



Filled fonksiyon kullanarak vana etkili ekonomik yük dağıtım problemi nin çözülmesi

İbrahim Eke^{1*}, Süleyman Sungur Tezcan², Coşkun Çelik³

¹Kırıkkale Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

³Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Tübitak Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, 06800, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Ekonomik yük dağıtım problemi nin filled fonksiyonu metodu ile çözülmesi
- Vana etkili ekonomik yük dağıtımında problemi nin analizi
- Ekonomik yük dağıtımında problemde iletim hattı kayıplarının ilave edilmesi

Makale Bilgileri

Geliş: 14.03.2016

Kabul: 20.07.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.322167

Anahtar Kelimeler:

Ekonomik yük dağıtım,
filled fonksiyonu,
vana noktası etkisi

ÖZET

Bu makalede, ekonomik yük dağıtım problemi ne filled fonksiyonu metodu uygulanmıştır. Vana etkisi gibi doğrusal olmayan durumlar içeren ekonomik yük dağıtım problemi nin çözümünde önerilen methodun başarısı gösterilmiştir. Eşitlik ve eşitsizlik içeren üç farklı test durumunda, önerilen metot test edilerek doğrulanmıştır. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre; filled fonksiyon metodu, parametrelerin ilk değerlerine daha az bağlıdır ve geliştirilen diğer algoritmalara göre daha verimli çalışmaktadır. Bunlara ilaveten, büyük güç sistemlerinde önerilen algoritmanın kolaylıkla uygulanabileceği öngörülmektedir.

Solving economic load dispatch problem with valve-point effects using filled function

H I G H L I G H T S

- Solving the economic load dispatch problem with using filled function method
- The analysis of the economic load dispatch problem with valve-point effect
- Addition of transmission line losses in the economic load dispatch problem

Article Info

Received: 14.03.2016

Accepted: 20.07.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.322167

Keywords:

Economic load dispatch,
filled function,
valf point effect

ABSTRACT

This paper presents a filled function method to solve economic load dispatch (ELD) of the thermal unit. The proposed method can take care of ELD considering nonlinearity such as valve point loading. The effectiveness of the proposed algorithm has been verified on three different test systems with equality and inequality constraint. Simulation results show that the filled function method is less sensitive to initial values of parameters and is more effective than other previously developed algorithms. In addition, the proposed algorithm is highly promising for the large-scale system.

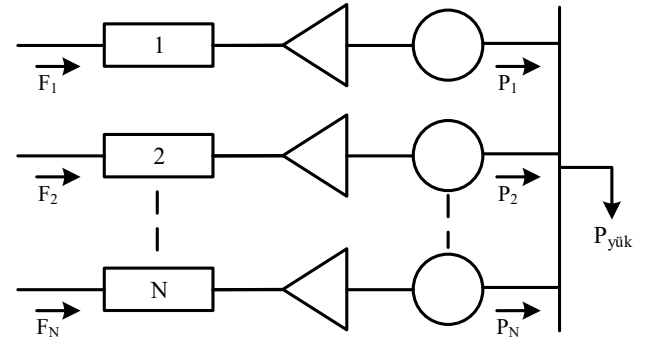
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç santrallerinden, santrallerin limitleri dâhilinde minimum maliyet ile talep edilen gücün karşılanması için hangi santralden ne kadar güç alınacağına belirlenmesine ekonomik yük dağıtımı denir [1]. Farklı kısıtlar altında ekonomik yük dağıtımı problemi literatürde çözülmüştür [2,3]. Güç santrallerinin yük merkezlerine olan uzaklıkları ve yakıt maliyetlerinin farklı olması nedeniyle toplam maliyetleri aynı değildir. Minimum maliyetin elde edilmesi için yakıt maliyetlerinin yanında iletim hattı kayıpları da dikkate alınmalıdır, bu yüzden amaç fonksiyonu olan toplam maliyetin minimuma indirilmesi gerekmektedir [4]. Literatürde, amaç fonksiyonunu minimuma indirmek için ilk başlarda lambda iterasyon, gradient metotlar gibi matematiksel metotlar kullanılmıştır [5]. Bu metotların dezavantajı, sistem büyüdüğüde hesaplama süresinin de artmasıdır. Bu dezavantajı gidermek için lineer programlama tekniği kullanılmıştır. Ünite sayısının artması ve adım aralığının azalmasıyla beraber hesaplama süresini yine artmaktadır. Yapay sinir ağları hem ekonomik yük dağıtımı probleminin çözümünde [6,7] hem de enerji problemlerinin çözümünde [8] kullanılmıştır. Bu metotta öğrenme ve momentum oranlarının doğru seçilememesi ile iterasyon sayısının artışı çözüm süresinin uzamasına neden olduğu, ekonomik yük dağıtımı [9], dinamik programlama [10] ve harmonik analiz [11] gibi konularda gözlenmiştir. Global optimizasyon tekniklerinden genetik algoritma, büyük boyutlardaki güç sistemlerinde ekonomik yük dağıtımı [12], röle koordinasyonu [13] ve enerji nakil hattı güzergah tespitinde [14] kullanılmıştır fakat bu tekniğin dezavantajı, çaprazlama ve mutasyon ile en iyi birey bulunmaya çalışılsa da elde edilenin sonucun en iyi sonuç olduğunun garantisinin olmamasıdır. Ayrıca genetik algoritma da birçok parametrenin ayarlanması gerekmektedir [15]. Sezgisel algoritmalar; evrimsel programlama (EP) [16], parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) [17], karınca koloni arama algoritması (ACSA) [18] ve tabu arama algoritması (TSA) [19] ekonomik yük dağıtımı problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Kullanıcının tanımladığı faktörlere bağlı olarak çözümün kalitesi değişmekte olduğundan bu faktörlerin yanlış seçilmesi çözüm süresinin uzamasına yol açmaktadır. Filled fonksiyon metodu (FFM), kısıtlanmış koşullu amaç fonksiyonlarının global minimum noktasını bulmak için önerilmiş deterministik bir yöntemdir [20]. FFM'deki temel amaç, bilinen bir optimizasyon algoritmasıyla problemin herhangi bir lokal minimum noktasını bulmak ve daha sonra bu noktaya göre tanımlanacak bir filled fonksiyon sayesinde bu lokal minimum noktasından kaçarak daha düşük değerli bir lokal minimum bulmaktır. Yöntem, bu işlemi belirli bir sayıda tekrar ederek problemin global minimum noktasına ulaşmayı amaçlar. [21] çok değişkenli maliyet fonksiyonlarının global minimum noktasını bulmak için önerilen ilk filled fonksiyonlardan biridir. [22]'de analitik yönden geliştirilmiş filled fonksiyonlar önerilmiştir. [24]'de global konveks filled fonksiyon kullanarak yöntemin başarısı artırılmıştır.

