

BUZLANMA KOŞULLARI ALTINDA AELOS 30 kW RÜZGAR TÜRBİN KANADININ BEM VE CST METOTLARI KULLANILARAK AERODİNAMİK ENİYİLEMESİ

Özcan Yırtıcı*
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi,
Osmaniye

İsmail H. Tuncer†
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

ÖZET

Atmosferik buzlanma koşulları altında rüzgar tarlaları türbin palleri üzerinde oluşan buz birikimi nedeniyle elektrik üretim kayıpları yaşanır. Bu çalışmada Aelos 30 kW rüzgar türbini için buzlanma koşulları altında kanat kesitlerinin aerodinamik eniyileştirilmesi yapılacaktır. Türbin kesit geometrisi tasarımında Sınıf-Şekil Transformasyonu Metodu (CST) kullanılacaktır. Böylece başlangıç kanat profili deforme edilip buzlanma koşulları altında performans kayıplarının azaltılması hedeflenecektir.

GİRİŞ

Dünya genelinde küresel ısınmanın neden olduğu iklim değişikliği ve buna bağlı olumsuz hava koşullarının artması, geleneksel tarım ve gündelik insan yaşamı üzerinde şiddetli bir olumsuz etki bırakmıştır. Bu nedenle karar vericiler fosil yakıtları ve Karbondioksit emisyonlarını azaltıcı önlemleri devreye sokmaktadır. Hatta İngiltere 2030 yılına kadar ülkede sadece elektrik ile çalışan otomobillerin satışına izin verecektir. İnsanlar elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için başta rüzgar enerjisi olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmişlerdir.

Kanada ve Avrupa Alpleri gibi soğuk iklim bölgeleri, insan yaşam bölgelerinin azlığı ve rüzgar enerjisi potansiyelinin yüksekliği nedeniyle buzlanma olmasına rağmen enerji şirketlerinin dikkatini çekmiştir. Rüzgar türbini kanatları, yapısal ve aerodinamik özellikleri gözüyle bakıldığında genellikle kök, orta ve uç kısımlara ayrılır. Kök kısmı esas olarak rüzgar türbini için yapısal faktörler gözetilerek belirlenirken, palanın geri kalan kısımları aerodinamik özellikleri gözetilerek belirlenir. Yalnız rüzgar türbininin en maliyetli ve hassas parçasının palalar olması nedeniyle bu palaların aerodinamik tasarım ve performans analizleri sektörde önemli bir yer tutar. Pal Elemanları yöntemi iki boyutlu bir yöntem olmasına rağmen çok kısa zamanda doğru çözüm verdiği için sektörde tasarım aşamasında sık kullanılır.

*Dr. Öğretim Üyesi, Bilgisayar Müh. Böl., E-posta: ozcanyirtici@osmaniye.edu.tr

†Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: ismail.h.tuncer@ae.metu.edu.tr

Bu çalışma, daha önceki çalışmaların devamı niteliğinde olup, atmosferik buzlanma koşulları altında rüzgar türbin pallerinde oluşan buz şekilleri ve buna bağlı performans kayıplarını başarılı bir şekilde hesaplayan modüle gradyan tabanlı optimizasyon eklentisi eklenecektir. Buzlanma şekil tahmini ve performans kayıpları ile ilgili doğrulama çalışmalarına [Yırtıcı, 2016, 2019] Referanslarından ulaşılabilir. Yapılacak olan optimizasyon ile başlangıç kanat profili sınıf-şekil transformasyonu (CST) metodu ile modifiye edilip, buzlanmadan kaynaklı güç kayıplarının azaltılması hedeflenmektedir.

YÖNTEM

Bu çalışmada atmosferik buzlanma koşulları altında rüzgar türbinlerindeki buzlanma ve buna bağlı kayıpları tahmin etmek için daha önce kuple edilmiş olan BEM modülü ile buzlanma tahmin modülüne buz birikimini azaltmak için gradyan tabanlı optimizasyon modülü eklenmiştir. Kullanılan metodoloji hakkında kapsamlı bilgi bir sonraki üç ana altbaşlık altında verilmiştir.

