BUZLANMIŞ RÜZGAR TÜRBİNİ PALASINDA PERFORMANS KAYIP ANALİZİ

Özcan YIRTICI* , Serkan ÖZGEN[†] ve İsmail Hakkı TUNCER[‡] ODTÜ, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada, rüzgar türbinlerinin tasarım ve performans hesaplamalarında sıkça kullanılan Pal Elemanları yöntemi XFOIL panel çözücüsü kullanılarak Aeolos 30 kW rüzgar türbini için temiz ve buzlanmış pal elemanları üzerinde performans analizi gerçekleştirilmiştir. Buzlanmış kanat profili şeklinin doğru tahmin edilmesi karsı ve camsı buz tipleri için doğrulanmış ve buna bağlı olarak aerodinamik katsayıların değişimi temiz kanat profili ile karşılaştırılmıştır. Sayısal hesaplamalar sonrasında, bu performans kayıplarının buzlanma türüne bağlı olduğu ve camsı tipi buzlanma için tahmin edilen performans düşüşünün, karsı tipi buzlanma türü için tahmin edilenden daha fazla olduğu görülmüştür. Son olarak Aelos rüzgar türbini için karsı tipi buzlanma koşulları altında performans kayıp analizi gerçekleştirilmiş ve nominal hızda bu kayıp temiz türbin palasına kıyasla %20 olarak tahmin edilmiştir.

GIRİŞ

Günümüzde yüksek teknoloji ürünlerinin günlük yaşamın her aşamasında sıkça kullanılmalarıyla birlikte dünyadaki elektrik tüketimi günden güne artmaktadır. Bu enerji talebini karşılamak için farklı elektrik enerjisi üretim yöntemleri olmakla birlikte rüzgar türbinleri son zamanlarda kullanımı gittikçe yaygınlaşan ve yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisinden elektrik üreten bir sistemdir. Dünya Rüzgar Enerjisi kurumuna (WWEA) göre 2015 yılı sonunda dünya genelinde rüzgar türbinlerinin üretim kapasitesi 63.7 GW olmuştur [WWEA, 2016]. Navigant Research'e göre dünya genelinde tüketilen elektrik enerjisinin % 3'ü rüzgar enerjisinden üretilmekte olup 2018 yılına kadar bu oranın % 7.8'e çıkması öngörülmektedir[Navigant, 2016]. Rüzgar türbininin en maliyetli ve hassas parçasının palalar olması nedeniyle bu palaların aerodinamik tasarım ve performans analizleri sektörde önemli bir yer tutar. Pal Elemanları yötemi iki boyutlu bir yöntem olmasına rağmen çok kısa zamanda doğru çözüm verdiği için sektörde tasarım aşamasında sık kullanılır.

Bulut veya sis içerisinde sıvı fazda bulunan suyun herhangi bir cismin yüzeyine çarparak katılaşmasına buzlanma denir. Buzlanma, donma sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda bulunan soğumuş su damlalarının boyutuna, miktarına ve dağılımına, dış ortamın sıcaklığı ile nem oranının

^{*}Araştırma görevlisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: oyirtici@ae.metu.edu.tr

[†]Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: serkan.ozgen@ae.metu.edu.tr

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

durumuna göre farklılık göstermektedir. Karsı buzlanma (rime ice), camsı buzlanma (glaze ice) ve karışık tip olmak üzere üç farklı buzlanma türü vardır. Karsı buzlanma genelde -20 °C derecenin altında su damlacıklarının hücüm kenarına çarpıp anında donmalarıyla oluşan buz türüdür. Buzun görünümü mat ve oldukça kabadır ve kolayca ayrışır. Camsı buzlanma 0 °C ile -20 °C derece arasında soğumuş su damlalarının yüzeye çarpıp tamamen donma olmadan çevreye yayılması ve yüzeyin şeklini de alarak yavaş yavaş donmasıyla oluşan buzlanmadır. Camsı buz şeffaf ve kompakt bir görüntüye sahip olup karsı buza göre çok daha serttir, yüzeye güçlü bir şekilde yapışır ve kaldırılması oldukça zordur. Son olarak karışık tip buzlanma bu iki türün bir arada olduğu buzlanma çeşididir.

Bu çalışmada BEM modülü ile genişletilmiş Messinger modeli kuple edilip, çeşitli atmosferik buzlanma koşulları altında rüzgar türbini için performans kayıp analizleri yapılacaktır.