Literatürdeki bazı çalışmalarda belirli problem alanlarında (kesikli fonksiyon [23] veya lineer olmayan tamsayı programlama [25] gibi) yöntemin etkinliğini artırmayı amaçlamaktadır. Bu makalenin amacı, jeneratörlerin limitlerini dikkate alarak yeni bir metot olan filled fonksiyon metodunu, ekonomik yük dağıtımı problemine - vana etkili ve vana etkisiz olarak- uygulamaktır. Literatürde bu konuya daha önce hiç uygulanmamış bir metodun uygulanması ile sadece daha iyi çözüm bulunmamakta aynı zamanda hesaplama süresi fark edilir şekilde kısalmaktadır. Ayrıca, önerilen yöntem matematiksel hesaplamaya dayandığından, sezgisel algoritmalarda rastlanan rastgele sonuç bulma sorunu, önerilen yöntemde görülmemekte olup her çalıştırmada aynı sonucu bulmakta ve böylelikle sonuç kesin olarak hesaplanmaktadır.

2. EKONOMİK YÜK DAĞITIMI (ECONOMIC LOAD DISPATCH)

Giderek artan elektrik enerjisi talebini karşılamak için; ileriye dönük işletme planlaması olan ekonomik yük ve reaktif güç dağıtımı gibi planların, sistemin bütün kısıtlarını karşılayacak şekilde önceden yapılarak, enerji üretim ve işletme maliyetinin minimum seviyeye indirilmesi gerekmektedir. Ekonomik yük dağıtımının temel amacı; sistemden talep edilen gücün, jeneratörlerin çalışma sınırları gibi çeşitli eşitlikler ve eşitsizlikler içinde minimum maliyetle karşılanmasının planlanmasıdır. Şekil 1'de, tek bir baraya bağlanan N tane üretim biriminin girişleri, üretim birimlerinin maliyet oranı olan F_i ile çıkışları ise üretilen enerji miktarı olan P_i ile gösterilmektedir. Sistemin toplam maliyet oranı, üretim birimlerinin maliyetlerinin toplamına eşittir ve işletme sınırlaması olan çıkış gücünün talep gücüne eşit olması karşılanmalıdır. Eş. 1'de gösterildiği gibi, jeneratörlerin yakıt maliyetleri üretilen enerji miktarlarının ikinci dereceden fonksiyonudur.



Şekil 1. N tane üretim ünitesinin $P_{yük}$ yükünü sağlaması (Driving the load, $P_{yük}$ with N generation units)

$$F_i = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (1)$$

Burada; a_i , b_i , c_i ile i . jeneratörün maliyet katsayıları ve P_i ile ürettiği aktif güç gösterilmektedir. Eş. 2'de gösterildiği

gibi, hedef fonksiyonu F_T , maliyetler toplamına eşittir. Problemin amacı, hedef fonksiyonunu minimize etmektir. İlk durumda, iletim hattı kayıpları veya işletim limitleri ihmal edilmiştir [5].

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_N = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (2)$$

Eş. 3'de gösterildiği gibi, sınırlama fonksiyonu; yük tarafından talep edilen güç ile üretilen güçler toplamının farkıdır ve sıfır olmalıdır [5].

$$\Phi = P_{yük} - \sum_{i=1}^N P_i = 0 \quad (3)$$

Bu problem, Lagrange fonksiyonu barındırmaktadır. Eş. 4'de sınırlama fonksiyonunun, bir çarpan ile çarpıp, hedef fonksiyonuna eklenmesi gösterilmiştir [5].

$$\mathcal{L} = F_T + \lambda \Phi \quad (4)$$

Hedef fonksiyonun uç değeri için gerekli şartları bulmak için, her bir bağımsız değişkene göre Lagrange fonksiyonunun birinci türevleri alınıp sıfıra eşitlenmelidir. N tanesi güç çıkışının değeri ve bir tanesi belirsiz Lagrange çarpanı λ olmak üzere toplam $N+1$ değişken vardır. Eş. 5'de gösterildiği gibi, güç çıkış değerlerine göre kısmi türev alınarak sonuca gidilir [5].

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda = 0 \quad (5)$$

Eş. 6'da verildiği gibi üretilen güçler toplamı ile talep edilen güçler toplamının eşit olması şartının yanında iki tane daha ek şart vardır. Bunlar Eş. 7'de gösterildiği gibi her bir biriminin gücünün, izin verilen minimum güce eşit veya büyük olması ve her bir biriminin gücünün, izin verilen maksimum güce eşit veya küçük olmasıdır [5].

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_{yük} \quad (6)$$

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (7)$$

Her bir biriminin gücü, minimum güç maksimum güç aralığında ise Eş. 8, maksimum güce eşit ise Eş. 9 ve minimum güce eşit ise Eş. 10'da gösterildiği gibi daha ayrıntılı yazılabilir [5].

$$P_{i,min} < P_i < P_{i,max} \quad \text{için} \quad \frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \quad (8)$$

$$P_i = P_{i,max} \quad \text{için} \quad \frac{dF_i}{dP_i} \leq \lambda \quad (9)$$

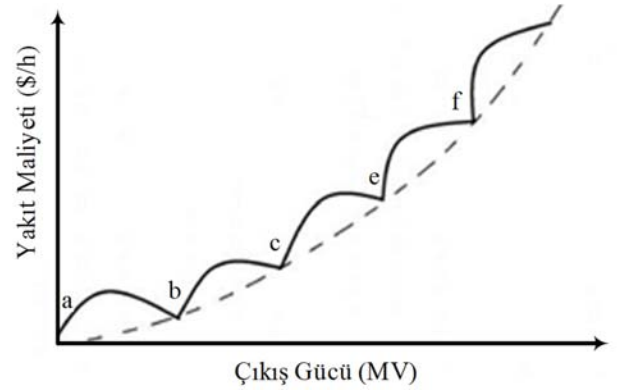
$$P_i = P_{i,min} \quad \text{için} \quad \frac{dF_i}{dP_i} \geq \lambda \quad (10)$$

2.1. Ekonomik Yük Dağıtımında Vana Etkisi (Valve-point Effects in Economic Load Dispatch)

Ünitelerin devreye girip çıkmalarında vanalar açma veya kapama yaparak sistemi etkilemektedir, vana etkisi denen bu etkinin hesaba katılması ile Şekil 2'den görüldüğü gibi yakıt maliyeti açısından daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. Gerçek hayatta, yakıt miktarı değişimine ve vana etkilerinden dolayı türevlenemeyen noktalara sahip olan ekonomik yük dağıtım probleminin amaç fonksiyonunu, konveks olmayan maliyet fonksiyonu ile ifade etmek gerekmektedir. Eş. 11'de Maliyet fonksiyonuna, sinüzoidal fonksiyonların eklenmesi ile vana etkisi hesaba katılır.

$$F_j = a_j + b_j P_j + c_j P_j^2 + |d_j \sin(e_j (P_j^{min} - P_j))| \quad (11)$$

e_j ve f_j j. ünitenin vana etkisini gösteren yakıt maliyeti katsayılarıdır. Vanaların açılıp kapılmasının etkisi, sinüzoidal bir terimin Eş.1'e eklenmesi ile ifade edilmektedir.