Gradyan Tabanlı Optimizasyon ve Gradyan Vektörü Soğuk iklim bölgelerinde rüzgar türbini tarafından üretilen enerji kayıplarını azaltmak yatırımcılar açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle buz birikimini azaltmak ve böylelikle ilgili enerji kayıpları düşürmek için aerodinamik şekil eniyilemesi yapılabilir. Gradyan tabanlı optimizasyon uygulamasında en önemli unsur, maximize edilecek olan amaç fonksiyonunun, O , optimizasyon değişkenlerine olan duyarlılığını gösteren gradyan vektörünün hesaplanmasıdır. Bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak seçilen rüzgar türbini için buzlanmış palaların güç üretimi alınmıştır. Amaç fonksiyonu sonlu farklar yöntemi ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{\partial O}{\partial A_i} \approx \frac{O(A_i + \epsilon) - O(A_i)}{\epsilon} \quad (1)$$

Yukarıdaki ifadede A_i tasarım değişkenleri olup, sınıf-şekil transformasyonu yönteminde şekil fonksiyonlarının pertürb edilmiş halinin büyüklüğü olup, ϵ pertürbasyon miktarını gösterir. Başlangıç kanat profili ile optimizasyon süreci aşamasında kanat deformasyonu Sınıf-Şekil Transformasyonu (CST) yöntemi ile sağlanır. Bu yöntem ile ilgili ayrıntılı bilgi bir sonraki altbaşlıkta verilmiştir.

Sınıf-Şekil Transformasyonu Metodu: Sınıf-Şekil Transformasyonu (CST) metodu, iki ve üç boyutlu kompleks geometrileri tanımlamak için Bernstein polinomlarını kullanan bir matematiksel transformasyon tekniğidir. Literatüre bu tekniği ilk olarak 2007 yılında Brenda Kulfan adlı bir mühendis kazandırmıştır [Kulfan, 2007]. Bu yöntemde şekil fonksiyonu profil kesitinin geometrisini tanımlarken, sınıf fonksiyonu başlıca farklı geometriler için uygulanabilir yöntemi sağlar. Matematiksel olarak üst ve alt kanat kesitleri için en genel bir ifadeyle Sınıf-Şekil Transformasyonu aşağıdaki gibi verilir.

$$\zeta_u(\psi) = C_{N1}^{N2}(\psi) \cdot S_u(\psi) + \psi \cdot \Delta\zeta \quad (2)$$

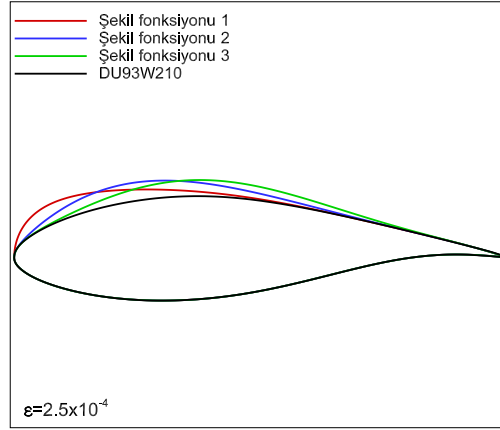
$$\zeta_l(\psi) = C_{N1}^{N2}(\psi) \cdot S_l(\psi) + \psi \cdot \Delta\zeta \quad (3)$$

Üst kısımda verilen denklemlerde C sınıf, S şekil fonksiyonlarını ve $\Delta\zeta$ kuyruk kalınlık oranını göstermektedir. Keskin kenarlı kanat profilleri için bu değer sıfırdır. Sınıf fonksiyonunun ($C(\psi)$) genel formda tanımlanması aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$C_{N1}^{N2}(\psi) = \psi^{N1} \cdot (-\psi^{N2}) \quad (4)$$

Bu fonksiyonda $N1$ ve $N2$ birer sabit sayı olup, temel geometri sınıfını belirlerler. $N1 = 0.5$, $N2 = 0.5$ çifti eliptik airfoil kesidini tanımlarken, $N1 = 0.5$, $N2 = 1.0$ çifti yuvarlak burunlu bir airfoil kesidini belirtmek için kullanılır. Farklı geometrileri oluşturmak için kullanılabilecek değişik $N1$, $N2$ çiftlerinin değerleri Kulfan'ın [Kulfan, 2007] çalışmasında bulunabilir. Üst ve alt kenarlar için şekil fonksiyonu ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$S_u(\psi) = \sum_{i=0}^{N_u} A_u(i) \cdot S(\psi, i) \quad (5)$$



Şekil 1: DU93W210 Kanat Profili Ve Deformasyon İçin Kullanılacak Fonksiyonlarının Etki Alanları.

$$S_l(\psi) = \sum_{i=0}^{N_l} A_u(i) \cdot S(\psi, i) \quad (6)$$

Yukarıda N sabiti Bernstein polinomunun derecesini ifade ederken, A sabiti eğrilik oranını belirler.

