

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

Keriman OĞUZ

ASELSAN

Doç. Dr. Nilay SEZER UZOL

ODTÜ-RÜZGEM

Sunum Planı

- Giriş
- Sınıf-Şekil Transformasyonu (CST) Metodu
- Pala Elemanı Momentum (BEM) Teorisi
- Pala Kesidi Tasarımı Validasyonu ve Optimizasyonu
- Pala Tasarımı Validasyonu ve Optimizasyonu
- Sonuçlar ve Öneriler



Giriş

İyi bir pala kesidi geometrik tanımlama yönteminden beklenen özellikler

- Sürekli, pürüzsüz ve makul geometri
- Esnek yapılı
- Kısmi geometri kontrolü ve düzenlemesine izin veren
- Sistematik ve tutarlı
- Az sayıda tasarım değişkenine sahip

Çalışma Kapsamı

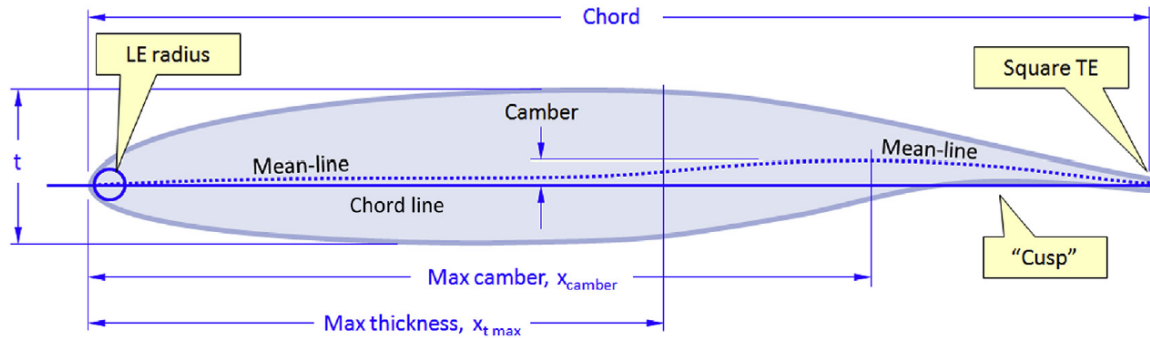
Amaç

CST Metodu ile tanımlanan pala kesitlerinin genetik algoritma ile optimizasyonu ve yatay eksenli rüzgar türbini palalarının BEM teorisi ile tasarımı

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

Sınıf-Şekil Transformasyonu (CST) Metodu

Pala kesidi geometrisinin genelleştirilmiş matematiksel tanımlanması



$$y(x) = \sqrt{x} \cdot (1 - x) \cdot \sum_{i=0}^N A_i \cdot x^i + x \cdot y_{TE}$$

Pala kesidi geometrisinin CST metodu ile tanımlanması

$$y(x) = C_{N2}^{N1}(x) \cdot S(x) + x \cdot y_{TE}$$

$$S(x) = \frac{y(x) - x \cdot y_{TE}}{\sqrt{x} \cdot [1 - x]} = \sum_{i=0}^N [A_i \cdot x^i]$$

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

$$N1 = 0.5, N2 = 1$$

*Gudmundsson, General Aviation Aircraft Design Applied Methods and Procedures, 2014.

CST Metodu

Şekil Fonksiyonu Limitleri

$$x = 0; \quad S(0) = \sqrt{2r_{LE}} \quad r_{LE} \text{ ilişkisi}$$

$$x = 1; \quad S(1) = \tan \beta + y_{TE} \quad \beta \text{ ve } y_{TE} \text{ ilişkisi}$$

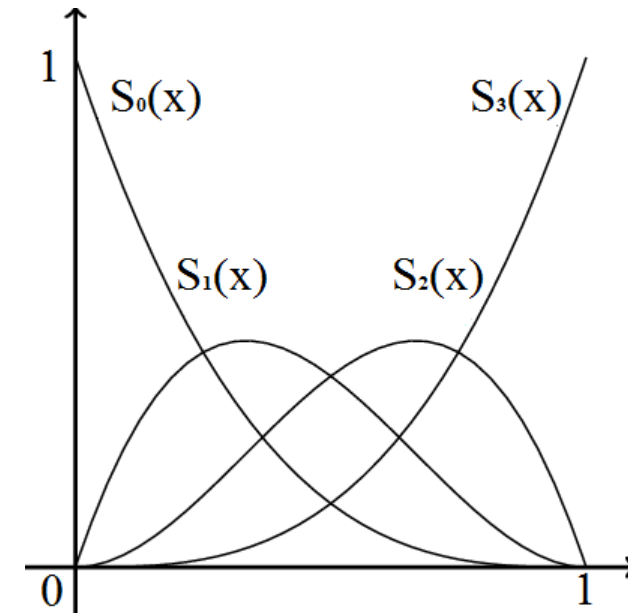
S(x)=1 Birim Şekil Fonksiyonunun Bernstein Polinomlarına Dekompozisyonu

$$S_i(x) = K_i x^i (1-x)^{n-i}; \quad K_i \equiv \binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

