Rüzgâr Türbini Sistemleri Analiz Ve Tasarım

Optimizasyonu Paket (RTAOP) Programının Geliştirilmesi

Program Kodu: 3001

Proje No: 114E961

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Ulaş EMİNOĞLU

Bursiyer(ler):
Ozan KARAHAN

Eylül 2017
TOKAT

ÖNSÖZ

Bu projede Rüzgâr Türbinlerinin (RT'lerin) kurulacağı bölgenin rakım, ortalama sıcaklık ve 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 Paketinin (RTAOP) geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Paketinin tasarım optimizasyonu bölümünde yapılacak tasarım ile bölgenin rüzgar enerjisinden en düşük maliyette ve en yüksek verimde elektrik enerjisi üretimi için sistem elemanlarından rotor yarıçapı, jeneratör gücü, kule (hub) yüksekliği, kanat sayısı, rotor devir sayısı, maksimum rotor verimliliği için kanat uç hızı oranının en uygun değerinin belirlenmesine imkan sağlanmaktadır. Böylece en düşük maliyette enerji üretimi için belirlenen en uygun tasarım büyüklükleri ile bölgenin ortalama rüzgâr hızı ve coğrafik özellikleri de dikkate alınarak kurulacak rüzgâr türbini için türbin kapasite faktörü, yıllık enerji üretim miktarı, yıllık ortalama gücü ve diğer giderlerde göz önünde bulundurularak sistemin toplam maliyeti, birim enerji maliyeti gibi maliyet büyüklükleri de belirlenebilmektedir.

Paketin Analiz bölümünde, bölgenin coğrafik durumuna bağlı olarak değişen rakım, ortalama sıcaklık, yıllık ortalama rüzgâr hızı ve hızdaki standart sapma değeri gibi büyüklükler ve türbin sistemi için rotor yarıçapı, kule (hub) yüksekliği ve jeneratör gücü, türbin devir sayısı ve kanat uç hızı oranı gibi büyüklükler seçilerek herhangi bir RT analiz edilebilecektir. Böylece kullanıcı tasarladığı veya mevcut kurulu bir türbin sisteminin 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 belirleyebilecektir.

Analiz ve tasarım optimizasyonu sabit-hızlı ve değişken-hızlı RT'ler için ayrı ayrı yapılabilmektedir. Ayrıca bu uygulamalarda proje ekibi tarafından sabit-hızlı ve değişken-hızlı RT'lerin çıkış gücü hesabına ilişkin geliştirilen ve diğer modellere nazaran hata payı daha düşük modeller kullanılmaktadır. Buna ilaveten pratikte kullanılan çok sayıda gerçek RT'lerin bilgileri kullanılarak RT'ler için kule yüksekliği, jeneratör gücü ve rotor yarıçapı gibi tasarım büyüklükleri arasında yeni matematiksel modeller geliştirilmiş ve bu modeller RT'lerin tasarımında elemanların büyüklüklerinin gerçekçi olarak belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

Oluşturulan paket; TÜBİTAK tarafından "3001 Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı" kapsamında 114E961 numaralı ve "Rüzgâr Türbini Sistemleri Analiz ve Tasarım Optimizasyonu Paket (RTAOP) Programının Geliştirilmesi" başlıklı proje olarak desteklenmektedir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....ii
İÇİNDEKİLER.....iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....iv
TABLOLAR DİZİNİ.....v
ÖZET.....vi
ABSTRACT.....vii
1. GİRİŞ VE LİTERATÜR ÖZETİ.....1
1.1 Giriş.....1
1.2 Literatür Özeti.....1
1.2.1 RT Çeşitleri ve Elemanları.....3
1.2.2 RT'lerde Güç ve Enerji Hesabı.....4
2. GEREÇ VE YÖNTEM.....5
2.1 Giriş.....5
2.2 C# Programı ve Arayüz Tasarımı.....5
2.3 Rüzgâr Türbini Sistemleri Analiz Ve Tasarım Optimizasyonu Paket (RTAOP) Programının Tanıtımı.....14
3. BULGULAR.....24
3.1 Değişken-Hızlı RT'lerin Tasarım Optimizasyonu.....24
3.2 Sabit-Hızlı RT'lerin Tasarım Optimizasyonu.....27
4. SONUÇ VE TARTIŞMALAR.....30
5. KAYNAKLAR.....31

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 RT Elemanları ve Yerleşimi.....3
Şekil 1.2 1.5 MW'lık RT'nin kurulum ve işletim giderlerinin dağılımı.....6
Şekil 2.1. NET Derleme ve Çalıştırma Sistemi.....8
Şekil 2.3 Yeni proje dosyası açma ekranı.....10
Şekil 2.4 Windows formu dosyalama kısmı (Solution explorer).....10
Şekil 2.5. Windows formu Form1.cs dosyası.....11
Şekil 2.7 Form ile Toolbox Ekranı.....12
Şekil 2.8 Label Özellikleri.....13
Şekil 2.9 Geliştirilen RTAOP arayüzü ana penceresi.....15
YŞekil 2.10 .....Değişken-hızlı RT'ler için giriş parametreleri ve üretilen güç, enerji ve maliyet analiz sonuçlarının elde edilmesi.....15
Şekil 2.11 Arayüz de tasarım optimizasyonu sekmesi ile ilgili RT, optimizasyon algoritması ve buna ilişkin parametrelerin seçilmesi.....16
Şekil 2.12 Değişken-hızlı RT'ler için giriş parametreleri ve tasarım optimizasyonu sonuçlarının elde edilmesi.....18
Şekil 2.13 Load ve Save Data butonu ile giriş değerlerinin yükleme ve kaydetme ekranı ...19
YŞekil 2.14 .....Optimizasyon sonucunda en uygun pratik RT seçimi ekranı. 19
Şekil 2.15 Sabit-hızlı RT'ler için giriş parametreleri ve üretilen güç, enerji ve maliyet analiz sonuçlarının elde edilmesi.....21
Şekil 2.16 Sabit-hızlı RT'ler için giriş parametreleri ve tasarım optimizasyonu sonuçlarının elde edilmesi.....22
YŞekil 3.1 Referans yükseklik h=50 m de k=2 ve c=8.5 m/sn olan bölge için DGA metodu kullanılarak değişken-hızlı RT tasarımının gerçekleştirilmesi.....26
Şekil 3.2 Referans yükseklik h=50 m de k=2 ve c=8.5 m/sn olan bölge için PSO metodu kullanılarak değişken-hızlı RT tasarımının gerçekleştirilmesi.....27
Şekil 3.3 Referans yükseklik h=30 m de k=2 ve c=6 m/sn olan bölge için PSO metodu kullanılarak sabit-hızlı RT tasarımının gerçekleştirilmesi.....29
Şekil 3.4 Referans yükseklik h=30 m de k=2 ve c=6 m/sn olan bölge için DGA metodu kullanılarak P_n=660 kW gücünde sabit-hızlı RT tasarımının gerçekleştirilmesi....29

TABLOLAR DİZİNİ

YTablo 2.1 …C# da yaygın matematiksel işlemler, karşılaştırma ve döngüler için komut dizini 13
Tablo 2.2 Değişken-hızlı RT'ler için tasarım parametreleri, sınırlar ve değişim aralıkları….17
Tablo 2.3 Sabit-hızlı RT'ler için tasarım parametreleri, sınırlar ve değişim aralıkları.....23
Tablo 3.1 h=30 m de k=1.2 ve c=8 m/sn için tasarlanan RT'lerin tasarım büyüklükleri, enerji ve maliyet.....25
Tablo 3.2 h=50 m de k=2 ve c=8.5 m/sn için tasarlanan RT'lerin tasarım büyüklükleri, enerji ve maliyet değerleri.....26
Tablo 3.3 k=2, c=6 m/sn, h_o = 30 m ve α=0.12 değerleri için optimizasyon sonuçları ve kurulu RT parametreleri.....28

ÖZET

Bu projede Rüzgâr Türbinlerinin (RT'lerin) güç, enerji ve maliyet analizinin yanı sıra bölgesel olarak en düşük maliyette enerji üretimi için uygun RT tasarımının yapılabileceği paket geliştirilmiştir. Geliştirilen paket Analiz ve Tasarım optimizasyonu olarak iki bölümden oluşmaktadır. Analiz bölümünde kullanıcı sabit- veya değişken-hızlı RT'ler için tasarım büyüklükleri ve parametre değerleri ile bölgeniz rüzgâr ve coğrafik özelliklerini kullanarak, yıllık ortalama güç, enerji üretim miktarı, toplam maliyet ve birim enerji maliyeti gibi enerji ve maliyet analizlerini ayrı ayrı gerçekleştirebilmektedir. Tasarım optimizasyonu bölümünde ise kullanıcı her iki tip RT için seçilen bölgenin coğrafik ve rüzgâr hızı değerlerini kullanarak en düşük maliyette enerji üretimini gerçekleştirecek RT'yi tasarlayarak pratikte kullanılan çok sayıda RT'lerden tasarlanana en yakın olanını seçebilmektedir. Ayrıca analiz edilen veya tasarlanan RT'ye ait çıkış (güç) karakteristiği, rotor verimliliği ve bölgenin rüzgâr hızı olasılık dağılımı gibi parametreler grafiksel olarak analiz edilebilmektedir. Bu parametrelerin oluşturulmasında proje ekibi tarafından geliştirilmiş ve geçerlilikleri test edilmiş matematiksel modeller kullanılmaktadır. Buna ilaveten pratikte kullanılan çok sayıda gerçek RT'lerden faydalanılarak RT'ler için temel tasarım büyüklükleri olan kule yüksekliği, jeneratör gücü ve rotor yarıçapı arasında tanımlanan matematiksel modeller RT'lerin tasarımında kullanılarak büyüklüklerinin gerçekçi ve birbirleri ile uyumlu olarak belirlenmesine olanak sağlanmaktadır. Sonuç olarak oluşturulan paketin gerçekçi modeller ve tasarım kurgusu ile analiz ve en uygun (optimum) tasarımın elde edilmesi ve ayrıca kullanım kolaylığı açısından kullanıcıya büyük avantaj sağladığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr Türbinleri, enerji üretimi ve maliyet, tasarım optimizasyonu, grafik kullanıcı arabirimi

ABSTRACT

In this project, a package was developed for the analysis of the power, energy and cost of Wind Turbines (WTs), as well as the design of the optimum WT for energy production at the lowest cost. The developed package consists of two sections, namely Analysis and Design Optimization. In the analysis section, the user can perform energy and cost analyzes such as; annual average power, energy production amount, total cost and cost of per-energy using design variables and parameter values for constant- or variable-speed WTs, separately, by taking into account the wind and geographical characteristics of the region. In the design optimization section, by using the geographical and wind speed values of the selected region, the user can design the WT which will be product electrical energy at the lowest cost, and then select the nearest one from a large number of practical WTs for both types of WTs. In addition, parameters such as the output (power) characteristic of the analyzed or designed RT, the rotor efficiency and the wind speed probability distribution of the region can be analyzed by graphically. Mathematical models developed and tested for their validity by the project team are used in the modelling of these parameters. Additionally, the mathematical models, which are defined between the basic components of WTs such as; tower height, generator power and rotor radius by using a large number of actual WTs, allows to determining the size of components realistically and in harmony with each other. As a result, it is seen that the package created with the realistic models and design fiction gives a great advantage to the user in terms of analysis, optimum design and ease of use.

Keywords: Wind turbines, energy production and cost, design optimization, graphical user interface

1. GİRİŞ VE LİTERATÜR ÖZETİ

1.1 Giriş

Rüzgâr enerjisinin fosil enerji kaynaklarına göre en önemli avantajı bitmeyen bir enerji kaynağı olmasıdır. Bunun yanı sıra diğer önemli avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [1].

- 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.

Günümüzde Rüzgâr Türbinlerinin (RT'lerin) elektrik enerjisi üretiminde kullanımı yaygın hale gelmiştir. Dünya Rüzgâr Enerjileri Birliği (WWEA) verilerine göre Çin yaklaşık 168 gigawatt'lık enerji kapasitesi ile RT kurulumunda ilk sırada yer almaktadır. Sıralamada Amerika Birleşik Devletleri 82 GW ve Almanya ise 50 GW ile yer almaktadır. 2016 yılı sonu itibarı ile RT santrallerinin Dünyada toplam kurulu gücü yaklaşık 500 GW seviyesine yükselmiş olup bu kapasite devlet teşvikleri nedeniyle önemli oranda artmaktadır. Türkiye de RT'lerin kullanımı özelliklede rüzgâr potansiyeli yüksek olan Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz bölgelerinde her geçen gün artmaktadır. Yapılan devlet teşvikleri ile 2016 yılı sonucunda RT toplam kurulu gücü 5.7 GW'ın üzerine çıkmıştır [2]. RT'ler ile rüzgârdan en yüksek oranda elektrik enerjisi üretimi ve aynı zamanda üretim maliyetinin de en düşük seviyede tutulması için bölgenin rüzgâr potansiyeli de dikkate alınarak en uygun büyüklükte RT tasarımı zorunlu hale gelmektedir.

1.2 Literatür Özeti

RT'lerde enerji üretim miktarı ve maliyeti etkileyen tasarım parametreleri ve değişkenler ise; kurulu güç (jeneratör gücü), kule yüksekliği, kanat boyu (rotor yarıçapı), nominal rüzgar hızı, kapasite faktörü, nominal rotor devir sayısı ve kanat sayısıdır. RT'lerin bölgeye has tasarımı için literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur [4-11]. Özetle bu çalışmalardan Referans [4-6, 8-9, 11]'de birim enerji maliyeti amaç fonksiyonu olarak alınmış ve bunun değerini olası en düşük değerde tutmak için RT tasarımları gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan enerji maliyeti yerine enerji üretim miktarının amaç fonksiyonu olarak alındığı çalışmalar Referans [7, 10]'da verilmiş olup çalışmalarda enerji üretimini olası en yüksek değerde tutmak amacıyla RT tasarımları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda sabit-hızlı RT'ler için rotor yarıçapı, jeneratör gücü, kule yüksekliği gibi temel tasarım büyüklüklerinin yanı sıra rotor verimliliğinin

en yüksek değerde olduğu tasarım rüzgâr hızı, enerji üretim parametresi olan türbin kapasite faktörü ve devir sayısının en uygun değerleri seçilen bölgeler için belirlenmiştir [5, 8]. Günümüzde yaygın olarak kullanılan değişken hızlı RT tipi için rotor yarıçapı, jeneratör gücü, kule yüksekliği gibi temel büyüklükler ile türbin nominal rüzgar hızı ve kapasite faktörü gibi tasarım parametreleri [4-5, 9]'da verilen çalışmalarda belirlenmiştir. Tüm parametrelerin tasarımı çalışmalarının yanı sıra belirli büyüklükteki RT için en uygun rotor yarıçapı [7]'de, en uygun kanat ucu hız oranı ve türbin devir sayısının en yüksek oranda enerji üretimi için optimizasyonu [10]'da ve devir sayısının en uygun değerinin belirlenmesi çalışması [11]'de verilmektedir. Ayrıca Referans [6]'da paralel (çok amaçlı) tasarım optimizasyonu yapılarak RT temel bileşenlerinin büyüklükleri ile kanat tasarımı birlikte belirlenmiştir.