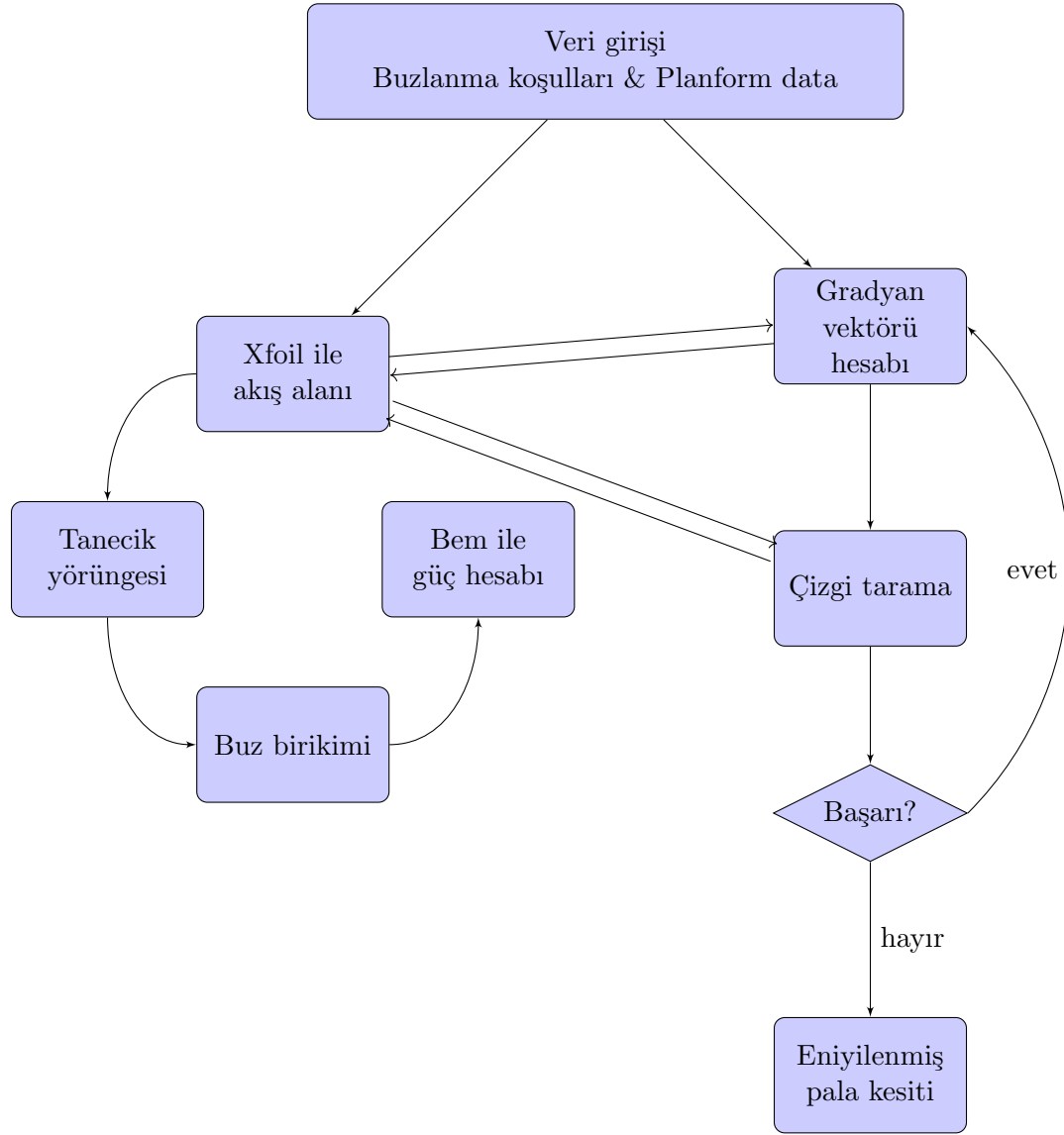
$$S(\psi, i) = K_i^N \psi_i \cdot (-\psi_i)^{N-i}, \quad \text{ve} \quad K_i^N = \frac{N!}{i!(N-i)!} \quad (7)$$

