



**META-SEZGİSEL METOTLAR İLE RÜZGÂR TÜRİNİ SİSTEMLERİNİN
TASARIM OPTİMİZASYONU**

OZAN KARAHA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
Doç. Dr. Ulaş EMİNOĞLU
Ocak - 2018
Her hakkı saklıdır

**T.C.
GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**META-SEZGİSEL METOTLAR İLE RÜZGÂR TÜRBİNİ SİSTEMLERİNİN
TASARIM OPTİMİZASYONU**

OZAN KARAHAHAN

TOKAT
Ocak - 2018

Her hakkı saklıdır



Bu tez çalışması;

**Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından
114E961 nolu proje ile desteklenmiştir.**

Ozan Karahan tarafından hazırlanan “**Meta-Sezgisel Metotlar ile Rüzgâr Türbini Sistemlerinin Tasarım Optimizasyonu**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 4 OCAK 2018 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Üye

Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

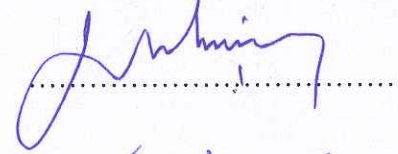
Danışman

Doç. Dr. Ulaş EMİNOĞLU
Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Üye

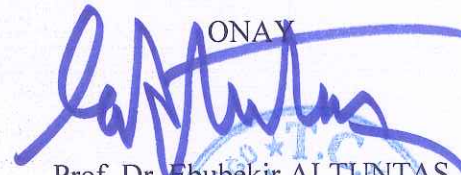
Yrd. Doç. Dr. Kenan ZENGİN
Gaziosmanpaşa Üniversitesi

İmza



ÖĞÜT
ENSTİTÜ

ZİYA
ÜNİVERSİTESİ



Prof. Dr. Ebubekir ALTUNTAŞ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

...11.../01.../2018



TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

OZAN KARAHAHAN

4 Ocak 2018

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

META-SEZGİSEL METOTLAR İLE RÜZGÂR TÜRBİNİ SİSTEMLERİNİN TASARIM OPTİMİZASYONU

OZAN KARAHAN

GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ULAŞ EMİNOĞLU)

Bu tezde, Rüzgâr Türbinlerinin (RT) kurulacağı bölgenin rakım, ortalama sıcaklık, yıllık ortalama rüzgâr hızı, hızdaki standart sapma değeri gibi coğrafik özellikler ve rüzgâr potansiyeli kullanılarak en düşük maliyette ve en yüksek oranda enerji üretimi için rüzgâr türbinlerinin tasarımının gerçekleştirilebileceği Rüzgâr Türbini Sistemleri Analiz ve Tasarım Optimizasyonu Paketi (RTAOP) geliştirilmiştir. Paketin tasarım bölümünde bölgenin rüzgâr enerjisinden en düşük maliyette ve en yüksek verimde elektrik enerjisi üretimi için sistem elemanlarından rotor yarıçapı, jeneratör gücü, kule yüksekliği, kanat sayısı, rotor devir sayısı, maksimum rotor verimliliği için kanat uç hızı oranının en uygun değeri belirlenmektedir. Pakette ek olarak tasarım sonuçlarına (nominal güç ve nominal rüzgâr hızı) göre pratikte kullanılan RT'ler önerilmektedir. Geliştirilen paketin analiz bölümünde ise, bölgenin coğrafik büyüklükleri ve kurulu veya kurulması amaçlanan bir türbin sistemi için tasarım büyüklükleri girilerek türbin sistemi için toplam maliyet, yıllık enerji üretim miktarı, yıllık ortalama türbin gücü, birim enerji üretim maliyeti ve türbin kapasite faktörü, bölgenin ortalama güç yoğunluğu gibi üretilen güç ve maliyet büyüklüklerini analiz edilebilmektedir. En düşük birim enerji maliyeti için optimizasyonda metasezgisel yaklaşımlardan Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılmıştır. Arayüz C# programlama dili kullanılarak oluşturulmuştur. Rüzgâr türbinleri için gerçekleştirilen analiz ve tasarım problemleri herhangi bir programlama bilgisi olmadan çalıştırılabilmektedir.

2018, 71 SAYFA

ANAHTAR KELİMELELER: Grafiksel Kullanıcı Arayüzü, Meta-Sezgisel Metotlar, Rüzgâr Türbinleri, Tasarım Optimizasyonu

ABSTRACT

MASTER THESIS

DESIGN OPTIMIZATION OF WIND TURBINE SYSTEMS WITH META HEURISTIC METHODS

OZAN KARAHAN

**GAZIOSMANPASA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ULAŞ EMİNOĞLU

In this thesis, Wind Turbine Systems Analysis and Design Optimization Package (WTSADOP) is being developed using the geographical features and wind potential such as altitude, average temperature, annual average wind speed, standard deviation value of speed in the area where Wind Turbine (WT) will be installed, and the design of wind turbines for highest energy production at the lowest cost. In the design section of the package, the optimum value of the rotor radius, generator power, tower height, number of blades, number of rotors, rotor blade speed ratio for maximum rotor efficiency is determined from the system elements for the lowest cost of wind energy and highest efficiency electric energy production. In addition to the padding, practical RTs are recommended according to design results (nominal power and nominal wind speed). In the analysis section of the developed package, the generated power and cost magnitudes such as total cost for turbine system, annual energy production amount, annual average turbine power, unit energy production cost and turbine capacity factor, average power density of the region can be analyzed by entering the geographical size of the region and design sizes for a turbine system intended to be installed or installed. For the lowest unit energy cost, Particle Swarm Optimization (PSO) and Differential Evaluation Algorithm (DGA) were used in meta-heuristic approaches in optimization. The interface was created using C # programming language. Analysis and design problems for wind turbines can be run without any programming knowledge.

2018, 71 SAYFA

KEYWORDS: Graphical User Interface, Meta-Heuristic Methods, Wind Turbine, Design Optimization

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde tez danışmanım Doç. Dr. Ulaş EMİNOĞLU'na çalışmanın önerisinde bulunduğu, zaman gözetmeksizin yardımcı olduğu ve sonuçların karşılaştırılması esnasında katkıda bulunduğu için çok teşekkür ederim. Çalışma esnasında teknik bilgi kazanmamı sağlayan eğitimimi sürdürdüğüm Gaziosmanpaşa Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü hocalarına teşekkürü bir borç bilirim. Proje süresince Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na ("3001 Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı" kapsamında 114E961 numaralı ve "Rüzgâr Türbini Sistemleri Analiz Ve Tasarım Optimizasyonu Paket (RTAOP) Programının Geliştirilmesi") katkılarından dolayı teşekkür ederim. Son olarak hayatım süresince beni hiç yalnız bırakmıyan canım aileme teşekkür ederim.

OZAN KARAHAN

4 Ocak 2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	8
3.1 RT'lerin Yapısı ve Elemanları	8
3.2 RT'lerde Güç ve Enerji Hesabı	10
3.3 RT Çeşitleri	15
3.4 Rüzgâr Türbinlerinde Çıkış Gücünün Modellenmesi.....	18
3.4.1 Değişken hızlı RT'lerde çıkış gücünün modellenmesi.....	18
3.4.2 Sabit Hızlı RT'lerde Çıkış Gücünün Modellenmesi	22
3.4.3 Tasarım Parametrelerinin Modellenmesi	25
3.5 Rüzgâr Türbinlerinin Tasarım Optimizasyonu	28
3.5.1 Tasarım optimizasyonu	28
3.5.2 Değişken Hızlı RT'lerin Tasarım Optimizasyonu.....	29
3.5.3 Farklı bölgeler için değişken-hızlı rüzgâr türbinlerinin tasarımı.....	38
3.5.4 Sabit Hızlı RT'lerin Tasarım Optimizasyonu.....	44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	49
4.1. C# Programlama Dilinde Arayüz Tasarımı.....	49
4.2. Rüzgâr Türbini Sistemleri Analiz ve Tasarım Optimizasyonu Paket (RTAOP) Programının Geliştirilmesi.....	54
4.2.1. RTAOP Paketinin Geliştirilmesi	55
4.2.2. RTAOP Geçerliliğinin Test Edilmesi.....	60
5. SONUÇ	66
6. KAYNAKLAR	68
7. ÖZGEÇMİŞ	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
A	Rotor süpürme alanı
C	Ölçekleme parametresi
c1	Öğrenme faktörü
c2	Öğrenme faktörü
$C_p(\lambda, v)$	Güç katsayısı
$C_{p,eq}$	Sabit eşdeğer güç katsayısı
C_{p-max}	Sabit maksimum rotor verimliliği
CR	Çaprazlama oranı
D	Parametre sayısı
itermax	Mmaksimum iterasyon sayısı
k	Şekil parametresi
Kf	Kapasite faktörü
NP	Popülasyon büyüklüğü
Pn	Nominal güç
Po	Ortalama güç
R	Rotor yarıçapı
un_max	Maksimum nominal rüzgâr hızı
un_min	Minimum nominal rüzgâr hızı
uo	Ortalama rüzgâr hızı
λ	Kanat uç hızı oranı
λ_{max}	Maksimum kanat uç hızı oranı
λ_{min}	Minimum kanat uç hızı oranı
λ_{opt}	Optimum kanat uç hızı oranı
ρ	Havanın yoğunluğu
σ	Hızdaki standart sapma değeri

Kısaltmalar	Açıklama
BEM	Birim Enerji Maliyeti
BSM	Başlangıç Sermaye Maliyeti

ÇBAG	Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DERT	Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini
KF	Kapasite Faktörü
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
RMSE	Karekök Ortalama Hata
RSAG	Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
RSSG	Rotoru Sargılı Senkron Generatör
RT	Rüzgâr Türbini
SKAG	Sincap Kafesli Asenkron Generatör
SMSG	Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör
SÜO	Sabit Ücret Oranı
YERT	Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini
YEÜ	Yıllık Enerji Üretimi
YFG	Yıllık Faaliyet Giderleri

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1	RT elemanları ve yerleşimi 9
Şekil 3.2	SKAG tipi sabit-hızlı bir RT'nin şebeke bağlantısı 16
Şekil 3.3	SMSG tipi değişken hızlı bir RT'nin şebeke bağlantısı 17
Şekil 3.4	RSAG'nün şebeke bağlantısı 17
Şekil 3.5	RSSG'nün şebeke bağlantısı 18
Şekil 3.6	Farklı değişken-hızlı RT'ler için modellere ait RMSE değerleri 22
Şekil 3.7	1500 KW'lık sabit-hızlı RT için rotor verimliliğinin değişimi 25
Şekil 3.8	Pratikte kullanılan RT'ler için kule yüksekliğinin rotor yarıçapına göre değişimi 26
Şekil 3.9	Pratikte kullanılan RT'ler için rotor yarıçapının nominal gücüne göre değişimi 27
Şekil 3.10	Pratikte kullanılan değişik güçteki RT'ler için nominal rüzgâr hızı değerinde rotor verimliliğinin değerleri 28
Şekil 3.11	Güney Avrupa bölgesi için yapılan tasarım optimizasyonunda tasarım parametrelerinin en uygun değerinin iterasyon sayısına göre değişimi (—DGA, — PSO, —GA, —YAK) 42
Şekil 3.12	Algoritmalar için amaç fonksiyonunun en uygun değerinin iterasyon sayısına göre değişimi (—DGA, — PSO, —GA, —YAK) 42
Şekil 3.13	Metotlar için hesaplama sürelerinin optimizasyon parametrelerine göre değişimi 43
Şekil 3.14	Algoritmalar için amaç fonksiyonunun en uygun değerinin iterasyon sayısına göre değişimi 48
Şekil 4.1	Windows formu Form1.cs dosyası 50
Şekil 4.2	NET derleme ve çalıştırma sistemi 51
Şekil 4.3	Microsoft visual C# 2010 başlama sayfası 51
Şekil 4.4	Yeni proje dosyası açma ekranı 52
Şekil 4.5	Windows formu dosyalama kısmı (Solution explorer) 52
Şekil 4.6	Windows formu form1.cs Design dosyası 52
Şekil 4.7	Form ile toolbox ekranı 53
Şekil 4.8	Geliştirilen RTAOP arayüzü ana penceresi 56
Şekil 4.9	Değişken hızlı RT'ler için giriş parametreleri ve üretilen güç, enerji ve maliyet analiz sonuçlarının elde edilmesi 56
Şekil 4.10	Load ve save data butonu ile giriş değerlerinin yükleme ve kaydetme ekranı 58
Şekil 4.11	Değişken hızlı RT'ler için tavsiye edilen türbünler 58
Şekil 4.12	RTAOP sınıf görünümü 59
Şekil 4.13	Değişken hızlı $h=50$ m de $k=2$ ve $c=8.5 \text{ m s}^{-1}$ için tasarlanan RT'lerin DGA ile çözülmesi 61
Şekil 4.14	Değişken hızlı $h=50$ m de $k=2$ ve $c=8.5 \text{ m.s}^{-1}$ için tasarlanan RT'lerin PSO ile çözülmesi 62
Şekil 4.15	Değişken hızlı $h=30$ m de $k=1.2$ ve $c=8 \text{ m s}^{-1}$ için tasarlanan RT'lerin DGA ile çözülmesi 63
Şekil 4.16	Sabit hızlı $k = 2$, $c = 6 \text{ m.s}^{-1}$, $h_0 = 30$ m ve $\alpha=0.12$ değerleri için DGA ile çözülmesi ($P=660\text{kW}$) 64

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 RT'ler için güç eğrisi modelleri.....	21
Çizelge 3.2 Modeller için ortalama RMSE değerleri ve standart sapma.....	22
Çizelge 3.3 Eşitlik 3.20-22 ile verilen model parametrelerine ilişkin katsayılar.....	24
Çizelge 3.4 Değişken-hızlı RT'ler için tasarım parametreleri, sınırlar ve değişim aralıkları.....	38
Çizelge 3.5 $h=30$ m de $k=1.2$ ve $c=8$ m/sn için tasarlanan RT'lerin tasarım büyüklükleri, enerji ve maliyet.....	40
Çizelge 3.6 $h=50$ m de $k=2$ ve $c=8.5$ m/sn için tasarlanan RT'lerin tasarım büyüklükleri, enerji ve maliyet değerleri.....	41
Çizelge 3.7 Sabit-hızlı RT'ler için tasarım parametreleri, sınırlar ve değişim aralıkları.....	47
Çizelge 3.8 $k = 2$, $c = 6 \text{ m.s}^{-1}$, $h_o = 30$ m ve $\alpha=0.12$ değerleri için optimizasyon sonuçları ve kurulu RT parametreleri.....	48
Çizelge 4.1 $h=50$ m de $k=2$ ve $c=8.5$ m/sn için tasarlanan RT'lerin tasarım büyüklükleri, enerji ve maliyeti.....	62
Çizelge 4.2 $h=30$ m de $k=1.2$ ve $c=8$ m/sn için tasarlanan RT'lerin tasarım büyüklükleri, enerji ve maliyeti.....	63
Çizelge 4.3 $k = 2$, $c = 6 \text{ m.s}^{-1}$, $h_o = 30$ m ve $\alpha=0.12$ değerleri için optimizasyon sonuçları ve kurulu RT parametreleri.....	65

1. GİRİŞ

Günümüzde karşı karşıya bulunduğumuz çevre sorunlarının çözümü ve enerji ihtiyaçlarının sürekli olarak karşılanabilmesi için uzun vadeli ve güvenilir kalkınma planlarının yapılması gerekmektedir. Bu açıdan bakıldığında, temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları en etkili ve en verimli çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Yenilenebilir, temiz, ucuz bir enerji olan rüzgâr enerjisi de bu yeni enerji kaynaklarına bir örnektir. Rüzgâr enerjisi çağdaş ülkelerin gündemine 1980’li yıllarda girmiş ve hızla önemini arttırmıştır. Fosil enerji kaynaklarına göre en önemli avantajı bitmeyen bir enerji kaynağı olmasıdır. Bunun yanı sıra diğer önemli avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Hau, 2005).

- Temiz ve ucuz enerji kaynaklarının en başında gelmektedir.
- Ulusal enerji olarak tamamen dış enerjiden bağımsızdır.
- Rüzgâr türbinin kurulduğu alan diğer amaçlar (tarım, ormancılık vs.) içinde kullanılabilir.
- Atmosfere sera gazı salınımı yapmaz.
- Teknolojiye bağlı olarak gün geçtikçe normal enerji kaynaklarından daha ucuz hale gelmektedir.

Dünya üzerinde rüzgâr enerjisi kullanımı hızla artarken, birçok ülke kara üzerine kurduğu türbinler sayesinde elde ettiği bu alternatif enerji kaynağını denizler üzerine de türbinler kurarak daha da yaygınlaştırmaya çalışmaktadır. Dünya Rüzgâr Enerjileri Birliği’ne (WWEA) göre Çin dünyadaki en büyük rüzgâr enerjisi pazarına sahip ülke olup yaklaşık 168 gigawatt’lık enerji kapasitesine sahiptir. Bunu ABD 82 GW ile ve Almanya ise 50 GW ile takip etmektedir. Dünyada Rüzgâr Türbini (RT) santrallerinin toplam kurulu gücü 2016 yılının sonunda yaklaşık 500 GW seviyesine yükselmiş olup yapılan devlet teşvikleri ile bu kapasite hızla artmaktadır. Ülkemizde rüzgâr potansiyelleri incelendiğinde Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz bölgelerinin yüksek potansiyele sahip

olduğu görülmektedir. Yapılan devlet teşvikleri ile 2016 yılı sonucunda RT toplam kurulu gücü 5.7 GW'nin üzerine çıkmıştır (Anonim, 2017a).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi; fosil yakıtların meydana getirdiği çevre kirliliği gibi etmenlerin olmadığı temiz bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr türbini sistemleri; rüzgâr enerjisinin mekanik enerjiye ve bu enerjinin de jeneratörler vasıtası ile elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlerdir (Zervos, 2009).

Bu sistemlerde enerji üretim maliyetini belirleyen etkenler; kurulum giderleri, işletme ve bakım giderleri, türbin kapasite faktörü, türbin çalışma ömrü ve diğer dış giderler olarak sıralanabilir. Üretim maliyetinin yaklaşık %75-80'ini kurulum giderleri oluşturmaktadır. Bu giderler ise kule, rotor elemanları, jeneratör, dişli kutusu, frenleme sistemi gibi elemanların maliyetlerinden oluşmakta olup kullanılan jeneratör büyüklüğü, rotorun yerden yüksekliği, rotor yarıçapı gibi tasarım büyüklüklerine göre değişmektedir. Dolayısıyla, kurulacak türbin sisteminde tasarım elemanları büyüklüklerinin bölgenin rüzgâr potansiyeli göz önünde bulundurularak birbirleri ile uyumlu ve üretilecek enerjinin olası en büyük değerinde ve maliyetini de en aza indirecek şekilde seçilmesi gerekmektedir (Eminoglu, 2016).

Oluşturulan RTAOP programının Tasarım Optimizasyonu bölümünde yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin kurulacağı bölgenin coğrafik durumu (rakım, ortalama sıcaklık, yüzeyin rüzgâr açısından pürüzlülük durumu vb.) ve ölçümler ile belirlenmiş yıllık ortalama rüzgâr hızı kullanılarak en düşük maliyette ve en yüksek oranda enerji üretimi için Rüzgâr Türbini Sistemi temel elemanlarının (rotor yarıçapı, jeneratör gücü, hub yüksekliği ve kanat sayısı) en uygun büyüklükleri, maliyeti etkileyen rotor kanat uç hızı oranı, tasarım rüzgâr hızı, nominal rüzgâr hızı ve devir sayısı gibi büyüklüklerden sabit veya değişken hızlı olma durumuna göre ilgili olanlarının uygun değerlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu büyüklüklerin belirlenmesi için yapılacak tasarım optimizasyonu uygulamalarında sabit hızlı rüzgâr türbini sistemlerinde türbin güç çıkış karakteristiğinin belirlenmesinde rotor verimliliğinin hesabı için geliştirilen yeni model ve değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde türbin güç çıkış karakteristiğinin belirlenmesi için geliştirilen yeni model kullanılacaktır. Optimizasyon metotları olarak popülasyon temelli algoritmalarından Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ve Diferansiyel Gelişim Algoritmaları kullanılacaktır. Böylece en düşük maliyette enerji üretimi için belirlenen tasarım elemanlarının

büyüklikleri, ortalama rüzgâr hızı ve bölgenin coğrafik özellikleri dikkate alınarak kurulacak rüzgâr türbini sistemi için tüm giderler göz önünde bulundurularak toplam maliyet, yıllık enerji üretim miktarı, yıllık ortalama güç, birim enerji maliyeti ve türbin kapasite faktörü gibi büyüklükler de belirlenebilecektir. Tasarım optimizasyonu analizlerinde paralel programlama tekniği ile optimizasyon metotlarının aynı anda çalıştırılarak aynı zamanda farklı metotlar ile sonuçların elde edilebilmesi imkanı sağlanacaktır.

Oluşturulan paketin analiz bölümü ile kullanıcı kendi belirlediği coğrafik durum (rakım, ortalama sıcaklık vb.), yıllık ortalama rüzgâr hızı ile rotor yarıçapı, hub yüksekliği, jeneratör gücü ve devir sayısı, kanat uç hızı oranı, nominal rüzgâr hızı, tasarım rüzgâr hızı vb gibi büyüklüklerden sabit veya değişken hızlı olma durumuna göre ilgili olanları kullanarak tasarladığı veya mevcut kurulu bir rüzgâr türbini sisteminin toplam maliyet, birim enerji üretim maliyeti, türbin yıllık ortalama gücü, yıllık enerji üretim miktarı, türbin kapasite faktörü ve bölgenin ortalama güç yoğunluğu gibi büyüklükleri analiz edilebilmektedir. Bunun için yapılacak analizlerde de türbin çıkış gücü hesabı için geliştirilmiş en uygun metotlar kullanılmıştır. Paketin bu bölümünde ayrıca grafik arayüzü kullanılarak rüzgâr türbini sisteminin güç çıkış karakteristiğini, girilen coğrafik özelliklere göre hub yüksekliğinde rüzgâr hızı olasılık dağılımı (Weibull Dağılımını), sabit hızlı rüzgâr türbinleri için rotor verimliliğinin rüzgâr hızına göre değişimleri grafiksel olarak analiz edilmektedir.

Farklı alanlarda olduğu gibi RTS'ler için de analiz ve/veya tasarım optimizasyon paket programları geliştirilmiş olup bu amaçlı çalışmalar devam ettirilmektedir. Paket programların büyük çoğunluğunun oluşturulması amaçlanan paketin kısmen analiz bölümünü içerdiğini söylemek mümkündür. Ayrıca bu paket programlar lisanslı olup yüksek maliyetli olmalarının yanı sıra türbin gücü ve üretilen enerji hesabında klasik metotlar kullanılmakta dolayısıyla rotor verimliliğinden kaynaklı yaklaşık analizler yapılabilmektedir (Anonim, 2017a, 2017b, 2017c). Oluşturulması amaçlanan paket program da çıkış gücü hesabı için geliştirilen rotor verimliliğinden bağımsız modeller kullanılarak daha gerçekçi analizlerin yapılabilmesine olanak sağlanmaktadır. Paket internet ortamında ücretsiz olarak temin edilip herhangi bir program gerektirmeksizin bilgisayar ortamında çalıştırabilmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Barambones (2012)'de, değişken hızlı rüzgâr enerjisi üretiminde kullanılan çift beslemeli endüksiyon jeneratörü sürücüsü için kayma modu vektör kontrol şeması tasarlanmıştır. Önerilen kontrol yöntemi, geniş bir rüzgâr hızı aralığında optimum güç verimliliği ile çalışan rüzgâr türbinini kontrol etmeyi ve böylece değişken rüzgâr hızları için güç çıkarmasını en üst düzeye çıkarmayı sağlar. Nominal rüzgâr hızından düşük hızlarda, hızın anlık değişimine göre maksimum güç çıkışını takip ederek maksimum güç çıkışını sağlamaktadır.

Fingersh ve ark. (2006)'de, piyasa koşullarını temsil eden gerçek ve modellenmiş verileri kullanarak, kara ve açık deniz rüzgâr enerjisinin seviyelendirilmiş maliyetinin analizi verilmektedir. Ayrıca, kara ve deniz rüzgâr projeleri için kapasite faktörü, karşılama oranı, birim enerji üretim maliyet aralığı ve toplam maliyet aralığı ABD için karşılaştırılarak verilmektedir.

Griffin (2000)'de, NREL İleri Araştırma Programı ART-2B rotor pervaneleri için aerodinamik tasarım yapılmıştır. Çalışmada ART-2B bıçak, aerodinamik performansın en gelişmiş durumunu yansıtacak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, süreçte aerodinamik tasarım hedeflerine öncelik verilmiş ve yapısal tasarım yönleri ikincil olarak değerlendirilmiştir. Yapısal verimlilik sonuçtaki bıçak boyutlarını dikkate alarak nitel olarak ele alınmıştır.

Bekele ve Ramayya (2013)'de, yatay eksen rüzgâr türbininin maliyeti üzerine maliyet odaklı aerodinamik tasarım optimizasyonunun özelliklerini vurgulamaktır. Kullanılan kanat profili, rüzgâr türbini uygulaması için ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından geliştirilen ve test edilen NREL-S serileridir. Bu çalışmada ek olarak kullanılan kanat profillerinin performans verileri sayısal olarak üretilmesi ve literatürden elde edilen deneysel verilerle doğrulanmasına değinilmiştir. ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından geliştirilen standart rüzgâr enerjisi sistemi maliyet modelleri, Adama I Rüzgâr Santrali için proje belgesinden bulunan fiili maliyet esas alınarak ölçeklendirilmiştir. Ayrıca rüzgâr türbini maliyeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ek olarak kanat profili ve nominal gücün yıllık enerji üretimi ve birim enerji maliyeti

üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca atmosferik türbülansın yıllık enerji üretimi üzerindeki etkisi tüm durumlar için analiz edilmiştir.

