

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KANAL İÇERİSİNDE RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE
HAD ANALİZİ İLE KANAL PROFİLİNİN TÜRBİN PERFORMANSINA
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yiğitcan GÜLSOY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı-Akışkan Programı

NİSAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KANAL İÇERİSİNDE RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE
HAD ANALİZİ İLE KANAL PROFİLİNİN TÜRBİN PERFORMANSINA
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Yiğitcan GÜLSOY
(503151136)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı-Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Levent KAVURMACIOĞLU

NİSAN 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503151136 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Yiğitcan GÜLSOY, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KANAL İÇERİSİNDE RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE HAD ANALİZİ İLE KANAL PROFİLİNİN TÜRBİN PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr.Üyesi Levent KAVURMACIOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Kadir KIRKKÖPRÜ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Emre ALPMAN
Marmara Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Mart 2018**
Savunma Tarihi : **5 Nisan 2018**





Aileme,



ÖNSÖZ

Tez çalışmamda bana her türlü konuda destek olup yönlendiren ve lisansüstü eğitimim boyunca her konuda yardımcı olan çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Levent Ali KAVURMACIOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Desteklerini hiç mahrum bırakmadan hayatım boyunca her konuda bana yardımcı olan annem Münevver GÜLSOY ve babam Erdoğan GÜLSOY'a her zaman yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ediyorum.

Nisan 2018

Yiğitcan GÜLSOY
(Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|-----------|
| ÖNSÖZ..... | vii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| KISALTMALAR | xi |
| SEMBOL LİSTESİ..... | xiii |
| ALT İNDİS LİSTESİ..... | xv |
| ÇİZELGE LİSTESİ..... | xvii |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | xix |
| ÖZET..... | xxiii |
| SUMMARY | xxv |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Tezin Amacı | 2 |
| 1.2. Literatür | 2 |
| 2. RÜZGAR TÜRBİNLERİ | 13 |
| 2.1. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri | 13 |
| 2.2. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri..... | 14 |
| 2.3. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Bileşenleri | 14 |
| 2.3.1. Türbin kanatları ve rotor | 14 |
| 2.3.2. Kule | 15 |
| 2.3.3. Motor yuvası | 15 |
| 2.3.4. Dişli kutusu | 15 |
| 2.3.5. Jeneratör | 16 |
| 3. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TEORİSİ..... | 17 |
| 3.1. Momentum Disk Teorisi ve Betz Limit | 17 |
| 3.2. Kanat Profili Terminolojisi | 24 |
| 3.3. Kanat Profili ve Kanat Elemanı Teorisi | 25 |
| 3.3.1. Betz kanat teorisi | 28 |
| 3.3.2. Schmitz kanat teorisi | 30 |
| 3.4. Kaldırma Hattı Teorisi | 33 |
| 3.5. Kanat Uç Hızı Oranı Etkisi | 36 |
| 3.6. Rüzgar Türbini Performans Karakteristiği | 37 |
| 4. RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI | 41 |
| 4.1. Tasarım Parametrelerinin ve Kanat Profillerinin Belirlenmesi | 41 |
| 4.2. Kanat Tasarımı | 43 |
| 4.3. QBlade Rotor Tasarımı ve Analizleri..... | 45 |
| 4.4. Rüzgar Türbininin Modellenmesi | 51 |
| 4.5. HAD Analizleri | 52 |
| 4.5.1. Geometrik alanların oluşturulması | 52 |
| 4.5.2. Ağ yapısının oluşturulması | 53 |
| 4.5.3. HAD analiz sonuçları | 54 |

| | |
|---|------------|
| 5. KANAL İÇERİSİNDE YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI | 63 |
| 5.1. Bezier Eğrileri Teorisi | 63 |
| 5.2. Çoklu Hedef Optimizasyonu | 65 |
| 5.2.1. Pareto çözüm seti..... | 66 |
| 5.2.2. Genetik algoritma metodu | 67 |
| 5.3. Kanal Profilinin Tasarımı | 70 |
| 5.4. Kanal İçerisinde Rüzgar Türbini HAD Analizleri..... | 74 |
| 5.4.1. Analiz modelinin ve ağ yapısının oluşturulması | 74 |
| 5.4.2. Ağ yapısının kalitesinin incelenmesi | 76 |
| 5.4.3. Farklı kanal profillerinin performansa etkileri | 77 |
| 5.4.4. Kanal ve rotor arası boşluğun performansa etkileri | 83 |
| 5.4.5. Rotor pozisyonunun performansa etkileri | 87 |
| 5.4.6. Kısmi kanal uygulanmasının performansa etkileri..... | 91 |
| 5.4.7. Kanalın rotor referanslı açısının performansa etkisi | 95 |
| 5.4.8. HAD simülasyon metodunun incelenmesi | 100 |
| 6. DEĞERLENDİRMELER..... | 101 |
| 7. ÖNERİLER..... | 105 |
| KAYNAKLAR..... | 107 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 111 |

KISALTMALAR

| | |
|---------------|--|
| YERT | : Yatay Eksenli Rüzgar Türbini |
| MDT | : Momentum Disk Teorisi |
| KET | : Kanat Eleman Teorisi |
| KHT | : Kaldırma Hattı Teorisi |
| HAD | : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği |
| CFD | : Computational Fluid Dynamics |
| GAO | : Genetik Algoritma Optimizasyon |
| K-YERT | : Kanal İçersinde Yatay Eksenli Rüzgar Türbini |



SEMBOL LİSTESİ

| | |
|---------------------|---|
| ρ | : Yoğunluk (kg/ m^3) |
| \dot{m} | : Kütleli debi (kg/s) |
| ω | : Rotor açısal hızı |
| A | : Akışkan kesit alanı / Rotor tarama alanı (m^2) |
| R | : Rotor yarıçapı (m) |
| r | : Rotor radyal pozisyonu (m) |
| P_0 | : Serbest akış basıncı (Pa) |
| P_{D1} | : Referans disk alanı giriş basıncı(Pa) |
| P_{D2} | : Referans disk alanı çıkış basıncı (Pa) |
| ΔP | : Basınç farkı (Pa) |
| $D1$ | : Referans disk alanı girişi |
| $D2$ | : Referans disk alanı çıkışı |
| U_D | : Referans disk alanı hızı (m/s) |
| U_{ref} | : Serbest akış rüzgar hızı (m/s) |
| $U_{\text{çıkış}}$ | : Kontrol hacmi çıkışı rüzgar hızı (m/s) |
| U_R | : Rotor teğetsel hızı (m/s) |
| V | : Bağlı rüzgar hızı (m/s) |
| $P_{\text{Türbin}}$ | : Türbin gücü (W) |
| T | : İtke (N) |
| E_R | : Rüzgar kinetik enerjisi ($\text{kg m}^2/\text{s}^2$) |
| C_P | : Türbin güç katsayısı |
| C_T | : Türbin itki katsayısı |
| c_p | : Basınç katsayısı |
| F_D | : Sürüklenme kuvveti |
| F_L | : Kaldırma kuvveti |
| C_D | : Sürüklenme katsayısı |
| C_L | : Kaldırma katsayısı |
| k_v | : Kontrol hacmi rüzgar hızı azalma katsayısı |
| F | : Rotor üzerine etkiyen net kuvvet (N) |
| a | : İvme (m/s^2) |

| | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| M | : Rotor torku (N) |
| c_p | : Basınç Katsayısı |
| λ | : Kanat uç hızı oranı |
| α | : Hücüm açısı (rad) |
| β | : Kanat yükselme açısı (rad) |
| ϕ | : Bağlı rüzgar açısı (rad) |
| c | : Kanat giriş uzunluğu (m) |
| t | : kanat profil kalınlığı (m) |
| Γ | : Kaldırma hattı dolaşım yoğunluğu |
| w | : Vorteks aşağı yönlü hızı |



ALT İNDİS LİSTESİ

| | |
|----------------|---|
| 1, 2 | : Disk alanı girişı, kanat çıkışı |
| x, y, z | : Kartezyen koordinat düzlemi konum eksenleri |
| t | : Türbine ait |
| R | : Rüzgara ait |
| ref | : Serbest akışa ait |
| çıkış | : Kontrol hacmi çıkışı |
| L | : Kaldırma etkisi |
| D | : Sürüklenme etkisi |



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|-----------|
| Çizelge 4.1 : NREL S833, S834 ve S835 profilleri aerodinamik karakteristikler. | 41 |
| Çizelge 4.2 : Kanat profillerinin kullandıkları radyal pozisyon aralıkları. | 42 |
| Çizelge 4.3 : Profiller için maksimum C_l/C_d değerlerindeki hücum açısı ve $C_{l,d}$ | 44 |
| Çizelge 4.4 : HAD analiz sonuçları. | 55 |
| Çizelge 5.1 : Genetik algoritma, Bezier eğrisi kontrol noktaları sınırları. | 71 |
| Çizelge 5.2 : HAD analizi gerçekleştirilen kanallı rüzgar türbini geometrileri. | 76 |
| Çizelge 5.3 : Ağ kalitesi inceleme tablosu. | 77 |
| Çizelge 5.4 : Geometri-1 ve Geometri-2 için ulaşılan HAD analiz sonuçları. | 84 |
| Çizelge 5.5 : Geometri-4 için gerçekleştirilen HAD analiz sonuçları. | 88 |
| Çizelge 5.6 : Geometri-5 için gerçekleştirilen HAD analiz sonuçları. | 92 |
| Çizelge 5.7 : Geometri-6 için gerçekleştirilen HAD analiz sonuçlar. | 96 |



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1 : Türkiye geneli kümülatif rüzgâr gücü ve yıllara göre artış oranı. | 4 |
| Şekil 1.2 : Bölgelere göre Türkiye’de kurulu rüzgar enerji santrali kapasiteleri..... | 4 |
| Şekil 2.1 : Savnoius tipi rüzgâr türbinlerinin düşey kesitten çalışma prensibi..... | 13 |
| Şekil 2.2 : Yatay eksenli rüzgâr türbini bileşenleri. | 16 |
| Şekil 3.1 : Serbest akış kontrol hacmi ve basınç - hız terminolojisi..... | 17 |
| Şekil 3.2 : Akış hacmi boyunca basınç ve hız ilişkisi..... | 21 |
| Şekil 3.3 : Kanat profili terminolojisi. | 24 |
| Şekil 3.4 : Kanat üzerine etkiyen kuvvetler..... | 25 |
| Şekil 3.5 : Belirli bir r pozisyonundaki hız ve açılar ile etki eden kuvvetler. | 27 |
| Şekil 3.6 : Bir kanat elemanı üzerine etkiyen kuvvetler..... | 29 |
| Şekil 3.7 : Rotor ardındaki vorteks akış ve hızlarda görülen değişim grafiği. | 31 |
| Şekil 3.8 : Üst yapılar Rotor girişindeki hız üçgeni. | 31 |
| Şekil 3.9 : (I) Rotor düzlemindeki hız üçgeni, (II) rotor düzleminde hız değişimi. .. | 32 |
| Şekil 3.10 : Rotor çıkışındaki hız üçgeni..... | 32 |
| Şekil 3.11 : Kanat boyunca görülen dolaşım vorteksi ve vorteks yoğunluğu. | 35 |
| Şekil 3.12 : Rüzgar türbinleri için standart güç üretimi eğrisi..... | 38 |
| Şekil 4.1 : Rotor geometrisinde kullanılan kanat profilleri. | 42 |
| Şekil 4.2 : Rotor kanat profillerinin Qblade’e tanıtılması. | 42 |
| Şekil 4.3 : Rotor kanat profillerinin C_l/C_d oranını grafiği. | 43 |
| Şekil 4.4 : Rotor kanat profillerinin kaldırma katsayısı-hücum açısı grafiği. | 43 |
| Şekil 4.5 : Betz ve Schmitz kanat teorilerine göre kanat giriş genişliği eğrileri. | 44 |
| Şekil 4.6 : Betz ve Schmitz kanat teorilerine göre kanat yükselme açısı eğrileri..... | 45 |
| Şekil 4.7 : Ekstrapolasyonlu sürtünme ve kaldırma katsayısı eğrileri0..... | 46 |
| Şekil 4.8 : Qblade’de tasarlanan kanat modeli. | 46 |
| Şekil 4.9 : Kanat geometrisi açısı ve genişlik değerleri. | 47 |
| Şekil 4.10 : Rotor Qblade analiz eğrileri. | 48 |
| Şekil 4.11 : Rotor Qblade çoklu parametre analiz eğrileri. | 49 |
| Şekil 4.12 : Türbin Qblade analiz eğrileri. | 49 |
| Şekil 4.13 : Türbin Qblade KHT simülasyon görseli – akış ardı vorteks..... | 50 |
| Şekil 4.14 : Türbin Qblade KHT simülasyon görseli – toplam hız bileşeni..... | 51 |
| Şekil 4.15 : Türbin kanadının modellenmesi, profil kesitleri. | 51 |
| Şekil 4.16 : Türbin rotor modeli, CATIA. | 52 |
| Şekil 4.17 : Dönel, sabit ve kanat akış hacimleri, ANSYS. | 53 |
| Şekil 4.18 : Dönel ve kanat çevresi akış hacimleri, ANSYS..... | 53 |
| Şekil 4.19 : Bütün tanım hacimleri ağ örgüsü görüntüsü, ANSYS ICEM. | 54 |
| Şekil 4.20 : Kanat kesitinde ağ örgüsü görüntüsü, ANSYS ICEM. | 54 |
| Şekil 4.21 : Kanat ucu hızı oranı – güç katsayısı eğrisi..... | 55 |
| Şekil 4.22 : Rüzgar hızı – güç eğrisi..... | 56 |
| Şekil 4.23 : HAD ve Qblade Kanat uç hızı – Güç katsayısı karşılaştırmalı grafiği. . | 56 |
| Şekil 4.24 : Kanat emme ve basınç yüzeylerinde y^+ konturları ($\lambda=6$)..... | 57 |
| Şekil 4.25 : Kanat emme ve basınç yüzeylerinde gerilim konturları ($\lambda=6$)..... | 57 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.26 : Eksenel düzlemde akış boyunca basınç konturları ($\lambda=6$)..... | 58 |
| Şekil 4.27 : Kanat ucu basınç konturları ve hız vektörleri ($\lambda=6$)..... | 58 |
| Şekil 4.28 : $Y=0,4$ m, kanat çevresinde basınç konturu ve hız vektörleri ($\lambda=6$). | 59 |
| Şekil 4.29 : $Y=1,2$ m, kanat çevresinde basınç konturu ve hız vektörleri ($\lambda=6$). | 59 |
| Şekil 4.30 : $Y=2,0$ m, kanat çevresinde basınç konturu ve hız vektörleri ($\lambda=6$). | 60 |
| Şekil 4.31 : Kanat yüzeyinde basınç konturları ($\lambda=6$). | 60 |
| Şekil 4.32 : $Y=0,4$ m pozisyonundaki kanat profilinin basınç katsayısı dağılımı ($\lambda=6$)..... | 61 |
| Şekil 4.33 : $Y=1,2$ m pozisyonundaki kanat profilinin basınç katsayısı dağılımı ($\lambda=6$)..... | 61 |
| Şekil 4.34 : $Y=2,0$ m pozisyonundaki kanat profilinin basınç katsayısı dağılımı ($\lambda=6$)..... | 61 |
| Şekil 5.1 : Kübik Bernstein polinomlarının gösterimi. | 64 |
| Şekil 5.2 : 4 kontrol noktası ile ifade edilen kübik Bezier eğrisi görseli. | 64 |
| Şekil 5.3 : Pareto eğrisi ve çözüm seti örnek gösterimi. | 67 |
| Şekil 5.4 : Rasgele yaklaşımda karşılıklı alışveriş ve mutasyon örnek gösterimi. | 70 |
| Şekil 5.5 : 6 kontrol noktası ile oluşturulmuş Bezier eğrisi örneği. | 70 |
| Şekil 5.6 : Ortalama yaklaşım metodu, pareto çözüm seti. | 72 |
| Şekil 5.7 : Hüristik yaklaşım metodu, pareto çözüm seti. | 72 |
| Şekil 5.8 : Rasgele yaklaşım metodu, pareto çözüm seti. | 72 |
| Şekil 5.9 : Ort. yaklaşım metodu ile ulaşılan pareto çözüm setinden maksimum güç profilini..... | 73 |
| Şekil 5.10 : Ort. yaklaşım metodu ile ulaşılan pareto çözüm setinden ortalama güç profilini..... | 73 |
| Şekil 5.11 : Periyodik dönel akış hacmi, kanal ve rotor geometrileri, ANSYS..... | 74 |
| Şekil 5.12 : Akış doğrultusunda sabit, dönel ve kanat çevresi ağ yapısı, ANSYS. | 75 |
| Şekil 5.13 : Geometri-1 ve Geometri-2, güç katsayısı – kanat uç hızı oranı eğrileri. | 78 |
| Şekil 5.14 : Geometri-1 ve Geometri-2, güç üretimi – rüzgar hızı eğrileri. | 78 |
| Şekil 5.15 : Geometri-1 ve Geometri-2, itki katsayısı – kanat uç hızı oranı eğrileri. | 79 |
| Şekil 5.16 : Geometri-1 ve Geometri-2, itki- rüzgar hızı eğrileri. | 79 |
| Şekil 5.17 : Geometri-1, akış hacmi boyunca görülen basınç konturları ($\lambda=6$)..... | 80 |
| Şekil 5.18 : Geometri-2, akış hacmi boyunca görülen basınç konturları ($\lambda=6$)..... | 80 |
| Şekil 5.19 : Geometri-1, kanal çevresi basınç konturları ve hız vektörleri ($\lambda=6$)..... | 81 |
| Şekil 5.20 : Geometri-2, kanal çevresi hız konturları ve hız vektörleri ($\lambda=6$). | 81 |
| Şekil 5.21 : Geometri-1, farklı rüzgar hızlarında kanal çevresi akım çizgileri..... | 82 |
| Şekil 5.22 : Geometri-3, kanal pozisyonunun elde edilmesi. | 83 |
| Şekil 5.23 : Geometri-3, güç katsayısı – kanat uç hızı oranı karşılaştırma eğrileri. .. | 84 |
| Şekil 5.24 : Geometri-4, itki katsayısı – kanat uç hızı oranı karşılaştırma eğrileri.... | 85 |
| Şekil 5.25 : Geometri-3, akış hacmi boyunca görülen basınç konturları ($\lambda=6$)..... | 85 |
| Şekil 5.26 : Geometri-3, kanal çevresi hız konturları ve hız vektörleri ($\lambda=6$). | 85 |
| Şekil 5.27 : Geometri-3, farklı rüzgar hızlarında kanal çevresi akım çizgileri..... | 86 |
| Şekil 5.28 : Geometri-4, kanal geometrisinin elde edilmesi. | 87 |
| Şekil 5.29 : Geometri-4, güç katsayısı – kanat uç hızı oranı karşılaştırma eğrileri. .. | 88 |
| Şekil 5.30 : Geometri-4, itki katsayısı – kanat uç hızı oranı karşılaştırma eğrileri.... | 88 |
| Şekil 5.31 : Geometri-4, akış hacmi boyunca görülen basınç konturları ($\lambda=6$)..... | 89 |
| Şekil 5.32 : Geometri-4, kanal çevresi hız konturları ve hız vektörleri ($\lambda=6$). | 89 |
| Şekil 5.33 : Geometri-4, farklı rüzgar hızlarında kanal çevresi akım çizgileri..... | 90 |
| Şekil 5.34 : Geometri-5, kısmi kanallı rüzgar türbini modelinin görüntüsü..... | 91 |
| Şekil 5.35 : Geometri-5, güç katsayısı – kanat uç hızı oranı karşılaştırma eğrileri. .. | 92 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 5.36 : Geometri-5, rüzgar türbini güç üretimi – rüzgar hızı karşılaştırma eğrileri..... | 92 |
| Şekil 5.37 : Geometri-5, itki katsayısı – kanat uç hızı oranı karşılaştırma eğrileri. .. | 93 |
| Şekil 5.38 : Geometri-5, itki – rüzgar hızı karşılaştırma eğrileri..... | 93 |
| Şekil 5.39 : Geometri-5, akış hacmi boyunca görülen basınç konturları ($\lambda=6$)..... | 94 |
| Şekil 5.40 : Geometri-5, akış hacmi boyunca görülen hız konturları ($\lambda=6$)..... | 94 |
| Şekil 5.41 : Geometri-5, rotor ekseninde görülen hız konturları ($\lambda=6$). | 94 |
| Şekil 5.42 : Geometri-6, kanal geometrisinin elde edilmesi..... | 95 |
| Şekil 5.43 : Geometri-6, güç katsayısı – kanat uç hızı oranı eğrileri..... | 96 |
| Şekil 5.44 : Geometri-6, itki katsayısı – kanat uç hızı oranı eğrileri. | 96 |
| Şekil 5.45 : Geometri-6, akış hacmi boyunca görülen basınç konturları ($\lambda=6$)..... | 97 |
| Şekil 5.46 : Geometri-6, kanal çevresi hız konturları ve hız vektörleri ($\lambda=6$)..... | 97 |
| Şekil 5.47 : Geometri-6, farklı rüzgar hızlarında kanal çevresi akım çizgileri..... | 98 |
| Şekil 5.48 : Y=0,4 m pozisyonundaki kanat basınç katsayısı dağılımı ($\lambda=6$). | 99 |
| Şekil 5.49 : Y=1,2 m pozisyonundaki kanat basınç katsayısı dağılımı ($\lambda=6$). | 99 |
| Şekil 5.50 : Y=2,0 m pozisyonundaki kanat basınç katsayısı dağılımı ($\lambda=6$). | 100 |
| Şekil 5.51 : Geometri-1, simulasyon metodlarının karşılaştırması..... | 100 |



KANAL İÇERİSİNDE RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE HAD ANALİZİ İLE KANAL PROFİLİNİN TASARIMA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Literatürde, rüzgar türbini tasarımına ve rüzgar türbinlerinden elde edilebilecek enerjinin artırılmasına yönelik birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaları çoğunlukla tasarıma yönelik olup, kanat geometrilerinin rüzgardan daha fazla enerji çekebilmesini sağlamaya yöneliktir. Bununla birlikte yakın geçmişten günümüze kadar rüzgar türbinin performansını artırılmasına yönelik daha yenilikçi çalışmalarda mevcuttur. Bu tez çalışmasında da bu amaca yönelik olarak çalışmalar yürütülmüştür. Bu bağlamda küçük rotor çapına sahip bir rüzgar türbini tasarlanması ve tasarlanan rüzgar türbini modelinin kanal içerisine yerleştirilmek yoluyla performansının artırılması amacıyla incelemeler yürütülmüştür. Bu amaçla ilk olarak kanat geometrisi, belirlenen tasarım koşullarına uygun olarak optimal tasarım parametreleri için kanat elemanı teorisi ve momentum disk teorisinden yararlanılarak elde edilmiştir. Kanat tasarımının elde edilmesinde QBlade yazılımından yararlanılmış ve bu yazılım yardımıyla kaldırma hattı teorisi kullanılarak iki boyutlu analizler ile rüzgar türbini performansına yönelik ilk öngörüler elde edilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen kanat geometrisinin CATIA programı yardımıyla üç boyutlu modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen rotor geometrisi için ANSYS 16.0 analiz programının ICEM modülü kullanılarak ağ yapısı modellenmiş ve ANSYS FLUENT modülü kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler serbest akış rejimi için sabit hacim ve rotor çevresinde dönel akışkan hacmi olarak modellenerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca analizlerin gerçekleştirileceği akış hacimleri periyodik analiz yapısına uygun olarak oluşturulmuş olup, üç kanatlı olarak tasarlanan rüzgar türbininin bir kanadını içerisine alacak şekilde düzenlenmiştir. Türbülans modeli olarak k-omega SST modülü seçilmiş ve sabit rotor çevresinde dönel akış hacmi oluşturulması metodu kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Bununla beraber kanat geometrisinin etrafında daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi adına ayrı bir dönel akış hacmi tanımlanmış ve bu hacim için O-örgü formunda yapısal ağ modellenmesi kullanılmıştır. Rüzgar türbininin performans karakteristiğini gösteren rüzgar hızına bağlı değişen güç üretimi eğrisi ve kanat uç hızına bağlı değişen güç katsayısı verilerine ulaşılmıştır. Elde edilen sonuç verileri ile tasarım aşamasında ilk öngörülerin elde edildiği QBlade iki boyutlu analizlerinin birbirine benzer eğilimde olduğu görülmüştür. Rüzgar türbini performansını karakterize eden güç katsayısı eğrisinin literatürde ki çalışmalarda ulaşılan sonuçlara bakıldığında tutarlı olduğu görülmüştür.

İlerleyen aşamada tezin de esas konusu olan ve ulaşılan rüzgar türbini performansının artırılması yönelik kanal içerisinde rüzgar türbini tasarımının elde edilmesine geçilmiştir. Bu doğrultuda tasarım kanal profilinin belirlenmesinde 6 nokta kontrollü Bezier eğrileri teorisi kullanılmış ve bu tezinin düzenlendiği MATLAB kodu yardımıyla kapalı kanal profilleri oluşturulmuştur. Kanal

profillerinin elde edildiği MATLAB kodunun içeresine gömülü olarak eklenen DFDC yazılımı ile oluşturulan rasgele kanal profillerinin 2 boyutlu HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. MATLAB programından optimizasyon modülü kullanılarak genetik algoritma çoklu hedef optimizasyonu analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada rüzgar türbini rotor tasarımının elde edilmesinde de belirlenen tasarım parametreleri ve kanat profillerinin aerodinamik özellikleri de analiz girdileri olarak uygulanmış ve optimizasyon hedef parametreleri olarak maksimum güç ile minimum itki getirileri belirlenerek, pareto çözüm setleri elde edilmiştir. Çözüm setlerine, GAO parametrelerinde farklı yaklaşım metotları için, sorunsuz şekilde analizlerin ilerleyebilmesi adına belirlenen kontrol noktalarının sınırları içerisinde profiller elde edilerek ulaşılmıştır.

Kanal geometrisi ve kanal içerisinde rüzgar türbini tasarım parametrelerinin ayrıntılı olarak incelenebilmesi adına, çözüm seti içerisinde kanal profilleri seçilmiştir. Seçilen kanal profillerinin rüzgar türbini performansına etkileri belirlenen tasarım parametrelerine yönelik hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Bu doğrultuda kanal ile kanatlar arasındaki boşluk oranı, kanal içerisinde rotorun yerleştirildiği pozisyon, kanal giriş ve çıkış akış alanları arasındaki oran ve kısmi kanal modelinin kullanılması gibi farklı tasarımlar için analiz sonuçları elde edilmiş ve ulaşılan veriler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İncelenen tasarımlardan pareto çözüm seti içerisinde farklı bölgelerden seçilen iki profil için ulaşılan HAD analizi sonuçlarıyla, pareto çözüm setinin elde edilmesinde kullanılan DFDC yazılımdan elde edilen iki boyutlu analiz sonuçlarının birbirine yakın olduğu söylenebilir. Bununla birlikte incelenen tasarım parametrelerinin sonuç verilere olduğu kadar kanal ve kanat çevresindeki akışa da etki ettikleri ve bu etkiye bağlı olarak rüzgar türbini performansının da değiştiği sonuçlardan görülmektedir.

DUCTED WIND TURBINE DESIGN AND INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DUCT PROFILE TO THE DESIGN WITH CFD ANALYSIS

SUMMARY

In the recent researches, there are many studies to design the wind turbine and to increase the energy that can be generated by wind turbines. These studies are mostly for design purposes and aim at ensuring that the wing geometry can draw more energy from the wind. However, from past to the present days, there are more innovative studies about the ways to improve the performance of the wind turbines and increase the obtained energy output from wind turbines.

In this thesis study, examinations have been carried out for this purpose. In this context, studies have been carried out to design a wind turbine with a small rotor diameter and to improve the performance of the designed wind turbine model, a duct geometry was encircled around the wind turbine rotor. For this purpose, firstly the wing geometry was designed by using the wing element theory and momentum disc theory for optimal design parameters in accordance with the determined design conditions. In this phase, the wing angle and wing profile width data which allow the identification of the wing geometry were derived from the Betz wing theory and Schmitz wing theory. At the designation of these data, aerodynamic analyzes of the profiles that selected from the NREL airfoil profile families were used in accordance with the design requirements for blade root, blade tip and main blade body profiles. In the acquisition of the wing design, QBlade software was used to obtain the first predictions for the performance of the wind turbine by two dimensional analysis using lifting line theory via QBlade software. Three dimensional modeling of the wing geometry, where geometrical coordinates of geometry was obtained from QBlade, was created by CATIA modelling program. Further the mesh grid structure was modeled using the ICEM module of the ANSYS 16.0 program for the created analysis domains.

Moreover computational fluid dynamics (CFD) analyzes were performed using ANSYS FLUENT module. Analyzes were carried out as fixed free flow regime volume and rotational volume around the frozen rotor geometry. In addition, flow volumes to be analyzed were constructed in accordance with the periodic analysis structure and were arranged to take one wing geometry within the analysis domains. Furthermore k-omega SST model was selected as the turbulence model and the results were obtained by using the method of creating the rotational flow volume around the stationary frozen rotor. Wind velocity and rotational domain angular velocity values were used as a analysis initial inputs. In addition to these, in order to obtain more accurate results around the wing geometry, a separate rotational flow volume is defined and the structural mesh model in O-grid form was used for this flow volume. Also, boundary layer quality of mesh structure around wing was especially paid attention to obtain more accurate results.

As investigated results, the power generation curve and power coefficient curve depending on the blade tip speed ratio, which indicates the performance characteristics of the wind turbine, was obtained with respect to changing wind velocity. It has been seen that the results obtained from QBlade software as a first prediction in the design phase and CFD results that have been acquired, show similar trends if compared to each other. The power coefficient curve characterizing wind turbine performance has been found to be consistent with the results shared in reference literature studies.

In the course of the proceeding, the thesis' main focus on the design of the wind turbine within the duct to improve the performance of the designed wind turbine. In this direction, 6 point controlled Bezier curves theory was used to determine the design duct profile and closed duct profiles were created with the help of MATLAB code where this theory was embedded. Two dimensional CFD analysis of randomly created duct profiles have been carried out by DFDC software which is also embedded in the MATLAB code. Furthermore, genetic algorithm multi-objective optimization analysis were performed by using optimization module from Matlab program. In this stage, the design parameters determined at the time of obtaining the wind turbine rotor geometry and the aerodynamic characteristics of the blade profiles were also applied as the analysis inputs and the pareto solution sets were obtained by assigning the maximum power and minimum thrust as optimization target parameters. The solution sets were obtained by generating profiles within the boundaries of the specified control points in order to allow the analysis to proceed smoothly for different approach methods in GAO parameters. In addition, herouistic, random and intermediate crossover approach methods were used for obtainin GAO analysis results. In the optimization, analysis population selected as default value of 200 and generation selected as 50 to generate pareto optimal solution sets.

In order to examine the duct geometry and the effects of design parameters for a ducted wind turbine in detail, duct profiles were selected from the solution set which was obtained by intermediate crossover approach method. The effects of selected duct profiles on the performance of the wind turbine were obtained by performing analysis of the computational fluid dynamics for the determined design parameters. For CFD analysis of ducted wind turbine models, again k-omega SST turbulent model was used with frozen rotor model. Furthermore, the analysis results have been obtained for different designs such as the ratio between the duct and the wings, the position of the rotor within the duct geometry, the ratio between the inlet and outlet flow areas, and the use of the partial channel model, and data obtained have been compared comparatively. It can be concluded that the results of CFD analysis for two profiles that selected from different regions within the pareto optimal solution set and results that have been given by DFDC software are close to each other for optimal design conditions. However, it is seen that the design parameters examined also affect the flow around the duct and wing as much as the result, and the performance of the wind turbine also changes depending on this effect.

As a supporting result, the analysis of the ratio between the duct geometry and the wings showed very close results for the power output data obtained from the wind turbine. On the contrary, when the results were examined, it has been observed that the increase of the clearance ratio leads to the formation of the flow separation toward the duct wall through outlet and the formation of more wider vortex field at the duct outlet. A similar situation has been observed in the analysis of the position of the rotor geometry in the duct geometry. In addition to these cases, there are

results with evident change in the power output data obtained from the wind turbine and the change on the flow field around the duct geometry.

Furthermore mesh quality check analysis and FLUENT simulation method analysis also performed to obtain detailed data about accuracy of the analysis. More extensive analysis studies on design parameters have been investigated in this thesis.





1. GİRİŞ

Rüzgâr enerjisi artan dünya nüfusunun beraberinde getirdiği yüksek enerji ihtiyacının karşılanması ve uluslararası toplumların çevre bilincinin de farkındalığı ile gösterdiği eğilim ve yatırımlar sonucunda oldukça hızlı gelişim göstermiştir. Teknolojik olarak gösterilen bu hızlı gelişim ve ekonomik olarak konvansiyonel enerji kaynakları ile rekabet edebilir hale gelmesi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr enerjisini daha da ön plana çıkarmaktadır. Günümüzde rüzgâr enerjisi teknolojik olarak gelişmiş, diğer enerji kaynakları ile ekonomik olarak rekabet edebilen ve çevreye duyarlı enerji kaynağı haline gelmiştir. Bununla beraber gelişmiş sanayi ülkelerinin birbirleri ile rekabeti de rüzgâr enerjisine olan eğilim ve yatırımları arttırmıştır. Bu bağlamda rüzgâr türbinlerinin dayanıklılıklarının geliştirilmesi, verimlerinin artırılması, maliyetlerinin azaltılması ve bunlara bağlı olarak kendilerini karşılama sürelerinin daha aşağıya çekilebilmesi hedeflenmiştir.

Son zamanlardaki çalışmalar ile yeni uygulamalar ve verimi artırıcı tasarım geliştirmeleri üzerinde durulmuştur. Daha efektif şekilde rüzgâr enerjisinin kullanılabilmesi çalışmaları yürütülmüştür. Bu amaçla kanal içerisine yerleştirilmiş rüzgâr türbini tasarımları üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Yüksek enerji veriminin sağlandığı bu kanal içi rüzgâr türbini tasarımları ile kanal boyunca basınç ve akış hızı kontrol edilebilir hale getirilmiştir. Kanal girişi, kanat ucundan kaçan akışların oluşturduğu itki kuvvetinin azaltılabilmesini sağlamaktadır. Bunlarla beraber rotorun operasyon güvenliğinin de artırılması sağlanır. Öte yandan rotor çapının büyümesi, rüzgâr türbininin kanal içerisinde kullanılmasını maliyet ve operasyon olarak zorlaştıracığından, daha çok orta ve küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinde bu kanal tipi tasarımlar kullanılmaktadır.

Rüzgâr türbini kanatları, rüzgârın kanat üzerine etkidiği kuvvetinden yaralanmak yoluyla, hava hareketindeki kinetik enerjiyi efektif olarak toplar. Rüzgâr türbini kanatları kanadın rüzgâr yönündeki tarafında oluşan alçak basınç kuvveti(lift) etkisini ve kanadın rüzgâra göre ön tarafına etkiyen sürüklenme kuvveti (drag) etkisini kombine ederek türbin rotorunun pervane gibi dönmesini ve dolayısı ile rüzgâr

enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesini sağlar. Bu mekanik enerji de bir şaft mekanizmasının jeneratörü döndürmesi ile elektrik enerjisine dönüştürülür.

1.1. Tezin Amacı

Tezin amacı belirlenen tasarım parametreleri ve yöntemleri ile yatay eksenli rüzgâr türbini tasarlanması ve HAD analizlerinin de elde edilmesi yoluyla incelemeler gerçekleştirilmesidir. İlerleyen aşamalarda Bezier eğrileri teorisi kullanılarak kanal profillerini elde etmek ve bu profillerin rüzgâr türbini tasarımının yerleştirileceği kanal geometrilerini oluşturacak şekilde modellenmesidir. Oluşturulan MATLAB kodu ve HAD analizleri için yardımcı yazılımlar kullanılarak, elde edilen bu kanal profillerin 2 boyutlu analizlerinin gerçekleştirilmesi yardımıyla, elde edilen rüzgar gücü ve itki verilerine göre çoklu hedef optimizasyonunun gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Böylelikle kanal geometrileri için en uygun sonuçların gösterildiği pareto çözüm setine ulaşılması ve çözüm seti içerisinde seçilecek olan profiller için HAD analizlerinin gerçekleştirilerek kanal içerisindeki rüzgâr türbini tasarımının, standart rüzgar türbini tasarımı ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Bununla birlikte kanal geometrisi ile rüzgar türbini kanatlarının birbirleri ile ilişkilerinin inceleneceği tasarım parametrelerine yönelik HAD analizleri gerçekleştirilerek, elde edilecek olan verilerin incelenmesi amaçlanmaktadır. Sonuç olarak belirlenen tasarım parametreleri ışığında en optimal kanallı rüzgar türbini tasarımına ulaşılması ile birlikte ulaşılan olumlu veya olumsuz performans sonuçlarının da gözlemlenmesi hedeflenmektedir.

1.2. Literatür

Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisinin elde edilmesini sağlayan teknolojilerdeki gelişim uzun yıllar süresince gerçekleşmiştir. İnsanoğlunun 4000 yıl öncesine değin rüzgâr enerjisini günlük işlerinde kullandığı tahmin edilmektedir. Günümüzün modern rüzgâr türbinlerinin temeli niteliğini taşıyan ve kullanıcının mekanik güç ihtiyacını karşılamak amacıyla geliştirilen rüzgâr değirmenlerinin kökeni bir milenyum öncesine kadar dayanmaktadır. Öncül uygulamaları İran, Hindistan ve Mezopotamya uygarlıklarına dayandırılabilir. Kullanılan ilk rüzgâr değirmenleri rüzgârın geniş değirmen kanatlarında oluşturduğu sürüklenme etkisinden faydalanılarak geliştirilen yatay eksenli modeller olup kökenleri onuncu yüzyıla

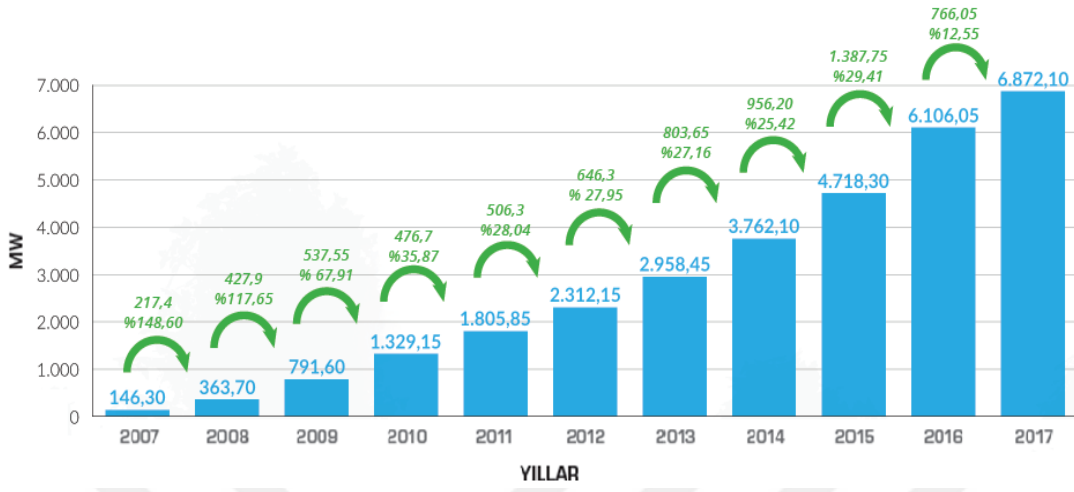
kadar dayanmaktadır. Düşey eksenli rüzgâr değirmenlerinin kullanımlarının yaygın olarak gözlemlenmesi ise on ikinci yüzyıla dayandırılmaktadır [1].

Mekanik enerji sağlayan rüzgâr değirmenlerinden, elektrik enerjisi sağlayan rüzgâr türbinlerine geçiş on dokuzuncu yüzyılın sonlarına dayanmaktadır. Rüzgâr enerjisinin, elektrik enerjisi üretiminde kullanımının öncül çalışmaları, rüzgâr jeneratörlerinin ve daha büyük çaplı rüzgâr türbinlerinin gelişimine katkı sağlamıştır. Bunlara ek olarak yirminci yüzyılda hava araçlarının icat edilmesi ve yoğun geliştirme çalışmalarının yürütülmesi sonucunda kanat tasarımları üzerine gerçekleştirilen çalışmalar, rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesine etkin katkı sağlamıştır. Sanayi devrimine kadar geçen süreçte rüzgâr türbinleri temel enerji üretimi kaynağı olma yönlerini korumuştur. Ancak takibindeki dönemde buhar motorlarının ve içten yanmalı fosil yakıt hammaddeli motorların gelişmesinin yanı sıra taşınabilir olmaması ve geniş alan ihtiyacı oluşturması gibi sebeplerden ötürü gelişimi yavaşlamış ve arka planda kalmıştır [1].

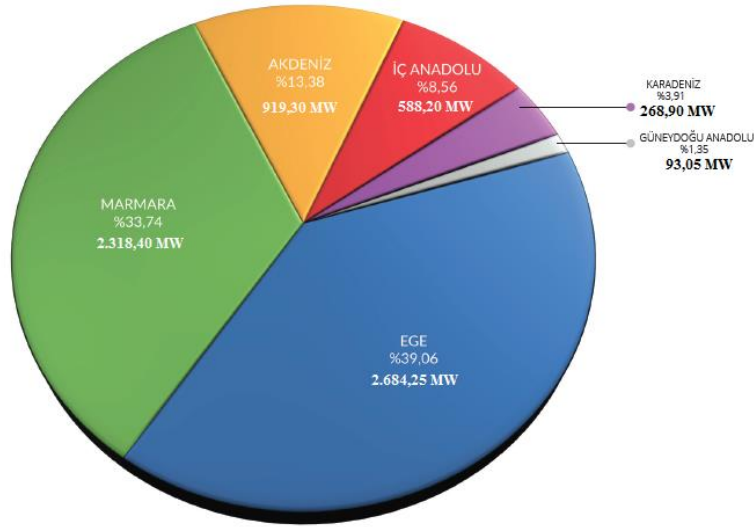
Modern rüzgâr türbinlerinin gelişiminin başlangıcı 1940'lı yıllara dayanmaktadır. Sanayileşmenin olumsuz etkilerinin sonucunda insanlarda oluşan yaşanan çevre ve gelecek nesiller kaygısı, kaçınılmaz olumsuz sonuçlara karşı gerçekleştirilmesi gerekenler hususunda bilinçlenmeyi de beraberinde getirmiştir. Nükleer enerjisinin ve fosil yakıtların beraberinde barındırdığı tehlikeler, temiz enerji kaynaklarına olan yönelimi arttırmıştır. Oluşan toplumsal bilinç ve yönelim, rüzgâr enerjisine ve rüzgâr türbinlerine olan yatırımların da artmasına olanak sağlamıştır. Devam eden süreçte küresel ısınma ve nükleer enerji santrallerine karşı gelişen endişe, ülkelerin rüzgâr enerjisine olan ilgilerini arttırmıştır. Geçtiğimiz 25 yıllık süreçte rüzgâr türbinleri üzerine gerçekleştirilen akademik ve sektörel çalışmaların da ışığında daha fazla enerji üretimi sağlayan ve daha büyük boyutlara sahip rüzgâr türbinlerinin üretilmesine olanak sağlanmıştır. 2000'li yıllardan itibaren güç üretme kapasitelerinde ciddi oranlarda artış görülen rüzgâr türbini modelleri geliştirilmiştir. Günümüzde 10 MW'lık güç kapasitesine ve 180 metreye kadar ulaşabilen rotor çapına sahip yüksek verimli rüzgâr türbinleri üretilmektedir.

Ülkemiz rüzgâr enerjisi bakımından yüksek potansiyele sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Özellikle Batı Ege ve Marmara bölgelerindeki rüzgâr potansiyeli ve rüzgâr hızının dağılım olasılığı verileri ülkemizin elektrik enerjisi ihtiyacının ikame edilmesinde önemli bir potansiyele sahiptir. Şekil 1.1'de 'Türkiye Rüzgar Enerjisi

Birliği (TÜREB)'in ocak 2018'de yayımladığı 2007 yılından sonra Türkiye'deki kümülatif rüzgâr enerjisi santral kapasitesi grafiği gösterilmiştir [2].



Şekil 1.1: Türkiye geneli kümülatif rüzgâr gücü ve yıllara göre artış oranı [2].



Şekil 1.2: Bölgelere göre Türkiye'de kurulu rüzgar enerji santrali kapasiteleri [2].

Rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesi adına gerçekleştirilen çalışmalar temel olarak türbin rotorunun aerodinamik karakteristiğinin daha fazla rüzgâr gücü elde edilmesini sağlayacak şekilde geliştirilerek kanat geometrisinin elde edilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. P. Fugsang ve H.A. Madsen (1999) yayınladıkları makalede, yatay eksenli rüzgar türbinlerinin tasarımı için geliştirilen sayısal bir çok metodu içinde barındıran bir optimizasyon yöntemi sunmuşlardır. Geliştirdikleri yöntem birden fazla sınırlandırmaya izin verirken, yıllık üretilen enerji ile aşırı yüklenme ve zorlanmaya bağlı olarak minimum enerji maliyetini hedef olarak belirlemişlerdir. Çalışmalarında en uygun kanat profilini elde etmek adına, kanat geometrisi boyunca uç bölgesi de dahil olmak üzere tüm yayılma alanlarında göreceli

olarak yüksek maksimum kaldırma oranına sahip olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bununla beraber, rotor tarama alanının artırılması durumunda rotor kanatlarının da tamamen tekrardan tasarlanması gerektiğini de çalışmalarında belirtmişlerdir [3].

David Hartwanger ve Andrej Horvat (2008) çalışmalarında birden çok rüzgar türbinin yerleştirildiği rüzgar tarlalarının verimliliğinin artırılmasını adına ortam ve tasarım şartlarına göre en uygun rüzgar türbininin tasarlanmasını sağlayan yöntem üzerinde incelemelerde bulunmuşlardır. Bu bağlamda HAD analizi çalışmalarını temel alarak, kanat kesitleri için 2 boyutlu analizler gerçekleştirip 3 boyutlu türbin modeli için elde edilen HAD analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Kanat profili olarak S809 profilini belirlemiş ve bu profil için literatürdeki mevcut çalışmalardan yararlanarak deneysel sonuç ve XFOIL kodu kullanılarak elde edilen sonuçları, kendi uyguladıkları 2 boyutlu HAD analizleri ile karşılaştırmışlardır. Belirledikleri kanat profili ile modelledikleri rüzgar türbini için ANSYS CFX ve ICEM CFD kullanarak, sabit rotor modeli için zamandan bağımsız çözüm analizleri gerçekleştirmişlerdir. Ulaştıkları sonuçlar ışığında standart aktüatör disk teorisi için eksenel ve açılal indüksiyon faktörlerini elde ederek, bu modele muadil aktüatör disk modelinin oluşturulmasında kullanmışlardır. Oluşturdukları muadil aktüatör disk modelinden yararlanarak değişken kanat uç hızı oranları için eksenel indüksiyon faktörü ve değişken rüzgar hızları için tork dağılımlarını türbin radyal pozisyonuna göre incelemişlerdir. Kanat uç hızının artmasıyla eksenel indüksiyon faktörünün de artış gösterdiği ve kanat radyal pozisyonu boyunca daha tutarlı sonuçlar verdiği sonuçlarına ulaşmışlardır. Bununla beraber uyguladıkları modelin yüksek rüzgar hızları için ıraksama eğiliminde olduğunu da belirtmişlerdir [4].

McCosker (2012) küçük rüzgar türbini tasarımı ve optimizasyonunu incelediği çalışmasında belirlediği rüzgar türbini tipi için kanat profili, yarıçap boyunca kanat karşılama açısını ve giriş uzunluğunu elde etmiştir. Kanat açılarının ve giriş uzunluklarının belirlenmesinde açılal momentumun korunumu ve kanat profili üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetlerden yararlanmıştır. Kanat açısı ve giriş uzunluklarının optimal sonuçlarının elde edildiğini belirleyebilmek adına, kanat elemanı momentum teorisini kullanarak parametrik çalışma yürütmüştür. Seçtiği iki farklı kanat profili için analizler gerçekleştirerek rüzgar türbini tasarımının verimini maksimize edecek tasarım parametrelerini incelemiştir. Küçük boyutlardaki rüzgar türbini tasarımının verimliliğini etkileyen temel parametrenin kanat boyu ve gövde

merkezinin yüksekliği oluğunu belirtmiştir. Buna ek olarak kanat boyunun ve gövde yüksekliğinin maksimize edilmesinin maliyet veriminin de sağlanması adına zaruret gösterdiğini ancak bu şekilde rüzgar türbini yapısının sabit giderlerinin optimize edilebileceğini belirtmiştir. Belirlediği tasarım parametreleri için kanat uç hızının optimal sonuç verdiği operasyon noktasında NACA 4412 kanat profilinin NACA 23012 profiline göre daha fazla g katsayısına sahip olduğu sonucuna ulaşmıştır [5].

