

Rüzgar ve Termik Santrallerden Oluşan Enerji Sistemlerinde Ekonomik Güç Dağılımının Big-Bang Big-Crunch, PSO ve IMO Algoritmaları ile İrdelenmesi

Alp KARADENİZ*, Mehmet Kubilay EKER

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, BALIKESİR

(Geliş / Received : 18.08.2015 ; Kabul / Accepted : 18.11.2015)

ÖZ

Bu çalışmada, rüzgar santrallerinin enerji sisteminde artan etkilerini irdeleyebilmek için, rüzgar ve termik santrallerinden oluşan hibrit sistemin ekonomik güç dağılım problemi, üç güncel sezgisel algoritma kullanarak incelenmektedir. Optimizasyon çalışmalarında kullanımı yaygın olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) ve Big-Bang Big-Crunch (BB-BC) algoritmalarının yanında, literatüre yeni olarak sunulan İyon Hareket Optimizasyonu (Ions Motion Optimization, IMO) algoritması da kullanılarak en iyi ekonomik güç dağılımının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Algoritmalarda kullanılan amaç fonksiyonunun minimize edilmesinin yanında, bu algoritmaların bilgisayarda harcadığı süreler de belirlenerek, enerji tesisi işletmecisinin süre yönünden de etkileneceği durumun ortaya konulması hedeflenmektedir. Çalışma sonuçları dikkate alındığında, BB-BC ve PSO algoritmalarının, IMO algoritmasına göre daha hızlı ve etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Big-Bang Big-Crunch Optimizasyonu, Parçacık Sürü Optimizasyonu, İyon Hareket Optimizasyonu, Ekonomik Güç Dağılımı, Rüzgar-Termik Hibrit Sistemler

BB-BC, PSO and IMO Algorithms for Economic Dispatch Problem of Wind-Thermal Power Plants

ABSTRACT

In this study, for examining the effect of wind power systems on energy systems, three new heuristic methods were compared to solve economic dispatch problem of wind-thermal (hybrid) plants. These three heuristic algorithms are Big-Bang Big-Crunch (BB-BC), Particle Swarm Optimization (PSO) that is generally used in optimization area and Ions Motion Optimization (IMO) which is newly developed. The objective function (the cost function) was solved to have minimum value in minimum time interval which can be affective on electricity system operator. The results were evaluated with different aspects (i.e. run-time, best value) available in the literature. The results of the comparison demonstrated that BB-BC algorithm and PSO algorithm were more effective than IMO algorithm.

Keywords: Big-Bang Big-Crunch Optimization, Particle Swarm Optimization, Ions Motion Optimization, Economic Dispatch Problem, Wind-Thermal Hybrid Plants

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik güç sistemlerinde, tüketicilerin ihtiyaç duyduğu güç için gerekli güç üretim maliyetinin minimize edilmesi, ekonomik dağılım (ED) problemi olarak adlandırılmaktadır [1]. Buradaki amaç hangi generatörün, en az üretim maliyetiyle, ne kadar güç üretmesi gerektiğini hesaplamaktır. Klasik santraller (özellikle termik) dikkate alınarak, ekonomik güç dağılımının belirlenmesi için birçok çalışma yapılmıştır [1-3]. Fakat rüzgar enerjisine olan ilginin son yıllarda artması ve rüzgar santrallerinin, termik santrallerin yanında yer alması sonucunda, bu hibrit şebeke yapısı için gerekli ekonomik güç dağılımının hesaplanması başlı başına bir gereklilik haline gelmiştir.

Günümüzde artan yakıt fiyatları, azalan fosil yakıtlar ve çevreye verilen zararları göz önünde bulundurarak birçok ülke yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Bu kaynakların arasında en çok gelecek vadedenlerden biriside rüzgar enerjisidir [4]. Ekonomik güç dağılımı problemlerindeki klasik hesaplamalarda, sistemi besleyen her bir santralin güç-maliyet eğrisi ve generatörlerin mini-mum ve maksimum kapasitesi gibi kısıtlar dikkate alınarak, tüketiciler tarafından kullanılması beklenen toplam yük değeri için minimum maliyet oluşturacak biçimde hangi santralin ne kadar gücü sisteme aktarması gerektiği planlanmaktadır. Rüzgar santralinin sisteme aktaracağı güç ise kontrol edilebilir bir büyüklük değildir. Bu yüzden tüketicinin değişen güç talepleri için, planlanan zaman dilimi içinde rüzgar santralinin sisteme ne kadar güç aktarabileceğinin tahmin edilmesi gerekmektedir.

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: akaradeniz@balikesir.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 261-268

Rüzgar santrali tarafından üretilecek güçle, rüzgar hızı arasında doğrudan bir ilişki olduğu dikkate alındığında, rüzgar hızının belirlenen bir bölge için matematiksel olarak modellenmesi ve bu modelde kullanılan katsayı-lara bağlı olarak rüzgar santralının üreteceği güç değişiminin tanımlanması, belirlenen bir zaman diliminde rüzgar santralının sisteme aktaracağı gücün bilinmesi için önemlidir [5]. Rüzgar hızının tahmini [6] veya rüzgar hızına bağlı gücün, Weibull dağılımı [7] ve benzeri [8] istatistiksel yöntemler kullanılarak belirlenmesine yönelik çalışmalar literatürde mevcut olsa da, bu çalışmanın amacını rüzgar santrallerinden oluşan hibrit sistemlerde ekonomik güç dağılımının belirlenmesi oluşturmaktadır.