Şekil 2. Üretim biriminin giriş-çıkış karakteristiği, kesikli çizgi: vana etkili, düz çizgi: vana etkisiz
(Input-Output characteristics of a generation unit, dashed: with valve effect, straight: without valve effect)

2.2. Ekonomik Yük Dağıtımında İletim Hattı Kayıpları (Transmission Line Losses in Economic Load Dispatch)

Bir güç sisteminde ekonomik dağıtım yapılırken, dikkat edilmesi gereken en önemli kısıtlayıcı faktör, Eş. 12'de verildiği gibi, sistemde üretilen toplam gücün, sistemden talep edilen toplam güce eşit olması durumudur. Bu durum hesaplanırken, iletim esnasında oluşan hat kayıpları göz önünde tutulmalıdır [4].

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_d + P_{loss} \quad (12)$$

Sistemdeki toplam iletim kayıpları Eş. 13'deki şekilde ifade edilir [4]:

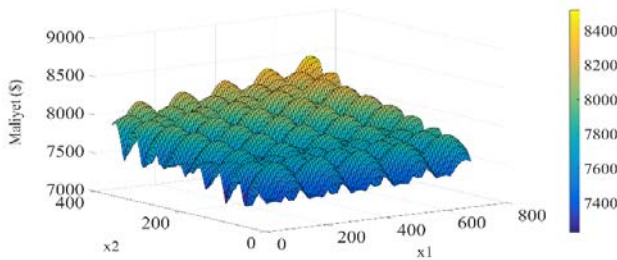
$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^N B_{0i} P_i + B_{00} \quad (13)$$

Burada;

P_d ;	Sistemden talep edilen toplam güç;
P_{loss} ;	iletim esnasında oluşan kayıplar;
P_i ;	i 'inci jeneratörün çıkış gücü;
P_j ;	j 'inci jeneratörün çıkış gücü;
B_{ij} ;	kayıp katsayısı.

3. FİLLED FONKSİYON METODU (THE FILLED FUNCTION METHOD)

Mühendislik alanında karşılaşılan bir çok optimizasyon problemi lineer değildir ve birden çok yerel minimum içerir. Bu durumsa, bütün yerel minimum noktalar arasındaki en iyi çözümün bulunmasını yani global optimizasyon problemini doğurur. Bir global optimizasyon metodunun başarısı çözüm uzayı taranırken karşılaşılan yerel minimum noktalarına takılmamasına ve eğer varsa daha iyi bir yerel minimum noktasını bulabilmesine bağlıdır. Literatürde karşılaşılan global optimizasyon metodları genel olarak iki kategoriye ayrılabilir. Bunlardan birincisi olan deterministik yöntemler; global optimum çözümün bulunmasını garanti ederler, ancak yüksek çalışma süreleri nedeniyle sadece küçük ölçekli problemlerde etkin bir biçimde uygulanabilirler. Dal ve sınır yöntemi [26], Lagrangian basitleştirmesi [27], dinamik programlama [28] bu tür metotlara örnek olarak verilebilir. Yine deterministik global optimizasyon yöntemlerine örnek olarak verebileceğimiz; Filled fonksiyon metodu [20, 29], Tunneling ve Basın-hopping [30] yöntemleri yardımcı bir fonksiyon kullanarak çözüm uzayında karşılaşılan bir yerel minimum noktasından kaçma stratejisi üzerine kurulmuşlardır. İkinci grup global optimizasyon metodu ise probalistik veya olasılığa dayalı yöntemlerdir. Bu yöntemler, gerçek çözümün gerekli olmadığı ya da polinomsal zamanda çözülemediği durumlarda, kabul edilebilir bir çözümün bulunması için kullanılır. Benzetimli tavlama, genetik algoritmalar ve tabu arama bu tür yöntemlere örneklerdir. Global optimizasyon yöntemlerinin detaylı bir analizi bu çalışmanın kapsamı dışında olduğundan, bu bölümde sadece ekonomik yük dağılımı probleminin çözümü için seçilen yöntem olan Filled fonksiyon metodu üzerinde durulacaktır. Şekil 3'de üç üniteli ve vana etkili dağıtım sistemi için maliyet fonksiyonunun grafiği verilmiştir. 3 ünitenin üreteceği toplam güç değeri sabit olduğundan iki ünitenin değişiminin izlenmesi yeterlidir.



Şekil 3. Üç üniteli vana etkili dağıtım sistemi için maliyet fonksiyonunun değişimi

(Variations of the cost function for a three units distribution system with valve-point effect)

Grafikte de görüldüğü üzere ekonomik yük dağıtım problemi çok noktalı bir optimizasyon problemidir. Yani problemin çözüm uzayında pek çok lokal minimum noktası bulunmaktadır. Filled fonksiyon metodu çözümü ararken karşılaştığı lokal minimum noktalarından kaçarak global minimum noktasına ulaşmayı amaçlamaktadır.

3.1. Tanım (Definition)

Filled fonksiyon metodu (FFM) ilk olarak 1990'da Renpu Ge tarafından sürekli global optimizasyon problemlerinin çözümü için önerilmiştir [20]. FFM çok noktalı optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılabilir bir yöntemdir. R_n de tanımlı bir f fonksiyonunun optimum noktasının bu yöntemle bulunabilmesi için fonksiyonun aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekmektedir:

1. f fonksiyonu sürekli türevlenebilir olmalıdır.
2. f fonksiyonunun sonlu sayıda lokal minimumu olmalıdır.
3. X^* 'in mutlak değeri sonsuza giderken $f(X^*)$ 'de sonsuza gitmelidir.

