

# RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE ATMOSFERİK BUZLANMA VE GÜÇ EĞRİSİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

**Erdem Demir, Ferhat Bingöl**

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü<sup>1</sup>

erdemdemir@iyte.edu.tr, ferhatbingol@iyte.edu.tr

## ÖZET

Rüzgar enerjisinin yaygınlaşması ile rüzgar türbinleri günümüzde çok farklı iklim koşullarında konumlandırılmakta ve bu iklim koşullarında üretim yapılmaktadır. Rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu kuzey ülkeleri ve yüksek rakımlı sahalarda konumlandırılan türbinlerde kış mevsimlerinde gözlemlenen buzlanma, enerji üretiminin düşmesine ve ya tamamen durdurulmasına, türbinlerin mekanik olarak daha çabuk yorulmasına ve buz fırlatarak çevresindeki yapılar ve canlılar için tehlike oluşturmaktadır. Buzlanmayı önlemek için çeşitli çalışmalar sürdürülse de belirlenen standart bir yöntem henüz bulunmuş değildir. Aynı zamanda buzlanma mekanizması da henüz tam anlamı ile modellenenmiş değildir. Buzlanmanın kanat yapısını değiştirerek aerodinamik özelliklerini değiştirdiği, bu nedenle olması gerekenden farklı üretim yapması türbinin güç eğrisinin değişmesine sebebiyet vermektedir. Bu çalışmada atmosferik buzlanma ve bunun türbin kanatları üzerindeki yapısı ve güç eğrisine olan etkisi 5MW NREL türbin modeli ile BEM simülasyonu kullanılarak çalışılmış ve güç eğrisinde buzlanmanın yarattığı etki incelenip, buzlanma olması muhtemel sahalarda uygulanarak daha düşük belirsizliğe sahip enerji analizleri yapılarak, daha verimli yatırımlar yapılması amaçlanmıştır.

## 1. GİRİŞ

Rüzgar türbinlerinin kapasite faktörleri buzlanma tarafından birkaç farklı şekilde etkilenir. Yoğun buzlanmanın olduğu yerlerde, türbinlerin yapısal bütünlüğünü korumak için tamamen kapatılması seçeneklerden biri olmaktadır. Türbinlerin tamamen kapatılması aynı zamanda üretimde tamamen durma anlamına gelmektedir. Buzlanma aynı zamanda türbin kanatlarının aerodinamik özelliklerini bozarak, geciken durma ile aşırı yüklenerek ve buz birikmesi nedeniyle kanatlarda oluşan dengesizlik ve buna bağlı olarak erken gelişen yapısal yaşlanma olarak kendini gösterir [1]. Aerodinamik özelliklerin buzlanma sebebi ile değişmesine bağlı olarak ve türbin üzerindeki kontrol elemanlarının donmasına bağlı olarak rüzgar türbinindeki güç kayıpları yıllık üretim bazında %17 lere kadar çıkabilirken bu yüzde güç katsayısında %20 ila %50 gibi değerlere ulaşabilmektedir [2]. Bu güç kayıpları buzlanma miktarına ve cinsine göre değişiklik göstermektedir.

Buzlanma soğuk iklime sahip olan bölgelerde gözlenmektedir. Soğuk iklim ise sıcaklığın uzun süre rüzgar türbinin çalışma sıcaklığının altında kaldığı bölgeler olarak adlandırılabilir. Ancak soğuk iklimlerde uzun süre sıcaklık düşük seviyelerde seyretmesine rağmen buzlanmanın gözlenmediği bölgeler olmasına rağmen daha ılıman iklimlerde yoğun buzlanmanın görülmesi sebebi ile soğuk iklim için tam bir tanım bulunmamaktadır. Bu nedenle IEA Wind Task 19 [3] tarafından tanımlanan düşük sıcaklık iklimi ve buzlanma iklimi kullanılmaktadır. Düşük sıcaklık iklimi, sıcaklığın belirli bir dönem içerisinde türbinin çalışma aralığının altında olduğu, buzlanma iklimi ise buzlanmanın gözlenmediği iklimler için kullanılmaktadır [4].

## 2. Buzlanma Çeşitleri ve Nedenleri

Rüzgar türbinlerinde buzlanma iki tip sınıfta incelenebilir, bulut içi buzlanma ve yağışa bağlı buzlanma. Bulut içi buzlanma, kar tipi buzlanma<sup>1</sup>, şeffaf buzlanma<sup>2</sup> ve ikisinin birlikte gözlemlendiği karışık buzlanma ile tanımlanırken yağışa bağlı buzlanma ise sulu kar ve yağmurun donması ile tanımlanır.