3. Dereceden Bernstein Polinomlarına Açılımı Örneği

$$S_0(x) = (1-x)^3 \quad S_1(x) = 3x(1-x)^2$$

$$S_2(x) = 3x^2(1-x) \quad S_3(x) = x^3$$



CST Metodu

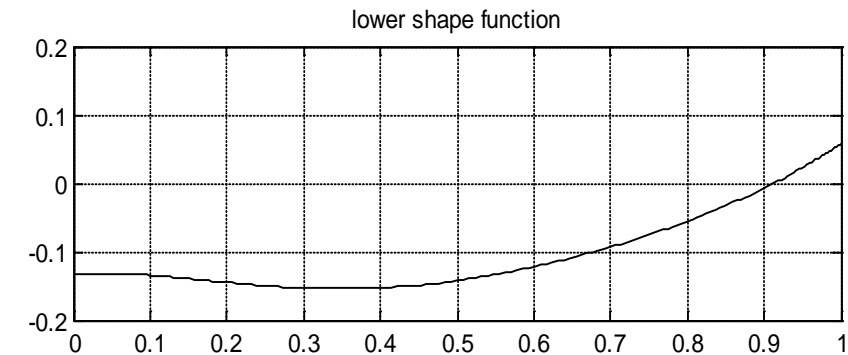
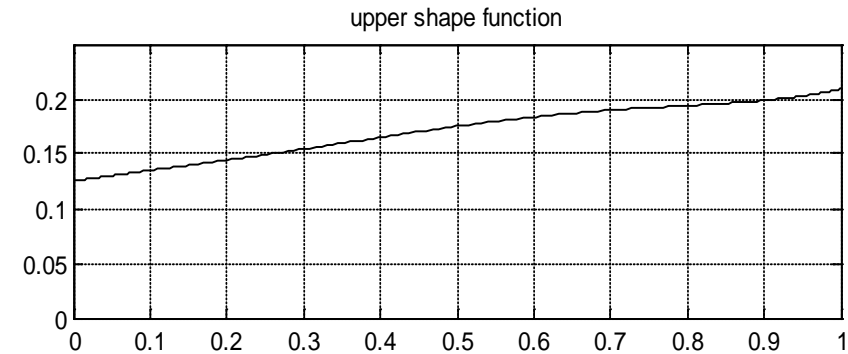
Üst ve Alt Eğrilere ait CST Fonksiyonları

$$y(x)_{üst} = C_1^{0.5}(x) \cdot S_{üst}(x) + x \cdot y_{TE,üst}$$

$$y(x)_{alt} = C_1^{0.5}(x) \cdot S_{alt}(x) + x \cdot y_{TE,alt}$$

$$S_{üst}(x) = \sum_{i=0}^n [A_{üst i} \cdot S_i(x)]$$

$$S_{alt}(x) = \sum_{i=0}^n [A_{alt i} \cdot S_i(x)]$$



RAE 2822 6. Dereceden Şekil Fonksiyonları

CST Metodu

Avantajları

- Düşük sayıda tasarım parametresi
- Garantili pürüzsüzlük
- Kolay uygulama
- Zengin tasarım alanı
- Parametre salınımlarına düşük hassasiyet

Dezavantaj

- Bombeli r_{LE} için uygulama kısıtı

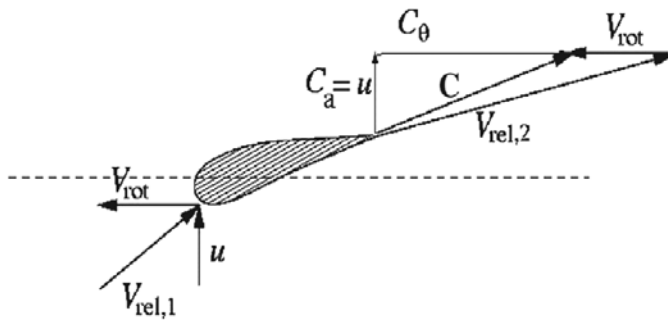
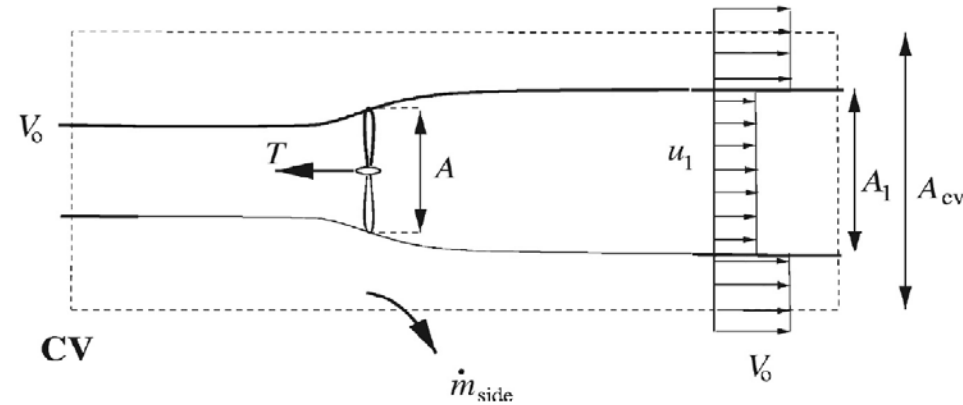
BEM Teorisi