Yukarıdaki denklemlerde $S(\psi, i)$ Bernstein polinomu olup, K_i^N ise Binom katsayısını ifade eder. İstenilen kanat profili için bu katsayılar herhangi bir eğri uydurma yöntemi için bulunabilir ve bu bulunan katsayı değerleri değiştirilerek farklı kanat profilleri elde edilebilir. Bu çalışmada DU93W210 kanat profili için elde edilen katsayılar daha sonra yeni kanat kesiti geometrileri oluşturmak için kullanılacaktır. Bunun için seçilen şekil fonksiyonları pertürb edilerek kanat profili modifiye edilecektir. Şekil 1'de başlangıç kanat profili ve kullanılacak şekil fonksiyonlarının etki alanları üst kanat için gösterilmiştir.

Basit bir çizgi tarama algoritması amaç fonksiyonunu maximize etmek için hesaplanan gradyan vektörü boyunca başlangıç kanat profilini pertürb ederek kanadı modifiye eder. Bundan dolayı optimizasyon süreci içinde amaç fonksiyonu tekrar tekrar hesaplanır.

Pal Elemanları Yöntemi (BEM) Teorisi Pal Elemanları Yöntemi (BEM) helikopter ve rüzgar türbini palası tasarımı ve performans analizinde en sık kullanılan metodlardan birisidir. Bu yöntemde pal elemanından elde edilen kuvvetin bu pal elemanının dönmesinden meydana gelen ve sadece bir tek dairesel halkadan geçen akışkanın momentumundaki değişim oranından sorumlu olduğunu varsayar. Teorideki denklemler rotor tarafından üretilen itki kuvvetinin eksensel momentum değişim oranına eşit olması varsayımına dayanarak oluşturulur. İteratif olarak eksensel ve teğetsel etki faktörleri hesaplandıktan sonra bu etki faktörlerine göre ilgili pala elemanının sisteme olan tork ve güç katkısı bulunur. Literatürde kullanılan BEM modülleri genelde panel yöntemi ile ampirik yaklaşımları bir arada kullanır. Düşük hücum açılarında kaldırma ve sürüklenme katsayıları panel yöntemi kullanılarak hesaplanırken, yüksek hücum açılarında Viterna [Viterna, 1981] yöntemi gibi yaklaşımlar kullanılır. Bu çalışma için düşük hücum açılarında XFOIL [Drela, 1980] panel çözücüsü kullanılarak gerekli aerodinamik katsayılar hesaplanmıştır. XFOIL etkileşimli bir dizayn ve analiz aracı olup viskoz akışlarda kanat profilinin aerodinamik niceliklerini çok yüksek hücum açılarında çıkmadıkça doğru bir şekilde hesaplamaktadır. XFOIL açık kaynaklı bir yazılım olup ilk olarak 1986 yılında Mark Drela tarafından yazıldıktan sonra yıllar içerisinde çeşitli modifikasyon ve düzeltmelere uğramıştır.

Buzlanma Tahmini Buz birikimi tahmini yapılırken verilen başlangıç kanat profili ve hava koşulları altında su taneciklerinin yörüngelerini Lagrangian bir yaklaşım ile hesaplamakta ve konvektif ısı