Tekrarlı bir yöntem olan filled fonksiyonun her bir iterasyonu 2 fazdan oluşur. İlk fazda herhangi bir başlangıç noktasından başlanarak geleneksel optimizasyon yöntemlerinden biriyle bir yerel minimum noktası bulunur. Daha sonra, ikinci fazda, bu yerel minimum noktası kullanılarak filled fonksiyon adı verilen bir yardımcı fonksiyon oluşturulur. Buradaki önemli nokta, asıl fonksiyonun yerel minimumu olan noktanın burada tanımlanan filled fonksiyonun yerel maksimumu olmasıdır. Genel olarak ikinci faz, filled fonksiyonun minimize edilmesi işidir. Bu sayede mevcut yerel minimum noktasından uzaklaşarak, eğer varsa, daha küçük bir yerel minimumun bulunması hedeflenir. İkinci fazın sonunda bulunan nokta bir sonraki iterasyonun başlangıç noktası olarak kabul edilir ve bu işlem, daha iyi bir yerel minimum bulunamayana kadar, tekrarlı olarak devam eder. Son adımda bulunan yerel minimum problemin global çözümü olarak kabul edilir. $P(X)$ filled fonksiyonu matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [22]

Tanım 1. Bir B_1 bağlı bölgesindeki tüm noktaların en dik iniş izdüşümleri (steepest descent trajectory) X_1 'e yakınsıyorsa B_1 bölgesine $f(x)$ 'in X_1 lokal minimumundaki yuvası denir.

Tanım 2. $-f(X)$ 'in X_1 lokal minimumundaki yuvasına $f(X)$ 'in X_1 lokal maksimumundaki tepesi denir.

Tanım 3. $f(X)$ fonksiyonunun X_1 ve X_2 lokal minimumları için, eğer $f(X_2) > f(X_1)$ ise X_2 lokal minimumu, X_1 lokal minimumundan büyüktür denir. Bu durumda B_2 yuvası B_1 yuvasından daha yüksektir.

Tanım 4. Aşağıdaki şartları sağlayan herhangi bir $P(X)$ fonksiyonu, $F(X)$ 'in X_1 noktasındaki filled fonksiyonu olarak kullanılabilir;

1. X_1 , $P(X)$ 'in bir lokal maksimumuysa ve B_1 yuvası, $P(X)$ 'in bir tepesinin bir parçasıysa,
2. $P(X)$ 'in hiçbir B_h 'de durağan (stationary) noktası yoksa, (B_h , B_1 'den daha yüksek tüm yuvalardır.)
3. Herhangi bir B_1 'de $P(X)$ 'i minimum yapan bir X^* noktası varsa. (B_1 , (eğer varsa) B_1 'den daha düşük tüm yuvalardır.)

3.2. Literatürde Kullanılan Filled Fonksiyonlar (Filled Functions in the Literature)

FFM sürekli olarak gelişen bir yöntemdir. Algoritmada kullanılan filled fonksiyonu geliştirilerek yöntemin hızı, verimliliği veya belirli problemlerdeki performansı geliştirilebilir. Eş. 14'de gösterildiği gibi, ilk olarak önerilen filled fonksiyonu [20]'de sunulan P fonksiyonudur;

$$P(X) = \frac{\exp\left(-\frac{\|X - X_1\|^2}{p^2}\right)}{r + f(X)} \quad (14)$$

Yukarıdaki fonksiyon X_1 lokal minimum noktasına ve orijinal $f(X)$ fonksiyonuna bağlı olarak türetilmiştir. Bu fonksiyonun sakıncası iki ayrı ayarlanabilir parametre (p ve r parametreleri) ve üssel fonksiyon (\exp) içermesidir. Tek parametre içeren fonksiyonların en sık kullanılması Eş. 15'de gösterildiği gibi, Q fonksiyonudur [20].

$$Q(X, A) = -[f(X) - f(X_1^*)] \exp\left[-A\|X - X_1^*\|^2\right] \quad (15)$$

Burada, algoritmanın çalışması sırasındaki tek parametre A 'dır. (p parametresi pozitif bir tamsayıdır.) Bu fonksiyonun zayıf tarafı ise içerdiği üssel terimdir. Özellikle a parametresinin yüksek değerleri için üssel terimin nümerik hesaplanması mümkün olmamaktadır. Literatürde önerilmiş olan bir diğer filled fonksiyon ise bu çalışma kapsamında da kullanılan G fonksiyonudur [23]. Bu fonksiyon çift parametreliliğine rağmen üssel terim içermediği için nümerik hesap bakımından daha kolaydır. Öte yandan, günümüzde bilgisayarların işlem gücünün yüksek olması filled fonksiyonda çift değişken parametre olmasını nümerik hesaplama açısından bir dezavantaj olmaktan çıkarmıştır. G fonksiyonunun genel formu Eş. 16'da gösterildiği gibidir.

$$G_{\mu, p, X_1}(X) = A_{\mu}(f(X) - f(X_1)) - p\|X - X_1\| \quad (16)$$

Burada $p > 0$ ve $0 < \mu < 1$ ayarlanabilir parametrelerdir. $A_{\mu}(y) = yV_{\mu}(y)$ şeklinde tanımlanır. Buradaki $V_{\mu}(y)$ fonksiyonunun $y < 0$ için azalan, $y \geq 1$ için artan olması gerekmektedir. Ayrıca $V_{\mu}(-\tau) = 1$, $V_{\mu}(0) = \mu$ ve $V_{\mu}(y) \geq c\mu$ şartlarını sağlamalıdır. ($\tau > 0$ yeterince küçük bir sayı ve $0 < c < 1$ bir sabittir).

Bu çalışmada kullanılan $V_{\mu}(y)$ fonksiyonu Eş. 17'de gösterildiği şekildedir.

$$V_{\mu}(y) = \mu \left[(1 - c) \left(\frac{1 - c\mu}{\mu - c\mu} \right)^{-y/\tau} + c \right] \quad (17)$$

Seçilen fonksiyonun yukarıda belirtilen şartları sağladığı kontrol edilebilir.

