

YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ KANADI VE KANAT PROFİLLERİNİN BEM VE CST METOTLARI VE GENETİK ALGORİTMA KULLANARAK AERODİNAMİK OPTİMİZASYONU

Keriman Oğuz¹, Nilay Sezer Uzol²

^{1,2}Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ

^{1,2}ODTÜ RÜZGEM

¹keriman.karakas@metu.edu.tr, ²nuzol@metu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada yatay eksenli rüzgar türbini palalarının ve kanat kesitlerinin aerodinamik optimizasyonu yapılmaktadır. Kanat kesit geometrisi tasarımında Sınıf-Şekil Transformasyonu Metodu (CST) kullanılmıştır. Aerodinamik veriler, bir potansiyel akış çözücüsü olan XFOIL yazılımı ile elde edilmiştir. Rotor güç hesaplamaları için Pala Elemanı-Momentum (BEM) teorisi kullanılmıştır. Genetik Algoritma (GA), rotor maksimum güç üretimi amacıyla, pala kanat kesiti geometrisi optimizasyonunda kullanılmıştır. Bu bildiriye, seçilen rotorlar için doğrulama çalışmaları yapılmış, ve yapılan optimizasyon çalışmaları ve aerodinamik performans karakteristikleri hesaplamaları ve sonuçlar literatürdeki mevcut test rüzgar türbinleri ile karşılaştırılmıştır. Kalın ve ince kanat kesiti optimize tasarımlarını da kullanan üç kanat kesitli tasarlanan yeni rotor için analizler yapılmış ve aerodinamik performans artırımları incelenmiştir.

1. GİRİŞ

Rüzgar türbini tasarımı, temel olarak aerodinamik, mekanik ve elektriksel tasarım alanlarını kapsayan disiplinler arası bir optimizasyon çalışmasıdır. Literatürün çoğunluğu, jeneratör, kanat, açık deniz platformu, mikro-yerleşim vb. gibi bileşen-odaklı bir bakış açısına sahip uzmanlık alanlarından birine odaklanmıştır. Bununla birlikte, farklı bileşenlerin optimizasyon hedefleri birbirleri ile paralel olmayabilir. Rüzgar enerjisi tasarım çalışmalarının motivasyonu daha bütünsel bir yaklaşım ve geniş perspektifle oluşturulmalıdır.

Daha önce ODTÜ’de yapılan çalışmalarda, Ceyhan vd. [1,2], 2008-2009, özgün Pala Elemanı-Momentum (BEM) Teorisi kodu ve genetik algoritma kullanarak rotor pala geometrisinin optimizasyonunu yapmışlar ve hatve açısı değişimi ile güç üretimi kontrolünü incelemişlerdir. Sağol vd. [3,4], 2009-2010, belirli bir rüzgar türbini yerleşim sitesine özgü rüzgar karakteristikleri için minimum enerji maliyetine göre BEM kodu ve genetik algoritma kullanarak kanat optimizasyonu yapmışlardır. Polat vd. [5-8], 2011-2013, rotor pala geometrisinin maksimum güce göre optimizasyonunda kanat boyunca üç farklı kesit için bezier eğrileri ile tanımları, BEM ve genetik algoritma kullanmıştır. Ayrıca, Polat vd. [9], 2014’de, hem helikopter hem de rüzgar türbini rotor palalarının tasarımını ve kanat kesiti optimizasyonunu karşılaştırmalı incelemiştir. Elfarra vd. [10-15], 2010-2015, rüzgar türbini kanadı aerodinamik optimizasyonunda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), genetik algoritma ve yapay sinir ağları kullanarak kanat uç geometrisinin optimizasyonu ve performansa etkilerini çalışmıştır.

Kanat kesiti geometrisinin tanımlanmasında literatürde farklı yöntemler mevcuttur. Kanat kesitinin üst ve alt yüzey koordinatlarının verilmesi en basit tanımdır. Bu koordinatlara farklı eğrilerin uydurulması ile geometri tanımı, basit polinomlardan bezier eğrilerine kadar farklı doğrulukta tanımlar elde edilmesi en genel tanımlamalardır. Kanat kesiti için özelleşmiş geometri tanımları da yaygın kullanılmaya başlayan diğer tanımlamalardır: Sobieczky’nin [16],

2000'de tanımladığı, Parametrik Kesitleme Yöntemi (PARSEC) ile kanat kesitinin hücum kenarı yarıçapı, maksimum kalınlığı, firar kenarı açıları gibi belli karakteristik büyüklüklerin geometriyi tanımlayan eğrilerle birlikte kullanılması, Kulfan vd'nin [17,18], 2008-2006, ortaya koyduğu Sınıf-Şekil Transformasyonu (CST) ile geometri tanımlarının kullanılmasıdır.

Literatürdeki son çalışmalarda, Javed vd. [19], 2016, küçük rüzgar türbinleri için pala tasarımı yapmak için, bir açık kaynak panel kodu olan XFOIL tabanlı olan XFLR5 yazılımı kullanarak ve MATLAB'de BEM metodu ile veter uzunluğu, burkulma açısı ve önceden belirlenmiş kanat kesiti parametrelerini hesaplayan bir optimizasyon yazılımı geliştirmiştir. Barret [20], 2018, enerji maliyetini en aza indirmek amacıyla CST kullanarak tasarlanan kanat kesitleriyle, XFOIL ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve gradyan tabanlı optimizasyon yöntemi ile rüzgar türbini pala tasarımı yapmıştır. Hem önceden optimize edilmiş kanat kesitleri hem de pala planformu ile birlikte kanat kesitlerini de optimize ederek palalar tasarlamışlardır. Liang vd. [21], 2018, CST metoduyla optimize edilmiş dikey rüzgar türbini kanat kesitinin türbin güç performansına etkisini, XFOIL, HAD, genetik algoritma ve dikey rüzgar türbini rotoru için çoklu akım borusu modeli kullanarak incelemiştir.

Bu çalışmanın amacı, yatay eksenli rüzgar türbini palalarının ve kanat kesitlerinin aerodinamik optimizasyonu için farklı geometri tanımlamaları kullanılarak tasarım yöntemi geliştirilmesidir. Tasarım yönteminin uygulama adımları şöyledir: Öncelikle kanat kesit geometrisi tasarımlarında CST metodu kullanılmıştır ve bu bildiride bu yöntem anlatılmaktadır. İlgili aerodinamik verileri, bir potansiyel akış çözücü yazılımı olan XFOIL ile elde edilir. Daha sonra, her pala bölümünde güç üretimini hesaplamak için BEM kullanılır. Ardından genetik algoritma, maksimum güç üretim hedefi için pala genişliği boyunca kesit veter uzunluğunu ve burkulma açısını optimize etmek için kullanılır. Son olarak, geliştirilen modeli doğrulamak için, literatürdeki model referans türbin olarak da yaygın kullanılan yatay eksenli rüzgar türbini deneysel çalışmalarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Ana tasarımda kullanılan yöntemler Tablo 1'de de verilmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan problem, seçilen bir rüzgar türbini kanat kesitinin ve rotor palasının aerodinamik optimizasyonu ve performans analizleridir. Bir karşılaştırma çalışması olarak, NREL Faz III ve NREL Faz VI referans rüzgar türbinleri doğrulama çalışmalarında kullanılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Daha sonra, tek kanat kesiti, S809, kullanan NREL Faz VI palası için bu kanat kesitinin daha kalın ve daha ince versiyonları optimize edilerek tasarlanmış ve yeni rotor palasında bu 3 kesit dağılımı kullanılarak performans analizleri yapılmıştır.