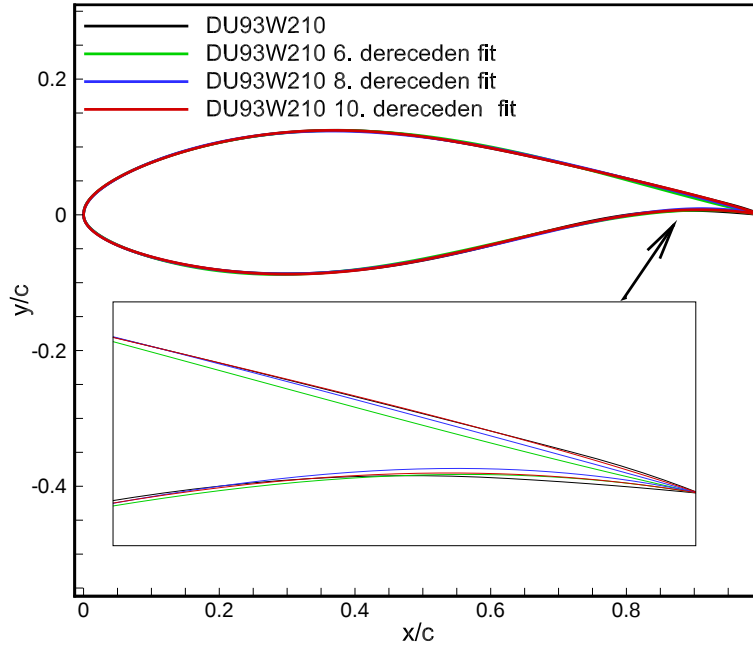
Şekil 2: Kullanılan Metodolojinin Akış Şeması

transferi katsayıları için integral sınır tabakası denklemlerini kullanmaktadır. Buzlanmış kanat profilini tahmin etmek için ise genişletilmiş Messinger modeli uygulanır. Bu model standart faz değişim yöntemine dayanır. Faz değişim problemi; buz ve su tabakalarının enerji denklemleri, kütle korunumu denklemi ve buz/su arayüzündeki faz değişim koşulu olmak üzere dört denklem ile belirlenir[Myers, 2001]. Program, verilen hava şartlarına bağlı olarak karşı ve camısı buz birikim tahmini yapabilmektedir. Bu modül ile ilgili daha ayrıntılı bilgi [ÖzgenS., 2008, 2010] referanslarında bulunabilir.

Bir bütün olarak kullanılan bu metodolojinin akış şeması Şekil 2'de verilmiştir. Optimizasyon ve gradyen vektörü hesaplama kısmı sürücü kısmı oluşturur ve eniyilenmiş kanat profili elde edilene kadar, rüzgar türbini için sürekli olarak buzlanma ve güç hesabı yapılır.

UYGULAMALAR

Sınıf-Şekil Transformasyonu Metodu (CST) Doğrulamaları Bu çalışmada ilk olarak CST için yazılan Fortran kodu, değişik dereceler kullanılarak Aelos türbin palasını oluşturan DU93-W-210 kanat profilini tanımlamak için kullanılacaktır.



Şekil 3: DU93W210 Kanat Kesiti İçin Yapılan Farklı Dereceden Sınıf-Şekil Transformasyonları

Şekil 3’de DU93W210 kanat profili için değişik dereceden CST sonuçları gösterilmiştir. Sınıf-Şekil Transformasyon yöntemi kanat profilini oldukça başarılı bir şekilde oluşturabilmiştir. Farklı dereceden fit edilen geometriler karşılaştırıldığında 8. derece CST kullanmak, kanat kesiti geometrisini yüksek çözünürlükte elde etmek için yeterlidir.

