

## Matlab GUI Kullanılarak Rüzgâr Türbini Sistemleri İçin Tasarım Optimizasyonu Paketinin Geliştirilmesi

### Developing of Design Optimization Package for Wind Turbine Systems By Using Matlab GUI

Ulaş Eminoğlu

Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

ueminoğlu@nigde.edu.tr

#### Özet

Rüzgâr Türbini Sistemlerinde üretim maliyetinin yaklaşık %75'ini kurulum giderleri oluşturmaktadır. Bu giderler; kullanılan jeneratör gücüne, rotorun yerden yüksekliğine (hub yüksekliğine), rotor yarıçapı gibi büyüklüklere ve kanat sayısına göre değişmektedir. Dolayısıyla, kurulacak türbin sisteminde bu elemanların büyüklüklerinin bölgenin rüzgâr potansiyeli ve coğrafik yapısı göz önünde bulundurularak birbirleri ile uyumlu ve üretilecek enerjinin maliyetini en aza indirecek şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Matlab GUI (Grafik Kullanıcı Arabirimi) kullanılarak Rüzgâr Türbinlerinin kurulacağı bölgenin coğrafik özellikler (rakım, ortalama sıcaklık vb) ve ölçümler ile belirlenmiş yıllık ortalama rüzgâr hızı, hızdaki standart sapma değeri gibi rüzgâr potansiyeli dikkate alınarak en düşük maliyette enerji üretimi için Rüzgâr Türbini Sistemi tasarım optimizasyonu paketi verilmektedir.

#### Abstract

For Wind Turbine Systems, the installation costs are approximately 75% of production costs and it varies with the generator power, the height of the rotor (hub height), the radius of the rotor and the number of wings. Therefore, the turbine system has to be installed to minimize the cost of produced energy by taking into account the region's wind potential and geographic situation considering these turbine quantities which must be compatible with each other. In this study, Wind Turbine Systems' design optimization package is developed for production of electrical energy at the lowest cost by taking into account region's geographic situation (altitude, average temperature, etc.) that the system will be installed and region's wind potential such as annual average wind speed and its standard deviation determined by measurements using Matlab GUI (Graphical User Interface).

#### 1. Giriş

Bilindiği gibi yeryüzünde mevcut bütün enerji kaynaklarının kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi o kaynağın kendine özgü niteliği, zenginliği ve cinsine göre değişmektedir. Kullanılan enerji kaynaklarının maliyet analizleri yapılarak toplam maliyeti en düşük olan enerji kaynakları tercih edilmektedir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları maliyetin yanı sıra enerji teminine yönelik tüm süreçlerde ekolojik denge ile çevre üzerindeki olumsuz

etkilerin en aza indirilmesi açısından da önemlilik arz etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi; fosil yakıtların meydana getirdiği çevre kirliliği gibi etmenlerin olmadığı, dışa bağımlılıktan uzak, temiz enerji yaratması, işletme giderlerinin nispeten az ve fiyat belirsizliği riskinin asgaride olması nedeniyle yatırım yapılması tercih edilen projelerin başında gelmektedir [1].

Rüzgâr Türbini Sistemleri (RTS'ler), rüzgârdaki hareket enerjisini önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir [2]. Türbinlerinin ürettikleri enerjinin beraberinde, genelde tüketiciye yakın yerde kurulu olmaları taşımadan kaynaklanan giderleri de önlemektedir. RTS'lerin güç kapasiteleri, rotor (kanat) yarıçap büyüklüklerine göre kW'lardan MW'lara kadar değişmektedir. RTS'ler ile rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi, seçilecek bölgenin meteorolojik özelliklerine ve en önemlisi de kullanılacak türbin sisteminin tasarımına bağlıdır. Ekonomik olarak enerji üretebilmek için RTS'nin kurulması düşünülen bölgede rüzgâr hızı, coğrafik özellikler (rakım sıcaklık gibi hava yoğunluğuna etki eden büyüklükler) ve arazi pürüzlülüğünün çok iyi belirlenerek tasarımında göz önünde bulundurulması gerekmektedir [3], [4].

RTS'lerin tasarım optimizasyonu uygulamaları başlangıçta tek bir tasarım çalışması noktasında olası en büyük güç üretimine dayanmaktadır [5]. Bu gibi tasarım optimizasyon çalışmaları düşük üretim ve bakım maliyetinde yüksek kapasiteli enerji üretimi kavramlarını (Birim Enerji Fiyatı modeli) ortaya çıkarmış ve birim enerji miktarını en düşük maliyette üretebilmek için tasarım yöntemleri geliştirilmiştir [4], [6]. Bu model daha sonra Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) [7] ve RISO [8] gibi rüzgâr enerjisi laboratuvarlarında çeşitli RTS tasarım optimizasyonu çalışmalarında kullanılmıştır.

