



Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Diferansiyel Gelişim Algoritması Kullanılarak Tasarım Optimizasyonunun Gerçekleştirilmesi

Ulaş EMİNOĞLU^{1,*}

¹*Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Tokat/TÜRKİYE*

Başvuru: 02/05/2016 Kabul: 19/09/2016

ÖZ

Son yıllarda yarı iletken teknolojisindeki hızlı gelişim, enerji talebindeki artış ve devlet teşvikleri nedeniyle Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada bu tip Rüzgâr Türbinlerin (RT'lerin) tasarımı için yeni bir optimizasyon algoritması verilmektedir. Algoritmada hedef fonksiyonu olarak birim enerji maliyeti kullanılmakta olup RT'lerin kurulacağı bölgenin rüzgâr potansiyeli dikkate alınarak tasarım parametrelerinin en uygun büyüklükleri belirlenmektedir. Tasarım parametreleri olarak türbin elemanlarının büyüklüğü; kule (hub) yüksekliği, rotor yarıçapı (kanat boyu), nominal güç (jeneratör gücü), ve üretilen enerji ve maliyete etki eden temel parametreler; türbin nominal rüzgâr hızı, türbin kapasite faktörü kullanılmaktadır. Algoritmada tasarım parametrelerinin en uygun büyüklükleri/değerleri popülasyon temelli Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılarak belirlenmektedir. Farklı bölgeler için tasarlanan Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin algoritmada kullanılan türbin güç eğrisi modeli ve parametreler arasında tanımlanan kısıtlamalar açısından gerçekçi, üretilen enerji miktarı ve maliyet açısından da oldukça avantajlı olduğu görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Değişken-hızlı rüzgâr türbinleri, Diferansiyel gelişim algoritması, Tasarım optimizasyonu.

Design Optimization of Variable-Speed Wind Turbines by Using Differential Evolution Algorithm

ABSTRACT

With the fast development in semiconductor technology, and as a result of the increase in energy demand and government subsidies, the usage of Variable-Speed Wind Turbines has increased. In order to design of this type of wind turbines, in this study, a new optimization algorithm is introduced. In the algorithm, the cost of per-energy is used as objective function and the optimum size/value of design parameters are determined by keeping in consideration the wind potential in regions. For the design parameters, the size of turbine components; hub height, rotor diameter, nominal (rated) power, and the parameters that has effects on the energy production and its cost, namely nominal wind speed and turbine capacity factor are used. In the optimization algorithm, a population based algorithm, namely Differential Evolution Algorithm (DEA), is used to determine the most appropriate size/value of design parameters. It is observed that the designed wind turbines are more realistic in terms of power curve model used in optimization algorithm and the constraints defined between design parameters, and more advantageous in terms of the energy amount that will be produced and its cost.

Keywords: Variable-speed wind turbines, Differential evolution algorithm, Design optimization.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi; dışa bağımlılıktan uzak, temiz enerji yaratması, işletme giderlerinin nispeten az ve fiyat belirsizliği riskinin asgaride olması nedeniyle yatırım yapılması tercih edilen projelerin başında gelmektedir. Enerji dönüşümü için kullanılan Rüzgâr Türbinleri çalışma prensibine göre iki gruba ayrılır. Bunlar; Sabit-Hızlı Rüzgâr Türbinleri ve Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinleridir. Sabit-Hızlı RT'lerde kanat eğim kontrolü yapılarak rotor hızı sabit değerlerde tutulmakta veya çok küçük değişimlere müsaade edilmektedir. Rüzgâr hızı ile rotor verimliliği değiştiğinden genellikle rüzgârdan maksimum oranda güç üretimi yapılamamaktadır. Yarı iletken teknolojisinin hızlı gelişimi ile son yıllarda Çift-Beslemeli Asenkron Jeneratör (ÇBAG) ve Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratör (SMSJ) kullanılarak RT'ler geniş bir rüzgâr hızı aralığında maksimum aerodinamik verim elde etmek amacıyla tasarlanmaktadır. Bu tip RT'ler de, rotor hızı kontrol edilerek kanat uç hızı oranı değişik rüzgâr hızlarında en uygun değerlerde tutulmaktadır. Dolayısıyla bu tip sistemde rotor verimliliği maksimum değerlerde tutularak rüzgâr enerjisinden değişik rüzgâr hızlarında olası en yüksek oranda faydalanılmakta ve türbin çıkış gücü artmaktadır [1].

RT'lerin tasarım optimizasyonu mevcut rüzgâr kapasitesinden en düşük maliyetle ve en yüksek verimde yararlanılması için gereklidir. RT'lerde enerji maliyeti; kullanılan jeneratör gücü, kule yüksekliği, rotor yarıçapı, kapasite faktörü, sabit-hızlı RT'ler için en uygun devir sayısı ve değişken-hızlı RT'ler için en uygun nominal rüzgâr hızı gibi büyüklüklere ve kanat sayısına göre değişmektedir. Bu nedenle bölgesel rüzgâr potansiyeli dikkate alınarak minimum maliyette ve maksimum enerji üretimi için literatürde çok sayıda tasarım optimizasyonu çalışması mevcuttur [2-9]. Yapılan çalışmalarda hedef fonksiyonu olarak birim enerji maliyeti [2-4, 6-7, 9] veya üretilecek enerji miktarı [5, 8] seçilerek bölge için kurulacak sabit hızlı RT'ler için en uygun rotor yarıçapı, jeneratör gücü, kule yüksekliği gibi tasarım büyüklükleri ile tasarım rüzgâr hızı, türbin kapasite faktörü ve rotor devir sayısı [3, 6]'da, değişken hızlı RT'ler için en uygun rotor yarıçapı, jeneratör gücü, kule yüksekliği gibi tasarım büyüklükleri ile türbin nominal rüzgâr hızı ve kapasite faktörü [2-3, 7]'de belirlenmiştir. Diğer taraftan bir rüzgâr bölgesi için belirlenen türbin kurulu gücüne en uygun rotor yarıçapı [5]'de, üretilen enerjiyi maksimum yapan en uygun kanat ucu hız oranı ve devir sayısı [8]'de ve en uygun devir sayısı [9]'da belirlenmiştir. Bunların yanı sıra Referans [4]'de çok kademeli optimizasyon yapılarak türbin kanatları için en uygun geometri ile kule yüksekliği, jeneratör gücü gibi tasarım bileşenlerinin en uygun büyüklükleri birlikte belirlenmiştir.

