile dönen parçalar arasındaki kaçak debinin kontrol edilmesiyle turbomakinanın güç kaybı önlenir, hatta iyi tasarlanmış ileri teknolojik keçeler sayesinde turbomakinaların güç çıkışında %1'e yakın seviyelerde artışlarla karşılaşılabilmiştir.

Turbomakinalarda çok sayıda kullanılan sızdırmazlık elemanı mevcuttur. Sızdırmazlık elemanları; akışkan cinsi, kullanılacak bölgedeki sıcaklık ve basınç seviyeleri, aşınma ve ısı üretimi değerleri, bölgede etkili olan kuvvetler, istenilen sızdırmazlık performansına göre gerekli açıklığın sağlanması ve ayrıca üretim, montaj ve demontaj kolaylıkları gibi parametrelere göre farklılıklar gösterirler.

Genel olarak turbomakinalarda kullanılan sızdırmazlık elemanları iki grupta kategorize edilebilir:

- Statik sızdırmazlık elemanları
- Dinamik sızdırmazlık elemanları

Statik sızdırmazlık elemanları genel olarak bir turbomakinanın sabit parçaları arasında kullanılırlar. Turbomakinalarda genel olarak kullanılan statik sızdırmazlık elemanları aşağıda listelenmiştir.

- Metal keçe (C, O ve U tipi)
- Metal örgü keçe
- Salmastra

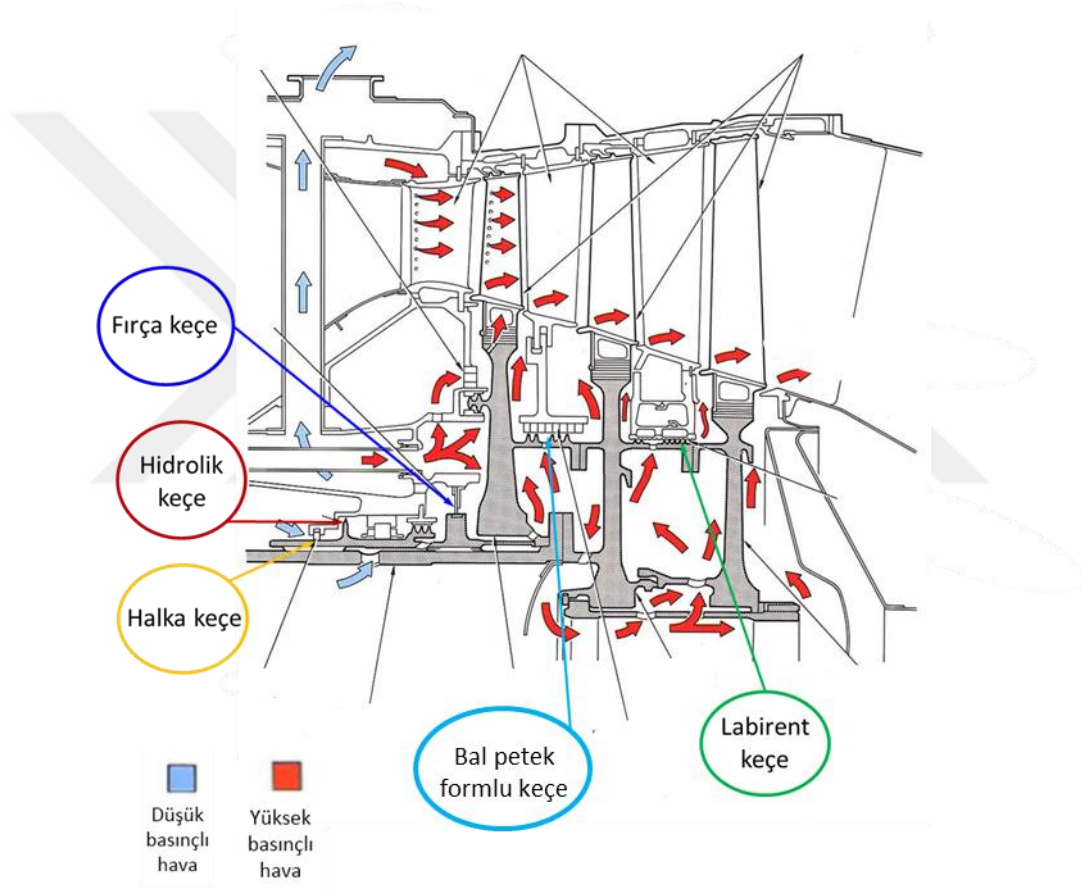
Dinamik sızdırmazlık elemanları ise birbirine göre hareketli parçalar arasında kullanılırlar. Bu sebeple stator-rotor arası kullanılabilecekleri gibi, rotor-rotor arasında da kullanılabilirler. Turbomakinalarda genel olarak kullanılan dinamik sızdırmazlık elemanları aşağıda listelenmiştir.

- Kanat uç keçesi
- Aşınabilir keçe
- Labirent keçe
- Fırça keçe

- Hidrolik keçe
- Mekanik keçe

Şekil 1.16’da temsili bir gaz türbini üzerine yerleştirilmiş yaygın kullanılan sızdırmazlık elemanlarından bazıları gösterilmiştir [3].

Fırça keçe, labirent keçe, hidrolik keçe, halka tipi keçeler ve bal peteği keçeleri, türbin iç akış sistemine ait yüksek ve alçak basınçtaki soğutma hatlarının ayrılmasında ve türbin kanat ve disk boşlukları arasında kaçak debinin kontrolünün sağlanmasında kullanılmaktadır.

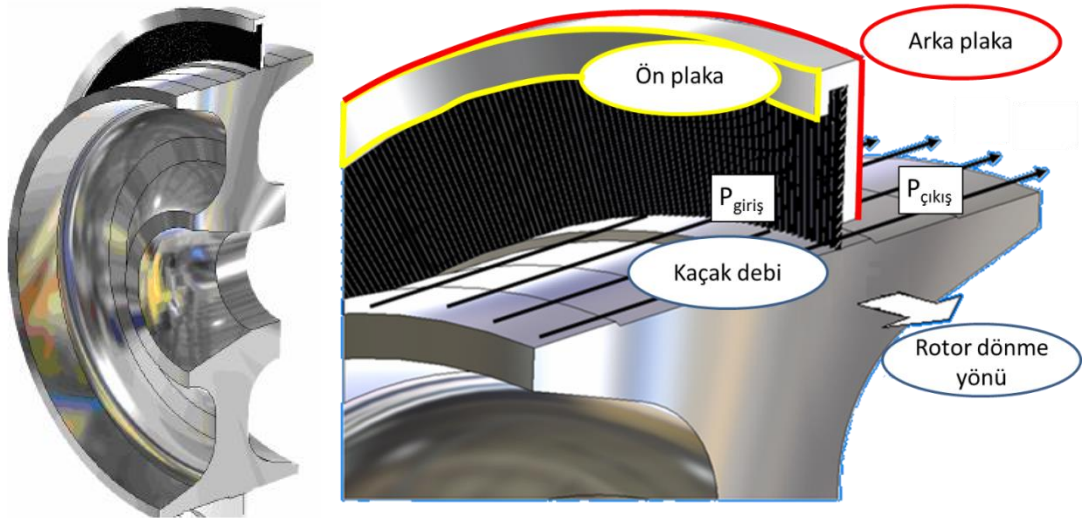


Şekil 1.16. Temsili bir gaz türbini üzerindeki sızdırmazlık elemanları [3]

Bu tez çalışmasında turbomakinalarda kullanılan dinamik sızdırmazlık elemanlarından fırça keçeler incelenmiştir.

Fırça keçeler özellikle gaz ve buhar türbinlerinde giderek kullanımı yaygınlaşan ileri teknoloji sızdırmazlık elemanlarıdır. Fırça keçeler yapısal olarak diş görevini gören ön ve arka plaka arasına açılı olarak yerleştirilmiş bir tel paketinden oluşur. Şekil 1.17’de bir fırça keçe uygulama örneği gösterilmiştir [4]. Fırça keçe tellerinin rotorun dönme yönünde açılı olarak yerleştirilmesi, geçici rejimde tellerin açılarını değiştirerek rotora yumuşak temasını sağlar ve en az aşınma ile geçici rejim geçilir ki bu fırça keçenin en önemli avantajıdır. Kullanımlarının yaygınlaşmasındaki ana sebep; turbomakinalarda çoğunlukla kullanılan labirent keçelere göre %20’ye varan oranlarda daha az kaçak debiye sahip olmalarıdır. Ayrıca, en kötü durumda dahi tellerin rotora değmesiyle aşınmaları veya tamamen kopmaları durumunda, ön ve arka plakalar labirent diş gibi davranır ve en kötü durumda fırça keçe labirent keçe gibi davranır. Fırça keçelerin uzun çalışma sürelerinde daha kararlı sızdırmazlık performansı sunmaları ise diğer önemli bir avantajıdır.

Fırça keçelerin sahip olduğu bu avantajlar kullanımlarındaki önemi artırırken maliyetlerinin yüksek olması, kompleks bir tasarıma sahip olmaları ve çalışma sırasındaki akış kaynaklı dinamik davranışların telleri olumsuz etkilemesi çok yaygın kullanılmalarını sınırlamaktadır.



Şekil 1.17. Fırça keçe uygulama örneği [4]

1.5. Amaç ve Kapsam

Gaz türbinli turbomakinalar çoğunlukla stratejik öneme sahip enerji, havacılık ve savunma sektörlerinde kullanılmaktadır. Bu sebeple turbomakina teknolojisini elinde bulunduran ve sürekli geliştiren ülkeler daha güçlü ve istikrarlı yapıya sahip olmaktadır.

Gelişen turbomakina teknoloji istekleri arasında verim hep ön planda bulunmaktadır. Bunun yanısıra; emniyet, güvenlik, ömür ve ekonomiklik istekleri de giderek turbomakina teknolojisi limitlerini zorlamaktadır. Teknolojik istekler doğrultusunda optimum turbomakina tasarımına ulaşabilmek için tüm bileşenler üzerinde birçok çalışma yürütülmektedir. Bu kapsamda, rotor ve stator arasındaki boşluklardan kaçan akışkan debisini kontrol eden sızdırmazlık elemanları doğrudan turbomakina verimini etkileyen önemli bir bileşendir.

Sızdırmazlık elemanları akışkanı belirli bir bölgede tutmak üzere veya kontrollü akışkan geçişini sağlamak üzere kullanılan elemanlardır. Sızdırmazlık elemanları ile bazı uygulama bölgelerinde kaçak debinin sıfır seviyesine indirilmesi hedeflenirken, bazı bölgelerde ise belli bir değerde tutulması hedeflenir.

Sızdırmazlık elemanlarının maliyetleri kullandıkları makinalarla karşılaştırılamayacak kadar düşük olmasına rağmen, makinaların verimli, güvenli, ekonomik ve uzun ömürlü olabilmeleri için diğer elemanlar kadar önemlidirler. Ayrıca kritik sahalarda kullanılan havacılık motorlarında uzun menzil, düşük yakıt tüketimi, zorlu operasyonel şartlarda emniyetli çalışma gibi özel beklentiler sızdırmazlık elemanlarının önemini daha da artırmaktadır. Bu beklentiler, ancak iyi analiz edilmiş ve tasarlanmış sızdırmazlık elemanları ile karşılanabilmektedir.

Bu tez kapsamında, ileri teknoloji sızdırmazlık elemanı olan fırça keçe akış analizi üzerinde çalışılmıştır. Fırça keçe tasarımı birçok etkileşimli parametreyi ve fiziği içermektedir ve dolayısıyla da tasarım ve analiz metodolojisindeki gelişmelere rağmen hala tüm tasarımları tam olarak doğrulanabilmiş değildir. Bu etkileşimli parametreler genel olarak; jet motorunun geometrisi, çalışma şartları, geçici rejim karakteristikleri, keçe geometrisi, motor-keçe dinamik davranışı, vb. şeklinde özetlenebilir. Bu kapsamda yapılan tez çalışmasında, fırça keçe tasarım parametrelerinden keçe geometrisinin ve çalışma şartlarının sızdırmazlık performansı

üzerindeki etkileri HAD analizleri ile incelenmiştir. Literatürde bu konuda az sayıda çalışma bulunmakta olup, yapılan çalışmalarda fırça keçe geometrisinden az sayıda parametrenin etkisi incelenmiştir. Bu tez çalışmasında ise fırça keçeye ait aşağıda listelenen 3 grup parametrenin kaçak debi üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

- Eksenel boyutlar
- Radyal boyutlar
- Çalışma şartları

Keçeye ait incelenen geometrik parametreler eksenel yönde sırasıyla, ön plaka kalınlığı, tel paketi ile ön plaka arası mesafe, tel paketi kalınlığı ve arka plaka kalınlığıdır. Radyal yönde ise, ön plaka çit yüksekliği, tel radyal yüksekliği, arka plaka çit yüksekliğidir. Çalışma şartları olarak ise; basınç oranı, radyal açıklık ve rotor dönme hızı incelenmiştir.

HAD analizleri ANSYS-Fluent v.14 paket programında yapılmıştır HAD modeli 2-boyutlu eksenel simetrik koordinatlarda oluşturulmuştur. Fırça keçeyi oluşturan tel paketi, gözenekli ortam olarak modellenmiştir. Gözenekli ortam için direnç katsayıları, literatürdeki deneysel kaçak debi ve basınç verileri kullanılarak kalibre edilmiştir. Hava sıkıştırılabilir akışkan olarak alınmış ve yoğunluğun değişimi ideal gaz denklemi ile tanımlanmıştır. Türbülanslı akış için k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır. Belirlenen sınır şartlarında süreklilik, momentum (Navier-Stokes) ve enerji denklemleri sayısal olarak çözülmüştür. İncelenen parametrelerin sızdırmazlık performansına etkileri hesaplanmış ve değerlendirilmiştir.

Takip eden bölümde fırça keçeler hakkında kapsamlı bir literatür değerlendirmesi yapılmıştır.

1.6. Literatür Taraması

Fırça keçeler ilk olarak 1980’li yıllarda başarılı kullanılmaya başlanmıştır. İlk çalışmalarda, fırça keçenin yer değiştirdiği labirent keçeye göre kaçak debide gösterdiği iyileşmelerin deneysel sonuçları yayınlanmıştır [5,6]. Takip eden çalışmalarda deneysel ve analitik tabanlı kaçak debi değerlendirmeleri devam

ederken aynı zamanda fırça keçe tasarımsal olarak ele alınmaya başlanmış ve tasarım parametreleri ve bu parametrelerin fırça keçe davranışına etkileri araştırılmaya başlanmıştır. Günümüze kadar gelen süreçte ise, katı tel demeti ve içinden geçen akış etkileşiminin çözülmesine yönelik yapısal ve ısıl-akış analizleri devam edegelmiştir. Bu amaçla gerek yapısal gerekse akış analizlerinde birçok yaklaşım ortaya konmuştur. Fırça keçeler, tecrübenin ve bilgi birikiminin olduğu firmalarca hala terzi usulü şeklinde tasarlanmakta ve imal edilmektedir. Aşağıda fırça keçeler hakkındaki çalışmalar değerlendirilmiştir.

Ferguson tarafından yayınlanan ilk fırça keçe makalesinde fırça keçelerin çalışma prensipleri ve kullanımlarının önemi incelenmiştir [5]. Çalışmada, fırça keçelerin gaz türbinlerinde yaygın kullanılan labirent keçelere göre daha az kaçak debiye sahip oldukları deneysel olarak ortaya konmuştur.

Gorelev vd. tarafından yapılan deneysel çalışmada; fırça keçelerin daha az kaçak debiye müsaade etmesi, rotorun geçici radyal hareketlerindeki tellerin esnek davranmaları ve aşınabilir olmaları, ayrıca yine bu duruma bağlı olarak labirent keçelere nazaran daha az ısı üretimleri gibi önemli avantajlar gözlenmiştir [6].

Bayley vd. tarafından yapılan analitik ve deneysel çalışma ile fırça keçe tel paketi içerisinden geçen akış incelenmiştir [7]. Bu incelemede fırça keçe tel paketleri içerisindeki basınç ve hız alanlarının belirlenmesine yönelik bir model geliştirilmiştir. Modelde tel paketi için genel bir gözeneklilik katsayısı tanımlanmıştır. Deneysel çalışma ile de çeşitli çalışma basıncı oranlarındaki tel paketi kalınlığında aksel basınç dağılımları, arka plaka üzerindeki radyal basınç dağılımları çıkartılmış ve kaçak debi değerleri ölçülmüştür. Elde edilen test verileri analitik çalışmada tanımlanan gözeneklilik katsayısının hesaplanmasında kullanılmıştır ve basınç dağılımlarının bu katsayı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Sonuç olarak, arka plaka radyal basınç dağılımının ve tel paketi kalınlığınca rotor yüzeyindeki aksel basınç dağılımının fırça keçe gözeneklilik katsayısının hesaplanmasında başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca, analitik çalışma ile tahmin edilen kaçak debi değerinin ölçülen debi sonucuyla uyum içerisinde olduğu gözlenerek, bu sayede analitik bazlı çalışma ile geliştirilen model doğrulanmıştır.

Chupp vd. özellikle ses altı hızlarda çalışan ve kısıtlı çalışma ömrüne sahip gaz türbinleri için yaygın kullanılan labirent keçelerin yerine kullanılabilecek fırça keçelerin sahip olduğu performans özelliklerini incelemişlerdir [8]. Çalışma için yüksek sıcaklıkta dinamik bir test sistemi tasarlanmış ve farklı çalışma şartlarında (basınç oranı, sıcaklık ve devir sayılarında) testler yapılarak sonuçlar incelenmiştir. İnceleme sonuçlarında fırça keçelerin labirent keçelere göre daha az kaçak debiye sahip olduğu ve daha düşük aşınmaya sahip oldukları görülmüştür.

Chew vd. tarafından yapılan çalışmada fırça keçeler için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı bir model geliştirilmiş ve literatürdeki deneysel sonuçlar ile yapılan sayısal çalışmanın sonuçlarını karşılaştırmışlardır [9]. Eksenel simetrik bir koordinat sisteminde geliştirilen modelde anizotropik ve doğrusal olmayan Darcy gözenekli ortam yaklaşımı kullanılmıştır. HAD analiz sonuçları kaçak debiyi, keçe boyuncaki basınç dağılımını ve hız alanlarını vermekle birlikte, teller üzerindeki eğilme etkisi oluşturan kuvvetlerin de tahmin edilmesine yardımcı olmuştur. Deneysel veriler sayesinde geliştirilen HAD modeli için gözenekli ortam direnç katsayıları da kalibre edilmiştir. Kaçak debi açısından sonuçlar değerlendirildiğinde, doğrusal olmayan Darcy gözenekli ortam yaklaşımı doğrusal yaklaşıma göre deney ile daha uyumlu sonuçlar vermiştir. Ancak bu durumun tellerin girişimli çalışmaları halindeyken basınç oranı 4'e kadar olan bir fırça keçe için iyi bir şekilde eşleştiği gözlemlenmiştir. Aynı yaklaşımın fırça keçe tellerinin belirli bir radyal açıklıkta çalışması hali için, tellerin rotora doğru akması (blow-down) olarak adlandırılan dinamik keçe davranışına bağlı olarak kaçak debi sonuçları açısından uyumlu sonuçlar vermediği görülmüştür.

Chupp vd. fırça keçe kaçak debisinin hesaplanmasının keçenin çalışma süresinceki değişken yapısı nedeniyle güç olmasından ötürü, yaptıkları çalışma ile efektif tel paketi kalınlığı olarak tanımladıkları bir parametre ile yarı ampirik bir model kullanarak motorun çalışma şartlarında fırça keçe kaçak debi hesaplamasında kullanılan bir korelasyon oluşturmuşlardır [10]. Bu kapsamda çalışma basıncı oranı, ortam sıcaklığı ve tel paketi kesit alanı parametrelerine bağlı bir akım fonksiyonu geliştirerek başarılı bir şekilde kaçak debi tahmini yapıldığı gözlenmiştir.

Turner vd. farklı açıklıklarda (0,27 ve 0,75 mm) fırça keçenin mekanik ve dinamik davranışlarını deneysel olarak ve HAD modeli geliştirerek sayısal olarak

incelemişlerdir [11]. HAD modeli aksel simetrik koordinatlarda seçilmiş olup, keçe içerisindeki tel paketi anizotropik gözenekli ortam yaklaşımı ile modellenmiştir. Deneysel çalışma sonuçları, HAD tabanlı modele ait doğrusal olmayan, üç yöndeki gözenekli ortam akış direnç katsayılarının kalibrasyonunda kullanılmıştır. Ayrıca HAD analizi sayesinde hesaplanan tel paketi üzerindeki aerodinamik kuvvetler, ayrı bir programda kullanılarak tellerin hareketi, gerilmeleri ve tel ile rotor üzerindeki yükleri hesaplanmıştır. Analiz sonucunda tel paketinin girişim halinde çalıştığındaki şartlara nazaran, açıklıklı çalıştığında tel paketi içerisinde çok farklı bir akış alanı olduğu gözlenmiştir.

Akşit vd. yapmış oldukları analitik ve sayısal çalışma ile fırça keçe telleri arasında meydana gelen akış kayıplarını incelemek amacıyla iki komşu teli alarak aralarındaki ince film akışını incelemişlerdir. İnceleme sonucunda, herhangi bir deneysel parametreye bağlı kalmadan basit bir analitik model geliştirmişlerdir [12]. Ayrıca çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemiyle iki tel arasındaki akış modelinde sıkıştırılmaz laminer akış incelenmiş olup, keçe bölgesinde viskozitenin sabit olduğu ve yer çekiminin akışa etkisinin de ihmal edilebilir düzeyde olduğu yaklaşımlarıyla sayısal bir çalışma da yapılmıştır. Farklı Reynolds sayılarında basınç profilleri analitik ve sayısal çalışma sonucunda karşılaştırılmıştır. Farklı teller arasındaki akışın basit bir analitik yaklaşım ile modellenerek kolaylıkla çözülebilecek olmasına rağmen, sayısal bir çalışmada keçe fiziğinin doğru olarak yakalanabilmesi için daha fazla sayıda teli alınarak geliştirilecek model için çok daha fazla sayıda çözüm ağı ile çözüm yapılması gerektiği görülmüştür.

Chen vd. radyal açıklıklarda çalışan fırça keçelerde basınç dağılımı sonucu tel paketi içerisinde tellerin pozisyonlarının değişmesinin, fırça keçe davranışı üzerindeki etkisini incelemek için bir HAD modeli ve bir de analitik model geliştirmişler ve aralarında çalışma ilişkisi kurarak bir metot oluşturmuşlardır [13]. Fırça keçe davranışının anlaşılması kapsamında bu metot ile kaçak debi, basınç dağılımları, tellerin hareketi, teller üzerindeki sürtünme etkileri, tel gerilmeleri ve rotor yüzeyindeki temas eden yüklerin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Sonuçlar, hem tellerin açıklıklı hem girişimli çalışmaları için değerlendirilmiş ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda her iki çalışma durumu için de kaçak debi

açısından uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Ayrıca doğrusal olmayan Darcy gözenekli ortam yaklaşımının da deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Chen vd. bir fırça keçe modeli ile modelin beş katı büyüklüğünde bir motor için imal edilen bir fırça keçenin akış karakteristiklerini karşılaştırarak, aralarında geometrik ve fiziksel davranış açısından boyutsuz bir benzerlik geliştirilmiştir [14]. Bu benzerlik ilişkisi deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Dinç vd. endüstriyel uygulamalarda performans ve verimi arttırmak amacıyla kullanılan fırça keçelerin temel tasarım konularını incelemiştir [15]. Edinilen endüstriyel tecrübeler doğrultusunda fırça keçelerin uygun ve düzenli tasarlandıklarında önemli kazanımlar sağlarken, doğru tasarlanmayan fırça keçe uygulamalarında çok olumsuz sonuçlar görüldüğünü belirtmişlerdir. Özellikle yüksek performans talepleri nedeniyle yüksek hız ve sıcaklıklarda çalışması beklenen fırça keçelerin çalışma şartlarındaki fiziksel davranışını anlamak büyük önem kazanmaktadır. Fırça keçelerin çalışmaları süresince karşılaşılabilecekleri gerilme, yorulma, sünme, aşınma ve oksitlenme gibi çeşitli hata durumları için doğru tasarım kriterlerine gereksinim duyulmaktadır. Çalışmada fırça keçeler için çok önemli olan tasarım kriterleri ve farklı tasarım yaklaşımlarına ait fizibilite çalışmaları yapılmıştır.