Hidroelektrik santrallerde olduğu gibi rüzgar santrallerinde de yakıt maliyeti bulunmasa da, elektrik enerjisi işletim operatörü (Türkiye için TEİAŞ), elektrik enerjisi üreticilerinden, gün öncesinde ve gün içinde ne kadarlık gücü ne kadar bedelle satacaklarına ilişkin taleplerini almaktadır [9]. Rüzgar Santrali işletmecilerinin de, elektrik şebekesine ne kadarlık güç aktaracak-larını ve satış maliyetini operatöre iletmeleri gerekmektedir. Ayrıca hidroelektrik santrallerden farklı olarak, planlanan zaman diliminde tahmin edilen rüzgar gücünün üstünde bir gücün sisteme aktarılması durumunda sistemde bulunan klasik santrallerin üretimlerini düşürmeleri gerekeceğinden ve bu durum ekonomik maliyet hesaplamasına fazladan bir yük getireceği için bir ceza katsayısının dikkate alınması gerekmektedir. Benzer biçimde rüzgar santralinden alınması beklenen gücün düşük değerde olması durumunda da, sistemdeki klasik santrallerin, fazladan sisteme güç aktarması gerekecektir ki, bu da ekonomik dağılım problemi hesaplamalarına (rezerv maliyeti) dahil edilmesi gereken diğer bir unsurdur [10].

Günümüzde birçok sezgisel, üst sezgisel ve bunların haricinde doğadan ilham alınarak bulunan algoritmalar ışığında ekonomik dağılım problemi için çözümler üretilmektedir [11]. Klasik algoritmaların çoğu rastgele olmayan bir düzene (lineer programlamadaki simpleks metodu gibi) bağlı kalmaktadırlar. Bazı klasik algoritma-lar ise yerçekimi metoduna bağlı kalmaktadır ve bunlara yerçekimi tabanlı rastgele olmayan algoritmalar (Newton-Raphson metodu gibi) denilmektedir. Fakat amaç fonksiyonunda devamlı olmayan bir hal var ise, bu yöntemler doğru sonuçlar vermeyebilirler. Bu gibi durumlarda ise yerçekimi tabanlı olmayan algoritmalar önerilir. Diğer bir algoritma tipi ise doğadan esinlenerek oluşturulan üst sezgisel metotlardır. Bu tarz metotlarda deneme yanılma yolu ile çözüm uzayında birçok çözüm üretilir ve istenilen amaç fonksiyonunun çözümü elde edilir. Bu çözüm istenilen çözüme ne kadar yakın ise o kadar doğru ve yeterli denebilecek ölçüde bir sonuç elde edilmiş olur. Çözüme yakınlık açısından gerekli sınırlamalar veya şartlar her amaç fonksiyonu için özeldir [11]. Bu çalışmada kullanılan PSO, BB-BC ve IMO gibi algoritmalar da doğadan esinlenerek bulunan üst sezgisel metotlardır.

Rüzgar enerjisi içeren ED modeli tahmini değişkenler, eşitsizlik ve eşitlik içeren sınırlamalar, birden fazla boyut ve parçalı lineer olmayan bir karakteristiğe sahiptir [12]. Bu problem türünü genetik algoritma (GA), benzetimle tavlama veya gradient metot ile çözmek zordur. Benzetimle tavlama veya GA'yı sisteme uyguladığımızda çözümler yavaş ve stabil olmayan şekilde elde edilir. Diferansiyel evrim (DE) metodu bu tür problemlerde çok iyi sonuçlar vermektedir, fakat mutant operatöründeki çözüm eksikliği yüzünden ayrı olasılık dağılımı elde edilemeyebilir, bu da tamamen kendiliğinden organize olan yapıyı ortadan kaldırabilir [12]. Bu yüzden bu çalışmada, daha iyi sonuçlar gözlemlenen PSO, BB-BC ve IMO algoritmaları kullanılarak lineer olmayan optimizasyon problemine uygulanmış, elde edilen veriler ve grafikler ışığında, algoritmalar arasında çözüme ulaşma süreleri ve buldukları maliyet değerlerine göre karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çalışmada incelenen 2 adet rüzgar ve 2 adet termik santral içeren 6 baralı örnek sistem üzerinde elektrik enerjisi maliyetlerini eniyilemek için kullanılan PSO ve BB-BC algoritmaları en iyi ve birbirine yakın değerler üretirken IMO algoritmasının diğer iki algoritmaya göre daha yüksek maliyet değerleri ürettiği görülmüştür.

2. EKONOMİK DAĞILIM MODELİ (ECONOMIC DISPATCH MODEL)

Enerji sistemlerinde, elektrik üreticisi santrallerin her birinin enerji üretim maliyetleri birbirinden farklıdır. Bir ağ yapısında olan güç sisteminde, ihtiyaç duyulan aktif ve reaktif güç değerlerini, sistemin kısıtları ve hatlar üzerindeki güç kayıplarını da dikkate alarak, üretim maliyetini minimize edecek biçimde hangi generatörlerin sisteme ne kadar güç aktarması gerektiğinin bulunması işleme optimum güç akışı (Optimum Power Flow, OPF) denilmektedir. Bu problemde, amaç fonksiyonu ve kısıtların bir arada toplanıp tek bir ifade altında birleştirilip minimize edilmesi gerekir ve bu işlem için sistemin güç akışı denklemlerinin de kullanılması gerekecektir. Belirli zaman aralığında ihtiyaç duyulacak sadece aktif güç değerlerini dikkate alarak, generatörlerin maksimum-minimum çalışma kısıtları arasında, üretim maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi ise Ekonomik Dağılım (Economic Dispatch, ED) problemi olarak adlandırılır. Bu optimizasyon işlemine, OPF hesaplamalarında kullanılan denklemlere göre daha basit hesaplamalarla hatların aktif güç kayıplarının eklenmesi de mümkündür [13].