Elektrik güç sistemlerinin bilgisayar uygulamaları, sistemlerin daha kolay analiz edilebilmesi ve görsel olarak elde edilen sonuçların kullanıcı tarafından daha kolay bir şekilde yorumlanabilir olması nedeniyle büyük öneme sahiptir. Matlab programı yazılım ve simülasyon açısından çok avantajlı bir program olup mühendislik eğitiminde özellikle elektrik-elektronik alanında verilen teorik ve deneysel çalışmaların pekiştirilmesi açısından yaygın olarak kullanılmaktadır. Eğitim amaçlı kullanımının yanı sıra bilimsel araştırma çalışmalarında ve Grafik Kullanıcı Arayüz Birimi

(GUI) ile Analiz Paketi oluşturmada da geniş olarak kullanılmaktadır [9].

Bu çalışmada Matlab GUI kullanılarak geliştirilen Yatay Eksensli RTS'lerin kurulacağı bölgenin coğrafik durumu (rakım, ortalama sıcaklık vb.), yıllık ortalama rüzgâr hızı ve hızdaki standart sapma değeri, bölgenin pürüzlülük durumu dikkate alınarak en düşük maliyette enerji üretimi için rotor yarıçapı, jeneratör gücü, hub yüksekliği ve kanat sayısının en uygun büyüklüklerinin belirlenebildiği RTS tasarım-optimizasyon paketi tanıtılmaktadır.

## 2. RTS'lerde Güç ve Enerji Maliyet Hesabı

Bir RTS'nin üreteceği gücü etkileyen faktörler; coğrafi konum, yerel yüzey yapısı, toprak seviyesinden yüksekliği ve hava yoğunluğu şeklinde sıralanabilir. Rüzgârdan elde edilen kinetik enerji; bir kanadın tam tur dönmesiyle oluşan rotor süpürme alanı ( $A$ ), havanın yoğunluğu ( $\rho$ ), kanat ucu hız oranı ve kanat açısına bağlı güç katsayısı (rotor verimi) ( $C_p$ ), ve rüzgârın hızı ( $u$ )'nun fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır [2].

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

Burada  $A$  rotor süpürme alanı,  $C_p$ , kanat ucu hız oranı ( $\lambda$ ) ve kanat açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak değişen güç katsayısıdır (rotor verimi). Rüzgârdaki kinetik enerji havanın yoğunluğuna bağlıdır. Normal atmosfer basıncında (deniz seviyesinde) ve  $15^\circ$ 'de havanın ağırlığı her metre küpte  $1.225 \text{ kg}'\text{dır}$ . Deniz seviyesinden farklı bölgede gerçekçi güç hesabı için farklı sıcaklık ve rakım gibi bölgesel özellikler ayrı ayrı dikkate alınarak hava yoğunluğu;

$$q = \frac{q_T q_A}{1.225} \quad (2-a)$$

$$q_T = \frac{P_o M A}{R T} \times 10^{-3} \quad (2-b)$$

$$P = P_o e^{-1.1857 \times 10^{-4} H} \quad (2-c)$$

$$q_A = \frac{P M A}{R(15^\circ C + 273)} \times 10^{-3} \quad (2-d)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir. Burada  $\rho_T$  ve  $\rho_A$  sırasıyla sıcaklık ve rakıma bağlı olarak belirlenen hava yoğunlukları,  $P$  rakıma ( $H$ ) ve normal atmosfer basıncına ( $P_o = 1 \text{ atm}$ ) göre belirlenen hava basıncı,  $R$  ideal gaz sabiti,  $T$  Kelvin cinsinden ortam sıcaklığı ve  $MA$  havanın moleküler ağırlığıdır. Türbin kanatlarındaki rüzgâr gücü, rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılı olduğundan, rüzgâr hızındaki ufak bir artış bile ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Türbini yüksek hızlı rüzgârlara maruz bırakmanın bir yolu, türbinleri daha uzun kulelere monte etmek yani hub yüksekliğini arttırmaktır. Bu ise kurulum maliyetini dolayısıyla birim enerji üretim maliyetini arttırmaktadır. Bir RTS kurulumu için farklı yüksekliklerde rüzgâr hızı, bölgenin pürüzlülüğü dikkate alınarak;

$$u = u_{ref} \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (3)$$

ifadesi ile hesaplanabilmektedir [2]. Kullanılan bu bağıntı Hellmann bağıntısı olarak bilinmektedir. Burada  $u_{ref}$  referans yükseklikte ( $h_{ref}$ ) belirlenen rüzgâr hızını,  $h$  ise rüzgâr hızının hesaplanmasını gerektiren yüksekliktir. Yüzeyin pürüzlülük

durumu hesaplamalara  $\alpha$  sabiti ile dâhil edilmekte olup,  $\alpha$  sürtünme veya pürüzlülük katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