Owen vd. fırça keçe, rotor ve akış arasındaki ısı etkileşimi analitik ve deneysel olarak incelemişlerdir [16]. Bu kapsamda fırça keçedeki basınç ve kütleli debi değişimi, rotor sıcaklığındaki ve rotor torkundaki değişimleri ölçerek teller ile rotor temasında oluşacak ısı üretimini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Ayrıca, tellerden akışa olan ısı transferini ise analitik olarak analiz etmişler ve bu ısı transferinin rotora ısı geçişinin hesaba katılması yönünde bir korelasyon geliştirmişlerdir.

Doğu tel paketi için gözenekli ortam yaklaşımını kullanarak fırça keçenin akış karakteristiklerini (kaçak debi, basınç ve hız dağılımları) incelemiştir [17]. Geliştirilen aksel simetrik HAD modelinde, tel paketi içerisinde yöne bağlı gözenekli ortam akış direnç katsayıları, literatürdeki deneysel veriler (kaçak debi, rotor yüzeyindeki aksel basınç dağılımı ve arka plaka üzerindeki radyal basınç dağılımı) ile kalibre edilmiştir. Kalibrasyon işleminde, tel paketine ait çit kısmının üstündeki gözenekli ortama ait akış direnç katsayıları, çit bölgesindeki katsayılara nazaran %20 daha büyük alınmıştır. Çalışma sonucunda özellikleri doğrulanarak

tanımlanan bir gözenekli ortam modelinin kaçak debi ve basınç alanları açısından tüm tel paketi için literatürdeki çalışmalar ile uygun sonuçlar verdiği görülmüştür.

Doğu vd. fırça keçelerdeki farklı ön ve arka plaka geometrilerinin akış alanına ve kaçak debiye olan etkilerini incelemiştir [18,19]. İnceleme, tellerin hem temaslı hem açıklıklı çalışmaları durumları için yapılmış ve sonuçlar literatürde bulunan sayısal ve deneysel diğer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Doğu vd. farklı ön plaka geometrileri kapsamında yapılan çalışmada, uzatılmış ön plakanın (kısa ön plaka çit yüksekliğinin) keçe girişi bölgesinden gelebilecek olası jet etkiler ve akış çevrintileri kaynaklı karmaşık akış etkilerini engellediği görülmüştür [18]. Bununla birlikte uzatılmış ön plakanın, ön plaka ile tel paketi arasındaki bölgede dışa doğru radyal bir akış oluşturduğu ve bu akışın arka plaka üzerinden rotora doğru yönelmesiyle, tellerin de rotora akmasına (blow-down) sebep olduğu gözlenmiştir. Ayrıca ön plaka üzerinde açılan deliklerin de söz konusu radyal dış akışı bastıracağı ve tellerin rotora akmasının (blow-down) olumsuz sonuçlarını azaltabildiği gözlenmiştir. Açıklıklı çalışma durumunda ise, radyal açıklığın tel paketi içerisindeki akış ve basınç alanı üzerindeki kuvvetli emiş etkisiyle, içe doğru daha kuvvetli bir radyal akışa neden olduğu görülmüştür.

Doğu vd. farklı arka plaka geometrileri kapsamında yapılan çalışmada ise arka plaka üzerinde açılan geçiş hatları ve küçük oyukların kaçak debi, basınç alanı ve akış alanı üzerindeki etkilerini incelemiştir [19]. Çalışma sonucunda üzerinde tahliye (by-pass) hatları bulunan arka plaka geometrilerinin daha fazla kaçak debiye sebep olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında, diğer geometrilerde (arka plaka üzerinde; oyuklar bulunan veya ince ve radyal olarak uzunca bir kanal bulunan geometriler) ise referans alınan standart fırça keçe tasarımıyla aynı kaçak debi sonuçlarını verdikleri gözlenmiştir.

Doğu vd. tellerin rotor ile etkileşimleri nedeniyle tel uçlarındaki sürtünme kaynaklı ısı oluşumunun keçe genelindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerini incelemiştir [20]. 2-boyutlu aksel simetrik olarak oluşturulan akış bölgesi gözenekli ortam yaklaşımı ile modellenmiş ve fırça keçe üzerindeki akış ve basınç alanları sayısal olarak HAD paket programı aracılığıyla incelenmiştir. Tel paketinin modellenmesinde, gözenekli ortam katsayılarına ek olarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak izotropik ısı iletim katsayısı tanımlanmıştır. Ayrıca tel paketi içindeki tek bir

telin, kanatçık yaklaşımıyla ele alınarak analitik olarak da ısı transferi mekanizması incelenmiş ve sayısal çalışma ile kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda analitik kanatçık yaklaşımının tel sıcaklığını HAD analiz sonuçlarının altında hesapladığı gözlenmiştir.

Doğu vd. fırça keçenin çeşitli radyal açıklıkta çalışma durumlarındaki akış davranışını, gözenekli ortam yaklaşımı ile geliştirilen HAD modeli ile incelemiş ve deneysel veriler ile kıyaslamıştır [21]. Çalışma sonucunda, rotor ile temaslı çalışan fırça keçe ile açıklıklı çalışan fırça keçelerin farklı akış alanlarına sahip olduğu ve radyal çalışma aralığı arttıkça kaçak debinin de ciddi seviyelerde arttığı görülmüştür.

Pugachev vd. fırça keçe tel paketinin modellenmesinde gözenekli ortam yaklaşımını kullanmış ve gözenekli ortam akış direnç katsayıları için gerekli kalibrasyon işlemi üzerine çalışmışlardır [22]. Bu kapsamda iki farklı fırça keçe geometrisi farklı çalışma şartlarında sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar değerlendirilerek, gözenekli ortam katsayılarının kalibrasyon işlemi ve bu işlemin HAD modelinin doğrulanması açısından ne derece önemli olduğu ifade edilmiştir.

Qui vd. HAD ve sonlu elemanlar metodu ile fırça keçenin ısı transfer mekanizmasını ve tellerin rotor ile temaslı çalışması durumundaki mekanik davranışını incelemişlerdir [23]. Oluşturulan HAD modelinde gözenekli ortam yaklaşımı kullanılmıştır. Diğer taraftan teller üzerindeki aerodinamik yükler ile tel paketi, rotor ve arka plaka arasındaki sürtünmelerin sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi için bir fırça keçe modeli oluşturulmuştur. Ayrıca tellerin eğilme etkileri dikkate alınarak daha etkili bir şekilde ısı transfer mekanizmasının incelenmesi için HAD ile SEM arasında da çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda basınç oranının ve rotor hızının, teller ile rotor arasındaki temas mekanizmasına, tel paketi genelindeki sıcaklık dağılımına ve maksimum tel sıcaklığına olan etkileri değerlendirilmiştir.

Pekris vd. basınç oranı ve rotor hızının bir fonksiyonu olarak rotor üzerindeki torku, sıcaklık artışını ve kaçak debi değişimini incelemek üzere bir test sistemi tasarlayarak deneysel çalışma yapmışlardır [24]. Çalışma kapsamında iki farklı tel paketine sahip konvansiyonel pasif ve aktif basınç dengeli arka plaka geometrilerine

sahip fırça keçeler test edilmiştir. Fırça keçelerin akış, mekanik ve ısı performansları değerlendirilerek kıyaslanmıştır.

Doğu vd. yaptıkları HAD çalışması ile fırça keçe tasarım parametrelerinin kaçak debi üzerindeki etkilerini incelemiştir [25]. Tel paketi gözenekli ortam yaklaşımı ile modellenmiştir. Oluşturulan HAD modeli için gözenekli ortam akış direnç katsayıları literatürdeki çalışmalardan alınan kaçak debi, rotor üzerindeki aksel basınç dağılımı ile arka plaka üzerindeki radyal çalışma basıncı dağılımları kullanılarak kalibre edilmiş ve bu sayede HAD analizleri doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda geometrik parametreler açısından; tel paketi kalınlığının ve arka plaka çit yüksekliğinin kaçak debi üzerinde önemli etkisi olduğu (artan tel paketi kalınlığı kaçak debiyi azaltırken, artan arka plaka çit yüksekliği artırmıştır), serbest tel yüksekliğinin hafif bir etkisinin (kaçak debiyi artırıcı yönde) olduğu gözlenmiştir. Çalışma parametreleri açısından da artan basınç oranı ve radyal açıklığın kaçak debiyi ciddi seviyede artırdığı görülmüştür.

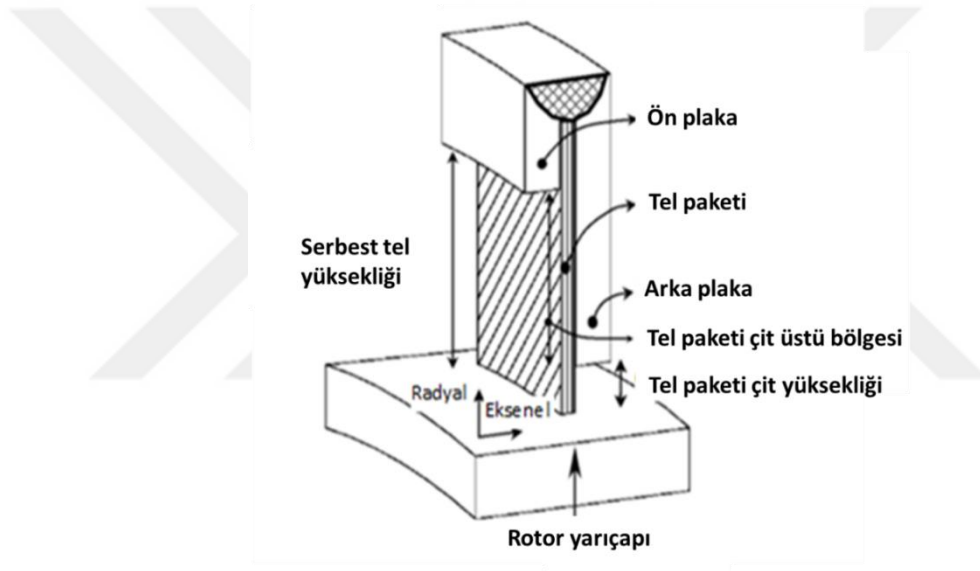
Fırça keçe hakkında literatürdeki yayınlardan görüldüğü gibi deneysel çalışmaların yanı sıra fırça keçe yapısal ve ısı-akış analizleri konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. Akış analizlerinde ve deneysel kaçak debi ölçümlerinde temel geometrik büyüklüklerden özellikle radyal açıklığın ve çalışma şartlarından özellikle basınç farkının etkileri yaygın olarak ortaya konmuştur. Ancak, fırça keçeye ait tüm temel boyutların özellikle fırça keçe uygulamasında nihai hedef olan kaçak debi üzerindeki etkileri yine farklı çalışma parametrelerinin fonksiyonu olarak ortaya konmamıştır. Bu tez çalışmasında, fırça keçenin birçok boyutunun kaçak debiye etkisi değişik çalışma şartları için HAD analizi ile belirlenmiştir. Böylece hem bilimsel hem de teknolojik açıdan fırça keçe tasarımcıları için referanslar oluşturulmuştur.

Takip eden bölümde fırça keçe hakkında detaylı olarak bilgiler sunulmuştur.

2. FIRÇA KEÇE

2.1. Fırça Keçe Yapısı ve Bileşenleri

Fırça keçe; Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, tel paketi, ön plaka ve arka plaka olmak üzere 3 temel kısımdan oluşur [21]. İnce tellerden oluşan tel demeti rotor dönme yönünde açılı olarak yerleştirilerek halka şeklinde iki plaka arasında dış kısımdan kaynakla birleştirilir.



Şekil 2.1. Fırça keçe şeması [21]

Fırça keçe tel paketi, çapları 0,071 mm’den 0,150 mm’ye kadar olan ve genellikle kobalt esaslı bir süperalaşım olan Haynes-25 malzemesinden imal edilen tellerin belirli bir açıda yerleştirilmesiyle üretilmektedir. Haynes-25 malzemesi, gaz türbinlerinde yüksek sıcaklığın olduğu bölgelerde kullanılan genel bir malzemedir. Teller rotorun etrafına, rotor dönme yönünde tipik 45° ila 55° arasında bir açıyla yerleştirilir. Bu açı, keçenin yüke maruz kalması durumunda tel paketi ile rotor yüzeyi arasındaki reaksiyona göre değişir [27].

Fırça keçeyi oluşturan temel parçalardan ön plaka esas olarak tellerin sıkıca çevresel olarak tutulmasını sağlar. Arka plaka ise teller için bir destekleyicidir. Keçeye gelen akış ön plakadan arka plakaya doğru olduğundan, teller akışın etkisiyle akış yönünde bir baskıya maruz kalır. Bu sebeple arka plaka hem akış ile gelen yükü taşıma görevini görür, hem de tellerin dayanma yüzeyi olarak telleri destekler.

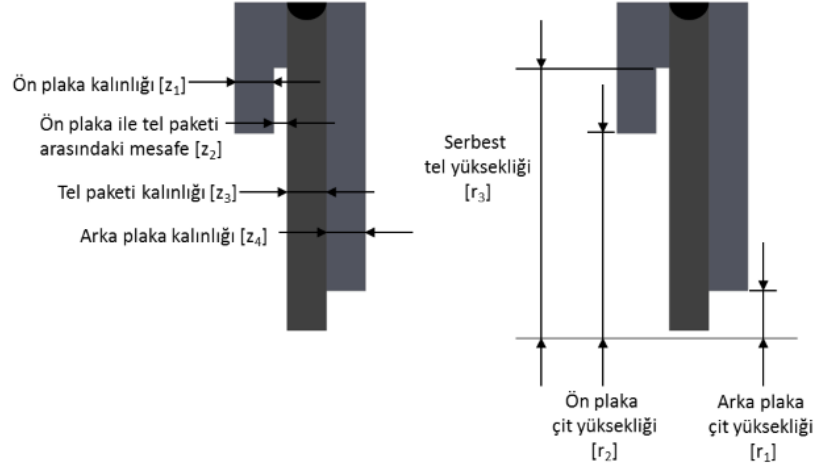
Fırça keçenin esasını teşkil eden bu üç parçanın (ön plaka, tel paketi, arka plaka) boyutları fırça keçe geometrik tasarım parametrelerinin de çerçevesini oluşturur. Geometrik tasarım parametreleri; aşağıda belirtilen üç grupta toplanabilir:

- aksel boyutlar
- radyal boyutlar
- tel paketi boyutları

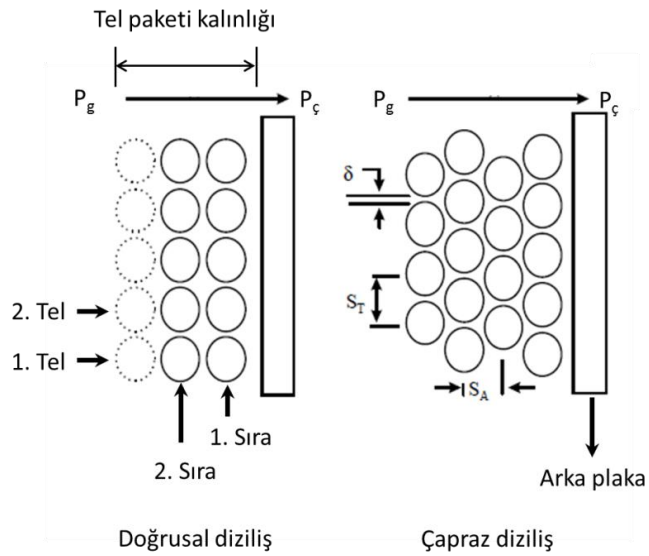
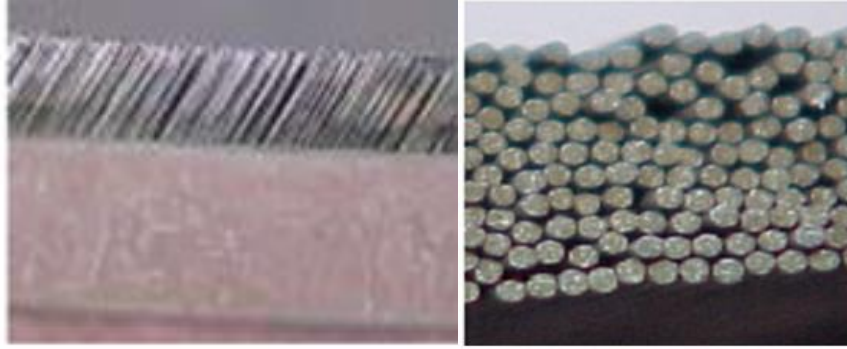
Eksenel boyutlar akışın aksel geçtiği doğrultudaki uzunlukları (kalınlıkları), radyal boyutlar ise radyal doğrultudaki uzunlukları (yükseklikleri) belirtmektedir. Tasarım parametresi olarak tanımlanan aksel ve radyal boyutlar Şekil 2.2’de gösterilmiş ve Çizelge 2.1’de listelenmiştir. Tel paketine ait tasarım parametreleri ise tellerin çapları, diziliş şekilleri, sıra sayıları ve yerleştirilme açıları şeklindedir ve genel olarak Şekil 2.3’de gösterilmiştir [15,26,12]. Görüldüğü gibi, aksel akış doğrultusunda 4 adet kalınlık bulunmaktadır. Bunlar: ön plaka kalınlığı, ön plaka ile tel paketi arasındaki mesafe, tel paketi kalınlığı, arka plaka kalınlığı şeklindedir. Radyal yükseklikler ise toplamda 3 adettir ve ön plaka çit yüksekliği, arka plaka çit yüksekliği ve tel radyal yüksekliği şeklindedir. Tel paketi iç boyutları ise temelde 4 adet olarak tel çapı, tel sıra sayısı, tel yerleştirilme açısı ve tel diziliş şekli olarak sıralanabilir.

Ayrıca, Çizelge 2.1’de gösterildiği gibi, fırça keçe için bir diğer tasarım parametresi grubunu işletme şartları oluşturmaktadır. En önemli işletme şartları ise; radyal açıklık, basınç oranı ve rotor dönme hızı olarak özetlenebilir.

Bu tez çalışması kapsamında, fırça keçe kaçak debisi Çizelge 2.1’de gösterilen tüm aksel ve radyal boyutlar tüm işletme şartları için incelenmiştir.



Şekil 2.2. Fırça keçe aksenal ve radyal boyutları



Şekil 2.3. Fırça keçe tel paketi ve tel dizilişleri [15,26,12]

Çizelge 2.1. Fırça keçe boyutsal tasarım parametreleri

Geometrik parametreler	Eksenel boyutlar	Ön plaka kalınlığı	Z_1
		Ön plaka ile tel paketi arası mesafe	Z_2
		Tel paketi kalınlığı	Z_3
		Arka plaka kalınlığı	Z_4
	Radyal boyutlar	Arka plaka çit yüksekliği	r_1
		Ön plaka çit yüksekliği	r_2
		Serbest tel yüksekliği	r_3
	Tel paketi boyutları	Tel çapı	
		Tel sıra sayısı	
		Tel yerleştirilme açısı	
		Sıralı / çapraz diziliş	
	İşletme şartları	Radyal açıklık	r_0
		Basınç oranı (P_1/P_2)	R_p
Rotor dönme hızı		n	

2.2. Fırça Keçe İmalat Konfigürasyonları

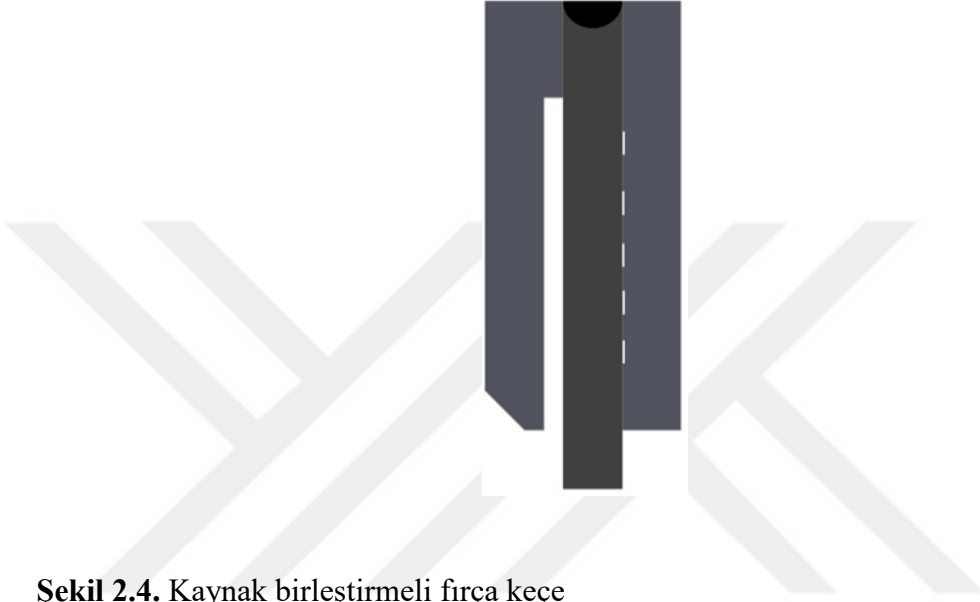
Fırça keçe imalatında kullanılan iki farklı imalat konfigürasyonu bulunmaktadır. Bu konfigürasyonlar, fırça keçe tellerinin sabitlenmesinde kullanılan yöntemlere göre

- kaynak birleştirmeli
- kenetleme birleştirmeli

olarak isimlendirilebilir.

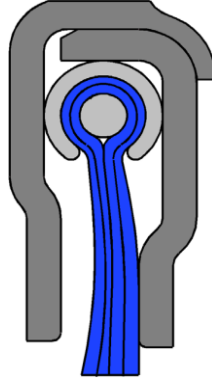
Kaynaklı birleştirme, fırça keçe tellerinin ön plaka ile arka plakaya dış kısımdan kaynaklanarak birleştirildiği yöntemdir. Bu yöntem geleneksel fırça keçe imalat yöntemi olarak ta bilinir ki, yukarıda bahsedilen keçe tipidir ve Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Bu imalatta, Şekil 2.4'de gösterildiği gibi, arka paka üzerinde odacıklar da oluşturulmaktadır. Fırça keçeye basınç etkidiğinde tel paketindeki teller,

birbiri içine geçerek daha sıkı bir yapıya sahip olurlar ve arka plakaya yapışırlar. Bu durumda tellerin açısız hareket serbestliği azalır, rotor yüzeyine teğet teması sağlamayabilir ve nihai olarak kaçak debi artabilir. Geleneksel fırça keçe tasarımlarında arka plaka üzerinde açılabilcek bu küçük odacıklar sayesinde tel paketinin sıkılığı belli seviyede giderilir.



Şekil 2.4. Kaynak birleştirmeli fırça keçe

Kenetlemeli birleştirme yönteminde, tel paketi Şekil 2.5’de gösterildiği gibi yarım bir halka ile kenetlenerek ön ve arka plaka arasına yerleştirilip sabitlenmektedir [28]. Bu sayede kaynak işlemine gerek kalmamaktadır. Arka plaka işlevini üstlenen gövde elemanı ile tel paketi arasında kalan odacık ise yukarıdaki konfigürasyondaki odacıklara benzer işlev görmektedir. Benzer şekilde bu arka plaka odacığı, tellerin eğimli yerleştirilmesi ve elastiki yapıları sayesinde tüm rotor sapmalarının dengelenmesine ve sonrasında da tellerin ilk durumlarına geri dönmelerine imkan sağlamaktadır.



Şekil 2.5. Halka kenetlemeli fırça keçe [28]

2.3. Fırça Keçe Dinamik Davranışları

Fırça keçenin sızdırmazlık performansı açısından avantajlarının bulunmasıyla birlikte, turbomakinaların geçici rejim süreçleri ve akış kaynaklı etkiler nedeniyle kontrol etme zorluğu olan çeşitli dinamik davranışlar göstermektedir. Fırça keçe tasarım sürecini daha kompleks hale getiren dinamik etkilerin oluşturduğu bu dinamik davranışların anlaşılması ve göz önünde bulundurulması bir gerekliliktir.