Hava sıcaklığı sıfırın altında ve saha bulut tabanının üstünde ise bulut tipi buzlanma görülür. Bulut tipi buzlanma buzlanmanın birikimi ile oluşur ve hava sıcaklığı, bağıl nem, rüzgar hızı, hava basıncı, hava yoğunluğu, sıvı su içeriği ve ortalama hacim çapı gibi atmosferik parametrelere göre değişiklik gösterir. Buzlanma üç aşamada gerçekleşir; çarpışma, toplanma ve birikme. Su damlacıkları çarpışma anında donabilir, buharlaşabilir, yavaş ya da hızlıca kanat üzerinden akabilir. Bu durumların hepsi yerel termal özelliklere ve akış dinamiklerinin durumuna göre değişiklik gösterir. Buzlanma zamana göre değişken bir olaydır.

### a. Kar Tipi Buzlanma

Kar tipi buzlanma 0°C ve -40°C arasında gözlenmektedir. Buzlanma mekanizması kısaca aşırı soğumuş su damlacıklarının çarpışma anında yüzey üzerinde donarak birikimi sonucu olmaktadır. Görünüş olarak pürüzlü, opak, beyaz ve rüzgar akış yönünde büyüme eğilimi gösterirler. Genellikle düşük rüzgar hızı, düşük sıcaklık, ve düşük sıvı su içeriği olan tabaka bulutlarının olduğu durumlarda gözlenir. [5]. Kar tipi buzlanma, buz çözme metotları ile kolayca ortadan kaldırılabilmektedir [2].

### b. Şeffaf Buzlanma

Şeffaf buzlanma yüksek rüzgar hızı ve görece yüksek sıcaklık ve yüksek sıvı su içeriğinin bulunduğu durumlarda küme tipi bulutların olduğu durumlarda gözlenir. Kar tipi buzlanmada olduğunun aksine su parçacıkları çarpma anında donmayıp kanat boyunca, firar kenarı boyunca donar. Şeffaf buzlanma buz çözme metotları ile zor ortadan kalkar çünkü kar tipi buzlanmaya göre daha çok yapışma basıncı ve fiziksel özellikleri vardı.

### c. Karışık Buzlanma

Karışık buzlanma basitçe her iki buzlanma tipinin de görüldüğü durumlardır. Karışık buzlanmanın görülme sebebi hızın ve hücum açısının bölgesel olarak değişik göstermesidir. Soğuk iklime sahip bölgelerde rüzgar türbinlerinin kurulumu ve kullanımı hem türbin kanatları, hem de türbin üzerinde bulunan cihazların donması sebebiyle oldukça kısıtlanmaktadır. Buzlanma sonucu teorik olarak elde edilen güç eğrisi önemli ölçüde değişmekte ve teorik güç azalmaktadır.

## 3. Buzlanmanın Kanat ve Türbin Üzerindeki Etkisi

Buzlanma havacılık endüstrisinde hem deneysel olarak hem nümerik olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bunun sonucunda kanat üzerinde oluşan buzlanma kaldırma katsayısında %30 luk bir azalmaya sebep olurken sürtünme katsayısında ise %50 artışa sebep olmaktadır. Bu

<sup>1</sup> Rime icing (ing.)

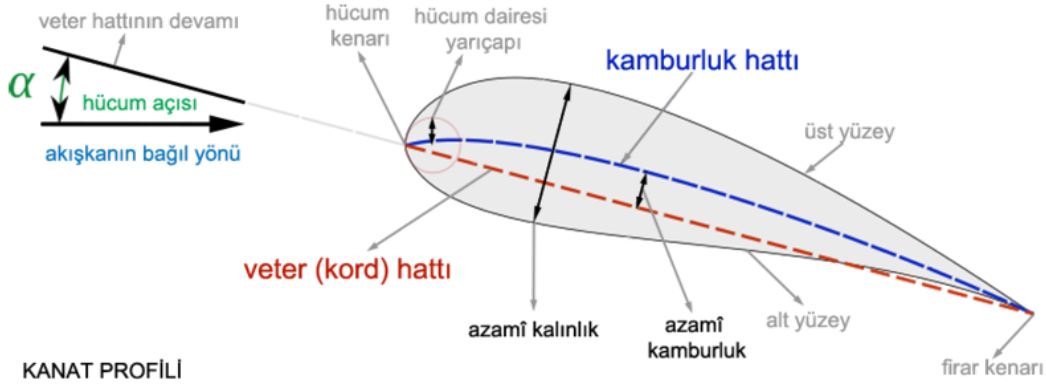
<sup>2</sup> Glaze icing(ing.)