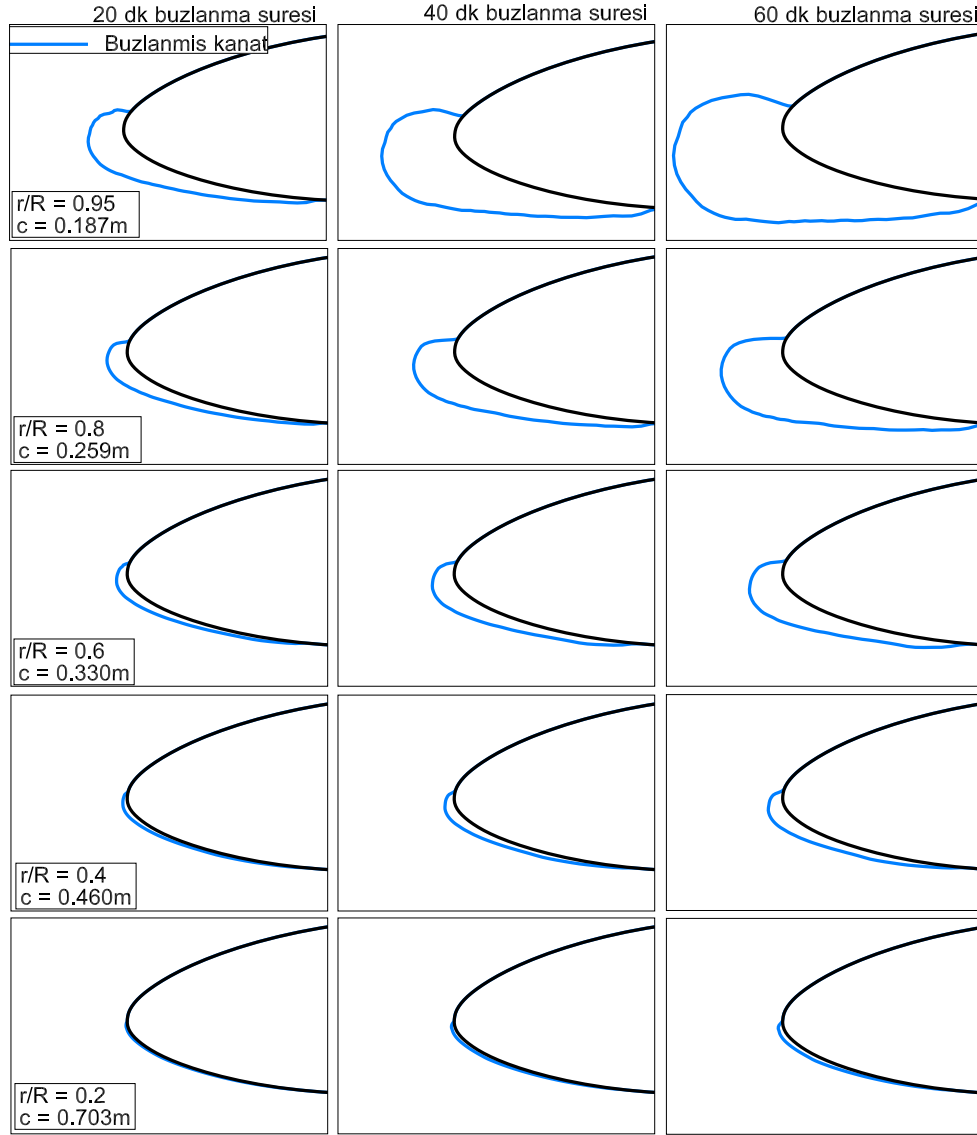
Optimizasyon Kesitlerinin Tanımlanması İçin Aelos 30 kW Rüzgar Türbin Palasında Buzlanma Olayı Simülasyonu Sınıf-Şekil Transformasyonu Metodunda optimizasyon kesitlerini tanımlamak için seçilen Aelos 30 kW rüzgar türbin palasının bir atmosferik buzlanma olayı simüle edilmiştir. Buzlanma koşulları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Atmosferik Buzlanma Koşulları.

Ortam sıcaklığı	-10.0 °C
Serbest akış hızı	11 m/s
Sıvı su içeriği	0.05 g/m ³
Damlacık çapı	27 µm
Toplam buzlanma zamanı	20, 40, 60 dakika
Çevre basıncı	95610 Pa

Şekil 2’de gösterilen buz şekilleri incelendiğinde genel olarak gövde kısmından uca doğru gidilrken rölatif hızın artmasının ve kord uzunluğunun azalmasına bağlı olarak biriken buz miktarı oransal olarak artmaktadır. Rüzgar hızı değişikçe buz kalınlıklarında gözle görülür bir ayrışma olmamasına rağmen, kanat profili ile etkileşecek rölatif hız vektörünün gördüğü hücum açısının artmasına bağlı olarak buz birikimi alt kanatta daha çok gerçekleşir. Buzlanmış kanat profillerinde buz oluşumu ençok kord uzunluğunun 2/3’ne kadar ulaşabilmektedir. Bu nedenle başlangıç kanat profili kord uzunluğunun yarısına tesir edecek şekilde modifiye edip, eniyileştirme çalışması gerçekleştirilecektir. Kanat kesidini modifiye etmek için kullanılacak olan üç tümsek fonksiyonunun üst yüzeydeki etki alanları Şekil 1’de gösterilmiştir.

