



A new approach in the solution of the environmental economic power dispatch problems with piecewise quadratic fuel cost function: Conic scalarization method

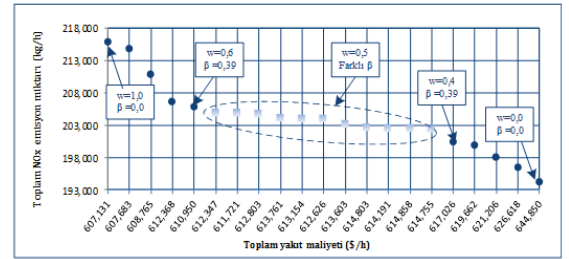
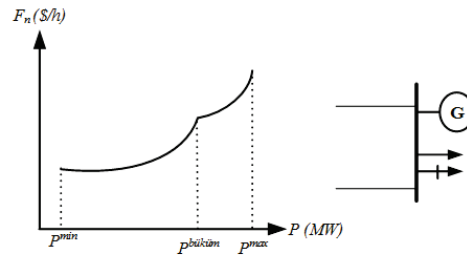
Celal Yaşar, Serdar Özyön*

Department of Electrical Electronics Engineering, Kütahya Dumlupınar University, Kütahya, 43100, Turkey

Highlights:

- The solution of environmental economic power dispatch problems with piecewise quadratic fuel cost function has been done
- The environmental economic power dispatch problem has been scalarized by the scalarization method
- The scalarized problem has been solved with the method of genetic algorithm and pareto optimum results have been obtained

Graphical/Tabular Abstract



Purpose: Today the environmental pollution caused by the generation units using fossil fuel has become an important subject for the world. Gas and ash particles containing carbon dioxide, sulfur dioxide, nitrogen oxide are spread around by the generation units using fossil fuel. These wastes affect the natural life in a negative way, emission values increase enormously and as a result, have fatal/deadly ecological effects. Thus, the result that has been reached is that in the solution of power dispatch problems environmental effects of the environmental generation units as well as their fuel cost must be evaluated together.

Keywords:

- Piecewise cost function
- Power dispatch
- Genetic algorithm
- Conic scalarization

Theory and Methods:

When both fuel cost and the environmental criteria are evaluated together it is called environmental economic power dispatch problem. These kinds of problems are solved both by the minimization of total fuel cost and total NOx emission amount together under the system constraints. In the study in order to solve the environmental economic power dispatch problem composed of piecewise fuel cost functions scalarization has been done with KSM. GA has been applied for the solution of scalarized non-convex environmental economic power dispatch problem. The process that GA had undergone until it reached the best solution, can be defined as codification of the solution set, formation of the initial population, calculation of the fitness of the solutions in the population, selection of the ancestor individuals according to their fitness, formation of the new individuals by the crossing and mutation operations. When the results obtained in the solution of the problem violate the constraints, they are punished by the help of punishment function. the fitness function value minimized in the solution of the problem is obtained by adding total punishment to the total fuel cost function in the study. After the population has been formed, the best one among the individuals taken as solution is searched for, by calculating their total cost function and total emission amounts. By repeating these operations, it is aimed that the solutions in the population that will be formed in different iterations to be better. When the stopping criterion is supplied, the algorithm is ended by determining the best solution.

Article Info:

Received: 15.11.2016

Accepted: 22.02.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416363

Acknowledgement:

Results:

The algorithm proposed for the performance comparison has been applied to two different test system successfully. One of these systems is IEEE 30 bus 6 generator test system which was solved with different methods in literature while the other is a different test system with 10 bus and 5 generators, both the fuel cost functions and emission functions of which contain expressions that are non-convex.

Conclusion:

The results obtained from the study have been compared with the results obtained with different methods in literature. It has been seen that the results obtained by the proposed method are close to the results in literature. Along with the fact that it is similar to the studies in literature in terms of performance, the additional advantage of KSM method is to present much more alternatives to the system administrators.

Correspondence:

Author: Serdar ÖZYÖN

e-mail:

serdar.ozyon@dpu.edu.tr

phone: +90 274 265 20 31 -

4264



Parçalı yakıt maliyeti fonksiyonlarına sahip çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerinin çözümüne yeni bir yaklaşım: Konik skalerleştirme metodu

Celal Yaşar^{ID}, Serdar Özyön*^{ID}

Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Parçalı yakıt maliyet fonksiyonlu çevresel ekonomik güç dağıtım probleminin çözümü yapılmıştır
- Çevresel ekonomik güç dağıtım problemi konik skalerleştirme metoduyla skalerleştirilmiştir
- Skalerleştirilen problem genetik algoritma metoduyla çözülerek pareto optimal sonuçlar elde edilmiştir

Makale Bilgileri

Geliş: 15.11.2016

Kabul: 22.02.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416363

Anahtar Kelimeler:

Parçalı maliyet fonksiyonu,
Güç dağıtımı,
Genetik algoritma,
Konik skalerleştirme.

ÖZET

Gelişen dünyada elektrik enerjisine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Fosil yakıt kullanan elektrik üretim birimleri çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bu nedenle optimal güç dağıtım problemleri çözümlenirken çevre kirliliği de dikkate alınmalıdır. Çevre kirliliğini dikkate alan bu tür problemlere çevresel ekonomik güç dağıtım problemleri adı verilmektedir. Bu çalışmada çok amaçlı çevresel ekonomik güç dağıtım problemi konik skalerleştirme metodu (KSM) kullanılarak tek amaçlı optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Skalerleştirilen problemin çözümü için genetik algoritma (GA) metodu kullanılmıştır. Uygulama için ele alınan örnekler, konveks ve konveks olmayan parçalı yakıt maliyeti fonksiyonlarına sahip üretim birimlerinden oluşan kayıplı güç sistemleridir. Örnek problemlerde farklı ağırlık değerleri için toplam yakıt maliyeti ve toplam NO_x emisyon değerlerine ait en iyi çözüm değerleri elde edilmiştir (Pareto optimal değerler) ve sonuçlar tartışılmıştır.