Momentum Teorisi

$$T = \Delta p A = \frac{1}{2} \rho A (V_0^2 - u_1^2)$$

$$T = \dot{m} (V_0 - u_1) = \rho u A (V_0 - u_1)$$

$$\alpha = (V_0 - u) / V_0 \quad T = 2\rho A V_0^2 \alpha (1 - \alpha)$$



$$C_\theta = 2\alpha' \omega r$$

$$dQ = \dot{m} r C_\theta = 2\pi r \rho u C_\theta dr$$

$$dQ = 4\pi \rho \omega V_0 \alpha' (1 - \alpha) r^2 dr$$

BEM Teorisi

Pala Elemanı Teorisi

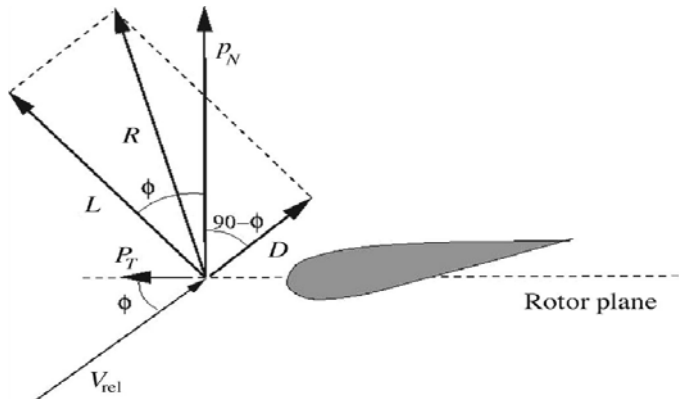
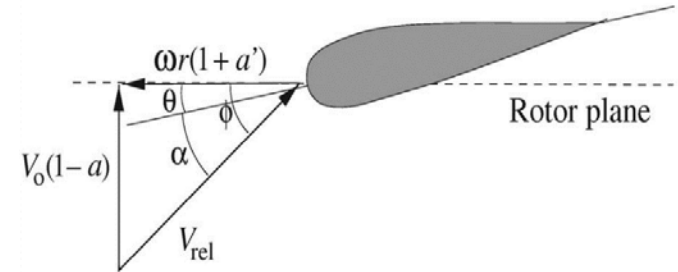
$$\alpha = \varphi - \theta$$

$$\theta = \theta_p + \beta$$

$$V_{rel} \sin \varphi = V_0(1 - \alpha)$$

$$V_{rel} \cos \varphi = \omega r(1 + \alpha')$$

$$\tan \varphi = \frac{(1 - \alpha)V_0}{(1 + \alpha')\omega r}$$



$$P_N = L \cos \varphi + D \sin \varphi \quad \& \quad P_T = L \sin \varphi - D \cos \varphi$$

$$dT = BP_N dr$$

$$dT = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_0^2 (1 - \alpha)^2}{\sin^2 \varphi} c C_n dr$$

$$dQ = rBP_T dr$$

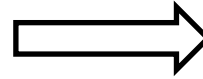
$$dQ = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_0 (1 - \alpha) \omega r (1 + \alpha')}{\sin \varphi \cos \varphi} c C_t r dr$$

BEM Teorisi

Pala Elemanı Momentum Teorisi

$$T_{pala\ elemanı} = T_{momentum}$$

$$Q_{pala\ elemanı} = Q_{momentum}$$



$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \varphi}{\sigma C_n} + 1}$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \varphi \cos \varphi}{\sigma C_t} - 1}$$

BEM Teorisi

Rotor Göbeği ve Pala Uç Kayıplarına ait Düzeltmeler – Prandtl Metodu

$$F_{uç} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left(-\frac{B (R - r)}{2 r \sin \varphi} \right) \right) \quad F_{göbek} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left(-\frac{B (r - R_{hub})}{2 r \sin \varphi} \right) \right)$$

$$F = F_{uç} \cdot F_{göbek}$$

Buhl Düzeltmesi

If $a > 0.4$

$$C_T = \left(\frac{50}{9} - 4F \right) a^2 - \left(\frac{40}{9} - 4F \right) a + \frac{8}{9}$$

$$a = \frac{1}{\frac{4 F \sin^2 \varphi}{\sigma C_n} + 1}$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 F \sin \varphi \cos \varphi}{\sigma C_t} - 1}$$

