T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI

KÜÇÜK ÖLÇEKLİ GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARDA YERLEŞİM (STAGGER) AÇISININ TÜRBİN PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİ

Hazırlayan
Yusuf Sergen TAŞCI

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Selim TANGÖZ

Yüksek Lisans Tezi

Ağustos 2023
KAYSERİ

T.C.

ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI

KÜÇÜK ÖLÇEKLİ GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARDA YERLEŞİM (STAGGER) AÇISININ TÜRBİN PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan

Yusuf Sergen TAŞCI

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Selim TANGÖZ

Ağustos 2023

KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Yusuf Sergen TAŞCI

“Küçük Ölçekli Gaz Türbinli Motorlarda Yerleşim (Stagger) Açısının Türbin Performansı Üzerine Etkisi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan
Yusuf Sergen TAŞCI

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Selim TANGÖZ

Sivil Havacılık ABD Başkanı

Prof. Dr. İlke TÜRKMEN

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans sürecimde ve bu çalışmanın yapılması sırasında bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Selim TANGÖZ'e ayrıca bilgi ve destekleriyle yolumu aydınlatan sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Murat TAŞTAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen babam Hasbi TAŞCI, annem Ayfer TAŞCI, eşim Fatma Nur TAŞCI'ya ve kardeşlerim Özlem, Özge ve Gizem'e teşekkür ederim.

Yusuf Sergen TAŞÇI

Ağustos 2023, KAYSERİ

KÜÇÜK ÖLÇEKLİ GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARDA YERLEŞİM (STAGGER) AÇISININ TÜRBİN PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİ

Yusuf Sergen TAŞCI

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2023
Danışman: Dr. Öğr. Selim TANGÖZ

ÖZET

Bu çalışmada küçük ölçekli gaz türbinli motorun türbin kısmının HAD çözümü için Fluent 16.0 sürümlü programı kullanılarak simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon soncunda elde edilen verilerin karşılaştırılabilmesi için daha önce üretilmiş ve testleri yapılmış SR-30 küçük ölçekli gaz türbinli motor tercih edilmiştir. Tercih edilmesinin sebeplerinden biri SR-30 motorunda impulse tip türbin kullanılmasıdır. SR-30 motorunun dokümanlarından alınan teknik çizim bilgileri kullanılarak türbinin rotor ve statoru Solidworks programı üzerinden üç boyutlu katı modellemesi yapılmıştır. Referans motor dokümanında verilen analiz sonuçları rotorun 70000 RPM'de dönmesiyle elde edilmiştir. Diğer performans girdileri ise verim hesabında kullanılan türbinin giriş ve çıkışındaki basınç, hız ve sıcaklık değerlerdir. Daha sonra referans türbinin tüm ölçüleri sabit tutularak türbin bladelerine stagger açısı verilmiştir. Bu sayede İmpuls ve Reaktion tip türbinlerin kombinasyonu elde edilmiştir. SR-30 motorunun türbininin rotor kademesinde bulunan bladelerin stagger açısı 10, 20 ve 30 derece değiştirilerek üç farklı katı modelleme oluşturulmuştur. Bu katı modellerin analizinde referans dokümanda yer alan ve doğrulama için kullanılan türbin girişindeki basınç, hız ve sıcaklık değerleri kullanılmıştır ve çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda stagger açısının kademeli olarak arttırılmasıyla izantropik verimde ve çıkış hızında artış gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gaz Türbinli Motor, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Türbin, Rotor, Stator, Stagger açısı

THE EFFECT OF STAGGER ANGLE ON TURBİNE PERFORMANCE İN SMALL SCALE GAS TURBİNE ENGİNES

Yusuf Sergen TAŞCI

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, August 2023
Supervisor: Asst. Prof. Selim TANGÖZ

ABSTRACT

In this study, the solution of computational fluid dynamics (CFD) of the turbine part of the small-scale gas turbine engine was simulated by using the FLUENT program. The SR-30 small-scale gas turbine engine, which was produced and tested before, was preferred for comparison of the data provided from the simulation. One motive of the preference was the usage of the Impulse type turbine in the SR-30 engine. Three-dimensional solid modelling of the rotor and stator of the turbine was made through the SOLIDWORKS program by using the technical drawing information provided from the documents of the SR-30 engine. The analysis results given in the reference motor document were obtained by rotating the rotor at 70000 RPM. Other performance inputs are the pressure, speed and temperature values at the inlet and outlet of the turbine which was used in the efficiency calculation. Subsequently, while the dimensions of the reference turbine were kept constant the stagger angle was given to the turbine blades. Thus, the combination of the Impulse and Reaktion type turbines was attained. Three different solid models were created via changing the stagger angle of the blades in the rotor stage of the turbine of the SR-30 engine by 10, 20 and 30 degrees. The pressure, speed and temperature values at the turbine inlet that are included in the reference document and used for confirmation; were used in the analysis of these solid models, then the findings were compared. As a result of the analysis, it was observed that the isentropic efficiency and output speed was increased with the gradual increase of the stagger angle.

Keyword: Gas Türbine Engine, Computational fluid dynamics, Türbine, Rotor, Stator, Stagger Angle

İÇİNDEKİLER

KÜÇÜK ÖLÇEKLİ GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARDA YERLEŞİM (STAGGER) AÇISININ TÜRBİN PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK……..……ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK……..……..…iii
KABUL VE ONAY……..…….…….iv
ÖNSÖZ……..……..v
ÖZET……..……...….vi
ABSTRACT……..…….…vii
İÇİNDEKİLER……..……..…viii
KISALTMALAR……..……...…...xi
TABLOLAR LİSTESİ……..……..…….xii
ŞEKİLLER LİSTESİ……..……..……...…xiii
GİRİŞ……..…….……1

1.BÖLÜM

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1.Giriş…….2
1.2.Literatür Araştırması……2

2. BÖLÜM

KÜÇÜK ÖLÇEKLİ GAZ TÜRBİNLİ MOTORLAR VE TÜRBİNLERİ

2.1. Giriş……6
2.2. Küçük Ölçekli Gaz Türbinli Motorlar……6
2.3. Brayton Cycle……...…...…..…8

2.4. Radyal Akışlı Türbin……..…...…….10

2.5. Eksenel Akışlı Türbinler……..……..……10

2.5.1. Impulse Türbin……..….11

2.5.2. Reaction Türbin…….……12

2.5.3. Impulse-Reaction Türbin…….....12

2.6. Türbin Verimliliği……..….14

2.6.1 Türbinin İzantropik Verimi ……14

3. BÖLÜM
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

3.1. Giriş…….……...…16

3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği…….…….16

3.3. Çözüm Denklemleri...…….....….....17

3.4. Türbülans Modelleri……...….18

3.4.1. Standart k-ε Türbülans Modeli……...….19

4. BÖLÜM
TÜRBİN MODELLEMESİ

4.1. Giriş……21

4.2. Türbin Geometrisi…….21

4.3. Ağ Oluşturma……22

4.4. Ağdan bağımsızlık….……26

4.5. Sınır Şartları……...…26

4.6. Doğrulama Sonuçları……27

5. BÖLÜM
TÜRBİN TASARIMI

5.1. Giriş……..30

5.2. 10 Derecelik Stagger Açılı Türbin Geometrisi……30

5.2.1. Mesh Yapısı…….32

5.2.2. Çözümleme Sonuçları……33

5.3. 20 Derecelik Stagger Açılı Türbin Geometrisi……..…….…….….35

5.3.1. Mesh Yapısı…….36

5.3.2. Çözümleme Sonuçları……37

5.4. 30 Derecelik Stagger Açılı Türbin Geometrisi…….……39

5.4.1. Mesh Yapısı……40

5.4.2. Çözümleme Sonuçları……41

6. BÖLÜM
DEĞERLENDİRME ve ÖNERİ

6.1. Sonuçlar, Karşılaştırma ve Değerlendirme...……...……43

6.2. Öneriler……48

KAYNAKÇA……..49

ÖZGEÇMİŞ……53

KISALTMALAR VE SEMBOLLER

Sembol	Anlamı
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
İHA	: İnsansız hava aracı
APU	: Auxiliary power unit
GTM	: Gaz türbinli motor
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CO_2	: Karbondioksit
NGV	: Nozzle guide vane
RPM	: Revolutions Per Minute
T	: Sıcaklık
kPa	: Kilopascal
K	: Kelvin
ε	: Türbülans enerjisi yayılma oranı
k	: Türbülans kinetik enerji
m	: Metre
Pa	: Pascal
y	: Specific heat ratio
pt	: Toplam verim
Tt	: Toplam sıcaklık
TW	: Turbine work
η_t	: Izantropik verim

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Katı model oluşturulurken kullanılan ölçüler……...….22
Tablo 4.2. Ağdan bağımsızlık çözümleme sonuçları. 26
Tablo 4.3. Türbülans modeline göre çözümleme sonuçları 27
Tablo 4.4. Elde edilen değerler ile referans değerlerin karşılaştırılması.....29
Tablo 6.1. Stagger açısı değiştirildikten sonra elde edilen çıkış parametreleri.....43
Tablo 6.2. Stagger açısına göre izantropik verim sonuçları.....43

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.Küçük ölçekli gaz türbinli motor.....7

Şekil 2.2.Gaz türbinli motor kapalı Brayton Cycle…….....8

Şekil 2.3. Gaz Türbinli Motor Açık Brayton Cycle. 9

Şekil 2.4 Gaz Türbinli Motor P-V ve T-S Diyagramı…….....9

Şekil 2.5. Eksenel Akışlı Türbin Rotor…….....11

Şekil 2.6. Eksenel Akışlı Türbin Nozzle Guide Vane 11

Şekil 2.7. İmpulse (Çarpma) Türbin…….....12

Şekil 2.8. : Reaction (Tepki) Türbin…….....12

Şekil 2.9. Rotor Blade Yapısı…….....13

Şekil 2.10. Rotor Blade Yapısı.....13

Şekil 2.11 Stagger anggle.....14

Şekil 2.12 Adyabatik bir türbinin h-s diyagramı.....15

Şekil 4.1 Türbin Case ve Göbek Katı Modeli.....21

Şekil 4.2 Stator Vane ve Rotor Blade…….....22

Şekil 4.3 Göbek ve Case arası ağ üretimi için oluşturulan katı modeli 23

Şekil 4.4 Rotor ve Case arası ağ üretimi için oluşturulan katı model.....24

Şekil 4.5 Rotor çıkışında ağ üretimi için oluşturulan katı model….....24

Şekil 4.6 Mesh dağılımı…….....25

Şekil 4.7 Türbin kesiti mesh dağılımı…….....25

Şekil 4.8. Türbin çıkışı plane ortalama basıncı…….....28

Şekil 4.9. Türbin çıkışı plane ortalama hızı…….....28

Şekil 4.10. Türbin çıkışı plane ortalama sıcaklığı…….....29

Şekil 5.1. 10 derece stagger açılı rotor pali…….....30

Şekil 5.2. 10 derece stagger açılı rotor kademesi…….....31

Şekil 5.3. 10 derece stagger açılı rotor ve stator kademesi…….....31

Şekil 5.4. Türbin kesiti mesh dağılımı…….....32

Şekil 5.5. Mesh dağılımı.....32

Şekil 5.6. Türbin çıkışı plane ortalama basıncı.....33

Şekil 5.7. Türbin çıkışı plane ortalama hızı.....33

Şekil 5.8. Türbin çıkışı plane ortalama sıcaklığı…….....34

Şekil 5.9. Stagger açısıyla birlikte blade kök ve uç hız farkı…….....34

Şekil 5.10. 20 derece stagger açılı rotor pali……..….....35

Şekil 5.11. 20 derece stagger açılı rotor kademesi…….....35

Şekil 5.12. 20 derece stagger açılı rotor ve stator kademesi…….....36

Şekil 5.13. Türbin kesiti mesh dağılımı…….....36

Şekil 5.14. Mesh dağılımı…….....37

Şekil 5.15. Türbin çıkışı plane ortalama basıncı…….....37

Şekil 5.16. Türbin çıkışı plane ortalama hızı…….....38

Şekil 5.17. Türbin çıkışı plane ortalama sıcaklığı…….....38

Şekil 5.18. 30 derece stagger açılı rotor pali…….....39

Şekil 5.19. 30 derece stagger açılı rotor kademesi…….....39

Şekil 5.20 30 derece stagger açılı rotor ve stator kademesi…….....40

Şekil 5.21. Mesh dağılımı…….....40

Şekil 5.22. Türbin kesiti mesh dağılımı…….....41

Şekil 5.23. Türbin çıkışı plane ortalama basıncı…….....41

Şekil 5.24. Türbin çıkışı plane ortalama hızı…….....42

Şekil 5.25. Türbin çıkışı plane ortalama sıcaklığı…….....42

Şekil 6.1. Stagger açısına göre rotor çıkışı toplam basınç değişimi……..…….....45

Şekil 6.2. Pal çıkışlarındaki hız değerlerinin karşılaştırılması…….…….....45

Şekil 6.3. Pal çıkışlarındaki basınç değerlerinin karşılaştırılması…….....46

Şekil 6.4. Pal çıkışlarındaki sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması…….....46

Şekil 6.2. Stagger açısı değişiminin verimliliğe etkisi ……..…….....47

GİRİŞ

Günümüz sivil ve askeri havacılıkta insansız hava araçlarının üzerinde yapılan araştırma ve geliştirmeler hız kazanmıştır. İnsansız hava araçları sivil alanda kargo taşımacılığı, alan tarama ve haritalandırma, tarımsal ilaçlama ve elektrik üretimi gibi alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Askeri alanda ise silahlı ve silahsız hava araçlarında sınır koruma, gözetleme ve görüntü işleme yöntemleri ile hedef tespiti ve imhası için kullanılmaktadır. İnsansız hava araçlarının kullanılmasındaki amaca yönelik üzerinde bulundurduğu ekipman ve mühimmattın ağırlığından tasarruf sağlamak mümkün olmayacağından yapılan araştırmalar yakıttan tasarruf ve üretim malzemeleri üzerine yoğunlaşmıştır. Maliyet ve hava araçlarının boyutları göz önünde bulundurulduğunda yakıtın yer kaplama, ağırlık ve maliyet açısından tüketiminin minimum düzeyde tutulması gerekmektedir. Yakıt tüketiminin azalması ise kullanılan motorun geliştirilmesi ile istenilen gücün daha az yakıt tüketerek elde edilmesiyle sağlanabilir.Bu amaca yönelik yapılan çalışmalar ile insansız hava araçlarında kullanılan küçük ölçekli gaz türbinli motorun gelişmesi diğer alanlara da fayda sağlamıştır. Tercih edildiği diğer alanlar APU gibi yardımcı güç üniteleriyle beraber roket ve jetpack gibi hava araçlarında ana güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. Belirtilen bu alanların gelişmesinde önemli rolü oynayan küçük ölçekli gaz türbinli motor üç ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler havanın basınçlandırıldığı kompresör, hava ile yakıt karışımının yakıldığı yanma odası ve kompresöre bir şaft ile bağlı olan türbindir. Bu önemli üç parçanın performans ve yakıt tüketimi üzerinde çok büyük etkisi bulunmaktadır. Bu parçalardan türbinin [9] Wang Kun, Chen Fu, Yu Jianyang ve Song Yanping Türbin rotor bladeleri üzerinde yaptıkları çalışmada türbinin karmaşık yapısı sebebiyle tasarım, işleme ve montajın en zorlu parçalarından biri olduğunu bununla birlikte üretim ve tasarım açısından iş yükünün %30-40'ını türbin oluşturduğunu belirtmişlerdir. Küçük ölçekli gaz türbinlerde kullanılan türbinin iki farklı türü bulunmaktadır. Bunlar eksenel ve santrifüj tip türbinlerdir. Eksenel türbinler impulse tip, Reaction tip ve bu iki tipin kombinasyonu impulse-reaction tip türbinlerdir.

1. BÖLÜM
LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1 GİRİŞ

Bu bölümde küçük ölçekli gaz türbinli motorların; çalışma prensipleri, motor parçaları incelemesi, tasarımı, analizi, performans üzerindeki etkileri, verim kayıplarının sebepleri, analiz esnasında kullanılan yollar ve yöntemler, tavsiye edilen programlar ve modelleme şekilleri, benzer çalışmalarda kullanılan türbülans çeşitleri, havacılıktaki yeri, kullanım alanları, stagger açısının verim üzerinde etkileri ve yakıt tüketimini etkileyen etmenler konuları üzerinde çalışılmış ve literatürde yer almış çalışmaların taranması ve incelenmesi yapılmıştır. Bu inceleme sonucunda mevcut çalışmanın daha efektif ve verimli olmasını sağlamıştır.

1.2 LİTERATÜR

Anthony Giampolo [1] gaz türbin prensipleri ve uygulamaları araştırmasında; gaz türbin tarihi, çevrimi, inlet, kompresör, yanma odası ve mevcut tez çalışmasına katkıda bulanacak türbinin, yanma odasında gelen ve genişleyen gazları kinetik enerjiye çevirdiği ve bu enerjiyle şaftı daha sonrasında belirli aksesuarları ve kompresörü çevirdiğini bununla birlikte eksenel akışlı türbinlerin üçe ayrıldığını; Çarpma (Impulse), etki (Reaktion) ve bu iki tipin kombinasyonu olan İmpulse-Reaktion'den oluştuğunu araştırmıştır ve türbin çalışma prensiplerine yer vermiştir. Bununla birlikte Giampolo bu çalışmasında mikrotürbinlerin özellikleri, kullanım alanları ve avantajları hakkında araştırmalar yapmıştır. Doğuş Özkan [2] AxStream Programı ile Eksenel Akışlı Kompresör ve Türbin Dizaynı-Analizi çalışmasında türbinin tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar, türbin aerodinamiği ve performansa etkileyen parametreler hakkında araştırmalar yapmıştır. Serdar Toprak [3] Gaz Türbin Kanatlarının Soğutulmasının Önemi ve Soğutma Yöntemlerinin İncelenmesi çalışmasında; gaz türbinli motorların

