



Bir rüzgar türbini tasarımı ve geliştirilmesi

Davut Keleş^{1*}, Vezir Ayhan², Adnan Parlak³, İdris Cesur², Barış Boru⁴, Tufan Koç⁴

¹Yiğit İnşaat, Sakarya

²Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi, Sakarya

³Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaat ve Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri ve İnşaat Mühendisliği, İstanbul

⁴Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Sakarya

30.10.2012 Geliş/Received, 21.12.2012 Kabul/Accepted

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynakların içerisinde yüksek bir potansiyele sahip olan rüzgar enerjisi, hızla büyüyen enerji ihtiyacını karşılayabilecek bir kapasiteye sahiptir. Bu potansiyelin değerlendirilmesi, sınırlı olan yenilenemeyen enerji kaynaklarına bağımlılığın azalmasını ve aynı zamanda ekolojik denge açısından da olumlu sonuçlar getirecektir. Ülkemiz rüzgar enerjisi potansiyeli olarak zengin ve teknolojik olarak yeterli bir seviyededir. Rüzgarın enerjisinden yararlanabilmek için rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Bu makalede, bir rüzgar türbini hesaplamaları, modellenmesi ve imalatı gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar Türbini, Rüzgar Türbini Hesaplamaları, Tasarım, İmalat

Design and development of a wind turbine

ABSTRACT

Which have a high potential in renewable energy sources wind energy has the capacity to meet the rapidly growing energy needs. This assessment of potential environmental problems of our country and to minimize the need to preserve the ecological balance. At the same time as the wind energy potential in Turkey is a country rich and technologically adequate. In this article, wind energy design, modeling and has been manufactured. Wind speed of 5 m/s has been adopted, the calculations carried out to meet the energy needs of a house.

Keywords: Wind Turbine, Wind Turbine Calculations, Design, Manufacturing

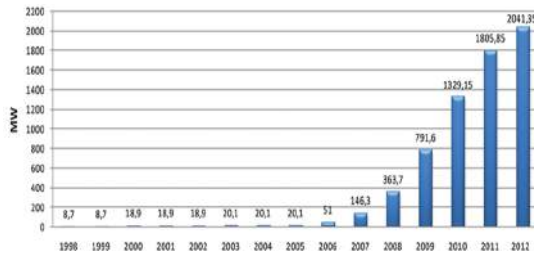
* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya ekonomisinde söz sahibi ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına önemli yatırımlar yapmakta ve kullanımını arttırmak için büyük çaba sarf etmektedirler. Yaşamımızın vazgeçilmez haline gelen enerji, üretilmesi, taşınması ve tüketimi esnasında çevre kirliliğine yol açmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevreyi kirletmemesi ve ömrünün uzun olması enerji ihtiyacının karşılanması açısından büyük bir avantajdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en avantajlı olanlarından biri de rüzgar enerjisidir. Rüzgâr; güneş enerjisinin yeryüzüne ulaşması sonucunda ortaya çıkan bir doğa kuvvetidir. Güneş enerjisinden dolayı yeryüzünde oluşan sıcaklık farkı, basınç değişimlerini meydana getirmektedir. Bu değişimler sonucu da rüzgâr meydana gelir [1-8]. Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlasına (REPA) göre Türkiye'deki teorik rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW civarındadır. Mevcut elektrik şebeke alt yapısı dikkate alındığında ise elektrik şebekesine bağlanabilir rüzgar enerjisi potansiyeli 10.000 MW düzeyinde hesaplanmıştır. 2020 yılına kadar Türkiye'de rüzgâr kurulu gücünde 20.000 MW seviyelerine ulaşılması öngörülmektedir [9].

Türkiye'de 2005 yılında 20,1 MW olan rüzgâr kurulu gücü 2012 itibariyle 2041,35 MW'a yükselmiş durumdadır. Şekil 1' de Türkiye de rüzgar enerjisinden sağlanan elektrik üretiminin yıllara göre gelişimi görülmektedir [10].

Şekil 1' den de görüldüğü gibi ülkemizde rüzgâr enerjisine yönelik hızla artmaktadır. Rüzgar enerjisine artan bu eğilim, özellikle enerji üzerine çalışma yapan arge firmaları ve araştırmacıların ilgi alanı haline gelmiştir. Yapılan araştırmalarda, genellikle rüzgarın ülkedeki enerjiye dönüştürülebilir potansiyelleri, sağlayabileceği faydalar, maliyet analizi ve en önemlisi de rüzgar türbini veriminin kanatçık tasarımı ve malzeme tekniğiyle artırılması üzerinedir.