BEM Teorisi

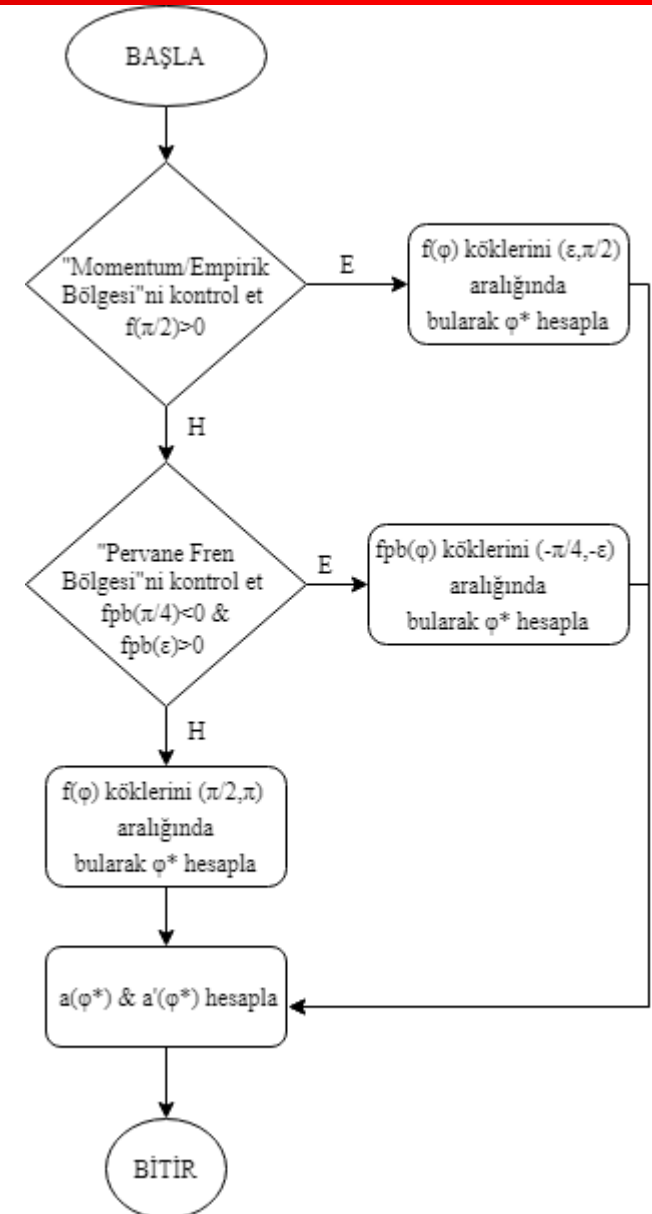
Ning'in Garantili Yakınsama Çözümü

1B doğrusal olmayan denklemin çözümü,
lokal akış açısı, φ

$$f(\varphi) = \frac{\sin \varphi}{1 - a(\varphi)} - \frac{1}{\lambda_r} \cos \varphi (1 - \kappa'(\varphi))$$

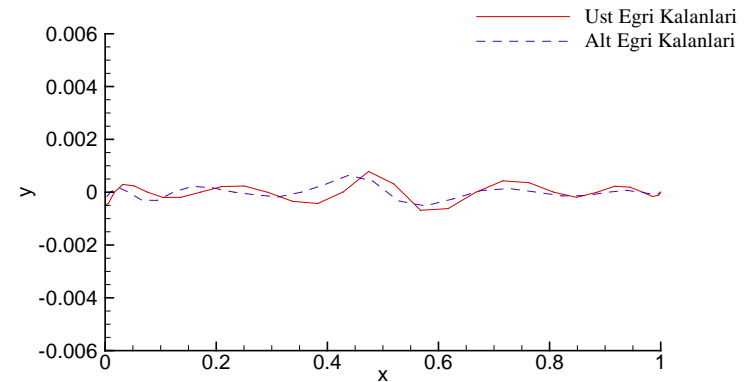
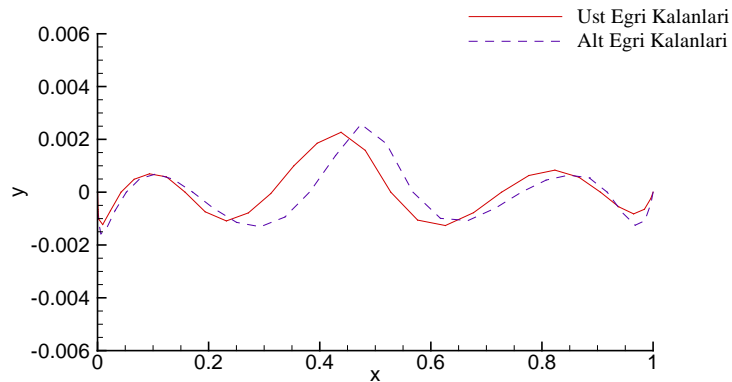
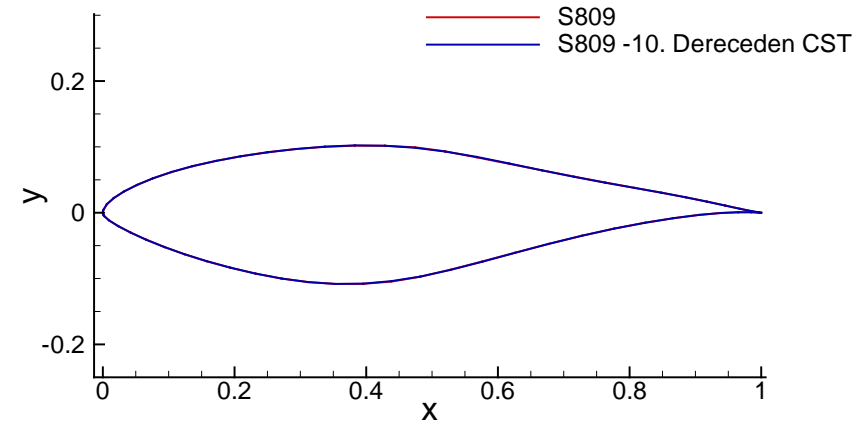
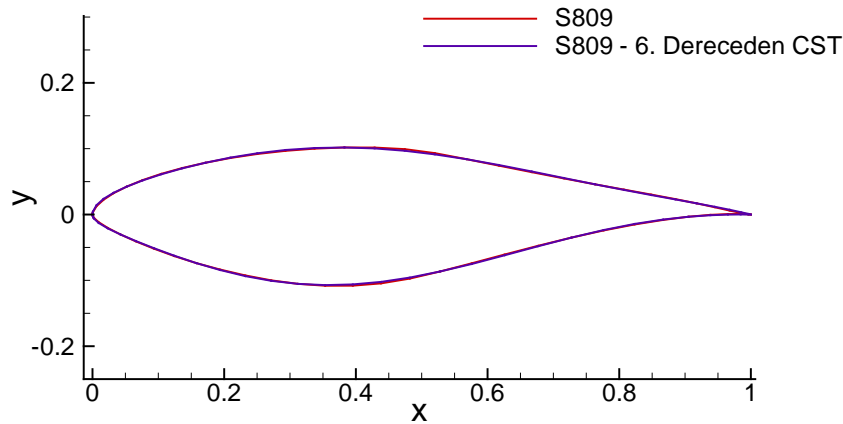
$$f_{pb}(\varphi) = \sin \varphi (1 - \kappa(\varphi)) - \frac{1}{\lambda_r} \cos \varphi (1 - \kappa'(\varphi))$$

$$\kappa(\varphi) = \frac{\sigma C_n}{4F \sin^2(\varphi)} \quad \kappa'(\varphi) = \frac{\sigma C_t}{4F \sin(\varphi) \cos(\varphi)}$$