Bir RT'nin tasarımı enerji maliyeti hesabını gerektirmektedir. Enerji maliyeti için Referans [2]'de verilen model yaygın olarak kullanılmaktadır [3, 6-9]. RT'ler için maliyet ve üretilen enerji miktarına ilişkin analizlerde, RT ile üretilen yıllık enerji üretim miktarını dolayısıyla da yıllık ortalama güç üretimi değeri kullanılmaktadır. Bu büyüklükler ise RT'nin rüzgâr hızına bağlı olarak çıkış gücünün (güç eğrisinin) hesaplanmasını gerektirmektedir. Bu nedenle RT'lerin çıkış gücü hesabı için rotor verimliliğine bağlı klasik güç ifadesinin yanı sıra çok sayıda matematiksel model geliştirilmiştir [5, 10-13]. Mevcut modeller RT'lerin

tasarımında üretilen güç ve sonucunda üretilen enerji ve maliyet analizlerinde kullanılmaktadır [2-9, 11]. Gerçekçi bir analiz ve sonucunda RT'lerin büyüklüklerinin en uygun şekilde belirlenmesinde kullanılan güç eğrisi modelinin gerçekçiliği büyük önem taşımaktadır [11].

Bu çalışmada Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılarak Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin tasarımı gerçekleştirilmektedir. İlk olarak güç ve maliyet hesabında kullanılan güç eğrisi modeli, pratikte kullanılan RT'lerin gerçek güç eğrisi üzerinde geçerliliği gösterilmektedir. Sonrasında DGA temelli optimizasyon algoritması verilmektedir. Geliştirilen algoritma ilk olarak Güney Avrupa bölgesi için uygulanarak tasarlanan rüzgâr türbini, literatürde bu rüzgâr bölgesi için tasarlanan RT'ler ile kıyaslanarak algoritmanın geçerliliği ve üstünlükleri verilmektedir. İkinci olarak tasarım optimizasyonu Türkiye'de Marmara ve Ege bölgesi kıyı şeritlerinde rüzgâr potansiyeli yüksek bölgeler için maliyet ve enerji üretimi açısından en uygun RT'ler belirlenmektedir. Çalışmada son olarak rüzgâr potansiyelinin tasarlanan RT'lerin enerji üretim maliyetine etkisini göstermek amacıyla yapılan parametrik analiz ve sonuçlar verilmektedir. Elde edilen sonuçlar tasarlanan RT'lerin üretilen enerji ve birim enerji maliyeti açısından oldukça avantajlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bölgelerin rüzgâr potansiyelinin RT'lerde tasarım parametrelerinin büyüklüklerinin yanı sıra birim enerji maliyetini de önemli oranda etkilediği görülmektedir.

2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ VE ENERJİ HESABI (POWER AND ENERGY CALCULATION FOR WIND TURBINES)

2.1 RT'ler İçin Çıkış Gücü Hesabı (Output Power Calculation for Wind Turbines)

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

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

şeklinde ifade edilmektedir [1-3]. Burada, A rotor süpürme alanı, ρ havanın yoğunluğu, λ kanat uç hızı oranı ve u ise rüzgâr hızını göstermektedir. $C_p(\lambda, v)$ güç katsayısı (rotor verimliliği) olup kanat uç hızı oranı ve kanat açısına bağlı olarak değişmektedir. Teorik olarak maksimum değeri 0.593 (Betz limit), pratikte ise büyük güçteki RT'ler için 0.4-0.5 arasında değişmektedir [8, 10].

Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinlerinde değişen rüzgâr hızına göre kanat açısı kontrol edilerek türbin hızının değiştirilmesi ile rotor kanat uç hızı oranı en uygun değerlerde veya buna yakın değerlerde tutulmakta ve maksimum değerlerde rotor verimliliği ile çalışılmasına olanak sağlanmaktadır. Rotor verimliliğinin rüzgâr hızına göre değişmesi RT'lerde çıkış gücü hesabının Eşitlik (1) ile hesabını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle çalışmalarda rotor verimliliği için $C_{p,eq}$ (Sabit eşdeğer güç katsayısı) veya C_{p-max} (Sabit maksimum rotor verimliliği) gibi katsayılar kullanılmaktadır [10]. Eşitlik (1) temelli modellerde rüzgâr hızı ile değişen rotor verimliliği için yaklaşık sabit değerlerin kullanılması nedeniyle RT'lerin

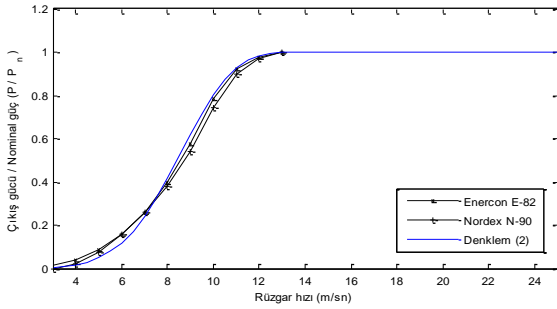
rüzgâr hızına göre çıkış gücü yaklaşık olarak elde edilmekte ve hata bazı RT'ler için yüksek değerli olabilmektedir. Bu nedenle bu tip RT'lerin güç eğrisi dikkate alınarak birçok matematiksel model geliştirilmiştir [5, 10-13]. Bu modeller, RT'nin başlangıç rüzgâr hızı (u_{ci}) ve nominal rüzgâr hızı (u_n) değişkenlerine bağlı olarak popülasyonların S-tipi çoğalma eğrisi [7], lineer eğri [3, 12], üstel, ikinci ve üçüncü dereceden fonksiyonlar [10-12] gibi RT'lerin güç eğrilerine benzer eğri denklemleri kullanılarak geliştirilmiştir. Bu çalışmada [13]'de önerilen güç eğrisi modeli kullanılmaktadır. Model kondansatör geriliminin doğru akımda değişim ifadesinden faydalanarak geliştirilmiş olup matematiksel olarak;

