

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİ BİR RÜZGAR ENERJİ ÜRETİM SİSTEMİNİN OPTİMAL TASARIMI,
GERÇEKLENMESİ VE PERFORMANS İYİLEŞTİRMESİ**

BEDRİ KEKEZOĞLU

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. MUĞDEŞEM TANRIÖVEN**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YENİ BİR RÜZGAR ENERJİ ÜRETİM SİSTEMİNİN OPTİMAL TASARIMI,
GERÇEKLENMESİ VE PERFORMANS İYİLEŞTİRMESİ**

Bedri KEKEZOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 21/01/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Celal KOCATEPE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan ÜNDİL
İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. Hıdır Selçuk NOĞAY
Kırklareli Üniversitesi

Bu alışma, 29-04-02-KAP01 nolu “Mini Rüzgar Türbininin Optimal Tasarımı, Gerçeklenmesi ve Performans İyileştirmesi” konulu proje kapsamında Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasındaki katkılarından dolayı değerli danışman hocam Prof. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN'e, çalışmalarım süresince her zaman yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca her zaman maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan anneme ve babama, çalışmalarım sırasında en büyük destekçim olan eşime teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak, 2013

Bedri KEKEZOĞLU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ	X
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı.....	8
1.3 Orijinal Katkı.....	9
BÖLÜM 2	
RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ	10
2.1 Rüzgar Türbinlerini Oluşturan Ekipmanlar	11
2.1.1 Kule.....	12
2.1.2 Kanatlar.....	12
2.1.3 Dişli Kutusu	13
2.1.4 Generatör.....	13
2.1.4.1 Doğru Akım Generatörleri.....	14
2.1.4.2 Senkron Generatörler	14
2.1.4.3 Asenkron Generatörler	14
2.1.5 Güç Elektroniği Ekipmanları.....	15
2.1.6 Kontrol Sistemleri.....	15
2.2 Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinde Güç.....	16

BÖLÜM 3

RÜZGAR HIZI DAĞILIMLARI VE KAPASİTE FAKTÖRÜ	21
3.1 Weibull Dağılım Fonksiyonu	21
3.1.1 Moment Yöntemi	23
3.1.2 Ortalama Hız ve En Yüksek Hız Yöntemi	24
3.1.3 En Yüksek Olabilirlik Yöntemi	24
3.2 Rayleigh Dağılım Fonksiyonu	25
3.3 Kapasite Faktörü	26

BÖLÜM 4

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE EKONOMİK ANALİZLER	28
4.1 Rüzgar Türbinlerinde Ekonomik Büyüklükler	28
4.1.1 Finansman Maliyetleri	30
4.1.1.1 Şimdiki Değer Yöntemi	31
4.1.2 Bakım Onarım Maliyetleri	31
4.1.3 Birim Enerji Maliyeti	32

BÖLÜM 5

GENERATÖR PERFORMANS ANALİZİ ÇALIŞMALARI	34
5.1 Doğru Akım Generatörleri	34
5.2 Alternatif Akım Generatörleri	35
5.2.1 Senkron Generatör	35
5.2.2 Asenkron Generatör	36
5.3 Mini Rüzgar Türbininde Kullanılacak Generatörleri Performans Analizleri	37

BÖLÜM 6

MİNİ RÜZGAR TÜRBİNİ KONSEPTİ	44
6.1 Prototip Çalışmaları	46
6.1.1 Tasarım Çalışmaları	46
6.1.1.1 Kanat Tasarımı	46
6.1.1.2 Göbek Tasarımı	51
6.1.1.3 Dişli Tasarımı	53
6.1.2 Prototip Üretimi	55
6.1.3 Prototip Çalışması Performans Analizi	59
6.2 Mini Rüzgar Türbinine Ait Optimizasyon Çalışmaları	67

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	85
EK-A	90
NREL S833 KANAT PROFİLİ	90

ÖZGEÇMİŞ.....	91
---------------	----

SİMGE LİSTESİ

A	Kanatların süpürdüğü alan
a	Dişli sayısı
C_p	Güç katsayısı
c	Weibull skala parametresi
c_v	Veter uzunluğu
E_K	Kinetik enerji
E_T	Yıllık enerji üretimi
$f(v)$	Weibull dağılım fonksiyonu
i	Yıllık faiz oranı
$J_{Dişli}$	Dişli ataleti
J_{kanat}	Kanat ataleti
J_T	Toplam ataleti
KF	Kapasite faktörü
k	Weibull şekil parametresi
k_g	Kanat genişliği
k_k	Kanat kalınlığı
l	Kanat uzunluğu
$M_{Baş}$	Başlangıç maliyetleri
M_{Bir}	Birim enerji maliyeti
M_{BO}	Bakım onarım maliyetleri
M_{DE}	Diğer maliyetler
M_{Ekip}	Ekipman maliyetleri
M_G	Generatör maliyeti
M_{ilk}	İlk ödeme miktarı
$M_{İş}$	İşçilik maliyetleri
M_K	Kanat maliyeti
M_{KE}	Diğer kurulum maliyetleri
M_{Ku}	Kule maliyeti
M_{Kur}	Kurulum maliyetleri
$M_{şim}$	Maliyetin şimdiki değeri
M_t	Ara ödeme bedeli
$M_{Taş}$	Taşıma maliyeti
$M_{Top-yıl}$	Yıllık toplam maliyet
M_{yat}	Yatırım maliyeti
m	Kanat sayısı
m_c	Herhangi bir cismin kütlesi

n	Ekonomik ömür
P_A	Kanatların süpürdüğü alandaki güç
P_E	Elektriksel güç
P_m	Mekaniksel güç
P_N	Türbin nominal güç çıkışı
P_r	Rüzgar gücü
R	Kanat yarıçapı
T_m	Mekaniksel moment
t	Zaman
t_{max}	Maksimum kalınlık
ω	Türbin açısal hızı
v_{in}	Üretime başlangıç rüzgar hızı
v_k	Kanat ucundaki rüzgar hızı
v_{max}	Maksimum rüzgar hızı
v_{ort}	Ortalama rüzgar hızı
v_{out}	Üretim sonu rüzgar hızı
v_r	Nominal güç rüzgar hızı
λ	Kanat uç hız oranı
ϑ	Kanat açısı
Γ	Gamma fonksiyonu
ρ	Hava yoğunluğu
ρ_k	Kanat malzeme yoğunluğu
δ_n	Kanat kalınlık oranı
γ	Eksik gamma fonksiyonu

KISALTMA LİSTESİ

BEM	Kanat Elemanı Momentum Yöntemi (Blade Element Momentum)
BRM	Birim Enerji Maliyeti
MOEA	Çok Kısıtlı Evrim Algoritması (Multi-Objective Evolutionary Algorithm)
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu (Partical Swarm Optimization)
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi Genel Şeması.....	12
Şekil 2.2	A alanına v hızı ile birim zamanda çarpan rüzgar kütlesi	17
Şekil 2.3	Rüzgar türbininde hava akışı.....	17
Şekil 2.4	Türbin güç katsayısı ile kanat uç hız oranının kanat açısına bağlı değişimi ..	20
Şekil 3.1	Weibull Dağılım Fonksiyonunun Skala Parametresine Göre Değişimi	22
Şekil 3.2	Weibull Dağılım Fonksiyonunun Şekil Parametresine Göre Değişimi	23
Şekil 3.3	Farklı Parametre Hesaplama Yöntemlerinin Kıyaslanması.....	25
Şekil 3.4	Farklı skala parametleri için Rayleigh Dağılımı Fonksiyonu'nun değişimi	26
Şekil 4.1	Rüzgar rejimine bağlı olarak rüzgar türbinlerinin maliyet değişimi	29
Şekil 5.1	Testleri gerçekleştirilen generatörler	38
Şekil 5.2	Generatör Deney Devresi Şematik Gösterimi	39
Şekil 5.3	Generatör 3'e ait boşa çalışma karakteristiği	40
Şekil 5.4	Generatör 4'e ait boşa çalışma karakteristiği	40
Şekil 5.5	Generatör 6'ya ait boşa çalışma karakteristiği	41
Şekil 5.6	Generatör 8'e ait boşa çalışma karakteristiği	41
Şekil 5.7	Prototip üretiminde kullanılacak generatöre ait devir sayısına bağlı çıkış gücü değişimi	42
Şekil 5.8	Prototip üretiminde kullanılacak generatöre ait farklı devirlerde çıkış gerilim – çıkış gücü eğrileri	43
Şekil 6.1	Tasarlanan mini rüzgar türbin konsepti	45
Şekil 6.2	Kanat üstten görünüşü	46
Şekil 6.3	Kanat yanal kesit görünümü (Kanat Profili).....	47
Şekil 6.4	Kanat kesiti üzerinde kanat kalınlığının görünümü.....	47
Şekil 6.5	S833 Kanat Profili	48
Şekil 6.6	CATIA V5 ortamında oluşturulan kanat profili.....	49
Şekil 6.7	Tasarlanan yapıya ait hücum açısı	50
Şekil 6.8	Dişli çarklar ile kullanıma uygun kanat tasarımı	50
Şekil 6.9	Farklı kanat tasarımları	51
Şekil 6.10	Mini rüzgar türbini için tasarlanan göbekler	52
Şekil 6.11	6 kanat bağlantısı için tasarlanmış göbek kapağı.....	53
Şekil 6.12	Kanatları kapak yüzeyinin oturumu	53
Şekil 6.13	Mini rüzgar türbini için tasarlanan dişli çark	54
Şekil 6.14	Generatör bağlantısı için tasarlanan dişli çark.....	55
Şekil 6.15	Prototip üzerinde kullanılan malzemeler	56
Şekil 6.16	Sistemin 6 kanatlı 3 dişli için montajlı durumu	58

Şekil 6.17	Sistemin 4 kanatlı 3 dişli için montajlı durumu.....	58
Şekil 6.18	Sistemin 3 kanatlı 2 dişli için montajlı durumu.....	59
Şekil 6.19	6 kanatlı 3 dişliden oluşan prototip üzerinden alınan verilerin dağılımı.....	60
Şekil 6.20	3 kanatlı yapı için performans eğrileri.....	61
Şekil 6.21	4 kanatlı yapı için performans eğrileri.....	61
Şekil 6.22	5 kanatlı yapı için performans eğrileri.....	62
Şekil 6.23	6 kanatlı yapı için performans eğrileri.....	62
Şekil 6.24	Generatör bağlantısı ile mini rüzgar türbini	63
Şekil 6.25	6 kanatlı 3 dişliden oluşan prototip için rüzgar hızına bağlı güç çıkışı değişimi.....	64
Şekil 6.26	Farklı dişli kutusu kullanımları için 6 kanatlı 3 dişli yapının güç çıkışı eğrileri	65
Şekil 6.27	Kullanılan optimizasyon algoritması	71

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 5.1	Tasarım Çalışmalarında Kullanılan Generatörler.....38
Çizelge 6.1	Kanat aerodinamik özellikleri.....49
Çizelge 6.2	Dişli çark özellikleri54
Çizelge 6.3	Türbin bileşenleri üretim miktarları57
Çizelge 6.4	3m/s ortalama rüzgar hızı için optimum boyutlar ve birim enerji maliyeti70
Çizelge 6.5	4m/s ortalama rüzgar hızı için optimum boyutlar ve birim enerji maliyeti72
Çizelge 6.6	5m/s ortalama rüzgar hızı için optimum boyutlar ve birim enerji maliyeti73
Çizelge 6.7	6m/s ortalama rüzgar hızı için optimum boyutlar ve birim enerji maliyeti74
Çizelge 6.8	3m/s ortalama rüzgar hızı için farklı kanat boylarına ait birim enerji maliyetleri76
Çizelge 6.9	4m/s ortalama rüzgar hızı için farklı kanat boylarına ait birim enerji maliyetleri77
Çizelge 6.10	5m/s ortalama rüzgar hızı için farklı kanat boylarına ait birim enerji maliyetleri78
Çizelge 6.11	6m/s ortalama rüzgar hızı için farklı kanat boylarına ait birim enerji maliyetleri79

YENİ BİR RÜZGAR ENERJİ ÜRETİM SİSTEMİNİN OPTİMAL TASARIMI, GERÇEKLENMESİ VE PERFORMANS İYİLEŞTİRMESİ

Bedri KEKEZOĞLU

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN

Günümüzde elektrik enerjisine olan talep giderek artmaktadır. Geleneksel enerji üretim tekniklerinin artan talebi karşılamakta yetersiz kalması, fosil yakıt rezervlerindeki azalma ve çevresel etkiler sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı hız kazanmıştır.

Dünyadaki gelişim incelendiğinde, yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisinin öne çıktığı görülmektedir. Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde farklı yapıya ve bileşenlere sahip türbin sistemlerinin enerji üretimi amacıyla kullanıldığı bilinmektedir. Bununla birlikte, çeşitli ortam şartlarında maksimum verimi, minimum maliyet ile elde edebilecek optimum rüzgar turbini yapısının ortaya konulması konusundaki çalışmalar da hızla devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında, yerleşimin yoğun olduğu kentsel bölgelerde kullanıma uygun yeni bir rüzgar enerji dönüşüm sisteminin tasarımı ve prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Uygulaması gerçekleştirilen sistem esnek bir yapıya sahiptir. Ortaya konulan rüzgar türbini konseti dış yüzeyine dişli çarklar yerleştirilmiş kanatlardan meydana gelmektedir. Tasarım çalışmalarında ve gerçekleştirilen analizlerde farklı kanat ve dişli sayıları dikkate alınmıştır.

Tasarımı gerçekleştirilen mini rüzgar türbini farklı kanat sayısı ve dişli miktarı ile çalışmaya uygun olarak dizayn edilmiştir. Böylece arttırılabilir bir yüzey alanı oluşturulmuş ve farklı rüzgar rejimine sahip bölgeler için ayrı ayrı optimize edilebilme olanağına kavuşulmuştur.

Geliştirilen yapı ile 3, 4, 5 ve 6 kanatlı konfigürasyonların, ihtiyaca göre farklı ortamlarda kullanılabilmesine imkan tanınmıştır. Her bir konfigürasyonun tekli, ikili ve üçlü çark sistemleri ile çalıştırılabilmesi sağlanmıştır. Böylece kullanılacağı bölgenin rüzgar potansiyeline bağlı olarak değişken bir yapıya sahip, modüler mini rüzgar türbini tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Gerçeklenen tüm durumlar için mini rüzgar türbini analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar tez kapsamında sunulmuştur. Mini rüzgar türbini konseptine üzerinde kullanılacak olan generatör laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testler ile sekiz farklı generatör tipi arasından belirlenmiştir.

Ayrıca, geliştirilen optimizasyon algoritması kullanılarak tasarımı gerçekleştirilen sistemin minimum maliyeti sağlayacak şekilde optimum boyutlandırılması sağlanmıştır. Optimizasyon çalışmalarında sistemin farklı bölgeler için farklı konfigürasyonlar ile optimize edilebildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbini tasarımı, rüzgar türbini prototipi, rüzgar türbinlerinin boyutlandırılması, rüzgar türbinlerinde optimizasyon

**OPTIMAL DESIGN, IMPLEMENTATION AND PERFORMANCE
IMPROVEMENT OF A NEW WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM**

Bedri KEKEZOĞLU

Department of Electrical Engineering
PhD. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN

Electrical energy demand has been continuously increasing. Depleting fossil fuel reserves, environmental concerns, and insufficiency of conventional generation techniques in meeting growing demand, renewable energy use has been widely adopted in the world.

When the application of renewable energy sources in the world considered, it can be seen that wind energy is mostly preferred over other renewable energy sources. Various wind turbines and components are used in wind energy conversion systems. Therefore, research continues on developing optimal wind turbine structure that has maximum efficiency with minimum cost for various environmental conditions.

In this thesis, a new prototype wind energy conversion system suitable for urban use is designed and manufactured. The proposed design is modular and has flexible structure. In the new design, an outer gear ring attached to turbine blades is used. In design stage, both the number of blades and the number of tooth in the outer ring are varied to analyze their effect on turbine performance.

The designed wind turbine can be operated with different blade numbers and different outer ring tooth numbers. By connecting several small wind turbine modules, it is possible to increase effective area. Thus, the new design can be optimized for regions with different wind speed regimes. 3-blade, 4-blade, 5-blade and 6-blade versions are manufactured and ready to use. Analyses for these versions are completed and results are given in this study. The generator for the new wind power system is selected based on tests of 8 different generators.

In addition, optimal sizing of the proposed systems that minimizes the cost is completed using an optimization algorithm. In optimization studies, it is shown that optimal configurations can be found for different regions.

Key words: Wind turbine design, prototype wind turbine, sizing of wind turbines, optimization studies in wind turbines

GİRİŞ

Geçmişten günümüze insanoğlu artan elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için çeşitli kaynaklar kullanılmıştır. Özellikle çevresel etkilerin dikkate alınması ile rüzgar, güneş, dalga v.b. temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim olmuştur. Rüzgar enerjisi, teknolojik gelişmelere de bağlı olarak günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkmaktadır. Rüzgar elektrik santrallerinde kullanılan çeşitli tiplerdeki (yatay eksen, dikey eksen) ve güçlerdeki rüzgar türbinleri sayesinde hızla artan oranda elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmektedir.

Şebeke bağlantılı çalışan rüzgar enerji sistemleri gereksinim duydukları kurulum alanı ve rüzgar rejiminden dolayı tüketim merkezlerinin dışına tesis edilmektedir. Bu durum kentsel bölgelerde bulunan rüzgar enerjisi potansiyelinin kullanılamamasına yol açmaktadır.

Gerçekleştirilen tez çalışması ile kentsel bölgelerde kullanıma uygun yeni bir mini rüzgar türbini ortaya konulmuştur. Ele alınan mini rüzgar türbininin tasarımı gerçekleştirilmiş ve prototip uygulaması hayata geçirilmiştir.

Ortaya konulan türbin yapısı modüler olarak tasarlanmış ve prototip üzerinde farklı konfigürasyonlar için mini rüzgar türbinine ait performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar yardımıyla türbine ait optimizasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Geliştirilen rüzgar türbin yapısının farklı rüzgar rejimleri için çeşitli konfigürasyonlarda kullanılabileceği gösterilmiştir.

Tez çalışmasının ilk bölümünde, rüzgar türbinlerinin tasarımı, üretimi ve optimizasyonu konuları ile ilgili literatür çalışması yapılmıştır. Tezin amacı ve yapılan çalışmanın orijinal katkısı ortaya konulmuştur.

Teze ait 2. Bölüm’de, rüzgar enerji dönüşüm sistemleri ve içerdikleri ekipmanlar tanıtılmıştır. Rüzgar türbinlerinden nasıl güç elde edildiği ve kullanılan matematiksel alt yapı açıklanmıştır.

Bölüm 3’te, rüzgar rejimine ait dağılım fonksiyonları tanıtılmış ve bu fonksiyonların kullanımı durumunda türbin enerji çıkışının değişimi gösterilmiştir. Bölüm sonunda enerji üretim sistemlerinde verimliliğin bir göstergesi olan kapasite faktörü açıklanmıştır.

Tezin 4. Bölüm’de, rüzgar türbinlerinin ekonomik analizinde kullanılan büyüklükler gösterilmiş ve bunlara ait matematiksel ifadeler verilmiştir.

Çalışmanın 5. Bölümü’nde, tez kapsamında geliştirilen mini rüzgar türbininde kullanılacak generatör tespitine yönelik yapılan çalışmalar sunulmuştur. Bölüm sonunda yapılan çalışmalar ile kullanımına karar verilen generatöre ait karakteristik değerler verilmiştir.

Çalışmaya ait 6. Bölüm’de, mini rüzgar türbinin tasarım safhası detaylı olarak anlatılmıştır. Türbin üzerinde bulunan her bir bileşene ait üretim aşamaları gösterilmiştir. Geliştirilen yapıya ait ilk prototip ve bunun üzerinde yapılan çalışmalar sonucu elde edilen veriler ayrıntıları ile sunulmuştur. Bölüm sonunda geliştirilen rüzgar türbininden alınan veriler kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları ve sonuçları paylaşılmıştır.

Tezin son bölümünde, gerçekleştirilen çalışma ile elde edilen sonuçlar ve bunların değerlendirmeleri verilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Rüzgar enerji sistemleri gün geçtikçe enerji sistemlerinin önemli bir parçası halini almaya başlamıştır. Rüzgar türbinlerinin daha etkin ve verimli kullanımına yönelik çalışmalar da bu kapsamda hız kazanmıştır. Özellikle gerçekleştirilen yeni tasarım ve optimizasyon çalışmaları günümüzde ön plana çıkmaktadır. Rüzgar türbinlerinin

tasarımı, optimizasyonu, prototip uygulamaları ve verimlerinin artırımı ile ilgili literatürde gerçekleştirilen önemli çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Ameku ve arkadaşları, 3 kW gücünde bir rüzgar türbini tasarlamışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada prototip rüzgar türbinine ait kanat tasarımı yapılmıştır. Ele alınan kanat yapısı teorik ve sayısal olarak analiz edilmiştir. Bunun yanında prototipi gerçekleştirilen türbin üzerinde değişken kanat açısı ve generatör alan akım kontrolleri olmak üzere iki kontrol metodu kullanmışlardır. Sunulan rüzgar türbininin, tasarlanan kanat ve kontrol yöntemleri kullanılarak elektriksel parametrelerinin değişimleri analiz edilmiştir [1].

Kosasih ve Tondelli hava akımını hızlandırmak amacıyla etrafında konik bir yapı kullanılan küçük güçlü bir türbinin laboratuvar ortamında performans analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda kanat etrafında kullanılan yapının, mikro türbin performansını %60 oranında arttırdığı görülmüştür [2].

Chen ve arkadaşları tarafından ortaya konulan çalışmada, farklı rotor yapıları ve rüzgar hızlarında 30 cm çapa sahip küçük bir rüzgar türbininin performansı analiz edilmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneyler sonucunda rotor yapısının türbin çıkış gücünü önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Yapılan çalışma ile birlikte incelenen küçük güçlü rüzgar türbininin düşük tork ve yüksek rotor dönüş hızı karakteristiğine sahip olduğu ve geleneksel büyük rüzgar türbinlerine göre rotor sağlamlığının daha yüksek olduğu gösterilmiştir [3].

Singh ve Ahmed tarafından rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere yeni bir kanat yapısı tasarlanmış ve söz konusu yapı 400 W gücündeki küçük güçlü bir rüzgar türbininde 3-6 m/sn rüzgar hızı aralığında test edilmiştir. Farklı kanat açıları için türbin performansı analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, optimum kanat açısı 18° olarak tespit edilmiştir. Tasarlanan kanat yapısı, konvansiyonel rotor yapısıyla kıyaslandığında daha yüksek güç katsayısı (C_p) değerleri elde edilmiştir [4].

Chong ve arkadaşları tarafından yüksek binaların üzerinde kullanılabilecek dikey eksenli bir rüzgar türbini sistemi ortaya konulmuştur. Tasarlanan sistem, güneş enerjisi sistemleri ve yüksek katlı binalardaki yağmur suyu toplama sistemleri ile entegre

olabilmektedir. Ele alınan rüzgar türbinine ait deneysel çalışmalar ile simülasyon çalışmaları sunulmuştur [5].

A. Ali ve arkadaşları, yeni bir dikey eksenli rüzgar türbini tasarımı gerçekleştirmiştir. Ele alınan sistemin güç üretim potansiyelini incelemişlerdir. Türbin kanatları farklı konfigürasyonlarda ve farklı rüzgar hızlarında test edilmiştir. Farklı malzemeler ile imal edilen rüzgar türbininin, hafif malzeme kullanılması durumunda daha yüksek performans gösterdiği ortaya konulmuştur [6].

Abrahamsen ve arkadaşları, küçük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere 10 kW gücünde, 8 kutuplu yeni bir senkron generatör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan generatör sargılarında süper iletkenler kullanılmıştır [7].

Tang ve arkadaşları, yeni bir rüzgar türbin kanadı için analizi gerçekleştirilen türbinin uç hız oranını ve nominal güç üretimine başladığı rüzgar hızını baz alarak, rotor yarıçapı ile kanat şekli açısından incelenmesi yapılmıştır [8].

Sun ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, büyük ölçekli bir rüzgar türbini için üç boyutlu kanat tasarımı gerçekleştirilmiştir [9].

Arakawa ve arkadaşları tarafından yapılan yayında, Avrupa'ya yeni rüzgar türbini tasarımlarını tanıtmak amaçlanmıştır. Bu çalışmada, gelecekte çok daha fazla rüzgar türbini kullanılacağı göz önüne alınarak, kullanılacak türbinlerin ekonomik, enerji verimli ve çevresiyle uyumlu olması gerektiği savunulmuştur. Rüzgar türbinlerinin tasarımı yapılırken, bulunduğu bölgenin özelliklerinin de yansıtılması gerektiğine vurgu yapılmıştır [10].

Collier ve Heldwein tarafından, rüzgar türbini, sabit mıknatıslı senkron generatör ve PWM doğrultucunun sürekli hal karakteristikleri temel alınarak küçük ölçekli bir rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi tasarımı için bir metodoloji önerilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada, sistemin analizi için detaylı sistematik prosedür verilerek, simülasyon modeli ve sonuçlar sunulmuştur [11].

Howell ve arkadaşları tarafından, küçük ölçekli dikey eksenli rüzgar türbinleri ile ilgili bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, incelenen türbinin aerodinamikleri ve performansı ile ilgili deneysel ve matematiksel analizler sunulmuştur. İncelenen türbin

için farklı rüzgar hızı ve uç hız oranları için rüzgar tüneli performansları verilmiştir. İki kanatlı ve üç kanatlı rotor testleri sonucu, üç kanatlı rotorların performans katsayılarının daha yüksek olduğu gözlenmiştir [12].

Nagai ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, değişken eğim kontrol sistemli, 3 kW gücündeki rüzgar türbini performansı sunulmuştur. İncelenen generatörün prototip tasarımı ve imalatı gerçekleştirildikten sonra, farklı çalışma durumları için davranışları incelenmiştir [13].

Lavassas ve arkadaşları, çelikten yapılmış 1 MW'lık rüzgar türbini kulesinin prototip tasarımını ve analizlerini sunmuştur [14].

Zhang ve arkadaşları tarafından düşük hızlı yüksek performanslı rüzgar türbin kanatlarının tasarımı ve araştırması ile ilgili olarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu yayında, genetik algoritma ve Blade Element Method (BEM) yöntemi kullanılarak optimum kanat uzunluğu ve yükleme açısı araştırılmıştır [15].

Sharma ve Madawala tarafından yayınlanan makalede, değişken kanat uzunluklu ve hibrid güç değişim sistemli, akıllı rüzgar türbin sistemleri incelenmiştir. Basit maliyet analizleri sonucu önerilen konseptin, sabit uzunluktaki kanat rotor maliyetine göre yaklaşık olarak 4,3 kat maliyet ile uygulanabilir bir sistem olduğu gösterilmiştir. Farklı çalışma koşullarındaki deneysel çalışmalar sonucu, küçük ölçekli yenilenebilir enerji uygulamaları için akıllı kanatlı rüzgar türbin sisteminin önerilebileceği belirtilmiştir [16].

Park ve arkadaşları tarafından, 3 MW sınıfında offshore bir rüzgar türbini geliştirilmiştir. Üç kademeli dişli kutusu kullanılan entegre aktarma organı tasarımı ile ağırlık azaltılmış ve iletim için yüksek güvenilirlik sağlanmıştır. Kullanılan tam güç dönüştürücülü sabit mıknatıslı generatör ile yüksek verimlilik sağlanmıştır. Kanat ve sistem yükünü azaltması için özel eğim kontrol sistemi kullanılmıştır [17].

Jugsujindaa ve arkadaşları tarafından tasarlanan çok küçük güçlü rüzgar türbini prototipi için türetilen denklemler sunulmuştur. Vantilatörden türbin kanatlarına gönderilen 3,86-8,4 m/sn'lik rüzgar ile üretilen elektrik enerjisi led lambaların enerjilendirilmesi için kullanılmış ve çalışma sonucunda incelenen yapı için % 9'luk tahmini verimlilik elde edilmiştir [18].

Campbell ve Santoso tarafından gerçekleştirilen çalışmada, küçük ölçekli elektromekanik rüzgar türbini güç aktarma modelinin tasarımı ve performansı sunulmuştur [19].

Fuglsang ve Madsen tarafından, yatay eksenli rüzgar türbinlerinin rotorları için çok disiplinli dizayn yöntemi geliştirilmiştir. Nümerik optimizasyona dayalı bu çalışmada minimum enerji maliyeti amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda rotor optimizasyonu ile enerji maliyetinin azaltılabileceği gösterilmiştir [20].

Benini ve Toffolo, yatay eksenli bir türbinin dizayn optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Optimizasyon çalışmalarında aerodinamik yapının da bulunduğu Blade Element Method (BEM) ile birlikte Multi-Objective Evolutionary (MOEA) algoritması kullanılmıştır [21].