Bilgisayar uygulamalı simülasyonlar, sistemlerin kolay bir şekilde analiz edilebilmesi ve görsel olarak elde edilen sonuçların kullanıcı tarafından daha kolay bir şekilde yorumlanabilir olması nedeniyle büyük öneme sahiptir. Oluşturulan Grafik Kullanıcı Arayüzleri (Graphical User Interface) klasik metin temelli yaklaşımlar ile karşılaştırıldığında anlaşılması açısından daha etkili ve uygulamanın gerçekleştirilmesi açısından çok büyük kolaylık sağladığını söylemek mümkündür. Bu nedenle farklı alanlarda olduğu gibi RT'lerin tasarımı ve performans analizleri için grafik kullanıcılı analiz paketleri geliştirilmiştir [12-17]. Referans [12]'de geliştirilen RT analiz paketinde ortalama rüzgâr hızı, kanat yarıçapı, hub yüksekliği gibi türbin parametreleri ve hava yoğunluğu, arazinin pürüzlülüğü gibi bölgesel özellikler giriş verisi seçilerek pratikte kullanılan farklı tip türbinler için çıkış gücü hesaplanabilmektedir. Aynı zamanda geliştirilen pakette kullanıcı ara yüzü ile seçilen türbinin rotor veriminin ve rotor çıkış gücünün rüzgâr hızına göre değişiminin analizine sınırlı sayıda türbin sistemi için imkân sağlamaktadır. Çok fonksiyonlu bir RT analiz paketi [13]'da verilmektedir. Benzer şekilde geliştirilen analiz paketinin kullanıcı ara yüzü ile ortalama rüzgâr hızı ve hızdaki standart sapma değeri gibi giriş parametreleri seçilerek pratikte kullanılan türbin tiplerine göre türbin çıkış gücünün rüzgâr hızına göre değişimi, rüzgâr hızının yoğunluk dağılımı (Weibull distribution), türbinin üretebileceği ortalama gücün ve yıllık enerji üretiminin ortalama rüzgâr hızına göre değişimi ve birim enerji maliyeti gibi analizlerin yapılmasına imkan sağlamaktadır. RT'lerin tasarımı için geniş kullanılan programlardan biri FOCUS (The integrated Modular Wind Turbine Design Tool) [14] programı olup kanat tasarımı, RT tasarım optimizasyonu ve tasarlanan RT'nin enerji üretimi analizi yapılabilmektedir. Diğer bir tasarım programı WindFARM [15] programı olup RT'lerin tasarım optimizasyonu ve enerji hesabı gibi analizler yapılabilmektedir. Bölgesel rüzgâr potansiyeli analizlerinin yapılabilmesi amacıyla geliştirilmiş birçok yazılım programı mevcut olup bunlardan WindRose [16] ve Wasp [17] programları geniş olarak kullanılmaktadır. Bu programlar kullanılarak girilen rüzgâr ölçüm bilgileri ile klasik analizler (ortalama hız, Weibull dağılım) yapılabilmekte ve ayrıca girilen RT

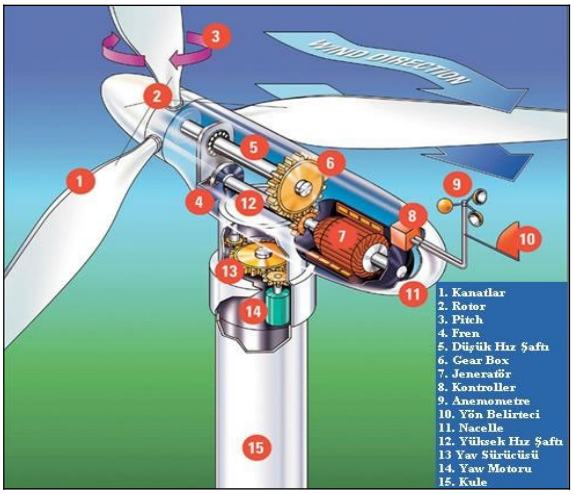
parametrelerine göre kapasite faktörü, yıllık enerji üretimi gibi analizler gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca Wasp [17] programı kullanılarak girilen rüzgâr karakteristiğine göre RT'lerin tasarımı yapılabilmektedir. Mevcut bu paket programlar lisanslı olup, ücret karşılığında temin edilebilmekte ve ayrıca büyük bir çoğunluğu RT tipine göre değişken hızlı veya sabit hızlı türbin sistemleri için ayrı ayrı ve detaylı olarak analiz ve/veya tasarım optimizasyonunun gerçekleştirilmesine imkân sağlayamamaktadır.

1.2.1 RT Çeşitleri ve Elemanları

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. Bunlardan ilki olan ve günümüzde büyük güçler için tercih edilmeyen Sabit-Hızlı RT'lerde devir sayısı nominal değerde sabit olup rotor verimliliği rüzgâr hızına göre değişmektedir. Dolayısıyla güç üretimi düşmekte ve rüzgâr enerjisinden olası en yüksek oranda faydalanılamamaktadır. Bu nedenle, Değişken-Hızlı RT'ler, Çift Besleme Asenkron Jeneratör (DFIG) ve Daimi Mıknatıslı Senkron Jeneratör (PMSG) kullanılarak geniş bir rüzgâr hızı aralığında maksimum aerodinamik verim elde etmek üzere tasarlanmıştır. Dolayısıyla bu tip RT'lerde, rotor verimliliği maksimum değerde tutulmakta ve rüzgâr enerjisi en yüksek oranda kullanılarak türbin çıkış gücü artmaktadır [3]. RT'ler; dişli kutusu, rotor, anemometre, otomatik yöneltme düzeni, frenleme düzeni, yaw mekanizması ve kuleden meydana gelmektedir. Herhangi bir RT'ye ait elemanlar ve konumları Şekil 1.1'de verilmektedir.



Şekil 1.1 RT Elemanları ve Yerleşimi

1.2.2 RT'lerde Güç ve Enerji Hesabı

RT'lerde kanatlarda yakalanan gücün rotor miline aktarılan mekanik güç değeri, rotor verimliliğine bağlı olarak;

$$P_m(u)=\frac{1}{2}\rho A u^3 C_p(\lambda,v) \tag{1.1}$$

temel denklemi ile ifade edilmektedir [1]. Burada; *A* kanatların süpürme alanı, *ρ* hava yoğunluğu, *λ* kanat uç hızı oranı ve *u* ise kanatlardaki rüzgâr hızını göstermektedir. Rotor verimliliği; $C_p(\lambda,v)$ ile ifade edilmekte olup rüzgâr hızına bağlı olarak değişmektedir. Rüzgâr hızına bağlı olarak oluşturulan RT çıkış gücü eğrisi, rüzgâr hızı olasılık dağılımı fonksiyonu ile birlikte yıllık ortalama güç hesabında kullanılmaktadır. RT'lerde yıllık ortalama güç enerji miktarı hesabı için gerekli bir büyüklüktür ve RT'nin enerji verimliliğini gösteren kapasite faktörünü (KF) belirlemektedir. Bir RT'nin yıllık ortalama güç değeri;

$$P_o(u_o)=\int_{u_o}^{u_f} P_m(u) f_w(u) du \tag{1.2}$$

ifadesi ile hesaplanabilir [4-5]. Burada $P_m(u)$ türbin çıkış gücü, u_o ortalama rüzgâr hızı değeri, f_w ise rüzgâr hızı olasılık dağılım fonksiyonu olup genellikle Weibull olasılık dağılım fonksiyonu kullanılmaktadır [3]. Bir RT'nin enerji verimliliği açısından kapasite faktörü önemli bir performans parametresi olup;

$$KF=\frac{P_o(u_o)}{P_n} \tag{1.3}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Enerji verimliliği ve maliyet açısından pratikte RT'lerin en az 0,35 veya daha büyük kapasite faktörü değerinde üretim yapması beklenmektedir. Yıllık ortalama güç veya kapasite faktörü değeri bir RT'nin yıllık ortalama enerji üretimi (YEÜ) değerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Kayıpların ihmal edilmesi ve sürekli çalışma durumu için YEÜ miktarı;

$$YEÜ = 8760\, P_o(u_o) = 8760 \times \mathrm{KF} \times P_n \tag{1.4}$$

ifadesi ile *kWh* cinsinden belirlenmektedir [4].

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 [4].

- Kurulum giderleri
- Kapasite faktörü
- İşletme ve bakım giderleri
- Türbin çalışma ömrü
- Dış maliyetler

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuarı (NREL) Ulusal Rüzgâr Teknoloji Merkezi karasal ve deniz rüzgâr türbinleri sistemleri için üretilen elektriğin maliyetini tahmin etmek üzere çalışmalar yapmıştır [4]. 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 sonrasında ki 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 [4].

$$BEM = \frac{SÜO \times BSM + YFG}{YEÜ}$$

(1.5)

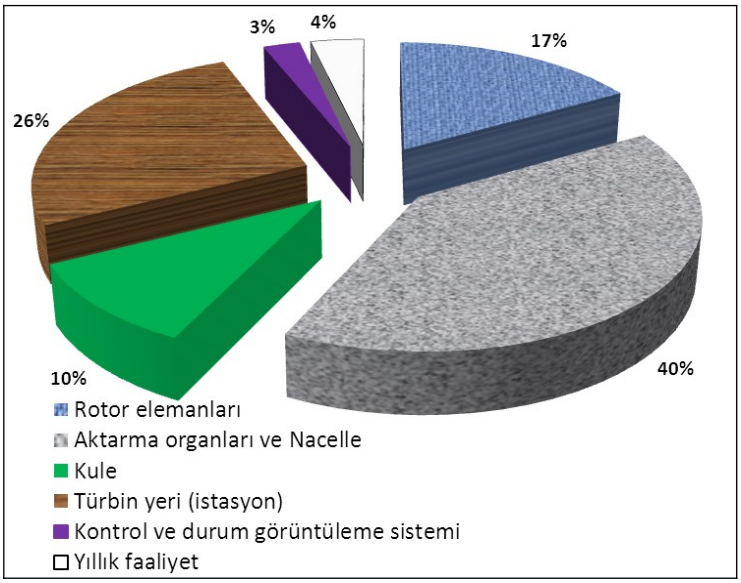
Burada BEM, üretilen enerjinin birim fiyatını $/kWh ifade etmektedir. YEÜ (Annual Energy Production), kWh/yıl cinsinden Yıllık Enerji Üretim miktarı olup Denklem 1.4 ile hesaplanmaktadır. Diğer büyüklükler ise:

BSM: Başlangıç sermaye maliyetidir (Initial Capital Cost). İlk 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 [4]'de detaylı olarak verilmektedir.

SÜO: Sabit ücret oranı (Fixed Charge Rate) olarak tanımlanır. 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 (Annual Operating Expenses) olarak tanımlanır. İşletme ve bakım giderleri olup bu giderler, arazi kiralama masrafları (land lease costs), işçilik, parça ve planlanan türbin bakım gereçleri, ekipman ve tesislerin bakım parçaları ve malzemeleri (levelized O&M cost) ve rüzgar türbini çalışma ömrü süresince önemli değişikliklerin ve

revizyonların maliyetini (levelized replacement cost) içermektedir. Bu gider kalemlerine ilişkin maliyetler teknolojik olarak temel (normal) seviyede nitelendirilecek RT'ler için [4]'de verilmiştir. 1.5 MW'lık rotor yarıçapı 35 m ve hub yüksekliği 65 m olan üç kanatlı bir rüzgâr türbini sisteminin pratik değer olan %33'lük kapasite faktörü ile çalışması durumunda toplam enerji maliyetini oluşturan kurulum ve işletme maliyetleri [4]'de verilen BEM modeli ile hesaplanarak Şekil 1.2'de dağılımı verilmiştir. Hesaplamalar için gerekli yıllık enerji üretim miktarı, kapasite faktörü kullanılarak teorik yıllık enerji üretiminin %33'u olarak belirlenmiştir. Şekilden görüleceği üzere RT ile enerji üretiminde en yüksek maliyeti %40'lık oranla Aktarma organları ve Nacelle, en düşük maliyeti ise %3'lük oranla kontrol ve durum görüntüleme sistemi oluşturmaktadır. Bu oranlar uygun tasarım yapılarak kurulan farklı büyüklüklerdeki RT'ler için ciddi bir değişiklik göstermemekte, yüzde olarak yaklaşık bu değerlerde kalmaktadır. Dolayısıyla bu ve RT diğer elemanlarının maliyeti rotor yarıçapı, kule yüksekliği jeneratör gücü gibi büyüklüklere göre değiştiğinden en düşük maliyette enerji üretimi için elemanların büyüklüklerinin birbirleri ile uyumlu ve en uygun değerlerinin belirlenmesinin gerekliliği maliyet dağılımından da görülebilmektedir.



Şekil 1.2 1.5 MW'lık RT'nin kurulum ve işletim giderlerinin dağılımı

2. GEREÇ VE YÖNTEM

2.1 Giriş

Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (GKA), simgeler, ikonlar ve grafikler yardımıyla bir işlevin gerçekleştirilmesine ve/veya analiz edilmesine olanak sağlayan arabirimlerdir. Sistemlerin kolay bir şekilde analiz edilebilmesi ve kullanıcı tarafından görsel olarak elde edilen sonuçların daha kolay bir şekilde yorumlanabilir olması nedeniyle büyük öneme sahiptir. Klasik metin temelli yaklaşımlar ile karşılaştırıldığında anlaşılması açısından daha etkili ve uygulamanın gerçekleştirilmesi açısından çok büyük kolaylık sağladığını söylemek mümkündür. Bu nedenle günümüzde birçok çalışma alanı için GKA tasarımı yaygınlaşmakta olup kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bölüm 1.1'de bahsedildiği üzere RT'lerin analizi ve/veya tasarımı için bir çok Arayüz geliştirilmesine rağmen bu paket programların lisanslı, ücrete tabi, RT tipine göre ayrı ayrı ve detaylı olarak analiz ve/veya tasarım optimizasyonunun gerçekleştirilmesi gibi olumsuzluk ve/veya yetersizlikler söz konusudur. Bu nedenle projede bu olumsuzlukları gidermek ve yetersizlikleri karşılamak amacıyla Rüzgâr Türbini Sistemleri Analiz Ve Tasarım Optimizasyonu Paket (RTAOP) Programı geliştirilmiştir. Arayüz, kullanımı kolay, tamamen nesneye yönelik olması, diğer nesne tabanlı programlama dillerine nazaran daha hızlı olması ve ayrıca proje ekibi tarafından iyi derecede kullanılabilir olması nedenleriyle C# yazılım programı kullanılarak tasarlanmıştır olup bu bölümde detaylı olarak tanıtılarak geçerliliği ve güvenilirliği test edilmektedir.