$$P_m(u) = P_n \left(1 - e^{-\left(\frac{u}{a}\right)^5} \right) \quad (2)$$

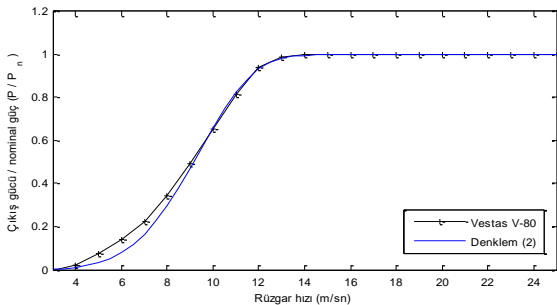
şeklinde ifade edilmektedir. Burada P_n türbin kurulu gücünü kW cinsinden göstermektedir. Modelde a parametresi türbin nominal rüzgâr hızına (u_n) göre değişmekte olup;

$$a = 0.70335986 \times u_n - 0.00049995 \quad (3)$$

eşitliği ile elde edilmektedir. Modelin performansı RT'lerin gerçek güç eğrileri ile karşılaştırılarak Şekil 1 ve Şekil 2'de örneklendirilmiştir. Şekil 1'de Enercon ve Nordex tipi, Şekil 2'de ise Vestas tipi Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin gerçek güç eğrileri ve model kullanılarak elde edilen güç eğrisi verilmektedir.



Şekil 1. Enercon E-82 ve Nordex N-90 gerçek güç eğrisi ve model çıktıları



Şekil 2. Vestas V-80 gerçek güç eğrisi ve model çıktıları

Yukarıda verilen her iki şekilden de görüleceği üzere Eşitlik (2)'de verilen kondansatör şarj gerilimi modeli ile elde edilen güç ve gerçek güç değerleri büyük ölçüde örtüşmekte, model gerçekçi sonuç vermektedir. Dolayısıyla gerçek güç eğrisine ihtiyaç duymaksızın bu tip RT'lerin çıkış gücünün hesabında modelin

kullanılmasının gerçekçi analizlerin yapılmasına ve çok sayıda RT'nin kullanılarak tasarım uygulamalarının yapılmasına olanak sağlayacağı söylemek mümkündür. Ayrıca literatürdeki mevcut modeller sadece güç eğrisinde lineer olmayan kısım için kullanılabilirken (u_{ci} - u_n aralığı), [13]'de geliştirilen bu model güç eğrisinin tamamı (u_{ci} - u_{co} aralığı) için kullanılabilir. Burada u_{co} , RT'nin çalışabileceği başka bir değişle devreden çıktığı en yüksek rüzgâr hızı değerini göstermektedir.

2.2 RT'ler İçin Enerji Hesabı (Energy Calculation for Wind Turbines)

RT'lerin tasarımında yıllık enerji üretim miktarı (YEÜ), enerji maliyeti hesabı açısından gereklidir. Yıllık enerji üretimi, RT'nin belirlenen ortalama gücü kullanılarak hesaplanır. Ortalama güç ise ortalama rüzgâr hızı ve standart sapma değeri dikkate alınarak rüzgâr hızının dağılımı (genellikle Weibull dağılımı) kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [3].

$$P_o(u_o) = \int_0^{\infty} P_m(u) f_w(u) du \quad (3)$$

Burada P_o ortalama rüzgâr hızı (u_o) değeri için RT'nin yıllık ortalama gücü, f_w ise rüzgâr hızı olasılık dağılım fonksiyonudur. RT'nin ortalama gücü kullanılarak kapasite faktörü ve yıllık enerji üretim miktarı belirlenmektedir. Kapasite faktörü enerji verimliliği açısından bilinmesi gereken önemli bir performans parametresidir. Bir RT'nin yıllık sürekli çalışma durumu için kapasite faktörü;

$$KF = \frac{P_o(u_o)}{P_n} \quad (4)$$

şeklinde hesaplanır [2-3]. Kapasite faktöründen faydalanarak bir RT'nin yıllık enerji üretim miktarı kayıpların ihmal edilmesi ve sürekli çalışma durumu için;

$$YEÜ = 8760 P_o(u_o) = 8760 \times KF \times P_n \quad (5)$$

eşitliği ile kWh cinsinden elde edilmektedir. Enerji üretim miktarı ayrıca RT'ler için toplam ve birim enerji maliyeti hesabı için gereklidir. Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) [2] tarafından yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilen Birim Enerji Maliyeti (BEM) modeli ile RT elemanların maliyeti ve kütlesi rotor çapı, kule yüksekliği ve jeneratör gücü gibi büyüklüklere göre 10 yıllık çalışma durumu için modellenmektedir. Model RT'lerin tüm kurulum ve işletme bileşenlerinin maliyetini içermekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır [2, 6-10].

3. RT'LERİN TASARIM OPTİMİZASYONU (DESIGN OPTIMIZATION OF WIND TURBINES)

RT'lerin tasarımı, çok sayıda tasarım parametresi ve bunların birbirlerine bağımlılığı nedeniyle lineer olmayan kısıtlamalı optimizasyon probleminin çözümünü gerektirmektedir. Küçük güçlü jeneratör ile büyük yarıçaplı rotor kullanımı üretim miktarını düşürmektedir. Diğer taraftan büyük güçlü jeneratörün küçük yarıçaplı rotor (kanat boyu) ile kullanımı enerji verimliliğini azaltmaktadır. Kule yüksekliği ve rotor yarıçapındaki

artış üretim miktarını arttırırken aynı zamanda üretim maliyetini de arttırmaktadır. Türbin nominal rüzgar hızı değeri rotor verimliliği açısından jeneratör gücü ile uyumlu olmasının yanı sıra RT'nin kapasite faktörünü ve sonucunda ise enerji üretim miktarı ve maliyetini önemli oranda etkilemektedir. Bu nedenle tasarım büyüklüklerinin birbirleri ile uyumlu ve minimum maliyette maksimum üretim için seçilmesi gerekmektedir [2-3, 7-8].