Bir bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde, ham verilerin işlenmesi yoluyla elde edilmiş olan istatistiksel veriler kullanılır. Değerlendirmede, çeşitli rüzgâr hızı olasılık dağılımları ve bunları matematiksel olarak modellenmesinde "Weibull Dağılımı" ve "Rayleigh Dağılımı" fonksiyonları geniş olarak kullanılmaktadır [11]. Weibull dağılımı;

$$f_w(u) = \left( \frac{k}{c} \right) \left( \frac{u}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{u}{c} \right)^k \right] \quad (4)$$

fonksiyonu ile ifade edilir. 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 ve buna rüzgâr hızı frekansı adı da verilir. Olasılık yoğunluğu fonksiyonunun elde edilmesi, şekil ve ölçek parametresinin bilinmesini gerektirir ve bu iki parametre ortalama hız ile standart sapmanın fonksiyonudur. Yapılan yıllık rüzgâr hızı ölçümleri sonucunda belirlenen ortalama rüzgâr hızı ( $u_o$ ) ve hızdaki standart sapma değeri ( $\sigma$ ) kullanılarak dağılımdaki bu parametreler;

$$k = \left( 0.9874 \frac{u_o}{\sigma} \right)^{1.0983} \quad (5-a)$$

$$c = \frac{u_o}{\Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (5-b)$$

ifadeleri ile hesaplanır [12]. Bu parametrenin hesabında kullanılan  $\Gamma$ , gamma fonksiyonu operatörü olup fonksiyon;

$$\Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) = 0.1693 \left( 1 + \frac{1}{k} \right)^4 - 1.1495 \left( 1 + \frac{1}{k} \right)^3 + 3.3005 \left( 1 + \frac{1}{k} \right)^2 - 4.393 \left( 1 + \frac{1}{k} \right) + 3.0726 \quad (6)$$

şeklinde tanımlanır [12]. Rüzgâr hızının sabit ve sürekli nominal hız değerine eşit olmaması nedeniyle hesaplanan yıllık enerji üretimi (YEÜ) miktarı, jeneratör nominal gücünün bir yıldaki toplam saatle çarpılması sonucu elde edilen teorik YEÜ değeri ile hiçbir zaman aynı olmaz. Bu değerlerin eşit olabilmesi için türbinin bir yıl boyunca sürekli nominal hızda dönerek jeneratörün tam kapasitede güç üretmesi gerekir ki bu pratik olarak mümkün değildir. Bunların oranı RTS'lerde kapasite faktörü (KF) olarak tanımlanır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$KF = \frac{YEÜ}{8760 P_n} \quad (7)$$

Burada  $P_n$ , Rüzgâr Türbininin kurulu gücü ve aynı zamanda kullanılan jeneratörün nominal gücüdür. RTS'lerin tasarımında yıllık enerji üretim miktarı, enerji maliyeti hesabı açısından gereklidir. Yıllık enerji üretimi, RTS'nin belirlenen ortalama gücü kullanılarak hesaplanır. Ortalama güç ise ortalama rüzgâr hızının yerine ortalama rüzgâr hızı dikkate alınarak rüzgâr hızının dağılımı (genellikle Weibull dağılımı) kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [12].

$$P_o(u_o) = \int_0^\infty P_m(u) f_w(u) du \quad (8)$$

Burada  $P_o$  ortalama rüzgâr hızı ( $u_o$ ) değeri için RTS ortalama gücü,  $P_m$  Denklem (1) kullanılarak türbinin çalıştığı rüzgâr hızı aralığı için elde edilen türbin çıkış gücü (güç eğrisi) ve  $f_w$

ise rüzgar hızı olasılık yoğunluk (Weibull Dağılım) fonksiyonudur. Verilen bu ortalama güç hesabında integral sınırları için alt limit türbinin çalışmaya başladığı rüzgâr hızı ve üst limit olarak türbinin devreden çıktığı maksimum rüzgâr hızı kullanılmaktadır. RTS ortalama gücü kullanılarak yıllık enerji üretim miktarı kayıpların ihmal edilmesi ve sürekli çalışma durumu için;

$$YEÜ = 8760P_o(u_o) \quad (9)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu durumda (RTS'nin yıllık sürekli çalışması durumu için) kapasite faktörü;

$$KF = \frac{YEÜ}{8760P_n} = \frac{P_o(u_o)}{P_n} \quad (10)$$

şeklinde hesaplanır. Kapasite faktörü hem üreticiler hem de kullanıcılar açısından bilinmesi gereken önemli bir performans parametresidir. Tipik olarak kapasite faktörü %20 ile %50 arasında değişmektedir.