Peter J. Schubel ve Richard J. Crossley (2012) rüzgar türbini kanat tasarımı üzerine yayımladıkları çalışmalarında, yatay eksenli rüzgar türbini kanatlarını aerodinamik tasarım prensiplerince, teorik olarak elde edilebilecek maksimum verim, itiş gücü, pratikteki verim, kanat yükleri ve YERT kanat tasarımı şeklinde incelemişlerdir. Bu bağlamda modern rüzgar türbinlerinin tasarım prensipleri doğrultusunda kanat boyunca kullanılacak profillerin planlanması, plan doğrultusunda kanat profillerinin belirlenmesi, en uygun tasarım hücum açısının belirlenmesi gibi tasarım aşamalarını detaylandırmışlardır. Bunlara ek olarak kanat üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetler, yerçekimi kuvveti, merkezkaç kuvveti ve operasyonel koşullar tanımlanarak tasarım yüklerini detaylandırmışlardır. YERT rotor kanatlarının planlanmasında kanat eleman metodunu kullanarak, Betz limiti, yerel akış hızları ve kanat profili kaldırma etkisini dikkate alarak kanat kiriş uzunluklarını elde etmişlerdir. Kanat kiriş uzunluklarının elde edilmesinde Betz kanat optimizasyon teorisinden yararlanmışlardır. Buna ek olarak Betz metodunun yetersiz kaldığı tasarım şartları için pratikte daha ileri tasarım metodlarının da kullanılabilceğini söylemişlerdir. Aerodinamik performans temelinde efektif rotor tasarımı için rüzgar türbininden güç elde edilmesinde temel etken kuvveti oluşturan aerodinamik kaldırma etkisini maksimize edecek şekilde tasarım gerçekleştirmişlerdir. Belirledikleri kanat profilleri için kaldırma ve sürükleme verilerini XFOIL modeli kullanarak elde etmişlerdir [6].

R. Lanzafame ve ark. yayımladıkları makalelerine konu olan çalışmalarında yatay eksenli rüzgar türbini için 3 boyutlu HAD modeli geliştirerek, ANSYS FLUENT çözücüsüyle incelemeler gerçekleştirmişlerdir. Bununla birlikte geliştirdikleri model ile rüzgar türbinin performans özellikleri için literatürde bulunan 1 boyutlu kanat eleman metodu teorisi için elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Uyguladıkları HAD modeli için zamandan bağımsız basınç temelli çözümü ele almışlardır. Standart 2 denklem $k-\omega$ SST modeli ve 4 denklem geçiş SST modeli için HAD analizleri uygulamışlardır. zm denklemlerini 2 dereceden kullanmış olup daha az agresif

fakat stabil olarak sonuca ulaşılmasını sağlamak amacıyla yakınsama faktörlerinin indirgenmesi ayarlanarak iterasyon edilmiştir. İteratif sonuçların yakınsamasını kontrol edebilmek adına kontrol monitörleri belirlemiştir. Ağ yapısının oluşturulması sırasında ANSYS MESHING modülünü kullanmışlardır. Kanat üzerinde türbülans model limitlerinin sağlanmasını sağlayabilmek adına 1 boyutlu kod kullanarak yaklaşık y^+ ifadesi elde etmiş ve sınır tabaka için prizma elemanlar oluşturmuşlardır. Uyguladıkları 2 farklı HAD modeli için elde ettikleri sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu noktada 3 boyutlu HAD analizi modelinin, 1 boyutlu kanat elemanı modeli ile elde edilen sonuçların kıyaslanmasında yeterli olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte 3 boyutlu HAD analiz modeli kullanılarak ulaşılan aerodinamik katsayıların, 1 boyutlu kanat eleman modelini iyileştirme amaçlı kullanılabileceğini de belirtmişlerdir [7].

Kishinami, K. ve ark. (2015) tarafından yayımlanan araştırmada teorik ve deneysel çalışmalar ile yatay eksenli bir rüzgar türbininin aerodinamik karakteristiğinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Teorik olarak gerçekleştirilen analizlerde kanat eleman metodu uygulanarak momentumun korunumu teorisi, enerjinin korunumu teorisi ve kanat elemanı teorisi birlikte incelenmiştir. Deneysel analizlerde ise küçük ölçekli tasarım modeli kullanılmıştır. Analizlerde itki - tork ve itki - enerji metotları kullanmışlardır ancak elde edilen sonuçlar da farklılık gözlenmemiştir. Deneysel çalışma sonuçlarını üç farklı kanat profile için farklı serbest akış hızları altında açık tip rüzgâr tüneline elde etmişlerdir. Buna göre çalışmalarında teorik ve deneysel olarak elde ettikleri aerodinamik karakteristik verilerini karşılaştırma adına itki, güç ve tork katsayıları ile kanat uç hızı oranını referans alarak değişken ve sabit kanat eğim kontrolü için incelemişlerdir. Sonuç olarak elde ettikleri verilere göre, kullandıkları kanat profillerine göre farklı sonuçlar gözlemlemişlerdir. LS04 kanat profili için değişken kanat eğim açısı kontrollü sistem efektif sonuçlar verirken, NACA44 kanat profili için değişken eğim açısı uygulamasında zorluk gözlemlemiş ancak sabit eğim açılı kontrol sisteminde ortalamada sonuçlar elde etmişlerdir. 60 m çapa sahip NACA44 serisi kanat profili ile tasarlanan rüzgar türbininin karakteristik güç katsayısı eğrisinin elde edilmesi adına, akış ayrılması dağılımı göz önüne alınarak tasarım parametrelerinde optimizasyon çalışmaları yürütmüşlerdir [8].

Rüzgar türbinlerinde verimin artırılması noktasında kanat profillerinin aerodinamik karakteristiklerinin, rüzgar türbininin güç üretimine olan etkilerinin incelendiği çalışmalar dışında daha yenilikçi tasarım geliştirme çalışmaları da cazibesini arttırmaktadır. Bunlar arasında en umut vadeden tasarım tipleri kanal içerisine yerleştirilen rüzgar türbini modelleridir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde rüzgarın kanatlar üzerine etkidiği kuvvet ile oluşan itki etkisiyle rotorun dönmesi sağlanır ve rüzgarın sahip olduğu güç çekilir. Bunun sonucunda hava akımında basınç düşüşü görülür. İtkinin artması, basınç düşüşünün de artmasını beraberinde doğurarak rüzgar türbini veriminin artmasını sağlamakla beraber, rotor disk alanından geçen hava akımını da sınırlandırarak elde edilebilecek maksimum güç için bir sınır oluşturur. Bu noktada rotor disk alanından geçen hava akımının artırılması ve rüzgardan elde edilebilecek maksimum mümkün enerji sınırının (Betz limit) aşılabilmesi için rotoru çevreleyen bir kanal kullanılmasıyla mümkündür. Kanal profili için kanat profili benzeri yapının kullanılması ile kaldırma etkisinden yararlanılarak, kanal içerisine doğru daha fazla hava akımının çekilmesi sağlanabilir. Rotor disk alanından geçen hava akımının radyal doğrultuda düzenli hız dağılımına sahip olmasında ve türbin veriminin artırılması için kanal duvarında ayrılmanın minimum seviyelerde tutulmasında kanal geometrisi önemli rol oynamaktadır.

M.O.L.Hansen ve ark. (2000) rüzgar türbini çevresine kanal yerleştirilmesinin etkilerini inceledikleri çalışmalarında, farklı kanal profilleri için referans aldıkları metotlarla optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Kanal yerleştirilmesinin etkilerini rüzgar tüneli kullanarak deneysel olarak ve bir boyutlu nümerik analize göre teorik olarak incelemişlerdir. Deneysel olarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında kanal duvarında boşluklar oluşturarak etkileri gözlemlemişlerdir. Ürettikleri 3 metrelik rotor çapına sahip prototip ile testler gerçekleştirmiş olup, 5 m/s rüzgar hızı için uyguladıkları testlerde standart açık tip rüzgar türbinleri için ideal sınır olan Betz limite göre 2 kat daha fazla enerji elde ettiklerini belirtmişlerdir. Bir boyutlu nümerik analizlerde elde ettikleri sonuçları doğrulama adına sıkıştırılmaz Navier-Stokes denklemi kullanarak kanal çevresindeki tüm akış alanı için HAD modeli ile analizler gerçekleştirmişlerdir. Kanal geometrisi için firar kenarı dışarı yönlü bükülerek deforme edilmiş NACA serisi 0015 profilini kullanarak, belirledikleri nümerik modeli uygulamışlardır. Kanal çıkışındaki açıyı adım adım arttırarak akış ayrılmasının gerçekleştiği noktaya kadar devam etmiş ve maksimum kaldırma

etkisinden yararlanabilmek adına açıyı belirlemişlerdir. Sonuç olarak güç katsayısını itki katsayısının bir fonksiyonu olarak ele aldıkları HAD analizlerini karşılaştırarak, aktüatör disk teorisinin rotor modellenmesinde yeterli olduğunu ve kanal eklenmesi ile rotor disk alanından geçen kütle akımının artışıyla doğru orantılı olarak, Betz limitinin aşılabileceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte kanallı rüzgar türbinindeki kütle akışının, standart açık tip rüzgar türbinindeki kütle akışına oranının itki katsayısındaki artışa bağlı olarak azaldığı sonucuna ulaşmışlardır [9].

Literatürdeki çoğu çalışmada kanal geometrisi ve biçimine ve bağlı olarak aynı süpürme alanına sahip kanallı ve açık tip rüzgar türbinlerinin analizlerinde, kanal yerleştirilmesinin rüzgar türbini gücünde artış sağladığı sonuçları görülmektedir. Bu bağlamda rüzgar türbini çevresinde difüzör etkisi yaratması adına kanat profilleri dışında da profiller kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar mevcuttur. S.A.H. Jafari ve B. Kosasih (2013) konik biçimli kanal içerisine yerleştirilen küçük boyutlu rüzgar türbinleri için HAD ile akış analizleri gerçekleştirmişlerdir. Farklı profillerde kanallar modelleyerek kanal uzunluğunun ve alan oranının güç verisine etkilerini incelemişlerdir. Modelledikleri 4 metrelik rotor çapına sahip küçük boyuttaki rüzgar türbini için sabit rüzgar hızı ile değişken rotor dönme hızlarında çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Kanal ve rotor çevresinde yüzey basınç katsayısı sonuçları ile kanal çevresinde görülen hız vektörleri ve hız büyüklük konturları ile de bölgesel akış ayrılması sonuçlarına ulaşmışlardır. Çalışmalarındaki analizler ışığında, güç artışında en önemli etkin parametre olarak alt atmosferik geri basıncın olduğunu belirtmişlerdir. Bu parametrenin de kanal alan oranıyla doğrudan ilişkili olduğunu bununla birlikte kanal duvarında gözlemlenebilecek akış ayrılmasının da basınç düşüş katsayısını azaltarak, güç katsayısında azalmaya sebebiyet vereceği sonucuna ulaşmışlardır [10].

Literatürde rüzgar türbini çevresine kanal yerleştirilmesi çalışmalarında çeşitli yaklaşım metotlarıyla gerçekleştirilen analiz uygulamaları mevcuttur. Deborah A.T. Rio Vaz ve ark. (2014) yayınladıkları makalelerinde kanat elemanı momentum metodu ile korunum prensiplerine dayanan HAD analizleri gerçekleştirerek kanal içerisine yerleştirilmiş rüzgar türbini için performans sonuçlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında rotor geometrisinde bir boyutlu analiz uygulaması kullanarak, eksenel indüktif faktörün yüksek değerlere ulaşmasından kaçınılması hipotezini temel almışlardır. HAD analizlerini aksisimetrik hipotezine göre uygulamışlardır.

Gerçekleştirdikleri analiz sonuçlarında ulaştıkları performans verilerini literatürdeki nümerik ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Bu bağlamda literatürdeki standart uygulama olan kanal içerisinde aktüatör disk kontrol hacmi teorisine göre güç katsayısı, kanal difüzör verimi ve kanal içerisinde maksimum eksenel hız oranı (difüzör hızlanma oranı) için teorik olarak sonuçlara ulaşmışlardır. Bununla birlikte standart teoride ele alınmayan rotasyon etkisini incelemek adına, kontrol hacmi için momentum korunum denklemi uygulanarak teğetsel ve eksenel indüksiyon faktörleri ve elde edilebilecek torku hesaplamışlardır. Çalışmalarının temel kapsamı olan kanat elemanı momentum metodu ile kanal yerleştirilmesinin performansa etkilerinin incelenmesi doğrultusunda kanal elemanı üzerine etkiyen kuvvet katsayıları ve hız diyagramlarını incelemiştir. Teğetsel ve eksenel indüksiyon faktörlerini bu metod uygulanarak da elde etmiş ve rotor performansını bu faktörlerin bir fonksiyonu olarak, kullanılan kanat profilinin literatürdeki aerodinamik karakteristik özelliklerinden de yararlanarak, elde etmişlerdir. Ulaştıkları sonuçların ışığında rüzgar türbini tasarımlarında kanal kullanılarak difüzör etkisinden yararlanılmasının, güç katsayısında belirgin artış sağladığını bildirmişlerdir [11].

R. Botempo ve M. Manna (2014) kanallı rüzgar türbini analizlerini doğrusal olmayan ve yarı analitik aktüatör disk modeline dayandırarak gerçekleştirmişlerdir. Analizlerinde, kanal duvarında ve ayrılma bölgesinde görülen üstdüşüm vorteksleri uygun şekilde düzenleyerek örtük formülasyon ile kesin sonuçlara ulaşılmasında dikkate almışlardır. Ulaştıkları sonuçlara göre kanallı rüzgar türbini ile elde edilen gücün arttığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte kanal ve rotor arasındaki doğrusal olmayan karşılıklı etkileşimi ve rotor ardındaki hava akımındaki ayrılmayı da analizlerinde incelemiştir. Sonuçlarda uygun şekilde entegre edilmiş kanal geometrileri ile birlikte kullanılan rüzgar türbinlerinin, standart açık tip rüzgar türbinlerine kıyasla daha fazla kütleli akış debisi sağladığı görülmektedir. Bu da daha fazla güç elde edilmesi sonucunun görülmesini beraberinde sağlamıştır. Bunlara ek olarak uyguladıkları doğrusal olmayan yarı analitik aktüatör disk metodu ile literatürde sıkça kullanılan standart lineer aktüatör disk metodunu karşılaştırarak elde ettikleri sonuçların kesinliğini test etmişlerdir. Bu karşılaştırmalarda hata analizi çalışması uygulanmış ve referans nümerik veriler için ideal akışkan aksisimetrik hız

ve basınç alanı dağılımlarını elde etmişlerdir. Sonuç olarak karşılaştırmalı uyguladıkları iki metodun sonuçlarının uygunluk gösterdiğini belirtmişlerdir [12].

Botempo ve M. Manna (2016) kanal içerisinde rüzgar türbini tasarımı için kanal etkisinin performansa olan etkilerini inceledikleri daha güncel çalışmalarında, yarı analitik yaklaşımın yanı sıra eksenel momentum teorisini incelemişlerdir. Eksenel momentum teorisi kullanarak elde ettikleri sonuçlarda, rüzgardan çekilen gücün artırılmasında etkisinin önemli rolü olduğunu ancak buna karşın kanal çevresinde akış alanının oluşmasına engel oluşturduğunu görmüşlerdir. Bu durumun önüne geçebilmek adına kanallı rüzgar türbininin lokalde ve genelde gösterdiği özelliklerin incelenmesinde yarı analitik yaklaşımdan yararlanmışlardır. Karşılaştırmalı olarak eksenel momentum teorisine göre belirlenen tüm rotor yük dağılımlarında ve kanal geometrilerinde, yarı analitik yaklaşımda daha uygun sonuçlar elde etmişlerdir. Literatürdeki benzeri diğer uygulamalara kıyasla, uyguladıkları yaklaşımda ayrılma ve rotasyon etkilerini yetkin şekilde hesaba katabilmişlerdir. Sonuçlarda kanal eklenmesiyle güç üretiminin artacağı ve kanal etkisinin artırılmasıyla güç getirisinin daha yüksek seviyelere çekilebileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca görülen değişikliklerin daha iyi kavranması adına rotor etkisinin ve kanal kamburluğunun performansa etkilerini akış alanının yerel özelliklerinden yararlanarak incelemişlerdir [13].

Kanal içerisine yerleştirilen rüzgar türbinleri için kanal ile rotor arasındaki etkileşimin performans üzerindeki etkilerini incelenerek optimal kanal tasarımının elde edilmesinin yanı sıra, rüzgar türbininin rotor kanat tasarımlarının iyileştirilmesi konusunda da literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Jerson R.P. Vaz ve David H. Wood (2016) yayınladıkları makalelerinde bu konuda bir çalışma yürütmüş türbin kanatlarının aerodinamik optimizasyonu üzerinde incelemelerde bulunmuşlardır. Kanal yerleştirilmesiyle ortaya çıkan difüzör etkisinin rüzgar türbininden elde edilen gücü artırıcı etkisi olmasına karşın, yapısal ve diğer maliyetlerinin ortaya çıkmasının bu kazancı sınırlandırır nitelikte olup olmadığı üzere çalışma yürütmüşlerdir. Analizlerini aerodinamik optimizasyon uygulaması ile gerçekleştirerek, literatürde de sıkça kullanılan kanat eleman metodunu ve difüzör verimini kullanmışlardır. Kanadın aerodinamik olarak optimize edilmesinde kendi geliştirdikleri algoritmayı kullanarak, kanat veter uzunluğu ve kanat açısı dağılımlarının kanal kullanılması durumundaki performansı için optimizasyon çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.

Optimizasyon hedef parametresi olarak kanal içerisinde difüzör hızlanma etkisini dikkate alarak iyileştirilmiş kanat geometrisini elde etmişlerdir. Literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırdıkları sonuçlarında, elde ettikleri iyileştirilmiş rotor geometrisiyle daha iyi performans elde ettiklerini bildirmişlerdir. Sonuçlarını farklı difüzör hızlanma oranları için elde ederek, difüzör hızlanma oranının artışıyla kanat veter uzunluğunun ve kanat dönüm açısının radyal dağılımlarında da artış olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca difüzör hızlanma oranının artışıyla optimize edilen kanat geometrisine göre elde edilen güç katsayısı verilerinde de artış olduğu sonucuna ulaşmışlardır [14].



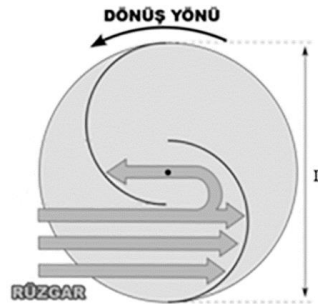
2. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Rüzgâr türbinleri günümüz dünyasında her geçen gün daha da önem ve ilgi kazanan enerji üretim sistemleri halini kazanmaktadır. Rüzgâr türbinleri, rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren, temelinde turbo makina denebilecek, elektrik enerjisi üreten makinalardır. Geçmişten günümüze yel değirmenleri ile başlayan ve günümüzde gelişen teknoloji ile efektif birer elektrik enerjisi üretim sistemi hale gelen rüzgâr türbinleri, tasarımda farklılıklar göstermelerine rağmen başlıca iki tiptedir. Bunlar yatay eksenli rüzgâr türbinleri ve düşey eksenli rüzgâr türbinleridir.

2.1. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin rotor dönme eksenleri yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin aksine yere dik pozisyonundadır. Temel olarak Savnoius ve Darrieus olacak üzere iki tipten oluşurlar. Darrieus tipi rüzgar türbinlerinde türbin düşey bir şaftta monte edilmiş kanatlardan oluşur. Kanatlar yatay eksenli rüzgar türbinlerde gibi profillere sahiptir ve rotor saftı boyunca uç kısımlardan birleşecek şekilde eliptik olarak yerleştirilir.

Savnoius tipi rüzgar türbinlerinde kanatlar yerine kepçe benzeri profiller kullanılır. Bu tip rüzgar türbinlerinde hava akışı içbükey kanat üzerinde yol izleyerek diğer profil üzerinde de bir etki oluşturur. Bu durumda performansta düşüşe yol açar. Bu sebeple kullanımları çok tercih edilmez. Savnoius ve Darrieus tipi türbinlere ek olarak melez denilebilecek düşey eksenli rüzgâr türbinini tasarımları mevcuttur [15].



Şekil 2.1: Savnoius tipi rüzgâr türbinlerinin düşey kesitten çalışma prensibi [15].

Düsey eksenli rüzgâr tipleri, yatay eksenlilerin aksine her yönden gelen rüzgâr ile rotor şaftının dönmesini sağladığından, rotorun rotasının bir başla değişle rüzgâr yönünün bir önemi yoktur. Buna karşın fırtınalı ve daha kaotik rüzgârlı havalarda düzgün şekilde performans göstermeyerek oldukça düşük başlangıç torku oluştururlar ve buda bazı istikrar sorununu beraberinde doğurur.

2.2. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri için geleneksel olarak yüzyıllar boyunca kullanılan yel değirmenlerinin modernize edilmiş tasarıdır. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde, rotorunun dönme eksenini yere paralel olacak şekildedir. Nacella bölümü türbin kulesine dik olacak şekilde montajlanmıştır dolayısıyla rotor kanatları da rüzgârın hareket yönüne dik olacak şekilde yerleşmiş olur. Böylelikle rüzgâr yönüne dik olarak yerleştirilen kanatlar yardımıyla rüzgârdan maksimum enerjinin kazanılması hedeflenir. Rüzgârın kanatlar üzerinde etkidiği kuvvet (itki) sayesinde türbin rotorunun dönmesi ve böylelikle rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin rotorun dönüşüyle mekanik enerjiye dönüşmesi sağlanır. Genel olarak en yaygın rüzgâr türbini tasarım tipinin yatay eksenli türbinler olduğu söylenebilir [15].

Yatar eksenli rüzgâr türbinlerinin rotor kanat sayılarında tasarımlarına bağlı olarak farklılıklar görülebilir. (2 kanatlı, 3 kanatlı, 5 kanatlı vb. yapıda). Bununla birlikte rotoru oluşturan kanat ve gövdenin birbirlerine göre yerleşiminde de tasarıma göre farklılıklar gözlemlenebilir. Rüzgârı önden alan veya rüzgârı arkadan alan türbin modelleri mevcuttur. Genel olarak rüzgârı önden alan modeller günümüz tasarımlarında daha çok tercih edilmektedir.

2.3. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Bileşenleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri basitçe rotor kanatları, rotor gövdesi, motor yuvası, kule ve jeneratör bileşenlerinden oluşur. Şekil 2.2’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir [24].

2.3.1. Türbin kanatları ve rotor

Rüzgâr türbini kanatlarının aslı işlevi, rüzgârın kinetik enerjisinin üzerine etkiyen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin yardımıyla mekanik enerjiye çevrilmesini sağlamaktır. Kanatlar, cam elyaf takviyeli polyster, ahşap-epoksi, alüminyum veya

güçlendirilmiş plastik malzemelerden imal edilir. Kanatlar üzerlerine etkiyen kuvvetlere ve periyodik olarak tekrar eden yüklere karşı dayanıklı olmalıdır. Bu bağlamda türbin rotoru kanatlar ve gövde bağlantısı önem arz eder. Kanatların boyutları, geometrisi ve kesit profilleri tasarlanan türbinin performans gereklilikleri doğrultusunda belirlenmelidir. Buna göre kanat geometrileri

aerodinamik olarak optimize edilirken, gövde ile bağlantı bölümlerinde yapısal olarak ihtiyacı karşılamalıdır. Bununla beraber daha keskin arka kenara sahip kanatlar aerodinamik olarak avantaj sağlasalar da yapısal olarak üretimlerinin zor olması tasarımlarda performansı en uygun seviyede tutacak çözümler üzerinden ilerlemek zorundadır. Kanalarda kullanılacak materyal, kanat profilleri ve boyutlarının yanı sıra rotor tipi de tasarımda önem arz etmektedir. Bu doğrultuda yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde rotor üzerine kurulu iki veya üç ve hatta tasarıma göre daha fazla kanat bulunabilir.

2.3.2. Kule

Kule, motor yuvası ve rotor gövdesi kısımlarını destekleyen bölümdür. Genellikle beton, çelik veya çelik kafesten imal edilen rüzgâr türbini kulelerinin yüksekliği tasarım açısından türbin çapına uygun olarak ayarlanmalıdır. Yüksekteki rüzgâr hızlarının daha fazla olmasından yararlanmak adına ve dolayısıyla daha fazla rüzgâr enerjisi toplayabilmek adına bu özellik etkili rol oynar. Buna karşın maliyetin artıyor olması da kule yüksekliğinin, maliyet – performans ilişkisinin tayin edeceği uygun değer değer ile belirlenmesini sağlayacaktır. Kule tasarımıyla ilgili bir başka parametrede eğilme doğal frekansıdır.

2.3.3. Motor yuvası

Türbinin verimli olarak çalışması için gerekli olan tüm bileşenleri içeren bileşendir. Motor yuvası (nacella) olarak adlandırılan kısım jeneratör, dişli kutusu, rotor dönme hızının gerekli durumlarda ayarlanabilmesi adına frenleri ve kontrolörleri bünyesinde barındırır.

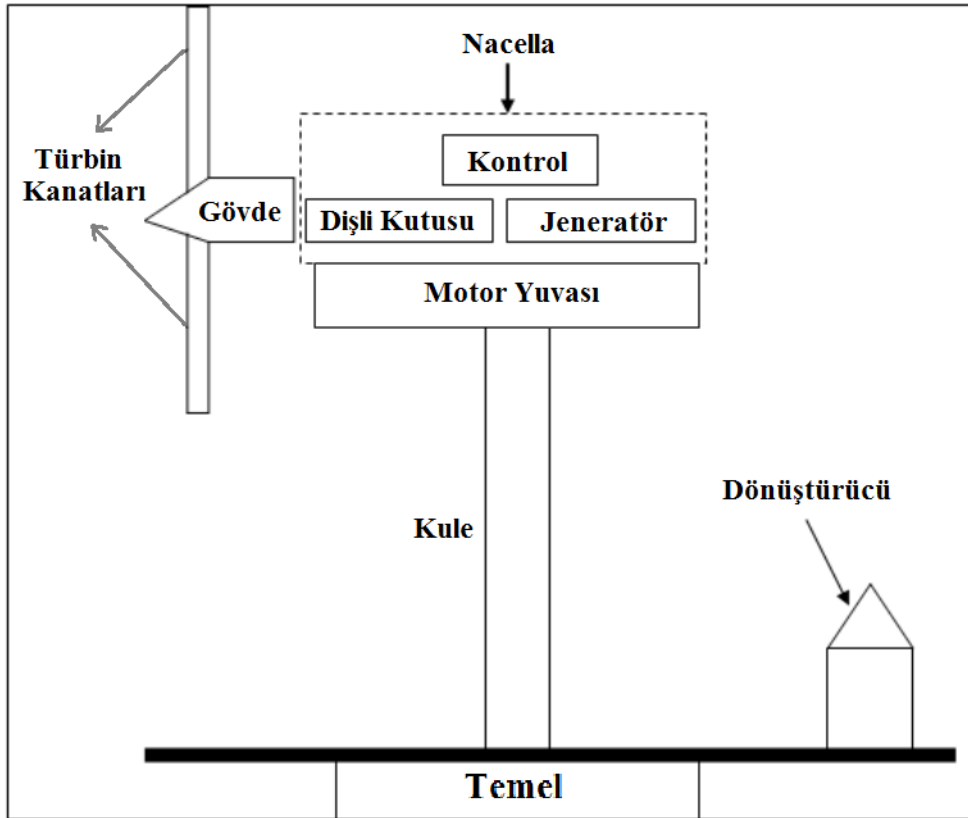
2.3.4. Dişli kutusu

Dişli kutusu, türbin rotorun rüzgâr enerjinden elde ettiği düşük hızlı yüksek tork gücünün, uygun değer elektrik enerjisini elde edilebilmesi adına jeneratör için gerekli olan yüksek hızlı düşük tork gücüne değiştirilmesi için kullanılır. Türbin rotorunun,

üzerine etkiyen kuvvetler ile elde ettiği açısız hız genellikle ihtiyaç duyulan elektriksek frekans değerinin üretilmesi adına jeneratörü eyleme sokmakta yeterli hızda değildir. Bu doğrultuda dişli takımlarının yardımıyla mekanik hızda artış sağlanarak, rotora bağlı şaftın düşük açısız hızını jeneratöre bağlı şaftta yüksek açısız hıza dönüştürür. Rotor şaftı ve jeneratör şaftı arasında dakikada yaklaşık 30 ila 60 dönüş hızının 1000 ila 1800 rpm olarak arttırılması için kullanılır. Rüzgâr türbini için kullanılan şanzımanlar üstün kaliteli alüminyum alaşımları, paslanmaz elik, dökme demir vb. malzemelerden üretilmektedir.

2.3.5. Jeneratör

Dişli kutusunun dönen mekanik enerjisi, jeneratör şaftından jeneratöre bağlanır. 'Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasası' prensibi ile çalışır, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Rüzgar türbinlerinde kullanılan jeneratörler alternatif akım veya doğru akım jeneratörleri olabilir ve bir dönüştürücü yardımıyla bu jeneratörlerdeki elektrik akımı şebekeye uygun hale getirilir. Jeneratör tipinin belirlenmesinde, kullanılan dişli kutusunun, rüzgâr türbininin boyutunun, jeneratörde kullanılan kutup sayısının etkisi bulunur.



Şekil 2.2: Yatay eksenli rüzgâr türbini bileşenleri [25].

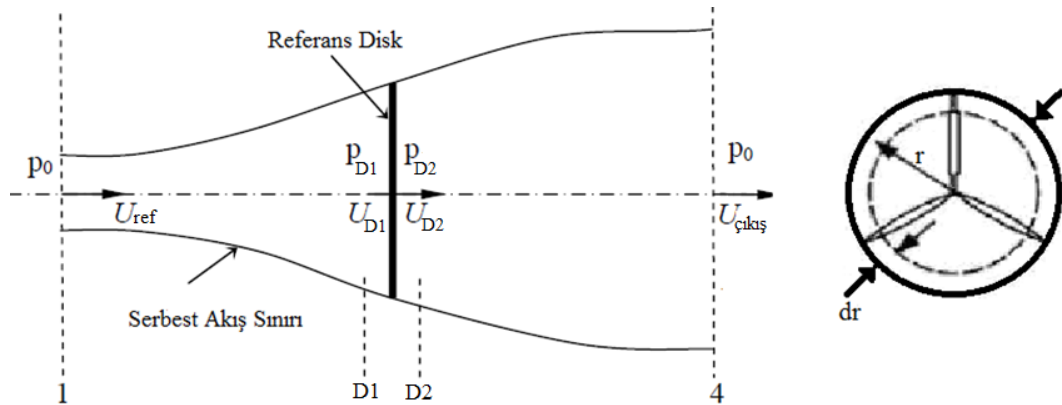
3. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TEORİSİ

3.1. Momentum Disk Teorisi ve Betz Limit

Rüzgâr türbinlerini tasarlarken karşılaşılan en temel meydan okuma, rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin ne kadarlık kısmının türbin kanatları tarafından tutulacağıdır. Kanatlar rüzgârın geçişine engel olarak sahip olduğu kinetik enerjinin azalmasını sağlarken rotorun dönmesini sağlayarak mekanik enerjinin oluşmasını da beraberinde getirirler. Rotor tarafından tutulabilecek rüzgâr gücünün belirlenmesinde momentum disk teorisinden yararlanır. Momentum disk teorisi ile serbest akış içerisinde yerleştirilen türbin rotoru yerine aynı çapta sonsuz ince bir disk olduğu kabul edilir ve akış içerisindeki bu disk alanından geçen havanın momentumundaki değişim incelenir. Rotorun ardına geçen rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji azalacağından, diskin devamında akış hızının da azalacağı kabul edilir. Disk momentum modelinde kabul edilen şartlar;

- Bir boyutlu inceleme
- Sıkıştırılmaz akışkan
- Sürekli rejim
- Zamandan bağımsız
- Momentumun korunması

şeklindedir.



Şekil 3.1: Serbest akış kontrol hacmi ve basınç - hız terminolojisi [18].

Buna göre Bernoulli Denklemi, belirlenen diskin önündeki ve ardındaki bölgeler için yazılırsa,

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho U_{ref}^2 = p_{D1} + \frac{1}{2}\rho U_D^2 \quad (3.1)$$

$$p_{D2} + \frac{1}{2}\rho U_D^2 = p_0 + \frac{1}{2}\rho U_{çıkış}^2 \quad (3.2)$$

olduğu görülür. Bernoulli denkleminin kinetik enerji ifadesi için sürekli rejimde belirlenmiş olan referans disk alanından geçen kütle debisi yukarıda da görüldüğü üzere,

$$\dot{m} = \rho A U_D \quad (3.3)$$

şekilde ifade edilmiştir. Serbest akış sınırları dâhilinde belirlenen kontrol hacmi içerisinde bir boyutlu lineer momentumun korunumu denklemleri uygulanarak, sistemi etkileyen net kuvvet elde edilir. Kontrol sistemindeki bu net kuvvet, rüzgâr türbinine etkileyen net kuvvetin yani itkinin zıttı olup zamandan bağımsız, bir boyutlu, sürekli rejim için elde edilmiş olur.

$$T = \rho A U_D (U_{ref} - U_{çıkış}) = A(p_{D1} - p_{D2}) \quad (3.4)$$

Türbin rotoru üzerine etkileyen net itki belirlenen disk alanı göz önüne alınarak, bu alanın giriş ve çıkışı için basınç farkından da elde edilebilir. Serbest akış içinde sabit olan rüzgârın hızı rüzgâr türbini kesitinden geçerken hızını kaybedeceğinden, rotor girişi ve çıkışı arasında devamsız olarak basınç farkı oluşacaktır.

$$\delta p = (p_{D1} - p_{D2}) \quad (3.5)$$

$$T = A * \delta p \quad (3.6)$$

Bu doğrultuda Bernoulli denklemi düzenlenir ve her iki formülü de sistemdeki basınç farkı formunda yazılırsa,

$$\delta p = \frac{1}{2}\rho (U_{ref} - U_{çıkış})^2 \quad (3.7)$$

olarak elde edilir. Elde edilen basınç farkı ifadesini, rotor üzerine etkileyen itki ifadesine uygularsak,

$$T = \frac{1}{2} \rho A (U_{ref}^2 - U_{çıkış}^2) \quad (3.8)$$

ifadesi şeklinde sonuca ulaşılır. Kütleli debi cinsinden ifade edilen itki denklemi ile basınç farkı cinsinden ifade edilen itki denklemini birlikte çözerek referans disk düzlemindeki hızın, belirlenen serbest akış kontrol hacminin girişindeki ve çıkışındaki hızlar cinsinden ifadesine ulaşılır. Buna göre,

$$U_D = \frac{1}{2} (U_{ref} + U_{çıkış}) \quad (3.9)$$

Denklemleri çoklu hız ifadelerinden arındırarak daha sade bir forma sokmak adına, rüzgâr hızının azalma katsayısı şeklinde açıklanabilecek bir ifade tanımlanırsa ve referans disk düzlemi hızı ile kontrol hacmi çıkışındaki hız bu ifadeye göre düzenlenirse,

$$k_V = \frac{(U_{ref} - U_D)}{U_{ref}} \quad (3.10)$$

$$U_D = U_{ref}(1 - k_V) \quad (3.11)$$

$$U_{çıkış} = U_{ref}(1 - 2k_V) \quad (3.12)$$

Sonuç olarak rotorda oluşan güç (P), rotara etkiyen itkinin ve disk düzlem hızının çarpımından elde edilir. Buna göre gerekli düzenlemeler yapılarak,

$$P = T U_D \quad (3.13)$$

$$P_{türbin} = \frac{1}{2} \rho A (U_{ref}^2 - U_{çıkış}^2) U_D \quad (3.14)$$

$$P_{türbin} = \frac{1}{2} \rho A k_V^4 (1 - k_V)^2 U_D^3 \quad (3.15)$$

türbin gücü ifadesi elde edilir. Ulaşılan denklemde rüzgâr hızının azalma katsayısı cinsinden belirtilen ifade, güç katsayısı yani rotorun rüzgârın sahip olduğu enerjiden çekebildiği güç oranını temsil eder. Belirlenen referans disk alanından geçen rüzgârın sahip olduğu mevcut kinetik enerji,

$$E_R = \frac{1}{2} m U^2 \quad (3.16)$$

olarak yazılır. Birim zamanda belirlenen disk alanından geçen rüzgârın enerjisinden, güç ifadesini elde etmek istersek,

$$P_{disk} = \frac{dE_R}{dt} = \frac{1}{2}U^2 \quad (3.17)$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho AU \quad (3.18)$$

$$P_{disk} = \frac{1}{2}\rho U^3 A \quad (3.19)$$

Rüzgârdan elde edilebilecek maksimum güç belirlenmiş olur. Denklem 3.19'da ulaşılan maksimum güç ve denklem 3.15'te ulaşılan türbin tarafından çekilebilecek güç ifadelerinden yararlanarak rüzgâr türbininin güç katsayısı bulunur. Burada genel uygulamada denklem 3.19'da disk düzlemindeki rüzgâr hızı için U_D kabulü yapılarak,

$$C_p = \frac{P_{türbin}}{P_{disk}} = \frac{\frac{1}{2}\rho A k_V^4 (1 - k_V)^2 U_D^3}{\frac{1}{2}\rho U_D^3 A} = 4k_V(1 - k_V)^2 \quad (3.20)$$

Sonucu elde edilir. Denklem 3.20'de elde edilen güç katsayısı ifadesinin alabileceği maksimum değer hesaplanmak istenildiğinde $k_V = 1/3$ değeri için $C_{p,maks}$ 'ın 0,5926 (16/27) olduğu sonucuna ulaşılır. Bu değer teorik olarak bir rüzgâr türbininin, rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjiden elde edebileceği maksimum türbin gücü olup 'Betz Limiti' olarak adlandırılır. Uygulamada ise standart rüzgâr türbini tasarımlarında bu limite ulaşamaz. Güç katsayısı her rüzgâr türbini için karakteristik bir tanım özelliği gösterir. Buna göre her bir rüzgâr türbini, rüzgâr hızının bir fonksiyonu olarak kendine has güç katsayısı eğrisine sahiptir. Ayrıca rüzgar türbini tasarımlarını etkileyen diğer mühendislik gerekliliklerinin, örneğin dayanıklılık ve maliyet gibi özellikler, sağlanması da pratikte bu güç katsayısının daha da aşağıya düşmesine neden olmaktadır ve genellikle en uygun performans noktasında 0,35 ile 0,45 aralığındaki güç katsayısı görülen rüzgar türbinleri mevcuttur. Buna ek olarak jeneratör ve motor yuvası gibi kısımlardaki diğer kayıp faktörleri de hesaba katıldığında yalnızca %10 ile %30 arasında rüzgâr gücünün elektrik enerjisine dönüştürülebildiği söylenebilir. Sonuç olarak genelleştirilmiş formda rüzgâr türbinlerinin gücü Denklem 3.21'de ki gibi ifade edilir.

$$P_{t\u00fcrbin} = \frac{1}{2} C_P \rho A U_D^3 \quad (3.21)$$

Betz limite g\u00f6re maksimum elde edilebilecek g\u00fc\u00e7 katsayısı ($C_{P,max} = 16/27$) ifadeye eklenererek maksimum limit t\u00fcrbin g\u00fc\u00e7\u00fc bulunur.

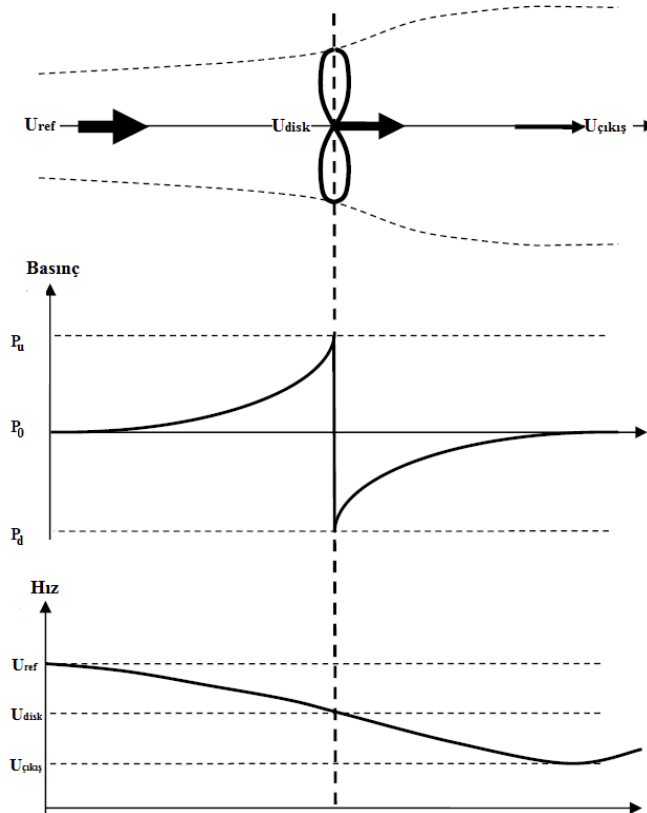
$$P_{t\u00fcrbin} = \frac{1}{2} \left(\frac{16}{27} \right) \rho A U_D^3 = \frac{1}{2} \left(\frac{16}{27} \right) \rho (\pi r^2) U_D^3 \quad (3.22)$$

T\u00fcrbin g\u00fcc\u00fcn\u00fcn belirlenmesinde kullanılan yol t\u00fcrbin eksenel itkisinin de belirlenmesinde takip edilirse, denklem 3.8'de k_V d\u00f6n\u00fc\u00fcm\u00fc ger\u00e7ekle\u00ftirilmelidir.

$$T_{t\u00fcrbin} = \frac{1}{2} \rho A 4k_V (1 - k_V) U_D^2 \quad (3.23)$$

Denklem 3.23'den yararlanarak itki katsayısı elde edilebilir. Buna g\u00f6re disk alanı i\u00e7in maksimum itki ifadesine oranı yazılmalıdır.

$$C_T = \frac{T_{t\u00fcrbin}}{T_{disk}} = \frac{\frac{1}{2} \rho A k_V 4(1 - k_V) U_D^2}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 U_D^2} = 4k_V (1 - k_V) \quad (3.24)$$



Şekil 3.2: Akış hacmi boyunca basınç ve hız ilişkisi [18].

Türbin rotorundan geçen rüzgârın hızında azalma olması, rüzgârın sahip olduğu enerjinin bir kısmının rotor tarafından rüzgâr gücü olarak tutulmasının doğal sonucudur. Basit bir şekilde rotor rüzgârın gücünü tutarken aynı zamanda da frenlemiş olur. Buna karşın serbest akış içerisinde sabit bir P_0 basıncındaki rüzgâr, türbin rotorunun giriş ve çıkışında süreksiz durum gösterir. Türbin rotoru girişinde basınç serbest akışa göre artış gösterirken, rotor çıkışında ise ani düşüş gösterir ki bu olgu rotorun ardında emiş etkisinin oluşmasına yol açar. İdeal durumdan uzaklaştıkça ve rotor çıkışında daha fazla boşluk oluşturmak yoluyla türbinin ardında oluşan emiş durumunu arttırılır ve aynı zamanda basınç düşüşünün de artışı sağlanır. Böylece türbinin rüzgârın enerjisinden daha fazla alabilmesi sağlanmış olur.

Türbin rotorunun rüzgârdan çektiği güç, birim zamanda rotordan geçişi esnasında kaybettiği kinetik enerjisinden elde edilebilir. Buna göre kontrol hacmi girişindeki ve çıkışındaki hızlardan yararlanarak hesaplanan kinetik enerji kaybı ile rotordaki güç elde edilmek istenirse;

$$P_{türbin} = \frac{dE}{dt} = \frac{\frac{1}{2}\dot{m}U_{ref}^2 - \frac{1}{2}\dot{m}U_{çıkış}^2}{\Delta t} = \frac{1}{2}\dot{m}(U_{ref}^2 - U_{çıkış}^2) \quad (3.25)$$

olarak yazılabilir. Bununla birlikte kütleli debinin korunumu kabulü doğrultusunda Euler Teoremi uygulanarak rotor üzerine etkiyen kuvvet hesaplanırsa;

$$F = m\vec{a} = m\frac{dU}{dt} = \dot{m}\Delta U = \dot{m}(U_{ref} - U_{çıkış}) \quad (3.26)$$

ifadesi elde edilir. Denklem 3.24'te bulunan kuvvet ifadesi yardımıyla birim enerji ve güç ifadelerine de ulaşılır. Buna göre;

$$dE = F b dx \quad (3.27)$$

$$P = \frac{dE}{dt} = F \frac{dx}{dt} = FU \quad (3.28)$$

Denklem 3.24 'de bulunan F ifadesini yerleştirilerek,

$$P = \dot{m}(U_{ref} - U_{çıkış})U \quad (3.29)$$

olacak şekilde elde edilir. Rotor tarafından tutulan güç ifadesini gösterir. Denklem 3.31 ve denklem 3.35 birlikte çözümlerse hızlar arasındaki ilişkiyi gösteren ifadeye ulaşılır.

$$P = \dot{m}(U_{ref} - U_{çıkış})U = \frac{1}{2}\dot{m}(U_{ref}^2 - U_{çıkış}^2) \quad (3.30)$$

$$U = \frac{(U_{ref} + U_{çıkış})}{2} \quad (3.31)$$

Denklem 3.37'de elde edilen bu ifade ile rotor geçişindeki rüzgâr hızının türbin girişi ve çıkışındaki hızların ortalaması olarak alınabileceğini gösterir. Momentum disk teorisinde bulunduğu üzere parametrik olarak elde edilen C_p ifadesinden, Denklem 3.24, yararlanarak serbest akış rüzgâr hızı ve türbin rotor çıkışındaki hızı arasındaki ilişki elde edilebilir.

$$C_p = 4k_v(1 - k_v)^2 = 4k_v^3 - 8k_v^2 + 4k_v \quad (3.32)$$

$$\frac{dC_p}{dk_v} = 12k_v^2 - 16k_v + 4 \quad (3.33)$$

$$3k_v^2 - 4k_v + 1 = (3k_v - 1)(k_v - 1) = 0 \quad (3.34)$$

olarak şekilde elde edilir. Maksimum performansın elde edilmesi adına C_p 'nin türevinin 0'a eşit olduğu nokta için hızlar arasındaki ilişkiyi veren k_v katsayısı değeri bulunur. Buna göre,

$$(k_v - 1) = 0, \quad k_v = 1 \quad (3.35)$$

$$\frac{(U_{ref} - U_D)}{U_{ref}} = 1 \quad (3.36)$$

bu durumda rotor geçişindeki rüzgâr hızı (U_{Disk}) sıfır bulunduğu ve bu durum ideal maksimum güç üretimi için imkânsız olacağından denklem çözümünden gelen diğer k_v katsayısı ile devam edilirse,

$$(3k_v - 1) = 0 \quad (3.37)$$

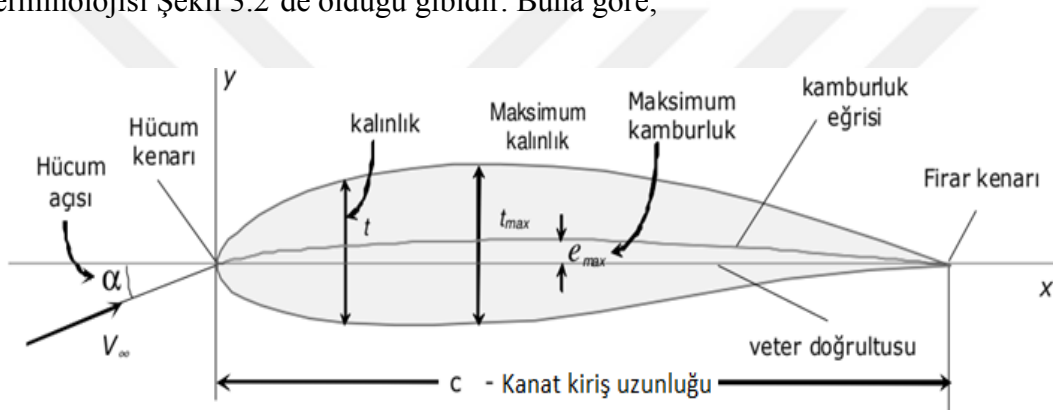
$$\left(3 \frac{(U_{ref} - U_{Disk})}{U_{\infty}} - 1\right) = 0 \quad (3.38)$$

$$U_D = \frac{2}{3}U_{ref} = 2U_{çıkış} \quad (3.39)$$

sonuçlarına ulaşılır.

3.2. Kanat Profili Terminolojisi

Rotor kanadına etkiyen kuvvetlerin kaldırma ve sürüklenme katsayısı verileri, kanat profilinin geometrik bilgisini gerektirir. Rotor kanatları çeşitli kullanım ve tasarım durumlarına adapte olacak şekilde kendilerine özgü profiller ile tasarlanırlar. Çoğu rotor kanadının enine kesit şekilleri kanat kirişi boyunca aynı değildir. Profil üzerindeki her noktada yaşanan belirli hız ve kuvvet verilerinden en uygun şekilde yararlanılabilme adına ve kanat kökü ile kanat ucu arasındaki yükü dengelemek amacıyla kanat yarıçapı boyunca farklı profiller kullanılabilir. Bununla beraber kanat boyunca bükülme yaratarak kanat kökü ve kanat ucu arasında rüzgarı karşılayan hücum açısının farklılık göstermesi sağlanabilir. Genel olarak bir kanat profilinin terminolojisi Şekil 3.2’de olduğu gibidir. Buna göre;



Şekil 3.3: Kanat profili terminolojisi [18].

Kanat kiriş çizgisi; kanat profilinin hücum kenarı ve firar kenarı arasındaki hattır.

Kanat kiriş uzunluğu/veter uzunluğu; kanat kiriş çizgisinin uzunluğu olup profilin karakteristik uzunlamasına boyutudur.