2.1. Ekonomik Dağılım Probleminin Amaç Fonksiyonu (The Objective Function of Economic Dispatch Problem)

2.1.1. Termik santrallerde enerji üretim maliyeti (The production cost of conventional energy)

Genel olarak fosil yakıtlarla çalışan generatörlerin girdileri Btu/h (British thermal unit/hour), çıktıları ise MW cinsindedir. Termik santraller için yakıt giderleri,

personel ve işletme giderleri dikkate alınarak elektrik enerjisi maliyet değişimi için Eşitlik-1'de verilen denklem kullanılmaktadır [13].

$$C_{t,i} = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (1)$$

Burada; a_i, b_i ve c_i i'inci generatörün maliyet fonksiyonu sabitleridir. P_i i'inci generatörün planlanmış güç değerini, $C_{t,i}$ ise i'inci generatörün MW/h cinsinden toplam enerji üretim maliyetini ifade eder. Toplam olarak her bir termik santrallerdeki enerji üretimi için harcanan maliyet tutarı Eşitlik-2'de verilmektedir.

$$\sum_{i=1}^m C_i = \sum_{i=1}^m a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2)$$

Burada, m fosil yakıtla çalışan toplam generatör sayısını göstermektedir. Havaya salınan gazların da bir yayılım maliyeti vardır, ancak buradaki formülde bu durum ihmal edilmiştir. Rüzgar enerjisi üretiminde, fosil yakıt kullanılmadığı için gaz salınımı yoktur ve ilgili maliyet sıfıra eşittir [14].

2.1.2. Rüzgar enerji üretim maliyeti

(The production cost of wind energy)

Rüzgar hızı ve dolayısı ile gücünün belirsizliğinden dolayı, planlanan zamanda rüzgardan alınabilecek güçle ilişkili maliyet üç farklı formülle ifade edilir [10]. Eşitlik-3'de verilen, direk veya beklenen maliyet olarak adlandırılan $C_{w,i}$, şebekeye o an için rüzgar santralının aktaracağı güce bağlı olarak güç sistemi operatörünün ödeyeceği alım bedelidir.

$$C_{w,i} = d_i w_i \quad (3)$$

Burada; w_i , i'inci generatörde üretilen rüzgar gücünü göstermektedir. Klasik santraller için yapılan minimum maliyet analizi sonrasında, planlanan zamanda hesaplanan güç değerini her bir santralin sisteme aktarması beklenir. Planlanan zaman dilimi için rüzgar santralının sisteme aktarabileceği güç, her ne kadar meteorolojik hesaplamalarla daha önceden belirlenmeye çalışılsa da, bu hesaplamaların tamamen gerçekçi bir sonucu yansıtması beklenemez. Bu yüzden, beklenenden farklı bir güç değerinde rüzgar santralının sisteme güç aktarması durumunda, klasik santrallerin ya üretimlerini düşürmeleri ya da artırmaları gerekecektir. Bu durumda hesaplanan direk maliyet hesabının dışında yeni bir maliyet değeri sistem operatörüne yansiyacaktır ki bu durumun maliyet denklemlerinde dikkate alınması gereklidir. Eğer rüzgar gücü gerçekleşen durumdan düşük tahmin edilmişse, sisteme gelen bu fazla güç nedeniyle klasik santrallerin üretimlerini düşürmeleri gerekecektir. Bu durumdan kaynaklanan fazladan maliyet, Eşitlik-4 ile maliyet denklemine eklenir. Bu denklemdeki; $k_{p,i}$ ceza katsayısını, $f_w(w)$ rüzgar gücünün olasılık yoğunluk fonksiyonunu, $w_{r,i}$ ise i'inci rüzgar generatörün nominal güç değerini ifade eder [10].

$$C_{p,i} = k_{p,i} \int_{w_i}^{w_{r,i}} (w - w_i) f_w(w) dw \quad (4)$$

Eğer rüzgar gücü gerçekleşen durumdan fazla tahmin edilmişse, yüklerin ihtiyaç duyduğu toplam gücü sağlamak için klasik santrallerin sisteme fazladan güç

aktarmaları gerekecektir. Bu işlem de doğal olarak fazladan bir maliyet gerektirir ki, Eşitlik-5 ile maliyet hesaplamalarına dahil edilir. Bu denklemdeki $k_{r,i}$ katsayısı, klasik santrallerin sisteme fazladan güç aktarmaları durumunda oluşacak maliyetle ilişkili bir katsayıdır [10].

$$C_{r,i} = k_{r,i} \int_0^{w_i} (w_i - w) f_w(w) dw \quad (5)$$

2.2. Sınırlamalar (Constraints)

Amaç fonksiyonunun çözümü sırasında birtakım sınırlamalara uyulması çözümün doğruluğu açısından çok önemlidir. Gerekli şartlar aşağıdaki denklemlerde verilmektedir [10].

$$p_i^{min} \leq p_i \leq p_i^{max}$$

$$0 \leq w_i \leq w_{r,i}$$

$$\sum_{i=1}^m p_i + \sum_{i=1}^n w_i = L \quad (6)$$

Yukarıdaki ifadede, p_i^{min}, p_i^{max} sırasıyla i'inci klasik generatörün minimum ve maksimum güç değerlerini, w_i i'inci rüzgar generatörün ürettiği güç değerini, $w_{r,i}$ i'inci rüzgar generatörün nominal güç değerini, L ise toplam istenilen güç değerini ifade eder [12,15]. Yukarıda belirtilen bütün durumunlar dikkate alındığında, amaç fonksiyonu için Eşitlik-7'de verilen ifade elde edilir.

$$\min C = \sum_{i=1}^m C_i(p_i) + \sum_{i=1}^n C_{w,i}(w) + \sum_{i=1}^n C_{p,i}(w) + \sum_{i=1}^n C_{r,i}(w) \quad (7)$$

3. ALGORİTMALAR (ALGORITHMS)

3.1. Big-Bang Big-Crunch Optimizasyonu

(Big-Bang Big-Crunch Optimizaton, BB-BC)