Uys ve arkadaşları, rüzgar türbini için çelik kule maliyetini minimize edecek olan tasarımı elde etmek üzerine çalışmalar yapmışlardır. Kule küçük boyutlu konik halkalardan imal edilip, silindirik 3 parça ile modellenmiştir. Maliyet fonksiyonunda materyal ve üretim masrafları kullanılmıştır. Çalışma neticesinde minimum maliyet, en küçük güçlendirici halkanın kullanımı ile elde edilmiştir [22].

Liao ve arkadaşları, rüzgar türbin kanatları için çok kriterli kısıtlanmış optimum tasarım modeli geliştirmiştir. Bu model, türbin üretim maliyetini azaltmak için minimum kanat kütlesi elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Optimum çözüm elde etmek için Partical Swarm Optimizasyon (PSO) algoritması kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, geliştirilen optimizasyon modelinin büyük güçlü rüzgar türbinlerinin tasarım problemlerine uygulanabilir olduğu gösterilmiştir [23].

Jureczko ve arkadaşları rüzgar türbinlerinde kullanılan kanatlar için optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. Birden çok kriterin göz önüne alındığı çalışmada optimizasyon algoritması olarak Genetik Algoritma kullanılmıştır [24].

Solero ve arkadaşları tarafından çok soğuk iklim şartlarına sahip bölgelerde kullanılabilecek bir rüzgar türbini geliştirilmiştir. Analizleri gerçekleştirilen sistem 5 kW çıkış gücünde dizayn edilmiş ve pilot uygulaması gerçekleştirilmiştir [25].

Malayappan ve arkadaşları tarafından bir rüzgar türbinine ait kanat dizaynı gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada kanat dizaynının yanında türbine ait kule sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir [26].

Griffin ve Zuteck tarafından farklı rotor çapları için rüzgar türbin kanatları boyutlandırılmıştır. Kanatlar dizayn edilirken türbine ait güç çıkışı, kanat ağırlığı, kanat üzerinde oluşan statik yük ve kanat ömrü göz önüne alınmıştır [27].

Lin ve arkadaşları rüzgar türbinlerinde kullanılan dişli kutusunun boyutunu minimize edecek şekilde yeni bir dizayn yöntemi ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmada dişli kutusuna etki eden dinamik faktörler de göz önünde bulundurulmuştur [28].

Verheij, büyük güçlü rüzgar türbinlerinin dizaynında fırtına durumlarını da göz önünde bulunduran bir model geliştirmiştir [29].

Bishop ve Amaratunga tarafından Barbados için güçleri 500 kW'tın altında olan küçük güçlü türbinlerden oluşan 10 MW'lık rüzgar çiftliğinin göstereceği performans göz önüne alınarak, bölgede kurulu bulunan 10 MW gücündeki rüzgar çiftliği ile karşılaştırması yapılmıştır [30].

Simic ve arkadaşları tarafından, çeşitli küçük güçlü rüzgar türbinleri Hırvatistan'a ait rüzgar verileri ışında analizi edilmiştir. Çalışma ile türbinlerin çalışma eğrileri ve rotor alanlarının, güç çıkışına etkileri ortaya konulmuştur [31].

Akwa ve arkadaşları tarafından dikey eksenli rüzgar türbinlerinin performansları analiz edilmiştir [32].

Glass ve Levermore, gerçek koşullar altında mikro rüzgar türbinlerinin performanslarını analiz etmişlerdir. Gerçekleştirilen çalışmada iki farklı modeli içeren 5 adet bağımsız mikro rüzgar türbini bir yıl boyunca gözlemlenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda türbinlerin çıkış verimlerinin oldukça düşük olduğu ortaya konulmuştur [33].

Bahaj ve arkadaşları, küçük güçlü rüzgar türbinlerinin, binaların elektrik enerji tüketimi üzerindeki etkilerini İngiltere için analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda küçük güçlü türbinlerinin çıkış güçleri ve enerji üretimlerinin tahmini için gerçekçi bir yöntem ortaya konulmuştur [34].

Peacock ve arkadaşları, İngiltere'de mikro rüzgar türbini sektörü üzerinde araştırmalar gerçekleştirmiştir. Kullanılan mikro türbinlerin karbondioksit salınımını olumlu yönde etkilediği gösterilmiştir [35].

1.2 Tezin Amacı

Artan elektrik enerjisi ihtiyacı, ülkeleri öz kaynaklarını kullanarak enerji üretimine yöneltmiştir. Konvansiyonel üretim tesislerinin yüksek yakıt maliyetlerinin ve çevresel etkilerin de dikkate alınması ile birlikte, yenilenebilir enerji kaynakları enerji üretiminde etkin rol oynamaya başlamışlardır. Özellikle rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri büyük güçler üretebilmeleri ve kolay tesis edilmeleri nedeniyle güç sistemlerinin önemli bir parçası haline almıştır.

Büyük rüzgar türbinlerinin kurulması için gerekli olan alan, çevre ile görsel uyumluluk sağlayamamaları ve gürültü problemleri, bu sistemlerin tüketim merkezlerinden uzakta tesis edilmeleri gerektirmektedir. Bunun yanında, büyük güçlü türbinlerin ekonomik olarak kullanılabilirliği için gerekli olan sürekli rüzgar rejimi kentsel bölgelerde sağlanamamaktadır. Bu durum, üretilen enerjinin tüketim merkezlerine uzun iletim hatlarıyla iletimini zorunlu kılmakta ve kurulum maliyeti ile birlikte iletim sırasında oluşan kayıpların da artmasına yol açmaktadır.

Gerçekleştirilen tez çalışmasında kentsel bölgelerde kullanıma uygun, bina üstlerine tesis edilebilen yeni bir mini rüzgar türbin konsepti ortaya konulmuştur. Geliştirilen sistemin kullanımı ile tüketim merkezlerinde atıl durumda bulunan rüzgar enerjisi kullanılabilir duruma gelmektedir. Bunun yanında, üretimin tüketim noktasına yakın gerçekleşmesi ile iletim kayıpları azalacak ve enerji iletimi için gerekli olan maliyet ortadan kalkacaktır.

Yapılan tez ile ortaya konulan mini rüzgar türbininin modüler bir yapıya sahip olması hedeflenmiştir. Böylelikle sistem herhangi bir rüzgar rejimi için optimize edilebilecek ve her nokta için farklı bir konfigürasyon ortaya konulabilecektir. Bununla birlikte, geliştirilen sistemin imalatının kolay olması ve ülkemiz öz kaynakları ile gerçekleştirilebilmesi tezin ana amaçlarından biridir.

1.3 Orijinal Katkı

Bu çalışmada, kentsel bölgelerde kullanıma uygun yeni bir rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiş ve prototip uygulaması hayata geçirilmiştir. Bina üstlerine monte edilebilen yapının modüler olarak kullanılabilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen sistem ve modüler kullanıma uygun oluşu literatüre orijinal katkı olarak sunulmuştur.

Geliştirilen rüzgar türbini, kullanılacağı bölgenin rüzgar rejimine göre optimize edilebilmekte ve kullanıcıya en uygun çözüm sunulabilmektedir. Sistemin her bir nokta için ayrı ayrı optimal çözümler getirebilecek şekilde dizayn edilebilmesi de yapılan çalışmanın orijinal katkılarının arasındadır.

Tez kapsamında geliştirilen sistem basit yapısı ile ülkemiz koşullarında üretime uygundur. Bu sayede öz kaynaklarımız ile sistemin üretimi yapılabilecek ve enerji üretimi teknolojisi bakımından ülkemizin güçlenmesi sağlanacaktır. Çalışma bu yönüyle de önemli bir orijinal katkıya sahiptir.

RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

İnsanoğlunun kullandığı en eski enerji formlarından biri olan rüzgar enerjisi, günümüzde de birçok alanda kendine yer bulmaktadır. Tarihte ilk olarak yel değirmenlerinde yararlanılmaya başlanılan rüzgar enerjisi, teknolojik gelişmelerle beraber günümüzün en önemli yenilebilir enerji kaynaklarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği'nin verilerine göre 2012 yılının ortası itibariyle dünya üzerinde kurulu rüzgar türbini gücü kapasitesi 254 GW'tır. Yıl sonuna kadar kurulu gücün 273 GW olması hedeflenmektedir [36]. Avrupa Birliği'nde ise 2011 yılı itibariyle 93,9 GW kurulu rüzgar gücü bulunmakta ve toplam enerji ihtiyacının %6,3'ü rüzgardan karşılanmaktadır [37].

Türkiye'de rüzgar enerjisi kullanımı incelendiğinde, 1.8 GW'ın üzerinde kurulu rüzgar gücünün bulunduğu ve toplam enerji talebinin %3,55'inin rüzgar enerjisinden karşılandığı görülmektedir. Mevcut rüzgar potansiyeli ile karşılaştırıldığında ülkemizde rüzgar enerjisi kullanımının yaygınlaştırılabileceği açıkça görülmektedir. Gerçekleştirilen yasal düzenlemeler ile de rüzgar enerjisinin kullanımı teşvik edilmektedir. Özellikle 21 Temmuz 2011 tarihinde kabul edilen "Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik" çerçevesinde, başta rüzgar enerjisi olmak üzere, yenilenebilir enerji kaynaklarından 500 kW'a kadar lisanssız enerji üretimi serbest bırakılmıştır. İlgili yasal düzenleme ile küçük güçlü enerji üretim sistemlerinin kullanımı konusunda önemli kolaylıklar sağlanmıştır [38].

Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü rüzgar türbinleri ile yapılmaktadır. Rüzgar türbinleri en basit hali ile rüzgar enerjisini öncelikle mekanik enerjiye, ardında

elde edilen mekanik enerjiyi generatörler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürürler. Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri elektrik enerjisi üretiminin yanında birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. Yakıt ihtiyacının bulunmaması, sıfır karbon salınımı, gelişen teknoloji ile sağlanan ekonomik faydalar ve türbinin kurulduğu alanın kullanılabilir olması bunlar arasında sıralanabilir. Sağladığı avantajlarla beraber, rüzgar enerjisi üretim tesisleri enerji üretiminin değişkenliği, büyük güçlü santrallerin şehir merkezinin uzağına tesis edilmeleri gibi dezavantajları da barındırmaktadır.

Rüzgar türbinleri birçok farklı özelliğe göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalardan en çok kullanılanı ise kanat eksenine göre yapılanıdır. Rüzgar türbinleri, eksen tiplerine göre 2 ayrı grupta incelenirler; yatay eksenli türbinler ve dikey eksenli türbinler.

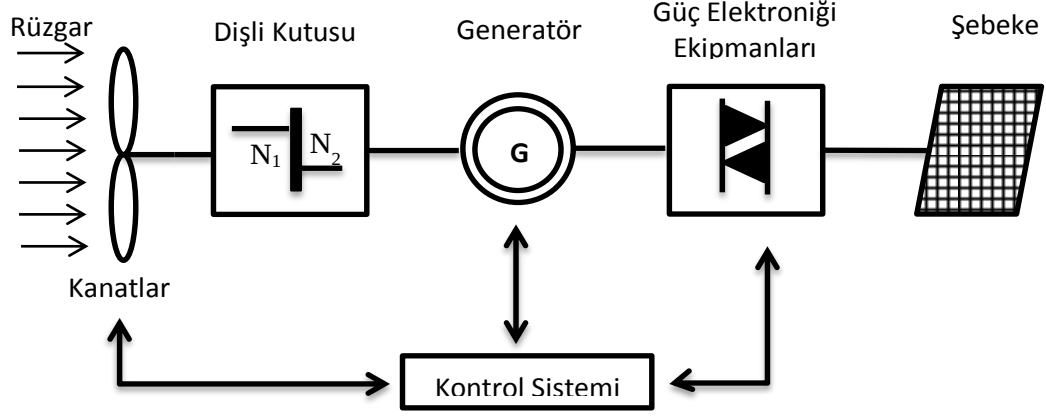
Yatay eksenli türbinlerde dönme eksenini rüzgar yönüne paralel, kanatlar ise dik konumdadır. Generatör, miller ve dişli kutusu (kullanılması durumunda) ile birlikte kulenin üzerine konumlandırılırlar. Ticari olarak kullanılan rüzgar türbinlerinin büyük bir bölümü yatay eksenli olarak imal edilmektedir.

Dikey eksenli türbinlerde dönme eksenini rüzgar yönüne diktir. Kanatlara bağlı ekipmanlar zemine tesis edilirler. Rüzgarın doğrultusundan etkilenmemeleri ve düşük bakım maliyetleri, yatay eksenli türbinlere göre avantajları olarak ön plana çıksa da düşük verimlerinden dolayı ticari olarak tercih edilmemektedirler.

2.1 Rüzgar Türbinlerini Oluşturan Ekipmanlar

Temel olarak bir rüzgar türbini kanatlar, dişli kutusu (kullanılan sisteme göre bulunmayabilir), generatör, güç elektroniği elemanları, kule ve tüm ekipmanın optimal düzeyde çalışmasını sağlayan kontrol sisteminden oluşmaktadır.

Şekil 2.1’de rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinin temel bileşenleri gösterilmiştir. Bir rüzgar türbinini oluşturan elemanlar aşağıda genel hatları ile açıklanmıştır. Ticari olarak kullanılan türbinlerin büyük çoğunluğunun yatay eksenli olmaları nedeni ile türbin bileşenleri de bu türbin tipi göz önüne bulundurularak ele alınmıştır.



Şekil 2.1 Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi Genel Şeması

2.1.1 Kule

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin en önemli bileşenlerinden bir olan kule, üzerinde generatör, kullanılması durumunda dişli çark ve milleri bulunduran yatak ile kanatları taşımaktadır [39]. Günümüzde ticari olarak kullanılan rüzgar türbinlerinde kule çelik ya da betondan boru şeklinde imal edilmektedir [40]. Kule yüksekliği, rüzgar hızından maksimum düzeyde yararlanmak amacı ile optimum çözümle belirlenir. Kule boyutlandırılmasındaki en önemli parametreler kule malzemesi ve buna bağlı olarak oluşacak maliyet ile birlikte kulenin kurulacağı bölgeye ait rüzgar rejimidir. Kulenin enerji üretimi sırasında oluşan titreşim ve rüzgar yükünden etkilenmeyecek şekilde tesis edilmesi önemlidir.

2.1.2 Kanatlar

Bir türbin üzerinde rüzgarın kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünü sağlayan bileşenler kanatlardır. Rüzgar türbinlerinin kanatları, alüminyum, cam elyafı ile güçlendirilmiş malzemeler ve ahşap gibi hammaddeler kullanılarak imal edilebilmektedir. Modern rüzgar türbinlerinin kanatlarının hemen hemen tamamı, cam elyafı katkılı kompozit malzeme ile imal edilmektedir. Özellikle şebekeye bağlı olarak kullanılan büyük güçlü türbinlerin kanat boyların oldukça büyük ölçülerdedir. Bu nedenle üzerlerinde oluşacak olan rüzgar yükü de fazla olmaktadır. Mevcut rüzgar yükünün yüksek seviyelerde olması kanat üzerinde oluşan stresi de arttırmakta ve kanadın zorlanmasına neden olmaktadır. Kanatların üretildikleri malzemenin dayanımı

bu nedenle çok önemlidir. Kompozit malzemeler esnek yapılarının yanında yüksek dayanımları ile rüzgar türbin kanatları imalatında sıklıkla kullanılan bir malzeme halini almıştır. Buna karşın küçük kanat boyuna sahip türbinlerde kanat malzesi olarak tahta ve hafif metaller de kullanılabilmektedir [41].

Büyük güçlü rüzgar türbinlerinde kanatlar kontrolörler yardımı ile yönlenebilmektedir. Böylelikle türbin yüksek verimlilikle kullanılabilmektedir. Ayrıca türbine zarar verecek rüzgar hızlarının etkisi de kanatların yönlendirilmesi ile en aza indirilmektedir. Buna karşın küçük güçlü rüzgar türbinleri sabit kanatlar ile üretilmektedir [42].

2.1.3 Dişli Kutusu

Rüzgarın kinetik enerjisi kanatlar tarafından mekanik enerjiye dönüştürülmekte ve bir dönme hareketi oluşturulmaktadır. Kanatların dönüş hızı, dış ortamda bulunan rüzgar hızı ile orantılı olsa da türbin üzerinde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan generatörün nominal hız değeri her zaman sağlanamamaktadır. Türbin üzerinde bulunan dişli kutusu generatörün ihtiyacı olan devir sayısına ulaşılmasını sağlayan ve rotor ile generatör arasındaki bağlantıyı gerçekleştiren ekipmandır. Genellikle birçok dişlinin bir arada kullanıldığı dişli kutusu generatör ile birlikte türbin üzerindeki en ağır parçadır.

Dişli kutusunun kullanılması türbin ile elde edilen mekanik enerjide kayıpların oluşmasına ve türbin veriminin düşmesine neden olmaktadır. Bu sebepten ötürü günümüzde rüzgar türbinleri üzerinde kullanılan generatör tipine de bağlı olarak dişli kutusu olmadan üretilmektedir. Sistem üzerinde dişli kutusunun bulunmaması olası arızaların azalmasını ve türbin güvenilirliğinin artmasını sağlamaktadır. Türbine ait bakım masrafları da dişli kutusunun kullanılmaması ile azalmaktadır.

2.1.4 Generatör

Türbinden elde edilen mekanik enerji, elektrik enerjisine generatör vasıtasıyla dönüştürülmektedir. Günümüzde kullanılan rüzgar türbinleri ile elektrik enerjisi doğru akım ya da alternatif akım generatörleri kullanılarak üretilmektedir. Küçük güçlü rüzgar türbinlerinde verimliliğin artırılması amacı ile sıklıkla doğru akım generatörleri tercih edilirken, şebekeye bağlanan büyük güçlü türbinlerde alternatif akım

generatörleri kullanılmaktadır [43]. Rüzgar türbinlerinde kullanılan generatör tipleri aşağıda açıklanmıştır.

2.1.4.1 Doğru Akım Generatörleri

Doğru akım generatörleri şebekeden bağımsız çalışan rüzgar türbini uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. En büyük avantajları, hız kontrollerinin kolay olması ve tüm rüzgar hızlarında enerji üretimine elverişli olmalarıdır. Doğru akım generatörleri özellikle yüksek bakım maliyetlerinden ötürü büyük güçlü türbinlerde tercih edilmemektedir [44].

2.1.4.2 Senkron Generatörler

Senkron generatörler günümüzde ticari olarak kullanılan rüzgar türbinlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Senkron generatörler yapılarına göre farklı rüzgar hızlarında dişli kutusuna gerek duyulmadan istenilen düzeyde üretim gerçekleştirebilmekte ve şebekeye güç elektroniği ekipmanlarının yardımıyla bağlanmaktadır. Günümüzde rüzgar üretim sistemlerinde sıklıkla kullanılan senkron generatör tipleri aşağıda sıralanmıştır [45]:

- Alan sargılı senkron generatörler
- Sabit mıknatıslı senkron generatörler

Senkron generatörlerin yapısı gereği, bağlı bulunduğu güç sisteminin kararlılığına da katkı sağlamaktadır.

2.1.4.3 Asenkron Generatörler

Asenkron generatörler, senkron generatörlere kıyasla daha basit bir yapıya sahiptir ve maliyetleri daha düşüktür. Bu nedenle rüzgar türbinlerinde günden güne daha çok tercih edilmeye başlanmıştır. Senkron generatörlerden farklı olarak asenkron makineler, generatör modunda çalışabilmek için dışarıdan uyarıtıma ihtiyaç duymaktadırlar. Böylece ihtiyaç duyulan manyetik alan karşılanmış olur. Günümüzde rüzgar üretim sistemlerinde sıklıkla kullanılan asenkron generatör tipleri aşağıda sıralanmıştır [45]:

- Sincap kafesli asenkron generatörler
- Rotoru sargılı asenkron generatörler

Asenkron generatörlerin kullanıldığı rüzgar türbinleri, bağlı bulundukları güç sistemlerinde kararlılığı ve güç kalitesini negatif etkileyebilmektedirler. Ayrıca yapıları gereği büyük bir reaktif güç ihtiyacına sahiptirler.

2.1.5 Güç Elektroniği Ekipmanları

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde mümkün olan her rüzgar hızında elektrik enerjisi üretimi yapılması hedeflenmektedir. Böylece sistem verimliliği artırılabilir. Buna karşın türbin üzerinde kullanılan generatörlere ait çıkış büyüklükleri tüm rüzgar hızları için istenilen seviyeye ulaşamamaktadır. Ayrıca rüzgarın kararsız yapısı ve anlık olarak değişmesi çıkış büyüklüklerinde de değişikliklere neden olmaktadır. Bu problemleri ortadan kaldırmak amacıyla rüzgar türbinleri güç elektroniği ekipmanları yardımı ile şebekeye bağlanmakta ya da yük beslemektedirler. Rüzgar türbininin kullanılacağı sisteme göre doğrultucu ve inverterler rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde sıklıkla kendilerine yer bulmaktadır. Böylece türbin çıkışı istenilen gerilim ve frekans değerine sahip hale getirilmektedir.

2.1.6 Kontrol Sistemleri

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri her an farklı bir rüzgar hızı ile karşılaşmakta ve buna bağlı olarak elektrik enerjisi üretimi sağlamaktadırlar. Bu durum rüzgar türbinlerinin optimum düzeyde çalıştırılmaları zorunluluğunu da beraberinde getirmektedir. Bir türbin üzerinden her bir rüzgar hızında maksimum verimi alabilmek için kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Rüzgar türbinleri üzerinde birçok kontrol yöntemi ve algoritması kullanılmaktadır. Bunların en önemlileri ise sapma kontrolü ve kanat açısı kontrolüdür.

Yatay eksenli türbinler genellikle kanatlara ön cepheden gelen rüzgar ile çalışmaktadırlar. Buna karşın rüzgar zaman içerisinde birçok defa yön değiştirmektedir. Rüzgar türbinleri üzerinde bulunan Sapma mekanizmaları ile kanatlar rüzgar doğrultusuna dik olarak konumlandırabilmektedir. Sapma mekanizmasındaki duyarlılığın artması sistemin maksimum düzeyde çalışmasına yardımcı olmaktadır.

Türbin üzerinde bulunan bir diğer önemli kontrol mekanizması ise kanat açısı kontroldür. Değişken rüzgar hızına karşın kanat açısı kontrolü ile kanatlar farklı açılarda konumlandırılabilmekte ve türbinden maksimum verim alınması sağlanmaktadır. Ayrıca türbinin zarar görebileceği rüzgar hızlarında kanat açısı kontrolü ile kanatlar ve rüzgar türbini koruma altına alınabilmektedir.

Rüzgar türbinlerinde kontrol sistemlerinin ihtiyaç duyduğu rüzgar hızı ve yönü bilgisi, türbin üzerinde bulunan anemometre yardımıyla belirlenebilmektedir.

2.2 Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinde Güç

Bir rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi, rüzgara ait kinetik enerjinin mekanik enerjiye dönüşümünü sağlamaktadır. Elde edilen mekanik enerji kullanılarak elektrik enerjisi üretilmektedir. Bu nedenle rüzgardan elde edilebilecek gücün ortaya konulabilmesi için sahip olduğu kinetik enerjinin hesabından yola çıkılması gerekmektedir.

v hızına sahip m_c kütleli bir cisme ait kinetik enerji Denklem 2.1 ile ifade edilir.

$$E_k = \frac{1}{2} m_c v^2 \quad (2.1)$$

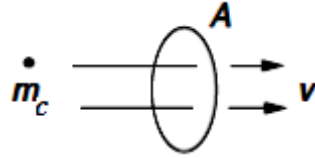
Bir rüzgar türbininde hareketi sağlayan kanatlara çarpan rüzgardır. Dolayısıyla, rüzgar türbininin kinetik enerjisi kanatların süpürdüğü alana çarpan rüzgar kütlesi ile orantılıdır. Kinetik enerji eşitliğinin, birim zamandaki enerji olarak tariflenen güç cinsinden düzenlenmesi ile kanatların süpürdüğü alandaki güç (P_A) Denklem 2.2 kullanılarak elde edilir.

$$P_A = \frac{1}{2} \left(\frac{m_c}{t} \right) v^2 \quad (2.2)$$

Kanatların süpürdüğü alana birim zamanda çarpan rüzgar kütlesi ($\dot{m}_c = \frac{m_c}{t}$), havanın yoğunluğu (ρ , - 15° sıcaklık ve 1atm basınç altında 1,225 kg/m³), kanatların süpürdüğü alan (türbin rotor alanı, A) ve rüzgar hızı (v) cinsinden yazılacak olursa,

$$\dot{m}_c = \rho \cdot A \cdot v \quad (2.3)$$

ifadesi elde edilir. Kanatların süpürdüğü alana birim zamanda çarpan v hızına sahip rüzgar kütlesi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



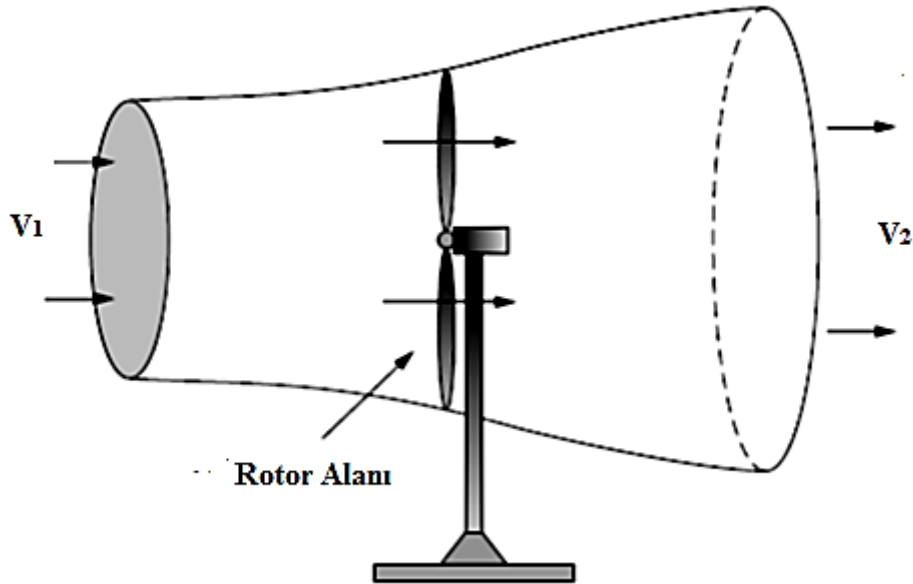
Şekil 2.2 A alanına v hızı ile birim zamanda çarpan rüzgar kütlesi

Denlem 2.3, Denklem 2.2’de yerine yazılırsa türbine çarpan rüzgar gücü,

$$P_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (W) \quad (2.4)$$

olarak bulunur [43].

Ancak türbine çarpan bu rüzgar gücünün tümünün elektrik enerjisine çevrilmesi imkansızdır. Bir rüzgar türbininde hava akışı Şekil 2.3’de gösterildiği biçimde gerçekleşir.



Şekil 2.3 Rüzgar türbininde hava akışı

Şekil 2.3’den açıkça görüldüğü üzere bir rüzgar türbininde, türbin kanatlarının önünde ve türbin kanatlarının arkasında olmak üzere iki ayrı rüzgar hızı tanımlanmıştır. v_1 hızının, v_2 hızına eşit olması kanatlarda bir hareketin söz konusu olmayacağı sonucunu vermektedir. Türbinin hareketinin sağlanması için kanatlara çarpan rüzgarın kinetik enerjisinin bir bölümünün kanatlar tarafından emilmesi gerekmektedir. Bu durumda rüzgar hızı kaybederek kanatların arkasına geçecektir. Başka bir deyişle bir türbin rotorunun hareket edebilmesi için $v_1 > v_2$ eşitliğinin sağlanması gerekmektedir.

Şekil 2.3 göz önüne alınarak kanatlara birim zamanda çarpan rüzgar kütlesi,

$$\dot{m}_c = \rho \cdot A \cdot v_k \quad (2.5)$$

denklemleri ile bulunabilir.

Bu ifade de v_k ’nın (kanat ucundaki rüzgar hızı) kanatlara giren hız ile kanatlardan çıkan hızın ortalaması olduğu kabul edilirse, türbinin mekanik gücü;

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) (v_1^2 - v_2^2) \quad (W) \quad (2.6)$$

ifadesi ile elde edilir [46].

Türbin mekaniksel gücünün, kanatlara çarpan rüzgar gücüne oranı “güç katsayısı” (c_p) olarak adlandırılır. Buna göre güç katsayısı Denklem 2.7 ve Denklem 2.8 kullanılarak elde edilebilmektedir [45].

$$c_p = \frac{P_m}{P_r} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} \quad (2.7)$$

$$c_p = \frac{P_m}{P_r} = \frac{1}{2} \cdot \left| 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right| \cdot \left| 1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right| \quad (2.8)$$

Albert Betz'e ait Momentum Teorisi'ne göre, türbinden maksimum verim elde edilebilmesi için $\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$ oranının 1/3 olması gerekmektedir. Bu durumda türbin verimi (güç katsayısı) 0,59 olarak hesaplanmaktadır [40],[43].