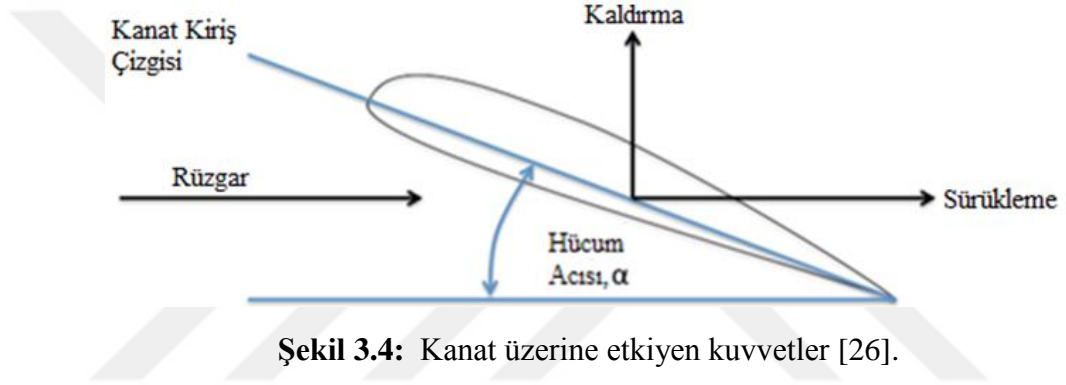
Kamburluk eğrisi; kanat profilinin alt ve üst yüzeyleri arasında ortalama mesafede çizilmiş çizgidir. Kanat kiriş çizgisiyle çizgi uçları birleşir. Profil kesitinin aerodinamik özelliklerinin belirlenmesinde ortalama kamburluk eğrisi önem arz eder. Şekil 3.2’de görülen kanat profilinin ortalama kamburluk eğrisi, kanat kiriş çizgisinin üzerinde olduğundan pozitif kamburluk eğrisine sahiptir.

Maksimum kalınlık; kanat kiriş çizgisi üzerinde yüzdeler olarak pozisyonu belirtilir. Kanat profilinin şeklini ve performansını tanımlamada etkindir.

Maksimum kamburluk; kamburluk eğrisinin şeklinin belirlenmesine yardımcı olmakla beraber, kamburluk eğrisi ile kanat kiriş uzunluğu arasındaki en büyük farkı gösterir. Kanat kiriş uzunluğu üzerindeki pozisyonu yüzdeler oran ile belirtilir.

3.3. Kanat Profili ve Kanat Elemanı Teorisi

Kanat profilleri bir kanat kiriş çizgisi üzerinde 2 farklı eğriden oluşan profillerdir. Profilin her iki tarafında farklı kamburluk eğrisinin görülüyor olması, örneğin kanadın üst eğrisinin daha kambur formda olması, rüzgârı karşılayan kanadın her iki tarafında farklı akışkan hızlarının oluşmasına yol açar. Bu durum da kanadın iki tarafında basınç farkının gözlemlenmesini sağlayarak, yüksek basınç görülen kanat yüzeyinden alçak basınç görülen tarafa doğru bir kaldırma kuvvetinin oluşmasına yol açar. Bununla beraber akış yönüne paralel olmak üzere kanat üzerinde sürüklenme kuvveti görülür. Bu iki temel kuvvetin sonucunda türbin rotorunun dönmesine yol açan durum ortaya çıkar.



Şekil 3.4: Kanat üzerine etkiyen kuvvetler [26].

Rüzgârın hareket doğrultusu ile kanat kiriş çizgisi arasında oluşan açığa ise hücum açısı adı verilir. Kanat geometrilerinin oluşturulmasında, her bir kanat profili için en uygun kaldırma ve sürüklenme kuvveti değerlerine sahip olduğu hücum açılarının belirlenmesi gerekmektedir. Kanat boyunca tasarım şartlarına ve rüzgâr türbini tipine uygun olarak kullanılacak profillerin belirlenmesinde, kanat profillerinin performansına aerodinamik olarak etki eden temel karakteristik özellikleri olan kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayısı etkilidir. Rüzgâr türbinin güç üretimini en uygun seviyeye çıkarabilmek adına kanat profilinin bu karakteristik özellikleri göz önüne alınarak kanat geometrisi tasarlanmalıdır. Bu karakteristik özellikler aerodinamik olarak Reynold sayısının bir fonksiyonu olarak her bir kanat profili için değişim gösterir. Reynold sayısı,

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (3.40)$$

şeklinde tanımlanırken, burada L olarak belirtilen ifade yerine kanat profilinin aerodinamik karakteristiği incelenmek istenildiğinden kanat genişliği (c) kullanılır.

Buna göre kanat genişliği boyunca etki eden kuvvetlerin, yine kanat genişliği boyunca etkili olan dinamik kuvvete oranı şeklinde kaldırma ve sürüklenme katsayıları elde edilebilir.

Profilin sürüklenme ve kaldırma katsayıları Reynold sayısı ile birlikte hücum açısının da birer fonksiyonudur. Kanat tasarımına doğrudan etki eden kaldırma ve sürüklenme katsayılarının tayin edilmesinde hücum açısına bağlı olarak elde edilmelidir. Kanat profili verileri üzerine yapılan incelemeler, bir kanat profilinin C_L ve C_D eğrilerinin hücum açısı (α) ve Reynold sayısının bir fonksiyonu olarak davranışının makul olarak aşağıdaki değişkenlere göre karakterize edildiğini göstermektedir:

- Kanat profil kalınlığı ile kanat giriş uzunluğu oranı (b/c)
- Kanat kamburluğu
- Hızın kesilmesi, bir başka deyişle hücum açısının bir fonksiyonu olarak akış ayrılmasıdır. Bu durumun en temel etkeni kanat profilinin sahip olduğu kendine has şeklin detaylarıdır.
- Rüzgârı karşılayan öncü kanat yüzeyinin pürüzlülüğü

Hücum açısının pozitif değerde olduğu normal operasyon durumunda genel olarak kamburluk etkisinin daha fazla gözlemlendiği kanat profillerinde kaldırma katsayısının sürüklenme katsayısına oranının simetrik olan kanat profillerine göre daha fazla olduğu gözlemlenir. Bu durum kamburluğun daha aktif bir tasarım parametresi olarak kullanılmasını ve kamburluğu daha fazla olan profillerin yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde öncül olarak tercih edilmesini de beraberinde doğurmaktadır.^[11] Kaldırma ve sürüklenme katsayıları bakımından gösterdikleri farklılıklara göre, tasarlanan rüzgâr türbini için en uygun olan profil seçilmelidir. Özellikle orta ve küçük rotor çapına sahip rüzgâr türbinlerinin kanat tasarımlarında, yüksek kaldırma katsayısı istenirken buna karşın düşük sürüklenme katsayısına sahip profiller tercih edilmelidir. Buna göre C_l/C_d oranının bir diğer deyişle süzülme oranının maksimum olduğu hücum açıları için kanat tasarımının gerçekleştirilmesi yapılır. Yukarıda da tanım olarak belirtildiği üzere sürüklenme ve kaldırma katsayıları şu şekilde ifade edilir;

$$C_D = \frac{\frac{F_D}{l}}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} \quad (3.41)$$

$$C_L = \frac{\frac{F_L}{l}}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} \quad (3.42)$$

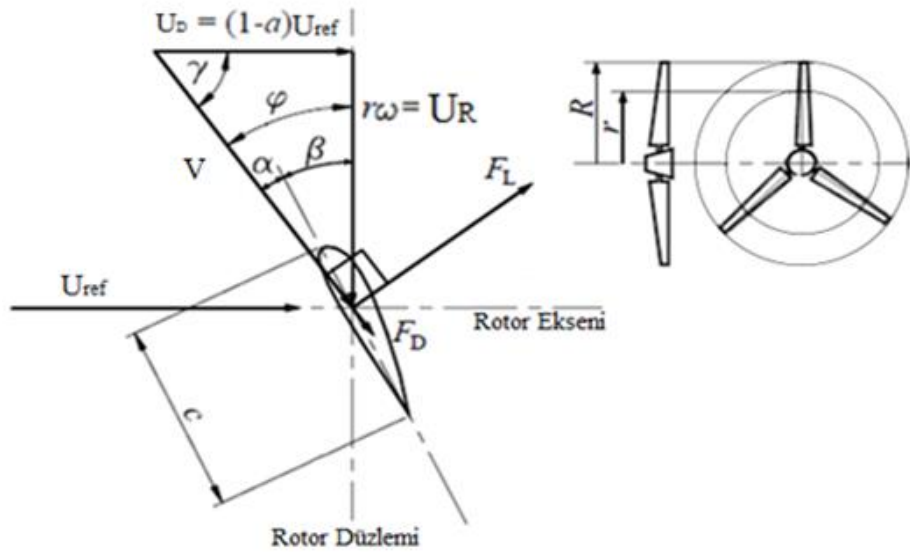
Kanat eleman teorisinde her bir eleman birbirinden bağımsız olarak ele alınır, bununla beraber sabit bir aksenal akış katsayısı olduğu ve radyal etkileşimin olmadığı kabulleri yapılır. Bu bağlamda kanat kesitinin yani kanat profilinin tasarıma olan etkisi daha net ortaya çıkmaktadır. Akışkan ortamında hareket ettirilen bir kanat profili kesitinde aerodinamik kuvvet bileşenlerinden hareket yönüne dik olan kaldırma kuvveti;

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho U^2 bc \quad (3.43)$$

kaldırma katsayısı da ifadeye katılarak yukarıdaki gibi belirlenir. Buna göre serbest akış rejimi içerisindeki bir kanat profiline etki eden kaldırma kuvveti, akışkanın yoğunluğu (ρ), serbest akış hızının (U) karesi, kanat kesitinin genişliği (b), kanat giriş uzunluğu (c) ve kaldırma katsayısının çarpımı sonucunda elde edilebilir. Yine benzer şekilde kanat üzerine etki eden sürüklenme kuvveti de;

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho U^2 bc \quad (3.44)$$

C_D , sürüklenme katsayısını ifade etmek üzere, şeklinde bulunur.



Şekil 3.5: Belirli bir r pozisyonundaki hız ve açılar ile etki eden kuvvetler [18].

3.3.1. Betz kanat teorisi

Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, R yarıçaplı bir türbin için değişken r radyal pozisyonunda sahip olduğu kanat geometrisinin elde edilmesi adına belirlenen radyal pozisyonundaki açılar ve kanat kiriş uzunluğunun bulunması gerekmektedir. Kaldırma katsayısının sürüklenme katsayısına oranının maksimum olduğu hücum açısı, serbest akış doğrultusunda/rotor ekseninde rotor düzleminde geçerken görülen rüzgâr hızı ve tasarım parametreleri doğrultusunda belirlenen rotor açısal hızı verileri elde edilip kullanılarak kanat geometrisi tanımlanmış olur. Betz kanat teorisinde rüzgârın rotasyonu dikkate alınmaz. Dolayısıyla bir 'r' radyal pozisyonunda, rotorun teğetsel hızı bir başka değişle Şekil 3.5'den de görüldüğü üzere aşağı yönlü hızı için denklem 3.47'deki ifade kullanılır. Teğetsel hızın tanımlanmasında rotorun açısal hızı da ifade edilmelidir. [18] Buna göre,

$$\omega = 2\pi N \quad (3.45)$$

$$U_R = \omega r = 2\pi N r \quad (3.46)$$

Denklem 3.45'da N olarak belirtilen terim rotorun saniyede gerçekleştirdiği tur sayısını ifade eder. Bunlarla beraber rotor düzlemindeki hız üçgeninin de tanımlanması gerekir. Rotor düzlemindeki rüzgâr hızı, kanat teğetsel hızı ve bağıl hızın oluşturduğu hız üçgeninden,

$$V^2 = U_R^2 + U_D^2 \quad (3.47)$$

ifadesi elde edilir. Kanat açılarının belirlenmesinde tanımlanan hız üçgeninden yararlanarak denklemler elde edilebilir.

Rüzgâr türbini tasarımında göz önünde bulundurulmuş önemli parametrelerden biri de kanat uç hızının rotor eksenine rüzgâr hızına oranıdır. Kanat uç hızı oranı olarak adlandırılan bu parametre hem kanat açılarının hem de kanat kiriş uzunluğunun belirlenmesinde etkin bir parametre olarak kullanılır. Ayrıca kanat uç hızı oranının değişken değerlerine göre rüzgâr türbinin performans eğrileri de elde edilir.

$$\lambda = \frac{U_{tip}}{U_D} = \frac{\omega R}{v_1} \quad (3.48)$$

Kanat açılarının ve hızlarının gösterildiği figürden de yararlanarak, kanat geometrisini tanımlayan aşağıdaki denklemlere ulaşılır.

$$\gamma(r) = \arctan\left(\frac{3r\lambda}{2R}\right) \quad [\text{rad}] \quad (3.49)$$

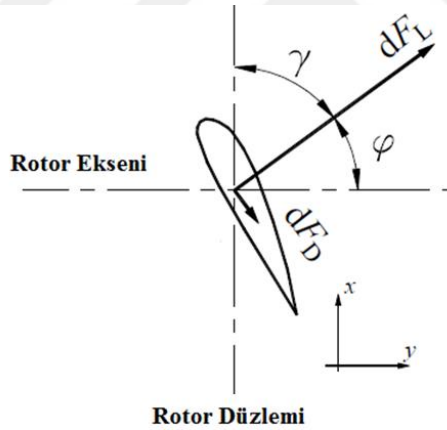
$$\varphi(r) = \arctan\left(\frac{2R}{3r\lambda}\right) \quad [\text{rad}] \quad (3.50)$$

$$\beta(r)_{\text{Betz}} = \arctan\left(\frac{2R}{3r\lambda}\right) - \alpha(r) \quad [\text{rad}] \quad (3.51)$$

Kanat eleman teorisinden bir r radyal pozisyonunda alınan dr kalınlığındaki kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri,

$$dF_L = \frac{1}{2} \rho V^2 c dr C_L \quad [\text{N}] \quad (3.52)$$

$$dF_D = \frac{1}{2} \rho V^2 c dr C_D \quad [\text{N}] \quad (3.53)$$



Şekil 3.6: Bir kanat elemanı üzerine etkiyen kuvvetler [18].

Rotor düzlemindeki torku belirtmek istersek x eksenini doğrultusunda,

$$dU = \frac{1}{2} \rho V^2 c dr C_x \quad [\text{N}] \quad (3.54)$$

yazılır. C_x olarak görülen terim x eksenini doğrultusundaki kuvvet katsayısıdır. Kanat açılarından yararlanarak C_x yazılmak istenirse,

$$C_x = C_L \sin(\varphi) - C_D \cos(\varphi) \quad [\text{N}] \quad (3.55)$$

Kaldırma kuvvetinin, sürüklenme kuvvetinden çok daha fazla olduğu kabul edilirse ($C_L \gg C_D$) denklem 3.54 ve denklem 3.55 den yararlanarak,

$$dU = \frac{1}{2} \rho V^2 c dr C_L \sin(\varphi) \quad [\text{N}] \quad (3.56)$$

$$dP = dU r\omega = \frac{1}{2} N_B \rho V^2 c dr C_L \sin(\varphi) r\omega \quad [\text{W}] \quad (3.57)$$

Betz kanat eleman teorisinden yararlanarak elde edilen denklemler düzenlenirse ‘c’ kanat kiriş uzunluğunun tanımlanması elde edilir. Denklem 3.22’de bulunan türbin gücü ifadesinin ‘r’ değişken radyal pozisyonuna göre türevinden elde edilen ifade ve denklem 3.57’ de ulaşılan ifade birlikte çözümlenerek, kanat kiriş uzunluğunun değişken ‘r’ pozisyonuna göre ifadesine ulaşılmış olunur. Bu bağlamda Betz’in kanat eleman teorisinden elde edilen en uygun kanat kiriş uzunluğu ifadesi denklem 3.58’da belirtildiği üzere dir.

$$c(r)_{Betz} = \frac{16\pi R}{9N_B C_L} \frac{1}{\lambda \sqrt{\lambda^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad [\text{m}] \quad (3.58)$$

Optimal tasarımın elde edilmesi adına denklem 3.59’da kullanılan kaldırma katsayısı terimi (C_L) için tasarım hücum açısındaki değer kullanılmalıdır. N_B terimi tasarımı gerçekleştirilecek olan rüzgar türbininin rotor kanat sayısıdır.

3.3.2. Schmitz kanat teorisi

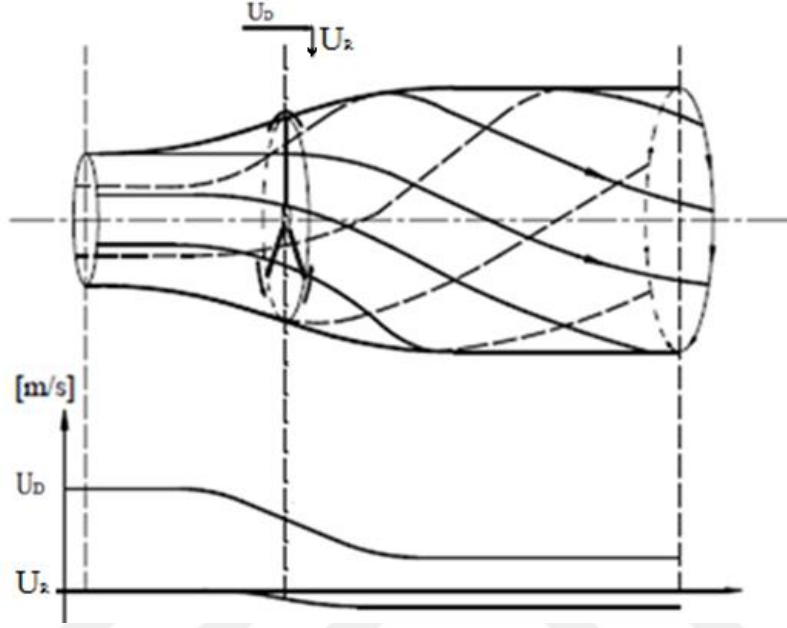
Schmitz’in kanat teorisi Betz’in kanat teorisine göre daha detaylı olarak rotor düzlemindeki akış için geliştirmiştir. Teoride rotor şaftındaki torkun sadece rotor ardındaki dönüşten oluşturulabileceği belirtilmiştir. Güç ifadesinin elde edilmesinde,

$$P = M\omega \quad (3.59)$$

rotor torku ve açısal hız kullanılır ve Betz teorisinden farklı olarak kanadın rotor dönüş yönündeki teğetsel hızı için,

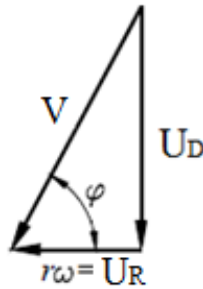
$$U_R = \omega r + \frac{1}{2} \Delta u \quad (3.60)$$

ifadesi kullanılır. Schmitz kanat teorisinde açısal momentumun korunumu uygulanırken, rotorda oluşan torkun sadece türbin ardında oluşan helezonik dönüşle beraber oluşabileceği kabulü yapılır. Kanat elemanının teğetsel hızında rotor düzlemini geçişinde görülen hızdaki değişimin, toplam değişimin yarısı kadar olduğu kabulü yapılır [18].



Şekil 3.7: Rotor ardındaki vorteks akış ve hızlarda görülen değişim grafiği [18].

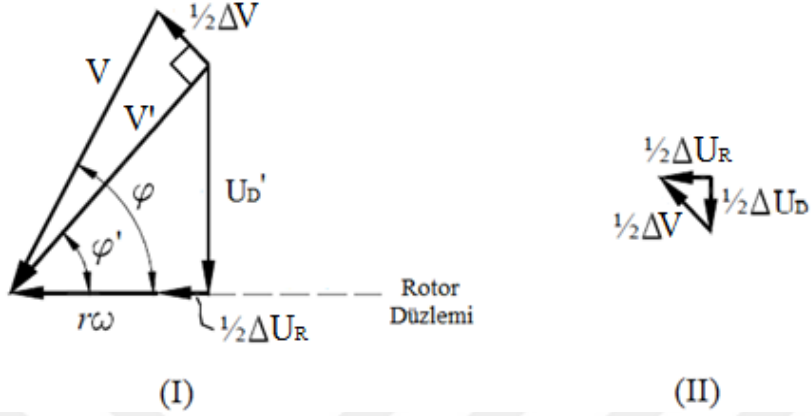
Bu kabule göre kontrolde rotor girişindeki, rotor düzlemindeki ve rotor çıkışında hız üçgenlerinin oluşturulması gerekir. Rotor girişinde Betz kanat teorisinde olduğu gibi bir hız üçgeni elde edilir.



Şekil 3.8: Rotor girişindeki hız üçgeni.

Rotor düzleminde ise bağıl hız farkının yarısı eklenerek yeni hız üçgeni elde edilir. Eklenen bu değişim kanat profiline etkisinin dikkate alınması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu aşamada açılar elde edilmesini teorik olarak kaldırma katsayısı ile sürüklenme katsayısının oranından bağımsız kılmak adına sürüklenme katsayısının kaldırma katsayısına kıyasla çok küçük olduğunu kabul edersek, bağıl hız

vektörünün momentumun korunumu kanununa uyulması gerektiğinden kaldırma kuvvetiyle aynı yönlü olduğunu görürüz. Bu da bağıl hızdaki değişimin vektörel olarak bağıl hız vektörüne dik olduğu sonucunu getirir. Buna göre rotor düzlemindeki hız üçgeni çizilmek istenirse,



Şekil 3.9: (I) Rotor düzlemindeki hız üçgeni, (II) rotor düzleminde hız değişimi.

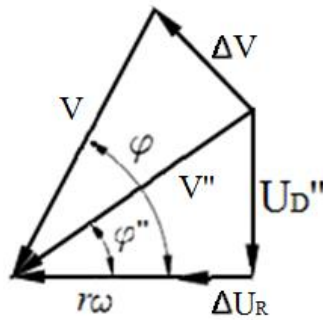
Oluşturulan hız üçgenlerinden yararlanarak,

$$V = V' \cos(\varphi - \varphi') \quad (3.61)$$

$$U_D' = V' \sin(\varphi') \quad (3.62)$$

$$\Delta V = 2V \sin(\varphi - \varphi') \quad (3.63)$$

denklemlerine ulaşılır. Rotor çıkışında bağıl hızdaki değişim daha önceden de kabul edildiği üzere hız üçgenlerine eklenirse,



Şekil 3.10: Rotor çıkışındaki hız üçgeni.

$$V = V'' \cos(\varphi - \varphi'') \quad (3.64)$$

$$U_D'' = V'' \sin(\varphi'') \quad (3.65)$$

$$\Delta V = V'' \cos(\varphi - \varphi'') \quad (3.66)$$

ifadeleri elde edilir. Türbin gücünün belirlenmesinde momentumun korunumundan ve sürüklenme etkisinin ihmal edildiğini de dikkate alarak uygulanır ise,

$$dF_L = \Delta V \dot{m} \quad [N] \quad (3.67)$$

$$\dot{m} = 2\rho\pi r U_D dr \quad [kg/s] \quad (3.68)$$

Denklem 3.59'ın türevi alınır ve yukarıdaki ifadeler ile birleştirilirse,

$$dP = \Delta M \omega = dF_L \sin(\varphi) r \omega \quad (3.69)$$

Denklem 3.69'te elde edilen ifade ile denklem 3.61 – 3.67'deki ifadeler birlikte çözümlenerek referans disk için güç ifadesinin, bağıl rüzgâr hızına göre fonksiyonu halinde elde edilir. Maksimum rotor gücünün elde edilebilmesi adına, elde edilen fonksiyonun türevinin sıfır olduğu ifade elde edilmelidir. Buna göre gerekli işlemler gerçekleştirilerek,

$$\varphi_{maks} = \frac{2}{3} \varphi' \quad [rad] \quad (3.70)$$

$$\varphi_{maks} = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{R}{\lambda r}\right) \quad [rad] \quad (3.71)$$

Buna göre rotor düzlemindeki hız üçgeninden yararlanarak kanat yükselme açısı elde edilir.

$$\beta(r)_{Schmitz} = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{R}{r\lambda}\right) - \alpha(r) \quad [rad] \quad (3.72)$$

Benzeri dönüşümler denklem 3.67 ve denklem 3.53 için de gerçekleştirilip, eşlenik olarak çözümlerse, Schmitz kanat teorisi için kanat kiriş uzunluğunun 'r' radyal pozisyonuna bağlı fonksiyonu şeklinde ifadesi elde edilir.

$$c(r)_{Schmitz} = \frac{16\pi r}{BC_L} \sin^2\left(\frac{1}{3} \tan^{-1}\left(\frac{R}{\lambda r}\right)\right) \quad [m] \quad (3.73)$$

3.4. Kaldırma Hattı Teorisi

Teori Prandtl ve Lanchester tarafından 20. yy'ın başlarında geliştirilmiştir. Kaldırma hattı teorisi sonlu bir kanat için geçerli olup, oldukça büyük en boy oranına sahip kanatlarda uygulanır ve sürüklenme etkisi katılmaz. Kanat, arkasında uzanan bir dizi

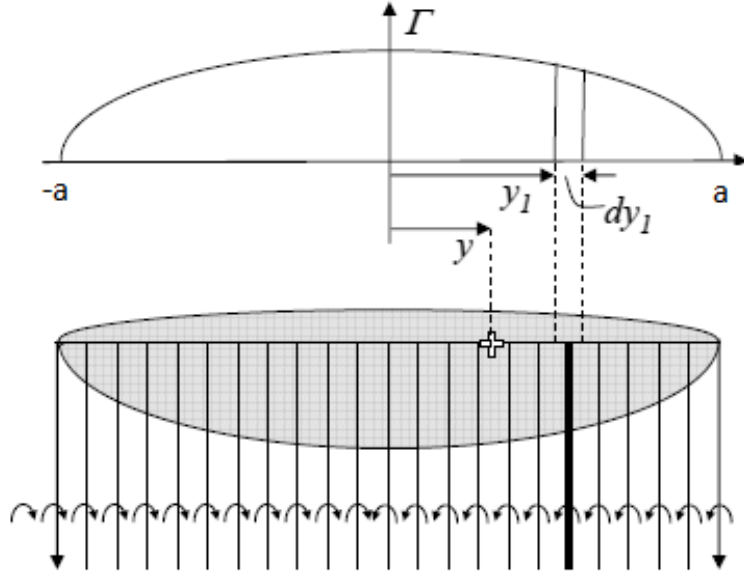
sarmal vorteks ile sabit bir girdap olarak modellenmiştir. Bu vorteks, kanat tarafından üretilen kaldırma etkisinin azalmasına ve indüklenen sürüklenme adı verilen sürüklenme şekli oluşturma etkisine sahiptir. Buna göre sürüklenme ve kaldırma katsayıları,

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2 c} \quad (3.74)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2 c} \quad (3.75)$$

ifadelerinde, L ve D birim kanat genişliğinde tanımlanmıştır. Kanat çevresinde görülen akım dolaşımı kendiliğinden oluşmamakla beraber, teoride kanadın ileri yönlü hareketi sonucu ortaya çıkmaktadır. Kanat çevresinde görülen dolaşım vorteksine zıt olacak şekilde, hareket yönünün ardında da vorteks oluştuğu görülür. Kanadın çevresini saran bu dolaşım vorteksi kaldırma hattı olarak kabul edilir. Kaldırma hattı teorisi kanadın tek bir vorteks çizgisi olduğunu düşünür. Uç vortekslerinin de, kaldırma hattının ve sonlu kanat çevresindeki dolaşımın doğal sonucunda oluştuğu kabulü yapılır. Oluşan bu uç vortekslerin kanada aerodinamik olarak etkin sonuçları olup kaldırma ve sürüklenme olgularını doğrudan bağlar. Uç vorteksler kanattan aşağı yönlü akım olarak oluşurken, ekstra sürüklenme etkisini de beraberinde getirir ve kanat ucunda aşağı yönlü akımın uç vorteksleri sebebiyle aşağı yönlü akımda artış görülür. Bu da kanat boyunca sürüklenme katsayısının değişmesine yol açar.

Momentum teorisine göre, sürüklemedeki artış kaldırma katsayısının karesi ile orantılı olarak değişir. Kanadın kaldırma etkisi arttıkça, indükte edilmiş sürüklemede de artış görülür. Uç vortekslerinin etkisi ile de kanat ucunda bu etki daha da fazla gözlemlenir. Kanat uç vorteks etkisinin azaltılması sonucunda indükte sürüklenme etkisinin önüne geçilmesi ve bunun sonucu olarak kanat boyunca sabit aşağı yönlü akım oluşumu sağlanması için baştan sona daha eliptik kanat geometrisi uygulanabilir. Bunun en temel sebebi kanat ucunda oluşan dolaşım vorteksinin profilin git gide daralması sonucunda etkisini de azaltmasıdır.



Şekil 3.11: Kanat boyunca görülen dolaşım vorteksi ve vorteks yoğunluğu.

Oluşan aşağı yönlü akımın fonksiyonunu dolaşım vorteks yoğunluğunun y 'ye bağlı değişken olarak türevi alınarak, birim vorteks kesitinde görülen aşağı yönlü akım elde edilir. İndükte akım,

$$w_i = \frac{-\Gamma}{4\pi y} \quad (3.76)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklemdaki eksi işareti aşağı yönlü akım olmasından dolayıdır. Kaldırma kuvvetini, kaldırma merkezi için yalnız bir çizgi vorteks olarak değiştirilmesiyle, yaklaşık kanat kiriş uzunluğunun 4'te biri, kaldırma hattı elde edilir ve elde edilen sistemdeki dolaşım vorteks yoğunluğu kaldırma etkisine eşit olur. Tüm kanat boyunca görülen aşağı yönlü akım denklem 3.77 gösterildiği gibi elde edilir.

$$w_i(y) = \int_{-a}^a \frac{-\frac{d\Gamma}{dy}\Big|_{y_1} dy_1}{4\pi(y - y_1)} \quad (3.77)$$

Yalnız bir profil kesitinde görülen kaldırma hattı için denklem 3.75 ve denklem 3.76'de ki ifadeleri dolaşım yoğunluğunun kaldırma ve sürüklenme etkisi şeklinde ifadesi elde edilebilir. Buna göre kanat kesitine etki eden kuvvetler,

$$l = \rho U_{ref} \Gamma \quad (3.78)$$

$$d = \rho U_{ref} \Gamma \epsilon \approx -\rho w \Gamma \quad (3.79)$$

Toplam kuvvetlerin bulunması adına kanat boyunca dolaşım yoğunluğu intergrasyon edilir ve toplam aerodinamik katsayılar bulunursa,

$$C_L = \frac{\rho U_{ref} \int_{-a}^a \Gamma dy}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2 S} = \frac{2 \int_{-a}^a \Gamma dy}{U_{ref} S} \quad (3.80)$$

$$C_D = \frac{-\rho \int_{-a}^a w \Gamma dy}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2 S} = \frac{2 \int_{-a}^a w \Gamma dy}{U_{ref}^2 S} \quad (3.81)$$

Kanat aerodinamik performansının incelenmesinde yararlanılan katsayılardan biri de basınç katsayısıdır. Basınç katsayısı boyutsuz olup, basınç kuvvetlerinin atalet kuvvetlerine oranı olarak tanımlanabilir. Basınç katsayısı kanat üzerinde kritik olduğu düşünülen lokasyonlarda, kanat çevresinde belirlenebilir. Basınç katsayısını tanımlayan ifade aşağıda belirtilmiş olup Denklem 3.82'deki gibidir.

$$c_p = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2} = \frac{p - p_{ref}}{p_0 - p_{ref}} \quad (3.82)$$

Denklemden p olarak gösterilen terim basınç katsayısının hesaplanacağı noktadaki statik basıncı ifade etmekte olup, ref indisi ile gösterilen terimler serbest akış değerlerini ifade etmektedir.

3.5. Kanat Uç Hızı Oranı Etkisi

En uygun çalışma potansiyeli için belirli bir rotasyon hızında tasarlanan kanat geometrisinin, kanat uç hızı ile rüzgâr hızı arasındaki oran kullanılarak rotorun performansı elde edilir. Her bir kanat uç hızı oranı için kanadın sahip olduğu aerodinamik koşullar belirlenmelidir. Böylelikle rotorun geliştirilmiş performansı belirlenebilir. Sonuçlar genellikle ucu hız oranı λ 'e karşı güç katsayısı C_P yani rotor gücü ile rüzgâr içindeki dinamik güç arasındaki oran olarak tanımlanır. Bu grafiğe C_P - λ eğrisi denir. C_P - λ eğrisinde görülen sonuçlar için şunlar söylenebilir [21] ;

- Kanat uç hızı oranının, λ , sıfır olduğu durumda rotorda dönme hareketi görülmez ve rüzgârdan çekilen etkin güç yoktur.
- Kanat uç hızının çok yüksek olduğu durumda, dönme hızının da çok fazla olduğu veya rüzgâr hızının çok düşük olduğu durumlarda, rotor disk alanı rüzgâr için

kapalıymış gibi görünür. Bu sebeple rüzgâr bu disk alanın çevresinden akar dolayısıyla rotor üzerinde rüzgâr olmaz ve hareketli bir kütlede etkin rüzgâr enerjisi elde edilemez.

- Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde genellikle kanat uç hızı oranının 0 ila 12 arasındaki bir değeri için rotorun en verimli performans gösterdiği çalışma noktası görülür. Optimal çalışma noktasında Betz teorisine göre rotor disk düzlemindeki rüzgâr hızının, referans rüzgâr hızının $2/3$ 'ü oranında olduğu durum ortaya çıkar.

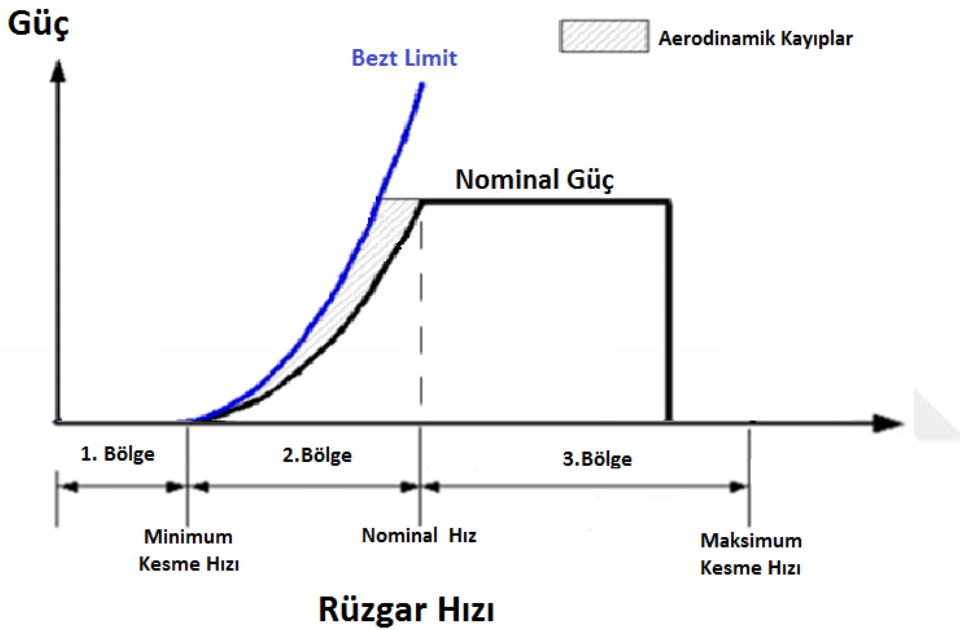
3.6. Rüzgar Türbini Performans Karakteristiği

Modern bir rüzgâr türbinleri, rüzgâr hızı aralığının daha geniş olduğu durumlarda efektif olarak güç üretmek için tasarlanmaktadır. Şekil 3.11'de standart rüzgâr türbini için değişken rüzgâr hızına karşılık üretilen güç çıkışı gösterilmektedir. Rüzgâr türbinleri, rotorun harekete geçip dönmesini sağlayacak minimum rüzgâr hızı aşıldıktan sonra güç üretmeye başlar. Türbinin güç üretimine başladığı bu alt limit niteliğindeki rüzgâr hızı tasarlanan rüzgâr türbinin karakteristik özelliklerine göre değişiklik gösterir. (rotor çapı, kanat geometrisi vs.) Rüzgâr hızı arttıkça rotor tarafından çekilen rüzgâr enerjisi de orantısal olarak artış gösterir.

Rüzgar türbinleri, nominal gücünü kesme hızının üzerinde bir rüzgar hızından başlayarak, ancak rotor yük limitlerinin aşılmadığı bir rüzgar hızının altında üretmek üzere tasarlanmıştır. Rüzgar hızının nominal rüzgar hızının çok üzerinde olduğu ve türbin makine hasarlarının önüne geçilmesi adına güç üretiminin durdurulduğu rüzgar hızına, güç kesme hızı denir. Tipik nominal rüzgar hızları 12-14 m / s, tipik kesme hızı ise 20-22 m / s'dir. Rüzgar türbinin nominal güç üretiminde çalışması dişli kutusu veya türbinin rotor frenlemesi ile elde edilir. Rüzgar türbini operasyonu, minimum kesme hızı altındaki, minimum kesme hızı ile nominal hızlar arasında ve nominal güç üretimi başlangıcı ile ve maksimum kesme hızı arasında olmak üzere sırasıyla Bölüm I, II ve III operasyonu olarak uygulanmaktadır. Günümüzde, bilinen tüm verimli rüzgâr türbinleri bu temel çalışma operasyonlarına uygun çalışmaktadır. Nominal güç üretimi hızına kadar, rüzgâr türbini rotorları tipik olarak sabit bir adım ayarında kalır ve rotor üzerindeki akışın birleştirilmesi beklenir. Nominal hız ulaşıldığında, rotor tasarımı, ya rotorun rüzgârı karşılama açısını değiştirerek ya da

duraklamayla düzenlenmiş tasarımlarda akışa ayrılarak, sabit bir güç seviyesini korumayı amaçlar.

Minimum kesme hızının aşağı çekilebilmesi veya nominal güç üretiminin başladığı rüzgar hızının arttırılabilmesi, rüzgar türbininden daha fazla güç elde edilmesi adına etkin parametrelerdir. Rüzgarın sahip olduğu mevcut güç hızının küpü ile orantılı olduğundan, rüzgar hızlarının minimum kesme hızının daha da aşağıya çekilmesi uygulama bölgesi dikkate alınmadığı takdirde cazip olmayabilir. Buna karşın rüzgâr potansiyelinin daha düşük olduğu coğrafyalar için düşük rüzgâr hızlarında da efektif performans gösterebilen rüzgâr türbinlerine de ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil.3.12: Rüzgar türbinleri için standart güç üretimi eğrisi.

Yüksek rüzgar hızlarının görülme olasılığının düşük olmasından dolayı sabit rüzgar gücünün elde edildiği nominal rüzgâr hızının üzerindeki operasyon bölgesinin de daha kısıtlı olmasına sebep olur. Kısıtlı nominal güç üretim operasyon bölgesi tasarım açısından istenilmeyen bir durumdur. Çünkü daha yüksek nominal hız geçişiyle birlikte maksimum kesim hızının da artması sonucunda kanatlar üzerine etkiyen yükte de artış olur ve rüzgar türbinin bakım, donanım ve yüklenme maliyetlerinin artması sonucu oluşur. Bunlarla birlikte karşılaşılabilecek aksaklık olasılığında artışı da beraberinde getirir. Güç üretiminin rüzgâr hızının bir fonksiyonu olarak artış gösterdiği ikinci bölge için amaç rüzgâr hızındaki potansiyel enerjiden çekilebilecek maksimum gücün elde edilmesidir. Rüzgâr türbinlerinin genel çalışma rejimleri bu bölgede geçer. Bu bağlamda bir rüzgâr türbinin yıllık

elektrik enerjisi üretiminin belirlen bir kısmı da bu bölgede iken üretilen güçten elde edilir. Yıllık üretilen rüzgâr enerjisinin belirlenmesinde, operasyon coğrafyasındaki rüzgâr hızı olasılık verisi ve türbinin rüzgâr hızının bir fonksiyonu olarak elde edilen karakteristik güç eğrisi birlikte incelenerek elde edilebilir.

Şekil 3.11’de görülen Betz limiti güç eğrisi ile örnek türbin güç eğrisi arasında gösterilen aerodinamik kayıplar dışında da mekanik kayıplar görülmesi yüzünden rüzgâr türbini tasarım operasyon noktasında dahi mümkün olan potansiyel enerjiyi toplayamaz. Rüzgâr türbininin tasarlanma evresinde en uygun operasyon noktası için dizayn edilmesine karşın çok çeşitli gerçek çalışma koşullarının olması da bu sonucu doğurur. Bu bağlamda 2. bölgede rüzgâr hızıyla orantısız olarak artış gösteren güç üretim, türbinin verimliliğini tasarımda mümkün olan maksimum seviyeye çıkarmaktadır. Bu operasyon bölgesinde kasıtlı olarak rüzgâr enerjisi kullanım dışında bırakılması durumu yoktur. İdeal ve gerçek güç elde edilmesinde temel kayıplar aerodinamik kaynaklı olduğundan 2.bölgede rüzgâr türbininin verimliliğinin artırılması için aerodinamik kayıplar azaltılmalıdır.



4. RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

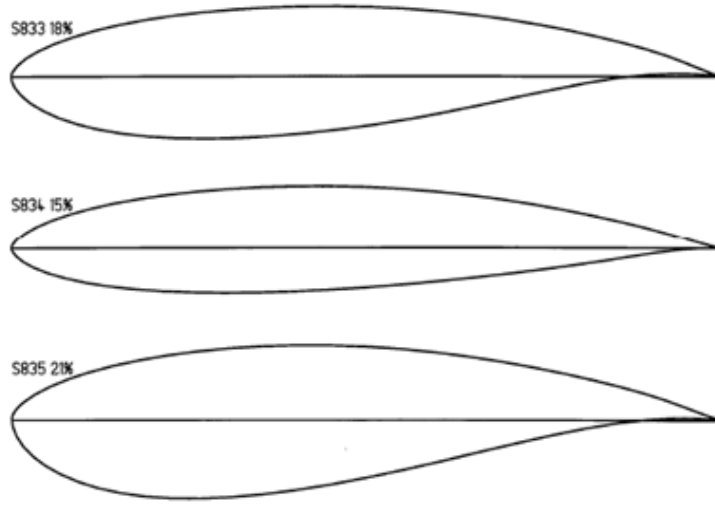
4.1. Tasarım Parametrelerinin ve Kanat Profillerinin Belirlenmesi

Tasarımı gerçekleştirilecek olan küçük çaplı rüzgar türbini için ön bilgiler ve önceki çalışmalar araştırılarak, belirlenen tasarım parametrelerine uygun kaynaklara ulaşılmıştır. Bu bağlamda tasarımda belirlenen 2 metre kanat boyu (4.4 metre rüzgar türbin çapı) için NREL serisi kanat profil kaynakları ve koordinatları ele alınmıştır [16].

Tek kanat profili kullanılmaktansa kanat kökü, kanat ucu ve kanat genel profili için 3 ayrı profil seçilmesi yoluna gidilerek, kökten uca kanat boyunca rotor kanadının rüzgarın kaldırma kuvvetinden optimal seviyede yararlanması sağlanmaya çalışılmıştır. NREL serisi S833, S834, ve S835 kanat profilleri seçilerek bu profiller için C_l ve C_d katsayılarının belirlenen hücum açısı aralığı için değerleri Qblade yazılımı yardımı ile elde edilmiştir. NREL referansında seçilen kanat profilleri için belirtilen aerodinamik özellikler Tablo 4.1'deki gibidir;

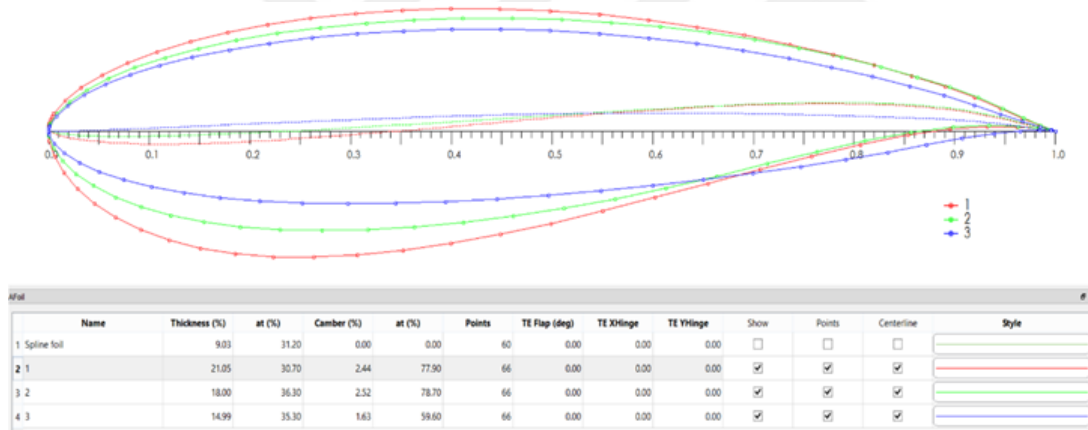
Çizelge 4.1: NREL S833, S834 ve S835 profilleri aerodinamik karakteristikleri [17].

| Kanat Profili | S833 | S834 | S835 |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|
| Kanat Radyal Pozisyonu | 0,75 | 0,95 | 0,40 |
| Parametre | Hedef/Sınır | | |
| Reynold Sayısı (Re) | $0,40 \times 10^6$ | $0,40 \times 10^6$ | $0,25 \times 10^6$ |
| Maksimum Kaldırma Katsayısı $C_{l,max}$ | 1,10 | 1,00 | 1,20 |
| Düşük sürükleme alt limiti, kaldırma katsayısı $C_{l,ll}$ | 0,30 | 0,20 | 0,40 |
| Düşük sürükleme üst limiti, kaldırma katsayısı $C_{l,ul}$ | 0,90 | 0,80 | 1,00 |
| Sıfır-kaldırma blokaj moment katsayısı $C_{m,0}$ | $\geq -0,15$ | | |
| Kanat profili kalınlığı t/c | % 18 | % 15 | % 21 |



Şekil 4.1: Rotor geometrisinde kullanılan kanat profilleri [17].

Kanat boyunca kullanılacak profillerin koordinatları Qblade yazılımına tanıtılarak, bu profiller için en uygun hücum açılarının belirlenmesi adına aerodinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.



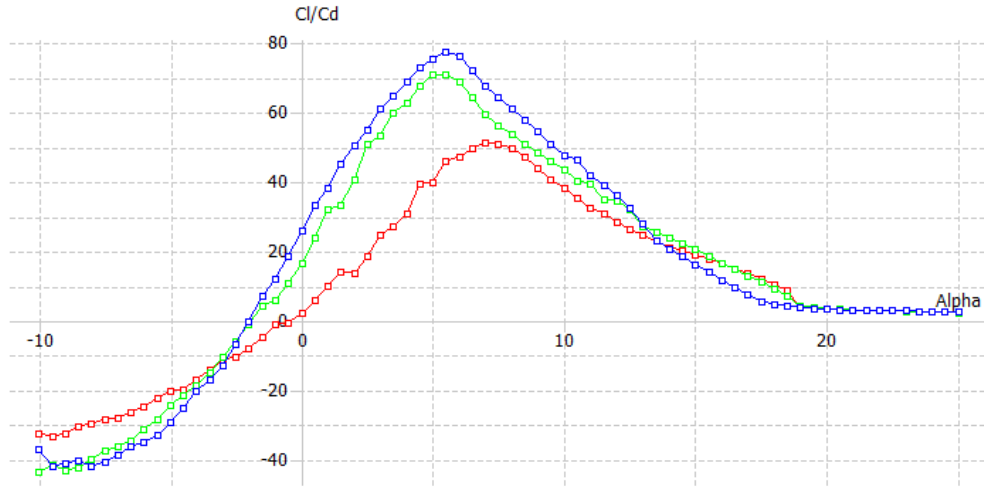
Şekil 4.2: Rotor kanat profillerinin Qblade'e tanıtılması.

Şekil 4.2'de kanat kökü, kanat gövdesi ve kanat ucu bölgeleri için kullanılması planlanan profil ailesini bir arada görülmektedir. Kanat ucundan kanat köküne doğru profil kalınlığının artması hem yapısal olarak hem de rüzgardan aerodinamik olarak en uygun seviyede yararlanmak adına tercih edilmiştir. Buna göre Tablo 4.2 de belirlenen profillerin kullanılacakları radyal pozisyon aralıkları gösterilmiştir.

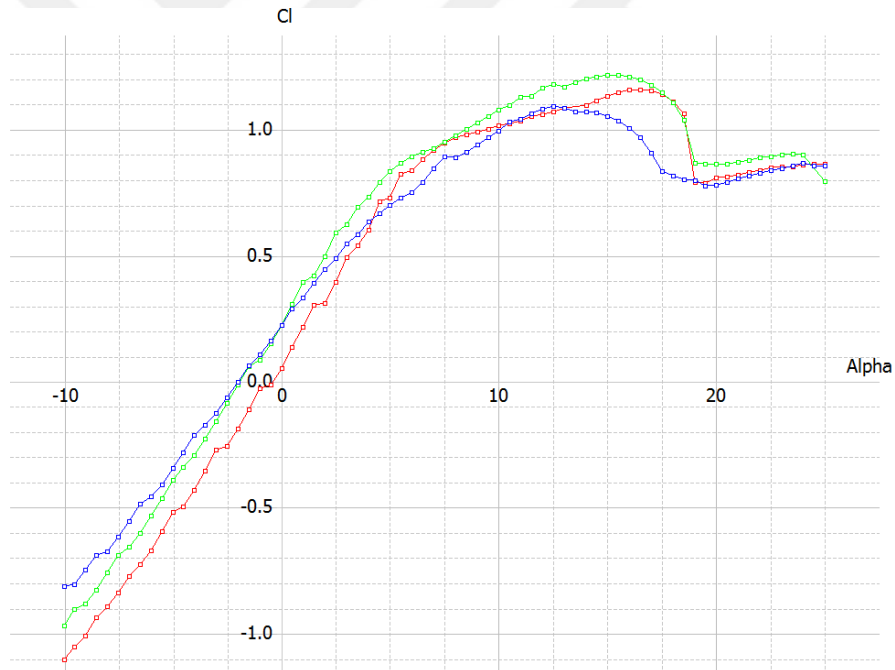
Çizelge 4.2: Kanat profillerinin kullanıldıkları radyal pozisyon aralıkları.

| Profil | No | Bölge | Aralık |
|--------|-------------|------------|-------------|
| S833 | 2 (Yeşil) | Ana Profil | 0,40 – 0,95 |
| S834 | 3 (Mavi) | Kanat Ucu | 0,95 – 1,00 |
| S835 | 1 (Kırmızı) | Kanat Kökü | 0,00 – 0,40 |

Qblade yardımıyla bu profiller için belirlenen hücum açısı aralığındaki C_l ve C_d katsayıları elde edilmiştir. Hücum açısı aralığı -10° ile 25° olarak 0.5° 'lik adımlarla uygulanmıştır.