türbin bladelerinin geometrisi ve tasarımı direkt olarak akışın şeklini ve blade'in maruz kaldığı ısıl ve mekanik zorlamaların hangi bölgelerde ve ne büyüklükte olacağını bununda motor verimi üzerinde etkilerini açıklamıştır. Bu açıklamayla birlikte türbin dizaynının türbin çıkış gücünü etkileyebilecek en büyük parametrelerden biri olduğu çıkarımı yapılmaktadır. Emre Sezerkan [4] Küçük Ölçekli 3D Radyal Akışlı Türbinin Analizi Ve Uygulanması çalışmasında radyal ve eksenel akışlı türbinin şekli itibariyle kayıp modelleri karşılaştırması yapılmıştır. Emin Nadir Kaçar [5] Havacılık Motoru Türbin Disk Boşluğunun Sonlu Hacim ve Sonlu Elemanlar Modellerinin Bütünleşik Çözüm Tekniği Kullanılarak Termohidrolik Analizi çalışmasında boyunca hesaplamalı akışkanlar analizi gerçekleştirmiştir. Türbin üzerinde yapılan HAD analizi çıkış verilerinin doğruluğunu etkileyen parametrelere yer vermiştir. Enes Günaltılı [6] HAD kullanarak kanatçık dizaynı ve optimizasyonu çalışmasında Ansys programı üzerinden akış analizi yapmış ve standart k-e türbülans modeli için literatürdeki diğer çalışmalar gibi akış analizi için yüksek doğruluğa sahip türbülans modeli olduğunu belirtmiştir. Rodgers [7] Küçük ölçekli turbojet motoru, insansız hava araçlarında itki üretebilmek için kullanılan bir motor tipi olduğunu, güvenilir ve bakım maliyetinin oldukça düşük olduğuna çalışmasında yer vermiştir. Ayrıca küçük ölçekli gaz türbinli motorların, diğer hafif platformlar için kullanışlı, üretimi maliyeti düşük ve güvenli bir motor tipi olduğu ve geliştirme çalışmalarına açık olduğunu çalışmalarında belirtmiştir. Van Den Braembrussch [8] Bir gaz türbinli motorun mikro düzeyde ölçeklendirilmesi için tasarımı ve imalatında motor sisteminin ve geçen akışının termodinamik döngüsünün korunması efektif bir ürün elde etmek için ilk şart olduğunu ve bununla birlikte ölçeklendirilmiş GTM'ların normal boyuttaki GTM'ler ile aynı çalışma prensibine sahip olduğunu fakat üretim ve tasarım esnasında oluşabilecek hataların ölçeklendirilmiş GTM'lerde daha yüksek olduğunu çalışmasında vurgulamıştır. Wang Kun, Chen Fu, Yu Jianyang ve Song Yanping [9] Türbin rotor bladeleri üzerinde yaptıkları çalışmada türbinin karmaşık yapısı sebebiyle tasarım, işleme ve montajın en zorlu parçalarından biri olduğunu bununla birlikte üretim ve tasarım açısından iş yükünün %30-40'ını türbin oluşturduğunu belirtmişlerdir. K. Bammert ve H. Sandtede [10] üretim toleranslarının ve kanat yüzey pürüzlülüğünün türbin performansına etkisi isimli çalışmasında stagger açısının türbinden çıkan havanın çıkış açısının türbin performansına etkide bulunduğunu belirtmiştir. M. Vahdati, A. I. Sayma, M. Imregun ve G. Simpson [11] Eksenel akışlı kompresör modellemesi üzerine yaptığı çalışmada; blade tasarım veya üretim esnasında

hatalı stagger açısı oluşturulması, üzerinden geçen akışın bir kısmının veya tamamının bozulmasına sebep olabileceğini vurgulamıştır. Dutczak [12] mikro gaz türbinli motor incelemesinin sonucunda amatör kullanımda santrifüj tip türbinin kullanıldığını ve eksenel türbin kullanılmaya başlandığında askeri alanda dikkat çekerek insansız hava araçlarında güç kaynağı olarak kullanılmaya başlandığını belirtmiştir. Bu geçiş dönemi sonrasında eksenel akışlı türbinin geliştirilme ihtiyacı olduğu sonuçlarında yer verimiştir. Adnan ve Hortono [13] Küçük ölçekli turbojet motorunda türbin tasarı çalışmalarında stagger açısı 5 derece değiştirerek motor çıkış gücünün verilerini CFD analizi ile elde etmiş ve 146 kW olan güç çıkışını 155 kW elde etmişlerdir. Ennil,Al-dadah,Mahmoud,Rahbar ve Aljubori [14] CFD modelleme ve evrimsel algoritma optimizasyonu kullanılarak küçük ölçekli eksenel akışlı türbininde kaybın en aza indirilmesi konulu çalışmasında kayıp oluşturabilecek parametrelerden birinin de stagger açısı olduğuna yer vermiştir. Bununla birlikte Ansys programı ile üzerinden yaptığı analizler sonucunda stagger açısı ile türbindeki kayıpların azaldığını tespit etmişlerdir. Culley ve Garg, [15] çalışmalarında türbin verimliliğinin termodinamik döngü üzerinde etkisi olduğu için yakıt tüketiminin ve CO_2 emisyonlarının optimizasyonunda önemli rol oynadığını bunu da yaptığı çalışmalar sonucunda elde ettiği verileri grafik üzerinde göstererek desteklemiştir. Nilsson [16] kanat toleransının türbin performansı üzerinde etkisini araştırırken türbinin akış analizini yapmıştır. Bu çözümü yaparken spalart-allmaras, k-e, k – omega türbülans modellerini denemiş ve türbin için en uygun türbülans modelinin k-e olduğunu çalışmalarında ortaya koymuştur. J. U. Schluter ¨ , X. Wu, S. Kim, J. J. Alonso and H. Pitsch [17] Gaz Türbinlerinde Kompresör-Difüzör Bağlantısında Entegre RANS-LES Hesaplamaları çalışmasında motor içerisindeki akışın sağlanabilmesi için katı modellemede kompresör ve difüzör ikilisinin öncesi ve sonrasına kanal oluşturmuş ve akışın bu kanaldan geçmesini sağlamıştır. Haricen tip boşluğunun ayarlanabilmesi için bir case ile kompresörü ve kanalı oluşturmuştur. Bu katı modellemenin oluşturulması bu çalışma için de türbin katı modeli oluşturmada ışık tutmuştur. Turan [18] İnsansız hava araçları için küçük turbojet motoru üzerine yaptığı çalışmasının sonucunda egzozdan çıkan akışkanın hızı ve sıcaklığının artışıyla iticinin verimliliğinin arttığını tespit etmiştir. Egzozdan önce akışın geçtiği türbinin ise egzozdan çıkacak akışın hızı ve sıcaklığı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Cao, Gao, Zheng ve Dai [19] çalışmasında; Gaz türbinlerinin elektrik üretimi için kullanımı, araştırma ve geliştirmesi son zamanlarda artmaya başladığına yer vermiştir.

Gaz türbinleri, dizel motorlara ve buhar türbinlerine göre çeşitli açılardan avantajlıdır. Bir gaz türbini temel olarak Brayton çevrimi prensibine göre çalışır ve yüksek dereceli çıkış sıcaklığı, kompakt boyutu, az bakım, minimum kirlilik, yüksek verimlilik ve makul olması nedeniyle enerji endüstrilerinde yaygın olarak elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Bu durumda bir gaz türbinli motorun kullanım alanının genişlemesiyle birlikte bu motorların boyutsal olarak küçültülmesini amaçlayarak çalışmalar yapmıştır. Silva, Khatib ve Fleming [20] nominal itme çıkışını korurken yakıt tüketimini en aza indirme veya aynı yakıt tüketimi için itme kuvvetini en üst düzeye çıkarma ve türbin blade sıcaklığını en aza indirmeye yönelik küçük ölçekli gaz türbinli motor optimizasyonu çalışmasını yapmıştır. Çalışma sonunda bu optimizasyonla birlikte türbin gibi karmaşık bir motor parçasının bu isteklere cevap vermesi için geliştirmeye açık olduğunu belirtmiştir. Muller N. Ve Akbari P. [27] çalışmalarında basit çevrimli bir gaz türbinin performansını arttırmak için iki ana yöntem olduğunu ve bunların özellikle kompresör ve türbinin bileşen verimliliğini arttırmanın büyük rol oynadığını belirtmişlerdir. Diğer bir faktör ise türbin giriş sıcaklığının arttırılmasıyla döngünün termodinamik sürecinin iyileştirilmesidir. Bu çalışma göz önüne alınarak küçük ölçekli bir gaz türbinli motorun türbin kısmının kusursuz bir şekilde hesaplanarak tasarlanması gerektiği çıkarımında bulunabiliriz. Guha A. [28] İnsansız hava araçlarında, yedek güç ünitelerinde (APU-Auiliary Power Unıts) ve askeri füzelerde itki kaynağı olarak küçük ölçekli gaz türbinli motorlar kullanılmaktadır ve bu ana taşıyıcıların ölçeklendirilmesindeki temel nedenlerden biri olan motor ağırlığıdır. Bu ağırlık ile üretilen itkinin oranı da küçük ölçekli motor kullanımı açısından büyük önem arz etmektedir. Ölçeklendirilmiş bu motorların daha kullanışlı ve daha çok talep edilmesi için bu oranın en yüksek seviyede tutulması gerekmektedir. Çetin [29] türbin verimliliğinin de yer aldığı gaz türbinin motorların optimal performansı üzerine çalışmalar yapmış ve açık çevrimli gaz türbinli motorların türbininin izentropik verimi net güç çıkışının üzerindeki en önemli faktörlerden biri olduğunu sonucuna varmıştır. Bununla birlikte türbinin izentropik veriminin artmasıyla net gücün de arttığını ortaya koymuştur.

2. BÖLÜM

KÜÇÜK ÖLÇEKLİ GAZ TÜRBİNLİ MOTORLAR VE TÜRBİNLERİ

2.1 Giriş

Bu bölümde küçük ölçekli gaz türbinli motorlar, ana parçaları, çalışma prensipleri, küçük ölçekli gaz türbinli motorlarda kullanılan eksenel akışlı türbin ve çalışma prensipleri, radyal akışlı türbin ve türbin verimliliği hakkında yapılan araştırmalar ve bu araştırmalar sonucu elde edilen bilgiler verilmiştir.

2.2 Küçük Ölçekli Gaz Türbinli Motorlar

Gaz türbinli motor, termodinamik Brayton Çevrimine göre çalışan bir akışkandan enerji alarak ve enerjiyi kullanılabilir bir forma dönüştürerek çalışan bir makinedir. Çeşitli tiplerde gaz türbinleri, bir dizi görevi yerine getirmek için tasarlanmıştır ve hepsi benzer prensiplerde çalışır. Modern gaz türbinlerinin yaygın uygulamaları şunları içerir: yer veya uçak sistemleri için yardımcı güç üretmek, askeri uçakları süpersonik hızlarda itmek ve helikopterlerin rotor sistemini çalıştırmak. Bu alanlarda kullanılan gaz türbinler büyük ölçekli motorlara kıyasla aynı motor bileşenlerine sahiptir ve ölçeklendirilmiştir [21]. Bu çok aşamalı ölçeklendirilmiş bileşenlerin verimliliği, basınç oranlarını ve performans özelliklerini arttırır [22].

Küçük ölçekli gaz türbinli motorlar Şekil 2.1'de gösterildiği gibi hava alığı, kompresör, yanma odası, türbin ve egzoz gibi 5 önemli bileşenden oluşmaktadır.

Dönü kuvveti oluşturacak harici bir kaynaktan alınan tahrik ile kompresör ve türbini birbirine bağlayan milin çevrilmesiyle kompresör ve türbinin çevrilmesi sağlanır. Kompresörün dönmesiyle birlikte hava motora çekilmektedir. Çekilen hava, hava alığından alınarak kompresörde dar ağızdan geniş çıkışa yönlendirilerek basıncının artışı sağlanır.

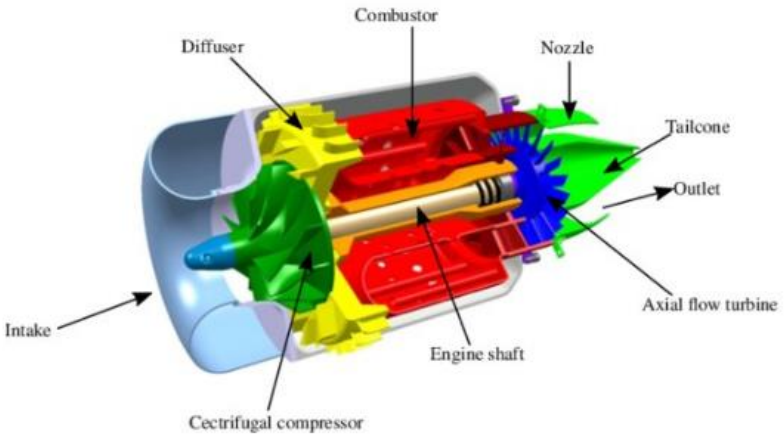
Basıncı arttırılmış hava yanma odasına gönderilerek yakıt-hava karışımının yanması ile yakıt enerjisinin açığa çıkarılması ve havanın genişlemesi sağlanır.

Yanma odasından yüksek ısı ve enerjiye sahip akış türbin kademesini hareketlendirir. Türbinden geçen hava egzozdan ivmelendirilerek atmosfere atılır. Atmosfere atılan bu gaz ile itkinin elde edilmesi Newton'un ikinci yasası ile bağlantılıdır.

Bu yasaya göre kuvvet, kütle ve ivmenin çarpımı ile elde edilir. Belirtilen yasaya göre gaz türbinin itkisi kuvvetinin arttırılması için ivmenin ve egzozdan çıkan gaz kütlesinin arttırılması gerekir.

Eksenel akışlı türbin kullanımı bu gereksinimleri radyal akışlı türbine göre daha efektif bir şekilde sağlamaktadır.

Türbinin yanma odasından gelen yanmış hava-yakıt karışımı ile çevrilmesi ve mil vasıtasıyla kompresörün çevrilmesi devamlılığı sağlanmış ve harici güç ünitesine ihtiyaç kalmamıştır. Harici kaynağı ayırarak motor içerisinde yakıtın yanması ile çevrim oluşturulmuş olur. Bu çevrim için kullanılan parçalar motor verimliliğinin arttırılması amacıyla gün geçtikçe geliştirilmektedir. Kompresörde olduğu gibi mili çevirmek için iki farklı türbin kullanılır. Bu türbinler eksenel ve radyal olarak ikiye ayrılır. Eksenel akışlı türbinler radyal akışlı türbinlere göre yüksek kütleli akış sağladığı için en çok tercih edilen türbin çeşididir [22].

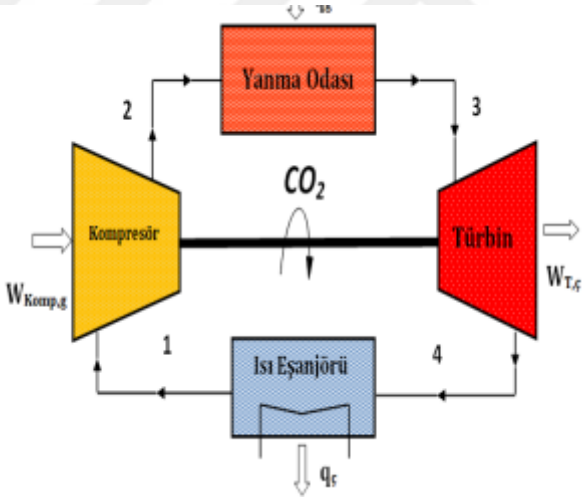


Şekil 2.1. Küçük ölçekli gaz türbinli motor

2.3 Brayton Cycle

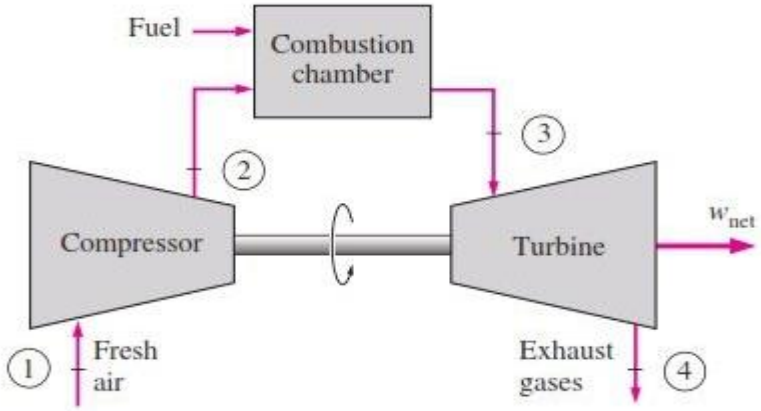
Gaz türbinli motorlar Brayton çevrimi ile çalışan turbomakinalardır. Gaz türbinli motorların çalışma çevrimleri açık, kapalı ve yarı kapalı olarak üç sınıfa ayrılır [24].

Kapalı Brayton çevriminde akışkanın kompresörde basıncı ve sıcaklığı yükseltilir. Kompresörden sonra gaz türbinli motorlarda kullanılan yanma odasında basınçlı akışkan yakıt ile karıştırılarak yakılır. Yüksek enerjili yanmış yakıt hava karışımı türbine ilerler. Türbin kademesinin gaz vasıtayla çevrilmesiyle dönü kuvveti elde edilir. Türbinde iş elde edildikten sonra ısı eşanjörüne yönlendirilir. Isı eşanjörü içerisindeki gazın ısısının bir miktarı başka bir ortama aktarılır. Daha sonrasında gaz basınçlandırılmak üzere tekrar kompresöre gönderilir.



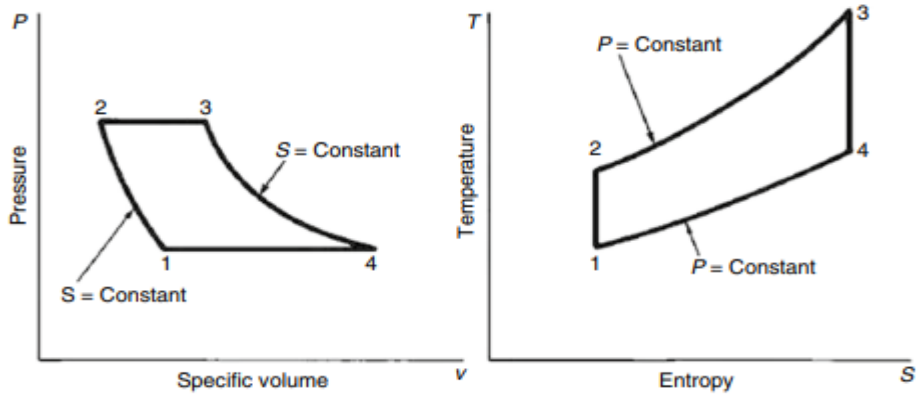
Şekil 2.2. Gaz Türbinli Motor Kapalı Brayton Cycle [25]

Mevcut çalışmada üzerinde durulan küçük ölçekli gaz türbinli motorlar Açık Brayton çevrimine göre çalışmaktadır. Sabit basınçlı Brayton çevrimi bir mil vasıtasıyla birbirine bağlanmış kompresör ve türbinle birlikte iş üreten gaz türbinin temelini oluşturmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Gaz Türbinli Motor Açık Brayton Cycle

Bir gaz türbinin iş üretmesi için kullandığı çevrimde, Atmosfer havası kompresöre çekilir ve 1. noktadan 2. noktaya kadar basınçlandırılır, aynı zamanda entropi sabitken sıcaklık 1. noktadan 2. noktaya yükselir. 2. noktadan 3. noktaya kadar yanma odasında yakıt ile karışan basınçlandırılmış hava yakılarak sabit basınçta iş elde etmek için ihtiyaç olan enerji açığa çıkarılır. 3. ve 4. noktalar arasında yanmış yüksek enerjili gazın türbinde meydana gelen izantropik genişleme ile sıcaklık ve basınç düşerken, entropi sabit kalır ve hacim artar. 4. Noktadan 1. Noktaya geçerken bu çevriminde egzoz iş elde edilen gaz atmosfere atılır ve bir sonraki çevrim için kompresör tarafından temiz hava çekilir. Sabit basınç altında çevreye ısı geçişi olur. Bu ısı geçişiyle birlikte sıcaklık ve entropide azalmalar meydana gelir. (Şekil 2.4)



Şekil 2.4. Gaz Türbinli Motor P-V ve T-S Diyagramı

2.4 Radyal Akışlı Türbin

Radyal akışlı türbin eksenel akışlı türbin gibi ana görevi kompresörü çevirmek için varsa yardımcı üniteleri tahrik etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu görevi yanmış gazların türbin üzerine yönlendirilmesiyle gerçekleştirir. Yanma odasından gelen gazdan tork üretmek için kullanılan radyal akışlı türbin çeşitli parçalar ve kademelerden oluşmaktadır. Bu parçalar sabit olan Nozzle Guide Vane (Difüzör) ve hareketli olup torku üreten rotordan (Impeller) oluşmaktadır.

Radyal akışlı türbinler tek bir kademede eksenel akışlı türbinlere göre yüksek basınç oranına sahiptir. Dezavantaj olarak radyal akışlı türbinler yüksek debili akışlarda verimli olarak çalışamamaktadır [26].

