

MS (Mustafa Sahin) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli ve Bazı Önemli Yetenekleri

MS (Mustafa Sahin) Bladed Wind Turbine Simulation Model and Some Important Capabilities

Mustafa Şahin 

Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi
(RÜZGEM)
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
musahin@metu.edu.tr

Öz

Bu çalışma, pal elemanı momentum (BEM) teorisi üzerine kurulan MS (Mustafa SAHİN) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modelinin tanıtılması, özellikleri ve bazı önemli yeteneklerinin uygulamalarla göstermek amacıyla hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli, Türbin Performans Tahmini, Türbin Kontrolü ve Simülasyonları

Abstract

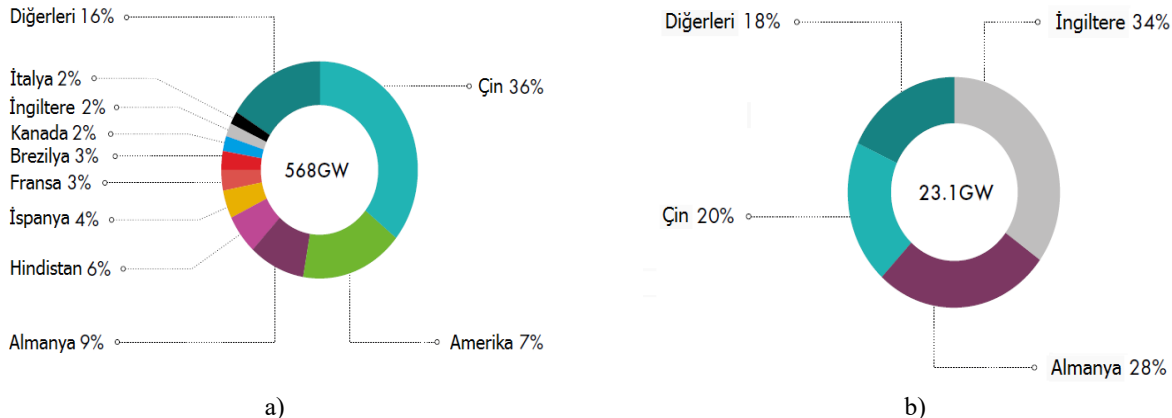
This study aims to introduce MS (Mustafa SAHİN) Bladed Wind Turbine Simulation Model which is based on Blade Element Momentum (BEM) Theory and its capabilities with some example applications.

Keywords: MS Bladed Wind Turbine Simulation Model, Turbine Performance Prediction, Turbine control and Simulations.

1. Giriş

Günümüzde, rüzgar türbinleri ile elektrik enerjisinin üretimi oldukça popülerdir. Dünyada rüzgar türbinlerinin toplam kurulu gücü, her geçen yıl artmaktadır. GWEC'in en güncel verilerine göre, rüzgar türbinlerinin dünya çapında toplam kurulu güç kapasitesi, 600.000 MW'a yaklaşmıştır[1].

Rüzgar türbinlerinin kullanımını arttıran etkenlerin başında, rüzgar enerjisinin oldukça temiz, bol, tamamen masrafsız olması ve başka ülkelere enerji bağımlılığını ortadan kaldırması gelmektedir. Bu nedenle, günümüzde pek çok ülke, rüzgar türbinleri ile elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamaktadır. Bu elektrik enerjisi üretim yöntemi, karada olduğu gibi, denizde de hızla yaygınlaşmaktadır. Günümüz itibarıyla, 90'dan fazla ülke, elektrik enerjisi üretiminde rüzgar türbinlerini kullanmaktadır. Bu ülkelerin 30 tanesi 1000 MW'tan, 9 tanesi ise 10000 MW'tan daha fazla toplam kurulu güç kapasitesine sahiptir. Şekil 1'de verilen rüzgar türbinini toplam kurulu güç kapasitelerinin ülkelere dağılımı incelendiğinde, Çin, bu ülkelerin en başında yer aldığı, ardından sırasıyla Amerika, Almanya ve Hindistan geldiği anlaşılmaktadır. Türkiye, 7,370 MW'lık toplam kurulu güç kapasitesine sahip olup, Şekil 1'den de anlaşılacağı üzere, dünyada ilk on ülke içinde yer alamamaktadır[1]. Kara tipi rüzgar türbinlerinde önderliği Çin üstlenirken, deniz tipi rüzgar türbinlerinde ise, önderlik İngiltere'nindir. 2018 yılı içinde yeni kurulan türbin kurulu güç kapasitelerinde bile, yukarıda belirtilen ülkelerin sıralaması değişmemiştir. Çin 21,200 MW'lık kurulu güç kapasitesi ile önderliğini sürdürmektedir. Amerika ise, 7,588 MW'lık güçle ikinci, Almanya 2,402 MW'lık güçle üçüncü, Hindistan ise, 2,191 MW'lık güç ile dördüncü sıradadır. Bu durum, bu



Şekil 1: Dünyada toplam kurulu güç dağılımı, a) Kara tipi rüzgar türbinini b) Deniz tipi rüzgar türbinini[1]

ülkelerin rüzgar türbinleri ile elektrik enerjisi üretimini bir hayli önemseydiği ve sürekli olarak mevcut kurulu güç kapasitelerini artırma eğiliminde olduğunu göstermektedir[1]. Aynı şekilde, Fransa, Brezilya, Kanada ve diğer pek çok ülke de, rüzgar türbinlerine olan yatırımlarına devam etmektedir.

Sonuçta, dünya ülkelerince bu kadar önemsenen rüzgar türbin teknolojilerinin, daha da üst seviyelere çıkarılması için bilimsel araştırmaların da, aralıksız devam etmesi gerekmektedir. Bu araştırma alanlarının önemli bir kolu, rüzgar türbinlerinin simülasyon modellerinin geliştirilmesidir. Bu çalışmanın amacı, günümüz rüzgar elektrik santrallerinde (RES) sıklıkla kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinin (Şekil 2) simülasyonları için geliştirilen MS (Mustafa ŞAHİN) Bladed adındaki bir rüzgar türbin simülasyon modelini tanıtmak ve bu türbin modelinin bazı önemli yeteneklerini uygulamalarla göstermektir.

MS Bladed Modeli, pal eleman momentum (BEM) teorisine dayalı olup, Matlab ve Simulink programları kullanılarak geliştirilmiş yatay eksenli rüzgar türbin simülasyon modelidir. Bu model aracılığıyla, sahada çalışan yatay eksenli rüzgar türbinini, bir nevi bilgisayar ortamına taşınmıştır. MS Bladed Modeli, temelini aldığı BEM teorisinin yanında, çeşitli aerodinamik düzeltme formülleri ve özel koordinat sistemlerine ihtiva ederek, modern bir rüzgar türbin sistemini simüle edecek şekilde geliştirilmiştir. Türbin modelinin aerodinamik hesaplamaları, literatürde bulunan PROP(ID) kodu [2], Wt_Perf [3] ve AeroDyn [4] gibi pal elemanı momentum teorisini içeren programlar ile benzerlik göstermektedir. MS Bladed Modelindeki türbin sistemi, türbin rotoru, dişli kutusu ve değişken tork üretebilen bir elektrik jeneratöründen oluşmaktadır.

MS Bladed Modeli sayesinde, tasarımı tamamlanmış rüzgar türbinleri, üretilmeden önce farklı çalışma koşullarında sergileyecekleri performanslar, önceden tahmin edilebilir. Bu çalışma koşulları, farklı rüzgar hızları ve yoğunlukları, kanat yunuslama açıları, nasele eğim ve rotor koni açıları, rotor hızları/devirleri vb. olabilir. MS Bladed Modeli ile yapılacak olan simülasyonlardan sonra, türbin üzerinde herhangi bir değişiklik gerekiyorsa, üretilmeden önce türbin

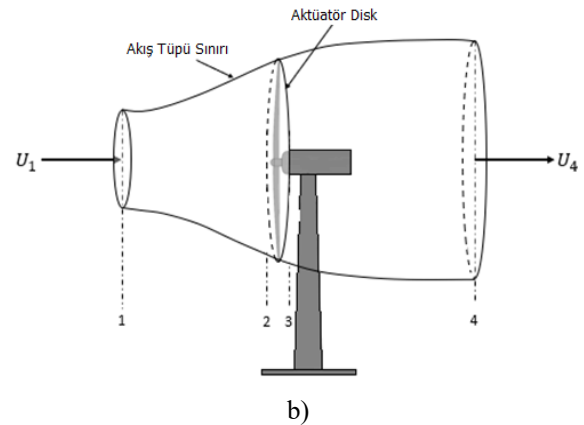
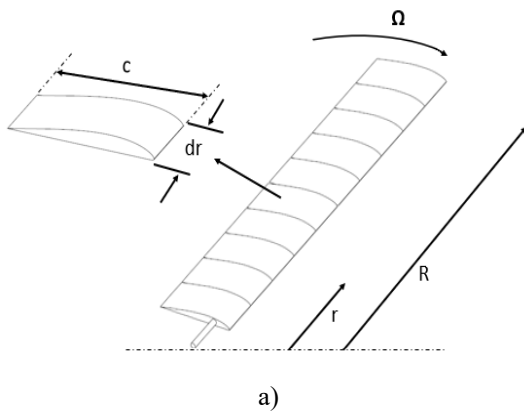
tasarımda düzeltilmeye gidilebilir. Ayrıca, MS Bladed Modeli ile, çeşitli rüzgar türbin kontrolcülerinin (jeneratör tork kontrol, kanat yunuslama açısı kontrol gibi vb.) tasarımları ve simülasyon testleri de gerçekleştirilebilir. Yeni kontrol algoritmaları geliştirilebilir ve MS Bladed Modeli aracılığıyla türbin ait önemli parametreler zaman bağılı olarak izlenebilir.