çalışmalara göre şekillerine göre buzlanma dört gruba ayrılmıştır. Bunlar; boynuz tipi, akış boyu, pürüzlülük ve genişlik yönünde büyüyen buzlanma olarak gösterilmiştir [6]. Buzlanma tipi ve şiddeti atmosferik bir parametre olan sıvı su içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Buzlanma hem kanat üzerinde aerodinamik özellikleri değiştirerek güç eğrisinde düşüşe yol açar hem de türbin üzerinde ki aygıtları ve kontrol mekanizmalarının hatalı çalışmasına sebebiyet vererek türbinlerin güç eğrilerinde düşüşe sebep olur. Bu etkiler bir araya getirildiği zaman yıllık üretimde %17 gibi bir düşüş gözlenebilmektedir [2]. Güç eğrisinde ki kayıp buzlanma şiddetine göre değişmektedir.

Buzlanma şekilleri deneysel olarak buzlanma fotoğrafları yardımı ile ve birikim kodu ile nümerik olarak tanımlanabilmektedir. Nümerik olarak kullanılan kodlar daha sonra gerçek buzlanmaların olduğu fotoğrafların analizi ile doğrulanmakta olup iki boyutla buzlanmanın modellenmesi için kullanılmaktadır. Daha sonra nümerik model ve fotoğrafların kombinasyonu ile üç boyutlu buzlanma profilleri elde edilmektedir. Üç boyutlu model elde edildikten sonra CFD<sup>3</sup> hesaplamaları ile kanadın aerodinamik özellikleri elde edilir [6]. Yapılan bu çalışmaların sonucunda, buzlanma düşen hücum açısı( $\alpha$ ) ile ve artan kanat uzunluğuna bağlı olarak artan açısal hızın artması ile artmaktadır. Ancak meteorolojik değerlerin sahip olduğu belirsizlik nedeni ile rüzgâr santralleri için buzlanma tahmini ve simülasyonları oldukça zordur. Bu simülasyonlar buzlanma tahmini sonrası türbin rotorunun aerodinamik davranışlarını tespit etmek için kullanılmaktadır. Farklı kontrol mekanizmasına sahip türbinlerde buzlanmanın etkisi ve buna bağlı olarak güç üretimindeki düşüşte farklı olmaktadır. Örnek olarak hız kesme kontrollü türbinlerde buzlanma, temiz kanattan daha erken hız keseceği için türbinin üretim performansını da düşürür. Benzer şekilde değişken açılı türbinlerde de kontrol üniteleri kanat ve rotor üzerindeki yükü azaltmak için kanat açılarını değiştirir. Kanat üzerindeki buzlanma kanadın aerodinamik özelliklerini değiştirdiği için kanat açısı düzgün kontrol edilemez ve buna bağlı olarak optimum üretim değerleri yakalanamaz ve türbinin üretimi düşer ve kanat üzerindeki bu fazladan yük kanat bileşenlerinin erken yaşlanmasına da sebebiyet verir[7].

Buzlanma üzerinde yapılan çalışmalar buzlanmanın kanat üzerindeki hız ve basınç dağılımında ciddi değişimlere sebep olduğu gözlenmiştir. Hücum kenarının üst yüzeyinde pozitif hücum açısında yüksek hız bölgelerinin oluştuğu gözlenmiştir. Aynı şekilde firar kenarı yakınlarında üst yüzeyde re sirkülasyon bölgelerinin olduğu görülmüş ancak negatif hücum açıları için bu re sirkülasyon bölgelerinin alt yüzeye kaydığı gözlenmiştir. Aynı şekilde türbülans yoğunluğu da buz birikiminin hücum kenarının şeklinde değişime neden olup düzensiz bir şekil yarattığı için artmaktadır [1]. Kanat üzerinde buz birikiminin neden olduğu biçimsizleşmenin nümerik hesaplara göre kaldırma katsayısını pozitif hücum açıları için arttırdığı gözlenmiştir. Bu etkinin sebebi artan kanat kamburluğu ve etkin kanat veteri hattının uzamasıdır. Bu etki aynı zamanda kanadın durma hızı aralığını da artırır ancak negatif hücum açıları için ise üst yüzeyde erken akış ayrılmasına da neden olur [1]. Kanat geometrisi ve bahsi geçen terimler, Şekil 1’de örnek bir kanat üzerinde gösterilmiştir.

<sup>3</sup> Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (Computational Fluid Dynamics CFD)(ing.)



Şekil 1 Kanat Geometrisi [8]

#### 4. Buzlanma ve Atmosferik Parametrelerin Etkisi

Buzlanmanın oluşması ve buzlanma şekli için farklı atmosferik parametrelerin farklı etkileri olmaktadır. Bu etkiler; hücum açısı rüzgar hızı, kanat veteri uzunluğu, kanat profil geometrisi ve kalınlığı, sıcaklık, sıvı su içeriği, ortalama hacim çapı ve bağıl nemdir.