Türbine ait güç katsayısı (c_p), kanat uç hız oranına (λ) bağlı bir büyüklük olup, her rüzgar hızı için, belirli bir maksimum değere sahiptir. Türbine ait kanat uç hız oranı Denklem 2.9 ile ifade edilmektedir.

$$\lambda = R\omega/v \quad (2.9)$$

burada, ω [rad/sn] türbin miline ait açısal hızı, R [m] türbin kanat yarıçapını ifade etmektedir.

Türbin güç katsayısı ile kanat uç hız oranı arasındaki bağıntı ampirik olarak elde edilmekte ve kanat yapısı ile değişmektedir. Türbin güç katsayısı, kanat uç hız oranı ve kanat açısına (θ) bağlı olarak [41],

$$C_p(\lambda, \theta) = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\beta} - c_3 \theta - c_4 \theta^x - c_5 \right) e^{-c_6 \frac{1}{\beta}} \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{1 + \theta^3} \quad (2.11)$$

eşitlikleri ile ifade edilmektedir.

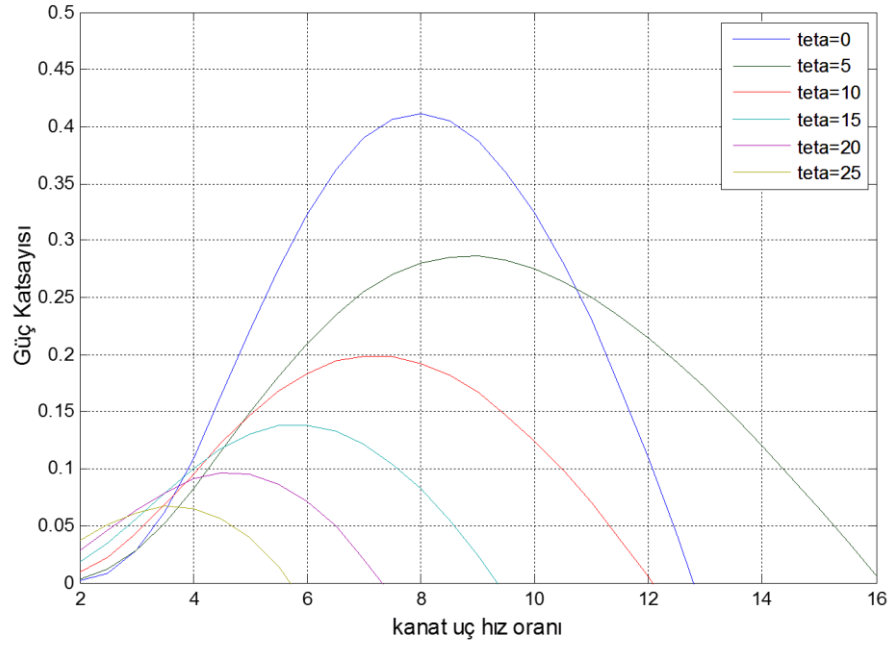
Şekil 2.4'te farklı kanat açısı değerleri için türbin güç katsayısı ile kanat uç hız oranı arasındaki değişim gösterilmiştir.

Bir rüzgar türbininde mekaniksel moment;

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} \quad (2.12)$$

eşitliği ile bulunur.

Türbin çıkışındaki elektriksel güç, sistem üzerinde bulunan diğer ekipmanların (dişli, miller, generatör vb.) verimleri oranında değişmektedir.



Şekil 2.4 Türbin güç katsayısı ile kanat uç hız oranının kanat açısına bağlı değişimi

RÜZGAR HIZI DAĞILIMLARI VE KAPASİTE FAKTÖRÜ

İki nokta arasındaki basınç ve ısı farklılığı sonucunda meydana gelen rüzgar, günümüzde önemli enerji kaynaklarından biri halini almıştır. Herhangi bir bölgeye rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi kurulmadan önce, o bölgeye ait rüzgar enerjisi potansiyelinin mutlaka analiz edilmesi gerekmektedir. Temel olarak bir bölgeye ait rüzgar potansiyeli ele alınan bölgeye ait rüzgar hızı ve yönü bilgileri ile ortaya konulabilmektedir.

Herhangi bir noktanın rüzgar potansiyelinin kısa süreli ölçümler ile ortaya konulması mümkün değildir. Gerçekleştirilecek olan uzun süreli ölçümler ise hem yatırım maliyetini arttıracak hem de sistem kurulumunun gecikmesine neden olacaktır. Bu nedenle analizi gerçekleştirilecek olan bölgelere ait rüzgar potansiyeli, bölgeden elde edilen kısa süreli (1 yıl) ölçümler sonucu oluşturulan olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılarak belirlenmektedir. Analizi gerçekleştirilen bölge için en uygun olasılık yoğunluk fonksiyonunun belirlenmesi koşulu ile kurulacak olan rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminden maksimum verim alınması sağlanabilir.

Literatürde çeşitli istatistiksel yöntemler, rüzgar benzetiminde kullanılmıştır. Ancak yapılan çalışmalar sonucunda, temel olarak Weibull ve Rayleigh Dağılım Fonksiyonlarının rüzgar karakteristiğine çok yakınsadığı görülmüştür. Her iki yöntem aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

3.1 Weibull Dağılım Fonksiyonu

Günümüzde rüzgar karakteristiğinin benzetiminde en sık kullanılan yöntem Weibull Dağılım Fonksiyonu'dur. Weibull Dağılımı Fonksiyonu, rüzgar değişimine en çok

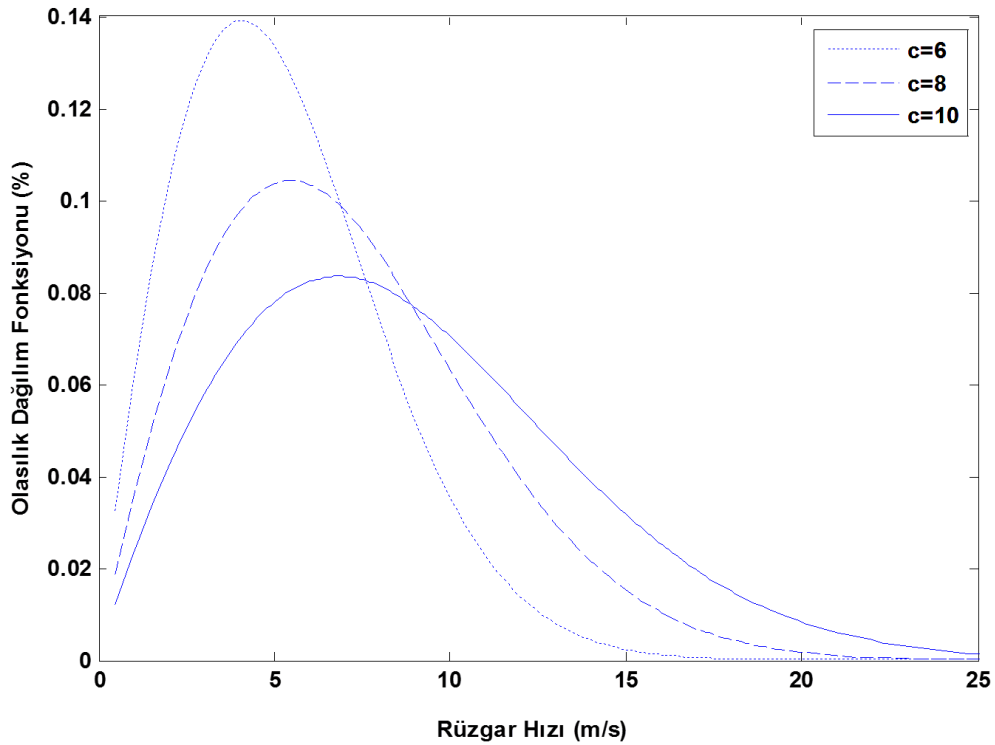
yakınsayan yöntem olmasının yanında, esnek bir yapıya sahip olması, parametre sayısının az olması, parametrelerinin belirlenmesindeki kolaylık ve parametrelerinin bir yükseklik için belirlenmesinin ardından farklı yükseklikler için de basitçe tahmin edilebilmesi gibi üstünlüklere sahiptir.

Weibull Dağılım Fonksiyonu, 2 parametrelilik olarak Denklem 3.1 'de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3.1)$$

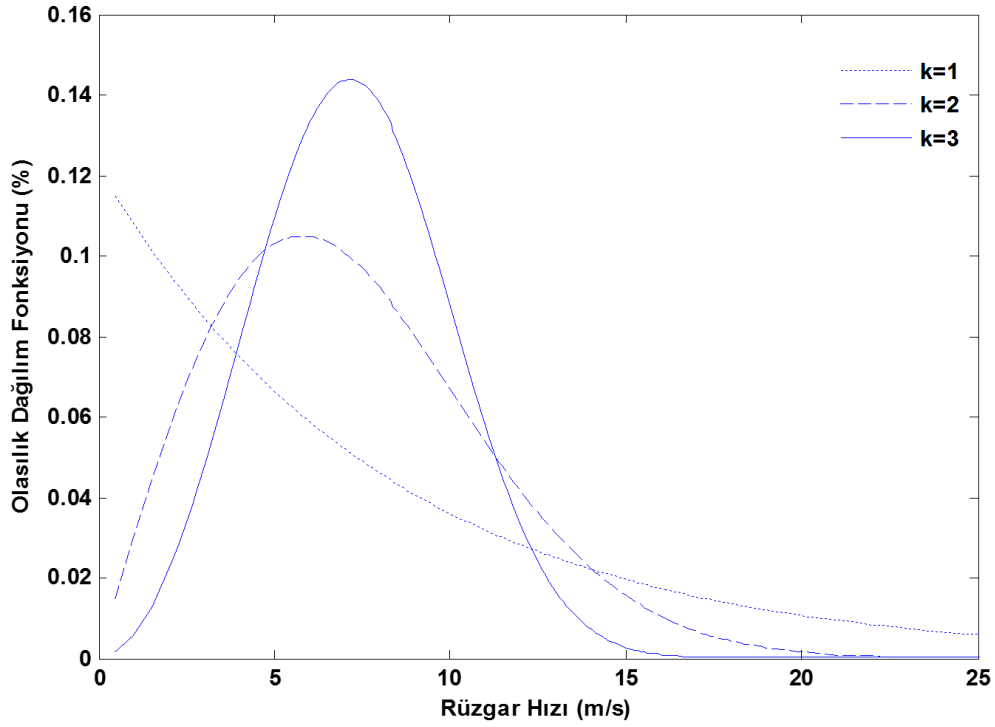
Burada, k , şekil parametresi ve c , skala parametresi olarak adlandırılmaktadır. v , rüzgar hızını ifade etmektedir.

Şekil ve skala parametrelerinin değişimlerinin Weibull Dağılım Fonksiyonu'na etkileri sırası ile Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Weibull Dağılım Fonksiyonunun Skala Parametresine Göre Değişimi

Şekil 3.1’den açıkça görüldüğü üzere, skala parametresinin değişimi ile eğrinin tepe noktası ötelenmekte, başka bir deyişle bölgeye ait ortalama rüzgar hızı arttıkça skala parametresi artmaktadır.



Şekil 3.2 Weibull Dağılım Fonksiyonunun Şekil Parametresine Göre Değişimi

Şekil parametresinin değişimi yıl içerisinde karşılaşılan rüzgar hızlarının olasılısal değişimini ifade etmektedir. Şekil parametresi 1 değerinden uzaklaştıkça ideal weibull dağılımına yaklaşılmaktadır.

Weibull Dağılım Fonksiyonu’na ait şekil ve skala parametreleri birçok farklı yöntem ile elde edilebilmektedirler. Literatürde sıklıkla kullanılan metodlar aşağıda özetlenmiştir.

3.1.1 Moment Yöntemi

Yalnızca rüzgar hızına ait standart sapma ve ortalamanın biliniyor olması durumunda uygulama kolaylığı sağlayan en eski Weibull parametreleri belirleme yöntemlerinden biridir. Şekil ve Skala Parametreleri aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir [47, 48].

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_{avg}} \right)^{-1.086} \quad (3.2)$$

$$c = \frac{v_{ort}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (3.3)$$

Burada σ rüzgar hızındaki standart sapmayı, v_{ort} ortalama rüzgar hızını ve Γ gamma fonksiyonunu göstermektedir. Gamma fonksiyonu;

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (3.4)$$

denklemleri ile ifade edilir [48].

3.1.2 Ortalama Hız ve En Yüksek Hız Yöntemi

Belirli bir zaman aralığı için rüzgâr hızının ortalaması ve maksimum değeri biliniyorsa, bu aralık için Weibull parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle göre, belirli bir t zaman aralığı için maksimum rüzgar hızının kullanılması ile şekil ve skala parametreleri,

$$k = \frac{\ln(\ln t)}{\ln(0.9 \cdot v_{max}/v_{avg})} \quad (3.5)$$

$$c = \frac{v_{avg}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (3.6)$$

eşitlikleri yardımıyla hesaplanır [47].

3.1.3 En Yüksek Olabilirlik Yöntemi

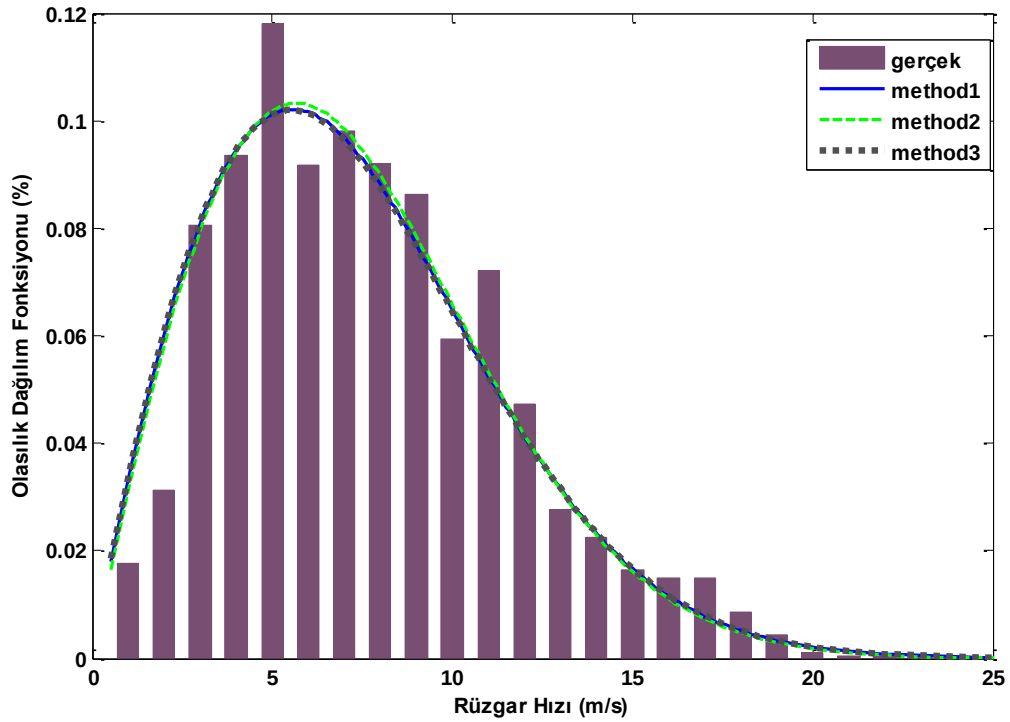
Weibull dağılım fonksiyonuna ait şekil ve skala parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan bir diğer yöntem ise en yüksek olabilirlik yöntemidir. İteratif çözüm gerektirmesinden dolayı diğer yöntemlere nazaran çözüme ulaşmak daha zordur. Weibull Parametreleri aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanır [48];

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right)^{-1} \quad (3.7)$$

$$c = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^k}{n} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.8)$$

Her ne kadar yukarıda açıklanan 3 yöntem ile belirli bir bölgeye ait Weibull Dağılım Fonksiyonu'nun parametrelerini hesaplasa da, kullandıkları verilerin farklılığından dolayı tüm yöntemlerde elde edilen sonuçlar farklı olmaktadır. Bu nedenle, özellikle fizibilite analizlerinde bölgeye en uygun yöntemin tercih edilmesi, doğru sonuca

yaklaşılması açısından oldukça önemlidir. Şekil 3.3.'de üç yöntemin birbirleri ve gerçek rüzgar verileri ile mukayesesi gösterilmiştir.



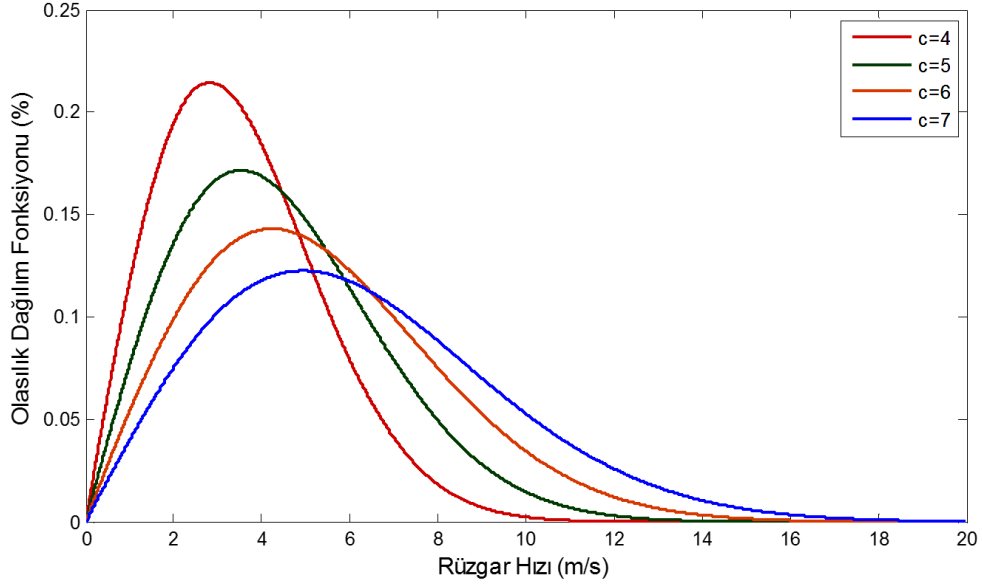
Şekil 3.3 Farklı Parametre Hesaplama Yöntemlerinin Kıyaslanması

3.2 Rayleigh Dağılım Fonksiyonu

Rayleigh Dağılım Fonksiyonu, Weibull Dağılımı'nın özel bir durumu olarak tek parametre ile tanımlanır. Rayleigh Dağılım Fonksiyonu'nda Weibull'dan farklı olarak şekil parametresinin değeri 2 olarak kabul edilir ve fonksiyon sadece skala parametresine bağlı olarak tanımlanır. Rayleigh Dağılımı Fonksiyonu Denklem 3.9'da verilmiştir.

$$f(v) = \frac{2v}{c^2} e^{-(v^2/c^2)} \quad (3.9)$$

Farklı skala parametresi değerleri için Rayleigh Dağılımı Fonksiyonu'nun değişimi Şekil 3.4'te gösterilmiştir



Şekil 3.4 Farklı skala parametreleri için Rayleigh Dağılımı Fonksiyonu'nun değişimi

Rayleigh Dağılım Fonksiyonu'na ait skala parametresinin değeri Weibull fonksiyonunda hesaplandığı yöntemler kullanılarak elde edilebilmektedir.

3.3 Kapasite Faktörü

Enerji üretim sistemlerinin verimliliğinin ölçülmesinde kullanılan önemli parametrelerden biri de kapasite faktörüdür. Bir rüzgar türbine ait kapasite faktörü;

$$KF = \frac{E_T}{P_N \cdot 8760} \quad (3.10)$$

olarak ifade edilir.

Burada, E_T [kWh/year] türbine ait yıllık enerji üretimini, P_N ise türbinin nominal güç değerini göstermektedir. Weibull dağılım fonksiyonuna ait parametrelerin kullanılması ile kapasite faktörü,

$$KF = \frac{1}{v_r^3} \int_{v_{in}}^{v_r} v^3 f(v) dv + \int_{v_r}^{v_{out}} f(v) dv \quad (3.11)$$

olarak elde edilir.

Eşitlik 3.11, gamma fonksiyonuna $\Gamma(.)$ göre yeniden düzenlenirse, kapasite faktörü eşitliği,

$$KF = \left(\frac{v_{in}}{v_r}\right)^3 e^{-(v_{in}/c)^k} + \frac{3\Gamma(3/k)}{k\left(\frac{v_r}{c}\right)^3} \left[\gamma\left(\left(\frac{v_r}{c}\right)^k, \frac{3}{4}\right) - \gamma\left(\left(\frac{v_{in}}{c}\right)^k, \frac{3}{4}\right) \right] - e^{-(v_{out}/c)^k} \quad (3.12)$$

olarak ifade edilebilir. Burada, v_{in} , v_r ve v_{out} sırası ile türbine ait güç üretimine başlangıç rüzgar hızını, nominal güce ulaşılan rüzgar hızını ve türbinin devre dışı kaldığı rüzgar hızını ifade etmektedir. γ eksik gamma fonksiyonunu göstermektedir [49].

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE EKONOMİK ANALİZLER

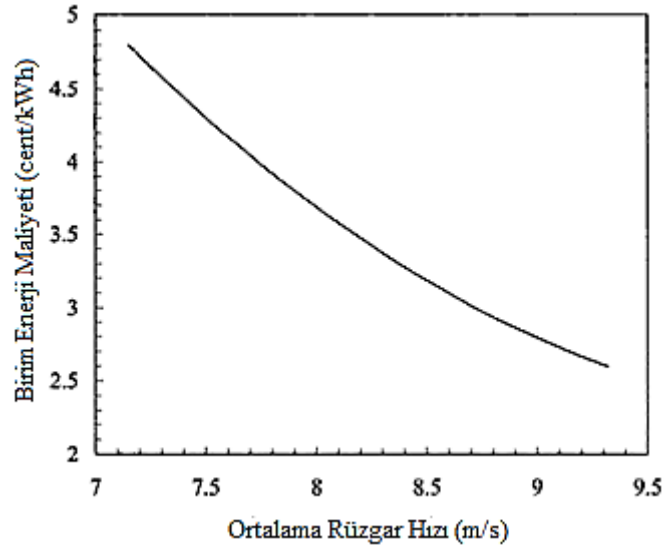
Çevresel olumlu etkileri ve enerji üretimine katkılarının karşın, rüzgar türbinleri konvansiyonel enerji üretim tesislerine kıyasla birim enerji başına daha yüksek bir yatırım maliyetine sahiptirler. Klasik enerji üretim sistemlerine nazaran daha yeni bir teknoloji olan rüzgar enerji sistemlerinin maliyetlerinin gün geçtikçe azalacağı öngörülmektedir. Kurulacak olan bir rüzgar enerjisi üretim sisteminin projelendirilmesi safhasında mutlaka doğru olarak analiz edilmesi ve minimum maliyet ile maksimum güç üretimi kriteri göz önünde bulundurularak optimize edilmesi gerekmektedir. Bu bölümde, rüzgar türbinlerine ait ekonomik büyüklükler ortaya konulmuş ve detaylı olarak açıklanmıştır.

4.1 Rüzgar Türbinlerinde Ekonomik Büyüklükler

Tüm enerji üretim sistemlerinde olduğu gibi sistemin uygulanabilir olması için rüzgar türbinlerinde de üretilen elektrik enerjisine ait birim enerji maliyetinin kabul edilebilir düzeyde olması gerekmektedir. Temel olarak, bir rüzgar enerji üretim sistemine ait birim enerji maliyeti aşağıdaki faktörlere bağlıdır;

- Türbinin kullanıldığı bölgedeki rüzgar rejimi
- Rüzgar türbininin verimi
- Türbinin ekonomik ömrü
- Finansman maliyeti
- İşletme ve bakım/onarım maliyetleri

Enerji üretilecek bölgedeki rüzgar rejimi ve kullanılan rüzgar türbinine ait verim, rüzgar enerjisi üretim sisteminin kapasite faktörünü doğrudan etkileyen parametrelerdir. Sistemin kapasite faktörünün yüksek olması birim enerji maliyetinin de azalmasına sebep olacaktır. Rüzgar rejiminin türbin maliyetine etkisi Şekil 4.1’de gösterilmiştir [50].



Şekil 4.1 Rüzgar rejimine bağlı olarak rüzgar türbinlerinin maliyet değişimi

Birim enerji maliyetinin hesaplanmasında, rüzgar türbininin ömrü çok önemli bir etkidir. Birim enerji maliyetinin hesabında türbinin ekonomik ömrü kullanılmakta ve başlangıç maliyetleri yıl bazına indirgenmektedir. Günümüzde ticari olarak kullanılan rüzgar türbinlerinin ortalama ömürleri 20 yıl olarak öngörülmektedir.

Finansman maliyeti, türbin bileşenlerinin maliyetlerini ve kurulum maliyetlerini içermektedir [51]. Finansman maliyetleri türbinin gücüne göre farklılık göstermektedir.

Rüzgar enerji üretim sistemlerinde, türbini oluşturan elemanların rutin bakımları (dişli kutusu bakımı, kanatların temiz tutulması vs.) ya da arıza sonrası onarımları ile sistemin işletme sırasındaki giderleri işletme ve bakım/onarım maliyetlerini oluşturmaktadır. Bu maliyetler yıllara göre değişiklik gösterebilmektedir [52].

Rüzgar enerjisi sistemlerine ait birim enerji maliyetleri günümüzde 6-8 cent/kWh aralığında değişmektedir. Sistemin doğru projelendirilmesi ve doğru noktaya tesis edilmesi ile bu değerin en düşük seviyelere indirilmesi mümkün olabilmektedir.

4.1.1 Finansman Maliyetleri

Rüzgar türbinleri, rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine çevrimini sağlamak amacıyla çok çeşitli bileşenleri içinde barındırmaktadır. Bu bileşenlerden, kule, kanat, generatör, kontrol sistemleri, sensör, şebeke bağlantısında kullanılan güç elektroniği elemanları ve transformatör maliyetleri, rüzgar enerji dönüşüm sistemine ait başlangıç maliyetlerini oluşturmaktadır.

Şebekeye paralel bağlı olarak çalışan rüzgar türbinlerinin başlangıç maliyetlerini oluşturan diğer bir etken ise türbinin şebeke ile bağlantısını sağlayan enerji iletim sistemidir. Enerji akışının sağlanacağı iletim hatları, türbinin yerleştirileceği alan ve ulaşımı sağlayacak yollara ait başlangıç maliyetleri ile birlikte kurulum için sarfedilecek işçilik bedeli de santralin boyutlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu gibi başlangıç maliyetlerini azaltmak ancak ulaşımın rahat olduğu ve enerji nakil hatlarına bağlantısı kolaylıkla yapılabilecek alanların rüzgar türbini kurulumunda kullanılması ile sağlanabilmektedir. Tüm bu bileşenlere ait kurulum maliyetlerinin rüzgar santralının tasarımında optimum şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Günümüzde ticari olarak kullanılan rüzgar türbinlerinde güç değeri büyüdükçe türbin üzerinde kullanılan elemanların birim enerji başına başlangıç maliyetleri düşmektedir. Ancak bu durum, kule ve kanat maliyetlerinde çok etkili değildir. Türbin gücü arttıkça kule ve kanatların boyutları da değişmektedir ve bu bileşenlerin üretiminde kullanılan hammadde oranları da buna bağlı olarak artmaktadır.

Bir rüzgar türbinine ait finansman (başlangıç) maliyetleri TL bazında;

$$M_{Baş} = M_{Ekip} + M_{Kur} \quad (4.1)$$

eşitliği ile elde edilir.

Bu eşitlikte M_{Ekip} türbine ait ekipman maliyetlerini, M_{Kur} ise türbine ait kurulum maliyetlerini ifade etmektedir.

Rüzgar türbinine ait ekipman maliyetleri Eşitlik 4.2 ile ifade edilir.

$$M_{Ekip} = M_G + M_K + M_{Ku} + M_{DE} \quad (4.2)$$

Burada M_G generatör maliyetini, M_K kanat maliyetini, M_{Ku} kule maliyetini ve M_{DE} kontrol sistemleri, güç elektroniği ekipmanları, elektriksel ve mekaniksel donanım ile şebeke bağlantısı için kullanılan transformatör maliyetlerini ifade etmektedir.

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerine ait kurulum maliyetleri ise,

$$M_{Kur} = M_{Taş} + M_{İs} + M_{KE} \quad (4.3)$$

eşitliği ile elde edilir. Burada $M_{Taş}$ taşıma maliyetlerini, $M_{İs}$ işçilik giderlerini ve M_{KE} türbinin kurulacağı arsa gideri ve enerji sistemine bağlantı için harcanan maliyetler gibi diğer harcamaları ifade etmektedir.