A new approach in the solution of the environmental economic power dispatch problems with piecewise quadratic fuel cost function: Conic scalarization method

H I G H L I G H T S

- The solution of the environmental economic power dispatch problems with piecewise quadratic fuel cost function has been done
- The environmental economic power dispatch problem has been scalarized by the scalarization method
- The scalarized problem has been solved with the method of genetic algorithm and pareto optimum results have been obtained

Article Info

Received: 15.11.2016

Accepted: 22.02.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416363

Keywords:

Piecewise cost function,
Power dispatch,
Genetic algorithm,
Conic scalarization

ABSTRACT

The need for electric power is increasing day by day in the developing world. Power generation units using fossil fuel cause environmental problems. Therefore, environmental pollution must be taken into consideration while solving optimum power dispatch problems. This kind of problems considering the environmental pollution are called environmental economic power dispatch problems. In this study, multi-objective environmental economic power dispatch problem has been transformed into single-objective optimization problem by using conic scalarization method (CSM). Genetic algorithm (GA) method has been used for the solution of the scalarized problem. The samples handled for practice are lossy power systems formed of generation units with convex and non-convex piecewise fuel cost functions. In the sample problems the best solution values belonging to total fuel cost and NO_x emission values (pareto optimal values) have been obtained for different weight values and the results have been discussed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde hızla artan elektrik enerji ihtiyacının karşılanması, söz konusu sistemlerin verimli ve ekonomik olarak işletilmesi, enerji sistemlerinin planlanmasının yapılması güç sistemleri mühendislerinin uğraştıkları konulardan bazıları olarak sayılabilir. Son zamanlarda boyutları giderek büyüyen enerji şebekelerinin planlanması ve optimal olarak işletilmesi sırasında ortaya çıkan problemlerin çözümü oldukça karmaşık hale gelmiştir. Bu nedenle ekonomik güç dağıtım problemleri güç sistemlerinin işletimlerinde en önemli konulardan biridir. Dolayısıyla literatürde, bu tip problemlerin optimal çözümleriyle daha fazla karşılaşılmaktadır.

Ekonomik güç dağıtım problemleri genel olarak konveks ve konveks olmayan optimizasyon problemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Konveks optimizasyon problemlerinde giriş-çıkış karakteristikleri monoton artan, parçalı lineer fonksiyon olarak alınırken, konveks olmayan optimizasyon problemlerinde ise süresiz, düzgün olmayan karakteristiğe sahip, birden çok yerel minimuma sahip fonksiyon olarak alınmaktadır [1]. Konveks olmayan optimizasyon problemleri daha karmaşık oldukları için çözümleri daha hızlı ve kararlı çözüm metodları gerektirmektedir [2, 3]. Fosil yakıt kullanan üretim birimlerinin oluşturduğu güç dağıtım problemlerinin sadece yakıt maliyeti dikkate alınarak çözülmesi, doğaya yaptığı olumsuz etkilerin göz ardı edilmesi anlamına gelmektedir. Halbuki günümüzde bu tür üretim birimleri tarafından yaratılan çevre kirliliği dünya için oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Karbondioksit, sülfür dioksit, nitrojen oksit içeren gaz ve kül parçacıkları fosil yakıt kullanan üretim birimleri tarafından çevreye yayılmaktadır. Bu atıklar doğal hayatı olumsuz yönde etkilemekte; emisyon değerleri aşırı miktarda artmakta ve sonuç olarak öldürücü ekolojik etkilere sebep olabilmektedir. Dolayısıyla güç dağıtım problemlerinin çözümünde; yakıt maliyetinin yanı sıra çevresel etkilerinin de birlikte değerlendirilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Hem yakıt maliyetinin hem de çevresel kriterlerin birlikte değerlendirilmesine çevresel ekonomik güç dağıtım problemi veya başka bir ifadeyle çok amaçlı optimizasyon problemi denilmektedir [4, 5].

Klasik ekonomik güç dağıtım problemlerine göre çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü, oldukça karmaşık olduğundan farklı çözüm yöntemleri uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle bu problemler literatürde iki farklı şekilde çözülmektedir. Bunlardan biri probleme doğrudan çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının uygulanması, diğeri ise çok amaçlı optimizasyon problemlerini tek amaçlı optimizasyon problemlerine dönüştürdükten sonra bu tür problemleri çözen metodların uygulanması şeklindedir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin uygun dönüşümler kullanılarak tek amaçlı optimizasyon problemlerine dönüştürülmesine skalerleştirme denilmektedir. Genel olarak skalerleştirme,

vektör optimizasyonu problemini uygun dönüşümler yardımıyla gerçel değerli tek amaçlı optimizasyon problemine dönüştürmektir. Skalerleştirme yöntemlerinden bazıları ağırlıklı toplam metodu (ATM), ϵ -kısıt metodu, elastik kısıtlayıcı metod, Benson skalerleştirme metodu, uzlaşma programlama metodu, amaç programlama metodu ve bu çalışmada uygulaması yapılan konik skalerleştirme metodu (KSM) şeklinde sayılabilir [6, 7]. Genellikle çok amaçlı optimizasyon problemlerinde bir tek çözüm yoktur, fakat alternatif çözümler kümesi vardır. Bu alternatif çözümler kümesinin elemanları için bütün amaçlar düşünüldüğünde hiçbirinin diğerine göre daha en iyi çözüm olduğu söylenemez. Bu tür çözümlere Pareto optimal çözümler denir [1].

Çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerinin literatürde farklı farklı çözüm yöntemleri uygulanarak optimizasyonuna rastlanmaktadır. Bu tür problemleri tek fonksiyona dönüştürerek çözümünü yapan çalışmalar; yüklü sistem arama algoritması (CSS) [3], artımsal ve dinamik popülasyonlu yapay arı koloni algoritmaları (IABC, IABC-LS, ABCDP, ABCDP-LS) [4], geliştirilmiş genetik algoritma (GA) [7], sözde spot elektrik fiyat algoritması (PSPA) [8], diferansiyel ve hibrid diferansiyel gelişim algoritmaları (DE, DE/BBO) [9, 10], biyocoğrafya tabanlı optimizasyon algoritması (BBO) [11, 12], karşıt tabanlı yerçekimsel arama algoritması (GSA, OGSA) [13], analitik çözüm metodu [14], çiçek tozlanma algoritması (FPA) [15] şeklinde bazılarıdır. İki amaç fonksiyonunun birlikte minimize edildiği yöntemlerin uygulandığı çalışmalardan bazıları ise; çok amaçlı geri besleme arama algoritması (BSO) [5], bulanık tabanlı ve çok amaçlı bakteri yiyecek arama algoritmaları (FSBF, NSBF, MBFA) [16, 17], çok amaçlı, bulanık tabanlı, kaotik, kültürel kuantum davranışlı ve hibrit parçacık sürü optimizasyonu algoritmaları (PSO, FCPSO, MOPSO, BB-MOPSO, MO-DE/PSO, CMOQPSO) [18, 19], çok amaçlı ve hibrit diferansiyel gelişim algoritmaları (MODE, EMODE, MOHDE-SAT) [20, 21], çok amaçlı evrimsel ve hibrit genetik algoritmalar (NSGA-II, NSGA-II/CAO, NSGA-II+DCD+CE) [22, 23], grup arama optimizasyon algoritması (GSOMP) [24], çok amaçlı, kaotik karınca sürü optimizasyonu algoritması (CASO, MOCASO) [25] şeklindedir. Çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerini hem tek fonksiyona dönüştürerek, hem de ikisinin birlikte minimize edildiği çalışmalar; çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu algoritmaları (MOPSO, FCPSO) [26], çok amaçlı ve hibrit genetik algoritmalar (NSGA, NPGA, NSGA-II) [27], güçlü pareto evrimsel algoritmaları (SPEA) [28, 29], geliştirilmiş rastgele sıçrayan kurbağa algoritması (SFLA, MSLFA) [30] şeklinde belirtilebilir. Bu çalışmalara ek olarak literatürde vana etkili ekonomik yük dağıtım problemlerinin çözümleri de yapılmıştır [31]. Bunun yanında çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerine uygulanan bazı optimizasyon metodları farklı mühendislik problemlerinin çözümünde de kullanılmıştır [32, 33]. Bu çalışmada yakıt maliyeti ve çevresel etkilerin birlikte değerlendirildiği iki amaçlı

optimizasyon problemi KSM yardımıyla skalerleştirilerek tek amaçlı optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Skalerleştirilen konveks olmayan çevresel ekonomik güç dağıtım probleminin çözümü için klasik genetik algoritma (GA) tekniği uygulanmıştır. GA, optimizasyon algoritmalarının temelini oluşturmakla birlikte, problemlerinin çözümünde çok geniş aralıkta, çok fazla sayıda değişkenle arama yaparak yerel optimumlara takılmadan genel optimuma ulaşma özelliği taşımaktadır. Bu nedenle GA, bu tür problemin çözümünde tercih edilmiştir.

2. PROBLEMİN FORMÜLASYONU (FORMULATION OF THE PROBLEM)

Çevresel ekonomik güç dağıtım problemleri hem toplam yakıt maliyetinin hem de toplam NO_x emisyon miktarının birlikte sistem kısıtları altında minimize edilmesi şeklinde çözülür. Literatürde yakıt maliyeti fonksiyonu konveks olan problemler birçok metotla çözülebildiği halde, yakıt maliyeti ve NO_x emisyon fonksiyonları konveks olmayan problemlerin optimal çözümü klasik metotlarla oldukça zordur. KSM'nin avantajını gösterebilmek için bu çalışmada maliyet fonksiyonları parçalı ve NO_x emisyon fonksiyonları konveks olmayan fonksiyonlar olarak seçilmiştir. Şekil 1'de konveks ve konveks olmayan ikinci dereceden yakıt maliyet fonksiyonlarının grafikleri verilmiştir.

Üretim birimlerinin konveks yakıt maliyet fonksiyonları Eş. 1'deki gibi alınmıştır [1,2].

$$F_n(P_{G,n}) = a_n + b_n P_{G,n} + c_n P_{G,n}^2, \quad (1)$$

$$P_{G,n}^{\min} \leq P_{G,n} \leq P_{G,n}^{\max}, \quad (n \in N_G) \quad (\$/h)$$

İkinci dereceden parçalı konveks olmayan yakıt maliyet fonksiyonları ise Eş. 2'de verilmiştir [1, 2].

$$F_n(P_{G,n}) = \begin{cases} F_{1n}(P_{G,n}) = a_{1n} + b_{1n} P_{G,n} + c_{1n} P_{G,n}^2, \\ P_{G,n}^{\min} \leq P_{G,n} \leq P_{G,n}^{\text{büyükim}} \\ F_{2n}(P_{G,n}) = a_{2n} + b_{2n} P_{G,n} + c_{2n} P_{G,n}^2, \\ P_{G,n}^{\text{büyükim}} \leq P_{G,n} \leq P_{G,n}^{\max} \end{cases}, \quad (2)$$

$$, \quad (n \in N_G) \quad (\$/h)$$

Eşitlikte $F_n(P_{G,n})$, n . termik üretim biriminin yakıt maliyet fonksiyonunu, a_n , b_n ve c_n katsayıları bu üretim biriminin maliyet fonksiyonu katsayılarını, $P_{G,n}$ ise bu üretim biriminin çıkış gücünü göstermektedir. Parçalı maliyet fonksiyonlarına sahip termik üretim birimleri için ise Eş. 2'de görüldüğü gibi aynı katsayılar belli bir güç değerinin ($P_{G,n}^{\text{büyükim}}$) altında ve üstünde farklı değerlere sahiptirler. Her bir üretim birimi tarafından çevreye yayılan konveks olmayan NO_x emisyon miktarı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [1, 2].

$$E_n(P_{G,n}) = d_n + e_n P_{G,n} + f_n P_{G,n}^2 + g_n \cdot \exp(h_n \cdot P_{G,n}), \quad (3)$$

$$(n \in N_G) \quad (\text{ton} / h)$$

Eş. 1, Eş. 2 ve Eş. 3'de $P_{G,n}$ 'nin birimi MW olarak alınmaktadır. Enerji iletim hatlarındaki kayıplar ($P_{\text{kayıp}}$) dikkate alındığında sistemdeki güç denge kısıtı Eş. 4'teki gibi alınmıştır.