##### a. Hücum Açısı

Hücum açısı buzlanmanın pozisyonunu değiştirir ve eğer sıfırdan farklıysa buzlanmanın kalınlığını azaltır. Buzlanmanın tepesi her zaman kanadın verilen hücum açısı için akış ayrılma noktasında meydana gelir.

##### b. Rüzgar Hızı

Rüzgar hızı da buzlanmanın geometrik profili üzerinde etkili olan bir diğer parametredir. Düşük rüzgar hızlarında buz profili parabolik ve tek tepe noktalı olurken daha yüksek rüzgar hızlarında ise profil iki tepe noktalı hale gelir. Rüzgar hızı arttıkça aynı zamanda buz kalınlığı da artar.

##### c. Kanat veteri Uzunluğu

Buzlanmayı etkileyen bir diğer faktör de kanat veteri hattının uzunluğudur. Kanat veteri hattı uzunluğu azaldığı zaman buzun kalınlığı da buna bağlı olarak artar. Buna ek olarak kanat veteri hattı uzunluğu ile kanat kalınlığının oranı da etkilidir, oran arttıkça buzlanmanın kalınlığı da azalmaktadır. Büyük kanat veterine sahip kanatlar, küçük olanlara göre daha az damlacık toplar. Kalın profillerin daha az damlacık toplamasının nedeni, kalın profile sahip kanat profilli yapıların daha kalın hücum kenarının olması ve daha fazla damlacığın kanadın akış hattını izlemesine neden olmaktadır. Bu etkiden dolayı da kalın profile sahip kanatlarda ince profillere göre daha az buzlanma gözlenir çünkü parçacıkların etkin çarpışma oranı düştüğü için buz birikimi de düşer. Yer çekimi ve yüzerlik etkisi göz ardı edilirse damlacıklara atalet ve sürtünme etki eder [9]. Eğer damlacık üzerinde sürtünme etkisi fazla ise, damlacık kanadın üzerinde akış hattı boyunca hareket eder. Bunun tam tersi eğer atalet etkisi yüksek ise kanadın hücum kenarına çarpar. Sürtünme ve atalet oranı ise kanat boyutuna, hava ve parçacık hızına bağlıdır [1]. Bu sonuçlar göz önüne alındığında kar tipi buzlanmanın büyük boyutlu türbinlerde küçük boyutlu türbinlere oranla, buz birikimi ve kalınlık olarak büyük kanatlarda buz birikiminin daha düşük etkinliği olduğundan dolayı daha az olduğu söylenebilir. Ayrıca küçük türbinlerde tork

büyük türbinlere oranla küçük türbinlerde daha fazla olacağı için kar tipi buzlanma büyük türbinleri daha az etkilemektedir.

#### d. Sıcaklık

Sıcaklık buzlanmada en önemli parametrelerden biridir. Sıcaklığın ısı dengeye ulaştığı hızda etkin olduğu için direk olarak buzlanmanın geometrisinde etkili olmaktadır. Hava sıcaklığının  $0^{\circ}\text{C}$  ile  $-2^{\circ}\text{C}$  arasında olduğu durumlarda oluşan buzlanmada iki tane tepe noktasının olduğu, ancak sıcaklığın  $-2^{\circ}\text{C}$  altına düştüğü durumlarda ise buzlanmanın parabolik bir şekil aldığı gözlenmiştir [7]. Ancak farklı bir çalışma ise [10]  $-6^{\circ}\text{C}$  ile  $-14^{\circ}\text{C}$  arasında boynuz tipi buzlanmanın görüldüğü  $-20^{\circ}\text{C}$  de ise akış hattı boyu buzlanmanın görüldüğünü belirtmiştir.  $-6^{\circ}\text{C}$  ile  $-14^{\circ}\text{C}$  arasında da çift tepe geometrisine sahip buzlanma gözlenmiştir. Çift tepe geometrilili buzlanmanın sebebi,  $-20^{\circ}\text{C}$  de su damlacıkları çarpışma anında kanat üzerinde donarken daha yüksek sıcaklıklarda damlacıklar su filmi şeklinde hücum kenarında, çarpışma noktasında ayrılır ve konkav bir şekil oluşturarak iki tepeli geometriyi meydana getirir. Her iki durumda da biriken buz kalınlığı zamana bağlı olarak artar.

#### e. Ortalama Hacim Çapı ve Sıvı Su İçeriği

Buz profili herhangi bir sıvı su içeriği değeri için paraboliktir. Sıvı su içeriği arttıkça buzlanmanın kalınlığı artar ve sadece bu noktada etkisi vardır Aynı durum Ortalama hacim çapı için de geçerlidir.