2.2 C# Programı ve 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) kısımlarından oluşmaktadır. BCL, .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

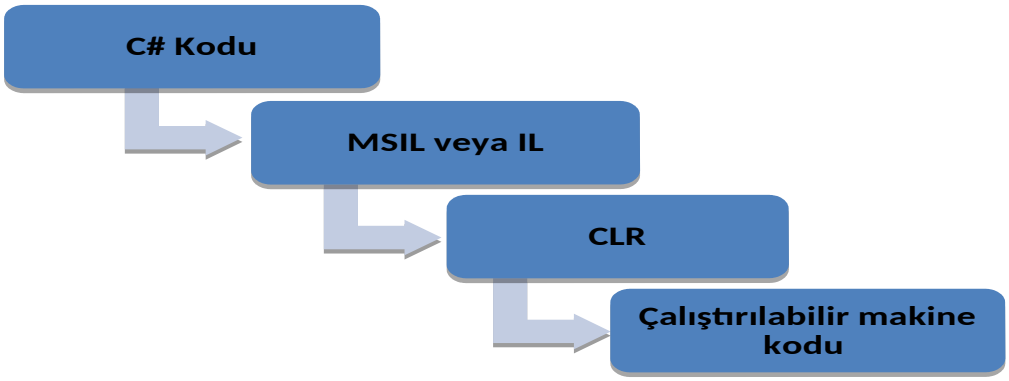
şeklinde sınıflandırılabilir. CLR, .NET ortamında uygulamaları çalıştıran ve içerisindeki nesne yönetimleri, kod güvenliği, hata ayıklama ve bellek yönetimi gibi birçok alanda yapılan işlemler Framework' ün bu kısmı ile yönetilir.

CLR ile uyumlu farklı diler 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.

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 4.5'den de görüldüğü gibi "*using*" komutuyla kullanılır [18].
ADO.NET (ActiveX Data Object for .NET) veri kaynakları arasındaki bağlantı sağlayan sınıfları içermektedir. System.Data içerisindeki isim uzayları ise:

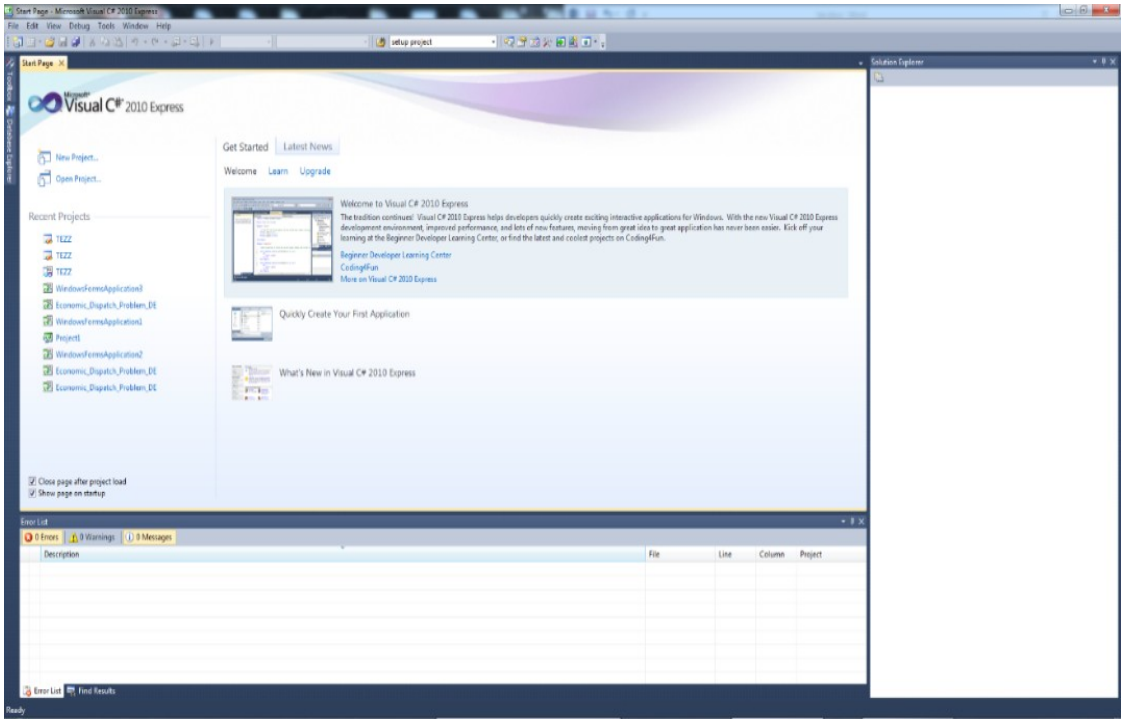
- Microsoft.SqlServer.Server
- System.Data
- System.Data.Common
- System.Data.Odbc
- System.Data.OleDb
- System.Data.Sql
- System.Data.SqlClient
- System.Data.SqlTypes
- System.Xml

dosyalarından oluşmaktadır [18-22]. Şekil 2.1'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 [18-20].

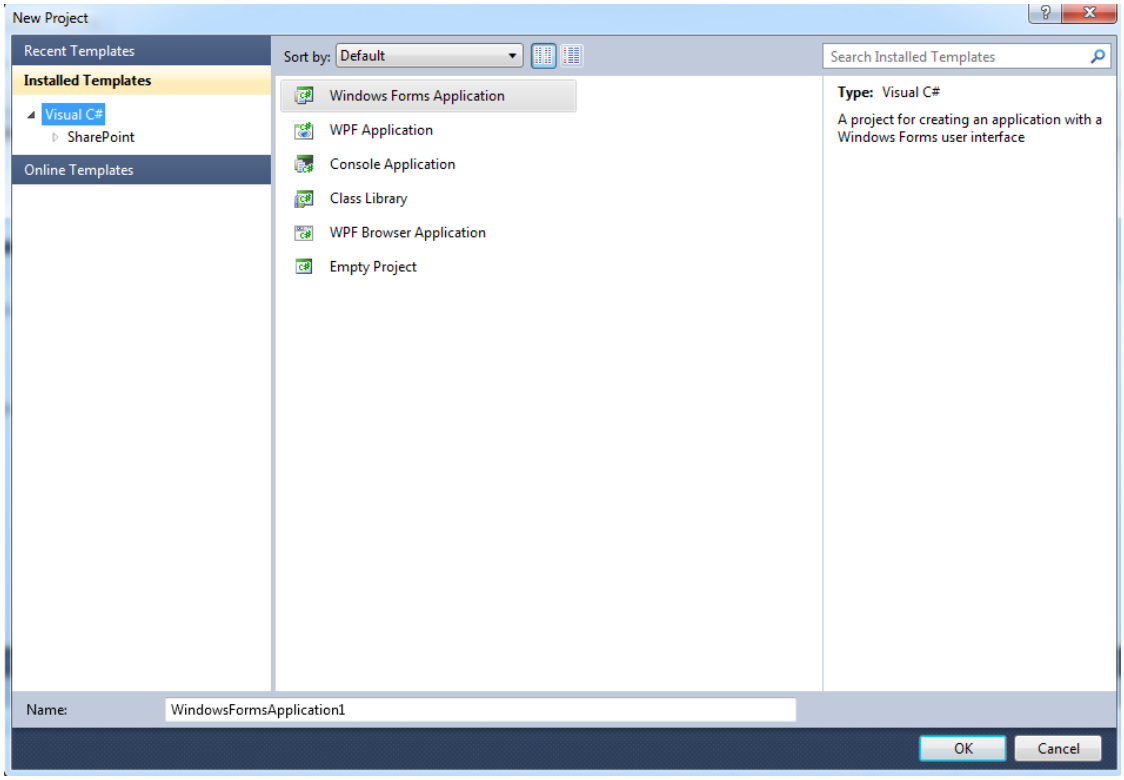


Şekil 2.1 NET Derleme ve Çalıştırma Sistemi

Şekil 2.2'de *windowsformsapplication* sayfası görülmektedir. Bu sayfa aracılığı ile yeni bir proje dosyası, kayıtlı bir proje dosyasının açılması vb. işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Yeni proje açma işlemi ise Şekil 2.3'de verilmektedir. Görüldüğü gibi, birçok proje ögesi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Windows formu, Explorer form, MDI patent form, oturum açma formudur. Uzantıları farklı olan bu proje ögeleri farklı amaçlar için kullanılabilmektedir. Örneğin; dataset bir dosya olan xml şeması oluşturmak için kullanılır ve uzantısı *.xsd* şeklindedir.

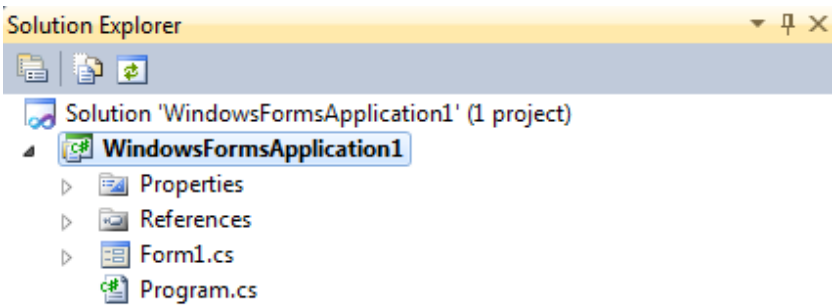


Şekil 2.2 Microsoft Visual C# 2010 başlama sayfası

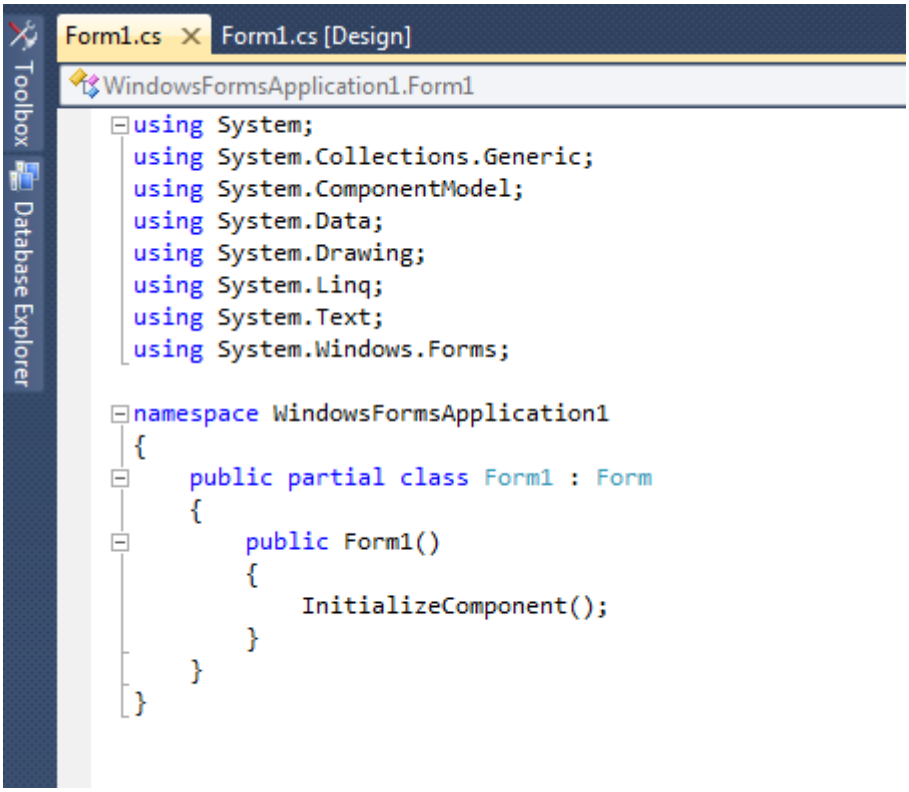


Şekil 2.3 Yeni proje dosyası açma ekranı

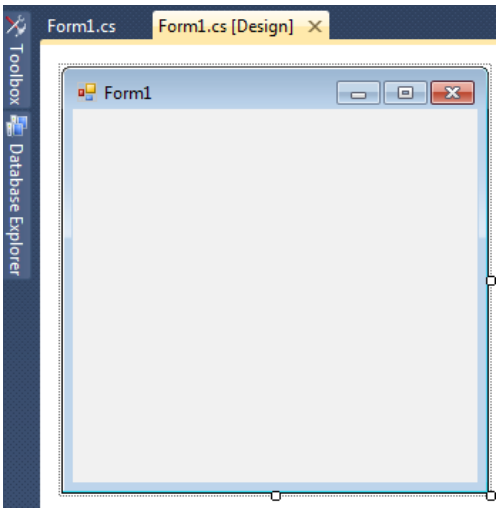
Windows tabanlı uygulamalar oluşturmak için Windows formu kullanılmaktadır. Şekil 2.4' de Windows formu açıldığında proje dosyalama kısmı görülmektedir. Bir proje Şekil 2.4-6'da gösterildiği üzere Properties, references, form1.cs ve program.cs dosyalarından oluşmaktadır. C# programı birçok isim uzayı (namespace) içermektedir. İsim uzayları proje referans dosyası olarak kullanılır. Şekil 2.5'den görüleceği üzere "using" komutuyla kullanılır.



Şekil 2.4 Windows formu dosyalama kısmı (Solution explorer)



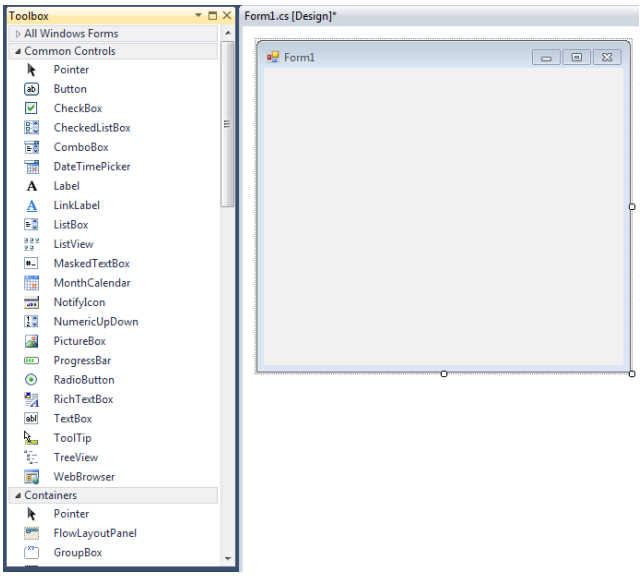
Şekil 2.5 Windows formu Form1.cs dosyası



Şekil 2.6 Windows formu form1.cs Design dosyası

C# da programında arayüz oluşturabilmek için ilk olarak bir proje dosyası oluşturulmalıdır. Şekil 2.7'den görüldüğü gibi form dosyası açılarak toolbox kısmındaki araçları sürükleme işlemiyle formda istenilen yere götürülerek kod içeriğini yazmadan arayüz tasarımı yapılmış olur. Kullanılması gereken label, button, textbox vs. form dosyasına kaydırılma işleminden

sonra kodun yazılması gereken toolbox elemanına çift tıklanarak kod sayfasına geçebilmektedir.