Şekil 2: Üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinini[5]

Mevcut MS Bladed Modelinde, türbin kanatları, türbin şaftları gibi yapısal parçalar, esnemeyen yapı olarak varsayılmaktadır. İleriki sürümlerinde, özellikle de kanatların esnekliğinin etkisi de, MS Bladed Modeline yansıtılması planlanmıştır.

İlerleyen kısımlarda, MS Bladed Modelinin çalışma mantığına, özelliklerine ve modelin bazı önemli yetenekleri uygulamalarla açıklanacaktır. MS Bladed Modeli ile ilgili daha fazla bilgi, [5]–[7] numaralı kaynaklardan temin edilebilir.



Şekil 3: Pal elemanı momentum (BEM) teorisi,

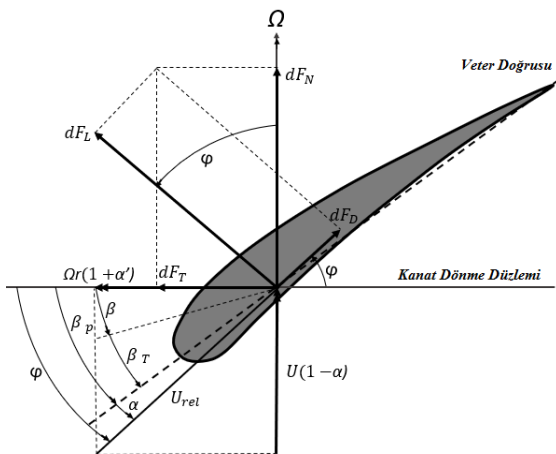
a) Türbin kanatların parçalara ayrılması, b) Rüzgar türbininin aktüatör disk olarak düşünülmesi

2. MS Bladed Rüzgar Türbini Simülasyon Modeli

MS Bladed Modeli, pal elemanı momentum (BEM) teorisi üzerine kurulmuştur. Bu teori, türbinin çoğu çalışma bölgesinde, türbin performansını doğru tahmin edemez. Örneğin; BEM teorisinin geçerli olabilmesi için, hava akışının türbin rotor kanatlarının dönmesiyle oluşan rotor diskinde dik bir şekilde gelmesi gerekir. Ayrıca, türbin çalışması esnasında, türbin rotoru türbülanslı akım izi durumuna düşmemelidir. Ancak, rüzgar türbinleri sahada çalışırken, hava akışı türbin rotoruna belirli bir sapma açısıyla gelebilir veya türbin rotoru türbülanslı akım izi durumunda çalışabilir. Bu gibi durumlarda, türbin davranışını doğru tahmin edebilmek için, BEM teorisine bazı aerodinamik düzeltme formüllerinin de eklenmesi gereklidir. Aşağıda, MS Bladed Modelinin hesaplamalarında faydalandığı pal elemanı momentum (BEM) teorisi, aerodinamik düzeltme formülleri ve model geliştirmesinde kullanılan özel koordinat sistemleri kısaca açıklanmıştır.

2.1. Pal Elemanı Momentum (BEM) Teorisi

Pal elemanı momentum (BEM) teorisi, pal elemanı ve momentum teorilerinin beraberce kullanılmasından ibarettir. Pal elemanı teorisinde, türbin kanatları parçalara ayrılarak (Şekil 3-a), kanatlarının her bir parçasındaki aerodinamik yükler, o kısımda bulunan kanat parçası etrafındaki yerel hava akışına bağlı olarak hesaplanır (Şekil 4). Her bir kanat parçasından elde edilen aerodinamik yükler, daha sonra türbin rotoru tarafından üretilen itki ve tork miktarlarının hesaplanmasında kullanılır. Momentum teorisinde ise, rüzgar türbini bir akış tüpü içinde dönen dairesel bir aktüatör disk gibi düşünülür (Şekil 3-b) ve türbinden üretilen itki kuvveti ve tork değerleri, sırasıyla doğrusal ve açısal momentum korunumu yasaları ile elde edilir [8].



Şekil 4: Bir kanat parçasındaki aerodinamik yükler ve özel açılar [5].

Bu iki teorisinin beraber kullanılması ile, eksenel ve teğetsel indüksiyon faktörleri iterasyon yöntemi ile hesaplanır. Bu sayede, eksenel ve teğetsel indüksiyon hızları da elde edilmiş olur. Daha sonra, bir türbin kanat kısmından alınan aerodinamik kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri tespit edilir (Şekil 4). Bu kuvvetlerin gerekli dönüşümleri yapıldıktan sonra, türbin kanatları boyunca toplanması ile türbin rotorundan alınan toplam tork ve itki kuvvetleri hesaplanır. Rotor hızının da, işleme katılmasıyla birlikte, türbinden elde edilen güç hesaplanır. Yukarıda bahsedilen iterasyon yöntemi ile ilgili detaylı bilgiler, [5]–[7] numaralı kaynaklarda mevcuttur.

Ancak, önceden de belirtildiği üzere, türbin modelinden doğru tahmin alınabilmesi için BEM teorisine bazı aerodinamik düzeltme formüllerinin de, eklenmesi gerekir. MS Bladed Modelinde, türbin rotorunun türbülanslı akım izi durumunda çalışmasını modelleyebilmek için Spera'nın düzeltme formülü (4) kullanılmıştır. Ayrıca, MS Bladed Modelinde, türbin rotor kanatlarının kök ve uç kısımlarında hava girdapları sonucu ortaya çıkan aerodinamik kayıplar da modellenmiştir. Örneğin; rotor kanatlarının ucunda oluşan kayıplar için Prandtl uç kayıp faktörü (7) kullanılmıştır. Ayrıca, türbin rotor diskinin rüzgara göre belirli bir açıda çalışması sonucu ortaya çıkan bükülmüş akım izinin rotor performansına etkisi de, MS Bladed Model'e Pitt ve Peters'in formülünün (8) yanı sıra, Burton'un formülü (9) kullanarak yansıtılmıştır. Bunların dışında, MS Bladed Modeline rotor koni açısı, nasele eğim açısı, kanat yunuslama ve nasele sapma açısı gibi sabit veya değişken yapısal açıların da kazandırılabilmesi için sapma hizalı, rotor göbeği hizalı, kanat hizalı, rüzgar hizalı koordinat sistemi gibi vb. çeşitli özel koordinat sistemleri de eklenmiştir. MS Bladed Modelinde, denklem (1) ve (2) kullanılarak, her bir kanat parçasının ürettiği kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri hesaplanmaktadır. Anlaşılacağı üzere, her bir kanat parçasının gördüğü etkin hava hızı, denklem (3) ile belirlenmiştir. Bu hava hızına, türbin sapma, rotor koni, azimut açısı gibi vb. sabit ve zamanla değişen açıların da, etkisi bulunmaktadır.

$$dF_L = \frac{1}{2} \rho V_{ef}^2 C_l c dr \quad (1)$$

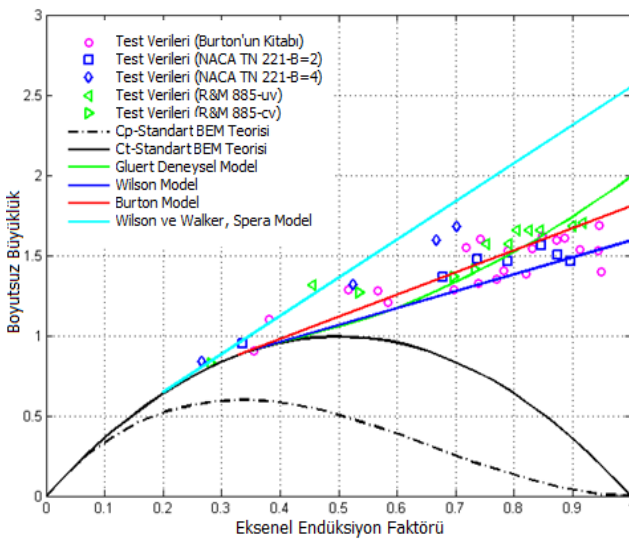
$$dF_D = \frac{1}{2} \rho V_{ef}^2 C_d c dr \quad (2)$$

$$V_{ef} = \sqrt{(V_{bx}(1-a))^2 + (V_{by}(1+a'))^2} \quad (3)$$

Aşağıda, MS Bladed Modelinde kullanılan aerodinamik düzeltme formülleri ve özel koordinat sistemleri kısaca açıklanmıştır.

2.2. Türbülanslı Akım İzi Durumunda Türbin Çalışmasının Modellenmesi

Doğrusal momentum teorisi, aksel indüksiyon faktörünün 0,5'in üzerine çıkması durumunda, geçersiz olur. Ancak, bu kritik değer, uygulama da modelden modele değişiklik gösterebilir (Şekil 5). Bu faktör değerinin kritik değeri aşarak, 1 değerine doğru yaklaşması durumunda, türbin rotorunun türbülanslı akım izi durumunda çalışmakta olduğu anlaşılır. Çünkü yüksek aksel indüksiyon faktörü, türbin rotorunun arka kısmında türbülanslı hava akımlarının oluştuğu anlamındadır. Bu durum, türbin rotorunun çok yüksek uç hız oranlarında çalıştığında meydana gelmektedir. Uç hız oranı arttıkça, türbin rotoru hava akışına, sanki bir disk duvar gibi davranmaya başlayarak, hava akışının türbin rotor kanatlarını geçmesini zorlaştırır. Bu durum sonucunda, türbin rotor diskinin orta kısmında bir durma noktası meydana gelir. Bu noktada, hava akışının statik basıncı oldukça yüksektir. Türbine gelen hava, türbin kanatlarını geçmede zorlanır ve türbin kanatlarından dışarı doğru radyal olarak akarak bir sınır tabakayı oluşturur. Bu sınır tabaka da, türbin rotor diskinin kenarlarından ayrılır. Bu olay, türbin rotorunun arkasında kalan bölgede, statik basınç değerinde bir azalmayı da beraberinde getirir. Bu azalma miktarı, uç hız oranı ve sonucunda aksel indüksiyon faktörünün artmasıyla artar. Sonuçta, türbin rotor diskinin ön kısmında statik basınç değerinin yüksek, arka kısmında da az olması, türbinin itki katsayısının, C_t , pal elemanı momentum teorisi ile tahmin edilen değerden çok daha yüksek bir değere ulaşması ile sonuçlanır.