Pala Kesidi Validasyon Çalışmaları

S809 CST Uydurmalarına Ait Sonuçlar



Pala Kesidi Optimizasyon Çalışmaları

Motivasyon: Farklı kalınlıktaki pala kesidi ailelerinin CST metodu ile oluşturulması

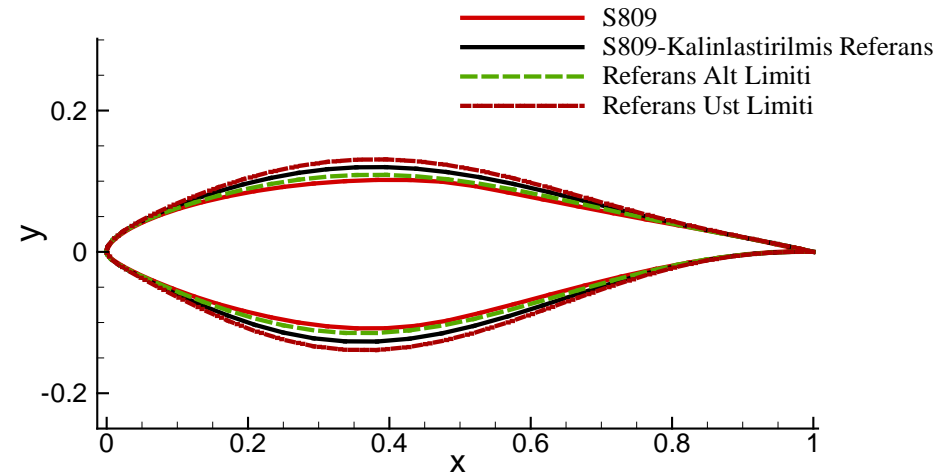
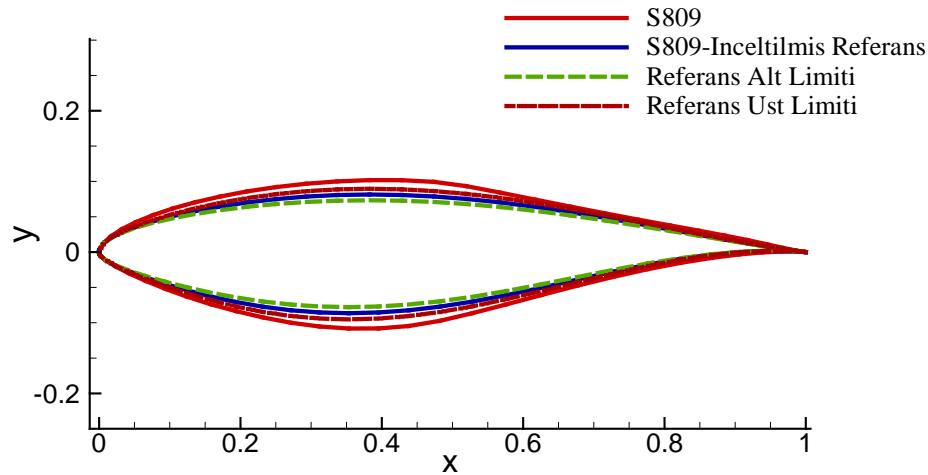
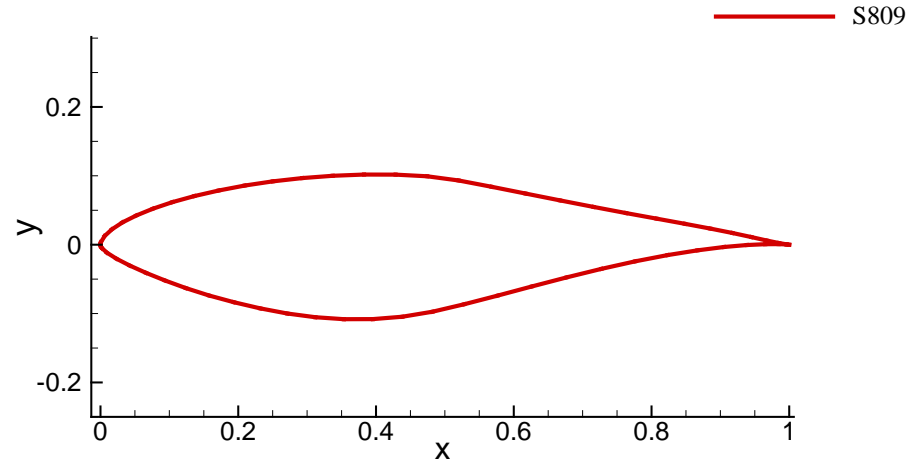
Amaç: Tanımlanmış bir akış koşulu için C_l/C_d oranının maksimize edilmesi

Tasarım Değişken Sayısı: Kalınlık ilişkili 6 adet CST değişkeni

Prosedür:

1. **Birincil referans pala kesidinin seçimi - S809**
2. **İnceltilmiş/kalınlaştırılmış referans pala kesidi geometrilerinin birincil referans pala kesidi CST katsayılarının değiştirilmesi ile oluşturulması - 20%**
3. **İnceltilmiş/kalınlaştırılmış referans pala kesidi geometrileri limitlerinin ilgili CST katsayılarının değiştirilmesi ile tanımlanması - 10%**
4. Optimizasyonun koşulması