$$\sum_{n=1}^{N_G} P_{G,n} - \sum_{l=1}^{N_B} P_{\text{Yük},l} - P_{\text{kayıp}} = 0, \quad (n \in N_G, l \in N_B) \quad (4)$$

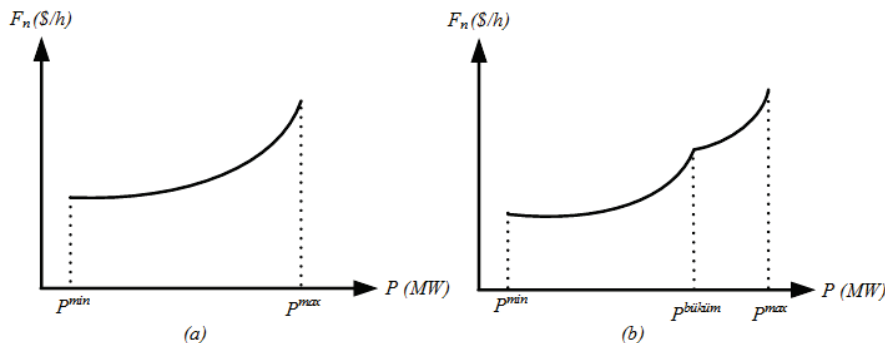
Eşitliklerde yer alan N_B ve N_G sırasıyla sistemdeki toplam bara ve generatör sayısını göstermektedir. Bu çalışmada iletim hattı kayıpları Newton-Raphson metoduyla güç akışı yapılarak hesaplanmıştır. Üretim birimlerinin maliyet fonksiyonları konveks olması durumunda çalışma sınır değerleri Eş. 5'de verilmiştir [1].

$$P_{G,n}^{\min} \leq P_{G,n} \leq P_{G,n}^{\max}, \quad (n \in N_G) \quad (5)$$

Üretim birimlerinin maliyet fonksiyonları konveks olmayan parçalı yakıt maliyet fonksiyonu olması durumunda ise Eş. 6'da verilmiştir [1, 2].

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{G,n}^{\min} \leq P_{G,n} \leq P_{G,n}^{\text{büyükim}} \\ P_{G,n}^{\text{büyükim}} \leq P_{G,n} \leq P_{G,n}^{\max} \end{array} \right\}, \quad (n \in N_G) \quad (6)$$

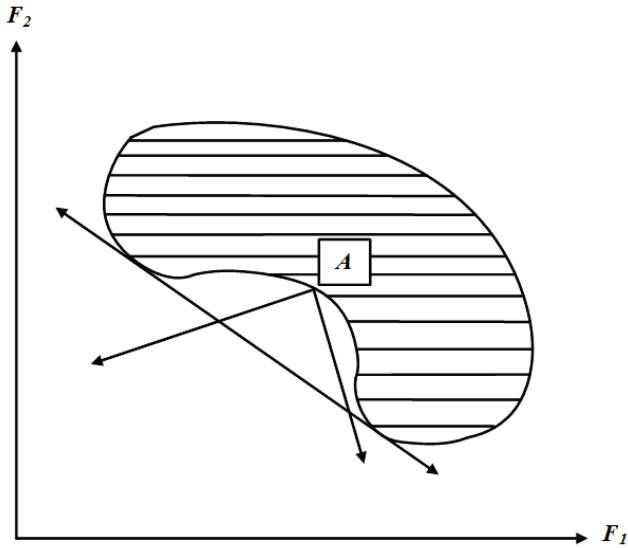
Çalışmada minimize edilecek iki amaçlı (yakıt maliyeti ve NO_x emisyon miktarı) optimizasyon problemi önce KSM ile skalerleştirilmiş ve sonra da GA tekniği ile çözülmüştür.



Şekil 1. Konveks ve konveks olmayan ikinci dereceden parçalı maliyet fonksiyonları
(Convex and non-convex piecewise quadratic cost functions)

2.1. Konik Skalerleştirme Metodu (The Conic Scalarization Method)

Konik skalerleştirme metodu (KSM), çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümü için Gasimov tarafından geliştirilmiştir. Gasimov'un skalerleştirme tekniğinin temel fikri, Pareto etkin değerleri bulmak için destek konilerini kullanmasıdır. KSM'de amaç fonksiyonu ve kısıtlar üzerine herhangi bir kısıtlayıcı şart konulmaksızın amaç fonksiyonları birleştirilerek tek fonksiyona dönüştürülmektedir. Literatürde KSM, birçok konveks olmayan çok amaçlı optimizasyon problemine uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çok geniş bir problem sınıfına uygulanabilmesi yöntemin üstünlüğü olarak değerlendirilebilir. KSM'nin geliştirilmesine temel dayanak olan iki amaçlı bir problem için konveks olmayan görüntü kümesi Şekil 2'de gösterilmiştir [34, 35].



Şekil 2. İki amaçlı bir problem için konveks olmayan görüntü kümesi (Non-convex range for a double-objective problem)

KSM açıklanırken aşağıdaki tanımların yapılması gerekir. $R_+^2 = \{(y_1, y_2) \in R^2 | y_1 \geq 0, y_2 \geq 0\}$ olarak belirlenmiş olsun.

Tanım-1: S, R^2 'nin boş olmayan bir alt kümesi olsun.

a) Eğer $(\{s\} - R_+^2) \cap S = \{s\}$ ise $s \in S$ elemanına S kümesinin bir pareto minimum elemanı olup $s \in \min(S)$ olarak yazılır.

b) Eğer s, S 'nin bir pareto minimum elemanı ise $s \in S, S$ kümesinin bir has minimum elemanıdır (Benson'a göre) ve $sep\text{-}\min(S)$ şeklinde yazılır. R^2 'nin sıfır elemanı $cl(\text{cone}(S + R_+^2 - \{s\}))$ 'nin pareto minimum elemanıdır. Burada cl küme kapanışını göstermektedir ve $\text{cone}(s) = \{\lambda s | \lambda \geq 0\}$ ve $s \in S$ 'dir.