Şekil 5: Türbülanslı akım izi durumunda uydurulmuş çeşitli modeller[5].

Literatürde, türbinin yüksek aksel indüksiyon faktörü ile çalışmasını modelleyebilmek için birden fazla deneysel düzeltme formülü, farklı bilim adamları tarafından önerilmiştir. Bu modellerin bazıları, Şekil 5'te

görülmektedir. Birden fazla modelin ortaya çıkmasının nedeni, bu bölgede farklı rotordan alınan deneysel verilerin birbirinden oldukça farklı değerlerde olması ve belirli bir trende sahip olmamasıdır. MS Bladed Modelinde, türbinin yüksek aksel indüksiyon faktörü ile çalışması durumunda, BEM teorisinin tahminini düzeltmek için denklem (4) ile verilen Spera'nın düzeltme formülü kullanılmıştır[9], [10].

$$a = \frac{1}{2} \left[2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right] \quad (4)$$

Denklemden 4'deki K değerinin elde edilmesi ise, denklem (5) ile gerçekleştirilmiştir.

$$K = \frac{4F \sin^2 \varphi}{\sigma C_n} \quad (5)$$

2.3. Kanat Kök ve Uç Kayıplarının Modellenmesi

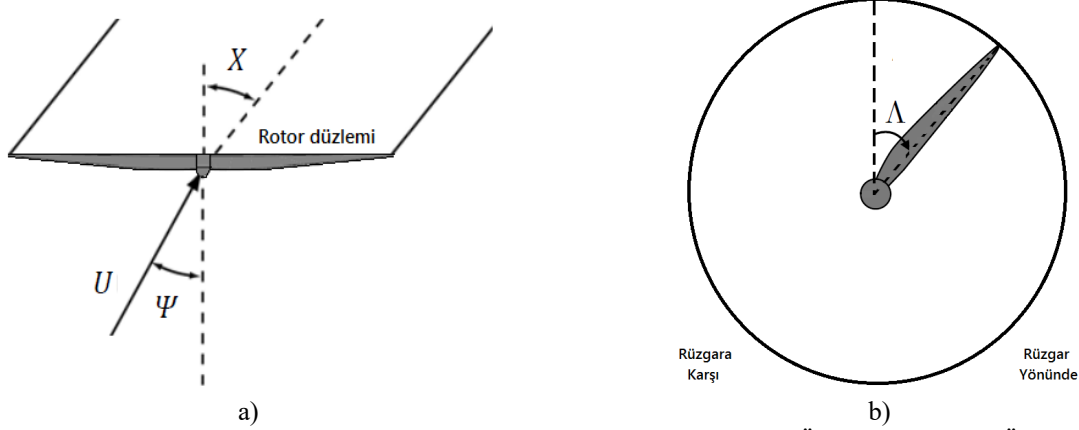
Pal elemanı momentum (BEM) teorisinde, türbin rotor kanatlarının kökünde ve uç kısımlarında meydana gelen, hava girdaplarının oluşturduğu aerodinamik kayıplar da, hesaba katılmaz. Gerçek rüzgar türbinlerinde, türbin kanatlarının uç kısımlarında, kanatlar son bulduğu için, kanatların yüksek basınç yüzeylerinden düşük basınç yüzeyine doğru bir hava akışı meydana gelerek, kanat ucu girdaplarını oluşturur. Benzer bir olay da, kanatların kökünde, rotor göbeği etrafında meydana gelir. Bu bölgedeki girdaplar da, kök girdapları olarak adlandırılır. MS Bladed Modelinde, kanatların ucunda girdaplardan dolayı oluşan kayıpları hesaba katmak için, Prandtl uç kayıp faktörü formülü (6) kullanılmıştır. Kanatların kök kısmındaki kayıplar için ise, bu formüle benzer bir formülden (7) faydalanılmıştır[4].

$$F_{uç} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \varphi}} \right) \quad (6)$$

$$F_{kök} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B}{2} \frac{r - R_{göbek}}{r \sin \varphi}} \right) \quad (7)$$

2.4. Bükülmüş Akım İzinde Türbin Çalışmasının Modellenmesi

Pal elemanı momentum teorisinde, rüzgarlı havanın türbin rotor diskine dik olarak aktığı varsayılır. Ancak, büyük gövdeli gerçek rüzgar türbinlerinde, türbin rotoru kulenin üst kısmına belirli bir nasel/rotor shaftı eğim açısı ile montajlıdır. Bu durumda, türbinden ayrılan akım izi bükülmekte ve türbin rotorunun aerodinamik performansı etkilenmektedir. Benzer bir durum, türbin rotorunun karşıdan gelen rüzgara göre herhangi bir nasel sapma açısında çalışması ile de, oluşmaktadır. Modern



Şekil 6: Bükülmüş akım izinde türbin çalışmasında kullanılan koordinatlar, a) Üstten görünüş, b) Önden görünüş

büyük gövdeli rüzgar türbinleri, hem belirli bir nasel eğim açısına sahiptir, hem de türbin çalışması esnasında, türbine gelen rüzgar ile türbin rotor diskine dik olan eksenle arasında, bir sapma açısı oluşabilmektedir. Bu tür nedenlerden dolayı, rotor diski ile karşıdan gelen rüzgar arasındaki diklik şartı bozulur ve BEM teorisi geçersiz olur. Bu durumları ortadan kaldırmak için, MS Bladed Modelinde, Pitt ve Peters'in formülünün (8) yanı sıra, Burton'a ait akım izinin bükülme açısını tahmin eden matematiksel ilişki (9) kullanılarak modelin bükülmüş akım izi ile çalışması durumunda rotor performansının daha doğru tahmin edilmesi sağlanmıştır[4], [5]. Şekil 6'da bükülmüş akım izinde türbin çalışmasında kullanılan koordinatlar görülmektedir.

$$a_{bükülme} = a \left(1 + \frac{15\pi r}{32 R} \tan \frac{X}{2} \sin \Lambda \right) \quad (8)$$

$$X = (0.6a + 1)\Psi \quad (9)$$

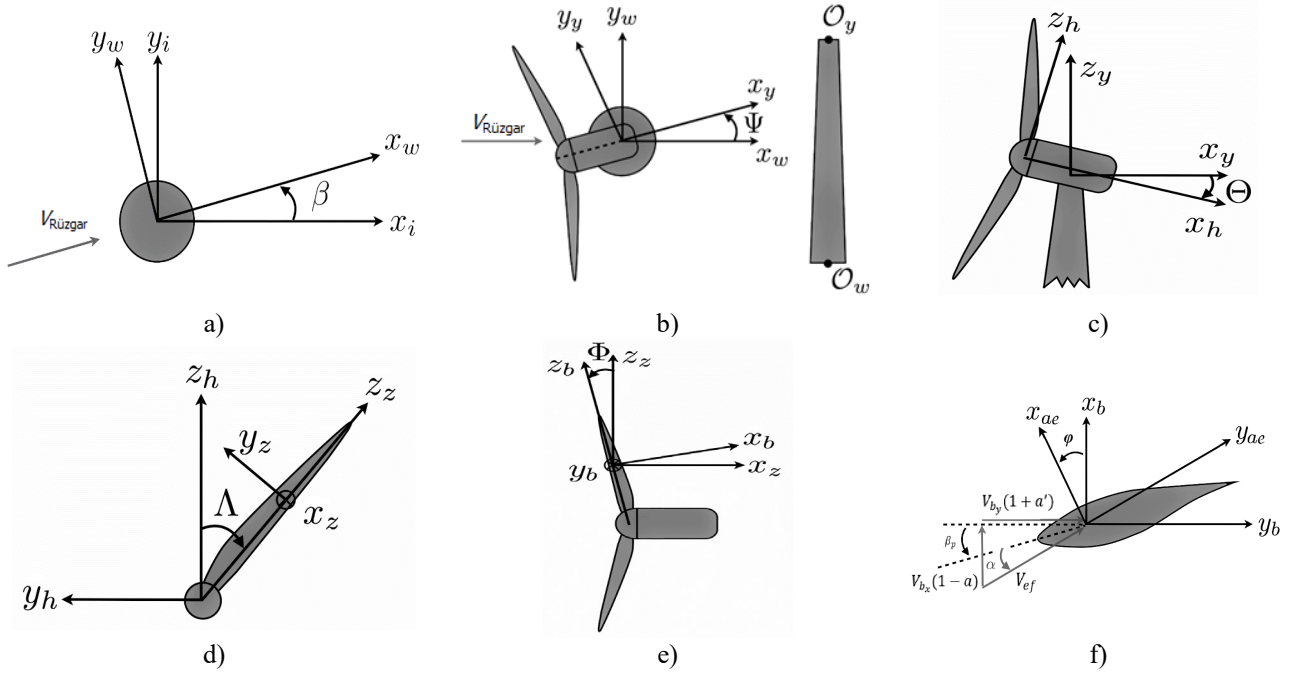
Geliştirilen MS Bladed Modeline, rüzgarın özellikleri (seviyesi ve yoğunluğu), türbin ve rotor kanatlarının özellikleri (koni açısı, eğim açısı, kanat veter uzunluğu ve burkulma açısı dağılımları), kanat tasarımında kullanılan kanat kesitlerinin aerodinamik katsayıları, girdi olarak verilirse, çıktı parametreleri olarak, türbin rotorunun ürettiği tork, itki, güç ve bunların katsayılarının yanında, türbin ile ilgili, uç hız oranı, her bir kanada ait pek çok parametre, modelden alınabilir. Ayrıca, her bir kanat parçasındaki aksenal ve teğetsel indüksiyon hızları, akış açısı, kanat kök ve uç kayıp faktörlerinin değerleri, toplam kayıp faktörü değeri, kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin miktarları ve katsayıları gibi vb. parametrelerin değerleri, MS Bladed Modeli ile elde etmek mümkündür.