Tablo 1. Ana Tasarım Prosedürü

TASARIM YÖNTEMLERİ	
Kanat Kesiti Geometrisi Tasarımı	Sınıf-Şekil Transformasyonu Metodu
Aerodinamik Veri	Potansiyel Akış Panel Metodu, XFOIL
Güç Hesaplamaları	Pala Elemanı Momentum Teorisi
Optimizasyon	Genetik Algoritma

2. YÖNTEM

2.1. Sınıf-Şekil Transformasyonu Metodu

Sınıf-Şekil Transformasyonu (CST) metodu, çeşitli 2-boyutlu ve 3-boyutlu geometrileri tanımlamak için kullanılan genel bir matematiksel transformasyon tekniğidir. Bu yöntemde şekil fonksiyonu ve sınıf fonksiyonu kullanılmaktadır. Şekil fonksiyonu yapının geometrisini tanımlarken, sınıf fonksiyonu farklı ana geometriler için uygulanabilir yöntemi sağlar. Her bir sistem bileşeni türünü belirtmek için, iki temel geometri sınıflandırılması yapılır:

- Sınıf 1 : Kanat tipi şekiller (kanat, pala, kanatçık, vb.);
- Sınıf 2 : Gövde tipi şekiller (gövde, kanallar, borular, rotor göbeği, vb.)

Bu iki temel sınıf içinde farklı ana geometriler tekrar sınıflandırılır ve şekil fonksiyonu detaylı geometri belirlenir. Bu çalışmanın ana amaçlarından biri, kanat kesiti geometrilerinin CST metodu ile tanımlanmasıdır. Bu yöntem, hücum kenarı yarıçapı, maksimum kalınlık, firar kenarı açıları gibi parametrelere bağlı olarak genel bir matematiksel eğri tanımlar.

Kanat kesiti geometrileri bu genelleştirilmiş matematiksel ifade ile tanımlanır:

$$\zeta(\psi) = \underbrace{\sqrt{\psi}}_I \cdot \underbrace{(1 - \psi)}_II \cdot \underbrace{\sum_{i=0}^N A_i \cdot \psi^i}_{III} + \underbrace{\psi \cdot \zeta_T}_{IV}$$

$$\psi = x/c; \quad \zeta = y/c; \quad \zeta_T = \Delta\zeta_{TE}/c$$

- I : Hücum kenarı yarıçapı ile ilgili terim
- II : Firar kenarı açıları ile ilgili terim
- III : Kanat kesiti kalınlığı ile ilgili terim
- IV : Firar kenarı kalınlığı ile ilgili terim

Şekil fonksiyonu $S(\psi)$ aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$S(\psi) = \frac{\zeta(\psi) - \psi \zeta_T}{\sqrt{\psi} \cdot [1 - \psi]}$$

Böylece şekil fonksiyonu aşağıdaki gibi tekrar tanımlanabilir:

$$S(\psi) = \sum_{i=0}^N [A_i \cdot \psi^i]$$

Kanat kesiti şeklinin temel geometrik özellikleri, hücum kenarı yarıçapı ve firar kenarı açısı ve kalınlığı ile ilgili tanımlar aşağıda Şekil fonksiyonunun sınır değerleri olarak verilir:

$$\psi = 0; \quad S(0) = \sqrt{2R_{LE}/c}$$

$$\psi = 1; \quad S(1) = \tan \beta + \Delta Z_{TE}/c$$

Temel geometri kanat kesiti birim şekil fonksiyonundan türetilir, $S(\psi) = 1$. Birim şekil fonksiyonu n'inci dereceden Bernstein polinomlarına aşağıdaki gibi ayrıştırılabilir:

$$S_i(\psi) = K_i \psi^i (1 - \psi)^{n-1}$$

$$K_i \equiv \binom{n}{i} = \frac{n!}{i! (n-i)!}$$

Sınıf fonksiyonunun $C(\psi)$ genel formda tanımlanması aşağıdaki gibi yapılmıştır:

$$C_{N2}^{N1}(\psi) = (\psi)^{N1} [1 - \psi]^{N2}$$

Sınıf fonksiyonu, genel geometri sınıflarını belirlerken; fonksiyonun $N1$ ve $N2$ üsleri, temel geometri sınıfını belirler. Birim şekil fonksiyonuna karşılık gelen geometri, ilgili sınıf için temel şekil olarak adlandırılır. Yuvarlak burunlu pala kesiti için, $N1 = 0.5$ ve $N2 = 1.0$ olarak tanımlanmıştır.

Sonuç olarak, bu yöntemde genelleştirilmiş ifade aşağıdaki gibi bulunur:

$$\zeta(\psi) = C_{N2}^{N1}(\psi) \cdot S(\psi) + \psi \cdot \zeta_T$$

Bu denklem, üst ve alt yüzeyler için ayrıştırılabilir:

$$\begin{aligned}\zeta(\psi)_{üst} &= C_{N2}^{N1}(\psi) \cdot S_{üst}(\psi) + \psi \cdot \Delta\xi_{üst} \\ \zeta(\psi)_{alt} &= C_{N2}^{N1}(\psi) \cdot S_{alt}(\psi) + \psi \cdot \Delta\xi_{alt} \\ \Delta\xi_{üst} &= yu_{TE}/c & \Delta\xi_{alt} &= yl_{TE}/c & C_{N2}^{N1}(\psi) &= (\psi)^{N1}[1 - \psi]^{N2} \\ S_{üst}(\psi) &= \sum_{i=1}^n [A_{üst i} \cdot S_i(\psi)] & S_{alt}(\psi) &= \sum_{i=1}^n [A_{alt i} \cdot S_i(\psi)]\end{aligned}$$

Belirli performans hedeflerine tabi yeni kanat kesiti geometrilerini tasarlarken, $A_{üst i}$ ve $A_{alt i}$ ağırlık katsayıları optimizasyon sürecinde tasarım değişkenleri haline gelir. Öte yandan, CST metodu ile bilinen bir kanat kesiti için, bu katsayılar eğri uydurma teknikleri yardımıyla bulunur. Bu çalışmada, rüzgâr türbini palasının farklı bölümleri için yeni kanat kesiti geometrileri oluşturmak amacıyla bu metod kullanılmıştır.