Big-Bang Big-Crunch metodunda, rastgeleliği enerji dağılımına, global optimal çözümü ise yerçekimine benzetirsek çok da yanlış olmayız. Bu metotta genel olarak düzensizliği enerji dağılımı ile yakınsanmış düzenli parçacıkları dağıtıp, bir sonraki adım için çözüm uzayına, çözüm adayları olarak dağıtırız. Burada düzensizlik veya kaos oluşturmuş oluruz. İlk çözüm adayları üretilirken kullanılan metot genetik algoritma (GA) ile benzerdir. Big-Bang Big-Crunch iki fazdan oluşur. İlki Big-Bang, yani çözüm uzayına yeni çözüm adaylarını dağıttığımız faz, diğeri ise Big-Crunch fazıdır. Big-Crunch fazında ortak bir kütle merkezi bulunup en iyi çözümün o olduğu varsayılarak, bir sonraki adımda üretilecek çözümler bu kütle merkezi etrafına yakınsanarak oluşturulur. Kütle merkezini (Eşitlik-8) bulmak için minimize edeceğimiz fonksiyonlarda kütle olarak uyum fonksiyonunun tersi alınır [16].

$$\bar{x}^c = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f^i} \bar{x}^i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f^i}} \quad (8)$$

Yukardaki formülde \bar{x}^c kütle merkezini, \bar{x}^i n-boyutlu uzayda bir çözüm noktasını, f^i uyum fonksiyonunun \bar{x}^i noktasındaki değerini, N Big-Bang fazında oluşturulan

popülasyon büyüklüğünü ifade eder.

Big-Crunch fazında ortak kütle merkezi bulunduktan sonra, yeni adımda çözümler bu kütle merkezi ve ayrıca en iyi çözüme sahip çözümün etrafında aşağıdaki denklemlere (Eşitlik-9 ve 10) göre oluşturulur [17].

$$x_i^{new} = X^c + \sigma \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{r\alpha(x_{max} - x_{min})}{k} \quad (10)$$

Yukarıdaki formülde α arama uzayını sınırlandırmak için kullanılan parametre, r standart rastgele oluşturulmuş sayı, x_{max} ve x_{min} en üst ve en alt optimizasyon problemi için belirlediğimiz sınır değerleri, k adım sayısını ifade eder. İkinci patlamadan sonra kütle merkezi tekrar hesaplanır. Bu patlama ve toplanma işlemleri durdurma kriteri sağlanana kadar devam eder.

Çözüm için performansı arttırmak amacı ile Eşitlik-11'de verilen denklem ile hem kütle merkezinden hem de global en iyi çözümden yararlanarak daha iyi yeni çözümler elde edebiliriz [18].

$$X^{(k+1,i)} = \beta X^{c(k)} + (1 - \beta)X^{gbest(k)} + \sigma \quad (11)$$

Burada, β değeri global en iyi çözümün kütle merkezine göre öncelik katsayısını ifade etmektedir. Hangisinin daha öncelikli ve etkili olduğu düşünülüyorsa onun β değeri artırılmalıdır. $X^{(k+1,i)}$ değeri yeni adımda üretilen çözüm adaylarını ifade eder. Bu çalışmada yapılan denemeler ışığında en iyi sonucu veren $\beta = 0.2$ ve $\alpha = 1$ değerleri kullanılmıştır. Durdurma kriteri sağlanana kadar yukarıdaki anlatılanlar bir döngüde devam eder.

3.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO)

PSO algoritması, 1995 yılında Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy tarafından geliştirilmiş, sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Bu algoritma, sürü halindeki kuşların birbirleri ile olan çeşitli nedenlerden (yiyecek bulma, avcılardan korunma vb.) dolayı ilişkilerinde bilgi paylaşımına dayandığı için sosyolojik temelli bir algoritmadır. Bu algortmada, her bir kuş bir bireyi temsil eder ve bu bireylerin toplamı da sürüyü oluşturur. Burada amaç hangi kuşun en iyi konum bilgisine sahip olduğu ve bunu diğer kuşlara bildirip topluca en iyi çözüm etrafında değişkenlerin (kuş) toplanmasıdır. Her bir kuş kendi pozisyonunu sürüdeki en iyi pozisyona göre ayarlar ve bu sırada önceki bilgilerinden de yararlanır. Tabi en iyi konum, her bir parçacığın (kuş) uygunluk fonksiyonu değerlerine göre hesaplanır. Kuşların hız ve konum bilgileri her bir adımda tüm parçacıkların en iyi ($gbest$) ve o parçacığın en iyi çözümü ($pbest$) göz önünde bulundurulup hem rastgele hem de matematiksel olarak hazırlanan Eşitlik-12'de verilen algoritma ile hesaplanır ve bu değerler saklanır [19]. Algoritmanın genel işleyişi aşağıdaki gibidir:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1U(pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2U(gbest_{id}^k - x_{id}^k)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$d = 1, 2, \dots, m$$

$$v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}]$$

$$pbest_i = [pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{im}] \quad (12)$$

Bu denklemlerde; n , bir gruptaki çözüm sayısını; m , çözümdeki eleman sayısını; k , adım (jenerasyon) sayısını; w , eylemsizlik kuvveti sabitini; c_1 , c_2 hızlandırma sabitini; U , [0,1] aralığında rastgele bir sayıyı; x_{id}^k , v_{id}^k , i 'inci çözümün k 'inci adımdaki pozisyon ve hız bilgisini göstermektedir.

c_1 ve c_2 yapılan çalışmalar sonucunda, en iyi $c_1 = 2$ ve $c_2 = 2$ iken çözüme yardımcı olduğu bilinmektedir. w ise [0.9,0.4] arasında, adım sayısına bağlı olarak Eşitlik-13'de verilen ifade ile giderek azalır [2].