Şekil 1. Türkiye rüzgar enerjisinin yıllara göre gelişimi [10] (Over the years the development of wind energy in Turkey)

Karadağ [11], yaptığı çalışmada, enerji çevre ilişkisine kapsamlı bir şekilde yer vermiştir. Rüzgar enerjisinin ülkemiz için uygun bir kaynak olduğunu saptamıştır.

Şen [12], rüzgar enerjisinin temel kriterlerinden yola çıkarak Gökçeada'nın elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgar enerjisi ile karşılanması konusunda genel

prensipleri araştırmış ve De Wind firmasının ürettiği türbinler arasında bir karşılaştırma yapmıştır. Gökçeada'nın elektrik enerjisi ihtiyacı ve bu ihtiyacı karşılamak için türbin sayısı, bunların ürettikleri enerji miktarlarını hesaplanmıştır. Tasarımı yapılan santralin maliyet analizi ve geri ödeme süresini hesaplamıştır.

Önder [13], aerodinamik esaslar ve kanat elemanı tasarım esasları ışığında istenilen bölge ya da rüzgâr koşullarına bağlı olarak yatay eksenli rüzgâr türbinleri için pratik ve görsellik taşıyan bir kanat tasarımı programı geliştirilmesini amaçlamıştır. Çalışmada, rüzgar hızı sabit tutulmuştur. Kanat elemanı tasarımı hesaplamalarında momentum teorisi ve kanat elemanı teorisini kullanmış ve bu teorilerin birlikte kullanılması gerektiğini vurgulamıştır.

Bu makalede, rüzgar enerjisinden yararlanmak amacıyla rüzgar türbini hesaplamaları, modellenmesi ve üretimi üzerinde durulmuştur. İlk olarak rüzgar türbini hesaplamaları gerçekleştirilmiş, hesaplamalar doğrultusunda bilgisayar ortamında katı modellenmesi ve imalat resimleri oluşturulmuştur. Daha sonra modellenmesi yapılan rüzgar türbini imalatına geçilmiştir. İmalatı tamamlanan rüzgar türbini gerekli alt yapı işlemleri gerçekleştirildikten sonra 6 metre çelik boru üzerine montaj edilmiştir.

2. RÜZGAR TÜRBİNİ MODELLENMESİ VE DİZAYNI (MODELING AND DESIGN OF WIND TURBINE)

Rüzgar türbini tasarımı için öncelikler gerekli güç, ortalama bir evin enerji ihtiyacı dikkate alınarak seçilmiştir. Bu güç değerinde ortalama rüzgar hızının sabit bir hızda (5 m/s) olduğu kabul edilip, üç kanatlı 3,2 m çapında bir rüzgar türbini tasarımı ve rüzgar türbini bileşenlerinin hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar doğrultusunda rüzgar türbini bilgisayar ortamında üç boyutlu olarak tasarlanmış ve katı modeli oluşturulmuştur. Tasarım aşamasından ardından imalat resimleri çizilmiş ve imalat safhasına geçilmiştir. Güç ihtiyacı doğrultusunda kanat çapı belirlenmiş ve rotor hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda gerekli devir hesaplanmış ve kanat profili seçilmiştir. Türbin kanat profili olarak Naca 4415 kullanılmıştır. Elektrik üretimi açısından uygun devire ulaşmak için dişli kutusu tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Türbin sisteminin aşırı rüzgarlardan korunması ve türbin sisteminde meydana gelen bir arıza durumunda sisteme müdahale etmek için fren mekanizması türbine montaj edilmiştir. Tasarımın gerçekleştirilmesi için elektrik üretici olarak doğru akım çıkışı veren jeneratör kullanılmıştır. Jeneratör çıkışında kullanılan elektrik taşıyıcı kabloların türbinin dönmesi durumunda birbirine dolanmasını önlemek amacıyla ile fırça sistemi kullanılmıştır. İmalatı tamamlanan rüzgar türbini gerekli alt yapı işlemleri gerçekleştirildikten sonra 6 metre çelik boru üzerine montaj edilmiştir. Tasarım hesaplamaları Betz

teoremine göre yapılmıştır ve değerler aşağıda verilmiştir.

