

RANS VE PAL ELEMENLARI YÖNTEMİ İLE YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ PERFORMANS ANALİZİ

Özcan YIRTICI*
ODTÜ, Ankara

İsmail Hakkı TUNCER†
ODTÜ, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada, Rüzgar türbinlerinin tasarım ve performans hesaplamalarında sıkça kullanılan Pal Elemanları yöntemi (BEM) Navier-Stokes akış çözücüsü kullanılarak Aeolos 30 kW rüzgar türbininin performans analizi gerçekleştirilmiştir. Pal üzerinde lokal kanat profillerinin maruz kaldığı hücum açılarının yüksek olması performans analizinde gerekli olan aerodinamik katsayılarının hesaplanmasını güçleştirip panel metodu ile yüksek hücum açılarında ampirik yaklaşımların bir arada kullanılmasına neden olmaktadır. RANS akış çözücüsünü kullanarak bu sorun ortadan kaldırılmış ve tüm gerekli aerodinamik katsayılar akış çözücüsü ile hesaplanarak deneysel veri ile uyumlu olan türbin performans analizi gerçekleştirilmiştir.

GİRİŞ

Günümüzde akıllı telefonlar gibi yüksek teknoloji ürünlerinin günlük yaşamın her aşamasında sıkça karşımıza çıkmalarıyla 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 yöntemi iki boyutlu bir yöntem olmasına rağmen çok kısa zamanda doğru çözüm verdiği için sektörde tasarım aşamasında sık kullanılır.

Bu çalışmada BEM modülü ile RANS akış çözücüsü kuple edilip, hiç bir yaklaşım yapılmadan tüm hücum açıları için aerodinamik katsayılar hesaplanıp seçilen rüzgar türbini için performans analizi yapılmıştır.

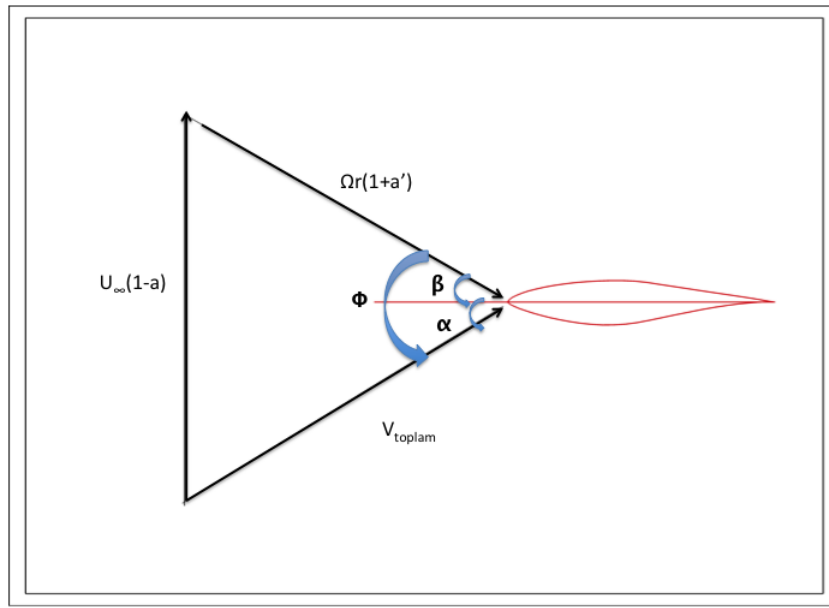
*Araştırma görevlisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: oyirtici@ae.metu.edu.tr

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

METODOLOJİ

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

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

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.

$$\alpha = \phi - \beta \quad (2)$$

Bir sonraki işlemde rüzgar türbini kesitinde kullanılan kanat profili için aerodinamik yükler (C_l , C_d) hücum 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.

$$dT = B \frac{1}{2} \rho V_{toplaml}^2 (C_l \cos\phi + C_d \sin\phi) c dr \quad (3)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho V_{toplaml}^2 (C_l \sin\phi + C_d \cos\phi) c r dr \quad (4)$$