2.2 Pala-Elemanı Momentum Teorisi

Pala-Elemanı teorisi ve Momentum teorisinden ayrı ayrı elde edilen kuvvet ve tork değerlerinin eşitlenmesiyle oluşturulan teori Pala-Elemanı Momentum (BEM) teorisidir. Pala Elemanı Teorisi, pala uzunluğu boyunca kanat kesitlerinin oluşturduğu aerodinamik yükler, taşıma ve sürüklenme kuvvetleri, tarafından üretilen kuvvetleri hesaplar. Momentum Teorisi ise, türbinin kontrol hacminden geçen dönen bir dairesel akım borusu için momentum dengesini kurar ve kullanır. BEM temel olarak ilgili indüksiyon faktörlerini, a ve a' hesaplayarak indüklenmiş hızları bulur. Böylece rüzgâr türbininin gücü ve torku bu indüksiyon faktörleri sayesinde kolayca hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}T_{pala\ elemanı\ teorisi} &= T_{momentum\ teori} \\ Q_{pala\ elemanı\ teorisi} &= Q_{momentum\ teori} \\ a &= \frac{1}{\frac{4F\sin^2\varphi}{\sigma C_n} + 1}; \quad a' = \frac{1}{\frac{4F\sin\varphi\cos\varphi}{\sigma C_t} - 1}; \quad \sigma = \frac{N_b c}{2\pi r}\end{aligned}$$

Prandtl uç kaybı düzeltmesi, F , Glauert düzeltmesi, ve rotor göbeği düzeltmesi dikkate alınarak yukarıdaki denklemler değiştirilmiştir ve gerçekleştirilecek tasarım, analiz ve değerlendirme çalışmaları için MATLAB'da bir BEM kodu, AeroBEM, yazılmıştır. Yinelemeli sayısal çözüm yöntemi, Ceyhan vd.'nin [1,2], 2008-2009, çalışmalarında da verildiği gibi, indüksiyon faktörlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Garantili yakınsama sağlanabilmesi için Ning vd.'nin [22], 2013, geliştirdiği çözüm algoritması uyarlanarak kodlanmıştır.

2.3 Genetik Algoritma

Genetik Algoritma, en iyi bireylerin hayatta kalma stratejisinin güdüldüğü, çok amaçlı, yarı rasgele bir arama optimizasyon tekniğidir. Optimizasyon şeması bir grup olası çözüm üretmekte, çözümleri bir uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirmekte, bir dizi uygun ebeveyn çözümünü seçmekte ve bu ebeveynleri yeni bir olası çözüm popülasyonu oluşturmak için yeniden üretmektedir. Çapraz geçiş, çoğaltma ve mutasyon işlemleri popülasyondaki doğal seçim sürecinde de kullanılır.

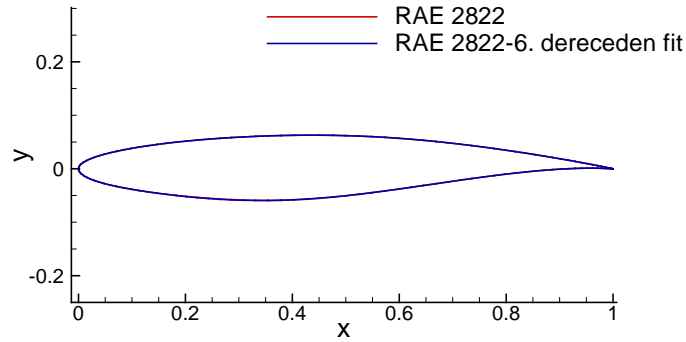
Bu çalışmada, BEM kodunda bir rüzgâr türbini palasının tanımlanması için kullanılan parametrelerin optimizasyonu genetik algoritma ile gerçekleştirilmektedir.

3. ANALİZLER ve SONUÇLAR

3.1 Sınıf-Şekil Transformasyonu Metodu (CST) Doğrulamaları

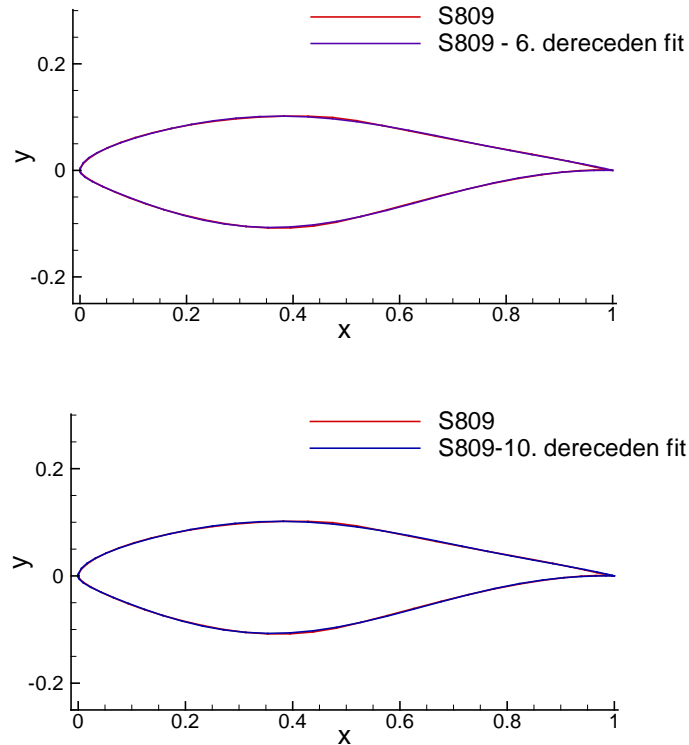
CST için yazılan MATLAB kodu, AirfoilCST, literatürde yer alan farklı kanat kesitlerinin tanımlanması için kullanılarak doğrulanmıştır.

Şekil 1’de RAE 2822 kanat kesiti için yapılan 6. dereceden CST sonuçları gösterilmiştir. RAE 2822 kanat kesiti orijinal koordinatlardan çizilen geometrisi kırmızı, bu çalışmada geliştirilen kod ile çizilen geometri mavi kesikli çizgi ile verilmiştir. Bu yöntemle, kompleks bir geometriye sahip kanat kesiti alt eğrisinin dahi oldukça düzgün bir şekilde takip edilebildiği görülmektedir.



Şekil 1. RAE 2822 kanat kesiti için yapılan 6. dereceden Sınıf-Şekil Transformasyonu