2.1. Gerekli Güç (Required Power)

Kurulacak rüzgar türbini bir evin ortalama aylık 244 KWh olan enerji ihtiyacının karşılamak üzere tasarlanmıştır. Rüzgar hızı 5 m/s sabit kabul edilmiştir. Hava akımındaki kinetik enerjiden kaynaklanan güç denklem 1' de verilmiştir [14].

$$P = C_p \frac{\rho}{2} \pi R^2 V^3 \quad (1)$$

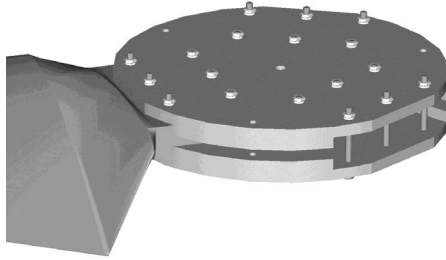
2.2. Rotor Hesaplamaları (Calculations of Rotor)

P gücünün Δt süresince etkimesi durumunda enerji denklemi denklem 2 ile ifade edilir [14].

$$E = P \Delta t \quad (2)$$

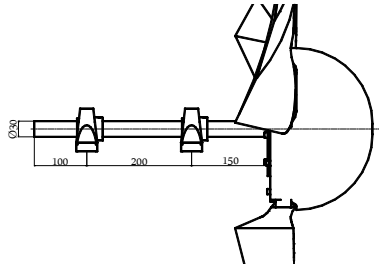
Rüzgar türbininden bir yılda (8760 saat) elde edilecek elektrik enerjisi 2928 Kwh kabul edildiğinde denklem 1' den rüzgar türbini yarıçapı; $R=1,6$ m olarak bulunur.

İmalatı gerçekleştirilen kanatlar, rotor miline kestamid malzemeler ile bağlanmış ve rotor merkezine gelen rüzgarın kanatları yönlendirilmesi ve kanat bağlantılarının estetiği açısından hub tasarımı yapılmış ve imal edilmiştir. Şekil 2' de kanat bağlama elemanları gösterilmiştir.



Şekil 2. Kanat bağlantı elemanları (Wing fasteners)

Rotor mili köprü yataklar ile iki noktadan yataklanmıştır. Yataklanan rotor mili redüktöre ara bağlantı mili ile bağlanmıştır. Şekil 3' te rotor mili bağlantı noktaları görülmektedir.



Şekil 3. Rotor mili bağlantı şeması (Wiring diagram of the rotor shaft)

Bir rüzgar türbini tasarımında en önemli noktalardan biriside rotorda oluşan gücün jeneratöre aktarımında kullanılan güç aktarma milidir. Bu mil kendisini etkileyen farklı kuvvetlere karşı dayanabilecek özelliklerde seçilmeli ve çapı bu özelliklere uygun olmalıdır. Denklem 3' de rotor mili çapının seçiminde kullanılan denklem verilmiştir [14].

$$d_R = \sqrt[3]{\frac{W_d \cdot 32}{\pi}} \quad (3)$$

$d_R = 30$ mm seçilmiştir.

2.3 Kanat Seçimi (Choice of Wing)

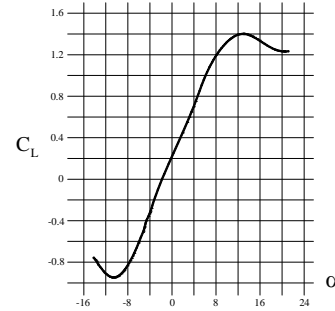
Aerodinamik açıdan optimum dizayn için ise α (hücum açısı) ve L/D (kaldırma/sürüklenme) oranlarının dikkatle seçilmesi gerekmektedir. α açısı küçük, buna karşılık L/D oranı ise maksimum değerlerinde seçilmelidir. Yüksek λ' lı ($\lambda =$ kanat uç hız oranı) rüzgar türbinlerinde C_L/C_D oranının büyüklüğünden dolayı tercih edilen kanat profil tipleri NACA 4415 ve NACA 23012'dir. Şekil 4' de C_L ve C_D nin α ' ya göre değişimini veren eğriler verilmiştir [15,16].

Hesaplamalar sonucunda Naca 4415 profilinin 10° bağlama açısının C_L/C_D değeri maksimumdur. Tablo 1' de C_L/C_D oranının hücum açısına göre değişimleri verilmiştir [15]. Kaldırma ve sürüklenme katsayıları doğrultusunda denklem 4 ve 5' de kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri hesaplanmıştır.

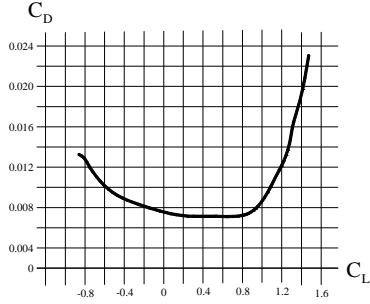
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (4)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (5)$$

Bu veriler doğrultusunda rüzgar türbininde NACA 4415 kanat profili 10° hücum açısı kabulü ile tasarlanmıştır [15].