4.1.1.1 Şimdiki Değer Yöntemi

Rüzgar enerji sistemleri uzun bir kullanım ömrüne sahiptirler. Yıllık birim enerji maliyetinin belirlenebilmesi için sisteme ait maliyetlerin yıl bazına indirgenmiş değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan Şimdiki Değer Yöntemi ile sistem için yapılan toplam yatırımın ekonomik ömür boyunca yıllara dağılımı elde edilebilmektedir.

Bir sisteme ait şimdiki değer Eşitlik 4.4 kullanılarak elde edilebilir [50].

$$M_{Sim} = M_{ilk} + M_t \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (4.4)$$

Sistem için yapılan yatırımın yılları içerisinde dağılması durumunda uygulanması uygun olan şimdiki değer metodunda, M_{ilk} , başlangıç maliyetleri için yapılan ilk ödemeyi, M_t , t zaman periyodun boyunca (yıllık, aylık, v.b.) gerçekleştirilen ödeme miktarlarını, n , türbine ait ekonomik ömrü, i ise yıllık faiz oranını temsil etmektedir.

4.1.2 Bakım Onarım Maliyetleri

Rüzgar türbinlerinde sistem mekanik enerji üzerine kuruludur ve döner aksamalar ile enerji çevrimi tamamlanmaktadır. Türbin üzerinde bulunan ekipmanın büyük bir bölümü zaman içerisinde mekanik zorlanma ile karşı karşıya kalmaktadır.

Özellikle büyük güçlü rüzgar türbinlerinde kanatlar ve kule büyük mekanik zorlamalara maruz kalmaktadırlar. Rüzgar yükünün fazla oluşu ve kanatlara çarpan rüzgar hızı ile yönünün sürekli değişmesi kanatların deformasyona uğramasına neden olmaktadır.

Kanatlar ile generatör arasındaki bağlantı ekipmaları ve kullanılması durumunda dişli kutusu sürekli dönme hareketine mazur kalmaktadır. Değişken rüzgar hızı ile birlikte döner aksamlar üzerinde büyük tahribatlar meydana gelebilmektedir.

Yukarıda sıralanan bu sebeplerden ötürü rüzgar enerji sistemlerinin periyodik bakım işleminden geçirilmeleri gerekmektedir. Böylelikle türbin üzerinde oluşabilecek olan büyük hasarlar önlenabilmektedir ve türbin güvenilirliği arttırılabilmektedir. Sistem üzerinde gerçekleştirilen bu işlemler ile birlikte türbin üzerinde meydana gelebilecek arızaların giderilmesine ait maliyetler bakım onarım giderleri adını alır. Bakım onarım maliyetleri genel olarak finansman maliyetlerinin yanında çok küçük değerlere sahiptirler. Günümüzde ticari olarak faaliyet gösteren rüzgar türbin üreticilerinin bir çoğu bakım onarım giderlerini yıllık sabit değerler olarak belilemektedirler.

Rüzgar enerji sistemlerinin projelendirilmesi sırasında bakım onarım maliyetlerinin de hesaplanarak, birim enerji maliyetinin elde edilmesinde kullanılması daha gerçekçi ve güvenilir değerlerin oluşturulması açısından önemlidir.

4.1.3 Birim Enerji Maliyeti

Enerji üretim sistemlerinde, elde edilen enerjinin maliyeti “*birim enerji maliyeti*” olarak adlandırılmaktadır. Temel olarak birim enerji maliyeti, üretim sistemi için ekonomik ömrü boyunca gerçekleştirilen harcamalar ile sistem tarafından gerçekleştirilen üretim miktarı arasındaki ilişki ile elde edilmektedir.

Rüzgar türbinleri için birim enerji maliyeti konvansiyonel üretim sistemleri ile rekabet edilebilmesi açısından oldukça önemli bir büyüklüktür. Günümüzde rüzgar türbinlerinden elde edilen enerjinin birim maliyeti, klasik sistemler ile mücadele edebilecek durumu gelmiştir.

Bir rüzgar türbinine ait birim enerji maliyetinin hesaplanabilmesi için yıl bazına indirgenmiş toplam maliyetin biliniyor olması gerekmektedir. Türbin sistemine ait yıl bazında toplam maliyet,

$$M_{Top_yıl} = \frac{M_{şim}}{n} + M_{BO} \quad (4.4)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada M_{BO} , bakım onarım maliyetlerini ifade etmektedir ve türbinin ekonomik ömrü boyunca yıllık olarak sabit kabul edilmiştir. Şimdiki değer yöntemi ile elde edilen finansman maliyetlerinin ekonomik ömre oranı, finansman maliyetlerinin türbin ekonomik ömrü boyunca yıllık dağılımını göstermektedir.

Türbin tarafından gerçekleştirilen yıllık enerji üretimi Eşitlik 4.5 yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$E_T = 8760 \cdot P_N \cdot KF \quad (4.5)$$

Burada, E_T sistemin ürettiği bir yıllık enerjiyi, P_N türbinin nominal gücünü ve KF kapasite faktörünü ifade etmektedir. Burada verilen KF , Bölüm 3'te gösterildiği şekilde Eşitlik 3.12 kullanılarak hesaplanmaktadır. Yıl bazına indirgenmiş maliyetin, yıllık enerji üretimine oranı ile türbine ait birim enerji maliyeti elde edilecektir [50].

$$M_{\text{Bir}} = \frac{M_{\text{Top_yil}}}{E_T} \quad (4.6)$$

Yukarıda verilen eşitlikte bileşenler açık olarak ifade edilirse;

$$M_{\text{Bir}} = \frac{\frac{M_{\text{ilk}} + M_t \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}}{n} + M_{BO}}{8760 \cdot P_N \cdot KF} \quad (4.7)$$

birim enerji maliyeti Eşitlik 4.7 ile hesaplanabilir.

GENERATÖR PERFORMANS ANALİZİ ÇALIŞMALARI

Rüzgar türbinleri üzerinde elektrik enerjisi üretimi amacıyla birçok farklı yapıda generatör kullanılmaktadır. Genellikle küçük güçlü ve bağımsız yükleri besleyen rüzgar türbinleri üzerinde doğru akım generatörleri bulunmaktadır. Büyük güçlü ve şebekeyle paralel çalışan generatörlerde ise enerji üretimi alternatif akım generatörleri ile yapılmaktadır.

Bu bölümde, rüzgar türbinleri üzerinde kullanılan generatörlere ait temel özellikler sunulmuştur. Bunun yanında mini rüzgar türbini yapısında kullanılacak olan generatörün seçimi amacıyla analiz edilen generatörler tanıtılmış ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testlere ait sonuçlar verilmiştir. Sonuç olarak mini rüzgar türbini konseptinde kullanılmasının uygun olduğu belirlenen generatör için elde edilen güç eğrileri gösterilmiştir.

5.1 Doğru Akım Generatörleri

Yapıları gereği elektrik enerji üretiminde kullanılan tüm makineler bir iletkenin döner bir manyetik alana maruz kalması durumu ile gerilim endüklenmesi prensibine göre çalışmaktadırlar. Döner manyetik alana maruz kalan iletkenlerin üzerinde alternatif gerilim endüklenmektedir.

Doğru akım makinelerinde elektromekanik dönüşüm sonucunda oluşan alternatif akım, makina üzerinde bulunan komütatör yardımıyla doğru akıma dönüştürülmektedir. Mekanik anahtarlama işlemi ile akımın doğrultulması görevini yapan komütatör üzerinde bulunan fırçalar enerji iletimini sağlamaktadır.

Günümüzde ise doğru akım makinalarında manyetik alan sabit mıknatıslar ile elde edilmekte ve oluşan alternatif akım güç elektroniği devreleri kullanılarak doğrultulmaktadır. Böylece makine üzerinde fırçalar ve komütatöre ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu durum makinanın güvenilirliğini arttırmakta ve bakım masraflarını düşürmektedir.

Doğru akım makinaları genellikle küçük güçlü rüzgar türbinlerinde tercih edilmektedir. Doğru akım makinalarının rüzgar enerji sistemlerinde tercih edilmesinin en önemli sebebi kolay kontrol edilebilir olmalarıdır. Elde edilen gerilim ve akımın DC oluşu nedeniyle şebekeden bağımsız uygulamalarda kullanılmaları sistemin daha yüksek verimle çalışmasını sağlamaktadır.

5.2 Alternatif Akım Generatörleri

Alternatif akım makinaları yapıları gereği temel olarak senkron ve asenkron makinalar olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir. Her iki alternatif akım generatörü de rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılmaktadır.

5.2.1 Senkron Generatör

Senkron makinalar en temel hali ile sabit hız ile çalışan elektrik makinalarıdır. Tüm elektrik makinalarında olduğu gibi senkron generatörde manyetik alan içerisinde dönen bir iletken üzerinde gerilim endüklenmesi esasına dayalı olarak çalışmaktadır. Senkron generatör elektriksel çıkışın sağlandığı sargıları üzerinde taşıyan stator ve manyetik alanın oluşumunu sağlayan rotordan meydana gelmektedir.

Senkron generatörün ihtiyacı olan manyetik alan, makina yapısında kullanılan fırçalar üzerinden DC gerilim uygulanması ile elde edilmektedir. Günümüzde ise rotora konumlandırılan sabit mıknatıslar ile senkron generatörün ihtiyaç duyduğu manyetik alan oluşturulabilmektedir. Böylece generatör için uyartım sorunu ortadan kaldırılmış olur ve makina üzerinde bulunan uyartım elamanlarına da gerek duyulmaz.

Senkron generatörler büyük güçlü rüzgar türbinlerinde en çok tercih edilen makinalar arasındadır. Senkron generatörler yapılarına göre farklı rüzgar hızlarında dişli kutusuna

gerek duymadan istenilen düzeyde üretim gerçekleştirebilmekte ve şebekeye güç elektroniği ekipmanları yardımıyla bağlanmaktadır.

Rüzgar türbinlerinde sıklıkla kullanılan senkron generatörler “Alan Sargılı Senkron Generatör” ve “Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör”dür.

Alan sargılı senkron generatörlerde manyetik alanın oluşması için gerekli olan sargılar rotor üzerine yerleştirilir. Sargılara DC uyarım verilerek makina içerisinde manyetik alanın oluşması sağlanır. Rotor, stator içerisinde döndükçe oluşan manyetik alandan dolayı stator sargılarında gerilim endüklenir. Alan sargılı makinanın en büyük avantajı stator akımının, güç faktörü kontrolü ile kolaylıkla minimize edilebilir olmasıdır.

Sabit mıknatıslı senkron makinalarda manyetik alan rotor üzerine yerleştirilmiş mıknatıslar ile oluşturulmaktadır. Böylece makina üzerinde uyarım sistemine gerek kalmamaktadır. Bu tip makinaların en büyük avantajı tüm rüzgar hızlarında enerji üretimine uygun oluşudur. Bu özelliğinden dolayı rüzgar enerjisi sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

5.2.2 Asenkron Generatör

Asenkron generatörler, mekanik enerjinin elektrik enerjisine çevriminde sıklıkla yararlanılan elektrik makinalarındandır. Yapısı gereği asenkron makinanın rotoru ile stator döner alanı arasındaki açısal hız bir birlerinden farklıdır. Bu ikisi arasındaki bağıl fark *kayma* olarak adlandırılır. Bir asenkron generatör üzerinde kaymanın büyümesi elektromekanik enerji dönüşümünün artmasına yol açarken, bunun yanında makina üzerinde oluşacak elektriksel kayıplarında artmasına neden olur.

Bir asenkron makinanın generatör olarak çalışabilmesi, başka bir deyişle elektrik enerjisi üretimi yapabilmesi için senkron hızın üzerinde tahrik edilmesi gerekmektedir. Asenkron generatörlerde enerji üretiminin sağlanması için makine üzerinde bulunan uyarım sargıları ile manyetik alan oluşturulması gerekmektedir.

Asenkron generatörler, senkron makinalara kıyasla daha basit bir yapıya sahip olmaları, kolay üretilibilmeleri ve düşük maliyetli olmaları gibi sebeplerden ötürü günümüzde rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Bu tip makinaların en

önemli özelliklerinden biri rüzgar hızı değişimlerinden daha az etkilenmeleridir. Asenkron makinaların ihtiyaç duydukları rekatif güç en büyük dezavantajlarıdır.

Rüzgar türbinlerin sıklıkla kullanılan asenkron makina çeıştleri, *“Sincap Kafesli Asenkron Generatörler”* ve *“Rorotu Sargılı Asenkron Generatörler”*dir.

Sincap kafesli asenkron generatörün rotoru oluklu olarak imal edilmektedir. Fırçasız olarak üretilen sincap kafesli asenkron generatörler, ekonomik ve güvenilir bir yapıya sahiptirler. Rotoru sargılı asenkron generatörler ise rotor üzerinde bulunan sargı uçları bilezikler yardımı ile dışarıya bağlıdır. En büyük avantajları hız kontrollerinin kolay olmasıdır. Buna karşın maliyetleri yüksektir.

Asenkron generatörlerin ihtiyaç duydukları reaktif gücün şebeke üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması amacıyla, bu tip makinaların kullanıldığı rüzgar türbinleri ile birlikte kompanzasyon sistemleri de kullanılmaktadır. Böylece ihtiyaç duyulan reaktif güç sebebiyle sistemin aşırı yüklemesinin önüne geçilmiş olur.

5.3 Mini Rüzgar Türbininde Kullanılacak Generatörleri Performans Analizleri

Yapılan tez kapsamında kullanılmak üzere farklı tür ve güçlerdeki generatörlere ait testler gerçekleştirilmiştir. Böylece mini rüzgar türbini konseptinde kullanılacak en uygun generatör tipi belirlenmiştir. Bu amaçla, 8 adet generatör test edilmiştir. Tasarım çalışmalarında kullanılan generatörlere ait bilgiler Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

Çizelge 5.1 ile verilen genertörlerin ilk 4 tanesi ticari olarak kullanılan elektrik makinalarıdır. Generatör 1 ve Generatör 2’ye ait dişli grupları üzerlerinde akupple durumda bulunmaktadır. Generatör 1’e ait dişli dönüştürme oranı 103:1, Generatör 2’ye ait dişli dönüştürme oranı 319:1’dir . Yapılan ilk çalışmalar sonucunda Generatör 1 ve Generatör 2’nin gerek düşük güç seviyeleri, gerek devir sayılarının yüksek oluşu, gerekse dişli kutusunun ihtiyaç duyduğu büyük moment değerleri nedenleriyle, mini rüzgar türbini konseptinde kullanımlarının uygun olmayacağı tespit edilmiştir.

Çizelge 5.1 Tasarım Çalışmalarında Kullanılan Generatörler

Generatör No	Tipi	Nominal Gücü (Watt)	Devir Sayısı (rpm)	Dönüştürme Oranı
1	DC (Fırçasız)	40	7210	103:1
2	DC (Fırçasız)	80	9510	319:1
3	DC (Fırçalı)	90	1000	-
4	Asenkron	250	680	-
5	Senkron	100	700	-
6	Senkron	200	700	-
7	DC (Fırçalı)	100	700	-
8	DC (Fırçalı)	650	700	-

Şekil 5.1’de mini rüzgar türbini yapısında kullanılmak üzere test edilen generatörler gösterilmiştir.

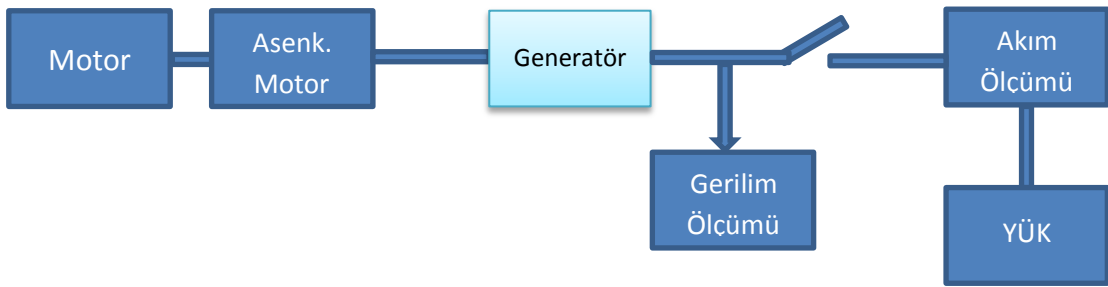


Şekil 5.1 Testleri gerçekleştirilen generatörler

Geliştirilen rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi için analiz edilen generatörlerden, Generatör 3 ve Generatör 4 de ticari olarak kullanılan ürünler olup, diğer 4 generatör söz konusu uygulamada kullanılmak üzere düşük devirlerde çalışabilecek şekilde özel olarak üretilmişlerdir. Bu 6 farklı generatörde de akuple dişli kutusu bulunmamaktadır.

Generatör 3, Generatör 7 ve Generatör 8 DC, Generatör 5 ve Generatör 6 Senkron, Generatör 4 ise Asenkron generatör olarak seçilmiştir. Böylece farklı generatör türlerinin kıyaslanması mümkün olmuştur.

Ele alınan tüm generatörler, oluşturulan test düzeneği üzerinde analiz edilmiştir. Laboratuvar ortamında oluşturulan deney düzeneğinin blok şeması Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Test edilen tüm generatör bir asenkron motor yardımı ile tahrik edilerek kullanılmıştır. Asenkron motor bir motor sürücüsü yardımı ile istenilen devir sayısında çalıştırılmıştır. Böylece analiz edilen generatörlere ait değerler devir sayısına bağlı olarak elde edilmiştir.

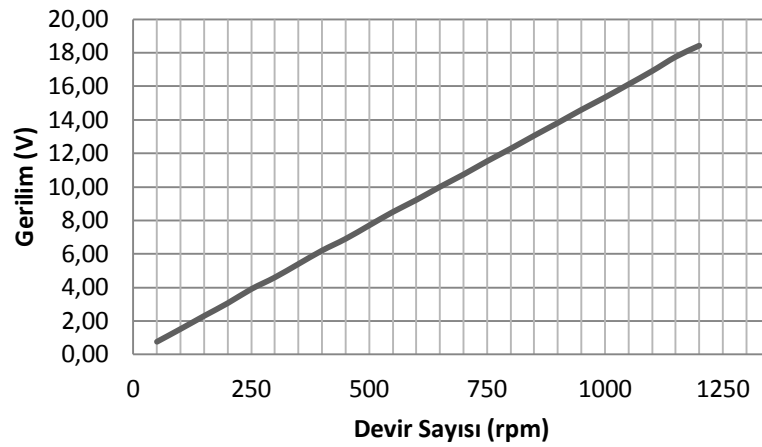


Şekil 5.2 Generatör Deney Devresi Şematik Gösterimi

Bilindiği üzere bir asenkron makinanın generatör modunda çalıştırılabilmesi için nominal devir sayısının üzerinde tahrik edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ele alınan asenkron makinanın nominal devir sayısı 680 rpm’dir. Söz konusu makinanın generatör modunda çalıştırılabilmesi için 680 rpm’in üzerinde bir devir sayısı ile tahrik edilmesi gerekmektedir.

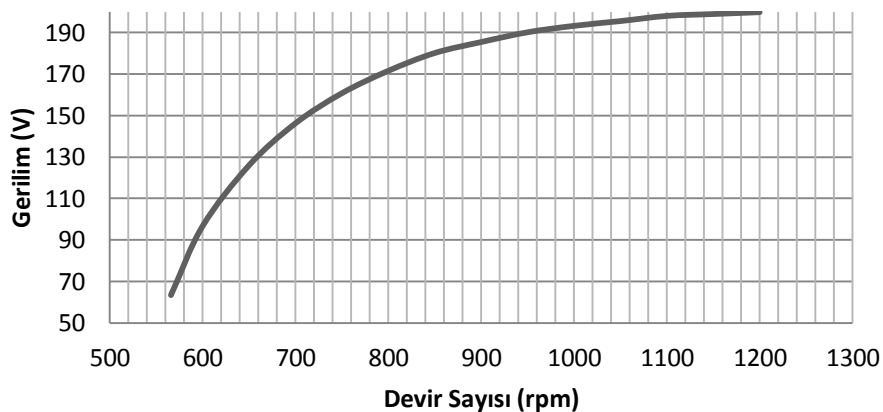
Şekil 5.3’de Generatör 3’e ait boşa çalışma karakteristiği sunulmuştur. Generatöre ait çıkış gerilimi seviyesi 24 V’tur. Yapılan testler sonucunda generatörün nominal gerilim seviyesine nominal devir sayısının üzerinde dahi ulaşamadığı tespit edilmiştir. Generatöre ait güç seviyesinin de düşük olduğu göz önüne alındığında mini rüzgar türbini üzerinde Generatör 3’ün kullanılması verimin düşmesine neden olacaktır. Bu

nedenle ele alınan generatörün geliştirilen sistem üzerinde kullanılması uygun olmayacaktır.



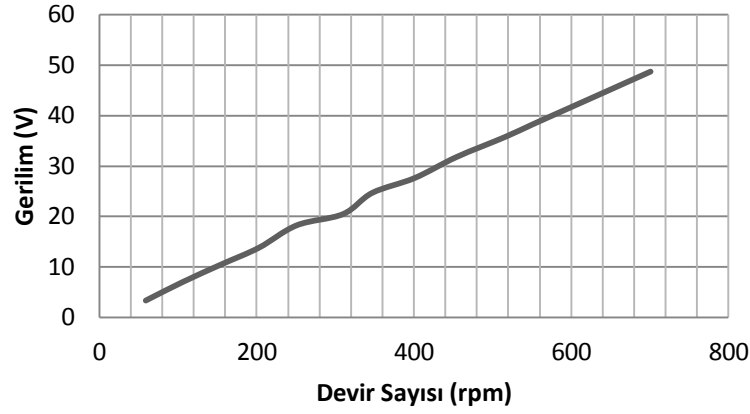
Şekil 5.3 Generatör 3'e ait boşta çalışma karakteristiği

Bu tez kapsamında geliştirilen yeni rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi ile düşük rüzgar hızlarında da üretim yapılabilmesi hedeflenmektedir. Bu amaç doğrultusunda ele alınan asenkron makinanın kullanılabilmesi için sistem üzerinde büyük dönüştürme oranlarına sahip dişli kutusunun bulunması gerekmektedir. Geliştirilen sistem üzerinde kullanılması muhtemel olan bu dişli kutusu yüksek momente sahip olacağından, sistemin istenilen verimde çalışması mümkün olmayacaktır. Bu nedenlerden ötürü Şekil 5.4'de boşta devir sayısına bağlı çıkış gerilimi (fazlararası) karakteristiği gösterilen Generatör 4'ün mini rüzgar türbini konseptinde kullanımı uygun olmayacaktır.



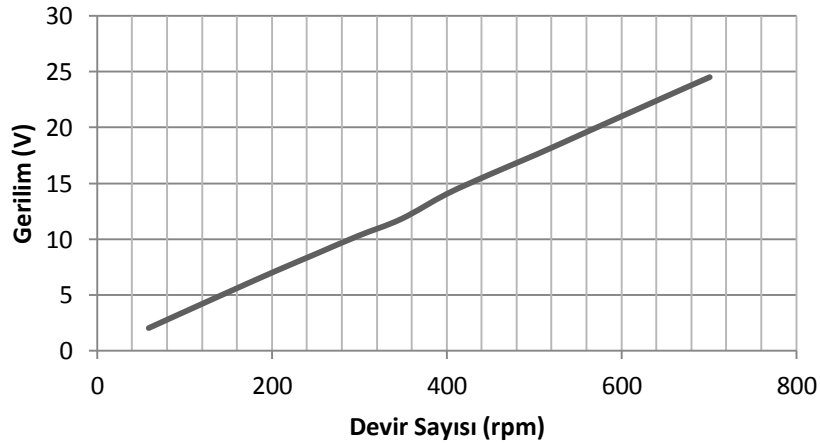
Şekil 5.4 Generatör 4'e ait boşta çalışma karakteristiği

Generatör 5 ve Generatör 6 sabit mıknatıslı senkron generatörlerdir. Her iki generatörün de yapısı birbiri ile aynı olup farkları elektriksel çıkış güçleridir. Bu nedenle ele alınana generatörlerden birinin analiz edilmesi uygun görülmüştür. Generatör 6 için elde edilen devir sayısına bağlı faz-faz gerilim değişimi Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5 Generatör 6'ya ait boşta çalışma karakteristiği

Testi gerçekleştirilen son generatörler 200 W ve 650 W gücündeki iki sabit mıknatıslı DC makinadır. Senkron generatörlerde olduğu gibi aynı yapıda olan bu iki makinadan, Generatör 8 için elde edilen boşta çalışma eğrisi Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Generatör 8'e ait boşta çalışma karakteristiği

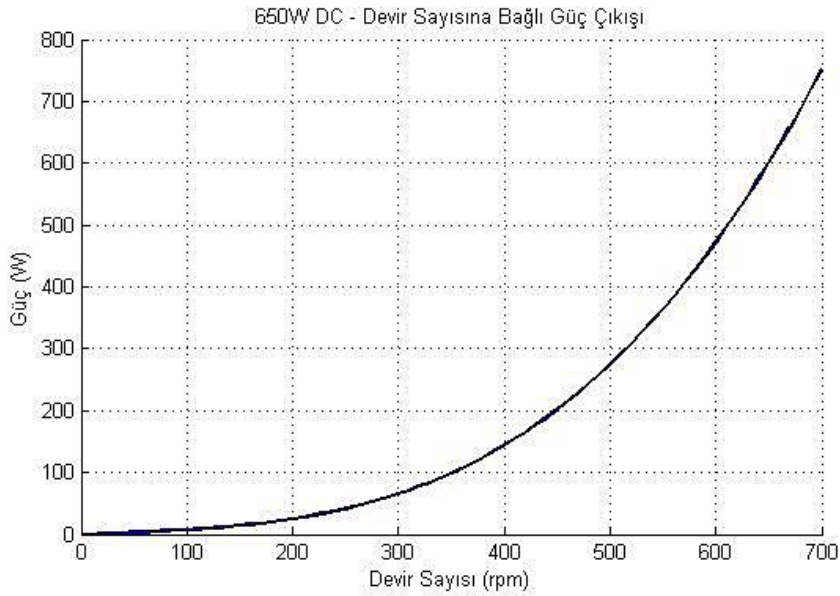
Gerçekleştirilen analizler sonucunda Generatör 5, Generatör 6, Generatör 7 ve Generatör 8'in devir sayısına göre gerilim değişimlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Senkron generatörler nominal devir sayılarında fazlararası 48 V alternatif gerilim üretmektedirler. DC generatör ise 24 V'luk çıkış gerilimi

sağlamaktadırlar. Analiz edilen bu dört generatörün başlangıç moment değerleri arasında büyük farklılıklar gözlemlenmemiştir.

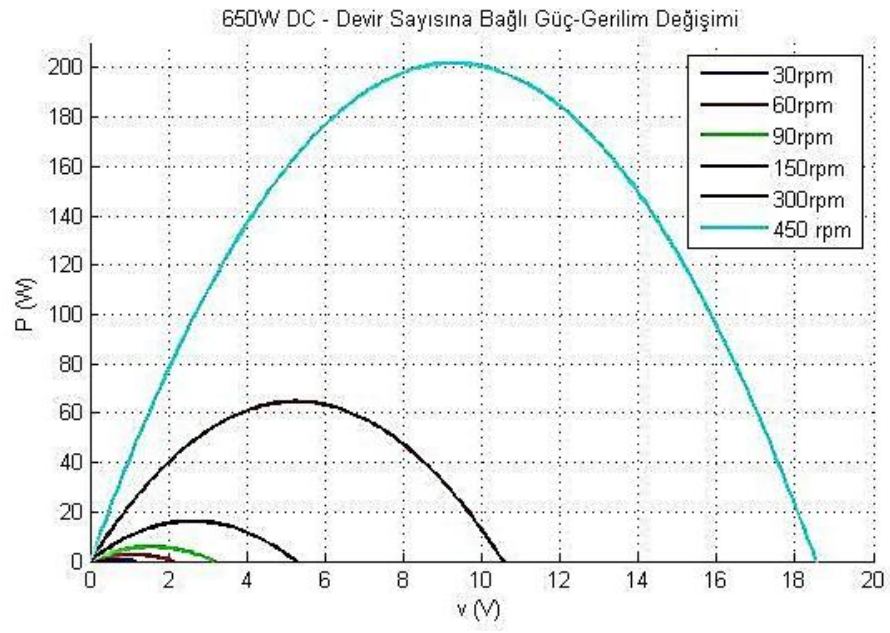
Tüm bu analizler sonucunda birbirleri ile yakın karakteristiklere sahip olan generatörler içerisinde güç değeri en yüksek olan Generatör 8'in prototip mini rüzgar türbini üzerinde kullanılmasının uygun olacağına karar verilmiştir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, nihai türbin yapısında kullanılmasına karar verilen 650W gücündeki DC generatöre ait devir sayısına bağlı çıkış gücü değişimi ve farklı devirlerde çıkış gerilimi – çıkış gücü eğrileri sırası ile Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlara bakıldığına kullanıma karar verilen Generatör 8'in güç üretimine 12,5 rpm hızında başladığı tespit edilmiştir. Generatör nominal hızı olan 700 rpm'de etiket değerinden daha yüksek bir güç çıkışı vermiş olup, generatörün güç çıkışı 750 W değerine yaklaşmıştır.