Şekil 2.7 Form ile Toolbox Ekranı

TextBox, özellikle değeri kullanıcıya göre değişebilen verilerin girişi için kullanılır. Ayrıca bu nesne ile program içerisindeki değer gösterilebilir. Çalışmada textbox özelliklerinden *Size* 46;20 olarak alınmıştır. (18-20). Label, değeri sabit kalıp değişmeyecek verilerin görüntülenmesi ve ayrıca form sayfasında açıklama için kullanılır. Çalışmada, *font* 8,25 pt. ve *forecolor* tanımlar için Control Text, sonuçlar için ise Red seçilmiştir.

Button, bir olayı veya döngüyü gerçekleştirmek için kullanılan form nesnesidir. Çalışmada *backcolor* 255;192;128 ve *Size* 75;23 kullanılmıştır. Şekil işlemleri için chart kullanılmıştır. Çalışmada 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 elemanıdır. *radioButton5.Checked* kodu ile kontrol sağlanır ve doğrulanan kod değeri 1 (true) olur.

Label, kullanıcıya bilgi veren bir etikettir ve Şekil 2.8'de işlevleri ile görülmektedir.. Önemli özelliklerinde, TextAlign Yazının etiket üzerindeki pozisyonu belirler.

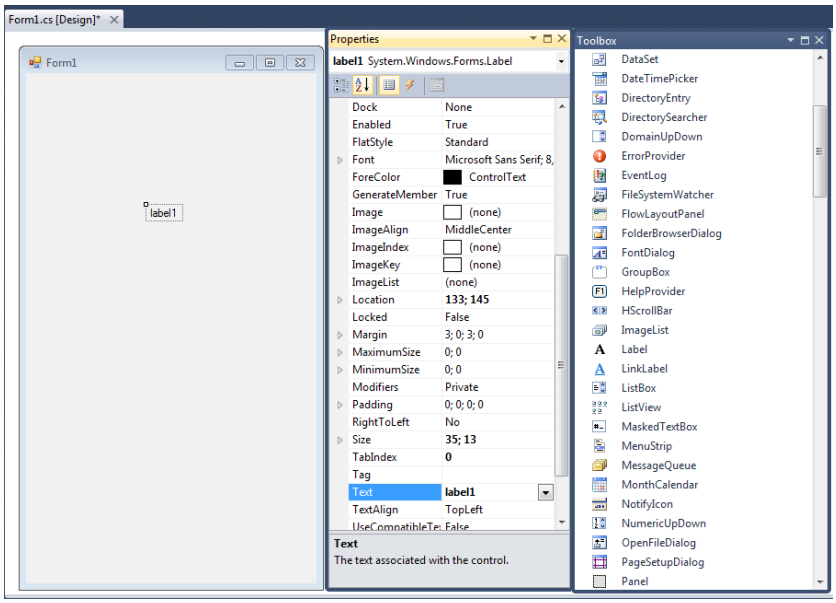
Windows uygulamaları windows kontrollerin tutulduğu pencerelerden oluşmaktadır. Windows projesi açıldığında form kontrolü otomatik olarak form1 adında eklenir. İkinci bir form eklemek için proje menüsü ile form seçilir. Örneğin radioButton1 aktif iken form5' e geçiş için aşağıdaki kod kullanılmaktadır [18-20].

```
if (radioButton1.Checked == true)
```

{ Form5 a = new Form5();

a.Show();

this.Hide(); }



Şekil 2.8 Label Özellikleri

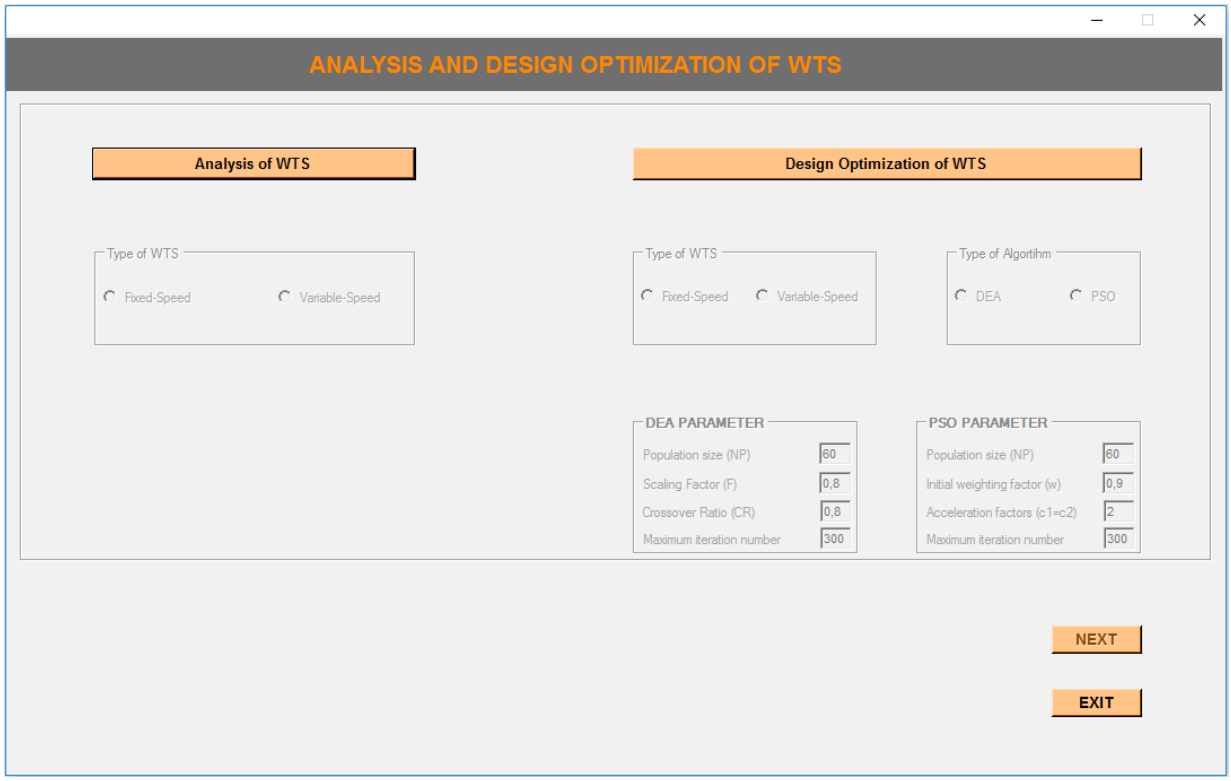
C# da matematiksel işlemlerin birçok kullanım şekli mevcuttur. Yaygın olarak kullanılanlar matematiksel işlemler, döngü ve mantıksal operatörlere ilişkin komut dizini Tablo 2.1'de verilmiştir [21-22].

Tablo 2.1 C# da yaygın matematiksel işlemler, karşılaştırma ve döngüler için komut dizini

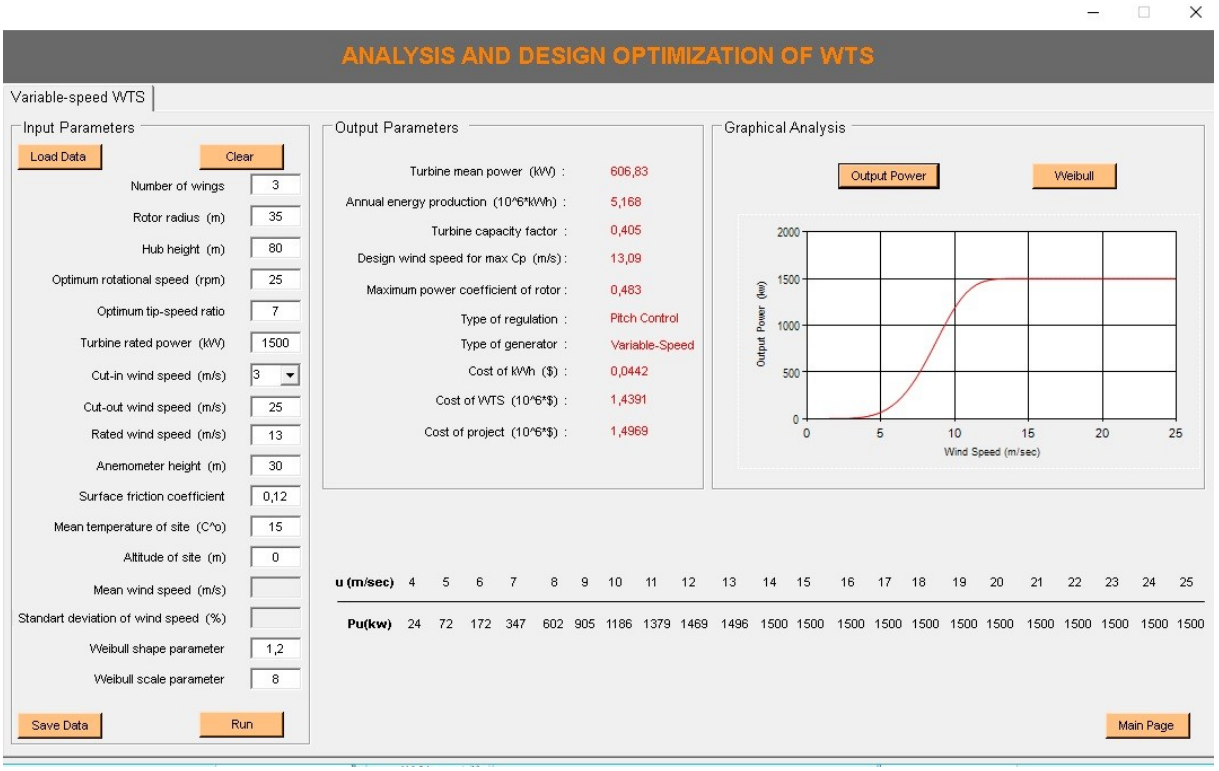
Komut	**İşlevi**
Math.Round(Sayı, Basamak)	Sayıyı basamak değeri kadar yuvarlar
Math.Pow (sayı,üs)	Sayının üssünü alır
Math.Exp (sayı)	Exponansiyel kuvvetini alır
Math.Sqrt (sayı)	Sayının karekökünü alır
Math.Sin (sayı)	Sayının sinüsünü alır
Math.Abs (sayı)	Sayının mutlak değerini alır
Math.Floor (sayı)	Sayıyı yukarıya yuvarlar
Math.Ceiling (sayı)	Sayıyı aşağı yuvarlar
rnd.Next(i,j)	i-j değer aralığında rastgele bir sayı üretir
for (int i = 1; i <=j; i++)	i=1,2,…,j için döngü oluşturur
if (i == j, i>=j, i<=j)	i ile j değerlerini karşılaştırır

2.3 Rüzgâr Türbini Sistemleri Analiz Ve Tasarım Optimizasyonu Paket (RTAOP) Programının Tanıtımı

RTAOP; nesne tabanlı, setup projesiyle işletim sisteminden bağımsız çalışan bir ara koda (Intermediate Language) dönüştürmesinden ve ayrıca proje ekibi tarafından iyi derecede kullanılabiliyor olmasından dolayı C# programlama dili kullanılarak tasarlanmıştır. Ayrıca ulusal ve uluslararası bazda kullanılması amacıyla metinler ingilizce olarak hazırlanmıştır. Proje kapsamında geliştirilen paket Şekil 2.9'da verildiği üzere Analiz ve Tasarım Optimizasyonu olmak üzere iki bölümden oluşturulmuştur. Analiz ve tasarım optimizasyonu sabit hızlı ve değişken hızlı RT'ler için ayrı ayrı yapılabilmektedir. Arayüz de Analiz veya Optimizasyon sekmesi seçilerek alt sekmeler aktif hale gelmektedir. Analiz bölümünde RT tipi seçilerek Next butonu ile Şekil 2.10'da verildiği üzere bilgi giriş ve sonuç 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 2.10'dan 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, kule yüksekliği, türbin kurulu gücü, kanat sayısı, kanat uç hızı oranı (veya devir sayısı) ve tasarım rüzgar hızı, nominal rüzgar hızı, anemometre yüksekliği gibi sabit veya değişken hızlı RT tipine göre uygun tasarım büyüklükleri giriş verileri olarak kullanılmaktadır. Kule yüksekliğindeki rüzgar hızı veya Weibull parametreleri değeri, anemometre yüksekliğine göre girilen rüzgar hızı; bölgenin rüzgar pürüzlülük (sürtünme) katsayısı dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Rakım, ortalama sıcaklık gibi coğrafik özellikler RT çıkış gücü hesabında hava yoğunluğunu belirlemede kullanılmaktadır. Enerji Maliyeti (BEM) [4] modeli kullanılarak belirlenmektedir. Bunun için yıllık enerji üretim miktarı RT'nin ortalama güç değerine göre Denklem 1.4 ile hesaplanmaktadır.