#### f. Bağlı Nem

Bağlı nemin buzlanma profili üzerinde herhangi bir etkisi yoktur [7].

Buz yükü, ortalama hacim çapı, sıvı su içeriği ve bağlı rüzgar hızı arttıkça artar, kanat profili kalınlığı arttıkça azalır. Buz yükü için geri kalan diğer parametrelerden neredeyse bağımsız diyebiliriz.

### 5. Buzlanmanın Güç Eğrisi Üzerindeki Etkisi

Buzlanmanın güç eğrisi üzerindeki etkiyi gözlemlemek için NREL 5MW lık türbinin güç eğrisi Türbin BEM<sup>4</sup> Simülasyonu ile çalışıldı. BEM simülasyonu, Pala Elementi Teorisi<sup>5</sup> ve Momentum Teorisinin birleşimi ile oluşturulmuş bir teoridir. Bu teori sayesinde pervanede oluşan endüvi hızların hesaplanmasında kolaylıklar elde edilmiştir.

Bu çalışmada atmosferik etki olarak sadece sıcaklık göz önünde bulundurulmuştur. Normal çalışma şartlarında ve  $-20^{\circ}\text{C}$  de oluşan akış hattı boyunca buzlanma geometrisi [10] kullanılmıştır. Tablo 1 de NREL 5MW için hem normal hem de buzlanmanın olduğu modellemenin özellikleri verilmiştir. Bu tabloda, NREL 5MW türbin kanadını oluşturan profillerin hangi yarıçap aralığında kullanıldığı buzlanma ve buzlanmanın olmadığı durumlar için gösterilmiştir. Türbin kanadını oluşturan profiller ise **Şekil 1**, **Şekil 2**, **Şekil 3**, **Şekil 4**, **Şekil 5**, **Şekil 6** ve **Şekil 7**'de gösterilmiştir.

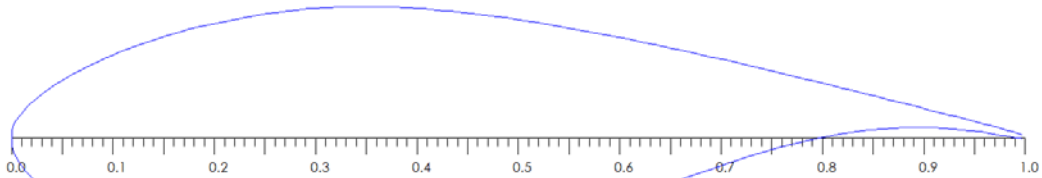
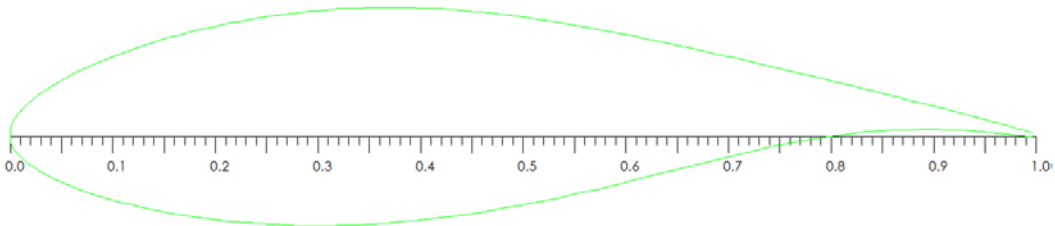
<sup>4</sup> Blade Element Momentum