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) [6] tarafından yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilen Birim Enerji Maliyeti (BEM) modeli ile RTS elemanların maliyeti ve kütlesi rotor çapı, kule yüksekliği ve jeneratör gücü gibi büyüklüklere göre 10 yıllık çalışma durumu için formüle edilmekte ve türbin teknolojisindeki gelişmeler sonrasında ki maliyet değişimi modele kolaylıkla dâhil edilebilmektedir. Geliştirilen bu model RTS tasarım optimizasyon çalışmalarında geniş olarak kullanılmaktadır [4], [6], [7], [10]. BEM modeli RTS'lerin tüm bileşenlerinin maliyetini içermekte olup aşağıdaki gibi ifade edilir [6].

$$BEM = \frac{FCR * ICC + AOE}{YEÜ} \quad (11)$$

Burada BEM, üretilen enerjinin \$/kWh cinsinden birim fiyatıdır. YEÜ kWh/yıl cinsinden Yıllık Enerji Üretim miktarı olup, ICC (Initial Capital Cost), başlangıç sermaye maliyeti olarak tanımlanır. İlk kurulum maliyeti olup türbin sistem maliyeti ve kurulacak yer (istasyon) maliyeti toplamıdır ve bir RTS'nin enerji üretim maliyetinin yaklaşık %75'ini oluşturmaktadır. FCR (Fixed Charge Rate), sabit ücret oranı olarak tanımlanır ve yılda 0,1158 olarak alınarak gelir vergisi, emlak vergisi ve sigorta getirisi gibi kalemleri de içermektedir. AOE (Annual Operating Expenses), yıllık faaliyet giderleri olarak tanımlanır. İşletme ve bakım giderleri maliyeti olarak tanımlanmaktadır [6].

### 3. RTS'lerin Tasarım Optimizasyonu

Rüzgar Türbini Sistemlerinin optimizasyonu mevcut rüzgar kapasitesinden en düşük maliyetle en iyi şekilde yararlanılması için gereklidir. RTS'lerde enerji maliyeti, kullanılan jeneratör gücüne, rotorun yerden yüksekliğine (hub yüksekliğine), rotor yarıçapı gibi büyüklüklere ve kanat sayısına göre değişmektedir. Bu problemin çözümü için amaç fonksiyonu RTS'ler için Denklem (11) ile verilen Birim Enerji Maliyetidir. Birim Enerji Maliyeti hesabı [6]'da verilen modelde kullanılacak jeneratör gücü ( $P_n$ ), Kanat yarıçapı ( $R$ ), Hub yüksekliği ( $h$ ) ve kanat sayısı ( $n$ ) büyüklüklerinin fonksiyonu olup toplam maliyet dolayısıyla Birim Enerji Maliyeti bu elemanların büyüklüklerine göre büyük oranda değişmektedir. Kanat yarıçapının büyümesi güç hesabında süpürme alanını dolayısıyla kanatlarda yakalanan güçü arttırmaktadır. Aynı zamanda kanat maliyeti ve kanat açısı kontrol ünitesi maliyeti de yarıçapa göre artmaktadır. Bunun yanı sıra kullanılacak kulenin kütlesi rotor süpürme alanı

dolayısıyla kanat yarıçapının fonksiyonu olduğundan kütle ve buna bağlı olarak kule maliyeti rotorun süpürme alanı ile artmaktadır. Benzer şekilde Denklem (3)'de verildiği üzere yükseklik arttıkça bölgenin pürüzlülük katsayısına bağlı olarak rüzgar hızı artmaktadır. Diğer taraftan yüksekliğin artması kulenin kütlesinin dolayısı ile kule maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Kule maliyetinin rotor yarıçapına bağlı olması nedeni ile RTS'lerin tasarımında kule yüksekliği ile yarıçap arasındaki ilişki;