Şekil 4.3: Rotor kanat profillerinin C_l/C_d oranını grafiği.



Şekil 4.4: Rotor kanat profillerinin kaldırma katsayısı-hücum açısı grafiği.

4.2. Kanat Tasarımı

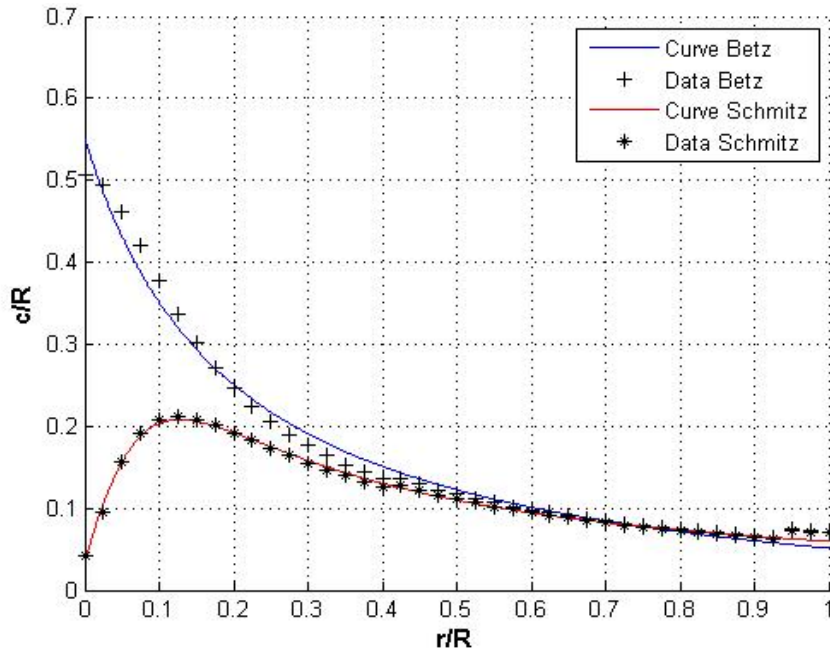
Rüzgar türbini için güç üretimini optimize etmek adına kaldırma katsayısının maksimize ve sürüklenme direnç katsayısının ise minimize etmek istediğimizden dolayı, değişen hücum açısı değerleri için C_l/C_d oranının maksimum olduğu noktalar da kanat tasarımının gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Bu aşamada kanat genişliğinin ve

kanat yükselme açısının belirlenmesi adına Betz'in ve Schmitz'in kanat teorileri ile rotor tasarımı incelenmiştir. Böylelikle optimal rotor tasarımı için kanat yükselme açısı ile kanat genişliğini gösteren eğriler istenilen radyal istasyon sayısı için elde edilmiştir.

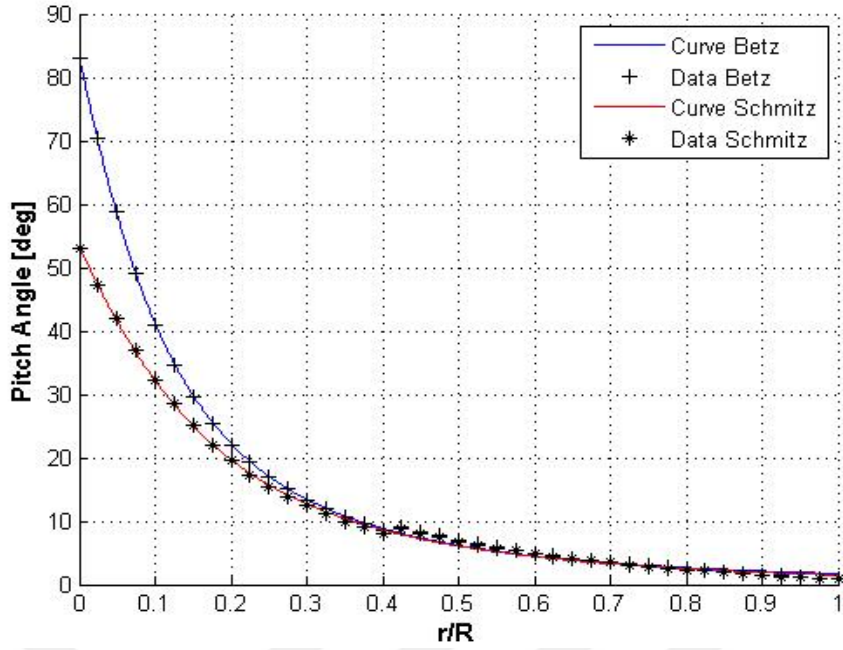
Betz ve Schmitz için eldeki denklemlerin kullanıldığı MATLAB kodu oluşturulmuştur. r/R pozisyonlarının elde edilmesi, seçilen rüzgar türbini çapı için gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber Qblade'den elde edilen C_l ve C_d değerlerinin hücum açısı ile değişimini gösteren veriler kullanılarak en uygun C_l/C_d değerine ulaşılacak olan hücum açıları her bir kanat için belirlenmiş ve kanat geometrisinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Buna göre optimal hücum açıları ile Betz ve Schmitz için elde edilen kanat geometrisi eğrileri aşağıdaki grafiklerdeki gibidir. Bu aşamada kanat teorisindeki gerekli parametreler maksimum performansın istenildiği kanat uç hızı oranı 6 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.3: Profiller için maksimum C_l/C_d değerlerindeki hücum açısı ve $C_{l,d}$.

| Profil | Bölge | $C_{l,d}$ | α (optimum hücum açısı) |
|--------|------------|-----------|--------------------------------|
| S833 | Ana Profil | 0,8638 | 5,5° |
| S834 | Kanat Ucu | 0,7267 | 5,5° |
| S835 | Kanat Kökü | 0,9179 | 7,0° |



Şekil 4.5: Betz ve Schmitz kanat teorilerine göre kanat giriş genişliği eğrileri.

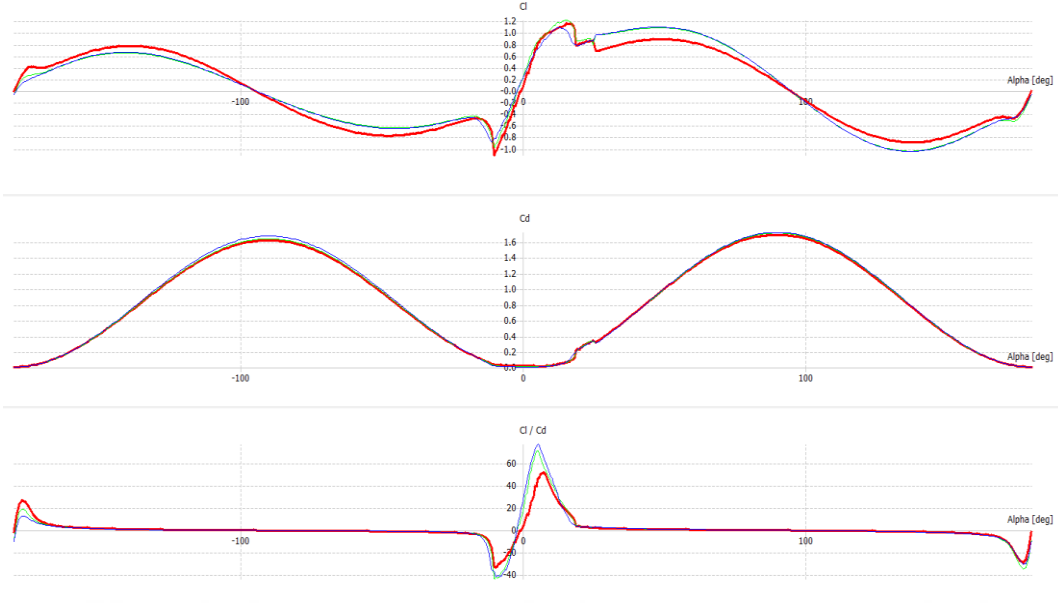


Şekil 4.6: Betz ve Schmitz kanat teorilerine göre kanat yükselme açısı eğrileri.

Şekil 4.5'te gösterilen kanat giriş genişliği eğrileri ve şekil 4.6'da gösterilen kanat yükselme açısı eğrileri, kanat profillerinin kullanılacakları aralıklar için belirli radyal pozisyonlarda elde edilmiştir. Ancak hem en uygun hücum açısı değerlerinin hem de optimal hücum açısı değerindeki kaldırma katsayılarının farklı olması sebebiyle profillerin geçiş bölgelerinde düşük seviyede atlamalar görülmüştür. Kanat geometrisinin oluşturulması sırasında modelleme sorunuyla karşılaşılmaması ve geometrik dengesizlikten kaynaklı analiz performansında düşüş yaşanmaması adına 3 profil içinde eşit radyal aralıklarla elde edilen veriler için eğri uydurulması yolu izlenerek ilerlenmiştir.

4.3. QBlade Rotor Tasarımı ve Analizleri

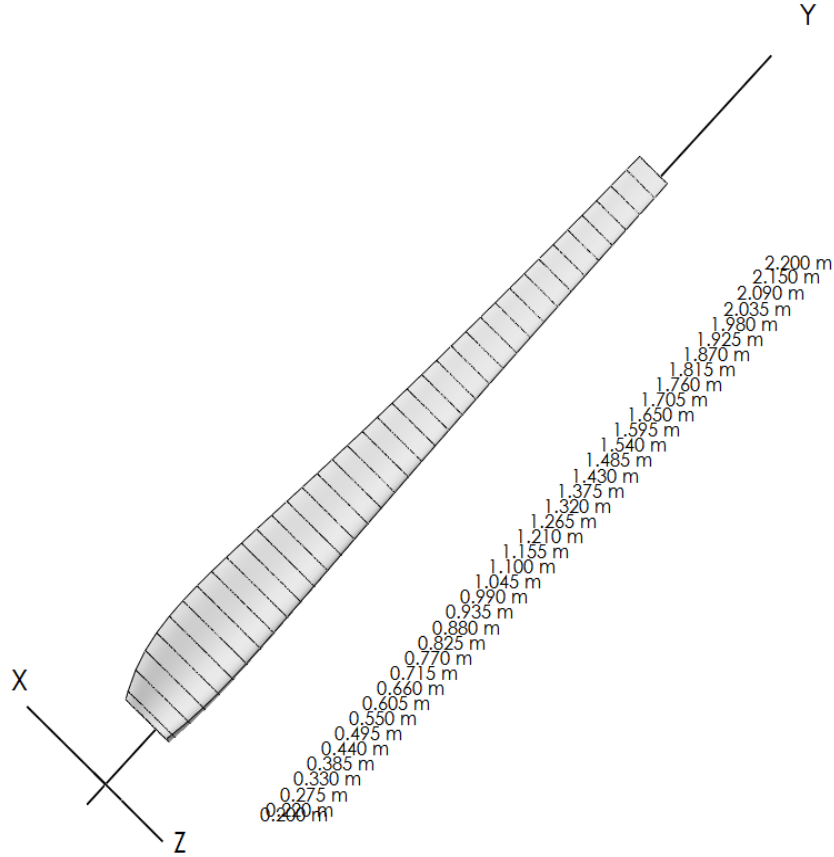
Rüzgar türbin kanat tasarımında Schmitz teorisi kullanılarak elde edilen veriler ile devam edilmiştir. Daha güncel ve detaylı olmasından dolayı bu şekilde ilerlenmiştir. Buna göre Schmitz teorisi için elde edilen kanat geometri verileri Qblade programına kanat geometrisi olarak yerleştirilmesi ile devam edilmiştir. Bu aşamada her bir kanat profili için, belirlenen hücum açısı aralığında elde edilen kaldırma ve sürtünme katsayısı eğrileri 360 dereceye ekstrapole yapılarak şekil 4.7'de görülen eğriler elde edilmiştir.



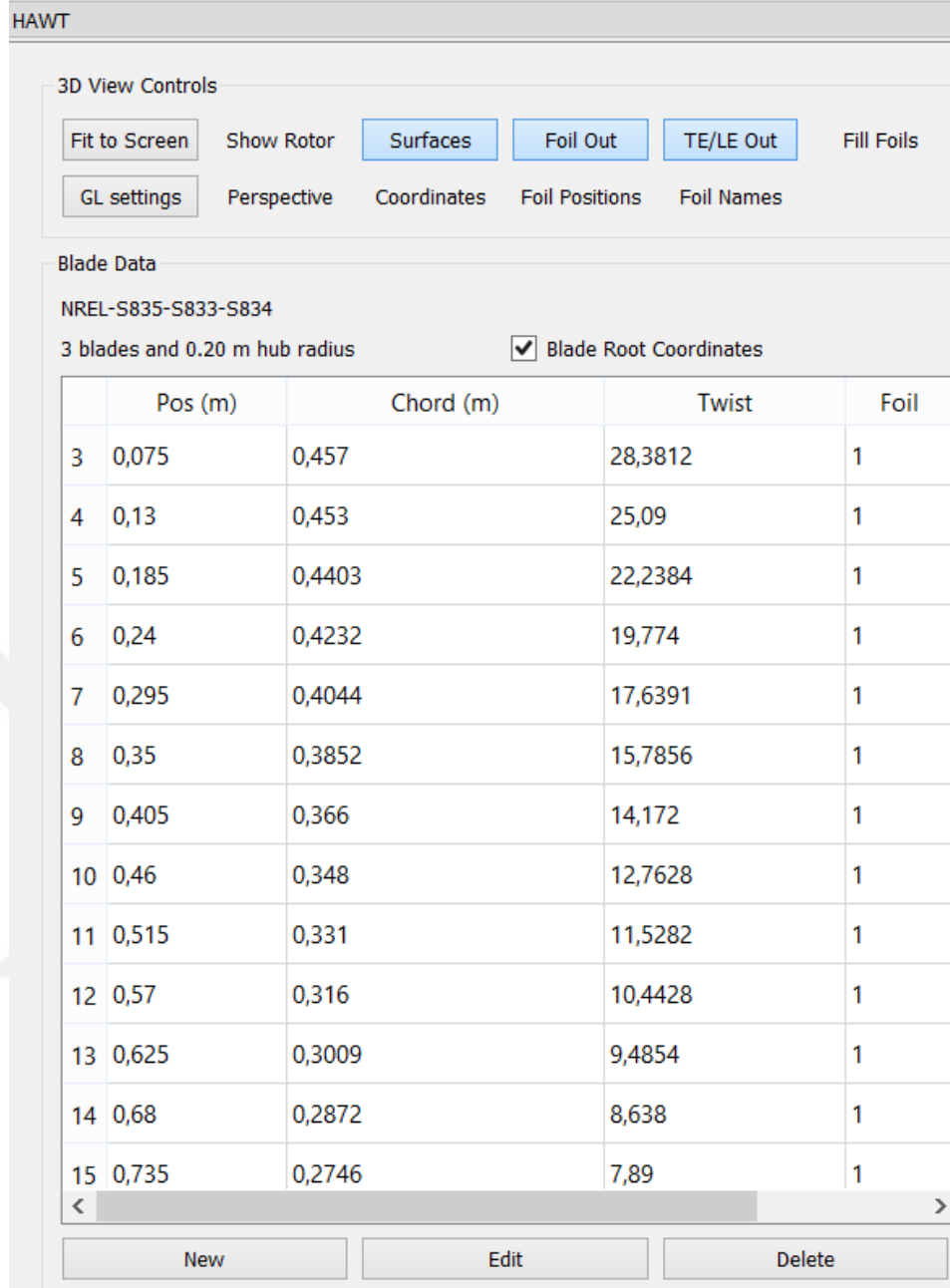
Şekil 4.7: Ekstrapolasyonlu sürütme ve kaldırma katsayısı eğrileri.

Bir sonraki aşamada MATLAB kodu ile elde edilen Schmitz teorisi kanat geometrisi verilerinin Qblade programına girilerek ve yukarıda da belirtilen kanat profillerinin konum aralarının seçilmesi ile rotor geometrisi oluşturulmuştur.

NREL-S835-S833-S834



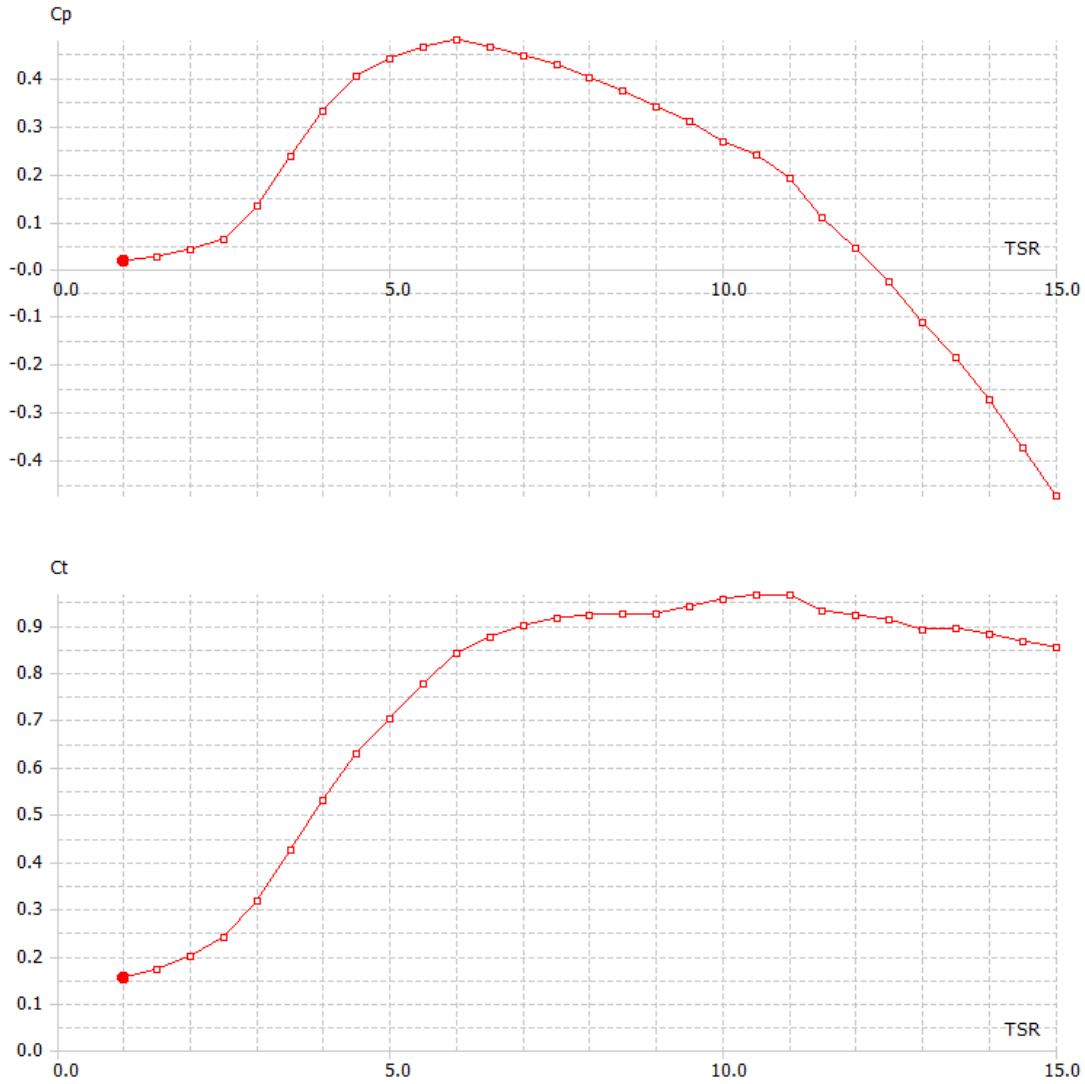
Şekil 4.8: Qblade'de tasarlanan kanat modeli.



Şekil 4.9: Kanat geometrisi açısı ve genişlik değerleri.

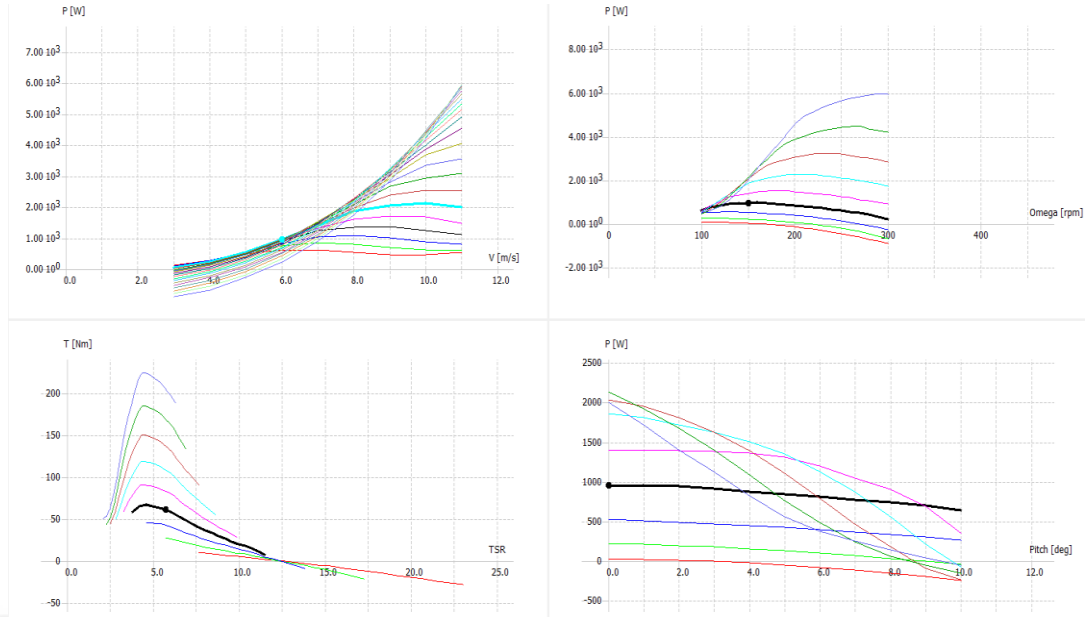
Şekil 4.9’da Qblade üzerinde kanat geometrisinin modellenmesi için gerekli veriler gösterilmektedir. Kanat kökünden kanat ucuna kadar, belirlenen radyal pozisyonlar için kanat yükselme açısı ve kanat giriş uzunlukları ile profillerin kullandıkları radyal aralıklara göre aerodinamik verileri girilerek, kanat geometrisi modellenir. Bunun üzerine elde edilmiş olan rotor geometrisi için Qblade sınır eleman metodu analiz kısmına geçilmiştir (BEM). Analiz Prantl kanat kökü ve kanat ucu kayıpları ile Reynold sürtünme korelasyonu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Analiz ayarları olarak kanat ucu hızının 1’den 15’e kadar 0,5’lik adımlarla değişen kanat uç hızı oranı ve 6 m/s rüzgar hızı için güç katsayısı (C_p) ve itki katsayısı (C_t) eğrileri elde

edilmiştir. Elde edilen geometrinin CFD analiz uygulanması öncesinde ön çalışma verileri oluşturulmuştur.



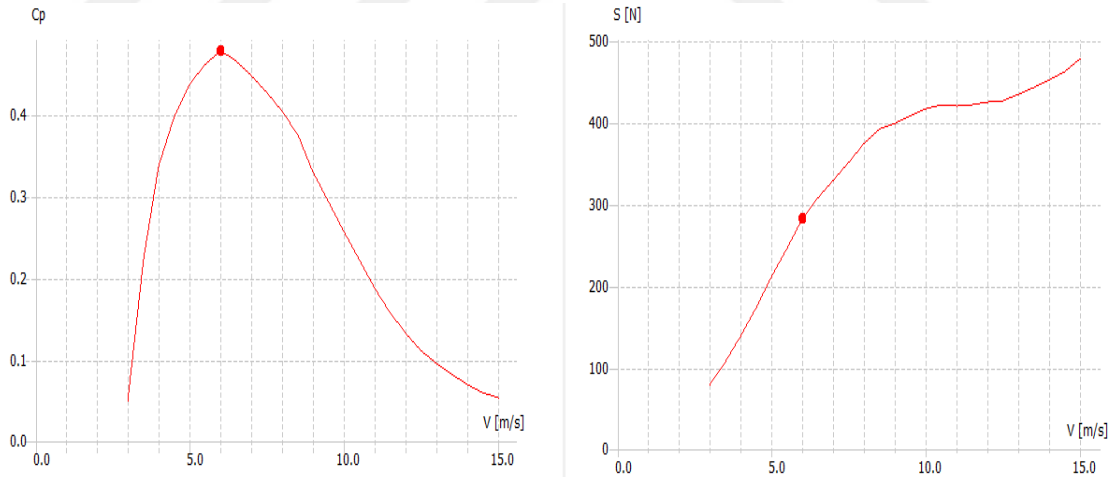
Şekil 4.10: Rotor Qblade analiz eğrileri.

Şekil 4.10'da görüldüğü üzere, kanat genişliği ve kanat yükselme açısının Schmitz teorisi ile hesaplanmasında kullanılan tasarım parametrelerinden kanat uç hızı oranının optimum değeri olarak seçilen 6 değeri için, Qblade de tasarlanan geometride de maksimum güç katsayısının elde edildiği görülmektedir. Bu analiz sonuçlarına ek olarak çoklu değişenin bir arada incelenmiş ve eğriler elde edilmiştir. (sınır eleman metodu) Rüzgar hızı, rotor dönüş hızı ve rotor açısının belirlenen aralıklarda ve adımlardaki eğrileri aşağıdaki grafikte gösterildiği gibidir. Grafiklerde kalın olarak görülen eğriler ve performans noktaları 6 m/s rüzgar hızı, 150 rpm rotor dönme hızı ve 0° rotor açısı için olan sonuçları göstermektedir.



Şekil 4.11: Rotor Qblade çoklu parametre analiz eğrileri.

Daha spesifik olarak kanat ucu hızı oranının olduğu 6 durumu sağlayacak şekilde türbin dönme hızının 156.26 rpm olarak girilmesiyle değişen rüzgar hızı için Qblade’de türbin sınır element yöntemi kullanılarak elde edilen güç katsayısı ve itki eğrileri şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12: Türbin Qblade analiz eğrileri.

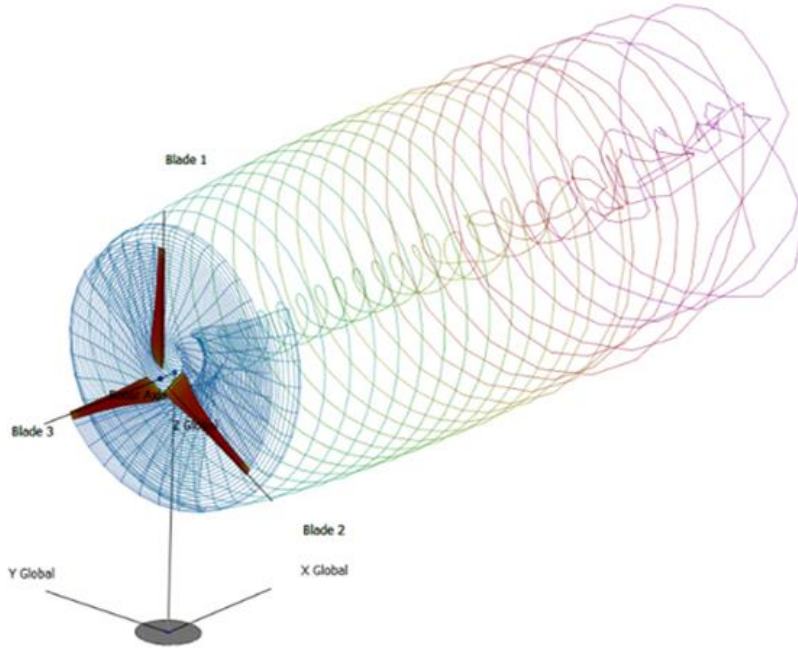
Bu analiz kısmında türbin tipinin belirlenerek analiz sonuçlarının alınması da mümkündür. Güç regülasyon tipi (stall, pitch limited, prescribed) ve türbin aktarım tipi (tekli, iki aşamalı, optimal) belirlenebilirken, kayıp faktörü ve sabit sistem kayıpları da bu kısımda analize dahil edilebilir. Ayrıca rüzgar potansiyeli için weibull parametreleri bilinen bir bölgenin dönemlik enerji üretimi de bu analiz kısmından elde edilebilir. Buna göre analizlerdeki türbin geometrisi için rüzgar

potansiyel verileri elimizde olan İzmir-Bababurnu bölgesini ele alarak weibull parametrelerini ($k=1.99$ & $A=6.72$) girdiğimizde, dönemlik enerji üretiminin 8357 kWh olduğu sonucuna ulaşabiliriz.

Qblade'in KHT simülasyon analizinde, matematiksel modelleme ile kanat boyunca ki vorteks akım yoğunluğunun elde edilmesi ve kaldırma katsayısının dağılımının tahmin edilmesi sonucu 3 boyutlu simülasyon gerçekleştirilmiştir. KHT simülasyonunda, operasyon noktası için parametreler girilmiş ve zaman aralığı ile zaman adımı seçilmiştir. Türbülans alanının modellenmesi için windfield türbülans modeli, ortalama rüzgar hızı, kanat yarıçapı ve türbin gövde yüksekliği girilerek elde edilmiştir. Buna göre Qblade KHT analizi yakınsayana kadar simülasyona devam edilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 4.13 ve şekil 4.14' te gösterilmektedir. Yakınsanan sonuçlara göre 6 m/s rüzgar hızı ve 6 kanat uç hızı oranında rüzgardan çekilebilecek optimum güç ve güç katsayısı verileri şekil 4.13 görülmektedir. ($P_{\text{türbin}} \approx 1090\text{W}$, $C_p \approx 0,5424$)

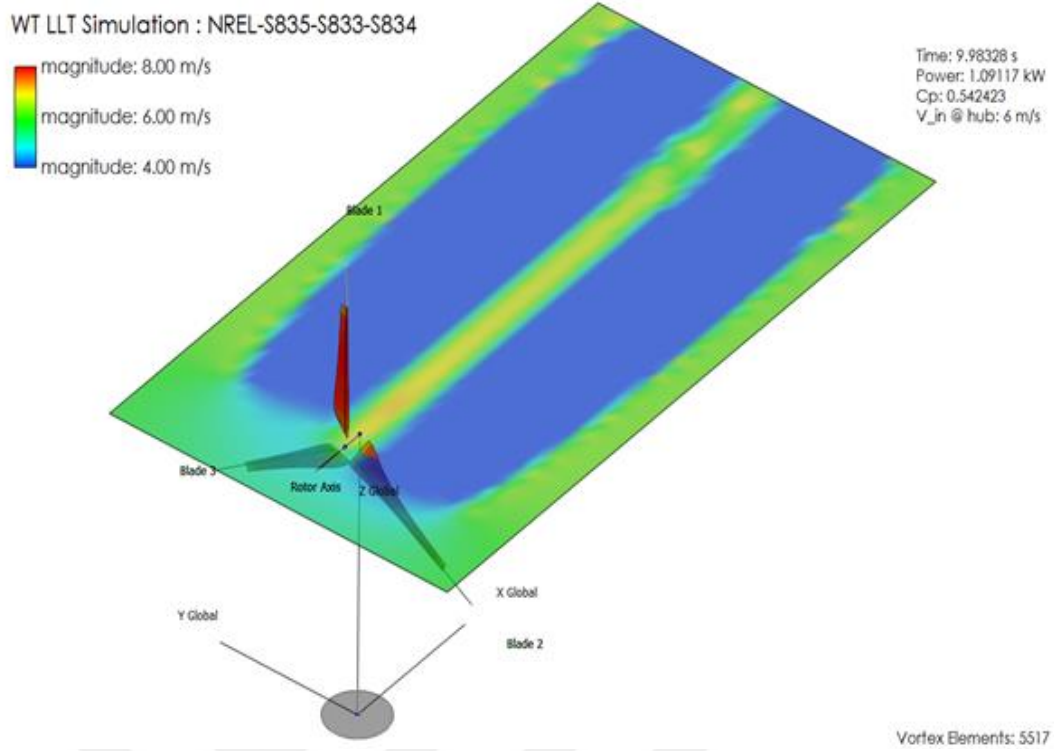
WT LLT Simulation : NREL-S835-S833-S834

Time: 9.98328 s
Power: 1.09117 kW
Cp: 0.542423
V_in @ hub: 6 m/s



Vortex Elements: 5517

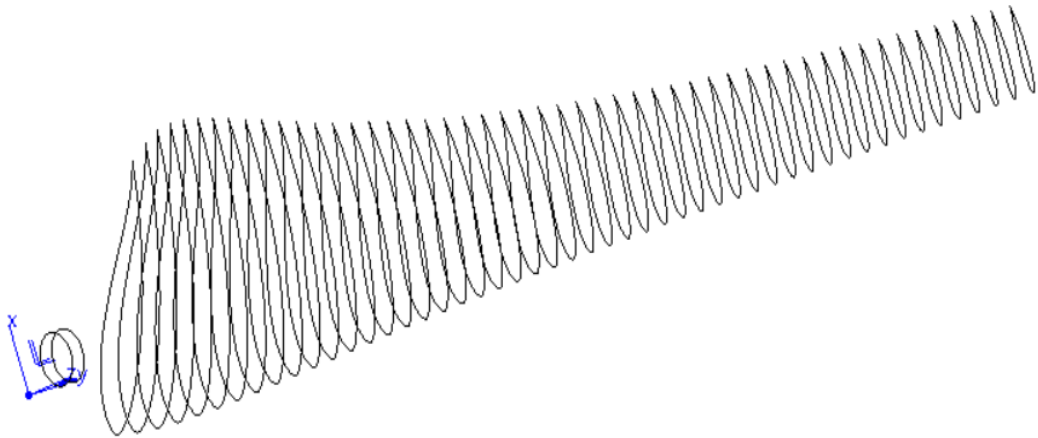
Şekil 4.13: Türbin Qblade KHT simülasyon görseli – akış ardı vorteks.



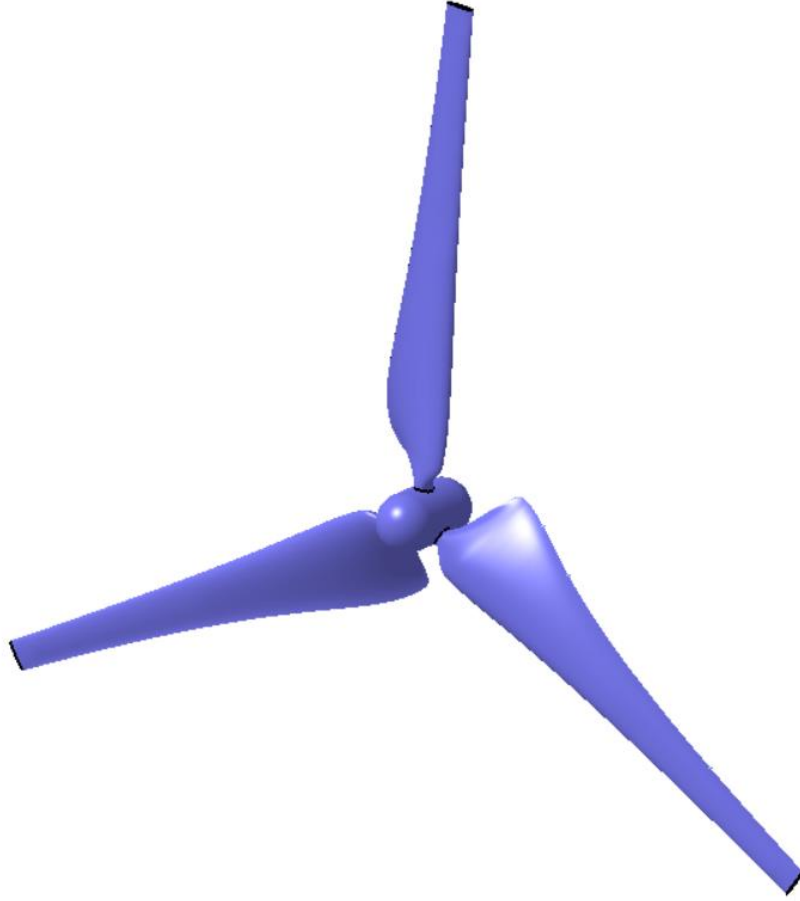
Şekil 4.14: Türbin Qblade KHT simülasyon görseli – toplam hız bileşeni.

4.4. Rüzgar Türbininin Modellenmesi

Qblade’de elde edilen rotor geometrisinin koordinat dosyası dışarı aktarılmış ve excel dosyası formatına getirilerek CATIA modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Kanat boyunca 50 radyal pozisyon ve kanat profillerinin çevresinde de 50 noktadan oluşan geometrik koordinatlar ile modelleme gerçekleştirilmiştir. Kanat geometrisinin gövde ile bağlandığı kısımda ise dairesel profil kullanılarak kanat geometrisi tamamlanmıştır.



Şekil 4.15: Türbin kanadının modellenmesi, profil kesitleri.



Şekil 4.16: Türbin rotor modeli, CATIA.

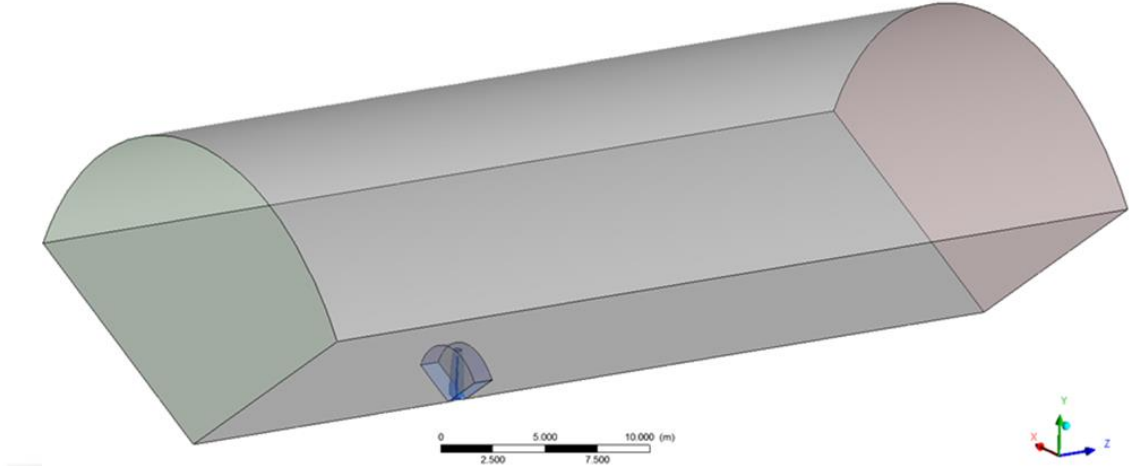
4.5. HAD Analizleri

4.5.1. Geometrik alanların oluşturulması

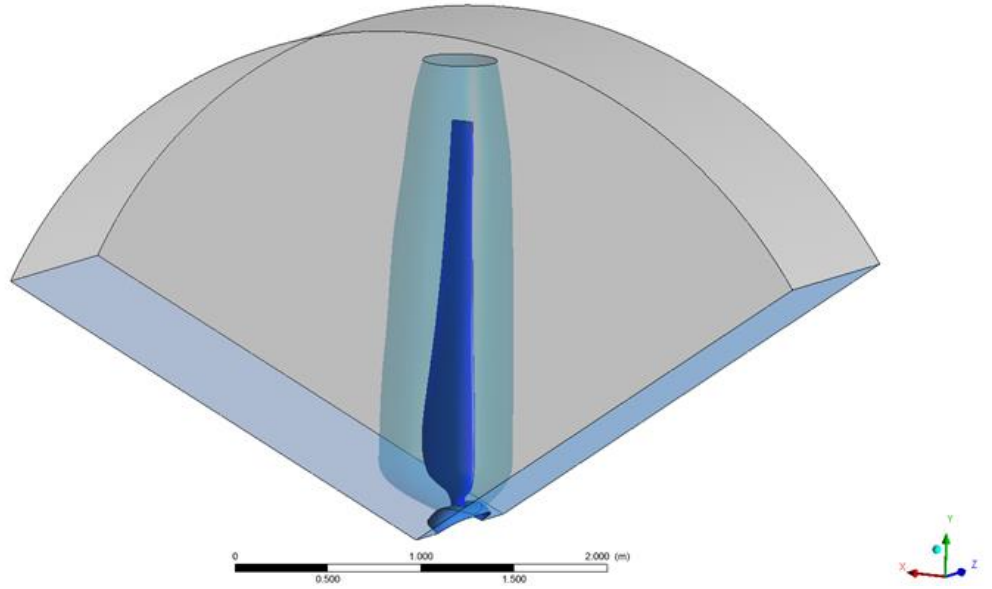
HAD analizlerinin periyodik geometrik tanım hacimleri şeklinde gerçekleştirilmesine karar verilmiştir, 120° içerisinde tek bir kanat için dönel hacim ve sabit akış hacmi oluşturulmuştur. Bununla beraber kanat çevresindeki hacimde daha kaliteli ağ yapısının oluşturulabilmesi ve sınır tabaka etkisinin daha doğru olarak elde edilebilmesi adına yine dönel tanım hacmi içerisinde kanadı saran bir hacim oluşturulmuştur. Kanat ve gövde kısımlarında stres analizi gerçekleştirilmeyeceğinden sadece yüzey olarak tanımlanmış ve iç hacimlerinde ağ yapısı oluşturulmamıştır. Buna göre sonuç olarak dış sabit akış hacmi, dönel akış hacmi ve kanadı saran akış hacmi olarak 3 ayrı tanım hacmi oluşturulmuştur.

Dönel akış hacmi, rotoru çevreleyecek şekilde oluşturulmuştur. Bununla beraber dış ortam sınırları için literatürdeki çalışmalardan da yararlanarak giriş gölgesi için 6L,

çıkış bölgesi için 12L ve radyal çap genişliği için de 12L olarak modellenmiştir. Buradaki L ifadesi rotor yarıçapını karşılamaktadır.



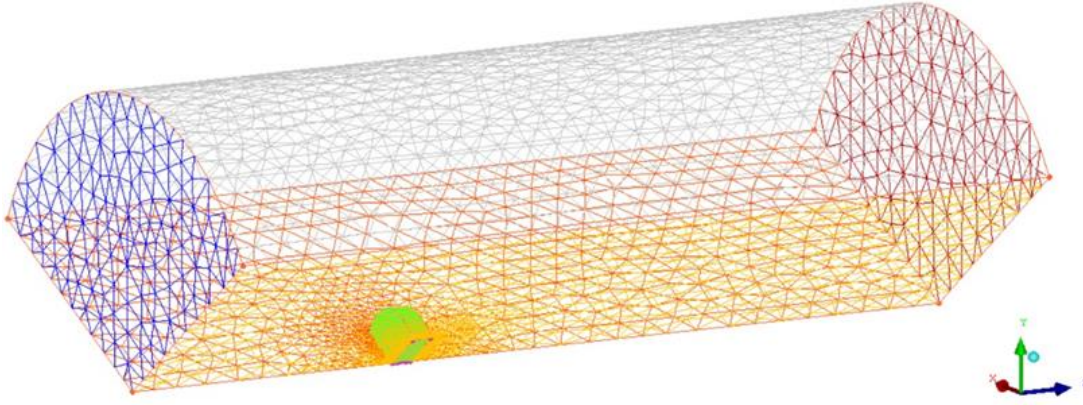
Şekil 4.17: Sabit, dönel ve kanat çevresi akış hacimleri, ANSYS.



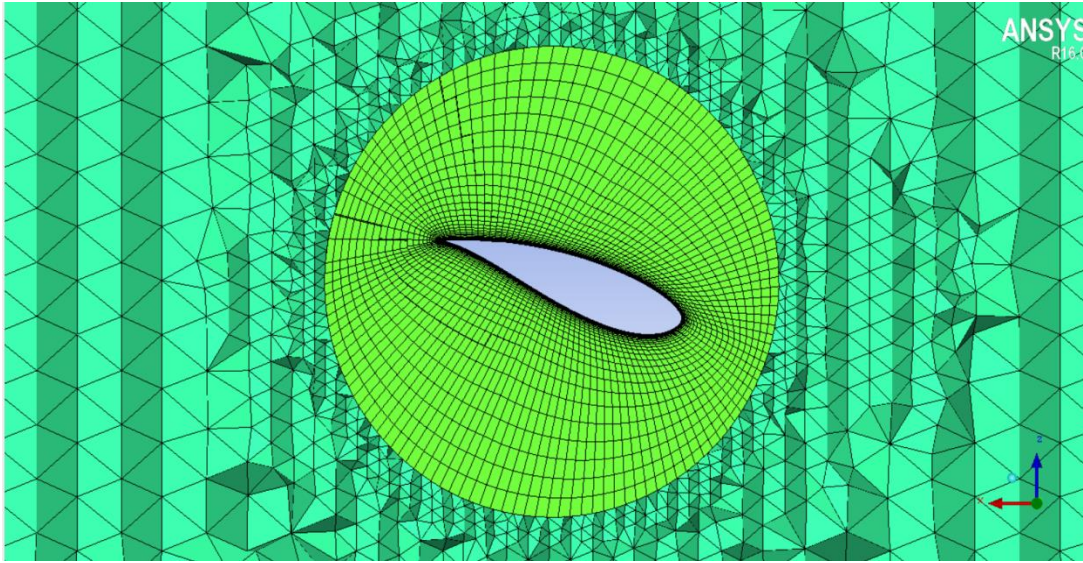
Şekil 4.18: Dönel ve kanat çevresi akış hacimleri, ANSYS.

4.5.2. Ağ yapısının oluşturulması

HAD analizlerinden gerçeğe daha yakın sonuçların elde adına kanat çevresinde ağ kalitesinin daha yüksek olmasını istediğimizden, kanat çevresi akış hacminde yapılandırılmış bloklar halinde ağ örgüsü oluşturulmuştur. Altıgen ağ yapısı kanadın geometrisine uygun olarak 'O-örgü' şekilde oluşturulmuştur. Dönel ve sabit akış hacimlerinde ise ara yüzey geçişlerinde de kaliteye dikkat edilerek yapılandırılmamış dörtgen ağ yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 4.19: Bütün tanım hacimleri ağ örgüsü görüntüsü, ANSYS ICEM.



Şekil 4.20: Kanat kesitinde ağ örgüsü görüntüsü, ANSYS ICEM.

Şekil 4.20’de de görüldüğü üzere kanat yüzeyi çevresinde sınır tabaka kalınlığına da dikkat edilerek daha sık ağ yapısı oluşturulmuştur. Toplamda kanat çevresi akış hacmi, dönel akış hacmi ve sabit akış hacmi olmak üzere tüm akışkan hacimleri için 2.424.818 ağ elemanı oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir.