2.5. MS Bladed Model'inde Kullanılan Koordinat Sistemleri

MS Bladed Modelinin geliştirilmesinde, aerodinamik düzeltme formüllerinin yanı sıra, özel koordinat sistemlerinden de faydalanılmıştır. Kullanılan bütün koordinat sistemleri sağ el koordinat sistemleri olup, şunlardır.

- Atalet koordinat sistemi
- Rüzgar hizalı koordinat sistemi
- Sapma hizalı koordinat sistemi
- Rotor göbeği hizalı koordinat sistemi
- Azimut hizalı koordinat sistemi
- Kanat hizalı koordinat sistemi
- Aerodinamik koordinat sistemi

Atalet hizalı koordinat sistemi ile rüzgar hizalı koordinat sistemi türbin kulesinin zemininde bulunmaktadır. Bu koordinat sistemlerinin merkezleri birbirine çakışmıştır. Ayrıca, bu koordinat sistemlerine ait z_i ve z_w eksenleri de çakışık olup, türbin kulesinin tepesini göstermektedir. Atalet koordinat sisteminin x_i eksenini herhangi bir yönü gösterebilir ancak, uygun olan yön rüzgarın geldiği yöndür. Rüzgar hizalı koordinat sisteminin x_w eksenini rüzgarın geldiği yönü göstermektedir. Sapma hizalı koordinat sistemi, kulanın üst orta kısmında yer almakta olup, nasel ile birlikte, sağa sola hareket etmektedir. Bu koordinat sisteminin z_y eksenini, bir önceki koordinat sistemleri ile aynı olup, yukarı doğrudur. Rüzgar ile sapma hizalı koordinat sistemlerinin x_w ve x_y eksenleri arasında kalan açı, türbinin nasel sapma açısına (Şekil 7-b) karşılık gelir. Rotor göbeği koordinat sisteminin merkezi, rotor göbeğinin merkezine sabit ve rotor ile dönmemektedir. Ancak, nasel sapma açısı kadar koordinat sisteminin merkezi sağa sola hareket etmektedir. Sapma hizalı koordinat sisteminin x_y eksenini



Şekil 7: MS Bladed Modelinin kullandığı koordinat sistemleri, a) Atalet ve rüzgar hizalı koordinat sistemleri, b) Rüzgar ve sapma hizalı koordinat sistemleri, c) Sapma ve rotor göbeği hizalı koordinat sistemleri, d) Rotor göbeği ve azimut hizalı koordinat sistemleri, e) Azimut ve kanat hizalı koordinat sistemleri f) Kanat ve aerodinamik koordinat sistemleri[5].

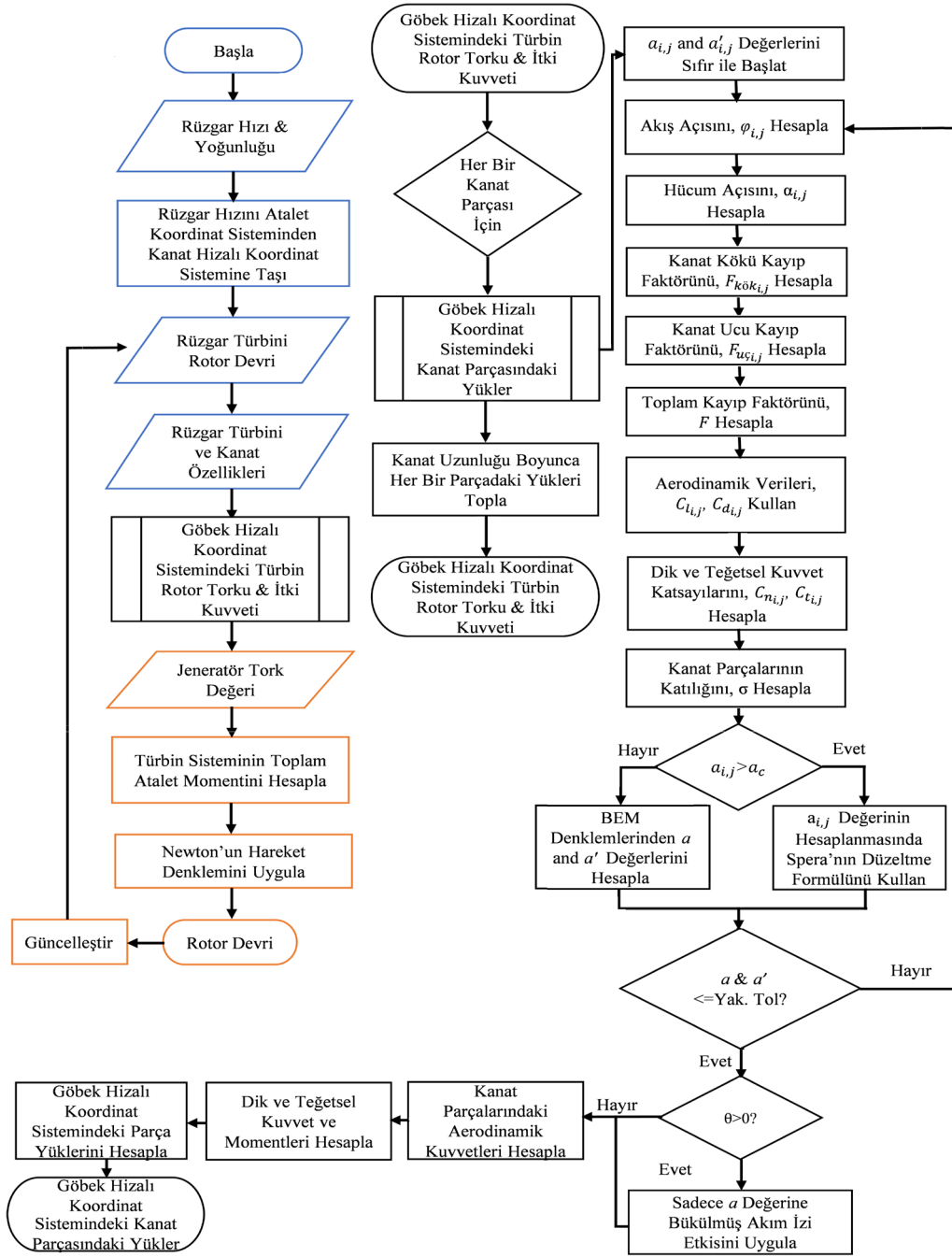
ile rotor göbeği hizalı koordinat sisteminin x_h ekseninde kalan açı nasel eğim açısıdır (Şekil 7-c). Türbinde, Şekil 7-c'deki gibi, naselin yukarıya doğru kaldırılarak bir eğim açısının verilmesi pozitif değerli bir eğim açısına karşılık gelir. Azimut hizalı koordinat sistemi, her bir kanat parçasının merkezine sabitlenmiş olup, ilgili kanat parçası ile beraber dönmektedir (Şekil 7-d). Azimuth açısı düz kanatlar için her bir kanat parçasında aynı iken, diğer farklı geometrik kanatlarda değişiklik gösterebilir. Kanat hizalı koordinat sistemi de, aynı şekilde her bir kanat parçasında bulunmakla birlikte, kanat kesitlerinin $c/4$ noktasında yer almakta ve kanatla beraber rotorun dönme yönünde dönmektedir. Azimuth ve kanat hizalı koordinat sistemi arasında kalan açı türbinin rotor koni açısıdır. İleri teknolojik tasarımlara sahip türbin kanatları kanat açıklığı boyunca değişen koni açılara sahip olabilir. Aerodinamik koordinat sistemi (Şekil 7-f) ise, aerodinamik kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerin tanımlandığı, kanat parçası ile birlikte dönen koordinat sistemidir. Bu koordinat sistemi, her bir kanat parçasının merkezinde yer almaktadır. Anlaşılacağı üzere, MS Bladed Modelinde, özel koordinat sistemlerinin kullanılmasıyla, modelde sapma açısı, rotor koni açısı gibi vb. açıların da tanımlanabilmektedir. Koordinat sistemleri ve dönüşüm matrisleri ile ilgili daha fazla bilgi [5], [11] numaralı kaynaklardan edinilebilir. Sonuç olarak, BEM teorisi, aerodinamik düzeltme formülleri ve özellikle koordinat sistemleri sayesinde türbin sistemi, bir nevi üç boyutlu olarak modellenmiştir. MS Bladed Model'de, türbin sistemi, türbin rotorunun aerodinamik torqu, dişli

kutusunun dönüştürme oranı, değişken tork üretebilen basit bir elektrik jeneratörünün elektromanyetik torqu düşünülerek, (10) ve (11)'de verilen denklemler üzerine kurularak, dinamik bir türbin sistemi oluşturulmuştur.

$$J_t \dot{\Omega} = \tau_{aero} - \tau_{jen} \quad (10)$$

$$J_t = J_{rotor} + N_{dişli}^2 J_{jen} \quad (11)$$

Şekil 8'de MS Bladed Modeline ait akış şeması verilmiştir. Akış şemasında, mavi renkle gösterilen kısım rüzgar, rüzgar türbini ve rotor özelliklerini içermektedir. Örneğin, rüzgarın hızı ve yoğunluğu, rotor koni açısı, kanat burkulma açısı dağılımı gibi vb. Siyah renkli olarak gösterilen kısım, türbinden alınan tork ve itki kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan kısımdır. Turuncu renkle verilen kısım ise, türbin sisteminin dinamikleştirilmesi için kullanılmıştır. Akış şemasından da, anlaşılacağı üzere a aksel indüksiyon faktörünü, a' , teğetsel indüksiyon faktörünü, φ akış açısını, α hücum açısını, $F_{kök}$ kök kayıp faktörünü, $F_{uç}$ uç kayıp faktörünü, F toplam kayıp faktörünü, C_l ve C_d kaldırma ve sürüklenme katsayılarını, C_n ve C_t dik ve teğetsel kuvvet katsayılarını, σ kanat parçasının katılığını, a_c ise kritik aksel indüksiyon faktörü anlamına gelmektedir. Yukarıdaki bu parametreler her bir kanat parçasına aittir. Her bir parametrenin altında bulunan i endeksi rüzgar türbininin kaçınıcı kanadı olduğu anlamına gelirken, j endeksi ise ilgili kanadın kaçınıcı parçası olduğu anlamındadır.