YÖNTEM

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 (a) ve teğetsel (a') etki faktörleri hesaplandıktan sonra bu etki faktörlerine göre ilgili pala elemanının sisteme olan tork ve güç katkısı bulunur. Eksensel etki faktörü rotor diskten geçen hava miktarını belirler iken teğetsel etki faktörü ise rotorun arkasındaki akışın çevrinti miktarını ölçer.



Şekil 2: Lokal pal elemanı için hız vektörleri ve ilgili akış açıları

$$tan\phi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{\Omega r(1+a')} \tag{1}$$

Lokal pal elemanı için yerel/bölgesel akış geliş açısı(ϕ) Formül 1 kullanılarak hesaplandıktan sonra, ilgili hücum açısı(α) yerel akış geliş açısı (ϕ) ve yerel geometrik hatve açısına (β) bağlı olarak hesaplanır.

$$\alpha = \phi - \beta \tag{2}$$

Bir sonraki işlemde rüzgar türbini kesitinde kullanılan kanat profili için aerodinamik yükler (Cl, Cd) hücüm açısı ve Reynolds sayısına bağlı olarak elde edilir. Pala sayısı (B) ve yerel kanat

profilinin yarıçapı (r) biliniyorsa, bu elde edilen aerodinamik yükler kullanılarak 3 ve 4 nolu denklemler kullanılarak pal elemanı üzerindeki eksensel kuvvet ve tork hesaplanabilir.

$$dT = B\frac{1}{2}\rho V_{toplam}^2 (C_l \cos\phi + C_d \sin\phi) cdr$$
(3)

$$dQ = B\frac{1}{2}\rho V_{toplam}^2 (C_l sin\phi + C_d cos\phi) crdr$$
(4)

Son olarak toplam güç (P) yerel pala elemanlarını oluşturduğu toplam tork ile açısal hızın çarpımından bulunur.

$$P = \Omega Q \tag{5}$$

BEM teorisi ile ilgili daha ayrıntılı bilgi [WrightW.B., 1997] referanslarında bulunabilir. BEM ile analizlerde en önemli aşama aerodinamik yüklerin hesabıdır. Bu yükler deneysel datalardan elde edilebileceği gibi HAD yöntemlerinden biri kullanılarakta elde edilebilir. XFOIL ile etki faktörlerinin hesaplanması aşamasında gerekli aerodinamik yükler saniyeler mertebesinde elde edilmesine rağmen ayrışmalı akışlarda çözüme yakınsamaması, bu yüklerin hesaplanmasında başka yöntemlerin kullanılmasını gerekli kılmıştır. 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.

<u>Buzlanma Tahmini:</u> Buzlanma tahmin yöntemi verilen başlangıç kanat profili ve hava koşulları altında su taneciklerinin yörüngelerini Lagrangian bir yaklaşım ile hesaplamakta ve konvektif ısı 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, kütlenin korunumu denklemi ve buz/su arayüzündeki faz değişim koşulu olmak üzere dört denklem ile belirlenir[Myers, 2001]. Program, verilen hava şartlarına bağlı olarak karsı ve camsı buz birikim tahmini yapabilmektedir, ayrıca su taneciklerinin kanat yüzeyine çarptıktan sonra bunların kopma ve sıçramadan kaynaklı etkilerinide hesaba katabilmektedir. Bu modül ile ilgili daha ayrıntılı bilgi [ÖzgenS., 2008, 2010] referanslarında bulunabilir.

Toplam buzlanma zamanına erişilip son buzlanmış kanat profili elde edildikten sonra, bu buzlanmış kanat profili üzerinde oluşan aerodinamik yükler XFOIL panel kodu [Drela, 1980] ile hesaplanmıştır. XFOIL yazılımı, panel tabanlı ve sınır tabaka denklemleri ile etkileşimli olarak vizkositeli akış alanlarını ve aerodinamik yükleri hesaplayabilen bir dizayn ve analiz aracı olup, kanat üzerindeki akışın toptan ayrışmadığı düşük hücüm açılarında oldukca başarılı sonuçlar vermektedir. XFOIL açık kaynaklı bir yazılım olup 1986 yılında Mark Drela tarafından geliştirilmiş, yıllar içerisinde çeşitli modifikasyon ve düzeltmelere uğramıştır. Bu çalışmada en son sürüm olan XFOIL-6.99 kullanılmıştır.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Doğrulama Çalışması