Şekil 4.a. NACA 4415 profili $C_L - \alpha$ eğrisi (NACA 4415 profile $C_L - \alpha$ curve)



Şekil 4.b. NACA 4415 profili $C_L - C_D$ eğrisi (NACA 4415 profile CL - CD curve)

Tablo 1. Naca 4415 profili kanat değerleri (Values of the wing profile Naca 4415)

α	C_L	C_D	C_L/C_D	L (N)	D (N)
-4	-	0,08	-5,07	-4,68	0,92
	0,038				
8	1,102	0,012	95,00	135,67	1,43
10	1,280	0,012	106,66	157,58	1,48
20	1,304	0,013	99,54	160,54	1,61

Hesaplamalar sonucunda kanat bağlama açısı ve kanat giriş boyu hesaplanmış ve kanat tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kanat bağlama açısı denklem 6 ve denklem 7 ile hesaplanmıştır [15].

$$\alpha_b = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{R}{\lambda.r}\right) - \alpha \quad (6)$$

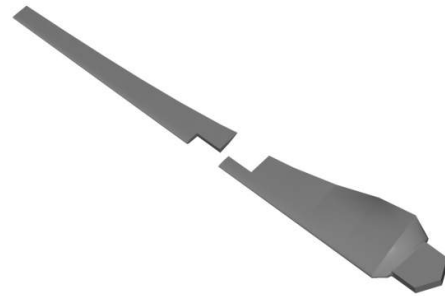
$$c = \frac{1}{B} \cdot \frac{16\pi}{C_l} \cdot r \cdot \sin^2\left[\frac{1}{3} \cdot \arctan\left(\frac{R}{\lambda.r}\right)\right] \quad (7)$$

Kanat bağlama açısı ve giriş boyu hesaplanırken kanat boyu belirli aralıklarla bölünmüş ve her istasyon için r değerleriyle hesaplamalar yapılmıştır. Kanat açılarının hesaplanmasında gerekli olan bu r değerinde aralıklarının fazla olması tasarım açısından faydalıdır. Tasarımı düşünülen kanadın rotor miline bağlanması gerekmektedir. Bu bağlantı için rotor merkezinden $r = 0,20$ m. lik mesafe kullanılmıştır. Tablo 2' de kanat hesaplamaları sonucunda bulunan bağlama açıları ve giriş boyları verilmiştir. Hesaplamalar neticesinde elde edilen veriler ile üretimi yapılacak kanadın katı modeli oluşturulmuştur. Şekil 5' de modellenmiş kanadın şekli verilmiştir.

Tablo 2. Kanat hesaplamaları sonucunda bulunan bağlama açıları ve giriş boyları (As a result of the wing calculations, beam angles and dimensions of mount)

İstasyon	r	Bağlama açısı	kiriş boyu
		α_b	c (m)
1	0,20	25,42	0,2412
2	0,32	16,54	0,2197
3	0,48	9,37	0,1770
4	0,64	5,08	0,1436
5	0,8	2,29	0,1195
6	0,96	0,35	0,1018
7	1,12	-1,07	0,0884
8	1,28	-2,15	0,0781
9	1,44	-3,01	0,0698
10	1,6	-3,69	0,0631

Rüzgar türbin kanadını cam elyaf takviyeli poliester esaslı kompozit malzeme ile üretiminin yapılabilmesi için türbin kanat modelinin imal edilmesi gerekmektedir. İmal edilen kanat modelinden poliester döküm kalıbı çıkarılmış ve 3 adet kanat dökülmüştür. Kanat modelinin belirlenen tasarım değerlerinde (Tablo 2) üretilebilmesi için CNC dik işlem merkezi kullanılmıştır. Mevcut tezgahın tabla ölçülerinden dolayı kanat 2 parça olarak işlenmiş ve işleme sonunda montaj edilmiştir. Kanat yarısı Şekil 5' de görülmektedir. Kanat modelinin imal edilebilmesi için Şekil 6' da görülen MDF model kütüğü hazırlanmıştır. Hazırlanan kütükler CNC dik işlem merkezinde işlenmiştir.



Şekil 5. Modellenen kanat profili ve tasarlanan kanat yarısı (Modelled airfoil and designed wings)



Şekil 6. Hazırlanan bir model kütüğü ve kanat 1. yarısının işlenmesi (Prepared model index and processing of first half of wing)

İmal edilen kanat modelinden poliester döküm için kalıp çıkarılmış ve 3 adet kanat dökülmüştür. Şekil 7' de kalıp çıkarılması ve dökümü gerçekleştirilen kanatlar gösterilmiştir.