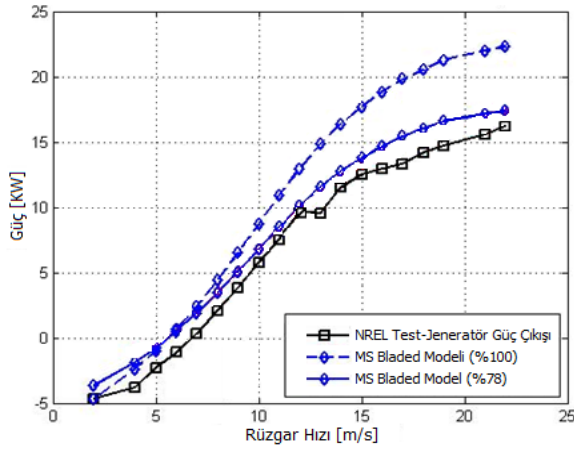
Şekil 8: MS Bladed modeli akış diyagramı

3. MS Bladed Modelinin Bazı Yetenekleri

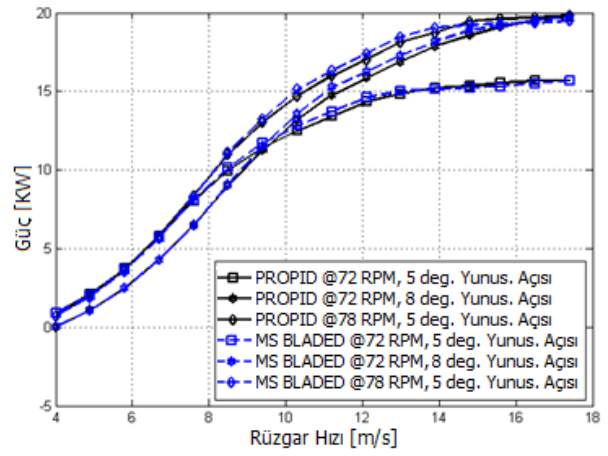
MS Bladed Modeli ile, rüzgar türbini ile ilgili olarak pek çok işlem ve uygulama gerçekleştirilebilir. Bu kısımda, MS Bladed Modeli kullanarak, yapılabilen bazı önemli uygulamalara örnek verilecektir. Bu uygulamalar şu şekilde açıklanabilir.

3.1. Türbin Güç, Tork ve İtki Eğrilerinin Tahmini

MS Bladed Modeli ile, tasarımı tamamlanmış bir rüzgar türbin kanadı kullanılarak, çeşitli sayıda kanatlara sahip rüzgar türbin rotoru oluşturularak, ilgili rotorun hangi rüzgar hızında ne kadar aerodinamik tork, güç ve itki kuvveti üreteceği kolaylıkla belirlenebilir. Bu parametrelerin rüzgara göre eğrileri oluşturulabilir.



a)



b)

Şekil 9: MS Bladed Model ile güç eğrisi tahmini,

a) NREL test verileri ve MS Bladed Modelinin tahmini, b) PROPID ile MS BLADED Modellerinin tahminleri

İstenirse, türbin rotoruna istenilen rotor koni açısı veya nasele (rotor) eğim açısı da tanımlanabilir. Şekil 9-a'da, NREL Faz II deneysel türbini için MS Bladed Modelinin güç eğrisi tahmini ile NREL tarafından bu türbin için saha testlerinde elde edilen güç verileri yer almaktadır. Faz II deneysel türbini, herhangi bir nasele eğim açısına sahip olmasa da, 3,25 derecelik bir rotor koni açısına sahiptir[12]. MS Bladed Modelinde, bu türbine ait güç tahminleri yapılırken (Şekil 9-a), rotor koni açısının değeri de, modelde tanımlanmıştır. Şekildeki siyah kare desenli çizgiler, NREL'in sahada elde ettiği deney sonuçlarıdır. Mavi kesik çizgili elmas desenli sonuçlar ile yine mavi düz çizgili elmas desenli sonuçlar, MS Bladed Modelinin tahmin ettiği sonuçlardır. Mavi düz çizgili elmas desenli sonuçlar ile NREL'in deney sonuçları olan siyah düz çizgili kare desenli sonuçlar birbirine bütün rüzgar hızları boyunca yakındır. MS Bladed Modeli tahminlerini yaparken, mekanik ve elektriksel kayıpları hesaplamalarına dahil etmeden, sistemi %100 verimle hesaplamaktadır. Ancak, NREL deneylerinde, türbin sisteminden alınan güç, jeneratörden alınan elektriksel güçtür. Mekanik ve elektriksel kayıplar da hesaba katıldığında, NREL'in türbin sistemi %78 verimle çalışmaktadır[12]. Bu nedenle, MS Bladed Modelinin %100 verimle tahmin ettiği mavi kesik çizgili elmas desenli sonuçlar, deneysel verilerden oldukça farklıdır. O zaman, MS Bladed Modelinden elde edilen sonuçlara, kayıplar da dahil edilirse, mavi düz çizgili elmas desenli sonuçlar elde edilir. Görüleceği üzere, türbin sisteminin verim etkisini içeren mavi düz çizgili elmas desenli sonuçlar ile, NREL'e ait deneysel veriler, birbirlerine yakın olmakla birlikte, eğrilerin trendleri de, birbirine çok benzemektedir.

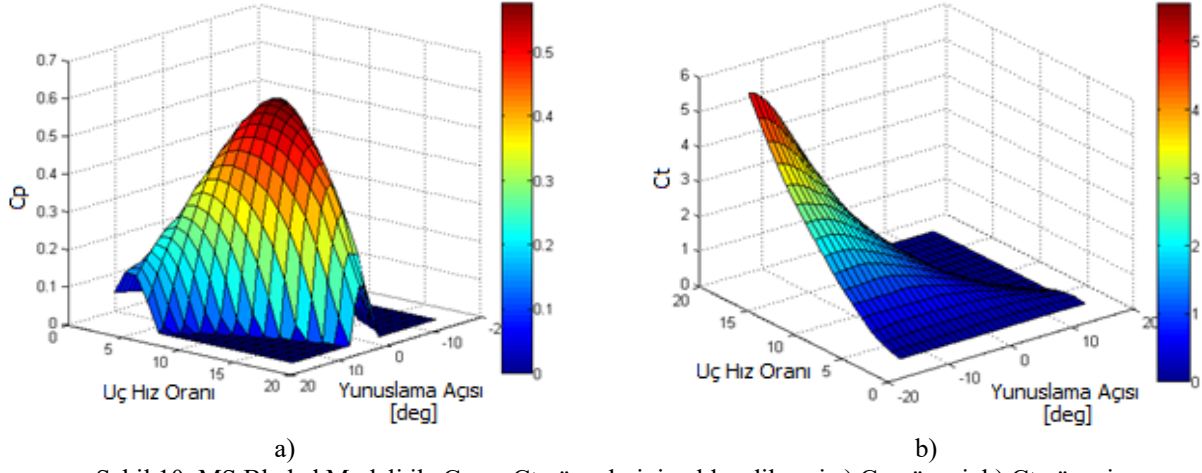
Bir diğer örnek ise, NREL Faz VI türbinin kanatlarının tasarımı esnasında kullanılan PROPID Kodu ile elde edilen güç eğrisi tahminlerinin[13], MS Bladed Modelinin tahminleri ile karşılaştırılmasıdır. Şekil 9-

b'de, NREL Faz VI türbininin uzatılmış kanatları ile oluşturulan, farklı kanat sayılarındaki türbin rotorunun, çeşitli rotor hızlarında ve kanat yunuslama açılarında çalıştırılması durumunda, PROPID Kodu ile MS Bladed Modelinin performans tahmin sonuçları bulunmaktadır. Görüleceği üzere, MS Bladed Modeli ile PROPID Kodu birbirine oldukça yakın tahminler vermektedir.

Sonuç olarak, MS Bladed Modeli, yatay eksenli rüzgar türbinlerinin rotor performans tahminlerini oldukça iyi tahmin edebilmektedir. Ancak, performans sonuçlarının doğru tahmin edilmesi için rüzgar türbin rotor kanatlarında kullanılan aerodinamik profillere ait deneysel aerodinamik verilerin doğruluğu da oldukça önemlidir. Örneğin, Şekil 9-b'de verilen NREL Faz VI türbin rotorunun güç eğrilerinin tahmin edilmesinde, hem PROPID, hem de MS Bladed Modeli, türbin rotor kanatlarının aerodinamik verilerine perdövitez gecikme etkisini[14] de dahil etmişlerdir.