Eminoglu ve Ayasun (2014)'de, değişken hızlı RT'ler için türbin güç çıkışı ve yıllık enerji üretimini hesaplamak için yeni bir yöntem incelenmiştir. Yeni model bir S-tipi eğrisinden geliştirilmiş ve sadece anma gücünün ve nominal rüzgâr hızının bir fonksiyonudur. Türbin kapasite faktörü ve weibull dağılımının ölçek parametresi açısından nominal rüzgâr hızının değerini hesaplamak için bir matematiksel yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilmiş güç çıkışı hesaplama modeli, daha az parametreye sahip olma ve klasik hesaplama yöntemine kıyasla rotor güç katsayısı kullanmadan güç çıkışını hesaplamayı sağlayan avantaja sahiptir. Tasarım parametreleri olarak rotor çapı, kulenin yüksekliği, jeneratörün gücü, kapasite faktörü ve nominal rüzgâr hızı gibi RT'nin konfigürasyonunu tanımlayan çeşitli parametreler kullanılmıştır. Güvenilirlik ve hesaplama verimliliğini artırmak için, kule yüksekliği ile rotor çapı arasındaki ilişkileri açıklayan ampirik bir formül eşitsizlik kısıtlaması olarak optimizasyon algoritmasına dahil edilmiştir. Eşitlik kısıtlaması olarak coğrafi ve aerodinamik değişkenler de kullanılmış ve tasarım optimizasyonları Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Fuglsang ve ark. (2010)'de, saha özelliklerinin rüzgâr türbinlerinin tasarım sürecine dahil edildiği Avrupa projesinin sonuçlarını rapor etmektedir. Farklı konseptteki iki rüzgâr türbinleri, normal düz arazi, açık deniz ve karmaşık arazi rüzgâr çiftliklerini kapsayan altı farklı alanda araştırılmıştır. Sayısal optimizasyon ve aeroelastik hesaplamalara dayalı tasarım araçları, minimum enerji maliyeti için optimizasyona izin vermek için bir maliyet modeli ile birleştirilmiştir.

Kongam ve Nuchprayoon (2010)'de, bir rüzgâr türbininin kontrol problemi, rüzgârın güç ve enerjiyi en üst düzeye çıkarmak için rotor hızının ve uç-hız oranının belirlenmesi incelenmektedir. Çalışmada, problem, yıllık enerji üretimi nesnel fonksiyon olarak doğrusal olmayan bir programlama problemi olarak formüle edilmektedir. Rüzgâr hızı dağılımı, weibull dağılımı olarak modellenmiştir. Değişken hızlı ve sabit hızlı RT'ler için optimum uc-hız oranı altında optimum rotor hızı için PSO ile çözüm gerçekleştirilmiştir.

Fuglsang ve Madsen (1999)'de, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin tasarımı için son zamanlarda geliştirilen sayısal bir çok disiplinli optimizasyon yöntemi sunulmuştur. Yöntem ile birden fazla kısıtlamaya izin vererek yıllık enerji üretimi ve minimum enerji maliyeti hesaplanmaktadır.

Carrillo ve ark. (2013)'de, değişken hızlı rüzgâr türbini jeneratörleri genel bir denklem kullanılarak üretici güç eğrisinin yaklaştırılması vasıtasıyla modellenmesi incelenmiştir. Bu çalışmada, değişken hızlı rüzgâr türbinleri için güç eğrilerini göstermek için yaygın olarak kullanılan denklemlerin (polinom güç eğrisi, üstel güç eğrisi, kübik güç eğrisi ve yaklaşık kübik güç eğrisi) incelemesi yapılmaktadır. Ölçüm katsayıları, fitness göstergeleri ve enerji üretiminin tahmini kullanılarak, üretici güç eğrileri ile karşılaştırılmıştır.

Li ve Chen (2009)'de, sürekli mıknatıslı jeneratör sistemi genetik algoritma ile rüzgâr enerjisi üretim sisteminin optimum tasarım modelleri geliştirilmiştir. Maliyet sonuçları belirli bir rüzgâr gücü için gerçek maliyeti ile karşılaştırılmıştır.

Eminoglu, (2016)'de, RT'nin tasarım optimizasyonu için bir çerçeve önerilmektedir. Rüzgâr özelliklerini ve bölgenin coğrafi özelliklerini dikkate alarak optimum maliyet hesaplanmaktadır. Bir RTS'nin konfigürasyonunu tanımlayan, rotor çapı, kule yüksekliği, jeneratörün gücü, türbin tasarımı rüzgâr hızı ve rotorun dönme hızı gibi çeşitli parametreler tasarım parametreleri olarak kullanılarak güvenilirlik ve hesaplama verimliliğini artırmak için, bu tasarım parametreleri arasındaki ilişkileri açıklayan ampirik formüller eşitsizlik kısıtlamaları olarak bir optimizasyon algoritmasına dahil edilmiştir. Eşitlik kısıtlamaları olarak coğrafi ve aerodinamik değişkenler de kullanılmış ve bu problemleri çözmede etkili olan bir PSO algoritması kullanılarak tasarım optimizasyonları yapılmıştır. Farklı bölgeler (Kuzey Avrupa ve Akdeniz) değerlendirilmiş ve rüzgâr potansiyelleri weibull parametreleri ile karakterize edilmiştir.

Collecutt ve Flay (1996)'de, değişken hızlı üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini optimizasyonu ile ilgilidir. Geliştirilen model, çeşitli rüzgâr kaynakları için enerji maliyetini en aza indirmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, çeşitli rüzgâr türlerinde optimum rüzgâr tür bini tasarımı için bir rehber oluşturmaktadır.

Maki ve ark. (2012)'de, çok düzeyli bir sistem tasarımı algoritması sunulmakta ve bir rüzgâr türbini sistem analizi için kullanılmaktadır. Rüzgâr türbini tasarım analizinde Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen simülasyon araçları kullanılmaktadır. Maksimum yıllık enerji üretimi için bıçak geometrisinin optimal tasarımı ve bıçağın kökünde minimum bükülme momenti için bıçağın yapısal tasarımı, iki teknik tasarım içermektedir. Rüzgâr türbininin temel özellikleri rotor çapı, dönme hızı, maksimum nominal güç, kule yüksekliği, bıçağın yapısal özellikleri ve bıçağın geometrik karakteristikleri genel tasarım analizi için tasarım değişkenleri olarak kullanılmıştır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

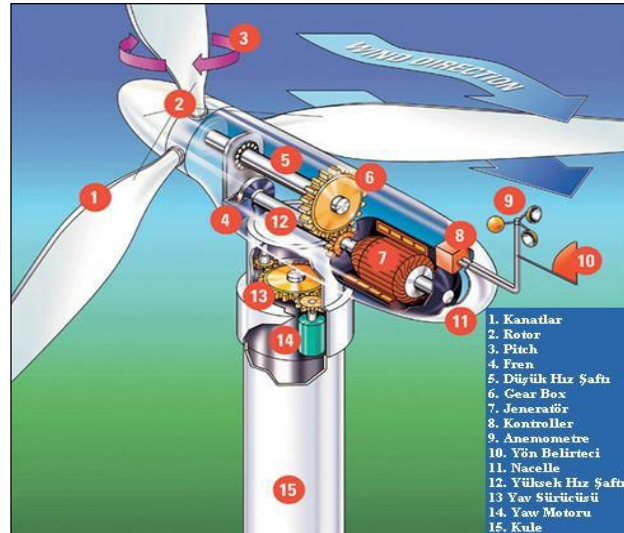
3.1 RT'lerin Yapısı ve Elemanları

RT'ler, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Hareketli havadan mekanik enerji şeklinde elde edilen enerji, uygun bir kaplin ve dişli kutusu içeren mekanik aktarıcı yoluyla elektrik jeneratörüne aktarılır. Jeneratörden elektrik çıkışı, uygulamaya göre bir yüke ya da güç şebekesine bağlanmaktadır. RT'ler elektrik enerjisini en ucuza mal edecek şekilde kurulmaktadır. Bu nedenle yaklaşık 15 m/s rüzgâr hızında maksimum çıkış verebilecek şekilde tasarlanırlar. Daha yüksek hızlarda maksimum çıkış üretebilecek şekilde RT tasarlamak mantıklı değildir. Çünkü daha yüksek hızlarda sürekli rüzgâr durumu pek mümkün değildir. Eğer daha kuvvetli rüzgârlar meydana gelirse rüzgâr türbinlerine zarar vermesini önlemek için rüzgârın bir kısmından mahrum olmak gerekmektedir. RT'lerin nasıl çalıştığını anlamak için iki önemli aerodinamik kuvvet iyi bilinmelidir. Bunlar sürüklenme ve kaldırma kuvvetleridir. Sürüklenme kuvveti, cisim üzerinde akış yönünde meydana gelen bir kuvvettir. Örneğin düz bir plaka üzerinde meydana gelebilecek maksimum sürüklenme kuvveti hava akışının cisim üzerine 90° dik geldiği durumda iken; minimum sürüklenme kuvveti ise hava akışı cismin yüzeyine paralel iken meydana gelir. Sürüklenme kuvvetine en iyi örnek olarak paraşüt verilebilir. Kaldırma kuvveti ise, akış yönüne dik olarak meydana gelen bir kuvvettir. Uçakların yerden havalanmasına da bu kuvvet sebep olduğu için kaldırma kuvveti olarak adlandırılmıştır. Kullanımdaki rüzgâr türbinleri boyut ve tip olarak çok çeşitlilik gösterse de genelde dönme eksenine göre sınıflandırılır. RT'ler dönme eksenine göre;

- Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri (YERT)
- Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (DERT)

olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir (Nurbay ve Çınar, 2005). Yatay eksenli RT'lerin dönme eksenini yataydadır. Çok büyükten, küçüğe kadar farklı boyutlarda olabilirler. Küçük türbinler rüzgâra doğru basit bir rüzgâr kuyruğu ile döndürülür; büyük türbinler ise bir rüzgâr sensörü ve servo motorla rüzgâra döndürülür. Bu tip türbinlerin verimi

yaklaşık %45'dir. Küçük rüzgâr türbinleri 100-1000 W elektrik üretirken, büyükleri yüzlerce kW, hatta 3-4 MW elektrik üretebilmektedir. Rotor, dişli çark, jeneratör ve fren bir kule üzerinde yatay safta bağlanmışlardır. Büyük güçlü türbinlerde (1 MW'dan büyük) transformatör de kulenin tepesinde türbin gövdesinde yer alır. Küçük güçlü türbinlerde ise, transformatör şebeke bağlantı sistemleri ile birlikte yerde bulunur. Kanatların rüzgâr doğrultusu ile açısının bir hidrolik sistemle değiştirilmesi kanat açısı kontrolü (pitch control) ile rotor kontrolü sağlanabilmektedir. Çok yüksek hızlarda kanatlar rüzgâra en az direnç gösterecek şekilde çevrilerek türbin hızı ayarlanabilmektedir. Dikey (düşey) eksenli rüzgâr türbinlerinin dönme eksenini düşeydir. Bu türün en önemli avantajı, türbinin rüzgâra doğru dönmesine gerek kalmamasıdır; rüzgârı her yönden alabilir. Bu rüzgâr yönünün sürekli değiştiği bölgeler için önemli bir avantajdır. Verimleri yaklaşık %35'dir. Toprak seviyesinde kurulabildiğinden kuleye gerek duymazlar ve düşük rüzgâr hızlarında çalışırlar. Bu yüzden güç kapasiteleri yatay eksenli RT'lere nazaran düşük olup 10 kW'a kadar kurulu güce ulaşabilmektedirler. RT'ler; dişli kutusu, rotor, anemometre, otomatik yöneltme düzeni, frenleme düzeni, yaw (yön) mekanizması ve kuleden meydana gelmektedir. Şekil 3.1'de tipik bir RT'ye ait elemanlar ve konumları görülmektedir (Cançoban, 2016).



Şekil 3.1 RT elemanları ve yerleşimi

3.2 RT'lerde Güç ve Enerji Hesabı

RT'ler, rüzgârda mevcut olan kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye sonrada bu enerjiyi jeneratör vasıtası ile elektrik enerjisine dönüştüren elektromekanik sistemlerdir. Rotor miline aktarılan mekanik güç;

$$P_m(u) = \frac{1}{2} \rho A u^3 C_p(\lambda, v) \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Hau, 2005). Burada, A rotor süpürme alanı, ρ havanın yoğunluğu, λ kanat uç hızı oranı ve u ise rüzgâr hızını göstermektedir. $C_p(\lambda, v)$ güç katsayısı (rotor verimliliği) olup kanat uç hızı oranı ve kanat açısına bağlı olarak değişmektedir. Teorik olarak maksimum değeri 0.593 (Betz limit), pratikte ise büyük güçteki RT'ler için 0.4-0.5 arasında değişmektedir (Kongam ve Nuchprayoon, 2010).

Bir bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde, ham verilerin işlenmesi yoluyla elde edilmiş olan istatistiksel veriler kullanılır. Rüzgârın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, hem enerji üretimi değerlendirmelerinde hem de rüzgâr endüstrisinde çok önemlidir. Türbin tasarımcıları, türbin iyileştirilmesinde ve maliyetleri en aza indirmede rüzgâr dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duymaktadır. Eğer bir yıl boyunca rüzgâr ölçülürse, genel olarak çok şiddetli rüzgârların nadiren, ılımlı ve şiddetli rüzgârların daha çok ortaya çıktığı görülür. Ölçümler sonucu elde edilen rüzgâr verileri uzun vadeli rüzgâr kayıtları elde etmek ayrıca, farklı site ve farklı yüksekliklerdeki rüzgâr özelliklerini belirlemek için değerlendirmeye alınır. Değerlendirmede, çeşitli rüzgâr hızı olasılık dağılımları ve bunları matematiksel olarak modellenmesinde “Weibull Dağılımı” ve “Rayleigh Dağılımı” fonksiyonları geniş olarak kullanılmaktadır (Kurban ve ark., 2006).

Weibull dağılımı, rüzgâr hızı olasılık dağılımları için en çok kullanılan yöntemdir. Bu dağılım, şekil ve ölçek değişkenleriyle belirtilir. Bu dağılımın altında kalan alanın toplam olabilirliği “1” dir. Yani, sakın havalar da bunun içinde olmak üzere, belli bir periyotta rüzgârın her aralıkta toplam olma olasılığı %100 dür. Bu dağılım:

$$f_w(u) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] \quad (3.2)$$

fonksiyonu ile ifade edilir (Kurban ve ark., 2006). Burada u m/s cinsinden rüzgâr hızı olup c ölçek parametresi (m/s) ve k şekil parametresi olarak tanımlanmaktadır. Bu olasılık yoğunluk fonksiyonu, rüzgârın herhangi bir hızda esme sıklığını gösteren bir fonksiyondur. Olasılık yoğunluğu fonksiyonunun elde edilmesi, şekil ve ölçek parametresinin bilinmesini gerektirir. Bunun için literatürde geliştirilmiş birden fazla yöntem mevcut olup en yaygın olanı moment yöntemidir. Bu yöntem ile parametreler, ortalama hız ile standart sapmanın fonksiyonu olarak tanımlanır. Yapılan yıllık rüzgâr hızı ölçümleri sonucunda belirlenen ortalama rüzgâr hızı (u_o) ve hızdaki standart sapma değeri (σ) kullanılarak dağılımdaki bu parametreler Moment yöntemi ile belirlenebilmektedir. Moment metodu Weibull dağılımı parametrelerini belirlemek için kullanılan en eski metotlardan birisi olup parametreler:

$$k = \left(\frac{\sigma}{u_o}\right)^{-1.086} \quad (3.3)$$

$$c = \frac{u_o}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \quad (3.4)$$

ifadeler ile belirlenmektedir (Kurban ve ark., 2006). Hesaplanan şekil parametresi rüzgâr sıklığını gösteren bir parametredir. Ölçek parametresi bağıl kümülatif rüzgâr hızı frekansını göstermektedir. Basit bir deyişle, c parametresi ortalama hıza bağlı olarak değişir. Ortalama hız yüksek ise, c parametresi de yüksektir. Bu parametrenin hesabında kullanılan Γ , gamma fonksiyonu operatörüdür. Diğer taraftan bir RT kurulumu için referans yükseklikte yapılan rüzgâr ölçümleri sonucunda belirlenen rüzgâr hızından faydalanılarak farklı yükseklikler için rüzgâr hızı, bölgenin pürüzlülüğü dikkate alınarak:

$$u = u_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^\alpha \quad (3.5)$$

şeklinde hesaplanır. Burada u_{ref} referans yükseklikte (h_{ref}) belirlenen rüzgâr hızını, h ise rüzgâr hızının hesaplanmasını gerektiren yüksekliktir. Yüzeyin pürüzlülük durumu hesaplamalara α sabiti ile dâhil edilmekte olup, α sürtünme veya pürüzlülük katsayısı

olarak tanımlanmaktadır. Farklı arazi durumları için sürtünme katsayısı yaklaşık olarak belirlenmiş olup açık alanlar için genellikle 1/7 değeri kullanılmaktadır.

RT'lerin tasarımında kullanılan enerji maliyeti hesabı için RT'nin kurulması planlanan bölge için yıllık enerji üretim miktarı hesaplanması gerekmektedir. enerji maliyeti hesabı açısından gereklidir. Bu hesaplamayı yapabilmek için bölge için rüzgâr verilerine ve RT güç eğrisine ihtiyaç duyulmaktadır. Dünyada yıllık enerji üretimlerinin hesaplanmasında yaygın olarak WindRose (Wind Data Analysis) ve WasP (Wind energy industry-standard software) programları kullanılmaktadır. WasP rüzgâr türbinleri ve rüzgâr santralleri için rüzgâr kaynağı değerlendirmesi ve enerji verimliliği hesaplamalarını içeren bilgisayar programıdır. RT'nin ortalama gücü olasılık dağılımı ve türbin çıkışı kullanılarak:

$$P_o(u_o) = \int_0^{\infty} P_m(u) f_w(u) du \quad (3.6)$$

şeklinde hesaplanır. Burada P_o , ortalama rüzgâr hızı (u_o) değeri için RT ortalama gücü, P_m , RT'nin çıkış gücü (güç eğrisi) ve f_w , ise rüzgâr hızının olasılık yoğunluk fonksiyonudur (Fingersh ve ark., 2006). Eşitlik (3.6)'da görüldüğü gibi ortalama güç hesabında integral sınırları her iki fonksiyonun da değer aldığı rüzgâr hızından (cut-in wind speed) RT'nin devreden çıktığı rüzgâr hızına (cut-out wind speed) kadardır. RT'lerin bir yıllık enerji üretimlerinin hesaplanmasında türbin güç eğrilerinden yararlanılmaktadır. Güç eğrilerinden türbinlerin devreye girme ve devreden çıkma hızları ve hangi rüzgâr hızında ne kadar enerji ürettikleri belirlenmesi sonucunda RT ortalama gücü kullanılarak yıllık enerji üretimi (YEÜ):

$$YEÜ = E_g \times \mu \times \%A \quad (3.7)$$

$$E_g = 8760 P_o(u_o) \quad (3.8)$$

$$\mu = (1 - \%SL) * (1 - \%AL) \quad (3.9)$$

şeklinde hesaplanmaktadır (Fingersh ve ark., 2006). Burada SL (Soiling losses) rotor kanatlarının kenarında böcek birikimi ve kir nedeniyle oluşan enerji kayıpları olup hesaplamalarda % 3.5 olarak alınmaktadır. Diğer bir kayıp olan AL (array losses) türbinlerin aerodinamik etkileşiminden kaynaklanan kayıpları göstermekte ve % 5 olarak alınmaktadır. A ise RT'nin bir yıllık dönemde aktif olarak çalışma durumunu göstermekte

olup verimlilik olarak adlandırılmakta ve hesaplamalarda genellikle %98 olarak alınmaktadır.

RT'nin her zaman nominal rüzgâr hızında çalışmayacağı için hiçbir zaman pratikteki ve teorideki yıllık enerji üretimi eşit olamaz. Bu durumun temel nedeni gün içerisinde rüzgârın değişiklik göstermesi ve RT'nin çıkış gücünün her zaman nominal rüzgâr hızındaki değerde olamamasıdır. Dolayısıyla teoride hesaplanan yıllık enerji miktarı değer pratikteki değere oranla daha fazladır. Bunların oranı birden küçüktür ve RT'lerde kapasite faktörü olarak tanımlanır. Kapasite faktörü bir santralin ne kadar verimli kullanıldığını gösteren bir parametre olup santralin belli bir periyotta (genellikle bir yıl için) ürettiği toplam enerji miktarının tam kapasitede üretebileceği enerjiye oranıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$KF = \frac{YE\ddot{U}}{8760P_n} \quad (3.10)$$

Burada P_n , RT'nin kurulu gücü ve aynı zamanda kullanılan jeneratörün nominal gücüdür. Bazı durumlarda RT kapasite faktörü, Eşitlik 3.7'de verilen yıllık enerji üretimi hesabında kayıpların ihmal edilmesi ve sürekli çalışması durumu varsayılarak:

$$KF = \frac{\text{Ortalama güç}}{\text{Nominal güç}} = \frac{P_o(u_o)}{P_n} \quad (3.11)$$

şeklinde tanımlanır. RT'lerin teknik özellikleri ve teknik performansları göz önüne alındığında, türbinlerin kapasite faktörlerinin yüksek rüzgâr potansiyeline sahip bölgelerden, direkt etkilendiği görülmektedir. Bu da türbin yatırımlarının daha kısa sürede geri ödenmesine olanak sağlar.

Rüzgâr Enerjisi mevcut üretim teknolojileri ile kW başına yüksek sermaye gerektiren ancak yakıt ve işletme maliyeti en düşük olan bir enerji kaynağıdır. RT maliyetini belirleyen etkenler aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Gökçınar ve Uyumaz, 2008).

- Kurulum giderleri
- Kapasite faktörü
- İşletme ve bakım giderleri

- Türbin çalışma ömrü
- Dış maliyetler

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) Ulusal Rüzgâr Teknoloji Merkezi karasal ve deniz rüzgâr türbinleri sistemleri için üretilen elektriğin maliyetini tahmin etmek üzere çalışmalar yapmıştır (Gökçınar ve Uyumaz, 2008). Bu çalışmalar sonucunda geliştirilen Birim Enerji Maliyeti (BEM) modeli RT elemanların maliyetini ve kütlesini; rotor çapı, kule yüksekliği ve jeneratör gücü gibi büyüklüklere göre 10 yıllık çalışma durumu için formüle etmekte ve türbin teknolojisindeki gelişmeler sonrasındaki maliyet değişimi modele kolaylıkla dâhil edilebilmektedir. Geliştirilen bu model türbin sistemi büyüklüğüne bağlı olarak kurulum giderleri, işletim ve bakımı ve diğer finansal faktörler dahil tüm giderleri içermekte olup tasarımında herhangi bir değişikliğin maliyete etkisini dikkate almakta, ve RT tasarım ve optimizasyon çalışmalarında geniş olarak kullanılmaktadır. BEM modeli RT'lerin tüm bileşenlerinin maliyetini içermekte olup aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Gökçınar ve Uyumaz, 2008).

$$BEM = \frac{SÜO \times BSM + YFG}{YEÜ} \quad (3.12)$$

Burada BEM, üretilen enerjinin birim fiyatını \$/kWh ifade etmektedir. YEÜ, kWh/yıl cinsinden Yıllık Enerji Üretim miktarıdır. BSM, Başlangıç Sermaye Maliyeti, ilk kurulum maliyeti olup türbin sistem maliyeti ve kurulacak yer (istasyon) maliyeti toplamıdır. Bir RT'nin enerji üretim maliyetinin yaklaşık %75-80'ini oluşturmaktadır. Başlangıç sermaye maliyetini oluşturan kalemler ve her bir eleman için maliyet fonksiyonları Gökçınar ve Uyumaz (2008)'da detaylı olarak verilmektedir. SÜO, Sabit Ücret Oranı, sermaye maliyeti, borç ve öz kaynak getirisi ve diğer çeşitli sabit ücretleri karşılamak için kullanılır. Yılda 0,1158 olarak alınmakta ve gelir vergisi ve emlak vergisi ve sigorta getirisi gibi kalemleri de içermektedir. YFG, Yıllık Faaliyet Giderleri, işletme ve bakım giderleri olup bu giderler, arazi kiralama masrafları, işçilik, parça ve planlanan türbin bakım gereçleri, ekipman ve tesislerin bakım parçaları ve malzemeleri ve rüzgâr türbini çalışma ömrü süresince önemli değişikliklerin ve revizyonların maliyetini içermektedir.

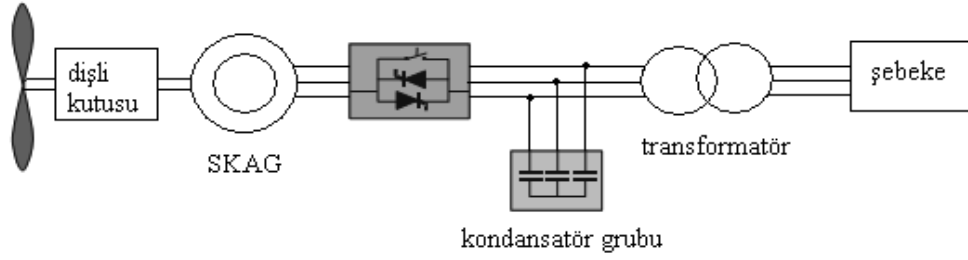
3.3 RT Çeşitleri

Günümüzde kullanılan rüzgâr türbinleri kanat açısı kontrolü (pitch kontrol) veya güç elektroniği sistemlerini kullanarak değişken hızda çalışabilecek şekilde tasarlanırlar. Büyük güçlü rüzgâr türbinlerinde hız kontrolü için genelde güç elektroniği sistemleri kullanılır. RT'lerde yapılan bu kontrol uygulamaları genel olarak Yaw kontrolü, Pitch (kanat açısı) kontrolü ve Stall (durdurma) kontrolü şeklinde özetlenebilir. RT'ler hızlarına göre;

- Sabit hızlı RT'ler
- Değişken hızlı RT'ler

olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır (Koç ve Güven, 2011).

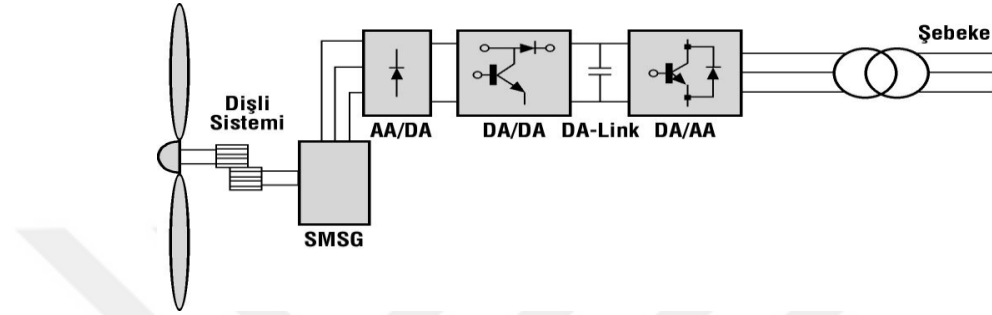
Sabit hızlı rüzgâr türbinleri basit, düşük maliyetli, sağlam, güvenilir olmalarından dolayı 90'lı yıllarda yaygın bir şekilde kullanılmaktaydı. Bu tip RT'ler çok kademeli dişli kutusu, standart sincap kafesli asenkron jeneratörlü, Şekil 3.2'de verildiği üzere şebekeye direkt bağlanan rüzgâr türbinleridir. Nominal rüzgâr hızında, nominal güce ulaşmalarını sağlayacak sabit bir devirde dönen türbinlerdir. Bu sistem, şebeke bağlantılı pek çok rüzgâr türbininde kullanılmış ve tasarım kolaylığı sağlamış olmakla birlikte sadece tek hızda döndükleri ve buna bağlı olarak sadece belirli bir rüzgâr hızında ve civarında en verimli şekilde çalışmak üzere tasarlandıkları için nominal hızdan uzaklaştıkça verimleri düşmektedir. Kanat eğim kontrolü yapılarak rotor hızı sabit değerde tutulmakta veya çok küçük değişimlere müsaade edilmektedir. Rotor hızının sabit olması nedeniyle rüzgâr hızı ile rotor verimliliği değiştiğinden genellikle rüzgârdan maksimum oranda güç üretimi yapılamamaktadır (Koç ve Güven, 2011).