İki amaçlı optimizasyon problemi Eş. 7'deki gibi ifade edildiğinde, X , uygun çözümler kümesidir.

$$\min [F_1(x), F_2(x)], \quad x \in X \quad (7)$$

$F(x) = [F_1(x), F_2(x)]$ ve $F(X)$ uygun çözümler kümesinin $[F_1(x), F_2(x)]$ dönüşümü altında görüntü kümesi olarak tanımlanmış olsun.

Tanım-2: $F(x) \in \min[F(X)]$ ise $x \in X$, Eş. 7'deki problemin pareto etkin çözümü olarak isimlendirilir. $F(x) \in p\text{-}\min[F(X)]$ ise $x \in X$ 'e Eş. 7'deki problemin has etkin (Benson'a göre) çözümü denilir. W , Eş. 8'deki gibi tanımlanmış olsun.

$$W = \{(\beta, w) \in R \times R^2 \mid 0 \leq \beta < \min(w_1, w_2), w_1 > 0, w_2 > 0\} \quad (8)$$

Teorem-1: Herhangi bir $(\beta, w) \in W$ için $x \in X$ 'in aşağıdaki skaler minimizasyon probleminin optimal bir çözüm olduğunu varsayalım.

$$\min \left[\beta \sum_{i=1}^2 |F_i(x)| + \sum_{i=1}^2 w_i F_i(x) \right], \quad x \in X \quad (9)$$

Bu durumda $x \in X$, Eş. 7'deki problemin has etkin bir çözümüdür.

Teorem-2: $x \in X$ 'in Eş. 7'deki problemin has etkin bir çözümü olduğunu varsayalım. Bu durumda $(\beta, w_1, w_2) \in W$ mevcut olup $x \in X$ aşağıdaki skaler minimizasyon probleminin optimal bir çözümüdür.

$$\min \left\{ \beta \sum_{i=1}^2 |F_i(x) - F_i(\bar{x})| + \sum_{i=1}^2 w_i (F_i(x) - F_i(\bar{x})) \right\}, \quad (10)$$

$$x \in X$$

Teorem-1, Eş. 9'da verilen skaler problemin herhangi bir çözümünün Eş. 7'deki problemin etkin bir çözümü olduğunu öne sürmektedir. Diğer yandan Teorem-2 ise Eş. 7'deki problemin her etkin çözümünün \bar{x} , bazı $(\beta, w_1, w_2) \in W$ değerleri için Eş. 10'daki skaler problemin çözülmesiyle hesaplanabileceğini ileri sürmektedir. Böylece bu teoremler Eş. 7'deki problemin Eş. 9 veya Eş. 10'daki gibi skalerleştirilebileceğini ve Eş. 7'deki problemin bütün etkin çözümlerinin Eş. 9 veya Eş. 10 skaler problemlerinin çözülmesiyle hesaplanabileceğini öne sürmektedir. Konveks olmayan çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümlerinde desteklenen ve desteklenemeyen etkin çözümler isimlendirmesi arasındaki fark çok önemlidir.

$$\min \sum_{i=1}^2 w_i F_i(x), \quad x \in X \quad (11)$$

Eğer bir $(w_1, w_2) \in R_+^2 = \{(w_1, w_2) : w_1 > 0, w_2 > 0\}$ varsa ve \bar{x} Eş. 11'in optimum bir çözümüyse, etkin çözüm \bar{x} 'e destekli etkin çözüm denir.

Eğer X konveks ve $F_i, i=1,2$ 'nin her ikisinde konveks fonksiyonlarsa, o zaman bütün Benson etkin çözümleri desteklenebilir. Fakat konveks olmayan problemler için desteklenmeyen etkin çözümler de mevcuttur. Eğer \bar{x} etkin

bir çözümse ve herhangi bir $(x_1, x_2) \in X$ için $\lambda \in [0, 1]$ 'li bir λ varsa, yani $F_\lambda(x) = \lambda F(x_1) + (1-\lambda)F(x_2) < F(x)$ ise, x 'in Eş. 11'de verilen ağırlıklı toplam problemi için optimum bir çözüm olmadığı açıktır. Diğer bir deyişle bu şartları sağlayan etkin çözüm x , ağırlıklı toplam skalerleştirme metodu kullanılarak hesaplanamaz [34, 35]. Teorem-1 ve 2'nin olası desteklenemeyen etkin çözümlerin hesaplanmasında kullanılması, bu teoremlerin önemini ortaya çıkarmaktadır. Teorem-1 veya Eş. 9'un çözümleri göz önüne alındığında, hatırlanmalıdır ki amaç fonksiyonlarının işaretlerinin uygun çözümler kümesi üzerinde değişmeden kaldığı durumda, Eş. 9'daki mutlak değer fonksiyonu anlamını yitirir ve Eş. 9 ağırlıklı toplam skalerleştirmeye dönüşür. Bu anlamsız durum Eş. 9 yerine Eş. 12'de verilen kaydırılmış çok amaçlı optimizasyon problemi kullanılarak aşılır.