3.2. C_p , C_q ve C_t Yüzeylerinin Elde Edilmesi

MS Bladed Modeli, rüzgar türbinlerinin C_p , C_q ve C_t çalışma yüzeylerinin elde edilmesinde kullanılabilir. Bu yüzeylerin ortaya çıkarılması, oldukça önemlidir ve türbin simülasyon modelinin kullanımını gerektirmektedir. Çünkü, bu yüzeylerin bulunması için türbin rotoru farklı kanat yunuslama açılarında ve uç hız oranında çalıştırılmalıdır. Küçük gövdeli rüzgar türbinleri için, bu yüzeylerin elde edilmesi, deneysel olarak elde etmek belki kolay olsa da, büyük gövdeli rüzgar türbinleri (MW) için imkânsızdır. Bu durum, MS Bladed Modelinin önemini ortaya çıkarmaktadır. MS Bladed Modeli ile, herhangi bir boyuttaki yatay eksenli rüzgar türbininin C_p , C_q ve C_t yüzeyleri kolayca elde edilebilir. Örneğin, MS Bladed Modeli ile elde edilen türbin C_p yüzeyinden, türbin rotorundan maksimum verim alabilmek için hangi kanat yunuslama açısı ve uç hız oranında çalıştırılması gerektiğine karar verilir.

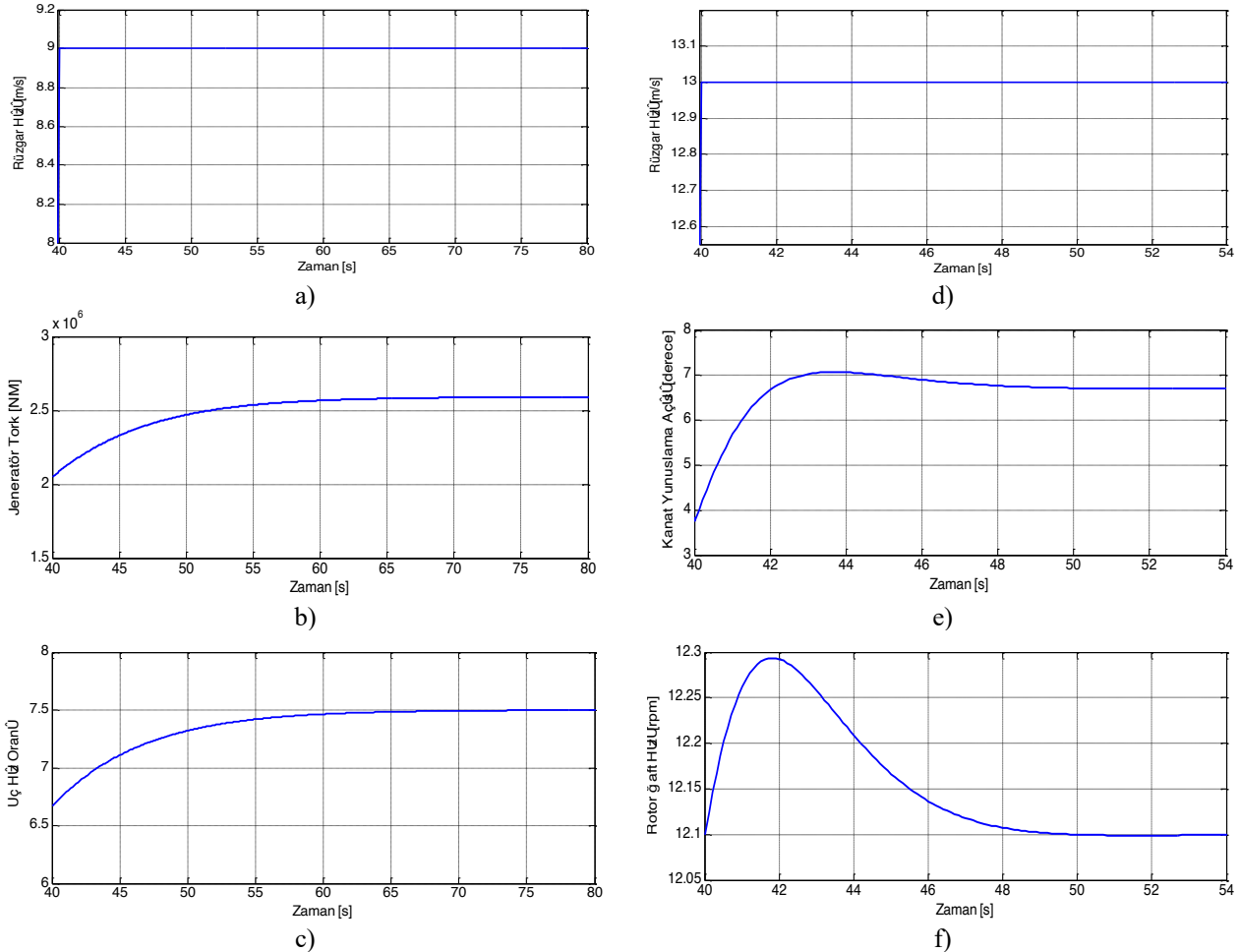


Şekil 10: MS Bladed Modeli ile Cp ve Ct yüzeylerinin elde edilmesi a) Cp yüzeyi, b) Ct yüzeyi

Bunlar, değişken devirli rüzgar türbinleri için oldukça önemli olan parametrelerdir. Örneğin, MS Bladed Modeli kullanarak, 63 metre uzunluğunda kanatlara sahip NREL 5 MW'lık rüzgar türbini farklı uç hız oranı ve kanat yunuslama açısında çalıştırılmış, rotorundan en iyi verim almak için gerekli en uygun uç hız oranı değeri, 7.5, yunuslama açısı değeri ise, -0.875 derece olarak belirlenmiştir[5]. Bu yüzeyin elde edilmesi esnasında, elde edilen diğer bir yüzey ise, aynı türbine ait Ct yüzeyidir. Her iki yüzey de, sırasıyla Şekil 10-a ve b'de yer almaktadır. İstenirse, modelden Cq yüzeyinin elde edilmesi de gerçekleştirilebilir.

3.3. Temel Türbin Kontrolcülerinin Tasarlanması ve Simülasyon Testleri

Bir önceki kısımda, MS Bladed Modeli ile türbinlere ait Cp ve Ct yüzeylerinin elde edilmesinden bahsedilmişti. Bu yüzeylere, çeşitli nedenlerden dolayı ihtiyaç olabilir. Örneğin, Cp yüzeyinden, ilgili türbine ait en uygun kanat yunuslama açısı ve uç hız oranı değerlerinin belirlenmesi gerçekleştirilebilir. Yüzey elde edildikten sonra, maksimum güç katsayısına karşılık gelen yunuslama açısı ve uç hız oranı, seçilen türbin için en uygun değerlerdir. Örneğin, en uygun uç hız oranı kullanılarak,



Şekil 11: Tasarlanan türbin kontrolcülerinin simülasyon testleri, a) Birim basamak artan rüzgar hızı, b) Jeneratör tork miktarı, c) Türbin uç hız oranı, d) Birim basamak artan rüzgar hızı, e) Kanat yunuslama açısı f) Rotor şaft hızı

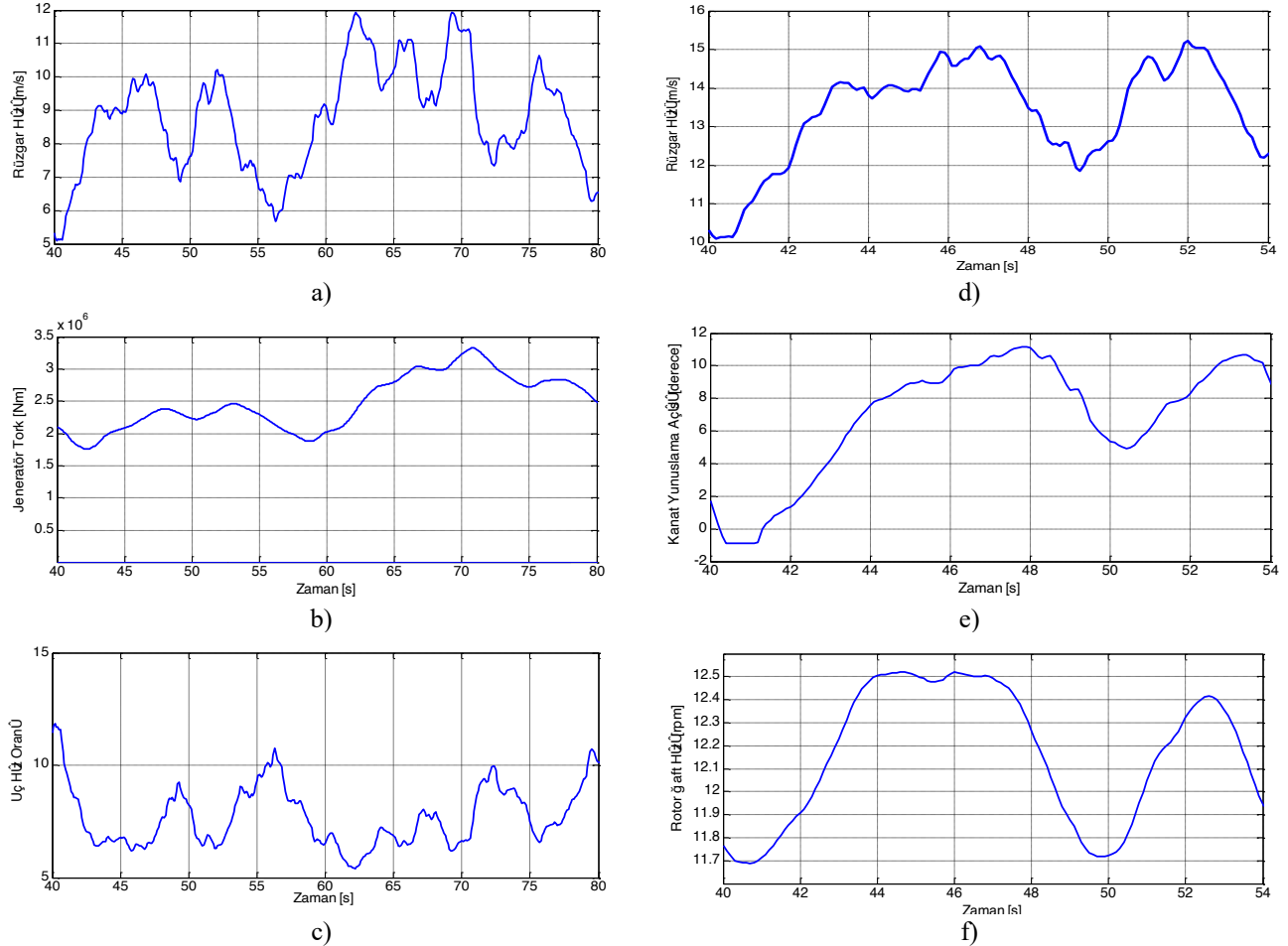
jeneratör tork kontrolcüsünün kontrolcü kazanç değeri hesaplanabilir. Jeneratör tork kontrolcüsü, türbinlerin açma ile anma rüzgar hızları arasındaki rüzgar hızlarında aktiftir.