$$0.9D \leq h \leq 1.2D \quad (12-a)$$

$$D/2 + 15 \leq h \quad (12-b)$$

şeklinde ampirik ifadeler ile tanımlanmakta olup burada  $D$  rotor çapını göstermektedir. Türbin tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden biride türbin gücüdür. Türbin gücü kullanılan jeneratörün nominal gücü olup RTS çalışmalarında "rated power" olarak tanımlanmaktadır. RTS tasarımında türbin gücü, kurulacak bölgenin rüzgâr potansiyeli ve kanat yarıçapına bağlı olarak elde edilen mekanik enerji dikkate alınarak belirlenmelidir. Örneğin yüksek güç değerli bir jeneratörün küçük bir türbin sisteminde kullanılması durumunda jeneratör ve dolayısıyla türbin sistemi düşük kapasitede çalışacak, enerji üretim maliyeti artacaktır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kanat uzunluğunun (rotor yarıçapının) türbin gücüne bağlı olarak ifadesi;

$$R = 0.5 * \left( \frac{P_n}{0.000195} \right)^{\frac{1}{2.155}} \quad (13)$$

şeklinde oluşturulan ampirik ifade ile hesaplanmaktadır [6]. Burada  $P_n$  MW cinsinden jeneratör nominal gücüdür (türbin gücü). Dolayısıyla yarıçap ve türbin gücü arasındaki bu ilişki yarıçap değerinde belirli bir tolerans dikkate alınarak RTS için yapılacak optimizasyon çalışmalarında bir kısıtlamayı oluşturmaktadır.

### 4. RTS'ler İçin Tasarım Optimizasyonu Paketi

Optimizasyon "En İyi" anlamına gelir ve her zaman için hedeflenen sonuç, optimizasyon teknikleri kullanılarak ulaşılan sonuçtur. Ortaya konulmuş olan çözüm, optimum çözüm (uygun değer) olarak adlandırılır ve amaç fonksiyonu değişkenlerinin uygun değerlerinin belirlenmesi sonucunda elde edilir [13]. Bu çalışmada RTS'nin kurulacağı bölgenin rüzgar ve coğrafik özellikleri giriş parametresi alınarak en düşük maliyette enerji üretimi için Rüzgâr Türbini Sistemi elemanlarının (rotor yarıçapı, jeneratör gücü, hub yüksekliği ve kanat sayısının) en uygun büyüklükleri Matlab GUI kullanılarak geliştirilen Arayüz Paketi kullanılarak belirlenmektedir. Yapılan optimizasyon analizinde amaç fonksiyonu Birim Enerji Maliyeti alınarak fonksiyonun minimum değerinin belirlenmesinde referans [10]'da geliştirilen algoritma kullanılmıştır. Algoritmada klasik Izgara Arama (Grid Search) metodu kullanılmaktadır. Izgara Arama Metodu önceden belirlenmiş model doğrultusunda model uzayının tümünü bir izgara yardımı ile küçük parçalara ayırarak tarama esasına dayanmaktadır [13]. Her ne kadar bu metod kullanılan parametrelerin sayısının artması ve/veya tanım aralıklarının büyük değerli olması durumunda çok sayıda işlem yapılmasını gerektirse de tam sonuç verme özelliğine sahip olması, probleme uygun ve uygulamasının basit olması nedeniyle kullanılmıştır.