Şekil 7. İmal edilen model ve poliester kalıp yarıları (the made model and polyester stereotypes)

Rüzgar türbinlerinde kullanılan kanat sayısı 2–24 adet arasındadır. Düşük hızlı türbinlerdeki kanat sayısının çok, yüksek hızlı türbinlerde kanat sayısının az olduğu düşünüldüğünde kanat sayısı ile uç hız oranı arasında ters orantı olduğu anlaşılmaktadır. Rüzgar türbinlerinde, kanat sayısının seçimi önem arz etmektedir.

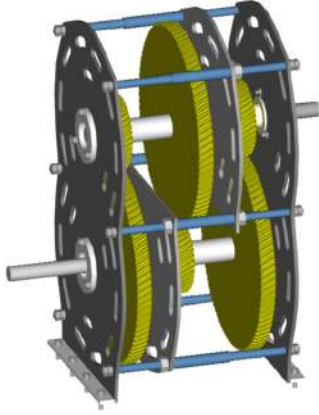
Tablo 3. Kanat sayısı ve uç hız oranı arasındaki ilişki (Relation between wing number and speed rate)

Kanat sayısı	Uç hız oranı (λ)
24	1
5	2
3	6
2	8
1	11

Dönme momentinin daha düzgün olması nedeniyle genellikle üç kanat kullanımı tercih edilmektedir. Bu türbinlerde, türbinin yapısı üzerinde depolanan yüklerden dolayı salınım yapan atalet momenti yoktur. Tablo 3' de kanat sayısı ve uç hız oranı arasındaki ilişki gösterilmiştir [15]. Tasarım hesaplamalarında, rotor 3 kanatlı seçildiği için $\lambda = 6$ alınmıştır.

2.4. Dişli Kutusu Tasarımı (Gearbox Design)

Dişli kutusu tasarımı, kullanılan jeneratör sistemi tasarıma yön vermektedir. Jeneratörün hangi devir aralıklarında istenen voltaj ve akım değerlerini ürettiği tespit edilmeli ve sistem bu yönde tasarlanmalıdır. Dişli kutusu kullanılması, sistemin verimini düşürmekle beraber AC çıkışlı jeneratörlerin kullanıldığı rüzgar türbinlerinde kaçınılmaz bir sistem elemanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Jeneratör 650 – 700 dev/dk' da yeterli enerji çıkışı verdiği için rotor giriş devri olan 35 dev/dk değeri, 650 ile 700 dev/dk aralığında olması gerektiği tespit edilmiştir. Dişli kutusu tasarımında 700 dev/dk değerine ulaşmak için 3 kademeli ve helisel dişlilerden oluşmuş bir dişli kutusu tasarımı yapılmıştır. Bilgisayar ortamında modellenen dişli kutusunun imalat detayları çıkarılmış ve imal edilmiştir. Şekil 8.1 ve Şekil 8.2' de dişli kutusunun katı modeli ve imal edilmiş hali görülmektedir.



Şekil 8.1 Tasarlanan dişli kutusu (Designed gearbox)



Şekil 8.2 İmal edilen dişli kutusu (Manufactured gearbox)

2.5. Platform ve Kule (Platform and Tower)

Tasarımı yapılan türbinde kule için 6 metre boyunda çelik boru kullanılmıştır. Borunun her iki başına bağlantı flanşı kaynatılmıştır. Zemin bağlantısı için çevrede 6 adet M16 cıvata bağlantısı kullanılmıştır.

2.6. Fren (Brake)

Devir sayısının belirli bir değerden sonra sabit tutulması, belirli bir sınırı aşmasına engel olması, çarkın ve kanatların korunması yönünden çok önemlidir. Tasarımı gerçekleştirilen rüzgar türbininde jeneratör devri 700 dev/dk sınırını aştığında fren sistemi devreye girecektir. Aynı zamanda türbinde bir arıza meydana geldiğinde sistemi tamamen durdurmak için kullanılmıştır. Şekil 9' da rüzgar türbini tasarımında kullanılan fren mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 9. Kullanılan mekanik fren düzeniği (The mechanical brake assembly)

2.7. Yönlendirici (Router)

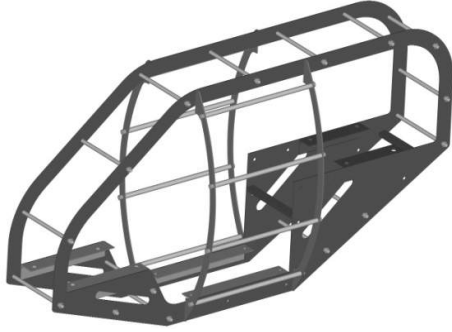
Çeşitli yönlerden esen rüzgarlardan yararlanabilmek için türbin gövdesinin, her an rüzgar doğrultusuna dikey konumda olması istenir. Bu yöneltme, ya çark düzlemine dikey olan büyük düzeyli bir dümenle veya yardımcı bir çarkla otomatik olarak sağlanabilmektedir [15]. Tasarımda kullanılan yönlendirici Şekil 10' da gösterilmiştir.