3.3. Algoritma (The Algorithm)

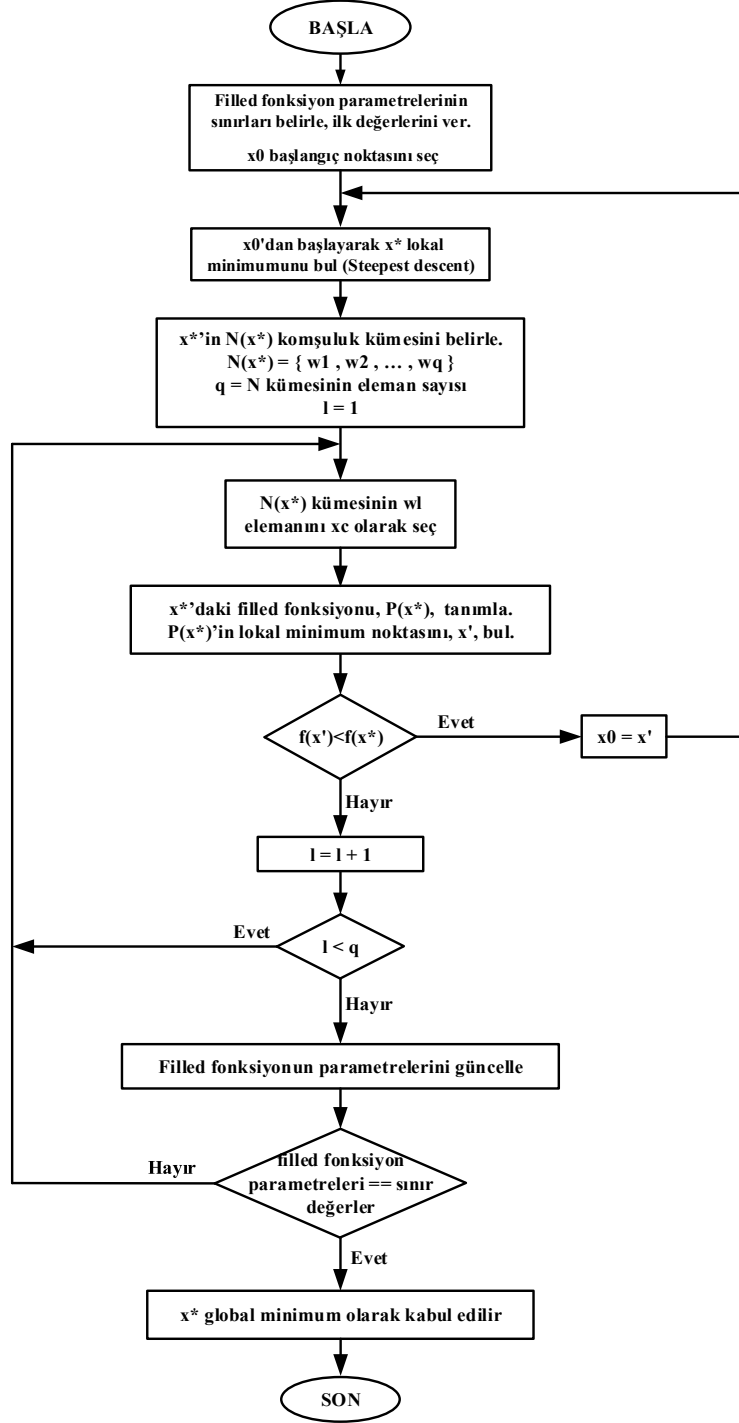
Ekonomik yük dağıtım probleminin FFM ile çözülmesi için geliştirilen algoritma aşağıda sunulmuştur. Algoritmanın sadeleştirilmiş akış diyagramı Şekil 4'de verilmiştir.

1. Başlangıç
 - Filled fonksiyonun tanımındaki parametreler için sınırları belirle
 - Parametrelere ilk değerlerini ver ve artış/azalış stratejilerini belirle
 - Bir x_0 başlangıç noktası seç.
2. Orijinal fonksiyonda lokal minimum nokta araması
 - En dik iniş (steepest descent) algoritması kullanarak x_0 noktasından başlayarak $f(x)$ 'in x^* lokal minimumunu bul
3. Komşuluk araması
 - x^{**} 'in $N(x^*)$ komşuluk kümesini tanımla. $N(x^*) = \{w_1, w_2, \dots, w_q\}$ burada q toplam komşu sayısıdır ve $q < 2n$. (n , aramanın yapıldığı uzayın boyut sayısıdır). $l = 1$ yap.
 - Şimdiki nokta x_c 'yi w_l olarak tanımla.
4. Filled fonksiyonda lokal arama
 - x^{**} 'daki filled fonksiyon, $P(x^*)$, tanımlanır.
 - En dik iniş algoritması kullanarak x_c noktasından başlayarak $P(x^*)$ 'in lokal minimum noktası, x' , bulunur.
5. x' noktasının incelenmesi
 - Eğer $f(x') < f(x^*)$ ise $x_0 = x'$ ataması yap ve 2. adıma git.
6. Diğer arama yönlerinin incelenmesi
 - l 'yi 1 artır.
 - Eğer $l < q$ ise 3b adımına dön
 - Değilse Filled fonksiyonun parametrelerini güncelle, 3a adımına dön.
 - Filled fonksiyon parametreleri 1. adımda tanımlanan sınır değerlere gelirse x^{**} 'in o anki değeri global minimum olarak kabul edilir ve program sonlandırılır.

4. NÜMERİK ÇALIŞMA (NUMERICAL STUDY)

4.1. Test Durumları (Test Cases)

Ekonomik yük dağıtım probleminin yeni global optimizasyon tekniği olan filled fonksiyon ile çözümü için üç ayrı test sistemi seçilmiştir. İlk sistemde vana etkisi yer almazken, diğer iki sistemde vana etkisi altında ekonomik yük dağıtım probleminin çözümü ele alınmıştır. İkinci test sisteminde diğerlerinden farklı olarak ünitelerin üretebileceği en düşük güç değeri sıfır kabul edilmiştir.



Şekil 4. FFM akış diyagramı (FFM Flow diagram)

FFM'de algoritmayı çalıştırırken seçilen başlangıç noktası çözümün başarısını etkilemektedir. Bu nedenle, hem bu etkiyi gözlemek hem de en doğru çözümü elde edebilmek amacıyla, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm nümerik hesaplamalar farklı başlangıç noktaları seçilerek tekrar edilmiştir. Bu amaçla tüm test durumları, güven aralığı kriterleri göz önünde tutularak, ortalama maliyet fonksiyon değerinin gerçek değer ± 0.1 yakınında olma ihtimali en az %99 olana kadar farklı başlangıç noktalarıyla

tekrar çözülmüştür. Tüm nümerik çözümler, 3,1 GHz, Intel Core i5 işlemcili bir bilgisayarda, Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir.

4.1.1. Birinci test sistemi (First test system)

Birinci test sistemi [4] için maliyet fonksiyonunda vana etkileri dahil edilmemiştir. Maliyet fonksiyonu olarak (1) kullanılmıştır. Tablo 1 ve Tablo 2'de parametreleri verilen

üç üniteli termik santralin ekonomik yük dağıtımını yapılmıştır. Bu test sistemi için talep edilen yük 975 MW'tır.