3.1 Kısıtlamalar (Constraints)

Çalışmada tasarım büyüklükleri ve parametrelerinin gerçekçi ve birbirleri ile uyumu için kısıtlamalar tanımlanmıştır. Kule yüksekliği (h) ve nominal rüzgar hızı (u_n) bağımsız parametreler olarak alınmaktadır. Rotor yarıçapı, kule yüksekliğine göre [14]'de tanımlanan deneysel ifadeye göre aşağıdaki şekilde belirlenerek $\pm 10\%$ tolerans dâhilinde seçilmektedir.

$$D_r = \left(\frac{h}{2.7936} \right)^{0.7663} \quad (6a)$$

$$0.9 \times D_r \leq D \leq 1.1 \times D_r \quad (6b)$$

Türbin kurulu gücü, nominal rüzgar hızı ve rotor yarıçapına göre;

$$0.35 \leq C_{p_max} \leq 0.4 \quad (7a)$$

$$P_n = \frac{1}{2} \rho \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \times u_n^3 \times C_{p_max} \quad (7b)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Enerji üretim miktarı ve enerji maliyeti hesabı için türbin kapasite faktörü, Eşitlik (2)'de verilen güç eğrisi modeli ve Weibull dağılım fonksiyonu Eşitlik (3)'de kullanılarak aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$KF = \frac{P_o(u_o)}{P_n} \quad (8)$$

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

Burada k ve c Weibull dağılım fonksiyonu için sırasıyla şekil ve ölçek parametresi olup bölgenin ortalama rüzgâr hızı ve standart sapma değerine göre belirlenmektedir [3].

3.2 Tasarım Algoritması (Design Algorithm)

Doğrusal olmayan çok değişkenli problemlerin çözümü sezgisel yöntemler ile kolaylıkla çözülebilmektedir. Bu çalışmada hızlı, kullanımı kolay ve etkin sonuçlar verebilme yeteneğine sahip olması nedeniyle Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılmıştır [15]. DGA popülasyon temelli sezgisel bir optimizasyon tekniği olup, her ne kadar rüzgar türbinlerinde kontrolör parametrelerinin kestirimi [16] ve benzeri gibi RT'ler için kısmi problemlerin çözümüne uygulanmış olsa da RT'lerin tasarım büyüklükleri ve parametrelerinin birlikte optimize edilmesi probleminde ilk kez uygulanmıştır. DGA ile ilk olarak başlangıç popülasyonu yani bireyleri oluşturulmaktadır. Sonrasında ise tanımlanan durdurma kriteri sağlanıncaya kadar tüm bireylere sırasıyla mutasyon, çaprazlama ve seçim işlemleri uygulanmaktadır. Algoritmada popülasyon bireyleri

parametrelerin sınır değerleri dâhilinde rastgele oluşturularak mutasyona tabi tutulmaktadır. Mutasyon işlemi ile bireye (x_i) ait mutant vektörü (v_i), bireyden ve birbirinden farklı üretilen üç farklı birey (x_{r1}) kullanılarak;

$$v_i = x_{r1} + F \times (x_{r2} - x_{r3}) \quad (9)$$

ifadesi ile hesaplanabilmektedir [15]. Burada F, ölçekleme (mutasyon) faktörü olup genelde 0 ile 1 arasında bir değer alınmaktadır. Oluşturulan mutant birey ve mevcut birey arasında çaprazlama uygulanarak aday birey belirlenmektedir. Bu işlem 0 ile 1 arasında rastgele seçilen çaprazlama oranı (CR) olasılığına göre mutant bireyden 1-CR olasılığına göre ise mevcut bireyden seçime göre yapılmaktadır. Mevcut birey ile aday birey arasındaki seçim işlemi hedef fonksiyon değerine göre yapılarak yeni popülasyon oluşturulmaktadır [15].

DGA ile RT'lerin tasarımı için geliştirilen algoritmanın anlaşılabilirliği açısından tasarım parametreleri ve bunlara ait ilişkiler Tablo 1'de özetlenmiştir. Algoritmada kule yüksekliği (h) ve türbin nominal rüzgar hızı (u_n) bağımsız parametreler olarak alınmakta ve bunlara ait bireyler başlangıçta tanımlanan sınır değerler arasında rastgele üretilmektedir. Diğer tasarım parametrelerinden rotor çapı (D); her bir h bireyi için Eşitlik (6a) ile hesaplanarak bu değer komşuluğunda Eşitlik (6b) yeni bireyler tanımlanmakta ve bunlardan biri rastgele seçilmektedir. Benzer durum türbin nominal gücü (P_n) için de geçerlidir. Eşitlik (7a) ile rastgele oluşturulan rotor verimliliği bireylerinden biri rastgele seçilerek her bir D ve u_n bireyleri için P_n bireyleri oluşturulmaktadır. Türbin kapasite faktörü her bir u_n bireyleri ve her bir h için elde edilen Weibull parametreleri (k, c) Eşitlik (8)'de kullanılarak belirlenmektedir. Bu işlemler algoritmada her bir adım için tekrar edilmekte ve bağımsız parametrelere ait bireyler (u_n ve h değerleri) Eşitlik (9) ve çaprazlama sonucunda oluşturulan aday bireylere göre yenilenmektedir. Algoritmada hedef fonksiyonu olarak birim enerji maliyeti seçilmiştir [2-3, 6-7]. Birim enerji maliyeti \$/kWh cinsinden Referenas [2]'de tanımlanan maliyet fonksiyonuna göre hesaplanmakta olup enerji üretim miktarı Eşitlik (5) ile belirlenmektedir. Durdurma kriteri olarak iterasyon sayısı kullanılmıştır. Algoritma adım adım aşağıda verilmiştir.