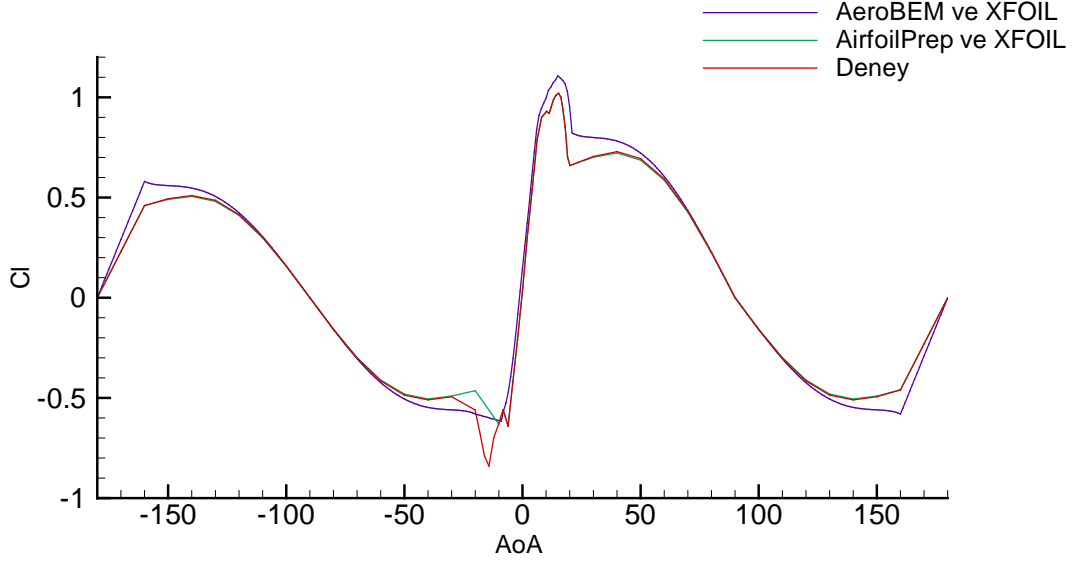
S809 kanat kesiti, NREL Faz III ve Faz VI test rüzgâr türbini kanatlarında kullanılmaktadır. Şekil 2’de S809 kanat kesiti için yapılan, 6. ve 10. derecelerden iki farklı CST sonucu gösterilmiştir. S809 kanat kesiti orijinal geometrisi kırmızı, bu çalışmada kullanılan kod ile çizilen geometri mavi çizgi ile verilmiştir. Bu karşılaştırmada görüldüğü üzere, 6. derece CST kullanmak, kanat kesiti geometrisini yüksek çözünürlükte çıkarmak için yeterlidir.



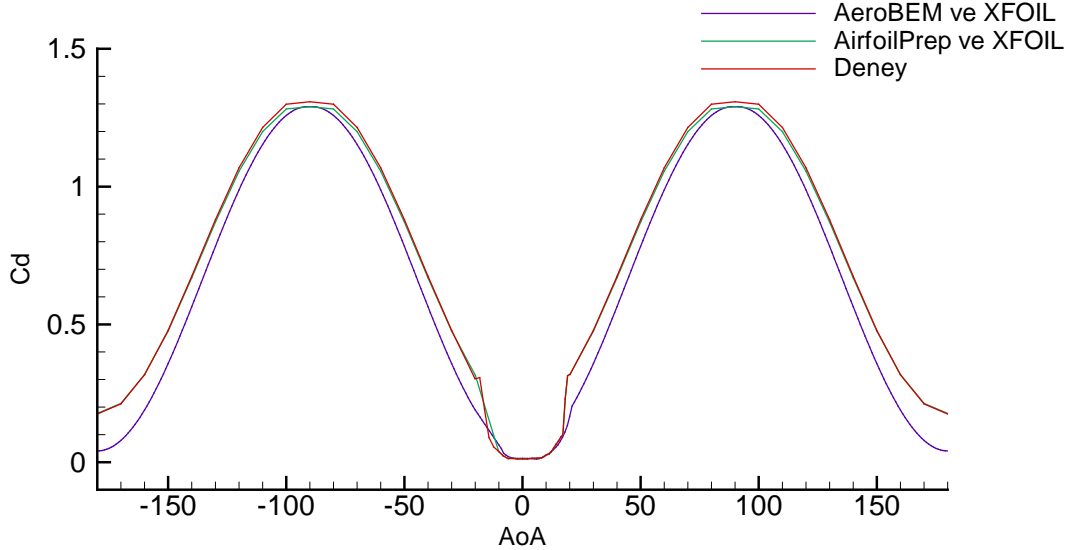
Şekil 2. S809 kanat kesiti için 6. (üst) ve 10. (alt) dereceden Sınıf-Şekil Transformasyonu

3.2 Aerodinamik Yük Katsayıları Hesaplamaları

Pala tasarımında kullanılacak kanat kesitlerinin farklı Reynolds sayıları ve farklı hücum açılarındaki (AoA) taşıma ve sürtünme kuvvetlerini hesaplamak için ve böylece aerodinamik yük verilerinin oluşturulması için XFOIL yazılımı kullanılmıştır. Viterna-Corrigan metodu kullanarak 360 derece polar değerleri ekstrapolasyonu yapan bir MATLAB kodu da yazılmıştır. Taşıma ve sürüklenme kuvveti katsayılarının, C_l ve C_d , polar dağılımları, S809 kanat kesiti için, 750.000 Reynolds sayısı için bir açık kaynak kod olan "AirfoilPrep v2.02.03" sonuçları ve rüzgâr tüneli ölçüm sonuçları ile Şekil 3 ve Şekil 4'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. S809 Kanat Kesiti için Taşıma Kuvveti Katsayısının Hücum Açısı ile Değişimi (Re=750.000)



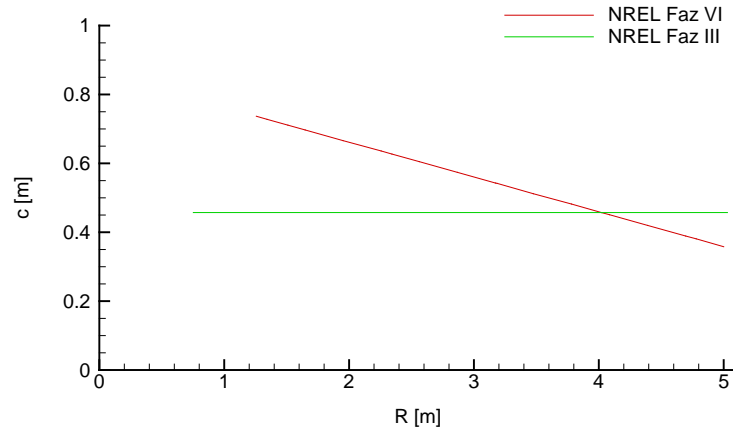
Şekil 4. S809 Kanat Kesiti için Sürüklenme Kuvveti Katsayısının Hücum Açısı ile Değişimi (Re=750.000)

3.3 Pala Elemanı Momentum Teorisi Analizleri Doğrulamaları

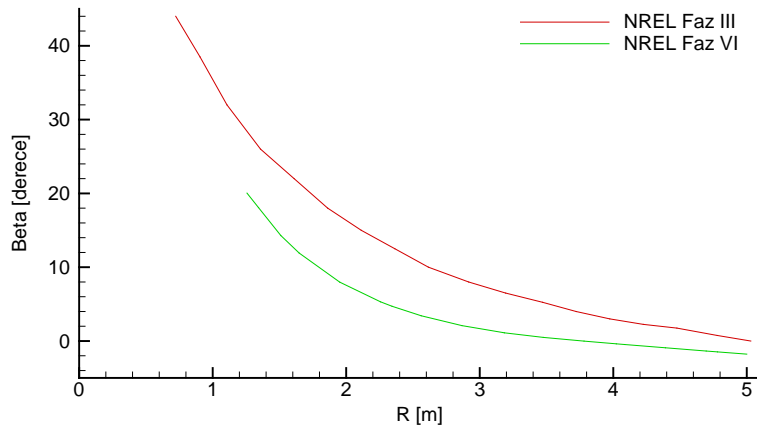
Çalışma kapsamında MATLAB’da geliştirilen BEM kodu, AeroBEM, ile NREL Faz III ve NREL Faz VI rüzgar türbini rotorları için analizler yapılmış ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Referans türbinlere ait rotor geometrik parametreleri Tablo 2’de, veter uzunluğu dağılımı Şekil 5’te, ve burkulma açısı dağılımı Şekil 6’da verilmiştir.