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

$$P = \Omega Q \quad (5)$$

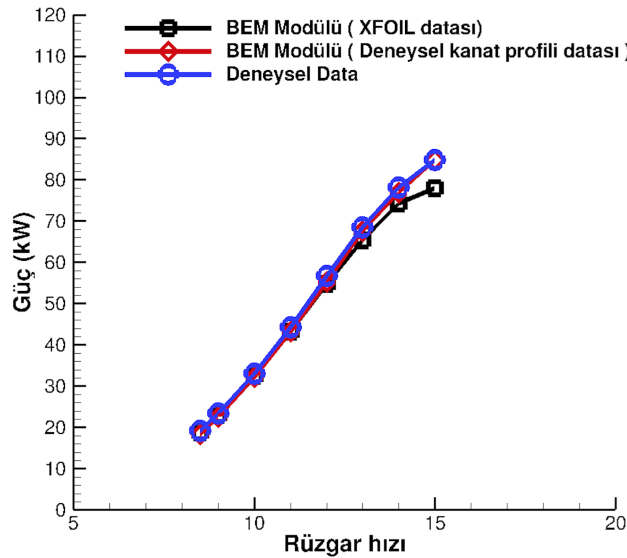
BEM teorisi ile ilgili daha ayrıntılı bilgi [Gundtoft, 2009] referanslarında bulunabilir. BEM ile analizlerde en önemli aşama aerodinamik yüklerin hesabıdır. Bu yükler deneysel datalardan elde edilebileceği gibi HAD yöntemlerinden biri kullanılarak elde edilebilir. XFOIL ile etki faktörlerinin hesaplanması 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.

XFOIL Panel Çözücüsü : XFOIL [Drela, 1980] etkileşimli bir dizayn ve analiz aracı olup viskoz akışlarda kanat profilinin aerodinamik niceliklerini çok yüksek hücum açılara 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.

RANS Akış Çözücüsü : Bu çalışmada kullanılan akış çözücüsü, Fortran programa dille yazılmış olan iki boyutta, boyutsuz, hücre merkezli ve sonlu hacim yöntemini kullanan seri bir programdır. Program korunum biçimindeki Navier-Stokes denklemlerini uzayda birini ve ikinci dereceden hassas değişik upwind şemalarını ve zamanda tek adımlı Runge-Kutta yöntemini kullanarak çözmektedir. Türbülanslı akışların çözümünde Spalart-Almaras türbülans modeli kullanılmaktadır. Çözüm ağırları akış çözücüsüne gömülü bir altprogram ile O-grid topolojisinde yaratılabileceği gibi daha yoğun grid oluşturmak için GAMBIT paket programında kullanılabilir. Bu akış çözücüsünün PVM kütüphanesini kullanan ve yönetici-işçi algoritmasını kullanan paralel versiyonunda mevcuttur.

UYGULAMALAR

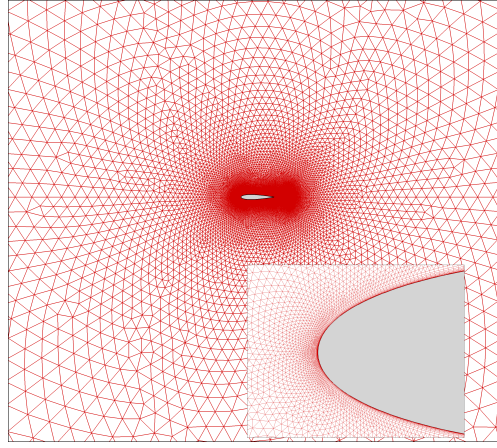
BEM ile XFOIL Kullanarak Performans Analizi: Aelos 30 kW rüzgar türbini performans analizi BEM modülünün doğrulama çalışması için kullanılacaktır. Aelos 30 kW türbin özellikleri [Aelos-H 30KW, 2015] referansında verilen raporda bulunabilir. Performans analizi sırasında gerekli olan aerodinamik yükler XFOIL ve deneysel veriler kullanılarak hesaplanmıştır.