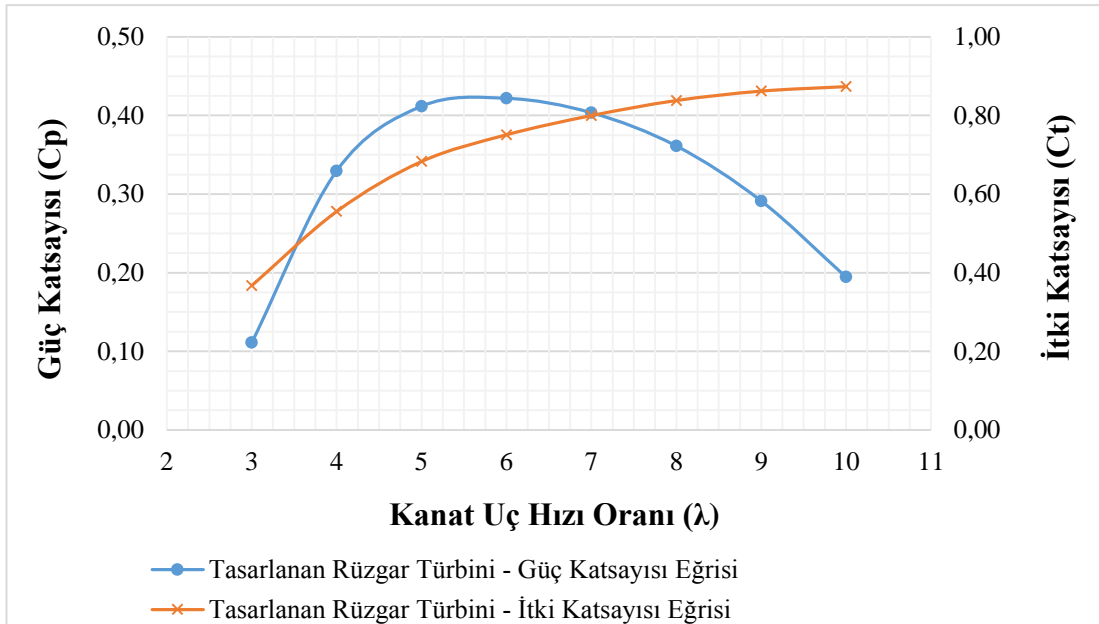
4.5.3.HAD analiz sonuçları

Türbin performansının incelenmesinde, kanat uç hız oranına göre güç katsayısı eğrisinin elde edilmesi adına analizler yürütülmüştür. Optimum çalışma noktası olarak rüzgar hızı 6 m/s’de kanat uç hızı oranı 6 iken türbin dönel hızının 156,26 olduğu denklem 3.49’dan hesaplanmıştır. Bu aşamada kanat ucu hızı oranı değişken olmasını sağlamak adına dönel akış hacminin açısal hızı sabit tutulmak kaydıyla değişken rüzgar hızları için ANSYS FLUENT modülü kullanılarak HAD analizi simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Analizlerde dönel akış hacmi için açısal hız

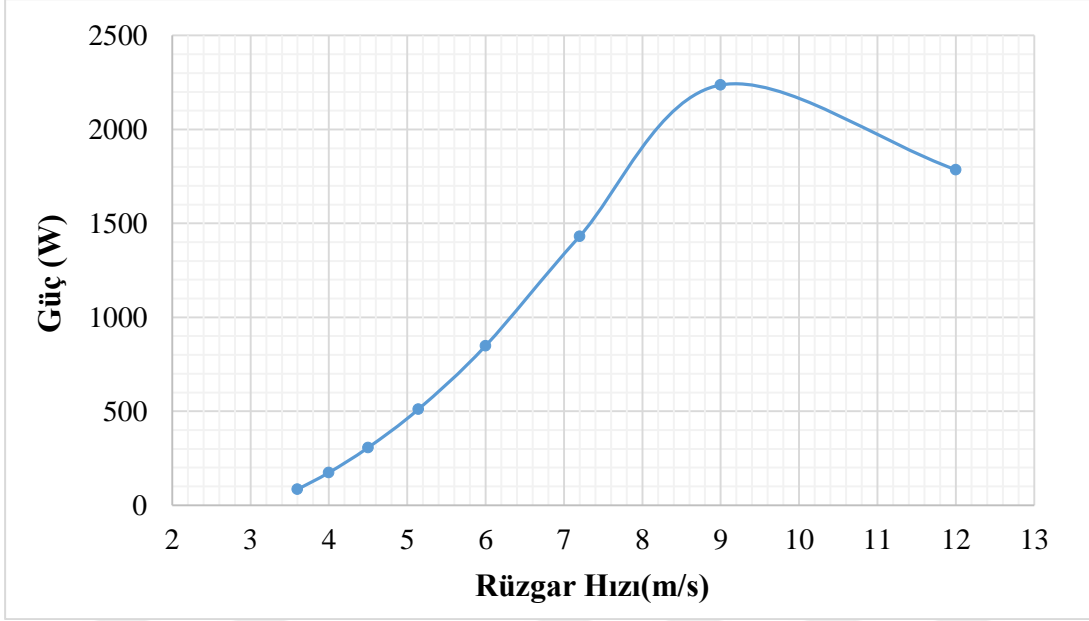
tanımlanırken, kanat ve gövde yüzeysel olarak hesaba katılmış olup sabit olarak tanımlanmışlardır. Türbülans modeli olarak tüm simülasyonlar için k-omega SST modeli seçilmiş olup ve denklemler ikinci dereceden seçilmiştir. Sonuçların daha az agresif fakat stabil olarak yakınsamasını sağlamak amacıyla yakınsama faktörlerinin indirgenmesi ayarlanarak iterasyon edilmiştir. İteratif sonuçların yakınsamasını kontrol edebilmek adına kontrol monitörleri belirlemiştir. Bu bağlamda kaldırma, sürüklenme ve momentum katsayıları için iteratif yakınsama monitörleri gözlenmiştir. Buna göre belirlenen HAD analiz parametrelerine göre elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'te gösterildiği şekildedir.

Çizelge 4.4: HAD analiz sonuçları.

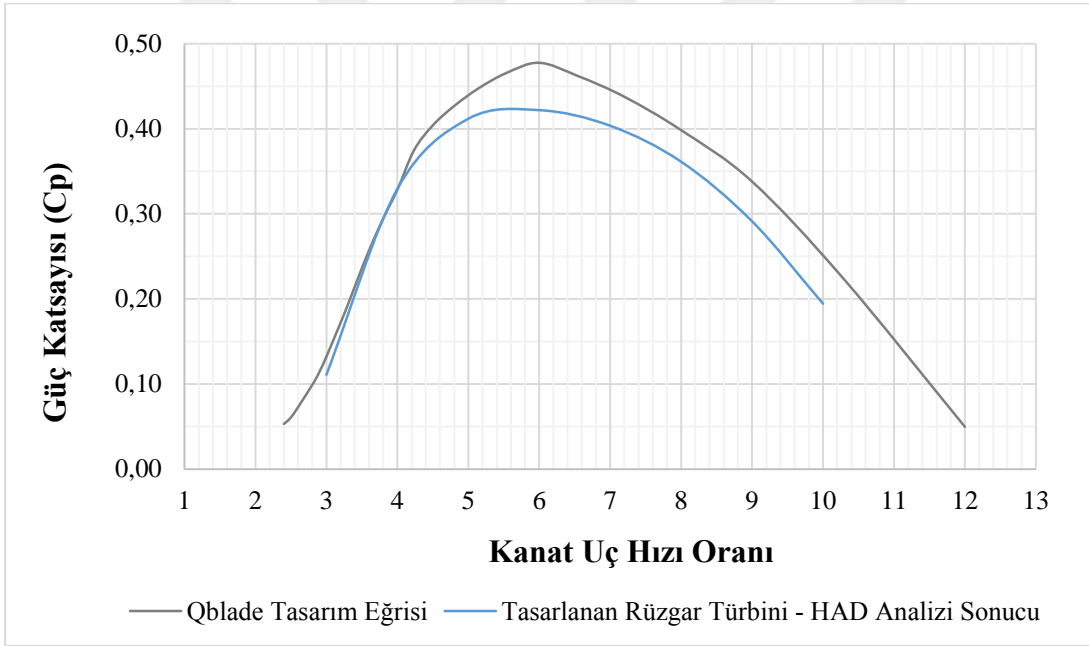
| Kanat Uç Hızı Oranı (λ) | Rüzgar Hızı [m/s] | Türbin Tork [Nm] | Türbin İtki [N] | Türbin Güç [W] | Türbin İtki Katsayısı (C_t) | Türbin Güç Katsayısı (C_p) |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|----------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | 12,00 | 109,1 | 492,27 | 1785,7 | 0,367 | 0,111 |
| 4 | 9,00 | 136,7 | 419,22 | 2236,6 | 0,556 | 0,329 |
| 5 | 7,20 | 87,4 | 329,71 | 1431,3 | 0,683 | 0,412 |
| 6 | 6,00 | 51,9 | 251,75 | 848,6 | 0,751 | 0,422 |
| 7 | 5,14 | 31,2 | 197,00 | 511,2 | 0,800 | 0,404 |
| 8 | 4,50 | 18,7 | 158,04 | 306,6 | 0,838 | 0,361 |
| 9 | 4,00 | 10,6 | 128,45 | 173,6 | 0,862 | 0,291 |
| 10 | 3,60 | 5,2 | 105,42 | 84,5 | 0,873 | 0,194 |



Şekil 4.21: Kanat ucu hızı oranı – güç katsayısı eğrisi.

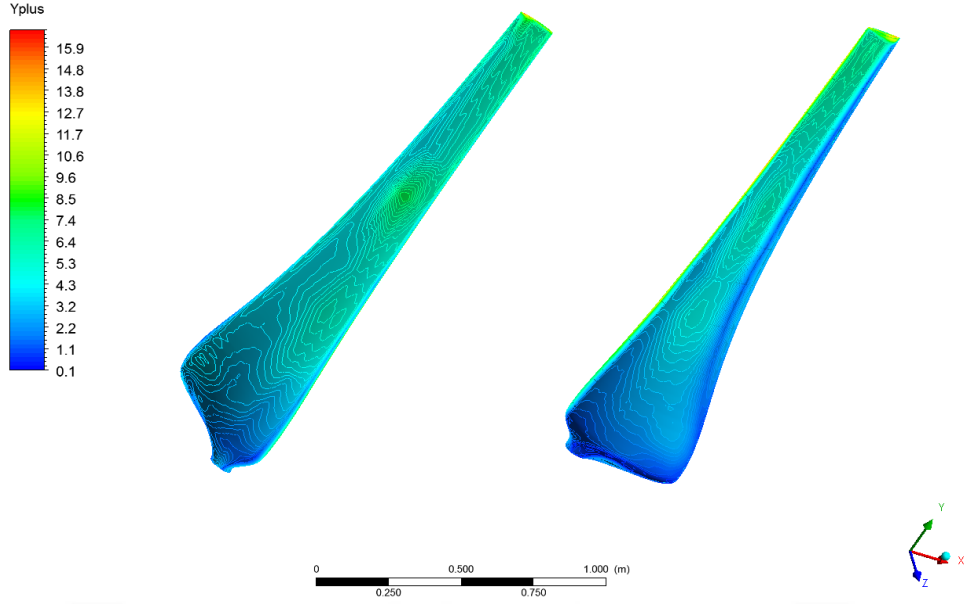


Şekil 4.22: Rüzgar hızı – güç eğrisi.



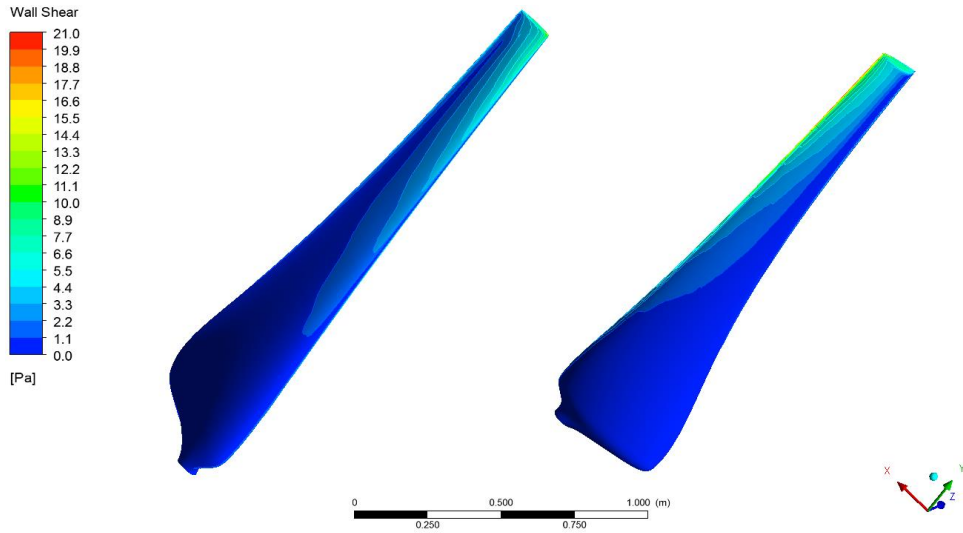
Şekil 4.23: HAD ve Qblade Kanat uç hızı – Güç katsayısı karşılaştırmalı grafiği.

Grafik 4.1’de belirlenen kanat uç hızı oranı noktaları için HAD analizleri sonucunda elde edilen güç katsayılarının ve itki katsayılarının oluşturduğu performans eğrileri görülmektedir. Grafik 4.2’de belirlenen kanat uç hızı oranlarındaki sonuçların bulunabilmesi adına, analizlerde girilen rüzgar hızı değerleri için elde edilen güç eğrisi görülmektedir. Grafik 4.3’te ise tasarlanan rüzgar türbini için elde edilen performans eğrisinin, QBlade’den elde edilen ön tasarım eğrisi ile karşılaştırılması gösterilmiştir.

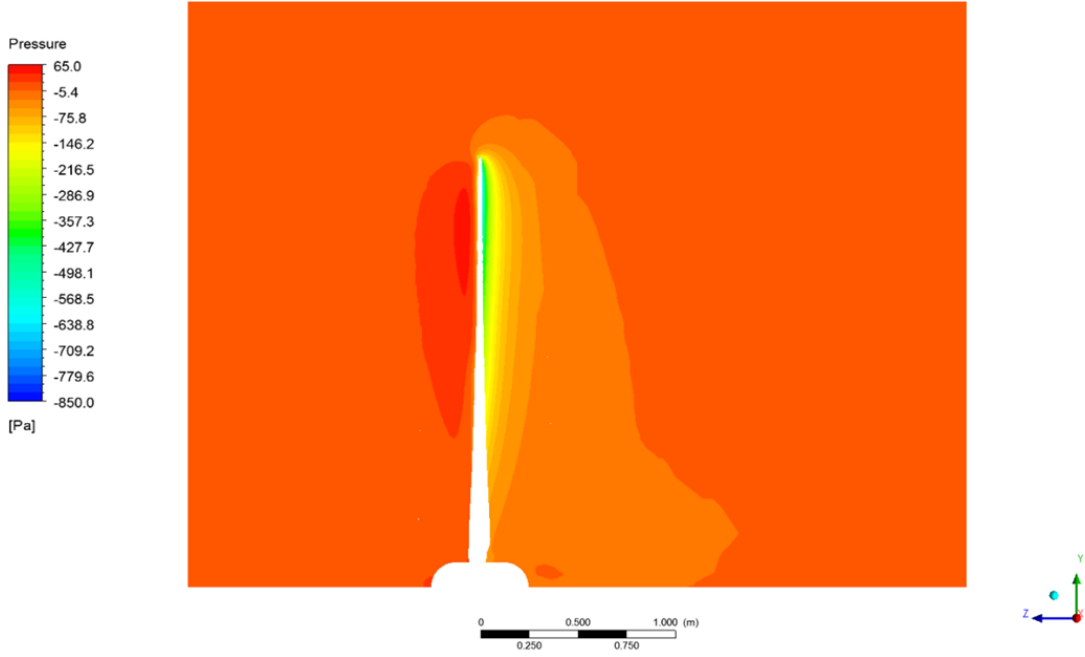


Şekil 4.24: Kanat emme ve basınç yüzeylerinde y^+ konturları ($\lambda=6$).

Şekil 4.21’de kanat uç hızı oranının 6 olduğu durum için HAD analizi sonucunda elde edilen y^+ konturları gösterilmektedir. Gövdeye yakın bölgelerden kanat ucuna doğru ilerledikçe y^+ verilerinin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte kanat basınç yüzeyindeki y^+ değerlerinin de emme yüzeyine göre daha fazla olduğu sonucu elde edilmiştir. Kanat yüzeyindeki ortalama y^+ değeri 4,36 olarak elde edilmiş olup, farklı λ değerleri için ise bu değer yaklaşık olarak 5-4 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.22’de λ değerinin 6 olduğu durum için kanat üzerinde elde edilen yüzey gerilimi konturları görülmektedir. Buna göre kanat üzerinde en fazla yüzey geriliminin kanadın öncül kenarı üzerinde oluştuğu görülmektedir.

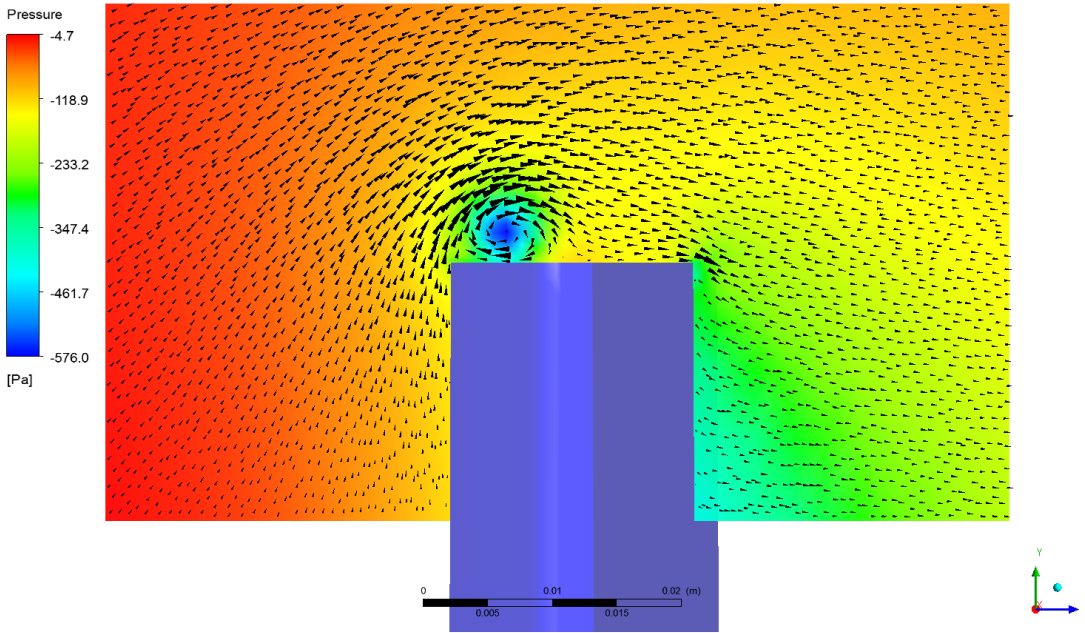


Şekil 4.25: Kanat emme ve basınç yüzeylerinde gerilim konturları ($\lambda=6$).

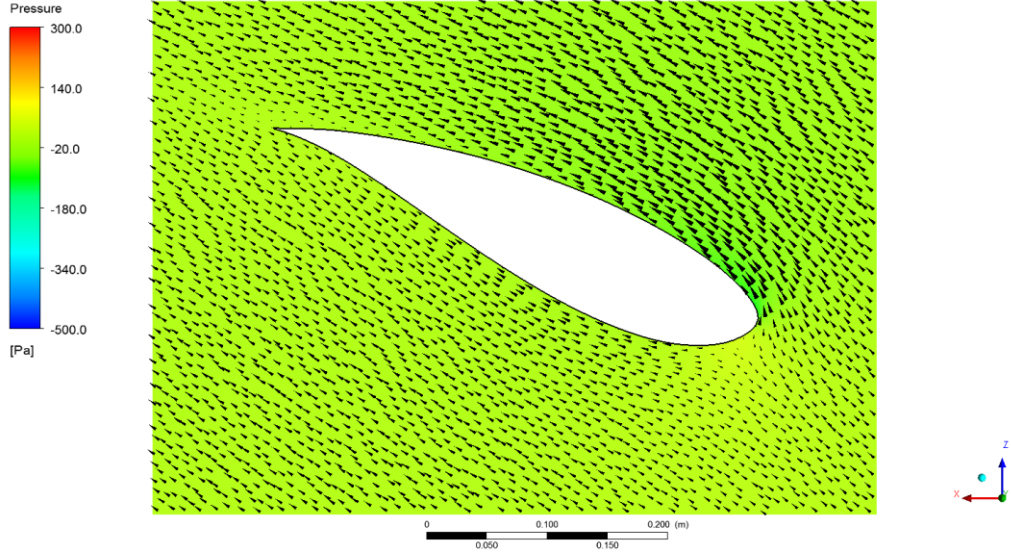


Şekil 4.26: Eksenel düzlemde akış boyunca basınç konturları ($\lambda=6$).

Şekil 4.23’de kanat uç hızı oranının 6 olduğu durum için analizlerde ele alanın akış hacmi boyunca gözlemlenen basıncı konturları ile rüzgar türbininin ardına geçen hava akımındaki basınç düşüşü görülmektedir. Şekil 4.24’de kanat ucu çevresinde yerel olarak gözlemlenen basınç konturları ve hız vektörleri görülmektedir. Bununla birlikte kanat ucundaki vorteks oluşumu ve kanat ardında oluşan düşük basınç kaynaklı vakum oluşumu da hız vektörleri ile gözlenebilmektedir.

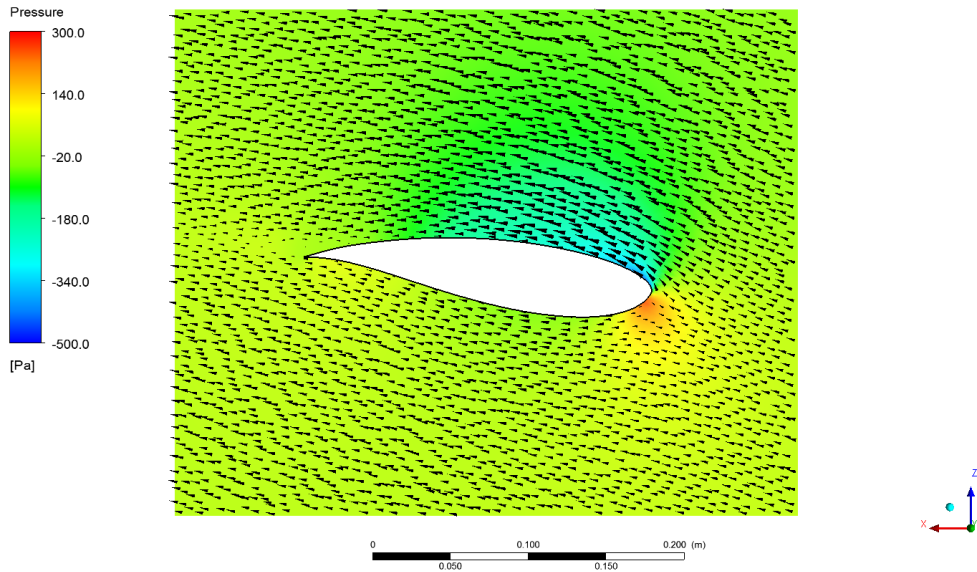


Şekil 4.27: Kanat ucu basınç konturları ve hız vektörleri ($\lambda=6$).

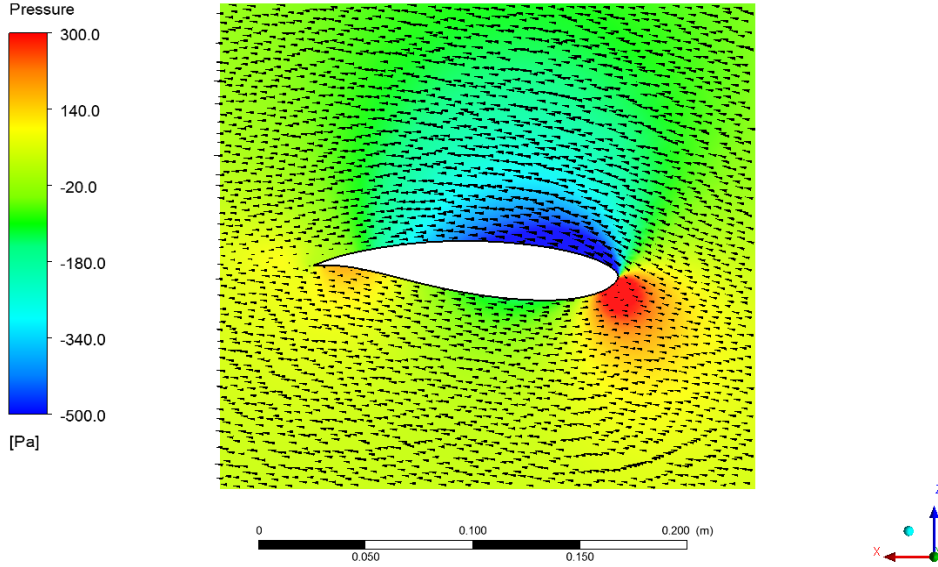


Şekil 4.28: $Y=0,4$ m için kanat çevresinde basınç konturu ve hız vektörleri ($\lambda=6$).

Şekil 4.25'ten şekil 4.27'ye kadar olan görsellerde, belirlenen radyal pozisyonlar için kanat çevresinde oluşan basınç konturları ile hız vektörleri görülmektedir. Rüzgar türbini rotor modelinin tasarlanması sırasında en uygun kanat geometrisinin elde edilmesi adına, kanat kökünden kanat ucuna kadar kullanılan profiller için aerodinamik verileri de göz önüne alınarak en uygun kanat açılarına göre tasarım gerçekleştirilmiştir. Böylelikle kanatlardan en uygun aerodinamik performans alınması sağlanırken herhangi bir akış ayrılmasının oluşmasını engelleyecek ve verimin üst seviyede tutulmasını sağlayacak şekilde kanat açıları da ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlarda 3 farklı radyal pozisyon için gözlemlenen kanat çevresi hız vektörleri ile kanat boyunca bir akış ayrılması durumunun oluşmadığını görülmüştür.

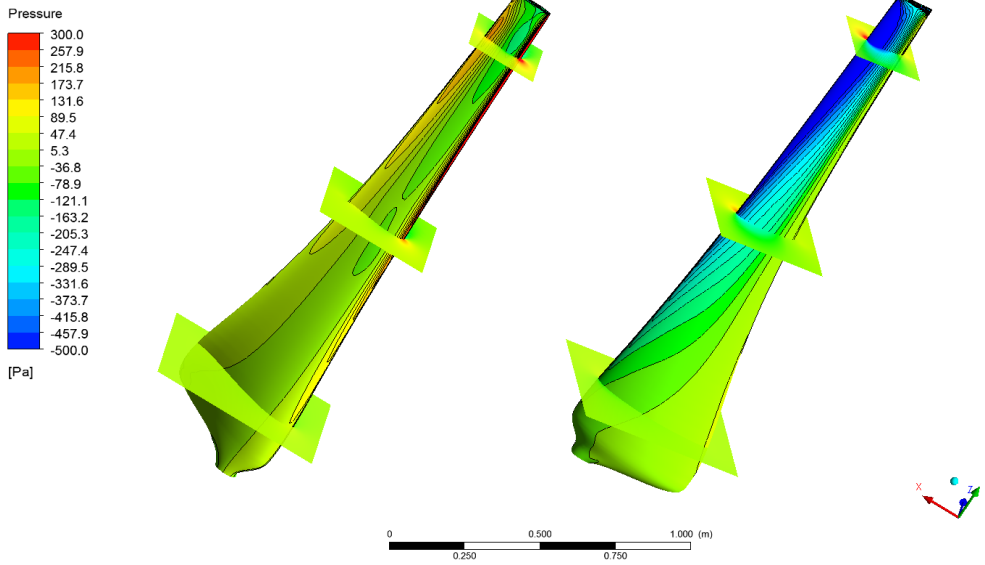


Şekil 4.29: $Y=1,2$ m için kanat çevresinde basınç konturu ve hız vektörleri ($\lambda=6$).



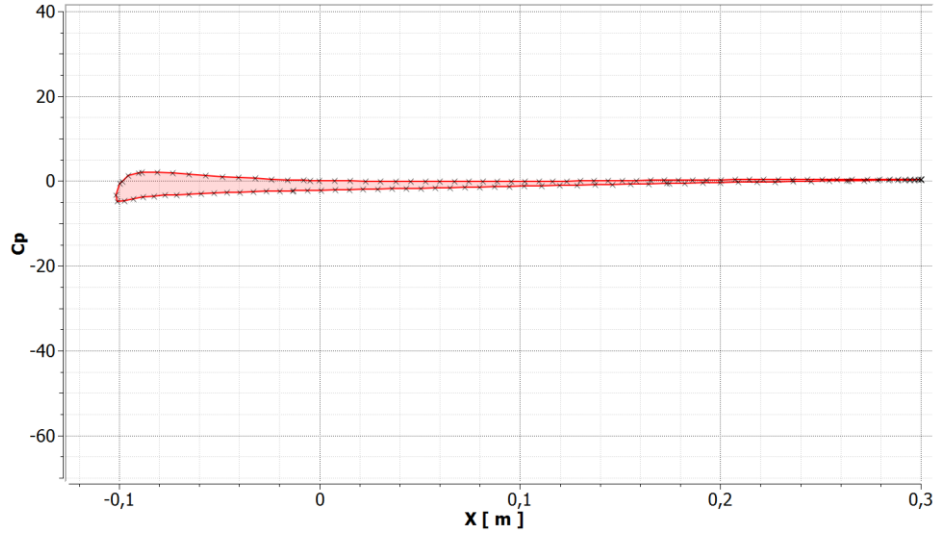
Şekil 4.30: Y=2,0 m için kanat çevresinde basınç konturu ve hız vektörleri ($\lambda=6$).

Kanat üzerinde oluşan basınç verileri tüm kanat modeli boyunca şekil 4.28’de gösterilmektedir. Burada elde edilen sonuçlara göre kanadın dönüş doğrultusunda rüzgarı karşıladığı kenar yüzeyi boyunca atmosfer basıncından fazla olduğu ve yine aynı kenar için durma noktasından itibaren kanadın arka yüzeyinde ise atmosfer basıncından daha az olduğu görülmektedir.

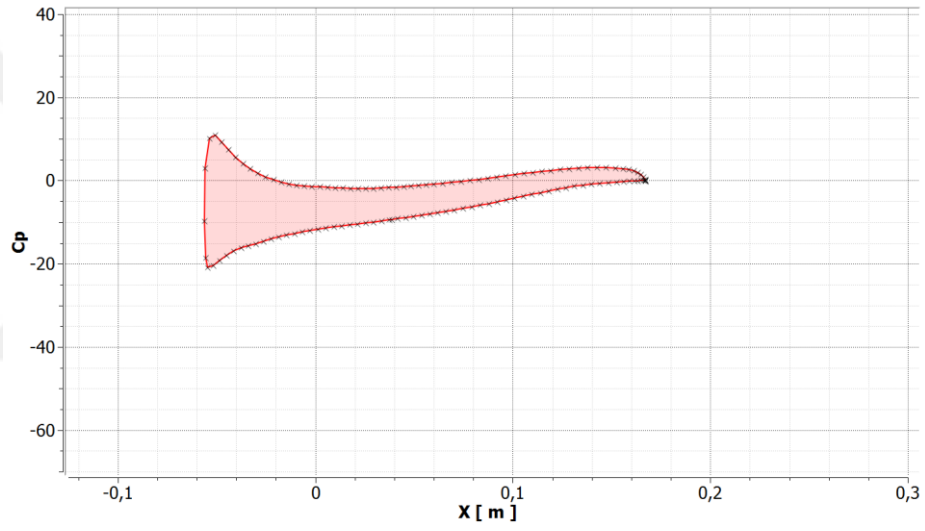


Şekil 4.31: Kanat yüzeyinde basınç konturları ($\lambda=6$).

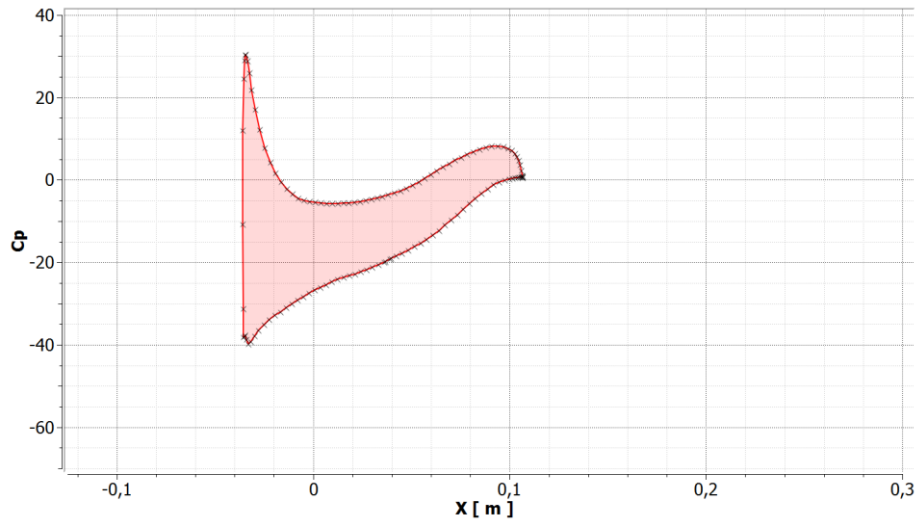
Şekil 4.29 ile şekil 4.31 arasındaki görsellerde daha önceden kanat çevresi basınç konturlarının incelendiği radyal pozisyonlar için kanat üzerinde elde edilen basınç katsayısı grafikleri gösterilmektedir. Grafiklerin elde edilmesinde Denklem 3.81’deki ifadeden yararlanılmıştır.



Şekil 4.32: $Y=0,4$ m pozisyonundaki kanat profilinin basınç katsayısı dağılımı ($\lambda=6$).



Şekil 4.33: $Y=1,2$ m pozisyonundaki kanat profilinin basınç katsayısı dağılımı ($\lambda=6$).



Şekil 4.34: $Y=2,0$ m pozisyonundaki kanat profilinin basınç katsayısı dağılımı ($\lambda=6$).



5. KANAL İÇERİSİNDE YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

Kanal içerisinde rüzgar türbini tasarlanması ve tasarlanan modellerin analizlerinin gerçekleştirilmesi doğrultusunda, öncelikli olarak daha önceden tasarımı gerçekleştirilmiş olan yatay eksenli rüzgar türbini geometrisi kullanılarak, en uygun kanal profillerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda en uygun kanal profillerinin elde edilmesi hedefi doğrultusunda, kanal geometrisinin herhangi bir hazır profili ele almaksızın sıfırdan tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada kanal profilinin 2 boyutlu olarak bir kanat profilinde olduğu gibi elde edilmesi hedeflenmiş ve kanal profillerine uygun olarak kapalı eğrilerin elde edilmesi adına Bezier eğrilerinden yararlanılmıştır. Elde edilen profiller arasından HAD analizlerinde kullanılacak ve anlamlı sonuçlar ifade edecek geometrilerin belirlenmesi hedefiyle, 2 boyutlu kanal profillerinin oluşturulduğu MATLAB kodu yardımı ile optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

5.1. Bezier Eğrileri Teorisi

Bezier eğrileri parametrik eğriler olup, bilgisayar grafikleri ve animasyonlar gibi birçok alanda kullanıldıkları gibi kanat profili gibi ekstrem geometrilerin modellenmesinde de kullanılabilirler. Bezier eğrilerinin matematiksel olarak kökeni Bernstein poligonlarına dayanmaktadır. Bernstein polinomlarını tanımlayan ifade,

$$b_i^n(t) = \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i \quad (5.1)$$

Denklem 5.1'de gösterildiği gibi olup binom katsayısı aşağıdaki ifade ile açıklanır [27].

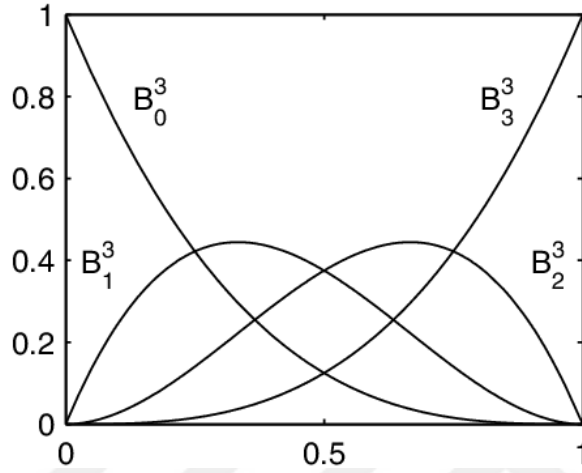
$$\binom{n}{i} = \begin{cases} \frac{n!}{i!(n-i)!} & \text{eğer } 0 \leq i \leq n \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (5.2)$$

Bir Bezier eğrisi P_0 'dan P_n 'inci kontrol noktasına kadar tanımlanarak ifade edilir. Örneğin kübik Bezier eğrileri elde edilmek istenildiğinde, $n=3$ olup 4 kontrol noktası

ile ifade edilir. Genelleştirilmiş hali ile yazmak istenirse Bezier eğrileri Denklem 5.4'de ki gibi ifade edilir.

$$B_i^n(t) = \sum_{i=0}^n b_i^n(t) P_i = \sum_{i=0}^n P_i \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i \quad (5.4)$$

Şekil 5.1'de kübik Bernstein polinomları oluşturan eğriler bir arada gösterilmektedir.

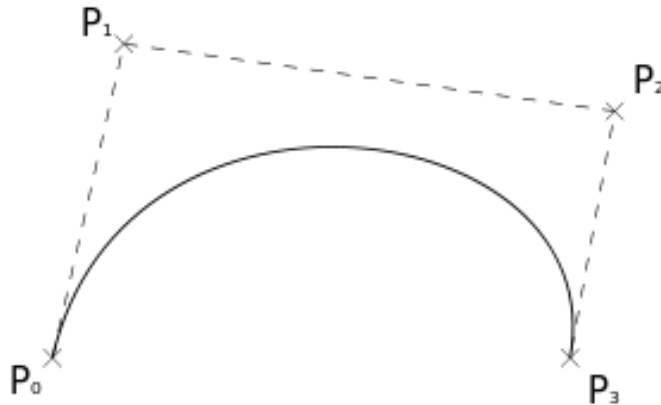


Şekil 5.1: Kübik Bernstein polinomlarının gösterimi [27].

Denklem 5.4'de genelleştirilmiş olarak gösterilen ifade daha açık bir formda gösterilmek istenirse denklem 5.5'teki ifade elde edilir.

$$B(t) = P_0(1-t)^n + \binom{n}{1}(1-t)^{n-1}tP_1 + \dots + t^n P_n \quad (5.5)$$

Rasgele dört farklı kontrol noktası ile elde edilmiş örnek bir kübik Bezier eğrisi şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2: 4 kontrol noktası ile ifade edilen kübik Bezier eğrisi görseli, MATLAB.

Bezier eğrileri kullanılarak, kanat profili gibi kapalı ekstrem geometrilerin daha uygun şekilde elde edilebilmesi adına kontrol noktası sayısı artırılabilir. Bu doğrultuda 6 kontrol noktasından oluşan Bezier eğrisi tanımlanırsa (n=5 için),

$$B_{P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5} = P_0(1-t)^5 + \binom{5}{1}(1-t)^{5-1}tP_1 + \binom{5}{2}(1-t)^{5-2}t^2P_2 + \binom{5}{3}(1-t)^{5-3}t^3P_3 + \binom{5}{4}(1-t)^{5-4}t^4P_4 + t^5P_5 \quad (5.6)$$

denklemini elde edilir.

5.2. Çoklu Hedef Optimizasyonu

Çoklu hedef optimizasyon metotları birden fazla hedef fonksiyonun yada bir başka deyişle birden fazla sonuç parametresinin matematiksel olarak optimize edilmesi sistemine dayanan, çoklu kriterlere sahip problemlerde kullanılan çözüm yöntemleridir. Realitede birden çok parametreye bağlı olarak değişkenlik gösteren çoğu problem için yine bu parametrelerin problem üzerindeki etkilerinin birbirleri ile uyumsuz olduğu görülebilir. Bu bağlamda herhangi bir X verisinin optimizasyonu için yalnızca bir etki parametrenin kullanılması, X verisini bağlayan diğer parametreler için aynı etkinin gözlemleneceği anlamına gelmez. Dolayısı ile etki eden tüm hedef fonksiyonların aynı anda optimize edilmesi mümkün değildir. İdeal çoklu hedef optimizasyonu ile tüm hedef parametrelerinin kabul edilebilir seviyede optimize edildiği çözüm seti elde edilebilir. Çoklu hedef optimizasyon metotlarının en temel hedefi “Pareto optimal çözüm seti” elde edilmesidir. Pareto optimal çözüm setinde hedef fonksiyonlardan birinin iyileştirilmesi, bir diğer hedef fonksiyon için daha uygun olan sonuçtan uzaklaşmadan mümkün olamaz. Mühendislik tasarım problemleri göz önüne alındığında, hedef fonksiyonlar için belirlenen önem seviyelerine göre en uygun parametrelerin elde edilmesi amaçlanır. Elde edilen dengelenmiş analiz sonuçlarına göre, tüm pareto optimal değerleri arasında bazı hedef değişkenler özdeş değerler alır. Hedef değişkenlerin bu özelliği sonuçların optimum olmasını sağlar. Bununla beraber diğer hedef değişkenlerin farklı değerler alması, verilerin optimum sonuçtan farklılaşmasına sebep olur [21].

Matematiksel olarak standart tek hedefli optimizasyon problemleri denklem 5.7’deki ifade ile formüle edilir.

$$\min\{f(x)\}, \quad x \in S \quad (5.7)$$

Burada $f(x)$ skaler bir fonksiyon olup, S ise örtük tanım kümesini oluşturur. Çoklu hedef optimizasyon problemlerin için pareto çözüm seti ise matematiksel olarak,

$$\min\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\}, \quad x \in S \quad (5.8)$$

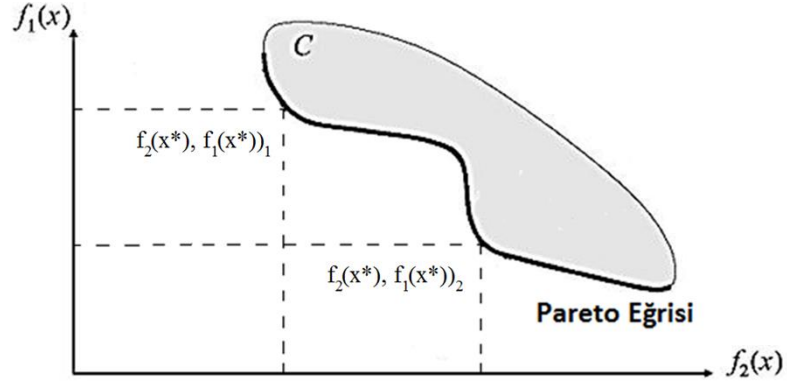
$n > 1$ ve S tanım kümesi olmak üzere, yukarıdaki şekilde ifade edilir. Hedef verilerin oluşturduğu çözüm vektörü yine hedef uzayına ait olup, uygulanması mümkün olan optimal çözüm setinin görüntüsü, erişilebilir optimal çözüm seti olarak adlandırılır.

5.2.1. Pareto çözüm seti

Optimizasyon problemlerinde en iyi hedef sonucun değerlendirilmesi skaler konseptte sahip olduğundan, çoklu hedef optimizasyon analizleri için doğrudan uygulanabilir değildir. Bir çoklu hedef optimizasyonunda $x^* \in S$ çözüm vektörünün pareto optimal çözüm olarak değerlendirilebilmesi için, tüm diğer $x \in S$ çözüm vektörlerinin en azından bir hedef fonksiyonu için daha büyük değere sahip olması veya tüm hedef fonksiyonları için aynı değere sahip olması gerekmektedir. Bununla beraber bir $x^* \in S$ çözüm vektörü için çoklu hedef optimizasyonunda aşağıdaki tanımlamalar yapılabilir.

- Bir çoklu hedef optimizasyon probleminde $x^* \in S$ çözüm vektörü için, eğer herhangi bir $x \in S$ çözüm vektörü ile $i = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere, $f_i(x) < f_i(x^*)$ durumu görülüyorsa, x^* için zayıf pareto optimum veya zayıf efektif çözüm denilebilir.
- Bir çoklu hedef optimizasyon probleminde $x^* \in S$ çözüm vektörü için, eğer herhangi bir $x \in S$ çözüm vektörü ile $i = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere, $f_i(x) \leq f_i(x^*)$ durumu görülüyorsa, x^* için mutlak pareto optimum veya mutlak efektif çözüm denilebilir.

Bunlara ek olarak, x^* için mümkün olan komşu çözümlerin sınırlandırılması dışında yerel pareto optimal çözüm noktaları için de yukarıdaki tanımlamalar yapılabilir. Efektif pareto setinin bir başka deyişle efektif çözümlerin gösterimi için pareto eğrisi veya pareto yüzeyi tanımlamaları yapılabilir. Pareto eğrisi veya yüzeyi farklı hedef fonksiyonlarına göre yönelimin doğasını gösterir niteliktedir.



Şekil 5.3: Pareto eğrisi ve çözüm seti örnek gösterimi.

Şekil 5.2’de iki farklı hedef fonksiyonundan oluşan örnek bir pareto eğrisi görülmektedir. Şekilde görülen $(f_2(x^*), f_1(x^*))_1$ ve $(f_2(x^*), f_1(x^*))_2$ noktaları pareto eğrisi üzerindeki çözüm noktaları olup bu noktalar ile beraber eğriyi oluşturan tüm noktalar için dominant olmayan noktalar tanımı kullanılabilir.

5.2.2. Genetik algoritma metodu

Genetik algoritma metodunun temel işleyiş prensibi doğal seçilime dayanmaktadır. Potansiyel çözüm setini oluşturan örnek popülasyon belirlenerek, jenerasyonlar ilerledikçe daha optimal sonuç setleri elde edilir. Doğal seçim prensibinin bir sonucu olarak jenerasyon geçişlerinde, oluşturulan popülasyon içerisindeki belirlenen hedef verilere göre daha zayıf özellik gösteren bireyler eliminasyona uğrarlar. Böylelikle popülasyon içerisindeki daha optimal sonuç gösterme eğiliminde olan bireyler, hedef veriler ışığında sahip oldukları avantajlı özelliklerini ilerleyen jenerasyonlara aktarırlar. Bu durum, kullanılan popülasyon miktarının artmasının sonucunda daha fazla potansiyel optimal sonuç elde edilebilmesinin de önünü açar. Her bir jenerasyonda sahip olunan popülasyon sayısı sabit kalırken, zayıf özellik gösteren eski bireylerin yerini jenerasyon geçişinde oluşturulan yeni modeller alır. Yeni modellerin oluşturulması sırasında gerçekleştirilen bağlayıcı model parametrelerindeki karşılıklı alışveriş ve rasgele mutasyon, popülasyonun durağanlaşmasını engeller. Genetik algoritma metodunun efektif şekilde çalışmasında aşağıdaki kriterlerin etkisi görülür.

- Potansiyeli daha yüksek sonuçların elde edilebilmesi adına diğer potansiyel sonuçlara göre değerlendirmenin nispeten daha kolay olmalıdır.
- Genetik algoritma metotları genellikle her ne kadar kesin en iyi sonuç olmasa da bir optimal sonucun olduğu durumlar için daha uygun çözüm yöntemleridir.

- Potansiyel sonuç birbirinden bağımsız olarak farklı parçalara ayrıştırılarak çözülebilir. Birbirinden bağımsız ancak aynı hedef sonuca etki eden ayrık sonuçlar genetik algoritmanın bir nevi gen yapısını oluşturur.

Her bir jenerasyon geçişi ile bir önceki jenerasyona göre daha potansiyel sonuçların elde ediliyor olması gereklidir. Bunun sağlanabilmesi belirlenen hedef verilerin elde edildiği ve pozitif tam sayı sonuç veren uygunluk fonksiyonuna bağlıdır. Elde edilen bu uygun veriler daha sonra doğal seçilimin gerçekleştirilmesi ve bir sonraki jenerasyona aktarılacak potansiyel sonuçların ya da yok olacak sonuçların belirlenmesinde kullanılır. Doğal seçim ile x sayıdaki çözümün seçilimi sırasında popülasyon içerisinde sadece en iyi hedef sonuca sahip olan modellerin değil, istatistiksel olarak daha uygun sonuçların da yer aldığı modeller belirlenir. Ancak bu durumun bir garantisi de yoktur. Bu durum doğal seleksiyonun yapısından kaynaklıdır.

Genetik algoritma metodu, çoklu hedef tasarım optimizasyonu uygulamaları için etkin bir yöntem olma özelliği gösterir ve tek tasarım noktasına sahip çözüm sonuçlarının elde edildiği bazı sınırlı çözüm yöntemlerinin aksine pareto optimal çözüm setlerinin elde edilmesinde de uygundur. Çoklu hedef optimizasyon problemlerinde tek bir çözüm noktasının elde edilmesi genellikle mümkün olmadığından temel hedef, belirlenen hedef fonksiyonlar için mümkün olan tüm çözüm setlerinin elde edilmesidir. Genetik algoritma çözüm metodu kullanılarak tüm pareto optimal çözümlerin elde edilmesi için, popülasyondaki bireylerin çeşitliliğinin her jenerasyon için sağlanması gereklidir [28].

Genel olarak genetik algoritma metodu kurulum ve değerlendirme, seçim, jenerasyon geçişinde bireyler arasındaki alışveriş ve mutasyon olmak üzere 4 temel aşamadan oluşur. Kurulum aşamasında kararlaştırılan sayıdaki başlangıç popülasyonu oluşturulur ve hedef fonksiyonların sonuçları her bir birey için hesaplanır. Böylelikle geçici pareto optimal çözüm seti güncellenerek elde edilir [21].

Seçim aşamasında oluşturulan her birey için rasgele ağırlıklı olarak uygunluk verileri belirlenir. Popülasyon içerisinde seçim olasılığına uygun olarak bir birey çifti seçilerek, popülasyon sayısının yarısı kadar birey çifti oluşturulur. Seçim olasılığı fonksiyonu,

$$P(x) = \frac{f(x) - f_{min}(C)}{\sum_{x \in C} \{f(x) - f_{min}(C)\}} \quad (5.9)$$

$$f_{min}(C) = \min\{f(x) | x \in C\} \quad (5.10)$$

C popülasyonu, x birey olmak üzere yukarıdaki gibi tanımlanabilir [21].

Birey çiftleri arasında gerçekleştirilen karşılıklı alışveriş aşamasında, başlangıç popülasyonu ile eşit sayıda yeni bireyler elde edilir. Bireyler arasında gerçekleşen karşılıklı alışveriş için farklı yaklaşım fonksiyonları kullanılabilir. Bu yaklaşımlar, parametreler ışığında potansiyel modellerin elde edilmesinde etkili olduğu gibi ulaşılabilecek olan çözüm setinin yapısında da etkilidir. Bireyler arasındaki bu alışveriş eylemini belirleyen yaklaşım fonksiyonlarına örnek olarak ortalama yaklaşım, dağılık yaklaşım ve hüristik yaklaşım fonksiyonları örnek gösterilebilir. Ortalama yaklaşım fonksiyonunda ata bireyler için rasgele belirlenen ağırlıklı oran ile yeni bireylerin elde edilmesi sağlanır. Elde edilecek yeni bireyin oluşmasında ata bireylerdeki yer değiştirme eylemi sadece bu oran ile kontrol edilir.