Tablo 1. Birinci test sistemindeki ünitelerin parametreleri
(Parameters of the units in the first test system)

Ünite	a	b	c
1	500	5,3	0,004
2	400	5,5	0,006
3	200	5,8	0,009

Tablo 2. Birinci test sistemindeki ünitelerin güçlerinin alt ve üst limitleri
(Lower and upper power limits of the units in the first test system)

Ünite	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)
1	200	450
2	150	350
3	100	225

Birinci test sisteminde, başlangıç noktasından bağımsız olarak, algoritmanın her çalıştırılmasında üç ünitenin en uygun çalışma noktaları sırayla 450 MW, 325 MW ve 200 MW (toplam 975 MW) bulunmuştur. Bu değerleri için hesaplanan maliyet fonksiyonu 8236\$ olarak bulunmakta olup bu sonuç [4]'de verilen sonucu sağlamaktadır. Önerilen algoritmanın ekonomik yük dağıtımını probleminde uygulanabilirliği gösterilmiştir. Yapılan nümerik çalışmada vana etkisi maliyet fonksiyonuna katılmadığında çözümün çok hızlı bir şekilde bulunabildiği gözlenmiştir. 3,1 GHz, Intel Core i5 işlemcili bir bilgisayarda tek bir çözümün tamamlanması ortalama 0,45 sn sürmüştür.

4.1.2. İkinci test sistemi (Second test system)

İkinci test sistemi [31] için (11) kullanılarak maliyet fonksiyonunda vana etkileri dahil edilmiştir. Üç üniteli termik santralin parametreleri Tablo 3 ve Tablo 4'de verilmiştir. Bu test sisteminde, 750 MW talep yük miktarı için ekonomik yük dağıtımını problemi çözülmüştür.

Tablo 3. İkinci test sistemindeki ünitelerin parametreleri
(Parameters of the units in the second test system)

Ünite	a	b	c	d	e
1	550	8,1	0,00028	300	0,035
2	309	8,1	0,00056	200	0,042
3	307	8,1	0,00056	200	0,042

Tablo 4. İkinci test sistemindeki ünitelerin güçlerinin alt ve üst limitleri
(Lower and upper power limits of the units in the second test system)

Ünite	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)
1	0	680
2	0	360
3	0	360

İkinci test sisteminde vana etkisi hesaba katılmıştır. Ayrıca diğer sistemlerden farklı olarak ünitelerin en küçük üretim güçleri (P_{min}) 0 olarak alınmıştır. Sonuçlar incelendiğinde

FFM'nin verdiği sonuçların %82'sinde ünite değerleri 449 MW, 150 MW ve 151 MW (toplamda 750 MW) ve maliyet fonksiyon değeri 7340\$ çıkmıştır. Bu sonuçlar, [31]'de belirtilen problemin gerçek çözümünü sağlamaktadır. Diğer sonuçlar ise 7341\$'lık bir maliyet değerine ulaşmıştır. Bu fark, başlangıç noktasının problemin çözümü üzerindeki etkisini göstermektedir. Başka bir deyişle, gerçekleştirilen nümerik çalışmanın %18'inde %0,014'lük bir hata söz konusudur. Aynı hata oranı [31]'de testlerin %9'unda %0,1 olarak belirtilmiş olup Tablo 5'de gösterilmiştir. Buradan hareketle kullandığımız filled fonksiyonun başlangıç noktasından kaynaklanan hataları düşürdüğünü söyleyebiliriz. Öte yandan, vana etkisi eklendiğinde ve çözüm uzayı genişletildiğinde problemin çözümü, özellikleri yukarıda verilen bilgisayarda, ortalama 1,25 sn sürmüştür. Bu değer de algoritmanın hala kabul edilebilir sürelerde çalıştığını göstermektedir.

Tablo 5. Testlerdeki hata oranları ve yüzde hata miktarlarının karşılaştırılması
(Comparison of the error rates of the tests)

	Testlerdeki yüzde hata oranı	Yüzde hata miktarı
Önerilen Filled Algoritması ile [31]	%18	%0,014
	%9	%0,1

4.1.3. Üçüncü test sistemi (Third test system)

Vana etkileri yanı sıra ünite limitleri farklı olan üçüncü test sistemi [31] için ekonomik yük dağıtımını problemi çözülmüştür. Tablo 6 ve Tablo 7'da parametreleri verilen sistem için talep yük 850 MW'tır.

Tablo 6. Üçüncü test sistemindeki ünitelerin parametreleri
(Parameters of the units in the third test system)

Ünite	a	b	c	d	e
1	561	7,92	0,001562	300	0,0315
2	310	7,85	0,00194	200	0,042
3	78	7,97	0,00482	150	0,063

Tablo 7. Üçüncü test sistemindeki ünitelerin güçlerinin alt ve üst limitleri
(Lower and upper power limits of the units in the third test system)

Ünite	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)
1	100	600
2	100	400
3	50	200

Üçüncü test sistemimizde hem vana etkisi eklenmiş hem de ünitelerin minimum güçleri 0'dan daha büyük değerler olarak alınmıştır. Algoritma farklı başlangıç noktaları için çalıştırılmıştır ve bunların tamamında 300 MW, 400 MW ve 150 MW çalışma değerleri ve 8234\$ toplam maliyet değeri hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, [31] sunulan gerçek değerleri tutmaktadır. Dikkat edilecek önemli bir sonuç, algoritmanın başlangıç noktasından bağımsız olarak tüm çalışmalarda gerçek değeri bulabilmiş olmasıdır. Ayrıca

problemin her bir çözümü ortalama 1,1 sn'de tamamlanmıştır. İkinci test sistemiyle kıyaslandığında çözüm uzayının alt sınırdan daraltılmış olmasının yöntemin doğru çözümü daha kısa bir sürede bulmasını sağladığını söyleyebiliriz.

4.1.4. Dördüncü test sistemi (Fourth test system)

Bu test grubu altı üretim ünitesi içeren 26 baralı sistemi ele almaktadır [4]. Tablo 8 ve Tablo 9'de parametreleri verilen altı üniteli termik santralin ekonomik yük dağıtımını hat kayıpları dikkate alınarak yapılmıştır [4]. Hat kayıpları için gerekli olan B, B₀ ve B₀₀ matrisleri [4] nolu referanstan alınmıştır. Bu test sistemi için maliyet fonksiyonu olarak (12) kullanılmış olup talep edilen yük miktarı 1263 MW'tır. Dördüncü test sistemimizde hat kayıpları dikkate alınırken, vana etkisi ihmal edilmiştir. Önerilen filled fonksiyon metodu ile elde edilen sonuçlar, Tablo 10' da literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Talep edilen yük miktarı 1263 MW' a göre her bir ünitenin güç değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, önerilen metod ile en düşük hat kaybı bulunmuştur.