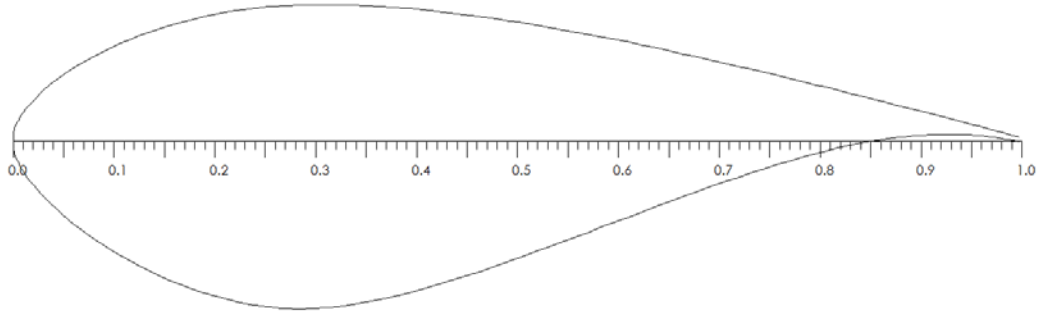
<sup>5</sup> Blade Element Theory

**Tablo 1.** NREL 5MW Türbin Kanatları

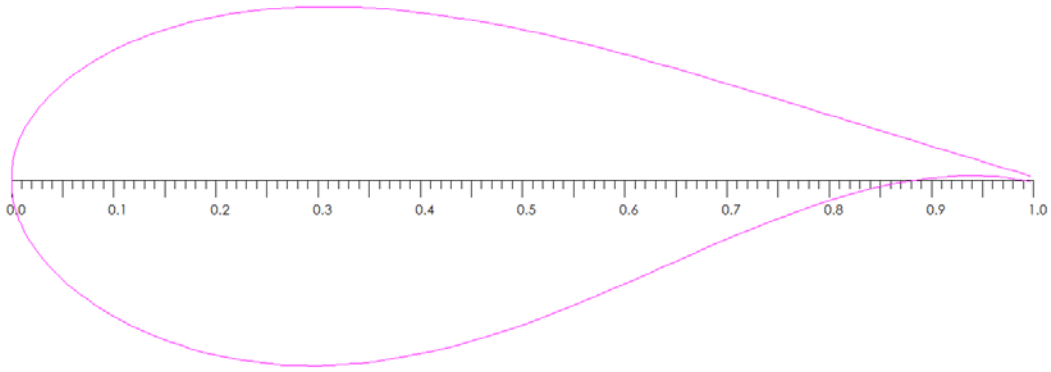
Yarıçap Pozisyonu[m]	Kanat Profil Tipi	
	Normal Şartlar	Buzlanma Durumu
0	Circular Foil 0.5	Circular Foil 0.5
1.36	Circular Foil 0.5	Circular Foil 0.5
4.10	Circular Foil 0.5	Circular Foil 0.5
6.83	Circular Foil 0.35	Circular Foil 0.35
10.25	DU99W405LM	DU99W405LM
14.35	DU99W350LM	DU99W350LM
18.45	DU99W350LM	DU99W350LM
22.55	DU97300LM	DU97300LM
26.65	DU91W2250LM	DU91W2250LM
30.75	DU91W2250LM	DU91W2250LM
34.85	DU93W210LM	DU93W210LM
38.95	DU93W210LM	DU93W210LM
43.05	NACA64618	NACA64618
47.15	NACA64618	NACA64618
51.25	NACA64618	NACA64618ICE
54.67	NACA64618	NACA64618ICE
57.4	NACA64618	NACA64618ICE
60.13	NACA64618	NACA64618ICE
61.50	NACA64618	NACA64618ICE

NREL 5MW türbine ait kanat profilleri aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.

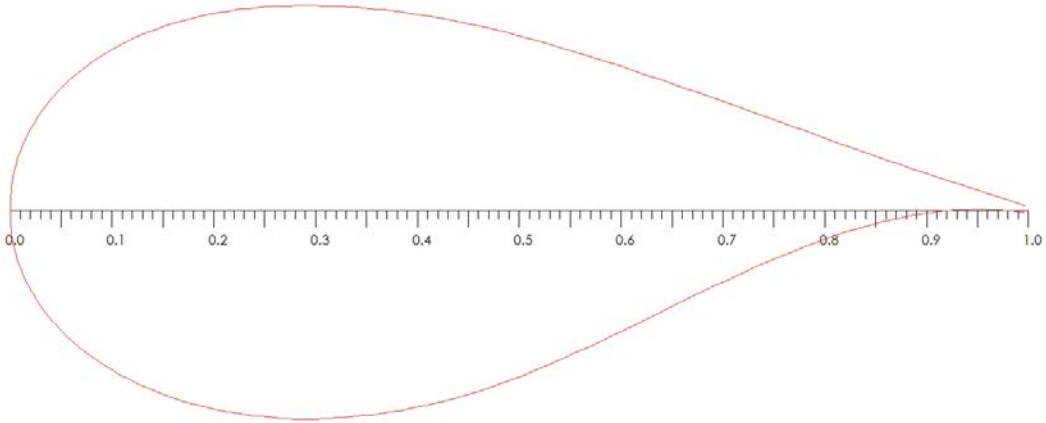
**Şekil 2.** DU91W2250LM Kanat Profili**Şekil 3.** DU93W210LM Kanat Profili