Şekil 3.2 SKAG tipi sabit-hızlı bir RT'nin şebeke bağlantısı

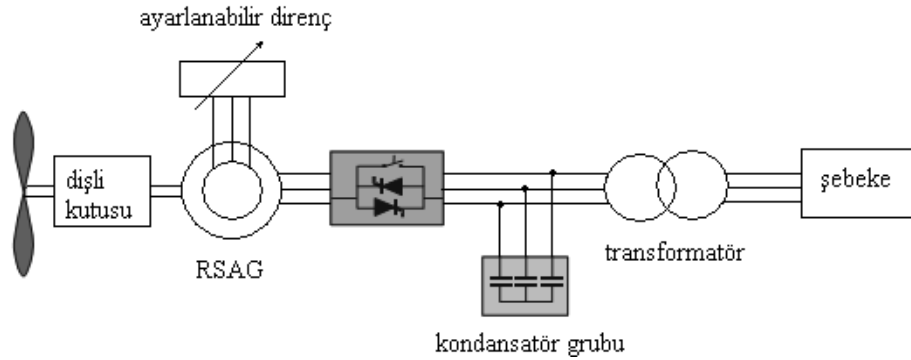
Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin temel avantajı, geniş bir rüzgâr hızı aralığında en uygun kanat uç hızı oranında çalışabilmeleri, böylece rotor verimliliğini yükseltip daha fazla enerji elde edilmesini sağlamalarıdır. Bu türbinler genel olarak birlikte kullanıldıkları açılı kontrol sistemi ile birlikte nominal hızdan çok düşük hızlarda dahi yüksek verimlilikle çalışabilirler. Bu tip türbinlerde genellikle bir asenkron veya senkron jeneratör kullanılarak, türbin bir güç çevirgeci üzerinden şebekeye bağlanır. Güç çevirgeci jeneratör hızını kontrol ederek, rüzgâr hızındaki değişikliklerden ötürü meydana gelen güç dalgalanmalarının şebekeyi etkilemesini minimum seviyeye indirmektedir. Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör (ÇBAG) tipli ve Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratör (SMSG) tipi değişken hızlı rüzgâr türbinleri yaygın olarak kullanılmaktadır. ÇBAG tipli rüzgâr türbinlerinde rotoru sargılı asenkron jeneratör kullanılır. Bu jeneratör yapısında, stator direk olarak şebekeye bağlıyken, rotor bilezikler üzerinden 2 adet çevirgeç ile şebekeye bağlı olduğu için çift beslemeli asenkron jeneratör olarak isimlendirilir. Bu çevirgeçlerden şebeke tarafında olan, çevirgeçler arası Doğru Akım (DA) link gerilimini kontrol ederken, rotor tarafında bulunan çevirgeç stator tarafının aktif ve reaktif güç çıkışını kontrol eder. Bu tip rüzgâr türbinlerinin güç çıkışları ve rotor hızı, kanat açısı kontrol sistemi ve çevirgeçler tarafından kontrol edilebilir. Bu tip rüzgâr türbinleri değişken hızda çalışabildiği ve rotoru şebekeden ayrıldığı için verimleri artmakta ve şebeke etkileri azalmaktadır. Şekil 3.3'de şebeke bağlantısı verilen SMSG tipi rüzgâr türbinleri en yeni teknolojiye sahiptirler ve sabit mıknatıslı senkron jeneratör kullanılır. Bu jeneratör, 2 adet çevirgeç ile şebekeden izole edilmiştir. Türbinin tüm çıkış gücü bu çevirgeçler üzerinden şebekeye aktarılır. Bu çevirgeçlerden şebeke tarafında olan, çevirgeçler arası DA-link gerilimini kontrol ederken, jeneratör tarafında bulunan çevirgeç jeneratörün aktif ve reaktif güç çıkışını kontrol eder. Bu tip rüzgâr türbinleri şebekeden

izole olduğu için şebekeye etkileri çok azdır. Ayrıca SMSG kullanılmasından dolayı türbin ve rotor arasında bulunan dişli kutusu kullanılmayabilir. Dişli kutusunun kullanılmaması, türbinin mekanik dayanımı ile verimini arttıran ve türbin maliyetini düşüren bir avantaj olarak nitelendirilebilir (Koç ve Güven, 2011; Sing, 2012).



Şekil 3.3 SMSG tipi değişken hızlı bir RT'nin şebeke bağlantısı

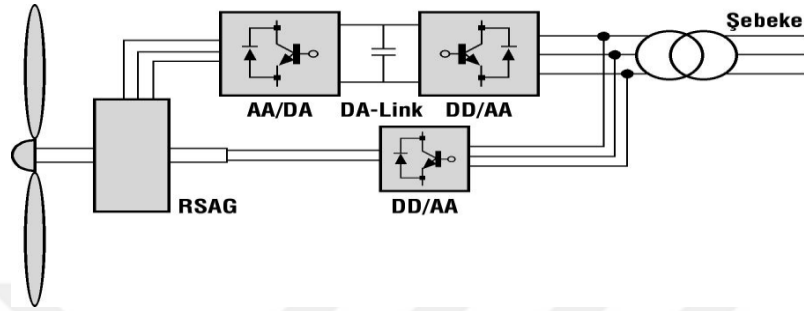
Şekil 3.4'de şebeke bağlantısı verilen RSAG'de rotorun elektriksel özellikleri dışarıdan kontrol edilebilir ve böylece rotor gerilimi değiştirilebilir. Rotor sargı uçları rotorla beraber dönen bileziklere bağlıdır. Bilezikler üzerinde sabit duran fırçalar yardımı ile rotor sargıları üç fazlı bir yol verici direncine ya da dış kaynağa bağlanabilir (Apaydın ve ark., 2017)



Şekil 3.4 RSAG'nün şebeke bağlantısı

Şekil 3.5'de şebeke bağlantısı verilen RSSG'de manyetik alan kutup sargısının bulunduğu makinenin hareketli parçası rotorda üretilir. Rotordaki kutup sargısı doğru akımla beslenerek hava aralığında zamana göre değişmeyen genliği sabit manyetik alan meydana getirir. Bu manyetik alan rotorun döndürülmesi ile statora yerleştirilmiş sargının düzlemlerinden değişik açılarda geçer ve gerilimi indükler. Bu sargıda oluşan gerilim

alternatiftir, zamana göre değişir. RSSG' nün hızı, döner alanın frekansı ve kutup sayısına göre değişir (Apaydın ve ark., 2017).



Şekil 3.5 RSSG'nün şebeke bağlantısı

3.4 Rüzgâr Türbinlerinde Çıkış Gücünün Modellenmesi

3.4.1 Değişken hızlı RT'lerde çıkış gücünün modellenmesi

Bu tip RT'lerde değişen rüzgâr hızına göre kanat açısı kontrol edilerek türbin hızının değiştirilmesi ile rotor kanat uç hızı oranı en uygun değerde veya buna yakın değerde tutulmakta ve maksimum değerde güç üretimine olanak sağlanmaktadır. Eşitlik (3.1)'de verildiği üzere güç ifadesinde yer alan rotor verimliliği türbin tasarım sabitleri, kanat açısı ve kanat uç hızı oranına göre değişmektedir. Tasarım sabitleri türbinden türbine göre değişken olup üretici firma bilgileri veya sahada türbin test edilerek belirlenebilir. Ayrıca tüm rüzgâr hızı değerleri için kanat açısının ve kanat uç hızı oranının değerlerinin bilinmesini gerektirmektedir. Bu nedenle çıkış gücü kontrol edilen değişken hızlı RT'lerin güç eğrisinin oluşturulması için birçok matematiksel model geliştirilerek çalışmalarda kullanılmaktadır. Bunlar;

- Rüzgâr gücü temelli modeller
- Güç eğrisi temelli modeller

olmak üzere iki grupta incelenir. Birinci tip modeller rotor verimliliği dikkate alınarak geliştirilmiş modeller olup rotor verimliliği için $C_{p,eq}$ (Sabit eşdeğer güç katsayısı) ve $C_{p,max}$ (Sabit maksimum rotor verimliliği) gibi katsayılar kullanılmaktadır (Carillo ve ark., 2013). Eşitlik (3.1) temelli modellerde rüzgâr hızı ile değişen rotor verimliliği için yaklaşık sabit değerlerin kullanılması nedeniyle RT'lerin rüzgâr hızına göre çıkış gücü eğrisi yaklaşık olarak elde edilmekte ve hata bazı RT'ler için yüksek değerli olabilmektedir. Bu nedenle bu tip RT'lerin çıkış gücü eğrisi dikkate alınarak eğri uydurma prensibine dayalı birçok matematiksel model geliştirilmiştir (Carillo ve ark., 2013; Chiang ve ark., 2014; Lydia ve ark., 2014; Thapar ve ark., 2011; Türksoy ve Eminoglu, 2015; Eminoglu ve Ayasun, 2014). Bu modellerin önemli bir kısmı RT'nin başlangıç rüzgâr hızı (u_{ci}) ve nominal rüzgâr hızı (u_n) değişkenlerine bağlı olarak popülasyonların S-tipi çoğalma eğrisi (Eminoglu ve Ayasun, 2014), lineer eğri (Chiang ve ark., 2014; Lydia ve ark., 2014), ikinci ve üçüncü dereceden denklem ve polinomlar (Thapar ve ark., 2011; Türksoy ve Eminoglu, 2015) gibi RT'lerin çıkış gücü eğrilerine benzer eğri denklemleri kullanılarak geliştirilmiştir. RT'ler için analiz ve tasarım çalışmalarında yaygın olarak kullanılan modeller aşağıda Çizelge 3.1'de verilmiştir. Tez çalışması kapsamında bu tip RT'lerde çıkış gücü hesabı için kondansatör geriliminin doğru akımda değişim ifadesinden faydalanarak (Eminoglu, 2015)'deki model kullanılmıştır. Model matematiksel olarak;

$$P_m(u) = P_n \left(1 - e^{-\left(\frac{u}{a}\right)^b} \right) \quad (3.13)$$

şeklinde olup P_n türbin kurulu gücünü kW cinsinden göstermektedir. Diğer a ve b parametreleri sırasıyla çıkış gücünün türbin nominal gücüne ulaştığı nominal rüzgâr hızı (u_n) ve çıkış gücünün rüzgâr hızı ile artış eğrisinin eğimine bağlı parametrelerdir (Eminoglu, 2015). Bu parametrelerin değeri çok sayıda (100'den fazla farklı tip Nordex, Vestas, Enercon vb.) ve büyüklükte rüzgâr türbini çıkış karakteristiği incelenerek eğri uydurma yöntemi ile belirlenmiştir. Eğri uydurmada Matlab Curve Fitting Toolbox programı (CFT, 2010) kullanılmıştır. Her bir türbin için çıkış gücünün rüzgâr hızına göre değerleri türbin kurulu gücüne bölünerek ölçeklendirilmiş ve bu değişimlere Eşitlik (3.13) uydurularak b parametresinin değeri belirlenmiştir. Yapılan analizlerde bu parametrenin değeri kullanılan RT'ler için $b=5$ olduğu görülmüştür. Parametre a , P_n 'nin değerinin sabitlendiği başka bir değişle artışın sonlandığı u değerini belirleyen parametre

olup çok geniş değer aralığına sahiptir. Bu nedenle uygun $b=5$ değeri alınarak a parametresinin farklı değerleri için Eşitlik (3.13)'in u 'ya göre değişimleri elde edilmiştir. Bu değişimlerde P 'nin 1 olduğu u_n değeri belirlenerek a parametresinin u_n 'ye göre değişimi elde edilmiştir. Her bir a değeri için belirlenen u_n değeri RT'ler için nominal rüzgâr hızını vermektedir. Dolayısıyla a parametresinin nominal rüzgâr hızı değeri cinsinden ifadesi değişimim lineer olması nedeniyle;

$$a = 0.70335986 \times u_n - 0.00049995 \quad (3.14)$$

şeklinde denklem uydurularak a parametresi türbin nominal rüzgâr hızı cinsinden ifade edilmiştir (Eminoglu, 2015). Geliştirilen modelin geçerliliği pratikte kullanılan RT'lerin gerçek güç eğrileri üzerinde test edilmiştir. Geçerlilik analizi Carillo ve ark. (2013) ile elde edilen çok sayıda RT'lerin 1'e normalize edilmiş (P/P_n) gerçek güç eğrisi ile modeller kullanılarak elde edilen güç eğrisi değerleri arasındaki Karekök Ortalama Hata (RMSE) değerleri belirlenerek gerçekleştirilmiştir. RMSE değerleri;

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{i,m} - x_{i,m})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

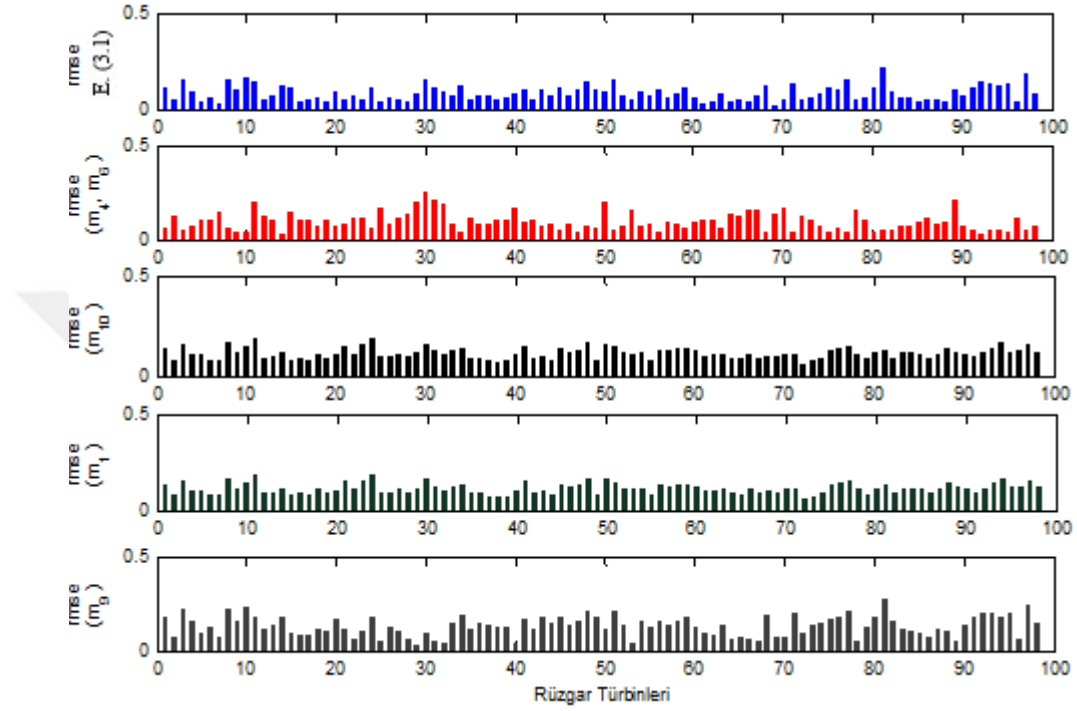
ifadesi ile hesaplanmıştır. Burada $y_{i,m}$ RT'nin gerçek çıkış gücü, $x_{i,m}$ modeller kullanılarak elde edilen çıkış gücü değeri ve N ise egride başlangıç rüzgâr hızı ile nominal rüzgâr hızı arasındaki alınan nokta sayısını göstermektedir. Analizlerde nokta sayısını (N 'yi) arttırmak için RT'lerin gerçek güç eğrisinin lineer olmayan kısmına Matlab Curve Fitting Toolbox (CFT, 2010) kullanılarak en uygun denklemler uydurulmuş ve bu denklemler ile elde edilen değerler gerçek değerler olarak kullanılmıştır. Kullanılan 98 adet farklı tipte pratik RT için bazı modeller ile elde edilen RMSE değerlerinin değişimi Şekil 3.6'de ve tüm modeller için hataların ortalama değerleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere Eşitlik (3.13)'de verilen model en küçük ortalama hata ve düşük standart sapma değerine sahiptir. Model 45 RT için en küçük hataya ve 24 RT için ise ikinci en küçük hataya sahiptir. Dolayısıyla bu tip RT'lerin çıkış gücünün hesabında bu modelin kullanılmasının gerçekçi analizlerin yapılmasına olanak sağlayacağını söylemek mümkündür. Ayrıca diğer modeller sadece güç eğrisinde lineer olmayan kısım için kullanılabilirken ($u_{ci}-u_n$ aralığı), Eminoglu (2015)'da geliştirilen model güç eğrisinin tamamını modellemek ($u_{ci}-u_{co}$ aralığı) için kullanılabilir.

Çizelge 3.1 RT’ler için güç eğrisi modelleri

Model	Matematiksel ifade	Parametreler
Lineer (M ₁)	$P(u) = P_r \left(\frac{u - u_{ci}}{u_n - u_{ci}} \right)$	-
Kuadrati k (M ₂)	$P(u) = P_r \left(\frac{u - u_{ci}}{u_n - u_{ci}} \right)^2$	-
Kübik (M ₃)	$P(u) = P_r \left(\frac{u - u_{ci}}{u_n - u_{ci}} \right)^3$	-
Kuadrati k (M ₄)	$P(u) = P_r \left(\frac{u^2 - u_{ci}^2}{u_n^2 - u_{ci}^2} \right)$	-
Kübik (M ₅)	$P(u) = P_r \left(\frac{u^3 - u_{ci}^3}{u_n^3 - u_{ci}^3} \right)$	-
Weibull (M ₆)	$P(u) = P_r \left(\frac{u^k - u_{ci}^k}{u_n^k - u_{ci}^k} \right)$	k: Bölgenin Weibull ölçek parametresi
Polinom (M ₇)	$P(u) = P_r (c_1 + c_2 u + c_3 u^2)$	$c_1 = \frac{1}{(u_{ci} - u_n)^2} u_{ci} (u_{ci} + u_n) - \frac{1}{(u_{ci} - u_n)^2} 4 u_{ci} u_n \left(\frac{u_{ci} + u_n}{2 u_n} \right)^3$ $c_2 = \frac{1}{(u_{ci} - u_n)^2} 4 (u_{ci} + u_n) \left(\frac{u_{ci} + u_n}{2 u_n} \right)^3 - \frac{1}{(u_{ci} - u_n)^2} (3 u_{ci} - u_n)$ $c_3 = \frac{1}{(u_{ci} - u_n)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{u_{ci} + u_n}{2 u_n} \right)^3 \right]$
Polinom (M ₈)	$P(u) = P_r (a + b u + c u^2)$	$a = u_{ci} \left[u_a - 2 u_n (u_a / u_n)^3 \right] \frac{0.5}{(u_n - u_a)^2}$ $b = \left[u_n - 3 u_a + 4 u_a (u_a / u_n)^3 \right] \frac{0.5}{(u_n - u_a)^2}$ $c = \left[1 - 2 (u_a / u_n)^3 \right] \frac{0.5}{(u_n - u_a)^2}$ $u_a = \frac{1}{2} (u_{ci} + u_n)$
S-tipi (M ₉)	$P(u) = \frac{P_r}{1 + e^{-(bu-7.5)}}$	$b = 5.822e^{-0.3398u_n} + 1.79e^{-0.0548u_n}$
Lineer (M ₁₀)	$P(u) = \frac{u - 0.45u_n}{0.55u_n}$	-

Çizelge 3.1 (Devamı) RT'ler için güç eğrisi modelleri

Kübik (M ₁₁)	$P(u) = P_r \frac{u^3}{u_n^3}$	-
-----------------------------	--------------------------------	---



Şekil 3.6 Farklı değişken-hızlı RT'ler için modellere ait RMSE değerleri

Çizelge 3.2 Modeller için ortalama RMSE değerleri ve standart sapma

Model	D- (3.1) (C _p - max)	D- (3.13)	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄ (M ₆)	M ₅	M ₇ (≅M ₈)	M ₉	M ₁₀	M ₁₁
Ort. RMSE	0.179	0.081	0.110	0.144	0.244	0.092	0.161	0.142	0.128	0.101	0.152

3.4.2 Sabit Hızlı RT'lerde Çıkış Gücünün Modellenmesi

Sabit hızlı rüzgâr türbinleri, rotor verimliliğini maksimum değerde tutmak üzere belirlenmiş tasarım rüzgâr hızı ve devir sayısında dolayısıyla en uygun kanat uç hızı

oranında elektrik enerjisi üretmek üzere tasarlanarak kurulmaktadır. Rüzgâr hızının artması durumunda genelde durum kontrol sistemi ile çıkış gücü nominal güç sınırında tutulmaktadır. Rüzgâr hızının değişimi ile devir sayısı sabit kaldığından kanat uç hızı oranı dolayısıyla rotor verimliliği değişmektedir. Bu tip RTS'lerde rüzgâr hızına bağlı olarak çıkış gücü hesabı için rotor verimliliğinin değişiminin bilinmesi gerekmektedir. Rotor verimliliğinin kanat uç hızı oranı (λ) ve kanat açısına (θ) bağlı olarak:

$$C_p(\lambda, \nu) = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\lambda} - c_3 \theta - c_4 \theta^x - c_5 \right) e^{\left(\frac{-c_6}{\lambda} \right)} \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{1 + \theta^3} \quad (3.17)$$

$$\lambda = \frac{Rw_r}{u} \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Hau, 2005). Denklemden görüleceği gibi rotor verimliliği türbin tasarım sabitleri (c_1 - c_6), kanat açısı ve kanat uç hızı oranına göre değişmektedir. Tasarım sabitleri türbinden türbine göre değişken olup üretici firma bilgileri veya sahada türbin test edilerek belirlenebilir. Ayrıca rüzgâr hızı ile kanat açısı değiştiğinden tüm rüzgâr hızı değerleri için kanat açısının değerinin bilinmesini gerektirmektedir. Bu tip RTS'lerde rotor verimliliğinin rüzgâr hızına bağlı olarak hesabı için türbin başlangıç rüzgâr hızı ve tasarım rüzgâr hızı dikkate alınarak yeni bir model kullanılmıştır. (Eminoglu, 2016). Model, Eşitlik (3.2)'de ifadesi verilen Weibull dağılım fonksiyonunun farklı şekil ve ölçek parametre değerleri alınarak pratik RT'lerde rotor verimliliğinin değişimine uyarlanması sonucunda geliştirilmiştir. Bu modelde tasarım rüzgâr hızı (U_{tas}) ve başlangıç rüzgâr hızı (u_{ci}) birbirinden bağımsız olup ifadesi:

$$C_p(u) = \frac{C_{p_max}}{w_m} \left(\frac{u}{u_{ci}} - 1 \right) \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{u}{c} \right)^k \right] \quad (3.19)$$

$$k = k_1 e^{(k_2 U_{tas})} + k_3 e^{(k_4 U_{tas})} \quad (3.20)$$

$$c = c_1 e^{(c_2 U_{tas})} + c_3 e^{(c_4 U_{tas})} \quad (3.21)$$

$$w_m = w_1 e^{(w_2 U_{tas})} + w_3 e^{(w_4 U_{tas})} \quad (3.22)$$

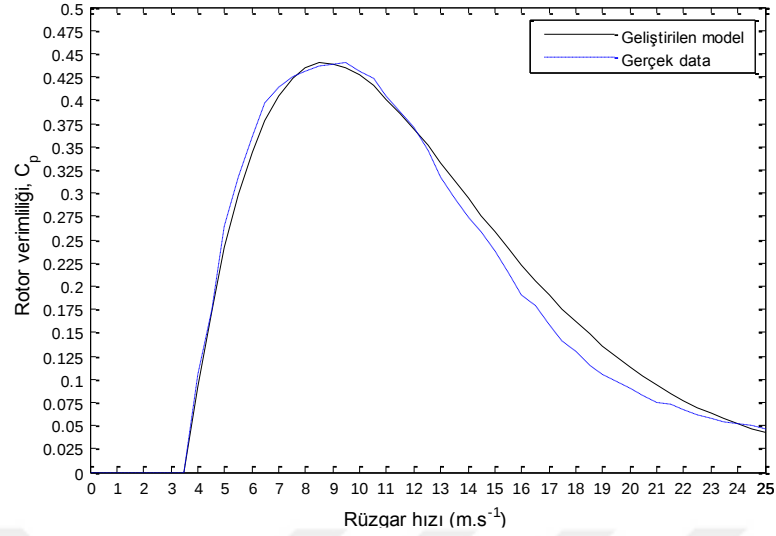
şeklinde. Burada u_{tas} tasarım rüzgâr hızı olup rotor verimliliği bu hızda maksimum değerdedir (Diveux ve ark., 2001). Rotor verimliliğinin maksimum değeri ise:

$$C_{p_max} = 0.593 \left(\frac{\lambda_{opt} p^{0.67}}{1.48 + \lambda_{opt}(p^{0.67} - 0.04) + 0.0025\lambda_{opt}^2} - \frac{1.92\lambda_{opt}^2 p C_d}{1 + 2\lambda_{opt} p C_L} \right) \quad (3.23)$$

ifadesi ile yaklaşık olarak hesaplanmaktadır (Eminoglu, 2016). Burada λ_{opt} rotor verimliliğini maksimum yapan en uygun (optimum) kanat uç hızı oranı değeri olup büyük güçlü 3 kanatlı RTS'ler için bu değer 6 ila 7 arasında değişmektedir (Anonim, 2017c). C_d ve C_L sırasıyla kanata etki eden sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri katsayılarıdır. Tipik bir NACA tip kanat için C_d/C_L oranı yaklaşık olarak 120 alınabilmektedir (Diveux ve ark., 2001). Modelde kullanılan diğer k , c ve w_m parametrelerine ilişkin katsayılar aşağıda Çizelge 3.3'de verilmiştir. Şekil 3.7'de 1500 kW'lık, tasarım rüzgâr hızı $U_{des}=9$ m/s, başlangıç rüzgâr hızı $u_{ci}=3.5$ m/s ve $C_{p_max}=0.44$ olan Danimarka türbini için Eşitlik (3.19) ile elde edilen rotor verimliliğinin değişimi gerçek veriler ile birlikte verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere geliştirilen model gerçek değerler ile örtüşmektedir. Her ne kadar yüksek rüzgâr hızı değerlerinde belirli bir hata değeri olsa da, bu hızlarda çıkış gücü nominal güç değerinde kontrol edileceğinden bu hata çıkış gücü ve üretilen enerji miktarına yansımayacaktır. Geliştirilen modelin en büyük avantajı rotor verimliliğini maksimum yapan tasarım rüzgâr hızının giriş değişkeni olarak kullanılabilmesidir. Bu optimizasyon analizlerinde tasarım rüzgâr hızının tasarım parametresi olarak kullanımına, dolayısıyla en uygun kanat uç hızı oranı ve rotor devir sayısının belirlenmesine imkan sağlamaktadır.