$$\min [F_1(x) - B_1, F_2(x) - B_2], \quad x \in X \quad (12)$$

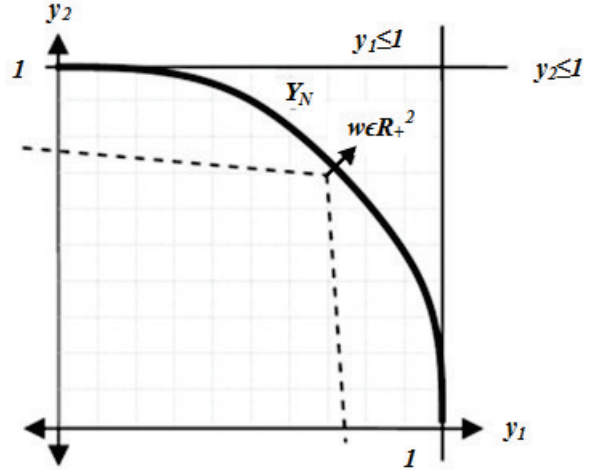
Eşitlikte B_1 ve B_2 rastgele belirlenmiş sayılardır. Eş. 7 ve Eş. 9'un aynı etkin çözümler kümesine sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bu yüzden B_1 ve B_2 sayılarını sırasıyla F_1 ve F_2 'nin sınırları içinden seçerek, skalerleştirilen problem Eş. 9'da kullanılan mutlak değerleri hassas hale getirmek için amaç fonksiyonları yenileriyle değiştirilebilir. B_1 ve B_2 için farklı değerler alarak Eş. 12'nin aşağıdaki şekilde skalerleştirilmiş biçimini çözerek farklı etkin çözümler elde edilebilir [34, 35].

$$\min \left\{ \beta \sum_{i=1}^2 |F_i(x) - B_i| + \sum_{i=1}^2 w_i (F_i(x) - B_i) \right\}, \quad x \in X \quad (13)$$

Olası desteklenmeyen yada gizli etkin çözümleri aramak için, B_1 ve B_2 parametreleri ilk olarak karar vericinin ağırlıklarına karşılık gelen ve nispeten birbirinden uzak desteklenebilir komşu pareto optimal çözümler arasından rastgele seçilebilir. Ek etkin çözümler hesaplandıktan sonra Eş. 13'teki B_1 ve B_2 için sıfır olmayan değerler seçmede kullanılan aralıklar sırasıyla daraltılabilir ve eğer varsa başka desteklenmeyen etkin çözümler bulunabilir. Bu duruma göre, Benson has etkin çözümlerini tamamıyla karakterize eden aşağıdaki sonuca ulaşılabilir.

Sonuç: Uygun çözüm $x \in X$, ancak ve ancak Eş. 13'ün en iyi çözümünü elde edilebileceği $(\beta, w_1, w_2) \in W$ ve $B_1, B_2 \in R$ parametrelerinin değerleri mevcutsa Benson has etkin çözümüdür. Sonucun bir kanıtı Teorem-1 ve 2'den elde edilebilir. Geometrik olarak, Eş. 13'te kullanılan skalerleştirme fonksiyonunun seviye kümeleri, sıralama konisi R^{+2} 'yi içeren R^2 içindeki dışbükey konileridir. $(\beta, w_1, w_2) \in W$ ve B_1, B_2 parametrelerini değiştirmek bu konilerin tepe açılarının yerini ve biçimini değiştirmeye sebep olur. Böylelikle Eş. 13, bu parametrelerin farklı kümeleri için minimize edilerek bu koniler tarafından desteklenen görüntü kümesinde farklı etkin çözümler bulunabilir. Bu yöntem, görüntü kümesinin destek noktalarını konilere göre karakterize ederek farklı etkin noktaları bulmaya dayalı olduğundan konik skalerleştirme

yöntemi olarak adlandırılır. Eş. 13'te $\beta=0$ alınırsa yöntem Eş. 11'deki ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemine indirgenir. Bu yüzden ağırlıklı toplam skalerleştirme metoduyla desteklenemeyen "gizli" etkin çözümler sadece $\beta > 0$ alındığında bulunabilir. Matematiksel olarak açıklanan KSM'nin geometrik olarak gösterimi ise Şekil 3'te verilmiştir [35].



Şekil 3. KSM'nin geometrik olarak gösterimi
(The demonstration of KSM geometrically)

Şekilde görüldüğü gibi, pareto etkin noktaların elde edilmesinde en uygun metot KSM olup zayıf etkin değerler, pareto etkin değerler ve has pareto etkin değerler metotta yer alan parametrelerin değerleri değiştirilerek elde edilebilir.

2.2 Konik Skalerleştirme Metodunun Probleme

Uygulanması

(The Application of Conic Scalarization Method for the Problem)

Bu çalışmada iki amaçlı optimizasyon problemlerinden, parçalı maliyet fonksiyonlarından oluşan çevresel ekonomik güç dağıtımını problemini çözebilmek için KSM ile skalerleştirme yapılmıştır. KSM'nin bu tür problemlerin skalerleştirilmesinde ilk kez uygulanıyor olması çalışmanın yenilikçi yönünü göstermektedir. Eş. 13'te skalerleştirilen problemin amaç fonksiyonundaki değişkenler; $w_1=w, w_2=1-w, F_1(x)=F_n(P_{G,n}), F_2(x)=\gamma_n E_n(P_{G,n}), B_1=STYMM$ ve $B_2=STEMM$ olarak alınmıştır. Bu durumda çevresel ekonomik güç dağıtım probleminin amaç fonksiyonu (toplam maliyet fonksiyonu $(TMF_{w,\beta})$) aşağıdaki eşitlikte verilmiştir [1].

$$TMF_{w,\beta} = \text{Min} \left\{ \begin{aligned} & \beta \left[|TM_1(P_{G,n})| + |TM_2(P_{G,n})| \right] + \\ & w.TM_1(P_{G,n}) + (1-w).TM_2(P_{G,n}) \end{aligned} \right\}, \quad (\$/h) \quad (14)$$

Eşitlikteki gösterimde sadece sadelik amacıyla toplam maliyet-1 ($TM_1(P_{G,n})$) ve toplam maliyet-2 $TM_2(P_{G,n})$) şeklinde gösterilmiş olup açılımları aşağıdaki gibidir [1, 7].

$$TM_1(P_{G,n}) = \sum_{n=1}^{N_G} F_n(P_{G,n}) - STYMM, \quad (\$/h) \quad (15)$$

$$TM_2(P_{G,n}) = \sum_{n=1}^{N_G} \gamma_n E_n(P_{G,n}) - STEMM, \quad (\$/h)$$

Eşitliklerdeki ($\$/h$) olarak seçilen toplam yakıt maliyet miktarı ($STYMM$) ve seçilen toplam emisyon maliyet miktarı ($STEMM$) pareto optimal yüzeye ait kullanıcı tarafından belirlenmiş sıfırdan farklı değerlerdir. Burada γ_n , n . üretim biriminin ($\$/ton$) olarak NO_x emisyon maliyetini göstermektedir. Koninin tepe açısı olan β ise $0 \leq \beta \leq \min[w, (1-w)]$ şartını sağlayacak şekilde seçilmektedir.