Tablo 8. Dördüncü test sistemindeki ünitelerin parametreleri
(Parameters of the units in the fourth test system)

Ünite	a	b	c
1	240	7	0,0070
2	200	10	0,0095
3	220	8.5	0,0090
4	200	11	0,0090
5	220	10.5	0,0080
6	190	12	0,0075

Tablo 9. Dördüncü test sistemindeki ünitelerin güçlerinin alt ve üst limitleri
(Lower and upper power limits of the units in the fourth test system)

Ünite	P _{min} (MW)	P _{max} (MW)
1	100	500
2	50	200
3	80	300
4	50	150
5	50	200
6	50	120

Tablo 10. Dördüncü test sisteminde önerilen metod ile bulunan sonuçların literatür ile karşılaştırılması
(Comparison of the results of the proposed method against literature for the fourth test system)

	[4]	[32]	Önerilen Filled Fonksiyonu Metodu
Hat Kaybı (kW)	12,807	12,757	12,5974
P1 (MW)	447,69	447,74	447
P2 (MW)	173,19	173,37	183,5
P3 (MW)	263,49	262,79	254,8
P4 (MW)	138,81	138,35	150
P5 (MW)	165,59	166,28	146,5
P6 (MW)	87,03	87,233	93,797

4.1.5. Beşinci test sistemi (Fifth test system)

Bu test grubu altı üretim ünitesi içeren 30 baralı sistemi ele almaktadır [33]. Tablo 11 ve Tablo 12'de parametreleri verilen altı üniteli termik santralin ekonomik yük dağıtımını hat kayıpları dikkate alınarak yapılmıştır [33]. Hat kayıpları için gerekli olan B, B₀ ve B₀₀ matrisleri [33] nolu referanstan alınmıştır. Bu test sistemi için maliyet fonksiyonu olarak (12) kullanılmış olup talep edilen yük miktarı 283,4 MW'tır.

Tablo 11. Beşinci test sistemindeki ünitelerin parametreleri (Parameters of the units in the fifth test system)

Ünite	a	b	c	d	e
1	150,0	2,00	0,0016	50,0	0,0630
2	25,0	2,50	0,0100	40,0	0,0980
3	0,0	1,00	0,0625	0,0	0,0
4	0,0	3,25	0,00834	0,0	0,0
5	0,0	3,00	0,025	0,0	0,0
6	0,0	3,00	0,025	0,0	0,0

Tablo 12. Beşinci test sistemindeki ünitelerin güçlerinin alt ve üst limitleri
(Lower and upper power limits of the units in the fifth test system)

Ünite	P _{min} (MW)	P _{max} (MW)
1	50	200
2	20	80
3	15	50
4	10	35
5	10	30
6	12	40

Beşinci test sistemimizde hem hat kayıpları hem de vana etkisi dikkate alınmıştır. Önerilen filled fonksiyon metodu ile elde edilen sonuçlar, Tablo 13' da literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada da önerilen yöntem, hat kayıplarını dikkate alarak ünitelerin güç değerlerini bulmuştur. Bu sonuçlara göre, önerilen metod ile en düşük hat kaybı bulunmuştur.

4.2. Değerlendirme / Yorum

Gerçekleştirilen nümerik çalışmanın amacı, FFM algoritması ile ekonomik yük dağıtımını çözmeye çalışmak ve böylece önerilen yöntemin başarısını ve verimliliğini ölçmektir. Bunun için literatürde kullanılan 5 farklı test sistemi seçilmiştir. Yapılan hesaplamaların tamamında problemin kısa bir süre içinde çözüldüğü gözlenmiştir. Bu sayede, problemi çok sayıda farklı başlangıç değeriyle çözmek mümkün olabilmektedir. Böylece, hem başlangıç değerinin etkisi gözlemlenebilmiş hem de yöntemin başarısı etkin bir biçimde ölçülebilmektedir. Ayrıca FFM, evrimsel algoritmalarda olduğu gibi rassal değişkenler içermediği için aynı başlangıç değeri için her çalıştırılıştaki aynı çözüm bulunmaktadır. Bu da yöntemin, ekonomik yük dağıtımını veya benzer problemlere uygulanabilirliğini artıran bir özelliğidir. FFM'nin ekonomik yük dağıtımını çözümedeki başarısını değerlendirirsek; test sistemlerini ikisinin farklı başlangıç

Tablo 13. Beşinci test sisteminde önerilen metot ile bulunan sonuçların literatür ile karşılaştırılması
(Comparison of the results of the proposed method against literature for the fifth test system)

	Genetik Algoritma [33]		Hibrit yaklaşım [33]		Önerilen Filled Fonksiyonu Metodu
	Maksimum Maliyet	Minimum Maliyet	Maksimum Maliyet	Minimum Maliyet	Maliyet
P ₁	108,6192	150,7244	177,1951	182,4784	102
P ₂	63,1641	60,8707	48,6799	48,3525	79,40
P ₃	42,7218	30,8965	20,2534	19,8553	49,40
P ₄	20,4320	14,2138	21,8570	17,1370	10
P ₅	18,5043	19,4888	12,0258	13,6677	29,80
P ₆	39,1609	15,9154	13,3454	12,3487	20,39
∑P _i (MW)	292,6022	292,1096	293,3566	293,8395	290,99
Maliyet (\$/h)	1117,1285	996,0369	992,4815	984,9365	1075,6215
P _{kayıp}	9,2027	8,7060	9,9566	10,4395	7,5911
Zaman (s)	0,1410	0,5780	0,0310	0,0150	0,16

noktaları için gerçekleştirilen tüm tekrarlarında literatürde verilen kesin sonuçları elde edebildiği görülmüştür. Sadece ikinci test sisteminde, bazı başlangıç değerleri için %0,014'lük çok küçük bir hata oranı ölçülmüştür. Bu oran bir çok değişkenli optimizasyon problemi için ihmal edilebilecek derecede küçük bir değerdir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan şekilde kullanılması, bu kaynakların güç sisteme ve özellikle ekonomik yük dağıtımına olan etkilerinin incelenmesini zorunlu hale getirmektedir. Bu çalışmada, literatürde güç sistemleri konusunda sıklıkla uygulanmamış olan filled fonksiyon algoritması kullanılmıştır. Filled fonksiyon algoritması, matematiksel süreç ile çözüme ulaştığından sezgisel algoritmalarla göre hem daha az zamanda sonuca ulaşmaktadır hem de büyük miktarda hafıza gerektirmemektedir. Sezgisel algoritmalarla göre bir başka avantajı ise; sezgisel algoritmalar gibi mutasyon, çaprazlama gibi birçok farklı operatör içermediğinden filled fonksiyon algoritması kolaylıkla uygulanabilmektedir. Bu yüzden, çok sayıda jeneratör içeren büyük güç sistemlerinde filled fonksiyon algoritması kolaylıkla uygulanabileceği öngörülmektedir. Filled fonksiyon algoritması ile iteratif olarak, her iterasyonda çözüm bulunur ve daha iyi sonuç elde etmek için, bir iterasyonun sonucu bir sonraki iterasyonun girişi olabilmektedir. Böylelikle, sezgisel algoritmaların dezavantajı olan çözüme ulaşmak için son kısmın tamamlanmasının zorunluluğu, Filled fonksiyon algoritması için geçerli değildir. Bu yüzden, anlık olarak ara çözüm gerektiğinde çözüme gidebilmektedir. Bütün bu avantajları sayesinde, Filled fonksiyon algoritması kolaylıkla uygulanabilir, daha az zaman ve hafıza alan bir algoritma olmaktadır. Bu yüzden, ekonomik yük dağıtımına gibi karmaşık bir konuda bu algoritma başarı ile uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlarda oldukça kısa zamanda sonuca ulaştığı tespit edilmiştir. Sezgisel algoritmalarla, rastgele sonuç bulunup bu sonuçların ortalaması veya en iyisi alınarak sonuç değeri bulunmaktadır. Filled fonksiyon algoritmasında ise matematiksel süreç ile işlem yapıldığından aynı başlangıç