Kanat Kesitinin Optimizasyonu Bu kısımda, Tablo 1’de verilen atmosferik buzlanma koşulları içinde 20 dakikalık bir buzlanma zamanı için eniyileme çalışması yapılmıştır. En iyileme sonucunda

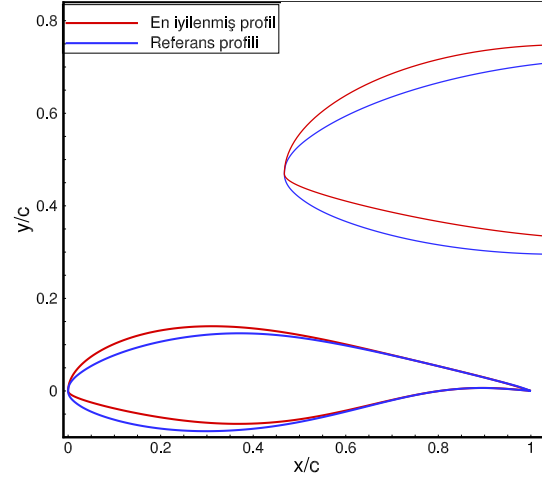


Şekil 4: Aelos 30 kW Rüzgar Türbini İçin Farklı Zamanlarda Buzlanmış Kanat Profilleri.

elde edilen referans ve optimize edilmiş kanat profilleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 6'da kökten tipe doğru giderken pal üzerinde farklı kesitler için temiz ve buzlanmış geometriler hem en iyilenmiş hem referans kanat profilleri için verilmiştir. Buzlanmış geometriler incelendiğinde en iyilenmiş kanat profilinin tüm kesitler boyunca referans kanat profiline göre daha az girintili çıkıntılı şekil verdiği görülmüştür. Bu pürüzlülük oranı buzlanmış kanat üzerinde bir güç artışına neden olmasına rağmen temiz geometride bir azalış gözlenmiştir. Bundan dolayı bu çalışmada bir sonraki aşama için aerodinamik şekil optimizasyonu sırasında temiz kanat profili için güç üretimini düşürmeyecek şekilde bir kısıtlama fonksiyonunun eklenmesi gerekmektedir.