Çizelge 3.3 Eşitlik 3.20-22 ile verilen model parametrelerine ilişkin katsayılar

Parametre	Katsayılar	Başlangıç rüzgâr hızı (u_{ci})			
		2.0 m.s ⁻¹	2.5 m.s ⁻¹	3.0 m.s ⁻¹	3.5 m.s ⁻¹
k	k_1	0.496573	0.455796	0.425054	0.413269
	k_2	0.121922	0.125928	0.130272	0.131543
	k_3	-27.63697	-22.50087	-20.92655	-10.67648
	k_4	-0.917701	-0.812986	-0.713853	-0.534774
c	c_1	6.235108	5.641625	5.325033	14.47420
	c_2	0.061462	0.067054	0.070120	0.019127
	c_3	-18.20245	-25.48576	-37.45718	-34.92125
	c_4	-0.207992	-0.250126	-0.286448	-0.131397
w	w_1	0.063406	0.042473	0.031896	0.037743
	w_2	0.137188	0.144883	0.148747	0.126524
	w_3	-0.807930	-0.737211	-0.539682	-0.222403
	w_4	-0.491432	-0.457384	-0.375764	-0.179157



Şekil 3.7 1500 KW'lık sabit-hızlı RT için rotor verimliliğinin değişimi

3.4.3 Tasarım Parametrelerinin Modellenmesi

RT'lerin tasarımı, çok sayıda tasarım parametresi ve bunların birbirlerine bağımlılığı nedeniyle lineer olmayan kısıtlamalı optimizasyon probleminin çözümünü gerektirmektedir. Küçük güçlü jeneratör ile büyük yarıçaplı rotor kullanımı üretim miktarını düşürmektedir. Diğer taraftan büyük güçlü jeneratörün küçük yarıçaplı rotor (kanat boyu) ile kullanımı enerji verimliliğini azaltmaktadır. Kule yüksekliği ve rotor yarıçapındaki artış üretim miktarını artırırken aynı zamanda üretim maliyetini de arttırmaktadır (Fingersh ve ark., 2006). Türbin nominal rüzgâr hızı değeri rotor verimliliği açısından jeneratör gücü ile uyumlu olmasının yanı sıra RT'nin kapasite faktörünü ve sonucunda ise enerji üretim miktarı ve maliyetini önemli oranda etkilemektedir. Bu nedenle tasarım büyüklüklerinin birbirleri ile uyumlu ve minimum maliyette maksimum üretim için seçilmesi gerekmektedir (Kongam ve Nuchprayoon, 2010; Fingersh ve ark., 2006; Li ve Chen, 2009). Bu nedenle RT'lerin tasarım optimizasyonu için tasarım büyüklükleri ve parametreler arasında pratik RT değerleri dikkate alınarak matematiksel ifadeler geliştirilmiştir. İlk olarak kule yüksekliği ve rotor yarıçapı arasındaki ilişki çok sayıda RT dikkate alınarak belirlenmiştir. Şekil 3.8'de verildiği üzere rotor yarıçapı değerleri için RT'lerin minimum ve maksimum kule yüksekliği değerlerine eğri uyurma yöntemi (CFT, 2010) kullanılarak kule yüksekliğinin rotor yarıçapına göre değişimi Zervos (2009)'da verilen model:

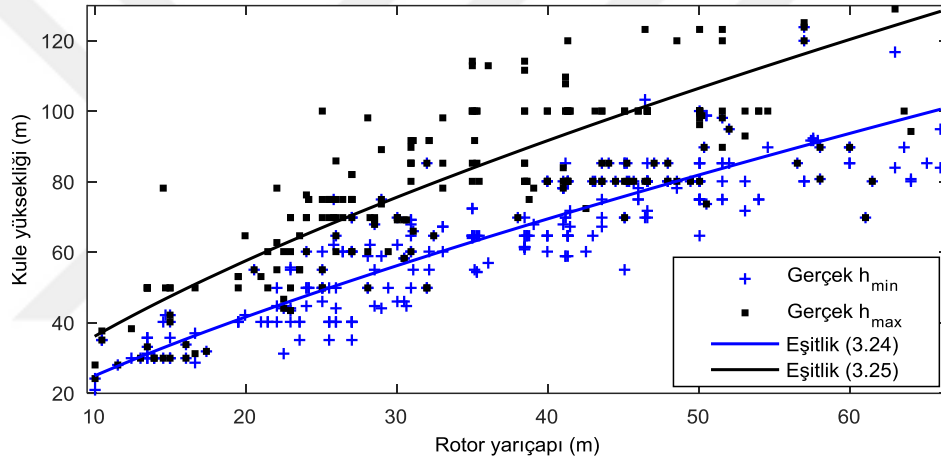
$$h_{min} = 4.56 \times R^{0.7385} \quad (3.24)$$

$$h_{max} = 7.711 \times R^{0.6713} \quad (3.25)$$

şeklinde geliştirilmiştir. Benzer şekilde rotor yarıçapı değerinin RT'lerin nominal güç (jeneratör gücü) değeri ile değişimi Şekil 3.9'de verilmiştir. Verilen değerlere eğri uydurma yöntemi uygulanarak:

$$R = 0.5927 \times \left(\frac{P_n}{0.195} \right)^{0.4639} \quad (3.26)$$

şeklinde modellenmiştir. Burada P_n kW cinsinden türbin nominal gücünü göstermektedir.

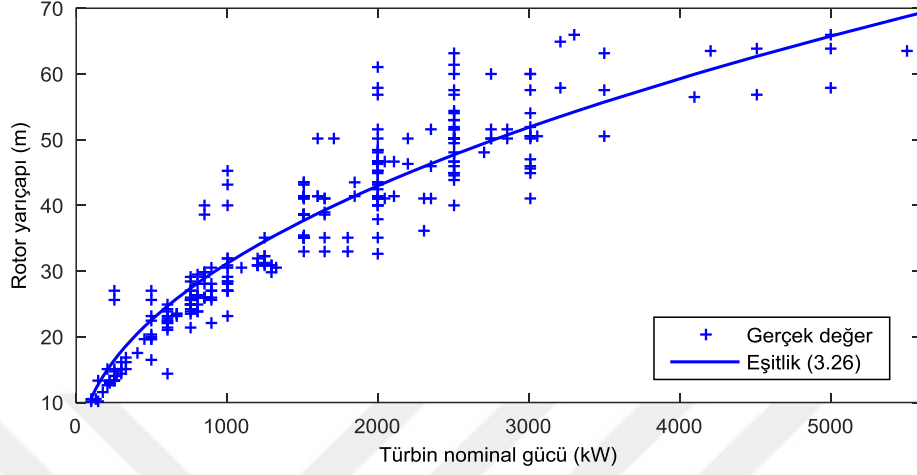


Şekil 3.8 Pratikte kullanılan RT'ler için kule yüksekliğinin rotor yarıçapına göre değişimi

Diğer taraftan rotor yarıçapı değerinin RT'lerin nominal güç (jeneratör gücü) değerinin nominal rüzgâr hızı değeri dikkate alınarak Eşitlik (3.1) ile belirlemek için pratikte kullanılan çok sayıda RT'ler için nominal rüzgâr hızı değerinde rotor verimliliğinin değeri Şekil 3.11'de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere nominal rüzgâr hızı değerinde RT'ler için rotor verimliliği değeri 0.4 den düşük değerlidir. Benzer şekilde sabit-hızlı RT'lerde optimum kanat uç hızı oranı ve rotor verimliliğinin maksimum değerinin belirlenmesi için türbin devir sayısının rotor yarıçapına bağlı olarak ifadesi, Zervos (2009)'da verilen pratik değerlere eğri uydurma yöntemi uygulanarak:

$$N = 30 \frac{0.5945 \times D/2 + 49.19}{\pi D/2} \quad (3.27)$$

şeklinde modellenmiştir.

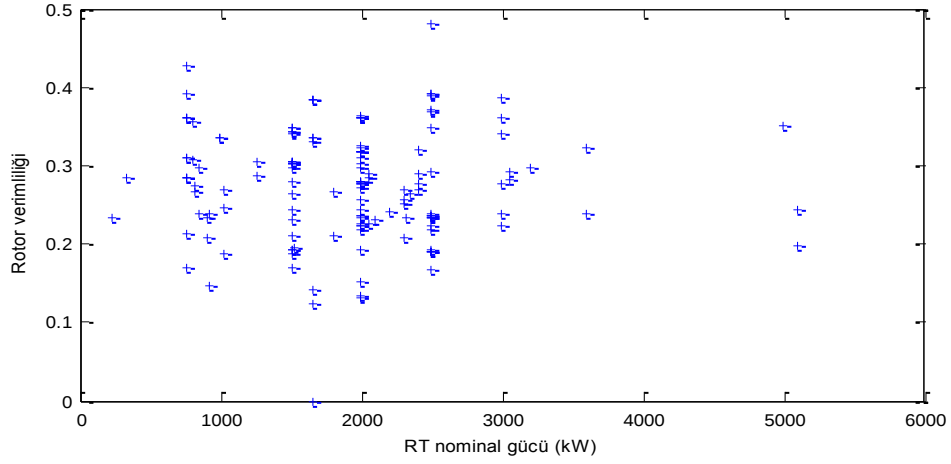


Şekil 3.9 Pratikte kullanılan RT'ler için rotor yarıçapının nominal gücüne göre değişimi

Bu modellere ilaveten enerji üretim miktarı ve sonucunda maliyetine etki eden RT kapasite faktörü, Eşitlik (3.13)'de verilen güç eğrisi modeli ve Weibull dağılım fonksiyonu Eşitlik (3.6)'da kullanılarak Eşitlik (3.10) ve (3.11) aşağıdaki şekilde yeniden tanımlanmıştır.

$$KF = \frac{P_o(u_o)}{P_n} = \int_{u_{ci}}^{u_{co}} \left(1 - e^{-\left(\frac{u}{0.70335986x u_n - 0.00049995}\right)^5}\right) \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] du \quad (3.28)$$

Burada k ve c dağılım fonksiyonu için sırasıyla şekil ve ölçek parametresi olup bölgenin ortalama rüzgâr hızı ve standart sapma değerine göre Eşitlik (3.3) ve (3.4) ile belirlenmektedir.



Şekil 3.10 Pratikte kullanılan değişik güçteki RT'ler için nominal rüzgâr hızı değerinde rotor verimliliğinin değerleri

3.5 Rüzgâr Türbinlerinin Tasarım Optimizasyonu

3.5.1 Tasarım optimizasyonu

Optimizasyon "En İyileme" anlamına gelir ve her zaman için hedeflenen sonuç, en iyileme teknikleri kullanılarak ulaşılan sonuçtur. S araştırma uzayı, F , S uzayında kabul edilebilir çözümler bölgesi ($F \subseteq S$) ve f amaç fonksiyonu ise optimizasyon her $\bar{y} \in F$ için maksimizasyon problemlerinde $f(\bar{x}) \geq f(\bar{y})$, minimizasyon problemlerinde $f(\bar{x}) \leq f(\bar{y})$ 'yi sağlayan $\bar{x} \in F$ çözümünün bulunması işlemidir. Bu durumda $\bar{x}$ küresel en iyi olmaktadır. Optimizasyon teknikleri, yapılmış veya yapılmakta olan işin en iyi çözümünü ortaya koymak için kullanılır. Bu teknikler kullanılarak ortaya konulmuş olan çözüm, optimum çözüm (en uygun değer) olarak adlandırılır. Optimizasyon problemlerinde hedef her zaman için optimum çözümü yakalayabilmektir. Optimum çözüm ise amaç fonksiyonu değişkenlerinin uygun değerlerinin belirlenmesi sonucunda elde edilir. Ayrıca optimum çözüm için değişkenlerin büyüklüklerinin belirlenmesinde bazı kısıtlamalar söz konusu olabilir. Bu nedenle optimizasyon problemi; amaç fonksiyonu, değişkenler ve kısıtlamalar şeklinde biçimlendirilir (Rao, 2009). Optimizasyon problemlerinin çözümünde optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır. Problem boyutunun

artması, problem yapısının lineer olmayan türde olması ve problem uzayının kabul edilebilir bölgesinin çok dar bir alan olması gibi sebeplerden dolayı kullanılan optimizasyon tekniğinin bu gibi hususlarda başa çıkabilecek ve olumsuz koşullara rağmen iyi sonuç verebilecek nitelikte olması beklenir. En iyileme metotları genel olarak Klasik ve Modern Sezgisel metotlar olmak üzere iki gruba ayrılır. Klasik optimizasyon teknikleri sürekli ve türevi alınabilir fonksiyonların minimum değerlerini bulmak için diferansiyel analiz tekniklerini kullanır. Bu teknik ayrıca daha gelişmiş tekniklere de alt yapı oluşturmaktadır. Bu tür yöntemlere örnek olarak Lagrange Çarpınları Metodu (Bertsekas, 1982) verilebilir. Problem boyutunun artması, problem yapısının lineer olmayan türde olması gibi durumlarda klasik metotların başarılı sonuçlar vermemesi nedeniyle Genetik Algoritma (Genetic Algorithm) (Holland, 1975) ve Parçacık Sürüsü Optimizasyon (Particle Swarm Optimization) metodu (Kennedy ve Eberhart, 1995), Diferansiyel Gelişim (Differential Evolution) (Storn ve Price, 1997) gibi arama, evrimsel ve sürü zekası tabanlı metotlar geliştirilmiştir. Son zamanlarda arıların topluluk olarak yiyecek arama davranışını temel alarak Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony) adlı sezgisel bir algoritma Karaboga ve Başturk (2007)'de geliştirilmiş olup farklı alanlardaki problem çözümü için kullanılmaya başlanmıştır. Bahsi geçen meta-sezgisel algoritmaların ilham kaynağı ise doğada günlük yaşamlarında zorlu şartlara karşı mücadele veren ve bu mücadele esnasında zeki davranışlar sergileyen canlılardır.

3.5.2 Değişken Hızlı RT'lerin Tasarım Optimizasyonu

Son yıllarda enerji talebindeki artış ve sağlanan devlet destekleri enerji üretiminde RT'lerin kullanımının önemli oranda artmasına neden olmuştur. Değişken hızlı RT'ler üretilen elektrik enerjisi miktarı açısından sabit hızlı RT'lere nazaran daha avantajlı olup bu tip RT'lerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. RT'lerin tasarımı, çok sayıda tasarım parametresi ve bunların birbirlerine bağımlılığı nedeniyle lineer olmayan kısıtlı optimizasyon probleminin çözümünü gerektirmektedir. Küçük güçlü jeneratör ile büyük yarıçaplı rotor kullanımı üretim miktarını düşürmektedir. Diğer taraftan büyük güçlü jeneratörün küçük yarıçaplı rotor (kanat boyu) ile kullanımı enerji verimliliğini azaltmaktadır. Kule yüksekliği ve rotor yarıçapındaki artış üretim miktarını arttırırken aynı zamanda üretim maliyetini de arttırmaktadır. Türbin nominal rüzgâr hızı değeri rotor

verimliliği açısından jeneratör gücü ile uyumlu olmasının yanı sıra RT'nin kapasite faktörünü ve sonucunda ise enerji üretim miktarı ve maliyetini önemli oranda etkilemektedir. Bu nedenle tasarım büyüklüklerinin birbirleri ile uyumlu, minimum maliyette ve en yüksek oranda enerji üretimi için seçilmesi gerekmektedir (Kongam ve Nuchprayoon, 2010; Fingersh ve ark., 2006; Eminoglu ve Ayasun, 2014; Diveux ve ark., 2001).

Bu tip RT'lerin tasarımı için hızlı, kullanımı kolay ve etkin sonuçlar verebilme yeteneğine sahip olması nedeniyle Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) (Storn ve Price, 1997), Parçacık Sürüşü Optimizasyon (PSO) metodu (Kennedy ve Eberhart, 1995), Genetik Algoritma (GA) (Holland, 1975) ve Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritması (Karaboga ve Başturk, 2007) kullanılmıştır. Metotlar popülasyon temelli sezgisel optimizasyon tekniği olup doğrusal olmayan problemlerin çözümü için tasarlanmış ve çok parametrelili ve çok değişkenli optimizasyon problemlerine çözüm bulmak için kullanılmaktadır.

DGA ile tasarım optimizasyonu

DGA ile optimizasyon probleminin çözümünde $NP \times D$ boyutlu popülasyon bireyleri (x_{ij} ; $i=1, 2, \dots, NP$ ve $j=1, 2, \dots, D$) başlangıçta rasgele üretilir. Burada D , parametre sayısı, NP ise popülasyon büyüklüğüdür. Sonrasında ise tanımlanan durdurma kriteri sağlanıncaya kadar tüm bireylere sırasıyla mutasyon, çaprazlama ve seçim işlemleri uygulanmaktadır. Algoritmada popülasyon bireyleri parametrelerin sınır değerleri dâhilinde rastgele oluşturularak mutasyona tabi tutulmaktadır. Mutasyon işlemi ile bireylere (x_{ij}) ait mutant vektörleri (v_{ij}) bireyden ve birbirinden farklı üretilen üç farklı birey (x_r) kullanılarak;

$$v_{ij,t+1} = x_{ij,t} + F \times (x_{b_{ij,t}} - x_{ij,t}) + F \times (x_{r1} - x_{r2}) \quad (3.29)$$

ifadesi ile oluşturulabilmektedir. Burada F ölçekleme (mutasyon) faktörü olup genelde 0 ile 1 arasında bir değer alınmaktadır. Oluşturulan mutant birey ve mevcut birey arasında çaprazlama uygulanarak aday birey belirlenmektedir. Bu işlem 0 ile 1 arasında rastgele seçilen çaprazlama oranı (CR) olasılığına göre mutant bireyden, $1-CR$ olasılığına göre ise

mevcut bireyden seçime göre yapılmaktadır. Mevcut birey ile aday birey arasındaki seçim işlemi hedef fonksiyon değerine göre yapılarak yeni popülasyon oluşturulmaktadır (Storn ve Price, 1997). Diferansiyel Gelişim Algoritması literatürde her ne kadar rüzgâr türbinlerinde kontrolör parametrelerinin kestirimi ve benzeri gibi problemlerin çözümüne uygulanmış olsa da RT'lerin tasarım büyüklükleri ve parametrelerinin birlikte optimize edilmesi problemine ilk kez uygulanmaktadır. RT'lerin tasarımı için geliştirilen algoritmanın anlaşılabilirliği açısından tasarım parametreleri ve bunlara ait ilişkiler Çizelge 3.4'de özetlenmiş, DGA ile tasarım algoritması adım adım aşağıda verilmiştir.

Adım 1: Durdurma kriteri için maksimum iterasyon sayısı, ölçekleme faktörü (F), çaprazlama oranı (CR) ve popülasyon büyüklüğü (NP) değerini gir.

Adım 2: Bölge için referans yükseklik (h_0) ve Weibull parametrelerini (k_0 ve c_0) gir, rakım ortalama sıcaklık değerine göre hava yoğunluğu (ρ) değerini hesapla.

Adım 3: Çizelge 3.4'de verildiği üzere başlangıç popülasyonlarını (x_{ij}) oluştur (h ve u_r sınırlar dâhilinde rastgele, diğer parametreler için verilen kısıtlamaları kullan).

Adım 4: Maksimum iterasyon sayısı tamamlanıncaya kadar aşağıdaki işlemleri her bir iterasyon için tekrar et.

- Bireyler (x_{ij}) için rastgele birbirinden farklı üç birey (x_r) oluştur.
- Rastgele bir index (R) oluştur, $R \in \{1, 2, \dots, NP\}$, (NP: popülasyon büyüklüğü).
- Aşağıdaki şekilde aday bireyleri ($v_{ij,t+1}$) oluştur:
 - Her bir i için 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı üret, $r_i \equiv U(0, 1)$, Eğer $r_i < CR$ veya $i=R$ ise $v_{ij,t+1}$ bireyini Eşitlik (3.29) ile oluştur. Aksi durumda mevcut bireyi kullan, $v_{ij,t+1} = x_{ij,t}$.
 - Oluşturulan aday bireylerin ($v_{ij,t+1}$) Çizelge 3.4'e göre sınırlarını kontrol et ve diğer parametreler için bireyleri kısıtlamaları kullanarak oluştur.
 - Aday bireyleri ($v_{ij,t+1}$) hedef fonksiyonunda değerlendir. Eğer $f(v_{ij,t+1}) < f(x_{ij,t})$ ise mevcut bireyi aday birey ile değiştir, $x_{ij,t+1} = v_{ij,t+1}$.
- Oluşturulan yeni bireyleri ($x_{ij,t+1}$) hedef fonksiyonunda değerlendir. En düşük maliyeti veren bireyleri en iyi çözüm olarak sakla, $x_c = x_{ij,t+1}$.

PSO ile tasarım optimizasyonu

Parçacık Sürüsü Optimizasyon (PSO) metodu bu tip problemin çözümü için çok kez kullanılmış (Kongam ve Nuchprayoon, 2010; Eminoglu ve Ayasun, 2014) ve performans açısından elverişli olduğu görülmüştür. PSO metodu 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından kuş sürülerinin davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiş popülasyon tabanlı stokastik optimizasyon tekniğidir (Kennedy ve Eberhart, 1995). PSO metodu ile $NP \times D$ boyutlu popülasyon bireyleri (p_{ij} ; $i=1, 2, \dots, NP$ ve $j=1, 2, \dots, D$) yani parçacıklar başlangıçta rasgele üretilmekte ve popülasyon bireyleri güncellenerek en uygun değer araştırılmaktadır. Her bir iterasyonda, her bir parçacık iki en iyi değere göre güncellenmektedir. Bunlardan birincisi bir parçacığın o ana kadar bulduğu en iyi uygunluk değeri olup bu değer daha sonra kullanılmak üzere hafızada tutulmakta ve “*pbest*” olarak adlandırılmaktadır. Diğer en iyi değer ise popülasyondaki herhangi bir parçacık tarafından o ana kadar elde edilmiş en iyi uygunluk değerine sahip çözümdür. Yani *pbest*’lerin en uygunudur. Bu değer popülasyon için global en iyi değerdir ve “*gbest*” olarak isimlendirilir. Algoritmada her bir iterasyonda $v_{ij,t}$ hız vektörüne göre $p_{ij,t}$ parçacıklarının konumlarındaki değişim miktarı belirlenerek ($v_{ij,t+1}$), parçacıkların yeni konumu ($p_{ij,t+1}$) aşağıdaki şekilde oluşturulmaktadır.

$$v_{ij,t+1} = w \times v_{ij,t} + c_1 \times rand_1 \times (pbest_{ij,t} - p_{ij,t}) + c_2 \times rand_2 \times (gbest_{ij,t} - p_{ij,t}) \quad (3.30)$$

$$p_{ij,t+1} = p_{ij,t} + v_{ij,t+1} \quad (3.31)$$

Burada *rand* 0-1 arasında üretilen rastgele bir sayı, *i* parçacık numarasını ve *t* ise iterasyon sayısını göstermektedir. Diğer c_1 ve c_2 öğrenme faktörleri olup genellikle eşit alınmakta, *w* eylemsizlik ağırlığı olarak adlandırılmakta ve her bir iterasyonda lineer olarak azaltılmaktadır. PSO kullanılarak RT’lerin tasarım optimizasyonuna ait algoritma adım adım aşağıda verilmiştir.

Adım 1: Durdurma kriteri için maksimum iterasyon sayısı ($iter_{max}$), öğrenme faktörü (c_1 ve c_2), eylemsizlik ağırlığının (*w*) başlangıç değeri ve popülasyon büyüklüğü (*NP*) değerini gir.

Adım 2: Bölge için referans yükseklik (h_0) ve Weibull parametrelerini (k_0 ve c_0) gir, rakım ortalama sıcaklık değerine göre hava yoğunluğu (ρ) değerini hesapla.

Adım 3: Çizelge 3.4’de verildiği üzere başlangıç popülasyonlarını (p_{ij}) oluştur (h ve u_r sınırlar dâhilinde rastgele, diğer parametreler için verilen kısıtlamaları kullan).

Adım 4: Maksimum iterasyon sayısı tamamlanıncaya kadar aşağıdaki işlemleri her bir iterasyon için tekrar et.

- Bireylerin ($p_{ij,t}$) mevcut pozisyonunu amaç fonksiyonu (birim enerji maliyeti) için değerlendir.
- Eğer $f(p_{ij,t}) < f(p_{ij,t-1})$ ise bireyin en iyi pozisyonunu değiştir, $pbest_{ij}=p_{ij,t}$.
- Bireylerin en iyi pozisyonlarını ($pbest$) karşılaştırarak içlerindeki en iyi pozisyona sahip bireyleri çözüm olarak ata, $gbest_{ij,t}=f(pbest_{ij,t})_{min}$.
- Eşitlik (3.31) ile bağımsız parametreler (h ve u_r) için aday bireyleri ($p_{ij,t+1}$) oluştur.
- Oluşturulan aday bireylerin ($p_{ij,t+1}$) Çizelge 3.4’de verildiği üzere sınırlarını kontrol et ve diğer parametreler için bireyleri tanımlanan kısıtlamalara göre oluştur.
- İterasyon sayısını bir arttır, $t=t+1$. Eğer $t \leq iter_{max}$ ise Adım 4’e git değil ise Adım 5’e git.

Adım 5: En iyi çözüm olarak $gbest_{ij,t}$ ’yi kullan, $p_{\phi}=gbest_{ij,t}$.