Şekil 11'de NREL 5 MW'lık rüzgar türbini için tasarlanan jeneratör tork ve kanat yunuslama açısı kontrolcülerinin simülasyon testleri verilmiştir[5], [15]. NREL 5 MW'lık rüzgar türbinin anma rüzgar hızı, 11.4 m/s'dir. Şekil 11-b ve c'de ise, tasarlanan jeneratör tork kontrolcüsün 8 m/s rüzgar hızından birim basamak olarak 9 m/s artan rüzgar hızına karşı (Şekil 11-a), kontrol edilen 5 MW'lık türbini üzerinde nasıl bir cevap verdiği görülmektedir. Rüzgar hızındaki birim basamak artışa karşılık, jeneratör tork kontrolcüsü türbin jeneratörünün torkunu artırarak, türbinin en uygun uç hız oranı olan 7.5 değerinde çalıştırarak görevini yapmıştır. Şekil 11-e ve f'de ise, kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün simülasyon testleri verilmiştir. Rüzgar hızı, birim basamak olarak 12 m/s den 13 m/s'ye çıkarılmıştır(Şekil 11-d). Bu rüzgar girişine karşılık olarak, kanat yunuslama açısı kontrolcüsü, kanatların yunuslama açısını kontrol ederek(Şekil 11-e), türbini anma rotor devri olan 12.1 rpm'de nasıl çalıştırdığı görülmektedir (Şekil 11-f). Görüleceği üzere, bütün bu simülasyonların sonuçları, belirli bir geçiş bölgesini geçtikten sonra kalıcı durum değerine ulaşmaktadır.

Burada bahsedilen kontrolcülerin dışında, türbin kontrolünde, türbinin başlama aşaması ve yukarıda adı geçen iki kontrolcünün birbiri arasındaki geçişi sağlayan geçiş kontrolcülerini de, MS Bladed Modeli kullanılarak tasarlanabilir. Burada yapılan simülasyon testleri, kontrolcülerin amaçlarına uygun sonuçlar verip vermediğinin tespiti içindir. Bunu deneyebilmek için birim basamak olarak artan rüzgar giriş sinyaline karşılık, türbinin cevapları incelenmiştir. Gerçekte, rüzgar hızı birim basamak olarak artmamakla beraber, bir ortalama değer etrafında sürekli olarak değişmektedir. Bu değişim miktarı, rüzgarın normal veya aşırı türbülanslı olma durumuna göre farklılık gösterir. Bir sonraki kısımda, performansı incelenen bu kontrolcülerin normal türbülanslı rüzgarlar altında vermiş olduğu cevaplar incelenecektir.

3.4. Kontrol Edilen Rüzgar Türbininin Türbülanslı Rüzgarlar Altında Simülasyon Testleri

Bir önceki kısımda, birim basamak olarak artan rüzgar hızları ile simüle edilen kontrolcüler, bu kısımda normal türbülanslı rüzgarlar altında simüle edilmiştir. Şekil 12-b ve c'de, jeneratör tork kontrolcüsünün, 9 m/s ortalama hıza sahip normal türbülanslı rüzgar (Şekil 12-a) altında simüle edilmesi ile elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Jeneratör tork kontrolcüsü, rüzgardaki değişimlere (Şekil



Şekil 12: Normal türbülanslı rüzgarlar altında türbin kontrolcülerinin simülasyon testleri, a) 9 m/s ortalama rüzgar, b) Jeneratör tork miktarı, c) Türbin uç hız oranı, d) 14 m/s ortalama rüzgar, e) Kanat yunuslama açısı, f) Rotor şaft hızı

12-a) bağlı olarak, jeneratörün üretmiş olduğu torku (Şekil 12-b) ayarlamakta ve bu sayede türbinin uç hız oranını (Şekil 12-c) en uygun değerde tutmaya çalışmaktadır. Uç hız oranı, simülasyon süresi boyunca en uygun değer olan 7.5 etrafında değişmektedir. Tork kontrolcüsü, türbini bu uç hız oranı değerinde sabitlemeye çalışarak, değişen rüzgar altında görevini yerine getirmektedir. Şekil 12-a, b ve c'den anlaşılacağı üzere, rüzgar hızı arttıkça, jeneratör tork kontrolcüsü vasıtasıyla jeneratörün türbin rotoruna uyguladığı tork artmakta, rüzgar hızı azaldıkça azalmaktadır. Buna bağlı olarak, uç hız oranında da, değişiklikler meydana gelmektedir. Rüzgar hızının artması ile uç hız oranı değeri azalmakta, azalması ile de, artmaktadır. Şekil 12-e ve f' de ise, 14 m/s ortalama değere sahip normal türbülanslı rüzgarın (Şekil 12-d), MS Bladed Modeline uygulanması durumunda, kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün, türbin kanatlarının açısını nasıl değiştirdiğini, buna bağlı olarak, rotor hızında meydana gelen değişiklikler görülmektedir. Rüzgarda meydana gelen değişiklikler (Şekil 12-d) sonucu, rotor hızında ortaya çıkan değişiklikler (Şekil 12-f) yunuslama açısının (Şekil 12-e) değiştirilmesi ile regüle edilmeye çalışılmıştır. Sonuçta, rotor hızı değeri, türbinin anma rotor hızı etrafında değişmektedir. Şekil 12-d, e ve f'den anlaşılacağı üzere, rüzgar hızında meydana gelen artışlarda, kanat yunuslama açısı artmış, azaldığında azalmıştır. Buna bağlı olarak, rotor hızı da, benzer bir davranış sergilemiştir.

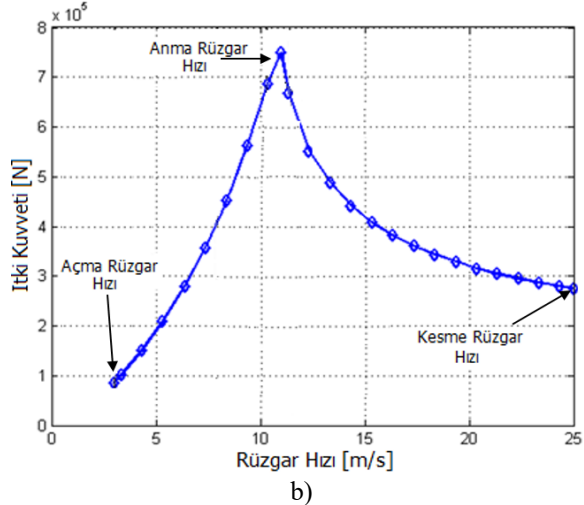
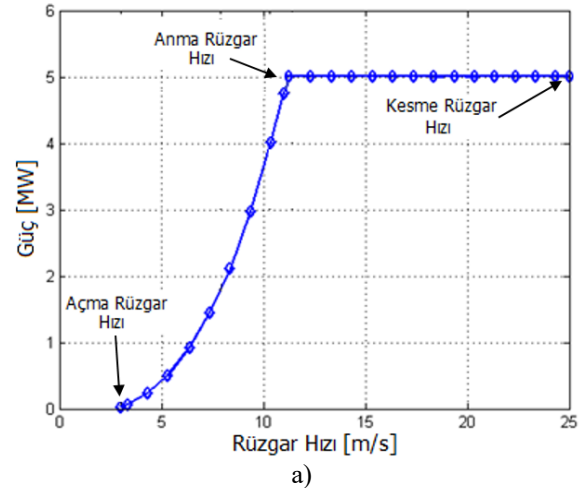
3.5. Kontrol Edilen Rüzgar Türbinini için Güç ve İtki Eğrilerinin Elde Edilmesi

MS Bladed Modeli, rüzgar hızına göre, kontrol edilen rüzgar türbinine ait güç, tork, itki, kanat yunuslama açısı, uç hız oranı gibi vb. eğrilerin de elde edilmesinde kullanılabilir. Burada, örnek olması açısından, MS Bladed Modeli kullanılarak, NREL 5 MW'lık rüzgar türbinini için elde edilen kontrol edilmiş güç ve itki eğrileri verilmiştir (Şekil 13). Şekil 13-a'dan anlaşılacağı üzere, türbin açma ile anma rüzgar hızları arasında, anma gücünde bir elektrik enerjisi sağlayamamaktadır. Kısmi yük bölgesi olarak ifade edilen bu bölgede, elde edilen güç, jeneratör tork kontrolcüsü sayesinde alınmakta ve türbin bu bölgede, anma gücünden az ve üretebileceği maksimum elektriksel gücünü üretmektedir. Anma ve kesme rüzgar hızları arasında ise, türbin tam yük bölgesi olarak adlandırılan bölgede çalışmakta, kanat yunuslama açısı kontrolü ile, türbinden anma gücünde elektrik enerjisi alınmaktadır.