Geliştirilen tasarım optimizasyonu paketi ve kullanılan algoritmayı şu şekilde özetlemek mümkündür. Şekil 1'de pakete ait arayüz verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere optimizasyon giriş parametreleri; kanat sayısı, bölgenin ortalama rüzgar hızı ( $m/sn$ ), % olarak hızdaki standart sapma değeri, bölgenin ortalama sıcaklık değeri ( $^{\circ}C$ ), rakım ( $m$ ), Anonometre (hız ölçüm) yüksekliği ( $m$ ), bölgenin pürüzlülük katsayısı ( $\alpha$ ) ve kW cinsinden minimum ve maksimum türbin güç değerleri girilerek **Çalıştır** butonu ile optimizasyon algoritması çalıştırılmaktadır. Algoritmada girilen minimum ve maksimum türbin gücü aralığı eşit aralığa bölünerek bu aralıktaki her bir türbin gücüne karşı gelen rotor yarıçapı Denklem (13) ile hesaplanır. Bu yarıçap değeri  $\pm\%15$  sınırlarında eşit aralığa bölünerek her bir yarıçap için Denklem (12-a) kullanılarak hub yüksekliği hesaplanır. Bu yükseklik değerler  $\pm\%15$  sınırlarında eşit aralığa bölünerek her bir yükseklik için Denklem (3) kullanılarak yeni ortalama hız değeri, Denklem (2) ile hava yoğunluğu, Denklem (5) ve (6) ile Weibull Dağılımı parametreleri, Denklem (8), (9) ve (10) kullanılarak sırasıyla ortalama güç, YEÜ miktarı ve türbin kapasite faktörü belirlenir. Belirlenen bu büyüklükler maliyet analiz fonksiyonunda kullanılarak toplam maliyet ve Denklem (11) ile birim enerji maliyetleri hesaplanır. Bu işlem farklı türbin gücü için yarıçap ve belirlenen yarıçap aralığındaki her bir değer için hub yüksekliği aralığı taranarak aralıktaki her bir türbin gücü değeri için maliyeti minimum yapan yarıçap ve hub yüksekliği değeri belirleninceye kadar devam ettirilir. Böylece girilen türbin gücü aralığındaki farklı güç değerleri için birim enerji maliyetinin minimum olduğu optimum yükseklik ve yarıçap belirlenmiş olur. Belirlenen bu birim enerji maliyetlerinden en küçüğü optimum çözüm buna karşılık gelen türbin gücü kanat yarıçapı ve hub yüksekliği ise optimum büyüklüklerdir. Analizlerde türbin çıkış gücü Denklem (1) ile hesaplanmakta olup güç katsayısı ( $C_p$ ) değerleri için pratikte kullanılan değişik güçteki türbinlerin güç katsayıları çıkartılarak bunlar güçleri eşdeğer veya yakın türbin gücü hesabında kullanılmıştır.

GİRİŞ PARAMETRELERİ	
Türbin Kanat Sayısı	3
Ortalama Rüzgar Hızı (m/sn)	7
Rüzgar Hızı Standart Sapması (%)	57
Ortalama Sıcaklık Değeri (°C)	15
Rakım (m)	1000
Anonometre Yüksekliği (m)	50
Pürüzlülük Katsayısı	0.25
Minimum Türbin Gücü (kW)	100
Maksimum Türbin Gücü (kW)	2000

Şekil 1 Optimizasyon paketi arayüzü ve bilgi girişi

Optimizasyon analizi tamamlandıktan sonra pakette Şekil 2'de verildiği gibi Optimizasyon Sonuçları bölümünde **Optimum Değerler** butonu aktif hale gelmektedir. Optimum değerler butonu ile giriş verilerine göre en uygun kanat yarıçapı, hub yüksekliği, türbin gücü ve bu RTS'nin bölgede kullanılması durumunda birim enerji maliyeti, YEÜ miktarı, türbin ortalama gücü ve kapasite faktörü gibi büyüklükler tablo şeklinde verilmektedir. Kanat sayısı giriş parametresi alınarak kullanıcıya farklı kanat sayısı değerleri için analiz yapabilmeye olanağı sağlanmıştır. Pakette **Grafik Analiz** bölümü ile

minimum ve maksimum türbin gücü sınırları arasında alınan her bir türbin gücüne karşılık belirlenen optimum kanat uzunluğu, hub yüksekliği ve bu değerler kullanılarak birim enerji maliyeti, YEÜ miktarı, türbin ortalama gücü ve kapasite faktörü grafiksel olarak analiz edilebilmektedir. Giriş verileri dikkate alınarak farklı türbin gücü değerleri için belirlenen en uygun yarıçap ve yükseklik kullanılarak Birim Enerji maliyetinin değişimi Şekil 3'de verilmektedir. Benzer şekilde rotor yarıçapının, ortalama türbin gücünün veya YEÜ miktarının kullanılacak türbin gücüne göre değişiminin grafiksel olarak analizi ilgili buton kullanılarak yapılması mümkündür. Kullanılan **Kapat** butonu ile daha önceden çizilmiş grafik Şekil 2'de görüldüğü gibi temizlenmektedir.