Tablo 2. NREL Faz III ve NREL Faz VI Rotorlarının Geometrik Parametreleri

Rotor Parametreleri	NREL Faz III	NREL Faz VI
Pala Sayısı	3	2
Rotor Yarıçapı	5.03 m	5.03 m
Dönüş Hızı	71.63 rpm	71.63 rpm
Devreye Girme Rüzgar Hızı	6 m/s	6 m/s
Anma Gücü	19.8 kW	19.8 kW
Kanat Göbek Uzantısı Uzunluğu	0.723 m	1.275 m
Pala Hatve Set Açısı	3°	0°
Burkulma Açısı	Lineer olmayan: 44° (kök) — 0° (uç)	Lineer olmayan: 20° (kök) — -1.775° (uç)
Pala Daralma Oranı	Sabit	Lineer
Kök Veter Uzunluğu	0.4572 m	0.737 m
Uç Veter Uzunluğu	0.4572 m	0.358 m
Kanat Kesiti	S809	S809

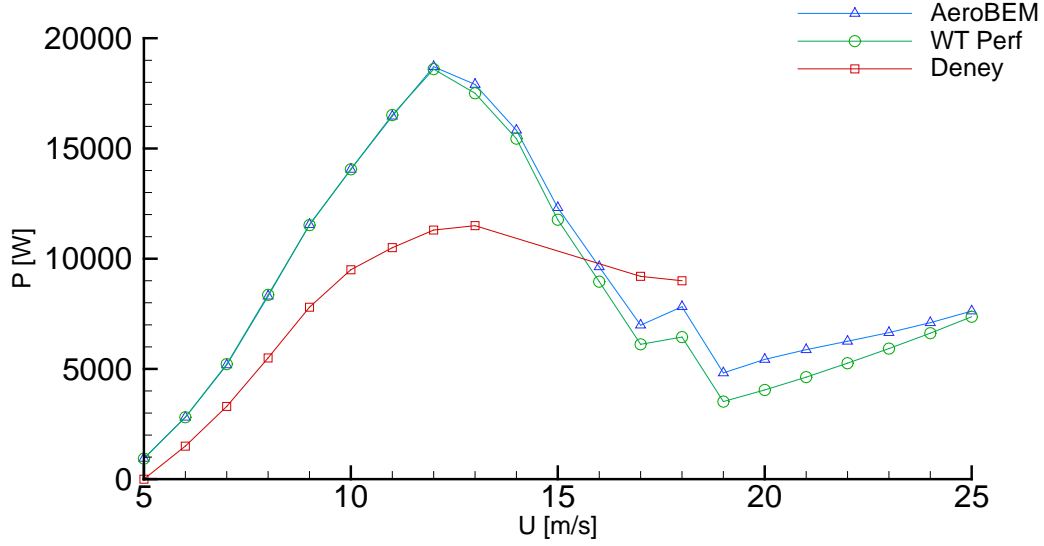


Şekil 5. NREL Faz III ve NREL Faz VI Rotor Palalarının Veter Uzunluğu Dağılımı

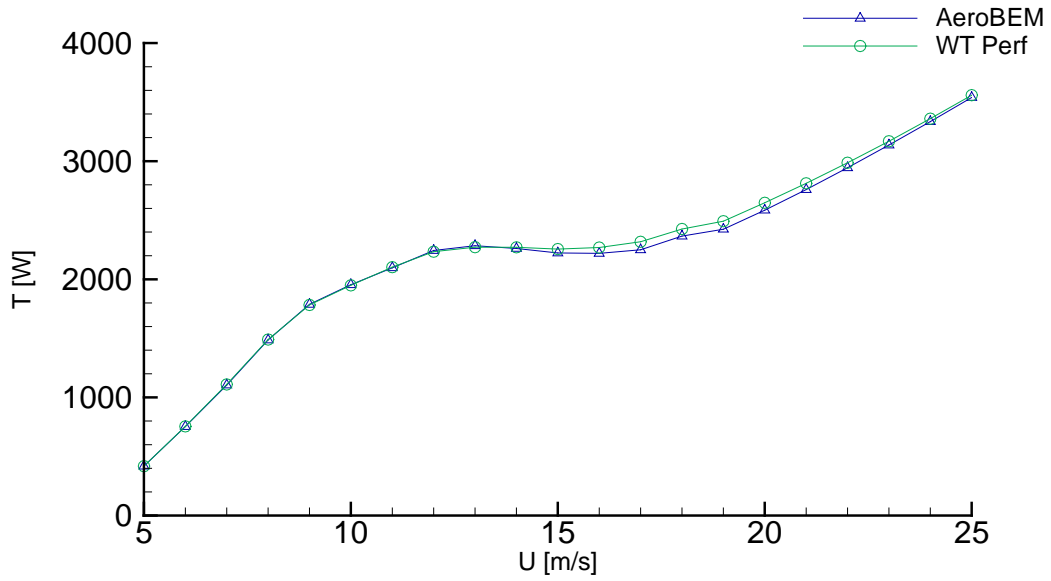


Şekil 6. NREL Faz III ve NREL Faz VI Rotor Palalarının Burkulma Açısı Dağılımı

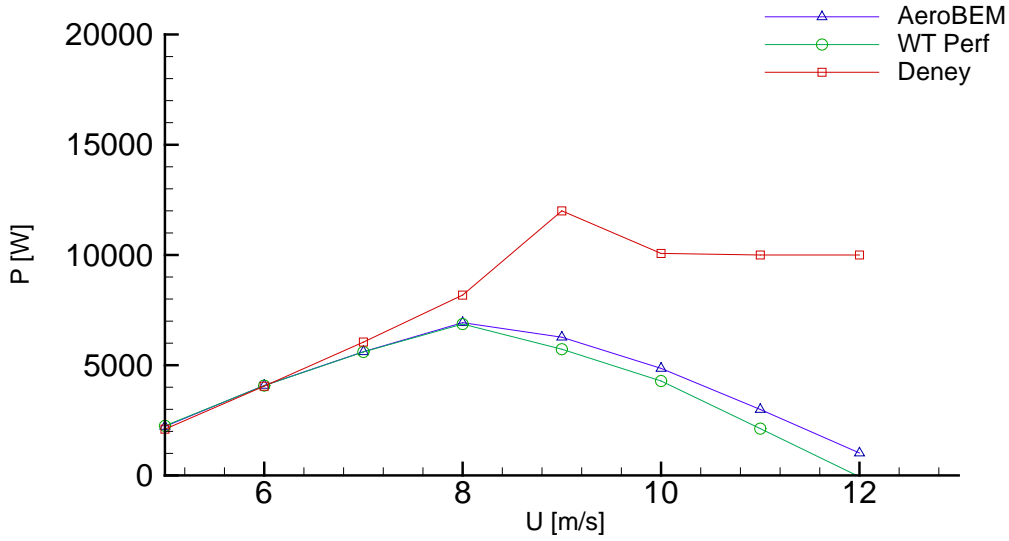
BEM analiz sonuçları, NREL tarafından geliştirilmiş, BEM teorisini kullanarak hesaplama yapan bir açık kaynak kod olan “WT Perf” yazılımı sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. NREL Faz III rotoru güç eğrisi karşılaştırması Şekil 7’de, itki eğrisi karşılaştırması Şekil 8’de; NREL Faz VI rotoru güç eğrisi karşılaştırması Şekil 9’da, itki eğrisi karşılaştırması Şekil 10’da gösterilmiştir.