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (13)$$

Burada w_{max} , w_{min} sırasıyla eylemsizlik kuvveti sabiti w 'nin maksimum ve minimum değerlerini, $iter_{max}$, algortmada kullanılacak adım sayısının üst limitini ve $iter$ değişkeni de o anki adım sayısını ifade eder [2].

3.3. İyon Hareket Optimizasyonu (Ions Motion Optimization, IMO)

İyon hareket optimizasyonu, iyonların (anyon ve katyon) birbirleri ile olan iletişimi göz önünde bulundurularak yakın geçmişte bulunan bir optimizasyon tekniğidir. Eksi yüklü iyonlar anyon, artı yüklüler ise katyon olarak adlandırılır. Temel olarak algoritma, aynı yüklü iyonların birbirini itmesi ve ters yüklülerin birbirini çekmesi felsefesine bağlıdır [20]. Çözüm için adaylar, biri anyonları diğeri ise katyonları ifade eden iki gruba ayrılır. Her bir iyon bir çözümü ifade eder ve çekme/itme kuvvetleri bu iyonların arama uzayında hareket etmesini sağlar. İyonlar, uyum fonksiyonundaki değerlerine göre ele alınırlar. Doğal olarak en iyi anyon katyonları, en iyi katyon ise anyonları kendine doğru çeker. Hareket etme oranları ise çekme/itme kuvvetlerine bağlı olarak değişir. Genel olarak her algortmada olduğu üzere, bu algortmada da biri sıvı, diğeri kristal faz olmak üzere iki adım vardır. Kristal fazında yerel minimum/maksimum noktalarına takılan çözümler elenip rastgele olarak atamalar yapılabilir.

3.3.1. Sıvı faz (Liquid phase)

Bu fazda sıvı içerisinde iyonlar daha hızlı hareket ederler. Sıvı fazda iyonların aynı işaretli olanların birbirini itme kuvveti, farklı işaretle olanların birbirini çekme kuvvetine göre çok azdır [20]. Bu yüzden çekme kuvvetleri, aradaki mesafeye bağlı olarak Eşitlik-14 ve Eşitlik-15'de verildiği gibi matematiksel olarak ifade edilebilir [21].

$$AF_{i,j} = \frac{1}{1 + e^{-0.1/AD_{i,j}}} \quad (14)$$

$$CF_{i,j} = \frac{1}{1 + e^{-0.1/CD_{i,j}}} \quad (15)$$

$$AD_{i,j} = |A_{i,j} - C_{best,j}| \quad (16)$$

$$CD_{i,j} = |D_{i,j} - A_{best,j}| \quad (17)$$

Yukarıdaki ifade; i , indeks sayısını; j , boyut sayısını, e , euler sayısını; $AD_{i,j}$ j 'inci boyuttaki en iyi katyon ile i 'inci sıradaki anyon arasındaki mesafeyi; $CD_{i,j}$ j 'inci boyuttaki en iyi anyon ile i 'inci sıradaki katyon arasındaki mesafeyi; $AF_{i,j}$ anyonların çekim kuvveti, $CF_{i,j}$ ise katyonların çekim kuvvetini ifade eder [21]. Bu kuvvetler, denklemlerden görüleceği üzere mesafe ile ters orantılıdır. Kuvvetler hesaplandıktan sonra, bu kuvvet değerlerinden yararlanıp yeni pozisyon bilgisi Eşitlik-18 ve 19 ile atanır.

$$A_{i,j} = A_{i,j} + AF_{i,j} * (C_{bestj} - A_{i,j}) \quad (18)$$

$$C_{i,j} = C_{i,j} + CF_{i,j} * (A_{bestj} - C_{i,j}) \quad (19)$$

Sadece güç değerinin, her bir iyonun en iyi ters yüklü iyonla doğru olan moment değerinin hesabında etkisi vardır. Adım sayısı arttıkça en iyi iyonlar etrafında diğer iyonlar toplanmaya başlar ve sıvı fazdan kristal faza doğru bir geçiş başlar. Kristal faz ise çözümün bulunduğu fazdır.

3.3.2. Kristal faz (Crystal phase)

Bu fazda, iyonlar bir noktaya yakınsarlar ve arama uzayının şekli bilinmediğinden bu nokta yerel minimum/maksimum noktası olabilir. Bu yüzden kaçış için atlama yapmak gereklidir. Doğada birbirini çeken iyonların sonuçta oluşturduğu kristal faz, aynı gücü aynı yükte uygulayarak yok edilip sıvı faz elde edilebilir. Yerel minimum/maksimum noktasından kurtulmak için gerekli algoritmik ifade aşağıda verilmektedir [21].

if (CbestFit >= CworstFit/2 and AbestFit >= AworstFit/2)

if rand () > 0.5

$$A_i = A_i + \phi_1 * (C_{best} - 1)$$

else

$$A_i = A_i + \phi_1 * (C_{best})$$

endif

if rand () > 0.5

$$C_i = C_i + \phi_2 * (A_{best} - 1)$$

else

$$C_i = C_i + \phi_2 * (A_{best})$$

endif

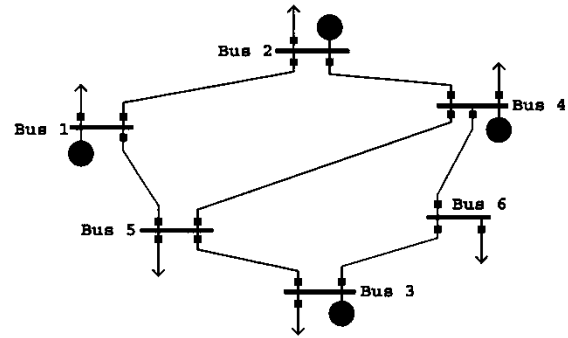
if rand () < 0.05

Re – initialized A_i and C_i **endif** **endif**

Bu ifade ϕ_1 ve ϕ_2 değerleri [-1,1] arasında değişen rastgele sayıları ve rand() ise [0,1] arasında değişen rasgele sayıyı ifade eder. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri, ilk başta bir popülasyon oluştururken $r(ub_i - lb_i) + lb_i$ formülünden yararlanılması gerektiğidir. Burada r , rastgele tekdüze dağılımlı [0,1] arasında değişen sayıyı, lb ve ub ise sırasıyla alt ve üst limiti ifade eder [21].