2.5 Eksenel Akışlı Türbinler

Eksenel akışlı türbinler daha yüksek kütle akışı sundukları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Verimliliğin ve itki üretimini arttırmak için birden çok kademeden oluşturulur. Fakat ölçeklendirilmiş motorlarda kademe sayısının arttırımı motor boyutlarının büyümesine sebep olur. Bu yüzden küçük ölçekli gaz türbinli motorlarda tek kademeli eksenel akışlı türbin tercih edilir.

Yanma odasında yanmış ve enerjisi yüksek gaz, eksenel akışlı türbinin motor case'ine bağlı Nozzle Guide Vane (Şekil 2.6) adı verilen sabit kademenin üzerindeki Vane'lerin arasından geçirilmesiyle rotora (Şekil 2.5) yönlendirilir. NGV'lerin amaçları gazın akışı esnasında oluşabilecek bozulmaları engellemek ve ivmelendirerek rotora iletmektir [23]. Enerjisi yüksek gaz hareketli ve mile bağlı olan rotorun üzerinde bulanan bladeleri arasından geçirilir ve milin hareketi sağlanmış olur. Bu dönü hareketinin elde edilmesinde kullanılanılan eksenel akışlı türbin; impulse türbin, Reaction türbin ve bu iki tipin kombinasyonu olan İmpulse-Reaction türbindir. Türbin tipinin değişmesiyle dönü hareketinin elde edilme yöntemi de değişmektedir.



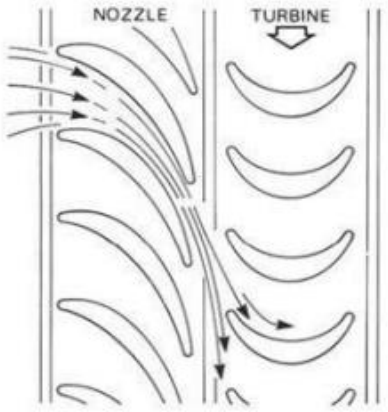
Şekil 2.5. Eksenel Akışlı Türbin Rotor



Şekil 2.6. Eksenel Akışlı Türbin Nozzle Guide Vane

2.5.1 Impulse Türbin

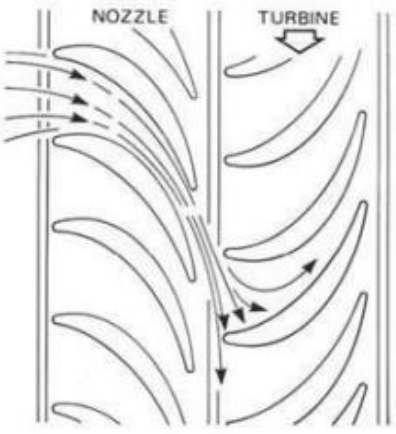
Impulse yani çarpma tip türbinde yanma odasından gelen yüksek enerjili gazın Nozzle Guide Vane kademesinin bıçaklarının girişinden çıkışına doğru darılmasıyla gaz ivmelendirilir. İvmelenmiş bu gaz hareketli olan rotor kademesinin bladelerine yönlendirilmiş olur. Girişinden çıkışına kadar eşit kesit yapısına sahip rotor bladelerinin basınç yüzeyine NGV tarafından ivmelendirilmiş gaz çarpar ve rotor kademesinin dönmesi sağlanmış olur.



Şekil 2.7. Impulse (Çarpma) Türbin

2.5.2 Reaction Türbin

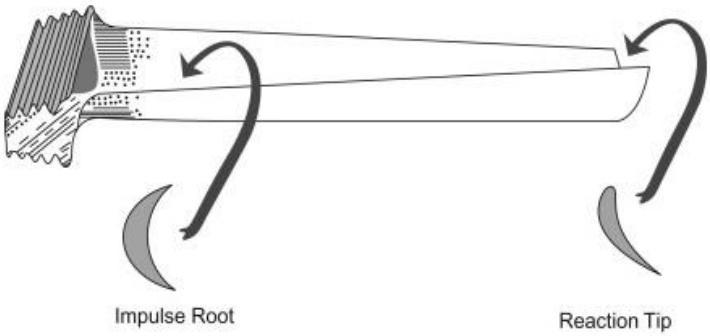
Reaction yani tepki tip türbinde yanma odasından gelen yüksek enerjili gazın Nozzle Guide Vane kademesinin vane adı verilen bıçaklarının girişi ve çıkışı eşit kesit yapısına sahiptir. Bu kademede gazın sadece rotor kademesine düzgün bir şekilde ilerlemesi sağlanmaktadır. Rotor bladelerinin girişinden çıkışına doğru daralmasıyla NGV'den gelen gaz rotor bladelerinin arasında ivmelenmesi sağlanır. İvmelenen bu hava rotor bladelerinden ayrılırken ivmelenmeden dolayı bir tepki kuvveti oluşturur. Bu tepki kuvveti sayesinde rotor kademesi hareket ettirilir ve milin dönmesi sağlanır.



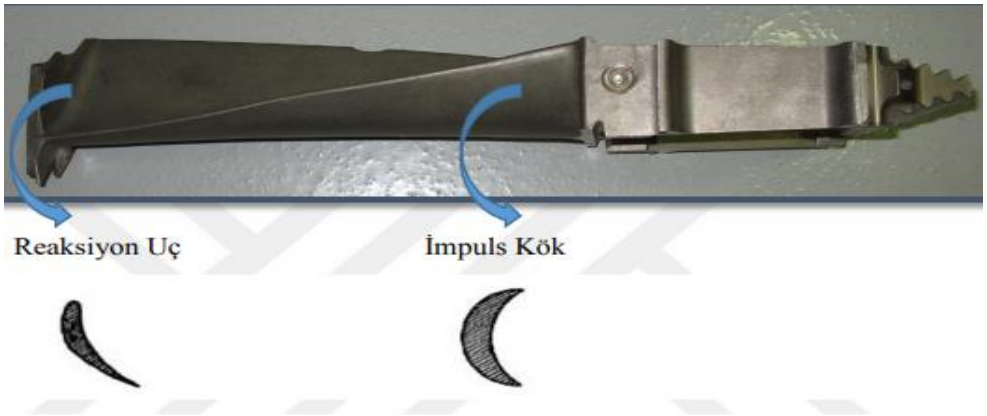
Şekil 2.8. Reaction (Tepki) Türbin

2.5.3 Impulse-Reaction Türbin

Impulse tip türbin NGV'sinde olduğu gibi Impulse-Reaction türbinde de NGV girişinden çıkışına doğru daralan yapı olmasıyla NGV'de ivmelendirilen gaz Rotor Bladelerine yönlendirilir. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da gösterildiği üzere Rotor Bladeleri ise Reaction tip türbinde olduğu gibi havayı ivmelendirmeli aynı zamanda impulse türbindeki gibi NGV'nin yönlendirdiği havanın kuvvet uygulayabileceği bir basınç yüzeyine sahip olmalıdır.



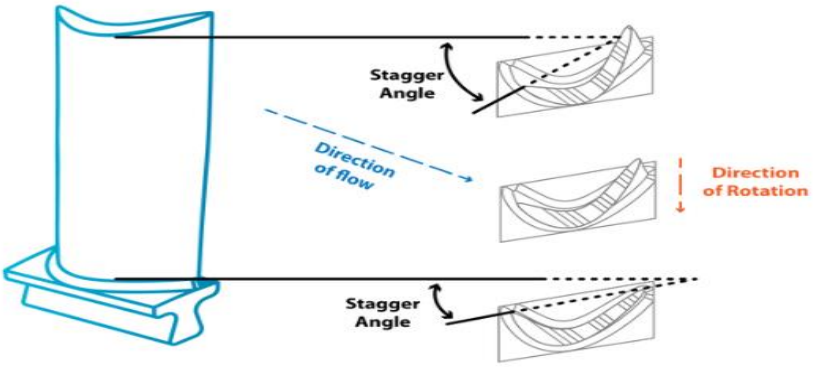
Şekil 2.9. Rotor Blade Yapısı



Şekil 2.10. Rotor Blade Yapısı

Yukarıda bahsedilen yapının oluşturulması da gazın blade kök kısmının basınç yüzeyine çarpmasıyla ve bladelerin uç kısımlarına doğru daralan yapıya sahip olması için stagger açısı verilerek tasarlanması gerekmektedir (Şekil 2.11). Stagger açısı NGV' de ivmelenen gaz rotor bladelerinin kök kısmında bulunun impulse tip basınç yüzeyine çarparak kuvvet uygular ve rotorun hareket etmesini sağlar.

Aynı zamanda kökten uca doğru açılandırılmasıyla daralan yapı elde edilir ve bu sayede gaz ivmelendirilir. İvmelendirilmiş gaz rotor bladelerin tepki kuvveti oluşturarak rotorun dönüş hareketini yapmasına fayda sağlar.



Şekil 2.11. Stagger Angle

2.6. Türbin Verimliliği

Gaz türbinli motorlarda kullanılan türbinler yanma odasında yakıt ile yanmış gazın yüksek enerjisiyle dönme hareketi elde etmek amacıyla kullanılır. Bu enerji dönüşümü sırasında, birçok verim faktörü vardır. Bu faktörler arasında izentropik verimin önemli bir yeri vardır [30]. Bu bağlamda türbinin veriminin artması kompresör ve dolaylı olarak yanma odasını etkileyeceği için kullanılan motorun verimliliği üzerinde türbinin verimliliğinin yeri yadsınamaz.

2.6.1 Türbinin İzantropik Verimi

Türbinin gerçek verimliliğinin bulunabilmesi için türbin çıkışındaki gazın basınç ve sıcaklık değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Basınç ve sıcaklık değerleri bilinen enerjisi yüksek gazın sabit entropide türbin üzerindeki oluşturacağı gerçek işin, izantropik yani ideal işe oranı izantropik verimi temsil etmektedir. Bu oranlamadan da anlaşılacağı üzere izantropik verim gerçek hal değişiminin izantropik hal değişiminden sapma oranını gösterir. Bunu da aşağıdaki bağıntı temsil etmektedir (2.1) .

$$\eta_t = \frac{\text{Türbin gerçek kişi}}{\text{Türbin izantropik işi}} = \frac{W_a}{W_s} \qquad \textbf{(2.1)}$$

Bu bağıntıya göre; Türbinin gerçek işinin türbinin izantropik işine oranı 1 veya daha fazla olamayacağı yani türbindeki izantropik verim %100'ü geçmesi mümkün olmayacağı anlaşılmaktadır.

Aşağıdaki diyagramdan (2.11) türbinde elde edilen iş için hal değişimleri gösterilmektedir. Bu diyagramdaki hal değişimleri göz önünde bulundurularak (2.2) bağıntısı elde edilebilir.

$$W_a = (h_1 - h_{2a})$$

$$W_s = (h_1 - h_{2s}) \qquad \textbf{(2.2)}$$

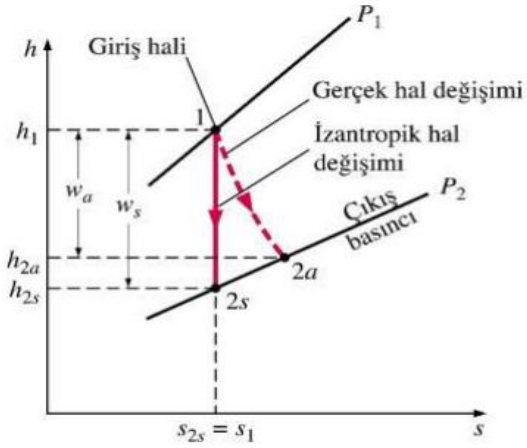
Yukarıdaki formüller dışında türbinden elde edilen iş kullanılarak da izantropik verim aşağıdaki formüller ile elde edilebilmektedir.

$$TW = \eta_t . Cp . Tt4 . (1 - TPR^{\frac{y-1}{y}}) \qquad \textbf{(2.3)}$$

$$TW = Cp\ (Tt4 - Tt5) \qquad \textbf{(2.4)}$$

Türbin basınç oranı ;

$$TPR = \frac{pt5}{pt4} = (\frac{Tt5}{Tt4})^{\frac{y}{y-1}} \qquad \textbf{(2.5)}$$



Şekil 2.12. Adyabatik bir türbinin h-s diyagramı

3. BÖLÜM

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)

3.1 Giriş

Mevcut çalışmada türbin analizinin bilgisayar üzerinden Fluent programı kullanılarak çözümlemesi yapılmıştır.

Bu bölümde analiz yapılabilmesi için kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve kanunları, denklemleri ve türbülans modelleri hakkında açıklamalar içermektedir.

3.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Mühendislik alanında akış analizi temelde iki farklı yol ile yapılır. Bu yaklaşımlar deneysel analiz ve sayısal çözümlemelerdir. Deneysel analiz yapılırken akışın elde edilebileceği rüzgâr tüneli gibi bir alan içerisinde akış elde edilir. Bu ortam içerisine mümkünse analiz edilmek istenilen parçayı değilse modelinin yerleştirilmesiyle analiz sonuçları elde edilir.

Diğer yöntem ise, mevcut çalışmada kullanıldığı gibi akış ile ilgili diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözümlendirilmesidir. Bu yöntem ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) bilgisayar programları üzerinden akış rejimiyle ilgili farklı denklemlerin çözdürülmesidir. Akış analizinin kullanılmaya başladığı dönemlerde, sadece deneysel çalışmaları desteklemek için kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği, bilgisayar ve programlarının gelişmesiyle birlikte katı modellerin oluşturulmasının kolaylığı ve analiz maliyetlerinin düşmesi hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin kullanılmanı yaygınlaştırmıştır. Bu yöntemin gelişmesi birçok sanayi alanında ve akademik çalışmalarında önünü açmıştır.

Fluent sonlu hacimler yöntemi kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümü yapılmasına olanak sağlayan bir programdır. Birçok alana fayda sağlayan bu program ilk

günden itibaren sürekli olarak gelişmiş ve dünya çapında hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümü için çok yaygın kullanılmaktadır.

Daha önce de belirtildiği gibi bu sonuçların doğrulanmasının HAD çözümlemesi FLUENT programı üzerinden yapılmıştır. Eksenel akışlı bir türbinin akışı hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak çözülmüştür. Bir sonraki bölümde detaylandırılmış NGV ve rotor kademesine bir kanal içerisinden eksenel akış sağlanmıştır.

Bu akışın çözümlenmesinde k-ε türbülans modeli tercih edilmiştir. Referans dokümandan ışığında deneysel çalışma ile elde edilen basınç, hız ve sıcaklık değerlerine en yakın oranda yaklaşma sağlanmıştır.

3.3 Çözüm Denklemleri

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, viskoz akışlar için Süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin çözümüne dayanır. Mevcut çalışmada kullanılan FLUENT yazılımı aşağıda ifade edilen denklemleri kullanarak çözümün yapılmasını sağlar.

Navier - Stokes, sıvı ve gaz gibi akışkanların hareketini tanımlayan momentum, enerji ve süreklilik denkleri ile türetilmiş denklemlerdir.

Süreklilik integral denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho dV + \int_S \rho \vec{V}\vec{n}dS = 0 \qquad \textbf{(3.1)}$$

Sıkıştırılabilir süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (p\overrightarrow{V}) = 0 \qquad \textbf{(3.2)}$$

Bu denklemde süreklilik denkleminin sıkıştırılabilir akış için geçerli bir formudur ve akış alanındaki her noktada geçerlidir. (3.2)

Momentum korunumu integral denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V (\rho dv)\vec{V} + \int_S (\rho \vec{V}\vec{n}dS)\vec{V} = \int_S \tau dS - \int_S p\vec{n}dS + \int_V \rho \vec{f} dv \quad \textbf{(3.3)}$$

Enerji korunumunun integral denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho E dV + \int_S (\rho \vec{V}\vec{n}dS)E = \dot{W}_{viskoz} - \int_S (p\vec{n}dS)\,\vec{V} + \int_V (\vec{f}\rho dv)\vec{V} \quad \textbf{(3.4)}$$

3.4 Türbülans Modelleri

Akış analizlerinin çözülebilmesi için farklı türbülans modelleri kullanılmaktadır. Bunun sebebi ise tüm akış analizlerini çözebilecek bir türbülans modelinin bulunmamasıdır. Akışın şartlarına göre en uygun türbülans modeli doğru analiz sonucunun elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Mevcut çalışmada çözüm Raynold ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri tercih edilerek tamamlanmıştır. Diğer yöntemler ise büyük girdap benzeşimi (LES) ve doğrudan sayısal benzetimi (DNS çözümleme yöntemidir. Bu yöntemlerin çözüm için tercih edilebilmesi için maliyeti yüksek işlemciler ve bellek ile alt yapı oluşturmak gerekmektedir.

Bunun sebebi ise çözümü yapabilmek için akışın elde edileceği katı model üzerinde Navier-Stokes çözümüne göre ağ eleman sayısının çok olması gerekmektedir.

Literatür çalışması sonucunda Murat Taştan'ın Eksenel Kompresörün üç boyutlu sayısal incelemesi çalışmasında [3] ve H. Alperen Alabaş'ın helikopter rotoru etrafında oluşan akışın hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile analizinde ve standart k-ε türbülans modeli kullanarak akış çözümlemesini yapmışlardır [32].

Mevcut çalışmaya yakın akışın sağlandığı ve standart k-ε türbülans modeli akış denklemlerinin çözümü yapıldığı bu çalışmalar göz önünde bulundurularak standart k-ε türbülans modeli tercih edilmiştir.

3.4.1 Standart k-ε türbülans modeli

Akış analizlerinde standart *k*–ε modeli en yaygın olarak kullanılan türbülans modelidir. Standart *k*-ε türbülans modeli iki taşınım denklemleri ile çözülür. Bu denklemler türbülans kinetik enerjisi *k* ve türbülans girdap dağılımı ε (yani türbülans kinetik enerjisinin dağılma hızı) [33].

Bu modelde, türbülanslı kinetik enerjiyi ve onun dağılma hızını elde etmek için aşağıdaki denklemler kullanılır.

Türbülans kinetik enerjisi k için ;

$$\frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial \mathrm{xi}}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial \mathrm{xj}}\left[\left(\mu + \frac{\mu \mathrm{t}}{\sigma \mathrm{k}}\right)\frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{xj}}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_m + S_k \quad \textbf{(3.4)}$$

Türbülans girdap dağılımı ε için;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial_k}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}\, G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad \textbf{(3.5)}$$

denklemleri ile ifade edilir. Bu denklemlerde G_k hızın ortama değişkenini (3.6) temsil ederken, G_b ise sıcaklık farklarından dolayı oluşan yoğunluk değişimine bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi üretimini (3.9) ifade etmektedir[34].

$$G_k = -\rho\overline{u_i^t u_j^t}\frac{\partial u_J}{\partial x_\iota} \quad \textbf{(3.6)}$$

Boussinesq varsayımına göre hızın ortalama değişkeni;

$$G_k = u_t S^2 \quad \textbf{(3.7)}$$

Bu bağıntıda *S* ortalama gerilmenin oranını ifade eder;

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad \textbf{(3.8)}$$

Sıcaklık farkından dolayı oluşan yoğunluk değişimine bağlı türbülans kinetik enerji ise;

$$G_b = \beta g_i \frac{u_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad \textbf{(3.9)}$$

bu bağıntı ile ifade edilir. Bağıntıda bulunan β ısıl genleşme katsayısı, g_i yerçekimsel vektörün bileşenini, Pr_t ise enerji için türbülans Prandtl sayısını ifade etmektedir[32].