Bu çalışmada, ilk olarak buzlanma şekil tahmini yapan buzlanma modülünün doğrulanması, karsı ve camsı tipi buzlanma için NACA 0012 kanat profili üzerinde buz şeklinin tahmini ve buna bağlı olarak gerçekleşen aerodinamik performans kayıplarının incelenmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Doğrulama çalışmasında kullanılacak olan deneysel ve sayısal buzlanma şekilleri DRA [WrightW.B., 1997] raporundan alınmıştır. Bu durumlar için hava koşulları Tablo 1' de verilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan buzlanma yazılımı Şekil 2' de görüldüğü gibi kanat profilinin hücum kenarında oluşan buz formasyonunu başarılı bir şekilde tahmin etmektedir. Elde edilen buz şekli

Değişken	Karsı tipi	Camsı tipi
Ortam sıcaklığı, T_a	-27.8 °C	-6.7 °C
Serbest akış hızı, V_{∞}	$58.1 \mathrm{m/s}$	$58.1 \mathrm{m/s}$
Profil veter uzunluğu ,c	$0.5334 {\rm m}$	0.5334 m
Sıvı su içeriği, ρ_a	$1.3 \ g/m^{3}$	$1.3 \ g/m^3$
Damlacık çapı, d_p	$20 \ \mu m$	$20 \ \mu \mathrm{m}$
Toplam buzlanma zamanı, t_{exp}	480 s	480 s
Çevre basıncı, p_{∞}	95610 Pa	95610 Pa
Hücum açısı, α	4.0°	4.0°
Nemlilik	100 %	100 %

Tablo	1:	Akıs	kosu	lları.
rabio	т.	Truch	Roga	man.

sayısal olarak hesaplanan buzlanmış kanat profilleri ve deneysel veri ile uyum göstermektedir. Temiz ve buzlanmış kanat profili üzerinde oluşan basınç dağılımları Şekil 2'te (sağ resim) temiz ve buzlanmış NACA 0012 kanat profili için basınç katsayısı dağılımı verilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi özellikle hücüm kenarında buzlanmadan kaynaklı basınç dalgalanmaları oluşmaktadır. Bu basınç dalgalanmaları buzlanma sonrasında sürüklenme katsayısında iki kattan fazla bir artış ve kaldırma katsayısında ise az bir düşüşe neden olduğu gözlenmiştir (Tablo 2).

Camsı buzlanma için elde edilen buzlanmış kanat şekilleri, Silveira ve arkadaşlarının [da Silveira , 2004] çalışmasından alınan deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 3' te görüldüğü gibi sayısal olarak hesaplanan buzlanmış kanat profilleri deneysel veri ile uyum göstermektedir. Bu çalışmada üst kenarda oluşan buz boynuzu diğer sayısal çalışmalara göre daha küçük olarak tahmin edilmiştir. Bu uyumsuzluk Silveira ve arkadaşlarının [da Silveira , 2004] çalışmasında camsı tip buzlanma birikimi modellenmesi sırasında yüzeye çarpan su taneciklerinin sıçrama, ayrılma etkilerinin dikkate alınıp alınmadığı ve toplam buzlanma zamanına kaç adımda yaklaşıldığı konularındaki belirsizliklerle açıklanabilir. Tablo 6'da camsı tipi buzlanma için aerodinamik yüklerin değerleri verilmiştir. Beklenildiği gibi sürüklenme katsayısında artış ve kaldırma katsayısında azalış gözlenmiştir. Moment katsayısında belirgin bir değişim olmamıştır. Kanat profilinde ki değişim, sürüklenme katsayısında dört katından fazla bir artışa neden olmuş ve bu artış aerodinamik performans kayıplarının ana unsurunu oluşturmuştur.

Rüzgar Türbinlerinde Buzlanmadan Kaynaklı Performans Kayıp Analizi

Buzlanmadan kaynaklı güç kayıplarını daha iyi analiz edebilmek için küçük ölçekli Aelos 30 kW rüzgar türbini incelenmiştir. Bu türbin için geometrik data ve türbin özellikleri [Aelos-H 30KW, 2015] referansında verilen raporda bulunabilir. Performans analizi sırasında gerekli olan aerodinamik yükler hem buzlanmış hemde temiz kanat profilleri için Xfoil kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 3 ve Şekil 4'te Aelos 30 kW rüzgar türbini için seçilen atmosferik buzlanma koşulu altında elde edilen buz şekilleri gösterilmiştir. Bu buz şekilleri incelendiğinde genel olarak gövde kısmından uca doğru gidilirken rölatif hızın artmasının ve kord uzunluğunun azalmasına bağlı olarak biriken buz miktarı oransal olarak artmaktadır. Rüzgar hızı değiştikçe 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. Şekil 5'te temiz ve bir saatlik buzlanmış türbin palası için güç eğrisi verilmiştir. Bu güç eğrisinden enerji kayıplarının rüzgar hızı arttıça lineer olarak arttığı hesaplanmıştır. Nominal rüzgar hızında (rated wind speed= 11 m/s) bu kayıplar %20 civarında hesaplanmıştır.