3.6. Yeni Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi ve Simülasyon Testleri

Yukarıda, MS Bladed Modeli ile yapılabilen bazı önemli uygulamalara örnek verildi. Bu uygulamalar, türbinin rüzgar hızına bağlı olarak, türbine ait güç eğrisinin çıkarılması, C_p ve C_t yüzeylerinin elde edilmesi, tasarlanan türbin kontrolcülerinin birim basamak olarak

artan rüzgar hızları ile normal türbülanslı rüzgar hızları altında simülasyon testlerinin gerçekleştirilmesidir. Simülasyon sonuçlarında, jeneratör tork kontrolcüsü için, jeneratör tork kontrolcü çıkışı, türbinin uç hız oranı değerinin zamana bağlı olarak değişimi verildi. Kanat yunuslama açısı kontrolü için, değişen rüzgar hızı altında, kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün kanadın yunuslama açısını nasıl değiştirdiği ve sonucunda rotor hızındaki değişiklikler zaman bağlı olarak gösterildi. En son olarak da, MS Bladed Modeli kullanılarak, kontrol edilen 5 MW'lık türbine ait güç ve itki eğrileri açma ve kesme rüzgar hızları arasında elde edilmiştir. Yukarıdaki belirtilenlerin dışında, rüzgar türbin sisteminden daha iyi verim almak, türbin sistemini korumak, türbin üzerine düşen aerodinamik/mechanik yükleri azaltmak gibi vb. amaçlar için yeni kontrol algoritmaları, MS Bladed Modeli kullanılarak, yatay eksenli rüzgar türbinleri için geliştirilebilir, simülasyon testleri yapılabilir. Başka sistemler için kullanılan çeşitli kontrol algoritmaları, MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli sayesinde türbinler için denenerek, rüzgar türbin teknolojisinin, özellikle de kontrol teknolojisinin gelişmesine önemli ölçüde katkı sağlanabilir.



Şekil 13: Kontrol edilen türbinin eğrileri, a) Güç eğrisi, b) İtki kuvveti eğrisi

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, MS Bladed Modelinin tanıtılması, özellikleri ve modelin bazı önemli yetenekleri uygulamalarla verilmiştir. MS Bladed Modeli, BEM teorisine dayalı bir modeldir. Bu teorisinin geçersiz olduğu durumlarda, türbin performansını daha doğru tahmin edebilmek için MS Bladed Modeli çeşitli aerodinamik düzeltme formülleri kullanmaktadır. Özel koordinat sistemlerinin de modele eklenmesiyle, MS Bladed Modeli modern yatay eksenli rüzgar türbinlerin simülasyonlarını yapabilecek kapasiteye erişmiştir. MS Bladed Modeli yardımıyla, tasarlanan rotorların performansları çeşitli sabit ve değişken yapısal açılar (rotor koni, sapma açısı gibi vb.) altında incelenebilir, türbin kontrolcülerini tasarlanabilir ve yeni kontrol algoritmaları geliştirilerek, simülasyon testleri gerçekleştirilebilir. Yeni kontrol algoritmaları için yapılan simülasyon testlerinde, ümit verici sonuçların alınması, gerçek türbinde de benzer sonuçların alınabileceği anlamını taşır. Geliştirilen algoritmanın gerçek rüzgar türbinine uygulanmasının ardından, yapılan saha testlerinde de, iyi sonuçların alınması türbin teknolojisinin ilerlemesine olumlu bir katkıdır. MS Bladed Modeli, temel olarak, türbin aerodinamik rotoru, dişli kutusu ve devir sayısına göre torku değişebilen bir elektrik jeneratöründen oluşmaktadır. MS Bladed Modeli, türbinin kanatlarını, şaft(lar)ını esnemeyen yapı olarak düşünmektedir. İleriki sürümlerinde, bu yapılarını esnek olarak simüle edecek şekilde gerekli düzenlemelerin yapılması planlanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmada, doktora yıllarımda geliştirmiş olduğum MS (Mustafa Şahin) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli ve farklı özellikleri sunulmuş olup yeni simülasyon sonuçları yer almaktadır. Türbin modelleme konusuna yönlendiren ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Hocam Doç. Dr. İlkyay YAVRUCUK'a ve modelleme konusunda tecrübelerini esirgemeyen Amerika'nın Milli Yenilenebilir Enerji Laboratuvarından (NREL) Araştırmacı Dr. Jason Jonkman'a teşekkürlerimi belirtmek istiyorum.

5. Kaynaklar

- [1] Wind, G. ve Council, E., "Gwec Report 2018," *Wind Glob. Counc. Energy*, no. April, 2019.
- [2] Wilson, R. E. ve Lissaman, P. B. S., "Applied Aerodynamics of Wind Power Machines," 1974.
- [3] Platt, A. D. ve Buhl, M. L., "WT_Perf User Guide for Version 3.05.00," 2012.
- [4] Moriarty, P. J. ve Hansen, A. C., "AeroDyn Theory Manual, NREL/TP-500-36881, Golden,

Colorado: National Renewable Energy Laboratory," 2005.

- [5] Sahin, M., "Dynamic Modeling, Control and Adaptive Envelope Protection System for Horizontal Axis Wind Turbines, PhD Thesis, Department of Aerospace Engineering, METU, Ankara," Middle East Technical University, 2018.
- [6] Sahin, M. ve Yavrucuk, I., "Dynamical modelling of a wind turbine system with precone and tilt angles," in *9th Ankara International Aerospace Conference*, 2017, no. 20-22 September, pp. 1-11.
- [7] Sahin, M. ve Yavrucuk, İ., "Rüzgar Türbininin Dinamik Modellemesinde Belirli Parametrelerin Güç Eğrisi Tahminine Olan Etkilerinin İncelenmesi," in *YEKSEM 2017*, 2017, p. 8.
- [8] Manwell, J. F., McGowan, J. G. ve Rogers, A. L., *Wind Energy Explained-Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [9] Hansen, M. O. L., *Aerodynamics of Wind Turbines*, 2th Edit. Earthscan, 2008.
- [10] Branlard, E., "Wind turbine tip-loss corrections, Master's Thesis, DTU," 2011.
- [11] Ning, S. A., "CCBlade Documentation, Release 0.1.0," 2013.
- [12] Schepers, J. G., Brand, A. J., Bruining, A., ve diğerleri, "Final report of IEA Annex XVIII : 'Enhanced Field Rotor Aerodynamics Database', ECN-C-02-016," 2002.
- [13] Giguere, P. ve Selig, M. S., "Design of a Tapered and Twisted Blade for the NREL Combined Experiment Rotor," 1999.
- [14] Corrigan, J. J. ve Schillings, J. J., "Emprical Model for Stall Delay Due to Rotation," *Am. Helicopter Soc. Aeromechanics Spec. Conf.*, pp. 8.4-1 to 8.4-15, 1994.
- [15] Sahin, M. ve Yavrucuk, I., "Performance Comparison of Two Turbine Blade Pitch Controller Design Methods Based On Equilibrium And Frozen Wake Assumptions," no. September, pp. 1-16, 2019.

Öğr. Gör. Dr. Mustafa Şahin



Öğr. Gör. Dr. Mustafa Şahin, Mersin Erdemli Teknik Lisesi Elektrik Bölümünden 2004 yılında Okul Birincisi olarak mezun olmuştur. Aynı yıl yapılan üniversite sınavı ile Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu (Şimdiki adıyla Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi) Uçak Elektrik-Elektronik Bölümünü kazanarak, bir yıl İngilizce hazırlık eğitiminin ardından, 2009 yılında Yüksekokul Birincisi olarak mezun olmuştur.

Aynı zamanda, 2000 yılında liseye başladığı yıldan itibaren, lise ve üniversite yıllarında, elektrik ile ilgili işyerlerinde teknik eleman, usta, ustabaşı gibi görevler yapmıştır. Yüksek lisans derecesini, 2011 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Anabilim Dalından "Sabit Kanatlı Mini İnsansız Hava Aracının Geliştirilmesi ve Ağaçlandırmada Kullanımı" adlı tezi ile almıştır. Bu çalışma ile İHA'lar, dünyada ilk kez ağaçlandırma çalışmalarında kullanılmıştır.

Doktora derecesini, ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde 1 yıl Bilimsel Hazırlık Eğitiminin ardından, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Havacılık ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalından 2018 tarihinde almıştır. Tez çalışması, Rüzgar Elektrik Santrallerinde sıklıkla kullanılan Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Modellenmesi, Kontrolü ve Koruma Sistemlerinin geliştirilmesi üzerinedir. Doktora tezinde, MS (Mustafa Sahin) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modelini geliştirmiş olup tez başlığı "Dynamic Modeling, Control and Adaptive Envelope Protection System for Horizontal Axis Wind Turbines"dır.

Ayrıca, lisans mezuniyetinden sonra, 2009 yılının ikinci yarısında, İSG Uluslararası Havalimanında, My Teknik Uçak Bakım Servisinde Uçak Aviyonik Bakım Personeli, 2009-2012 yılları arasında, Erzincan Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu'nda Havacılık Yönetimi Bölümü'nde Öğretim Görevlisi, 2012-2013 yıllarında, THK Üniversitesi İzmir Havacılık Yüksekokulunda Uçak Teknolojisi Programında Öğretim Görevlisi, Uçak Teknolojisi ve Sivil Havacılık Kabin Hizmetleri Programlarının Kurucu Bölüm Başkanlığı, 2013-2018 yılları arasında ise, ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmıştır. ODTÜ'ye geçmeden önce, yukarıda üniversitelerinde çeşitli program ve bölümlerin (Havacılık Elektrik-Elektronik Bölümü, Uçak Gövde Motor Bölümü vb.) açmıştır. Erzincan ve İzmir ilinde bulunan Teknik liselerde de Uçak Bakım Teknik Alanlarının açılmasına öncülük/rehberlik etmiştir.

2018 yılından bu yana da, ODTÜ Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (RÜZGEM) Öğr. Gör. Dr. unvanı ile çalışmaktadır.