4. BÖLÜM

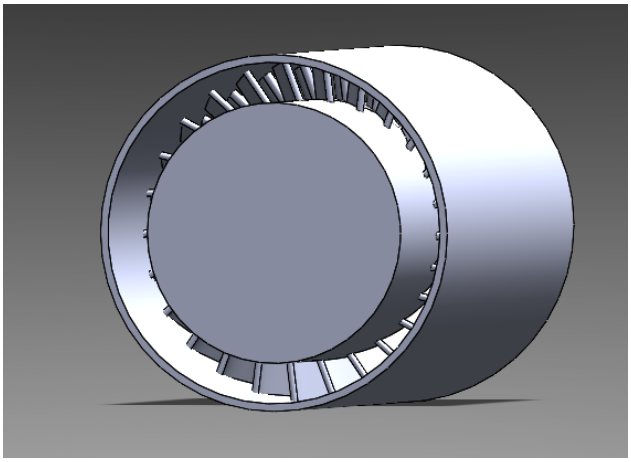
TÜRBİN MODELLEMESİ

4.1 Giriş

Bu bölümde referans alınan SR-30 küçük ölçekli eksenel akışlı gaz türbinli motorun bremze testlerinde ve MATLAB programı üzerinden yapılmış analizlerde kullanılan türbinin rotor kademesinin 70000 RPM'de giriş basınç, hız ve sıcaklık parametreleri kullanılarak ANSYS programı kullanılarak doğrulaması yapılmıştır.

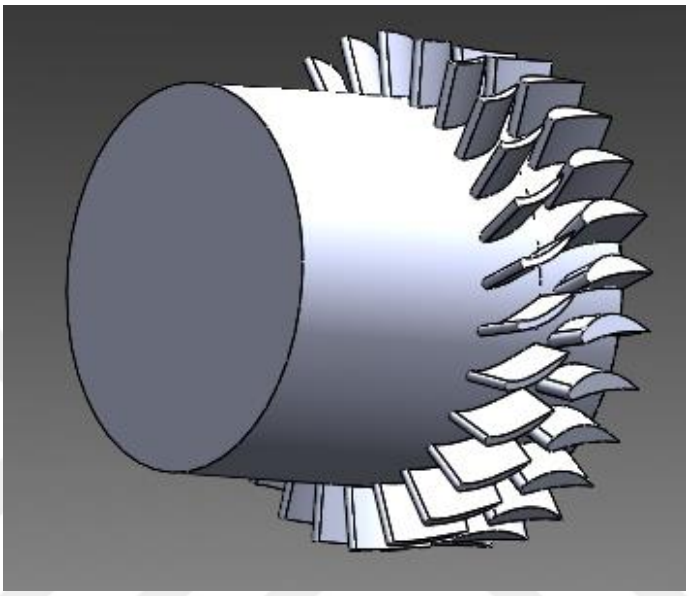
4.2 Türbin Geometrisi

Stator ve rotor kademesinden oluşan eksenel akışlı türbin SOLİDWORKS programı üzerinde üç boyutlu katı modeli oluşturulmuş ve ANSYS programı üzerinden akış analizi yapılmıştır. Motor içerindeki akışın sağlanabilmesi için bir dış case ve bir göbekten oluşmuş giriş (Şekil 4.1) tasarlanmıştır.



Şekil 4.1. Türbin Case ve Göbek Katı Modeli

Bu katı model havanın türbine göbek ve case arasından geçerek case'e bağlı stator vane'leri (kanatçıkları) (NGV) ve mile bağlı olup motor içerisinde mekanik dönü hareketini sağlayan türbin blade'leri (kanatçıkları) arasından geçecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Stator Vane ve Rotor Blade

Tablo 4.1'de katı model oluşturulurken kullanılan ölçüler yer almaktadır.

Rotor kanatçık uzunluğu	0.02691 m
Stator vane uzunluğu	0.02102 m
Rotor göbek çağı	0.06571 m
Stator göbek çapı	0.06818 m

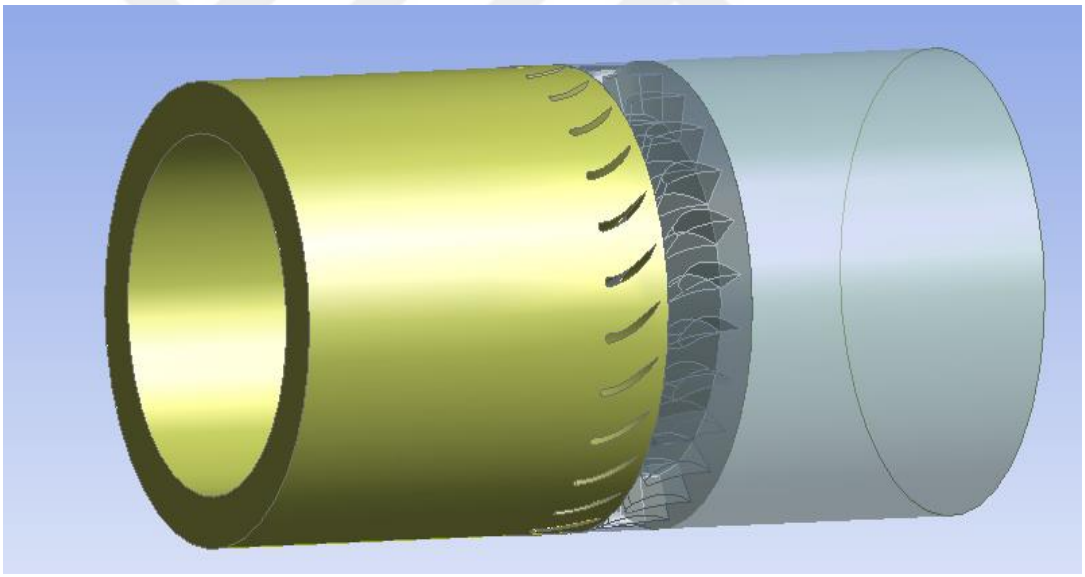
4.3 Ağ Oluşturma

Bu çalışmada kullanılan ANSYS programının alt yapısını sonlu elemanlar metodu oluşturur. Sonlu elemanlar metodu; analizi yapılacak elemanı belirli sayıda parçalara ayırarak belirlenen bir noktadan giriş parametreleri verilerek başka bir parçanın düğüm noktasındaki özelliklerin elde edilmesidir. Bunun da arka planda program için kodlanmış sıralı denklemlerle yapmaktadır. Bu yöntem ile dinamik yüklenme, statik yüklenme, ısı transferi ve bu çalışmada olduğu gibi akışkanlar mekaniği çözümü yapılabilmektedir.

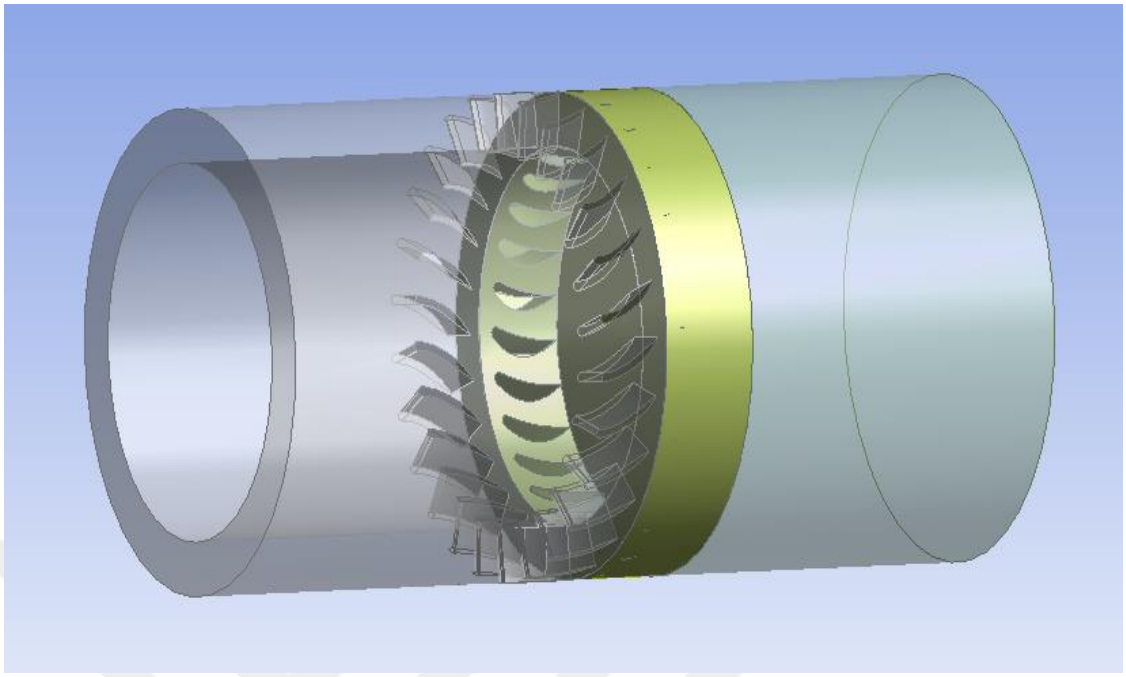
Bu çözümün yapılabilmesi için girdi ve çıktıların belirtildiği düğüm noktaları, üzerinde çalışmanın yapıldığı katı modelin belirli bölgelerinde oluşturulmaktadır. Bu düğüm noktalarının bir araya gelmesiyle oluşturulan yapıya ağ yapısı adı verilmektedir.

Oluşturulan modelin göbek ve case'i arasında kalan kanaldan havanın geçirilebilmesi için ağ üretilmesi gerekmektedir. Bu ağın üretilmesi için ise bilindiği üzere istenilen alana bir katı modelin olması gerekir. Bunun sebebi ise katı modelin olmadığı boş alanlarda ağ üretilememektedir.

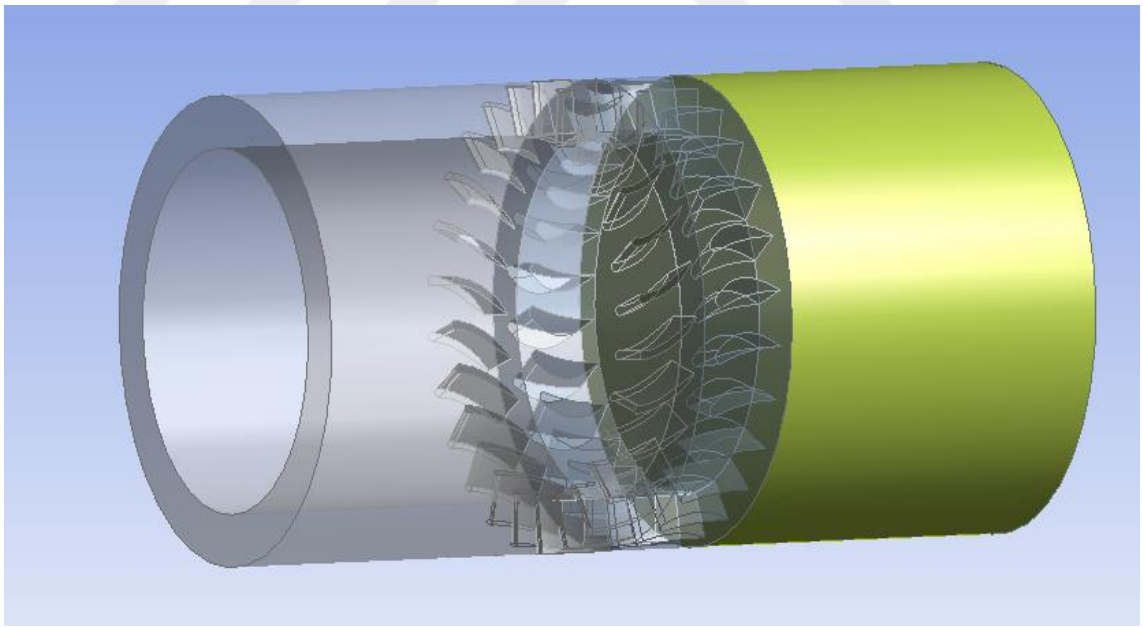
Akışın geçeceği çözüm havzasında silindirik geometri oluşturulup rotor, stator ve disk çıkarılmıştır. Bu sayede havanın geçeceği havzada ağ üretimi sağlanmıştır (Şekil 4.3)(Şekil 4.4) (Şekil 4.5).



Şekil 4.3. Göbek ve Case arası ağ üretimi için oluşturulan katı model

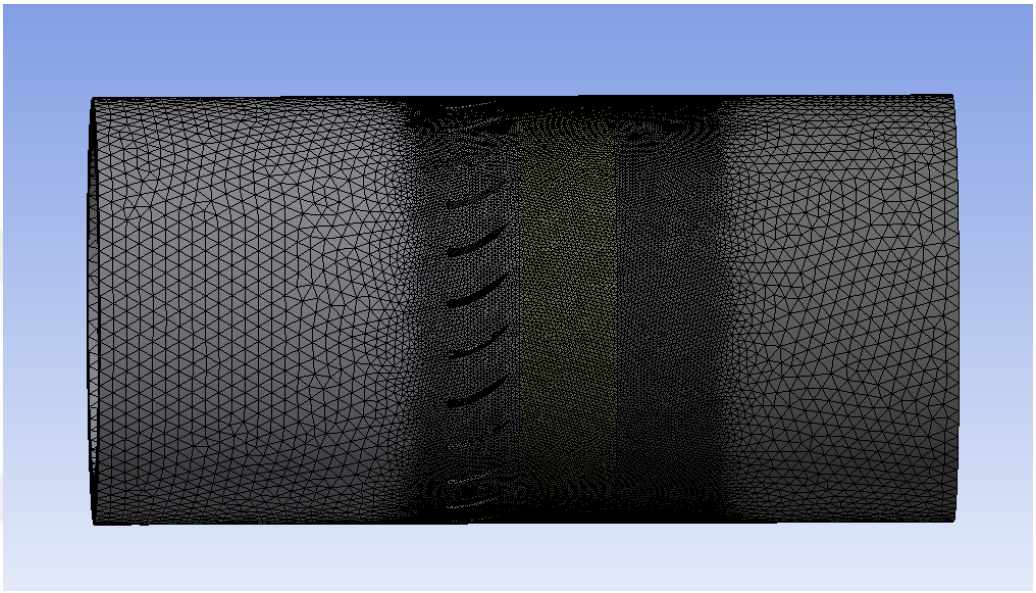


Şekil 4.4. Rotor ve Case arası ağ üretimi için oluşturulan katı model

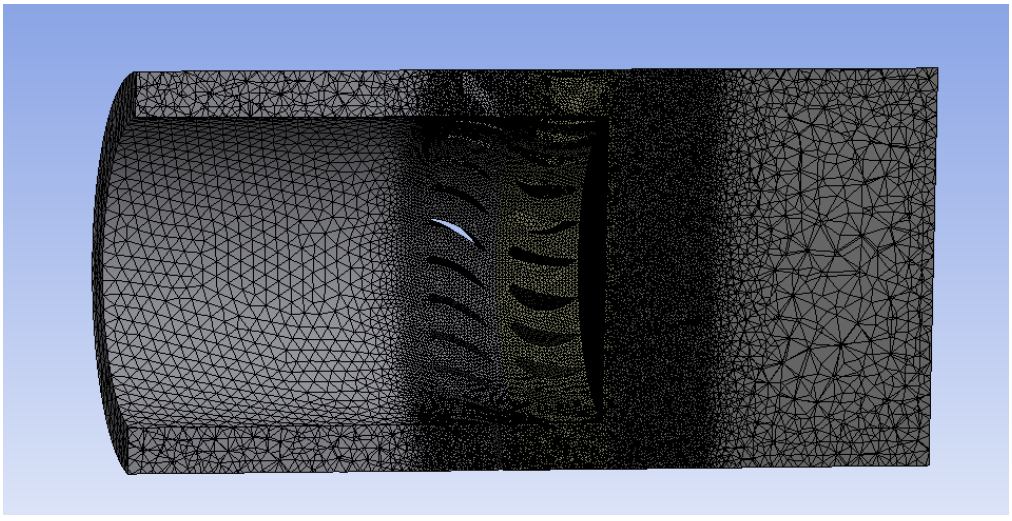


Şekil 4.5. Rotor çıkışında ağ üretimi için oluşturulan katı model

Contact sizing ile domainlerin birleştiği noktalarda ağ eleman sayı arttırılmıştır. Patch conforming metodu seçilerek tetrahedral geometriye sahip ağlar oluşturulmuş bu sayede karmaşık ve hızlı dönen yapılar için daha uygun ağ yapısı hazırlanmıştır. Yüksek hızlı dönen rotor yapısı ve karmaşık stator etrafında daha sıkı bir ağ oluşturulmuş uzak bölgelerde ise kaba bir ağ yapısı tercih edilmiştir. Bu sayede optimum eleman sayısı ve simülasyon süresinde azalma hedeflenmiştir. (Şekil 4.6) (Şekil 4.7).



Şekil 4.6. Mesh dağılımı



Şekil 4.7. Türbin kesiti mesh dağılımı

4.4 Ağdan Bağımsızlık

Ağ yapısı içerisinde bulunan düğüm noktası sayısı yapılan analizin doğruluğunu direkt olarak etkilemektedir. Bu ağ sayısını artışının sonuçları etkilemediği noktada sonuçlar ağdan bağımsız duruma gelmektedir.

Mevcut çalışmada yukarıda belirtilen ağ sayısının öneminden yola çıkarak farklı ağ sayılarında çözümle yapılmıştır. Bu çözümlemenin sonucu aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 4.2).
Hücre sayısı %10 arttırarak sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara değişmemesiyle birlikte ağdan bağımsız sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.2. Ağdan bağımsızlık çözümleme sonuçları.

Hücre sayısı	Çıkış basıncı(Pa)	Çıkış sıcaklığı(K)	Çıkış hızı(m/s)
3659935	161	805	186
3336258	161	805	186
2976009	161	806	185
2629813	161	808	184

4.5 Sınır Şartları (Türbülans Modelleri)

Bu çalışma için yapılan literatür araştırmasında türbin ve benzer bir parça olan kompresörün akış analizleri incelenmiştir.

Bu analizlerin incelenmesiyle birlikte standart k-ε türbülans modelinin kullanıldığı E. Günaltılı[6], M.Taştan[31] ve H.Alabaş[32] çalışmalarında akış analizinin sonuçlarının doğruluğu bu türbülans modeli ile sağlanmıştır.

Bu çalışmada rotor devri 70000 RPM'de, stator girişindeki havanın basıncı 270 kPa, hızı 125 m/s ve sıcaklığı ise 889 K'de sabit tutulmuştur.
Sabit tutulan bu değerlerle birlikte referans dokümanlardan alınan rotor çıkış değerlerine ulaşmak ve doğru sonuç elde etmek için iki farklı türbülans modeli ile çözümle yapılmıştır. Bu çözümlemelerin sonuçları aşağıdaki tabloda yer almaktadır. (Tablo 4.3).

Tablo 4.3 Türbülans modeline göre çözümleme sonuçları

Türbülans Modeli	Rotor çıkış basıncı (Pa)	Rotor çıkış hızı (m/s)	Rotor çıkış sıcaklığı (K)
Standart k- ε	161346	187,771	805,387
Spalart Allmaras	182422	169	857,631
Referans değerler	155000	186	770

Tabloda yer alan sonuçlardan ve literatürdeki çalışmalardan yola çıkarak standart k-ε türbülans modelinin mevcut çalışmanın çözümlenmesi için en doğru türbülans modeli olduğu belirlenmiştir.

4.6 Doğrulamanın Sonuçları

Oluşturulan katı modelden en doğru sonucu elde etmek amacıyla belirlenen ağ sayısı ve türbülans modeliyle birlikte referans alınan dokümanda dakikada 70000 RPM yani saniyede 1166 RPM ile sonuçların alındığı görülmektedir.