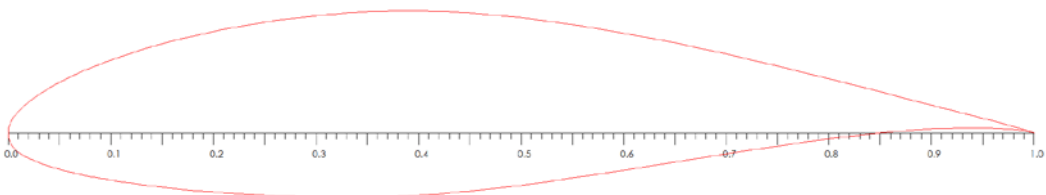
Şekil 4. DU97W300LM Kanat Profili



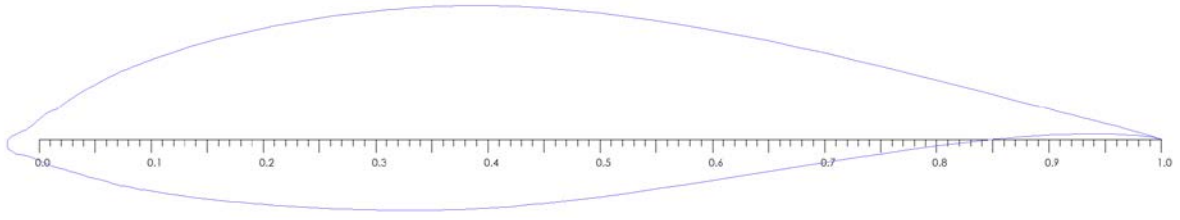
Şekil 5. DU99W350LM Kanat Profili



Şekil 6. DU99W405LM Kanat Profili

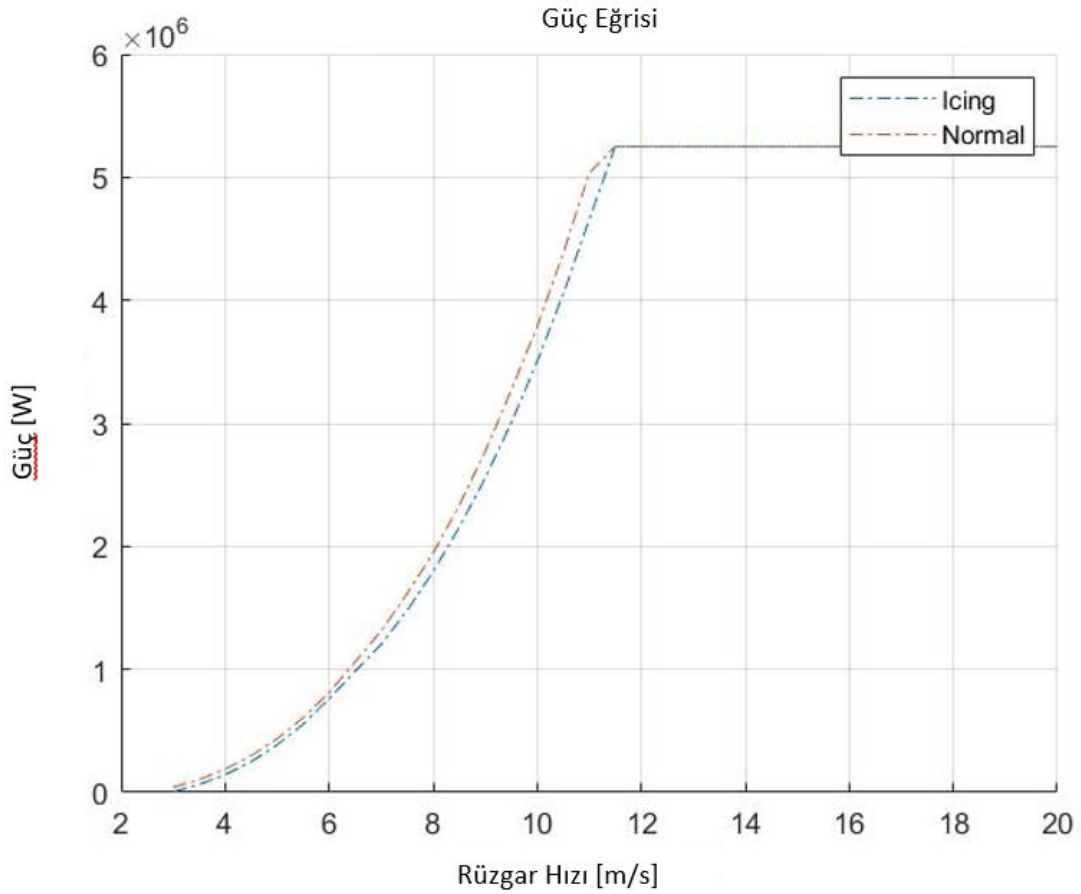


Şekil 7. NACA64618 Kanat Profili



Şekil 8. NACA64618 Buzlanma Altında Kanat Profili

Bu simülasyonda normal şartlar için NACA64618 kanat profili kullanılmıştır. Buzlanma profili için ise  $-10^{\circ}\text{C}$  ve  $-20^{\circ}\text{C}$  arasındaki buzlanma [7] profili kullanılmıştır. İki kanat profili için BEM simülasyonu kullanılarak güç eğrisi elde edilmiştir. Elde edilen güç eğrilerinin karşılaştırılmaları Şekil 8 de gösterilmiştir.