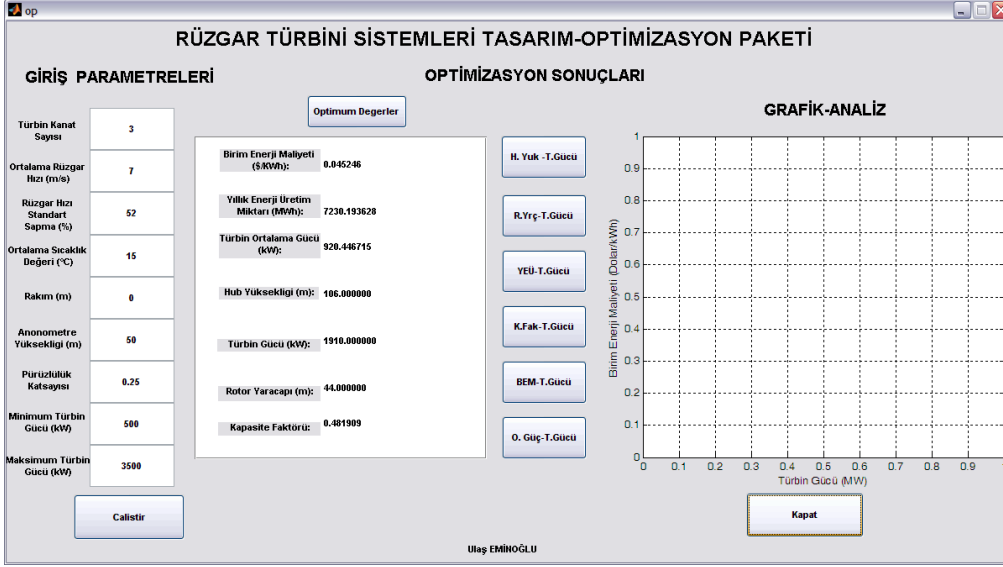
Geliştirilen tasarım optimizasyonu paketi kullanılarak kanat sayısı  $n=3$ , ortalama rüzgar hızı  $u=7 m/sn$ , standart sapma  $\sigma=\%50$ , bölgenin ortalama sıcaklık değeri  $T=15 ^{\circ}C$  ve pürüzlülük katsayısı  $\alpha=0.15$  değerleri için türbin gücü ve elemanlarının optimum değerleri belirlenerek sonuçlar Tablo 1'de Baz Durum olarak verilmiştir. Ayrıca tabloda giriş parametreleri Baz Durumdan farklı alınması durumu için sonuçlar ilgili sütunda verilmektedir. Tablodan görüleceği üzere RTS'nin kurulacağı bölgenin rüzgar potansiyeli ve/veya coğrafik özelliklerindeki (sıcaklık, rakım) ve pürüzlülük katsayısı gibi değişimler türbin sisteminin gücünü, elemanlarının büyüklüğünü, üretilen enerji ve enerjinin maliyetini etkilemektedir. Örneğin türbin yerinin çimenli bölge (pürüzlülük katsayısı  $\alpha=0.15$ ) yerine aynı bölgede kırsal orman alanlarının olduğu yer (pürüzlülük katsayısı  $\alpha=0.25$ ) seçilmesi durumunda, kurulacak türbin gücünün optimum değeri  $1220 kW$ 'dan  $1860 kW$ 'a  $\%52$  oranında, YEÜ miktarı  $4188 MWh$ 'ten  $6795 MWh$ 'e  $\%62$  oranında değişmektedir. Sonuç olarak RTS'lerin kurulacağı bölgenin özellikleri maliyet ve enerji üretimi açısından büyük öneme sahip olduğu görülmektedir. Geliştirilen tasarım optimizasyon paketi ile minimum maliyette ve maksimum seviyede rüzgar enerjisinden faydalanarak enerji üretimi için türbin gücü ve elemanlarının büyüklüğünü yanı sıra bu büyüklükler için üretilebilecek enerji miktarı ve enerjinin birim maliyeti kolaylıkla hesaplanabilmektedir.

## 5. Sonuçlar

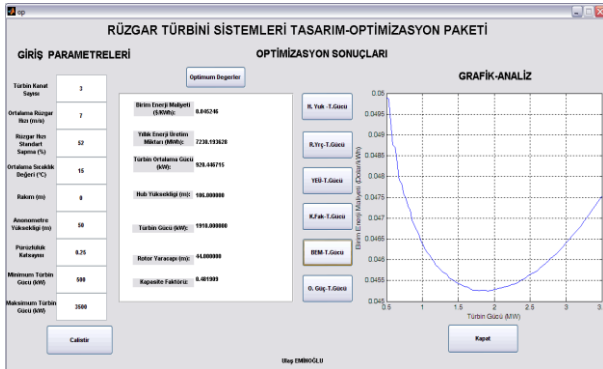
Bu çalışmada Matlab GUI kullanılarak geliştirilen yatay eksensiz RTS'ler için bölgenin rakım, ortalama sıcaklık vb. gibi bölgesel özellikleri ve ortalama rüzgâr hızı, bölgenin pürüzlülük durumu dikkate alınarak en düşük maliyette enerji üretimi için rotor yarıçapı, jeneratör gücü, hub yüksekliği ve kanat sayısının en uygun büyüklüklerinin belirlenebildiği RTS tasarım-optimizasyon paketi verilmiştir. Geliştirilen optimizasyon paketi kullanılarak farklı rüzgar hızları ve bölgenin farklı rakım sıcaklık gibi coğrafik özellikleri durumlarında en düşük maliyette enerji üretimi için kurulacak türbinin rotor yarıçapı, kule (hub) yüksekliği ve jeneratör gücü, kanat sayısı gibi tasarım büyüklükleri ve RTS karakteristik büyüklükleri olarak nitelendirilebileceğimiz; toplam maliyet, yıllık enerji üretim miktarı, birim enerji maliyeti ve türbin kapasite faktörü gibi büyüklükler belirlenerek paketin özellikleri gösterilmiş ve ayrıca bölgenin özelliklerinin türbin tasarım büyüklüklerine enerji üretimine etkisi gösterilmiştir.