GA ile tasarım optimizasyonu

Genetik algoritma, özellikle doğrusal olmayan, çok değişkenli problemlerin çözümüne yönelik olarak geliştirilmiş, popülasyon temelli sezgisel bir yöntemdir (Holland, 1975). Algoritmada her bir değişkene ait değerler genleri, genler kromozomları ve kromozomlar ise popülasyonu (nesli) oluşturmaktadır. Algoritmanın uygulanmasında ilk olarak NP popülasyon büyüklüğü ve D parametre sayısı olmak üzere $NP \times D$ boyutlu popülasyona ait genler (g_{ij} ; $i=1, 2, \dots, NP$ ve $j=1, 2, \dots, D$), başlangıçta sınır değerler dahilinde rastgele oluşturulmaktadır. Popülasyonu oluşturan i . kromozomlar amaç fonksiyonunda

kullanılarak uygunluk değerleri belirlenmektedir. Daha sonra ise mevcut popölasyona; çoğalma (seçim), çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörler uygulanarak yeni nesiller oluşturulur. Her nesil için uygunluk değeri hesaplanır ve bu durum durdurma kriteri sağlanana kadar devam eder. İlk operatör olan çoğalma (seçim) ile uygunluk değeri yüksek olan kromozomlar çoğaltılarak düşük olan kromozomlar elenmektedir. Bunun için rulet tekerleği yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu operatör ile bir sonraki nesil için kromozom üretmek amacıyla hangi kromozomların yer alması gerektiğine karar verilmektedir. Algoritmanın önemli bir operatörü olan çaprazlamada, iki kromozomun farklı genleri kullanarak yeni bir kromozom oluşturulur. Burada amaç uygunluk değeri daha yüksek yeni kromozomların üretilmesidir. Mutasyon işlemi uygunluk değeri yüksek çözümlerin kaybına karşı koruma sağlamaktadır. Çözümler üzerinde düşük bir olasılık ile tesadüfi değişiklikler yapılmaktadır. Gerçek değerli kodlamalarda genlerin değerinin mutasyon oranı miktarınca azaltılması veya eşit olasılıkla arttırılması şeklinde uygulanmaktadır. GA kullanılarak RT'lerin tasarım optimizasyonuna ait algoritma adım adım aşığıda verilmiştir.

Adım 1: Bölge için referans yükseklik (h_0) ve Weibull parametrelerini (k_0 ve c_0) gir, rakım ortalama sıcaklık değerine göre hava yoğunluğu (ρ) değerini hesapla.

Adım 2: Durdurma kriteri için maksimum iterasyon sayısı ($iter_{max}$), popölasyon büyüklüğü (NP), çaprazlama olasılığı ve mutasyon olasılığı değerini gir.

Adım 3: Başılangıç popölasyonunu Çizelge 3.4'de verildiği gibi oluştur (h ve u_r sınırlar dâhilinde rastgele, diğer parametreler için verilen kısıtlamaları kullan).

Adım 4: Popölasyondaki her bir kromozomu ($g_{ij,t}$) maliyet fonksiyonunda değerlendirerek en uygun olanını belirle $g_{best}=g_{ij,b}$ ($f_{min}=f(g_{ij,b})$).

Adım 5: Kromozomları uygunluk değerine göre sıralayarak aşığıdaki adımları durdurma kriteri sağlanıncaya kadar tekrar et.

- Olasılık değerine göre çaprazlama ve mutasyona tabi tutulacak kromozom (dizi) ve bunlara ait genleri rastgele belirle.
- Seçilen kromozomlar için bağımsız parametrelere ait genlere (h ve u_r) çaprazlama ve mutasyon işlemlerini uygulayarak aday kromozomları oluştur.

- Oluşturulan aday kromozomların ($g_{ij,t+1}$) Çizelge 3.4’de verildiği üzere sınırlarını kontrol et ve diğer parametreler için aday genleri tanımlanan kısıtlamalara göre oluştur.
- Popülasyondaki her bir kromozomun uygunluk değerini amaç fonksiyonuna göre belirle ve bunları mevcut en iyi çözüm ile kıyasla. Eğer en iyi çözüm mevcut çözümden daha uygun ise bunu en iyi çözüm olarak değiştir, $g_{best}=g_{ij,t}$ ($f_{min}=f(g_{ij,t})$).
- İterasyon sayısını bir arttır, $t=t+1$. Eğer $t \leq iter_{max}$ ise Adım 5’e git değil ise Adım 6’ya git.

Adım 6: En iyi çözümü gerçek çözüm olarak ata, $g_c=g_{best}$.

YAK ile tasarım optimizasyonu

Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritması arıların besin kaynağı bulmada ki davranışlarından yararlanarak geliştirilmiş popülasyon tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır (Karaboga ve Başturk, 2007). Algoritmada arı kolonisi; problemin olası çözümleri olan besin kaynaklarını tutan işçi arılar, besin kaynaklarını seçmek üzere işçi arıların davranışını izleyen gözcü arılar ve yeni besin kaynakları için rastgele arama yapan kâşif arıları olmak üzere üç grup arıdan oluşmaktadır. Algoritmada başlangıçta, NP besin kaynağı sayısı (işçi veya gözcü arı sayısı) ve D parametre sayısı olmak üzere $NP \times D$ boyutlu popülasyon bireyleri (x_{ij} ; $i=1, 2, \dots, NP$ ve $j=1, 2, \dots, D$), optimize edilecek parametrelerin limitleri dâhilinde işçi arılar rastgele besin kaynaklarına gönderilerek oluşturulur. İşçi arılar bulundukları besin kaynaklarının komşuluğunda yeni besin kaynakları bulurlar ve buldukları besin kaynaklarının uygunluklarını belirlemek üzere maliyet fonksiyonu ile nektar miktarlarını ölçerler. Yeni besin kaynakları;

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij} (x_{ij} - xk_{ij}) \quad (3.32)$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada ϕ_{ij} -1 ile 1 arasında rastgele tanımlanan reel bir sayı, xk_{ij} ise rastgele seçilen besin kaynağıdır. Kaynakların uygunluk değerleri ise bunların maliyet fonksiyonunda kullanılarak elde edilen f_i ve bunun değeri aralığına göre;

$$fitness_i = \frac{1}{1 + f_i}, \quad f_i \geq 0 \quad (3.33)$$

$$fitness_i = 1 + abs(f_i), \quad f_i < 0 \quad (3.34)$$

şeklinde belirlenmektedir (Karaboga ve Başturk, 2007). Yeni kaynak daha uygun ise bu yeni kaynağı hafızaya alırlar. Ardından, bulundukları besin kaynağının komşuluklarında daha uygun yeni bir besin kaynağı aramaya başlarlar. Belli bir iterasyon içerisinde daha uygun bir besin kaynağı bulamayan işçi arı kâşif arıya dönüşür ve arama uzayında rastgele bir başlangıç konumuna geri dönerek yeniden işçi arı olarak arama yapmaya başlar. Kovanda bekleyen gözcü arılar, işçi arılardan devraldıkları besin kaynaklarının konumu ve nektar miktarı (uygunluk değerleri) bilgilerine dayanarak kendilerine bir besin kaynağı seçerler. Bu seçme işlemi kaynakların uygunluk değerleri kullanarak Eşitlik (3.35)'de verilen rulet tekerleği yöntemi sonucuna göre yapılmaktadır.

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_{i=1}^{NP} fitness_i} \quad (3.35)$$

Burada p_i gözcü arılar tarafından besin kaynağının seçilme olasılığıdır. Seçim işleminde 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı üretilir ve kaynağa ait p_i değeri ile karşılaştırılır. Eğer olasılık değeri bu sayıdan büyük ise o kaynak gözcü arı tarafından seçilmiş olur. Gözcü arılarda işçi arılar gibi seçilmiş kaynağın komşuluğunda Eşitlik (3.32)'yi kullanarak yeni kaynaklar üretir. Eğer yeni kaynağın uygunluğu eski kaynak uygunluğundan daha iyi ise bu kaynak seçilir. Gözcü arıların her biri bir besin kaynağı seçene kadar bu işlem devam ettirilir. YAK algoritması kullanılarak RT'lerin tasarım optimizasyonuna ait algoritma adım adım aşağıda verilmiştir.

Adım 1: Bölge için referans yükseklik (h_0) ve Weibull parametrelerini (k_0 ve c_0) gir, rakım ortalama sıcaklık değerine göre hava yoğunluğu (ρ) değerini hesapla.

Adım 2: Maksimum iterasyon sayısı ($iter_{max}$), popülasyon büyüklüğü (NP) değerini gir.

Adım 3: Besin kaynaklarını yani başlangıç popülasyonunu (x_{ij}) Çizelge 3.4'de verildiği gibi oluştur (h ve u_r sınırlar dâhilinde rastgele, diğer parametreler için verilen kısıtlamaları kullan).

Adım 4: Kaynakların nektar miktarlarını (uygunluk değerlerini) Eşitlik (3.33)'i kullanarak hesapla ve aşağıdaki adımları maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar tekrar et.

- Her bir işçi arı için çözümlerin komşuluğunda yeni çözümler (yeni kaynaklar) üret ve sınırlarını Çizelge 3.4'de verildiği üzere kontrol et (h ve u_r için Eşitlik (3.32)'yi, diğer parametreler için tanımlanan kısıtlamaları kullan).
- Eşitlik (3.33)'i kullanarak yeni kaynakların uygunluk değerlerini hesapla (fitness). Eğer uygunluk değeri eski kaynaktan iyi ise değiştir.
- Kaynakların olasılık değerlerini (p_i) Eşitlik (3.35)'ü kullanarak hesapla.
- Gözcü arılar için olasılık değerlerine göre kaynak seçimi yap.
- Her bir gözcü arı için seçilen kaynakların komşuluğunda yeni çözümler (yeni kaynaklar) üret ve sınırlarını Çizelge 3.4'de verildiği üzere kontrol et (h ve u_r için Eşitlik (3.32) ile diğer parametreler için tanımlanan kısıtlamaları kullan).
- Eşitlik (3.33)'i kullanarak yeni kaynakların uygunluk değerlerini hesapla (fitness). Eğer uygunluk değeri eski kaynaktan iyi ise değiştir.
- İşçi arılardan kaynağı yenilenmeyen arı var ise bunları kâşif arısına dönüştür ve rasgele seçilen kaynağa göndererek (Çizelge 3.4'de verildiği üzere h ve u_r için sınırlar dâhilinde rastgele, diğer parametreler için verilen kısıtlamaları kullan) işçi arı olarak işlemlere devam et.
- En uygun kaynağı yani en iyi çözümü sakla.
- İterasyon sayısını bir arttır, $t=t+1$. Eğer $t \leq iter_{max}$ ise işlemlere devam et, değil ise hesaplamaları sonlandır.

Dört farklı optimizasyon metodu ile verilen algorithmada kule yüksekliği (h) ve türbin nominal rüzgâr hızı (u_n) bağımsız parametreler olarak alınmakta ve bunlara ait bireyler başlangıçta Çizelge 3.4'de verilen sınır değerler arasında rastgele üretilmektedir. Diğer tasarım parametrelerinden rotor yarıçapı (R); her bir h bireyi için Eşitlik (3.24) ve Eşitlik (3.25) ile hesaplanarak bu değerlerin arasında yeni bireyler tanımlanmakta ve bunlardan biri rastgele seçilmektedir. Benzer durum türbin nominal gücü (P_n) için de geçerlidir. Çizelge 3.4'de verildiği üzere nominal rüzgâr hızı değerinde pratik olarak 0.3-0.4 aralığında değişen rotor verimliliği ile rastgele oluşturulan bireylerden biri rastgele seçilerek her bir R ve u_n bireyleri için P_n bireyleri Eşitlik (3.1) ile oluşturulmaktadır.

Türbin kapasite faktörü her bir u_n ve h bireyleri için elde edilen Weibull parametreleri (k , c) kullanılarak Eşitlik (3.28)'de belirlenmektedir. Bu işlemler algoritmada her iterasyon için tekrar edilerek bağımsız parametrelere ait bireyler (u_n ve h değerleri) optimizasyon metotları (Eşitlik 3.29, 3.31 ve 3.32) ile aday bireylere göre yenilenmektedir. Genetik algoritma için ise çaprazlama ve mutasyon işlemleri ile elde edilen bireyler kullanılmaktadır. Algoritmada hedef fonksiyonu olarak birim enerji maliyeti seçilmiştir. Birim enerji maliyeti \$/kWh cinsinden Fingersh ve ark. (2006)'de tanımlanan maliyet fonksiyonuna göre hesaplanmakta olup enerji üretim miktarı Eşitlik (3.7) ile belirlenmektedir. Algoritmada durdurma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı kullanılmıştır.

Çizelge 3.4 Değişken-hızlı RT'ler için tasarım parametreleri, sınırlar ve değişim aralıkları

Tasarım Parametreleri		Sınırlar	Değişim Aralığı
Bağımsız parametreler	Kule Yüksekliği (h)	$h_{min}-h_{max}$ (giriş parametresi) (20-100m)	DGA-PSO-GA-YAK
	Nominal rüzgâr hızı (u_n)	$u_{n_min}-u_{n_max}$ (giriş parametresi) (10-17 m/sn)	DGA-PSO-GA-YAK
Bağımlı parametreler	Rotor yarıçapı (R)	$\left(\frac{h}{7.711}\right)^{\frac{1}{0.6713}} \leq R \leq \left(\frac{h}{4.56}\right)^{\frac{1}{0.7385}}$	Rasgele
	Nominal Güç (P_n)	$0.3 \leq C_{p_max} \leq 0.4$ $0.5 \rho A u_n^3 C_{p_max}$	Rasgele
	Kapasite faktörü (K_f)	Eşitlik (3.28)	$[k=k(h) \text{ and } c=c(h)]$

3.5.3 Farklı bölgeler için değişken-hızlı rüzgâr türbinlerinin tasarımı

Bölüm 3.2'de farklı optimizasyon metotları ile verilen tasarım algoritması kullanılarak farklı bölgeler için Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinleri tasarlanmıştır. İlk olarak literatürde yaygın şekilde incelenen Güney Avrupa (Akdeniz) ülkeleri için tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu bölgeler için rüzgâr potansiyeli $h=30$ m için $k=1.2$, $c=8$ m/sn (Diveux ve ark., 2001), $h=50$ m için $k=2$, $c=8.5$ m/sn ve yüzeyin pürüzlülük katsayısı $\alpha=0.12$ olarak alınmıştır (Fingersh ve ark., 2006). Optimizasyon algoritması için maksimum iterasyon sayısı ve popülasyon büyüklüğü (NP), DGA için ölçekleme faktörü (F) ve çaprazlama oranı (CR), PSO için öğrenme faktörleri (c_1 , c_2) ve başlangıç ağırlıklandırma oranı (w) ve GA için çaprazlama ve mutasyon oranı (olasılığı) literatürde

kullanılan değerler dikkate alınarak deneme yöntemine göre belirlenmiştir. Tasarım parametrelerinin değişimi ve bölgeler için elde edilen sonuçlar literatürde verilen RT'lere göre kontrol edilerek DGA için $F=CR=0.8$, PSO için $c_1=c_2=2$ ve $w=0.9$, GA için çaprazlama olasılığı 0.6, mutasyon olasılığı 0.1, ve metotlar için $NP=60$ ve maksimum iterasyon sayısı 300 değerlerinin bu problem için uygun olduğu görülmüştür. Metotlar kullanılarak oluşturulan tasarım algoritmaları MATLAB programında (Matlab, 2010) kodlanarak çalıştırılmıştır.

Çizelge 3.5'de Güney Avrupa bölgesi için tasarlanan RT parametreleri, güç, enerji ve maliyet değerleri verilmiştir. Literatürde bu bölge için yapılan tasarım optimizasyonu ile elde edilen sonuçlar da çizelgede verilmektedir. Çizelgeden görüleceği üzere dört farklı metot kullanılarak tasarlanan RT'ler tasarım parametreleri ve performans açısından tamamen uyumdadır. Diğer taraftan tasarlanan RT'lerin Referans Diveux ve ark. (2001)'de verilen RT ile kıyaslandığında Birim Enerji Maliyeti ve/veya yıllık enerji üretim miktarı açısından daha avantajlı olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca Diveux ve ark. (2001)'de Çizelge 3.1'de verilen Lineer model (M_1) kullanılmıştır. Dolayısıyla enerji üretim miktarı, maliyet vb. hesaplamalar yaklaşık olarak belirlenerek tasarım gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan tasarlanan RT'ler, Eminoglu ve Ayasun (2014)'de aynı bölge için tasarlanan RT ile karşılaştırıldığında tasarım parametreleri değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Üretilen enerji miktarı ve birim enerji maliyeti açısından karşılaştırıldığında ise Eminoglu ve Ayasun (2014)'de önerilen RT'nin biraz daha avantajlı olduğu görülmektedir. Fakat Eminoglu ve Ayasun (2014)'de yapılan tasarım optimizasyonunda türbin kapasite faktörü bağımsız değişken, nominal rüzgâr hızı bağımlı değişken olarak alınmıştır. Nominal rüzgâr hızı değerindeki artış kapasite faktörü değerini azaltırken türbin nominal gücü değerini arttırmaktadır. Diğer taraftan, üretilen yıllık enerji miktarı ve sonucunda birim enerji maliyeti kapasite faktörü ve nominal güç değeri ile elde edilmektedir. Dolayısıyla rüzgâr türbinlerinin tasarım optimizasyonunda nominal rüzgâr hızının bağımsız değişken olarak alınması tasarım optimizasyonunun gerçekçiliği açısından daha uygundur. Ayrıca rotor verimliliği rüzgâr hızı arttıkça azalmaktadır. Şekil 3.9'den görüleceği üzere pratikte kullanılan RT'lerin gerçek güç eğrileri incelendiğinde nominal rüzgâr hızı değerinde rotor verimliliği değerinin 0.4 ve daha düşük değerlerde alınmasının daha doğru bir yaklaşım olduğu görülmektedir. Bu nedenle, her ne kadar daha düşük performansa sahip olsa da kullanılan güç eğrisi modeli

ve tasarım kurgusu dikkate alındığında tasarlanan RT'lerin Eminoglu ve Ayasun (2014)'de tasarlanan RT'ye nazaran daha gerçekçi olduğunu söylemek mümkündür.

Çizelge 3.6'de $h=50$ m referans yükseklikte $k=2$ ve $c=8.5$ m/sn rüzgâr potansiyeli için üç metot kullanılarak tasarlanan RT'ler ve bu bölge için Fingersh ve ark. (2006)'de NREL (National Renewable Energy Laboratory) tarafından tasarlanan RT parametreleri verilmektedir. Çizelgeden görüleceği üzere üç farklı metot kullanılarak tasarlanan RT ile referans RT için tasarım parametreleri ve maliyet büyük oranda uyushmaktadır. Diğer taraftan tasarlanan RT'lerin türbin kapasite faktörü ve sonucunda yıllık enerji üretimi açısından biraz daha avantajlı olduğu görülmektedir. Ayrıca Fingersh ve ark. (2006)'de yapılan tasarımda Eşitlik (3.1)'de verilen klasik yöntem ile türbin çıkış gücü; rotor verimliliğinin rüzgâr hızına göre değişimi kullanılarak belirlenmiştir. Tasarım çalışmalarında özelliklede popülasyon tabanlı optimizasyon algoritması ile yapılan tasarımlarda çok sayıda değişik güçte RT'ler değerlendirildiğinden her bir RT için güç eğrisinin oluşturulmasında gerçekçi olarak rotor verimliliğinin kullanımı mümkün değildir. Dolayısıyla verilen tasarım algoritmasının kullanılan güç eğrisi modeli ve tasarım algoritmasının gerçekçi sonuçlar vermesinin yanı sıra kullanım açısından da büyük kolaylık sağladığını söylemek mümkündür.

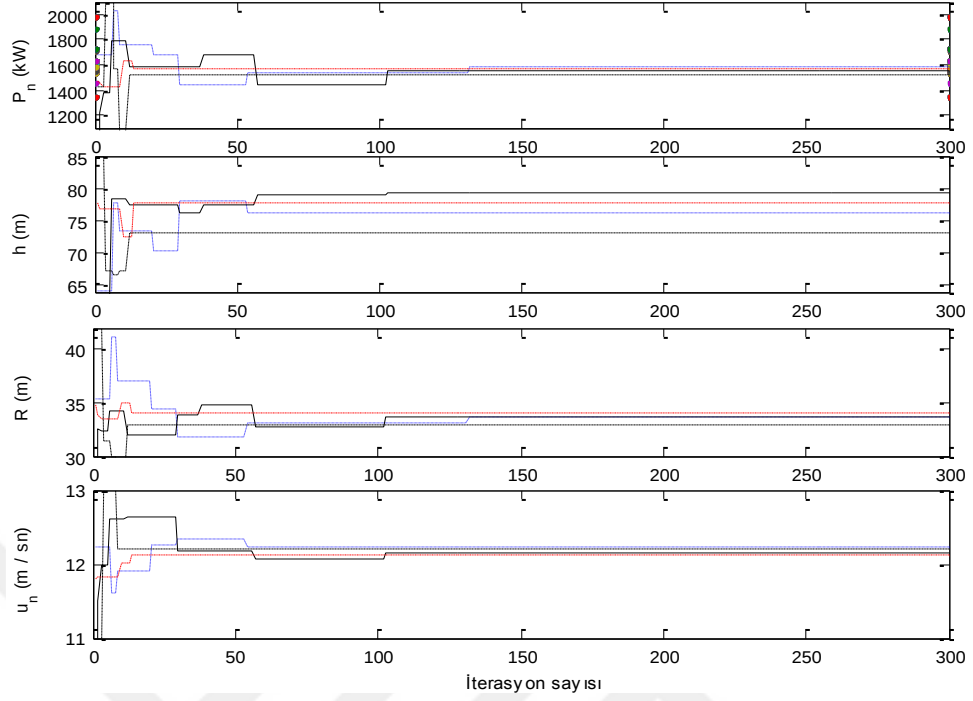
Çizelge 3.5 $h=30$ m de $k=1.2$ ve $c=8$ m/sn için tasarlanan RT'lerin tasarım büyüklükleri, enerji ve maliyet

Tasarım Parametresi	p	D (m)	h (m)	u_n (m/sn)	P_n (kW)	KF	P_o (kW/yıl)	YEÜ (kWh)	BEM (\$/kWh)
Tasarlanan RT (DGA)	3	67.1	79	12.15	1553	0.437	679	5.79×10^6	0.039
Tasarlanan RT (PSO)	3	67.2	76	12.22	1583	0.431	684	5.82×10^6	0.039
Tasarlanan RT (GA)	3	67.8	78	12.11	1572	0.437	688	5.86×10^6	0.039
Tasarlanan RT (YAK)	3	66	73	12.21	1514	0.429	650	5.53×10^6	0.039
(Diveux ve ark., 2001)	3	30	30	14.00	1000	0.349	349	2.97×10^6	0.039
(Eminoglu ve Ayasun, 2014)	3	64.2	73.5	12.40	1705	0.488	771	6.57×10^6	0.037

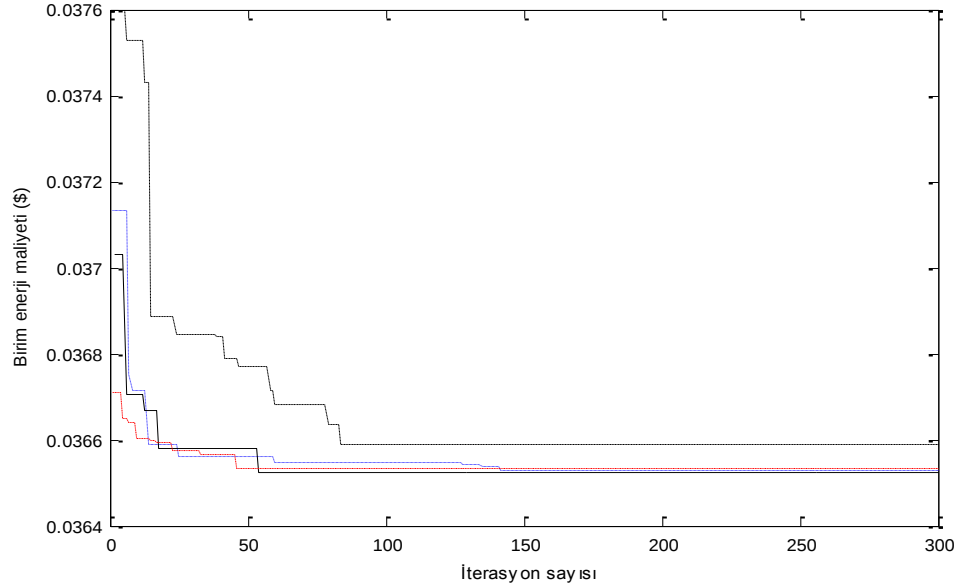
Çizelge 3.6 $h=50$ m de $k=2$ ve $c=8.5$ m/sn için tasarlanan RT’lerin tasarım büyüklükleri, enerji ve maliyet değerleri

Tasarım Parametresi	P	D (m)	h (m)	u_n (m/sn)	P_n (kW)	KF	P_o (kW/yıl)	YEÜ (kWh)	BEM (\$/kWh)
Tasarlanan RT (DGA)	3	71.6	82	11.48	1492	0.530	791	6.74×10^6	0.036
Tasarlanan RT (PSO)	3	72.4	81	11.38	1477	0.533	788	6.71×10^6	0.036
Tasarlanan RT (GA)	3	71.2	82	11.47	1462	0.528	772	6.57×10^6	0.036
Tasarlanan RT (YAK)	3	73	76	11.32	1482	0.529	784	6.68×10^6	0.036
(Fingersh ve ark., 2006)	3	70	65	11.39	1500	0.511	767	6.53×10^6	0.036