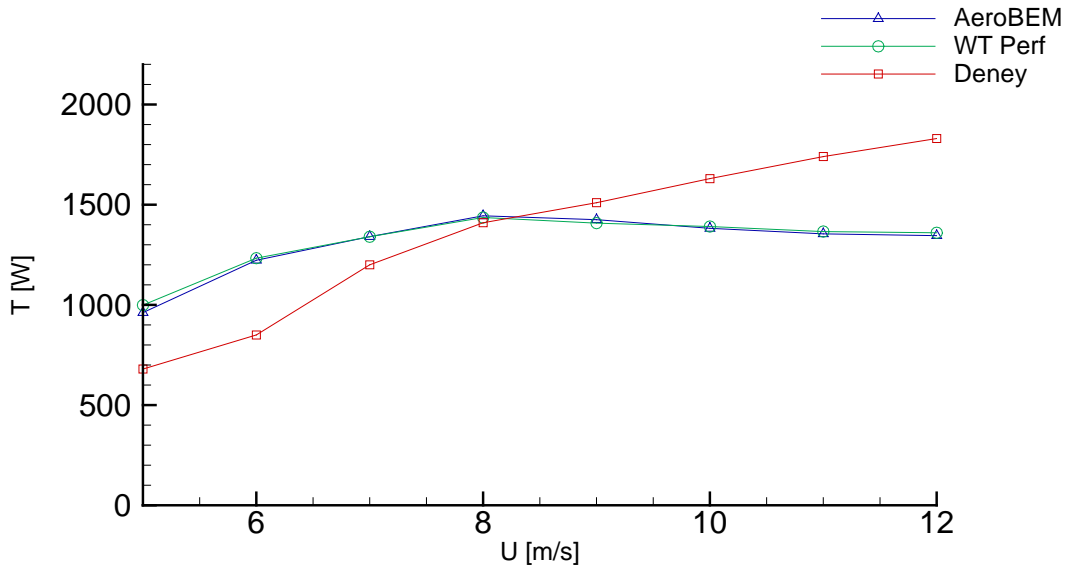
Şekil 7. NREL Faz III Rotoru Güç Eğrisi Karşılaştırması



Şekil 8. NREL Faz III Rotoru İtki Eğrisi Karşılaştırması



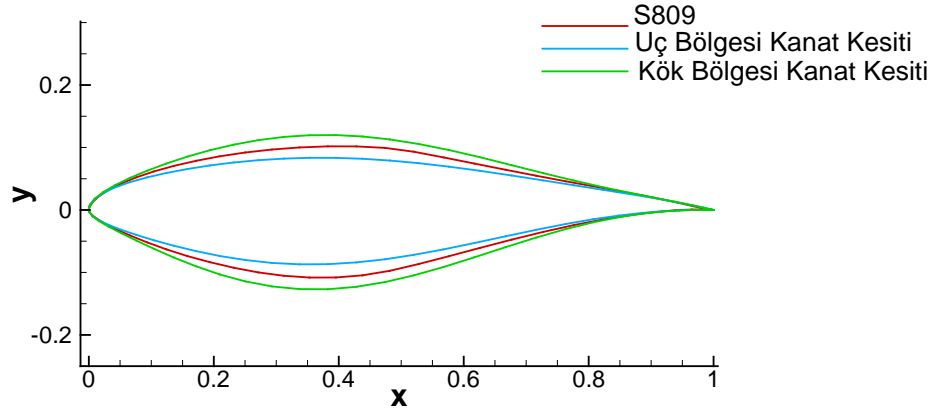
Şekil 9. NREL Faz VI Rotoru Güç Eğrisi Karşılaştırması



Şekil 10. NREL Faz VI Rotoru İtke Eğrisi Karşılaştırması

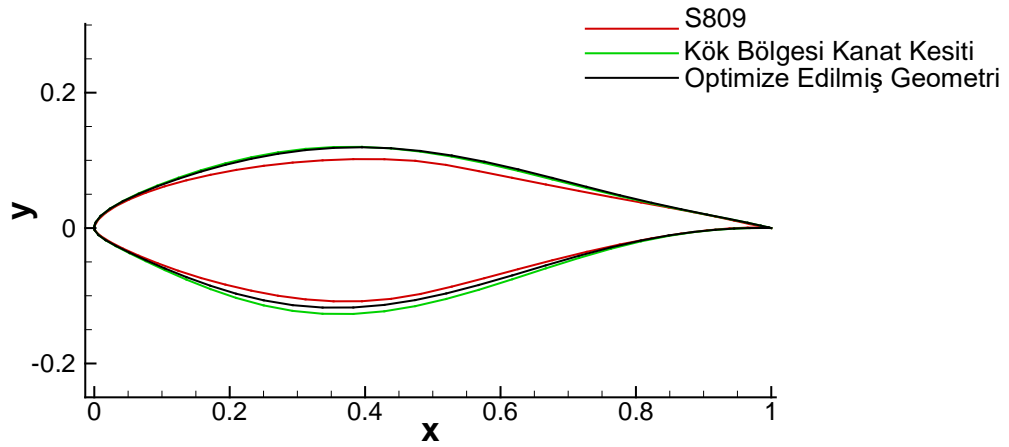
3.4 CST Metodu ile Kanat Kesiti Optimizasyonu

Bu bölümde, pala yarıçapı boyunca belirlenen farklı bölgelerde değişken kanat kesiti tasarlanması amaçlanmıştır. Öncelikle pala; pala kök bölgesi, pala orta bölgesi ve pala uç bölgesi olmak üzere üç bölgeye bölünmüştür. Pala kök bölgesinde, S809 kanat kesitinden CST metodu ile türetilen daha kalın bir kanat profili temel alınıp, bu profilin ağırlık katsayıları genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Pala orta bölgesinde S809 kanat kesiti geometrisi değiştirilmeden kullanılmıştır. Pala uç bölgesinde ise, yine S809 kanat kesitinden CST metodu ile türetilen daha ince bir kanat profili temel alınıp, bu profilin ağırlık katsayıları genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Şekil 11'de pala kök bölgesi ve pala uç bölgesinde optimizasyonda temel alınan profillerin S809 profili ile karşılaştırması verilmiştir. Bu temel geometrileri oluşturmak için, CST ağırlık katsayıları parametrelerinden kanat kesitinin orta kısımlarındaki kalınlık dağılımını etkileyenler %20 artırılıp ve azaltılarak, sırasıyla kalın ve ince profiller elde edilmiştir.