Tablo 1. Farklı rüzgar ve coğrafik özellikler için kurulacak türbine ait büyüklükler

Türbin Büyüklüğü	Baz Durum	$n=2$	$U_0=8$ (m/sn)	$\sigma=60\%$	$T=25$ (°C)	$H=1000$ (m)	$\alpha=0.25$
Türbin gücü (kW)	1220	1320	1280	1300	1180	1340	1860
Rotor yarıçapı (m)	37	38.5	35.5	36.5	37	39	44
Hub yüksekliği (m)	89	92	85	88	89	94	106
YEÜ miktarı (MWh)	4188	4568	4971	4122	4049	4434	6795
Ortalama Güç (kW)	533	581	632	524	515	564	865
Kapasite Faktörü	0.43	0.44	0.49	0.40	0.436	0.421	0.465
BEM (\$/kWh)	0.049	0.047	0.041	0.05	0.049	0.051	0.047



Şekil 2 Optimizasyon paketi ile optimum değerler ve bunlara ilişkin üretim ve enerji maliyeti değerlerinin elde edilmesi



Şekil 3 Optimizasyon paketi ile grafiksel analiz

## 6. Kaynaklar

- [1] Gökçınar, R.E. ve Uyumaz, A., "Rüzgar Enerjisi Maliyetleri ve Teşvikleri", VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES'2008), 17-19 Aralık 2008, 699-706.
- [2] Heier, S., *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Wiley, Newyork, 1998.
- [3] Hau, E., *Wind Turbines- Fundamentals, Technologies, Application and Economics*, 2nd Edition, Springer-Verlag, 2005.
- [4] Sağol, E., "Site specific design optimization of a horizontal axis wind turbine based on minimum cost of energy, (M. Sc. Thesis)", Aerospace Engineering of Middle East Technical University, 2010.
- [5] Fuglsang, P., Madsen H.A., "Optimization Methods for Wind Turbine Rotors", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.80, 191-206, 1999.
- [6] Fingersh, L., Hand, M., Laxson, A., "Wind Turbine Design Cost and Scaling Model", National Renewable Energy Laboratory (NREL/TP-500-40566), USA, 2006.
- [7] Griffin, D.A., "NREL Advanced Research Turbine (ART) Aerodynamic Design of ART-2B Rotor Blades", National Renewable Energy Laboratory (NREL/SR-500-28473), USA, 2000.
- [8] Fuglsang, P., Bak, C., Schepers, J.G., Bulder, B., Olesen, A., Rossen, R.V., Cockerill, T., "Site Specific Design Optimization of Wind Turbines", Risø National Laboratory (JOR3-CT98-0273), 2010.
- [9] Depcik, C., Assanis, D.N., "Graphical User Interfaces in an Engineering Educational Environment", *Computer Applications in Engineering Education*, Vol. 13, pp.48-59, 2005.
- [10] U. Eminoglu, "An Energy Cost Minimization Algorithm for Wind Turbine System Design", *International Review on Modelling and Simulation*, Vol.4, No.5, pp.2554-2563, 2011.
- [11] Kurban, M., Kantar, Y.M., Hocoğlu, F.O., "Rüzgar enerjisi potansiyelinin araştırılmasında Weibull ve Rayleigh dağılımlarının kullanılması", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 10, 14-21, 2006.
- [12] PelaFlow Consulting, *The WINDPOWER Program*, <http://www.wind-power-program.com/download.htm>.
- [13] Wood, A.J., Wollenberg, B.F., *Power generation, operation and control*, John Wiley and Sons, 1984.