Şekil 5.7 Prototip üretiminde kullanılacak generatöre ait devir sayısına bağlı çıkış gücü değişimi



Şekil 5.8 Prototip üretiminde kullanılacak generatöre ait farklı devirlerde çıkış gerilim – çıkış gücü eğrileri

MINİ RÜZGAR TÜRBİNİ KONSEPTİ

Konvansiyonel enerji üretim sistemlerinin yakıt olarak kullandıkları hammaddeler hızla tükenmektedir. Ülkemizde de bu yakıtlara ait rezervler ihtiyacımızı karşılayacak düzeyin çok uzağındadır. Bu durum enerji üretiminde dışa bağımlılığı da beraberinde getirmektedir. Ülkemiz enerji politikalarını hidrolik, rüzgar, v.b. öz kaynakların kullanımı ile enerji üretiminin sağlanması noktasında yoğunlaştırmıştır. Buna karşın söz konusu sistemler için yeterli teknolojik altyapının sağlanamamış olması ülkemizin karşındaki en önemli problemdir.

Fosil yakıt rezervlerinin yetersizliğinin yanında çevresel etkileri de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılmasına hız kazandırmıştır. Ülkemiz de Kyoto Protokolü çerçevesinde enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusunda taahhütlerde bulunmuştur.

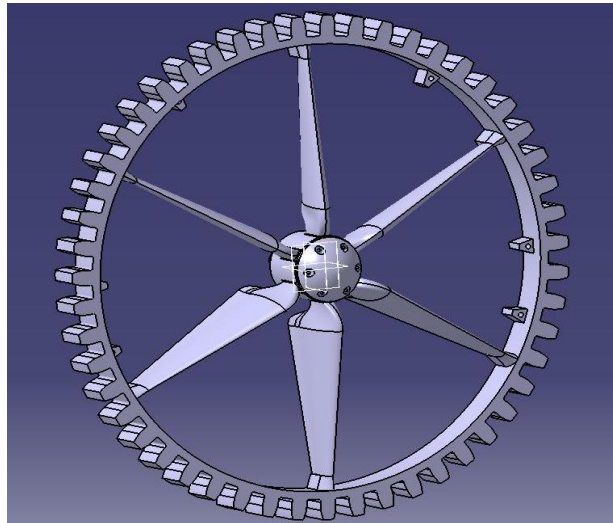
Yukarıda sıralanan sebeplerden ötürü, ülkemizin yenilenebilir enerji kaynaklarında maksimum düzeyde yararlanabilecek bilgi ve donanıma sahip olması gelecek adına oluşabilecek olumsuzluklarında önüne geçilmesini sağlayacaktır. Gerçekleştirilen bu tez çalışması ile, ülkemizin sahip olduğu teknoloji ile rahatlıkla üretimi gerçekleştirilebilecek yeni bir rüzgar enerji üretim sistemi konsepti ortaya konularak, ülkemizin ihtiyaç duyduğu konulardan biri için çözüm önerisi getirilmiştir.

Ortaya konulan konsept ile kentsel bölgelerde rüzgar enerjisinden yararlanabilmektedir. Böylece nüfus yoğunluğunun fazla olduğu şehirlerde atıl durumda bulunan rüzgar enerji potansiyeli kullanılabilir. Önerilen sistemin kullanımı ile tüketicilere en yakın noktadan enerji sağlanacak ve enerji iletiminde

oluşan kayıplarla birlikte, kurulum maliyetleri de azalacaktır. Bu yönü ile de ülkemize ekonomik kazanç sağlayacak yeni bir enerji üretim sistemi tez kapsamında ortaya konulmuştur.

Rüzgar enerji potansiyeli bölgesel olarak değişmekte ve her noktada farklı karakteristik göstermektedir. Bu sebepten ötürü rüzgar türbinleri tesis edildikleri bölgelerin rüzgar karakteristiklerine uygun olarak enerji çıkışı sağlamaktadır. Tez kapsamında geliştirilen mini rüzgar türbin sistemi ile türbinin kullanılacağı farklı bölgelere göre boyutlandırılması ve tasarımının gerçekleştirilebilmesi mümkün olmaktadır. Bu yönü ile ortaya konulan sistem ülkemizde kurulduğu her noktadan maksimum verim elde edilmesini sağlayacak ve ihtiyaç göz önünde bulundurularak maliyetler dengelenebilecektir. Tez çalışması ile ortaya konulan, mini rüzgar türbininin tasarımına ilişkin detaylar aşağıda sunulmuştur.

Bu tez çalışmasında, yeni bir rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi tasarımı hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, rüzgar hızlarının düşük olduğu kentsel alanlarda kullanıma uygun mini rüzgar türbini konsepti oluşturulmuştur. Geliştirilen rüzgar türbininin tasarımı gerçekleştirilirken kanatların dişli bir çarkın içerisinde olması öngörülmüştür. Böylece rüzgar türbininin ihtiyaç duyacağı dişli kutusu açık hale getirilerek, olması gereken türbin alanı ihtiyaca göre ayarlanabilmektedir. Tasarımı yapılan sistem Şekil 6.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Tasarlanan mini rüzgar türbin konsepti

Gerçekleştirilen tasarım ile mümkün oldukça küçük kanat yapıları ile maksimum güç elde edilmesi hedeflenmiştir. Birden fazla kanat dış yüzeylerindeki dişliler yardımıyla birbirlerine akuple edilebilmekte, böylece yüzey alanı genişletilerek sistemden elde edilebilecek güç miktarı arttırılmaktadır. Dişli içerisine bağlanabilecek kanat sayısının değişken olabilmesi sayesinde geliştirilen yapı, farklı rüzgar rejimleri için optimize edilebilmektedir. Mini rüzgar türbinine ait prototip tasarım, üretim ve optimizasyon çalışmaları sırası ile aşağıda sunulmuştur.

6.1 Prototip Çalışmaları

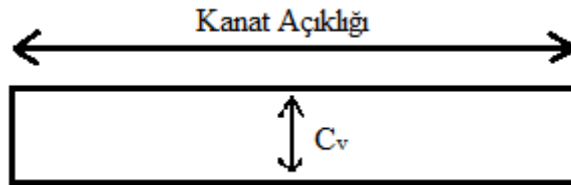
Geliştirilen sistem için ilk olarak konsept tanımı yapılmıştır. Bunu takiben sistemi oluşturan bileşenlere ait tasarım çalışmaları tamamlanmıştır. Tasarım ve çizim çalışmalarının ardından malzeme seçimi, sistem bileşenlerinin üretimi ve malzemelerin montaj çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

6.1.1 Tasarım Çalışmaları

Söz konusu rüzgar enerjisi dönüşüm sistemini oluşturan tüm elemanlar, bir bütünü oluşturacak şekilde ayrı ayrı tasarlanmışlardır. Sırası ile kanatlar, kanat üzerinde bulunan dişli ve diğer bileşenlere ait tasarım çalışmaları yapılmıştır.

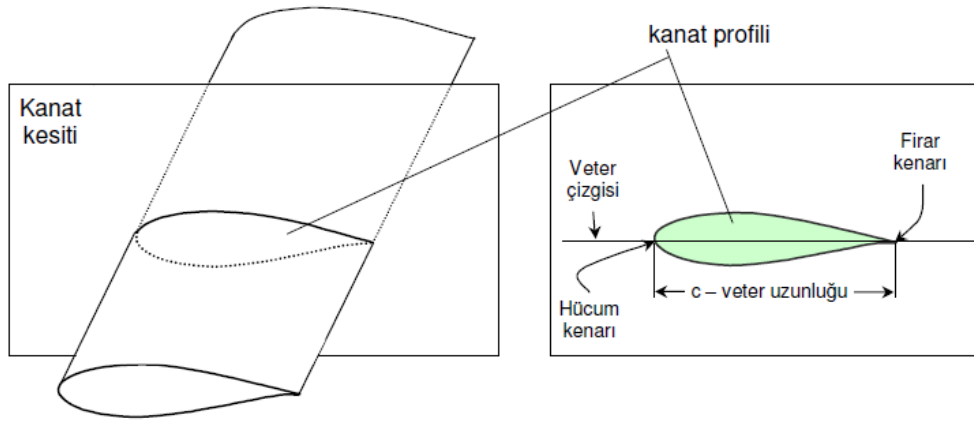
6.1.1.1 Kanat Tasarımı

Bir kanadın istenilen şekilde hareket edebilmesi için uygun olarak boyutlandırılması ve yönlendirilmesi gerekmektedir. Kanadın üstten görünüşü ele alındığında, eni “*veter*” (c_v) ve boyu “*kanat açıklığı*” olarak adlandırılmaktadır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 Kanat üstten görünüşü

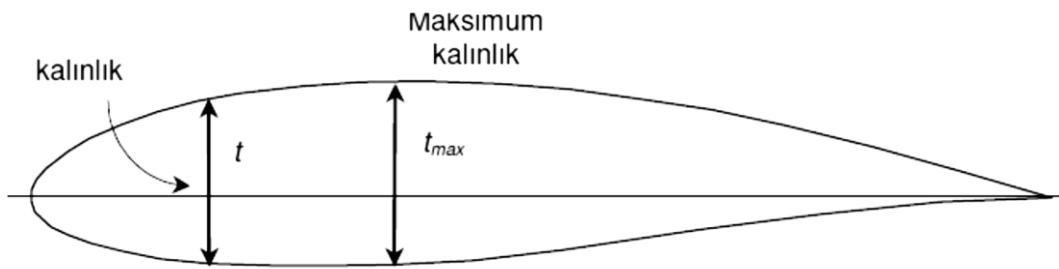
Bir kanadın yanal kesit görünümüne “*kanat profili*” adı verilir. Rüzgar türbin tasarımında, istenilen aerodinamik yapı, kanat profili ile kazandırılmaktadır. Şekil 6.3 ‘de kanat yanal kesit görünümü (kanat profili) verilmiştir.



Şekil 6.3 Kanat yanal kesit görünümü (Kanat Profili)

Kanat üzerinde kalın kenar *Hücum kenarı*, ince kenar ise *Fırar kenarı* olarak adlandırılır. Fırar kenarı, aerodinamik yapının oluşturulması amacıyla sivridir. Hücum kenarından fırar kenarına doğru devam eden çizgi *veter çizgisi*ni, iki kenar arasındaki uzaklık ise *veter uzunluğu*nu (c_v) göstermektedir.

Kanat üzerinde istenilen aerodinamik yapının oluşturulabilmesi için gerekli olan bir diğer parametre ise kanat kalınlığıdır. Kanat profili üzerinde kalınlık, hücum kenarı ile fırar kenarı arasındaki mesafedir. Kanat kalınlığının veter çizgisi boyunca ulaştığı en büyük değer maksimum kanat kalınlığı adını alır. Maksimum kanat kalınlığının veter uzunluğuna oranı ise kanat kalınlık oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu oran göz önüne alınarak, kanatlar kalınlıklarına göre sınıflandırılmaktadır. Bir kanat kesiti üzerinde maksimum kalınlık Şekil 6.4’da gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Kanat kesiti üzerinde kanat kalınlığının görünümü

Kanat kalınlık oranı Eşitlik 6.1 ile ifade edilmektedir. Burada, δ , kanat kalınlık oranını, c_v , veter uzunluğunu ve t_{max} , maksimum kalınlığı göstermektedir.

$$\delta = \frac{t_{max}}{c_v} \quad (6.1)$$

Günümüzde ticari rüzgar türbinlerinde kullanılan kanatlar ince, orta ve kalın olarak kategorize edilmektedir. Kanat çapının 10m'nin altında olduğu uygulamalarda kalın kanatlar tercih edilmektedir.

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, ortaya konulan mini rüzgar türbini konseptinin düşük rüzgar hızlarında çalışması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, tasarlanan türbin üzerinde kullanılacak kanat profilinin, düşük rüzgar hızlarında yüksek verim ile çalışmaya uygun olması sağlanmaya çalışılmıştır.

Yapılan araştırmalar sonucunda, National Renewable Energy Laboratory (NREL) tarafından geliştirilen S833 kanat profilinin gerçekleştirilecek olan prototip türbin üzerinde kullanılması uygun görülmüştür. S833 kanat profiline ait kesit görünümü Şekil 6.5'de verilmiştir.



Şekil 6.5 S833 Kanat Profili

S833 kanat profili %18'lik kanat kalınlık oranı ile kalın kanat kategorisinde yer almakta ve genellikle 1-3 m'lik kanat çaplarında kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen yeni rüzgar enerjisi üretim sisteminde kullanılan kanat profiline ait detay bilgiler EK-1'de sunulmuştur.

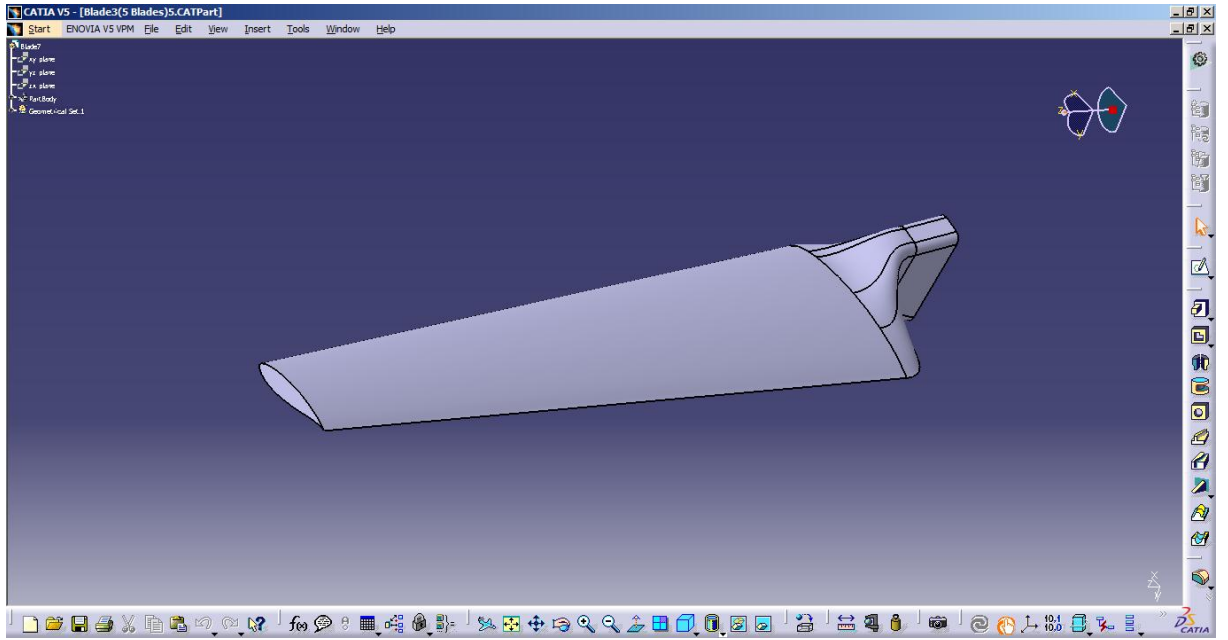
Kanat profilinin belirlenmesinin ardından, kanadın uygun şekilde boyutlandırılması çalışmalarına başlanılmıştır. Üretilecek ilk prototip için kanat boyunun 30 cm olması öngörülmüş ve kanada ait diğer büyüklükler bu değer referans alınarak belirlenmiştir. Prototip üretiminde kullanılan kanada ait büyüklükler,

- Kanat Uzunluğu : 30 cm
- Kanat Yüzey Alanı : 0,014 m²
- Ortalama Veter Uzunluğu : 4,95 cm
- Maksimum Veter Uzunluğu : 7 cm

- Minimum Veter Uzunluğu : 2,89 cm
- Maksimum Kanat Kalınlığı : 1.56 cm
- Minimum Kanat Kalınlığı : 0,67 cm

olarak seçilmiştir.

Belirlenen kanat ölçüleri baz alınarak prototip üretiminin yapılabilmesi amacıyla, mini rüzgar türbini üzerinde kullanılacak kanatlar, CATIA V5 çizim programı kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan kanat modeli Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



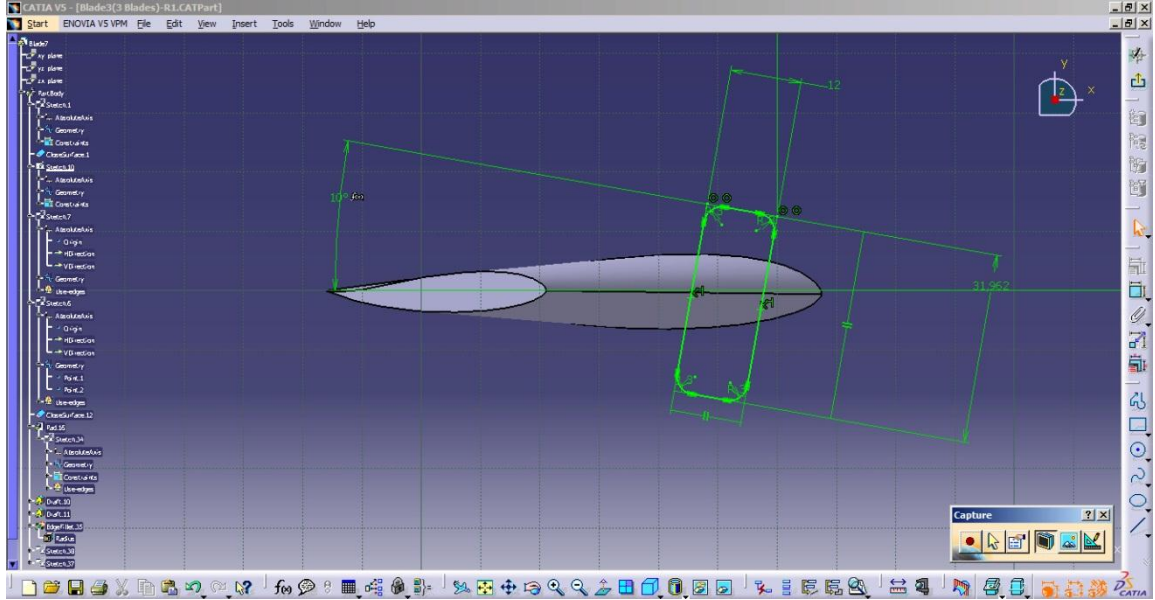
Şekil 6.6 CATIA V5 ortamında oluşturulan kanat profili

Bir kanat profilinde veter çizgisi ile kanadın rüzgar aldığı doğrultu arasında kalan açı *hücum açısı* adını alır. Kanat üzerinde oluşan kuvvet, hücum açısı ile doğrudan orantılıdır. Gerçekleştirilen bu çalışmada, hücum açısı 10° olarak kabul edilmiştir (Şekil 6.7). Tasarlanan kanada ait diğer aerodinamik parametreler Çizelge 6.1'da verilmiştir.

Çizelge 6.1 Kanat aerodinamik özellikleri

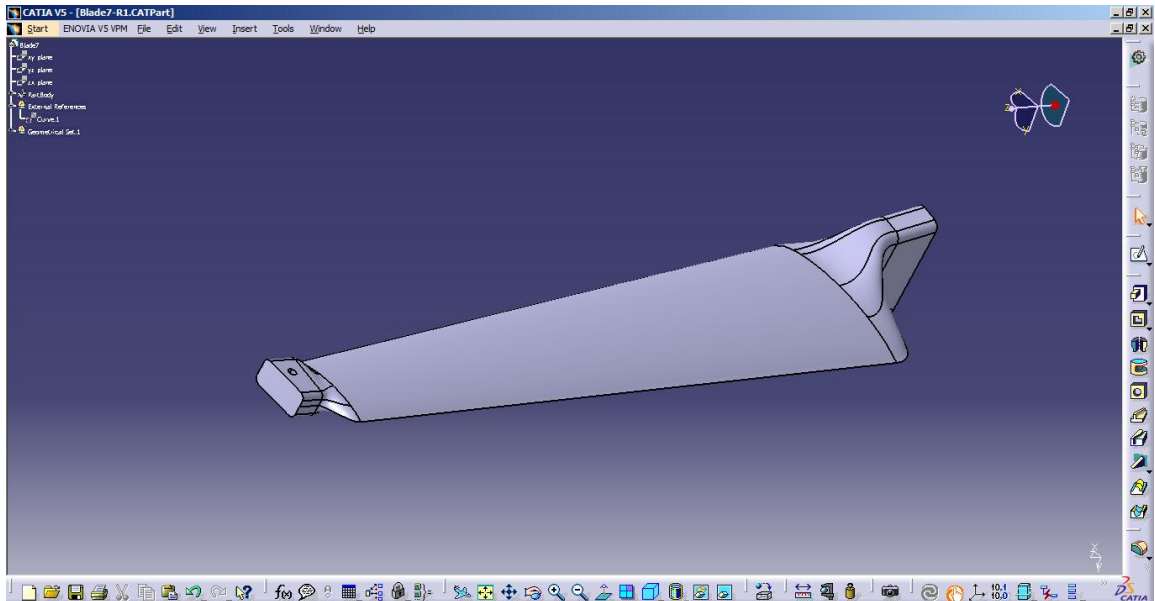
Parametre	Değer
Burulma Açısı	2°
Sivrilme Oranı	0,414

Çizelge 6.1’de verilen burulma açısı, kanadın gövde bağlantı noktası ile uç noktası arasındaki bükülme oranını göstermektedir. Sivrilme oranı ise kanat firar kenarındaki incelme oranını ifade etmektedir.



Şekil 6.7 Tasarlanan yapıya ait hücum açısı

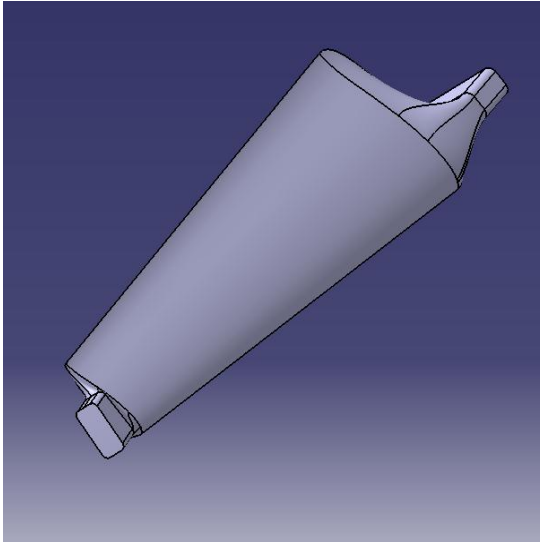
Geliştirilen mini rüzgar türbini sisteminde kanatların dişli bir çark içerisine yerleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla kanatların üst uçlarına dişli çarka montajı sağlayacak ilaveler yapılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen ve dişli sistem üzerinde kullanıma uygun hale getirilen kanat çizimleri Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



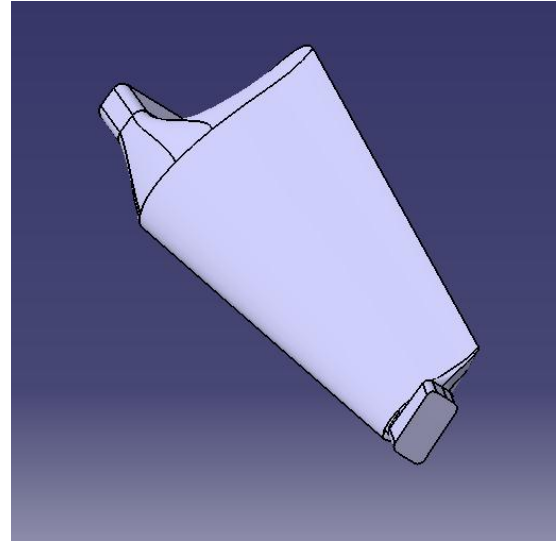
Şekil 6.8 Dişli çarklar ile kullanıma uygun kanat tasarımı

Uygulamada birbirleri ile bağlantılı olan dişli çarklar farklı dönüş yönüne sahip olacaktır. Birden çok dişli çarkın beraber çalışabilmesi için kanatların farklı yönlere doğru hareket etmeleri zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, tasarım safhasında göz önüne alınmış olup düz dönüş yönüne sahip ve ters dönüş yönüne sahip olmak üzere 2 farklı kanat tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Kıyaslamanın daha doğru yapılabilmesi amacıyla her iki kanat tipine ait çizimler Şekil 6.9’da gösterilmiştir.



a. Düz dönüş yönüne sahip kanat

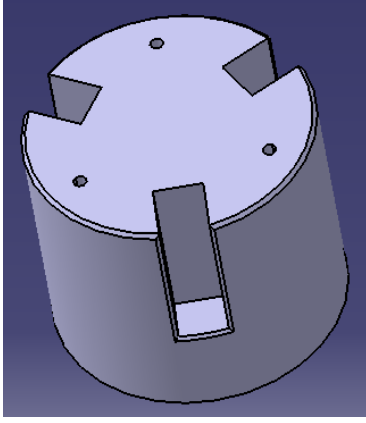


b. Ters dönüş yönüne sahip kanat

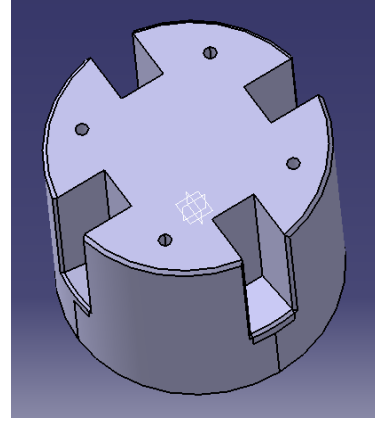
Şekil 6.9 Farklı kanat tasarımları

6.1.1.2 Göbek Tasarımı

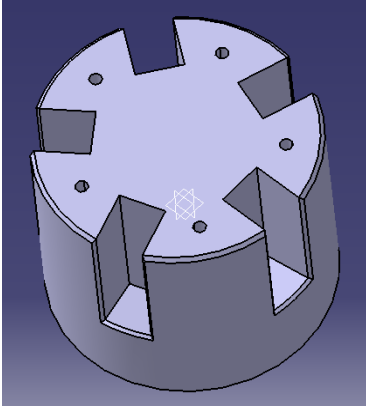
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen mini rüzgar türbininin farklı kanat sayıları ile kullanılabilir olması ve farklı rüzgar potansiyelleri için ayrı ayrı optimize edilebilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda ilk prototip çalışmasında denenmek üzere 3, 4, 5 ve 6 kanat bağlanabilecek farklı göbekler tasarlanmıştır. Göbek üzerinde kanatların oturabileceği oluklar açılmıştır. Her bir kanat sayısı için tasarımı yapılan göbekler Şekil 6.10 ‘de gösterilmiştir.