Fırça keçede meydana gelen dinamik davranışlar, tel paketinde etkili olan kuvvetlerin dengesine göre oluşmaktadır. Bu kuvvetler; tel paketinden geçen akışın oluşturduğu aerodinamik kuvvetler, aksel ve radyal yöndeki basınç farkları, teller arasında ve tel paketi ile arka plaka arasında oluşan sürtünme kuvvetleri ve yapısal kuvvetler olarak sayılabilir. Ayrıca, rotor-stator çiftinin geçici rejim süreçlerindeki ısıl genleşmeleri ve elastik şekil değişimleri ile oluşan özellikle radyal ve aksel yöndeki gezinimleri de dış kuvvet olarak etkimektedir. Fırça keçede bu iç içe geçmiş kuvvetler nedeniyle yine iç içe geçmiş çeşitli dinamik davranışlar gözlenmektedir. Bu dinamik davranışlardan en önemli olanları aşağıda listelendiği şekilde tariflenmiştir:

- 1) Tellerin rotora akması (bristle blow-down)
- 2) Tel paketi sıkılaşması (bristle stiffening)
- 3) Tel paketi asılı kalması (bristle hang-up) ve histerisis (hysteresis)
- 4) Tel titremesi (bristle flutter)

Bu etkiler aşağıda sırasıyla kısa kısa açıklanmıştır.

2.3.1. Tellerin Rotoru Akması (Bristle blow-down)

Fırça keçe üzerindeki ana akışı, aksenal yöndeki basınç farkı oluşturur. Fırça keçeye doğru gelen aksenal akışın bir kısmı arka plaka çit bölgesine doğru yönelirken, önemli bir kısmı da tel paketi ile ön plaka arasındaki boşluğu dolduracak şekilde radyal dış yönde akar. Bu merkezden dışa doğru olan radyal dış akış, tel paketi içine nüfuz eder ve tel paketi içinde arka plaka üzerinden dıştan rotora doğru radyal iç akış oluşturur. Tel paketi içindeki bu radyal iç akış, genellikle 45° ile 55° arasında bir açıyla yerleştirilmiş telleri rotora doğru sürükler ve teller rotora doğru ilerler ki bu dinamik davranışa “tellerin rotora akması (blow-down)” denilir. Bu etki sonucunda, radyal açıklığın azalmasıyla kaçak debinin düşmesi olumlu görülürken, tellerin rotora aşırı sürtmeleri ve aşınmaları ise olumsuz bir sonuç oluşturur. Basınç yükü ve tel yerleştirilme açısı arttıkça tellerin rotora akması da artar. Bu etkinin istenenden aşırı olmasını kontrol etmek için ön plakanın uzunluğunun değiştirilmesi önerilmiştir [29].

2.3.2. Tel Paketi Sıkılaşması (Bristle stiffening)

Eksenal basınç yükünün etkisiyle teller arka plakaya dayanarak sıkılaşır. Arka taraftaki teller arka plaka yüzeyi ile ve paketteki teller de birbirleri ile sıkı temaslı hale gelir. Bu sıkı temas, teller arasında ve teller ile arka plaka arasındaki sürtünmeleri artırır. Geçici rejimde rotor-stator çifti radyal yönde izafi olarak hareket eder. Basıncın etkisiyle sıkılaşmış olan tel paketinde tellerin aç değiştirme kabiliyeti azalır ki bu duruma “ tel paketi sıkılaşması (bristle stiffening) ” denilir. Bu sıkılaşma tel paketi içine nüfuz eden akışı azaltsa da, geçici rotor hareketleri takip edilerek minimum açıklık sağlanmazsa kaçak debi artar. Veya tel paketi rotora aşırı sürterek aşınır. Tel paketinin hareket kabiliyetini azaltan bu sıkılaşma istenmeyen sonuçlar oluşturur.

2.3.3. Tel Paketi Asılı Kalması (Bristle hang-up) ve Histerisis (Hysteresis)

Yukarıda tanımlanan tel paketi sıkışması sonucu, çalışma şartlarına bağlı olarak teller o kadar sıkışabilir ki açı değiştirme kabiliyetlerini tamamen kaybedebilirler. Bu durumda teller, aynı radyal pozisyonda asılı kalırlar ve rotor-stator çiftinin radyal geçici hareketlerini takip edemezler. Tel paketi iç sürtünmeleri sonucu tellerin asılı kaldığı bu davranışa “tel paketi asılı kalması (bristle hang-up)” denilir. Tellerin rotor hareketini takip edememesi ya açıklığı artırarak kaçak debiyi artırır yada rotor-tel sürtünmesi sonucu aşınma oluşturur ve kaçak debi yine artar.

Ayrıca, türbin çalışması esnasında fırça keçe üzerindeki basıncın artan veya azalan yönde olması da tel paketi içindeki özellikle yapısal kuvvetleri ve dolayısıyla tel paketi açı değiştirme kabiliyetini etkilemektedir. Bu sebeple tel paketinin artan veya azalan basınç ve rotor radyal hareketine farklı cevap vermesi sonucu histerisis oluşur.

2.3.4. Tel Titremesi (Bristle flutter)

Basıncın etkisiyle birlikte tel paketi içerisinde tellerin bir kısmı arka plakaya yönelip sıkışır. Bu sebeple arka plakaya yakın bölgedeki tellerin hareketleri sınırlıdır. Ancak tel paketinin ön kısmındaki teller daha fazla hareket kabiliyetine sahiptir. Tel paketine girişte yüksek basınç ve çeşitli türbülans etkileri nedeniyle ön taraftaki tellerde çarpınmalar, kopmalar ve aşınmalar meydana gelmektedir. Bu etki tellerin titremesi olarak ifade edilir. Ön plakanın uzatılması veya tel paketine yönelen türbülans etkilerini düşürecek ön plaka tasarımları [18,30,31] ile öndeki teller üzerindeki bu olumsuz etkiler azaltılabilmektedir.

Görüldüğü gibi; fırça keçe görünürde oldukça basit bir yapıya sahip olmasına rağmen, birçok karmaşık ve etkileşimli dinamik davranış oluşmaktadır. Bu davranışları akış kaynaklı aerodinamik kuvvetler ve yapısal kuvvetler arasındaki denge oluşturmaktadır.

Takip eden bölümde bu tez çalışmasının da konusu olan fırça keçelerde kullanılan akış analiz yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

3. FIRÇA KEÇE AKIŞ ANALİZ YÖNTEMLERİ

Fırça keçe akış analizlerinde esas olarak kaçak debi hesabı yapılır. Bununla birlikte; keçe girişinde, çıkışında ve tel paketi içerisindeki akışa ait basınç-hız dağılımlarının belirlenmesi amaçlanır. Basınç ve hız dağılımları aerodinamik kuvvetleri oluşturur. Tel paketi içindeki aerodinamik kuvvetler ile sürtünme ve elastik kuvvetlerin dengesi tel paketinin dinamik davranışını ve nihai olarak kaçak debiyi ve keçe ömrünü belirler. Yapılagelen fırça keçe akış analiz yöntemleri genel olarak üç grupta toplanabilir [17]:

- Deneysel akış analiz yöntemleri
- Analitik akış analiz yöntemleri
- Sayısal akış analiz yöntemleri

Doğrulanmış bir fırça keçe tasarımının gerçekleştirilmesi açısından bu analiz yöntemleri büyük öneme sahip olmakta ve fırça keçe tasarım sürecinde kullanılmaktadır.

3.1. Deneysel Akış Analiz Yöntemleri

Tasarımı yapılan fırça keçenin kaçak debisi ilgili çalışma şartlarında deneysel olarak ölçülür. Fırça keçe testlerinde türbin şartlarının (özellikle yüksek basınç farkı, sıcaklık ve yüzey hızı) deneysel olarak oluşturulmasında ve kontrolünde ısıl genleşmeler ve merkezkaç etkiler açısından ciddi zorluklar bulunmaktadır. Bu sebeple fırça keçe testleri şimdiye kadar aşağıda listelenen iki farklı test sisteminde yapılmıştır.

- Sıcak statik test
- Soğuk dinamik test

Sıcak statik test sisteminde, fırça keçe sabit bir rotor üzerine yerleştirilerek çalışma şartlarındaki basınç ve sıcaklıktaki hava ile test edilmektedir. Rotor sabit olduğundan merkezkaç etki bulunmamaktadır ve sıcaklık etkisinin görülmesi için

sıcaklık türbin şartlarına kadar çıkarılabilmektedir. Test sonucunda çalışma basıncı ve sıcaklığın kaçak debideki etkileri gözlenmektedir.

Soğuk dinamik test sistemlerinde ise fırça keçe, türbin şartlarındaki devir sayılarında ve basınçta hava ile test edilmektedir. Bu sayede sıcaklık dahil edilmeksizin rotor devrinin ve basıncın kaçak debi üzerindeki etkileri ölçülmektedir.

Deneysel çalışmalar fırça keçe tasarımları sürecinde diğer akış analizlerinin doğrulanması açısından kilit rol oynamaktadır. Analitik çalışmalarda geliştirilen bağıntılardaki katsayıların kalibresi ve sayısal çalışmalarda tel paketinin modellenmesinde deneysel sonuçlar kullanılmaktadır.

3.2. Analitik Akış Analiz Yöntemleri

Fırça keçe analitik akış analizlerinde; deneysel olarak ölçülen kaçak debi, keçe geometrisi ve çalışma şartlarının fonksiyonu olarak yarı-ampirik bağıntılarla tanımlanmaktadır. İlgili etkin parametreleri içeren bu bağıntılar deneysel çalışmalar ile kıyas edilerek veri tabanı oluşturulmaktadır. Analitik akış analiz yöntemleri, fırça keçe tasarımının özellikle ilk aşamalarında etkin parametrelere göre kaçak debi ön hesabında kullanılmaktadır. Bu yöntemde, tipik olarak aşağıdaki formda bir akış fonksiyonu tanımlanmıştır [10].

$$\phi = \frac{\dot{m} \sqrt{T_u}}{P_u A_u} \quad (3.1)$$

$$\phi : \text{Akış fonksiyonu} \quad \frac{kg\sqrt{K}}{N.s}$$

$$\dot{m} : \text{Kütleli debi} \quad \frac{kg}{s}$$

$$T_u : \text{Giriş sıcaklığı} \quad \sqrt{K}$$

$$P_u : \text{Toplam giriş basıncı} \quad \frac{N}{m^2}$$

$$A_u : \text{Akış kesit alanı} \quad m^2$$

Analitik akış modelinde, genel çalışma şartları için sürtünme faktörü olarak bir akış fonksiyonu tanımlanmaktadır. Bu model genelde tasarım başlangıcında kullanılmaktadır.

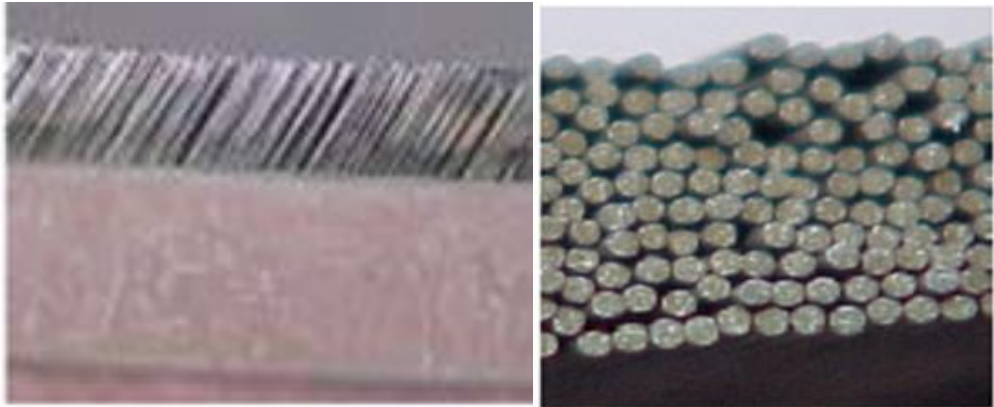
3.3. Sayısal Akış Analiz Yöntemleri

Sayısal akış analizleri genellikle HAD paket programları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu akış analizlerinde akışı temsil eden korunum denklemleri sayısal yöntemler ile çözülmektedir. Bu yöntemin en büyük avantajı akışın görsellenebilmesidir.

Fırça keçe tel paketi küçük çaplı tellerin yan yana belli açıda dizilerek bir araya getirilmesi ile oluşmaktadır (Şekil 3.1.) [15,26]. Akışkan tellerin arasındaki boşluklardan geçerek keçe içinden akmaktadır. Akış esnasında teller arasında rastgele küçük boşluklar oluşmakta ve akış şartlarına göre tellerin pozisyonu değişmektedir. Bu sebeple tel paketi içindeki akışın modellenmesi oldukça karmaşık bir hal almaktadır. Bununla birlikte fırça keçeler ile ilgili doğru bir tasarım metodolojisine ulaşabilmek için keçe içinde akış kaynaklı oluşabilecek tüm davranışların dikkate alınması gerekmektedir. Bu kapsamda literatürde fırça keçe tel paketi içindeki akışın modellenmesi için kullanılan iki akış modeli bulunmaktadır. Bu modeller genel olarak şu şekilde kategorize edilmiştir [17]:

- Çapraz akış modeli
- Gözenekli ortam akış modeli

Bu modeller hakkında aşağıda bilgi verilmiştir.



Şekil 3.1. Fırça keçe tel paketi [15,26]

3.3.1. Çapraz Akış Modeli

Bu akış modelinde Şekil 3.1' ve Şekil 3.2'de [15,26,32] görüldüğü gibi tel paketindeki teller arasındaki boşluklardan çapraz olarak geçen akış 2-boyutlu olarak modellenir. Tel paketi içerisine giren akışkan tellerin arasındaki boşluklardan akarak tel paketini terk etmektedir. Tel paketi içerisindeki akış karakteristiği genel olarak, tellerin çapına, yerleştirilme sıklığına ve yerleştirilme açısına bağlı olarak değişir. Ayrıca, çalışma esnasında ise tellerin dinamik davranışlarından kaynaklanan akış etkileri teller arasındaki boşlukları değiştirir. Basıncın etkisiyle teller sıklaşmakta, tel paketi içerisinde teller bazı yerlerde birbirine temas etmekte, bazı yerlerde teller arasındaki mesafe artmaktadır. Böylelikle uniform bir dağılıma sahip olmayan tel paketi yapısı ve teller arasında düzgün olmayan akış yollarının oluşumu söz konusudur. Ayrıca fırça keçelerin imalatları sürecinde uniform olmayan tel paketlerine sahip olmaları ise bu karmaşıklığı daha da artırmaktadır.

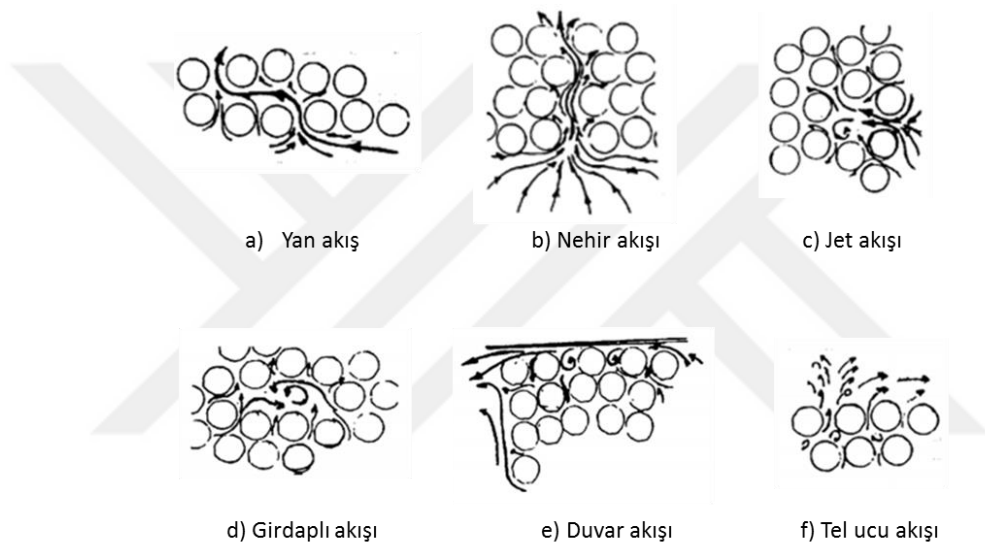
Tel paketi içerisindeki tüm bu karmaşık akış ve tellerin dinamik davranışları, akış görselleştirme çalışmalarıyla incelenmiştir (Şekil 3.2) [32]. Yapılan akış görselleştirme çalışmalarında, teller arasındaki akım yollarının zamana ve konuma bağlı olarak farklı şekillerde oluştuğu gözlenmiştir. Şekil 3.2'de gösterilen bu akım yolu oluşumları aşağıda listelenmiştir.

- a) Yan akış
- b) Nehir akışı
- c) Jet akışı
- d) Girdaplı akış
- e) Duvar akışı
- f) Tel ucu akışı

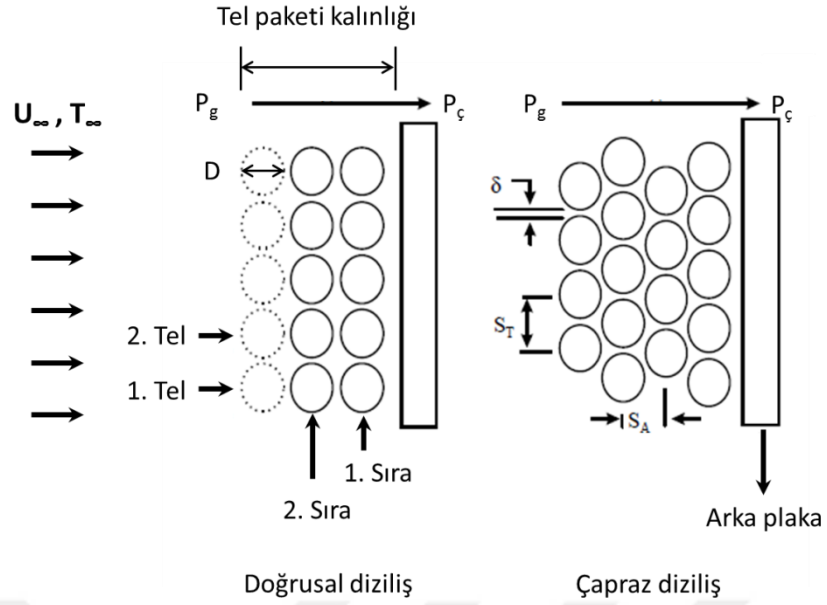
Tel paketindeki tüm bu düzensizliklerinin deneysel olarak belirlenmesi ve 3-boyutlu olarak modellenmesi oldukça karmaşıktır. Bunun yerine, fırça keçelerde teller arasındaki akış 2-boyutlu çapraz akış olarak modellenmiş ve Navier-Stokes denklemleri sayısal olarak çözülmüştür. Bu metotta yaygın olarak Şekil 3.3'de gösterilen tellerin aynı doğrusal hizada ve çapraz hizada yerleştirildiği iki farklı konfigürasyon kullanılmaktadır [12]. Burada S_A boyuna adımı, S_T enine adımı, δ çevresel birbirini takip eden iki tel arasındaki mesafeyi ve d ise tel çapını

göstermektedir. U_{∞} ve T_{∞} ise sırasıyla akış hızı ve sıcaklığını ifade etmektedir. Literatürde, belirtilen tel dizilişlerinde birçok akış analizi yapılmış ve kaçak debi ile eksenel basınç dağılımı hesaplanmıştır ve doğru ve olumlu sonuçlar alınmıştır [33-35].

Çapraz akış modeli, eksenel ve açısal yönde olmak üzere 2 boyutlu olup, kaçak debinin ve eksenel basınç dağılımının hesaplanmasını mümkün kılmaktadır. Bu modelde radyal yön dikkate alınmadığı için, keçenin dinamik davranışını belirleyen radyal akış etkileri gözlenememektedir.



Şekil 3.2. Tel paketi içindeki akım yolları [32]



Şekil 3.3. Tel paketi çapraz akış modeli: a) Doğrusal diziliş, b) Çapraz diziliş [12]

3.3.2. Gözenekli Ortam Akış Modeli

Karmaşık tel paketi içindeki akışın modellenmesi için kullanılan bir diğer modelleme yöntemi de gözenekli ortam modellemesidir. Fırça keçedeki ince metal tellerin belirli bir açıda ve sıklıkta çevresel olarak yerleştirildiği tel paketi, gözenekli bir ortam olarak ele alınabilmektedir. Böylelikle, tel paketi içerisindeki teller arasından geçen akışkan gözenekli bir ortamdan akıyormuş gibi modellenebilmektedir. Gözenekli ortam, gözeneklerden (boşluk) ve katı bir iskeletten oluşur. Gözenekli ortamlardaki akışın incelenmesi için geliştirilmiş birçok yaklaşım bulunmaktadır.

Gözenekli ortam akış modellemesinde, tel paketi içerisinde teller ile akışkan arasındaki sürtünmeye bağlı olarak ilave akış direnç katsayıları tanımlanır. Böylelikle momentum denklemi ilave sürtünmelerin de dahil edildiği akış direnci de hesaba katılarak çözülür. Çok yüksek akış direncine sahip gözenekli ortamlar için momentum denklemindeki viskoz ve atalet terimleri ihmal edilerek, sadece gözenekli ortam için tanımlanan akış direnç terimleri ile basınç gradyeni arasındaki bağıntı da çözülebilir. Fırça keçe için bu durum geçerlidir ve uygulanmıştır [17].

Çapraz akış modeli ve analitik akış modelinden farklı olarak, gözenekli ortam akış modelinde kaçak debi ve eksenel basınç hesaplamalarına ek olarak tel paketi içindeki radyal basınç dağılımı da hesaplanmaktadır. Hesaplanan basınç dağılımı gerek tellerin dinamik davranışlarının açıklanmasında gerekse yapısal analiz modellerinde kullanılmaktadır.

Gözenekli Ortam Özellikleri:

Gözenekli ortam akış modellemesinde ortama ait bazı özelliklerin bilinmesi gerekir. Gözenekli ortama ait ön plana çıkan özelliklerden ikisi gözeneklilik ve geçirgenliktir.

Gözeneklilik, malzemenin içindeki boşluk hacminin toplam hacme oranı olarak tanımlanır ve 0 ile 1 arasında değişir. Gözeneklilik “ ε ” ile gösterilir ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_a + V_k} \quad (3.2)$$

V_a : Malzeme içindeki boşluk hacmi

V_k : Malzemedeki katı hacim

Homojen yapıya sahip gözenekli ortamlarda gözeneklilik sabittir.

Geçirgenlik ise gözenekli ortamın akışı geçirebilmesinin bir ölçüsüdür. Diğer bir tabir ile gözenekli ortamdan akışkanın geçme kolaylığının bir ölçüsüdür. Akışkana bağlı bir özellik olmayıp, gözenekli ortama bağlı bir özelliktir ve temelde gözenekli ortamın akış direnç katsayısını temsil eder. Geçirgenlik “K” ile gösterilir, birimi m^2 'dir ve çoğunlukla deneysel olarak tespit edilir.

Gözenekli Ortam Akış Denklemleri:

Gözenekli ortam akış denklemi ilk olarak Darcy tarafından deneysel bir çalışma ile belirlenmiştir. Darcy, içinde kum bulunan düşey konumlandırılmış silindirik bir boru içerisinden su geçirerek, akışı incelemiştir. Darcy yaptığı deneyde,

kum tanecikleri ile dolu borunun üst kısmı ile alt kısmı arasındaki basınç farkı ile akış hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu gözlemiş ve aşağıdaki bağıntıyı belirlemiştir.

$$-\frac{dP}{dx_i} = \frac{\mu}{K_i} u_i \quad (3.3)$$

Burada; x_i akış yönü, μ akışkanın dinamik viskozitesini, K_i geçirgenliği ve u_i ortalama akış hızını ifade etmektedir. Darcy bağıntısına göre, akışkan sıkıştırılamaz olup, akış hızı çok yavaştır ve katı sınırlardaki sürtünme etkisi de görülmemektedir. Bu sebeple birçok akış uygulamasında denklemin bu haliyle kullanılması uygun olmamaktadır. Bu nedenle zamanla birçok denklem geliştirilmiştir. Yüksek akış hızlarında lineer olmayan akış etkisinin incelenmesi için Darcy denkleminde sağ tarafa bir atalet terimi eklenerek non-Darcy denklemi olarak da bilinen aşağıdaki denklem önerilmiştir [36].

$$-\frac{dP}{dx_i} = (a_i \cdot \mu + b_i \cdot \rho \cdot u_i) u_i \quad (3.4)$$

Burada; a viskoz direnç katsayısını, b atalet direnç katsayısı ve ρ ise akışkan yoğunluğudur. Bu denklemde, viskozite ve yoğunluk çarpım halinde oldukları katsayılar ile birlikte değerlendirilerek, viskoz direnç terimini ve atalet direnç terimini gösterecek şekilde aşağıdaki haliyle de ifade edilebilmektedir ve fırça keçe için kullanılmıştır [17].

$$-\frac{dP}{dx_i} = (\alpha_i \cdot u_i + \beta_i) u_i \quad (3.5)$$

Denklemin sağ tarafındaki ilk terim atalet direnç terimini gösterirken, (α : atalet direnci), ikinci terim ise viskoz direnç terimini (β : viskoz direnci) ifade etmektedir.