Şekil 10. Yönlendirici (Router)

2.8. Gövde (Body)

Rüzgar türbinlerinde kullanılan rotor, dişli kutusu, jeneratör, bağlantı elemanları, elektriksel kontrol elemanları ve bağlantı elemanlarını üzerinde taşıyan yapıdır. Tasarımı yapılan Rüzgar türbini çalışmasında gövde hareket elemanları ve jeneratörü içinde barındıracak şekilde tasarlanmıştır. Gövde içindeki elemanları herhangi bir arıza durumunda dışarı alınması gerekmektedir. Bunu sağlamak için gövde parçalı olarak imal edilmiştir. Montaj için cıvata ve somun kullanılmıştır. Şekil 11.1 ve Şekil 11.2' de tasarlanan ve imal edilen türbin gövdesi görülmektedir.



Şekil 11.1. Tasarlanan türbin gövdesi (Designed turbine housing)



Şekil 11.2. İmal edilen türbin gövdesi (Manufactured turbine housing)

2.9. Rüzgar Türbin Montajı (Wind Turbine Installation)

Rüzgar türbini tasarımında montaj önemli bir adımı teşkil etmektedir. Türbinin dikilmesinde ağırlık merkezinin tespit edilmesi gerekmektedir. Türbin verimliliğinin artmasında kanatların rüzgardan en uygun şekilde yararlanmasını sağlamak amacıyla türbin dikildiği direk ekseninde dönmesi gerekmektedir. Ağırlık merkezi türbin montajı bitirildikten sonra bulunmuştur. Türbinin direk ekseninde dönmesini sağlamak amacıyla araç poryesi kullanılmıştır. Porye üzerine elektrik kablolarının dolanmaması için fırça sistemi giydirilmiştir. Tasarımda porye ile fırça sisteminin yer kaplamasının önüne geçmek için porye tornalanmıştır. Şekil 12’ de ağırlık merkezine montaj edilen porye ve poryeye giydirilen fırça sistemi gösterilmiştir.



Şekil 12. Porye ve fırça sistemi (Hub and brush system)

Rüzgar türbini montajında öncelikle rotor mili montaj edilmiş ardında dişli kutusu ile akuple edilmiştir. Dişli kutusu çıkışına fren tertibatı bağlanmış ve jeneratör montajı gerçekleştirilmiştir. Fren tertibatı kumandası için çelik fren teli kullanılmış ve porye merkezinden geçirilmiştir. Türbin içindeki elemanlar montaj edildikten sonra kanatlar ve yönlendiricinin montajı gerçekleştirilmiştir. Türbin elemanlarının olumsuz hava şartlarından korunması amacı ile branda sistemi ile kaplanmıştır. Şekil 13.1’ de montaj edilmiş türbin gövdesi ve Şekil 13.2’ de rüzgar türbinin montajlı hali görülmektedir. Şekil 14’ de üretimi yapılan rüzgar türbininin son hali görülmektedir.



Şekil 13. Rüzgar türbinin montajlı hali (Wind turbine mounted version)



Şekil 13. Sistemin ankraj zeminine montaj edilmesi (Anchor to the floor of the assembly system)