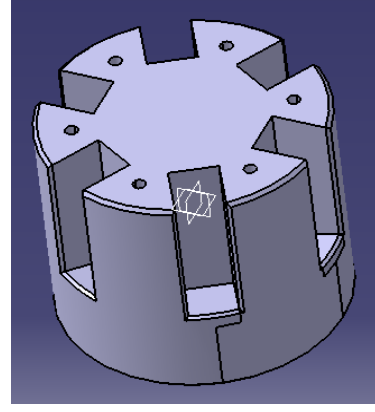
a. 3 kanat için tasarlanmış göbek



b. 4 kanat için tasarlanmış göbek



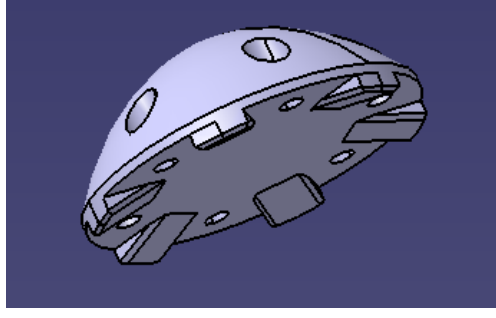
c. 5 kanat için tasarlanmış göbek



d. 6 kanat için tasarlanmış göbek

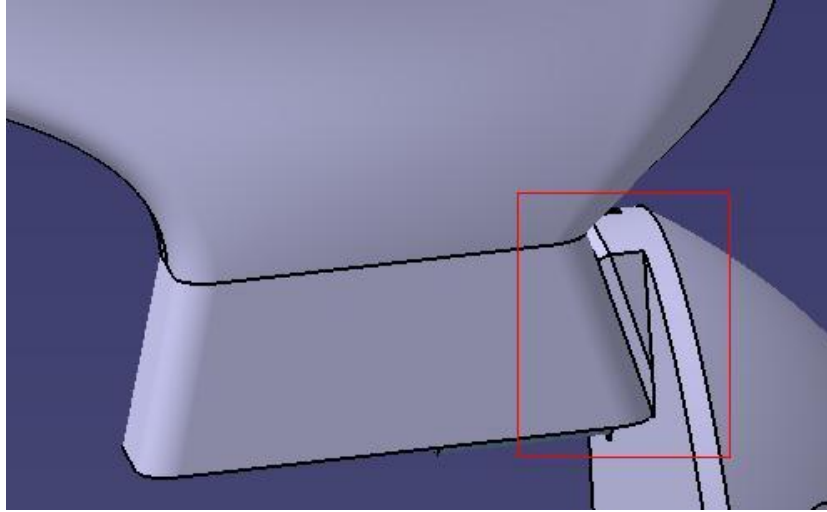
Şekil 6.10 Mini rüzgar türbini için tasarlanan göbekler

Tasarım safhasında karşılan en önemli zorluk, kanat ile göbek bağlantı noktasının dizaynıdır. Kanatların göbek üzerinde salınım yapmadan kalabilmesi için bağlantı noktalarına meyil verilmiştir. Böylece takılan kanadın öne doğru savrulmasının önüne geçilmiştir. Kanatların göbeğe bağlantıları sürme geçirme esasına dayanarak gerçekleştirilmektedir. Göbek üzerine takılan kapaklar yardımıyla, kanatlar göbek üzerine kilitlenmektedir. Şekil 6.11’de kanatların göbeğe sabitlenmesi amacıyla kullanılan göbek kapağı tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 6.11 6 kanat bağlantısı için tasarlanmış göbek kapağı

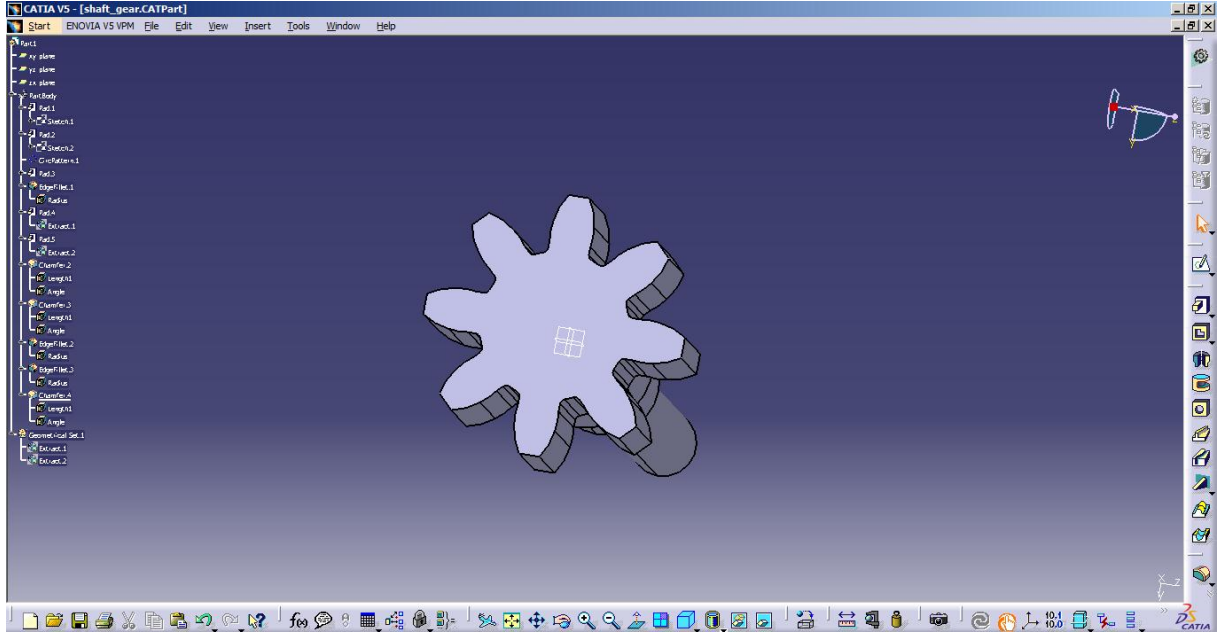
Göbek kapakları her bir göbek için (farklı kanat sayıları için) ayrı ayrı tasarlanmıştır. Kapak üzerinde bulunan çentikler yardımı ile kanatlar göbek üzerine kilitlenmektedir. Kanatların kapak yüzeyine nasıl yerleştirildiği Şekil 6.12’de gösterilmiştir.



Şekil 6.12 Kanatları kapak yüzeyinin oturumu

6.1.1.3 Dişli Tasarımı

Tez kapsamında geliştirilen rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminin modüler bir yapıya ve arttırılabilir yüzey alanına sahip olması amacıyla, kanatların etrafına dişli çarklar yerleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen dişli çark Şekil 6.13’de gösterilmiştir.



Şekil 6.14 Generatör bağlantısı için tasarlanan dişli çark

Generatör bağlantısında kullanılan dişli çark ile generatör milindeki açısal hız 71/8 oranında arttırılabilmektedir.

6.1.2 Prototip Üretimi

Hedeflenen mini rüzgar türbin yapısının tasarlanması ve bileşenlerine ait çizim çalışmalarının sonlandırılmasının ardından, her bir bileşenin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim safhasında türbini oluşturan bileşenlerin mümkün olduğunca hafif olarak imal edilmelerine gerekmektedir. Böylece türbinin ataleti düşürülerek düşük rüzgar hızlarında da çalışabilmesine imkan sağlanacaktır. Bu çalışmada üretilen montajı tamamlanmış bütün çarklı kanat sisteminin ağırlığı 6 kanat için 2,7 kg olmuştur.

Türbine ait kanatlar fiberglas katkıli kompozit malzemeden üretilmiştir. Fiberglas, yüksek mukavemet değerine sahip olması ve ısı yalıtkanlığının yüksekliği sebebiyle ortam değişikliklerinden minimum düzeyde etkilenmektedir. Günümüzde ticari rüzgar türbini kanatlarının imalatında da fiberglas katkıli kompozit malzemelerden sıklıkla yararlanılmaktadır.

Mini rüzgar türbinine ait kanatların üretimi için ilk olarak kanatların 3-boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller kullanılarak düz dönüş yönüne sahip ve ters dönüş yönüne sahip kanatlar için kalıplar oluşturulmuştur. Hazırlanan kompozit

malzeme, kalıplar yardımı ile şekillendirilmiştir. Kalıp içerisinden çıkarılan ham kanatların temizlenmesi ile uygulamada kullanılacak kanatların üretimi tamamlanmıştır.

Dişli üretiminde ise dış ortam koşullarına karşı oldukça dayanıklı bir yapıya sahip polietilen malzeme kullanılmıştır. Bunun yanında dişli yapımında kullanılan polietilen malzeme, tasarlanan sistemin çalışması esnasında oluşacak olan gürültü kirliliğini de düşük düzeye indirmiştir. Kanat çevresinde bulunan dişli çarkların üretimi CNC tezgah üzerinde işlenerek gerçekleştirilmiştir. Generatör bağlantısı için kullanılacak olan dişli imalatı da benzer yöntemle yapılmıştır.

Alüminyum hafif bir metal olmasına karşın mukavemeti yüksek olduğundan, türbin göbeği ve göbek kapağı alüminyum malzeme kullanılarak imal edilmiştir. Türbinde kullanılan kanat ile dişli ağırlıklarını rahatlıkla taşıyabilmesi ve sisteme minimum seviyede ağırlık yüklemesi nedeniyle göbek ve göbek kapağı üretiminde alüminyum tercih edilmiştir. Bu bileşenlerde CNC tezgah kullanılarak imal edilmiştir.



Şekil 6.15 Prototip üzerinde kullanılan malzemeler

Tez kapsamında gerçekleştirilen mini rüzgar türbininin prototip üretiminde kullanılan malzemelerin bir kısmı Şekil 6.15’de gösterilmiştir. Her bir bileşen için gerçekleştirilen üretim adetleri de Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3 Türbin bileşenleri üretim miktarları

Türbin Bileşeni	Adet
Düz dönüş yönlü kanat	18
Ters dönüş yönlü kanat	9
Kanatlar için dişli çark	3
3 kanat için göbek + kapak	3
4 kanat için göbek + kapak	3
5 kanat için göbek + kapak	3
6 kanat için göbek + kapak	3
Generatör bağlantı dişlisi	1

Prototip imalatı gerçekleştirilen sistem, farklı kanat ve dişli çark sayılarının türbin üzerindeki etkilerinin izlenmesine olanak sağlayacak şekilde dizayn edilmiştir. Bu amaçla alüminyum sigma profiller kullanılarak mini rüzgar türbininin oturtulacağı platform oluşturulmuştur. Söz konusu platform, üretimi gerçekleştirilen üç adet dişli çarkın yerleştirileceği şekilde tasarlanmıştır. Oluşturulan platform üzerinde farklı dişli ve kanat sayılarından oluşan yapılar incelenmiştir. 6 kanattan oluşan 3 dişli çarkın, 4 kanattan oluşan 3 dişli çarkın ve 2 kanattan oluşan 2 dişli çarkın montajı gerçekleştirilmiş halleri sırası ile Şekil 6.16, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18 ’de gösterilmiştir.



Şekil 6.16 Sistemin 6 kanatlı 3 dişli için montajlı durumu



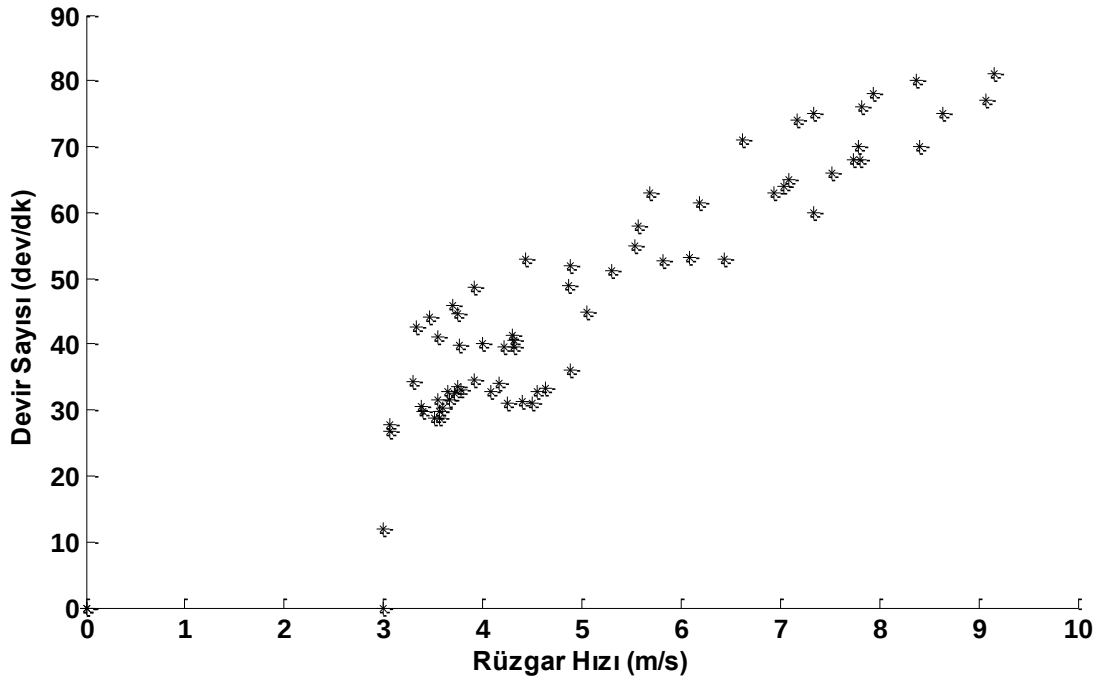
Şekil 6.17 Sistemin 4 kanatlı 3 dişli için montajlı durumu



Şekil 6.18 Sistemin 3 kanatlı 2 dişli için montajlı durumu

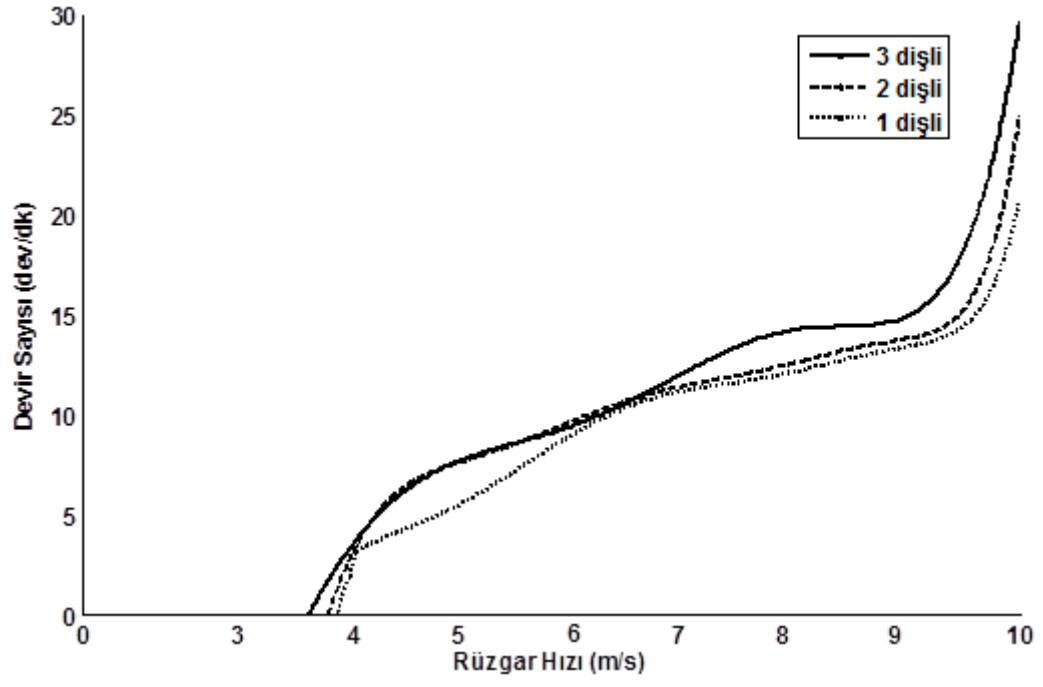
6.1.3 Prototip Çalışması Performans Analizi

Mini rüzgar türbin konseptine ait prototip üretimini takiben ortaya konulan yapının performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Prototip üzerinden giriş ve çıkış verileri yapılan ölçümler ile elde edilmiştir. Bu verilerin işlenmesi sonucunda ortaya konulan yapıya ait karakteristik değerler net olarak gösterilmiştir. Şekil 6.19’da 6 kanatlı ve 3 dişliden oluşan türbin yapısı üzerinden elde edilen veri dağılımı gösterilmiştir.

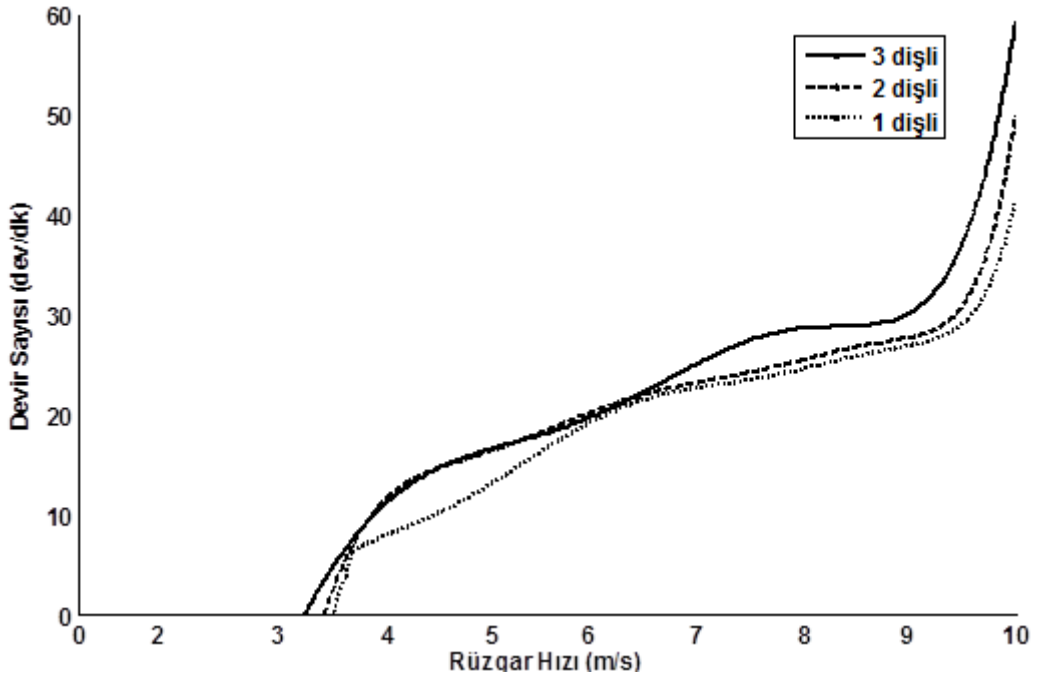


Şekil 6.19 6 kanatlı 3 dişliden oluşan prototip üzerinden alınan verilerin dağılımı

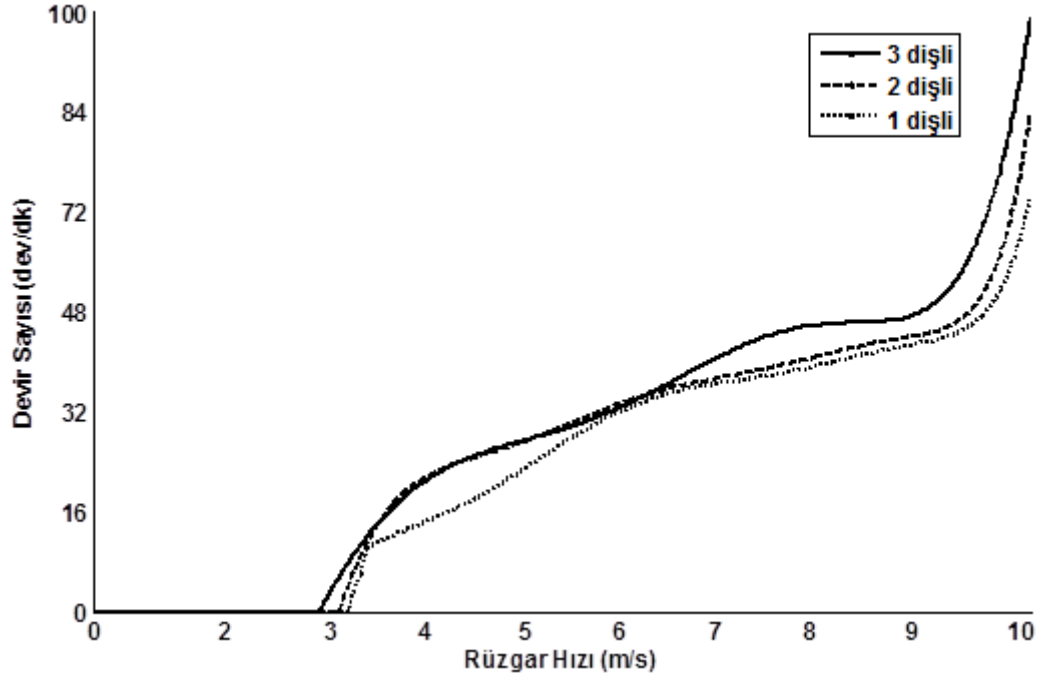
Sistem üzerinden alınan her bir verinin işlenmesi ile mini rüzgar türbinine ait rüzgar hızına bağlı devir sayısı değişimleri de elde edilmiştir. Mini rüzgar türbini prototipi farklı dişli ve kanat sayıları ile kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Oluşturulabilecek farklı konfigürasyonlar ayrı ayrı incelenmiş ve analiz edilmiştir. Mini rüzgar türbini üzerinde gerçekleştirilen performans analizi sonuçları sırası ile 3 kanatlı, 4 kanatlı, 5 kanatlı ve 6 kanatlı yapılar için sunulmuştur. Her bir kanat sayısı için tek dişli, 2 dişli ve 3 dişliye sahip yapılar incelenmiştir. 3 kanatlı, 4 kanatlı, 5 kanatlı ve 6 kanatlı yapılar için elde edilen performans eğrileri sırası ile Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22 ve Şekil 6.23’de gösterilmiştir.



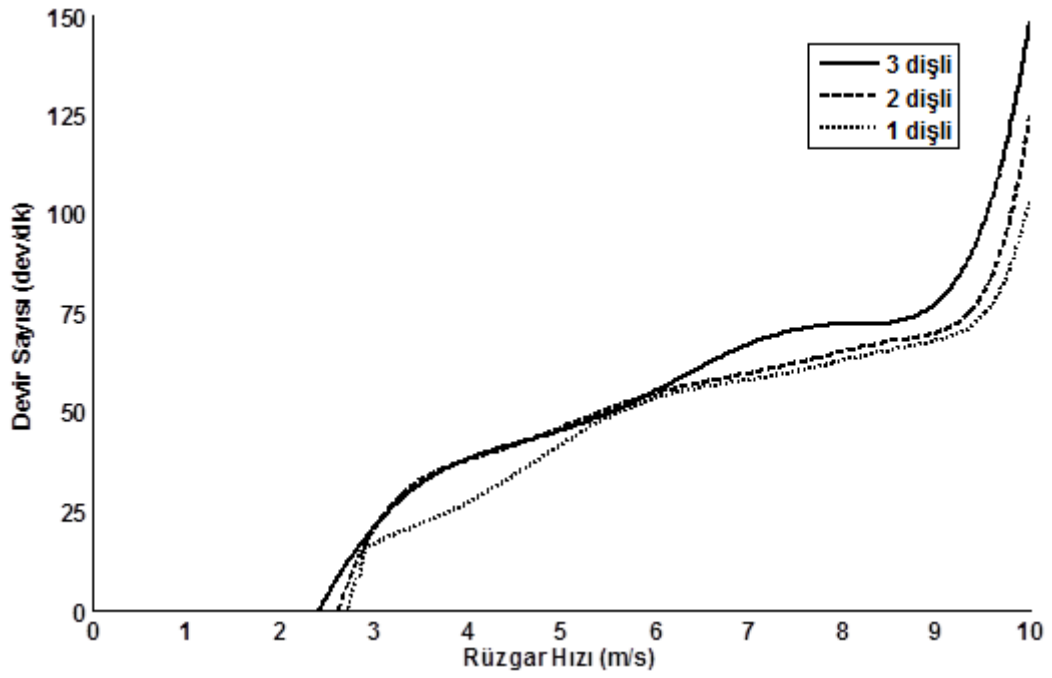
Şekil 6.20 3 kanatlı yapı için performans eğrileri



Şekil 6.21 4 kanatlı yapı için performans eğrileri



Şekil 6.22 5 kanatlı yapı için performans eğrileri



Şekil 6.23 6 kanatlı yapı için performans eğrileri

Şekillerden de açıkça görüldüğü üzere kanat sayısındaki artış geliştirilen türbinin performansını da doğrudan etkilemektedir. Türbin üzerinde kullanılan kanat sayısı arttıkça, açısal hız da artmaktadır.

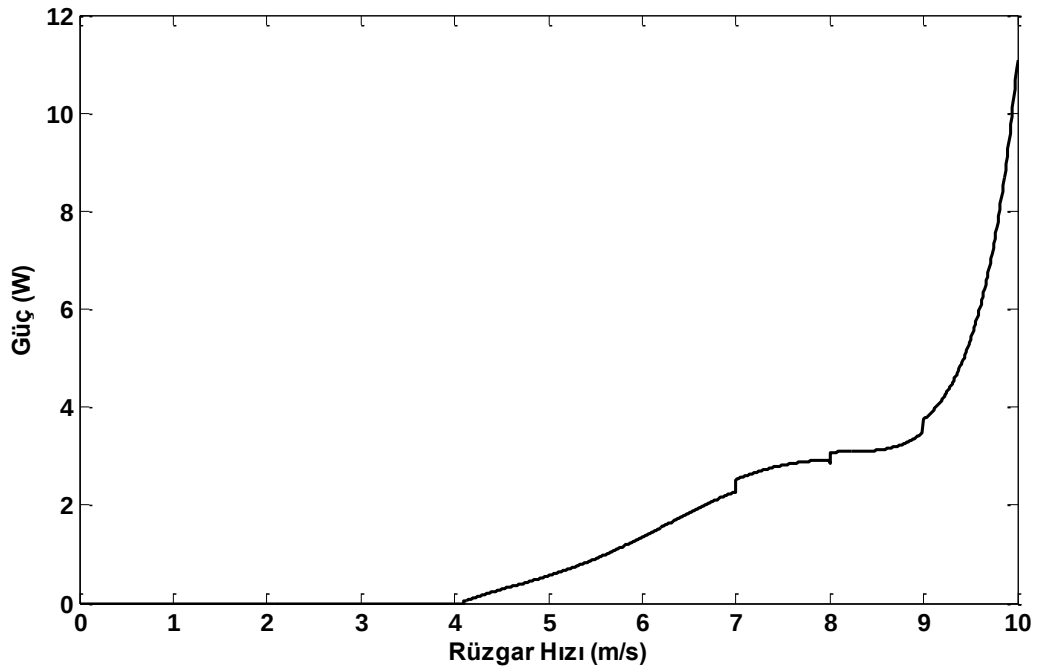
Kullanılan kanat sayısına benzer şekilde dişli sayısının da türbin performansını doğrudan etkilediği yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir. Geliştirilen sistem üzerinde dişliler arasındaki sürtünme, üretim tekniği ile minimize edilmiştir. Böylece birden çok dişli kullanılması durumunda ortaya çıkabilecek kayıplar en aza indirilmiştir. Bunun yanında, bir arada kullanılan dişliler birbirlerini destekleyici davranışta bulundukları da bilinmektedir. Ölçüm sonuçları da dişli sayısı arttıkça türbin performansının yükseldiği göstermektedir. Özellikle yüksek rüzgar hızlarında dişli sayısındaki değişikliğin türbin performansına etkisi Şekil 6.23'deki değişimlerden net olarak görülmektedir.

Gerçekleştirilen ölçümler ile mevcut konfigürasyonlar içerisinde performansı en yüksek olan yapının, 6 kanatlı 3 dişliden oluşan mini rüzgar türbini konfigürasyonu olduğu belirlenmiştir. Generatör bağlantısı da performans analizinin yüksek olması sebebiyle 6 kanatlı 3 dişliden oluşan mini rüzgar türbini üzerine gerçekleştirilmiştir. Söz konusu yapı üzerinde kanat miline doğrudan yapılmış generatör bağlantısı Şekil 6.24'te gösterilmiştir.



Şekil 6.24 Generatör bağlantısı ile mini rüzgar türbini

Generatörün türbine doğrudan bağlanması durumunda performansı incelenmiş ve bu durumda elde edilen güç çıkışı eğrisi Şekil 6.25'te gösterilmiştir.