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

Adım 2: Bölge için referans yükseklikte (h_o) Weibull parametrelerini (k_o ve c_o) gir.

Adım 3: Tablo 1'de verildiği üzere başlangıç popülasyonlarını (x_i) oluştur.

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

- Bireyler (x_i) için rastgele birbirinden farklı üç birey (x_{ri}) oluştur.
- Rastgele bir indis (R) oluştur, $R \in \{1, 2, \dots, NP\}$, (NP: popülasyon büyüklüğü).
- Aşağıdaki şekilde aday bireyleri ($v_{i, G+1}$) oluştur:
 - Her bir i için 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı üret, $r_i \equiv U(0, 1)$, Eğer $r_i < CR$ veya $i=R$ ise $v_{i, G+1}$ bireyini Eşitlik (9) ile oluştur. Aksi durumda mevcut bireyi kullan, $v_{i, G+1} = x_i, G$.

- Oluşturulan aday bireylerin ($v_{i, G+1}$) Tablo 1’de verildiği üzere sınırlarını kontrol et ve diğer parametreler için bireyleri oluştur.
- Aday bireyleri ($v_{i, G+1}$) hedef fonksiyonunda değerlendirir. Eğer $f(v_{i, G+1}) < f(x_{i, G})$ ise mevcut bireyi aday birey ile değiştirir, $x_{i, G+1}=v_{i, G+1}$.
- Oluşturulan yeni bireyleri ($x_{i, G+1}$) hedef fonksiyonunda değerlendirir. En düşük maliyeti veren bireyleri en iyi çözüm olarak sakla, $x_{c, G+1}=x_{i, G+1}$.

Tablo 1. Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinleri için tasarım parametreleri ve kısıtlamalar

	Tasarım Parametreleri	Sınır değerler	Üretim biçimi
Bağımsız parametreler	Kule yüksekliği (h)	$h_{min}-h_{max}$ 20-100 (m)	DGA
	Nominal rüzgâr hızı (u_n)	$u_{r-min}- u_{r-max}$ 9-17 (m/sn)	DGA
Bağımlı parametreler	Rotor çapı (D)	Eş. (6) (m)	Rastgele
	Nominal güç (P_n)	Eş. (7) (kW)	Rastgele ($u=u_n$ ve $C_p-max=0.35-0.4$)
	Kapasite faktörü (KF)	Eş. (8)	($u=u_n$, $k=k(h)$ ve $c=c(h)$)

4. FARKLI BÖLGELER İÇİN RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN TASARIMI (WIND TURBINE DESIGN FOR DIFFERENT REGIONS)

Farklı bölgeler için Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinleri tasarlanmıştır. Bölgelerin rüzgâr potansiyeli Weibull Dağılım fonksiyonu Eşitlik (3)’de kullanılarak Eşitlik (8) ile kapasite faktörü, Eşitlik (5) ile enerji üretim miktarı bir yıl için hesaplanmaktadır. İlk olarak rüzgâr potansiyeli yüksek olan ve literatürde yaygın olarak incelenen Güney Avrupa (Akdeniz) ülkeleri için tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu bölge için rüzgâr potansiyeli $h=30$ m için $k=1.2$, $c=8$ m/sn ve yüzeyin pürüzlülük katsayısı $\alpha=0.12$ olarak alınmıştır [3]. Bölüm 3.2’de verilen optimizasyon algoritması için maksimum iterasyon sayısı, ölçekleme faktörü (F), çaprazlama oranı (CR) ve popülasyon büyüklüğü (NP) literatürde kullanılan değerler dikkate alınarak deneme yöntemine göre belirlenmiştir. Bölge için elde edilen sonuçlar literatürde verilen tasarım sonuçlarına göre kontrol edilerek algoritma için $F=0.8$, $CR=0.8$, $NP=40$ ve maksimum iterasyon sayısı 300 değerlerinin bu problem için uygun olduğu görülmüştür. Algoritma MATLAB programı [17] kullanılarak kodlanmıştır.

Tablo 2’de Güney Avrupa bölgesi için tasarlanan RT parametreleri, güç, enerji ve maliyet değerleri verilmiştir. Literatürde bu bölge için yapılan tasarım optimizasyonu ile elde edilen sonuçlar da tabloda verilmektedir. Tablodan görüleceği üzere tasarlanan RT, Referans [3]’de verilen RT ile aynı Birim Enerji Maliyetine sahip olmasına rağmen nominal rüzgâr hızı ve sonucunda türbin kapasite faktörü ve enerji üretim miktarı açısından daha avantajlıdır. Referans [2]’de $h=50$ m referans yükseklikte $k=2$ ve $c=8.5$ m/sn rüzgâr potansiyeli için tasarım yapılmış olup bu değerler $h=30$ m yükseklikteki rüzgâr potansiyeline (Güney Avrupa bölgesi rüzgâr değerine) çok yakındır. Bu nedenle verilen RT karşılaştırmada kullanılmış olup tasarlanan RT ile parametreleri önemli oranda örtüşmektedir. Önerilen RT’nin enerji üretim miktarı ve birim enerji maliyeti açısından daha avantajlı olduğu görülmektedir. Referans [6]’da Sabit-Hızlı RT’lerin yanı sıra bu bölge için