Tez kapsamında yapılan HAD analizleri için gözenekli ortam modellemesinde, denklem 3.4 ve 3.5 ile verilen non-Darcy denklemi formatındaki denklem kullanılmıştır. Bu format aşağıda tanımlanmıştır. Denklemdaki viskoz ve atalet direnç değerleri deneysel veriler kullanılarak belirlenir ve fırça keçe için bu belirleme aşağıda açıklanmıştır.

Fırça Keçe Akış Direnç Katsayılarının Belirlenmesi:

Tel paketi için gözenekli ortam akış direnç katsayıları, keçe geometrisi ve çalışma şartlarının bir fonksiyonudur. Bu katsayılar, iç geometrisi karmaşık olan ve gözenekli ortam yaklaşımını gerektiren ortamlar için deneysel veriler kullanılarak belirlenir ve kalibre edilir. En önemli kalibrasyon kriteri, uygulanan basınç farkında ortamdaki geçen ve deneysel olarak belirlenen debidir. Bunun yanında ortam içindeki basınç dağılımının da deneysel olarak ölçülen ile benzeşmesi çok önemli ikinci bir kriterdir. Fırça keçe kaçak debisinin basınç farkına göre değişimi, deneysel olarak ölçülen birincil parametredir. Fırça keçe içindeki basınç dağılımı ölçümü ise arka plaka üzerine ve rotor üzerine açılan küçük delikler ile yapılmaktadır ki bu konuda literatürde yayınlanmış çok az çalışma bulunmaktadır [7,11,13]. Tel paketi içinde basınç ölçümüne ilişkin henüz yayınlanmış bir makale bulunmamaktadır. Sensörlerin teller arasına yerleşimi ince tellerin dinamik davranışını etkileyebilir. Sonuç olarak, akış direnç katsayılarının kalibrasyonu için kaçak debi ve yüzey basınç ölçümleri kullanılabilir.

Fırça keçe için, gözenekli ortam akış direnç katsayılarının kalibrasyonu aşağıdaki 3 deneysel veri kullanılarak yapılmaktadır (Doğu, 2005) [17] :

- Kaçak debi
- Rotor yüzeyindeki aksel basınç dağılımı
- Arka plaka yüzeyindeki radyal basınç dağılımı

İlaveten, Doğu (2005) [17] tarafından kalibrasyonun tel paketinin iki bölgeye bölünerek yapılması gerekliliği ortaya konmuştur. Buna sebep olarak ise, tel paketinin arka plaka çit yüksekliği bölgesinde dayanma yüzeyi olmadığından serbest hareket etmesi, bükülmesi ve tellerin gözenekliliğinin daha az olması gösterilmiştir. Tellerin arka plakaya dayandığı kısımda ise bir sıkışma olacaktır ve geçirgenlik düşecektir. Bu çalışmada da bu yaklaşım kullanılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar, literatürdeki deneysel ve HAD sonuçları ile karşılaştırılarak kabul edilebilir eşleşmeler sağlanacak şekilde kalibrasyon yapılmıştır.

4. FIRÇA KEÇE HAD ANALİZLERİ VE SONUÇLAR

4.1. Analiz Parametreleri ve Analiz Matrisi

Tez çalışmasında önceki kısımlarda da belirtildiği gibi fırça keçe tasarım parametrelerinin sızdırmazlık performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, geometrik parametrelerden aksel ve radyal parametrelere ilave olarak çalışma şartlarının da etkileri incelenmiştir. Tasarım parametrelerinin inceleme aralıklarının belirlenmesinde fırça keçelerin pratikteki uygulamalarına ait tecrübeler belirleyici rol oynamıştır. Aşağıda Çizelge 4.1’de HAD analizlerine ait parametrik analiz matrisi verilmiştir. Şekil 4.1’de ise parametrelerin temel değerleri için HAD model geometrisi ve uygulanan sınır şartları gösterilmiştir. Çizelge 4.1’de belirtilen analiz matrisi, 2-boyutlu aksel simetrik geometri için aksel ve radyal doğrultudaki fırça keçe boyutlarını içermektedir. Aksel yönde, ön plaka kalınlığı, tel paketi ile ön plaka arası mesafe, tel paketi kalınlığı ve arka plaka kalınlığı olmak üzere 4 adet geometrik uzunluk dikkate alınmıştır. Radyal yönde ise, ön plaka çit yüksekliği, tel radyal yüksekliği ve arka plaka çit yüksekliği olmak üzere 3 adet geometrik yükseklik ele alınmıştır. Çalışma şartları olarak ise en önemli 3 çalışma şartı olan basınç oranı, radyal açıklık ve rotor dönme hızı incelenmiştir. Her bir parametrenin minimum ve maksimum değerleri yani değişim aralığı tecrübi bilinen ve literatürde belirtilen çalışma aralıkları dikkate alınarak belirlenmiştir. Ayrıca değişimin yakalanabilmesi için parametrelerin minimum ve maksimum değerleri dahil en az 3 ve en fazla 6 değer seçilmiştir.

Özetle, toplam incelenen parametre sayısı 10 olmaktadır. Her bir parametre için alınan 3 ile 6 adet parametre değeri de düşünülecek olursa, analiz matrisinin tüm parametreler arası çapraz geçişleri dahil edecek şekilde taranması, HAD analizi sayısını aşırı artıracaktır. Bu sebeple Çizelge 4.1’de de gösterildiği gibi her bir parametre için temel bir değer belirlenmiş ve bu durum temel durum olarak isimlendirilmiştir. Her bir parametrenin etkisi bu temel durum referans alınarak incelenmiştir. Devam eden kısımlarda oluşturulan tüm şekiller aksi söylenmedikçe bu temel durum parametreleri için oluşturulmuştur. Fırça keçe uygulamalarında keçe

radyal açıklığı ve basınç oranı önemli iki çalışma parametresi olduğundan, parametre incelemelerinde bunların değişimleri de dikkate alınmış ve temel duruma ilave olarak gösterilmiştir.

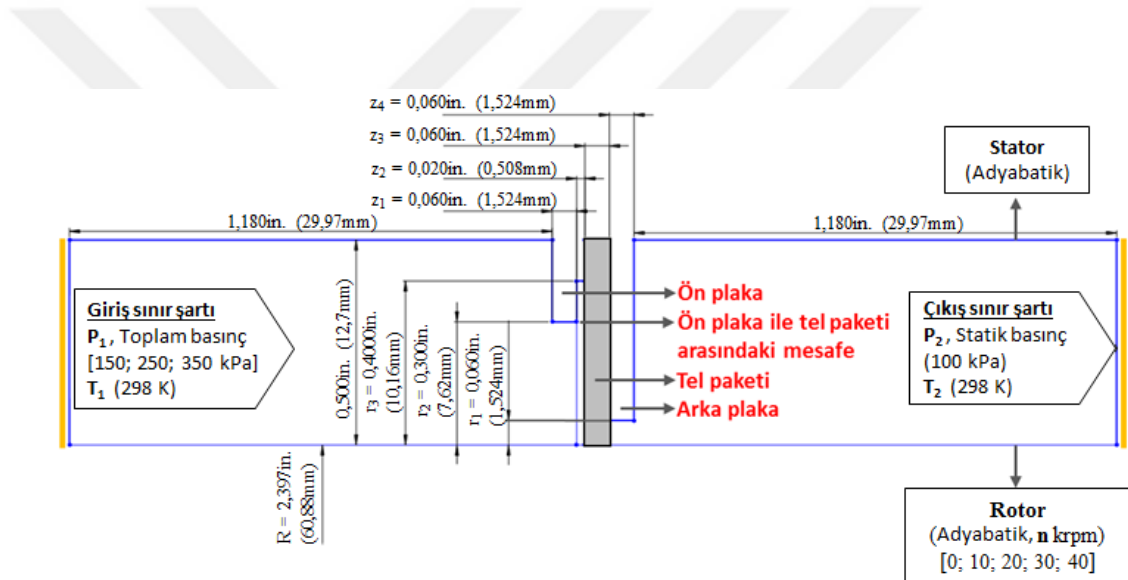
Çizelge 4.1 ve 4.2’ de belirtilen analiz matrisi esas alınarak 2-boyutlu eksenel simetrik olarak hazırlanan geometriler için HAD analizleri yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar (kaçak debi, hız ve basınç dağılımı) değerlendirilmiştir. Tasarım parametrelerine ait değerlerin kolay takip edilebilmesi için uzunluk birimleri Çizelge 4.1’de “in.” cinsinden, Çizelge 4.2’de “mm” cinsinden verilmiştir. İlerleyen bölümlerde de yeri geldikçe hem “in.” hem “mm” olarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesi yapılırken öncelikle kaçak debiyi belirleyici olan hız ve basınç dağılımı incelenmiştir. Ardından kaçak debinin incelenen parametrelere göre değişimi değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.1. HAD analizi parametreleri ve analiz matrisi

	#	Tasarım Parametreleri		Değerler (Min., Temel, Max.)
Eksenel parametreler	1	Ön plaka kalınlığı	z_1 (in.)	0,040 - 0,060 - 0,080 - 0,100 - 0,150
	2	Ön plaka ile tel paketi arasındaki mesafe	z_2 (in.)	0,010 - 0,020 - 0,030 - 0,040 - 0,050
	3	Tel paketi kalınlığı	z_3 (in.)	0,020 - 0,040 - 0,060 - 0,080 - 0,100
	4	Arka plaka kalınlığı	z_4 (in.)	0,040 - 0,060 - 0,080 - 0,100 - 0,150
Radyal parametreler	5	Arka plaka çit yüksekliği	r_1 (in.)	0,020 - 0,040 - 0,060 - 0,080 - 0,100
	6	Ön plaka çit yüksekliği	r_2 (in.)	0,060 -0,080-0,100-0,200- 0,300 - 0,400
	7	Serbest tel yüksekliği	r_3 (in.)	0,300 - 0,400 - 0,500
Çalışma koşulları	8	Radyal çalışma boşluğu	r_0 (in.)	0,000 - 0,005 - 0,010 - 0,015 - 0,020
	9	Çalışma basıncı oranı	R_p	1,5 - 2,5 - 3,5
	10	Rotor devri	n (krpm)	0 - 10 - 20 - 30 - 40

Çizelge 4.2. HAD analizi parametreleri ve analiz matrisi

	#	Tasarım Parametreleri	Değerler (Min., Temel, Max.)
Eksenel parametreler	1	Ön plaka kalınlığı	z_1 (mm) 1,016 - 1,524 - 2,032 - 2,540 - 3,810
	2	Ön plaka ile tel paketi arasındaki mesafe	z_2 (mm) 0,254 - 0,508 - 0,762 - 1,016 - 1,270
	3	Tel paketi kalınlığı	z_3 (mm) 0,508 - 1,016 - 1,524 - 2,032 - 2,54
	4	Arka plaka kalınlığı	z_4 (mm) 1,016 - 1,524 - 2,032 - 2,54 - 3,81
Radyal parametreler	5	Arka plaka çit yüksekliği	r_1 (mm) 0,508 - 1,016 - 1,524 - 2,032 - 2,540
	6	Ön plaka çit yüksekliği	r_2 (mm) 1,524 -2,032-2,540-5,080- 7,620 - 10,160
	7	Serbest tel yüksekliği	r_3 (mm) 0,300 - 0,400 - 0,500
Çalışma koşulları	8	Radyal çalışma boşluğu	r_0 (mm) 0,000 - 0,127 - 0,254 - 0,381 - 0,508
	9	Çalışma basıncı oranı	R_p 1,5 - 2,5 - 3,5
	10	Rotor devri	n (krpm) 0 - 10 - 20 - 30 - 40



Şekil 4.1. HAD model geometrisi ve sınır şartları

4.2. Fırça Keçe HAD Modellemesi

Fırça keçe HAD modeli ANSYS Fluent v.14 paket programında oluşturulmuştur. Paket programdaki gözenekli ortam yaklaşımı kullanılarak tel paketi gözenekli ortam olarak modellenmiştir. Gözenekli ortamdaki akışı temsil eden akış direnç katsayıları deneysel veriler kullanılarak kalibre edilmiştir.

Fırça keçe HAD modelinin oluşturulmasında genel olarak aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

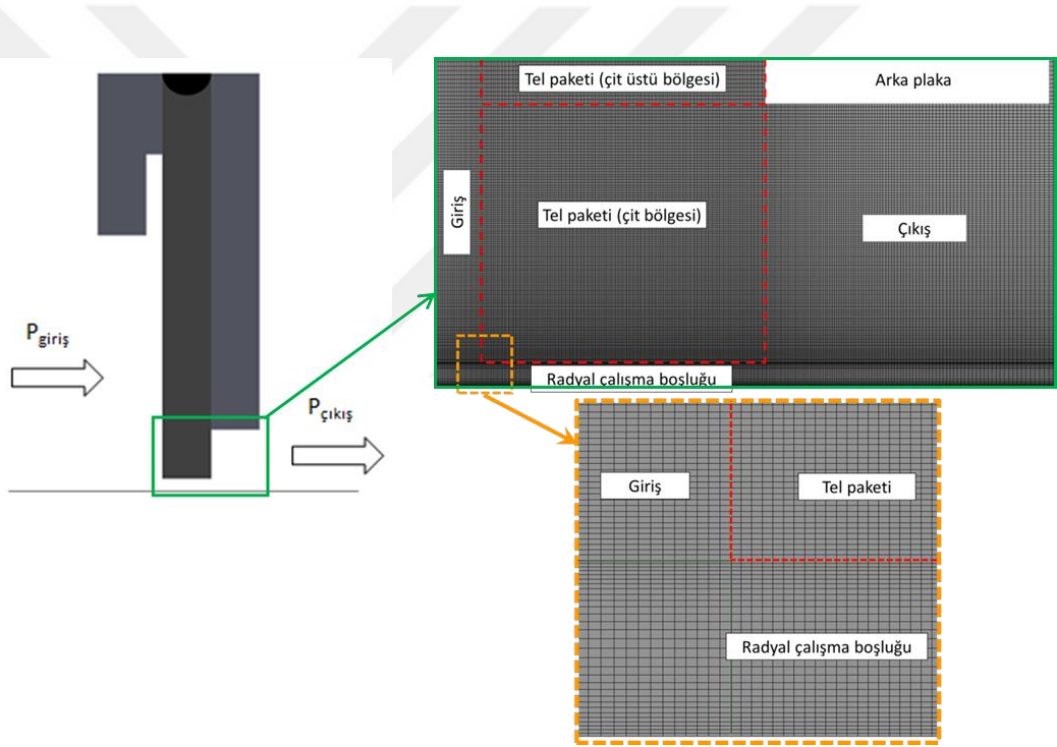
- i. CAD programında, 2 boyutlu eksenel simetrik geometrinin çizilmesi
- ii. ANSYS-Mesher programında, ağ yapısının (mesh) oluşturulması ve sınır şartı tanımlanacak geometri sınırlarının belirlenmesi ve isimlendirilmesi
- iii. ANSYS-Fluent v.14 programında, akış fiziği tanımlamaları (süreklilik, momentum ve enerji denklemleri, türbülans modeli, akışkan özellikleri, gözenekli ortam katsayıları) ve sınır şartı tanımlamaları yapılması
- iv. Denklem takımı çözümünde kullanılacak kriterlerin tanımlanması (ilk akış dağılımı, yakınsama kriteri, iterasyon sayısı, vb.)
- v. Çözüm
- vi. Sonuçların görüntülenmesi

Şekil 4.1’de tüm analizlerde kullanılan model geometrisi ve uygulanan sınır şartları gösterilmiştir. HAD analizlerinde kullanılan tüm yaklaşım ve tanımlamalar Çizelge 4.3’de belirtilmiştir. Tel paketinin gözenekli ortam olarak modellenmesi ile ilgili ilave açıklamalar aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.3. Fırça keçe HAD model bilgileri

1)	Koordinat sistemi	2-Boyutlu silindirik aksenal-simetrik koordinat sistemi kullanıldı.
2)	Akışkan	Hava
3)	Rejim	Sürekli rejim (daimi akış)
4)	Akış hali	Türbülanslı akış, “k-epsilon, Realizable, Enhanced Wall Treatment” yaklaşımı.
5)	Yoğunluk	İdeal gaz kabulü kullanıldı.
6)	Akışkan özellikleri	Viskozite, özgül ısı, ısı iletim katsayısı giriş şartlarında alındı.
7)	Tel paketi	Gözenekli ortam olarak modellendi.
8)	Gözenekli ortam katsayıları	Silindirik koordinatlarda 3 yöne ait viskoz ve atalet direnç katsayıları kalibre edilerek tanımlandı.
9)	Gözeneklilik	Gözeneklilik değeri tel paketini oluşturan tellerin çapına ve dizilimine bağlı olarak belirlendi.
10)	Giriş sınır şartı	Toplam basınç ve sıcaklık değerleri tanımlandı. Türbülans yoğunluğu %5 ve hidrolik çap ise arka plaka çit yüksekliği olarak tanımlandı.
11)	Çıkış sınır şartı	Statik basınç ve sıcaklık değerleri tanımlandı. Türbülans yoğunluğu %5 ve hidrolik çap ise arka plaka çit yüksekliği olarak tanımlandı.
12)	Rotor sınır şartı	Dönen rotor yüzeyi için açılmal hız tanımlandı. Isıl olarak adyabatik yüzey tanımlaması yapıldı.
13)	Stator sınır şartı	Durağan adyabatik duvar tanımlaması yapıldı.
14)	Referans basıncı	Referans basıncı 0 Pa olarak alındı.

HAD analizlerinde kullanılan çözüm ağı (mesh) yapısı üzerinde hassasiyetle çalışılmıştır. HAD analizlerinde fırça keçede özellikle tel paketindeki akış detaylarının görülmesi için ağ yapısının yeterli sıklıkta ve kalitede olması önemlidir. Şekil 4.2’de genel olarak tüm analizlerde kullanılan çözüm ağı yapısı özellikle en önemli bölge olan fırça keçe çit bölgesinde gösterilmiştir. Duvar bölgelerinde sınır tabaka ve dönme etkileri nedeniyle daha sık ağ oluşturulmuştur. Ayrıca, kaçak debinin çoğunluğunun olduğu açıklık kısmında yoğun ağ kullanılmıştır. Farklı yoğunluktaki ağ bölgeleri arasındaki geçişlerde ağ büyüklükleri orantısal olarak yakın tutulmuştur. Çözüm ağı sayısından bağımsız sonuç elde edilebilmesi için birçok analiz yapılmış, yaklaşık 3×10^5 adet çözüm ağının yeterli olduğu belirlenmiş ve bu değer civarında çözüm ağı oluşturularak HAD analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.2. Fırça keçe çit bölgesindeki çözüm ağı (mesh) yapısı

Akışın laminar veya türbülanslı bölgede olduğunun belirlenmesi için Şekil 4.1’de gösterilen fırça keçe arka plaka çit yüksekliği altındaki en dar halkasal kesit

için Reynolds sayısı 53234,5 olarak hesaplanmış ve akışın türbülanslı bölgede olduğu belirlenmiştir.

Daimi ve sıkıştırılabilir akış olarak 2 boyutlu eksenel simetrik, silindirik koordinatlarda oluşturulan HAD modeli için gerçekleştirilen HAD analizlerinde ANSYS-Fluent v.14 paket programındaki aşağıdaki denklemler çözülmüştür [38]:

- Süreklilik denklemi
- Momentum denklemleri
- Enerji denklemleri
- Türbülans denklemleri

Daimi ve sıkıştırılabilir akış için, 2 boyutlu eksenel simetrik silindirik koordinatlardaki süreklilik denklemi aşağıdaki formdadır [38]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (4.1)$$

Çözülen momentum korunum denklemleri ise 2 boyutlu eksenel simetrik modeller için eksenel, radyal ve açılmal olarak aşağıda verilmiştir:

Eksenel momentum korunum denklemi [38],

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad (4.2)$$

Radyal momentum korunum denklemi [38],

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_z}{r} + F_r \end{aligned} \quad (4.3)$$

Açılmal momentum korunum denklemi [38],

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \frac{\partial v_z}{\partial x} \right] \\ + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_z}{r} \right) \right] - \rho \frac{v_r v_z}{r} \end{aligned} \quad (4.4)$$

olarak ifade edilmiştir. Gözenekli ortama ait akış direnç terimleri de momentum korunum denklemlerinde sağ tarafa ilave edilen bir (S) kaynak terimi içerisinde çözülmektedir ki aşağıdaki bölümlerde bu terim ifade edilmiştir.

Genel enerji korunumu denklemi ise [38],

$$\nabla \cdot (\vec{v}(\rho E) + p) = \nabla \cdot \left(k_{et} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{et} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (4.5)$$

şeklindedir. Denklemdaki, E; iç enerji, potansiyel enerji ve kinetik enerjilerin toplamını ifade etmektedir. k_{et} , etkin ısı iletkenliği ($k+k_t$) ifade etmektedir, k_t ise kullanılan türbülans modeline bağlı ısı iletkenliği göstermektedir. J_j , ise difüzyon akısını ve τ_{et} ise viskoz ısınmayı belirtmektedir.

Yukarıda ifade edilen süreklilik, momentum ve enerji denklemlerine ilaveten kullanılan türbülans modeline göre bazı transport denklemleri de çözülmektedir. Çalışma kapsamında (realizable) k- ϵ 2-denklemlilik türbülans modeli kullanıldığından, HAD analizlerinde de k ve ϵ transport denklemleri çözülmüştür ve bu denklemler aşağıda sırasıyla belirtilmiştir.

k için çözülen transport denklemi [38],

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4.6)$$

ϵ için çözülen transport denklemi ise [38],

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \end{aligned} \quad (4.7)$$

şeklindedir. Burada C_1 ; C_2 ; $C_{1\epsilon}$; $C_{3\epsilon}$, sabit katsayılarıdır.

HAD Analizlerinin Kalibrasyonu ve Doğrulanması

HAD analizlerinin kalibrasyon ve doğrulanmasında en önemli konu, tel paketi için kullanılan gözenekli ortam yaklaşımının kalibrasyon ve doğrulanmasıdır.

Tez kapsamında yapılan HAD analizleri için gözenekli ortam modellemesinde, denklem 3.4 ve 3.5 ile verilen non-Darcy denklemi formatındaki denklem kullanılmıştır. Kullanılan ANSYS-Fluent v.14 paket programı gözenekli ortam katsayılarını, viskoz direnç katsayıları ve atalet direnç katsayıları olmak üzere bir kaynak terimi içerisinde belirterek, bu kaynak terimini de momentum denkleminin sağ tarafına ekleyerek çözmektedir. Belirtilen kaynak terimi aşağıda verilmiştir [37].

$$-S = \left[\sum_{i=1}^3 D_i \cdot \mu \cdot v_i + \sum_{i=1}^3 C_i \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot |v| \cdot v_i \right] \quad (4.8)$$

S: Momentum denklemine eklenen kaynak terimi

C: Gözenekli ortam atalet direnç katsayısı (1/m)

D: Gözenekli ortam viskoz direnç katsayısı (1/m²)

v: Hız (m/s)

μ : Dinamik viskozite (Pa-s)

ρ : Akışkan yoğunluğu (kg/m³)

i: Aksenal, radyal ve teğetsel yön

HAD modelinde, gözenekli ortam için üç yöndeki atalet direnç katsayıları (C_i), viskoz direnç katsayıları (D_i) ve gözeneklilik değerleri tanımlanmıştır. Gözeneklilik değeri tel paketini oluşturan tellerin çapına ve dizilimine bağlı olarak belirlenmiştir. Denklemdaki viskoz ve atalet direnç katsayıları ise literatürdeki deneysel veriler yanında literatürdeki HAD sonuçları da kullanılarak kalibre edilmiştir.