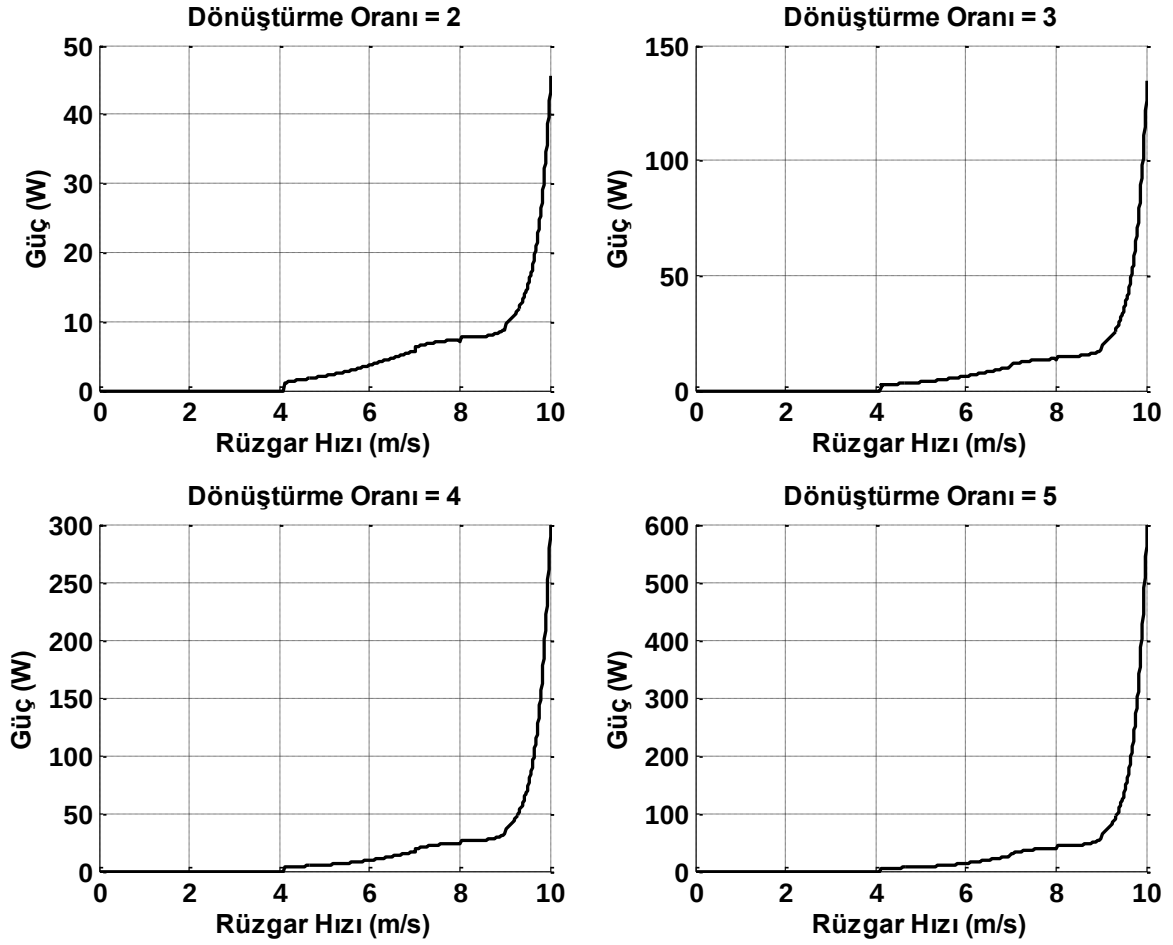


Şekil 6.25 6 kanatlı 3 dişliden oluşan prototip için rüzgar hızına bağlı güç çıkışı değişimi

Şekilden de görüldüğü üzere 6 kanatlı 3 dişliden oluşan yapının kullanılması durumunda türbin güç üretimine yaklaşık 4m/s'lik rüzgar hızında başlamaktadır. Özellikle 9m/s'lik rüzgar hızından daha yüksek hızlarda güç üretimi önemli ölçüde yükselmektedir. Sistem boyutlarının değiştirilmesi ya da sistemde kullanılan dişli sayısının başka bir deyişle türbin yüzey alanının arttırılması durumunda ortaya konulan mini rüzgar türbini daha verimli kullanılabilir.

Şekil 6.26'da generatörün türbin miline bir dişli kutusu üzerinden bağlanması durumunda oluşacak olan senaryolar incelenmiştir. Sırası ile türbin üzerinde 1:2, 1:3, 1:4 ve 1:5 dönüştürme oranlarına sahip dişli kutularının kullanıldığı varsayılmıştır. Her bir durum için generatörden alınabilecek maksimum güç eğrileri elde edilmiştir.

Şekil 6.26'dan da anlaşılacağı üzere sistem üzerinde kullanılacak dişli kutusunun dönüştürme oranı arttıkça, türbin çıkış gücü de yükselmektedir.



Şekil 6.26 Farklı dişli kutusu kullanımları için 6 kanatlı 3 dişli yapının güç çıkışı eğrileri

Türbin üzerinde kullanılan dişli kutusuna ait dönüştürme oranının yükselmesi generatör milinin açısal hızını ve türbin çıkış gücünü arttırmaktadır. Bunun yanında kullanılacak dişli kutusu ile generatöre aktarılan moment azalacaktır, başka bir deyişle generatörün belirli bir rüzgar hızındaki tahriki için türbin üzerinden daha yüksek bir tork elde edilmesi gerekmektedir. Bu durumda mini rüzgar türbini üzerinde daha uzun kanatlar kullanılabileceği gibi, türbin üzerinde bulunan dişli sayısı artırılarak da üretilen mekanik tork değeri istenilen düzeye çıkarılabilecektir. Bu durum sistemin kullanılacağı bölgeye özel olarak tasarlanıp optimize edilebileceğini de ortaya koymaktadır.

Tez kapsamında ortaya konulan mini rüzgar türbini yapısının karakteristik değerlerinin net olarak görülebilmesi amacıyla, geliştirilen sistem benzer özelliklere sahip bir ticari

rüzgar türbini ile mukayese edilmiştir. Bu amaçla Apollo marka 650W'lık türbinin göz önüne alınması uygun görülmüştür. 12 V DC gerilim çıkışına sahip olan sabit mıknatıslı DC generatörün kullanıldığı bu türbin 60 cm uzunluğunda 6 kanattan oluşmaktadır. Her bir kanat 166 gr ağırlığında olup termoplastik malzeme kullanılarak üretilmiştir. Türbine ait toplam süpürme alanı $1,13 \text{ m}^2$ 'dir. Rotor ile birlikte türbine ait toplam kanat ağırlığı 1,68 kg'dır.

Prototip üretimi tamamlanan mini rüzgar türbini ise 30 cm uzunluğundaki kanatlardan oluşmaktadır ve tek bir dişli çark ile oluşturulan sistemin süpürme alanı $0,28 \text{ m}^2$ 'dir. Tek bir dişli çark ile oluşan kanatların ağırlığı 2,7 kg olarak elde edilmiştir.

Referans olarak alınan Apollo marka rüzgar türbinine ait süpürme alanının elde edilebilmesi için mini rüzgar türbini üzerinde 4 adet dişli çarktan oluşan kanat sisteminin kullanılması gerekmektedir. Bu durumda sistemin üzerinde bulunan kanat ağırlığı 10,8 kg olacaktır. Başka bir deyişle geliştirilen sistem, ticari olarak kullanılan benzer bir ürüne oranla 6,4 kat daha ağırdır. Bu durum tez kapsamında prototip üretimi yapılan rüzgar türbin bileşenlerine ait malzemelerin seçimi açısından iyileştirmeler yapılması gerektiği anlamına gelmektedir.

Referans alınan ticari rüzgar türbini ile kıyaslandığında, prototip üretimi gerçekleştirilen mini rüzgar türbininin kanatları %64, türbin üzerinde kullanılan göbek ise %83 oranında hafifletilebilmektedir. Kanat dış yüzeyinde kullanılan dişli çarkın ağırlığı ise boyutlandırmasına da bağlı olmak üzere %50 oranında azaltılabilmektedir. Söz konusu malzeme değişimlerinin sistem üzerinde uygulanması ile sistemin boşta başlangıç rüzgar hızı 2 m/s 'nin altına indirilebilecektir.

Geliştirilen sistem üzerinde bulunan bileşenlerin üretiminde daha hafif malzemelerin kullanımı sistem ağırlığının hafiflemesini de beraberinde getirecektir. Malzemenin hafiflemesi mini rüzgar türbininin ataletini de düşürecektir. Bu durumda sistem daha düşük rüzgar hızlarında çalışmaya başlayabilecektir. Bunun yanında sistem üzerinde oluşan momenti dengelemek için kanat sistemi konfigürasyonunda iyileştirmeye gidilmesi gerekmektedir. Mini rüzgar türbini üzerinde kullanılan dişli çark ve kanat sayısının arttırımı ile söz konusu problem ortadan kaldırılabilir.

6.2 Mini Rüzgar Türbinine Ait Optimizasyon Çalışmaları

Gerçekleştirilen prototip üzerinden alınan veriler kullanılarak farklı ortalama rüzgar hızları için boyutlandırmaya dayalı performans iyileştirme hedefiyle optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, ortaya konulan yapının birim enerji maliyetini minimum yapacak değerler, farklı rüzgar hızları ve konfigürasyonlar için elde edilmiştir. Optimizasyon çalışmalarında kullanılan matematiksel altyapı aşağıda sunulmuştur.

Prototipi gerçekleşen mini rüzgar türbinine ait birim enerji maliyeti Bölüm 4'te detaylı olarak anlatıldığı gibi Eşitlik 6.2 ile ifade edilmektedir.

$$M_{Bir} = \frac{M_{Top_yil}}{E_T} \quad (6.2)$$

Optimizasyon çalışmalarında tasarımı yapılan sisteme ait bakım onarım maliyetleri ihmal edilmiştir. Buna göre toplam yıllık maliyet Eşitlik 6.3'de gösterildiği gibi toplam yatırım maliyetlerinin ekonomik ömre oranı ile elde edilir.

$$M_{Top_yil} = \frac{M_{yat}}{n} \quad (6.3)$$

Toplam yatırım maliyetlerinin üç farklı bileşenden meydana geldiği öngörülmüştür. Generatör maliyeti (M_G), kanat maliyeti (M_K) ve diğer bileşen maliyetlerinden (M_{DE}) meydana gelen toplam yatırım maliyeti Eşitlik 6.4 ile gösterilmiştir.

$$M_{yat} = M_G + M_K + M_{DE} \quad (6.4)$$

Sistem üzerinde kullanılan 650 W gücünde sabit mıknatıslı DC generatörün maliyeti 800 TL'dir. Kanat maliyetleri iki farklı bileşen kullanılarak oluşturulmuştur. Bunlardan ilki kanatların bir arada durmasına olanak sağlayan her bir göbeğe ait maliyettir ve 150 TL olarak tespit edilmiştir. Kanat maliyetlerini oluşturan diğer bileşen ise kanatların birim uzunluk başına maliyetleridir ve uygulamada 20 TL olarak kullanılmıştır. Buna göre toplam kanat maliyeti,

$$M_K = (150 + 20 \cdot l \cdot m) \cdot a \quad (6.5)$$

denklemi ile elde edilmiştir. Burada, l kanat uzunluğunu, m kanat sayısını ve a sistem üzerinde kullanılan kanatların bir arada durmasını sağlamakla beraber birbirleri arasında güç iletimini de sağlayan, kanat çevresindeki dişli sayısını ifade etmektedir.

Gerçekleştirilen mini rüzgar türbinine ait diğer maliyet bileşenleri, kanatların üzerinde bulunan dişlilere ve tasarlanan yapının üzerine oturtulduğu platforma ait maliyetlerden oluşmaktadır. Kanat çevresinde kullanılan dişlilere ait maliyet, dişli çark başına 2100 TL'dir. Platform ise 100 TL'ye imal edilmiştir. Tasarlanan sisteme ait diğer maliyetler Eşitlik 6.6 ile gösterilmiştir.

$$M_{DE} = 2100.a + 100 \quad (6.6)$$

Geliştirilen sisteme ait ekonomik ömrün 20 yıl alınması durumunda toplam yıllık maliyet,

$$M_{Top_{yıl}} = \frac{800 + (150 + 20.l.m).a + 2100.a + 100}{20} \quad (6.7)$$

olarak ifade edilmiştir.

Mini rüzgar türbinin yıllık enerji üretiminin boyutlandırmaya bağlı olarak elde edilebilmesi amacıyla, üretim fonksiyonu sistem ataletine bağlı olarak oluşturulmuştur. Sistem ataletine bağlı mekaniksel güç Eşitlik 6.8 ile ifade edilmektedir.

$$P_m = \frac{1}{2} J_T w^3 \quad (6.8)$$

Denklemden J_T sistemin toplam ataletini, w sistemin açısal hızını göstermektedir. Sistemin toplam ataleti kanatların ve dişlilerin ataletlerinin toplamından oluşmaktadır. Eşitlik 6.8'de kullanılan atalet değeri tek bir dişli ve içerisinde bulunan kanatlar için hesaplanmaktadır. Birden çok dişlinin kullanılacağı durumlarda, dişli sayısının hesaplamaya katılması gerekmektedir.

Her iki sistem bileşenine ait atalet değerleri parametrik olarak sırası ile Eşitlik 6.9 ve Eşitlik 6.10 kullanılarak elde edilmektedir.

$$J_{kanat} = \frac{1}{3} . m . \rho_k (l . k_k . k_g) . l^2 \quad (6.9)$$

$$J_{Disli} = 0,33 . l \quad (6.10)$$

Atalet denklemlerinde ρ_k , kanat malzemesinin yoğunluğunu, k_k kanat kalınlığını ve k_g kanat genişliğini ifade etmektedir. Sistem üzerinde kullanılan generatöre ait verim, literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda göz önüne alınarak 0,95 olarak kabul edilirse, mini rüzgar türbinine ait elektriksel güç çıkışı,

$$P_E = P_m \cdot 0,95 \quad (6.11)$$

ifadesi kullanılarak elde edilebilir. Buna göre bir yıl içerisinde 8760 saat olduğu göz önüne alındığında, analiz edilen türbine ait yıllık enerji üretim miktarı,

$$E_T = \left(\frac{1}{2} J_T w^3 \right) \cdot a \cdot 0,95 \cdot 8760 \quad (6.12)$$

denklemini kullanılarak hesaplanabilir.

Gerçeklenen rüzgar türbininin farklı rüzgar hızları için optimize edilebilmesi hedefiyle, amaç fonksiyonu rüzgar hızına bağlı olarak yazılmıştır. Bu kapsamda sistemin açılma hız,

$$w = \frac{\lambda \cdot v}{l} \quad (6.13)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir. Burada, λ sisteme ait kanat uç hız oranını, v ise rüzgar hızını, l ise kanat uzunluğunu sembolize etmektedir. Optimizasyon işleminin gerçekçi sonuçlar vermesi amacıyla saha ölçümlerinde elde edilen kanat uç hız oranları kullanılmıştır.

Tüm parametrelerin göz önünde bulundurulması ile optimizasyon çalışmalarında kullanılan amaç fonksiyonu Eşitlik 6.14'te gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

$$f(BRM)_{min} = \frac{800 + (150 + 20 \cdot l \cdot m) \cdot a + 2100 \cdot a + 100}{20} \cdot \left(\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} m \cdot \delta_k (l \cdot k_k \cdot k_g) \cdot l^2 + 0,33 \cdot l \right) \left(\frac{\lambda \cdot v}{l} \right)^3 \right) \cdot a \cdot 0,95 \cdot 8760 \quad (6.14)$$

Optimizasyon çalışmaları, boyutlandırmaya bağlı gerçekleştirilmiş ve değişken parametreler olarak kanat uzunluğu, kanat genişliği ve kanat kalınlığı alınmıştır. Optimizasyon probleminde göz önüne alınan kısıtlar Eşitlik 6.15'de gösterilmiştir.

$$0,2 \text{ m} \leq l \leq 0,4 \text{ m}$$

$$0,01 \text{ m} \leq k_k \leq 0,02 \text{ m} \quad (6.15)$$

$$0,03 \text{ m} \leq k_g \leq 0,07 \text{ m}$$

Dikkate alınan kısıtların belirlenmesinde, kanada ait aerodinamik yapının korunumu baz alınmıştır. Amaç fonksiyonunda belirtilen kanat kalınlığı, mini rüzgar türbini üzerinde kullanılan kanada ait maksimum kalınlığı, kanat genişliği ise türbin üzerinde kullanılan kanada ait ortalama genişliği ifade etmektedir.

Tasarımı gerçekleştirilen mini rüzgar türbini konsepti, farklı kanat ve dişli sayıları ile kullanılabilir. Optimizasyon çalışmalarında da farklı konfigürasyonlar için en

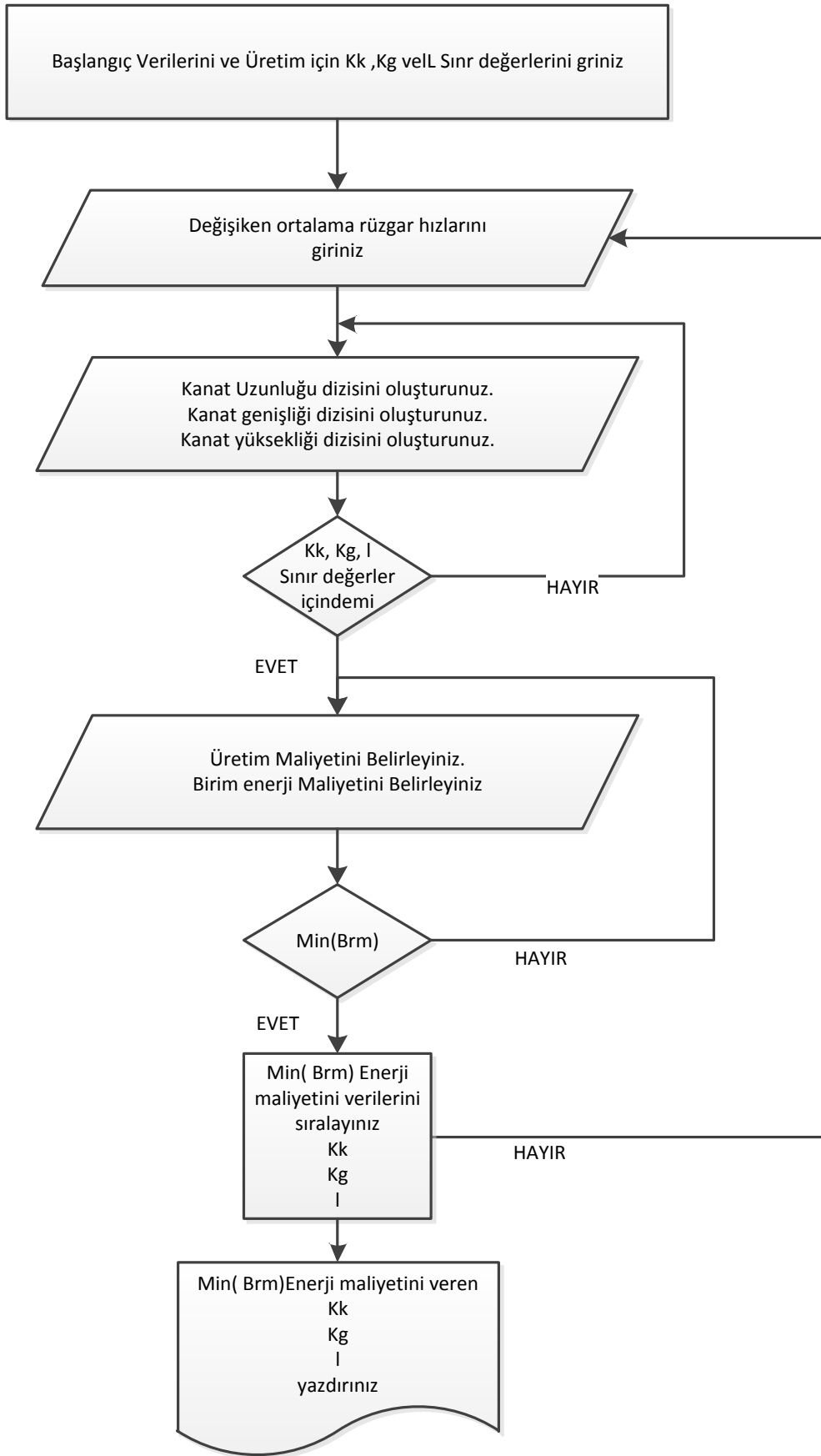
uygun boyutlandırma çözümleri elde edilmiştir. Sayısal uygulamada 3 dişli, 4 dişli ve 5 dişliden oluşan yapılar ele alınmış ve her bir durum için farklı kanat sayılarının bulunması durumlarına ait sonuçlar elde edilmiştir.

Mini rüzgar türbini konseptinin farklı rüzgar rejimlerine sahip bölgeler için değişik yapılarda kullanılabilir olması hedeflenmektedir. Bu durum optimizasyon çalışmalarında da göz önüne alınmış ve 3m/s, 4m/s, 5m/s ve 6m/s'lik ortalama rüzgar hızları için ayrı ayrı incelenmeler yapılmıştır. Mini rüzgar türbininin boyutlandırmaya dayalı optimizasyonu amacıyla kullanılan algoritma Şekil 6.27'de gösterilmiştir.

Optimizasyon çalışmaları iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 4 farklı ortalama rüzgar hızı için her bir mini rüzgar türbini konfigürasyonuna ait en uygun boyutlandırmalar belirlenmiştir. İkinci aşamada ise kanat uzunluğunun birim enerji maliyeti üzerindeki etkisi ortaya konulmuş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Çizelge 6.4 3m/s ortalama rüzgar hızı için optimum boyutlar ve birim enerji maliyeti

Dışlı Sayısı	Kanat Sayısı	BRM (TL/kWh)	Kanat Boyu (m)	Kanat Kalınlığı (m)	Kanat Genişliği (m)
3	3	7,1599	0,2000	0,0137	0,0588
	4	4,7257	0,2000	0,0152	0,0663
	5	2,9323	0,2000	0,0189	0,0495
	6	2,1457	0,2000	0,0182	0,0499
4	3	5,3903	0,2000	0,0124	0,0602
	4	3,5619	0,2000	0,0129	0,0695
	5	2,2127	0,2000	0,0185	0,0595
	6	1,6212	0,2000	0,0183	0,0581
5	3	4,3284	0,2000	0,0135	0,0630
	4	2,8636	0,2000	0,0185	0,0648
	5	1,7812	0,2000	0,0197	0,0481
	6	1,3065	0,2000	0,0195	0,0558



Şekil 6.27 Kullanılan optimizasyon algoritması

Çizelge 6.4’de 3 m/s’lik ortalama rüzgar hızı için optimizasyon sonuçları sunulmuştur. 3 m/s’lik ortalama rüzgar hızı için optimum yapı, 6 kanatlı 5 dişliden oluşan sistemde 20 cm kanat boyu, 1,95 cm maksimum kanat kalınlığı ve 5,58 cm ortalama kanat genişliği ile elde edilmiştir. Bu durumda birim enerji maliyeti 1,31 TL/kWh olarak hesaplanmıştır.

4 m/s, 5 m/s ve 6 m/s’lik ortalama rüzgar hızları için optimizasyon çalışması sonucunda elde edilen minimum BRM ve boyutlandırma sonuçları sırası ile Çizelge 6.5, Çizelge 6.6 ve Çizelge 6.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.5 4m/s ortalama rüzgar hızı için optimum boyutlar ve birim enerji maliyeti

Dişli Sayısı	Kanat Sayısı	BRM (TL/kWh)	Kanat Boyu (m)	Kanat Kalınlığı (m)	Kanat Genişliği (m)
3	3	3,0207	0,2000	0,0190	0,0543
	4	1,9937	0,2000	0,0176	0,0555
	5	1,2371	0,2000	0,0117	0,0618
	6	0,9051	0,2000	0,0182	0,0597
4	3	2,2740	0,2000	0,0143	0,0558
	4	1,5026	0,2000	0,0191	0,0565
	5	0,9335	0,2000	0,0190	0,0509
	6	0,6839	0,2000	0,0195	0,0514
5	3	1,8259	0,2000	0,0152	0,0639
	4	1,2082	0,2000	0,0156	0,0653
	5	0,7515	0,2000	0,0194	0,0521
	6	0,5512	0,2000	0,0179	0,0521

Çizelge 6.5’den de görüleceği üzere 4 m/s’lik ortalama rüzgar hızı için optimum yapı, 6 kanatlı 5 dişliden oluşan sistemde 20 cm kanat boyu, 1,79 cm maksimum kanat kalınlığı ve 5,71 cm ortalama kanat genişliği ile elde edilmiştir. Bu durumda birim enerji maliyeti 0,55 TL/kWh olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.6 5m/s ortalama rüzgar hızı için optimum boyutlar ve birim enerji maliyeti

Dişli Sayısı	Kanat Sayısı	BRM (TL/kWh)	Kanat Boyu (m)	Kanat Kalınlığı (m)	Kanat Genişliği (m)
3	3	1,5466	0,2000	0,0167	0,0535
	4	1,0207	0,2000	0,0175	0,0636
	5	0,6334	0,2000	0,0191	0,0605
	6	0,4635	0,2000	0,0172	0,0611
4	3	1,1642	0,2000	0,0195	0,0687
	4	0,7693	0,2000	0,0199	0,0688
	5	0,4780	0,2000	0,0198	0,0528
	6	0,3502	0,2000	0,0174	0,0674
5	3	0,9350	0,2000	0,0165	0,0482
	4	0,6186	0,2000	0,0120	0,0679
	5	0,3847	0,2000	0,0168	0,0508
	6	0,2822	0,2000	0,0146	0,0408

Çizelge 6.6’dan görüleceği üzere 5 m/s’lik ortalama rüzgar hızı için optimum yapı, 6 kanatlı 5 dişliden oluşan sistemde 20 cm kanat boyu, 1,46 cm maksimum kanat kalınlığı ve 4,08 cm ortalama kanat genişliği ile elde edildiği görülmektedir. Bu durumda birim enerji maliyeti 0,28 TL/kWh olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.7 6m/s ortalama rüzgar hızı için optimum boyutlar ve birim enerji maliyeti

Dışlı Sayısı	Kanat Sayısı	BRM (TL/kWh)	Kanat Boyu (m)	Kanat Kalınlığı (m)	Kanat Genişliği (m)
3	3	0,8949	0,2000	0,0177	0,0573
	4	0,5907	0,2000	0,0177	0,0573
	5	0,3665	0,2000	0,0167	0,0612
	6	0,2682	0,2000	0,0176	0,0385
4	3	0,6738	0,2000	0,0170	0,0693
	4	0,4453	0,2000	0,0170	0,0693
	5	0,2766	0,2000	0,0154	0,0650
	6	0,2027	0,2000	0,0124	0,0602
5	3	0,5410	0,2000	0,0159	0,0496
	4	0,3580	0,2000	0,0159	0,0496
	5	0,2227	0,2000	0,0159	0,0593
	6	0,1633	0,2000	0,0126	0,0643

Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda 6 m/s'lik ortalama rüzgar hızı için en uygun yapı 20 cm kanat boyu, 1,26 cm maksimum kanat kalınlığı ve 6,43 cm ortalama kanat genişliği ile elde edilmiştir. Bu durumda birim enerji maliyeti 0,16 TL/kWh olarak hesaplanmıştır. Tüm rüzgar hızları için optimum yapının 6 kanatlı 5 dişliden oluşan sistem ile sağlandığı tespit edilmiştir.

Günümüzde ticari olarak kullanılan rüzgar enerji dönüşüm sistemlerine ait birim enerji maliyetleri yaklaşık 0,1 TL/kWh olarak kabul edilmektedir. Yukarıda sıralanan tablolardan da görüldüğü üzere mini rüzgar türbini için elde edilen birim enerji maliyeti değeri oldukça yüksektir. Bunun sebebi optimizasyon probleminin çözümünde prototip üretimi sırasında oluşturulan maliyet değeri kullanılmasıdır. Mini rüzgar türbinini oluşturan bileşenlerin seri üretim ile elde edilmesi durumunda türbin

bileşenlerinin üretim maliyetleri ile beraber birim enerji maliyeti de makul seviyelere inecektir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, minimum birim enerji maliyeti, tüm konfigürasyonlarda 20 cm uzunluğundaki kanatlar için elde edilmiştir. Buna karşın kanat kalınlığı ve kanat genişliği tüm opsiyonlar için farklı değerlerde bulunmuştur. Burada elde edilen kalınlık kanat üzerindeki maksimum kalınlık, genişlik ise ortalama genişlik değeridir. Her iki değer de kanat uzunluğunca aerodinamik yapı korunacak şekilde değişmektedir. Ancak elde edilen tüm konfigürasyonlarda kanat hacmi farklıdır.

Tablolardan da açıkça görüldüğü üzere, dişli içerisindeki kanat sayısının değiştirilmesi ile birim enerji maliyeti azaltılabilmektedir. Bunun nedeni kanat sayısının artması ile yakalanan rüzgar miktarının artması ve üretilen enerji miktarının yükselmesidir.

Benzer şekilde aynı kanat yapısında, sistem üzerinde kullanılan dişli sayısının artırılması ile de birim enerji maliyeti azaltılabilmektedir. Dişli sayısı arttırıldıkça türbinin süpürdüğü alan artmakta ve bu durum enerji üretimini pozitif yönde etkilemektedir.

Analizi gerçekleştirilen tüm rüzgar hızı değerleri için minimum birim enerji maliyeti değeri, incelenen türbin konfigürasyonları içerisinde maksimum üretimin gerçekleştirildiği 6 kanatlı, 5 dişliden oluşan yapıda elde edilmiştir.