Değişken-Hızlı RT’ler için de tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tasarımda güç eğrisi modeli olarak Eşitlik (1)’de verilen klasik model kullanılmış ve nominal rüzgâr hızı yerine kanat uç hızı oranı (λ) parametresi belirlenmiştir. Sonuçlardan önerilen RT’nin tasarım parametreleri ile kıyaslandığında tasarım elemanları büyüklüklerinin (D, h ve P_n) birbirlerine yakın olmasına rağmen üretilen enerji miktarı ve enerji maliyeti açısından önerilen RT’nin daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni algoritmada kullanılan güç eğrisi modeli ile RT için nominal rüzgâr hızının (u_n)’nin uygun değerinin belirlenmesidir. Tasarlanan RT, Referans [7]’de aynı bölge için tasarlanan RT ile karşılaştırıldığında tasarım parametreleri değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Üretilen enerji miktarı ve birim enerji maliyeti açısından karşılaştırıldığında ise referans [7]’de önerilen RT’nin biraz daha avantajlı olduğu görülmektedir. Fakat Referans [7]’de yapılan tasarım optimizasyonunda türbin kapasite faktörü bağımsız değişken, nominal rüzgâr hızı bağımlı değişken olarak alınmıştır. Eşitlik (8) ve (1)’den görüleceği üzere nominal rüzgâr hızı değerindeki artış kapasite faktörü değerini azaltırken türbin nominal gücü değerini artırmaktadır. Diğer taraftan, üretilen yıllık enerji miktarı ve sonucunda birim enerji maliyeti Eşitlik (5)’de verildiği gibi kapasite faktörü ve nominal güç değeri çarpımı sonucunda elde edilmektedir. Dolayısıyla rüzgâr türbinlerinin tasarım optimizasyonunda nominal rüzgâr hızının bağımsız değişken olarak alınması tasarım optimizasyonu açısından daha uygundur. Ayrıca rotor verimliliği rüzgâr hızı arttıkça azalmaktadır. Pratikte kullanılan RT’lerin gerçek güç eğrileri incelendiğinde Eşitlik (7)’de nominal rüzgâr hızı değerinde rotor verimliliği değerinin 0.4 ve daha düşük değerde alınmasının daha doğru bir yaklaşım olduğu görülmektedir [10]. Bu nedenle, her ne kadar daha düşük performansa sahip olsa da kullanılan güç eğrisi modeli ve tasarım kurgusu dikkate alındığında tasarlanan RT’nin daha gerçekçi olduğunu söylemek mümkündür.

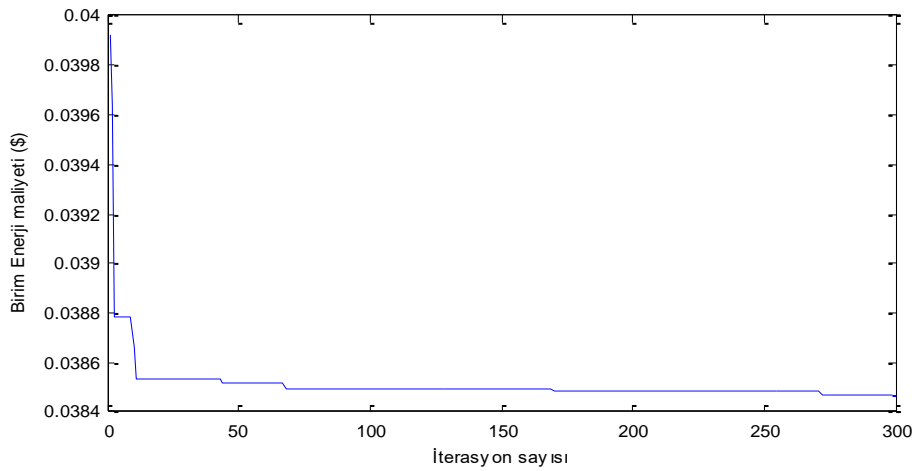
Optimizasyon algoritması Core™ i5-4590, 3.3-GHz işlemci ve 8 GB/3.3-GHz hafıza özelliklerine sahip bilgisayarda çalıştırılmıştır. Şekil 3’de hedef (amaç)

fonksiyonu Birim Enerji Maliyetinin iterasyon sayısı ile değişimi verilmiştir. Hesaplama süresi açısından algoritmanın 300 iterasyonu 8 saniye civarında tamamladığı görülmüştür. Değişken (parametre) sayısı, popülasyon büyüklüğü, tasarım değişkenleri arasında

tanımlanan eşitsizlik kısıtlamaları ve maliyet fonksiyonu dikkate alındığında Diferansiyel Gelişim Algoritmasının bu tip problem için uygun ve iyi bir performans gösterdiğini söylemek mümkündür.

Tablo 2. Güney Avrupa için tasarlanan Rüzgâr Türbinlerinin tasarım büyüklükleri, enerji ve maliyet

Tasarım Parametreleri	p	D (m)	h (m)	u_n (m/sn)	P_n (kW)	KF	P_o (kW/yıl)	YEÜ (kWh)	BEM (\$/kWh)
Tasarlanan RT	3	66.1	71.9	11.83	1566	0.443	693	5.91×10^6	0.038
RT Ref. [3]	3	30	30	14.00	1000	0.349	349	2.97×10^6	0.038
RT Ref. [2]	3	70	65	11.39	1500	0.337	523	4.45×10^6	0.049
RT Ref. [6]	3	67.6	79	-	1450	0.420	607	5.17×10^6	0.042
RT Ref. [7]	3	64.2	73.5	12.40	1705	0.488	771	6.57×10^6	0.036



Şekil 3. Amaç fonksiyonunun en iyi değerinin iterasyon sayısına göre değişimi

Ülkelerin elektrik enerjisi üretiminde arz güvenliğini sağlamak amacıyla mevcut üretilen enerjiyi verimli şekilde kullanmalarının dışında, mevcut enerji kaynaklarını optimum şekilde değerlendirmeleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarından en etkin şekilde yararlanmaları gerekmektedir [18]. Bu anlamda, çalışmada ikinci olarak Türkiye'de rüzgâr potansiyeli yüksek olan Ege ve Marmara bölgeleri için Rüzgâr Türbini tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu bölgelerin kıyı şeritlerinde rüzgâr potansiyeli diğer bölgelere kıyasla yüksek olup denizden uzaklaştıkça rüzgâr seviyesi düşmektedir. Diğer taraftan enerjide ithalat bağımlılığını azaltmak ve üretim-tüketim dengesini korumak amacıyla yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı hükümet tarafından teşvik edilmektedir. Teşvik için sabit fiyat sistemi kullanılmaktadır. Rüzgâr Türbinleri için dağıtım şebekelerine verdikleri ihtiyaç fazlası rüzgâr enerjisi 0.073 \$/kWh fiyatı ile 10 yıl kesintisiz olarak satın alınmaktadır. Mekanik ve/veya elektro-mekanik aksamın yerli üretim olması halinde ise bu fiyat değeri 5 yıl için 0.006-0.013 \$/kWh aralığında artmaktadır. Dolayısıyla Türkiye'de özellikle Ege ve Marmara bölgelerinde rüzgâr türbinleri kurularak enerji üretimi sürekli arttırılmaktadır. Bu nedenle her iki bölgede rüzgâr potansiyeli yüksek olan yerler için (genellikle kıyı şeritleri) üretilen enerji miktarı ve birim enerji maliyeti açısından en uygun Rüzgâr Türbinleri tasarlanarak Tablo 3'de verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere tasarlanan