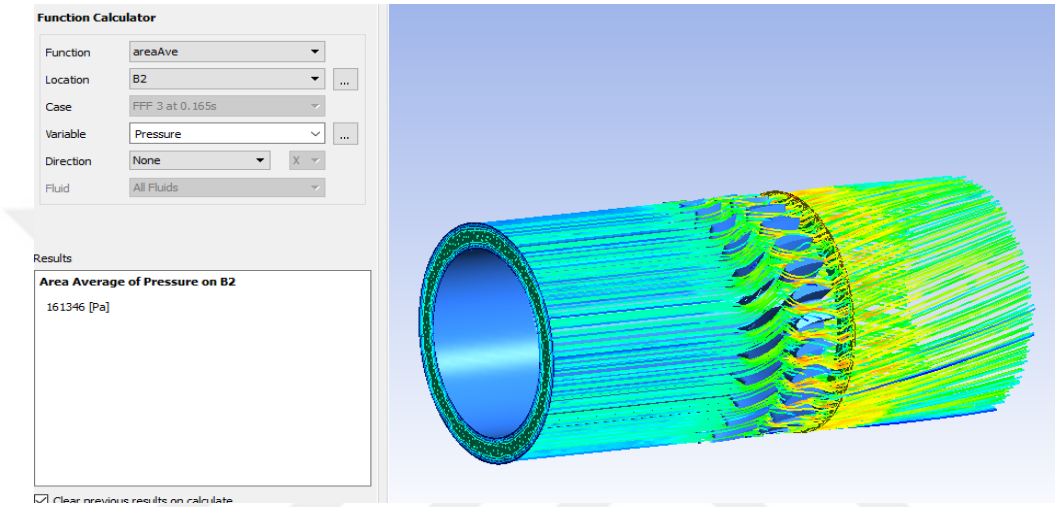
Simülasyonda saniyede 1166 dönü elde edebilmek için yaklaşık olarak 60 saat boyunca aralıksız rotor çevrilerek simüle edilmesi gerekmektedir. Bu süre zarfı içerisinde simülasyonun yaklaşık 6 turda bir kendini tekrar ettiği görülmüştür.3000 iterasyon sayısına ulaşıldığında yakınsama sağlandığı tespit edilmiştir.

Dönen rotora 270 kPa basınçlı, 125 m/s hızda ve 889 K sıcaklığında hava yönlendirilmiştir.

Rotor kademesinden çıkan havanın değerlerinin efektif bir şekilde elde edilebilmesi için egzozun daralan kanalı ile rotor arasındaki boşlukta plane oluşturulmuş ve bu plane üzerinden sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçların alındığı plane üzerinden noktasal problarla alınmasının sonuçların gerçekliğini etkileyebileceği sebebiyle plane üzerindeki tüm noktalardaki değerin ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

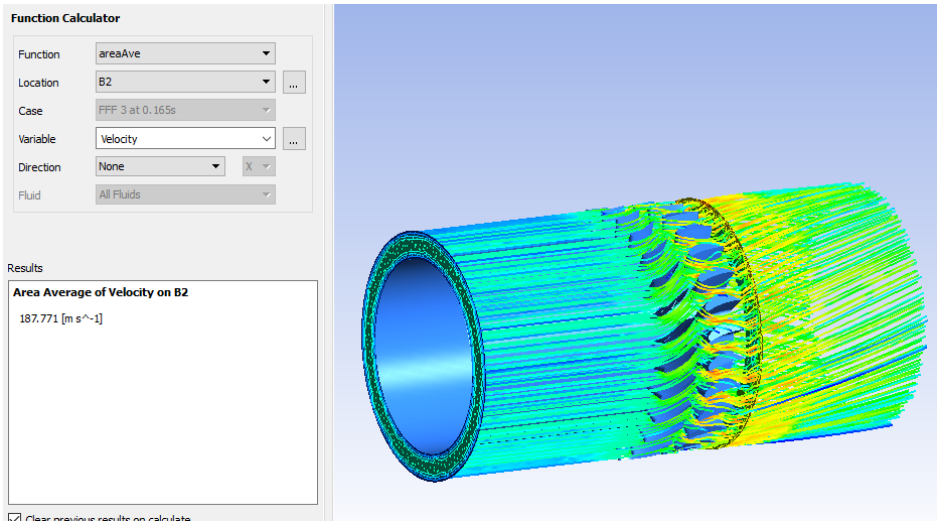
Havanın stator ve rotor kademelerinden geçtikten sonra B2 plane'i üzerinden alınan ortalama basıncı Şekil 4.9'de, ortalama hızı Şekil 4.10'de ve ortalama sıcaklığı Şekil 4.11'te verilmiştir.

270 kPa basınç ile sisteme giren hava B2 plane'i üzerindeki ortalama basıncı 161 kPa olduğu tespit edilmiştir.

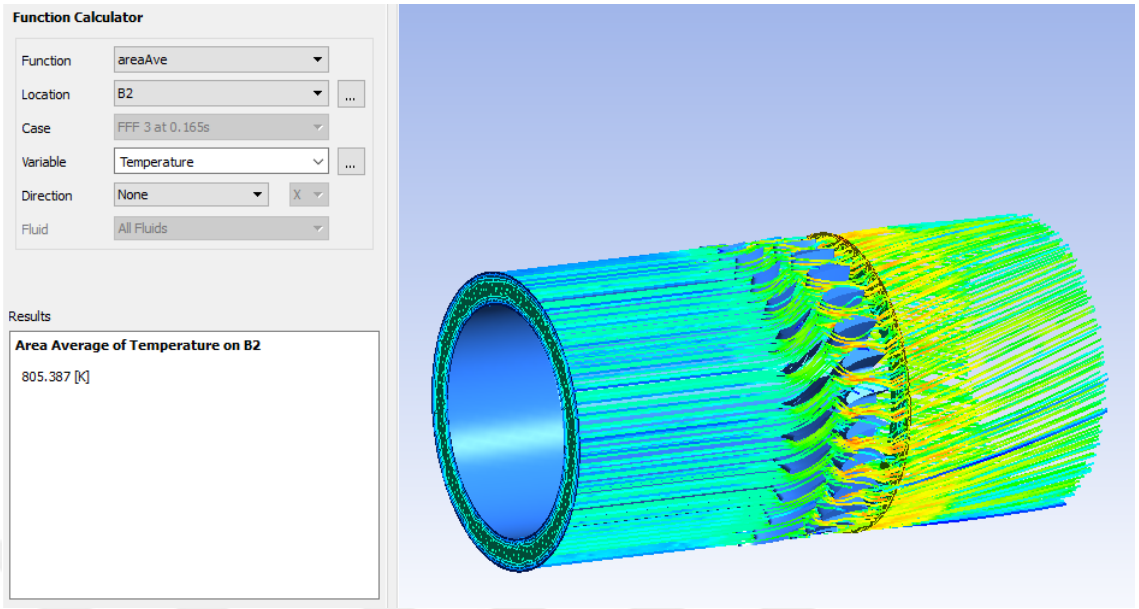


Şekil 4.8. Türbin çıkışı plane ortalama basıncı

Havanın basıncının düşmesiyle birlikte 125 m/s olan giriş hızı ortalama 187 m/s'ye yükseldiği Şekil 4.10' da görülmektedir.



Şekil 4.9. Türbin çıkışı plane ortalama hızı



Şekil 4.10. Türbin çıkışı plane ortalama sıcaklığı

Belirtilen çıkış parametreleri ve referans parametreleri Tablo 4.3'te verilerek sapma oranları belirtilmiştir.

Referans dokümanda 155 kPa olan çıkış basıncı 161 kPa elde edilmiş ve 6 kPa fark yani %3.9 sapma olduğu görülmektedir. 186 m/s olarak verilen çıkış hızı ile fark 1 m/s olduğu sapmanın ise %0,5 olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık ise 33 K fark ve %4.4 sapma ile elde edilmiştir (Tablo 4.3).

Sapma oranları kabul edilir seviyede olduğundan doğrulama kısmı tamamlanmıştır.

Tablo 4.4. Elde edilen değerler ile referans değerlerin karşılaştırılması

	Basınç(kPa)	Hız(m/s)	Sıcaklık (K)
Referans türbin giriş parametreleri	270	125	889
Referans türbin çıkış parametreleri	155	186	770
Elde edilen çıkış parametreleri	161	187	805
Sapma miktarı	6	1	35
Sapma oranı	%3.9	%0,5	%4.4

5. BÖLÜM

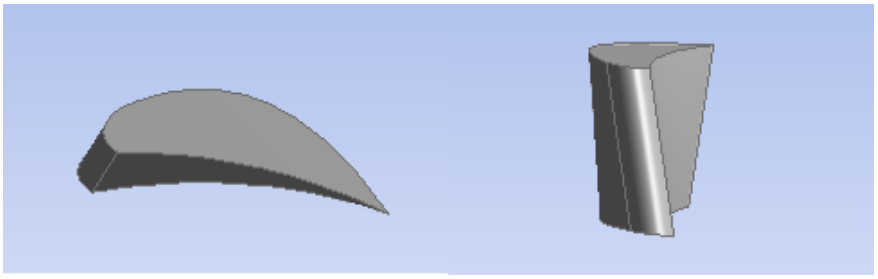
TÜRBİN TASARIMI VE ANALİZİ

5.1. Giriş

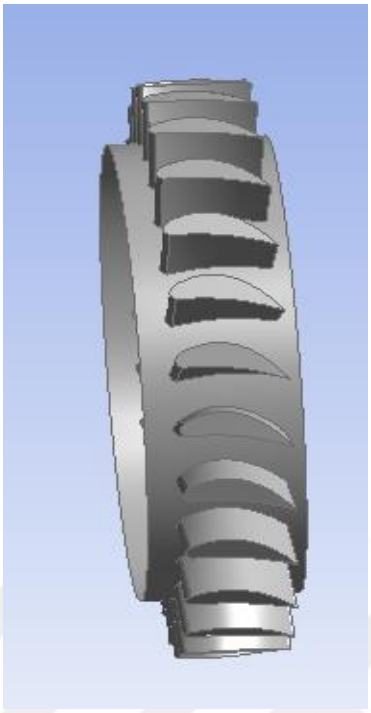
Bu bölümde, doğrulama için kullanılan geometri üzerinde stator, göbek ve case sabit tutulmuştur. Solidworks programı kullanılarak 10 derecece açılı rotor blade'i (Şekil 5.1), 20 derece açılı rotor blade'i, (Şekil 5.9), 30 derecelik rotor blade'i (Şekil 5.17) yerleşim açısı da denilen stagger açısı verilerek üç farklı açıda katı model oluşturulmuştur.

Oluşturulan katı modelin Ansys programı kullanılarak doğrulama aşamasında kullanılan yöntemler ile ağ oluşturulmuştur oluşturulan ağların sonucu yüksek oranda değiştirdiği göz önünde bulundurularak doğrulamada da olduğu gibi ağ sayısı patch conforming metot seçilerek katı hacminin daha büyük olduğu stator girişi ile rotor çıkışı arasında yoğunlaşması sağlanmıştır (Şekil 5.4.)(Şekil 5.12)(Şekil 5.21).
Ağ oluşumu işlemleri tamamladıktan sonra giriş verileri doğrulama ile aynı tutulup çıkış verileri elde edilmiştir.

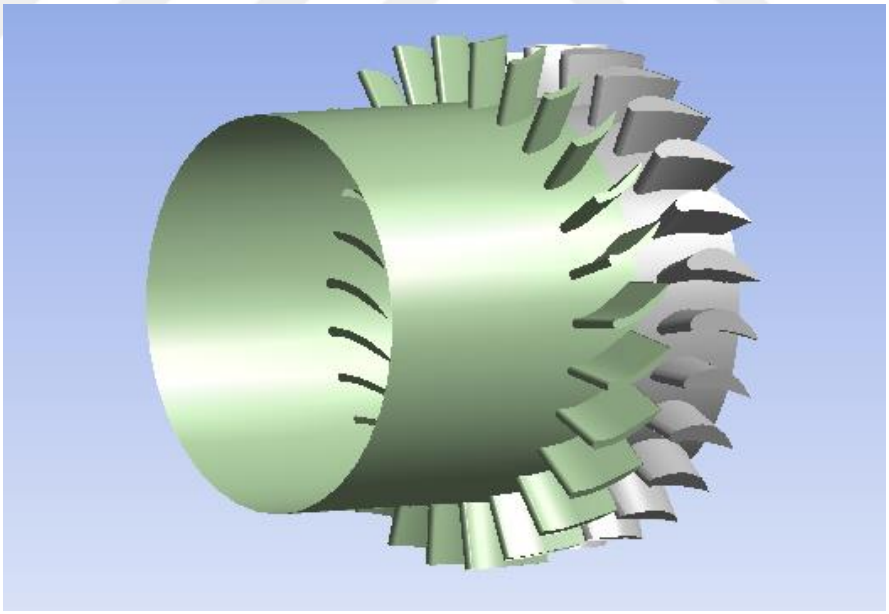
5.2. 10 Derece Stagger Açılı Türbin Geometrisi



Şekil 5.1. 10 derece stagger açılı rotor pali



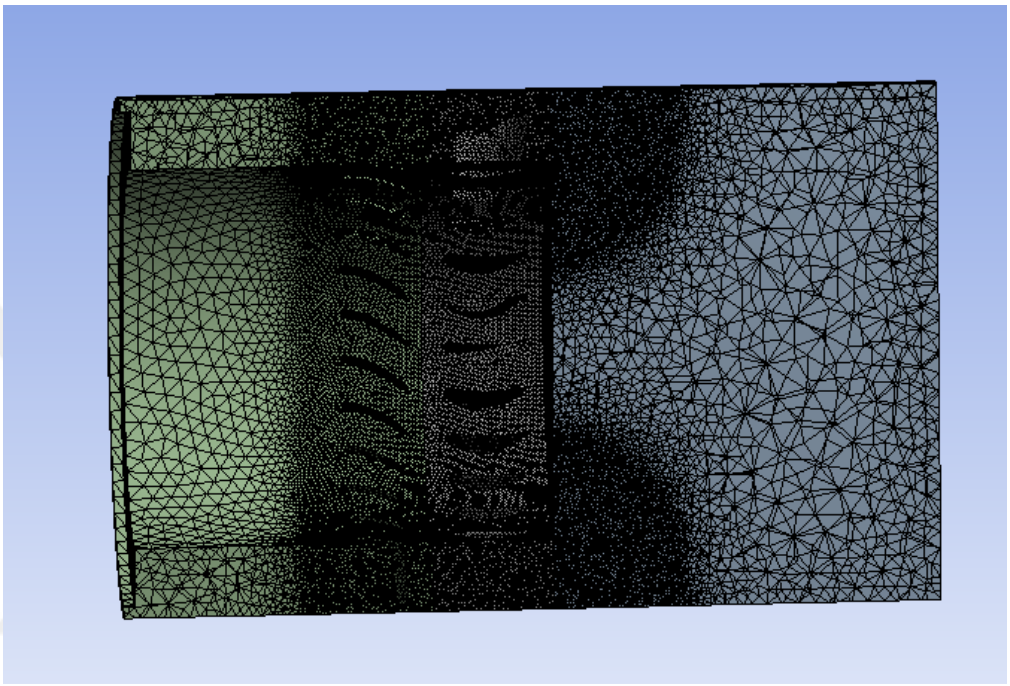
Şekil 5.2. 10 derece stagger açılı rotor kademesi



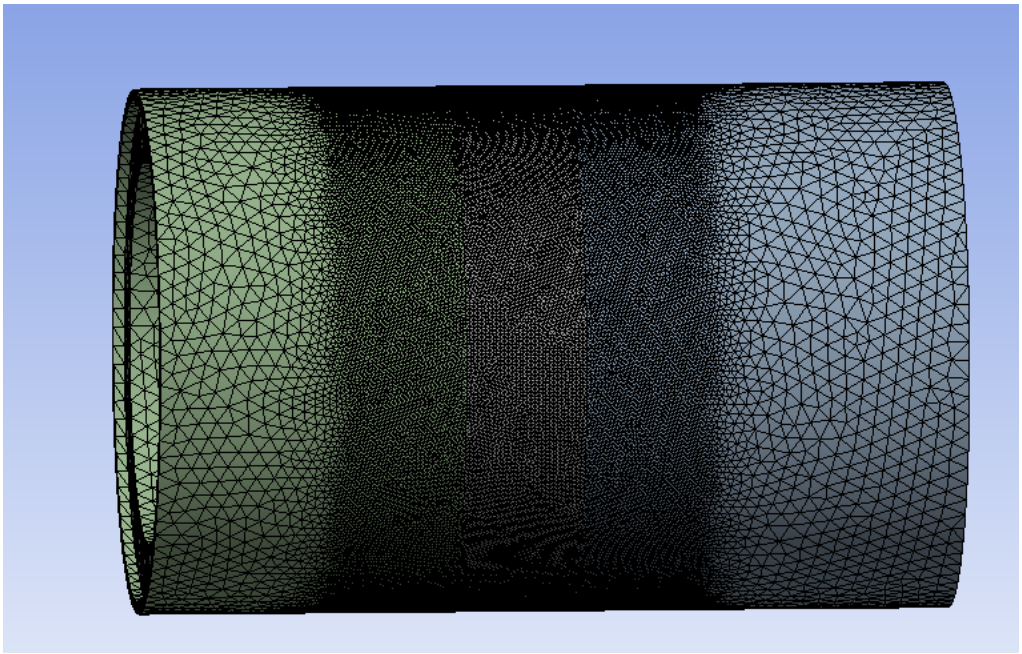
Şekil 5.3. 10 derece stagger açılı rotor ve stator kademesi

5.2.1. Mesh yapısı

Ağ düğüm sayısı doğrulamadaki metotlar seçilerek verilerin alındığı ilgili alanlar üzerinde yoğunlaştırılmış ve 4526545 element sayısı ile mesh aşaması tamamlanmıştır.