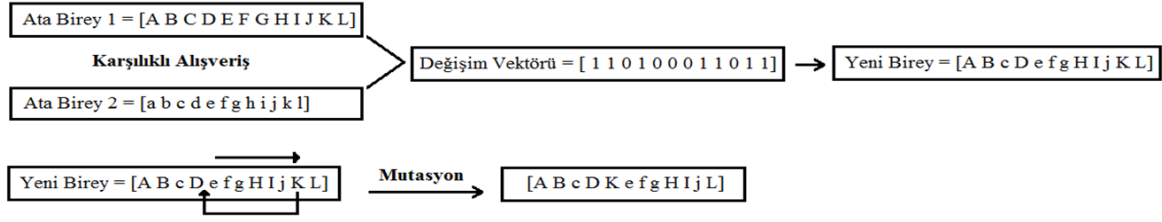
$$\text{Yeni Birey} = \text{Ata Birey 1} + r * R * (\text{Ata Birey 2} - \text{Ata Birey 1}) \quad (5.11)$$

Denklem 5.5' de görülen R ifadesi ata bireyler arasında belirlenen ağırlıklı oran olup, r ifadesi ise bu oranın rasgele olmasını sağlayan orandır. R oranının 0 ile 1 arasında olması durumunda elde edilecek olan yeni birey, ata bireyleri belirleyen parametrelerin oluşturduğu hiperküp içerisinde oluşacaktır. R oranının 1'den büyük olması halinde yeni birey bu hiperküpün dışında oluşur. R oranı skaler veya vektörel olabilir. Skaler olması halinde yeni oluşan birey, ata bireyler arasındaki çizgi üzerinde oluşur, vektörel olması halinde ise ata bireyleri oluşturan parametreler arasındaki hiperküpün her hangi bir noktasında olabilir.

Hüristik yaklaşım fonksiyonunda yeni birey, kendisini oluşturan ata bireyler arasındaki çizgi üzerinde, belirlenen hedef sonuçlara göre daha uygun pozisyonda yer alan ata bireyden yine belirlenen oranca uzaklıkta oluşturulur.

Rasgele yaklaşım fonksiyonunda bireylerin belirlenmesine etki eden parametre sayısında elemanı olan rasgele bir vektör oluşturulur. Oluşturulan bu vektör ikili yapıda olup yalnızca 1 ve 0 elemanlarında oluşur ve bu değerler ata bireyleri temsil eder. Oluşturulan bu rasgele vektör ve belirlenen ata bireyler yardımıyla yeni bir

birey elde edilmiş olur. Şekil 5.3'te rasgele yaklaşım uygulaması örneği görülmektedir.

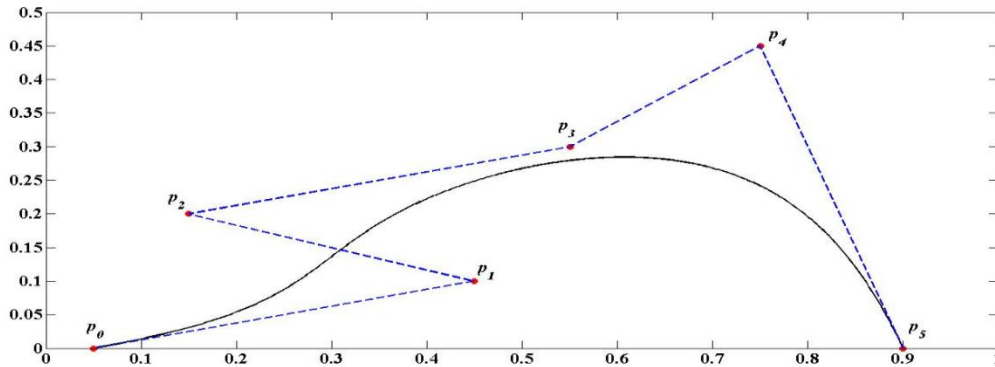


Şekil 5.4: Rasgele yaklaşımda karşılıklı alışveriş ve mutasyon örnek gösterimi.

Mutasyon aşamasında, birey çiftlerinin karşılıklı alışverişini sonucunda oluşturulan tüm yeni bireyler önceden belirlenmiş olan mutasyon olasılığı doğrultusunda mutasyon operasyonuna tabi tutulur. Mutasyon operasyonunun ardından oluşturulan popülasyon seti içerisinde önceden belirlenmiş N_{eleme} sayısında birey seçilir ve geçici pareto optimal çözüm seti içerisinde rasgele seçilen aynı sayıdaki birey ile değiştirilir. Böylelikle yeni jenerasyonun popülasyon çözüm seti elde edilmiş olunur. Final pareto optimal çözüm seti belirlenen sonuçlandırma kriteri veya jenerasyon sayısına ulaşılması halinde ulaşılmış olur.

5.3. Kanal Profilinin Tasarımı

Yatay eksenli rüzgar türbinleri için kanal tasarımının, değişken tasarım parametrelere göre etkilerinin incelenmesi amacıyla kanal profilinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda yatay eksenli rüzgar türbininin etrafını saracak kanal profilinin belirlenmesinde parametrik Bezier eğrilerinden yararlanılmıştır. Kanal profili tasarım metodu doğrudan nümerik yöntemle gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla parametrik Bezier eğrileri teorisi kullanılarak 6 kontrol noktası kullanılarak Bezier eğrileri elde edilmiştir.(Denklem 5.6)



Şekil 5.5: 6 kontrol noktası ile oluşturulmuş Bezier eğrisi örneği.

Oluşturulan Bezier eğrilerinin kanal profili formunda düzenlenebilmesi adına başlangıç ve bitiş kontrol noktaları aynı olmak kaydıyla, profiller elde edilmiştir. Oluşturulan kanal profilleri ve daha önceden tasarlanıp HAD analizleri de elde edilen YERT geometrisi ile tasarım parametreleri kullanılarak 2 boyutlu akış analizleri gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu analizlerde DFDC (Ducted Fan Design Code) yazılımından yararlanılarak, tasarlanan türbin geometrisinden belirlenen parametreler ışığında kanal içeresine konulduğunda elde edilecek olan performans verilerine ulaşılmıştır [22]. YERT tasarımı aşamasında belirlenen en uygun çalışma koşulları ve kanat modelinin aerodinamik özellikleri de analizde dikkate alınmıştır. Bununla beraber kanal tasarımının YERT'nin performansına etkilerinin daha doğru şekilde incelenebilmesi adına, daha uygun kanal profillerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Rüzgar türbini tasarımında belirlenen optimal çalışma parametrelerine göre en uygun kanal profillerinin elde edilmesi, Matlab programı kullanılarak çoklu hedefli genetik algoritma optimizasyonu uygulamasıyla gerçekleştirilmiştir. Matlab programında yazılan kod ve koda gömülü olarak kullanılan DFDC yazılımı ile türbin güç ve itki verileri için pareto eğrisi sonuçları elde edilmiştir.

Genetik algoritma metodu ile gerçekleştirilen çoklu hedef optimizasyonu için farklı analiz yöntemleri ile sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte her bir analiz için kontrol noktalarının sınırları aynı tutulmuş olup Tablo 5.1'de gösterilmektedir.

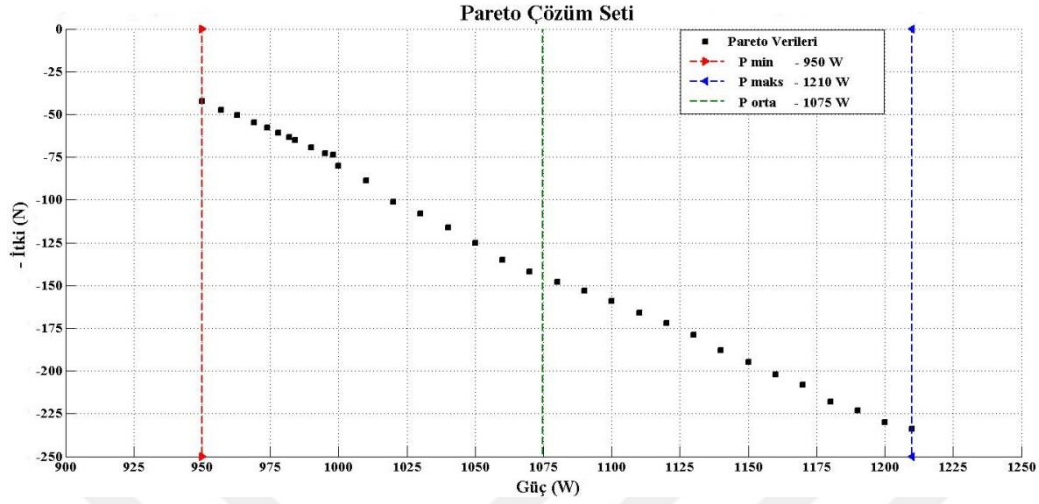
Çizelge 5.1: Genetik algoritma, Bezier eğrisi kontrol noktaları sınırları.

| | CP₀ | CP₁ | CP₂ | CP₃ | CP₄ | CP₅ |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| X_Minimum | 0 | 0,20 | 0,75 | 0,75 | 0,20 | 0 |
| X_Maksimum | 0 | 0,50 | 1,25 | 1,25 | 0,50 | 0 |
| Y_Minimum | 0 | -0,10 | -0,15 | -0,50 | -0,40 | 0 |
| Y_Maksimum | 0 | 0,10 | 0,15 | -0,20 | -0,20 | 0 |

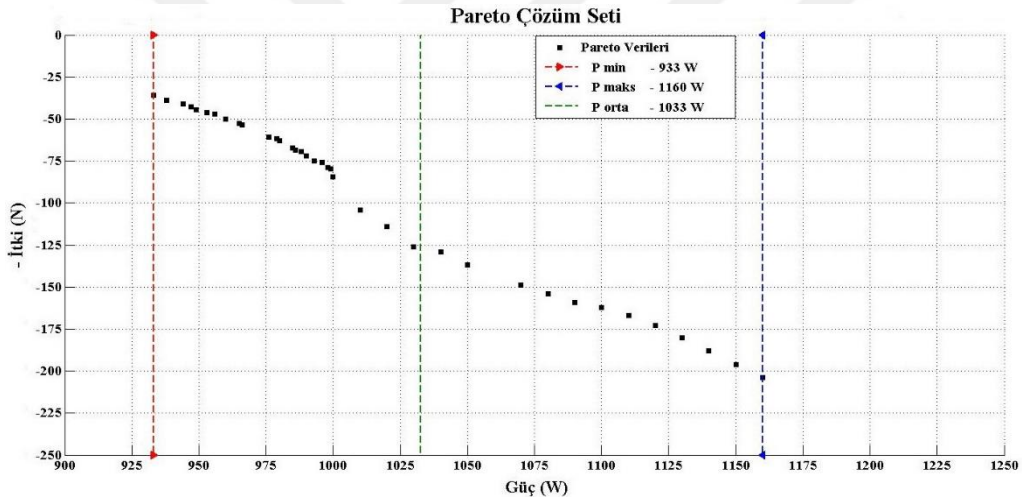
Analizlerde popülasyon sayısı 200, jenerasyon sayısı 50 olarak belirlenmiştir. Yer değiştirim doğrultusu ileri yönlü olarak belirlenmiş ve standart ayarlar üzerinden devam edilmiştir. Jenerasyon geçişi esnasındaki seçim karşılaştırılması için standart karşılaştırma grup örnekleme sayısı olan 2 kullanılmıştır.

Jenerasyonlar arasında her bir kontrol noktası bağlamında gerçekleşecek olan bireyler arasındaki karşılıklı alışveriş için 3 farklı yaklaşım fonksiyonu kullanılarak pareto sonuçları elde edilmiştir. Bu doğrultuda 'ortalama', 'höristik' ve 'dağınık'

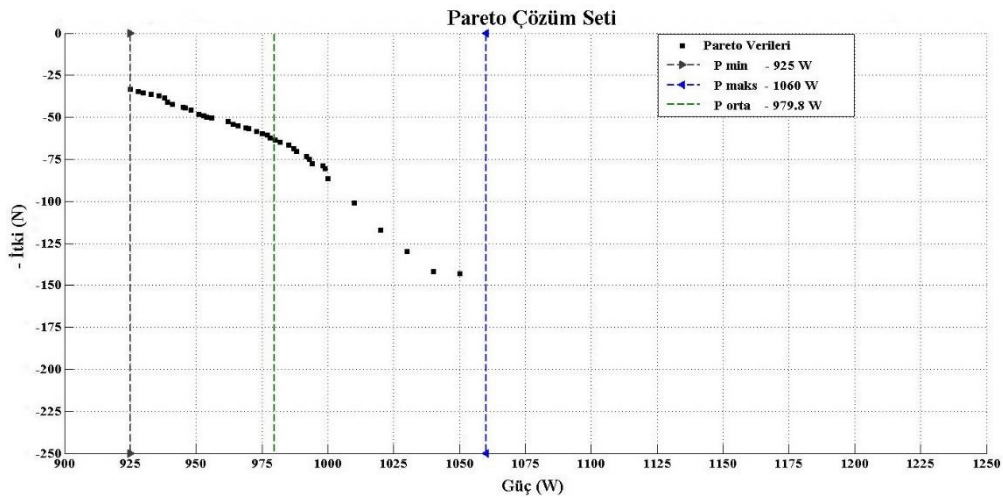
yaklaşım fonksiyonları kullanılmış olup Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'da görülen pareto çözüm seti verileri elde edilmiştir.



Şekil 5.6: Ortalama yaklaşım metodu, pareto çözüm seti.

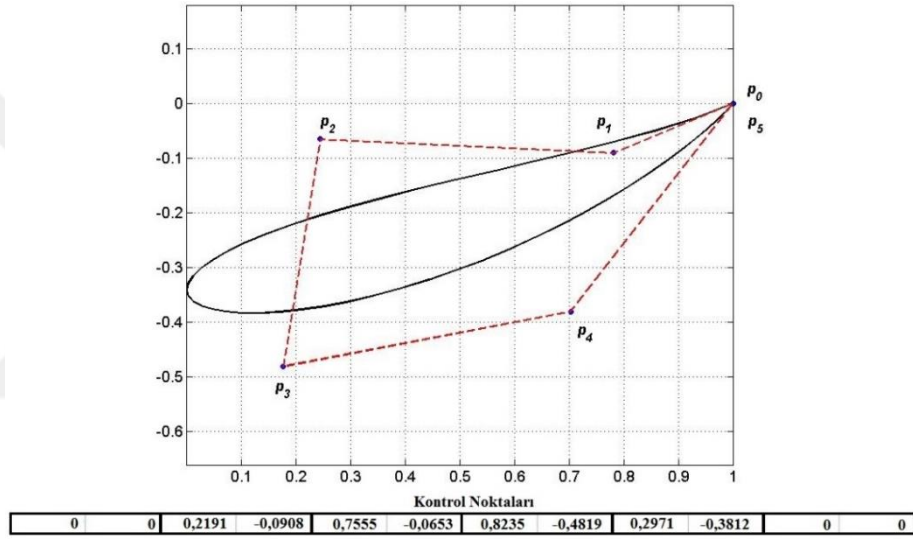


Şekil 5.7: Höristik yaklaşım metodu, pareto çözüm seti.

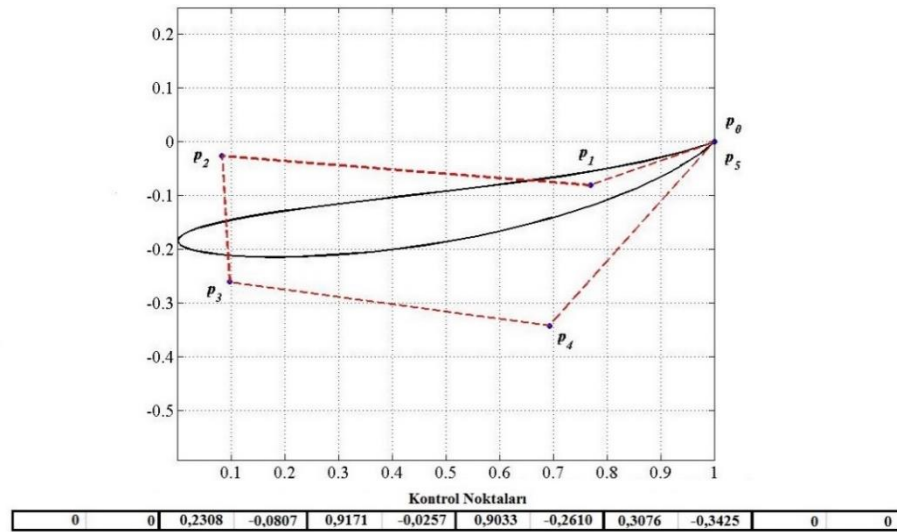


Şekil 5.8: Rasgele yaklaşım metodu, pareto çözüm seti.

Gerçekleştirilen çoklu hedef genetik algoritma optimizasyon analizleri sonucunda, uygulanan karşılıklı alışveriş yaklaşım metotları ile elde edilen pareto çözüm setlerinin değerlendirilmesi yapılarak, ortalama yaklaşım metodu kullanılarak ulaşılan pareto çözüm seti ile devam edilmiştir. Ortalama yaklaşım metodu ile elde edilen pareto çözüm setinin seçilerek ilerlenmesinde, elde edilen final popülasyonunun daha dengeli ve geniş aralıklı çözüm seti dağılımına sahip olması etken olmuştur. Çözüm setinin Şekil 5.5’de de görüldüğü üzere maksimum ve ortalama güç sonuçlarını veren kanal geometrileri arasında ilerleyen analizlerde kullanılacak profiller belirlenmiştir. Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da seçilmiş olan kanal profilleri görülmektedir.



Şekil 5.9: Ort. yaklaşım metodu ile ulaşılan pareto çözüm setinden maksimum güç profili.



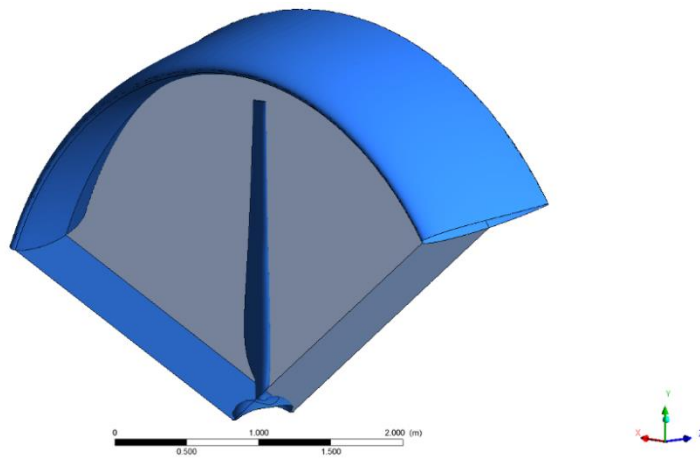
Şekil 5.10: Ort. yaklaşım metodu ile ulaşılan pareto çözüm setinden ortalama güç profili.

Şekil 5.9’de görülen maksimum gücün elde edildiği profil üzerinde HAD analizleri gerçekleştirilmesi yoluyla kanal ve türbin rotoru arasındaki bazı değişken tasarım parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Bu doğrultuda kanal ile kanat ucu arası boşluk, türbin rotorunun kanal içerisindeki pozisyonu, rotor çevresinde yarım kanal kullanılması ve bunlara ek olarak Şekil 5.10’da görülen ortalama gücün elde edildiği profil HAD analizleri gerçekleştirilebilmesi adına, profillerin modellenmesine geçilmiş ve gerekli düzenlemeler gerçekleştirilmiştir.

5.4. Kanal İçerisinde Rüzgar Türbini HAD Analizleri

5.4.1. Analiz modelinin ve ağ yapısının oluşturulması

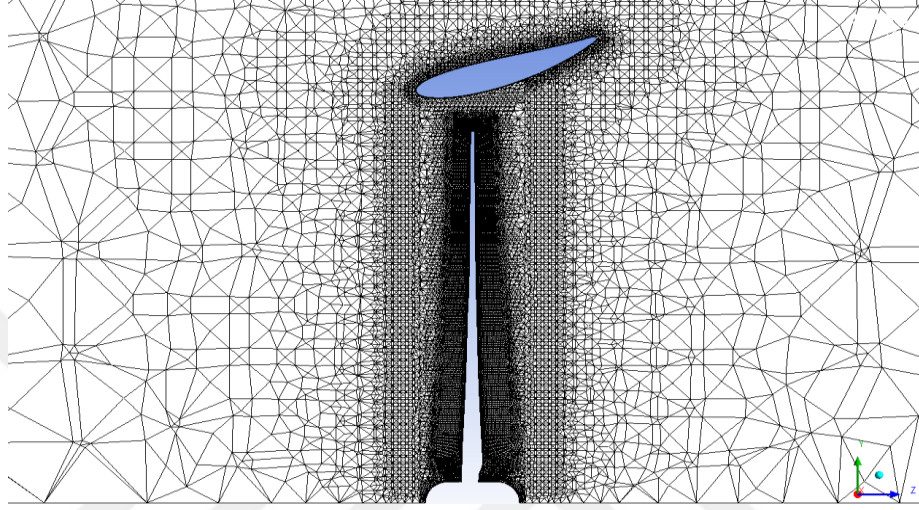
HAD analizlerinde kullanılmak üzere belirlenen kanal geometrileri 3 boyutlu modellenerek, daha önceden tasarımı gerçekleştirilen ve modellenen rotor geometrisi ile birlikte entegre edilmiş ve gözlemlenmek istenen kanal ile rotor arasındaki tasarım kaynaklı etkileşimlerin incelenmesi adına Fluent programında analiz geometrisi olarak oluşturulmuştur. Daha önceki standart açık tip rüzgar türbini HAD analizleri için oluşturulan akış hacimlerinin tanımı da aynı kalacak şekilde 120 derece periyodiklik tanımlanarak geometriler belirlenmiştir. Rotor ve gövde geometrilerinde olduğu gibi kanal geometrisi için de stres analizleri gerçekleştirilmeyeceğinden, kanal geometrisi de içi boş olacak şekilde sadece yüzey olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.11: Periyodik dönel akış hacmi, kanal ve rotor geometrileri, ANSYS.

Ağ yapısının oluşturulmasında standart açık tip analizlerinde olduğu gibi ANSYS ICEM CFD modülü kullanılmıştır ve kanat çevresinde ağ kalitesinin daha yüksek olmasını amacıyla, kanat çevresi akış hacminde yapılandırılmış bloklar halinde ağ

düzeni oluşturulmuştur. Altıgen(hexa) ağ yapısı kanadın geometrisine uygun olarak ‘O-örgü’ formunda oluşturulmuştur. Dönel ve sabit akışın olduğu hacimlerde standart tipte aynı yapıda ve sınır bölümlerde kaliteye dikkat edilerek yapılandırılmamış dörtgen ağ yapısı oluşturulmuştur. Bununla birlikte kanal çevresinde sınır tabaka etkisinin daha doğru olarak analizlere yansıtılabilmesi adına, kanal yüzeyi çevresinde sınır tabaka ağ yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 5.12: Akış doğrultusunda sabit, dönel ve kanat çevresi ağ yapısı, ANSYS.

Kanallı rüzgar türbini performansının incelenmesinde kanat uç hızı oranına göre güç katsayısı eğrisinin elde edilmesi adına, yürütülen HAD analizlerinde standart açık tip rüzgar türbininin HAD analizlerinde olduğu gibi en uygun çalışma noktası hedef alınmıştır. Bu bağlamda kanat ucu hızı oranının 6 olduğu durum için Denklem 3.49'dan elde edilen 156,26 rpm dönel hız değeri kullanılmıştır. Uygulamalarda kanat ucu hızı oranının değişken olmasını sağlamak adına rotor açılma hızı bu değerde sabit tutulmak kaydıyla değişken rüzgar hızları için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Sabit rotor analizi prensibine göre dönel akış hacmi için rotasyon hızı tanımlanırken, kanat, gövde ve kanal yüzeysel olarak hesaba katılarak tanımlanmıştır. Dönel hacmin kanal ile örtüştüğü yüzey için hız sıfır olarak girilmiştir. Türbülans modeli olarak k-omega SST kullanılmış ve denklemler ikinci dereceden seçilmiştir. Sonuçların daha az agresif fakat stabil olarak yakınsamasını sağlamak amacıyla yakınsama faktörlerinin indirgenmesi ayarlanarak iterasyon edilmiştir. İteratif sonuçların yakınsamasını kontrol edebilmek adına kontrol monitörleri belirlemiştir. Bu bağlamda kaldırma, sürüklenme ve momentum katsayıları için iteratif yakınsama monitörleri gözlenmiştir. Gerçekleştirilen tüm

HAD analizleri için incelendikleri parametrelere göre ayrıntıları Tablo 5.2’de gösterilmektedir. Tablo 5.2’de belirtilen kanal geometri pareto çözüm setinden seçilen profiller olup, ‘Profil A’ Şekil 5.9’de görülen kanal profili, ‘Profil B’ ise Şekil 5.10’da görülen kanal profilidir.

Çizelge 5.2: HAD analizi gerçekleştirilen kanallı rüzgar türbini geometrileri.

| K-YERT Geometrisi | Kanal Profili | Rotor Lokasyonu | Kanal –Rotor Arası Boşluk |
|--------------------------|----------------------|------------------------|----------------------------------|
| Geometri-1 | Profil A | 0,30* Kanal Boyu | 0,10*Rotor Yarıçapı |
| Geometri-2 | Profil B | 0,30* Kanal Boyu | 0,10*Rotor Yarıçapı |
| Geometri-3 | Profil A | 0,30* Kanal Boyu | 0,15*Rotor Yarıçapı |
| Geometri-4 | Profil A | 0,70* Kanal Boyu | 0,10*Rotor Yarıçapı |
| Geometri-5 | Profil A (Kısmi) | 0,30* Kanal Boyu | 0,10*Rotor Yarıçapı |
| Geometri-6 | Profil A (Açılı) | 0,30* Kanal Boyu | 0,10*Rotor Yarıçapı |

Tabloda rotor lokasyonunu belirten ifadeler, kanal boyuna oranı olarak kanal girişinden itibaren rotorun akış doğrultusundaki mesafesini belirtmektedir. Yine kanal ve rotor arasındaki boşluk ifadeleri de rotor yarıçapının oranı cinsinden belirtilmiştir.

5.4.2. Ağ yapısının kalitesinin incelenmesi

Analizlerden tutarlı ve doğruya en yakın sonuçların alındığından emin olunabilmesi adına, ağ yapısının kalitesinin incelenmesine yönelik ön inceleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda Geometri-1 için öncelikli olarak sabit, dönel ve kanat çevresi akış hacimlerinde toplam 4.235.834 ağ elemanından oluşan analiz yapısı oluşturulmuştur. Elde edilen bu ağ yapısı için analiz aralığı düşünülerek birbirine çok yakın olmayan operasyon noktaları seçilmiş ve kanat uç hızı oranının 4,6 ve 9 olduğu operasyon noktaları için HAD analiz sonuçları elde edilmiştir.

İkinci olarak, elde edilen sonuçlar incelenmiş ve gerekli görülen bölgeler için ağ yapısı iyileştirilmiştir. Bu doğrultuda kanal ve kanat çevresindeki ağ yapısında y^+ değerleri incelenerek bu değerlerin düşürülmesi amacıyla iyileştirmeler yapılırken, sonuçların ağ yapısından bağımsız olarak elde edildiğinden emin olmak adına ağ eleman sayısında da artış yapılmıştır. Buna göre yeni ağ yapısı 5.075.044 eleman içerir şekilde oluşturulmuştur ve aynı operasyon noktaları için HAD analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu bağlamda elde edilen sonuçların karşılaştırması ve bağıl hata yüzdeleri aşağıda belirtildiği üzere dir.

Çizelge 5.3: Ağ kalitesi inceleme tablosu.

| | Ağ Yapısı 1 | | | Ağ Yapısı 2 | | |
|-------------------------------|-------------|--------|-------|-------------|--------|-------|
| Ağ Eleman Sayısı | 4.235.834 | | | 5.075.044 | | |
| Kanat Uç Hızı Oranı | 4 | 6 | 9 | 4 | 6 | 9 |
| Türbin Gücü (W) | 2579,2 | 1175,4 | 247,9 | 2560,1 | 1141,5 | 245,9 |
| Bağlı Hata Yüzdesi (%) | - | - | - | 0,74 | 2,89 | 0,83 |

Ulaşılan sonuçlara göre rüzgar türbininden elde edilen güç verileri karşılaştırılması yoluyla bağlı hata payı hesaplamaları yapılmıştır. Bağlı hata yüzdeleri incelendiğinde maksimum güç katsayısına ulaşılması beklenen kanat uç oranının 6 olduğu operasyon şartında %2,89 bağlı hata elde edilmiştir. Buna karşın eğri üzerinde diğer operasyon noktalarındaki hata oranlarının yüzde birin altında kaldığı görülmüştür. Uygulanan ağ yapısı iyileştirmeleri ve ağ eleman sayısının artırılmasının, ulaşılan verilerdeki değişikliğe sebep olma durumunun sınırlı olması sebebiyle, ağ yapısından bağımsız sonuçların elde edilebildiğine kanaat getirilmiş ve ikinci durumda elde edilen ağ yapısı ile devam edilmiştir ve gerçekleştirilen tüm HAD analizlerinde aynı ağ yapısı parametreleri kullanılmıştır.

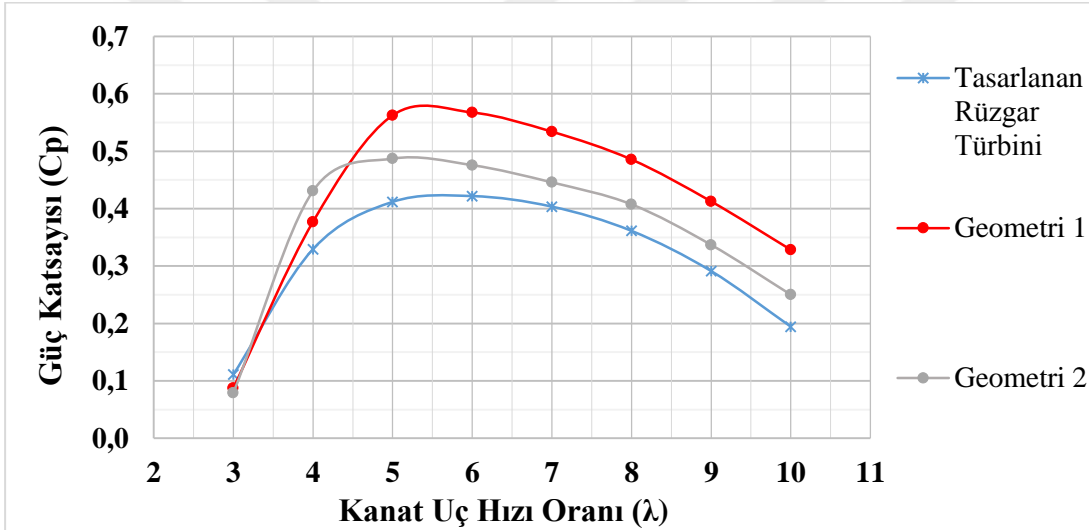
5.4.3. Farklı kanal profillerinin performansa etkileri

Kanal ile rotor arasındaki ilişkinin rüzgar türbini performansına etkilerinin incelenmesi adına gerçekleştirilen HAD analizlerine ilk olarak çoklu hedef genetik algoritma optimizasyonu analizleri sonucunda elde edilen pareto çözüm setinden belirlenen profiller ile başlanmıştır. Bu doğrultuda rüzgar türbininin kanal içerisine yerleştirilmesinin rüzgar türbini performansına etkilerinin yanı sıra, farklı kanal profillerinin gösterdiği etki ve sonuçlarda incelenmiştir. İki profil içinde doğrudan kanal geometrisinin etkisinin incelenmesi adına diğer tasarım parametreleri ve analiz parametreleri aynı tutulmuştur. Buna göre her iki analizde de rotor geometrileri kanal girişinden itibaren kanal profilinin yüzde 30'luk pozisyonuna yerleştirilmiş ve kanal ile rotor arasındaki boşluk rotor yarıçapının yüzde 10'u olarak belirlenmiştir. Elde edilen geometriler için daha önceden de belirtildiği gibi ağ yapıları oluşturularak HAD analizleri gerçekleştirilmiştir.

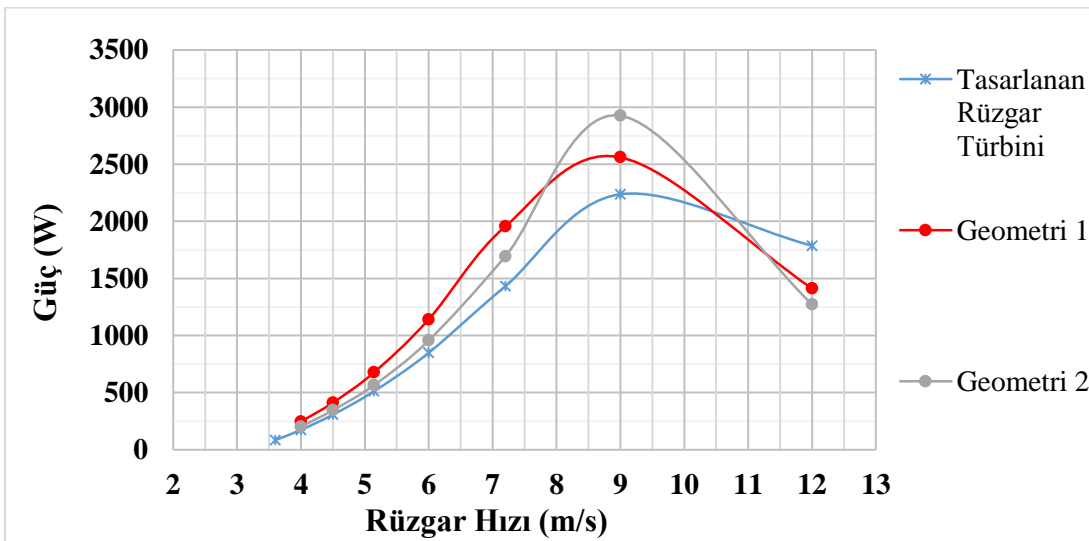
Grafik 5.1 ve Grafik 5.2'de belirlenen kanal profilleri kullanılarak elde edilen kanal içerisindeki rüzgar türbini HAD analizi sonuçlarının, standart açık tip rüzgar türbini sonuçları ile karşılaştırıldığı sırasıyla $C_p - \lambda$ ve $P - U_{Ref}$ eğrileri görülmektedir. Elde

edilen sonuçlar ışığında rüzgar türbini rotoru için difüzör etkisi yaratması adına kullanılan kanal geometrileri sayesinde, rüzgar türbininden elde edilen güç değerlerinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir.

Optimizasyon analizleri sonucu elde edilen pareto çözüm setine paralel olarak, belirlenen kanal geometrileri kullanılarak elde edilen HAD analizi sonuçlarında da aynı eğilimde verilere ulaşılmıştır. Destekleyici veri olarak optimum güç katsayısının elde edildiği kanat uç hızı oranının 6 olduğu durumda, Geometri-1 için gerçekleştirilen HAD analizlerde elde edilen güç değeri 1141,5 W olarak ulaşılmışken, Geometri-2 için gerçekleştirilen HAD analizlerde elde edilen güç değeri 956,9 W olarak bulunmuştur. Pareto çözüm setinde ise bu geometriler için ulaşılan güç verileri sırasıyla, 1210 W ve 975 W şeklinde elde edilmiştir.



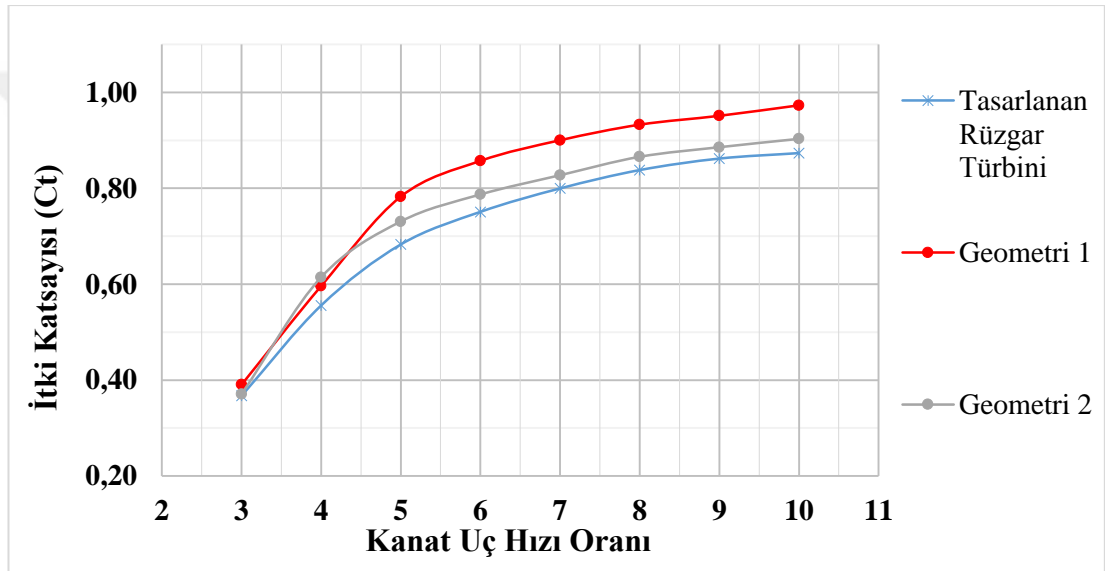
Şekil 5.13: Geometri-1 ve Geometri-2, güç katsayısı – kanat uç hızı oranı eğrileri.



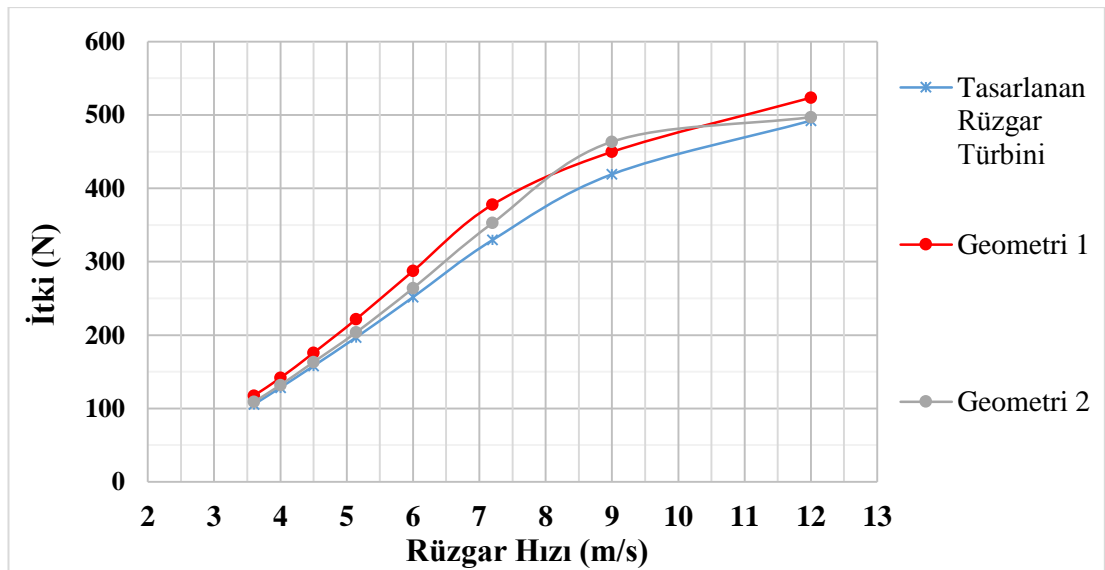
Şekil 5.14: Geometri-1 ve Geometri-2, güç üretimi – rüzgar hızı eğrileri.

Belirlenen kanal geometrileri için elde edilen güç verileri dışında bir diğer optimizasyon parametresi olan itki için de HAD analizleri değerlendirilmiştir. Bu bağlamda yine kanat uç hızı oranının 6 olduğu durumda, Geometri-1 için ulaşılan itki değeri 287,4 N olurken, Geometri-2 için ulaşılan itki değeri 263,91 N olarak elde edilmiştir. Kanal geometrisinin oluşturduğu difüzör etkisi ile rotor akış alanından geçen debinin artması ile itki değerlerinde de artış olduğu görülmüştür.

Grafik 5.3 ve Grafik 5.4’de belirlenen kanal profilleri kullanılarak elde edilen geometrilerin HAD analiz sonuçları ile standart açık tip rüzgar türbini sonuçlarının karşılaştırıldığı sırasıyla $C_T - \lambda$ ve $T - U_{Ref}$ eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.15: Geometri-1 ve Geometri-2, itki katsayısı – kanat uç hızı oranı eğrileri.

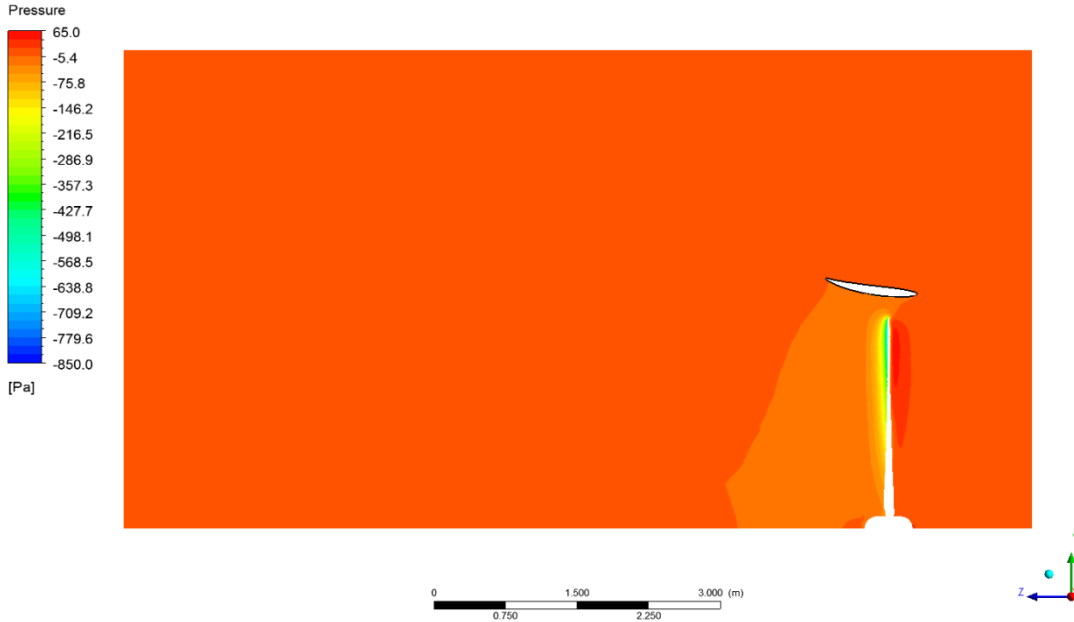


Şekil 5.16: Geometri-1 ve Geometri-2, itki– rüzgar hızı eğrileri.

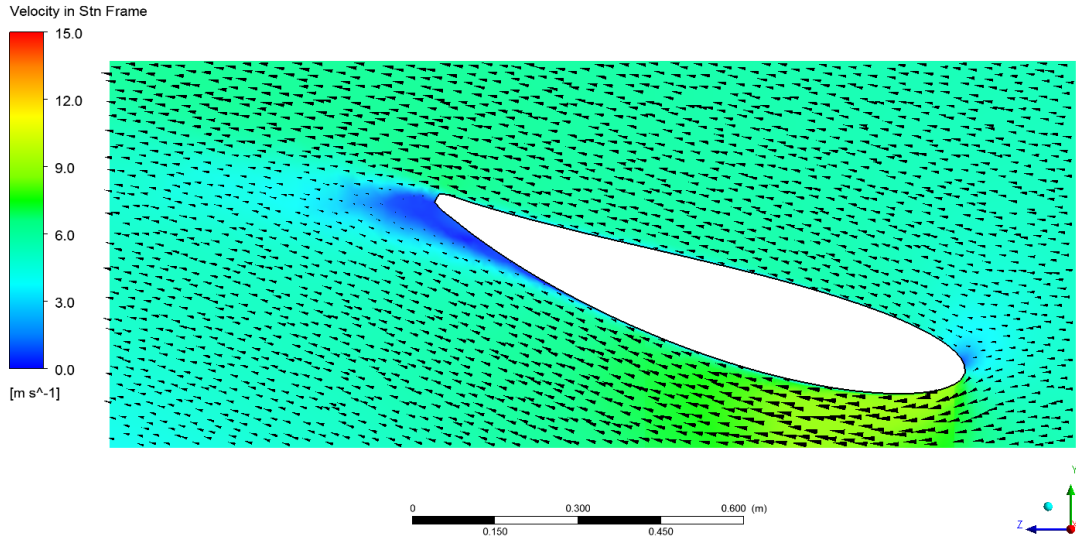


Şekil 5.17: Geometri-1, akış hacmi boyunca görülen basınç konturları ($\lambda=6$).

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te akış doğrultusunda alınmış kesitlerdeki basınç konturlarından görüldüğü üzere, Geometri-1 için rotor ardında görülen basınç düşüşü Geometri-2'de elde edilen sonuca göre daha fazladır. Rüzgar türbini tarafından rüzgardan çekilen enerji doğrudan basınç kaybı ile doğru orantılı olarak değiştiğinden bu durum elde edilen sonuçlarla da örtüşmektedir.

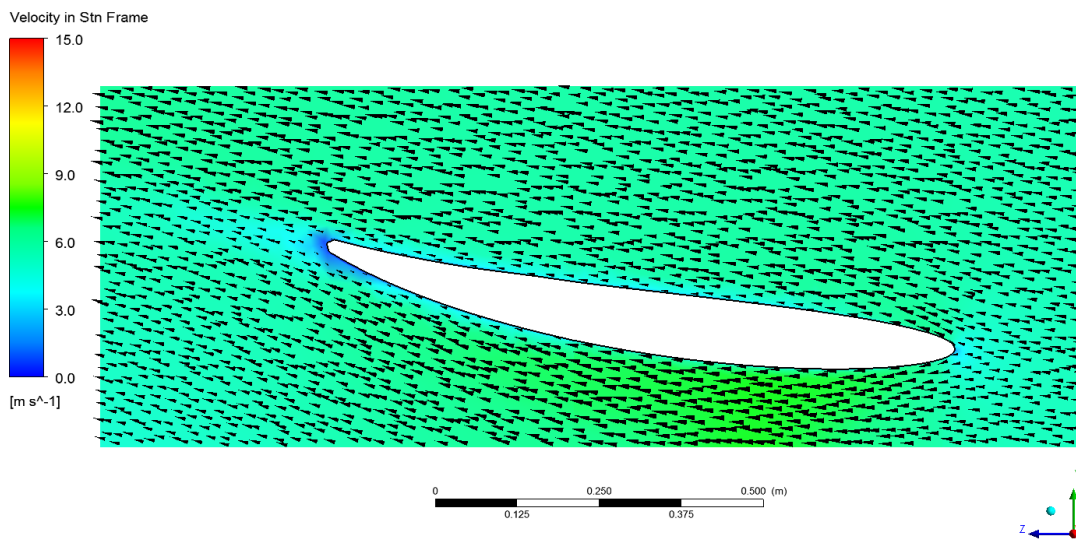


Şekil 5.18: Geometri-2, akış hacmi boyunca görülen basınç konturları ($\lambda=6$).

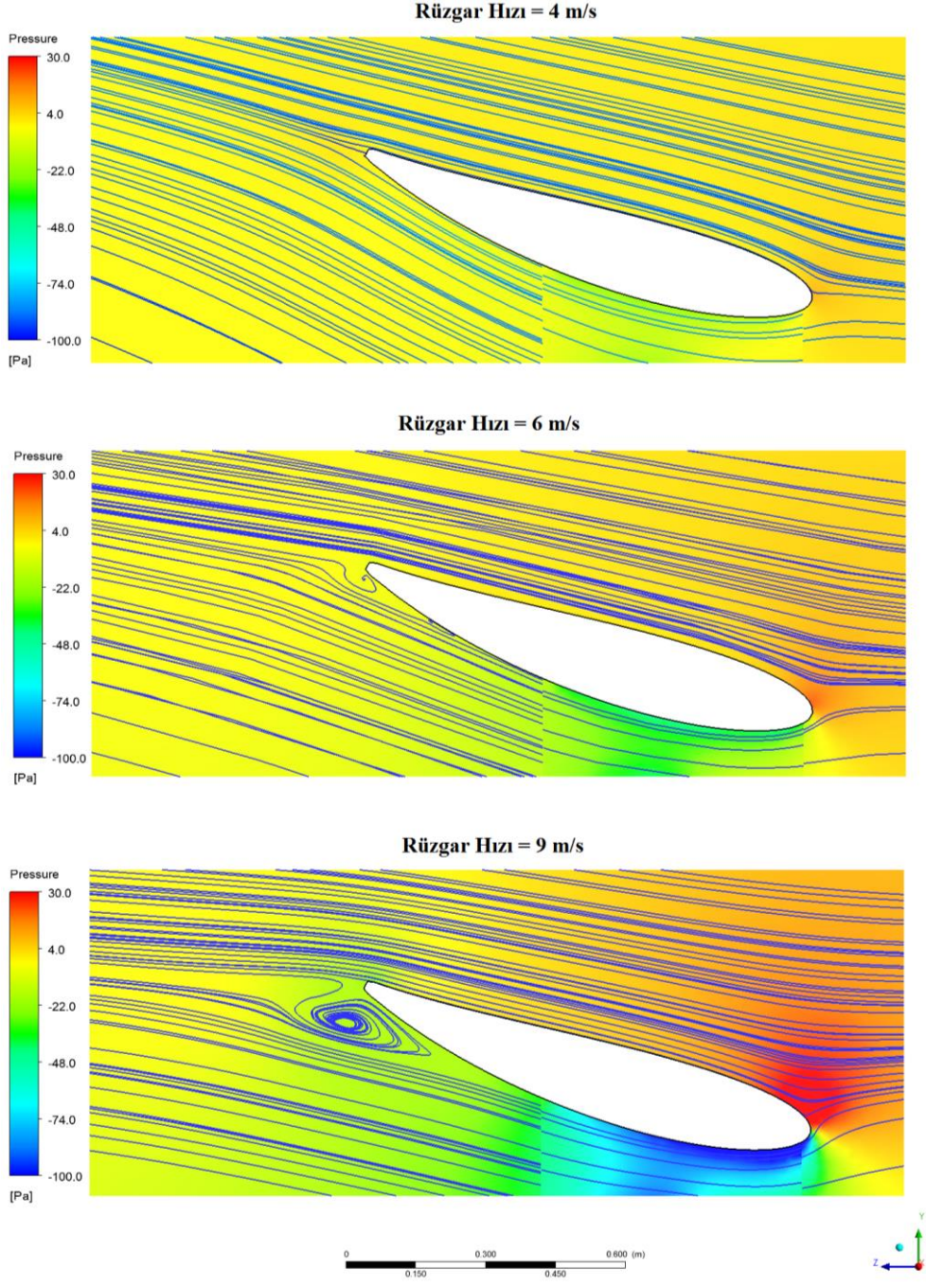


Şekil 5.19: Geometri-1, kanal çevresi basınç konturları ve hız vektörleri ($\lambda=6$).