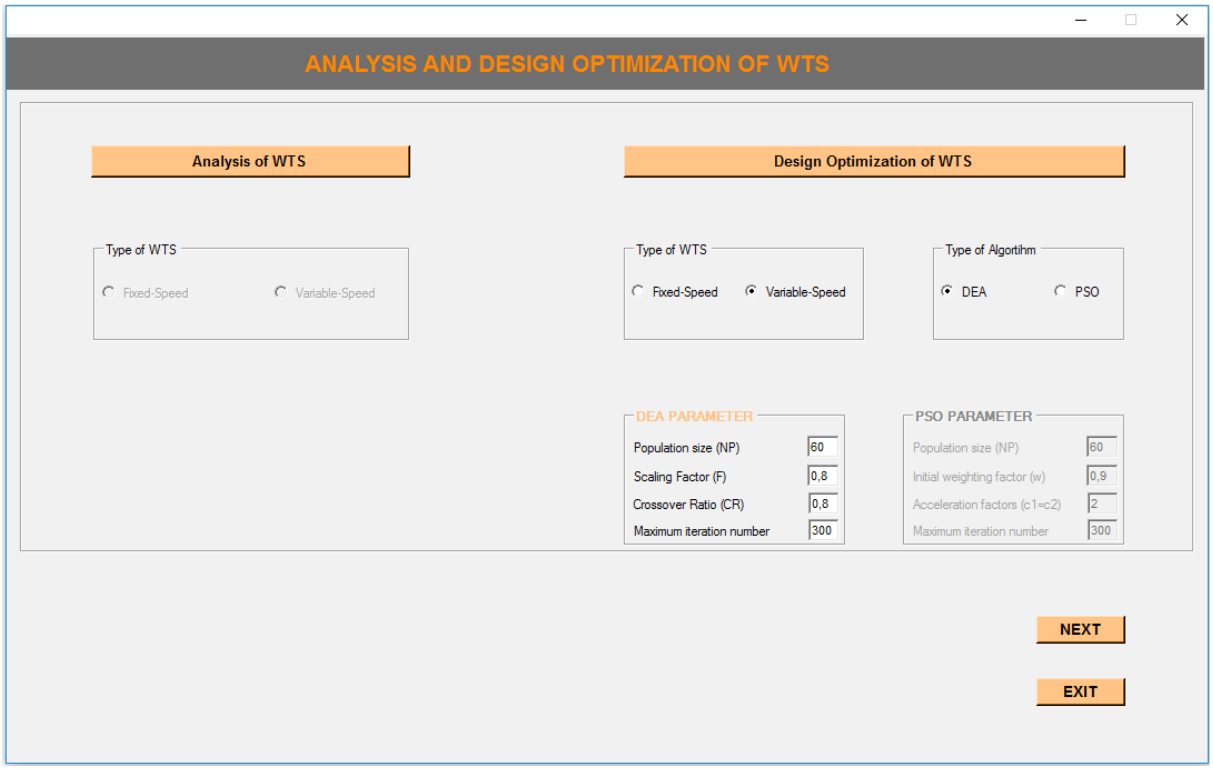


Şekil 2.9 Geliştirilen RTAOP arayüzü ana penceresi



Şekil 2.10 Değişken-hızlı RT'ler için giriş parametreleri ve üretilen güç, enerji ve maliyet analiz sonuçlarının elde edilmesi

Geliştirilen paketin Tasarım Optimizasyonu bölümünde Şekil 2.11'de verildiği üzere sabit hızlı ve değişken-hızlı RT'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 2.11 Arayüz de tasarım optimizasyonu sekmesi ile ilgili RT, optimizasyon algoritması ve buna ilişkin parametrelerin seçilmesi

Değişken-hızlı RT'ler için bilgi girişi ve optimizasyon sonuçlarının elde edilmesi Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Bu tip RT'ler için tasarım optimizasyonu Ara Raporda detaylı olarak verilen PSO ve DGA algoritmalarına göre yapılmaktadır. Bu iki farklı optimizasyon metodu ile verilen algoritmada kule yüksekliği (h) ve türbin nominal rüzgar hızı (u_n) bağımsız parametreler olarak alınmakta ve bunlara ait bireyler başlangıçta Tablo 2.2'de verilen sınır değerler arasında rastgele üretilmektedir. Diğer tasarım parametrelerinden rotor yarıçapı (R); her bir h bireyi için hesaplanarak bu değerlerim arasında yeni bireyler tanımlanmakta ve bunlardan biri rastgele seçilmektedir. Benzer durum türbin nominal gücü (P_n) için de geçerlidir. Tablo 2.2'de verildiği üzere nominal rüzgar 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 Denklem 1.1 ile oluşturulmaktadır. Türbin kapasite faktörü her bir u_n ve h

bireyleri için elde edilen Weibull parametreleri (k, c) Denklem 1.2'de kullanılarak yıllık ortalama güç elde edilmekte ve Denklem 1.3 ile belirlenmektedir. Yıllık ortalama güç (P_o) hesabında türbin çıkış gücü için proje kapsamında bu tip RT'lerde çıkış gücü hesabı için kondansatör geriliminin doğru akımda değişim ifadesinden faydalanarak yeni bir model geliştirilmiştir [23]. Model matematiksel olarak;

$$P_m(u) = P_n\left(1 - e^{-\left(\frac{u}{a}\right)^5}\right) \quad (2.1)$$

$$a = 0.70335986 \text{ x } u_n - 0.00049995 \quad (2.2)$$

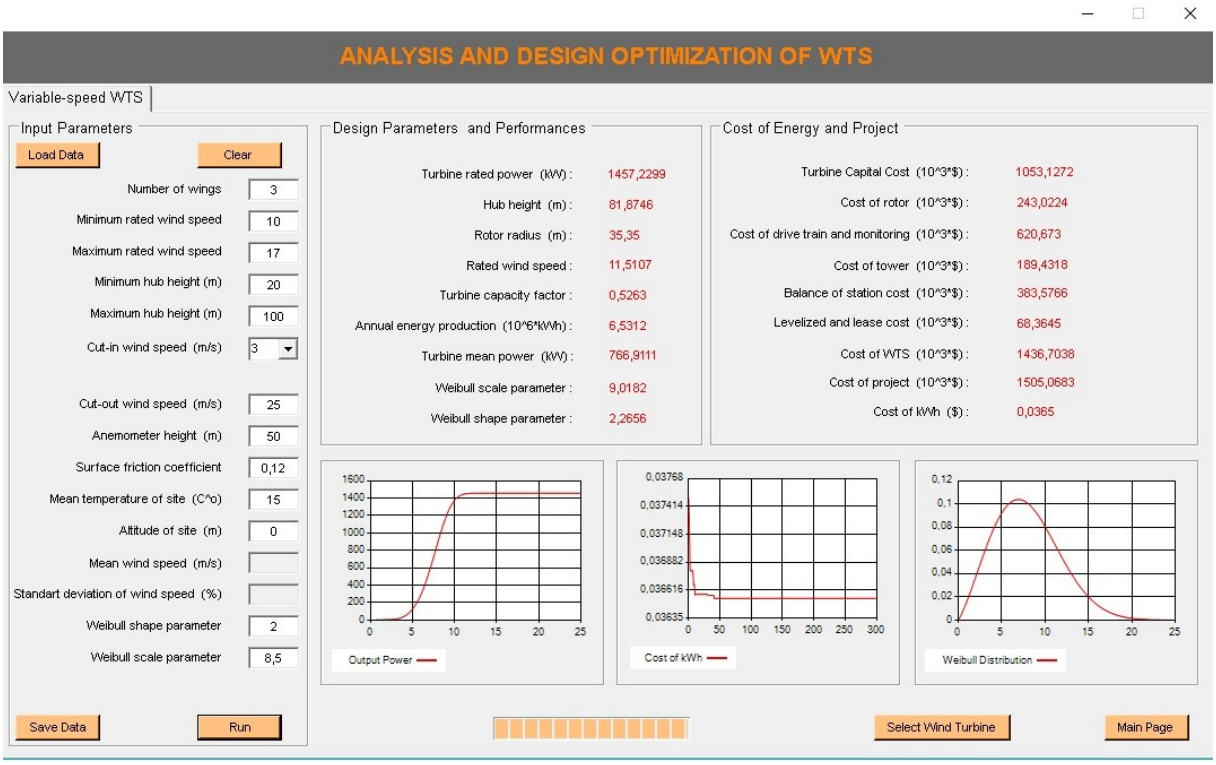
şeklinde olup P_n türbin kurulu gücünü kW cinsinden göstermektedir. Bu işlemler algoritmada her iterasyon için tekrar edilerek bağımsız parametrelere ait bireyler (u_n ve h değerleri) optimizasyon metotları ile aday bireylere göre yenilenmektedir. Algoritmada hedef fonksiyonu olarak birim enerji maliyeti seçilmiştir. Birim enerji maliyeti \$/kWh cinsinden Referansa [4]'de tanımlanan maliyet fonksiyonuna göre hesaplanmakta olup enerji üretim miktarı Denklem 1.4 ile belirlenmektedir. Algoritmada durdurma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı kullanılmıştır. Arar raporda verildiği üzere yapılan analizler sonucunda optimizasyon metodu olarak Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) [24] ve Parçacık Sürüsü Optimizasyon (PSO) [25] metotlarının bu tip problem için uygulanabilme, en uygun çözüme ulaşabilme ve performans açısından elverişli olduğu görülmüştür. Bu nedenlerden dolayı paketin tasarım optimizasyonu bölümünde bu iki optimizasyon metodu ile oluşturulan tasarım algoritmaları kullanılmaktadır.

Tablo 2.2 Değişken-hızlı RT'ler için tasarım parametreleri, sınırlar ve değişim aralıkları

	Tasarım Parametreleri	Sınırlar	Seçim Şekli
Bağımsız parametreler	Kule Yüksekliği (*h*)	h_{min}-h_{max} (giriş parametresi) (20-100m)	DGA-PSO
	Nominal rüzgâr hızı (u_n)	u_{n_min}- u_{n_max} (giriş parametresi) (10-17 m/sn)	DGA-PSO
Bağımlı	Rotor yarıçapı (*R*)	$\left(\frac{h}{7.711}\right)^{\frac{1}{0.6713}} \le R \le \left(\frac{h}{4.56}\right)^{\frac{1}{0.7385}}$	Rasgele

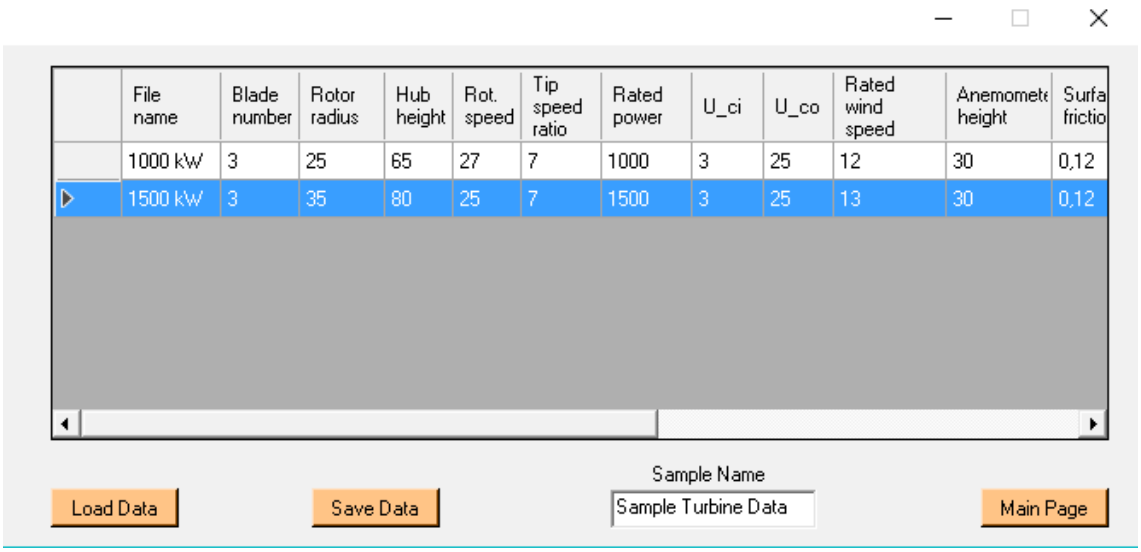
parametreler	Nominal Güç (P_n)	$0.3 \le C_{p_\max} \le 0.4$ $0.5\,\rho\, Au_{n^3}\, C_{p_max}$	Rasgele
	Kapasite faktörü (K_f)	Denklem 1.2, 1.3	-

Tasarım optimizasyonu sonucunda Şekil 2.12'den görüleceği üzere RT tasarım elemanlarının (Jeneratör gücü, rotor yarıçapı, kule yüksekliği) en uygun değeri belirlenebilmektedir. Bunların yanı sıra türbin nominal rüzgar 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 [4]'de verilen BEM modeline göre elde edilmektedir. Tasarlanan değişken hızlı RT için Analiz bölümünde de olduğu gibi türbin çıkış gücü; proje ekibi tarafından geliştirilen ve Denklem (2.1)'de verilen model ile belirlenmekte, birim enerji maliyetinin iterasyon sayısına göre değişimi ve ayrıca türbin yüksekliğindeki rüzgar hızının Weibull dağılımı Graphical Analysis groupBox'da grafiksel olarak elde edilebilmektedir.

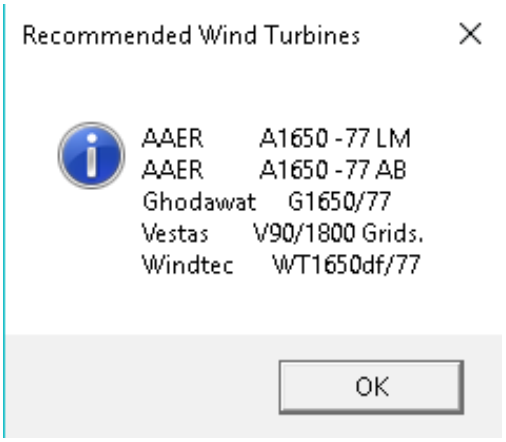


Şekil 2.12 Değişken-hızlı RT'ler için giriş parametreleri ve tasarım optimizasyonu sonuçlarının elde edilmesi

Paketin Analiz ve Tasarım Optimizasyonu bölümlerinde Save Data ve Load Data butonları ile girilen bilgiler kaydedilebilmekte ve yeniden yüklenebilmektedir. 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. Tasarlanan RT'ler için kurulu güç ve özellikle de nominal rüzgar hızı dikkate alınarak oluşturulan türbin listesinden [24] en uygun pratikte kullanılan RT'ler Select Wind Turbine sekmesi ile seçilebilmektedir. Nominal rüzgâr hızı, türbin kapasite faktörünü ve sonucunda ise enerji üretim miktarı ve enerji maliyetini önemli oranda etkilediğinden seçimlerde ön planda tutulmuştur. Bahsedilen bu uygulamalara ilişkin görseller sırasıyla Şekil 2.13 ve 2.14'de verilmektedir. Ayrıca pakette Main Page sekmesi ile Şekil 2.9'da verildiği üzere paketin ana pencereye dönülmekte, Clear butonu ile ekran temizlenmekte ve Exit butonu kullanılarak paket program katılmaktadır.