4. PROBLEM VE OPTİMİZASYON UYGULAMALARI (PROBLEM AND OPTIMIZATION APPLICATIONS)

Çalışmada irdelenen ve Şekil-1'de şematik yapısı verilen 6-baralı sistem, 2 adedi termik (bara 1-2) ve 2 adedi rüzgar (bara 3-4) olmak üzere 4 adet generatörden oluşmaktadır [22]. Sistemde bulunan generatörlerin maliyet fonksiyonları için gerekli katsayı değerleri Çizelge-1'de verilmektedir [15]. Maliyet fonksiyonu katsayıları, generatörün güç üretimi maliyeti değişimleri dikkate alınarak deneysel yollar kullanılarak bulunur [5].

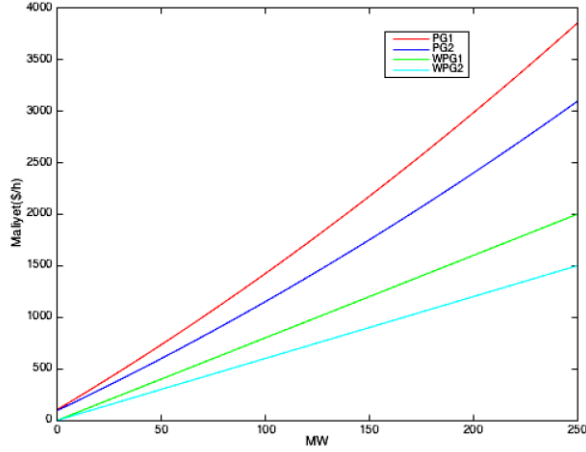


Şekil 1. 6-Baralı Örnek Sistem (Schematic diagram of 6-bus test system)

Çizelge 1. Maliyet Fonksiyonu Sabitleri (Cost Function Constants)

| Gen. No. | a_i (\$/MW ² h) | b_i (\$/MWh) | c_i (\$/h) | Pg_min (MW) | Pg_maks (MW) |
|----------|------------------------------|----------------|--------------|-------------|--------------|
| 1 | 0.012 | 12 | 105 | 50 | 250 |
| 2 | 0.0096 | 9.6 | 96 | 50 | 250 |
| 3 | 0 | 8 | 0 | 0 | 40 |
| 4 | 0 | 6 | 0 | 0 | 40 |

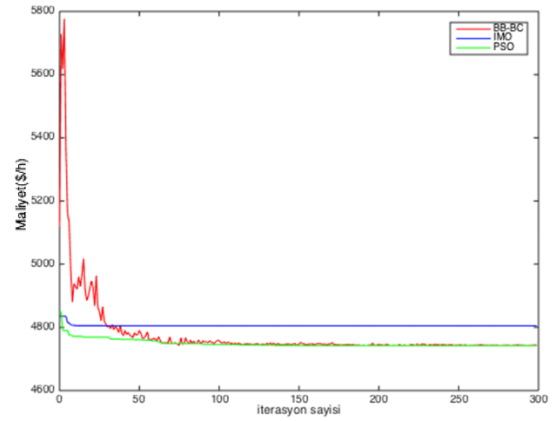
Çizelge-1'deki maliyet fonksiyonu katsayılarına göre maliyet değişimleri Şekil-2'de görülmektedir. Bu grafiğe göre, en yüksekte en düşüğe doğru generatörlerin maliyet sıralamasının PG1 (Gen-1), PG2 (Gen-2), WPG1 (Gen-3), WPG2 (Gen-4) olduğu açıktır. Buradaki kısaltmalarda, PG1 ve PG2 termik generatörleri, WPG1 ve WPG2 ise rüzgar generatörlerini göstermektedir.



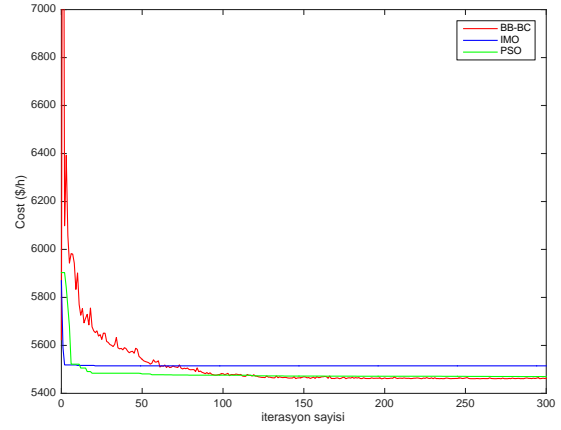
Şekil 2. Generatörlerin Maliyet Fonksiyonu Grafikleri (Cost Function Values of Generators)

Rüzgar gücü hesaplamalarda kullanılırken, tahmin edilenden fazla oluşan rüzgar gücü için ödenen ceza çarpanı $k_r = 0.0001$ ve rüzgar gücünün düşük değerde oluşmasına ilişkin maliyet katsayısı $k_p = 0$ alınmıştır. Bu demek oluyor ki, sistem operatörü rüzgar santrallerinin sahibi değildir ve termik santrallerin sisteme katacağı fazladan güç için bir maliyet ortaya çıkarmamaktadır. Rüzgar enerjisi ile çalışan sistemlerde istenilen en büyük güç değeri, rüzgar tribünlerinin üretebileceği en yüksek güç değerine eşittir ve çalışmada $w_r = 40$ MW alınmıştır [15].