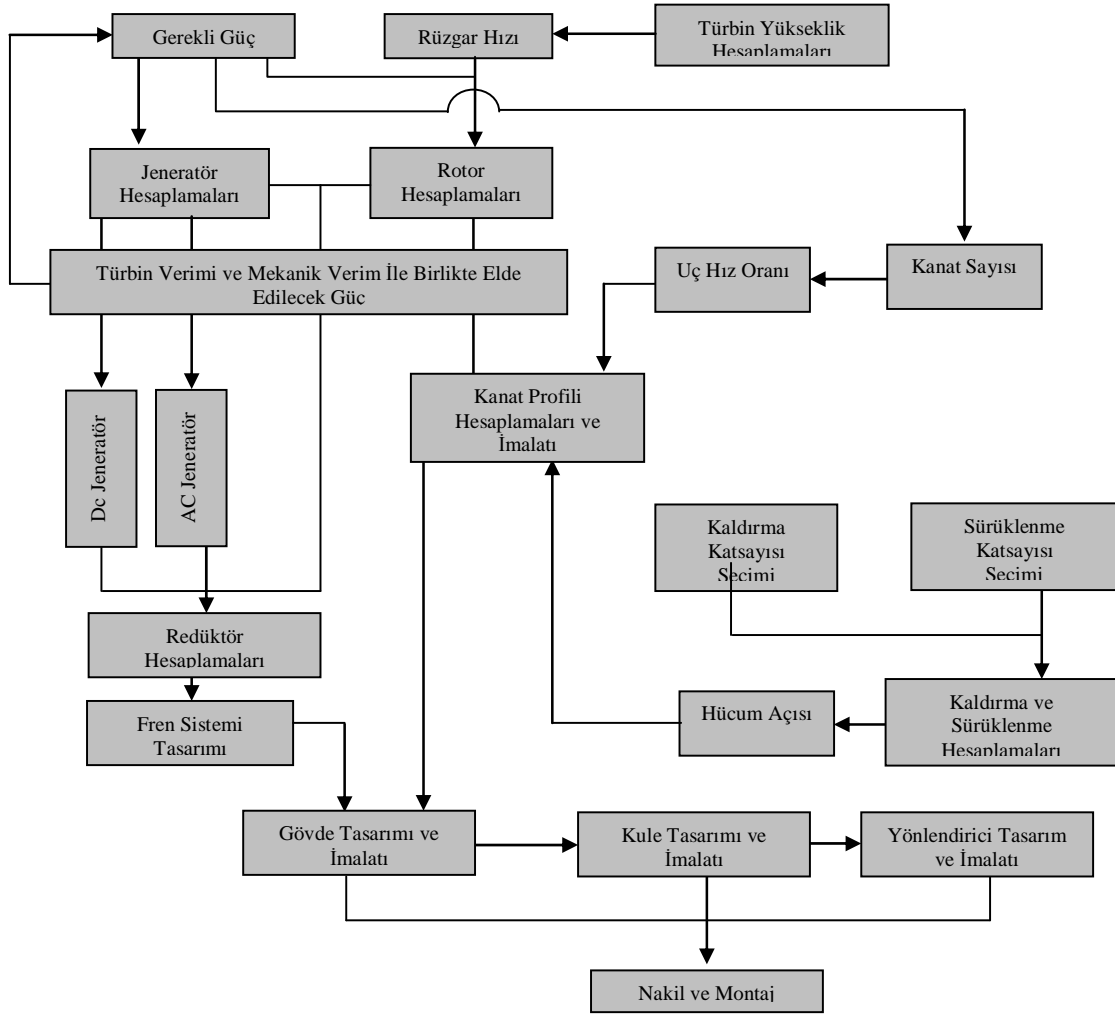
Şekil 14. Montaj işlemi tamamlanan türbin (Turbine completed assembly process)

3.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada bir evin enerji ihtiyacını karşılayabilecek kapasitede rüzgar türbini tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Türbin gücü ve diğer türbin elemanlarının hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Kanat profili olarak NACA 4415 seçilmiştir. Tasarım hesaplamalarında türbinin üreteceği güç belirlenip kanat hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Rüzgar türbin kanadının performansı, kanat profilinin doğru seçilmesi ile birlikte kanat imalatındaki hassasiyet ve kanat malzemesinin seçimi ile yakından ilgilidir. Bu sebeple kanat imalatında poliester üretim metodu kullanıldı. Kanadın poliester üretiminde kanat içi boş, rotora bağlandığı kısım dolu olarak imal edildi. Kanatların bağlandığı rotor ve rotor mili kanatlardan gelen hareketi dişli kutusuna aktarır. Bu aktarmada rotor, rotor miline 90^0 derece dik açı ile bağlanmalıdır. Aksi halde rotor yatakları hızlı bir şekilde bozulur ve sistemde önemli verim kayıpları oluşur. Bunun önüne geçmek için rotor mili ve rotora kaynatılmış alın flanş kullanılmıştır. Açığı sağlamak için mil ile flanş tek parça olarak işlenmiştir. İmal edilen dişli kutusunda dişli malzemesi olarak kestemid kullanılmıştır. Bu malzeme talaş kaldırmaya elverişli olmakla birlikte pahalıdır. İşleme avantajı için tercih edilmiştir. Dişli kutusunun dış gövdesi için sac malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler CNC lazer sac kesim tezgahında imal edilmiştir. Mil yataklamaları için tornada rulman yatakları imal edilmiştir. Rüzgar türbininin rüzgarda en verimli şekilde yararlanması kanatların rüzgara dik