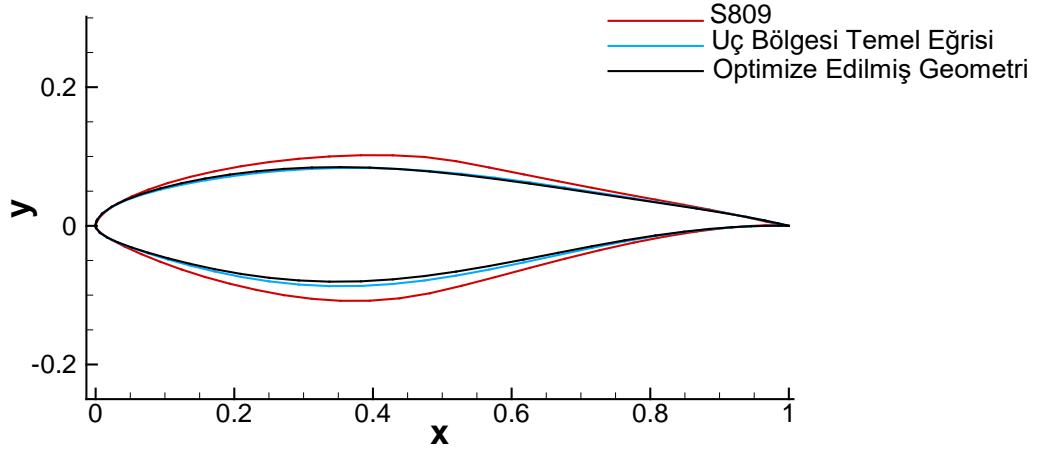
Şekil 11. Kök Bölgesi ve Uç Bölgesinde Optimizasyonda Temel Alınan Kalın ve İnce Kanat Kesiti Geometrilerinin S809 Profili ile Karşılaştırması

Pala kök bölgesi için, Şekil 11’de yeşil renkli eğri ile verilen temel kanat kesiti geometrisi üst ve alt yüzeyleri 6. dereceden CST parametreleri, ağırlık katsayısı parametreleri, ile tanımlanmıştır. Toplam 12 adet olan CST ağırlık katsayılarından kesit kalınlığına etkiyen 6 tanesi, optimizasyon girdisi olarak verilmiştir. 5° hücum açısı ve 1.000.000 Reynolds sayısı için XFOIL ile hesaplanan C_l/C_d oranının maksimize edilmesi optimizasyon hedefi olarak belirlenmiştir. Genetik algoritma ile elde edilen optimizasyon sonucunun S809 geometrisi ve pala kök bölgesi optimizasyonunda temel alınan geometri ile karşılaştırması Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Pala Kök Bölgesi için Optimize Edilen Kanat Kesiti Geometrisinin S809 Profili ve Pala Kök Bölgesi Optimizasyonunda Temel Alınan Geometri ile Karşılaştırması

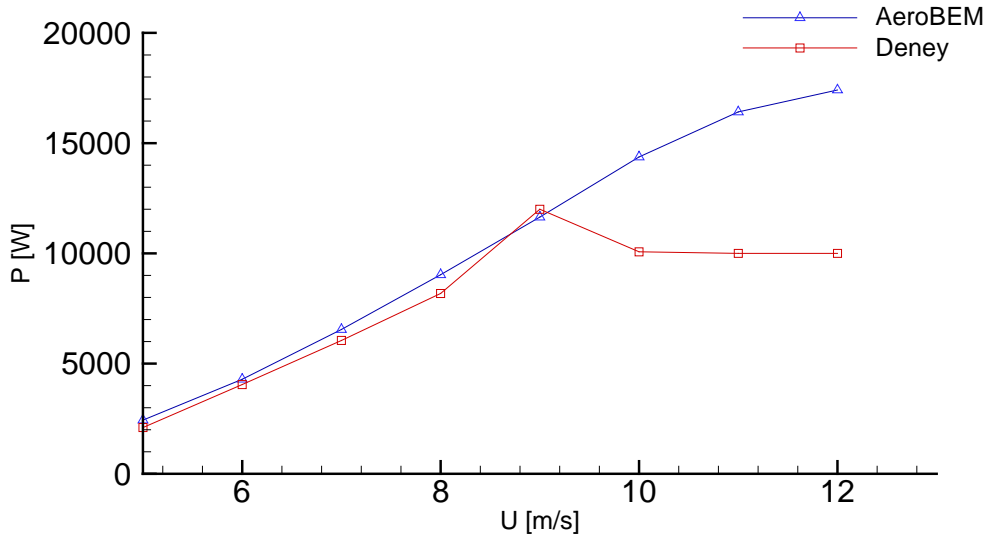
Pala uç bölgesi için, Şekil 11’de mavi renkli eğri ile verilen temel kanat kesiti geometrisi üst ve alt yüzeyleri 6. dereceden CST parametreleri ile tanımlanmıştır. Toplam 12 adet olan CST ağırlık katsayılarından kesit kalınlığına etkiyen 6 tanesi, optimizasyon girdisi olarak verilmiştir. 5° hücum açısı ve 5.000.000 Reynolds sayısı için XFOIL ile hesaplanan C_l/C_d oranının maksimize edilmesi optimizasyon hedefi olarak belirlenmiştir. Genetik algoritma ile elde edilen optimizasyon sonucunun S809 geometrisi ve pala uç bölgesi optimizasyonunda temel alınan geometri ile karşılaştırması Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 13. Pala Uç Bölgesi için Optimize Edilen Kanat Kesiti Geometrisinin S809 Profili ve Pala Uç Bölgesi Optimizasyonunda Temel Alınan Geometri ile Karşılaştırması

3.5 Optimize Edilen Kanat Kesitleriyle Pala Tasarımı

Bu bölümde, pala kök bölgesi ((%25-50R) ve pala uç bölgesi (%75-100R) için optimize edilen kalın ve ince kanat kesitlerinin türbin güç performansına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, NREL Faz VI türbini baz alınarak optimize edilmiş kanat kesitleriyle aynı veter ve burkulma açısı dağılımına sahip yeni bir türbin palası tasarlanmıştır. Şekil 14'te yeni tasarlanan rotor ile NREL Faz VI rotoru güç eğrisi karşılaştırması verilmiştir. Optimize edilmiş kanat kesitleri kullanılarak tasarlanan türbinin güç performansının arttığı görülmüştür.