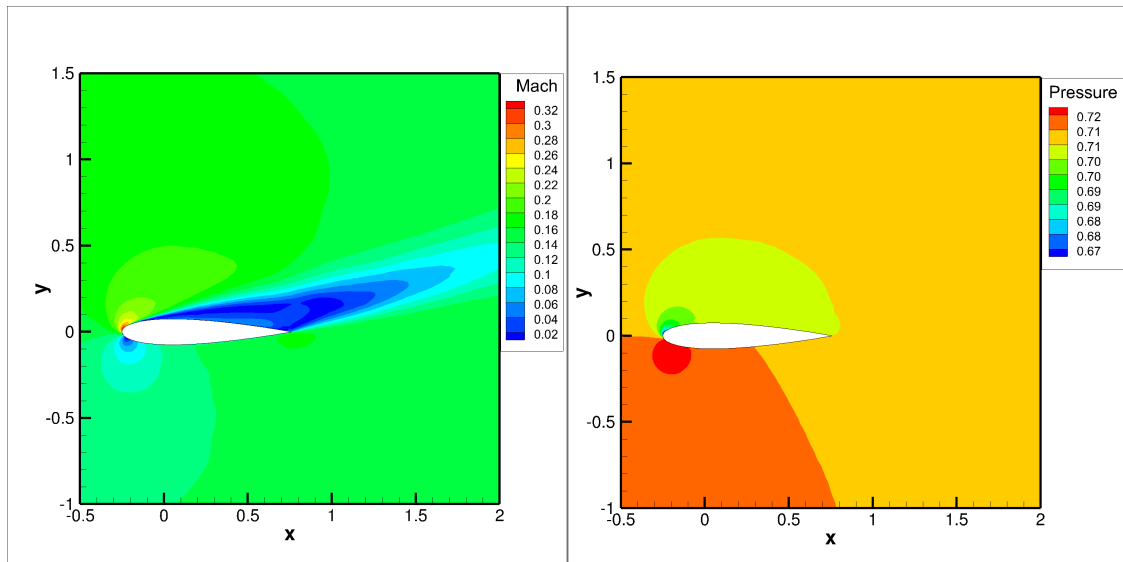
Şekil 1: Aelos 30 kW rüzgar türbini güç eğrisi

Şekil 1’de görüldüğü gibi deneysel data ile tabüle edilmiş aerodinamik yükler kullanılarak BEM modülü ile hesaplanan güç üretimi tam olarak örtüşmektedir. BEM modülünde en önemli kısmın aerodinamik yüklerin (Cl, Cd) hesaplanması olduğu için bu beklenen bir sonuçtur. XFOIL panel kodu kullanılarak yapılan performans analizi deneysel data ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Hız arttıkça güç üretiminde farklılaşma gözlenmiştir. Bunun nedeni yüksek hızlarda lokal olarak kanat profilinin karşılaştığı hücum açısı artmaktadır ve buna bağlı olarak XFOIL panel kodu ile hesaplanan aerodinamik yüklerde (Cl, Cd) hata payı artmaktadır. Buna ilave olarak BEM modülü 20 dereceden yüksek hücum açılarında Viterna yöntemini kullandığı için ayrışmalı akışlarda farklılaşma daha da belirgin gözlenmektedir.

Kanat Profilleri için Aerodinamik Katsayıların Hesaplanması: NACA 0015 kanat profili için aerodinamik yüklerin analizi XFOIL ve RANS akış çözücüsü yardımıyla yapıp Sheldahl ve Klimas’ın sağlamış olduğu deneysel veri ile karşılaştırılmıştır [Sheldahl, 1981]. Bu uygulama sırasında akış koşulları için *Mach sayısı* = 0.15 ve *Reynolds sayısı* = 1×10^6 değerleri kullanılmıştır. Çözüm ağı, kanat profili duvar ve anafor (wake) boyunca dötgen, geri kalan kısımlar üçgen hücrelerden oluşmaktadır. Çözümlerde kullanılan çözüm ağı Şekil 2’de yakından incelenebilir.