Yukarıda da belirtildiği gibi, tel paketi akış direnç katsayıları, literatürdeki 3 farklı deneysel veri kullanılarak kalibre edilmiştir [17]. Bunlar;

- Kaçak debi
- Rotor yüzeyindeki aksenal basınç dağılımı
- Arka plaka yüzeyindeki radyal basınç dağılımı

şeklinde. HAD analizlerinde Dogu (2005) [17] tarafından verilen direnç katsayıları referans olarak alınmış ve ANSYS-Fluent v.14 paket programındaki gözenekli ortam denkleminde uyarlanarak kullanılmıştır. Yapılan tekrarlı HAD analizleri ile kalibrasyonlar yapılmış ve deneysel verilerle kabul edilebilir eşleşmeler

sağlanmıştır. HAD analizinden elde edilen sonuçlar ile deneysel veriler ve diğer HAD analizi sonuçları aşağıdaki grafiklerde karşılaştırılmıştır.

Kaçak debi karşılaştırması:

Şekil 4.3'de hem temaslı çalışma durumu için ($r_0=0,000$ in.) ve hem de açıklıklı çalışma durumu için ($r_0=0,010$ in.) kaçak debi karşılaştırması yapılmıştır. Grafikte kaçak debinin basınç oranı ile değişimi çizilmiştir. Artan basınç oranı ile kaçak debi lineere yakın değişimle artmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi hem deneysel verilerde hem de literatürdeki HAD analizlerinde birbirleri ile belli yakınlıkta aynı eğilim gerçekleşmesine rağmen biraz dağınık bir eşleşme görülmektedir. Mevcut HAD analizleri ise diğer verilerle uyumlu ve aynı eğilimde gerçekleşmiştir.

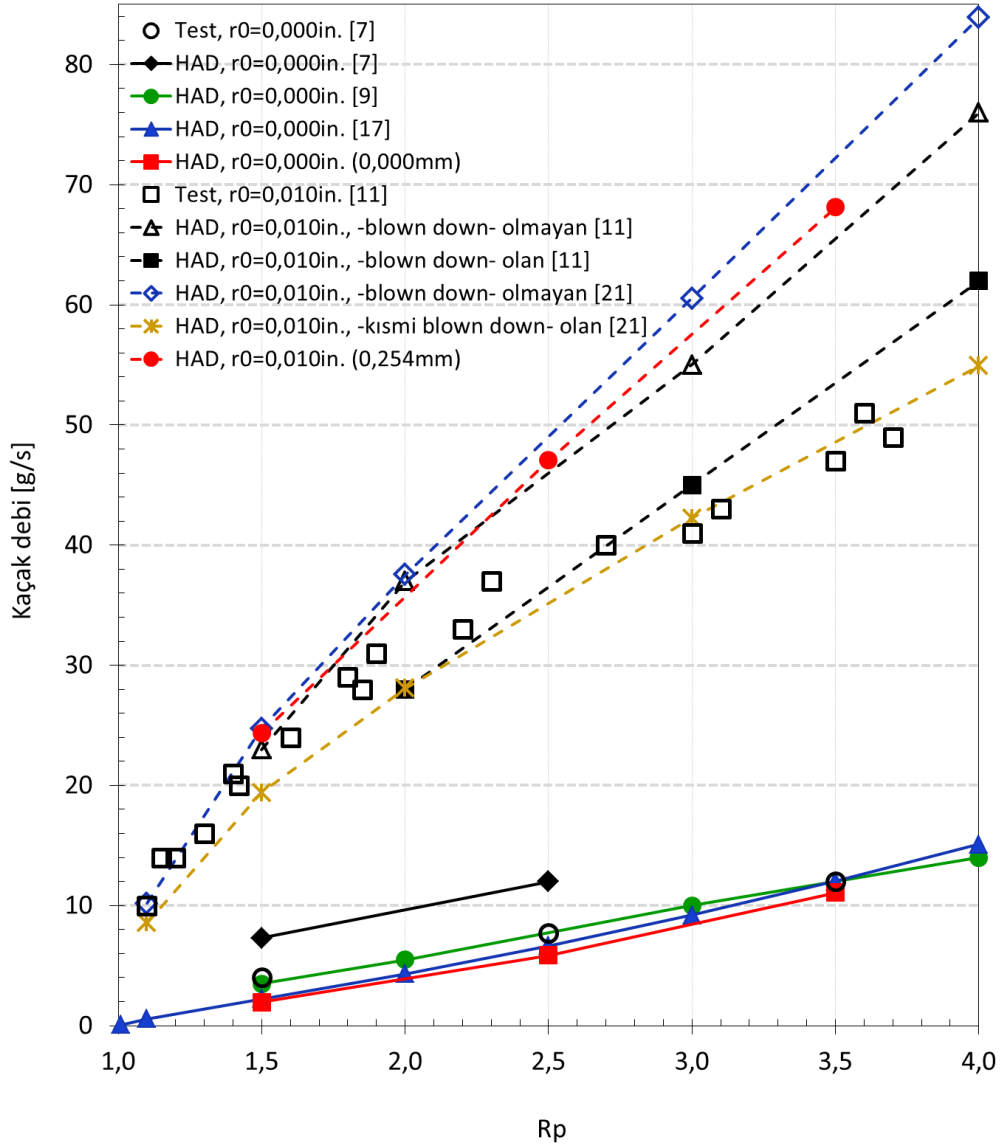
Rotor yüzeyindeki aksel basınç dağılımı karşılaştırması:

Şekil 4.4'de temaslı çalışma durumu için rotor yüzeyindeki aksel basınç dağılımı literatürdeki deneysel verilerle ve HAD analizleri ile karşılaştırılmıştır. Grafikte boyutsuz basıncın boyutsuz aksel mesafeye göre değişimi çizilmiştir. Basınç giriş ve çıkış basınçlarına göre boyutsuzlaştırılmıştır. Aksel mesafe ise tel paketi kalınlığına göre normalize edilmiştir. Basınç, giriş basıncından çıkış basıncına tel paketi kalınlığına düşmektedir. Genel olarak, tel paketi son yarısında ilk yarısına göre daha hızlı bir basınç düşüşü gözlenmektedir. Kaçak debiye benzer şekilde, genelde benzer basınç düşüşü eğilimi görülmesine rağmen gerek deneysel veriler kendi içinde gerekse HAD analizleri geniş bir bölgeye dağılmıştır. Mevcut HAD analizleri ise diğer verilerin arasında uyumlu ve aynı eğilimde gerçekleşmiştir.

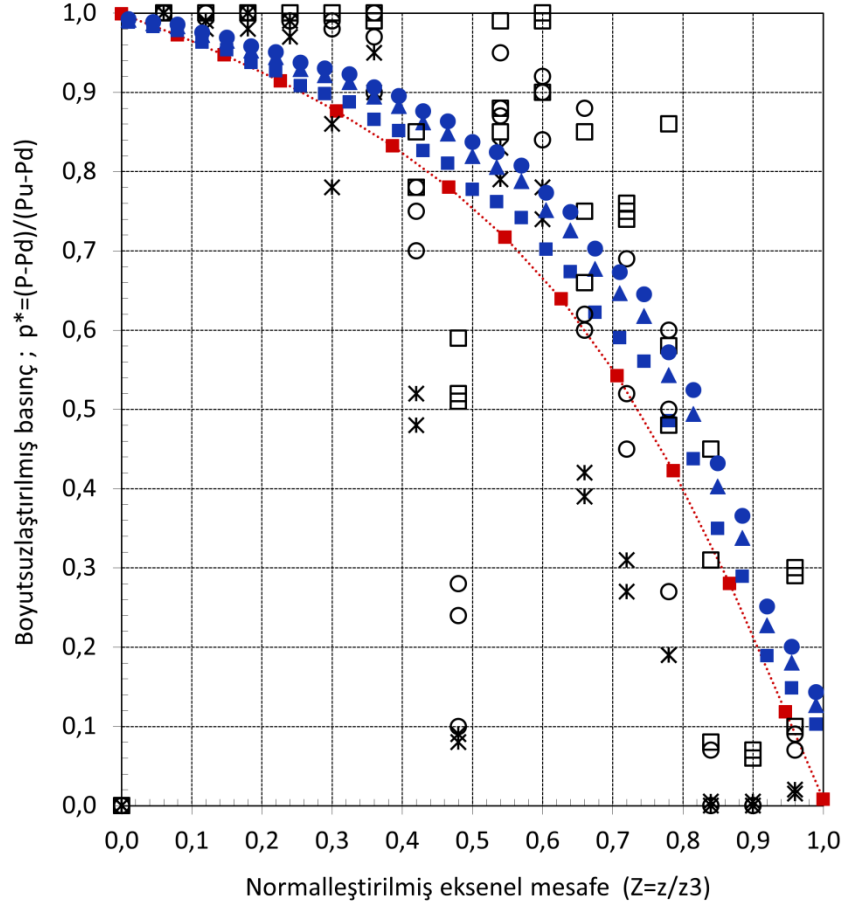
Arka plaka yüzeyindeki radyal basınç dağılımı karşılaştırması:

Şekil 4.5’de temaslı çalışma durumu için arka plaka yüzeyindeki radyal basınç dağılımı literatür ile karşılaştırmalı olarak karşılaştırılmıştır. Grafikte yine boyutsuz basınç kullanılmıştır. Radyal mesafe ise tel radyal yüksekliğine göre normalize edilmiştir. Arka plaka yüzeyindeki basınç, rotor yüzeyinden ($Y=0$) dışa doğru ($Y=1$) çıkış basıncından giriş basıncına exponansiyel olarak yükselmektedir. Buradaki veri dağılımı biraz daha dar bölgededir ve mevcut HAD sonuçları bu bölge içinde kalmaktadır.

Görüldüğü gibi HAD analizleri, literatürdeki mevcut veriler ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Böylece, hem tel paketi için gözenekli ortam yaklaşımı kalibre edilmiş hem de kullanılan HAD metodolojisi doğrulanmıştır.

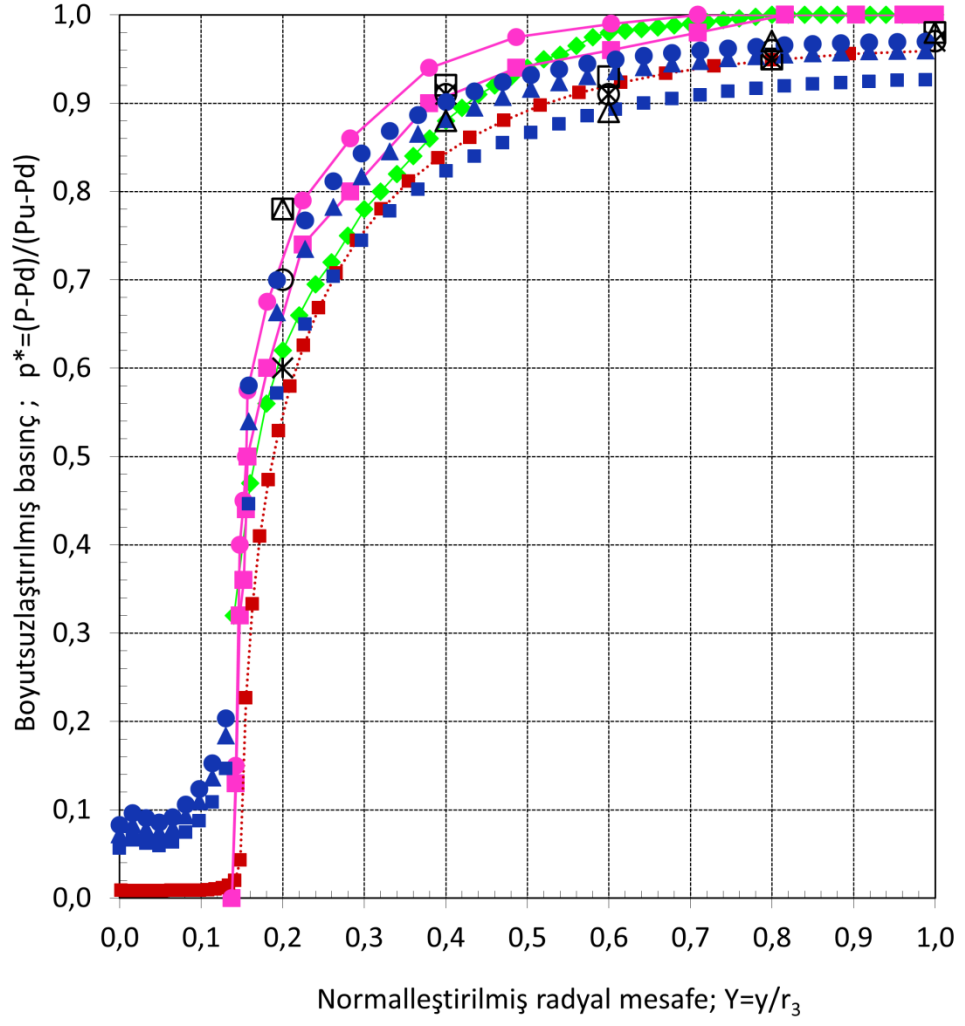


Şekil 4.3. Kaçak debi karşılaştırması



- ✕ Test, ($1,25 < R_p < 1,42$) [7]
- Test, ($2,20 < R_p < 2,70$) [7]
- Test, ($R_p < 3,80$) [7]
- HAD, $R_p=1,5$ [17]
- ▲ HAD, $R_p=2,5$ [17]
- HAD, $R_p=3,5$ [17]
- HAD, $R_p=1,5$ $z_3=0,020$ in. $r_1=0,060$ in.

Şekil 4.4. Temaslı çalışma için rotor yüzeyindeki aksel basınç dağılımı



- ✕Test, (1,08<Rp<1,29) [7]
- Test, (1,86<Rp<2,20) [7]
- Test, (2,23<Rp<2,65) [7]
- △Test, (3,17<Rp<3,80) [7]
- HAD, Rp=1,5 [9]
- HAD, Rp=3,0 [9]
- HAD, Rp=1,5 [17]
- ▲HAD, Rp=2,5 [17]
- HAD, Rp=3,5 [17]
- ◆HAD, [7]
- HAD, Rp=1,5 z3=0,020 r1=0,060[in.]

Şekil 4.5. Temaslı çalışma için arka plaka yüzeyindeki radyal basınç dağılımı

4.3. Hız ve Basınç Dağılımı

Fırça keçe tel paketi bölgesindeki hız ve basınç dağılımı keçe davranışını ve kaçak debiyi belirleyici olduğundan, öncelikle bunlar incelenmiştir. Çalışma şartlarından olan keçe açıklığı, hız ve basınç dağılımını önemli seviyede etkilemektedir. Bu sebeple, hız ve basınç dağılımı sırasıyla açıklığın sıfır olduğu [$r_0=0,000$ in. (0,000 mm)] temaslı durum ve [$r_0=0,005$ in. (0,127 mm)] olduğu açıklık durumu için çizilmiş ve değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, geometrik parametrelerden olan tel paketi kalınlığı ve arka plaka çit yüksekliği kaçak debi açısından en önemli parametreler olarak belirlendiğinden, hız ve basınç dağılımı incelemelerine dahil edilmiştir. Analizlerde diğer parametreler ise analiz matrisinde belirtilen temel değerlerde sabit tutulmuştur. Aşağıda sırasıyla temaslı ve açıklıklı keçe çalışma durumları değerlendirilmiştir.

Fırça keçe tel uçları ile rotor arasındaki açıklığa bağlı olarak 3 türlü çalışma söz konusudur. Bunlar:

- Açıklıklı çalışma (clearance)
- Temaslı (Teğetsel) çalışma (line-to-line)
- Baskılı (Girişimli) çalışma (interference)

olarak isimlendirilir. Basınç farkının oluşturduğu akış ile açılı yerleştirilmiş fırça keçe tellerinin dinamik davranışına ve montajlamaya bağlı olarak, tel uçları ile rotor yüzeyi arasında pozitif bir açıklık olursa bu durum açıklıklı çalışma (clearance) olarak isimlendirilmiştir. Teller, üzerlerindeki yüke bağlı olarak açılarını değiştirerek rotora teğet temaslı olarak çalışabilirler ki bu duruma temaslı çalışma (line-to-line) denir. Son olarak, telleri rotora doğru zorlayan yükler fazla olursa teller rotor yüzeyine iyice bastırılarak yaslanır. Bu durumda teller aşırı yük altında kalır ve uçları sürtünme sonucu aşınır. Tel uçlarının rotor yüzeyine teğet kalmasının ötesinde tellerin rotor yüzeyine bastırıldığı bu duruma da baskılı çalışma (interference) denir. Kaçak debi açısından temaslı ve baskılı çalışma aynı geometriyi oluşturur. Teller ve rotorun yapısal etkileşimi açısından bu durumlar elbette farklıdır.

Temaslı ve açıklıklı çalışma için hız ve basınç dağılımları incelenmiştir. Hız ve basınç dağılımının temaslı [$r_0=0,000$ in. (0,000 mm)] ve açıklıklı [$r_0=0,005$ in. (0,127 mm)] çalışmada değerlendirilmesi için hız vektörleri, hız dağılımı ve basınç

dağılımı sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Hız vektörleri tüm fırça keçe bölgesinde (Şekil 4.6) ve kaçak debiyi belirleyici olan arka plaka çit kısmında (Şekil 4.7) ayrı ayrı oluşturulmuştur. Temaslı ve açıklıklı çalışmanın da karşılaştırılabilmesi için şekillerde her ikisi de gösterilmiştir. Şekillerdeki sol taraftaki çizimler a, b, c indisleri ile temaslı çalışmayı ve sağ taraftaki çizimler ise d, e, f indisleri de açıklıklı çalışmayı göstermektedir.

Hız vektörleri:

Temaslı çalışma için hız vektörlerine bakıldığında (Şekil 4.6 ve 4.7, a,b,c), geniş giriş bölgesinden gelen akışın ön plaka çit kısmına doğru yönlendiği görülmektedir. Fırça keçede yüksek basınç bölgesinden düşük basınç bölgesine akışın geçeceği tek kısım arka plaka çit yüksekliği olduğundan ve bu bölgeye doğru yönelme daha fazladır. Giriş bölgesinden süzülerek yönlenen bu akışın bir kısmı doğrudan çit bölgesindeki tel paketine nüfuz ederken bir kısmı da üst kısımda ön plaka ile tel paketi arasındaki boşluğu doldurarak tel paketine nüfuz etmektedir. Akışın geçmesine bir bariyer oluşturan gözenekli tel paketi içine nüfuz eden akış, arka plaka üzerinde yığılarak arka plaka yüzeyinden rotora doğru akmakta ve arka plaka uç kısmında düşük basınç bölgesine çıkmaktadır. Bu sebeple en yüksek akış hızı arka plaka uç kısmında oluşmaktadır. Çıkış kısmında arka plakanın altında (rotora bakan tarafında) yerel akış çevrintileri görülmektedir. Arka plaka yüzeyinden rotora doğru oluşan radyal akışın teller üzerinde oluşturacağı sürüklenme kuvveti, tellerin açılarını değiştirerek rotor yüzeyine yönelmesine neden olur ki bu olay tellerin basınçla kapanması (blow-down) olarak adlandırılan fırça keçe dinamik davranışının tetik mekanizmasıdır.

Açıklıklı çalışmada ise yine Şekil 4.6 ve 4.7’deki d,e,f indisli hız vektörlerine bakıldığında, akışın giriş bölgesinden daha etkin bir şekilde ön plaka çit kısmına doğru yönlendiği görülmektedir. Tel uçları ile rotor arasındaki açıklıkta, akışı engelleyen sürtünmeli tel paketi bulunmamaktadır. Bu açıklık, tel paketi kısmı ile karşılaştırıldığında bir nevi yüksek basınçtan düşük basınca akışın direk geçtiği adeta bir emme pasajı gibi davranmaktadır ve açıklık çalışmasında kaçak debi çok yüksek

olmaktadır. Dolayısıyla, giriş bölgesinden açıklığa doğru etkin yönlene bir akış gerçekleşmektedir. Açıklık çalışmasında da yine tel paketine nüfuz eden akış arka plaka üzerinde toplanarak arka plaka yüzeyinden rotora doğru yönlenebilmektedir. Bu akışın bir kısmı arka plaka çit kısmından çıkışa yönleneirken bir kısmı da açıklığın emme etkisiyle açıklıktaki akışa katılmaktadır. En yüksek hız ise açıklık çıkışında oluşmaktadır. Açıklıklı çalışmada açıklık tüm akışı domine etmektedir.

Hız dağılımı:

Hız vektörleri ile takip edilen bu akış oluşumunun hız şiddetlerini veren hız dağılımı Şekil 4.8'de gösterilmiştir. En yüksek hız, temaslı çalışmada arka plaka uç kısmında ve açıklıklı çalışmada açıklık çıkışında olmaktadır.