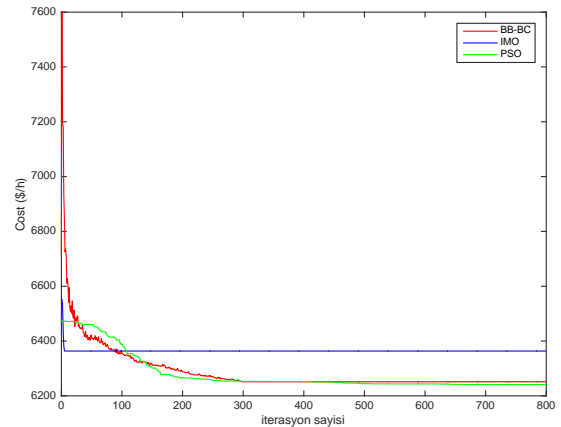
Algoritmaların çözümleri, 4GB DDR3 hafızaya sahip, i5 3.1 GHz işlemcili bilgisayarlar kullanılarak MATLAB ortamında yazılan programlarla yapılmıştır. Problem her üç algoritmaya 100'er kez olmak şartı ile uygulanıp, en iyi sonuçlar baz alınarak üç farklı toplam yük (400 MW, 450 MW, 500 MW) değeri için incelenmiştir. Ayrıca tüm algoritmalar için popülasyon sayısı 100 ve adım sayısı 1000 alınmıştır. 400 ve 450 MW için maliyet fonksiyonu verilerinde 300.üncü adımdan sonra değişim yaşanmadığından, grafiklerde 300.ncü adıma kadar olan veriler görülmektedir. 500 MW için ise değişim yaşanmadığı adım değeri 800'dür. Şekil-3'de 400 MW, Şekil-4'de 450 MW, Şekil-5'de ise 500 MW yük değerleri için, 3 farklı optimizasyon algoritması kullanılarak her bir adımda bulunan maliyet değerlerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 3. 400 MW yük değerinde elde edilen maliyet Değerleri (Cost values of three methods at 400 MW load)



Şekil 4. 450 MW yük değerinde elde edilen maliyet Değerleri (Cost values of three methods at 450 MW load)



Şekil 5. 500 MW yük değerinde elde edilen maliyet Değerleri (Cost values of three methods at 500 MW load)

Çizelge-2 (400 MW yük için), Çizelge-3 (450 MW yük için) ve Çizelge-4'de (500 MW yük için) en iyi maliyet değeri için, her bir generatörün sisteme aktarması gereken aktif güç değerleri verilmektedir. Çizelgelerden

görülebileceği gibi BB-BC ve PSO algoritmaları generatör güçleri için birbirine göre nispeten yakın sonuçlar üretmesine rağmen, IMO algoritması diğer iki algoritmadan farklı değerler üretmektedir.

Çizelge 2. 400 MW Yük Değeri İçin En İyi Güç

Dağılımları (Best Results of Three Methods for 400 MW Load)

| Gen (MW) | BB-BC | PSO | IMO |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| PG1 | 89.23 | 89.08 | 116.66 |
| PG2 | 231.37 | 231.68 | 217.42 |
| PG3 | 39.40 | 39.24 | 30.18 |
| PG4 | 40.00 | 40.00 | 35.74 |
| Toplam | 400.00 | 400.00 | 400.00 |

Çizelge 3. 450 MW Yük Değeri İçin En İyi Güç

Dağılımları (Best Results of Three Methods for 450 MW Load)

| Gen (MW) | BB-BC | PSO | IMO |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| PG1 | 124.44 | 125.88 | 143.80 |
| PG2 | 246.3 | 244.80 | 234.85 |
| PG3 | 39.26 | 39.33 | 37.31 |
| PG4 | 40.00 | 39.99 | 34.04 |
| Toplam | 450.00 | 450.00 | 450.00 |

Çizelge 4. 500 MW Yük Değeri İçin En İyi Güç

Dağılımları (Best Results of Three Methods for 500 MW Load)

| Gen (MW) | BB-BC | PSO | IMO |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| PG1 | 170.69 | 170.00 | 215.13 |
| PG2 | 249.95 | 250.00 | 209.66 |
| PG3 | 39.36 | 40.00 | 37.57 |
| PG4 | 40.00 | 40.00 | 37.64 |
| Toplam | 500.00 | 500.00 | 500.00 |

Çizelge-5’de her bir algoritma için elde edilen maliyet değerleri görülmektedir. Bu verilerden görüleceği üzere, BB-BC algoritması ile PSO algoritması minimuma yaklaşma açısından benzer performans içerisinde olup, çok az farkla PSO algoritması BB-BC algoritmasını geride bırakmayı başarmıştır. Elde edilen veriler ışığında PSO ve BB-BC algoritmaları bu özel örneğin maliyet fonksiyonunu için sonucu, IMO algoritmasına göre daha başarılı bir şekilde çözmüştür.

Çizelge 5. 3 Farklı Yük İçin Optimum Maliyet Değerleri (Optimal Cost Values for 3 Different Loads)

| Yöntem | BB-BC | PSO* | IMO |
|--------------------|---------|---------|---------|
| İterasyon sayısı | 1000 | 1000 | 1000 |
| Popülasyon sayısı | 100 | 100 | 100 |
| 400 MW için (\$/h) | 4742.30 | 4742.07 | 4805.20 |
| 450 MW için (\$/h) | 5466.39 | 5467.03 | 5514.81 |
| 500 MW için (\$/h) | 6246.73 | 6241.47 | 6363.42 |

‘*’ En başarılı yöntem

Çizelge-6’da, adım sayısını tamamlamak için gereken ortalama süre açısından algoritmalar karşılaştırılmış ve BB-BC algoritmasının, PSO ve IMO algoritmalarına göre daha hızlı sonuca ulaştığı gözlenmiştir.