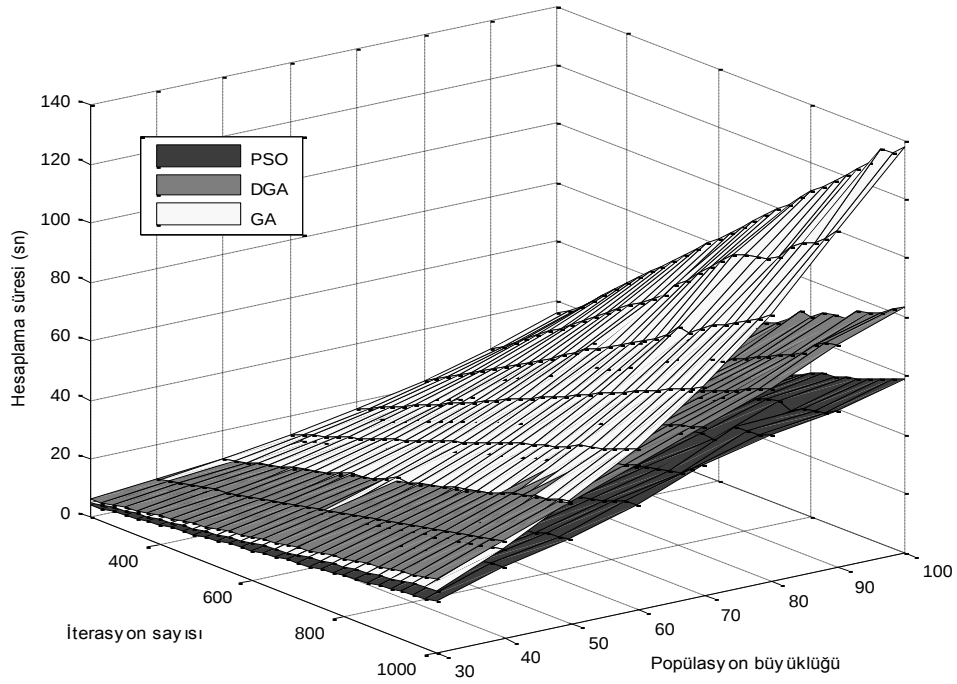
Analizler için optimizasyon algoritması i5-4590, 3.3-GHz işlemci ve 8 GB/3.3-GHz RAM hafıza özelliklerine sahip bilgisayarda çalıştırılmıştır. Verilen optimizasyon metotları kullanılarak Güney Avrupa bölgesi için farklı optimizasyon metotları ile yapılan tasarım optimizasyonunda tasarım parametreleri değerlerinin değişimi Şekil 3.12’de verilmiştir. Benzer şekilde Çizelge 3.6 ile verilen NREL bölgesi için yapılan tasarım optimizasyonu için hedef (amaç) fonksiyonu Birim Enerji Maliyetinin iterasyon sayısı ile değişimi Şekil 3.13’de verilmiştir. Hesaplama süresi açısından Matlab ortamında (Matlab, 2010) DGA temelli algoritmanın 300 iterasyonu 10.2 saniye civarında, PSO temelli algoritmanın 10.9 saniye civarında, GA temelli algoritmanın ise 12.4 saniye civarında tamamladığı görülmüştür. Diğer taraftan YAK algoritması için arı (koloni) sayısının en uygun çözüme ulaşma ve hesaplama süresi açısından algoritmanın performansını önemli derecede etkilediği görülmüştür. Örneğin işçi veya gözcü arı sayısı $NP=5$ için 300 iterasyonun 6.5 saniyede tamamlanmasına rağmen uygulamaların bir çoğunda uygun çözüme ulaşılamadığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan işçi veya gözcü arı sayısı $NP=10$ için hesaplama süresinin 21 saniye civarında olduğu ve elde edilen çözümlerin önemli oranda değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Yapılan analizler ile YAK algoritmasının bu tip kısıtlamalı optimizasyon problemi için kullanılan diğer algoritmalar ile kıyaslandığında yetersiz/elverişsiz olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.11 Güney Avrupa bölgesi için yapılan tasarım optimizasyonunda tasarım parametrelerinin en uygun değerinin iterasyon sayısına göre değişimi (—DGA, — PSO, —GA, —YAK)



Şekil 3.12 Algoritmalar için amaç fonksiyonunun en uygun değerinin iterasyon sayısına göre değişimi (—DGA, — PSO, —GA, —YAK)



Şekil 3.13 Metotlar için hesaplama sürelerinin optimizasyon parametrelerine göre değişimi

Eminoglu, (2016)'de metasezgisel algoritmaların en uygun değerinin iterasyon sayısına göre değişim analizleri yapılmıştır. YAK algoritması dışında diğer optimizasyon metotları için performans analizi popülasyon büyüklüğü 30 ile 100 arasında değiştirilerek iterasyon sayısının 250 ile 1000 arasında 25'er adımlarla değiştirilerek verilmektedir. Yapılan tasarım optimizasyonları sonucunda elde edilen metotların hesaplama sürelerinin değişimi Şekil 3.13'de verilmiştir (Eminoglu, 2016). Şekilden PSO algoritmasının tüm durumlar için daha düşük sürede sonuca ulaştığı ve en iyi performansa sahip olduğu görülmektedir. Her ne kadar popülasyon büyüklüğünün düşük değerleri için GA'ya nazaran daha yüksek sürede sonuca ulaşsa da genel anlamda DGA algoritmasının ikinci en iyi performansa sahip olduğu görülmektedir. Diğer taraftan GA'nın performansının popülasyon büyüklüğü ve iterasyon sayısına daha fazla bağımlı olduğu ve sonucunda hesaplama süresinin daha fazla oranda arttığı görülmektedir. Değişken (parametre) sayısı, popülasyon büyüklüğü, tasarım değişkenleri arasında tanımlanan eşitsizlik kısıtlamaları ve maliyet fonksiyonu dikkate alındığında DGA ve PSO metotlarının bu tip problem için uygulanabilme, en uygun çözüme ulaşabilme ve performans açısından elverişli olduğunu söylemek mümkündür. Bu nedenlerden dolayı paketin tasarım

optimizasyonu bölümünde bu iki optimizasyon metodu ile oluşturulan tasarım algoritmalarının kullanımının uygun ve yeterli olacağı sonucuna varılmıştır (Eminoglu, 2016).

3.5.4 Sabit Hızlı RT'lerin Tasarım Optimizasyonu

Sabit hızlı rüzgâr türbinleri basit, düşük maliyetli, sağlam, güvenilir olmalarından dolayı 90'lı yıllarda yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Bu tip RT'ler çok kademeli dişli kutulu, standart sincap kafesli asenkron jeneratörlü, şebekeye direkt bağlanan rüzgâr türbinleridir. Nominal rüzgâr hızında, nominal güce ulaşmakta ve sabit nominal devir de çalıştırılmaktadır. Bu tip RT'lerin tasarımı Bölüm 3.10'de uygunluğu tespit edilen Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) (Storn ve Price, 1997) ve Parçacık Sürüşü Optimizasyon (PSO) metodu (Kennedy ve Eberhart, 1995) algoritması kullanılmıştır. Bu iki farklı optimizasyon metodu ile verilen algoritmada türbin gücü (P_n) bağımsız parametre olarak alınmakta kule yüksekliği (h), rotor yarıçapı (R), türbin devir sayısı (N) ve türbin tasarım rüzgâr hızı (U_{tas}) bağımsız parametreler olarak alınmaktadır. Türbin gücüne ait bireyler başlangıçta Çizelge 3.7'de verildiği üzere sınır değerler arasında rastgele üretilmektedir. Diğer tasarım parametrelerinden rotor yarıçapı (R); her bir P_n bireyi için Eşitlik (3.26) ile hesaplanarak $\pm\%5$ sınırları içinde rastgele oluşturulan birey ile belirlenmektedir. Kule yüksekliği (h) ise Eşitlik (3.24) ve Eşitlik (3.25)'e göre sınır değerler belirlenerek yeni bireyler tanımlanmakta ve bunlardan biri rastgele seçilmektedir. Benzer durum türbin nominal devir sayısı (N) için de geçerlidir. Eşitlik (3.27) ile belirlenen devir sayısının $\pm\%10$ sınırları içinde oluşturulan bireylerden biri rastgele seçilerek N bireyleri oluşturulmaktadır. Türbin tasarım rüzgâr hızı (u_{tas}) için bireyler her bir R , N ve giriş parametresi olarak kullanılan kanat uç hızı oranı sınırları (λ_{min} , λ_{max}) kullanılarak elde edilen sınır değerler arasında üretilen rastgele bireylerden biri seçilerek oluşturulmaktadır. Türbin kapasite faktörü her bir h bireyleri için elde edilen Weibull parametreleri (k , c) Eşitlik (3.11)'de kullanılarak belirlenmektedir. Burada RT çıkış gücü Eşitlik (3.19)'de verilen rotor verimliliği için geliştirilen model Eşitlik (3.1)'de kullanılarak elde edilmektedir. Geliştirilen modelde C_{p-max} değeri Eşitlik (3.23) ile belirlenmektedir. Bu işlemler algoritmada her iterasyon için tekrar edilerek bağımsız parametreye ait bireyler (P_n değerleri) optimizasyon metotları (Eşitlik 3.29 ve 3.31) ile aday bireylere göre yenilenmektedir. Algoritmada hedef fonksiyonu olarak birim enerji

maliyeti seçilmiştir. Birim enerji maliyeti \$/kWh cinsinden Fingersh ve ark. (2006)'de tanımlanan maliyet fonksiyonuna göre hesaplanmakta olup enerji üretim miktarı Eşitlik (3.7) ile belirlenmektedir. Algoritmada durdurma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı kullanılmıştır.

DGA ile tasarım optimizasyonu

Geliştirilen algoritmanın anlaşılabilirliği açısından tasarım parametreleri ve bunlara ait ilişkiler Çizelge 3.7'de özetlenmiş, tasarım algoritması adım adım aşağıda verilmiştir.

Adım 1: Durdurma kriteri için maksimum iterasyon sayısı, ölçekleme faktörü (F), çaprazlama oranı (CR) ve popülasyon büyüklüğü (NP) değerini gir.

Adım 2: Bölge için referans yükseklik (h_0) ve Weibull parametrelerini (k_0 ve c_0) gir, rakım ortalama sıcaklık değerine göre hava yoğunluğu (ρ) değerini hesapla.

Adım 3: Çizelge 3.7'de verildiği üzere başlangıç popülasyonlarını (x_{ij}) oluştur (P_n sınırlar dâhilinde rastgele, diğer parametreler için verilen kısıtlamaları kullan).

Adım 4: Maksimum iterasyon sayısı tamamlanıncaya kadar aşağıdaki işlemleri her bir iterasyon için tekrar et.

- Bireyler (x_{ij}) için rastgele birbirinden farklı üç birey (x_r) oluştur.
- Rastgele bir index (R) oluştur, $R \in \{1, 2, \dots, NP\}$, (NP: popülasyon büyüklüğü).
- Aşağıdaki şekilde aday bireyleri ($v_{ij,t+1}$) oluştur:
 - Her bir i için 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı üret, $r_i \equiv U(0, 1)$, Eğer $r_i < CR$ veya $i=R$ ise $v_{ij,t+1}$ bireyini Eşitlik (3.29) ile oluştur. Aksi durumda mevcut bireyi kullan, $v_{ij,t+1} = x_{ij,t}$.
 - Oluşturulan aday bireylerin ($v_{ij,t+1}$) Çizelge 3.7'e göre sınırlarını kontrol et ve diğer parametreler için bireyleri kısıtlamaları kullanarak oluştur.
 - Aday bireyleri ($v_{ij,t+1}$) hedef fonksiyonunda değerlendir. Eğer $f(v_{ij,t+1}) < f(x_{ij,t})$ ise mevcut bireyi aday birey ile değiştir, $x_{ij,t+1} = v_{ij,t+1}$.
- Oluşturulan yeni bireyleri ($x_{ij,t+1}$) hedef fonksiyonunda değerlendir. En düşük maliyeti veren bireyleri en iyi çözüm olarak sakla, $x_c = x_{ij,t+1}$.

PSO ile tasarım optimizasyonu

Bölüm 3.5.4.1’de olduğu gibi PSO ile sabit hızlı RT’ler için tasarım parametreleri, sınır ve değişim aralıkları Çizelge 3.7’de verilmektedir. Rotor yarıçapı, kule yüksekliği, rotor devir sayısı ve tasarım rüzgâr hızı gibi büyüklüklerin Eşitlik (3.26) ve Eşitlik (3.27)’deki gibi hesaplanarak çizelgedeki aralıkta rastgele seçilmektedir. PSO ile tasarım algoritmaları aşağıda adım adım gösterilmektedir:

Adım 1: Durdurma kriteri için maksimum iterasyon sayısı ($iter_{max}$), öğrenme faktörü (c_1 ve c_2), eylemsizlik ağırlığının (w) başlangıç değeri ve popülasyon büyüklüğü (NP) değerini gir.

Adım 2: Bölge için referans yükseklik (h_0) ve Weibull parametrelerini (k_0 ve c_0) gir, rakım ortalama sıcaklık değerine göre hava yoğunluğu (ρ) değerini hesapla.

Adım 3: Çizelge 3.7’de verildiği üzere başlangıç popülasyonlarını (p_{ij}) oluştur (h ve u_r sınırlar dâhilinde rastgele, diğer parametreler için verilen kısıtlamaları kullan).

Adım 4: Maksimum iterasyon sayısı tamamlanıncaya kadar aşağıdaki işlemleri her bir iterasyon için tekrar et.

- Bireylerin ($p_{ij,t}$) mevcut pozisyonunu amaç fonksiyonu (birim enerji maliyeti) için değerlendir.
- Eğer $f(p_{ij,t}) < f(p_{ij,t-1})$ ise bireyin en iyi pozisyonunu değiştir, $pbest_{ij}=p_{ij,t}$.
- Bireylerin en iyi pozisyonlarını ($pbest$) karşılaştırarak içlerindeki en iyi pozisyona sahip bireyleri çözüm olarak ata, $gbest_{ij,t}=f(pbest_{ij,t})_{min}$.
- Eşitlik (3.31) ile bağımsız parametre (türbin gücü) için aday bireyleri ($p_{ij,t+1}$) oluştur.
- Oluşturulan aday bireylerin ($p_{ij,t+1}$) Çizelge 3.7’de verildiği üzere sınırlarını kontrol et ve diğer parametreler için bireyleri tanımlanan kısıtlamalara göre oluştur.
- İterasyon sayısını bir arttır, $t=t+1$. Eğer $t \leq iter_{max}$ ise Adım 4’e git değil ise Adım 5’e git.

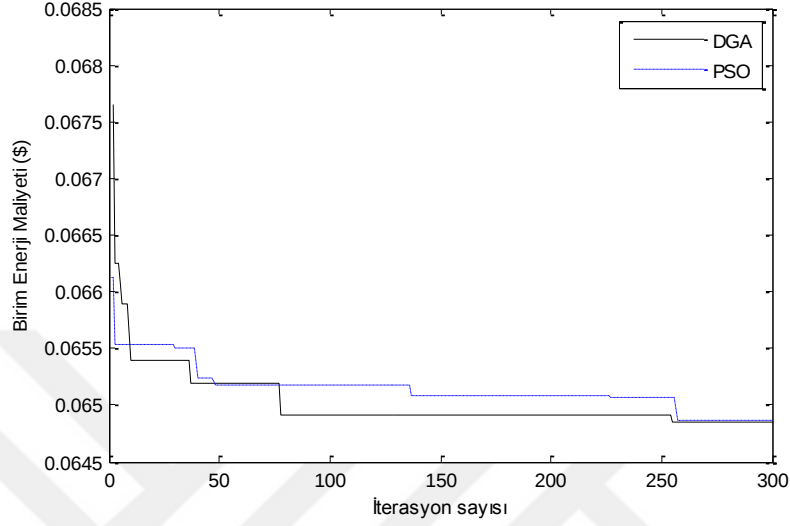
Adım 5: En iyi çözüm olarak $gbest_{ij,t}$ ’yi kullan, $p_c=gbest_{ij,t}$.

Çizelge 3.7 Sabit-hızlı RT’ler için tasarım parametreleri, sınırlar ve değişim aralıkları

Tasarım Parametreleri	Sınırlar	Değişim Aralığı
Türbin gücü (P_n)	$P_{min}-P_{max}$ (giriş parametresi)	DGA-PSO
Bağımlı parametreler	Rotor yarıçapı (R)	$0.95 \times \text{Eşitlik (3.26)} \leq N \leq 1.05 \times \text{Eşitlik (3.26)}$ Rasgele
	Kule yüksekliği (h)	$4.56 \times R^{0.7385} \leq h \leq 7.711 \times R^{0.6713}$ Rasgele
	Rotor devir sayısı (N)	$0.9 \times \text{Eşitlik (3.27)} \leq N \leq 1.1 \times \text{Eşitlik (3.27)}$ Rasgele
	Tasarım rüzgâr hızı (u_{tas})	$\frac{Rw_r}{\lambda_{max}} \leq u_{tas} \leq \frac{Rw_r}{\lambda_{min}}$ Rasgele

Oluşturulan algoritmalar $k=2$, $c=6$ m/sn, $h_o=30$ m ve $\alpha=0.12$ değerlerine sahip Kuzey Avrupa bölgesi için (Diveux ve ark., 2001) uygulanarak geçerliliği test edilmiştir. Metotlar kullanılarak oluşturulan tasarım algoritması Matlab programında (CFT, 2010) kodlanarak çalıştırılmıştır. Tasarımlar kanat açısının kontrolü varsayımı için yapılmış ve sonuçlar Diveux ve ark. (2001)’de bu bölge için tasarlanan RT ile kıyaslanarak Çizelge 3.8’de verilmiştir. Ayrıca tasarım kurgusu ve tanımlanan kısıtlamaların geçerliliğini test etmek amacıyla türbin gücü referans RT gücüne eşit alınarak aynı bölge için elde edilen optimizasyon sonuçları çizelgede son sütunlarda verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere RT gücünün kurulu türbin gücüne eşit ve sabit alınması durumunda diğer tasarım büyüklükleri (hub yüksekliği, rotor yarıçapı, devir sayısı vb.) uyuşmaktadır. Diğer taraftan tasarlanan RT’lerin Diveux ve ark. (2001)’de verilen RT ile kıyaslandığında Birim Enerji Maliyeti ve yıllık enerji üretim miktarı açısından daha avantajlı olduğunu söylemek mümkündür. Dolayısıyla, tasarım büyüklükleri arasında tanımlanan kısıtlamaların ve yapılan optimizasyon analizinin güvenilir olduğunu seçilen bölgenin rüzgâr ve coğrafik durumu göz önüne alınarak olası en düşük maliyet ve yüksek verimde RT tasarımına imkan sağladığını söylemek mümkündür. Buna ilaveten rotor verimliliği hesabı için geliştirilen yeni modelin tasarım rüzgâr hızının belirlenmesine imkan sağlayarak optimizasyon çalışmaları için çok elverişli olduğu görülmektedir. Her iki metot kullanılarak yapılan tasarım optimizasyonunda hedef (amaç) fonksiyonunun iterasyon sayısına göre değişimi Şekil 3.14’de verilmiştir. Şekilden her iki optimizasyon metodu ile yapılan tasarımda amaç fonksiyonu için aynı değere yakınsandığı

görülmektedir. Sonuç olarak geliştirilen algoritmaların proje çıktısı olan Analiz ve Tasarım Optimizasyonu paketinde sabit hızlı RT'ler için kullanıma elverişli olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 3.14 Algoritmalar için amaç fonksiyonunun en uygun değerinin iterasyon sayısına göre değişimi

Çizelge 3.8 $k = 2$, $c = 6 \text{ m.s}^{-1}$, $h_o = 30 \text{ m}$ ve $\alpha=0.12$ değerleri için optimizasyon sonuçları ve kurulu RT parametreleri

Tasarım Parametreleri	(Diveux ve ark., 2001)	RT DGA	RT PSO	RT DGA ($P_n=660\text{kW}$)
n	3	3	3	3
D (m)	47	65	63.4	51.4
H_{hub} (m)	60	76	77	66
N (rpm)	26	18.3	18.5	22
U_{tas} (m/sn)	8	8.9	8.9	8.3
P_n (kW)	660	999	949	660
YEÜ (kWh)	1.30×10^6	2.46×10^6	2.34×10^6	1.53×10^6
Birim Enerji Mal. (\$cent)	7.12	6.49	6.49	6.6
Kapasite Faktörü	0.23	0.29	0.29	0.27
Opt. kanat uç hızı oranı	7.99	6.98	6.94	6.99
RTS ortalama gücü (kW/yıl)	153.4	289	275	180
Kontrol tipi	Pitch	Pitch	Pitch	Pitch

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. C# Programlama Dilinde Arayüz Tasarımı

20. yüzyılın ortalarında başlayıp günümüzde kullanılan yazılım alanında her geçen gün yeni gelişmeler olmaktadır. Bu duruma paralel olarak programlama insan hayatının hemen hemen her alanında önemli bir yere gelmiştir. İnsan hayatını kolaylaştıran birçok üründe programlama kullanılmaktadır.

.NET Framework Sınıf Kütüphanesi (Class Library), Çalıştırma Motoru (Common Language Runtime, CLR) kısımlarından oluşmaktadır. BCL (Base Class Library), .NET ortamında hazır olarak kullanılabilecek hazır kütüphanelerdir ve giriş-çıkış işlemleri, arayüz, veri tabanı gibi birçok işlem için gerekli sınıfları içerir. .NET Framework farklı programlama dillerini aynı ortamda toplama imkanı sağlamaktadır. .NET uygulamaları ASP.NET, Windows formları ve konsol uygulamaları şeklinde sınıflandırılabilir. CLR, .NET ortamında uygulamaları çalıştıran ve içerisindeki nesne yönetimleri, kod güvenliği, hata ayıklama ve bellek yönetimi gibi birçok alanda yapılan işlemler Framework' ün bu kısmı ile yönetilir (Demirli ve İnan, 2015).

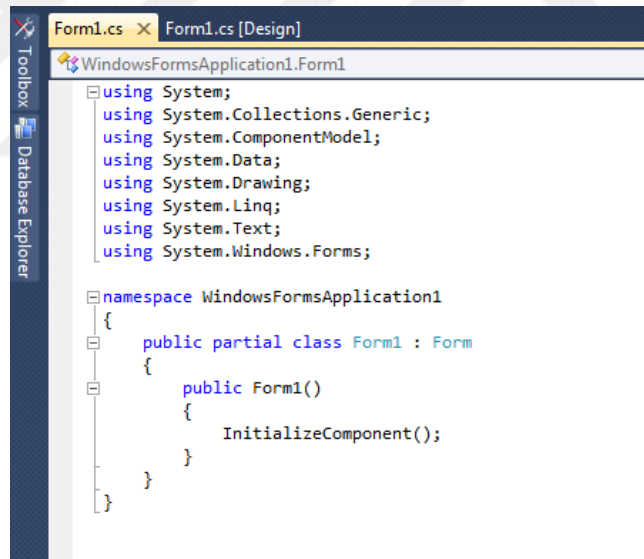
CLR ile uyumlu farklı diller ile aynı çatı altında uygulamaların geliştirilmesi bazı avantajlar sunmaktadır. Farklı dillerde yazılan kodun derlendikten sonra üretilen kod kullanılan programda bağımsız olarak çalışır ve MSIL (Microsoft Intermediate Language) olarak adlandırılır (Demirli ve İnan, 2015).

FCL (Framework Class Library) uygulamaları kısa kodlar halinde yazılması ve böylece uygulamaları kolay ve hızlı geliştirilmesini sağlayan kütüphaneler topluluğudur. Kendi içerisinde isim uzaylarından (Namespace) oluşmaktadır. İsim uzayları proje referans dosyası olarak kullanılır ve Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi “using” komutuyla kullanılır. (Algan, 2016)

ADO.NET (ActiveX Data Object for .NET) veri kaynakları arasındaki bağlantı sağlayan sınıfları içermektedir. System.Data içerisindeki isim uzayları: (Algan, 2016, Koymaz, 2013, Jesse, 2002; Demirli ve İnan, 2015; Aktaş, 2016).

- Microsoft.SqlServer.Server

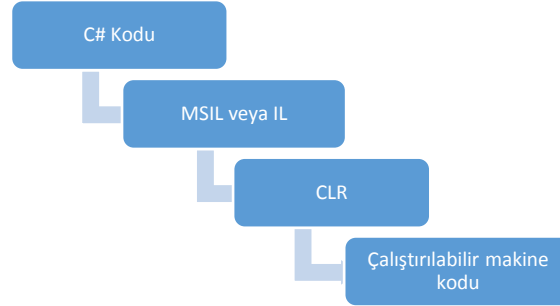
- System.Data
- System.Data.Common
- System.Data.Odbc
- System.Data.OleDb
- System.Data.Sql
- System.Data.SqlClient
- System.Data.SqlTypes
- System.Xml



Şekil 4.1 Windows formu Form1.cs dosyası

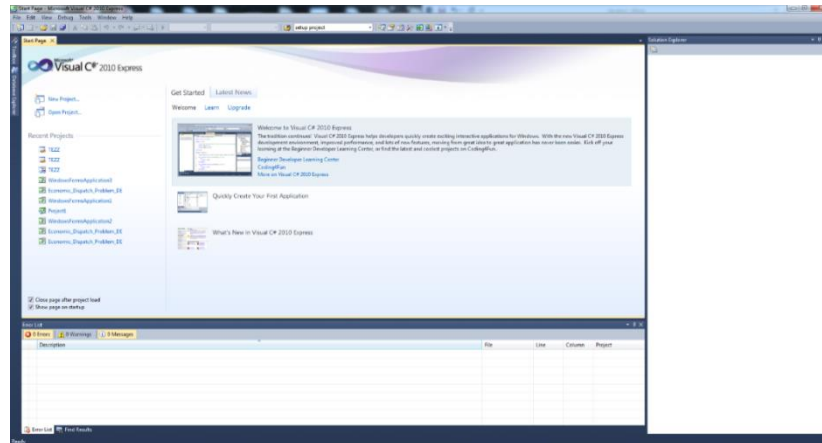
Şekil 4.2’ de görüldüğü gibi programın evreleri kaynak program yazma işlemi ile başlamaktadır. İkinci kısımda derleme ile bilgisayarın anlayabileceği bir ara dile dönüşmektedir. Bu kod programlama diline göre değişiklik gösterebilir. Örneğin, C dilinde obj kodları, java dilinde bytecode kodları kullanılırken C# dilinde ise IL(Intermediate Language) şeklindedir. Programın çalıştırılabilmesi için kullanılan

işletim sisteminin anladığı dile dönüştürülmesi gerekmektedir (Algan, 2016, Koymaz, 2013, Jesse, 2002).

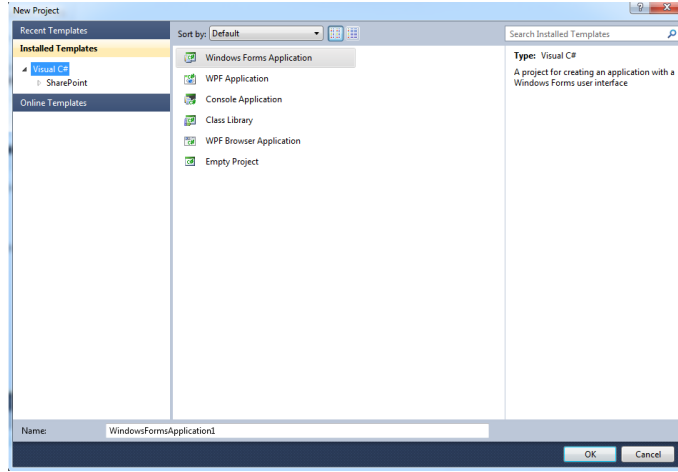


Şekil 4.2 NET derleme ve çalıştırma sistemi

Şekil 4.3’de *windowsformsapplication* sayfası görülmektedir. Bu sayfa aracılığı ile yeni bir proje dosyası, kayıtlı bir proje dosyasının açılması vb. işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Yeni proje açma işlemi Şekil-4.4’de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, birçok proje ögesi bulunmaktadır. Önemli birkaç proje ögesi Windows formu, Explorer form, MDI patent form, oturum açma formudur. Uzantıları farklı olan bu proje ögeleri farklı amaçlar için kullanılabilir. Örneğin; dataset bir dosya olan xml şeması oluşturmak için kullanılır ve uzantısı *.xsd* şeklindedir.