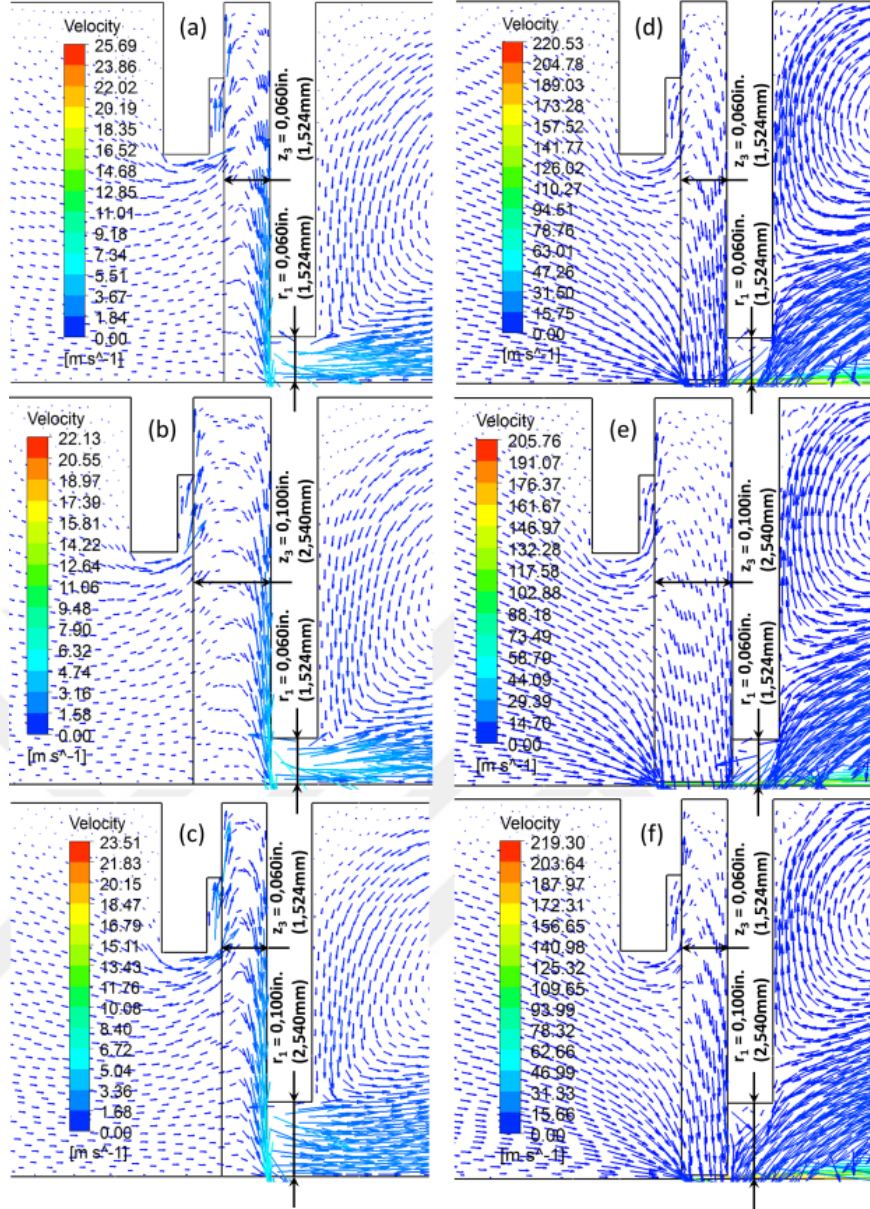
Basınç dağılımı:

Temaslı çalışma için Şekil 4.9'daki a,b,c indisli basınç dağılımlarında, basıncın tel paketi giriş yüzeyindeki yüksek basınçtan çıkış yüzeyi olan arka plaka çitine doğru ve arka plakaya doğru düştüğü görülmektedir. Rotor yüzeyindeki aksenal basınç düşüşü yukarıda Şekil 4.4'de çizilmiştir. Aynı zamanda tel paketinde rotora doğru radyal yönde giderek artan bir basınç düşüşü de gözlenmektedir. Arka plaka yüzeyindeki bu radyal basınç düşüşü de Şekil 4.5'de çizilmiştir. Aksenal basınç düşüşü tüm tel paketi içinde yayılı ise de basınç düşüşündeki hakim yön, akışın da yöneldiği arka plaka çit kısmına doğrudur. Tel paketinin ön yüzeyi boyunca nüfuz eden akışkan arka plaka çit kısmına doğru yönelmektedir. Bu sebeple arka plaka uç kısmına doğru yoğunlaşan bir basınç düşüşü oluşmuştur. Tel paketi kalınlığı $z_3=0,060$ in. (1,524 mm)'den $0,100$ in. (2,54 mm)'ye arttığında (Şekil 4.9, a'dan b'ye), basınç düşüşü hem aksenal hem radyal yönde tel paketine daha uniform olarak yayılmaktadır. Aksenal yönde tel paketine nüfuz eden akış için daha uzun bir akış yolu, basınç dağılımını daha uniform hale getirmiştir. Arka plaka çit yüksekliği $r_1=0,060$ in. (1,524 mm)'den $r_1=0,100$ in. (2,54 mm)'ye arttığında (Şekil 4.9, a'dan

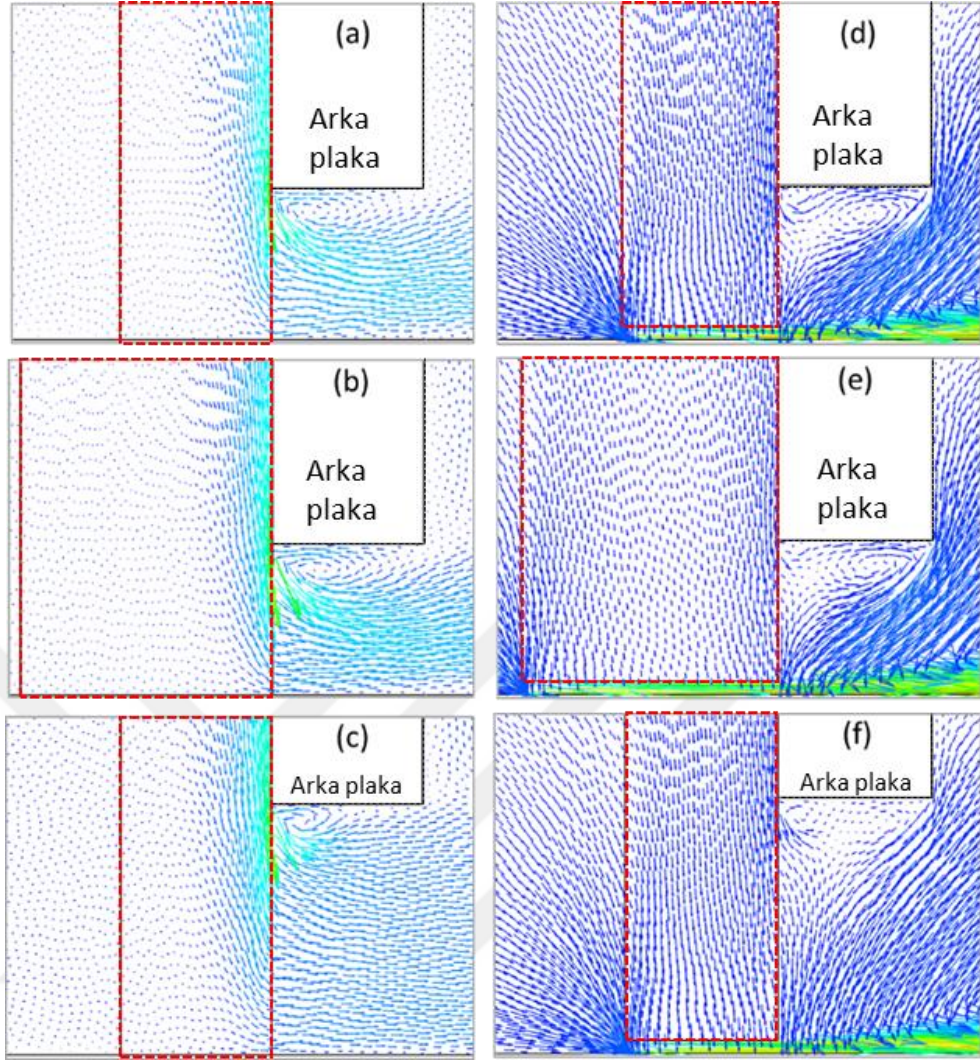
c'ye), arka plaka uç kısmına doğru yoğunlaşan basınç düşüşü biraz daha arka plaka yüzeyine yayılmıştır. Arka plaka çit yüksekliğinin artması, akışın çıkışa boşaldığı alanın artması ve kısılmanın azalması anlamındadır ve bu sebeple basınç daha yaygın düşmektedir.

Açıklıklı çalışmada basınç dağılımı (Şekil 4.9, d,e,f) temaslı çalışmaya benzer olmakla birlikte, açıklığın dominant etkisiyle, tel paketi üzerindeki basınç düşüşü açıklığa doğru kaymıştır.

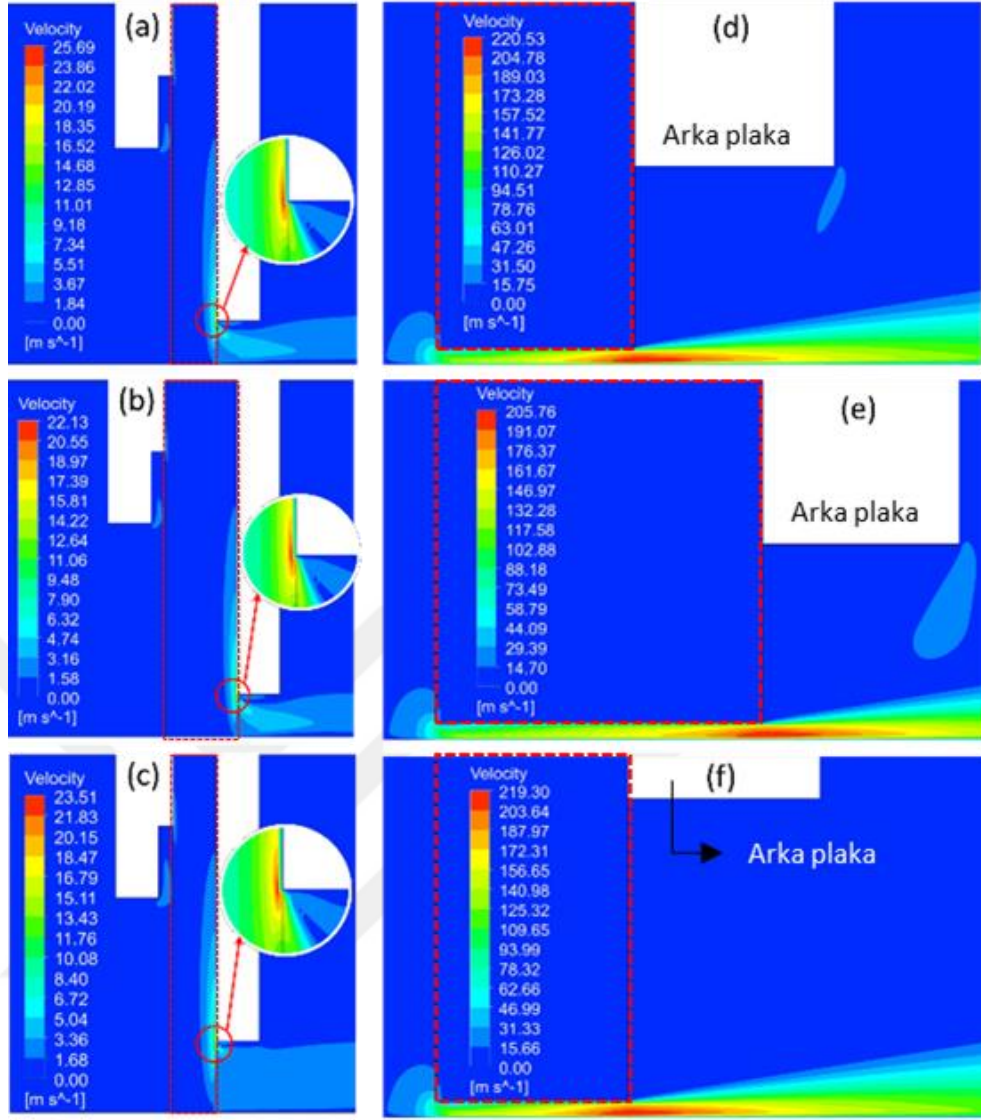




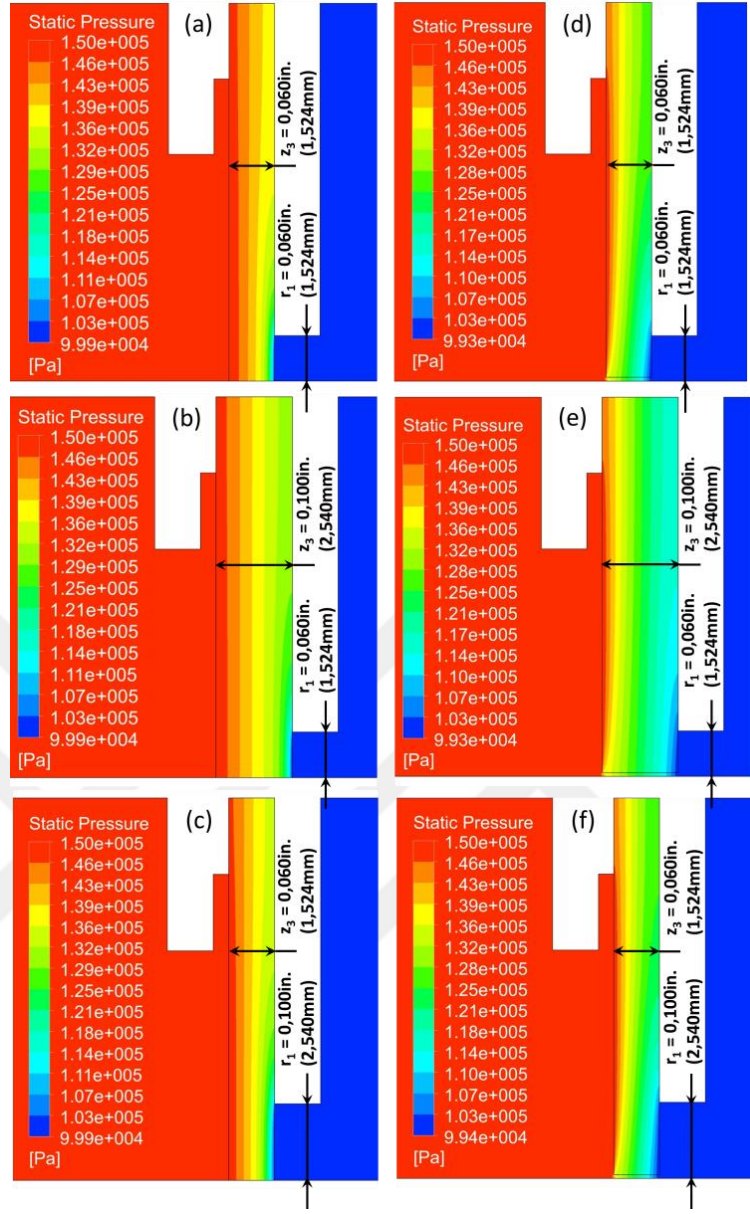
Şekil 4.6. Hız vektörleri; a,b,c) temaslı çalışma d,e,f) açıklıklı çalışma [$r_0=0,005$ in. (0,127 mm)]



Şekil 4.7. Çit bölgesinde hız vektörleri; a,b,c) temaslı çalışma d,e,f) açıklıklı çalışma [$r_0=0,005$ in. (0,127 mm)]



Şekil 4.8. Hız dağılımı; a,b,c) temaslı çalışma d,e,f) açıklıklı çalışma [$r_0=0,005$ in. (0,127 mm)]



Şekil 4.9. Basınç dağılımı; a,b,c) temaslı çalışma

d,e,f) açıklıklı çalışma

[$r_0=0,005\text{ in.}$ (0,127 mm)]

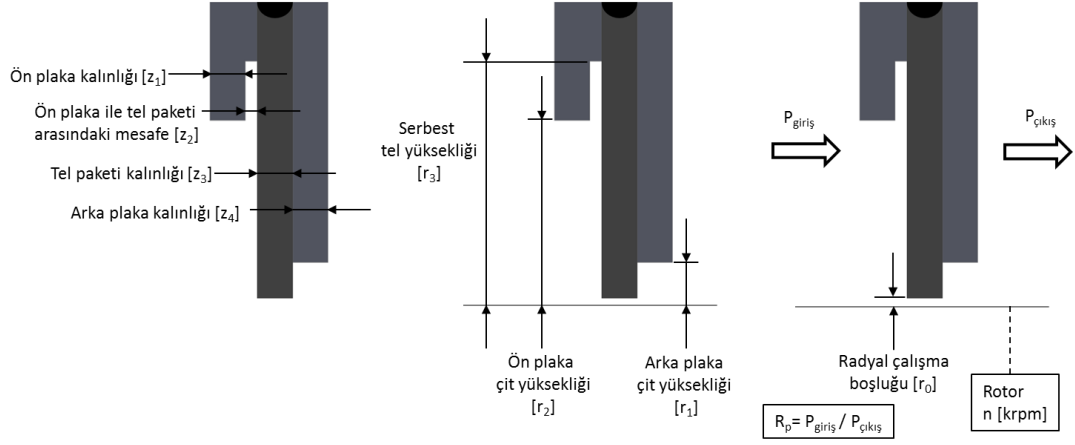
4.4. Fırça Keçe Tasarım Parametrelerinin Kaçak Debi Üzerindeki Etkileri

Çizelge 4.1'deki HAD analiz matrisinde verildiği gibi, 10 adet parametrenin kaçak debi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her bir parametrenin minimum ve maksimum değerleri yani değişim aralığı tecrübi bilinen ve literatürde belirtilen çalışma aralıkları dikkate alınarak belirlenmiştir. Ayrıca değişimin yakalanabilmesi için parametrelerin minimum ve maksimum değerleri dahil en az 3 ve en fazla 6 değer seçilmiştir. Çizelge 4.1'de de gösterildiği gibi her bir parametre için temel bir değer belirlenmiş ve bu durum temel durum olarak isimlendirilmiştir. Her bir parametrenin etkisi bu temel durum referans alınarak incelenmiştir. Devam eden kısımlarda oluşturulan tüm şekiller aksi söylenmedikçe bu temel durum parametreleri için oluşturulmuştur. Fırça keçe uygulamalarında keçe radyal açıklığı ve basınç oranı önemli iki çalışma parametresi olduğundan, parametre incelemelerinde bunların değişimleri, temel duruma ilave olarak gösterilmiştir.

İncelenen parametreler Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1 de gösterildiği gibi 3 grupta toplanabilir:

- Eksenel boyutlar
- Radyal boyutlar
- Çalışma şartları

Bu gruplar içindeki her bir parametre kolay takip edebilirlik açısından Şekil 4.10'da açık olarak gösterilmiştir. Kaçak debinin incelenen parametrelere göre değişimi aşağıda sıralı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.10. Fırça keçe kaçak debi inceleme parametreleri: a) Aksel boyutlar, b) Radyal boyutlar, c) Çalışma şartları

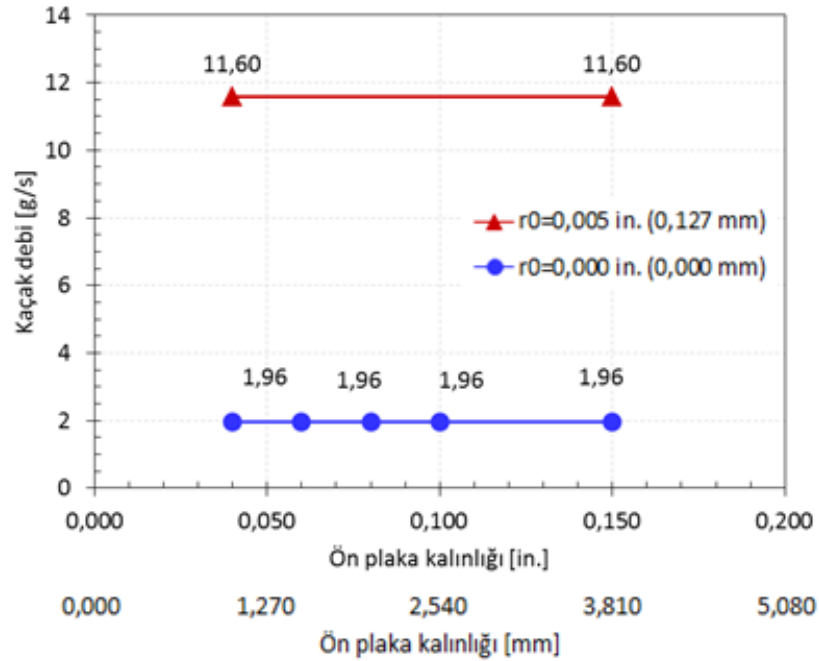
4.4.1. Ön Plaka Kalınlığı (z_1)

Ön plaka kalınlığı $z_1=0,040$ in. (1,016 mm) ile $z_1=0,150$ in. (3,81 mm) arasında değiştirilerek temaslı [$r_0=0,000$ in. (0,000 mm)] ve açıklıklı [$r_0=0,005$ in. (0,127 mm)] çalışma durumları için HAD analizleri yapılmıştır. Her iki çalışma durumunda da ön plaka kalınlığının kaçak debiyi etkilemediği Şekil 4.11’de görülmektedir. Kaçak debi temaslı ve açıklıklı çalışmada sırasıyla 1,96 g/s ve 11,60 g/s değerlerinde sabit kalmıştır.

Bu analizlerde ön plaka çit yüksekliği temel değeri $r_2=0,300$ in. (7,62 mm)’dir ve ön plaka ile rotor arasında oldukça geniş bir mesafe vardır. Bununla birlikte ön plaka uzunluğunun oluşturacağı kısılma etkisinin kaçak debi üzerindeki etkisinin de incelenmesi için, ön plaka çit yüksekliği $r_2=0,300$ in. (7,62 mm)’den en küçük değeri olan $r_2=0,060$ in. (1,524 mm)’e düşürülerek HAD analizleri tekrar edilmiştir. Bu durumda ön plaka ile arka plaka çit yükseklikleri aynı olmuştur. Uzun ön plaka için de kalınlık yine aynı aralıkta değiştirildiğinde [$z_1=0,040$ in. (1,016 mm) - 0.150 in. (3,81 mm)], kaçak debinin etkilenmediği görülmüştür. Bu durumun oluşumunda ise ön plaka ile tel paketi arasında aksel mesafenin olması etkilidir. Literatürdeki çalışmalarda ön plaka ile tel paketi arasında aksel mesafenin bulunmadığı modellerde ön plaka çit yüksekliği azaltıldığında kaçak debinin azaldığı

gözenmiştir [18]. Mevcut incelemede ön plaka ile tel paketi arasında bir mesafe vardır. Bu mesafe nedeniyle ön plaka altından geçen akışın bir kısmı aksel boşluk üzerinden radyal olarak yukarıya doğru tel paketine yönelir. Radyal olarak aşağı yönelen akış ise arka plaka çit bölgesi doğrultusunda tel paketinden geçer. Basınç dağılımlarında, ön plaka ile tel paketi arasında basıncın uniform olduğu ve yüksek basınca eşit olduğu görülmektedir. Ön plaka kalınlığı tel paketi önündeki bu basıncı değiştirmedikinden, kaçak debide de bir değişim oluşmamıştır.

Ön plakanın rotora daha yakın konumunda, ön plaka kalınlığının akım çizgilerini değiştirebilecek olmasına rağmen, tel paketi ile ön plaka arasındaki mesafede basıncın yüksek basınca yakın değerlerde aynı kalması nedeniyle kaçak debinin değişmediği görülmüştür [18].

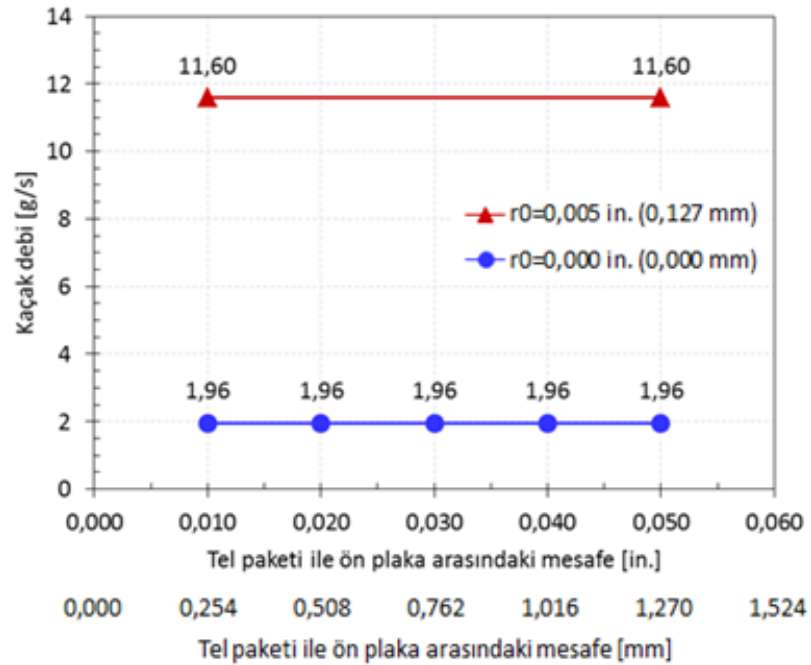


Şekil 4.11. Ön plaka kalınlığının kaçak debiye etkisi

4.4.2. Ön Plaka ile Tel Paketi Arasındaki Mesafe (z_2)

Tüm HAD analizlerinde ön plaka ile tel paketi arasında aksel bir boşluk bırakılmıştır. Ön plaka, tel paketine dayanmadığı için teller serbestçe hareket edebilir. Ayrıca bu boşluğa giren akış tel paketine nüfuz ederek tellerin rotora akması (blow-down) mekanizmasını tetikleyen akışı oluşturur. Bu boşluk mesafesi $z_2=0,010$ in. (0,254 mm) - 0,050 in. (1,27 mm) arasında kademeli olarak artırılmıştır. Ancak, Şekil 4.12’de gösterildiği gibi gerek temaslı gerekse açıklıklı çalışma için kaçak debide herhangi bir değişim gözlenmemiştir.

Bu gözlem üzerine, yine yukarıdaki ön plaka kalınlık parametresinde olduğu gibi, ön plakanın uzunluğu arka plaka seviyesine getirilerek (yani ön plaka çit yüksekliği $r_2=0,300$ in. (7,62 mm)’den en küçük değeri olan $r_2=0,060$ in. (1,524 mm)’ye düşürülerek) HAD analizleri çapraz bir parametre geçişi olarak tekrar edilmiştir. Uzatılmış ön plaka için de, yine ön plaka ile tel paketi arasında aksel mesafenin kaçak debiyi değiştirmedeği hesaplanmıştır.