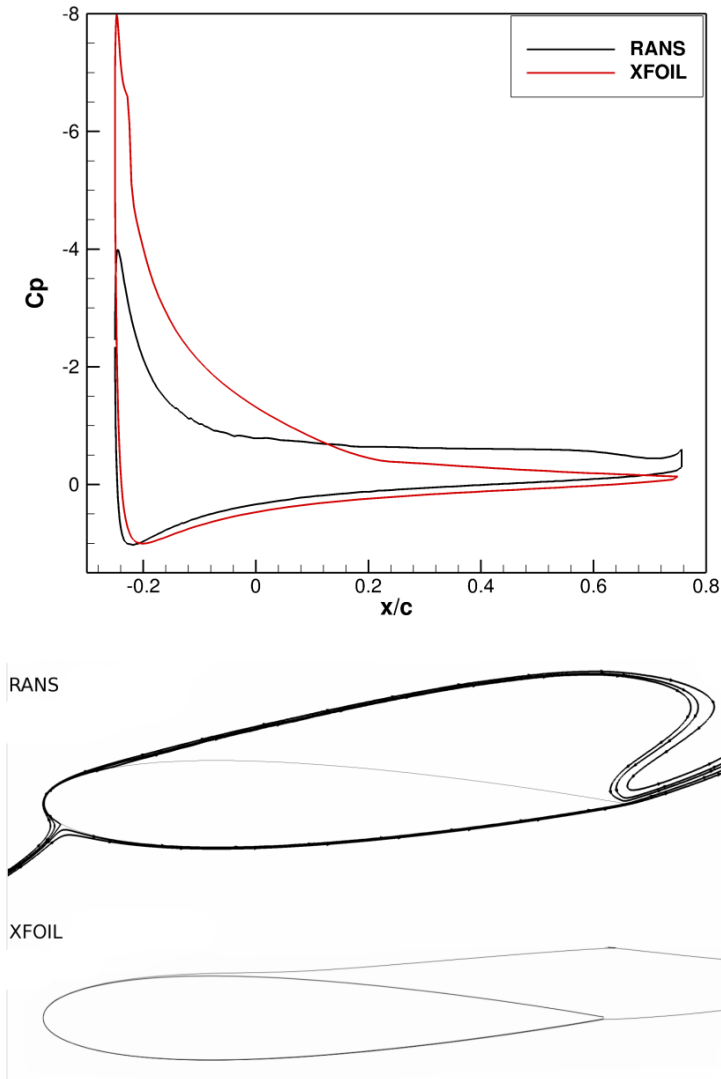
Şekil 2: NACA 0015 kanat profili için çözüm ağı



Şekil 3: NACA 0015 kanat profilinin Mach ve Basınç eş çizgileri

Şekil 3’te RANS akış çözücüsü ile 17 derecelik hücum açısı altında elde edilen çözümün Mach sayısı ve basınç eş çizgileri görülebilir. XFOIL panel çözücüsünün aksine çok yüksek ayrışmalı akışlarda