Pala Kesidi Optimizasyon Çalışmaları



Pala Kesidi Optimizasyon Çalışmaları

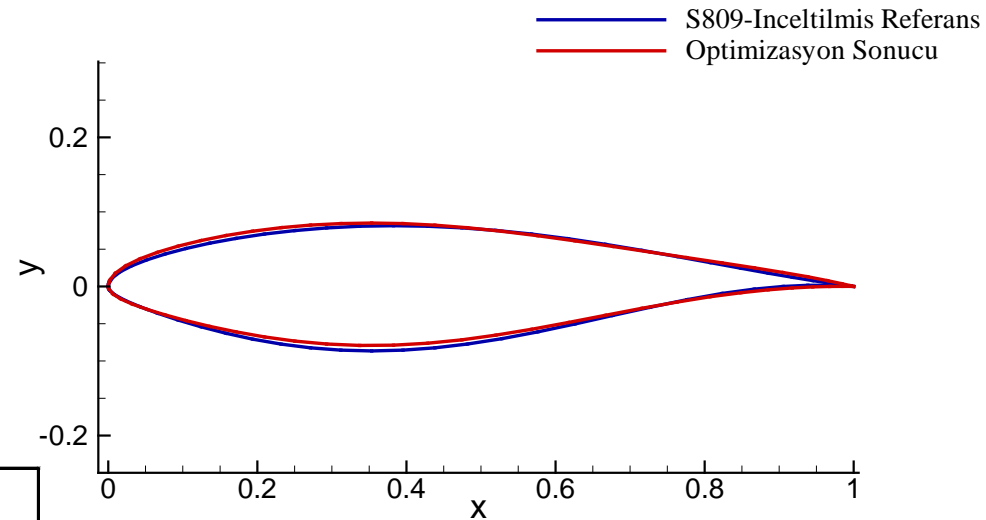
İnceltilmiş Referans Pala Kesidi Optimizasyonu

XFOIL Girdileri

AoA	5
Re	5×10^6
N _{crit}	9
Ma	0

GA Optimizasyon Girdileri

Populasyon Sayısı	75
Minimum Jenerasyon Sayısı	51
Fonksiyon Toleransı	1E-01



Pala Kesidi Optimizasyon Çalışmaları

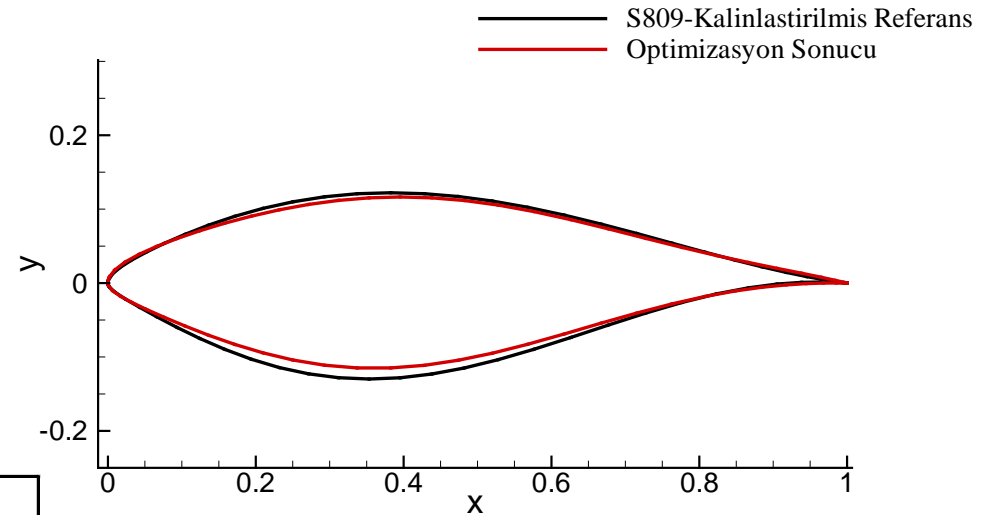
Kalınlaştırılmış Referans Pala Kesidi Optimizasyonu

XFOIL Girdileri

AoA	5
Re	1×10^6
N_{crit}	9
Ma	0

GA Optimizasyon Girdileri

Populasyon Sayısı	75
Minimum Jenerasyon Sayısı	51
Fonksiyon Toleransı	1E-01



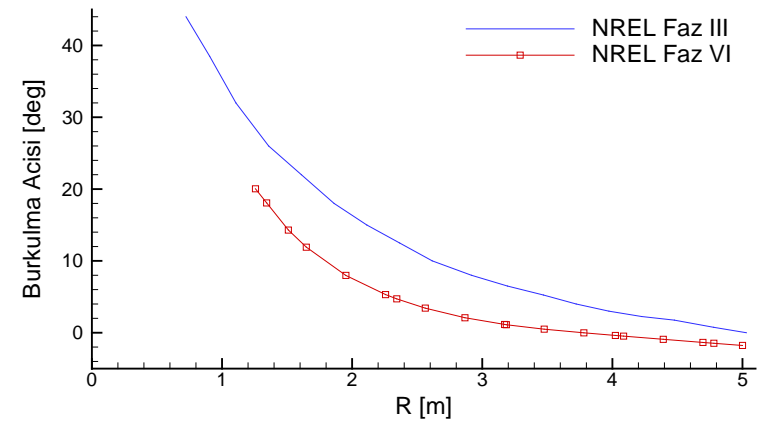
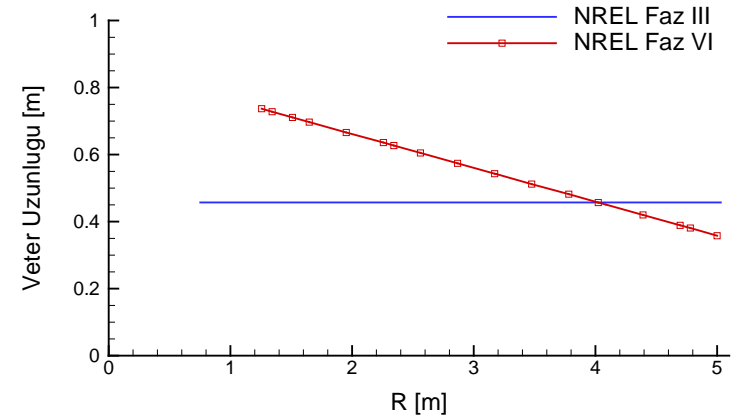
Pala Kesidi Optimizasyon Çalışmaları