Şekil 4.12. Ön plaka ile tel paketi arasındaki mesafenin kaçak debiye etkisi

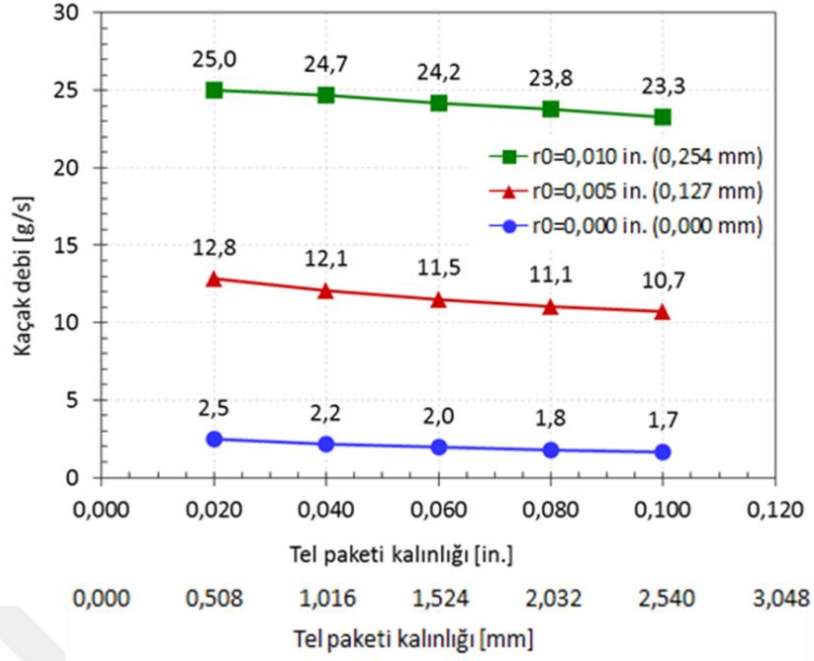
Yukarıda da bahsedildiği gibi, ön plaka ile tel paketi arasında bırakılan çok kısa bir aksel mesafe dahi tel paketi ön yüzeyi boyunca akışı yönlendirmekte ve giriş basıncı ile basınçlandırmaktadır. Netice olarak, bir önceki ön plaka kalınlığı parametresinin değerlendirmesinde vurgulanan, tel paketi ön yüzeyinde aynı giriş basıncının etkimesi kaçak debinin aynı kalmasına neden olmaktadır [25].

4.4.3. Tel Paketi Kalınlığı (z_3)

Çok sayıda telin radyal açılı yerleştirilmesinden oluşan tel paketinin kalınlığı; tel çapına, diziliş şekline ve tel sıra sayısına göre değişir. Fırça keçenin uygulama yerindeki basınç farkı, sıcaklık değeri ve rotor hızına bağlı olarak bu tel paketi parametreleri belirlenir. HAD modelinde artan tel paketi kalınlığı, artan gözenekli ortam kalınlığı anlamındadır. Diğer bir ifadeyle, aynı tel çapı, dizilişi, yerleştirme açısı ve teller arası akış boşluğu için aksel yönde daha çok tel sırası yerleştirilmesi şeklinde düşünülebilir.

İncelemede, tel paketi kalınlığı $z_3=0,020$ in. (0,508 mm) - 0,100 in. (2,54 mm) değerlerinde geniş bir aralıkta değiştirilerek, üç farklı keçe açıklığında [$r_0=0,000$ in. (0,000 mm); 0,005 in. (0,127 mm); 0,010 in. (0,254 mm)] kaçak debi hesaplanmış ve Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Her üç keçe açıklığında kaçak debinin artan tel paketi kalınlığı ile lineer olarak azaldığı görülmektedir. Birim tel paketi kalınlığı için kaçak debideki azalma oranları, [$r_0=0,000$ in. (0,000 mm); 0,005 in. (0,127 mm); 0,010 in. (0,254 mm)] keçe açıklıkları için sırasıyla 10,0; 26,3; 21,3 (g/s)/in. tel paketi kalınlığı [0,39; 1,04; 0,84 (g/s)/mm tel paketi kalınlığı] olarak hesaplanmıştır.

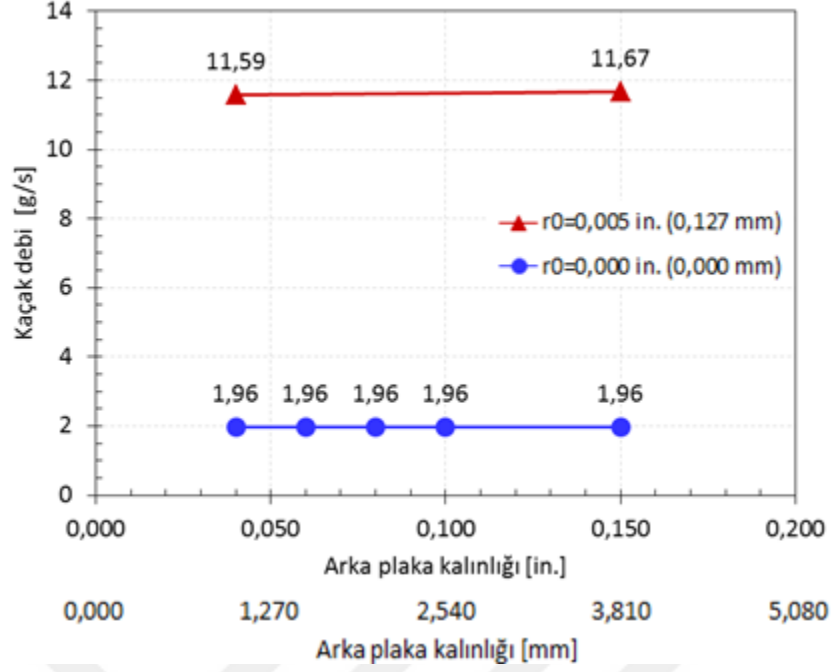
Tel paketi kalınlığının artması ile kaçak debinin azalması fiziksel olarak beklenen bir etkidir. Artan kalınlıktan geçen akış, daha uzun bir yol boyunca daha fazla sürtünmeye kayıplarına maruz kalacağından kaçak debi azalır.



Şekil 4.13. Tel paketi kalınlığının kaçak debiye etkisi

4.4.4. Arka Plaka Kalınlığı (z_4)

Son aksel boyut olarak, arka plaka kalınlığı $z_4=0,040$ in. (1,016 mm) - 0,150 in. (3,81 mm) aralığında değiştirilmiş ve Şekil 4.14'de görüldüğü gibi hem temaslı hem açıklıklı çalışma durumları için kaçak debide etkisiz olduğu görülmüştür. Fırça keçe üzerinden olan tüm akış arka plaka ile rotor arasındaki kısılma boşluğu olan arka plaka çit yüksekliğinden [temel durum için $r_1=0.060$ in. (1,524 mm)] geçmektedir. Arka plakanın kalın olması, daha uzun kısılmış akış yolu nedeniyle sürtünmeleri artırır olsa da, kısılmayı oluşturan çit yüksekliği yeterince geniş olduğundan, kalın arka plakanın tüm akış şartlarına göre kaçak debide değişim oluşturması gözlenmemiştir.



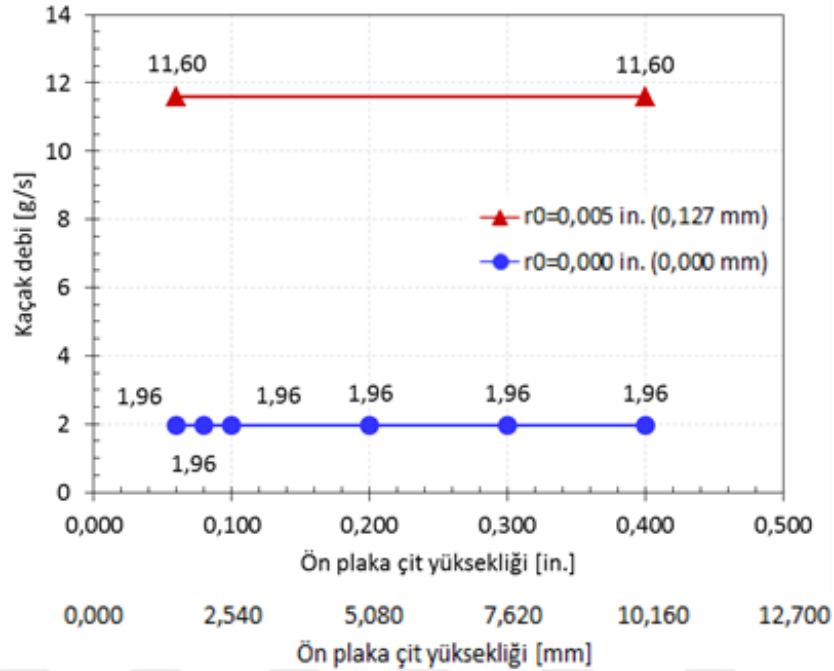
Şekil 4.14. Arka plaka kalınlığının kaçak debiye etkisi

4.4.5. Ön Plaka Çit Yüksekliği (r_2)

Günümüzdeki fırça keçe uygulamalarında ön plaka ya arka plaka uzunluğunda ya da biraz kısa tutulmaktadır. İncelemede, ön plaka çit yüksekliği $r_2=0,060$ in. (1,524 mm) - 0,400 in. (10,16 mm) aralığında değiştirilmiştir. En düşük yükseklik olan $r_2=0,060$ in. (1,524 mm) değeri, arka plaka çit yüksekliğine karşı gelmektedir. Şekil 4.15’de, temaslı ve açıklıklı çalışma durumları için ön plaka çit yüksekliğinin kaçak debi üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Yukarıdaki kısımlarda, ön plaka kalınlığı ve ön plaka ile tel paketi arasındaki mesafe parametrelerinin değerlendirilmesinde belirtildiği gibi, ön plaka çit yüksekliğinin değişimi, tel paketi önündeki baskın giriş basıncını değiştirmemektedir. Dolayısıyla, ön plaka yüksekliği değişse de, tel paketine aynı giriş basıncından nüfuz eden akış aynı kaçak debiyi vermektedir.

Ön plaka çit yüksekliğinin kaçak debide etkisi olmamasına karşın, tel paketi içindeki akış yönlerinde etkili olabilir. Uzun ön plaka geniş giriş bölgesinden keçeye yönelen akış düzensizliklerini azaltıcı rol oynamaktadır. Ayrıca tel paketi çit

bölgesine doğru yönlenmiş düzgün bir akışın gelmesi, fırça keçe dinamiklerinden olan tel titremesini (bristle flutter) belli seviyede kontrol edilebilmektedir.



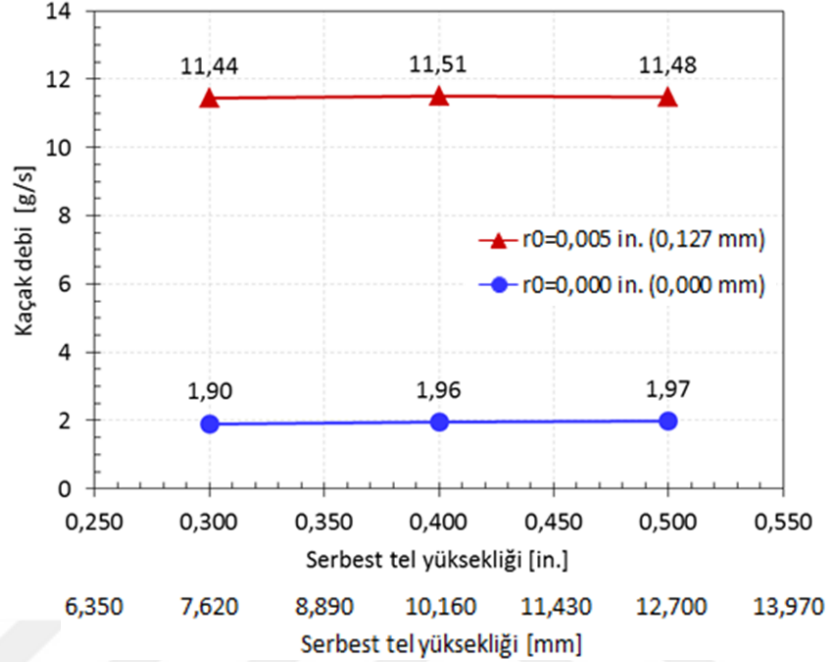
Şekil 4.15. Ön plaka çit yüksekliğinin kaçak debiye etkisi

4.4.6. Tel Radyal Yüksekliği (r_3)

Tel radyal yüksekliği, fırça keçenin tel paketinin mekanik olarak daha yumuşak veya sert olmasını sağlar. Tel radyal yüksekliği ön plaka uzunluğuna da bağlı olarak uygulamada fazla değişmez ve $r_3=0,300$ in. (7,62 mm) - 0,500 in. (12,7 mm) aralığında alınmıştır. Şekil 4.16'da gösterildiği gibi, artan tel radyal yüksekliği kaçak debiyi dikkate alınmayacak kadar az artırmıştır. Tel radyal yüksekliğinin $r_3=0,300$ in. (7,62 mm)'den $r_3=0,500$ in. (12,7 mm)'ye çıkması durumunda temaslı ve açıklıklı çalışmada kaçak debi artışı sırasıyla %3,7 ve %0,7 değerlerinde olmuştur.

Tel radyal yüksekliğinin artması ile akışın tel paketine nüfuz ettiği yüzey bir miktar arttığından kaçak debide çok az artış olmaktadır. Açıklık durumunda kaçak

debideki artışın daha da az olması açıklığın kaçak debiyi domine etmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.16. Tel radyal yüksekliğinin kaçak debiye etkisi

4.4.7. Arka Plaka Çit Yüksekliği (r_1)

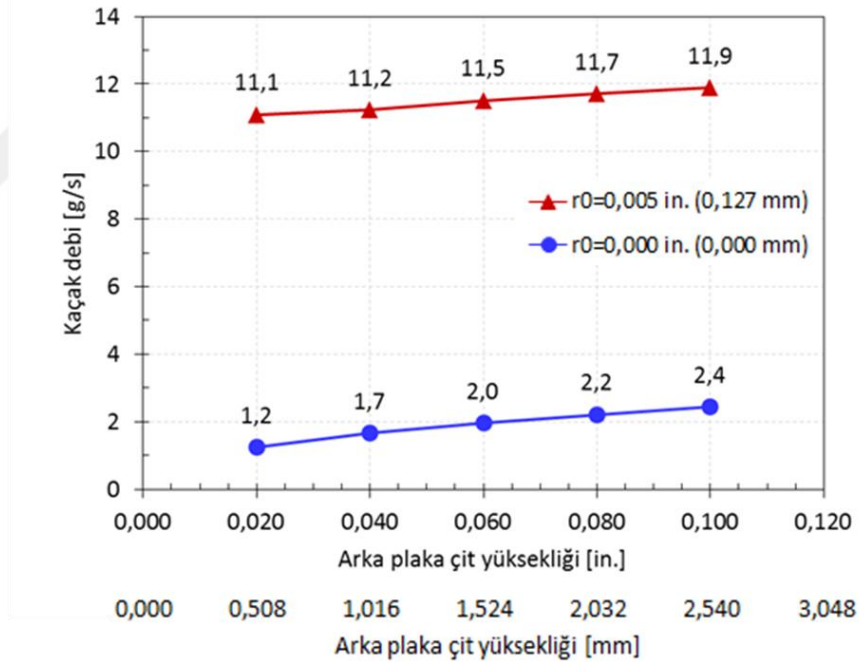
Fırça keçe tasarımında, arka plaka çit yüksekliği rotor-stator çiftinin geçici rejimdeki izafi hareketlerine göre olabilecek minimum değerde belirlenir. Labirent keçe uygulamasındaki dış açıklığı da aynı geçici rejim davranışına göre belirlenir. Bu sayede, fırça keçe telleri tamamen tahrip olsa da, fırça keçe en kötü durumda labirent keçe kadar kaçırır. Ayrıca, belirlenen minimum arka plaka çit yüksekliği ile hem minimum kaçak debi elde edilir hem de teller için en fazla destek sağlanır.

HAD analizlerinde arka plaka çit yüksekliği $r_1=0,020$ in. (5,08 mm) - 0,100 in. (2,54 mm) aralığında değiştirilmiştir. Artan arka plaka çit yüksekliği, düşük basınca açılan akış kesitini artırdığı için hem temaslı hem açıklıklı çalışmada kaçak debinin lineer olarak arttığı Şekil 4.17'de görülmektedir.

Arka plaka çit yüksekliğinin $r_1=0,020$ in. (5,08 mm)'den $r_1=0,100$ in. (2,54 mm)'ye artması ile kaçak debideki artış oranı temaslı ve açıklıklı çalışma için sırasıyla %100 ve %7.2 olarak hesaplanmıştır.

Temaslı çalışmada, kaçak debinin tamamı gözenekli tel paketinden geçerek arka plaka çit yüksekliğinden geçtiğinden, artan kesit alanı ile doğru orantılı olarak kaçak debi önemli seviyede artmıştır.

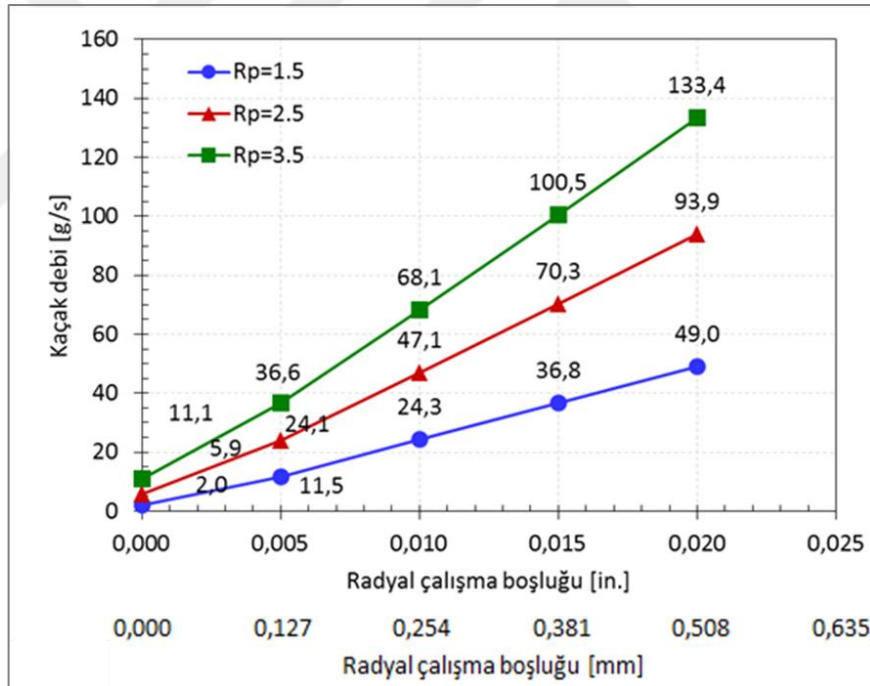
Açıklıklı çalışmada ise, kaçak debinin bir kısmı temaslı çalışmada olduğu gibi gözenekli tel paketi üzerinden olurken çok önemli bir kısmı ise açıklıktan olmaktadır. Açıklık kaçak debiyi domine etmektedir. Arka plaka çit yüksekliğinin artması ile gözenekli tel paketi ortamının çıkışa boşalan akış kesiti artmakta ve sadece tel paketinden geçen kaçak debi artmaktadır. Bu debi açıklık debisinin çok azını oluşturduğundan toplam debi artışı düşük kalmaktadır.



Şekil 4.17. Arka plaka çit yüksekliğinin kaçak debiye etkisi

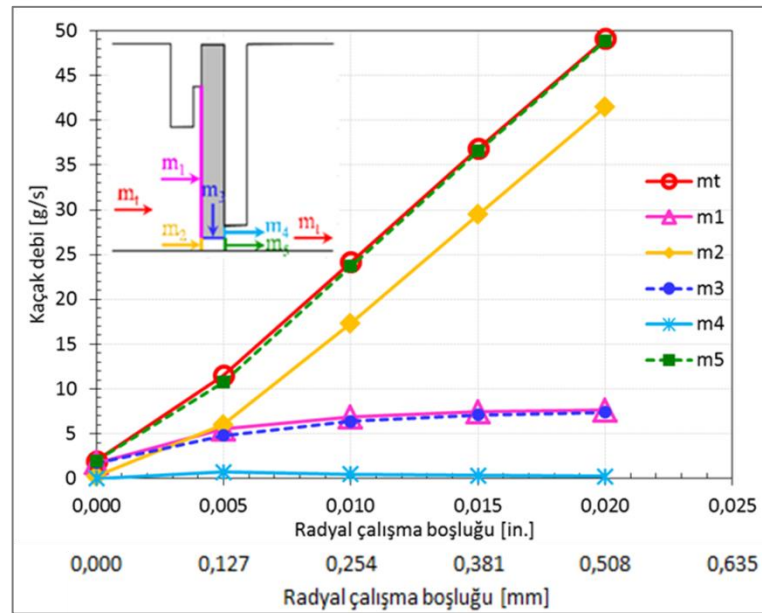
4.4.8. Açıklık ve Basınç Oranı (r_0 , R_p)

Analizlerde, rotor yüzeyi ile tel uçları arasındaki fiziksel mesafe olan açıklık, $r_0=0,000$ in. (0,000 mm) ile $r_0=0,020$ in. (0,508 mm) aralığında değiştirilmiştir. Giriş basıncının çıkış basıncına oranı olarak tarif edilen basınç oranı ise $R_p=1,5$; 2,5; ve 3,5 olarak alınmıştır. Şekil 4.18’de gösterildiği gibi, tüm basınç oranları için artan açıklık ile kaçak debi hemen hemen lineer olarak artmaktadır. Yüksek basınç oranlarında kaçak debinin açıklık ile artış oranı daha yüksek olmuştur. Göz önüne alınan açıklık aralığında, birim açıklık için kaçak debideki artış oranı; $R_p=1,5$; 2,5; 3,5 için sırasıyla 2350; 4400; 6115 (g/s)/(in. açıklık) [93; 173,2; 241 (g/s)/(mm açıklık)] olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, fiziksel olarak ve literatürde bilinen sonuçlar ile uyumludur.



Şekil 4.18. Basınç oranı ve açıklığın kaçak debiye etkisi

Kaçak debi, temaslı çalışmada çok küçük değerlerde iken en ufak bir açıklıkta dahi ciddi seviyelerde artmaktadır. Temaslı çalışmada, kaçak debi akışının tamamı ilave sürtünmelerin olduğu gözenekli tel paketinden geçmektedir. Açıklıklı çalışmada ise kaçak debinin önemli bir kısmı açıklıktan akmaktadır. Kaçak debinin, tel paketi ve açıklıktan olan kısımları HAD analizinden kolaylıkla okunabilir. Şekil 4.19’da açıklıklı çalışmada fırça keçe üzerinden olası kaçak debi yolları gösterilmiş ve hesaplanan değerlerinin açıklığa göre değişimi çizilmiştir. Yüksek basınç bölgesinden gelen toplam debi (m_t) tel paketi ön yüzüne geldiğinde, bir kısmı tel paketine nüfuz ederken (m_1) önemli bir kısmı da açıklığa (m_2) yönelmekte ve düşük basınç bölgesine akmaktadır. Tel paketine nüfuz eden debi arka plaka üzerinden çit yüksekliğine doğru akmaktadır. Bu akışın belli bir kısmı çit yüksekliği kısmındaki tel paketinden çıkışa boşalırken (m_4), çoğunluğu açıklıktaki yüksek hızdaki akışın jet vakumu etkisiyle açıklığa yönelmektedir (m_3). Böylece, açıklık çıkışındaki debi (m_5), açıklık girişindeki debi (m_2) ile tel paketinden yönelen debinin (m_3) toplamı olmaktadır. Bu debilerin değişik açıklıklar için [$r_0=0,000$ in. (0,000 mm) - 0,020 in. (0,508 mm)] değişimi Şekil 4.19’da gösterilmiştir.