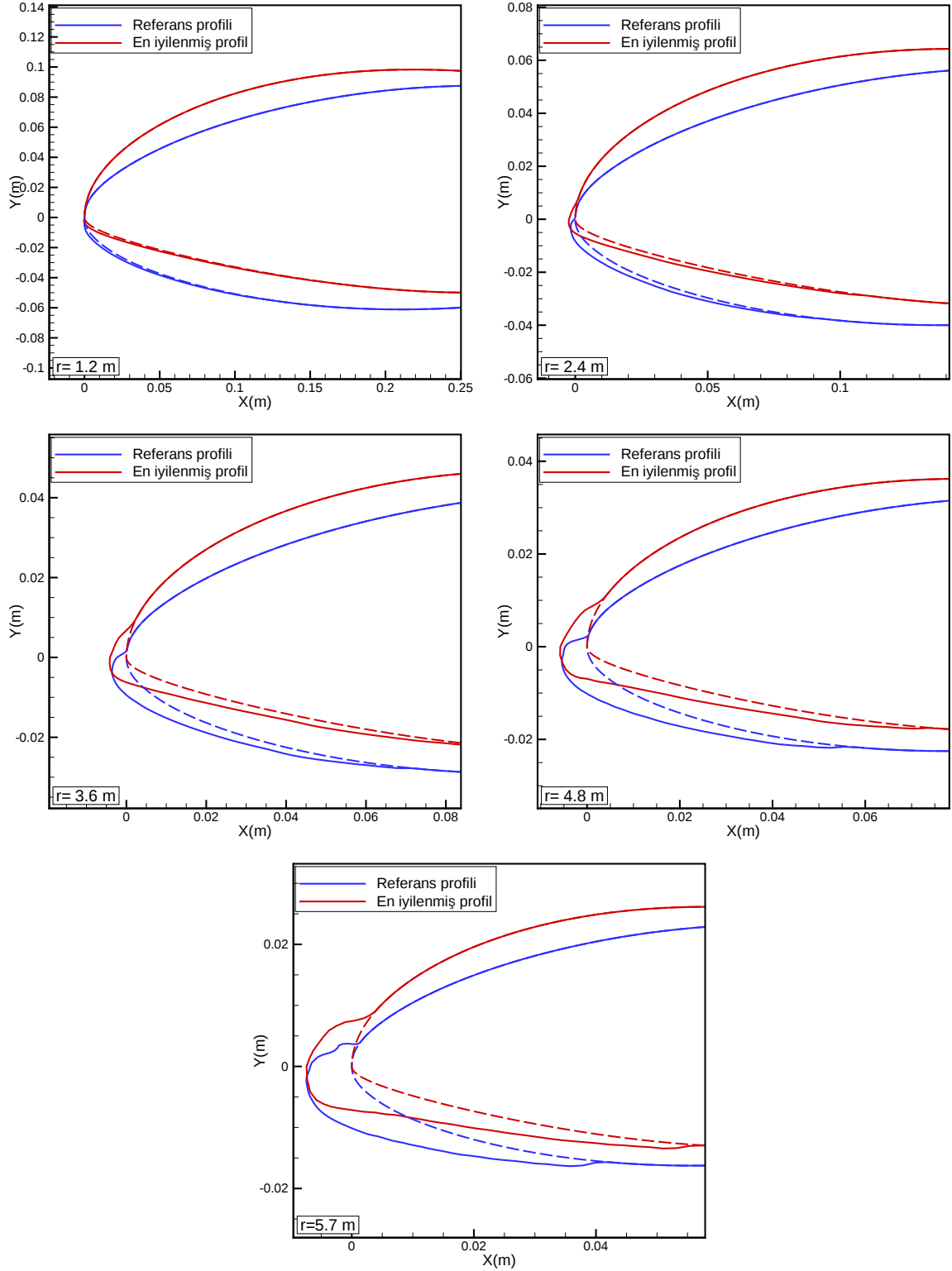
SONUÇ

Bu çalışmada, rüzgar türbin palasında buzlanmadan kaynaklı güç üretim kayıplarını azaltmak için kanat profili tasarımında Sınıf-Şekil Transformasyonu (CST) metodunu kullanarak bir eniyileştirme çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda CST metodu ile kanat başarılı bir şekilde yaratılmış ve kanat modifikasyonu için tümsek fonksiyonları oluşturulmuştur. Eniyileştirme çalışması sonucu referans profili üzerinde yapılan değişimler ile daha az pürüzlü buzlanmanın elde edildiği gözlenmiştir. Yalnız temiz paller için güç üretiminin en iyileştirilmiş kanat profilinde azalmış olması bu çalışmada amaç



Şekil 5: En İyilenmiş Ve Referans Kanat Profillerinin Beraber Gösterimi.

fonksiyonuna bir kısıtlama konulması gerekliliğini ortaya koymuştur. Bir sonraki aşamada kısıtlama fonksiyonu eklenmiş amaç fonksiyonu ile eniyileme çalışması yapılacaktır.



Şekil 6: En İyilenmiş Ve Referans Kanat Profilleri İçin 20 Dakikalık Buzlanma Süresi Sonunda Pal Üzerinde Kökten Uca Doğru Giderken Farklı Kesitler İçin Temiz Ve Buzlanmış Profiller.

Kaynaklar

- Viterna L. A., Corrigan R. C., 1981. *Fixed pitch rotor performance of large horizontal axis wind turbines*, DOE/NASA Workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbines, Cleveland, Ohio, July 1981
- Kulfan BM, 2008. *Universal parametric geometry representation method*, Journal of aircraft, 45(1):142-58.
- Myers Tim G., 2001. *Extension to the Messinger Model for Aircraft Icing*, AIAA Journal, Vol. 39, No.2
- Özgen S., Canıbek M. *Ice Accretion Simulation on Multi-Element Airfoils using Extended Messinger Model*, Heat Mass Transfer, DOI 10.1007/s00231-008-0430-4
- Özgen S., Canıbek M. *In Flight Icing Simulation with Supercooled Large Droplet Effects*, 7th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 19-21 July 2010, Antalya, Turkey
- XFOIL resmi internet sitesi, 2014. <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>, siteyi son ziyaret 15.12.2019 tarihinde yapıldı.
- Yırtıcı Ö., Özgen S. ve Tuncer İ.H., 2016. *Ice accretion prediction on wind turbines and consequent power losses*, Journal of Physics: Conference Series. Vol.753. No.2. IOP Publishing.
- Yırtıcı Ö., Özgen S. ve Tuncer İ.H., 2019. *Predictions of ice formations on wind turbine blades and power production losses due to icing*, Wind Energy, 22(7), 945-958.