Şekil 2: Karsı tipi buz formasyonu için buzlanma tahmini ve basınç katsayısı dağılımı



Şekil 3: Camsı tipi buz formasyonu için buzlanma tahmini ve basınç katsayısı dağılımı

	C_L	C_D	C_M
Temiz kanat profili	0.2163	0.00356	0.0287
Karsı tipi buzlanmış kanat profili	0.2150	0.00930	0.0271
Karsı tipi buzlanmış kanat profili	0.2138	0.01675	0.0315

Tablo 2: Aerodinamik yükler.

SONUÇ

Bu çalışmada, BEM metodu ile rüzgar türbini performans analizi ve buzlanma şekil tahmini yapabilen fortran kodu geliştirilmiştir. BEM modülü başarılı bir şekilde buzlanma şekil tahmini yapabilen program ile kuple edilmiştir. İlk olarak, karsı ve camsı tipi buzlanmaya uğrayarak deforme olmuş kanat profilleri tahmin edilmiş ve aerodinamik yükler XFOIL yardımıyla hesaplanmıştır. Sonuçta her iki buzlanma türünün sürüklenme kuvvetini artırarak aerodinamik performansı azalttığı ama camsı tipi buzlanmanın performansı daha fazla düşürdüğü görülmüştür. Daha sonra karsı tipi buzlanma koşulu için 15 ve 60 dakikalık buzlanma süreleri altında rüzgar türbin palası için buz şekilleri incelenmiş ve buna bağlı güç kayıpları verilmiştir. Aelos rüzgar türbini için nominal hızda bir saatlik buzlanma için %20'lik kayıp hesaplanmıştır. Böylece bu çalışmada kullanılan BEM modülü başarılı bir şekilde rüzgar türbini performans analizini tamamlamıştır. Bundan sonraki aşamada farklı atmosferik buzlanma koşulları altında rüzgar türbini performans kayıp analizleri



Şekil 3: Aelos 30 kW rüzgar türbini için buzlanmış pal elemanlarının tahmin edilmiş şekilleri $(T_a{=}$ -10. °C, $t_{exp}{=}$ 1 saat, $d_p{=}$ 27 $\mu{\rm m},~\rho_a{=}$ 0.05 g/m^3 ve $V_{\infty}{=}$ 8.5 m/s)



Şekil 4: Aelos 30 kW rüzgar türbini için buzlanmış pal elemanlarının tahmin edilmiş şekilleri $(T_a{=}$ -10. °C, $t_{exp}{=}$ 1 saat, $d_p{=}$ 27 $\mu{\rm m},~\rho_a{=}$ 0.05 g/m^3 ve $V_\infty{=}$ 15 m/s)



Şekil 1: Aelos 30 kW rüzgar türbini güç eğrisi

gerçekleştirilecektir.

Kaynaklar

World Wind Energy Association, 2016. http://www.wwindea.org/hyr2015/, web

Navigant Research, 2016.

 $www.navigantresearch.com/research/energy-technologies/wind-energy-service, {\tt web}$

- Aelos-H 30kW 5.5m Blade Specifications, 2015 http://windturbinestar.com/, web
- Sorensen N., Bertagnolio F., 2001. Wind Turbine Airfoil Catalogue, Risoe National Laboratory, Denmark 2001
- da Silveira Rafael A., Maliska Clovis A., Estivam Diego A. Aircraft Icing Simulation using Navier-Stokes and Potential Flow Simulation for the External Aerodynamics, Proceedings of the 10th Brazilian Congress of the Thermal Sciences and Engineering, Rio de Janerio, Brazil.
- Myers Tim G., 2001. *Extension to the Messinger Model for Aircraft Icing*, AIAA Journal, Vol. 39, No.2
- Wright WB, Gent RW, Guffond D., 1997. Part II. Prediction of Airfoil Ice Accretion, DRA/NASA/ONERA Collaboration on icing research, NASA CR-202349, 1997
- Ozgen S., Canıbek M. Ice Accretion Simulation on Multi-Element Airfoils using Extended Messinger Model, Heat Mass Transfer, DOI 10.1007/s00231-008-0430-4
- Ozgen S., Canıbek M. In Flight Icing Simulation with Supercooled Large Droplet Effects, 7^th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 19-21 July 2010, Antalya, Turkey
- XFOIL resmi internet sitesi, 2018. http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/, siteyi son ziyaret 05.08.2018 tarihinde yapıldı.
- 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