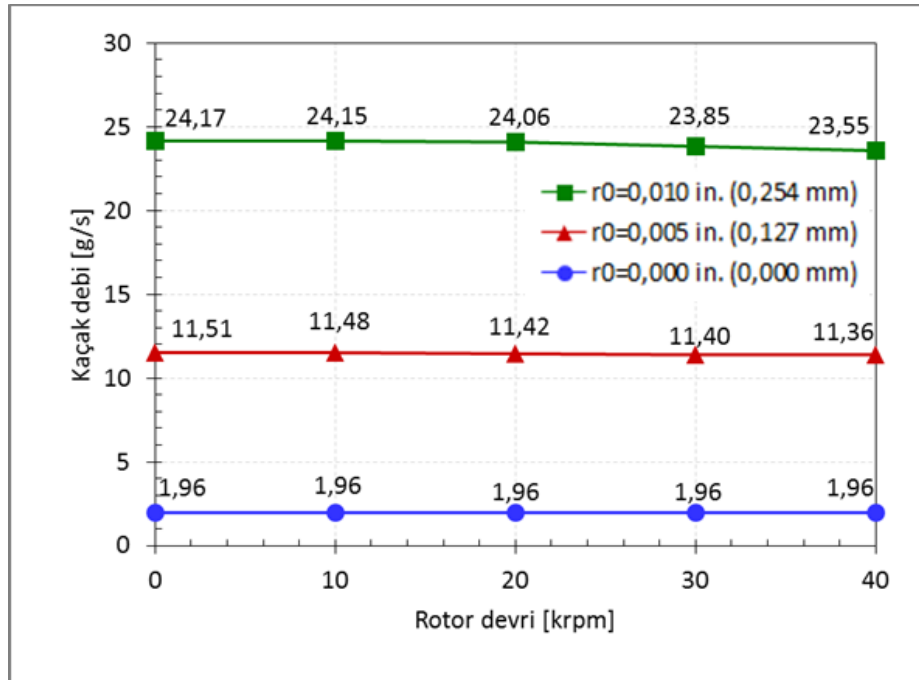


Şekil 4.19. Açıklıklı çalışmada fırça keçe üzerinden kaçak debi geçiş yolları ve değerleri

Sonuç olarak, fırça keçenin açıklıklı çalışması durumunda toplam kaçak debinin (m_t) çok büyük bir kısmı (m_5) açıklık çıkışından olmaktadır. Bu açıklık debisi (m_5) toplam debinin (m_t) yüzdesi olarak $r_0=0,005$ in. (0,127 mm); 0,010 in. (0,254 mm); 0,015 in. (0,381 mm); 0,020 in. (0,508 mm) açıklıklar için sırasıyla %93,6; %98,1; %99,1; %99,5 olarak hesaplanmıştır.

4.4.9. Rotor Devir Sayısı (n)

Şimdiye kadar sunulan incelemelerde rotor sabit alınmıştır. Uygulamada, statora monte edilen fırça keçe sabit dururken rotor dönmektedir. Şekil 4.20’de rotor dönme hızının kaçak debiye etkisi farklı açıklıklar $r_0=0,000$ in. (0,000 mm); 0,005 in. (0,127 mm); 0,010 in. (0,254 mm) için gösterilmiştir. Rotor devir sayısı $n=40000$ d/dk’ya kadar değiştirilmiştir ki bu hızda rotor yüzeyinin teğetsel hızı 255 m/s olmaktadır. Pratikte, kaçak debinin artan devir sayısı ile düşük seviyede azaldığı bilinmektedir.



Şekil 4.20. Rotor dönme hızının kaçak debiye etkisi

Temaslı çalışmada devir sayısındaki değişme rağmen kaçak debi sabit kalmıştır. Döner rotorun oluşturduğu merkezkaç kuvvetin akışı savurması, gözenekli ortamdaki yüksek sürtünme nedeniyle gözlenmemiştir.

Açıklıklı çalışmada devir sayısı $n=0$ d/dk'dan $n=40000$ d/dk'ya artırıldığında, kaçak debi $r_0=0,005$ in. (0,127 mm) ve $r_0=0,010$ in. (0,254 mm) açıklıklarında sırasıyla %1,3 ve %2,6 azalmıştır. Artan açıklık ile kaçak debideki azalışın daha etkili olduğu görülmektedir.

Artan rotor devrinin kaçak debiyi azaltması, dönmenin oluşturduğu radyal merkezkaç kuvvetlerinin rotor üzerindeki ince film tabakasına etkimesiyle aksel akışın bozulması gösterilebilir. Açıklık ve/veya rotor çapı arttığında merkezkaç etki daha da artacak ve kaçak debi daha da azalacaktır. Tellerin rotora temas ettiği temaslı çalışmada ise kaçak debide herhangi bir değişiklik oluşmaması, gözenekli tel paketindeki aksel, radyal ve dönme yönünde akışa engel olan ek akış dirençlerinden kaynaklanmaktadır.

5. FIRÇA KEÇE TESTLERİ

Tasarım ve analizler sürecinin ardından imal edilen fırça keçe prototipleri motor şartlarında kaçak debi ve dayanım testlerine tabi tutulur. Bölüm 3.1’de belirtildiği gibi fırça keçe testleri, motor şartlarının test ortamında elde edilmesindeki zorluklar nedeniyle

– sıcak statik test sistemi ve

– soğuk dinamik test sistemi

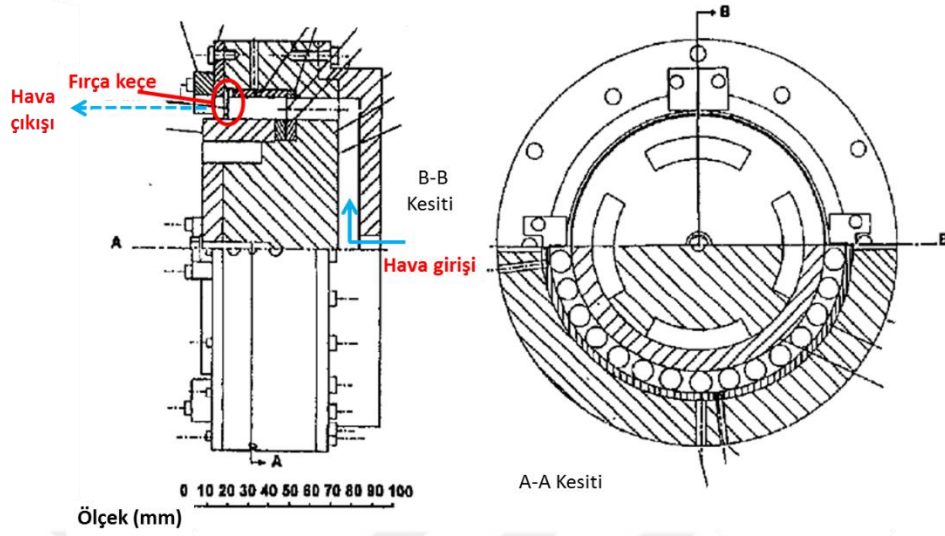
olmak üzere iki farklı test sisteminde yapılmaktadır. Bu testler, fırça keçe tasarım metodolojisinin ve analizlerin doğrulanması açısından önemli testlerdir. HAD analizlerinde kullanılan gözenekli ortam yaklaşımının kalibrasyon ve doğrulanmasında test sonuçları kullanılmaktadır.

Statik Test Sistemi:

Statik test sisteminde fırça keçenin çalışma basınç ve sıcaklıklarındaki kaçak debisi sabit rotor şartları için belirlenir. Şekil 5.1’de örnek bir statik test sistemi gösterilmiştir [11]. Bu testlerde rotor sabit olduğundan motor çalışma şartlarındaki sıcaklık yüklemesi yapılabilir. Testler esnasında aşağıdaki ölçümler yapılır.

- ✓ Giriş basıncı ve sıcaklığı
- ✓ Çıkış basıncı ve sıcaklığı
- ✓ Debi
- ✓ Radyal açıklık

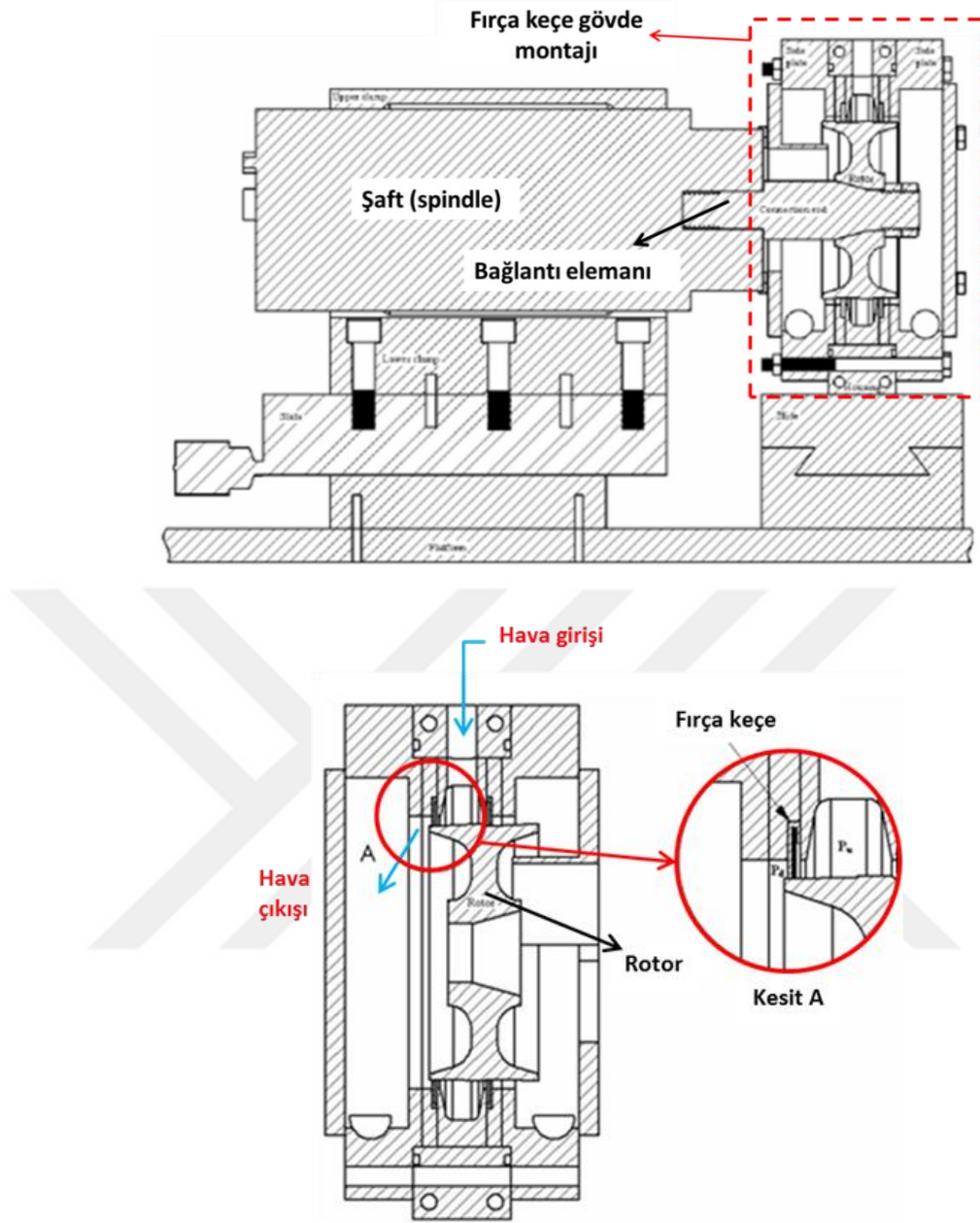
İlaveten, eğer fırça keçe tel paketinin karşılık geldiği rotor yüzeyindeki aksenal basınç dağılımı ölçülmek istenirse, Şekil 5.1’de gösterildiği gibi rotor yüzeyindeki delikler kullanılabilir [11]. Yine, fırça keçe arka plaka üzerindeki radyal basınç dağılımının ölçülmesi için ise arka plaka üzerine delikler açılabilir.



Şekil 5.1. Statik test sistemi örneği [11]

Dinamik Test Sistemi:

Rotor dönme etkisinin gözlenebilmesi için düşük sıcaklıklarda dinamik testler yapılır. Rotorun dönmesiyle oluşan mekanik etki ve teğetsel hız akış karakteristiğini, kaçak debiyi ve tellerin yapısal davranışını etkilemektedir. Rotor çapına ve hızına bağlı olarak merkezkaç etkiler neticesinde aksel akışın bozulmasıyla kaçak debi değişmektedir. Şekil 5.2’de örnek bir dinamik test sistemi gösterilmiştir [4].



Şekil 5.2. Dinamik test sistemi örneği [4]

Fırça keçe statik ve dinamik test sonuçları ile tasarım sürecinde gerçekleştirilen analiz sonuçları karşılaştırılarak tasarım metodolojisinin doğrulanması sağlanır. Bu kapsamda tez çalışması açısından; yapılan HAD akış analizlerinden elde edilen kaçak debi sonuçları, literatürdeki test ve HAD analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

6. SONUÇLAR

Tez kapsamında yapılan HAD akış analizleri ile tel paketinin yapısal kısmı haricinde, fırça keçeye ait birçok geometrik tasarım parametresinin ve çalışma şartlarının kaçak debi üzerindeki etkileri incelenmiştir. İncelemede, öncelikle HAD analizleri, literatürdeki kaçak debi ve basınç dağılımları kullanılarak kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır.

İncelenen geometrik parametrelerden arka plaka çit yüksekliğinin, tel paketi kalınlığının ve serbest tel yüksekliğinin kaçak debi üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Özellikle fırça keçenin rotor ile temaslı çalışması durumunda arka plaka çit yüksekliğinin artmasıyla kaçak debinin ciddi oranda arttığı gözlenmiştir. Ayrıca tel paketi kalınlığının artması da kaçak debinin düşmesini sağlayarak etkili olmuştur. Serbest tel yüksekliğinin artması da kaçak debinin hafif derecede artmasına neden olmuştur. Diğer geometrik parametrelerin ise kaçak debi üzerinde dikkate değer etkilerinin olmadığı gözlenmiştir.

Fırça keçe işletme parametrelerinden açıklık ve basınç oranının kaçak debiyi önemli oranda lineer olarak artırdığı görülmüştür. Rotor devrinin artması ise kaçak debinin küçük mertebelerde azalmasına neden olmuştur. Çalışma açıklığının akış alanı ve kaçak debi üzerindeki çok baskın değişim oluşturduğu görülmektedir. Açıklık çalışmasında, ana akış jet etkisiyle tel paketinin altından doğrudan arka plaka çit bölgesine yönelmektedir. Ayrıca bu esnada tel paketine girip çit bölgesine doğru yönelen akışı da açıklığa doğru çekmektedir. Bu durumda basınç ve hız alanı değişmektedir ki bu sebeple kaçak debi üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, fırça keçenin açıklıklı çalışması durumunda, yukarıda söz edilen geometrik tasarım parametrelerinin kaçak debi üzerindeki etkilerinin az olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., Termodinamik, Güven Kitabevi, 5. Baskı, İzmir, 2008
- [2] Öztürk, E., Türbin Motorların Aero-termodinamiği ve Mekaniği: Esaslar ve Uygulamalar, Birsen Yayınevi, 1997
- [3] Rolls Royce, The Jet Engine Book, Fifth Edition, 1996
- [4] E.T., Duran, Analysis of Shear Heating and Effect of Temperature Dependant Viscosity on Hydrodynamic Lift of Oil Brush Seals, Yüksek Lisans Tezi, Sabancı Üniversitesi, İstanbul, 2006
- [5] Ferguson, J.G., Brushes as High Performance Gas Turbine Seals, Gas Turbine and Aeroengine Congress, Amsterdam, The Netherlands, June 6-9, 1998
- [6] Gorelov, G.M., Resnic, V.E., and Tsibizov, V.I., Experiments and Comparison of Brush Seal and Labyrinth Seal Efficiency, Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Aviatsionaya Tekhnika, 43-46, 1988
- [7] Bayley, F.J., and Long, C.A., A Combined Experimental and Theoretical-Study of Flow and Pressure Distributions in a Brush Seal, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME, 115: 404-410, 1993
- [8] Chupp, R.E., and Dowler, C.A., Performance-Characteristics of Brush Seals for Limited-Life Engines, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME, 115: 390-396, 1993

- [9] Chew, J.W., Lapworth, B.L., and Millener, P.J., Mathematical Modeling of Brush Seals, *International Journal Heat and Fluid Flow*, 16: 493-500, 1995
- [10] Chupp, R.E., and Holle, G.F., Generalizing Circular Brush Seal Leakage Through a Randomly Distributed Bristle Bed, *Journal of Turbomachinery, Transactions of the ASME*, 118: 153-161, 1996
- [11] Turner, M.T., Chew, J.W., and Long, C.A., Experimental Investigation and Mathematical Modeling of Clearance Brush Seals, 120: 573-579, 1998
- [12] Aksit, M.F., Tichy, J.A., and Demiroglu, M., Brush Seal Leakage: Thin Film Flow Between Two Bristles, *STLE 53rd Annual Meeting*, May 17-21, 1998
- [13] Chen, L.H., Wood, P.E., Jones, T.V., and Chew, J.W., An Iterative CFD and Mechanical Brush Seals Model and Comparison with Experimental Results, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME*, 121: 656-662, 1999
- [14] Chen, L.H., Wood, P. E., Jones, T.V., and Chew, J.W., Detailed Experimental Studies of Flow in Large Scale Brush Seal Model and a Comparison with CFD Predictions, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME*, 122: 672-679, 2000
- [15] Dinc, S., Demiroglu, M., Turnquist, N., Mortzheim, J., Goetze, G., Maupin, J., Hopkins, J., Wolfe, C., and Florin, M., Fundamental Design Issues of Brush Seals for Industrial Applications, *Journal of Turbomachinery*, 124: 293-300, 2002
- [16] Owen, A.K., Jones, T.V., Guo, S.M., and Hogg, S., An Experimental and Theoretical Study of Brush Seal and Shaft Thermal Interaction, *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003 Power for Land, Sea, and Air*, Atlanta, Georgia, USA, June 16-19, 2003

- [17] Dogu, Y., Investigation of Brush Seal Flow Characteristics Using Bulk Porous Medium Approach, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Transactions of the ASME, 127: 136-144, 2005
- [18] Dogu, Y., and Aksit, M.F., Effects of Geometry on Brush Seal Pressure and Flow Fields-Part I: Front Plate Configurations, *Journal of Turbomachinery*, Transactions of the ASME, 128: 367-378, April 2006
- [19] Dogu, Y., and Aksit, M.F., Effects of Geometry on Brush Seal Pressure and Flow Fields-Part II: Backing Plate Configurations, *Journal of Turbomachinery*, Transactions of the ASME, 128: 379-389, April 2006
- [20] Dogu, Y., and Aksit, M.F., Brush Seal Temperature Distribution Analysis, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Transactions of the ASME, 128: 599-609, July 2006
- [21] Dogu, Y., Aksit, M.F., Demiroglu, M., and Dinc, O.S., Evaluation of Flow Behavior for Clearance Brush Seals, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Transactions of the ASME, 130: 012507-1-9, 2008
- [22] Pugachev, A.O., and Helm, P., Calibration of Porous Medium Models for Brush Seals, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A- Journal of Power and Energy*, 223: 83-91, 2009
- [23] Qiu, B., and Li, J., Numerical Investigations on the Heat Transfer Behavior of Brush Seals Using Combined Computational Fluid Dynamics and Finite Element Method, *ASME J. Heat Transfer*, 135, December 2013
- [24] Pekris, M.J., Franceschini, G., and Gillespie, D.R.H., An Investigation of Flow, Mechanical, and Thermal Performance of Conventional and Pressure-Balanced Brush Seals, *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, 136, 2014

- [25] Dogu, Y., Bahar, A.S., Sertçakan, M.C., Pişkin, A., Arican, E., and Kocagül, M., Computational Fluid Dynamics Investigation of Brush Seal Leakage Performance Depending on Geometric Dimensions and Operating Conditions, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016
- [26] Crudgington, P.F., and Bowsher, A., Brush Seal Pack Hysteresis, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002
- [27] Chupp, R.E., Hendricks, R.C., Lattime, S.B., Steinetz, B.M., and Aksit, M.F., Turbomachinery Clearance Control, Turbine Science and Technology, 2007
- [28] Gail, A., and Beichl, S., The MTU Brush Seal Design, MTU Aero Engines, Munich, Germany, 2000
- [29] Crudgington, P.F., and Bowsher, A., Brush Seal Blow Down, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003
- [30] Dinc, O.S., Albers, R.J., Dogu, Y., and Zhou, M., Rotary Machine Containing a Brush Seal, United States Patent Office, Patent Number: US6302646, 2001
- [31] Dinc, O.S., Dogu, Y., Battle, M.E., Albers, R.J., and Proctor, R., Brush Seal Segment Having Bristle Damping, United States Patent Office, Patent Number: US6293554, 2001
- [32] Braun, M.J., Hendricks, R.C., and Canacci, V.A., Flow Visualization in a Simulated Brush Seal, Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Brussels-Belgium, June 11-14, 1991
- [33] Braun, M.J., and Kudriavtsev, V.V., A Numerical Simulation of a Brush Seal Section and Some Experimental Results, Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Cincinnati, Ohio, May 24-27, 1993

- [34] Sharatchandra, M.C., and Rhode, D.L., Computed Effects of Rotor-Induced Swirl on Brush Seal Performance - 1. Leakage Analysis, *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 118: 912-919, 1996
- [35] Demiroglu, M., Aksit, M.F., and Tichy, J.A., A Numerical Study of Brush Seal Leakage Flow, 34th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit, Cleveland, July 13-15, 1998
- [36] Zheng, Z., and Grigg, R., A Criterion for Non-Darcy Flow in Porous Media, *Transport in Porous Media*, 57-69, 2006
- [37] Ansys, Ansys-Fluent Release v.14.0 User's Guide, 2011
- [38] Ansys, Ansys-Fluent Release v.14.0 Theory Guide, 2011

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmet Serhat BAHAR
Doğum Tarihi : 02.08.1990
Yabancı Dil : İngilizce
Email : ahmetserhatbahar@gmail.com

Eğitim Durumu

Lisans : Kocaeli Üniversitesi – Makine Mühendisliği (2013)
Yüksek Lisans : Kırıkkale Üniversitesi – Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisansı (2016)

Araştırma Projeleri

2013 – 2016, “Gaz Türbinli Motorlar için Dinamik Sızdırmazlık Elemanları Geliştirilmesi”,

San-Tez Projesi, (Kırıkkale Üniversitesi - TEI, TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş.)

Projede kalınan süre / Proje Süresi : 33ay / 36ay

Görevi : Yüksek Lisans Öğrencisi

Proje kapsamında, gaz türbinli motorlar için sızdırmazlık elemanları tasarımı, analizi, prototip imalatı ve testi yapılmaktadır.

Yayınları

Tezleri

1. A.S., Bahar, 2016, “Gaz Türbinlerinde Kullanılan Fırça Keçelerin Geometrisinin Ve Çalışma Şartlarının Kaçak Debi Üzerindeki Etkisinin HAD Analizi İle İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisi Anabilim Dalı, Kırıkkale
Danışman : Prof. Dr. Yahya DOĞU
2. A.S., Bahar, 2013, “Alüminyum Kanatçıklı LED’ lerin Isı Transferi Mekanizmasının HAD Analizi ve Deneysel Olarak İncelenmesi”, Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisi, Kocaeli
Danışman : Doç. Dr. Hasan KARABAY

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleleri

1. Dogu, Y., Bahar, A.S., Sertçakan, M. ., Pişkin, A., Arıcan, E., and Kocagül, M., Computational Fluid Dynamics Investigation of Brush Seal Leakage Performance Depending on Geometric Dimensions and Operating Conditions, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016
2. Dogu, Y., Sertçakan, M.C., Bahar, A.S., Pişkin, A., Arıcan, E., and Kocagül, M., Computational Fluid Dynamics Investigation of Labyrinth Seal Leakage Performance Depending on Mushroom-Shaped Tooth Wear, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildirileri

1. Dogu, Y., Sertçakan, M.C., Bahar, A.S., Pişkin, A., Arıcan, E., and Kocagül, M., Computational Fluid Dynamics Investigation of Brush Seal Leakage Performance Depending on Geometric Dimensions and Operating Conditions, Proceedings of ASME Turbo Expo 2015, Turbine Technical Conference and Exposition, June 15-19, 2015, Montreal, Canada, ASME Paper No: GT-2015-43607, 11 pages
2. Dogu, Y., Sertçakan, M.C., Bahar, A.S., Pişkin, A., Arıcan, E., and Kocagül, M., Computational Fluid Dynamics Investigation of Labyrinth Seal Leakage Performance Depending on Mushroom-Shaped Tooth Wear, Proceedings of ASME Turbo Expo 2015, Turbine Technical Conference and Exposition, June 15-19, 2015, Montreal, Canada, ASME Paper No: GT-2015-43638, 12 pages

Araştırma Alanları

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), İleri Isı Transferi Teknolojileri, Turbomakina Sızdırmazlık Elemanları