RT'ler ile üretilen enerjinin birim maliyeti hükümet tarafından uygulanan fiyat tarifesinin altındadır. RT'lerin kapasite faktörü %40'ın üzerindedir. Bu değerler enerji verimliliği açısından oldukça avantajlıdır. Elde edilen sonuçlar ve RT'lerin kurulumu açısından bölgelerin coğrafik özelliklerinin elverişli olması durumu dikkate alındığında bu bölgelerin rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretimi için oldukça avantajlı olduğunu ve tasarlanan RT'lere uygun pratik RT'lerin kullanılarak enerji üretiminin miktarı ve maliyeti açısından oldukça avantajlı olacağını söylemek mümkündür. Ayrıca sonuçlardan türbin kurulu gücünün değeri azaldıkça birim enerji maliyetinin arttığı görülmektedir. Diğer taraftan türbinler için kapasite faktörü değerinin rüzgâr hızı ile azaldığı görülmektedir.

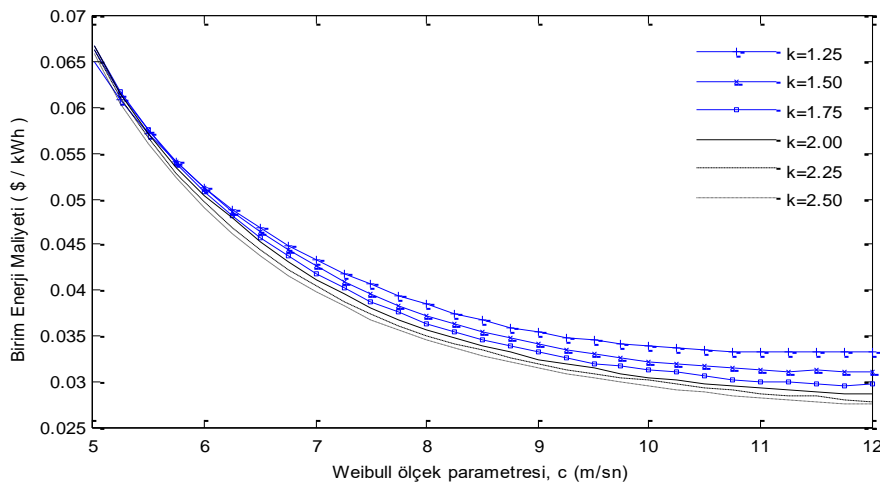
Tablo 3'den görüleceği üzere rüzgâr potansiyeli tasarım parametreleri büyüklüklerinin yanı sıra Birim Enerji Maliyetini de etkilemektedir. Bu nedenle çalışmada son olarak rüzgâr potansiyeline göre BEM değişimi parametrik olarak analiz edilmiştir. Analizlerde rüzgâr potansiyeli Weibull dağılım fonksiyonu parametreleri ile modellenerek $h=30$ m referans yükseklikte ölçek parametresi (c) 5 ile 12 arasında, şekil parametresi (k) ise 1.25 ile 2.5 arasında 0.25 adımlarla değiştirilerek tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Her bir rüzgâr hızı durumu için tasarlanan RT'lerin Birim Enerji Maliyetinin değişimi Şekil 4'de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere

bölgeler için c parametresi (ortalama rüzgâr hızı) arttıkça tasarlanan RT ile üretilecek enerjinin birim maliyeti önemle oranda azalmaktadır. Diğer taraftan k parametresi değeri yüksek rüzgâr hızı durumunda birim enerji maliyetini etkilemekte değeri arttıkça (standart sapma değeri azaldıkça) maliyet azalmaktadır. Elde edilen sonuçlardan yararlanarak bölgeler için rüzgâr durumuna göre RT ile üretilecek enerjinin birim maliyetinin öngörülmesi mümkündür. Örneğin Güney Avrupa bölgelerinde $h=30$ metrede $k=1.2$ ve $k=2$ aralığında, $c=8$

m/sn ile $c=12$ m/sn aralığında değişmektedir [3]. Dolayısıyla bu bölgelerde uygun RT'lerin kurulumu ile üretilecek enerjinin birim maliyetinin 0.04 \$ değerinin altında tutulması mümkündür. Diğer taraftan Kuzey Avrupa bölgeleri için $h=30$ metrede $k=2$ civarında ve $c=5$ m/sn ile $c=7$ m/sn aralığında değişmektedir [3]. Bu durumda bu bölgeler için uygun Rüzgâr Türbini seçimi ile birim enerji maliyetinin 0.067 \$ ile 0.042 \$ değerleri arasında enerji üretimi mümkün görülmektedir.