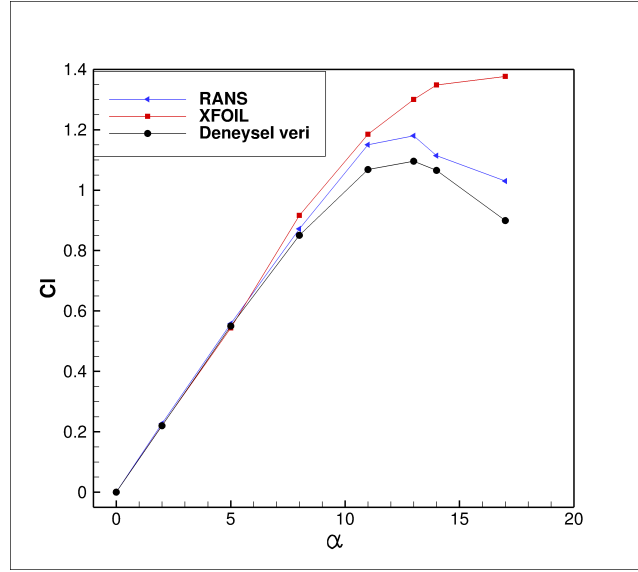
bile RANS ile çözüm elde edilebilmektedir. RANS ile XFOIL çözücüsünden 17 derece hücum açısı altında elde edilen basınç katsayısı dağılım grafiği Şekil 4'te verilmiştir.



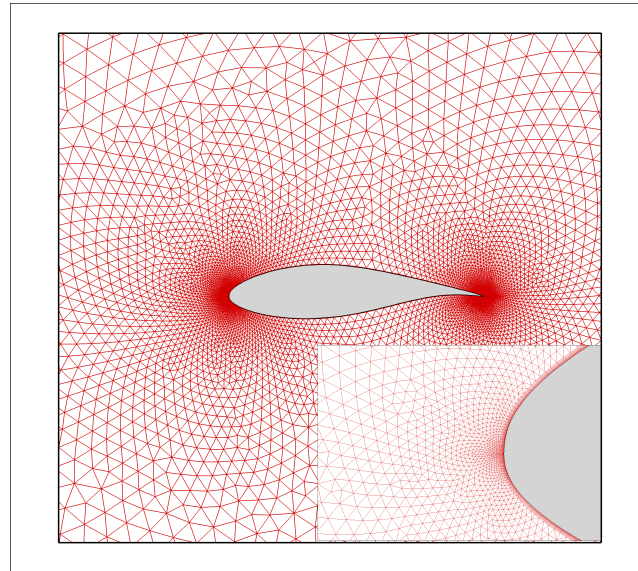
Şekil 4: Basınç katsayısı dağılımı (hücum açısı=17)

Şekil 4'te görüldüğü gibi XFOIL, RANS çözücüsüne kıyasla ayrışma noktasını üst yüzeyde daha geri bir noktada hesaplamaktadır. Buda basınç katsayısını ve kaldırma kuvveti katsayısında belirgin bir artışa neden olmaktadır. Bu iki yöntem ile elde edilen kaldırma kuvveti katsayıları deneysel veri ile Şekil 5'te verilen grafikte karşılaştırılmıştır. Grafikten RANS ve XFOIL'den elde edilen kaldırma katsayılarının yüksek hücum açılarında deneyeysel veri ile uyumlu oldukları ve ayrışma noktasından sonra sonuçların farklılaşmaya başladığı görülür. RANS kullanılarak elde edilen kaldırma kuvveti katsayıları XFOIL'e kıyasla yüksek hücum açılarında deneysel sonuçlara daha iyi yaklaşmaktadır. Bunun nedeni XFOIL'in ayrışmalı akışların çözümünde ayrışma noktasını yakalayamamasından dolayı başarısız sonuç vermesidir.

BEM ile RANS Kullanarak Performans Analizi: Bu son uygulamada ilk uygulamada kullanılan Aelos 30 kW rüzgar türbini için performans analizi yeniden yapılacaktır. Bu sefer performans analizi sırasında gerekli olan aerodinamik yükler RANS ile hesaplandıktan sonra türbin güç eğrisi XFOIL ve deneysel veri ile karşılaştırılacaktır. RANS ile çözüm elde etmek için DU93-W-210 kanat profili için yoğun olmayan 20104 tane hücre ve 11802 tane düğüm noktasından oluşan bir çözüm ağı yaratılmıştır. Oluşturulan bu çözüm ağı Şekil 6'da ayrıntılı bir şekilde görülebilir.