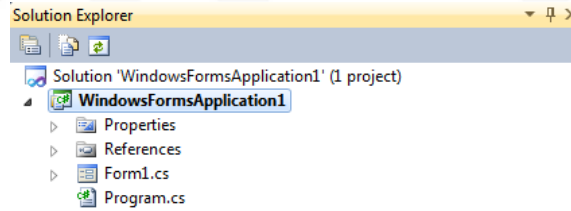


Şekil 4.3 Microsoft visual C# 2010 başlama sayfası

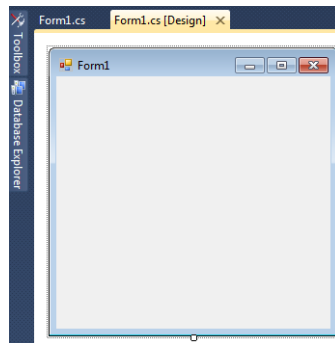


Şekil 4.4 Yeni proje dosyası açma ekranı

Windows tabanlı uygulamalar oluşturmak için Windows formu kullanılmaktadır. Şekil 4.4’ de Windows formu açıldığında proje dosyalama kısmı görülmektedir. Bir proje Şekil 4.5’ dan görüldüğü gibi properties, references, form1.cs ve program.cs dosyalarından oluşmaktadır. Şekil 4.6’ da form1.cs arayüz tasarım penceresi görülmektedir.

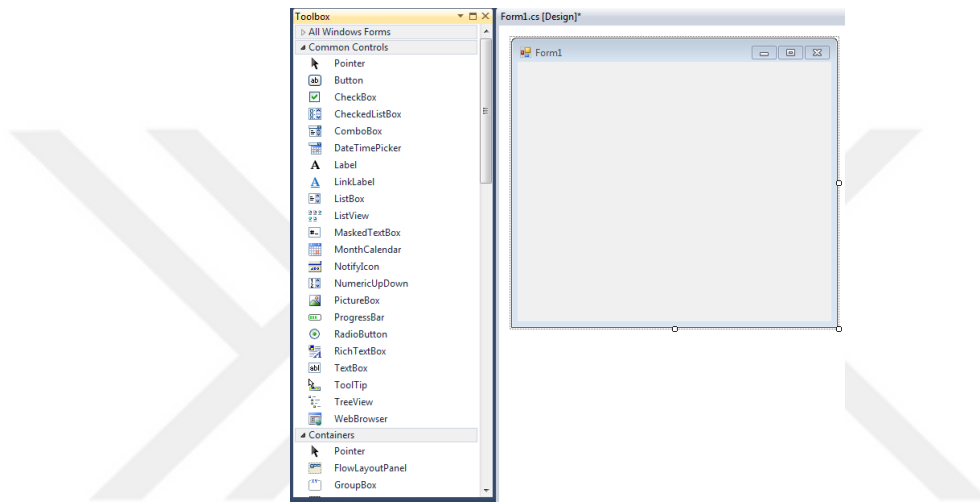


Şekil 4.5 Windows formu dosyalama kısmı (Solution explorer)



Şekil 4.6 Windows formu form1.cs Design dosyası

C # da arayüz oluşturabilmek için ilk olarak bir proje dosyası oluşturulmalıdır. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi form dosyası açılarak toolbox kısmındaki araçları sürüklemekle işlemiyle formda istenilen yere götürülerek kod içeriğini yazmadan arayüz tasarımı yapılmış olur. Kullanılması gereken label, button, textbox vs. form dosyasına kaydırılma işleminden sonra kodu yazmamız gereken toolbox elemanına çift tıklayarak kod sayfasına geçebiliriz.



Şekil 4.7 Form ile toolbox ekranı

TextBox, özellikle değeri kullanıcıya göre değişebilen verilerin girişi için kullanılır. Ayrıca bu nesne ile program içerisindeki değerler (yazılar, sayılar vb.) gösterilebilir. Textbox özelliklerinden *Size* 46;20 olarak alınmıştır. Label, değeri sabit kalıp değişmeyecek verilerin görüntülenmesi ve ayrıca form sayfasında açıklama için kullanılır. Pakette, *font* 8,25 pt. ve *forecolor* tanımlar için Control Text, sonuçlar için Red seçilmiştir. Button, bir olayı veya döngüyü gerçekleştirmek için kullanılan form nesnesidir. *BackColor* 255;192;128 ve *Size* 75;23 kullanılmıştır. Şekil işlemleri için chart kullanılmıştır. Chart özelliklerinden *palette chocolate*, *series.charttype spline*, *series.labelbackcolor white* ve *series.color red* olarak seçilmiştir. Radiobutton birden fazla seçimli işlem için kullanıcı tarafından değiştirilebilecek form elemanı olarak kullanılmıştır. *RadioButton5.Checked* kodu ile kontrol sağlanır ve doğrulanan kod değeri 1 (true) olur (Algan, 2016; Koymaz, 2013; Jesse, 2002).

Windows uygulamaları windows kontrollerin tutulduğu pencerelerden oluşmaktadır. Windows projesi açıldığında form kontrolü otomatik olarak form1 adında eklenir. İkinci bir form eklemek için proje menüsü ile form seçilir. Böylece farklı tasarım sayfalarında geçişler yapılabilir. Örneğin radioButton1 aktif iken form5' e geçiş için aşağıdaki kod kullanılmaktadır (Algan, 2016; Koymaz, 2013; Jesse, 2002) :

```
if (radioButton1.Checked == true)
{
    Form5 a = new Form5();
    a.Show();
    this.Hide();
}
```

4.2. Rüzgâr Türbini Sistemleri Analiz ve Tasarım Optimizasyonu Paket (RTAOP) Programının Geliştirilmesi

Bu tezde Rüzgâr Türbinlerinin (RT) 'lerin kurulacağı bölgenin coğrafik özellikleri ve rüzgâr potansiyeli kullanılarak enerji ve maliyet analizi, en düşük maliyette ve en yüksek oranda enerji üretimi için tasarımının gerçekleştirilmesi amacıyla Rüzgâr Türbini Sistemleri Analiz ve Tasarım Optimizasyonu Paketi (RTAOP) geliştirilmektedir. Paketin analiz bölümü ve değişken hızlı rüzgâr türbinleri için tasarım optimizasyonu bölümü sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin tasarımı ve paketin herhangi bir programa gerek kalmaksızın, bölgenin coğrafik özellikleri, rüzgâr potansiyeli gibi büyüklükler ve türbin sistemi için rotor yarıçapı, kule yüksekliği, jeneratör gücü vb. tasarım büyüklükleri kullanılarak tasarlanan veya mevcut kurulu bir RT'nin güç, enerji üretim miktarı ve maliyet analizleri yapılabilmektedir. Paketin tasarım optimizasyonu bölümünde ise sabit hızlı ve değişken hızlı RT'ler için ayrı ayrı tasarım yapılabilmektedir. Yapılan tasarım ile türbin nominal gücü, kule yüksekliği ve rotor yarıçapı (kanat uzunluğu gibi) tasarım büyüklüklerinin yanı sıra RT için nominal rüzgâr hızı, türbin kapasite faktörü vb. gibi tasarım parametrelerinin değerleri de belirlenebilmektedir. Bütün bu parametre ve tasarım büyüklükleri RT'nin kurulması düşünülen bölgenin rüzgâr potansiyeli dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir.

4.2.1. RTAOP Paketinin Geliştirilmesi

Arayüz; programı nesne tabanlı, setup projesiyle işletim sisteminden bağımsız çalışan bir ara koda dönüştürmesinden dolayı C# programlama dili kullanılmıştır. Proje kapsamında geliştirilen paket Şekil 4.8’de verildiği üzere Analiz ve Tasarım Optimizasyonu olmak üzere iki bölümden oluşturulmuştur. Analiz ve tasarım optimizasyonu sabit hızlı ve değişken hızlı RTS’ler için ayrı ayrı yapılabilmektedir. Arayüz de Analiz veya Optimizasyon seçilerek alt sekmeler aktif hale gelmektedir. Analiz bölümünde RT tipi seçilerek *Next* butonu ile Şekil 4.9’de verildiği üzere bilgi giriş ekranı açılmaktadır. Benzer şekilde Tasarım Optimizasyonu için ana ekranda Optimizasyon butonu seçilerek RT tipi sekmeleri aktif hale gelmektedir. Ayrıca optimizasyon algoritmasına ait kullanılan parametreler ekrana yüklenmekte ve bu değerler kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Şekil 4.9’den görüleceği üzere Analiz bölümünde kullanıcı kendi belirlediği coğrafik durum (rakım, ortalama sıcaklık, yüzeyin pürüzlülük katsayısı), yıllık ortalama rüzgâr hızı ve hızdaki standart sapma değeri (veya Weibull parametrelerini), rotor yarıçapı, hub yüksekliği, türbin kurulu gücü, kanat sayısı, kanat uç hızı oranı (veya devir sayısı) ve tasarım rüzgâr hızı, anemometre yüksekliği gibi sabit veya değişken hızlı RT tipine göre uygun tasarım büyüklükleri giriş verileri olarak kullanılmaktadır. Hub yüksekliğindeki rüzgâr hızı veya Weibull parametreleri değeri, Anemometre yüksekliğine göre girilen rüzgâr hızı bölgenin pürüzlülük katsayısı (α) dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Rakım, ortalama sıcaklık gibi coğrafik özellikler RT çıkış gücü hesabında hava yoğunluğunu belirlemede kullanılmaktadır. Enerji Maliyeti (BEM) (Fingersh ve ark., 2006) modeli kullanılarak belirlenmektedir. Bunun için yıllık enerji üretim miktarı RTS’nin ortalama güç değerine göre Eşitlik (3.7) ile hesaplanmaktadır.

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi değişken hızlı RT’lerin optimizasyonunda giriş parametreleri, dizayn ve performans parametreleri ve enerji ve proje maliyet sonuçları birlikte verilmektedir. Ayrıca çıkış gücünün rüzgâr hızına göre, birim enerji maliyetinin iterasyon sayısına göre ve weillbull olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiksel olarak verilmektedir. *Main Page* butonu ile ana pencere sayfasına tekrar dönülebilmektedir.

ANALYSIS AND DESIGN OPTIMIZATION OF WTS

Analysis of WTS

Type of WTS
☐ Fixed-Speed ☐ Variable-Speed

Design Optimization of WTS

Type of WTS
☐ Fixed-Speed ☒ Variable-Speed

Type of Algorithm
☒ DEA ☐ PSO

DEA PARAMETER

Population size (NP)	60
Scaling Factor (F)	0,8
Crossover Ratio (CR)	0,8
Maximum iteration number	300

PSO PARAMETER

Population size (NP)	60
Initial weighting factor (w)	0,9
Acceleration factors (c1=c2)	2
Maximum iteration number	300

NEXT

EXIT

Şekil 4.8 Geliştirilen RTAOP arayüzü ana penceresi

ANALYSIS AND DESIGN OPTIMIZATION OF WTS

Variable-speed WTS

Load Data

Clear

Number of wings : 3
 Rotor radius (m) : 35
 Hub height (m) : 80
 Optimum rotational speed (rpm) : 25
 Optimum tip-speed ratio : 7
 Turbine rated power (kW) : 1500
 Cut-in wind speed (m/s) : 3
 Cut-out wind speed (m/s) : 25
 Rated wind speed (m/s) : 13
 Anemometer height (m) : 30
 Surface friction coefficient : 0,12
 Mean temperature of site (C°) : 15
 Altitude of site (m) : 0
 Mean wind speed (m/s) :
 Standart deviation of wind speed (%) :
 Weibull shape parameter : 1,2
 Weibull scale parameter : 8

Save Data

Run

Output Parameters

Turbine mean power (kW) :	606,83
Annual energy production (10 ⁶ kWh) :	5,168
Turbine capacity factor :	0,405
Design wind speed for max Cp (m/s) :	13,09
Maximum power coefficient of rotor :	0,483
Type of regulation :	Pitch Control
Type of generator :	Variable-Speed
Cost of kWh (\$) :	0,0442
Cost of WTS (10 ⁶ \$) :	1,4391
Cost of project (10 ⁶ \$) :	1,4969

Graphical Analysis

Output Power

Weibull

u (m/sec)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Pu(kw)	24	72	172	347	602	905	1186	1379	1469	1496	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500

Main Page

Şekil 4.9 Değişken hızlı RT'ler için giriş parametreleri ve üretilen güç, enerji ve maliyet analiz sonuçlarının elde edilmesi

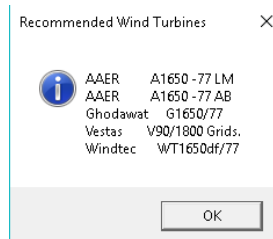
Geliştirilen paketin Tasarım Optimizasyonu bölümünde Şekil 4.8’de verildiği üzere sabit hızlı ve değişken hızlı RTS’ler için ilgili sekme ve optimizasyon algoritması seçilerek tasarım optimizasyonu için bilgi girişi ve optimizasyon sonuçlarının elde edildiği ekrana *Next* butonu ile geçilmektedir. Seçilen Optimizasyon algoritmasının parametreleri kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Şekil 4.9’de değişken hızlı RT’ler için bilgi girişi ve optimizasyon sonuçlarının elde edilmesi gösterilmiştir. Bu tip RT’ler için tasarım optimizasyonu Bölüm 3.5.2’de verilen PSO ve DGA algoritmalarına göre yapılmaktadır. Algoritmada giriş verileri olarak bölgenin coğrafik özellikleri (rakım, sıcaklık, rüzgârın pürüzlülük durumu) ve rüzgâr potansiyeli (ortalama rüzgâr hız, standart sapma değeri veya Weibul parametreleri değeri) alınmaktadır. Bunlara ilaveten kanat uç hızı oranı ve türbin jeneratör gücü (RTS çıkış gücü) sınır değerleri girilmektedir. Rüzgâr ve coğrafik özellikler dikkate alınarak girilen güç ve hız oranı sınırları içerisinde algoritma parametrelerine bağlı olarak çözüm uzayı ve bunlara bağlı olarak ise rotor yarıçapı, hub yüksekliği türbin devir sayısı, tasarım rüzgâr hızı değerleri Çizelge 3.1’de tanımlanan eşitsizlik kısıtlamaları dikkate alınarak oluşturulmaktadır. Oluşturulan ve sonrada yenilenen çözüm uzayı elemanları değerleri için üretilen enerji miktarı ve buna bağlı olarak birim enerji maliyeti hesaplanmakta ve en düşük maliyetli tasarım elemanlarının değerleri belirlenmektedir. Tasarım optimizasyonu sonucunda Şekil 4.9’dan görüleceği üzere RT tasarım elemanlarının (Jeneratör gücü, rotor yarıçapı, hub yüksekliği) en uygun değeri belirlenebilmektedir. Bunların yanı sıra türbün nominal rüzgâr hızı ve kapasite faktörü, ve tüm bu parametrelere göre türbin ortalama gücü, yıllık enerji üretim miktarı, RT kurulum ve işletim maliyetleri, birim enerji maliyeti gibi büyüklükler Fingersh ve ark. (2006)’de verilen BEM modeline göre elde edilmektedir. Tasarlanan değişken hızlı RT için analiz bölümünde olduğu gibi türbün çıkış gücü; Eşitlik (3.13)’ de verilen model ile belirlenmekte, birim enerji maliyetinin iterasyon sayısına göre değişimi ve ayrıca türbin yüksekliğindeki rüzgâr hızının Weibull dağılımı grafiksel olarak elde edilebilmektedir.

	File name	Blade number	Rotor radius	Hub height	Rot. speed	Tip speed ratio	Rated power	U _{ci}	U _{co}	Rated wind speed	Anemometer height	Surface friction
	1000 kW	3	25	65	27	7	1000	3	25	12	30	0,12
▶	1500 kW	3	35	80	25	7	1500	3	25	13	30	0,12

Load Data Save Data Sample Name: Sample Turbine Data Main Page

Şekil 4.10 Load ve save data butonu ile giriş değerlerinin yükleme ve kaydetme ekranı

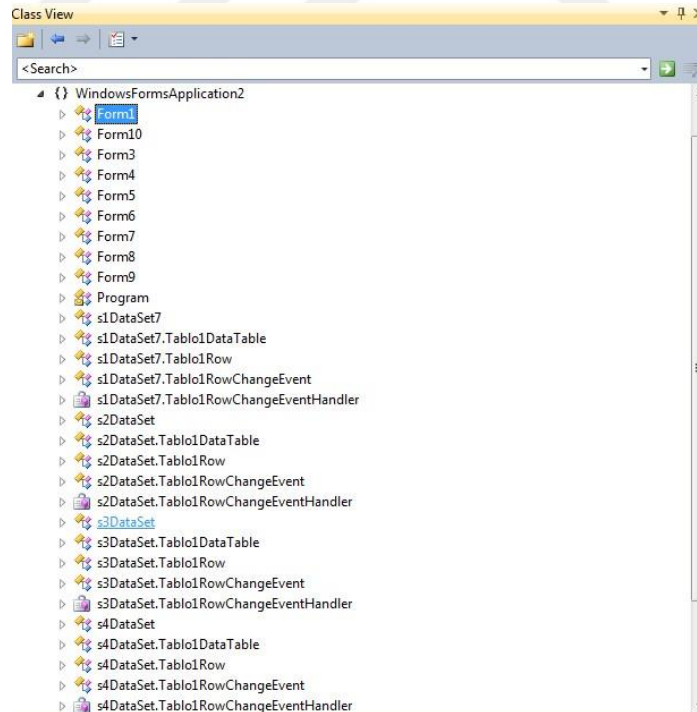
Şekil 4.9’da değişken hızlı RT’ler için giriş parametreleri ve üretilen güç, enerji ve maliyet analizi ekranında *Output Power* ve *Weilbull* butonları ile *Graphical Analysis* groupBox’ında çizilen grafik çıkış gücü ve weillbull olarak seçilebilmektedir. *Load Data* butonu ile daha önceden kayıtlı olan veriler yüklenebilmektedir. *Save Data* butonu ile bilgiler daha sonraki çalışmalarda kullanılabilmek için *Microsoft Access Database (.accdb)* dosya türünde kayıt edilebilmektedir. Bu dosya uzantısı yüklü değil ise *Load Data* ve *Save Data* butonları dosya okuma ve yazma işlemi yapamamaktadır (Microsoft, 2010). Şekil 4.10’da değişken hızlı RT’lerin tasarımı için kayıt ve yükleme ekranı görülmektedir. Şekilde görülen *Load Data* butonu ile seçili dosya yükleme, *Save Data* ile en son çalıştırılmış giriş verilerinin bir sonraki çalışma için kayıt işlemi gerçekleştirilir. *Main Page* butonu ise işlem sırasında herhangi bir değişiklik yapmadan Şekil 4.8’de görülen ana sayfaya dönüş yapılmaktadır.



Şekil 4.11 Değişken hızlı RT’ler için tavsiye edilen türbünler

Farklı rüzgâr türbini üreten firmaların nominal gücü, yarıçapı, nominal rüzgâr hızı vb. verileri kullanılarak veribankası oluşturulmuştur. Şekil 4.11’de paketin optimizasyon kısmında değişken hızlı RT’ler için yapılan optimizasyon sonucunda sonuçlara en yakın veribankasındaki maksimum 10 tane rüzgâr türbini önerilmektedir. Kullanıcı optimizasyon sonuçlarından sonra Şekil 4.13’de görülen *Select Wind Turbine* butonu ile Şekil 4.11’de tavsiye edilen RT’leri görebilmektedir.

Sabit ve değişken hızlı tasarım optimizasyonunda ana penceredeki PSO ve DGA giriş parametrelerinin diğer form sayfasına aktarımı için değişkenler *public static string* olarak tanımlanmıştır. Bu sayede kullanıcı tarafından tasarım optimizasyonu için PSO ve DGA seçimi, DGA için iterasyon sayısı, popülasyon büyüklüğü, ölçekleme faktörü ve çaprazlama oranı, PSO için iterasyon sayısı, popülasyon büyüklüğü, öğrenme faktörleri ve başlangıç ağırlıklandırma oranının diğer form sayfasına aktarımı sağlanmıştır. Benzer şekilde yükleme ve kaydetme ekranında da değerler tasarım optimizasyonu için *public static string* olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.12 RTAOP sınıf görünümü

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi RTAOP’de birçok form dosyası kullanılmıştır. Form1 Şekil 4.8’de görüldüğü giriş ekrandır. Form3 ile form1’deki analiz kısmındaki değişken hızlı RT’ler için giriş verilerinin yükleme ve kaydetme ekranıdır. Form4 ise form1’deki analiz kısmındaki sabit hızlı RT’ler için giriş verilerinin yükleme ve kaydetme ekranıdır. Form5 ve Form6 ise analiz kısmı için sırasıyla sabit ve değişken hızlı RT’ler için giriş verileri ve sonuç gösterme ekranıdır. Form7 optimizasyon kısmı sabit hızlı RT’ler için giriş ve sonuç verilerinin gösterme ekranı ve form8 ise bu alan için giriş verilerini yükleme ve kaydetme ekranıdır. Form9 optimizasyon kısmı değişken hızlı RT’ler için Şekil 4.13’de görüldüğü gibi giriş ve sonuç verilerinin gösterme ekranı ve form10 ise bu alan için giriş verilerini yükleme ve kaydetme ekranıdır. Veritabanında kayıt işlemi yapabilmek için DataSet kullanılmıştır. OleDbDataAdapter ile veritabanından okunan veriler Şekil 4.12’de s1DataSetler içerisinde tablolar halinde kaydedilir. Bu kısımda her bir DataSet; DataTable, DataColumn, DataRow ve DataRelation nesnelerinden oluşmaktadır (Aktaş, 2016).

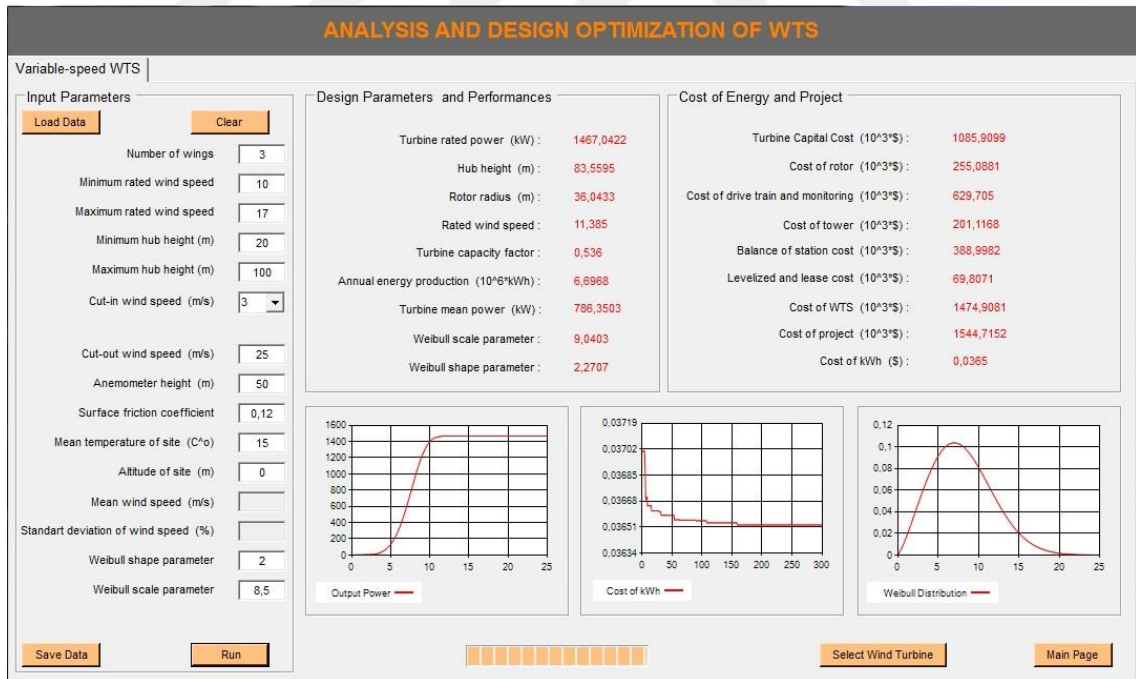
Paket içerisinde giriş verilerinin hızlı ve kolayca girilebilmesi için .acddb uzantılı Şekil 4.12’de görüldüğü gibi s1, s2, s3 ve s4 dosyaları kullanılmıştır. S1 ve s2 sırasıyla RTAOP’nin tasarım kısmındaki sabit ve değişken hızlı RT’ler için giriş verilerini tablo şeklinde kaydetmek için kullanılmıştır. S3 ve s4 ise sırasıyla RTAOP’nin optimizasyon kısmındaki sabit ve değişken hızlı RT’lerin giriş verilerini kaydetmek için kullanılmıştır.