C_l/C_d Performansına Göre Optimizasyon Sonuçları		
Pala Kesidi	İnceltilmiş Pala Kesidi	Kalınlaştırılmış Pala Kesidi
Referans	89,8	80,6
Alt Limit	91,5	85,5
Üst Limit	88,6	75,4
Optimize Edilmiş	96,8	88,8
Sonuç	7,7%	10,2%

CST metodu kullanılarak, esnek ve etkili bir pala kesidi tasarım aracı geliştirilmiştir.

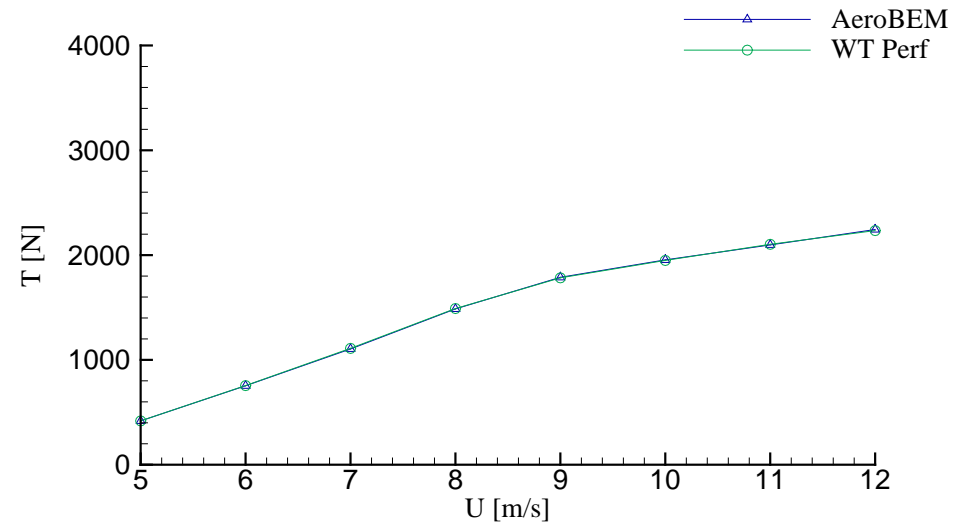
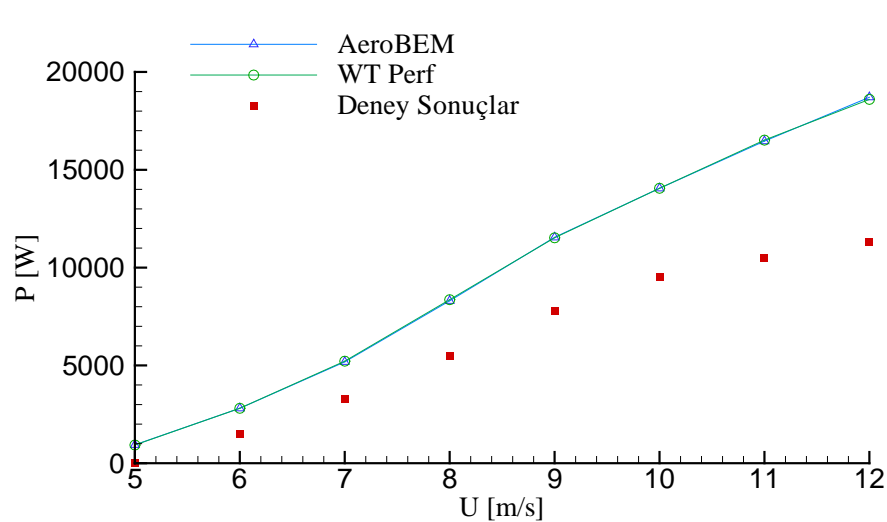
Pala Tasarımı Validasyon Çalışmaları