Şekil 9. Türbin Güç Eğrileri

## 6. Sonuç

Şekil 8 de görüldüğü üzere rüzgâr türbininin üretim güç eğrisi, türbin kanatlarının aerodinamik özelliklerinin değişmesi ile düşmüştür. Bu simülasyonda buz birikimi sade kanadın 51.25m ve 61.50m arasında olduğu varsayılmıştır. Buzlanma etkisinin çok düşük olmasına rağmen, güç eğrisindeki düşüş dolayısı ile türbinin performansı önemli ölçüde azalmıştır. Buz yükünün daha fazla olduğu durumlarda aerodinamik bozulma daha fazla olacağı için güç eğrisinde daha büyük bir düşüş gözlenecektir. Aynı zamanda kanatların üzerindeki fazladan buz yükü kanat



üzerindeki yorgunluğu arttıracak ve türbinin erken yaşlanmasına neden olacaktır. Yüksek buzlanma durumunda aynı zamanda kanatlardan fırlatılan buz hem çevreye hem de türbine zarar verebileceği için türbini tamamen kapatmak ve üretimi durdurma seçeneği ekonomik olarak daha karlı hale gelebilmektedir. Türbinlerin tamamen durduğu dönemlerde üretim de sıfıra ineceği için yıllık enerji üretiminde büyük bir etkisi olacaktır. Dolayısı ile yıllık enerji hesaplarında bu durum da göz önünde bulundurularak güç eğrisinin buna göre güncellenmesi ve bir belirsizlik olarak hesaplara dahil edilmesi enerji analizi sonrası yapılan ekonomik modellerde daha güvenilir sonuçlar verecektir. Bunun yapılabilmesi için buzlanmanın ve buzlanmanın güç eğrisi üzerindeki etkisinin daha derinlemesine incelenerek farklı parametrelere güç eğrisi üzerinde nasıl etki yaptığının daha iyi tanımlanması, farklı senaryolar için daha uygun güç eğrileri vererek buzlanmaya bağlı enerji kayıplarında standart elde edilebilir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ile türbinlerin gerçek güç eğrilerinin analizi ile de buzlanmanın tespiti mümkün hale gelecektir.

### **Teşekkürler**

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 216M505 numaralı projesi ve Avrupa Birliği, Latin Amerika ve Karayip Ülkeleri Ortak İnovasyon ve Araştırma Faaliyetleri Ağı (ERaNet-LAC) kapsamında fonlanmış olan Küçük Rüzgar Türbinlerinin Optimizasyonu ve Ticari Promosyonu - Small Wind Turbine Optimization and Market Promotion (SWTOMP) projesi içinde desteklenmiştir.

### **Kaynaklar**

- [1] Virk, M.S., M.C. Homola, and P.J. Nicklasson, *Effect of rime ice accretion on aerodynamic characteristics of wind turbine blade profiles*. Wind Engineering, 2010. **34**(2): p. 207-218.
- [2] Yirtici, O., I.H. Tuncer, and S. Ozgen. *Ice accretion prediction on wind turbines and consequent power losses*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. IOP Publishing.
- [3] *IEA Wind Task 19*. Available from: <https://community.ieawind.org/task19/home>.
- [4] Baring-Gould, E.I., *Wind Energy Workforce Development: A Roadmap to a Wind Energy Educational Infrastructure*. 2011: National Renewable Energy Laboratory.
- [5] Hudecz, A., et al., *Icing Problems of Wind Turbine Blades in Cold Climates*. 2014.
- [6] Barber, S., et al., *The impact of ice formation on wind turbine performance and aerodynamics*. Journal of Solar Energy Engineering, 2011. **133**(1): p. 011007.
- [7] Etemaddar, M., M.O.L. Hansen, and T. Moan, *Wind turbine aerodynamic response under atmospheric icing conditions*. Wind Energy, 2014. **17**(2): p. 241-265.
- [8] *Kanat Profili*. Available from: [https://www.wikiwand.com/tr/Kanat\\_profili](https://www.wikiwand.com/tr/Kanat_profili).
- [9] Mortensen, K., *CFD simulations of an airfoil with leading edge ice accretion*. Department of Mechanical Engineering, 2008: p. 117.
- [10] Li, Y., et al., *Temperature effect on icing distribution near blade tip of large-scale horizontal-axis wind turbine by numerical simulation*. Advances in Mechanical Engineering, 2018. **10**(11): p. 1687814018812247.