Şekil 2.13 Load Data ve Save Data butonu ile giriş değerlerinin yükleme ve kaydetme ekranı



Şekil 2.14 Optimizasyon sonucunda en uygun pratik RT seçimi ekranı

Her ne kadar günümüzde yaygın olarak kullanılmasa da rüzgârdan elektrik üretimi 90'lı yıllarda sabit-hızlı RT'ler ile gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle sabit-hızlı RT'lerin enerji ve maliyet analizi, ve ayrıca tasarım optimizasyonuna pakette verilmiştir. Analiz bölümünde kullanıcı kendi belirlediği rakım, ortalama sıcaklık, yüzeyin pürüzlülük katsayısı, yıllık ortalama rüzgâr hızı ve hızdaki standart sapma değeri (veya Weibull parametreleri) gibi bölgenin coğrafik özelliklerinin yanı sıra incelenen RT için rotor yarıçapı, kule yüksekliği, türbin kurulu gücü, kanat sayısı, kanat uç hızı oranı ve tasarım rüzgar hızı, anemometre yüksekliği gibi büyüklükler ve parametreler giriş verileri olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.15'de sabit-hızlı bir RT için giriş parametreleri ve analiz sonuçları verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere RT'nin toplam maliyeti, yıllık ortalama gücü ve enerji üretim miktarı, birim enerji maliyeti ve türbin kapasite faktörü gibi büyüklükler analiz edilebilmektedir. Bunların yanı sıra Rotor verimliliğinin değişimi, türbin güç karakteristiği ve bölgenin Weibull dağılımı da grafiksel ve Tablo (değer) olarak analiz edilebilmektedir. Rotor verimliliğinin rüzgâr hızına göre değişimi proje ekibi tarafından geliştirilen model kullanılarak elde edilmekte olup Denklem 1.1 ile RT çıkış gücü hesabında kullanılmaktadır. Geliştirilen modelde tasarım rüzgâr hızı (U_{tas}) ve başlangıç rüzgâr hızı (u_{ci}) birbirinden bağımsız olup ifadesi:

$$C_p(u) = \frac{C_{p_\max}}{w_m}\left(\frac{u}{u_{ci}} - 1\right)\left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^{k}\right] \quad (2.3)$$

$$k = k_1 e^{(k_2 U_{tas})} + k_3 e^{(k_4 U_{tas})} \quad (2.4)$$

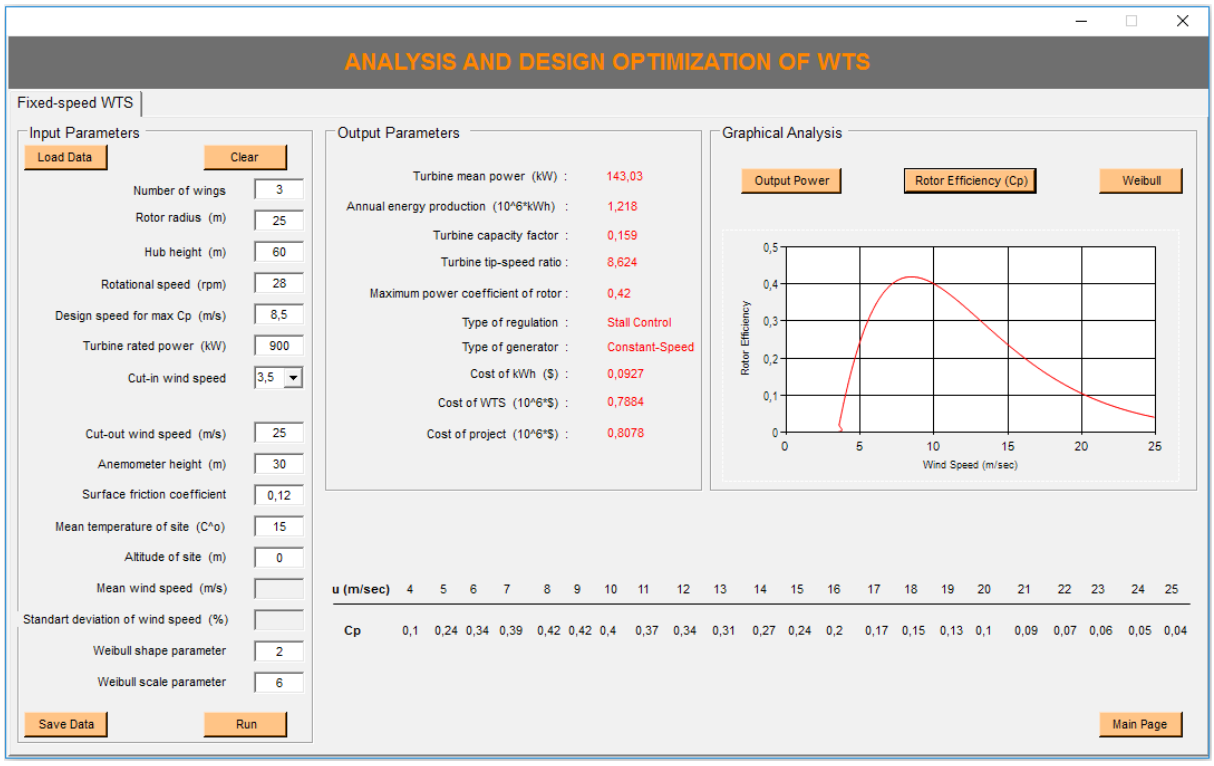
$$c = c_1 e^{(c_2 U_{tas})} + c_3 e^{(c_4 U_{tas})} \quad (2.5)$$

$$w_m = w_1 e^{(w_2 U_{tas})} + w_3 e^{(w_4 U_{tas})} \quad (2.6)$$

şeklindedir. Burada tasarım rüzgâr hızı; rotor verimliliğinin maksimum değerde olduğu rüzgar hızıdır [8]. Rotor verimliliğinin maksimum değeri ise:

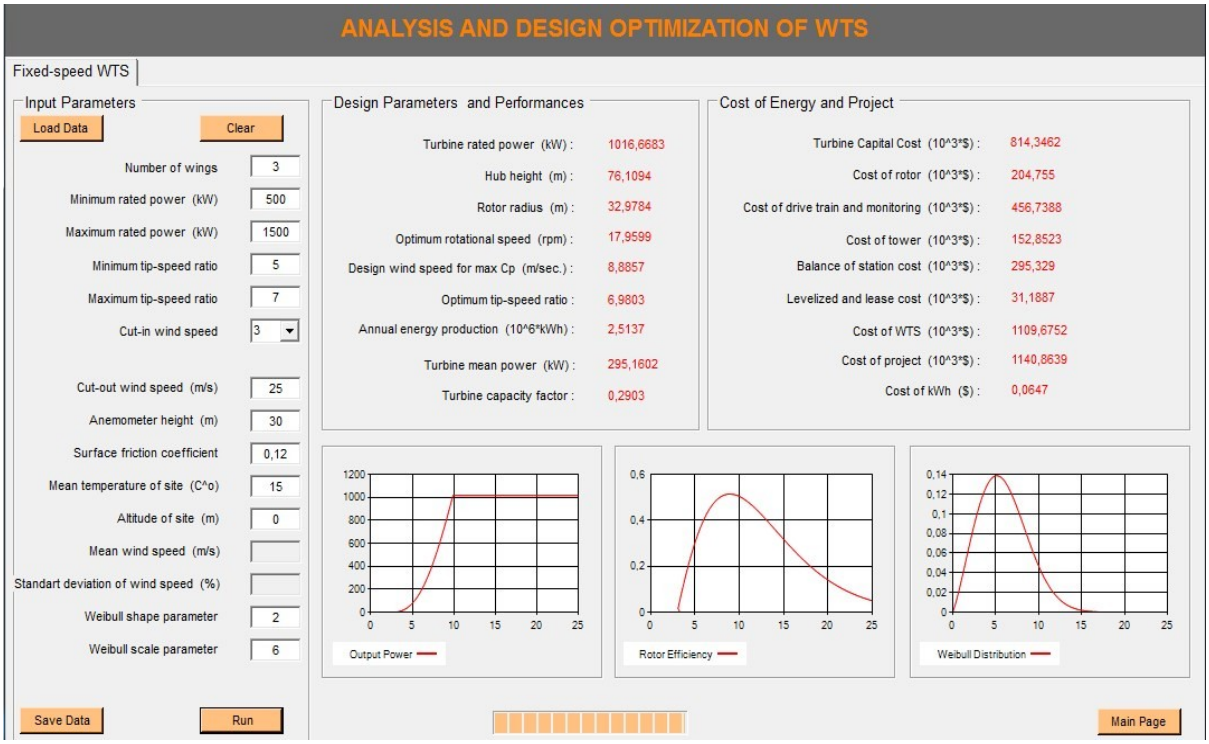
$$C_{p_{max}} = 0.593 \left(\frac{\lambda_{opt} p^{0.67}}{1.48 + \lambda_{opt}(p^{0.67} - 0.04) + 0.0025\lambda_{opt}^2} - \frac{1.92\lambda_{opt}^2 p}{1 + 2\lambda_{opt} p} \frac{C_d}{C_L} \right) \quad (2.7)$$

ifadesi ile yaklaşık olarak hesaplanmaktadır [8]. Burada λ_{opt} rotor verimliliğini maksimum yapan en uygun (optimum) kanat uç hızı oranı değeri olup orta ve büyük ölçekli 3 kanatlı RT'ler için bu değer 5-7 arasında değişmektedir. C_d ve C_l sırasıyla kanata etki eden sürükleme ve kaldırma kuvvetleri katsayılarıdır. Tipik bir NACA tip kanat için C_d/C_l oranı yaklaşık olarak 120 alınabilmektedir [5]. Modelde kullanılan diğer k, c ve w_m parametrelerine ilişkin katsayılar Ref. [8] ve ayrıca Ara Raporda verilmiştir.



Şekil 2.15 Sabit-hızlı RT'ler için giriş parametreleri ve üretilen güç, enerji ve maliyet analiz sonuçlarının elde edilmesi

Sabit-hızlı RT'lerin tasarımı Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) [24] ve Parçacık Sürüsü Optimizasyon (PSO) metodu [25] algoritması kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Algoritmalar Ara Raporda Detaylı olarak verilmiş olup geçerlilikleri test edilmiştir. Şekil 2.16'da bir sabit-hızlı RT için giriş parametreleri ve tasarım optimizasyonu sonuçlarının elde edilmesi verilmiştir. Bu tip RT'lerin tasarım optimizasyonu bölümünde her iki 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 rüzgar hızı (U_{tas}) bağımsız parametreler olarak alınmaktadır. Türbin gücüne ait bireyler başlangıçta Tablo 2.3'de verildiği üzere sınır değerler arasında rastgele üretilmektedir. Diğer tasarım parametrelerinden rotor yarıçapı (R); her bir P_n bireyi için hesaplanarak ±%5 sınırları içinde rastgele oluşturulan birey ile belirlenmektedir. Kule yüksekliği (h) ise Tablo 2.3'de verildiği üzere sınır değerler belirlenerek yeni bireyler tanımlanmakta ve bunlardan biri rastgele seçilmektedir. Benzer durum türbin nominal devir sayısı (N) için de geçerlidir. 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) kullanılarak belirlenmektedir. Burada RT çıkış gücü Denklem 2.3'de verilen rotor verimliliği için geliştirilen model Denklem 1.1'de kullanılarak elde edilmektedir. Bu işlemler algoritmada her iterasyon için tekrar edilerek bağımsız parametreye ait bireyler (P_n değerleri) optimizasyon metotları ile aday bireylere göre yenilenmektedir. Algoritmada hedef fonksiyonu olarak birim enerji maliyeti seçilmiştir. Birim enerji maliyeti $/kWh cinsinden Referansa [4]'de tanımlanan maliyet fonksiyonuna göre hesaplanmakta olup enerji üretim miktarı Denklem 1.4 ile belirlenmektedir. Algoritmada durdurma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı kullanılmıştır.



Şekil 2.16 Sabit-hızlı RT'ler için giriş parametreleri ve tasarım optimizasyonu sonuçlarının elde edilmesi

Tablo 2.3 Sabit-hızlı RT'ler için tasarım parametreleri, sınırlar ve değişim aralıkları

	Tasarım Parametreleri	Sınırlar	Seçim Şekli
Bağımsız parametre	Türbin gücü (P_n)	P_{min}-P_{max} (giriş parametresi)	DGA-PSO

Bağımlı parametreler	Rotor yarıçapı (R)	$0.95 \times D\text{enk.}(2.14) \leq N \leq 1.05 \times D\text{enk.}(2.14$	Rasgele
	Kule yüksekliği (h)	$4.56 \times R^{0.7385} \leq h \leq 7.711 \times R^{0.6713}$	Rasgele
	Rotor devir sayısı (N)	$0.9 \times D\text{enk.}(2.15) \leq N \leq 1.1 \times D\text{enk.}(2.15)$	Rasgele
	Tasarım rüzgâr hızı (U_{tas})	$\frac{Rw_r}{\lambda_{\max}} \leq u_{tas} \leq \frac{Rw_r}{\lambda_{\min}}$	Rasgele

3. BULGULAR

3.1 Değişken-Hızlı RT'lerin Tasarım Optimizasyonu

RTAOP 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 rüzgar potansiyeli h=30 m için k=1.2, c=8

m/sn [5], h=50 m için k=2, c=8.5 m/sn ve yüzeyin pürüzlülük katsayısı α=0.12 olarak alınmıştır [4]. 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) 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 ve metotlar için NP=60 ve maksimum iterasyon sayısı 300 değerlerinin bu problem için uygun olduğu görülmüştür.

Tablo 3.1'de Güney Avrupa bölgesi için tasarlanan RT parametreleri, güç, enerji ve maliyet değerleri verilmiştir. Literatürde bu gölge için yapılan tasarım optimizasyonu ile elde edilen sonuçlar da tabloda verilmektedir. Tablodan görüleceği üzere İki farklı metot kullanılarak tasarlanan RT'ler tasarım parametreleri ve performans açısından tamamen uyuşmaktadır. Diğer taraftan tasarlanan RT'lerin Referans [5]'de verilen RT ile kıyaslandığında Birim Enerji Maliyeti ve/veya yıllık enerji üretim miktarı açısından daha avantajlı olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca Referans [5]'de RT çıkış gücü için Lineer model kullanılmıştır. Dolayısıyla enerji üretim miktarı, maliyet vb. hesaplamalar yaklaşık olarak belirlenerek tasarım gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan tasarlanan RT'ler, Referans [9]'da 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 referans [9]'da önerilen RT'nin biraz daha avantajlı olduğu görülmektedir. Fakat bu çalışmada yapılan tasarım optimizasyonunda türbin kapasite faktörü bağımsız değişken, nominal rüzgar hızı bağımlı değişken olarak alınmıştır. Nominal rüzgar 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 rüzgar türbinlerinin tasarım optimizasyonunda nominal rüzgar hızının bağımsız değişken olarak alınması tasarım optimizasyonunun gerçekçiliği açısından daha uygundur. Ayrıca rotor verimliği rüzgâr hızı arttıkça azalmaktadır. Pratikte kullanılan RT'lerin gerçek güç eğrileri incelendiğinde nominal rüzgar hızı değerinde rotor verimliliği değerinin 0.4 ve daha düşük değerde 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 RTOP paketi kullanılarak tasarlanan RT'lerin [9]'da tasarlanan RT'ye nazaran daha gerçekçi olduğunu söylemek mümkündür.