Çizelge 6. Algoritmaların Ortalama Çalışma Süreleri (Run-Times of Three Methods)

| Yöntem | Programın çalışma süresi (sn) | | |
|--------|-------------------------------|--------|--------|
| | 400 MW | 450 MW | 500 MW |
| BB-BC* | 115.02 | 116.02 | 116.31 |
| PSO | 180.89 | 181.96 | 182.20 |
| IMO | 226.94 | 228.82 | 227.60 |

‘*’ En başarılı yöntem

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, rüzgar ve termik santrallerden oluşan örnek sistem üzerinde, enerji üretim maliyetine minimize etmeye amaçlayan ekonomik güç dağılım problemi için, ikisi (IMO ve BB-BC) yeni olmak üzere üç adet (IMO, BB-BC ve PSO) güncel algoritmanın performansı incelenmiştir. Elde edilen veriler ışığında BB-BC ve PSO algoritmaları başarılı bir performans sergilemiştir. Bulunan minimum maliyet değerleri açısından BB-BC ve PSO algoritmaları birbirine çok yakın değerlerde olup, süre bakımından BB-BC algoritması PSO algoritmasına göre 1 dakikadan daha az sürede algoritmayı tamamlayıp sonuca ulaşmıştır. Eğer büyük ve karmaşık bir problem üzerinde çalışılacaksa BB-BC algoritması, bulunduğu optimum sonuçlar ve minimum çalışma zamanı avantajı ile PSO algoritmasının bir adım ötesine geçebilir. BB-BC algoritmasının ilk fazında yaptığı sınırlı çözüm uzayı üzerindeki patlamalar nedeniyle büyük sıçramalar gözlenmiştir. Bunun nedeni sürekli değişen ağırlık merkezidir. Belli bir adım sonrasında BB-BC algoritmasının sıçramaları çok azalmış ve sınırlanmıştır. PSO ve IMO algoritmaları en iyi değerleri hep içerisinde tuttuğu için sıçrama yapmamış, direk olarak düşüşe geçmişlerdir. Problemin daha büyük boyuttaki sistemler üzerinde uygulanması ve algoritmalarda yapılacak iyileştirmeler ile, rüzgar santrallerinin yoğunlukla dahil olmaya başladığı enerji üretim pazarının, maliyet değeri açısından karşılaştırılmasında önemli kazanımlar elde edebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Xia X., Eliaw A.M. “Optimal Dynamic Economic Dispatch of Generation: A Review”, *Electric Power System Research*, 80: 975–986, (2010)
- [2] Gaing Z.L. “Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 18: 1187–1195, (2003)
- [3] Tran C.D., Dao T.T., Vo V.S., Nguyen T.T. “Economic Load Dispatch with Multiple Fuel Options and Valve

- Point Effect Using Cuckoo Search Algorithm with Different Distributions”, *International Journal of Hybrid Information Technology*, 8: 305–316, (2015)
- [4] Chen C.-L. “Optimal Wind-Thermal Generating Unit Commitment”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23: 273–280, (2008)
- [5] Patel M. “Wind and Solar Power Systems”, *CRC PRESS*, New York, (1999)
- [6] Özgönenel O., Thomas D.W.P., “Short-term Wind Speed Estimation on Weather Data”, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 20, 3 :335-346, (2012)
- [7] Arslan T., Bulut Y.M., Yavuz A.A., “Comperative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40: 820-825, (2014).
- [8] Mert İ., Karakuş C., A., “Statistical Analysis of Wind Speed Data Using Burr, Generalized Gamma, and Weibull Distributions in Antakya, Turkey”, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 23: 1571-1586, (2015).
- [9] Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği,
<http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/03/20150328-7.htm>, Erişim Tarihi: 13.11.2015.
- [10] Hetzer J., Yu D.C., Bhattarai K. “An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23: 603–611, (2008)
- [11] YANG X.-S. “Nature-inspired metaheuristic algorithms”, *Luniver Press*, Frome, UK, (2010)
- [12] Peng C., Sun H., Guo J., Liu G. “Dynamic economic dispatch for wind-thermal power system using a novel bi-population chaotic differential evolution algorithm”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 42: 119–126, (2012)
- [13] Saadat H. “Power System Analysis”, *PSA Pub.*, New York, (2010)
- [14] Victoire T.A.A., Jeyakumar a. E. “Reserve constrained dynamic dispatch of units with valve-point effects”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 20: 1273–1282, (2005)
- [15] Abuella M. “Particle Swarm for Optimal Power Flow Including Wind-Power”, *LAP LAMBERT Pub.*, Germany, (2012)
- [16] Erol O.K., Eksin I. “A new optimization method: Big Bang-Big Crunch”, *Advances in Engineering Software*, 37: 106–111, (2006)
- [17] Tabrizian Z., Afshari E., Amiri G.G., Ali Beigy M.H., Nejad S.M.P. “A new damage detection method: Big Bang-Big Crunch (BB-BC) algorithm”, *Shock and Vibration*, 20: 633–648, (2013)
- [18] Camp C. V “Design of Space Trusses Using Big Bang–Big Crunch Optimization”, *Journal Of Sturactural Engineering*, 133: 999–1008, (2007)
- [19] Kennedy J., Eberhart R. “Swarm intelligence”, *Morgan Kaufmann*, San Francisco, (2001)
- [20] Silberberg M.S. “Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change”, *McGraw-Hill*, New York, (2007)
- [21] Javidy B., Hatamlou A., Mirjalili S. “Ions motion algorithm for solving optimization problems”, *Applied Soft Computing*, 32: 72–79, (2015)
- [22] Weber J.D. “Implementaiont of a Newton based Optimal Power Flow into a a Power System Simulation Environment”, *MSc Thesis*, University Of Illinois, Electrical Engineering, (1997)