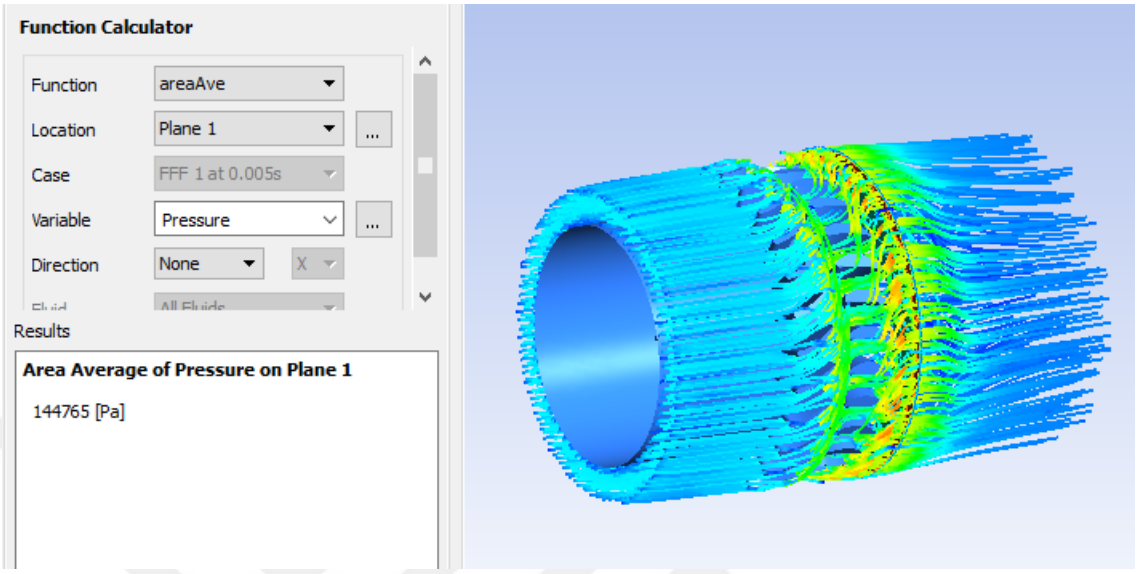


Şekil 5.4. Türbin kesiti mesh dağılımı

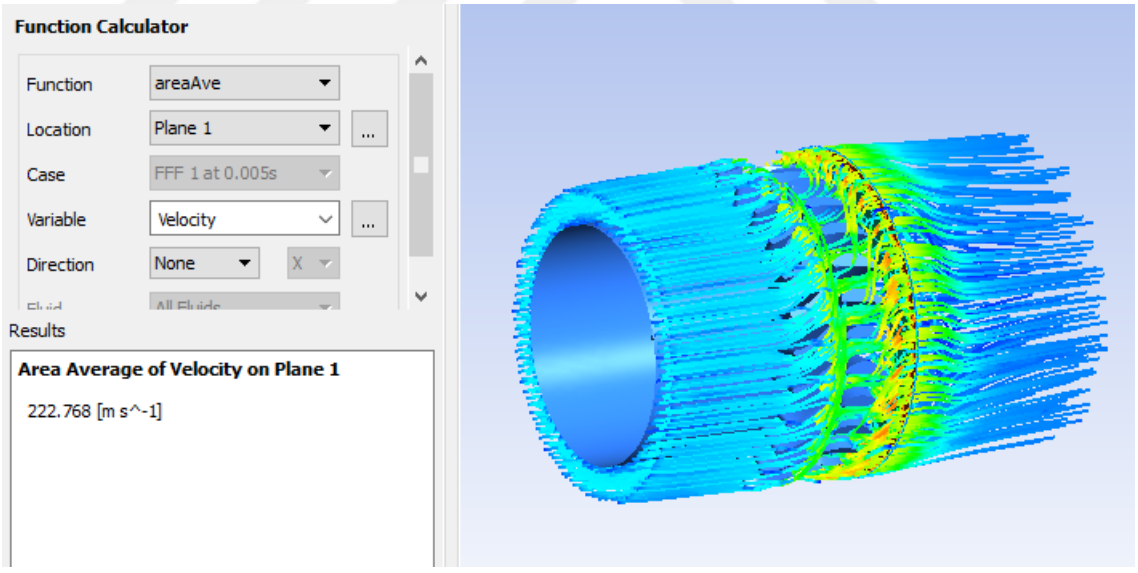


Şekil 5.5. Mesh dağılımı

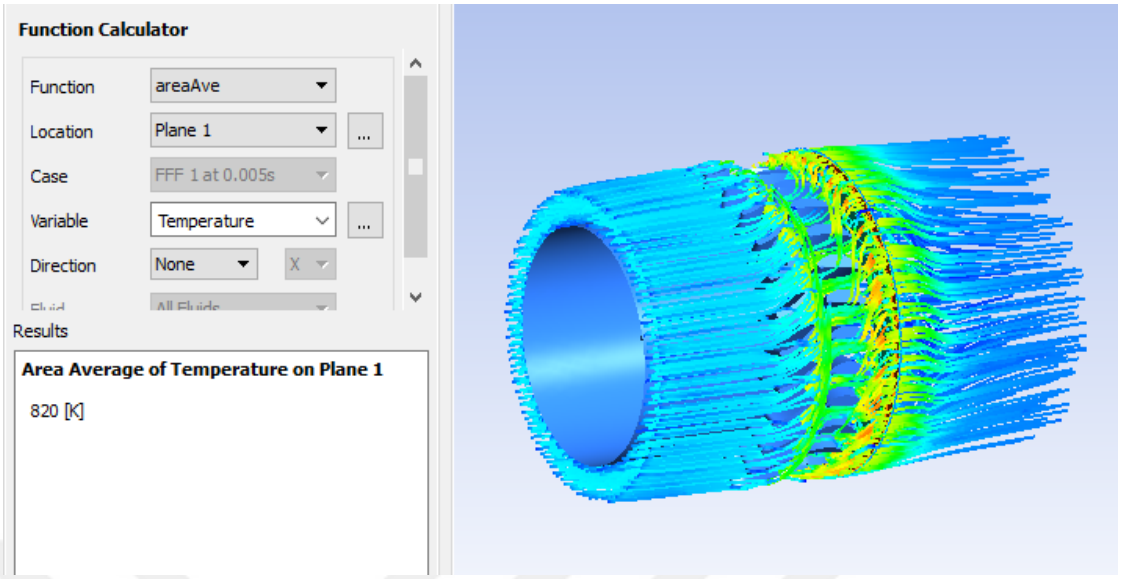
5.2.2. Çözümleme Sonuçları



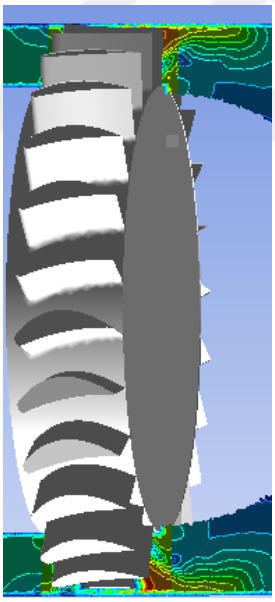
Şekil 5.6. Türbin çıkışı plane ortalama basıncı



Şekil 5.7. Türbin çıkışı plane ortalama hızı



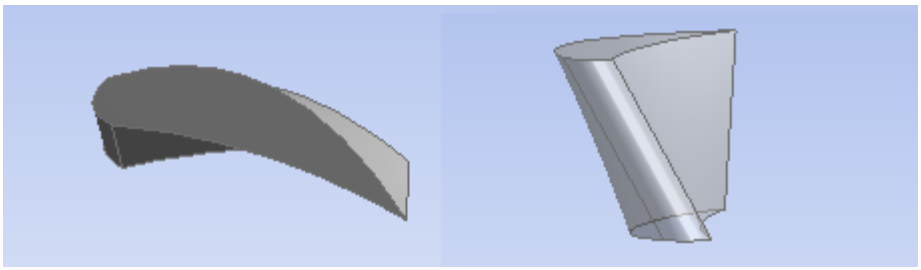
Şekil 5.8. Türbin çıkışı plane ortalama sıcaklığı



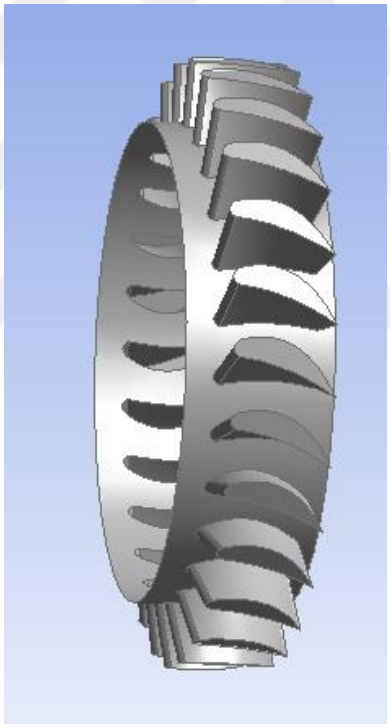
Şekil 5.9. Stagger açısıyla birlikte blade kök ve uç hız farkı

Stagger açısıyla birlikte oluşturulan rotor bıçaklarının uç kısmının Reaction tip türbine çevrilmesiyle birlikte daralan bir yapı elde edilmiştir. Elde edilen bu daralan yapı sayesinde bıçağın uç kısımlarına doğru hava hızının attığı bu sayede ivmelenen havanın rotorun çevrilmesine katkı sağladığı tespit edilmiştir (Şekil 5.9).

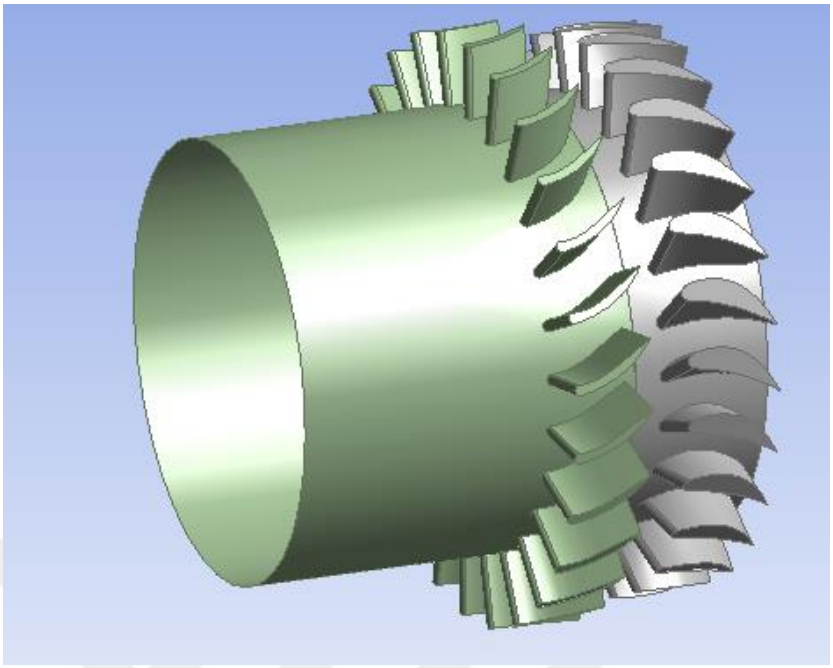
5.3. 20 Derece Stagger Açılı Türbin Geometrisi



Şekil 5.10. 20 derece stagger açılı rotor pali



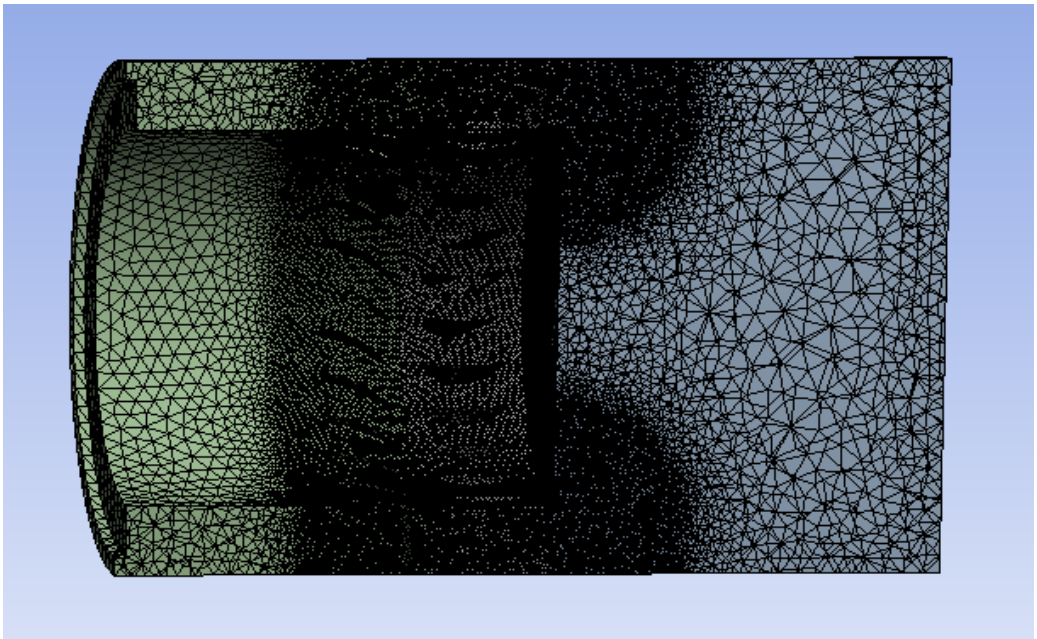
Şekil 5.11. 20 derece stagger açılı rotor kademesi



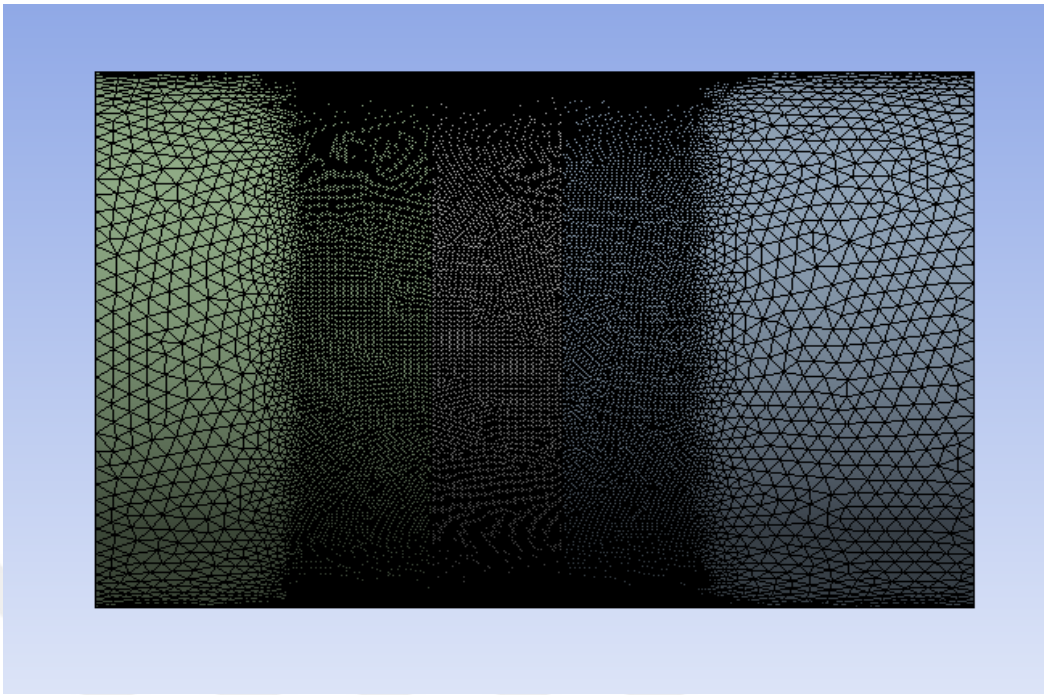
Şekil 5.12. 20 derece stagger açılı rotor ve stator kademesi

5.3.1 Mesh yapısı

Ağ düğüm sayısı doğrulamadaki metotlar seçilerek verilerin alındığı ilgili alanlar üzerinde yoğunlaştırılmış ve 4525215 element sayısı ile mesh aşaması tamamlanmıştır.