Tablo 3.1 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	69.2	79	12.09	1624	0.440	715	6.09×10^6	0.039
Tasarlanan RT (PSO)	3	68.1	79	12.17	1606	0.437	702	5.98×10^6	0.039
RT Ref. [5]	3	30	30	14.00	1000	0.349	349	2.97×10^6	0.039
RT Ref. [9]	3	64.2	73.5	12.40	1705	0.488	771	6.57×10^6	0.037

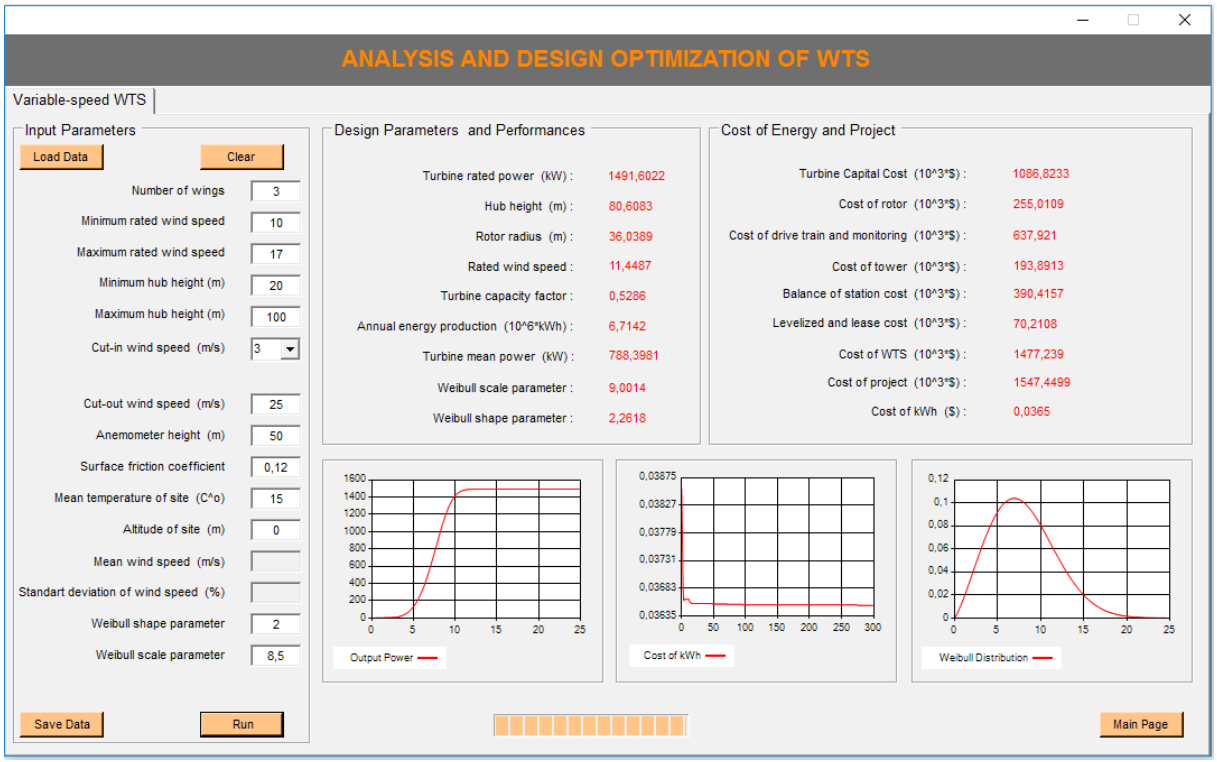
Tablo 3.2'de h=50 m referans yükseklikte k=2 ve c=8.5 m/sn rüzgar potansiyeli için üç metot kullanılarak tasarlanan RT'ler ve bu bölge için Referans [4]'de NREL (National Renewable Energy Laboratory) tarafından tasarlanan RT parametreleri verilmektedir. Tablodan görüleceği üzere her iki metot kullanılarak tasarlanan RT ile referans RT için tasarım parametreleri ve maliyet büyük oranda uyuşmaktadır. Diğer taraftan tasarlanan RT'lerin türbin kapasite faktörü ve sonucunda yıllık enerji üretimi açısından biraz daha avantajlı olduğu görülmektedir. Ayrıca Ref. [4]'de yapılan tasarımda Denklem 1.1'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.

Tablo 3.2 h=50 m de k=2 ve c=8.5 m/sn için tasarlanan RT'lerin tasarım büyüklükleri, enerji ve maliyet değerleri

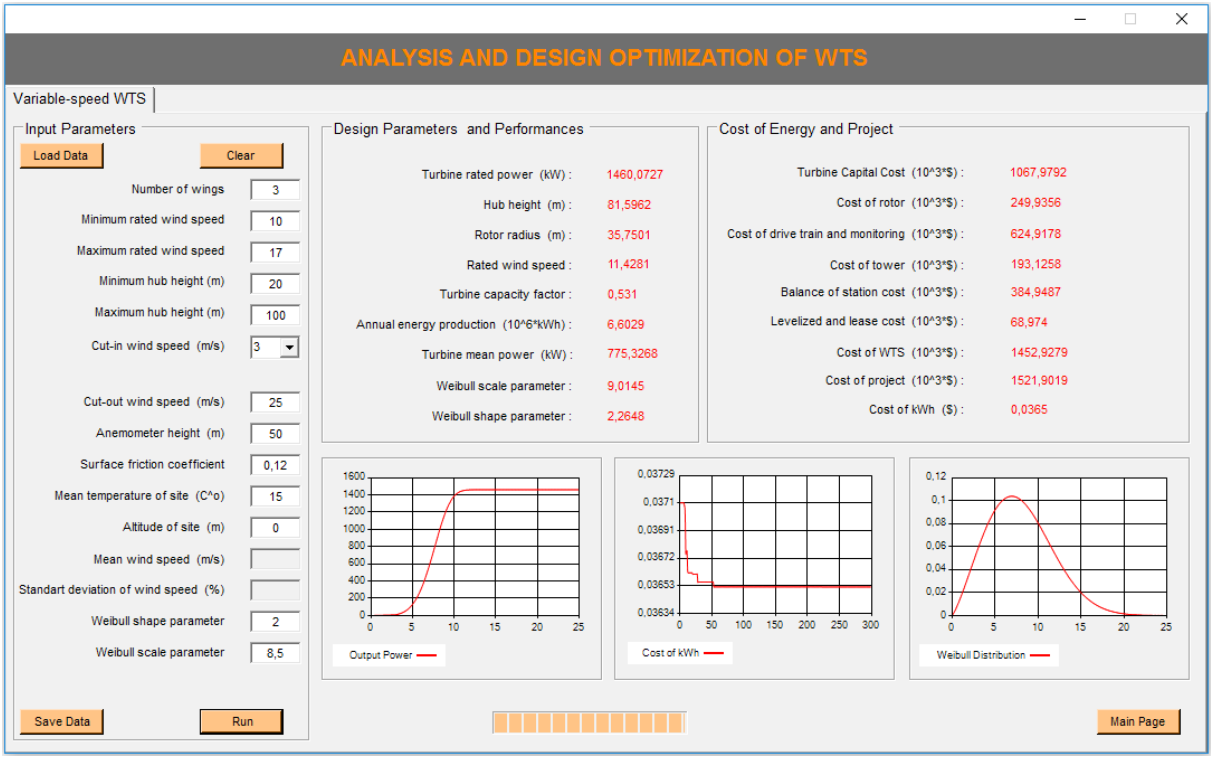
Tasarım Parametresi	p	D (m)	h (m)	u_n (m/sn)	P_n (kW)	KF	P_o (kW/yıl)	YEÜ (kWh)	BEM ($/kWh)
Tasarlanan RT (DGA)	3	72.0	80	11.44	1491	0.528	788	6.71×10^6	0.036
Tasarlanan RT (PSO)	3	71.6	81	11.42	1460	0.531	775	6.60×10^6	0.036

RT Ref. [4]	3	70	65	11.39	1500	0.511	767	6.53×10^{6}	0.036

Her iki metot kullanılarak yapılan tasarım optimizasyonu sonuçları aynı zamanda Şekil 3.1 ve 3.2'de verilmiştir. Analizler için optimizasyon algoritması i5-4590, 3.3-GHz işlemci ve 8 GB/3.3-GHz RAM hafıza özelliklerine sahip bilgisayarda çalıştırılmıştır. Hesaplama süresi açısından DGA ve PSO temelli algoritmanın 300 iterasyonu 6 saniye civarında tamamladığı görülmüştür. Problemdeki parametre sayısı, kısıtlamalar, maliyet analizi, iterasyon ve popülasyon sayısı dikkate alınıldığında bu sürenin çok elverişli olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 3.1 Referans yükseklik h=50 m de k=2 ve c=8.5 m/sn olan bölge için DGA metodu kullanılarak değişken-hızlı RT tasarımının gerçekleştirilmesi



Şekil 3.2 Referans yükseklik h=50 m de k=2 ve c=8.5 m/sn olan bölge için PSO metodu kullanılarak değişken-hızlı RT tasarımının gerçekleştirilmesi

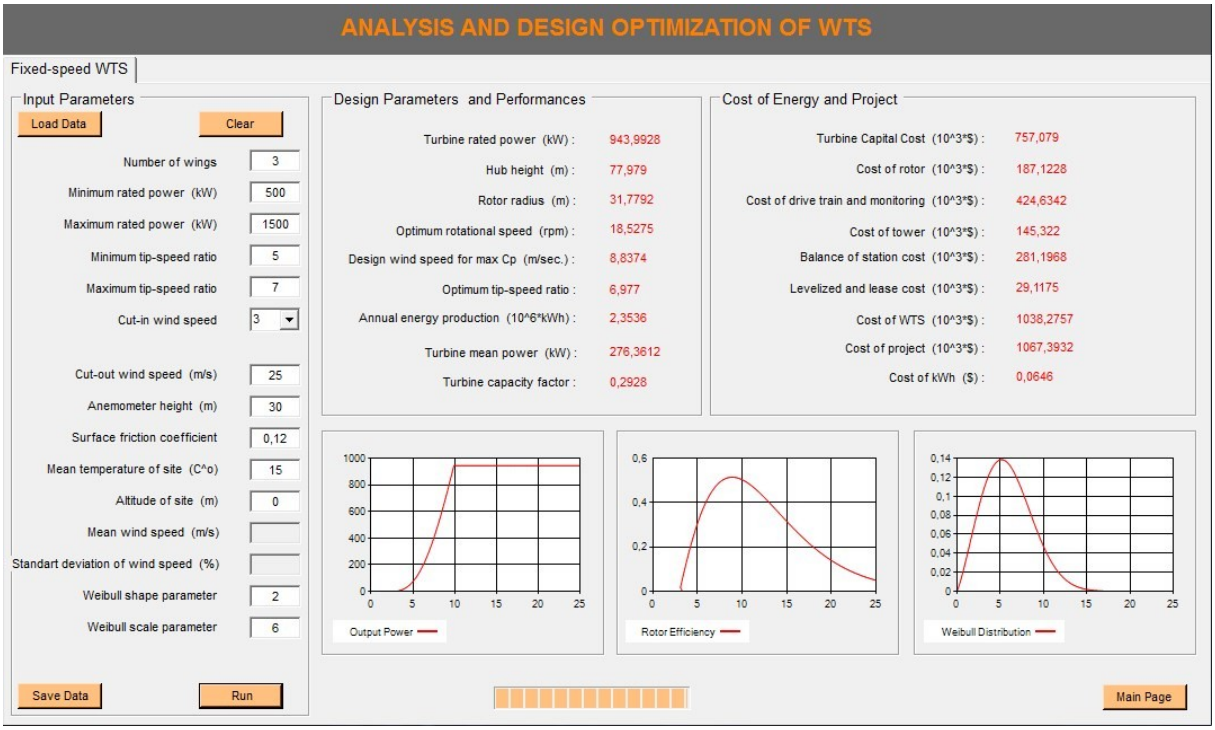
3.2 Sabit-Hızlı RT'lerin Tasarım Optimizasyonu

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 rüzgar hızında, nominal güce ulaşmakta ve sabit nominal devir de çalıştırılmaktadır. Bu tip RT'lerin tasarımında da Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) [24] ve Parçacık Sürüsü Optimizasyon (PSO) metodu [25] algoritması kullanılmıştır. RTAOP paketinde bu tip RT'lerin tasarımı için oluşturulan algoritmalar k=2, c=6 m/sn, h_o=30 m ve α=0.12 değerlerine sahip Kuzey Avrupa bölgesi için [5] uygulanarak geçerliliği test edilmiştir. Tasarımlar kanat açısının kontrolü varsayımı için yapılmış ve sonuçlar Referans [5]'de bu bölge için tasarlanan RT ile kıyaslanarak Tablo 3.3'de verilmiştir. Paket ile PSO kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 3.3'de verilmiş olup ve bölge için DGA ile elde edilen tasarım sonuçları Şekil 2.16'dan görülebilmektedir. Sonuçlar, tasarlanan RT'lerin üretilen enerji miktarı ve birim enerji maliyeti açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca tasarım kurgusu ve tanımlanan kısıtlamaların geçerliliğini test etmek amacıyla türbin gücü referans RT gücüne eşit alınarak (660 kW) aynı bölge için elde edilen optimizasyon sonuçları tabloda son sütunlarda ve DGA