Kanat boyunun birim enerji maliyeti üzerindeki etkisinin görülebilmesi amacıyla farklı kanat boyları ve ortalama rüzgar hızları için birim enerji maliyetleri de elde edilmiştir. 3 m/s, 4 m/s , 5 m/s ve 6 m/s'lik ortalama rüzgar hızları için elde edilen, farklı kanat boylarına ait birim enerji maliyetleri sırası ile Çizelge 6.8, Çizelge 6.9, Çizelge 6.10 ve Çizelge 6.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.8 3m/s ortalama rüzgar hızı için farklı kanat boylarına ait birim enerji maliyetleri

Dişli Sayısı	Kanat Sayısı	BRM (TL/kWh)				
		20 cm Kanat Uzunluğu	25 cm Kanat Uzunluğu	30 cm Kanat Uzunluğu	35 cm Kanat Uzunluğu	40 cm Kanat Uzunluğu
3	3	7,1599	11,2151	16,1915	22,0942	28,9293
	4	4,7257	7,4092	10,7070	14,6241	19,1664
	5	2,9323	4,6019	6,6565	9,1004	11,9385
	6	2,1457	3,3705	4,8798	6,6776	8,7681
4	3	5,3903	8,4508	12,2118	16,6789	21,8586
	4	3,5619	5,5915	8,0900	11,0630	14,5165
	5	2,2127	3,4782	5,0386	6,8987	9,0634
	6	1,6212	2,5513	3,7003	5,0724	6,6719
5	3	4,3284	6,7922	9,8240	13,4298	17,6162
	4	2,8636	4,5009	6,5199	8,9264	11,7266
	5	1,7812	2,8039	4,0678	5,5777	7,3383
	6	1,3065	2,0598	2,9926	4,1093	5,4142

Çizelge 6.8’de verilen sonuçlar incelendiğinde, minimum enerji maliyetinin tüm kanat boyları için 6 kanatlı 5 dişlinin kullanıldığı sistemlerde elde edildiği görülmektedir. Ayrıca kanat boyu arttıkça birim enerji maliyetinin de artış gösterdiği açıktır.

Çizelge 6.9 4m/s ortalama rüzgar hızı için farklı kanat boylarına ait birim enerji maliyetleri

Dişli Sayısı	Kanat Sayısı	BRM (TL/kWh)				
		20 cm Kanat Uzunluğu	25 cm Kanat Uzunluğu	30 cm Kanat Uzunluğu	35 cm Kanat Uzunluğu	40 cm Kanat Uzunluğu
3	3	3,0207	4,7314	6,8308	9,3210	12,2046
	4	1,9937	3,1258	4,5170	6,1695	8,0858
	5	1,2371	1,9414	2,8082	3,8393	5,0366
	6	0,9051	1,4219	2,0587	2,8171	3,6990
4	3	2,2740	3,5652	5,1519	7,0364	9,2216
	4	1,5026	2,3589	3,4130	4,6672	6,1242
	5	0,9335	1,4674	2,1257	2,9104	3,8236
	6	0,6839	1,0763	1,5611	2,1399	2,8147
5	3	1,8259	2,8655	4,1445	5,6657	7,4318
	4	1,2082	1,8988	2,7506	3,7658	4,9471
	5	0,7515	1,1829	1,7161	2,3531	3,0959
	6	0,5512	0,8690	1,2625	1,7336	2,2841

4 m/s'lik ortalama rüzgar hızı için elde edilen BRM'ler incelendiğinde, beklendiği üzere maliyetlerin rüzgar hızına bağlı olarak azaldığı görülmektedir. En uygun durum yine 20 cm uzunluğundaki 6 kanatlı 5 dişliden oluşan yapı ile sağlanmıştır.

Çizelge 6.10 5m/s ortalama rüzgar hızı için farklı kanat boylarına ait birim enerji maliyetleri

Dişli Sayısı	Kanat Sayısı	BRM (TL/kWh)				
		20 cm Kanat Uzunluğu	25 cm Kanat Uzunluğu	30 cm Kanat Uzunluğu	35 cm Kanat Uzunluğu	40 cm Kanat Uzunluğu
3	3	1,5466	2,4225	3,4974	4,7723	6,2487
	4	1,0207	1,6004	2,3127	3,1588	4,1399
	5	0,6334	0,9940	1,4378	1,9657	2,5787
	6	0,4635	0,7280	1,0540	1,4424	1,8939
4	3	1,1642	1,8254	2,6378	3,6027	4,7215
	4	0,7693	1,2078	1,7474	2,3896	3,1356
	5	0,4780	0,7513	1,0883	1,4901	1,9577
	6	0,3502	0,5511	0,7993	1,0956	1,4411
5	3	0,9350	1,4671	2,1220	2,9008	3,8051
	4	0,6186	0,9722	1,4083	1,9281	2,5329
	5	0,3847	0,6057	0,8787	1,2048	1,5851
	6	0,2822	0,4449	0,6464	0,8876	1,1695

Benzer şekilde, 5 m/s'lik ve 6 m/s'lik ortalama rüzgar hızları için hazırlanan tablolarda verilen sonuçlar analiz edildiğinde, rüzgar hızındaki artışla beraber her bir kanat boyundaki BRM'lerin düştüğü ve optimum çözümlere 20 cm'lik kanat boyunda ulaşıldığı belirlenmiştir.

Çizelge 6.11 6m/s ortalama rüzgar hızı için farklı kanat boylarına ait birim enerji maliyetleri

Dişli Sayısı	Kanat Sayısı	BRM (TL/kWh)				
		20 cm Kanat Uzunluğu	25 cm Kanat Uzunluğu	30 cm Kanat Uzunluğu	35 cm Kanat Uzunluğu	40 cm Kanat Uzunluğu
3	3	0.8949	1.4019	2.0239	2.7618	3.6162
	4	0.5907	0.9262	1.3384	1.8280	2.3958
	5	0.3665	0.5752	0.8321	1.1376	1.4923
	6	0.2682	0.4213	0.6100	0.8347	1.0960
4	3	0.6738	1.0564	1.5265	2.0849	2.7323
	4	0.4453	0.6989	1.0113	1.3829	1.8146
	5	0.2766	0.4348	0.6298	0.8623	1.1329
	6	0.2027	0.3189	0.4625	0.6341	0.8340
5	3	0.5410	0.8490	1.2280	1.6787	2.2020
	4	0.3580	0.5626	0.8150	1.1158	1.4658
	5	0.2227	0.3505	0.5085	0.6972	0.9173
	6	0.1633	0.2575	0.3741	0.5137	0.6768

Kanat boyu değişimlerine bağlı olarak BRM değişimlerinin verildiği tüm tablolar incelendiğinde, kanat boyundaki uzamanın maliyeti arttıran bir etken olduğu görülmektedir. Buna karşın, maliyet yönünden sebep olduğu negatif etkiye rağmen, kanat boyunun uzaması türbinden elde edilecek güç miktarının artmasını sağlamaktadır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen mini rüzgar türbinin farklı rüzgar rejimlerine sahip bölgeler için özel olarak optimize edilebileceğini net olarak ortaya koyabilmek

amacıyla, geliştirilen sistemin 100 W gücündeki bir yükü beslemesi durumu ayrı olarak analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda ortalama 6 m/s'lik ortalama rüzgar hızına sahip bir bölge için ele alınan yükün beslenebilmesi için 20 cm kanat uzunluğunda 4 kanatlı 5 dişli çarkın kullanılması en uygun çözümü sunmaktadır. Bu durumda sistemin toplam süpürme alanı 0,63 m² olmaktadır. Aynı yükün 5 m/s'lik ortalama rüzgar hızına sahip bir bölgede beslenebilmesi için ise sunulan mini rüzgar türbini yapısının 34 cm kanat uzunluğuna sahip 5 kanatlı 3 çarkın kullanılması ile oluşturulması en ekonomik çözümü sunmaktadır. Bu durumda ise mini rüzgar türbinine ait toplam süpürme alanı 1,09 m² olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi rüzgar hızının artışı sistem toplam süpürme alanının da küçülmesine neden olmaktadır. Başka bir deyişle ihtiyaç duyulan güç miktarı bölgesel olarak farklı mini türbin konfigürasyonları ile karşılanabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, prototip imalatı gerçekleştirilen mini rüzgar türbininin farklı ortam şartları ve güç ihtiyaçlarına göre uygulanabilir özellikte olması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, tasarımı gerçekleştirilen sistem ile ihtiyaç duyulan güç miktarına ve kullanılan bölgenin rüzgar rejimine göre farklı optimum çözümler sağlanabilmektedir.

Ortaya konulan bu özellik ile sistemin kullanılacağı noktaya, ihtiyaç duyulan güce ve mevcut rüzgar hızlarına bağlı olarak kolayca boyutlandırılabilceği ve şartlara göre en uygun çözümün sunulabileceği gösterilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde, elektrik enerjisine olan talebin artması, fosil yakıtların tükenmeye başlaması ve temiz enerji elde etme isteği yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi çalışmalarının hız kazanmasına neden olmuştur. Rüzgar enerji sistemleri, hızlı tesis edilebilmesi, büyük güçler üretebilmesi ve teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, elektrik enerjisi üretiminde diğer yenilenebilir kaynakların önünde yer almıştır. Rüzgar enerjisi sistemleri ile ilgili araştırmalar her geçen gün artmakta ve önemli gelişmeler elde edilmektedir.

Ticari olarak kullanılan yüksek güçlü rüzgar türbinleri, kurulum için geniş alanlara ihtiyaç duymaktadırlar. Bu durum, özellikle büyük güçlü türbinlerin kırsal kesimlere tesis edilmesine ve türbin üzerinden elde edilen enerjinin iletim hatları üzerinden tüketicilere ulaştırılmasına neden olmaktadır. Elektrik enerjisi üretiminin tüketim noktalarına göre uzakta kurulması, iletim hatlarında meydana gelen kayıpları arttırdığı gibi, enerji iletim hatlarının inşa masrafları ile birlikte üretilen enerjinin maliyetini de yükseltmektedir.

Bu tez çalışmasında, kentsel bölgelerde kullanıma uygun ve binaların üzerine tesis edilebilecek yeni bir mini rüzgar türbin konsepti ortaya konulmuştur. Geliştirilen yapı ile şehirlerde atıl durumda bulunan rüzgar enerjisi potansiyelinin kullanılabilmesi ve tüketicilerin elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasında bu potansiyelden yararlanılması hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda mini rüzgar türbini konseptinin tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan sistem ile türbin kanatları üzerine geçirilmiş dişli çarkların bir arada kullanılması esasına dayalı olarak elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirmektedir. Sistem üzerinde kullanılan kanat sayısı türbinin kullanılacağı rüzgar rejimine bağlı olarak değiştirilebilmektedir. Tasarlanan türbinin 3, 4, 5 ve 6 kanatlı olarak kullanılabilir olması sağlanmıştır.

Prototip imalatı gerçekleştirilen sistem, kanatlar üzerine geçirilmiş dişli çarklardan oluşmaktadır. Türbin üzerinde kullanılan dişli sayısı artırılıp azaltılabilmektedir. Böylece türbinin yüzey alanı genişletilmekte ve türbin üzerinden sağlanacak mekaniksel güç arttırılabilmektedir.

Türbin üzerinde kanatların bir arada tutulup generatör miline bağlanmalarını sağlayan göbek farklı kanat sayıları için ayrı ayrı üretilmiştir. Göbek kapağı ile mekaniksel olarak kanatlar sabitlenmektedir.

Mini rüzgar türbininde kullanılabilecek olan en uygun generatör yapısı laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testler sonucunda belirlenmiştir. Yapılan testler sonucunda göz önüne alınan generatörler arasından 650 W gücündeki 700 rpm nominal devire sahip sabit mıknatıslı DC generatörün, mini rüzgar türbini yapısı için en ideal generatör olduğu tespit edilmiştir.

Modelleme ve tasarım çalışmaları sonrasında mini rüzgar türbinini oluşturan her bir bileşenin imalatı gerçekleştirilmiştir. Türbine ait kanatlar, günümüzde ticari türbinlerin kanatlarının da üretiminde kullanılan fiberglas katkıli kompozit malzemeden yapılmıştır. Dişli üretiminde, sistem üzerindeki ağırlığın azaltılması amacıyla polietilen malzeme kullanılmıştır. Türbin üzerinde istenilen sayıda kanadın bir arada tutulmasını sağlayan göbek ile kapağı ise dayanımı yüksek ve hafif bir metal olan alüminyum kullanılarak üretilmiştir.

Tasarım ve imalat aşamalarının sonunda mini rüzgar türbinine ait prototip üretimi tamamlanmıştır. Gerçeklenen prototip üzerinde farklı kanat ve dişli sayıları için türbine ait performans analizleri yapılmıştır. Hayata geçirilen sistem 3, 4, 5 ve 6 kanatlı yapılarda tek dişli, iki dişli ve üç dişli olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, sistem üzerinde kullanılan kanat sayısının arttırılması ile türbinden elde edilen mekanik gücün arttığı görülmüştür. Benzer şekilde türbinde kullanılan dişli

sayısının arttırılmasının da mekanik gücü arttırdığı belirlenmiştir. Geliştirilen prototip üzerinde yapılan analizler sonucunda, sistemdeki yüksek performansın 6 kanatlı üç dişliden oluşan türbin yapısı ile elde edildiği görülmüştür.

Mini rüzgar türbini üzerinde elektriksel çıkış gücünün generatöre bağlanacak dişli kutusu ile arttırılabileceği yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Bu durumda dişli kutusu, generatöre aktarılabilecek momenti azaltacaktır, başka bir deyişle generatörün belirli bir rüzgar hızında tahriki için türbin üzerinden daha yüksek bir tork değerine ihtiyaç duyulacaktır. Bu durumda mini rüzgar türbini üzerinde daha uzun kanatlar kullanılabileceği gibi, türbin üzerinde bulunan dişli sayısı arttırılarak da üretilecek olan mekaniksel tork değeri istenilen düzeye çıkarılabilecektir. Böylece sistemin kullanılacağı bölgeye özel olarak tasarlanıp optimize edilebileceği de ortaya konulmuştur.

Prototip çalışması üzerinden alınan veriler kullanılarak mini rüzgar türbinine ait kanat boyulandırmasına dayalı optimizasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Optimizasyon çalışmaları iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak sistemin birim enerji maliyeti minimum olacak şekilde, her bir türbin konfigürasyonuna ait kanat boyutları elde edilmiştir. İkinci aşamada ise farklı kanat uzunlukları için türbinden elde edilecek elektrik enerjisine ait birim enerji maliyeti minimize edilmiştir.

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarının ilk aşamasında elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Minimum birim enerji maliyeti tüm konfigürasyonlarda 20cm uzunluğundaki kanatlar ile elde edilmiştir. Buna karşın kanat kalınlığı ve kanat genişliği tüm opsiyonlar için farklı değerlerde bulunmuştur.
- Dişli içerisindeki kanat sayısının değiştirilmesi ile birim enerji maliyetinin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni kanat sayısının artması ile yakalanan rüzgar miktarının artması ve üretilen enerji miktarının yükselmesidir.
- Aynı kanat yapısında sistem üzerinde kullanılan dişli sayısının arttırılması ile birim enerji maliyeti azalmaktadır. Dişli sayısı arttırıldıkça türbinin süpürdüğü alan artmakta ve enerji üretimi yükseltmektedir.

Optimizasyon çalışmalarının ikinci aşamasında,

- Kanat boyunun artmasının maliyetin artmasına neden olduğu, buna karşın güç üretimini arttırdığı,
- Mini rüzgar türbinine ait farklı konfigürasyonlar için birim enerji maliyetlerinin birbirine oldukça yakın değerlerde olduğu,
- Herhangi bir noktaya kurulacak olan mini rüzgar türbini konfigürasyonunun seçiminde birim enerji maliyetinin ve ihtiyaç duyulan güç seviyesinin göz önüne alınması gerektiği,

belirlenmiştir.

Elde edilen deneysel sonuçlar ve yapılan analizler neticesinde, tasarımı gerçekleştirilen sistemin farklı bölgeler için ayrı ayrı optimize edilebileceği ve bölgeye özel yapıların geliştirilebileceği gösterilmiştir.

Tez kapsamında geliştirilen sistem modülerdir ve türbini oluşturan bileşenler oldukça basit yapıdadır. Bu durum sistem bileşenlerinin üretim safhasını da kolaylaştırmaktadır. Geliştirilen mini rüzgar türbinine ait tüm bileşenler ülkemizin öz kaynakları ile üretilmektedir. Bu sistemin kullanılması ve yaygınlaştırılması ile ülkemizin elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasına önemli katkılar sağlanabilecektir.

Bu tez çalışması çalışmasında, yerleşimin yoğun olduğu kentsel bölgelerde kullanılabilecek modüler yapıda bir mini rüzgar türbininin tasarımı, prototip üretimi ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Üretilen sistem geliştirilmeye açıktır. İleride yapılacak çalışmalar ile önerilen sisteme rüzgar yönüne göre hareket kabiliyeti sağlayacak yapılar ve kontrol algoritmaları geliştirilmesi önemli bir noktadır. Ayrıca, tez çalışmasında elde edilen veri sonuçlar kullanılarak, sistem üzerinde daha verimli çalışabilecek generatör yapılarının tasarımı da gelecek çalışma konuları arasında yer almaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Ameku, K., Nagai, B. M. ve Roy, J. N., (2008). "Design of A 3 KW Wind Turbine Generator with Thin Airfoil Blades", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32:1723–1730.
- [2] Kosasih, B. ve Tondelli, A., (2012). "Experimental Study of Shrouded Micro-Wind Turbine", *Procedia Engineering*, 49:92-98.
- [3] Chen, T.Y., Liao, Y.T. ve Cheng C. C., (2012). "Development of Small Wind Turbines for Moving Vehicles: Effects of Flanged Diffusers on Rotor Performance", 42: 136-142.
- [4] Singh, R. K. ve Ahmed, M. R., (2013). "Blade Design and Performance Testing of A Small Wind Turbine Rotor for Low Wind Speed Applications", *Renewable Energy*, 50:812-819.
- [5] Chong, W.T., Pan, K.C., Poh, S.C., Fazlizan, A., Oon, C.S., Badarudin, A. ve Nik-Ghazali, N., (2013). "Performance Investigation of A Power Augmented Vertical Axis Wind Turbine for Urban High-Rise Application", *Renewable Energy*, 51:388-397.
- [6] Ali, A., Goldeb, S., Alama, F. ve Moria, H., (2012). "Experimental and Computational Study of a Micro Vertical Axis Wind Turbine", *Procedia Engineering*, 49:254-262.
- [7] Abrahamsen, A. B., Mijatovic, N., Seiler, E., Sørensen, M. P., Koch, M., Nørgård, P. B., Pedersen, N. F., Træholt, C., Andersen, N. H. ve Østergård, J., (2009). "Design Study of 10 kW Superconducting Generator for Wind Turbine Applications", *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, 19:1678-1682.
- [8] Tang, X., Liu, X., Sedaghat, A. ve Shark L., (2009). "Rotor Design and Analysis of Stall-regulated Horizontal Axis Wind Turbine", *Universities Power Engineering Conference (UPEC 2009)*, 1-4 Sept. 2009, Glasgow.
- [9] Sun, W., Wei, Y.F. ve Luan S., (2010). "The Design And Research Of Large-Scale Wind Turbine Blades Automatic Generation System", *International Conference*

on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), 20-22 Aug. 2010, China.

- [10] Arakawa C.; Ariga S. ve Lida M., (2002). "Proposal of Vernacular Design for Wind Turbine", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90:1731-1741.
- [11] Collier, D.A.F. ve Heldwein, M.L., (2011). "Modeling and Design of A Micro Wind Energy System With A Variable-Speed Wind Turbine Connected to A Permanent Magnet Synchronous Generator and A PWM Rectifier", *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP 2011)*, 11-15 Sept. 2011, Brazilian.
- [12] Howell, R., Qin, N., Edwards, J. ve Durrani, N., (2010). "Wind Tunnel and Numerical Study of A Small Vertical Axis Wind Turbine", *Renewable Energy*, 35:412-422.
- [13] B. M. Nagai, B. M., Ameku K. ve Roy J. N., (2009)., "Performance of A 3 kW Wind Turbine Generator with Variable Pitch Control System", *Applied Energy*, 86:1774-1782.
- [14] Lavassas, I., Nikolaidis, G., Zervas, P., Efthimiou, E., Doudoumis, I.N. ve Baniotopoulos, C.C., (2003). "Analysis and Design of The Prototype of A Steel 1-MW Wind Turbine Tower", *Engineering Structures*, 25:1097-1106.
- [15] Zhang, J., Zhou, Z. ve Lei, Y., (2009). "Design and Research of High-Performance Low-Speed Wind Turbine Blades", *World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference (WNWEC 2009)*, 24-26 Sept. 2009, China.
- [16] Sharma, R.N. ve Madawalab, U.K., (2012). "The Concept of A Smart Wind Turbine System", *Renewable Energy*, 39:403-410.
- [17] Park, J., Kim, J., Shin, Y., Lee, J. ve Park, J., (2010). "3 MW Class Offshore Wind Turbine Development", *Current Applied Physics*, 10:307-310.
- [18] Jugsujindaa, S., Jugsujindab, P. ve Seetawan T., (2012). "The Derivation of Efficiency Equation of the Prototype of Pico Wind Turbine Produces the Electricity", *Procedia Engineering*, 32:994-999.
- [19] Campbell, J. ve Santoso, S., (2009). "Design and Performance of a Scaled Electromechanical Wind Turbine Power Train Model", *Power & Energy Society General Meeting (PES'09)*, 26-30 July 2009, Kanada.
- [20] Fuglsang P. ve Madsen H.A., (1999). "Optimization method for wind turbine rotors", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 80: 191-206.
- [21] Benini E. ve Toffolo A., (2002). "Optimal Design of Horizontal-Axis Wind Turbines Using Blade-Element Theory and Evolutionary Computation", *Journal of Solar Energy Engineering*, 124:357-363.

- [22] Uys P.E., Farkas J., J'armai K. ve van Tonder F., (2007). "Optimisation of a steel tower for a wind turbine structure", *Engineering Structures*, 29:1337–1342.
- [23] Liao C.C., Zhao X.L. ve Xu J.Z., (2012). "Blade layers optimization of wind turbines using FAST and improved PSO Algorithm", *Renewable Energy*, 42:227-233.
- [24] Jureczko M., Pawlak M. ve Mezyk A., (2005). "Optimisation of wind turbine blades", *Journal of Materials Processing Technology*, 167:463–471
- [25] Solero L., Caricchi F., Crescimbeni F. ve Falchetta M., (2001). "Direct-drive wind generator pilot plant for stand-alone units in extremely cold climates" *Int J REE*, 3(2):326–329.
- [26] Malayappan S., Sivakumar M., Neethimanickam I. ve Venkatachalam G., (2003). "Design of wind turbine blade and an analysis of wind turbine tower using finite element analysis" *Windpro J*, 68:31–39.
- [27] Griffin D.A. ve Zuteck M.D., (2001). "Scaling of composite wind turbine blades for rotors of 80 to 120 meter diameter", *J Sol Energy Eng*, 123:310–317.
- [28] Lin P.H., Lin H.H., Oswald F.B. ve Townsend D.P., (2002). "Using dynamic analysis for compact gear design", *JMech Des*, 124:91–96.
- [29] Verheij F.J., (1988). "Development of a gust model for the design of large wind turbines", *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 27:89–102.
- [30] Justin D.K. ve Gehan A.J., (2008). " Evaluation of small wind turbines in distributed arrangement as sustainable wind energy option for Barbados", *Energy Conversion and Management*, 49:1652–1661.
- [31] Simic Z., Havelka J. G. ve Vrhovcak M. B., (2013). "Small wind turbines e A unique segment of the wind power market ", *Renewable Energy*, 50:1027-1036.
- [32] Akwa J. V., Vielmo H. A. ve Petry A. P., (2012). " A review on the performance of Savonius wind turbines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16:3054– 3064.
- [33] Glass A. ve Levermore G., (2011). " Micro wind turbine performance under real weather conditions in urban environment ", *Building Serv. Eng. Res. Technol.* 32(3):245–262.
- [34] Bahaj A.S., Myers L. ve James P.A.B., (2007). " Urban energy generation: Influence of micro-wind turbine output on electricity consumption in buildings", *Energy and Buildings*, 39:154–165.
- [35] Peacock A.D., Jenkins D., Ahadzi M., Berry A. ve Turan S., (2008). " Micro wind turbines in the UK domestic sector ", *Energy and Buildings*, 40:1324–1333.

- [36] Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği 2012 yılı ara raporu, <http://www.wwindea.org/>, 2012.
- [37] Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği 2011 yılı raporu, <http://www.ewea.org/>, 2011.
- [38] Erduman A., Kekezoglu B., Durusu A.ve Tanrıöven M., (2011). “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından 500 Kw’a Kadar Lisanssız Enerji Üretimi Ve Fizibilite Analizi”, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Sempozyumu (FEEB 2011), 122-126, 5-7 Ekim 2011, Elazığ, Türkiye.
- [39] Kreith F. ve Goswami D. Y., (2007). Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, Taylor&Francis Group LLC.
- [40] Patel M. R., (2006). Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis and Operation, Taylor&Francis Group LLC.
- [41] Bozkurt A. (2012). Şebekeye Paralel Bağlı Rüzgar Elektrik Santrallerinde Nonlineer Yüklenmenin Ve Açma-Kapama Olaylarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42] Özgür, M.A. (2002). Kütahya’da Seçilen Bir Konumda Rüzgar Verileriyle Elektrik Enerjisi Üretim Potansiyelinin Bulunması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [43] Gilbert, M.M., (2004). Renewable and Efficient Electric Power Systems, John Wiley & Sons, United States of America.
- [44] Manwell, J.F., McGowan, J.G. ve Rogers, A.L., (2009). Wind Energy Explained Theory, Design And Application, Second Edition, John Wiley & Sons, United Kingdom.
- [45] Ackermann, T., (2005). Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, England.
- [46] Hau E., (2006). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Applications, Economics, Springer.
- [47] Wen J., Zheng Y. ve Donghan F., (2009). “A review on reliability assessment for wind power”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13.2485-2494.
- [48] Akdağ S. A. ve Güler Ö., (2008). “Weibull Dağılım Parametrelerini Belirleme Metodlarının Karşılaştırılması”, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES’2008 17-19 Aralık 2008, İstanbul
- [49] Kekezoğlu B., Erduman A., Durusu A., Nakir İ. ve Tanrıöven M., (2011). “Reliability Assessment Of Wind Energy System Considering Turbine Dimensions”, 10th International Conference on Sustainable Energy Technologies (SET2011), 4-7 September, Istanbul, Turkey.
- [50] Mathew S., (2009), Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics., John Wiley & Sons, England.

- [51] Manwell J. F., McGowan J. G. ve Rogers A. L., (2009), Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons, England.
- [52] Craddock D., (2008), Renewable Energy Made Easy: Free Energy from Solar, Wind, Hydropower, and Other Alternative Energy Sources, Atlantic Publishing Company, USA.

NREL S833 KANAT PROFİLİ

TABLE II.- S833 AIRFOIL COORDINATES

Upper Surface		Lower Surface	
x/c	y/c	x/c	y/c
0.00014	0.00190	0.00001	-0.00039
.00080	.00413	.00027	-.00284
.00134	.00533	.00051	-.00405
.00192	.00645	.00516	-.01488
.00863	.01509	.01423	-.02612
.02100	.02526	.02762	-.03732
.03816	.03549	.04509	-.04794
.05981	.04544	.06670	-.05772
.08580	.05491	.09216	-.06635
.11583	.06370	.12149	-.07365
.14969	.07168	.15434	-.07944
.18700	.07875	.19065	-.08363
.22744	.08480	.23002	-.08613
.27056	.08979	.27228	-.08696
.31595	.09364	.31695	-.08611
.36309	.09632	.36379	-.08365
.41151	.09778	.41225	-.07967
.46067	.09798	.46198	-.07426
.51005	.09685	.51236	-.06755
.55925	.09430	.56300	-.05952
.60790	.09049	.61351	-.05025
.65539	.08546	.66384	-.03971
.70140	.07919	.71399	-.02876
.74562	.07192	.76337	-.01823
.78759	.06394	.81124	-.00889
.82683	.05549	.85669	-.00152
.86284	.04678	.89844	.00302
.89510	.03796	.93446	.00453
.92323	.02883	.96316	.00388
.94764	.01954	.98373	.00224
.96844	.01109	.99596	.00068
.98502	.00465	1.00000	.00000
.99606	.00100		
1.00000	.00000		

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Bedri KEKEZOĞLU

Doğum Tarihi ve Yeri : 16.04.1982 Kadıköy/İSTANBUL

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : bkekez@yildiz.edu.tr / kekezoglu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektirik Tesisleri	Yıldız Teknik Üniversitesi	2007
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2005	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Uluslararası ve Ulusal Bildiriler

1. B. Kekezoğlu, A. Erduman, A. Durusu, İ. Nakir, M. Tanrıöven, “Reliability Assessment Of Wind Energy System Considering Turbine Dimensions”, 10th International Conference on Sustainable Energy Technologies (SET2011), 4-7 September, Istanbul, Turkey, 2011.

2. A. Erduman, B. Kekezoglu, A. Durusu, M.Tanrıöven, “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından 500 Kw’a Kadar Lisanssız Enerji Üretimi Ve Fizibilite Analizi”, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Sempozyumu (FEEB 2011), 122-126 , 5-7 Ekim, Elazığ, Türkiye, 2011.

PROJE

1. “Mini Rüzgar Türbininin Optimal Tasarımı, Gerçeklenmesi ve Performans İyileştirmesi”, 29-04-02-KAP01 nolu BAPK projesi, Proje Yürütücüsü Prof. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN, 2010-2012.