4.2.2. RTAOP Geçerliliğinin Test Edilmesi

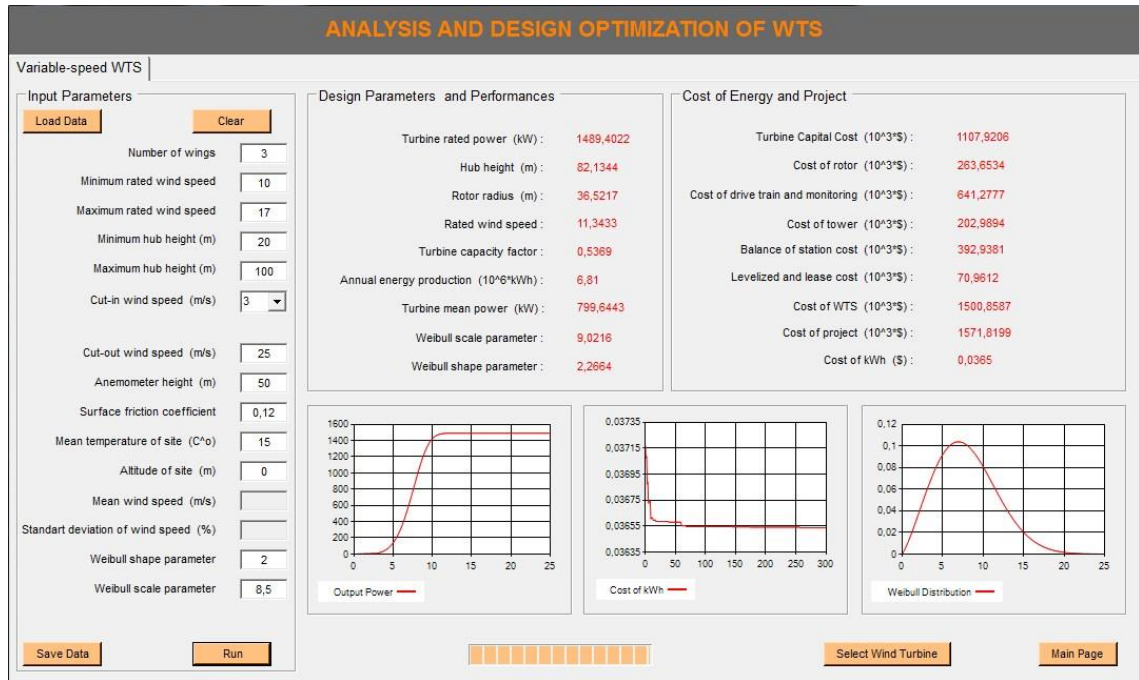
Bölüm 3.5.3’de Matlab sonuçlarında olduğu gibi, $h=50$ m için $k=2$, $c=8.5$ m/sn ve yüzeyin pürüzlülük katsayısı $\alpha=0.12$ için sonuçlar alınmıştır (Fingersh ve ark., 2006). Benzer şekilde rüzgâr potansiyeli $h=30$ m için $k=1.2$, $c=8$ m/sn (Diveux ve ark., 2001), için sonuçlar alınmıştır Optimizasyon algoritması için maksimum iterasyon sayısı ve popülasyon büyüklüğü , DGA için ölçekleme faktörü ve çaprazlama oranı , PSO için öğrenme faktörleri ve başlangıç ağırlıklandırma oranı DGA için $F=CR=0.8$, PSO için $c_1=c_2=2$ ve $w=0.9$ metotlar için $NP=60$ ve maksimum iterasyon sayısı 300 olarak alınmıştır. Metotlar kullanılarak oluşturulan tasarım algoritmaları C # programında (Microsoft, 2010) kodlanarak çalıştırılmıştır.

Şekil 4.13’den görüldüğü gibi Fingersh ve ark. (2006)’deki gibi şekil ve ölçek değerleri 2 ve 8.5 m/sn alındığında, DGA için birim enerji maliyeti 0.0365 \$/kwh, yıllık enerji üretimi ve türbin gücü ise sırasıyla 6.7×10^6 kWh ve 1467 kW’dır. Çizelge 4.2’de aynı giriş değerleri için sonuçlar Fingersh ve ark. (2006) ile karşılaştırıldığında, kule yüksekliği, rotor yarı çapı, türbin nominal gücü vb. benzerlik görülmektedir. Yıllık üretilen enerji miktarları açısından bakıldığında ise RTAOP’nin Fingersh ve ark. (2006)’dekine oranla daha fazla enerji ürettiği görülmektedir. Bundan dolayı RTAOP’nin daha iyi sonuçlar verdiğini söylemek mümkündür.

Şekil 4.14’de değişken hızlı RT’ler için Fingersh ve ark. (2006)’deki gibi aynı giriş değerleri kullanılarak RTAOP’de PSO ile optimizasyon yapılmıştır. Sonuçlar DGA ile benzerlik göstermektedir. DGA için Şekil 4.13’den görüleceği gibi yaklaşık 150 iterasyon sonunda hedef fonksiyonun (birim enerji maliyeti) sonuca yaklaştığı, PSO için Şekil 4.14’den görüleceği gibi hedef fonksiyonun yaklaşık 60 iterasyonda sonuca ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.13 Değişken hızlı $h=50$ m de $k=2$ ve $c=8.5$ m s⁻¹ için tasarlanan RT’lerin DGA ile çözülmesi

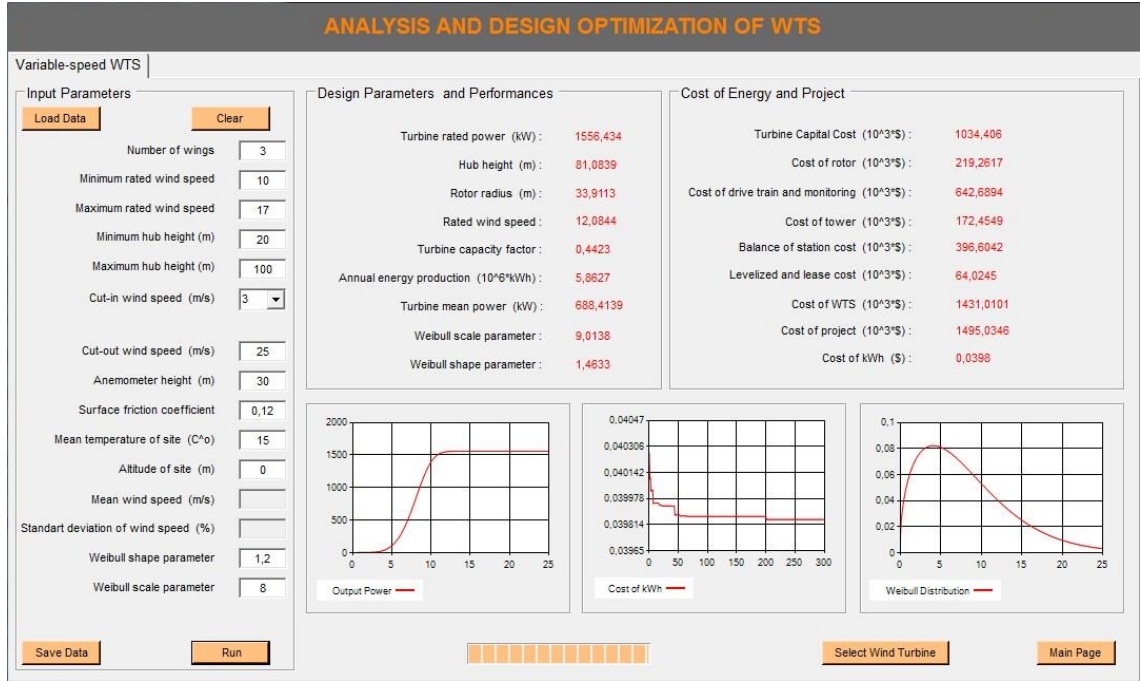


Şekil 4.14 Değişken hızlı $h=50$ m de $k=2$ ve $c=8.5$ $m.s^{-1}$ için tasarlanan RT'lerin PSO ile çözülmesi

Fingersh ve ark. (2006) ile RTAOP'nin DGA ve PSO sonuçları Çizelge 4.1'de birim enerji maliyeti, yıllık enerji üretimi, ortalama güç, kapasite faktörü, kule yüksekliği, rotor yarıçapı vb. gösterilmektedir. Her ne kadar nominal gücün PSO ve DGA için Fingersh ve ark. (2006)'dan düşük olsada kapasite faktörlerin yüksek olmasından dolayı üretilen gücün fazla olmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı yıllık üretilen enerji miktarları açısından RTAOP ile her iki çözümün de Fingersh ve ark. (2006)'dan avantajlı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1 $h=50$ m de $k=2$ ve $c=8.5$ $m.s^{-1}$ için tasarlanan RT'lerin tasarım büyüklükleri, enerji ve maliyeti

Tasarım Parametresi	P	D (m)	h (m)	u_n (m/sn)	P_n (kW)	KF	P_o (kW/yıl)	YEÜ (kWh)	BEM (\$/kWh)
RTAOP (DGA)	3	71.6	82	11.48	1492	0.530	791	6.74×10^6	0.036
RTAOP (PSO)	3	72.4	81	11.38	1477	0.533	788	6.71×10^6	0.036
(Fingersh ve ark., 2006)	3	70	65	11.39	1500	0.511	767	6.53×10^6	0.036

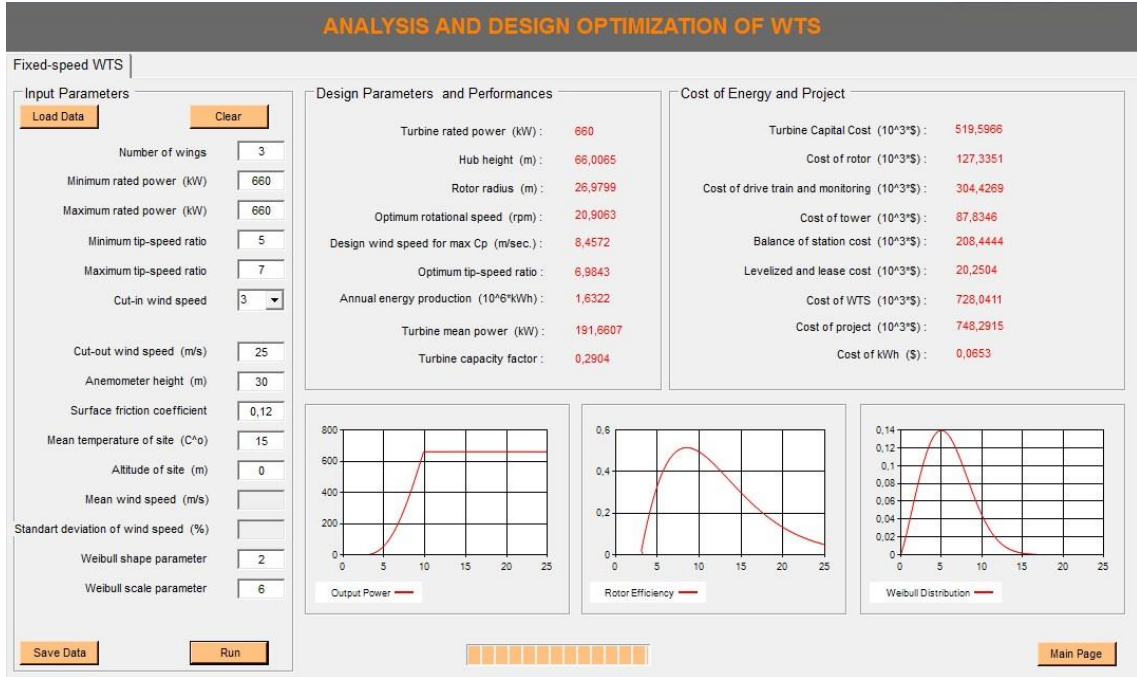


Şekil 4.15 Değişken hızlı $h=30$ m de $k=1.2$ ve $c=8$ m s⁻¹ için tasarlanan RT'lerin DGA ile çözülmesi

Eminoglu ve Ayasun (2014) ve Diveux ve ark. (2001)'deki gibi giriş değerleri anemometer yüksekliği 30 m., şekil parametresi 1.2 m/s ve ölçek parametresi 8 m/s olarak alındığında paket sonuçları DGA için Şekil 4.15'de verilmektedir.

Çizelge 4.2 $h=30$ m de $k=1.2$ ve $c=8$ m.s⁻¹ için tasarlanan RT'lerin tasarım büyüklükleri, enerji ve maliyeti

Tasarım Parametresi	p	D (m)	h (m)	u_n (m/sn)	P_n (kW)	KF	P_o (kW/yıl)	YEÜ (kWh)	BEM (\$/kWh)
RTAOP (DGA)	3	67.8	81	12.08	1556	0.442	688	5.86×10^6	0.039
RTAOP (PSO)	3	66.7	79	12.27	1575	0.433	682	5.81×10^6	0.039
(Diveux ve ark., 2001)	3	30	30	14.00	1000	0.349	349	2.97×10^6	0.039
(Eminoglu ve Ayasun, 2014)	3	64.2	73.5	12.40	1705	0.488	771	6.57×10^6	0.037



Şekil 4.16 Sabit hızlı $k = 2$, $c = 6 \text{ m.s}^{-1}$, $h_o = 30 \text{ m}$ ve $\alpha=0.12$ değerleri için DGA ile çözülmesi ($P=660\text{kW}$)

Diveux ve ark. (2001)'deki gibi sabit hızlı RT'ler için giriş değerleri anemometer yüksekliği 30 m., weibul şekil parametresi 2 m/s, weibul ölçek parametresi 6 m/s ve yüzey pürüzlülük katsayısı 0.12 olarak alındığında paket sonuçları DGA için Şekil 4.16'da verilmektedir. Minimum ve maksimum güç değerleri her ikisi için de 660 kW olarak girilmiştir. Ayrıca anemometer yüksekliği, yüzey pürüzlülük katsayısı, şekil ve ölçek parametreleri değiştirilmeden minimum ve maksimum güç değerleri sırasıyla 500 ve 1500 kW için DGA ve PSO ile paket çözümleri Çizelge 4.3'de verilmektedir. Güç limitleri kaldırıldığında birim enerji maliyetinin daha düşük olduğu dolayısıyla yıllık enerji üretiminde artış gözlenmektedir. Tasarım parametreleri incelendiğinde, Diveux ve ark. (2001) ile RTAOP ($P_n=660\text{kW}$) karşılaştırıldığında hedef fonksiyonu açısından RTAOP'nin daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.3 $k = 2$, $c = 6 \text{ m.s}^{-1}$, $h_o = 30 \text{ m}$ ve $\alpha=0.12$ değerleri için optimizasyon sonuçları ve kurulu RT parametreleri

Tasarım Parametreleri	(Diveux ve ark., 2001)	RTAOP DGA	RTAOP PSO	RTAOP DGA (Pn=660kW)
n	3	3	3	3
D (m)	47	66	63.6	51.4
Hhub (m)	60	76	78	66
N (rpm)	26	17.96	18.52	22
Utas (m/sn)	8	8.9	8.8	8.3
Pn (kW)	660	1016	944	660
YEÜ (kWh)	1.30×10^6	2.51×10^6	2.35×10^6	1.53×10^6
Birim Enerji Mal. (\$cent)	7.12	6.47	6.49	6.6
Kapasite Faktörü	0.23	0.29	0.29	0.27
Opt. kanat uç hızı oranı	7.99	6.98	6.97	6.99
RTS ortalama gücü (kW/yıl)	153.4	295	276	180
Kontrol tipi	Pitch	Pitch	Pitch	Pitch

5. SONUÇ

Bu tezde, herhangi bir yere kurulacak Rüzgâr Türbini (RT) için bölgenin coğrafik verileri (rakım, ortalama sıcaklık) ve rüzgâr potansiyeli (yıllık ortalama rüzgâr hızı, hızdaki standart sapma) değerlerine göre analizin ve tasarımın gerçekleştirildiği Rüzgâr Türbini Analiz ve Optimizasyon Paketi (RTAOP) geliştirilmiştir. Paketin tasarım optimizasyonu kısmında değişken hızlı RT'ler için nominal rüzgâr hızı, kule yüksekliği ile bölgenin coğrafi verileri girilerek en düşük birim enerji maliyeti için dizayn parametreleri (türbin nominal gücü, kule yüksekliği, rotor yarıçapı, nominal rüzgâr hızı, türbin kapasite faktörü, yıllık enerji üretimi) hesaplanabilmektedir. Sabit hızlı RT'lerde ise coğrafi veriler ile nominal rüzgâr gücü ve kanat uç hız oranını girilerek en düşük birim enerji maliyeti için dizayn parametreleri hesaplanabilmektedir. Sabit ve değişken hızlı RT'ler için metasezgisel metotlardan diğerlerine göre bu problemin çözümünde daha elverişli olduğundan Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılmıştır. Geliştirilen paketin analiz bölümünde ise, bölgenin coğrafik büyüklükleri rüzgâr türbin sistemi için tasarım büyüklükleri girilerek türbin sistemi için toplam maliyet, yıllık enerji üretim miktarı, yıllık ortalama türbin gücü, birim enerji üretim maliyeti ve türbin kapasite faktörü, bölgenin ortalama güç yoğunluğu gibi üretilen güç ve maliyet büyüklüklerini analiz edilebilmektedir.

RT'lerin üretilen enerji miktarı ve sonucunda maliyet hesabı için kullanılan çıkış gücü eğrisinin modellenmesinde literatürdeki güç eğrisi modellerinin geçerlilikleri çok sayıda pratik RT'ler üzerinde test edilmiş ve sonucunda en düşük hata payına sahip olan güç eğrisi modeli belirlenerek analiz ve tasarım optimizasyonu uygulamalarında kullanılmıştır. Ayrıca gerçekçi tasarımın yapılabilmesi amacıyla RT'lerin tasarım büyüklükleri olan kurulu güç, kule yüksekliği ve rotor yarıçapı (kanat boyu) arasında matematiksel olarak bağlantılar oluşturulmuş ve uygulamalarda kullanılmıştır. Bu tasarım büyüklükleri arasındaki matematiksel modellemelerde pratikte kullanılan yaklaşık 200 RT bilgileri kullanılmıştır.

Paket C# programlama dilinde Grafiksel Kullanıcı Arayüzü ile hazırlanmıştır. Pakete setup proje dosyası eklenerek kurulum dosyası oluşturulmuştur. Kurulum dosyası

kullanıcıya paketin C# programlama dilinden bağımsız ve ayrıca programlama bilgisine ihtiyaç duyulmaksızın kullanabilme olanağı sağlamaktadır.

Gelecek çalışmalarda, optimizasyon sonucuna göre seçilen pratik RT'lerin kullanıcı tarafından kolaylıkla analiz bölümüne aktarılması ve seçilen RT'nin güç, enerji ve maliyet analizlerinin gerçekleştirilebilmesi açısından oluşturulan RTAOP'nin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca en iyileme (optimizasyon) bölümünde kullanmak amacıyla üretilen yıllık enerji miktarı ve enerji maliyeti dikkate alınarak yeni bir hedef fonksiyonun geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Paket kullanılarak yapılan analiz ve optimizasyon durumlarında kullanılan veya yeni tasarlanan RT'lerin toplam maliyeti ve güncel elektrik enerjisi satış bedeli (kur değeri) dikkate alınarak yapılan veya yapılacak yatırımın geri dönüş sürelerinin belirlenmesi opsiyonu pakete eklenmesi amaçlanmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Aktaş, V., 2016. Her yönüyle C# 6.0. Kodlab, İstanbul.
- Algan, S., 2016. Her yönüyle C# 6.0. Pusula Yayıncılık ve İletişim, İstanbul.
- Anonim, 2017a. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Sektör Raporu (Ocak 2017). www.epdk.org.tr; (01.04.2017).
- Anonim, 2017b. WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program). <http://www.wasp.dk>, (01.04.2017).
- Anonim, 2017c. WindRose wind data analysis software. <http://www.windrose.gr>, (01.04.2017).
- Apaydın, M., Üstün, A. K., Kurban, M. ve Başaran Filik, Ü. Rüzgâr enerjisinde kullanılan asenkron jeneratörler. http://www.emo.org.tr/ekler/88dd0a42166cc52_ek.pdf (01.04.2017).
- Barambones, O., 2012. Sliding Mode Control Strategy for Wind Turbine Power Maximization. *Energies*, 5, 2310-2330.
- Bekele, A. ve Ramayya, A.V., 2013. Specific Design Optimization Of Horizontal Axis Wind Turbine Based On Minimum Cost Of Energy For Adama I Wind Farm. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(7), 862-870.
- Bertsekas, D.P., 1982. Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods, 1. Baskı, 395 s, Academic Press.
- Cançoban, Ü., 2016. İller Bankası A. Ş. Tarafından Yaptırılan Altyapı ve Üstyapı Tesislerinde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Hibrit Sistemlerinin (Güneş ve Rüzgâr) Kullanılarak Enerji Üretimi Yapılması ve Örnek Bir Çalışma, Uzmanlık Tezi, İller Bankası Anonim Şirketi.
- Carillo, C., Montano Obando, A.F., Cidras, J. and Diaz-Dorado, E., 2013. Review of power curve modeling for wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21, 572-581.
- Chiang, T.P., Liu, F.J. ve Ko, H.H., 2014. Comparative analysis on power curve models of wind turbine generator in estimating capacity factor. *Energy*, 73, 88-95.
- Collecute, G.R. ve Flay, R.G., 1996. The economic optimization of horizontal axis wind turbine design parameters. *Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, 61, 87-97.
- Curve Fitting Toolbox (CFT), Matlab R2010b Enterprise: Copyright©2010.
- Demirli N. ve İnan M.Y., 2015. Visual C# .net 2015, Ümit Ofset Matbaacılık, Ankara.
- Diveux, T., Sebastian, P., Bernard, D., Puiggali, R.J. and Grandidier, J.Y., 2001. Horizontal axis wind turbine systems: optimization using genetic algorithms. *Wind Energy*, 4, 151-171.
- Eminoglu, U. 2015. A New Model for Output Power Calculation of Variable-Speed Wind Turbine Systems, IEEE International Conference on Acemp-Optim-Electromotion (ACEMP 2015), 2-4 September 2015, 141-146, Side, Türkiye.
- Eminoglu, U. ve Ayasun, S., 2014. Modeling and Design Optimization of Variable-Speed Wind Turbine Systems. *Energies*, 7, 402-419.
- Eminoglu, U., 2016. Site specific design optimization of horizontal axis wind turbine systems. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24, 1044-1060.
- Fingersh, L., Hand, M. ve Laxson, A., 2006. Wind Turbine Design Cost and Scaling Model, National Renewable Energy Laboratory (NREL/TP-500-40566), USA.

- Fuglsang, P., Bak, C., Schepers, J.G., Bulder, B., Olesen, A., Rossen, R.V. ve Cockerill, T., 2010. Site Specific Design Optimization of Wind Turbines. National Laboratory Risø 2010; Technical Report JOR3-CT98-0273
- Fuglsang, P., Madsen, H.A., 1999. Optimization method for wind turbine rotors. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 80, 191-206.
- Gökçınar R.E. ve Uyumaz A., 2008. Rüzgâr Enerjisi Maliyetleri ve Teşvikleri, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES'2008), 699-706, İstanbul. (Gökçınar ve Uyumaz, 2008)
- Griffin, D.A., 2000. NREL Advanced Research Turbine (ART) Aerodynamic Design of ART-2B Rotor Blades, National Renewable Energy Laboratory (NREL/SR-500-28473), USA.
- Hau, E., 2005. Wind Turbines- Fundamentals, Technologies, Application, Economics (2nd Edition), Berlin:Springer,-Verlag.
- Holland, J.H., 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Jesse Liberty, 2002. Programming C#, O'Reilly.
- Karaboga, D. ve Başturk, A., 2007. A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm. Journal of Global Optimization, 39(3), 459-471.
- Kaymaz A., C# programlama dili ve yazılım tasarımı cilt I, Papatya Bilim Yayınevi, Mart,2013.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. C., 1995. Particle swarm optimization, Proc. IEEE int. conf. on neural networks, 4, 1942-1948.
- Koç, E. ve Güven, N., 2011. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi. EMO Bilimsel Dergi, 1, 51-55.
- Kongam C. ve Nuchprayoon S., 2010. A particle swarm optimization for wind energy control problem, Renewable Energy, 35: 2431-2438.
- Kurban, M., Kantar, Y.M. ve Hocaoglu, F.O., 2006. Rüzgâr enerjisi potansiyelinin araştırılmasında Weibull ve Rayleigh dağılımlarının kullanılması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10(1), 14-21.
- Li, H. and Chen, Z., 2009. Design optimization and site matching of direct-drive permanent magnet wind power generator systems. Renewable Energy, 34, 1175-1184.
- Lydia, M., Kumar, S.S., Selvakumar, A.I. ve Kumar, G.E.P., 2014. A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques. Renewable and sustainable energy reviews, 30, 452-460.
- Maki, K., Sbragio, R. and Vlahopoulos, N., 2012. System design of a wind turbine using a multi-level optimization approach. Renewable Energy, 43, 101-110.
- Matlab R2010b Enterprise: Copyright©2010.
- Microsoft, 2010 <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=13255> (01.04.2017).
- Nurbay, N. ve Çınar, A., 2005. Rüzgâr türbinlerinin çeşitleri ve türbinlerin birbirleriyle karşılaştırılması, 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, 164-168, Mersin.
- Rao, S.S., 2009. Engineering Optimization: Theory and Practice. 4. baskı, 840 s, New York, Wiley-Interscience.

- Sing, C. 2012. Variable speed wind turbines. International Journal of Engineering Sciences, 2, 652-656.
- Storn, R. ve Price, K.V., 1997. Differential evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous Spaces, J. Global Optim, 11, 341-359.
- Thapar, V., Agnihotri, G. ve Sethi, V.K., 2011. Critical analysis of methods for mathematical modelling of wind turbines. Renewable Energy, 36, 3166-3177.
- Türksoy, Ö. ve Eminoğlu, U., 2015. Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbini Sistemlerinin Çıkış Gücü Hesabı için Geliştirilen Matematiksel Modellerin Geçerliliklerinin Analiz Edilmesi, 8. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu (YEKSEM 2015), 15-16 Ekim 2015, 19-23, Adana.
- VSE, 2013 Visual Studio Enterprise, Copyright ©2013.
- Zervos, A., 2009. Wind Energy-The Facts: A Guide to the Technology. Economics and Future of Wind Power. European Wind Energy Association, 1 baskı, 592 s, Routledge.



7. ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : KARAHAN Ozan
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Tarihi ve Yeri : 20.06.1990 / Çorlu
Medeni Hali : Bekar
E-posta : ozan.karahan60@gmail.com
Yabancı Dil : İngilizce, Almanca

Eğitim

Derece	Alan	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Gaziosmanpaşa Üniversitesi	Devam ediyor
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Dokuz Eylül Üniversitesi	2015
Lisans	İşletme	Anadolu Üniversitesi	2014

Projelerde Yaptığı Görevler

“Rüzgâr Türbini Sistemleri Analiz ve Tasarım Optimizasyonu Paket (RTAOP) Programının Geliştirilmesi” ve 114E961 nolu TÜBİTAK projesinde tez öğrencisi (Kasım 2016 – Eylül 2017).

Yayınlar

Eminoğlu, U., Karahan, O., 2017. Rüzgâr Türbinleri Tasarım Büyüklüklerinin Matematiksel Olarak İlişkilendirilmesi. 2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2017), Adana / Türkiye, 839-845.

Eminoğlu, U., Karahan, O., 2017. Metasezgisel Metotlar Kullanılarak Ekonomik Yük Dağıtım Probleminin Çözümü: Grafiksel Kullanıcı Arayüzü Uygulaması, Politeknik Dergisi, 20(4), 827-835.