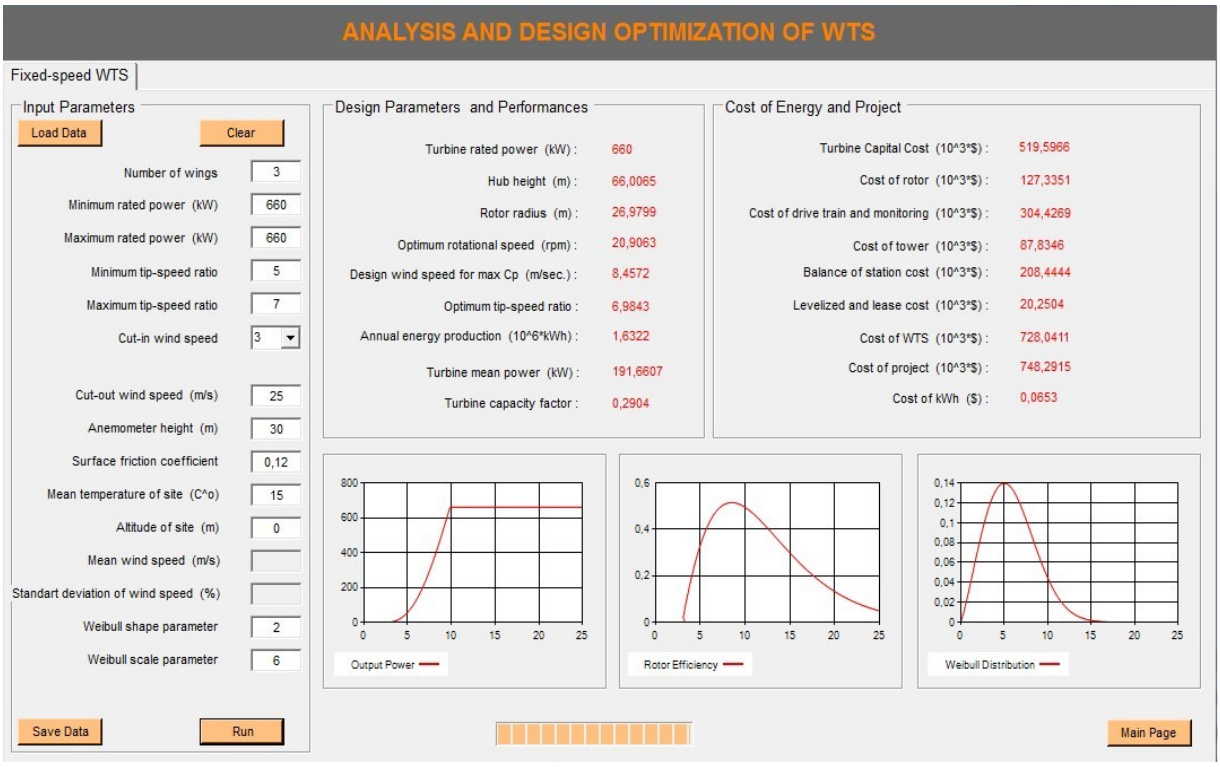
ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.4'de verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere RT gücünün kurulu türbin gücüne eşit ve sabit alınması durumunda diğer tasarım büyüklükleri (hub yüksekliği, rotor yarıçapı, devir sayısı vb. gibi), uyuşmaktadır. Diğer taraftan tasarlanan RT'lerin Referans [5]'de verilen RT ile kıyaslandığında Birim Enerji Maliyeti ve yıllık enerji üretim miktarı açısından daha avantajlı olduğunu söylemek mümkündür. Dolayısıyla, tasarım büyüklükleri arasında tanımlanan kısıtlamaların ve paket kullanılarak yapılan optimizasyon analizinin güvenilir olduğunu seçilen bölgenin rüzgar 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) fonksiyonunu aynı değere yakınsamaktadır. Sonuç olarak geliştirilen Analiz ve Tasarım Optimizasyonu paketinin sabit-hızlı RT'ler için tasarım optimizasyonu kısmının da kullanıma elverişli olduğunu söylemek mümkündür.

Tablo 3.3 k=2, c=6 m/sn, h_o = 30 m ve α=0.12 değerleri için optimizasyon sonuçları ve kurulu RT parametreleri

Tasarım Parametreleri	**Ref. RT** [5]	**RT DGA**	**RT PSO**	**RT DGA** *(P_n=660kW)*	**RT PSO** *(P_n=660kW)*
n	3	3	3	3	3
D (m)	47	65.8	63.4	53.8	51.4
H_{hub} (m)	60	76	77	66	66
N (rpm)	26	17.9	18.5	26.9	22
U_{tas} (m/sn)	8	8.88	8.83	8.45	8.3
P_n (kW)	660	1016	943	660	660
YEÜ (kWh)	1.30×10^6	2.51×10^6	2.35×10^6	1.63×10^6	1.53×10^6
Birim Enerji Mal. ($cent)	7.12	6.47	6.46	6.53	6.6
Kapasite Faktörü	0.23	0.29	0.29	0.29	0.27
Opt. kanat uç hızı oranı	7.99	6.98	6.97	6.98	6.99
RT ortalama gücü (kW/yıl)	153.4	295	276	191	180
Kontrol tipi	Pitch	Pitch	Pitch	Pitch	Pitch



Şekil 3.3 Referans yükseklik h=30 m de k=2 ve c=6 m/sn olan bölge için PSO metodu kullanılarak sabit-hızlı RT tasarımının gerçekleştirilmesi



Şekil 3.4 Referans yükseklik h=30 m de k=2 ve c=6 m/sn olan bölge için DGA metodu kullanılarak P_n=660 kW gücünde sabit-hızlı RT tasarımının gerçekleştirilmesi

4. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Bu projede 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) geliştirilmiştir. Paketin analiz bölümünde sabit- ve değişken-hızlı RT'ler için bölgenin coğrafik özellikleri, rüzgâr potansiyeli gibi büyüklükler ve türbin sistemi için rotor yarıçapı, kule yüksekliği, jeneratör gücü vb. gibi tasarım büyüklükleri kullanılarak tasarlanan veya mevcut kurulu bir RT'nin güç, enerji üretim miktarı ve maliyet analizleri yapılabilmektedir. Paketin tasarım optimizasyonu bölümünde ise her iki tip 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 rüzgar hızı, türbin kapasite faktörü vb gibi tasarım parametrelerinin değerleri de belirlenebilmektedir.

Analiz ve tasarım optimizasyonu uygulamalarında proje ekibi tarafından sabit-hızlı ve değişken-hızlı RT'lerin çıkış gücü hesabına ilişkin geliştirilen ve diğer modellere nazaran daha gerçekçi sonuç veren modeller kullanılmıştır. Ayrıca pratikte kullanılan çok sayıda gerçek RT'lerin bilgileri kullanılarak RT'ler için kule yüksekliği, jeneratör gücü ve rotor yarıçapı gibi tasarım büyüklükleri arasında yeni matematiksel modeller geliştirilmiş ve bu modeller RT'lerin tasarımında elemanların büyüklüklerinin gerçekçi olarak belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Yapılan analizlerde bu tip optimizasyon problemi için optimum değere yakınsama ve hesaplama süresi açısından Parçacık Sürüsü Optimizasyon Metodu ve Diferansiyel Gelişim Algoritmasının diğer metotlara nazaran daha avantajlı olduğu görülmüş ve sonucunda bu metotlar sabit- ve değişken-hızlı RT'lerin tasarım optimizasyonunda kullanılmıştır.

Arayüz; nesne tabanlı, setup projesiyle işletim sisteminden bağımsız çalışan bir ara koda (Intermediate Language) dönüştürmesinden ve ayrıca proje ekibi tarafından iyi derecede kullanılabiliyor olmasından dolayı C# programlama dili kullanılarak tasarlanmıştır. Setup projesi eklenerek tasarlanan programdan ve işletim sisteminden bağımsız olarak çalıştırılabilir hale getirilmiştir. Oluşturulan bu kurulum dosyası http://muhendislik.gop.edu.tr/birimProjeler.aspx?dilId=1&birimlerId=11&menuKod=projeler adresinden ücretsiz olarak tüm kişi ve/veya kurumların erişimine açılacaktır.

5. KAYNAKLAR

[1] Hau, E. 2005. Wind Turbines- Fundamentals, Technologies, Application, Economics (2nd Basım), Berlin:Springer Verlag.

[2] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Sektör Raporu, Ocak 2017. www.epdk.org.tr, Son erişim tarihi: Haziran 2017.

[3] Sing, C. 2012. “Variable speed wind turbines”, International Journal of Engineering Sciences, 2, 652-656.

[4] Fingersh, L. Hand, M. Laxson, A. 2006. “Wind Turbine Design Cost and Scaling Model”, National Renewable Energy Laboratory (NREL/TP-500-40566), USA.

[5] Diveux, T. Sebastian, P. Bernard, D. Puiggali. RJ, and Grandidier, J.Y. 2001. “Horizontal axis wind turbine systems: optimization using genetic algorithms”, Wind Energy, 4, 151-171.

[6] Maki, K., Sbragio, R., Vlahopoulos, N. 2012. “System design of a wind turbine using a multi-level optimization approach”, Renewable Energy; 43, 101-110.

[7] Collecutt, G.R., Flay, R.G. 1996. “The economic optimization of horizontal axis wind turbine design parameters”, Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics, 61, 87-97.

[8] Eminoğlu, U. 2016. “Site specific design optimization of horizontal axis wind turbine systems”, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 24, 1044-1060.

[9] Eminoğlu, U., Ayasun, S. 2014. “Modelling and design optimization of variable-speed wind turbine systems”, Energies, 7, 402-419.

[10] Kongam, C., Nuchprayoon, S. 2010. “A particle swarm optimization for wind energy control problem”, Renewable Energy, 35, 2431-2438.

[11] Li, H., Chen, Z. 2009. “Design optimization and site matching of direct-drive permanent magnet wind power generator systems”, Renewable Energy, 34, 1175-1184.

[12] Danish Wind Industry Association. “Wind Turbine Power Calculator”. www.windpower.org, Son erişim tarihi: Ağustos 2017.

[13] The WindPower Programme. “The WindPower and UK Wind Speed Database programs”. http://www.wind-power-program.com, Son erişim tarihi: Ağustos 2017.

[14] WMC. “The integrated Modular Wind Turbine Design Tool”. http://www.wmc.eu, Son erişim tarihi: Ağustos 2017.

[15] WindFarm. “Wind Farm Analysis Design and Optimization Software”. http://www.resoft.co.uk, Son erişim tarihi: Ağustos 2017.

[16] WindRose. “Wind data analyses software”. http://www.windrose.gr, Son erişim tarihi: Ağustos 2017.

[17] WASP. “Wind Atlas Analysis and Application Program”. http://www.wasp.dk, Son erişim tarihi: Ağustos 2017.

[18] Algan, S. 2016. Her yönüyle C# 6.0. İstanbul: Pusula Yasyıncılık ve İletişim.

[19] Kaymaz, A. 2013. C# programlama dili ve yazılım tasarımı cilt I” (2. Basım). İstanbul: Papatya Bilim Yayınevi.

[20] Liberty, J. 2002. Programming C#” (2nd Edition). O'Reilly ISBN: 0-596-00309-9

[21] Demirli, N. İnan, M.Y. 2015. Visual C# .net 2015. Ankara: Ümit Ofset Matbaacılık.

[22] Aktaş, V. 2016. Her yönüyle C# 6.0 (20. Baskı). İstanbul: Kodlab.

[23] Eminoğlu, U. 2015. “ A New Model for Output Power Calculation of Variable-Speed Wind Turbine Systems”, IEEE International Conference on ACEMP-OPTIM-ELECTROMOTION (ACEMP 2015),141-146.

[24] Storn, R., Price, K.V. 1997. “Differential evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous Spaces”, J. Global Optim, 11, 341-359.

[25] Kennedy, J. Eberhart, R. C. 1995. “Particle swarm optimization”, Proc. IEEE int. conf. on neural networks, 4, 1942-1948.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. ULAŞ EMİNOĞLU
Proje No:	114E961
Proje Başlığı:	Rüzgâr Türbini Sistemleri Analiz ve Tasarım Optimizasyonu Paket (RTAOP) Programının Geliştirilmesi
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	15
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR Ü. MÜHENDİSLİK MİMARLIK F. ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/06/2015 - 15/09/2017
Onaylanan Bütçe:	65154.0
Harcanan Bütçe:	3845.67
Öz:	Bu projede Rüzgâr Türbinlerinin (RT lerin) güç, enerji ve maliyet analizinin yanı sıra bölgesel olarak en düşük maliyette enerji üretimi için uygun RT tasarımının yapılabileceği paket geliştirilmiştir. Geliştirilen paket Analiz ve Tasarım optimizasyonu olarak iki bölümden oluşmaktadır. Analiz bölümünde kullanıcı sabit- veya değişken-hızlı RT ler için tasarım büyüklükleri ve parametre değerleri ile bölgeniz rüzgâr ve coğrafik özelliklerini kullanarak, yıllık ortalama güç, enerji üretim miktarı, toplam maliyet ve birim enerji maliyeti gibi enerji ve maliyet analizlerini ayrı ayrı gerçekleştirebilmektedir. Tasarım optimizasyonu bölümünde ise kullanıcı her iki tip RT için seçilen bölgenin coğrafik ve rüzgâr hızı değerlerini kullanarak en düşük maliyette enerji üretimini gerçekleştirecek RT yi tasarlayarak pratikte kullanılan çok sayıda RT lerden tasarlanana en yakın olanını seçebilmektedir. Ayrıca analiz edilen veya tasarlanan RT ye ait çıkış (güç) karakteristiği, rotor verimliliği ve bölgenin rüzgâr hızı olasılık dağılımı gibi parametreler grafiksel olarak analiz edilebilmektedir. Bu parametrelerin oluşturulmasında proje ekibi tarafından geliştirilmiş ve geçerlilikleri test edilmiş matematiksel modeller kullanılmaktadır. Buna ilaveten pratikte kullanılan çok sayıda gerçek RT lerden faydalanılarak RT ler için temel tasarım büyüklükleri olan kule yüksekliği, jeneratör gücü ve rotor yarıçapı arasında tanımlanan matematiksel modeller RT lerin tasarımında kullanılarak büyüklüklerinin gerçekçi ve birbirleri ile uyumlu olarak belirlenmesine olanak sağlanmaktadır. Sonuç olarak oluşturulan paketin gerçekçi modeller ve tasarım kurgusu ile analiz ve en uygun (optimum) tasarımın elde edilmesi ve ayrıca kullanım kolaylığı açısından kullanıcıya büyük avantaj sağladığı görülmektedir.
Anahtar Kelimeler:	Rüzgâr Türbinleri, Enerji üretimi ve maliyet, Tasarım optimizasyonu, Grafik kullanıcı arabirimi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Evet
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbini Sistemlerinin Çıkış Gücü Hesabı için Geliştirilen Matematiksel Modellerin Geçerliliklerinin Analiz Edilmesi (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum), 2- Site-Specific Design Optimization of Horizontal Axis Wind Turbine Systems (Makale - İndeksli Makale), 3- Değişken-hızlı rüzgâr türbinlerinin diferansiyel gelişim algoritması kullanılarak tasarım optimizasyonunun gerçekleştirilmesi (Makale - Diğer Hakemli Makale), 4- A New Model for Output Power Calculation of Variable-Speed Wind Turbine Systems (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 5- Bölgesel Coğrafik Özellikler ve Rüzgâr Potansiyeli Dikkate Alınarak Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Tasarım Optimizasyonunun Gerçekleştirilmesi (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),

TÜBİTAK