Şekil 14. Üç Farklı Kanat Kesiti Kullanan Yeni Tasarlanan Rotor ile NREL Faz VI Rotoru Güç Eğrisi Karşılaştırması

4. SONUÇ

Bu çalışmada yatay eksenli rüzgâr türbini rotor palalarının ve kanat kesitlerinin aerodinamik optimizasyonu Sınıf-Şekil Transformasyonu (CST) Metodu, XFOIL, BEM ve Genetik Algoritma kullanılarak yapılmıştır. BEM kodu için doğrulama çalışmaları NREL referans türbinleri için yapılmıştır. Daha sonra, seçilen iki kanat kesiti için CST yöntemi test edilmiştir. Ardından yeni bir türbin palası tasarımı için CST metodu ile iki farklı kanat kesiti kök bölgesi

için kalın olan ve uç bölgesi için daha ince olan kanat kesitleri, optimize edilmiştir. Bu yeni kanat kesitleri ile birlikte üç kesit kullanan tasarlanan yeni rotor palasının aerodinamik performansı NREL Faz VI türbini ile karşılaştırılmıştır. Devam eden çalışmalarda, palanın planform optimizasyonu için veter uzunluğu ve burkulma açısının etkileri incelenerek pala planformu optimizasyonu yapılacaktır. Kanat kesiti ve pala planformu, bu çalışmadaki yazılan kodlarla ve bu yöntemle hepsi birlikte de optimize edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Ceyhan, O.**, “Aerodynamic Design and Optimization of Horizontal Axis Wind Turbines by Using BEM Theory and Genetic Algorithm,” MS Thesis, METU Dept. of Aerospace Engineering, September 2008.
- [2] **Ceyhan, O., Ortakaya, Y., Korkem, B., Sezer-Uzol, N. ve Tuncer, I.H.**, “Optimization of Horizontal Axis Wind Turbines by using BEM Theory and Genetic Algorithm,” 5th Ankara International Aerospace Conference, METU Ankara, Turkey, 17-19 August 2009.
- [3] **Sağol, E., Sezer-Uzol, N., ve Uzol, O.**, “Site Specific Cost-Effective Design Optimization of A Horizontal Axis Wind Turbine,” NUYEK 2009, Nuclear & Renewable Energy Sources with International Participation, Ankara, 28-29 September 2009.
- [4] **Sağol, E.**, “Site Specific Design Optimization of A Horizontal Axis Wind Turbine Based On Minimum Cost of Energy,” MS Thesis, METU Dept. of Aerospace Engineering, January 2010.
- [5] **Polat, O., Sezer-Uzol, N., ve Tuncer, I.H.**, “Aerodynamic Optimization Of Horizontal Axis Wind Turbines Based On Potential Flow Solutions With BEM Theory And Genetic Algorithm,” ECCOMAS CFD & OPTIMIZATION 2011 - 064, An ECCOMAS Thematic Conference, Antalya, Turkey, 23-25 May 2011.
- [6] **Polat, O.**, “Genetic Algorithm Based Aerodynamic Shape Optimization of Wind Turbine Rotor Blades Using A 2-D Panel Method with a Boundary Layer Solver,” MS Thesis, METU Dept. of Aerospace Engineering, December 2011.
- [7] **Polat, O., Sezer-Uzol, N., ve Tuncer, I.H.**, “Aerodynamic Shape Optimization of Wind Turbine Blades Using A 2-D Panel Method With A Boundary Layer Solver And A Genetic Algorithm,” European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), Vienna, Austria, September 10-14, 2012.
- [8] **Polat, O., Sezer-Uzol, N., ve Tuncer, I.H.**, “Aerodynamic Shape Optimization of Wind Turbine Blades Using a Parallel Genetic Algorithm,” AIAC-2013-154, 7. Ankara International Aerospace Conference, METU, Ankara, Turkey, 11-13 September 2013.
- [9] **Polat, O., Sezer-Uzol, N., ve Tuncer, I.H.**, “Genetic Algorithm Based Aerodynamic Shape Optimization Tool for Wind Turbine Blades and its Implementation to Helicopters,” AHS 70th Forum and Technology Display, Montreal, Canada, May 19-22, 2014.
- [10] **Elfarrar, M.A., Sezer-Uzol, N., ve Akmandor, I.S.**, “Investigations on Tangential Tip Tilting for HAWT Rotor Blades,” 10th International Conference on Clean Energy, ICCE-2010, Famagusta, North Cyprus, 15-17 September 2010.
- [11] **Elfarrar, M.A., Akmandor, I.S., ve Sezer-Uzol, N.**, “Pitch Angle Design of NREL VI Wind Turbine Blade,” ECCOMAS CFD & OPTIMIZATION 2011-1080, An ECCOMAS Thematic Conference, Antalya, Turkey, 23-25 May 2011.
- [12] **Elfarrar, M.A., Akmandor, I.S., ve Sezer-Uzol, N.**, “Investigation and Optimization of Winglets for HAWT Rotor Blades,” ETC 2011, 9th European Conference on TURBOMACHINERY Fluid Dynamics and Thermodynamics, Istanbul, Turkey, 21-25 March 2011.
- [13] **Elfarrar, M.**, “Wind Turbine Design and Optimization,” PhD Thesis, METU Dept. of Aerospace Engineering, April 2010 - Ocak 2011.
- [14] **Elfarrar, M.A., Sezer-Uzol, N., ve Akmandor, I.S.**, “NREL VI Rotor Blade: Numerical Investigation and Winglet Design and Optimization Using CFD,” Wind Energy, (Online Early View, 6 February 2013) Vol 17. Issue 4. pp 605-626, April 2014.

- [15] **Elfarra, M.A., Sezer-Uzol, N., ve Akmandor, I.S.**, “Investigations on Blade Tip Tilting for HAWT Rotor Blades Using CFD,” *International Journal of Green Energy*, (Published Online: 08 Oct 2014) Vol. 12, Issue 2, pp. 125-138, 2015.
- [16] **Sobieczky, H.**, “Aerodynamic Design and Optimization Tools Accelerated by Parametric Geometry Preprocessing,” *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS 2000*, Barcelona, 11-14 September 2000.
- [17] **Kulfan B.M.**, “Universal Parametric Geometry Representation Method,” *45. Journal of Aircraft*, Vol. 45, No.1, January-February 2008.
- [18] **Kulfan B.M. and J.E. Bussoletti.**, ““Fundamental” Parametric Geometry Representations for Aircraft Component Shapes,” *11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference: The Modeling and Simulation Frontier for Multidisciplinary Design Optimization*, Virginia, USA, 6 - 8 September 2006.
- [19] **Javed F., Javed S., Bilal T., Rastogi V.**, “Design of Multiple Airfoil HAWT Blade using MATLAB Programming,” *5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications - ICRERA 2016*, November 2016.
- [20] **Barret R.T.**, “Investigation into Integrated Free-Form and Precomputational Approaches for Aerostructural Optimization of Wind Turbine Blades”, *MS Thesis*, Brigham Young University Dept. of Mechanical Engineering, January 2018.
- [21] **Liang C, Li H.**, “Aerofoil Optimization for Improving The Power Performance of a Vertical Axis Wind Turbine Using Multiple Streamtube Model and Genetic Algorithm,” *R Soc Open Sci.* 2018;5(7):180540. Published 2018 Jul 25. doi:10.1098/rsos.180540
- [22] **Ning, S.A.**, “A Simple Solution Method For The Blade Element Momentum Equations With Guaranteed Convergence,” *Wind Energy* 17(9), July 2013.