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’te kanal çevresinde oluşan hız konturları ve hız vektörleri görülmektedir. Geometri-1 kanal profili için elde edilen sonuçlarda kanal çevresinde elde edilen hız vektörleri kanal çıkışına doğru kanal profilinin arka ucunda akış ayrılması oluştuğunu göstermektedir. Buna karşın Geometri-2 kanal profili için elde edilen sonuçlarda kanal çevresinde herhangi bir akış ayrılması belirtisi görülmemektedir. Bununla birlikte Şekil 5.14’te de görüldüğü üzere Geometri-1 için rüzgarın kanal girişindeki ayrılma(durma) noktası, Geometri-2’ye göre daha yukarıda oluşmaktadır. Uygulanan kanal geometrisinin profil yapısından da kaynaklı olarak Geometri-1 için difüzör etkisinin daha net görüldüğü söylenebilir.



Şekil 5.20: Geometri-2, kanal çevresi hız konturları ve hız vektörleri ($\lambda=6$).

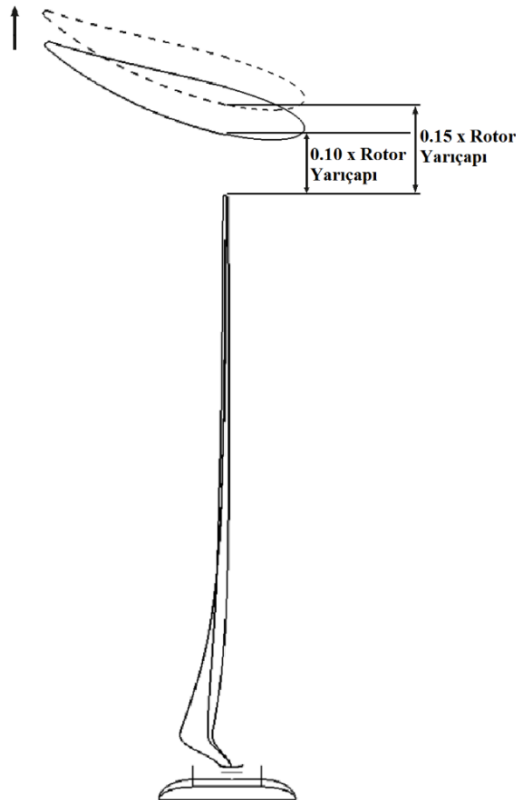


Şekil 5.21: Geometri-1, farklı rüzgar hızlarında kanal çevresi akım çizgileri.

Yukardaki görselde Geometri-1 kanal profili için farklı rüzgar hızlarında elde edilen akım çizgileri ve basınç konturları görülmektedir. Buna göre 4 m/s rüzgar hızında herhangi bir akış ayrılması ve kanal çıkışında vorteks oluşumu görülmez iken, artan rüzgar hızıyla birlikte akış ayrılması ve çıkışta vorteks oluşumu gözlemlenmektedir. Rüzgar hızının artışı ile kanal çıkışında gözlemlenen vorteks oluşum alanında da büyüme görülmektedir.

5.4.4. Kanal ve rotor arası boşluğun performansa etkileri

Geometri-1 ve Geometri-2 kanal geometrileri için gerçekleştirilen HAD analizlerinin sonuçları üzerine, Geometri-1 kullanılarak diğer incelenmek istenen tasarım parametrelerine yönelik çalışmalara geçilmiştir. Bu amaçla kanal ile rotor arasındaki boşluk oranının rüzgar türbini performansına etkilerinin incelenmesi doğrultusunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Rotor ile kanal arasındaki boşluk oranı önceki analizlerde rotor yarıçapının yüzde 10'u olacak şekilde düzenlenmişti, karşılaştırılmanın gerçekleştirilmesi adına Şekil 5.18'de de görüldüğü üzere Geometri-3 için bu oran rotor yarıçapının yüzde 15'i olacak şekilde ayarlanmıştır ve yeni model için ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısının oluşturulmasında tutarlılık sağlanması adına daha önceden uygulanan ağ kalitesi ayarlar tercih edilerek ilerlenmiştir. Böylece Tablo 5.2'de görülen Geometri-3 için belirlenmiş parametrelere uygun olarak HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Geometri-1 ve standart açık tip rüzgar türbini HAD analizi sonuçları ile karşılaştırılarak incelenmiştir.

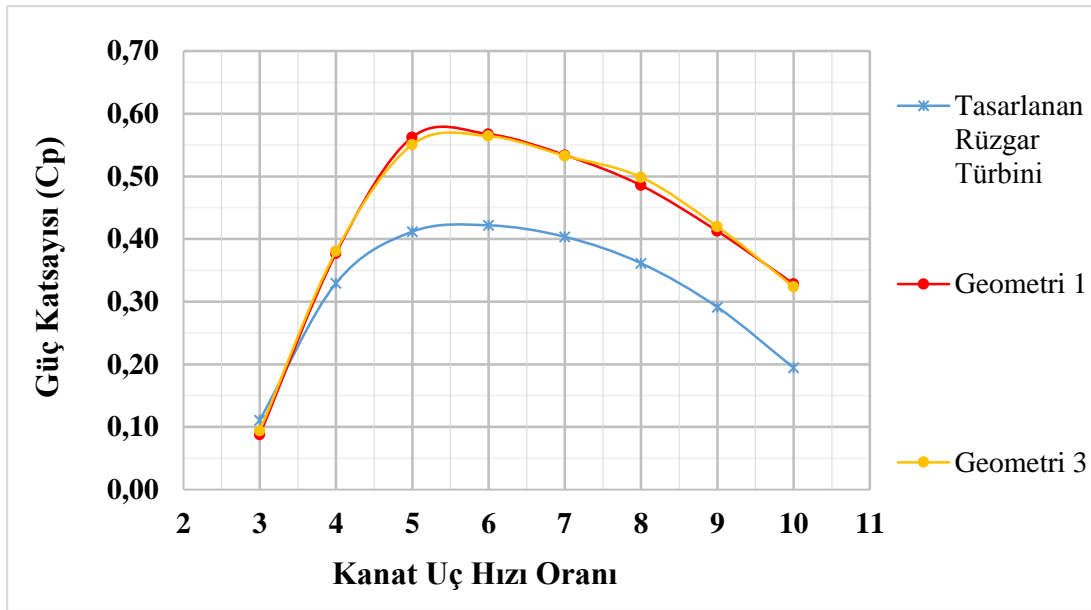


Şekil 5.22: Geometri-3, kanal pozisyonunun elde edilmesi.

Tablo 5.3'de karşılaştırmalı olarak Geometri-3 ve Geometri-1 için HAD analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar belirtilmiştir.

Çizelge 5.4: Geometri-1 ve Geometri-2 için ulaşılan HAD analiz sonuçları.

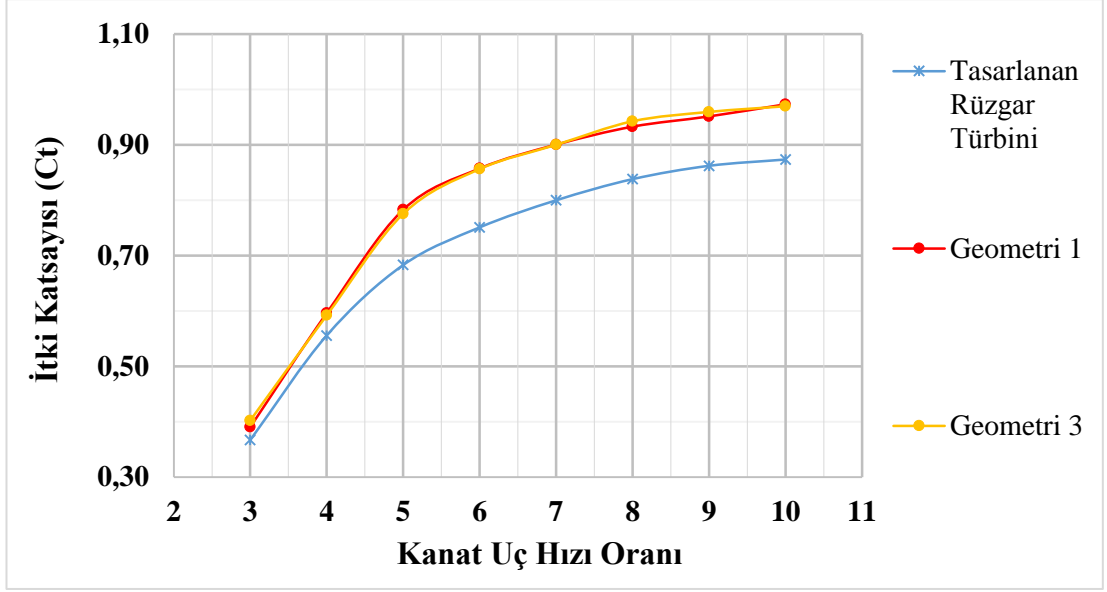
| | λ | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------|-----------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| | U_{ref} [m/s] | 12,0 | 9,0 | 7,2 | 6,0 | 5,1 | 4,5 | 4,0 | 3,6 |
| Geometri 1 | P [W] | 1411 | 2560 | 1955 | 1141 | 676 | 412 | 246 | 138 |
| | T [N] | 523 | 450 | 378 | 287 | 222 | 176 | 142 | 116 |
| Geometri 3 | P [W] | 1512 | 2583 | 1914 | 1135 | 675 | 423 | 250 | 141 |
| | T [N] | 540 | 447 | 374 | 287 | 222 | 178 | 143 | 117 |



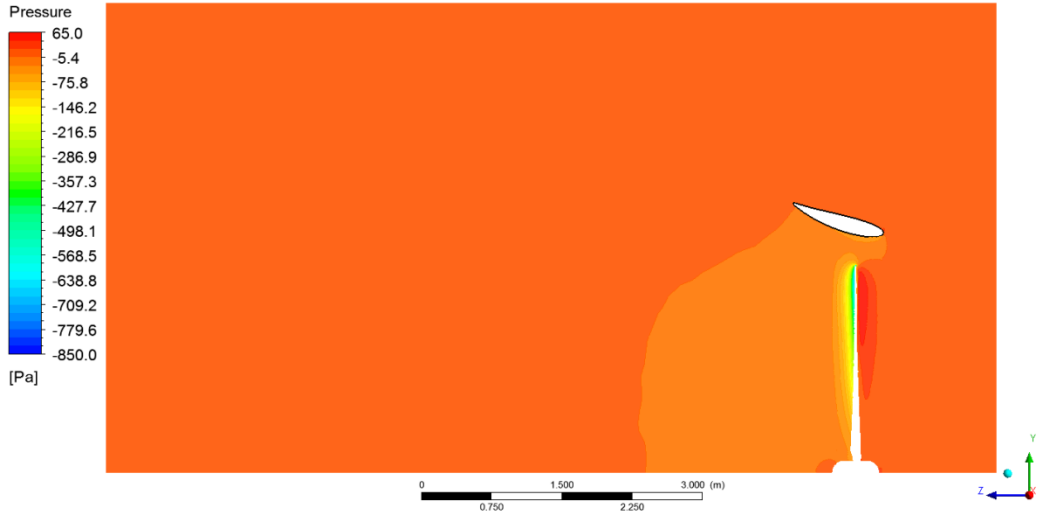
Şekil 5.23: Geometri-3, güç katsayısı – kanat uç hızı oranı karşılaştırma eğrileri.

Grafik 5.5'te HAD analizleri sonucunda elde edilen güç katsayısı ve türbin gücü verileri görülmektedir. Kanal ile kanatlar arasındaki boşluk oranının artırılmasının, rüzgar türbininden elde edilebilecek olan güç değerlerinde oldukça az etki gösterdiği sonuçlardan da görülmektedir. Bununla birlikte rotor yarıçapının %10'u kadar boşluk bırakılması durumunda kanalın girişi 2437 mm, kanalın çıkışı ise 2750,57 mm yarıçapa sahip olmaktadır. Giriş ile çıkış akış alanları arasındaki oran bu durumda 0,785 olarak ortaya çıkmaktadır. Rotor yarıçapının %15'i kadarlık boşluk bırakıldığı durumda ise kanalın girişi 2550,12 mm, kanalın çıkışı ise 2863,84 mm yarıçapa sahip olmaktadır ve giriş ile çıkış akış alanları arasındaki oran 0,793 olmaktadır.

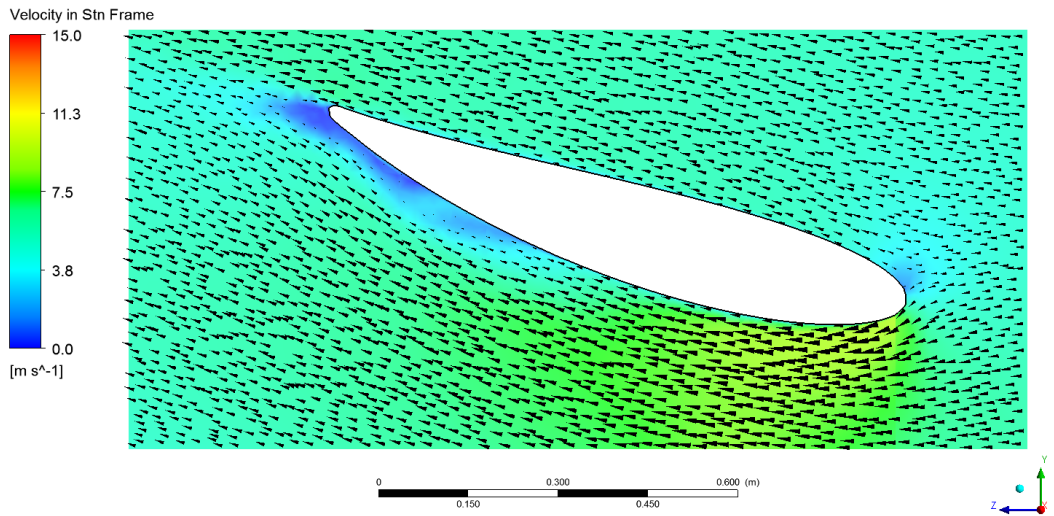
Grafik 5.6'da ise bu iki geometri için elde edilen itki katsayısı eğrileri görülmektedir. Türbinden elde edilen güç verilerinin gösterdiği eğilime benzer olarak itki için elde edilen sonuçlarda da birbirine yakın sonuçlara ulaşılmıştır.



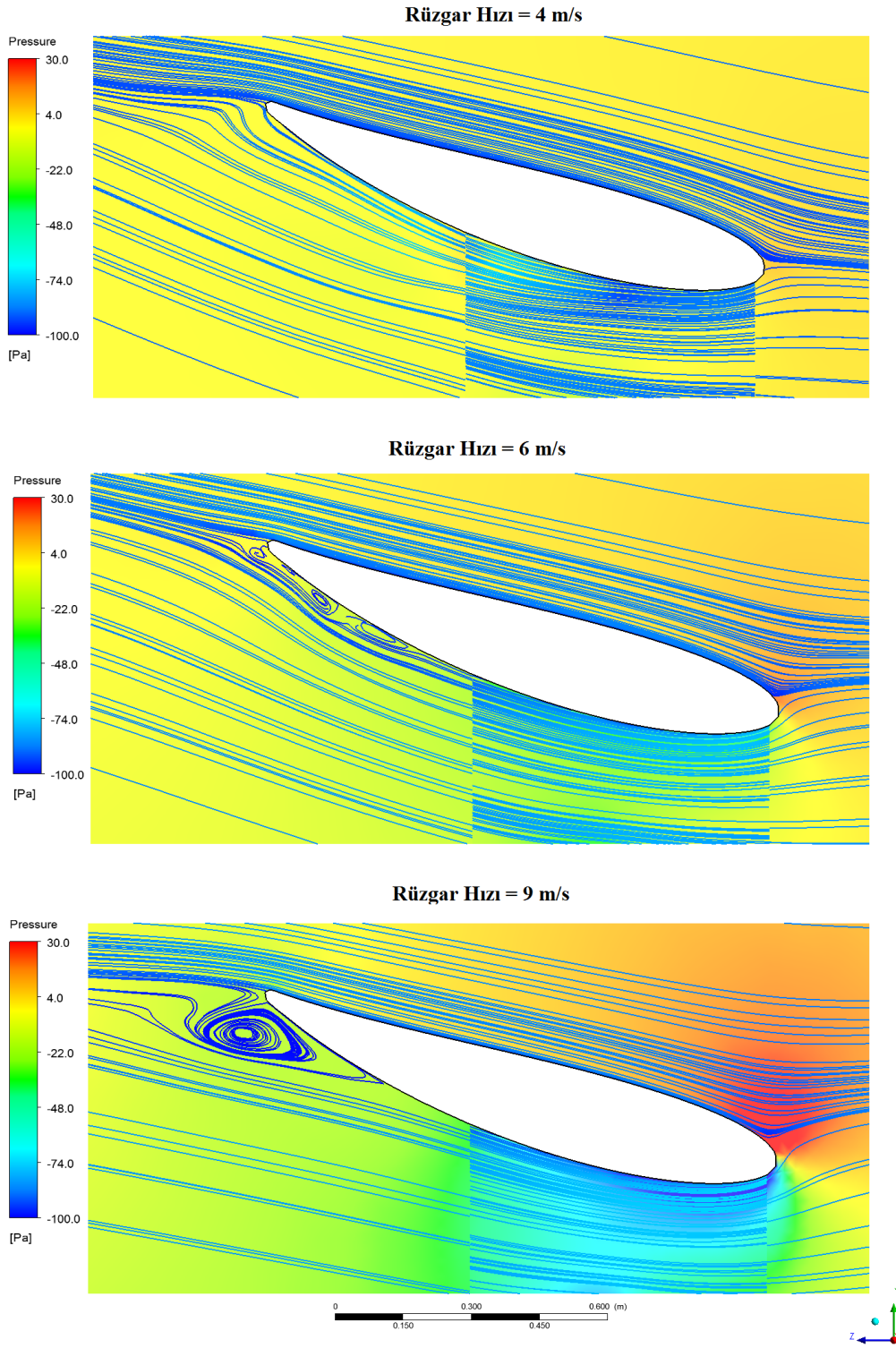
Şekil 5.24: Geometri-4, itki katsayısı – kanat uç hızı oranı karşılaştırma eğrileri.



Şekil 5.25: Geometri-3, akış hacmi boyunca görülen basınç konturları ($\lambda=6$).



Şekil 5.26: Geometri-3, kanal çevresi hız konturları ve hız vektörleri ($\lambda=6$).



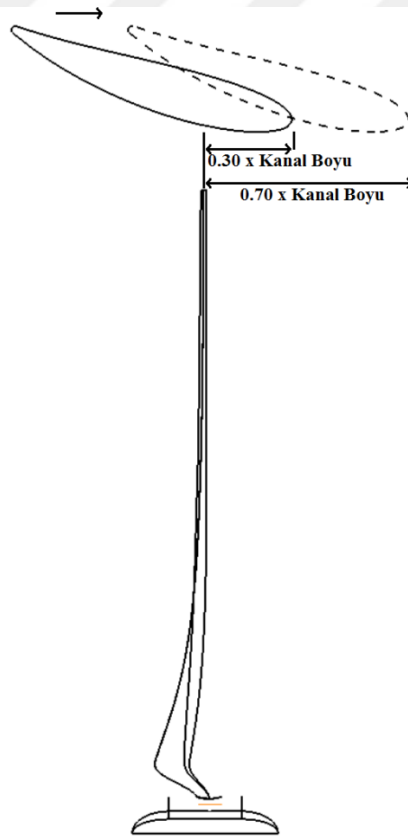
Şekil 5.27: Geometri-3, farklı rüzgar hızlarında kanal çevresi akım çizgileri.

Geometri-3 için 4 m/s, 6 m/s ve 9 m/s rüzgar hızlarında elde edilen analiz sonuçlarına göre kanal çevresinde oluşan basınç konturları ve akım çizgileri Şekil 5.21’de gösterilmiştir. Geometri-3 için elde edilen sonuçlar Geometri-1 için elde edilen sonuçlara kıyasla aynı rüzgar hızları ele alındığında kanal çıkışında daha geniş vorteks oluşumları ve kanal yüzeyinden daha erken akış ayrılması olduğu

gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kanal ile kanatlar arası mesafenin artışı ile kanalın rotora yakın bölgesinde gözlemlenen basınç düşüşünde azalma olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5.4.5. Rotor pozisyonunun performansa etkileri

Rüzgar türbini rotorunun kanal içerisindeki pozisyonunun incelenmesi amacıyla rotor geometrisi, kanal girişinden itibaren kanal profilinin yüzde 70'lik pozisyonuna yerleştirilmiştir ve Tablo 5.2'de belirtilmiş olan Geometri-4 elde edilmiştir. Bununla birlikte kanal geometrisi ve kanal pozisyonuna ilişkin herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Kanal girişi ve çıkışındaki kesitlerde akış alanlarının değişmemesi adına kanal geometrisinin radyal pozisyonu değiştirilmemiş ve Geometri-1'de olduğu pozisyonunda bırakılmıştır. Geometri-4 ün elde edilmesinde gerçekleştirilen işlem Şekil 5.22'de gösterilmiştir.

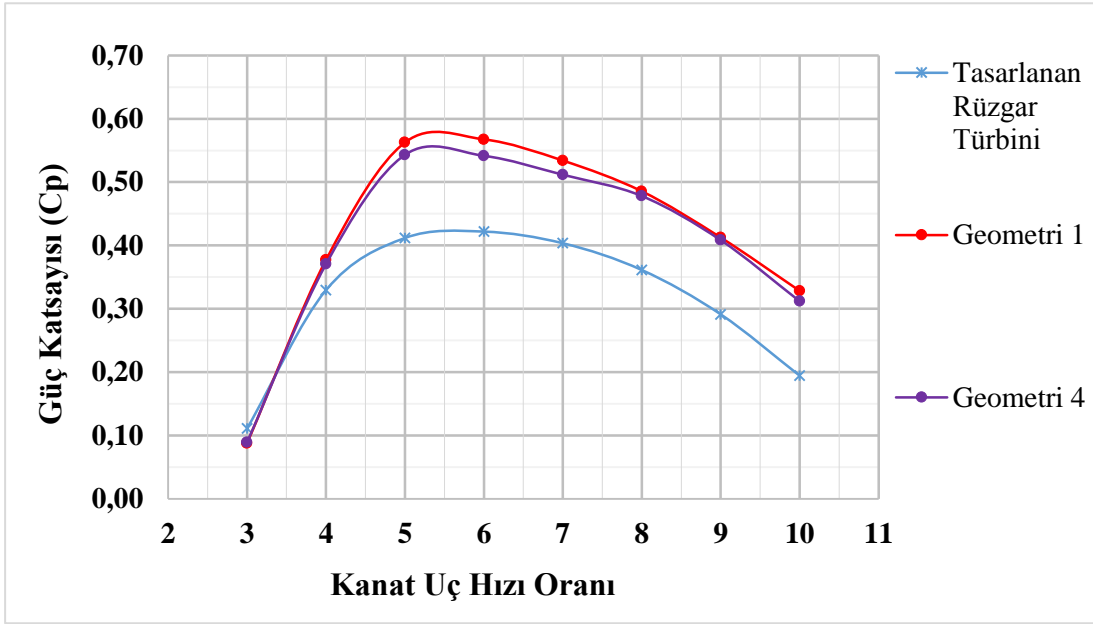


Şekil 5.28: Geometri-4, kanal geometrisinin elde edilmesi.

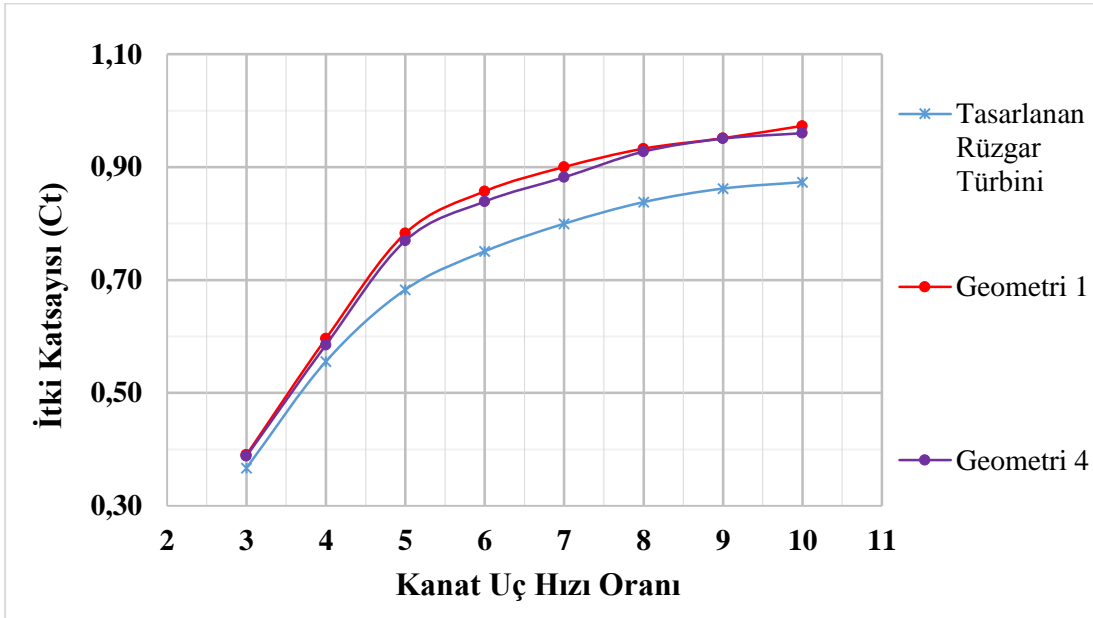
Elde edilen geometri için daha önceki analizlerde uygulanan ağ kalitesine eşdeğer ayarlar ile ANSYS ICEM CFD kullanılarak ağ yapısı modellenmiştir. Modellenme ve ağ yapısı oluşturulan yeni analiz geometrisi için gerçekleştirilen HAD analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'te görülmektedir.

Çizelge 5.5: Geometri-4 için gerçekleştirilen HAD analiz sonuçları.

| | λ | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------|-----------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| | U_{ref} [m/s] | 12,0 | 9,0 | 7,2 | 6,0 | 5,1 | 4,5 | 4,0 | 3,6 |
| Geometri 4 | P [W] | 1436 | 2515 | 1888 | 1089 | 648 | 406 | 243 | 136 |
| | T [N] | 520 | 441 | 372 | 281 | 217 | 175 | 142 | 116 |



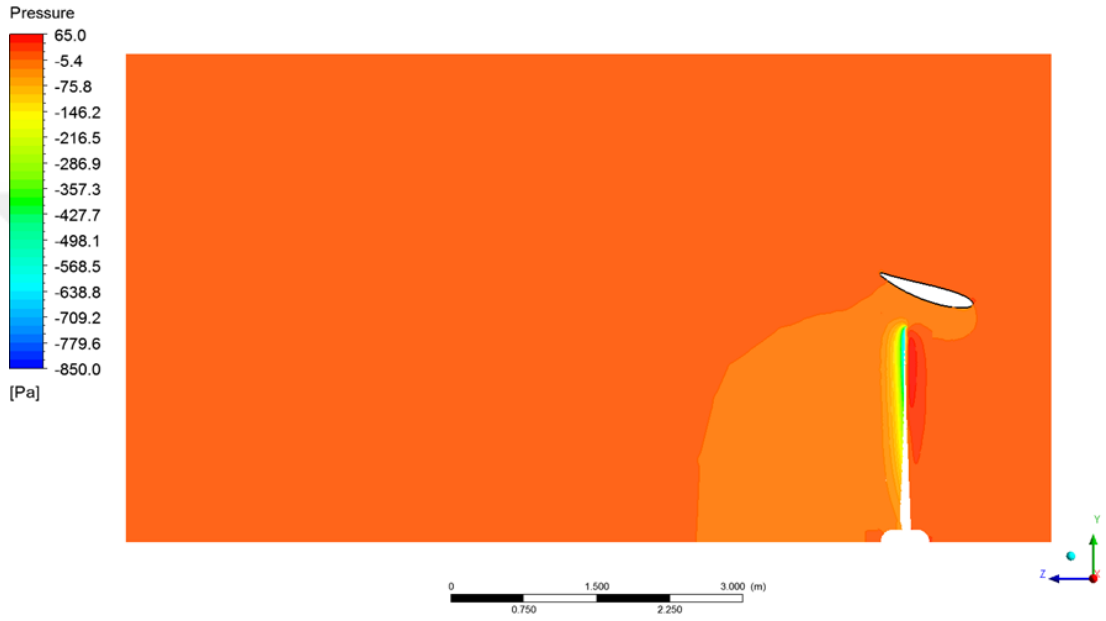
Şekil 5.29: Geometri-4, güç katsayısı – kanat uç hızı oranı karşılaştırma eğrileri.



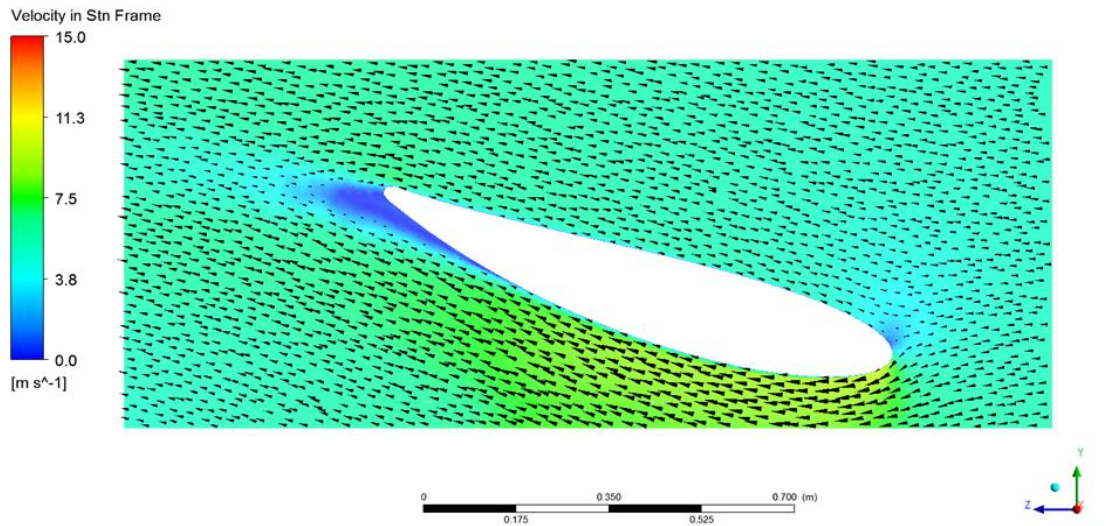
Şekil 5.30: Geometri-4, itki katsayısı – kanat uç hızı oranı karşılaştırma eğrileri.

Rotorun kanal çıkışına daha yakın pozisyona yerleştirilmesi ile rüzgar türbininden elde edilen güç verilerinde az oranda da olsa azalma olduğu görülmektedir. Grafik

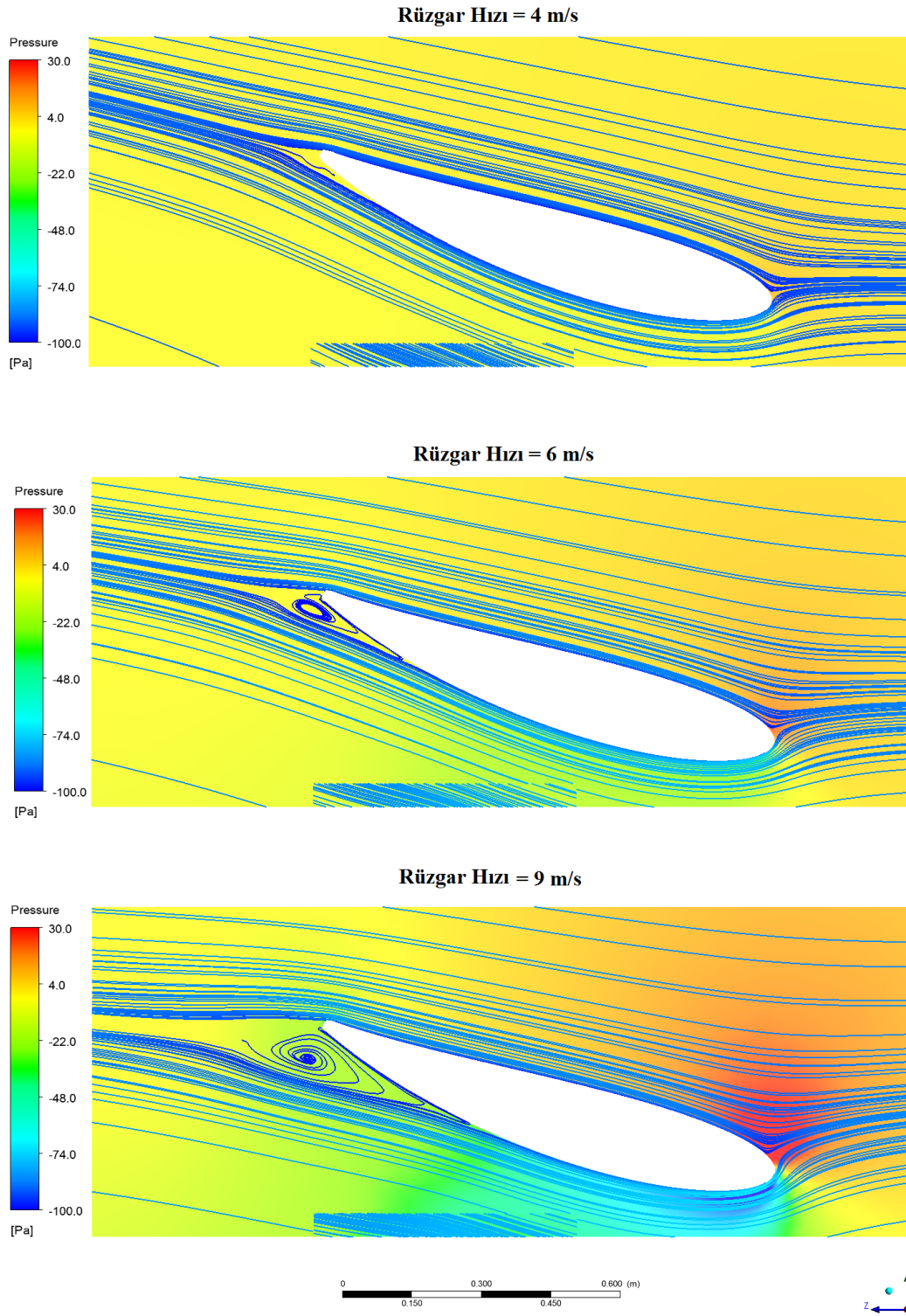
5.7'den de anlaşılacağı üzere, rüzgar türbininden elde edilecek güç değerlerindeki bu azalmanın özellikle kanat uç hızı oranının 8'den az olduğu operasyon şartlarında olduğu söylenebilir. İtki verilerinde de Grafik 5.8'de görüldüğü üzere azalma olmuştur. Kanat uç hızı oranının 8'den fazla olduğu operasyon koşullarında yani rüzgar hızının 4,5 m/s'den az olduğu durumlar için elde edilen sonuçlarda ise güç ve itki sonuçlarındaki bu azalma etkisinin daha düşük oranda gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 5.31: Geometri-4, akış hacmi boyunca görülen basınç konturları ($\lambda=6$).



Şekil 5.32: Geometri-4, kanal çevresi hız konturları ve hız vektörleri ($\lambda=6$).

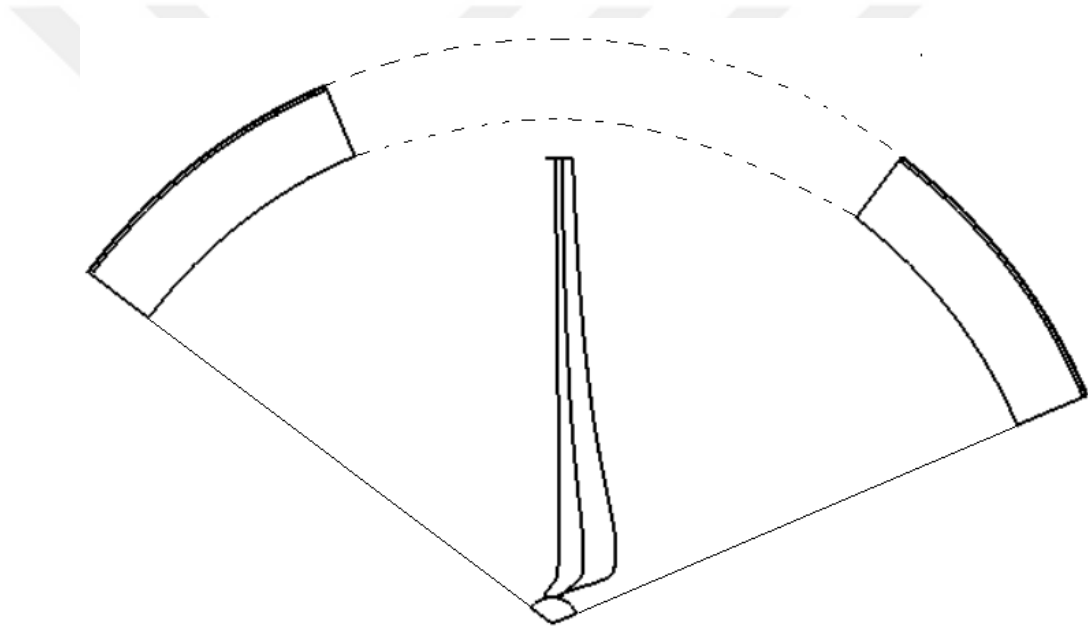


Şekil 5.33: Geometri-4, farklı rüzgar hızlarında kanal çevresi akım çizgileri.

Geometri-4 için 4 m/s, 6 m/s ve 9 m/s rüzgar hızlarında elde edilen analiz sonuçlarına göre Geometri-1 ile karşılaştırıldığında, aynı kanal profili için kanal çıkışındaki vorteks oluşumunun arttığı ve akış ayrılmasının da daha erken olduğu görülmektedir.

5.4.6. Kısmi kanal uygulanmasının performansa etkileri

Rüzgar türbinini çevreleyecek kanal geometrisi ve kanal ile rotor arasındaki yerleşim parametrelerinin etkilerine ek olarak, kanal geometrisinin rüzgar türbini çevresindeki devamlılığının da etkilerinin incelenmesi adına analizler gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda rotor geometrisinin çevresini yarı oranda çevreleyen kısmi kanal geometrisi için, pareto çözüm setinde maksimum güç değerine yakın bölümden seçilmiş olan Profil-A kullanılarak analizi gerçekleştirilecek olan geometrinin 3 boyutlu modellenmesi gerçekleştirilmiştir. HAD analizleri 120°'lik periyodik tanımlanarak gerçekleştirildiğinden, bu periyodik hacim içerisinde kanal geometrisi uygun açılar ayarlanmak yoluyla kısmi olarak yerleştirilmiştir.

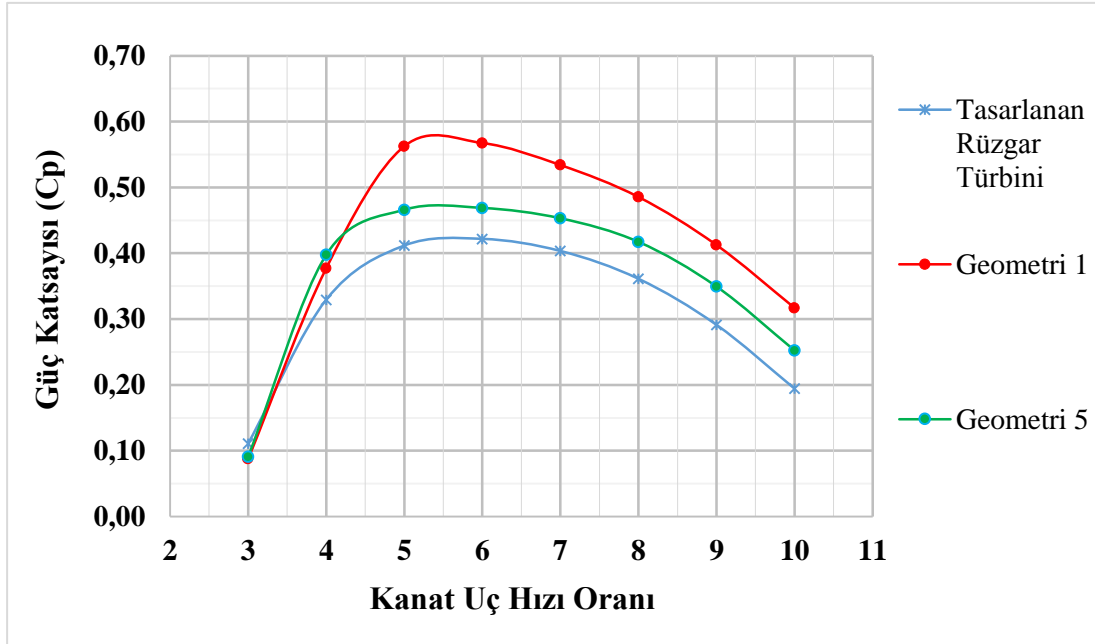


Şekil 5.34: Geometri-5, kısmi kanallı rüzgar türbini modelinin görüntüsü.

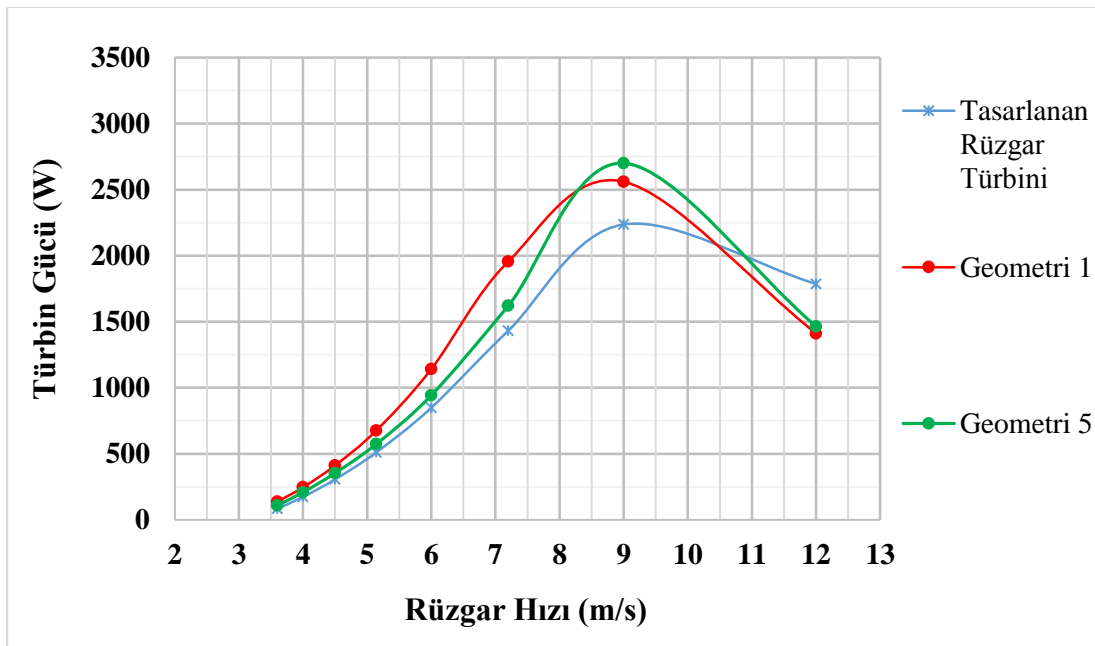
Şekil 5.26'de görüldüğü üzere analizi gerçekleştirilen periyodik çözüm geometrisinden, kesikli çizgiler ile gösterilmekte olan kanal bölümünün çıkartılması yoluyla analizlerde kullanılacak yeni model geometrisi elde edilmiştir. Elde edilen kısmi kanallı rüzgar türbini modeli için daha önceki analizlerde olduğu gibi ANSYS ICEM CFD modülü kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur. Analizlerde ise daha öncekilerde olduğu gibi dönel akış hacmi için açısal hız sabit alınmış ve serbest akış rüzgar hızının farklı değerlerinde HAD sonuçları elde edilmiştir. Buna göre gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen verilere göre sonuçlar Tablo 5.6'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.6: Geometri-5 için gerçekleştirilen HAD analiz sonuçları.

| | λ | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------|-----------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | U_{ref} [m/s] | 12,0 | 9,0 | 7,2 | 6,0 | 5,1 | 4,5 | 4,0 | 3,6 |
| Geometri 5 | P [W] | 1464 | 2700 | 1620 | 943 | 574 | 354 | 208 | 110 |
| | T [N] | 467 | 445 | 345 | 262 | 205 | 164 | 133 | 109 |

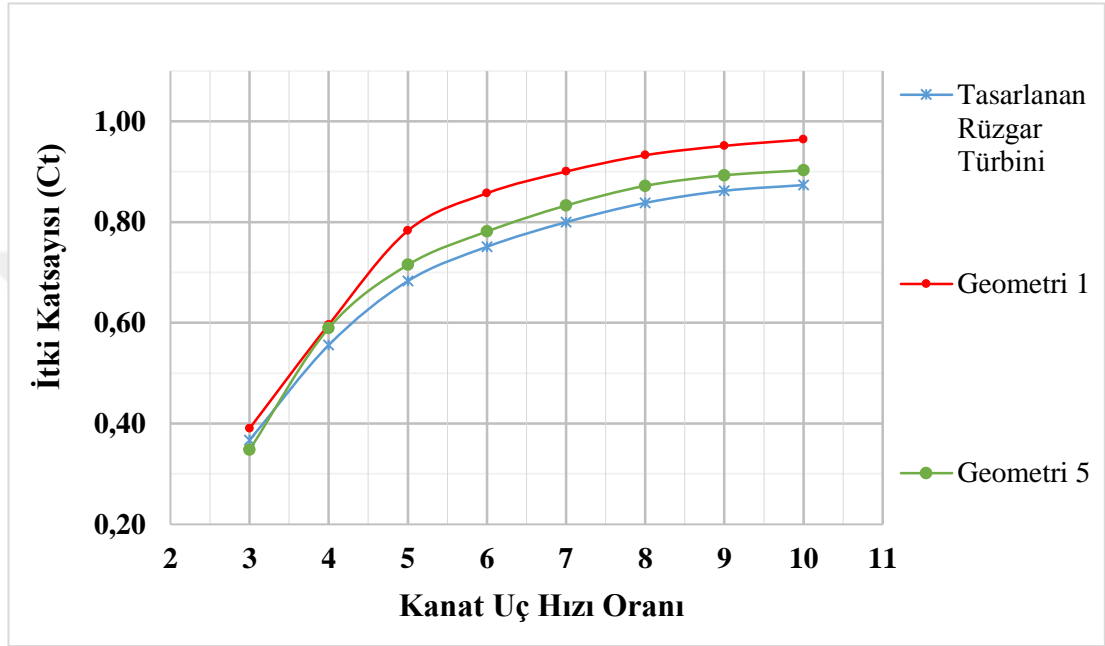


Şekil 5.35: Geometri-5, güç katsayısı – kanat uç hızı oranı karşılaştırma eğrileri.

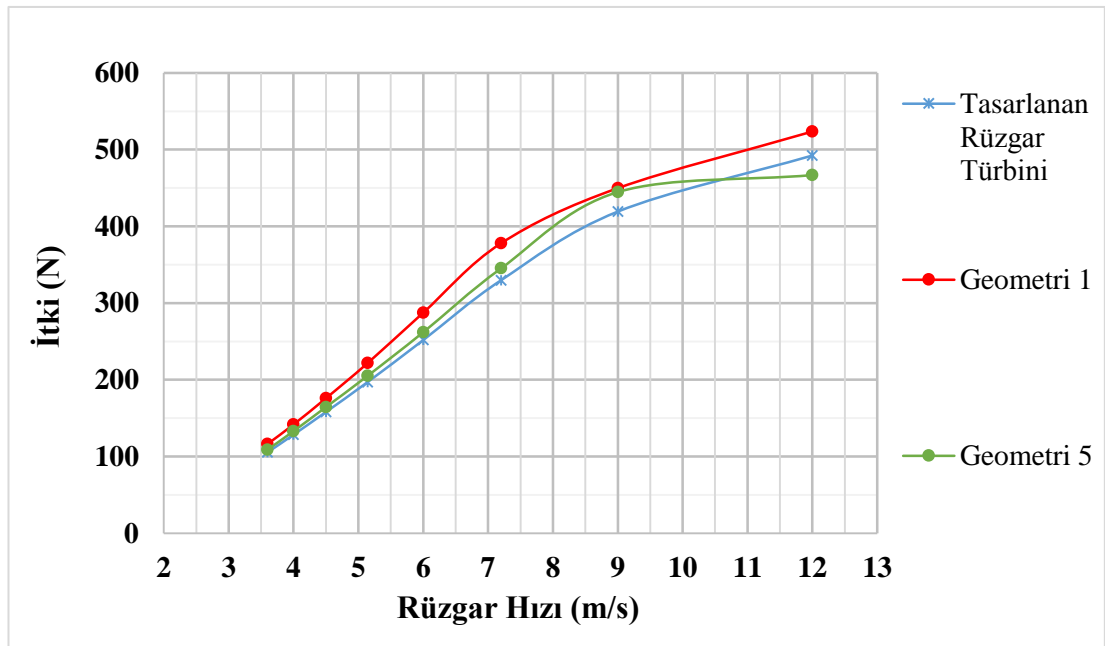


Şekil 5.36: Geometri-5, rüzgar türbini güç üretimi – rüzgar hızı karşılaştırma eğrileri.