KSM kullanılarak yapılan çalışmalarda β 'nin büyük alınmasının çözüm üzerinde olumlu etkisi görüldüğünden seçilen bu değer geçerli olduğu aralıkta olabildiğince büyük alınmıştır. Eş. 15'teki $STYMM$ ve $STEMM$ değerlerini bulmak için öncelikle $w=0,0$ (sadece emisyon miktarı optimize edilmektedir) ve $1,0$ (sadece yakıt maliyeti optimize edilmektedir) değerleri alınarak çözüm yapılmıştır. Çünkü Eş. 13'teki β için ($0 \leq \beta \leq \min[w, (1-w)]$) şartı vardır. Dolayısıyla $w=0,0$ veya $w=1,0$ alındığında $\beta=0,0$ olacaktır. Diğer yandan $\beta=0,0$ alındığında KSM, ATM'ye indirgenmektedir. Bu durumda $STYMM=STEMM=0,0$ alındığında, Eş. 13 tamamen Eş. 11'e eşit olmaktadır. Bu nedenle $w=0,0$ ve $w=1,0$ alındığında $STYMM=STEMM=0,0$ alınmalıdır. Fakat w 'nin $0,1$ 'den $0,9$ 'a kadar olan çözümlerinde $\beta > 0,0$ olacağı için $STYMM$ ve $STEMM$ değerleri aşağıdaki eşitliklerden hesaplanmıştır [1, 7].

$$STYMM = TMF_{1,0,0,0}, \quad (\$/h) \quad (16)$$

$$STEMM = TMF_{0,0,0,0}, \quad (ton/h) \quad (17)$$

Eşitliklerdeki $TMF_{1,0,0,0}$ ifadesi Eş. 14'teki $TMF_{w,\beta}$ 'de $w=1,0$ ve $\beta=0,0$ alınmasını, $TMF_{0,0,0,0}$ ifadesi ise $w=0,0$ ve $\beta=0,0$ alındığındaki duruma karşılık gelmektedir.

Eş. 14'teki amaç fonksiyonunu minimize eden optimal çözüm değerleri bulunduktan sonra sistemin toplam yakıt maliyeti ($TYM(P_{G,n})$) ve toplam NO_x emisyon miktarı ($TEM(P_{G,n})$) aşağıdaki eşitliklerden hesaplanarak tabloleştirilmektedir.

$$TYM(P_{G,n}) = \sum_{n=1}^{N_G} F_n(P_{G,n}), \quad (\$/h) \quad (18)$$

$$TEM(P_{G,n}) = \sum_{n=1}^{N_G} E_n(P_{G,n}), \quad (ton/h) \quad (19)$$

3. GENETİK ALGORİTMA METODU (THE GENETIC ALGORITHM METHOD)

Genetik algoritma (GA) metodu geleneksel yöntemlerle çözümü zor veya imkânsız olan problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Algoritma ilk olarak popülasyon diye tabir edilen ve kromozomlarla temsil edilen bir çözüm kümesi ile başlamaktadır. Bu popülasyondan alınan sonuçlar bir öncekinden daha iyi çözümler içereceği beklenen yeni bir popülasyon oluşturmak için kullanılır. Yeni popülasyon oluşturulması için seçilen çözümler uyumluluklarına göre seçilir. Çünkü uyumlu olanların daha iyi sonuçlar üreteceği olasıdır. Bu süreç belli bir durum (örneğin belli sayıda toplum veya en iyi çözümün gelişmesi) sağlanıncaya kadar devam ettirilir [1, 36]. Genetik algoritmanın en iyi çözüme ulaşıncaya kadar geçirdiği süreç; çözüm kümesinin kodlanması, başlangıç popülasyonunun oluşturulması, popülasyondaki çözümlerin uygunluğunun hesaplanması, uygunluğuna göre ata bireylerin seçilmesi, çaprazlama ve mutasyon işlemleriyle yeni bireylerin oluşturulması şeklinde tanımlanabilir [7, 36]. Algoritma probleme uygulanırken ilk olarak bn bit sayısını (çözüm hassasiyeti) göstermek üzere üretim birimlerinin çıkış güçleri olan $P_{G,n}$ değerleri için Eş. 20'deki kısıtı sağlayan rastgele N_G kümesinin elemanlarının bir eksiği (sahnım barası) kadar sayılar atanır [1, 7].

$$0 \leq P_{G,n}^{ilk} \leq 2^{bn} - 1 \quad (20)$$

Atanan bu sayılar sistemdeki üretim birimlerinin mevcut kısıtlarının dışında bir değer alabileceğinden, Eş. 21'e göre haritalama yapılarak, kısıtlara uygun hale getirilir [1, 7].

$$P_{G,n}^{yeni} = P_{G,n}^{\min} + \frac{P_{G,n}^{\max} - P_{G,n}^{\min}}{2^{bn} - 1} \cdot P_{G,n}^{ilk}, \quad n \in N_G \quad (21)$$

Böylece Eş. 5 ve Eş. 6'da verilen eşitsizlik kısıtları otomatik olarak sağlanmış olur. Bu durumda aşağıdaki şartı sağlayan değerler çözüm olarak alınır. Eşitsizlikte yer alan $CP_{yük}$ değeri ceza fonksiyonuna ait katsayıdır.

$$CP_{yük} P_{yük} < \sum_{n=1}^{N_G} P_{G,n} < P_{yük} \quad (22)$$

Böylece oluşan her birey mevcut problemin birer çözümü haline gelir. Bu şekilde birey oluşturma işlemi popülasyon için seçilen birey sayısı (ps) tamamlanıncaya kadar devam eder.