Tablo 3. Marmara ve Ege bölgeleri için tasarlanan Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinleri ve üretilen enerji, maliyet değerleri

RT/ Bölge-(k, c $h_0=50m$)	Tasarım parametreleri					Güç, Enerji ve Maliyet			
	D (m)	h (m)	u_n (m/s)	P_n (kW)	KF	P_o (kW/yıl)	YEÜ (kWh)	BEM (\$/kWh)	
Marmara Bölgesi	Uludağ/Bursa (10.14-1.95)	66.4	75	12.09	1683	0.598	1000	8.57×10^6	0.0302
	Gelibolu/Çanakkale (9.81-2.03)	65.6	74	12.01	1613	0.587	947	8.07×10^6	0.0307
	Gökçeada/Çanakkale (8.76-1.77)	68.6	76	11.45	1534	0.529	812	6.91×10^6	0.0347
	Enez/Edirne 7.02-1.72	73	81	10.31	1292	0.457	590	5.03×10^6	0.0441
	Kırklareli (6.68-1.92)	73.5	80	10.07	1195	0.447	531	4.52×10^6	0.0464
	Bandırma/Balıkesir (5.51-1.53)	73.8	72	9.389	991	0.350	347	2.95×10^6	0.0613
Ege Bölgesi	Muğla-Manisa (7.89-2.02)	70.5	78	10.66	1307	0.524	685	5.83×10^6	0.0378
	Menemen/İzmir (7.33-2.0)	73.2	78	10.38	1297	0.491	637	5.42×10^6	0.0411
	Söke/Aydın (5.84-1.87)	75.5	81	9.398	1059	0.398	422	3.59×10^6	0.0561



Şekil 4. RT'ler için Birim Enerji Maliyetinin Weibull parametrelerine göre değişimi

5. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada Değişken-Hızlı Rüzgar Türbinlerinin maliyet, üretilen güç ve enerji miktarı analizleri için kullanılan çıkış gücünün (güç eğrisinin) hesaplanmasına ilişkin yeni bir model kullanılarak bu tip RT'lerin tasarımı için yeni bir optimizasyon yöntemi verilmiştir. Optimizasyon algoritması olarak Diferansiyel Gelişim Algoritması kullanılarak Avrupa'nın Akdeniz bölgesi için Değişken-Hızlı Rüzgâr Türbinleri tasarlanmış ve bunlar tasarım parametreleri, üretilen enerji ve maliyet açısından literatürde verilen RT'ler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta tasarlanan RT'lerin referans RT'lere nazaran üretilen enerji miktarı ve birim enerji maliyeti açısından daha avantajlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, Türkiye'nin batısında rüzgâr potansiyeli yüksek kıyı şeridi bölgeleri için en uygun RT'ler tasarlanmıştır. Son olarak rüzgâr hızının geniş aralığı için tasarım optimizasyonu yapılmış ve rüzgâr potansiyelinin birim enerji maliyeti üzerindeki etkisi parametrik olarak analiz edilmiştir. Çalışmada Diferansiyel Gelişim Algoritması ilk kez bu tip optimizasyon problemine uygulanmıştır. Yapılan analizler ve optimizasyon sonuçlarından DGA'nın bu tip kısıtlı optimizasyon problemleri için kolaylıkla uygulanabilir ve performans açısından da elverişli olduğu görülmüştür. Verilen optimizasyon algoritması herhangi bir program gerektirmeksizin çalışabilen bir paket programa dönüştürülerek internet üzerinden ücretsiz erişime açılacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 114E961 Nolu proje kapsamında desteklenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sing, C. (2012). Variable speed wind turbines. *International Journal of Engineering Sciences*, 2, 652-656.
- [2] Fingersh, L., Hand, & M., Laxson, A. (2006). Wind turbine design cost and scaling model. *Technical Report; NREL/TP-500-40566, National Renewable Energy Laboratory, USA*, 4-36.
- [3] Diveux, T., Sebastian, P., Bernard, D., Puiggali R. J., & Grandidier, J. Y. (2001). Horizontal axis wind turbine systems: optimization using genetic algorithms. *Wind Energy*, 4, 151-171.
- [4] Maki, K., Sbragio. R., & Vlahopoulos, N. (2012). System design of a wind turbine using a multi-level optimization approach. *Renewable Energy*, 43, 101-110.
- [5] Collicutt, G. R., & Flay R. G. (1996). The economic optimization of horizontal axis wind turbine design parameters. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 61, 87-97.
- [6] Eminoglu, U. (2016). Site-specific design optimization of horizontal axis wind turbine systems. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24, 1044-1060.
- [7] Eminoglu, U., & Ayasun, S. (2014). Modelling and design optimization of variable-speed wind turbine systems. *Energies*, 7, 402-419.
- [8] Kongam, C., & Nuchprayoon, S. (2010). A particle swarm optimization for wind energy control problem. *Renewable Energy*, 35, 2431-2438.
- [9] Li, H., & Chen, Z. (2009). Design optimization and site matching of direct-drive permanent magnet wind power generator systems. *Renewable Energy*, 34, 1175-1184.
- [10] Carrillo, C., Obando Montano, A. F., & Diaz-Dorado, E. (2013). Review of power curve modelling for wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 572-581.
- [11] Thapar, V., Agnihotri, G., & Sethi, V. K. (2011). Critical analysis of methods for mathematical modelling of wind turbines. *Renewable Energy*, 36, 3166-3177.
- [12] Akdag, S. A., & Guler, O. (2011). Comparison of wind turbine power curve models. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 33, 2257-2263.
- [13] Eminoglu, U. (2015). A new model for output power calculation of variable-speed wind turbine systems. *IEEE International Conference on ACEMP-OPTIM-ELECTROMOTION*, Antalya, 141-146.
- [14] Zervos, A. (2009). Wind Energy-The Facts. *European Wind Energy Association (EWEA), Belgium, Part-I (Technology)*, 83-85.
- [15] Rainer, S., & Kenneth, P. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11, 341-359.
- [16] Oterino-Echavarri, F., Zulueta, E., Ramos-Hernanz, J., Calvo, I., & Lopez-Guede, J. M. (2013). Application of Differential Evolution as method of pitch control setting in a wind turbine. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13)*, Bilbao, 660-666.
- [17] Matlab R2010b Enterprise, Copyright©2010.
- [18] Doğan, H., & Yılankıran N. (2015). Türkiye'nin Enerji Verimliliği Potansiyeli ve Projeksiyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3(1), 375-383.