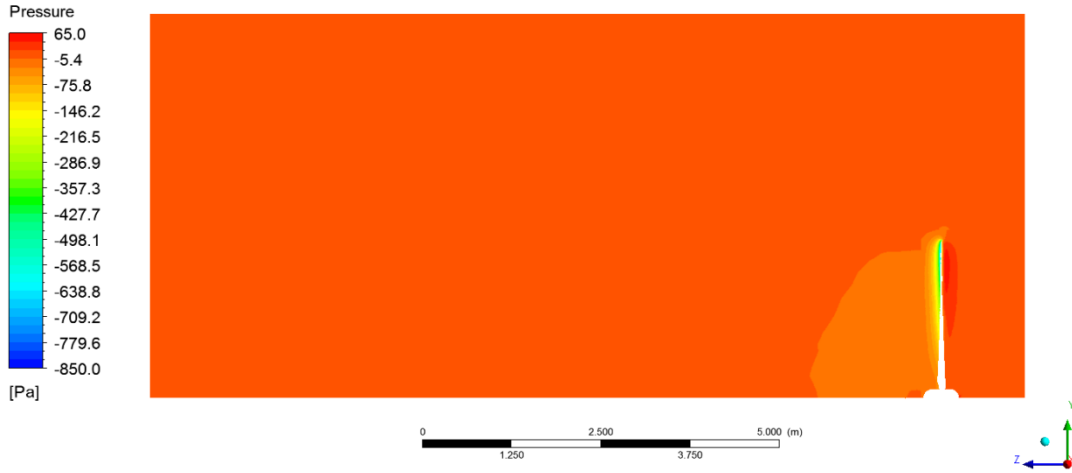
Kanal geometrisinin kısmi olarak kullanılması durumunda HAD analizleri sonucu elde edilen verilere göre rüzgar türbininden elde edilebilecek olan güç verisinde ciddi denebilecek oranda azalma olduğu verilere yansımıştır. Buna karşın kısmi kanal kullanılması halinde dahi standart açık tip rüzgar türbininden daha fazla güç elde edilebileceği görülmüştür. Bununla birlikte kısmi olarak kanal kullanılmasıyla güç verilerinin düşmesiyle ilişkili olarak itki değerlerinde de düşüş görülmüştür.



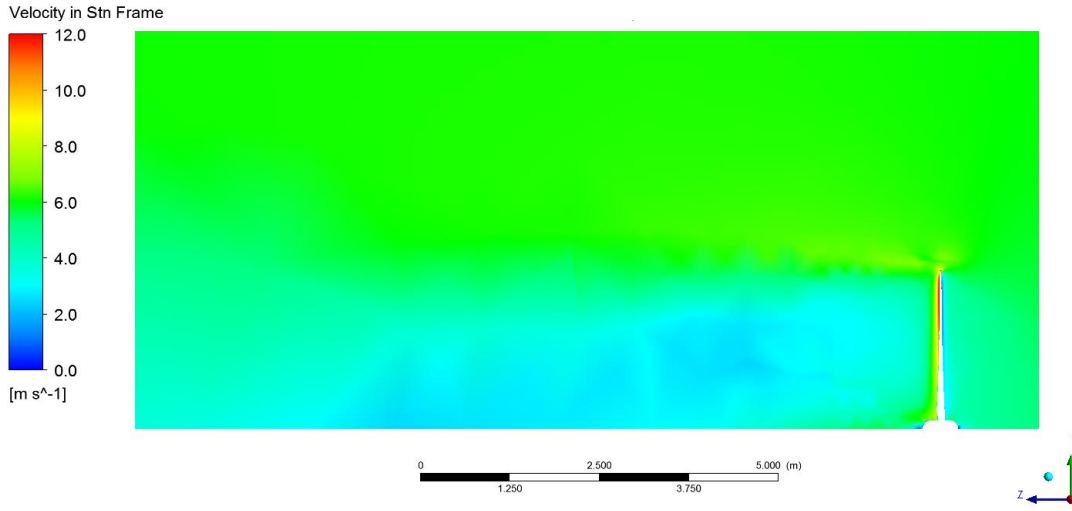
Şekil 5.37: Geometri-5, itki katsayısı – kanat uç hızı oranı karşılaştırma eğrileri.



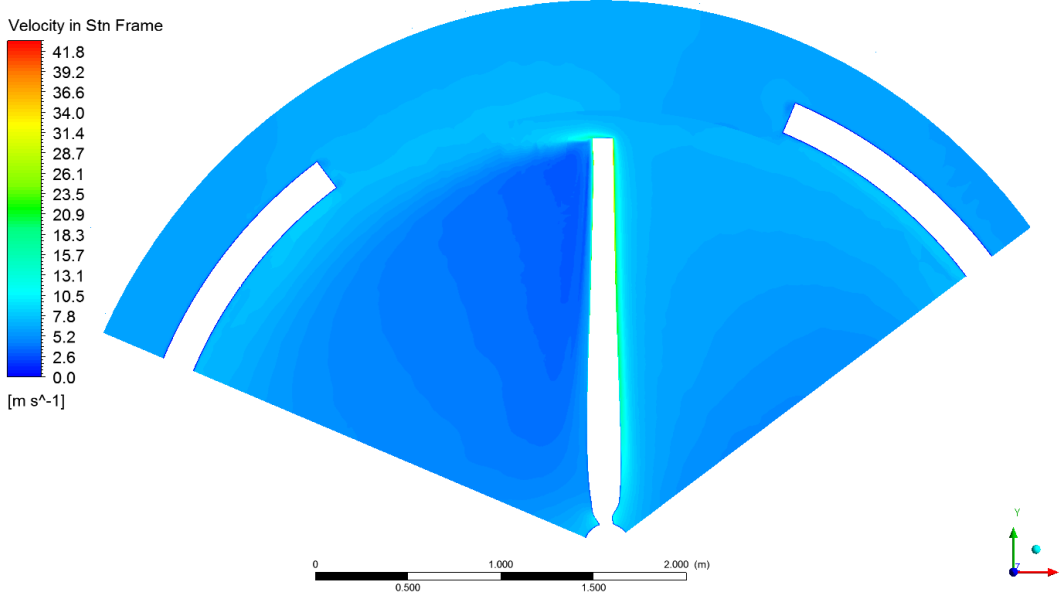
Şekil 5.38: Geometri-5, itki – rüzgar hızı karşılaştırma eğrileri.



Şekil 5.39: Geometri-5, akış hacmi boyunca görülen basınç konturları ($\lambda=6$).



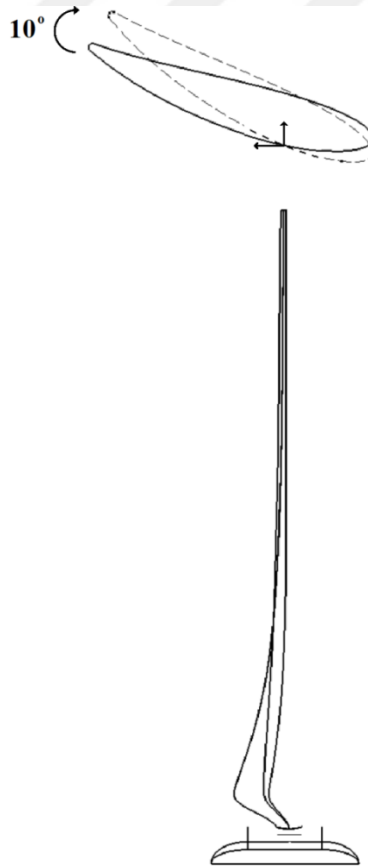
Şekil 5.40: Geometri-5, akış hacmi boyunca görülen hız konturları ($\lambda=6$).



Şekil 5.41: Geometri-5, rotor ekseninde görülen hız konturları ($\lambda=6$).

5.4.7. Kanalın rotor referanslı açısının performansa etkisi

Rüzgar türbini çevresine yerleştirilen kanal geometrisinin giriş ve çıkış akış alanlarının birbirlerine oranının rüzgar türbini performansı üzerine etkilerinin incelenmesi konusunda literatürde de oldukça çalışma bulunmaktadır. Bu etkinin en doğru şekilde gözlemlenebilmesi adına kanal geometrisini oluşturan profilde herhangi bir değişiklik yapılmaksızın, sadece türbin kanatlarının yerleştirilmiş olduğu kanal içerisindeki pozisyon pivot noktası alınarak kanalın açısı ile oynanmıştır. Kanal ile kanatlar arasındaki boşluk oranında veya rotorun kanal içerisindeki pozisyonuna yönelik herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Bu doğrultuda kanal geometrisini oluşturan profilin, kanalın girişi daraltılacak şekilde 10° 'lik açı ile öne doğru eğilmesi yoluyla yeni kanal geometrisi elde edilmiş olup Şekil 5.27'de gösterilmektedir.



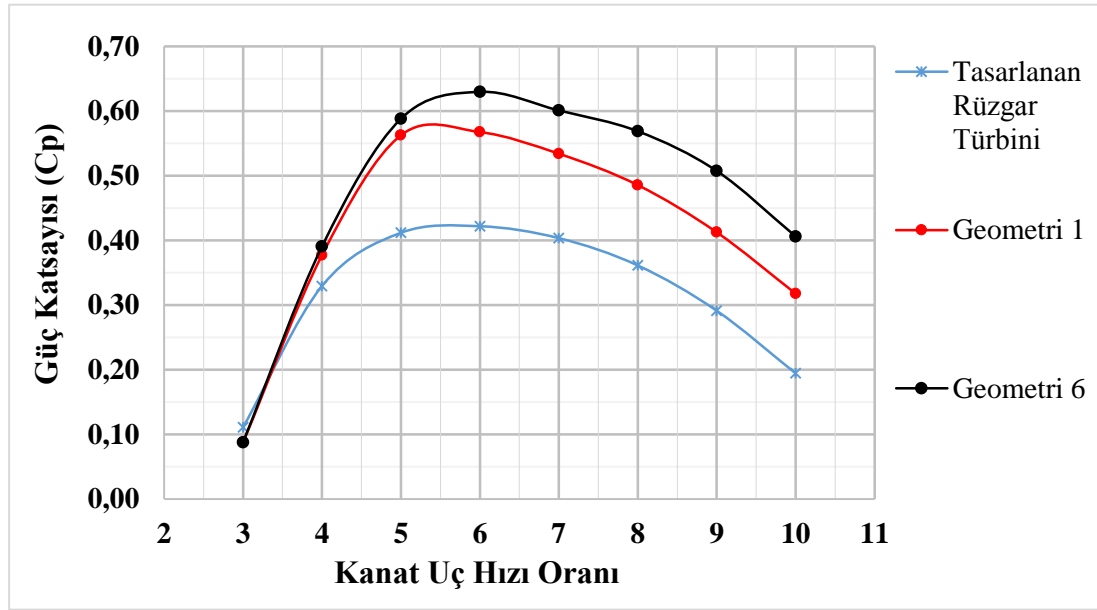
Şekil 5.42: Geometri-6, kanal geometrisinin elde edilmesi.

Oluşan yeni geometri için kanal girişinde akış alanının yarıçapı 2392,8 mm iken kanal çıkışındaki akış alanının yarıçapı 2858,9 mm olur ve kanal açısı değiştirilmeden önce 0,793 olan kanal giriş ve çıkış akış alanlarının birbirine oranı yeni durum için 0,700'dir

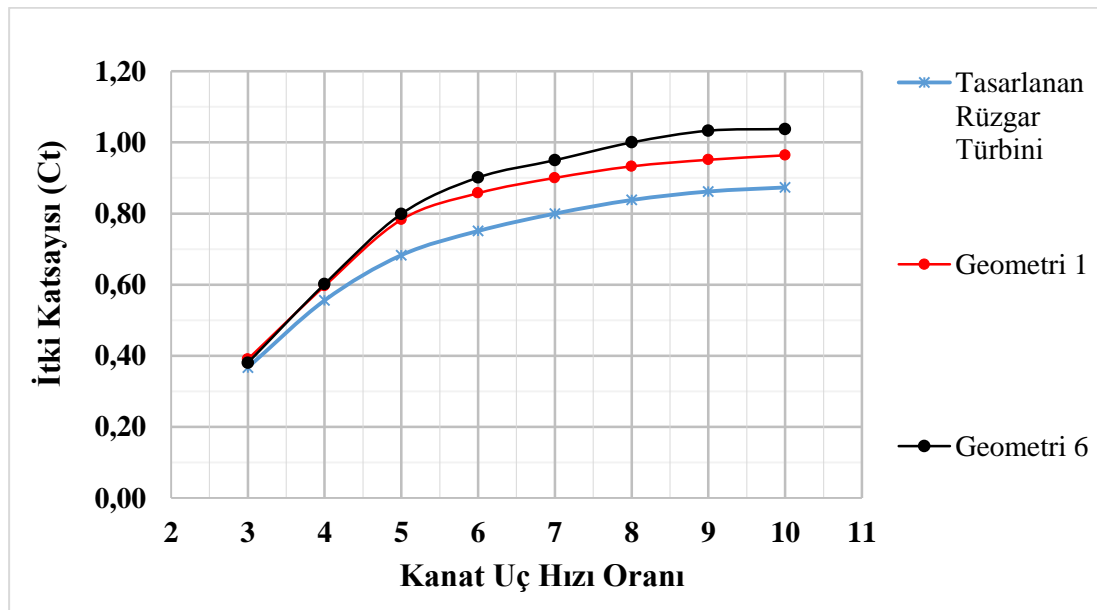
Analizlerin gerçekleştirildiği operasyon şartları için ulaşılan güç ve itki verileri Tablo 5.6'da belirtilmiştir.

Çizelge 5.7: Geometri-6 için gerçekleştirilen HAD analiz sonuçları.

| | λ | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
|-------------------|-----------------|---|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| | U_{ref} [m/s] | | 12,0 | 9,0 | 7,2 | 6,0 | 5,1 | 4,5 | 4,0 | 3,6 |
| Geometri 6 | P [W] | | 1414 | 1651 | 2044 | 1267 | 761 | 483 | 302 | 176 |
| | T [N] | | 510 | 454 | 386 | 302 | 234 | 189 | 154 | 125 |



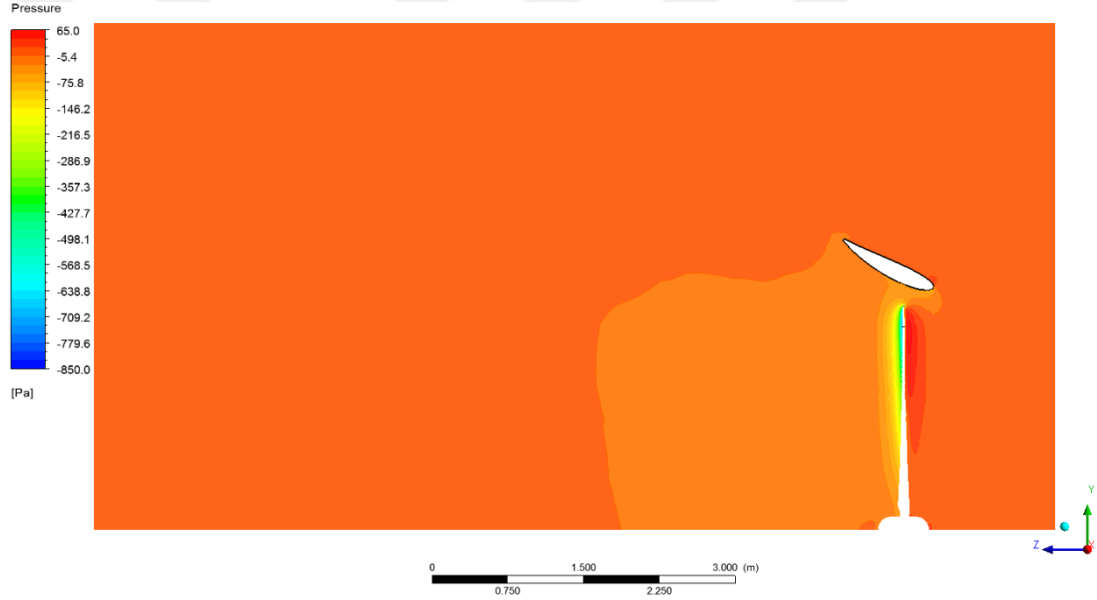
Şekil 5.43: Geometri-6, güç katsayısı – kanat uç hızı oranı eğrileri.



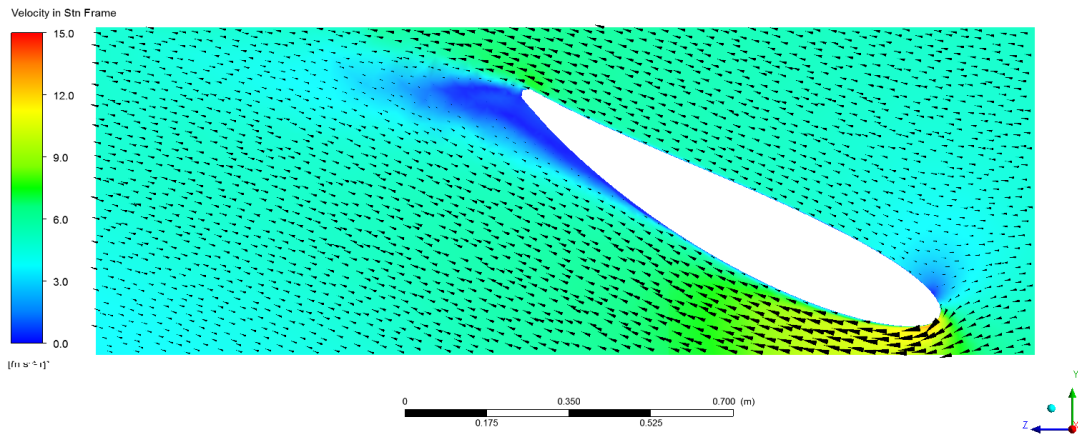
Şekil 5.44: Geometri-6, itki katsayısı – kanat uç hızı oranı eğrileri.

Kanal giriş ve çıkış akış alanlarının birbirine oranının azaltılması ile elde edilen güç değerlerinde önemli oranda artış olmuştur. Grafik 5.13 ve Grafik 5.14’de görüleceği üzere kanat uç hızı oranının 5’ten büyük olduğu yani 7,2 m/s rüzgar hızının altındaki operasyon şartları için güç verisinde belirgin oranda artış sağlanmıştır. Buna karşın kanat uç hızı oranının 5’ten küçük olduğu durumlar için aynı oranda etki oluşmamıştır. Türbin tarafından tutulabilen güç değerlerindeki belirgin artışla orantılı olarak itki değerlerinde de artış olduğu görülmüştür.

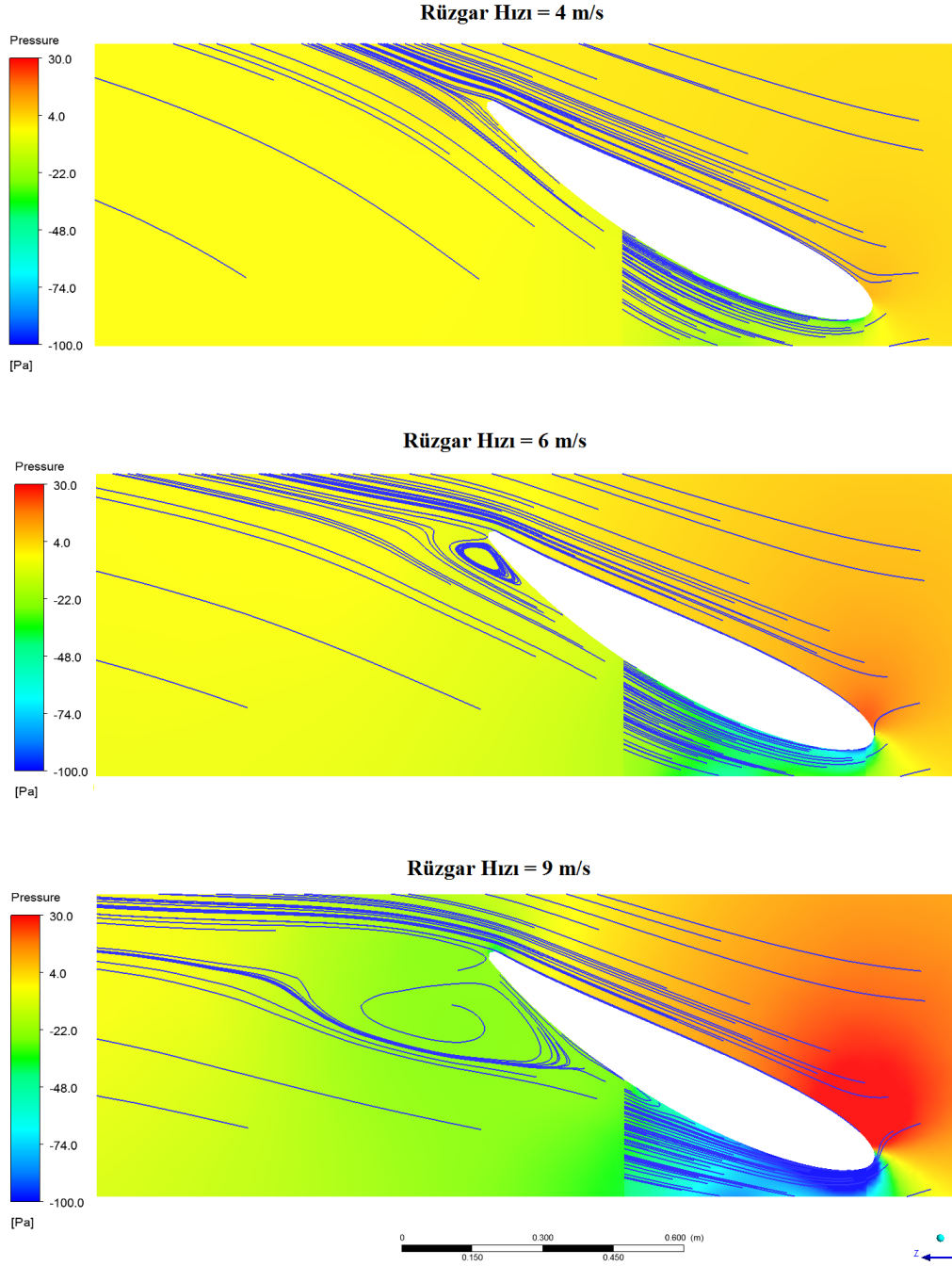
Analizleri daha ayrıntılı olarak incelemek gerekirse, Şekil 5.28’ de analizlerin gerçekleştirildiği akış hacmi boyunca basınç konturları görülmektedir. Kanal ve türbin kanadının ardındaki akış alanında gözlemlenen basınç düşüşünün Geometri-1’e kıyasla daha geniş alanda olduğu görülmektedir.



Şekil 5.45: Geometri-6, akış hacmi boyunca görülen basınç konturları ($\lambda=6$).



Şekil 5.46: Geometri-6, kanal çevresi hız konturları ve hız vektörleri ($\lambda=6$).

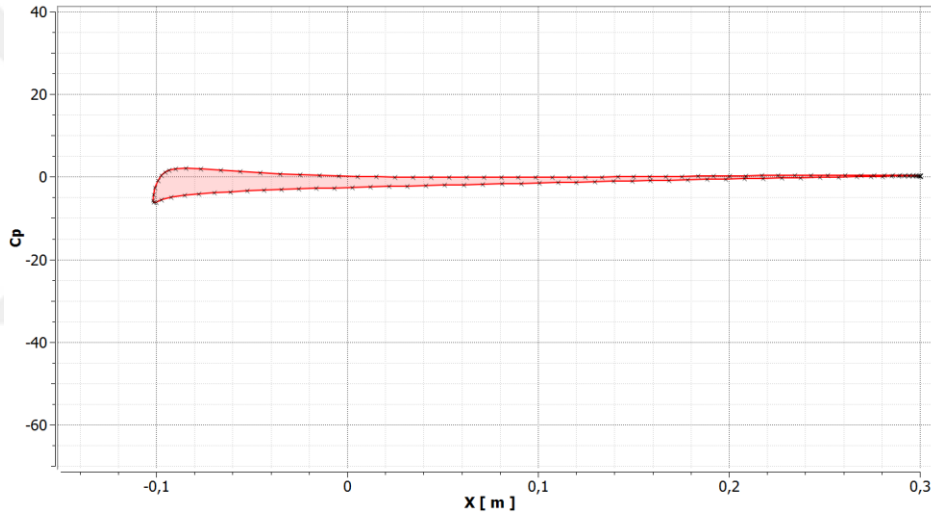


Şekil 5.47: Geometri-6, farklı rüzgar hızlarında kanal çevresi akım çizgileri.

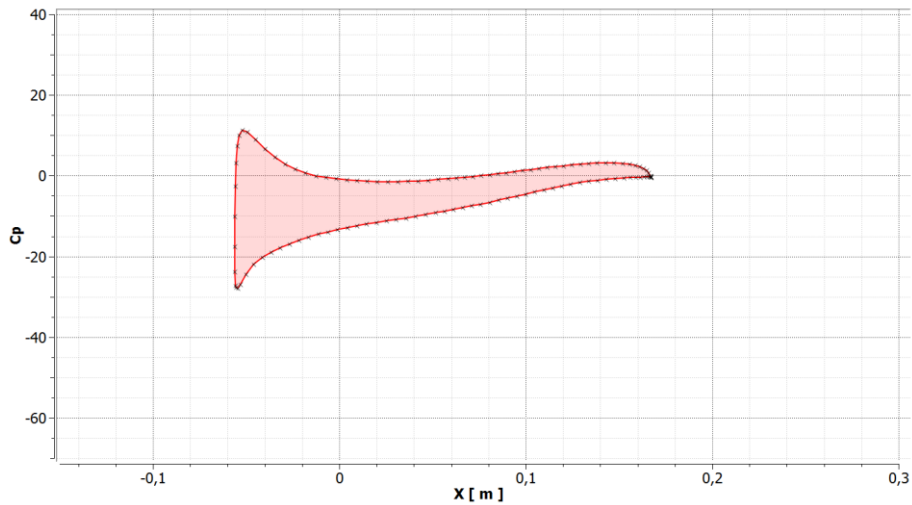
Kanal çevresindeki akım çizgileri ve basınç konturları incelendiğinde özellikle rüzgar hızının 6 m/s'den fazla olduğu durumlar için kanal çıkışına doğru gözlemlenen akış ayrılmasının önceki kanal geometrilerine göre daha erken oluşum gösterdiği ve kanal çıkış kenarı bölgesinde oluşan vorteksin daha geniş bir alana yayıldığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Şekil 5.30'da 4 m/s, 6 m/s ve 9 m/s rüzgar hızları durumları için kanal çevresinde elde edilen akım çizgileri ve basınç konturları gösterilmektedir. Yüksek rüzgar hızları için genişleyen vorteks oluşunun, kanal çıkışındaki etkin akış alanı kesitini daralmasından dolayı rüzgar türbininden elde

edilen güç verisinin de diğer operasyon şartlarına kıyasla artmadığı görülmektedir. Buna ek olarak kanal girişine doğru yönelen serbest akışın, kanal girişindeki ayrılma (durma) noktasının da daha yukarıya bir başka deyişle kanal dış yüzeyine doğru kaydığı görülmektedir.

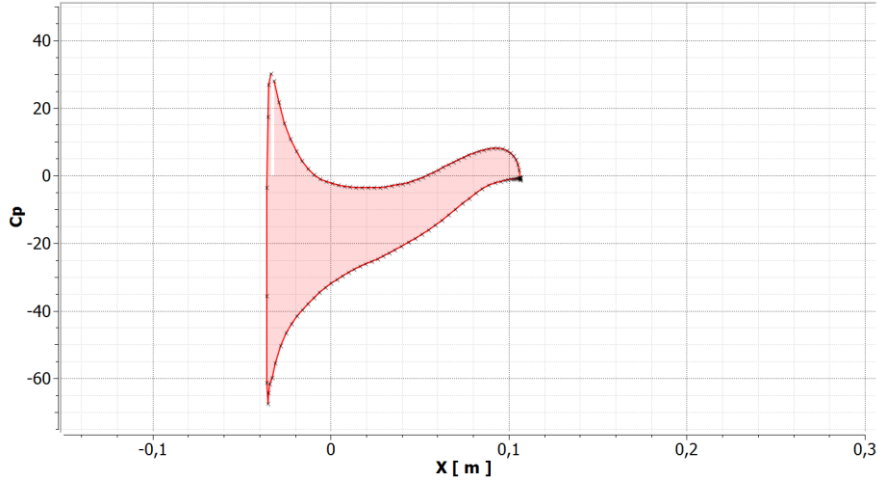
Elde edilen güç verileri göz önüne alınarak rüzgar türbini performansında en fazla iyileştirmenin, Geometri-6 için elde edildiği görülmüştür. Bu bağlamda, kanal kullanılmasının rüzgar türbini rotor kanatları üzerine etkisinin daha ayrıntılı olarak incelenmesi adına, belirlenen radyal pozisyonlar için kanat üzerindeki basınç katsayısı eğrileri elde edilmiş ve daha önceki kısımlarda incelenmiş olan standart açık tip rüzgar türbini analizlerinden de elde edilen yine aynı parametre ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.48: Y=0,4 m pozisyonundaki kanat basınç katsayısı dağılımı ($\lambda=6$).



Şekil 5.49: Y=1,2 m pozisyonundaki kanat basınç katsayısı dağılımı ($\lambda=6$).

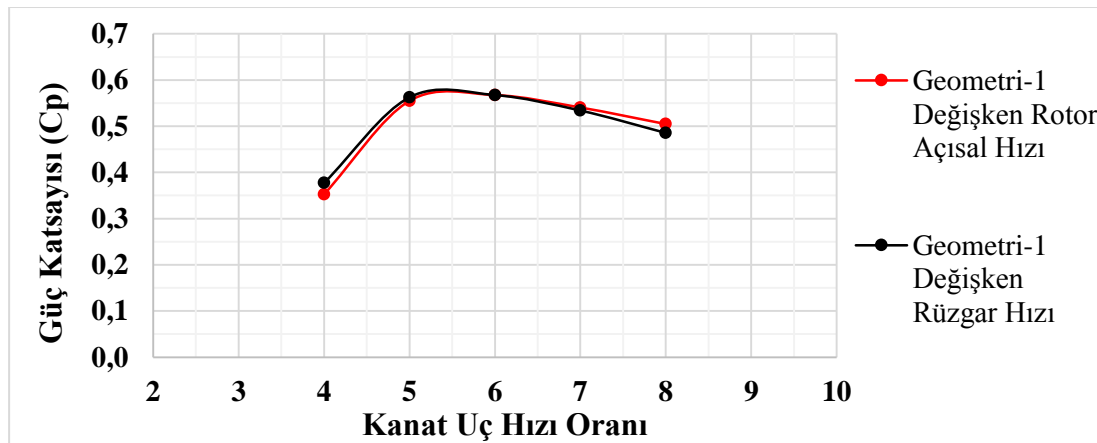


Şekil 5.50: Y=2,0 m pozisyonundaki kanat basınç katsayısı dağılımı ($\lambda=6$).

Geometri-6 için ulaşılan sonuçlarda açık tip rüzgar türbini tasarımına göre, belirlenen radyal pozisyonları için kanat üzerinde elde edilen basınç katsayısı eğrilerinde, değerlerin arttığı ancak genel formlarının değişmediği görülmektedir.

5.4.8. HAD simülasyon metodunun incelenmesi

Gerçekleştirilen tüm HAD analizi simülasyonlarında dönel akış hacmi için sabit açısal hız ve değişken rüzgar hızına göre simülasyonlar uygulanmıştır. Burada amaç rüzgar türbini performansını karakterize eden kanat uç hızı oranına bağlı güç katsayısı eğrisinin elde edilerek karşılaştırılması olmuştur. Bu bağlamda değişken kanat uç hızı oranının hesaplanmasında izlenen metodun elde edilecek olan sonuç verileri üzerine etkilerinin incelenebilmesi adına, dönel açık hacmi için değişken açısal hızlarda, sabit rüzgar hızı (6 m/s) için analizler belirli aralıklarda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında ulaşılan karakteristik eğrilerin karşılaştırılması Grafik 5.15'te gösterilmiştir.



Şekil 5.51: Geometri-1, simülasyon metodlarının karşılaştırması.

6. DEĞERLENDİRMELER

Bu tez çalışmasında küçük çaplı bir rüzgar türbinin tasarlanması ve incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak rüzgar türbini tasarımına literatürdeki teori ve tasarım çalışmalarında incelenmesi yoluyla kanat profillerinin belirlenmesiyle başlanmıştır. Kanat modelinin tasarlanmasında kullanılacak kanat profilleri NREL serisinden, başlangıçta belirlenmiş kanat yarıçapına ve çalışma şartlarına uygun olarak kanat profilleri içerisinde belirlenmiştir. Rüzgar türbini kanat geometrisinin elde edilmesinde kanat elemanı teorisi ve momentum disk teorisinden yararlanılmıştır. Elde edilen kanat geometrisi modellenerek HAD analizleri ile performans incelemeleri gerçekleştirilmiş ve sonuçların tutarlılığı test edilmiştir,

Bir sonraki aşamada tasarımı ve analizleri gerçekleştirilen küçük çaplı rüzgar türbininin çevresine kanal yerleştirilmesine yönelik çalışmalara geçilmiştir. Bu bağlamda kanal içerisinde rüzgar türbini tasarımı ile ilgili olarak kanal profilleri elde edilmiştir ve belirlenen hedef parametrelerine uygun olarak gerçekleştirilen 2 boyutlu analizler ışığında genetik algoritma çoklu hedef optimizasyonu çalışmaları yürütülmüştür. Ulaşılan pareto optimal çözüm seti içerisinde modellenmesi ve HAD analizleri gerçekleştirilecek kanal profilleri seçilmiş ve belirlenmiş olan tasarım analiz parametrelerine göre incelemelerde bulunulmuştur. Bu anlamda gerçekleştirilen çalışmalarda, belirlenen tasarım parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Bu parametreler kanal için farklı geometrik profillerin kullanılması, kanal ile kanatlar arasında kalan boşluk oranı, türbin rotorunun akış doğrultusunda kanal içerisinde yerleştirildiği pozisyon, kısmi kanal kullanılması yani yarı açık kanal modeli ve kanal profilinin giriş akış alanını azaltacak şekilde rotorun yerleştirildiği pozisyon referans alınması yoluyla açısının değiştirilmesi şeklinde olmuştur. Elde edilen sonuçlarda, incelemeleri yapılan parametrelerin belirlenen sonuçlar üzerinde etkin değişikliklere sebep olduğu gibi, performans sonuçları üzerinde belirgin değişiklik sağlamayan ancak kanal içerisindeki akışa etkilerinin olduğu analizler sonucunda görülmüştür.

Bu durumu destekleyici sonuç olarak, birbirinden farklı kanal profillerinin kullanılması durumunda, kanal profilinin geometrisine bağı olarak HAD analizlerinde belirgin olarak farklı sonuçlara ulaşılmıştır. Bu noktada kullanılan kanal profilinin kendine has geometrisinin etkisi ve yine kanatlar ile ilişkisinin etkisi olduğu görülmüştür. Geometri-1 ve Geometri-2 için gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarında Geometri-1 için daha fazla güç üretiminin elde edildiği görülmüştür. Bu sonuca kanal giriş ve çıkış akış alanları arasındaki oranın ve kanalın kendine has geometrisinin difüzör etkisinin sağlanmasında daha uygun oluşunun etkisi olmuştur. Bu bağlamda Geometri-1 için giriş ve çıkış akış alanlarının oranı 0,785 iken, Geometri-2 için bu oran 0,881 olarak elde edilmiştir. Benzeri olarak rotorun kanal içerisinde yerleştirildiği pozisyon referans noktası alınarak kanalın açısının değiştirildiği Geometri-6 için elde edilen sonuçlarda da rüzgar türbininden elde edilen gücün arttığı görülmüştür. Geometri-6'nın elde edilmesinde Geometri-1 için belirlenen profil kullanılmış olup, kanal girişindeki akış alanını daraltacak şekilde 10°'lik kaydırma yapılmıştır. Bu bağlamda Geometri-6 için kanal giriş ve çıkış akış alanlarının oranının 0,700 olduğu görülmektedir. Bu üç farklı tasarım için elde edilen analiz sonuçlarına göre kanal giriş ve çıkış akış alanlarının oranının en belirleyici parametre olduğu görülmektedir. Buna göre bu oranın azalmasıyla ulaşılan güç ve itki verilerinin belirgin şekilde arttığı sonucuna varılmıştır. Bu karşın Geometri-6 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarında, kanalın giriş ve çıkış akış alanlarının oranının azaltılmasıyla düşük rüzgar hızları için bahsedilen bu artışın etkin şekilde gözlemlendiği ancak yüksek rüzgar hızları için akış ayrılması ve kanal çıkışında oluşan vorteksin de büyümesi kaynaklı olarak etkin akış alanının azalmasıyla ulaşılan güç verisinde daha fazla iyileştirmenin elde edilemediği görülmüştür.

Kanal geometrisi ile kanatlar arasındaki boşluk oranının incelendiği HAD analizi sonuçlarına bakıldığında, elde edilen güç ve itki verilerinde performans etki edecek ciddi bir değişimin oluşmadığı görülmüştür. Buna karşın rotor yarıçapının %10'u oranında boşluğun bırakıldığı Geometri-1'e kıyasla rotor yarıçapının %15'i oranında boşluğun bırakıldığı Geometri-3'te, kanal çıkışına doğru kanal yüzeyinde görülen akış ayrılmasının daha düşük rüzgar hızlarında oluşmaya başladığı ve aynı rüzgar hızı temel alındığında ayrılmanın aksel doğrultuda daha önce olduğu görülmüştür. Bu etkiyle ilişkili olarak kanal çıkış kenarında oluşan vorteksin de oluşum alanının genişlediği görülmüştür. Benzeri olarak rotorun kanal içerisinde akış

doğrultusunda çıkışa doğru kaydırıldığı Geometri-4 için elde edilen sonuçlarda da güç ve itki verilerinde belirgin olarak olmamak üzere azalma olduğu ve Geometri-3'te olduğu gibi akış ayrılmasının ve vortesk oluşumunun artış gösterdiği görülmüştür.

Diğer gerçekleştirilen tasarım analizlerinden farklı olarak kısmi kanal geometrisinin kullanıldığı Geometri-5 için gerçekleştirilen analiz sonuçlarında güç ve itki verilerinin genel olarak azaldığı ancak kanat uç hızı oranının yaklaşık olarak 4 ila 5 arasından itibaren rüzgar hızının daha yüksek olduğu durumları için bu verilerin artış gösterdiği sonuçlara yansımıştır. Bu durumun oluşmasında düşük rüzgar hızları için kanal geometrisinin rotoru kısmen çevrelemesinden dolayı difüzör etkisinin azalması ve yüksek rüzgar hızları için ise kanal geometrisinin mevcut potansiyeli daha az engelleyici olmasının etkin sebep olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak kanal içerisinde rüzgar türbini tasarımlarında, kanal profilinin ve kanal içerisindeki akış hacminin genel formunun, rüzgar türbini performansını etkileyen en önemli parametreler olduğu görülmüştür. İncelemelerden optimal kanal profili belirlenerek, kanal giriş ve çıkış akış alanlarının en uygun şekilde ayarlanmasıyla rüzgar türbininden elde edilebilecek verimin daha da geliştirilebileceği sonucuna varılmıştır.



7. ÖNERİLER

Literatürde yer alan benzeri çalışmalar göz önüne alındığında bu tez çalışmasının incelenen parametre sayısı olarak oldukça dolgun olduğu söylenebilir. Ancak parametrelerin etkilerinin daha derinlemesine ve aydınlatıcı sonuçlar sunması adına incelemeler genişletilebilir. Örneğin kanal açısının veya kanal ile kanatlar arası boşluğun etkisinin incelenmesinde birer farklı model üzerinden gerçekleştirilen analizler, daha fazla modelleme yapılarak etkilerin gözlemlenmesinde incelenecek olan parametrelerin yelpazesi genişletilebilir.

Parametrelerin ve analizi gerçekleştirilen model sayısının arttırılmasının yanı sıra, uygulanan metotların geliştirilmesine yönelik olarak da çalışmalar yürütülebilir. Bu bağlamda ANSYS FLUENT programında HAD analizi türbülans modeli olarak kullanılan k-omega SST dışında farklı bir model kullanılarak sonuçların doğrulanması ve metotların etkilerinin de incelenmesi gerçekleştirilebilir. Bunlara ek olarak zamana bağlı analiz modeli kullanılarak da araştırmalar derinleştirilebilir.

Bu tez çalışmasında analizlerde sabit rotor modeli kullanılmış olup, kanatlar çevresindeki dönel akış alanı tanımlanması ve bu akış alanına açılma hızı verilmesi yoluyla sonuçlara ulaşılmıştır. Bu aşamada rotor geometrisinin sadece yüzeyleri modellenmiş olup ağ yapısı da sadece yüzeyler için düzenlenmiştir. Bu bağlamda, rotor geometrisinin hacim olarak ağ yapısının oluşturulması ve referans olarak verilen serbest akış rüzgar hızının kanatlar üzerinde oluşturduğu kuvvetlerin etkisiyle, rotorun dönme hızının belirlenmesi yoluyla gerçekleştirilecek analizler ile daha real sonuçlara da ulaşılabilir.

Bunlara ek olarak, tezin temel konusu olan kanal profillerinin elde edilmesinde kullanılan 6 noktalı Bezier eğrisinin kontrol noktaları için belirlenen sınırlarda iyileştirmeler yapılması yoluyla daha optimal sonuçlar veren profiller elde edilebilir. Eğrilerin elde edilmesinde kullanılan MATLAB kodu tarafımdan düzenlenmiş olup, kod kaynaklı olarak kontrol noktalarının sınırlandırılmasında daha fazla düzenleme yapılamamıştır. Kod düzenlemeler yapılarak bu konuda da iyileştirmeler yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Spera, D. A.** (1998). Wind Turbine Technology, Asme Press.
- [2] **Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu.** (2018) Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Ocak 2018.
- [3] **P. Fuglsang ve Madsen, H. A.** (1999). Optimization method for wind turbine rotors, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.
- [4] **David Hartwanger ve Andrej Horvat.** (2008). 3D Modelling of A Wind Turbine Using CFD, Intelligent Fluid Solutions, United Kingdom.
- [5] **John McCosker.** (2012). Design and Optimization of a Small Wind Turbine, Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut.
- [6] **Peter J.Schubel ve Richard J.Crossly.** (2012). Wind Turbine Blade Design
- [7] **R. Lanzafame ve diğerleri.** (2012). Wind turbine CFD modelling using a correlation-based transitional model, Dipartimento di Ingegneriale e Meccanica, Facolta di Ingegneria, Universita degli Studi di Catania, Catania, Italy, Elsevier.
- [8] **Koki Kishinami ve diğerleri.** (2015). Theoretical and Experimental Study on The Aerodynamic Characteristics of a Horizontal Axis Wind Turbine,Elsevier Ltd., Japan.
- [9] **Hansen, M. O. L. ve diğerleri.** (2000). Effect of Placing a Diffuser around a Wind Turbine, Department of Energy Engineering, technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, John Wiley & Sons.
- [10] **S.A.H. Jafari ve B. Kosasih.** (2013). Flow analysis of shrouded small wind turbine with a simple frustum diffuser with computational fluid dynamics simulations, School of Mechanical, Materials and Mechatronics Engineering, University of Wollongong, Australia, Elsevier.
- [11] **Deborah A.T. Rio Vaz ve diğerleri.** (2014). An extension of the Blade Element Momentum method applied to Diffuser Augmented Wind Turbines, Federal University of Para, Belem, Brazil, Elsevier.
- [12] **Botempo, R. ve Manna, M.** (2014). Performance analysis of open and ducted wind turbines, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Universita degli Studi di Napoli Federico II, Naples, Italy, Elsevier.
- [13] **Botempo, R. ve Manna, M.** (2016). Effects of the duct thrust on the performance of ducted wind turbines Dipartimento di Ingegneria Industriale, Universita degli Studi di Napoli Federico II, Naples, Italy, Elsevier.

- [14] **Jerson R. P. Vaz^a ve David H. Wood^b**. (2016). Aerodynamic optimization of the blades of diffuser-augmented wind turbines, ^aFaculty of Mechanical Engineering, Institute of Technology, Federal University of Para, Belem, Brazil, ^bDepartment of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Calgary, Alberta, Canada, Elsevier.
- [15] **Gasch R. ve Twele J.** (2012). Wind power plants – fundamentals, design, construction and operation: Springer.
- [16] **Tangler, J. L. ve Somers, D. M.** (1995). NREL Airfoil Families for HAWTs, National Renewable Energy Laboratory.
- [17] **Somers, D. M.** (2005). The S833, S834, and S835 Airfoils, National Renewable Energy Laboratory.
- [18] **Gundtoft, S.** (2009). Wind Turbines, University College of Aarhus, (1)Department of Nuclear, Plasma and Radiological Engineering, (2)Department of Aerospace Engineering and (1)University of Illinois at Urbana-Champaign, 216 Talbot Laboratory, USA.
- [19] **Al-Bahadly, I. H. ve Petersen, A. F. T.** (2011). A Ducted Horizontal Wind Turbine for Efficient Generation, Massey University, New Zealand.
- [20] **Karl O. Merz.** (2011). Conceptual Design of a Stall-Regulated Rotor for a Deepwater Offshore Wind Turbine, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- [21] **Tadahiko Murata ve Hisao Ishibuchi.** (1995). MOGA: Multi-Objective Genetic Algorithms, Department of Industrial Engineering, University of Osaka Prefecture, Osaka.
- [22] **Marc Drela ve Harold Youngren.** (2000). Axisymmetric Analysis and Design of Ducted Rotors Report, MIT Aero & Astro Dept. & Aerocraft Inc.
- [23] **Han Cao.** (2011). Aerodynamics Analysis of Small Horizontal Axis Wind Turbine Blades by Using 2D and 3D CFD Modelling, Engineering and Physical Sciences at the University of Central Lancashire, Preston, England.
- [24] **Manwell, J. F., McGowan, J. G. ve Rogers, A. L.** (2002). Aerodynamics of Wind Turbine, Wind Energy Explained-Theory Design and Application, John Wiley & Sons Ltd, London.
- [25] **Özlem Ceyhan.** (2008) Aerodynamic Design and Optimization of Horizontal Axis Wind Turbines by Using BEM Theory and Genetic Algorithm, Thesis Report of Master of Science, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East technical University.
- [26] **Ravi Kishore.** (2013). Small-scale Wind Energy Portable Turbine (SWEPT), Thesis Report of Master of Science, Faculty of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [27] **Gerald Farin.** (2002). Curves and surfaces for computer aided geometric design, Arizona State University, Academic Press.

- [28] **Carlos M. Fonseca ve Peter Fleming.** (1999). Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization, Dept. Automatic Control and System Eng., University of Sheffield, United Kingdom
- [29] **ANSYS ICEM CFD User's Manual.** (2015). ANSYS, Inc., ANSYS Release 16.0.





ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Yiğitcan Gülsoy
Doğum Tarihi ve Yeri : 28.02.1992 / İstanbul
E-posta : yigitgulsoy@gmail.com - yigitgulsoy@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Orta öğrenim** : 2006-2010, Ümraniye Anadolu Lisesi, Fen-Matematik Alanı
- **Lisans** : 2010-2015, Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği, GANO: 3.65/4.00 – Yüksek Onur Öğrencisi
- **Yükseklisans** : 2015-2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı – Akışkan Programı GANO: 3.63/4.00 – Yüksek Onur Öğrencisi

MESLEKİ DENEYİM:

- Arçelik A.Ş. : 08.07.2013 - 02.08.2013
Üretim Stajı; Boyahane ve Kalıp İşleme Departmanları
- Makyay Makina ve Yay Sanayi Tic. Ltd. Şti. : 19.08.2013 - 07.09.2013
Üretim Stajı; Kalite Kontrol Departmanı
- Rekor Kauçuk A.Ş. : 23.06.2014 - 08.08.2014
Yönetim Stajı; Organizasyon ve Üretim Kontrol Departmanı
- Bias Mühendislik : 10.2014 - 12.2014
Gönüllü Staj; Yapısal HAD Analizi Çalışmaları
- BSH Ev Aletleri Sanayi ve Ticaret A.Ş. : 10.10.2016 - 02.01.2017
İnovasyon Departmanı, Yüksek Lisans Proje Mühendisi
- THY A.O. : 14.08.2017 - ...
İnşaat ve Yapı İşleri Müdürlüğü, Mekanik İşler Mühendisi