konuma gelmesi gerekir. Türbin ağırlık merkezine porye sistemi montaj edilmiş ve türbinin kule ekseninde serbest dönmesi sağlanmıştır. Türbin gövdesi imalatından sonra tasarlanan bu sistem rüzgar türbini için kullanışlı olmuş fakat estetik açıdan olumsuz bir görüntü oluşturmuştur. Rüzgar türbini tasarımında tüm detayların dikkate alınması estetik görünüm için gereklidir. Rüzgar türbini kulesi için 6 metre boyunda çelik boru kullanılmıştır. Kullanılan boru 4 adet ankraj ile sabitlenmiştir. Ankrajlar $100 \times 100 \times 100$ cm ebatlarından donatılı betona montaj edilmiştir. Yaklaşık olarak 2.5 ton gelen bu beton kütle türbin sistemi için rijitlik sağlamış ve 6 metrelik çelik boru için çelik halat germeye ihtiyaç kalmamıştır. Kule yüksekliği arttıkça çelik halatlar ile kule rijitliği sağlanmalıdır.

Rüzgar türbininin yerine nakli ve türbinin montajı sırasında gerekli güvenlik tedbirleri alınmalı, montaj sırası önceden belirlenmelidir. Bir Rüzgar türbini hesabı ve üretim basamakları yukarıda adım adım verilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda, rüzgar türbini üretimi için izlenecek hesaplama, modelleme ve imalat aşamaları Şekil 15' de verilen akış diyagramı ile gösterilmiştir.



Şekil 15. Akış diyagramı (Flow chart)

Semboller (Symbols)

P	Türbin Gücü
ρ	Hava yoğunluğu
R	Türbin yarıçapı
V	Rüzgar hızı
d_R	Rotor mili yarıçapı
W_d	Direnç momenti
L	Kaldırma kuvveti
D	Sürüklenme kuvveti
C_L	Kaldırma katsayısı
C_D	Sürüklenme katsayısı
A	Rotor kanatlarının kapladığı alan
α_b	Kanat bağlama açısı
λ	Kanat uç hız oranı
α	Hücum açısı
c	Veter uzunluğu
r	Rotor radial mesafesi

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ağçay, M., “Türkiye’nin Elektrik Enerjisi Arz Talep Dengesinin Tespiti, Üretim Projeksiyonuna Yönelik Rüzgar Elektrik Santrali Tasarımı RES’ in Kurulum Maliyetlerinin ve Üretim Parametrelerinin Analizinin Matlab&Simulink İle Yazılan Programda Yapılması”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Bitirme Tezi, 2007.
- [2] Anonim, Sürdürülebilir Kalkınma ve Nükleer Enerji, TAEK, 2000.
- [3] Aydın, İ., “Küçük Güçlü Bir Otonom Rüzgar Enerjisi Çevrimi İle Elektrik Eldesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, 2008.
- [4] Aygun, E., “Güneş Enerjisi Nedir, Nasıl Faydalanılır?”, Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi, Sayı 257, Sayfa 22, 1989.
- [5] Demir, F.N., “Rüzgar Türbinleri”, Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2007.
- [6] Ergür, Ö., “Rüzgar Türbinleri İle Enerji Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [7] Şentürk, U., “Bir Rüzgar Türbininin Performansının Analitik ve Nümerik Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [8] Rapor, “Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi”, Enerji Raporu, 2010.
- [9] Dündar, C., “Rüzgar Enerjisi ve Türkiye Atlası”, www.atmosfer.itu.edu.tr/bildiriler/431.pdf, 2003.
- [10] Tureb, <http://www.tureb.com.tr>, 2012.
- [11] Karadağ, H.İ., “Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgar Enerjisinin Önemi ve Rüzgar Türbini Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [12] Şen, Ç., “Gökçeada’nın Elektrik İhtiyacının Rüzgar Enerjisi İle Karşılanması”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
- [13] Önder, M., “Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanadının Bilgisayar Destekli Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [14] Köm, L., “Rüzgar Türbininin Bilgisayar Destekli Tasarımı ve Prototip İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, 2004.
- [15] Emniyetli, G., “Evsel Elektrik İhtiyacının Karşılanması İçin Rüzgar Türbini Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [16] Onat, C., Çetin, Ş., “Rüzgar Tünelindeki Kanat Profilinin Dikey Hareketinin Modellenmesi”, Mühendis ve Makine, Sayı 522, 2003.