Şekil 5: NACA 0015 kanat profili için kaldırma kuvveti katsayıları ($Re=1E6$, $M=0.15$)

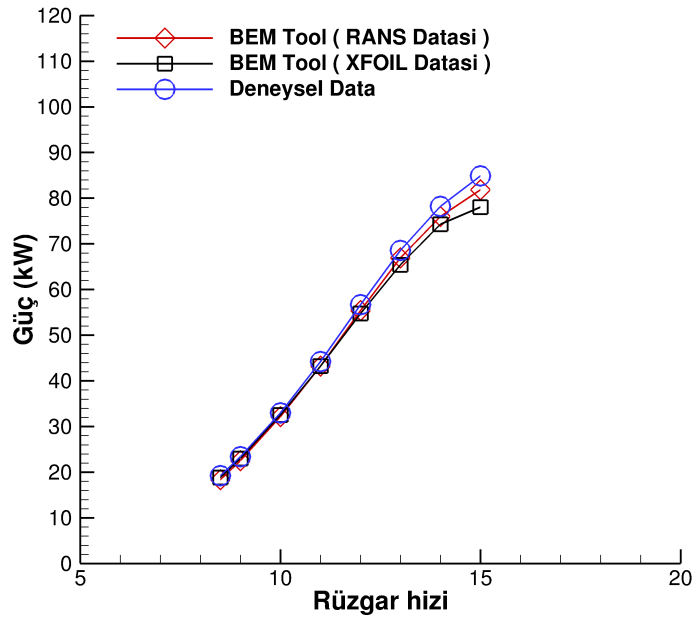


Şekil 6: DU93-W-210 kanat profili için çözüm ağı

RANS akış çözücüsü ile elde edilen aerodinamik yükler kullanılarak yapılan performans analizi için elde edilen güç eğrisi Şekil 7' de verilmiştir. Sonuçlardan RANS çözücüsü ile elde edilen sonuçların deneysel veriye daha fazla yaklaştığı görülmüştür. Bunun nedeni XFOIL panel çözücüsü kullanılırken yüksek ayrışmalı akışlarda aerodinamik yüklerin hesaplanması sırasında Viterna yönteminin kullanılmasıdır. Her ne kadar XFOIL çözücüsü çok kısa süre içinde yapışmalı akışlar için gayet iyi sonuçlar veriyor olsada sadece RANS çözücüsü ile hiç bir yaklaşım kullanmadan türbin performans analizi yapmak daha doğru sonuç vermektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada kullanılan BEM modülü başarılı bir şekilde rüzgar türbini performans analizini tamamlamıştır. RANS ve XFOIL akış çözücülerini aerodinamik yükler hesaplanmış ve Aelos 30 kW rüzgar türbini için hesaplanan güç eğrisi deneysel veri ile karşılaştırılmıştır. RANS akış çözücüsü tüm hücum açıları için aerodinamik yükleri kendi hesapladığı için deneysel veri ile daha uyumlu sonuçlar vermiştir.



Şekil 7: Aelos 30 kW rüzgar türbini güç eğrisi

Kaynaklar

World Wind Energy Association, 2016. [http : //www.wwindea.org/hyr2015/](http://www.wwindea.org/hyr2015/), web

Navigant Research, 2016.

[www.navigantresearch.com/research/energy – technologies/wind – energy – service](http://www.navigantresearch.com/research/energy-technologies/wind-energy-service), web

Aelos-H 30kW - 5.5m Blade Specifications, 2015 [http : //windturbinestar.com/](http://windturbinestar.com/), web

XFOIL resmi internet sitesi, 2014. <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>, siteyi son ziyaret 15.08.2016 tarihinde yapıldı.

Gundoft S., 2009. *Wind Turbines*, University College of Aarhus, June 2009

Sheldahl RE, Klimas PC, 1981. *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections through 180-degree Angle of Attack for use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*, Sandia National Laboratories Report SAND80-2114.

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