durumu için her defasında aynı sonuç bulunmaktadır. Böylelikle, sezgisel algoritmalarla karşılaşılan rastgelelik sorunu da ortadan kaldırılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, “2219 Yurtdışı Doktora Sonrası Araştırma Bursu Programı” kapsamında TÜBİTAK tarafından (Başvuru Numarası: 1059B191300593) ve “Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince” (Proje Numarası: 2012 / 112) desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Pradhana M., Royb P.K., Palc T., Grey wolf optimization applied to economic load dispatch problems, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 83 (1), 325-334, 2016.
2. Parouha R.P., Das K.N., DPD: An intelligent parallel hybrid algorithm for economic load dispatch problems with various practical constraints, *Expert Syst. Appl.*, 63 (1), 295-309, 2016.
3. Zou D., Li S., Wang G.G., Li Z., Ouyang, H., An improved differential evolution algorithm for the economic load dispatch problems with or without valve-point effects, *Appl. Energy*, 181 (C), 375-390, 2016.
4. Saadat H., *Power system analysis*, WCB/McGraw-Hill, A.B.D, 1999.
5. Wood A.J., Wollenberg B.F., *Power generation operation and control*, John Wiley, New York, 1984.
6. Yalcinoz T., Short M., Neural networks approach for solving economic dispatch problem with transmission capacity constraints, *IEEE Trans. Power Syst.*, 13 (2), 307-313, 1998.
7. Yalçınöz T., Altun H., Comparison of simulation algorithms for the Hopfield neural network: an application of economic dispatch, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 8 (1), 67-80, 2000.
8. Es H.A., Kalender F.Y., Hamzaçebi C., Forecasting the Net Energy Demand of Turkey by Artificial Neural

- Networks, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (3), 495-504, 2014.
9. Lee F.N., Breipohl A.M., Reserve constrained economic dispatch with prohibited operating zones, IEEE Trans. Power Syst., 8 (1), 246-254, 1993.
 10. Bellman R., Dynamic Programming Princeton University Press, Princeton, NJ, 1957.
 11. Germeç K.E., Erdem H., Time-harmonic analysis in electric power systems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (2), 263-271, 2015.
 12. Chen P.H., Chang H.C., Large-scale economic dispatch by genetic algorithm, IEEE Trans. Power Syst., 10 (4), 1919-1926, 1995.
 13. Gürsu B., Optimum overcurrent relay coordination via genetic algorithm method stopped by penalty function in substations, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (4), 665-676, 2014.
 14. Eroğlu H., Aydin M., Automation of electrical transmission lines' route optimization and project drawing, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (4), 723-732, 2015.
 15. Zaman M.F., Elsayed S.M., Ray T., Sarker R.A., Evolutionary Algorithms for Dynamic Economic Dispatch Problems, IEEE Trans. Power Syst., 31 (2), 1486-1495, 2016.
 16. Sinha N., Chakrabarti R., Chattopadhyay P., Evolutionary programming techniques for economic load dispatch, IEEE Trans. Evol. Comput., 7 (1), 83-94, 2003.
 17. Kumar N., Nangia U., Sahay K.B., Economic load dispatch using improved particle swarm optimization algorithms, 6th IEEE Power India International Conference (PIICON), Delhi, 1-6, 2014.
 18. Sum-Im T., Economic dispatch by ant colony search algorithm, 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems 416-421, 1-3 Aralık 2004.
 19. Naama B., Bouzeboudja H., Allali A., Solving the Economic Dispatch Problem by Using Tabu Search Algorithm, Energy Procedia, 36 (1), 694-701, 2013.
 20. Renpu G., A filled function method for finding a global minimizer of a function of several variables, Math. Program., 46 (1-3), 191-204, 1990.
 21. Ge R., Qin, Y., A class of filled functions for finding global minimizers of a function of several variables, Journal of Optimization Theory and Applications, 54 (2), 241-252, 1987.
 22. Liu X., A class of augmented filled functions, Computational Optimization and Applications, 33 (2-3), 333-347, 2006.
 23. Ng C.K., Li D., Zhang L.S., Discrete global descent method for discrete global optimization and nonlinear integer programming, J. Global Optim., 37 (3), 357-379, 2007.
 24. Lucidi S., Piccialli V., New classes of globally convexized filled functions for global optimization, J. Global Optim., 24 (2), 219-236, 2002.
 25. Shang Y.L., Zhang L.S., A filled function method for finding a global minimizer on global integer optimization, J. Comput. Appl. Math., 181 (1), 200-210, 2005.
 26. Gupta O.K., Ravindran A., Branch and bound experiments in convex nonlinear integer programming, Manage. Sci., 31 (12), 1533-1546, 1985.
 27. Fisher M.L., The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems, Manage. Sci., 50 (12), 1861-1871, 2004.
 28. Marsten R.E., Morin T.L., A hybrid approach to discrete mathematical programming, Math. Program., 14 (1), 21-40, 1978.
 29. Sahiner A., Gokkaya H., Yigit T., A new filled function for nonsmooth global optimization, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, 972-974, 2012.
 30. Levy A., Montalvo A., The tunneling algorithm for the global minimization of functions, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 6 (1), 15-29, 1985.
 31. Liu X., Application of filled function method to multimodal economic load dispatch problems, Electron. Lett., 47 (18), 1042-1043, 2011.
 32. Alhajri M.F., El-Hawary M.E., Pattern search optimization applied to convex and non-convex economic dispatch, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Montreal, Que., 2674-2678, 7-10 Ekim 2007.
 33. Malik T.N., ul Asar A., Wyne M.F., Akhtar S., A new hybrid approach for the solution of nonconvex economic dispatch problem with valve-point effects, Electr. Power Syst. Res., 80 (9), 1128-1136, 2010.