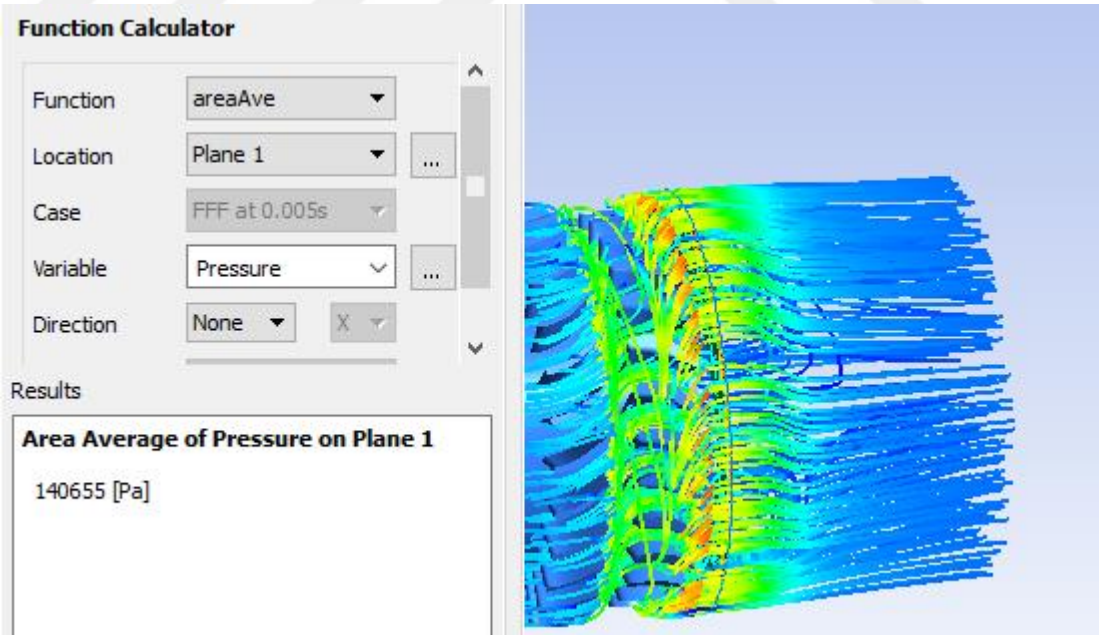


Şekil 5.13. Türbin kesiti mesh dağılımı

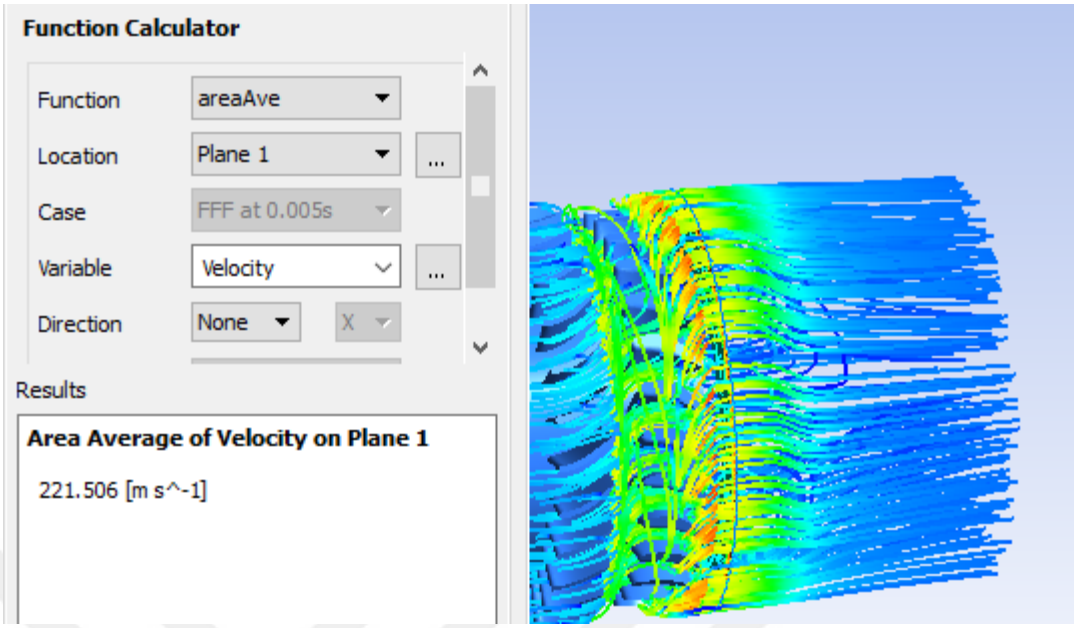


Şekil 5.14. Mesh dağılımı

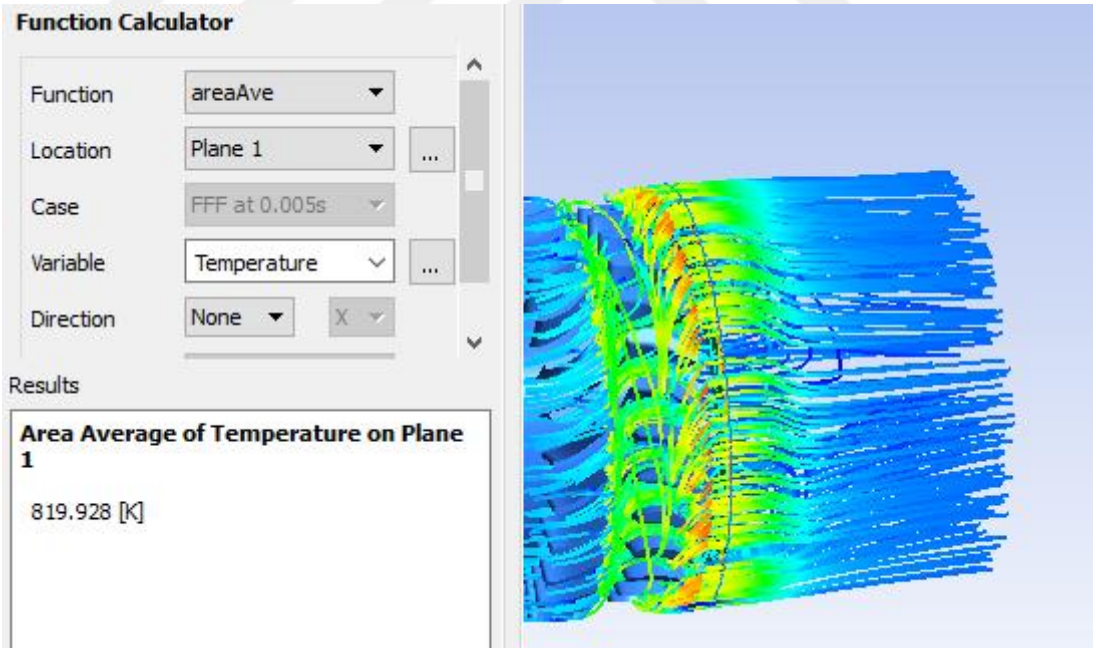
5.3.2. Çözümleme Sonuçları



Şekil 5.15. Türbin çıkışı plane ortalama basıncı



Şekil 5.16. Türbin çıkışı plane ortalama hızı

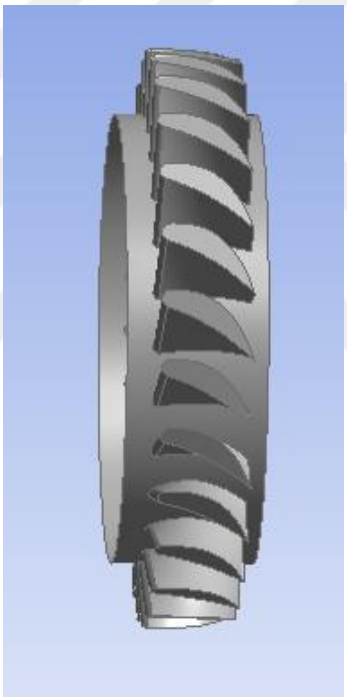


Şekil 5.17. Türbin çıkışı plane ortalama sıcaklığı

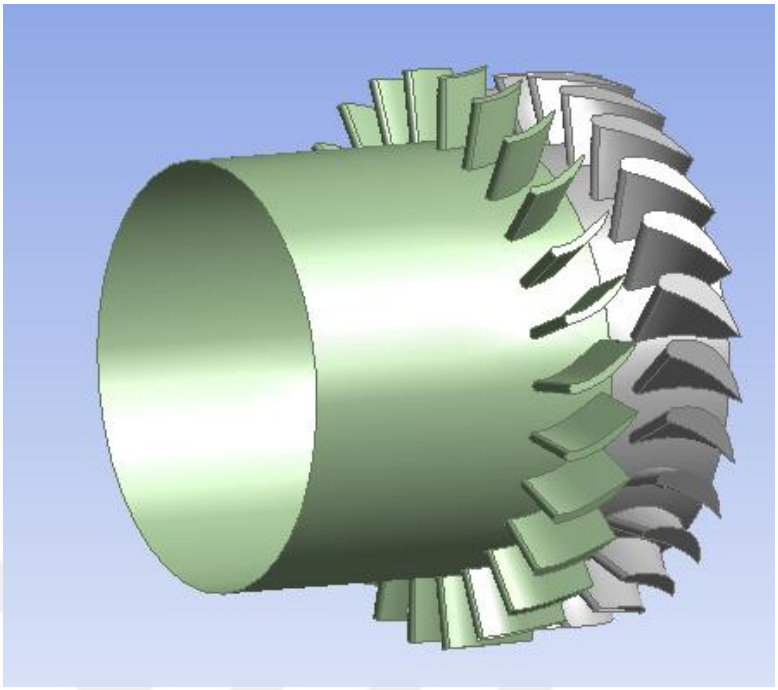
5.4. 30 Derece Stagger Açılı Türbin Geometrisi



Şekil 5.18. 30 derece stagger açılı rotor pali



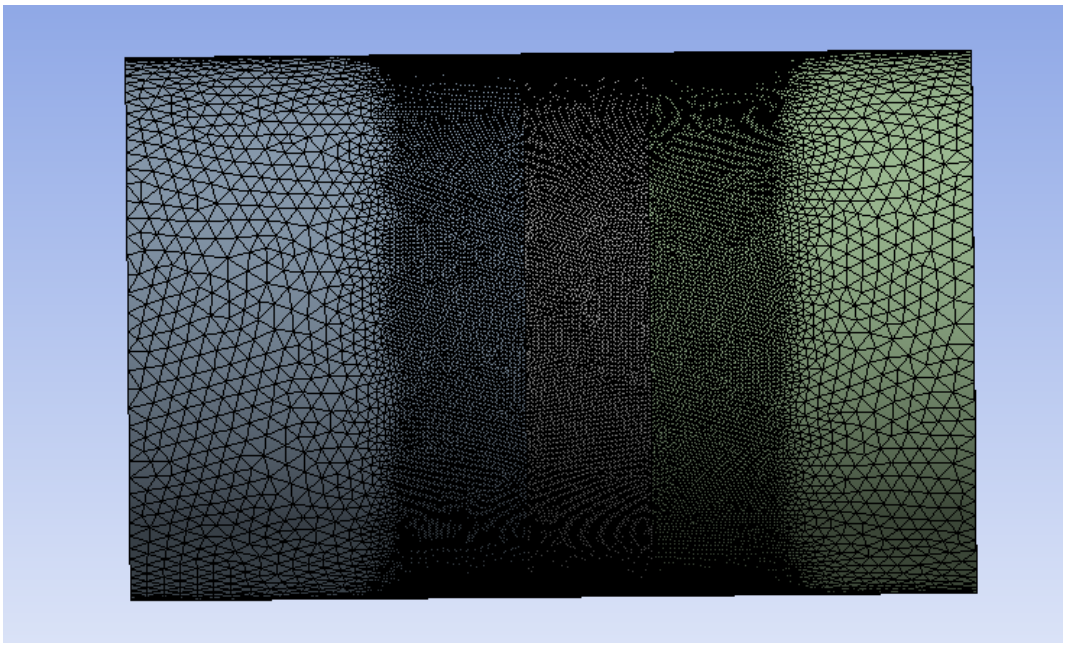
Şekil 5.19. 30 derece stagger açılı rotor kademesi



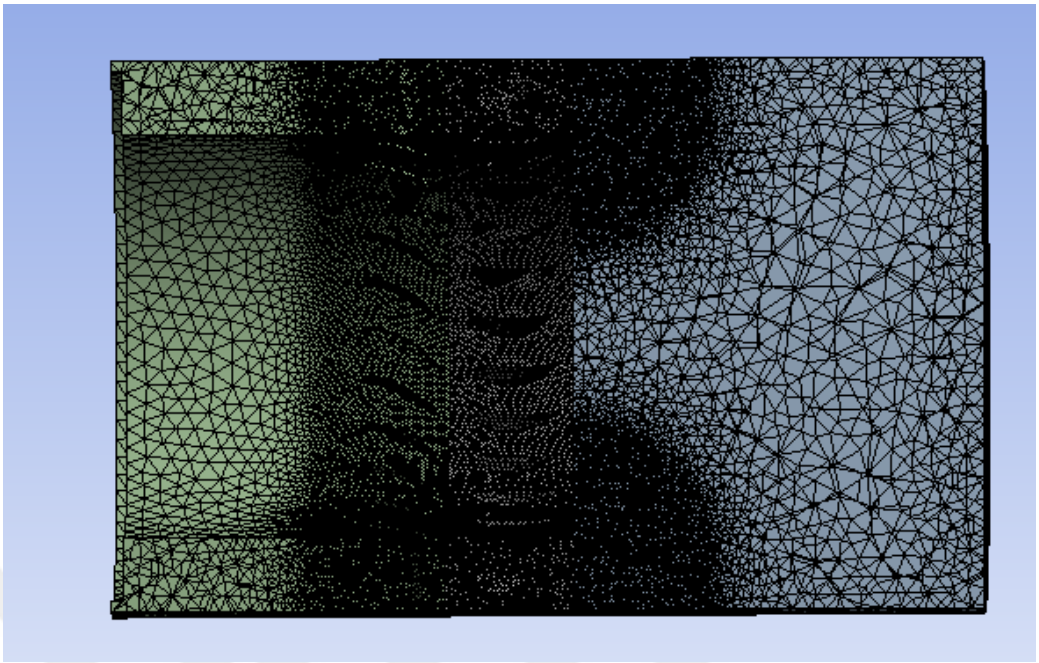
Şekil 5.20. 30 derece stagger açılı rotor ve stator kademesi

5.4.1 Mesh yapısı

Ağ düğüm sayısı doğrulamadaki metotlar seçilerek verilerin alındığı ilgili alanlar üzerinde yoğunlaştırılmış ve 4521498 element sayısı ile mesh aşaması tamamlanmıştır.

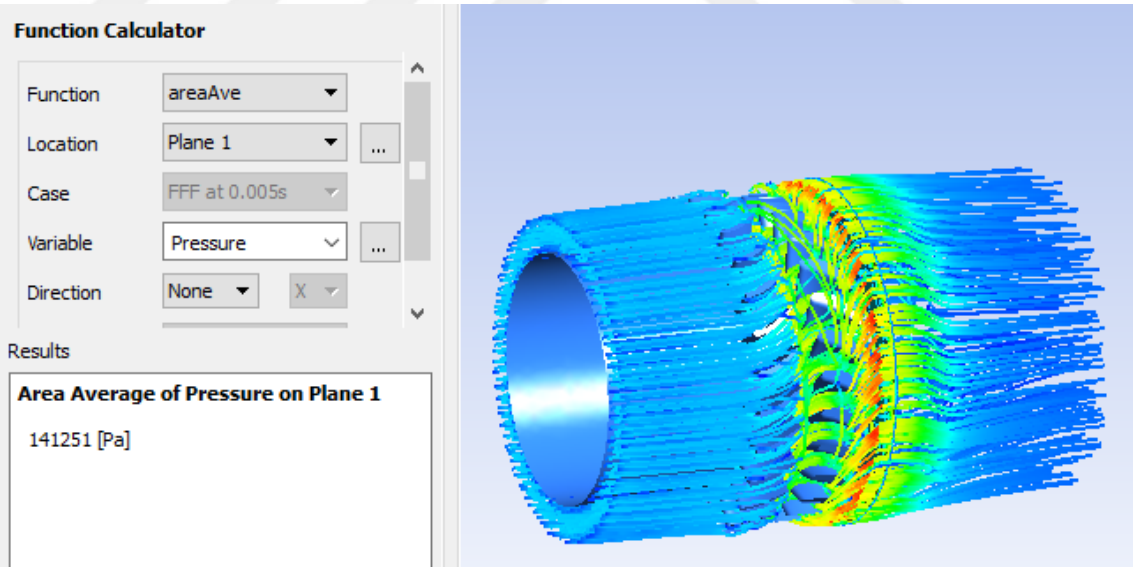


Şekil 5.21. Mesh dağılımı

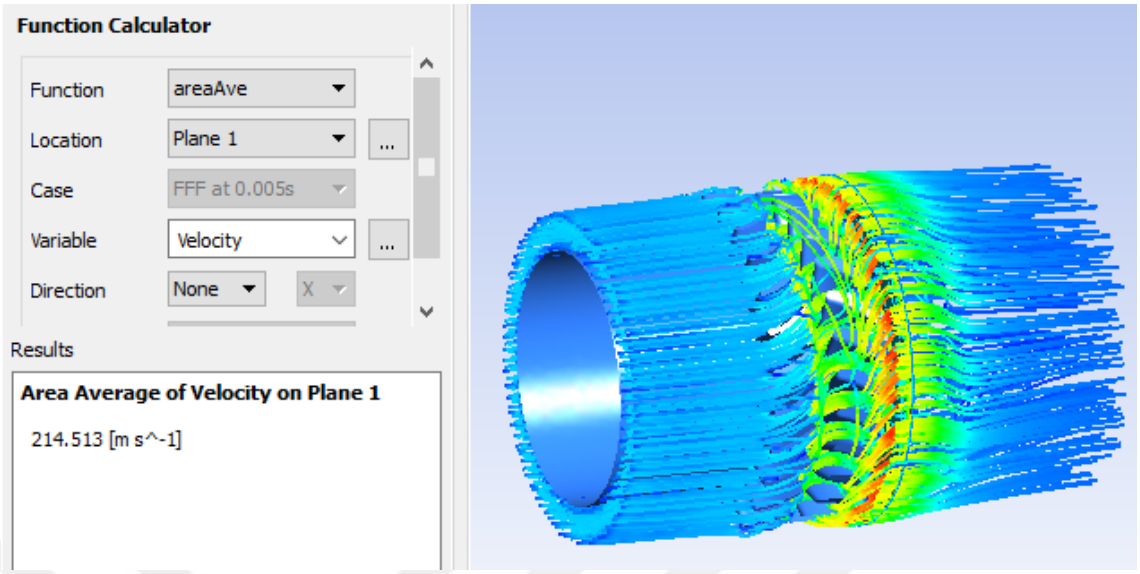


Şekil 5.22. Türbin kesiti mesh dağılımı

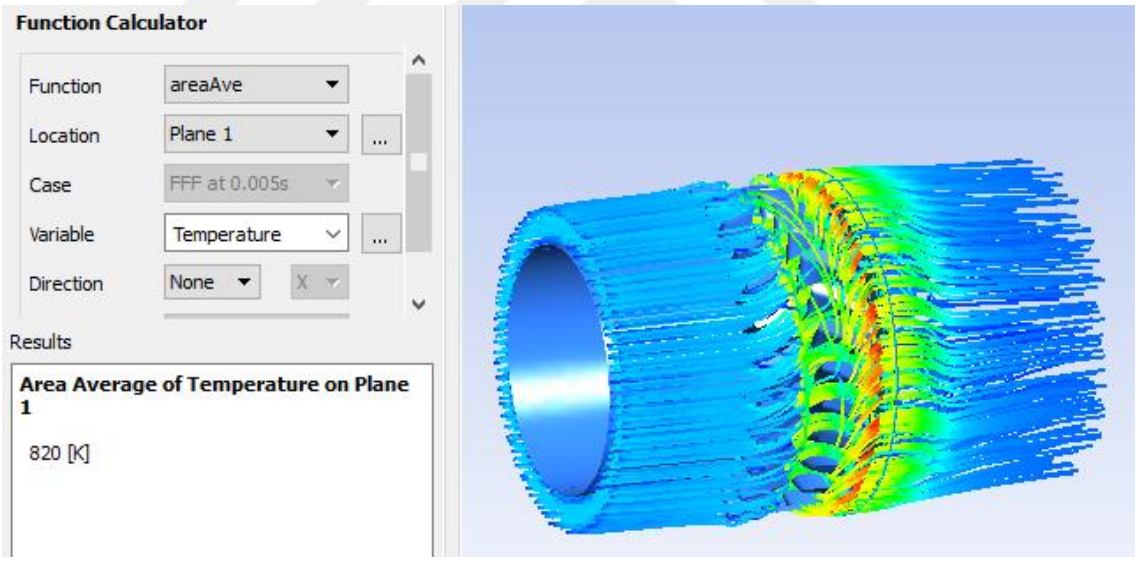
5.4.2 Çözümleme Sonuçları



Şekil 5.23. Türbin çıkışı plane ortalama basıncı



Şekil 5.24. Türbin çıkışı plane ortalama hızı



Şekil 5.25. Türbin çıkışı plane ortalama sıcaklığı

Yukarıdaki şekillerde de gösterildiği üzere elde edilen çıkış hız, basınç ve sıcaklık verileri Tablo 6.1 üzerinde verilmiştir.

6. BÖLÜM

SONUÇ, KARŞILAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRME

6.1.Sonuçlar ve Karşılaştırma

Tablo 6.1 Stagger açısı değiştirildikten sonra elde edilen çıkış parametreleri

	Basınç (kPa)	Hız(m/s)	Sıcaklık(K)
0 derece	161	187,771	805
10 derece	144	222,760	820
20 derece	140	221,513	819
30 derece	141	214,513	820

Tablo 6.2 Stagger açısına göre izantropik verim sonuçları

Stagger açısı	**İzantropik verim**
0 derece	%29,30
10 derece	%36,36
20 derece	%32,72
30 derece	%32,92

Yapılan çalışmalar ve analizler ile elde edilen veriler ışığında;

- Bu verilere göre türbin çıkışındaki toplam basınç orijinal türbinde 169547 Pa iken 10 dereceli stagger açılı türbinde 177178 Pa elde edilmiştir. 20 derece stagger açılı türbinde toplam verimin 176548 Pa , 30 derece de ise 176410 Pa olduğu tespit edilmiştir.

- Önceki bölümlerde açıklandığı üzere basınç ve sıcaklık verileri kullanılarak izantropik verim hesaplanmıştır. Tablo 6.2'de gösterildiği gibi orijinal stagger açısı ile iş elde edildiğinde izantropik verim %29,3 olduğu tespit edilmiştir. 10 derece stagger açısı ile elde edilen sonuçlarda izantropik verim %36,36'ya yükselmiştir. 20 derecelik stagger açısında da 10 dereceye nazaran bir miktar düştüğü ve verimin %32,72 olduğu tespit edilmiştir.
  30 derecelik açı ile yapılan çözümlemede ise 20 dereceli türbin verimine neredeyse eşit olduğu ve verimin %32,92 olduğu hesaplanmıştır.

Bu verim artışının beraberinde basıncın hıza dönüştüğü bunun sonucunda da hızın arttığı gözlemlenmiştir.

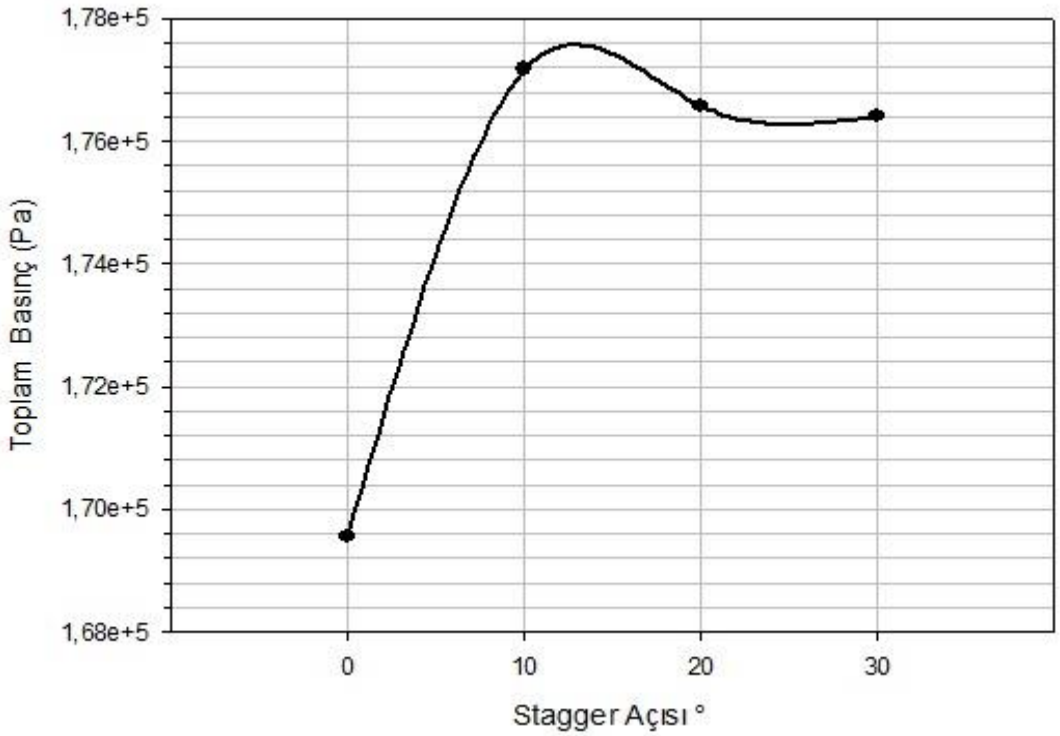
- 10 derece stagger açısıyla yapılan analizde 125 m/s ile sisteme giriş yapan havanın hızı 222 m/s ile rotordan çıkmıştır. Hız artışı %49'dan %19 artarak %78'e yükselmiştir.
- 20 derece stagger açısıyla yapılan analizde 125 m/s ile sisteme giriş yapan hava 221 m/s ile rotordan çıkmıştır. Hız artışı %49'dan %77'ye yükselmiştir.
- 30 derece stagger açısıyla yapılan analizde 125 m/s ile sisteme giriş yapan havanın hızı 214 m/s'ye yükselmiştir. Hız artışı %49 dan %71'e yükselmiştir.