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



Pala Tasarımı Validasyon Çalışmaları

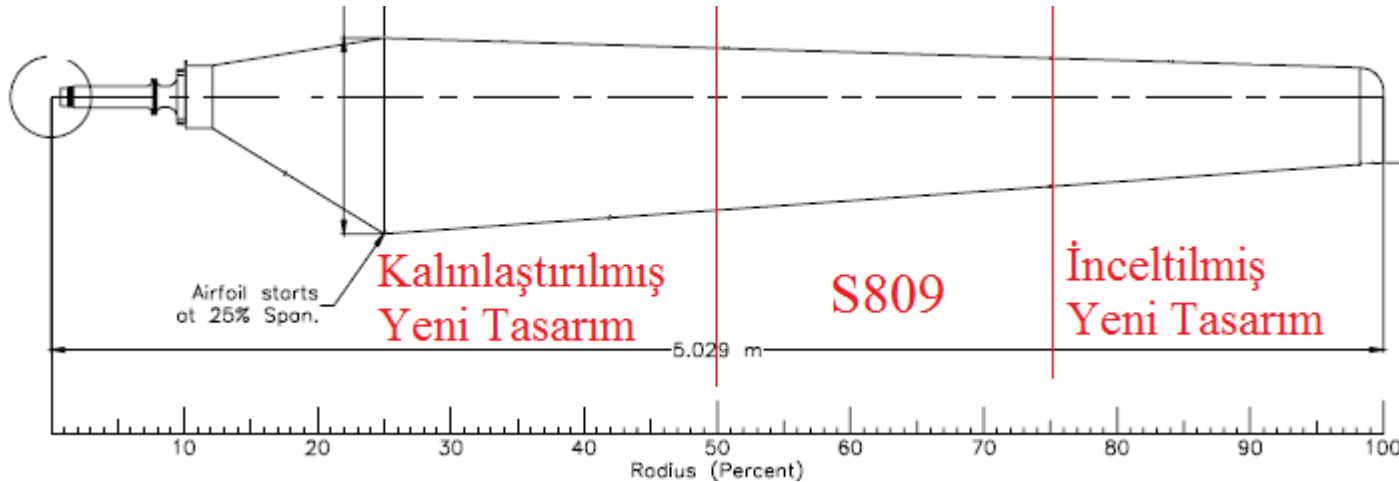
NREL Faz III Rotor Validasyon Sonuçları



Pala Tasarımı Çalışmaları

Optimize Edilmiş Pala Kesitleri ile NREL Faz VI Rüzgar Türbini Palası Tasarımı

	0-25%R	25-50%R	50-75%R	75-100%R
NREL Faz VI Palası	Pala Kök Uzantısı	S809	S809	S809
CST ile Optimize Edilmiş Pala Kesitlerinin Uygulandığı Yeni Tasarım Pala	Pala Kök Uzantısı	Kalınlaştırılmış Referanstan Optimize Edilmiş Pala Kesidi Tasarımı	S809	İnceltmiş Referanstan Optimize Edilmiş Pala Kesidi Tasarımı

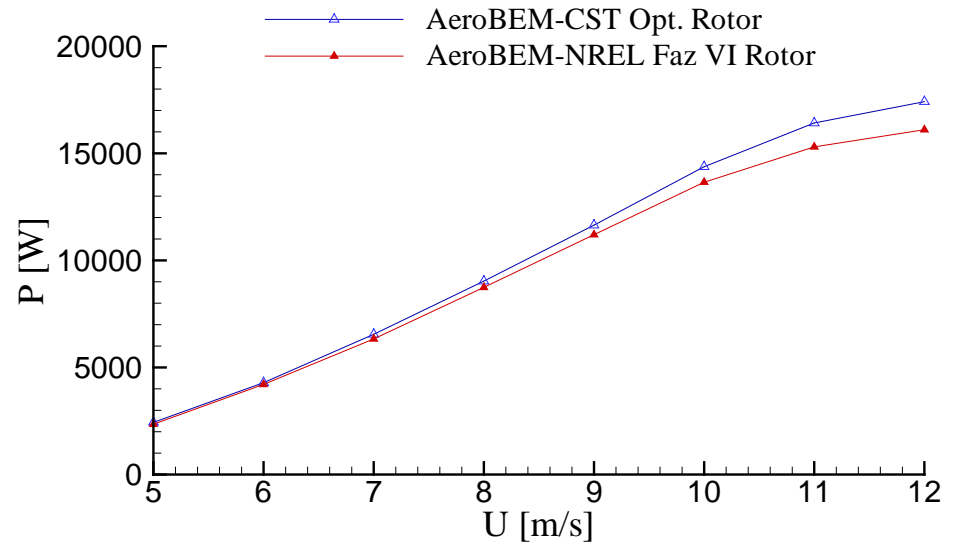


Pala Tasarımı Çalışmaları

Optimize Edilmiş Pala Kesitleri ile NREL Faz VI Rüzgar Türbini Palası Tasarımı

Performans Değerlendirme

U [m/s]	P _{NREL Faz VI} [kW]	P _{CST,OPT} [kW]	Değişim [%]
5	2,4	2,4	0,4
6	4,3	4,3	0,7
7	6,5	6,6	0,8
8	9	9,1	1,0
9	11,6	11,8	1,7
10	14,4	14,7	2,3
11	16,4	17,0	3,7
12	17,4	18,2	4,5



Sonuçlar

- CST tanımlama metoduyla pala kesidi tasarım aracı geliştirilmiştir.
- BEM Teorisi kullanan aerodinamik tasarım aracı geliştirilmiştir.
- S809 pala kesidinin farklı kalınlıklar için optimizasyonu, ve bu pala kesitleri ile NREL Faz VI türbin palasının tasarımı gerçekleştirilmiştir.
- Pala kesidi optimizasyonu ile entegre bir pala tasarım aracı geliştirilmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Öneriler

- Küt firar kenarlı pala kesitleri, hücum kenarı pürüzlülük dayanımı yüksek pala kesitleri gibi özel amaçlı pala kesidi aileleri geliştirilebilir.
- Geliştirilen pala kesitleri ve palalar için rüzgar tüneli test ve doğrulamaları yapılabilir.
- Türbin palaları için üç boyutlu CST tanımlama formülasyonları geliştirilebilir.

Teşekkürler