Newton'un III. kanununa göre etki tepkiden yararlanılarak üretilen itkinin artışı, havanın ivmelendirmesi ile ilişkili olduğu diğer bölümlerde açıklanmıştır. Türbin motor içerisinde dönü hareketinin oluşturulması aynı zamanda havayı ivmelendirerek itkinin oluşumunu sağlamaktadır.

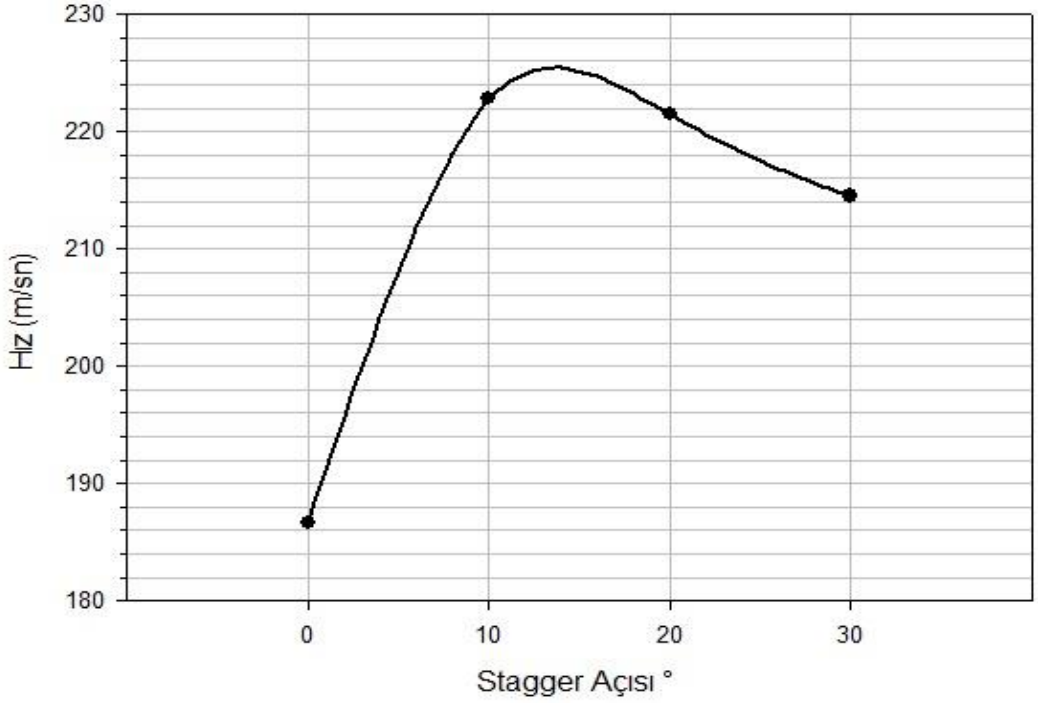
Bu yüzdelik dilimlerin değerlendirilmesi sonucunda izantropik verimin artışıyla birlikte hızın gözle görülebilir düzeyde artışı türbinin itkiye sağladığı faydanın arttığını ve egzozdan çıkan gazın daha ivmeli bir şekilde motoru terk etmesi sağlanarak itkiye katkıda söylenebilmektedir.

Şekil 6.1'de gösterildiği gibi hızın 222 m/s ile orijinal açıda dahil olmak üzere 20 ve 30 dereceye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 6.4'te izantropik verimin maksimum olduğu açının 10 derece olduğu tespit edilmiştir.

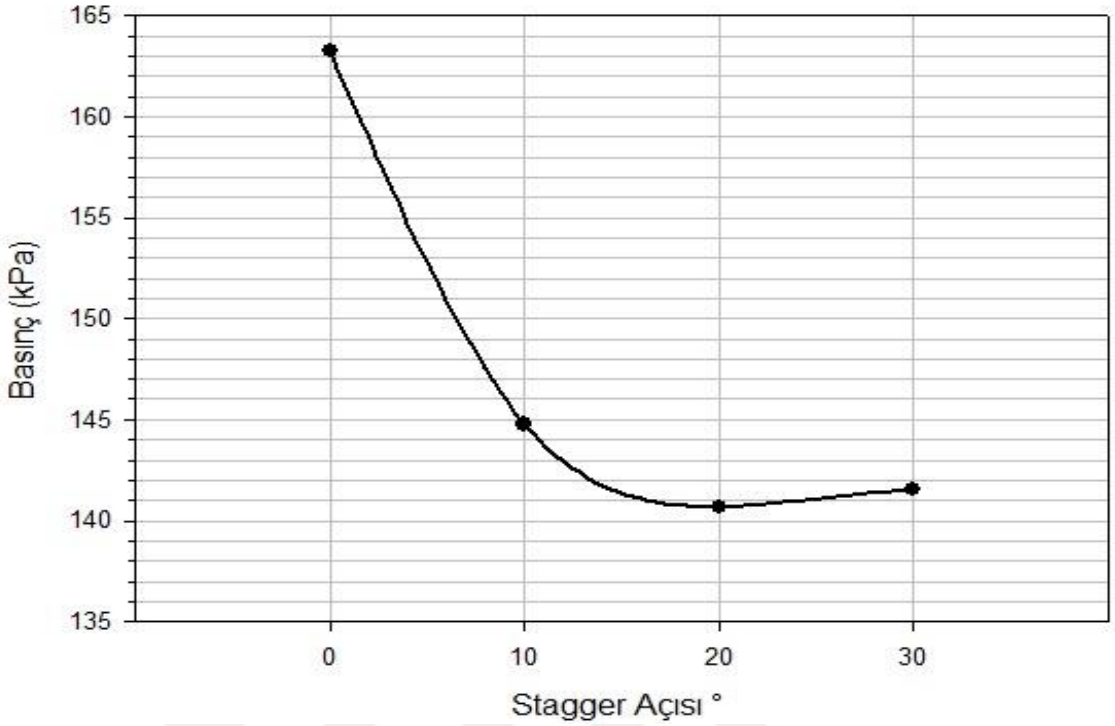
Bu karşılaştırmalar ile birlikte 10 derecelik stagger açısı ile tasarımın yapılması 0, 20 ve 30 dereceye göre verimin daha fazla olduğu aynı zamanda itkiye daha fazla katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.



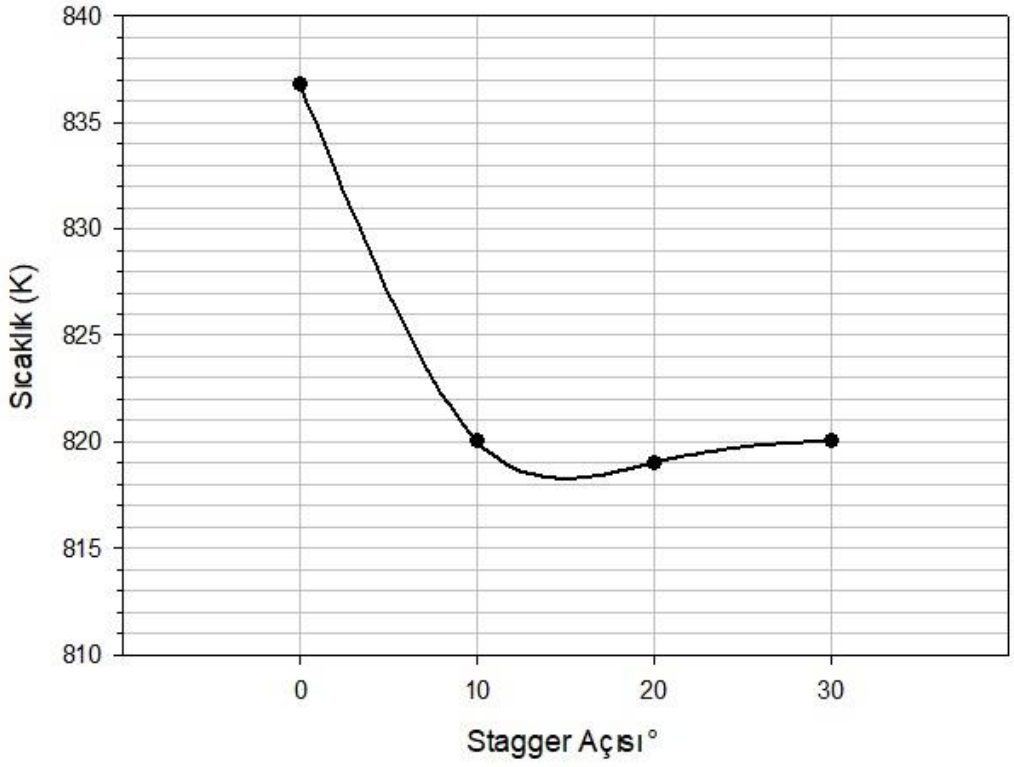
Şekil 6.1. Stagger açısına göre rotor çıkışı toplam basınç değişimi



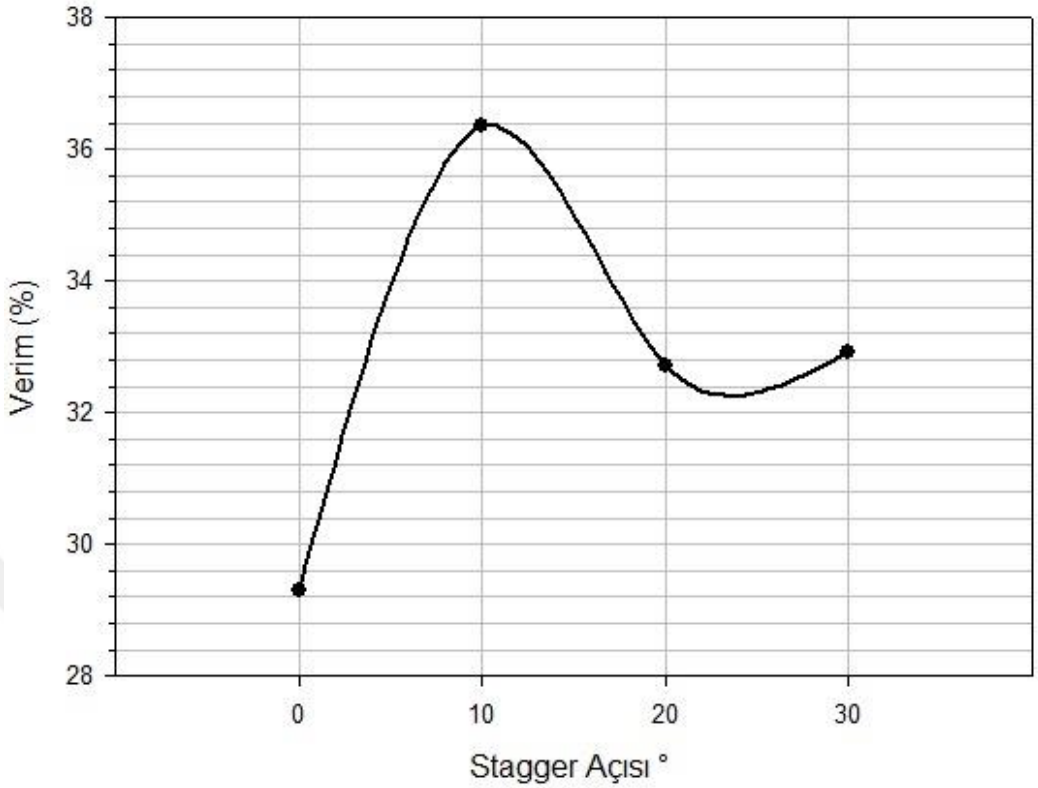
Şekil 6.2. Pal çıkışlarındaki hız değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.3. Pal çıkışlarındaki basınç değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.4. Pal çıkışlarındaki sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.5. Stagger açısı değişiminin verimliliğe etkisi

6.2. Öneriler

Yapılan çalışmaya ek olarak aşağıdaki öneriler de gelecekte yapılacak benzer çalışmalara katkısı olacaktır.

- Stator vanelerinin stagger açısı değiştirilerek rotor çıkış değerleri gözlemlenerek verimlilik karşılaştırması yapılabilir.
- Akış analizinin bir diğer yöntemi olan deneysel analiz değerlendirilebilir ve tasarlanan katı modeller üretilen bir motor üzerinde değiştirilerek analiz sonuçları elde edilebilir.
- Rotor bladelerinin stagger açısı ile birlikte hücum açısı da değiştirilerek çözümlemeler yapılarak en verimli açısı saptanabilir.

KAYNAKÇA

1. Giampaolo A. 2006. **Gas Turbine Handbook: Principles and Practices.** *Third Edition, The Fairmont Press.*, U.S.A.

2. Özkan D. 2009. **Gaz Türbini Çalışma Donanımlarının İncelenmesi, AxStream Programı ile Eksenel Akışlı Kompresör ve Türbin Dizaynı-Analizi**, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.

3. Toprak S. 2007. **Gaz Türbin Kanatlarının Soğutulmasının Önemi ve Soğutma Yöntemlerinin İncelenmesi**, Trakya Üniversitesi, Edirne.

4. Sezerkan E. 2014. 3d **Radıal Inflow Turbıne Desıgn And Analysıs For A Small Scale Orc Applıcatıon**, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

5. Kaçar E. N. 2017. **Havacılık Motoru Türbin Disk Boşluğunun Sonlu Hacim ve Sonlu Elemanlar Modellerinin Bütünleşik Çözüm Tekniği Kullanılarak Termohidrolik Analizi**, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

6. Günaltılı E. 2018. HAD **Kullanarak Kanatçık Dizaynı ve Optimizasyonu**, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

7. Rodgers, C., 2001**. Turbofan Design Options for Mini** *UAV's, 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit.*

8. Braembussche V. D., 2005**. R. Micro Gas Turbines – A Short Survey of Design Problems**. Notes.

9. Chen F, Fu Y, Yu J, Song Y.2019**, Effect of clearance height on tip leakage flow reduced by a honeycomb tip in a turbine cascade. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,** *Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2019;233(10):3564-3576.*

10. Bammert K, Sandstede H. 1976**. Influences of manufacturing tolerances and surface roughness of blades on the performance of turbines. J Eng Gas Turbines Power** .

11. Vahdati M, Sayma AI, Imregun M, 2007**. Multiblade row forced response modeling in axial-flow core compressors. J Turbomach.**

12. Dutczak J., 2016. **Micro turbine engines for drones propulsion,** *IOP Conf. Ser., Mater. Sci. Eng. 148 2016 012063.*

13. Putra A. Hartono F. 2018. Design of Single Stage Axial Turbine with Constant Nozzle Angle Blading for Small Turbojet J. Phys.: Conf. Ser. 1005 012026 Medan, Indonesia.

14. Ennil A. B., Al-Dadah R., Mahmoud S., Rahbar K., 2016. **Development of micro-scale axial and radial turbines for low-temperature heat source driven organic Rankine cycle** Ayad AlJubori School of Mechanical Engineering, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15-2TT, United Kingdom,

15. Culley D., Garg S., 2009. **More Intelligent Gas Turbine Engines** *Vehicle Technology (AVT) Panel Task Group 128.*

16. Nilson P., 2016. **A Study on thr ımpact of Blade Tolerances on Turbine Performance**, Chalmers University of technology, Gothenburg.

17. Schluter J. U., Wu X., Kim S., Alonso J. J., Pitsch H., 2004. **Integrated RANS-LES Computations in Gas Turbines: Compressor-Diffusor Coupling**, Stanford University.

18. Turan Ö., 2012. **İnsansız hava aracı uygulamaları için küçük turbojet motoru üzerindeki bazı tasarım parametrelerinin ekserjetik etkileri**, *Energy 46 2012 51–61.*

19. Cao Y., Gao Y., Zheng Y., Dai Y.,2016. **Optimum design and thermodynamic analysis of a gas turbine and ORC combined cycle with recuperators**, *Energy Convers. Manag. 116 2016 32–41*

20. Silva V.V.R., Khatib W., Fleming P.J., 2005. Performance optimization of gas turbine engine, *Eng. Appl. Artif. Intell. 18 (5) 2005 575–583.*

21. Macisaac B, Langton R. 2011. Gas Turbine Propulsion Systems**.** *Chichester, UK: Wiley.*

22. Alonzo D., Crocker A., James E., Kingston J., 2018. **Design and Manufacturing of a Miniature Turbojet Engine**, ABD.

23. Hunecke K., 1997. Jet Engines: Fundamentals of Theory Design and Operation. *Osceola, WI: Motorbooks International Publishers & Wholesalers.*

24. Taspia C., Mohsin F., Tonni M., Mita M., Ehsan M., 2023. **A critical review on gas turbine cooling performance and failure analysis of turbine blades** , Bangladesh

25. Ceylan V., Özgür A. E., 2021, **Süperkritik Brayton Çevriminin Termodinamik Analizi**, Avrasya Üniversitesi.

26. Kang S. H., 2012. **Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid**, Korea.

27. Muller N., Akbari, P., 2003. Performance Investigation of Small Gas Turbine Engines Topped with Wave Rotors, *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit.*

28. Guha A., 2001. **Optimization of Aero Gas Turbine Engines,** *The Aeronautical Journal, 105, 1049, 345-358, 2001.*

29. Çetin B., 2006. **Gaz Türbinlerinin Optimal Performans Analizi**, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi.

30. Ata S., 2020. **Düşük Kapasiteli DEĞK ISI KAYNAKLI, Akışkanlı ve Konfigürasyonlu Organik Rankine Çevrimlerinin Tasarımı ve Termodinamik Optimizasyonu,** Konya.

31. Taştan M., 2011. **Eksenle kompresörün üç boyutlu sayısıal incelenmesi**, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

32. Alabaş H. A., 2019. **Helikopter Rotoru Etrafında Oluşan Akışın Gemi İz Bölgeleriyle Etkileşiminin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Analizi**, MSÜ,

33. Olsen N. 2000. **CFD algorithms for hydraulic engineering. Department of Hydraulic and Environmental Engineering**, The Norvegian University of Science and Technology.

34. Bayraktar S., 2008. **Çapraz Akıştaki Türbülanslı Jet Akışlarının Deneysel ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi,** Yıldız teknik üniversitesi, İstanbul

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Yusuf Sergen Taşcı
Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde Motor Bakım, Kayseri	2019
Lise	Şeker Anadolu Lisesi, Kayseri	2014

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2021-Halen	Kapadokya Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2019-2021	THY Teknik Aş.	Uçak Bakım Teknisyeni

YABANCI DİL

İngilizce