Bu çalışmada problemlerin çözümünde kullanılan uygunluk değeri f_v toplam maliyet fonksiyonuna toplam cezanın eklenmesiyle bulunur. Uygunluk fonksiyonu olan f , Eş. 23'te verilmiştir [1, 7].

$$f = \frac{1}{f_v} = \frac{1}{TMF_{w,\beta} + PFP_{sal}} \quad (23)$$

Burada sistemin kısıtlara uygun olarak işletimi kontrol edilerek toplam maliyet fonksiyonu hesaplanmaktadır. Eşitlikte PFP_{sal} kısıtlara uygun bir optimizasyon

yapılabilmesi için eklenen salınım barası ceza fonksiyonunu göstermektedir. Problemin çözümünde elde edilen sonuçlar, kısıtları ihlal ettiğinde ceza fonksiyonu yardımıyla cezalandırılmaktadır. Ceza fonksiyonu kısıtlara uymayan sonuçları, mümkün olan sınırlara çekebilme için uygunluk fonksiyonuna ceza olarak eklenir. Çözüm sonunda f fonksiyonunun maksimum olması istenir. Salınım barasının PFP_{ref} ceza fonksiyonu değeri Eş. 24'e göre hesaplanmaktadır.

$$PFP_{sal} = \begin{cases} CP_{sal} (P_{G,sal}^{min} - P_{G,sal})^2 & \text{eğer } P_{G,sal} < P_{G,sal}^{min} \\ CP_{sal} (P_{G,sal} - P_{G,sal}^{max})^2 & \text{eğer } P_{G,sal} > P_{G,sal}^{max} \\ 0 & \text{eğer } P_{G,sal}^{min} \leq P_{G,sal} \leq P_{G,sal}^{max} \end{cases} \quad (24)$$

Eşitliklerde yer alan $CP_{yük}$ ve CP_{sal} ifadeleri ceza fonksiyonlarına ait katsayılar olup sıfır ile bir arasında değişen değerlerdir. Bu katsayılar çözümü aranan örnek sistemlere göre kullanıcı tarafından belirlenir.

Cezaların ilavesiyle hesaplanan uygunluk değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanır ($1, 2, 3, \dots, bs$). Uygunluk değeri sıralamasına göre bütün bireyler Eş. 25 kullanılarak puanlanır. Puanlama her bireyin oluşturulacak olan rulet tekerleğindeki alanını belirlemek için yapılır. Yüksek puana sahip (daha uygun) birey rulet tekerleğinde diğer bireylerden daha fazla alana sahip olacağından, seçilme şansı daha yüksek olacaktır [1, 7].

$$puan(TMf)_k = 5 + \text{yuvarla} \left[95 \cdot \left(\frac{ps - k + 1}{ps} \right)^2 \right] \quad (25)$$

Eşitlikte (k) bireyin sıralamadaki yerini, (bs) ise popülasyondaki birey sayısını göstermektedir. Yapılan bu puanlama sonraki iterasyonlarda oluşturulacak popülasyonlar için belirlenecek olan bireylerin seçiminde kullanılır. Bu şekilde puanı yüksek olan birey daha fazla seçilme şansına sahip olacaktır. Eşitlikteki puanlama sistemi seçim işleminin daha başarılı yapılabilmesi için kullanılmıştır. Puanlamaya farklı yaklaşımlar getirilebilir. Yeni popülasyonun oluşturulması için sırasıyla elitizm, seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleri gerçekleştirilir. İlk olarak mevcut popülasyondaki en yüksek puana sahip birey (elit birey) hiçbir işleme uğratılmadan sonraki popülasyona aktarılır. Kalan bireylerin oluşturulması için iki adet birey seçilir. Seçilen bu iki birey çaprazlama oranına bakılarak çaprazlanır. Çaprazlamadan sonra oluşan birey orana bağlı olarak mutasyona uğratılır. Seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonunda oluşan yeni bireyle yük akışı yapılarak maliyet ve emisyon miktarları hesaplanır. Hesaplanan bu değerlere göre yeni cezalar hesaplanarak amaç fonksiyonuna eklenir. Bu işlemler popülasyondaki birey sayısı tamamlanmaya kadar devam eder. Popülasyonun oluşturulmasından sonra bireylerin toplam yakıt maliyetleri ve toplam emisyon miktarları hesaplanarak en iyi çözüm aranır. Bu işlemler tekrarlanarak farklı iterasyonlarda

oluşacak popülasyonlardaki çözümlerin daha iyi olması amaçlanır. Durma kriteri sağlandığında en iyi çözüm belirlenerek algoritma sonlandırılır [1].

4. ÖRNEK PROBLEMLERİN ÇÖZÜMLERİ (SOLUTION OF THE SAMPLE PROBLEM)

Önerilen algoritmanın performans karşılaştırılması yapılabilmesi için, literatürde farklı metodlarla çözümü yapılmış olan IEEE 30 baralı 6 generatörlü test sistemine uygulanmıştır. Bu test sisteminde yakıt maliyet fonksiyonları konveks, fakat emisyon fonksiyonları konveks olmayan ifadeler içermektedir. KSM'nin avantajlarını vurgulayabilmek için hem yakıt maliyet fonksiyonları hem de emisyon fonksiyonları konveks olmayan ifadeler içeren 10 baralı 5 generatörlü test sisteminin önerilen metotla çözümü yapılmıştır. Sistemdeki üretim birimleri için Eş. 15'teki NO_x emisyon maliyeti $\gamma_n=1000$ \$/ton, olarak seçilmiştir. Her iki test sistemi için bu çalışmada kullanılan GA için rulet tekerleği metoduyla seçim, tek noktaya göre çaprazlama, tek bit değiştirmeye mutasyon ve iterasyon sayısına bağlı durma kriteri kullanılmıştır. GA parametrelerinden kromozom uzunluğu 16, popülasyon boyutu (ps) 50, elit kromozom sayısı 2, çaprazlama oranı 0,990, mutasyon oranı 0,03, iterasyon sayısı 200 olarak seçilmiştir. Test sistemlerinde bir nolu generatörün bağlı olduğu bara salınım barası ve baz değerleri ise $S_{baz}=100$ MVA, $U_{base}=230$ kV olarak alınmıştır.

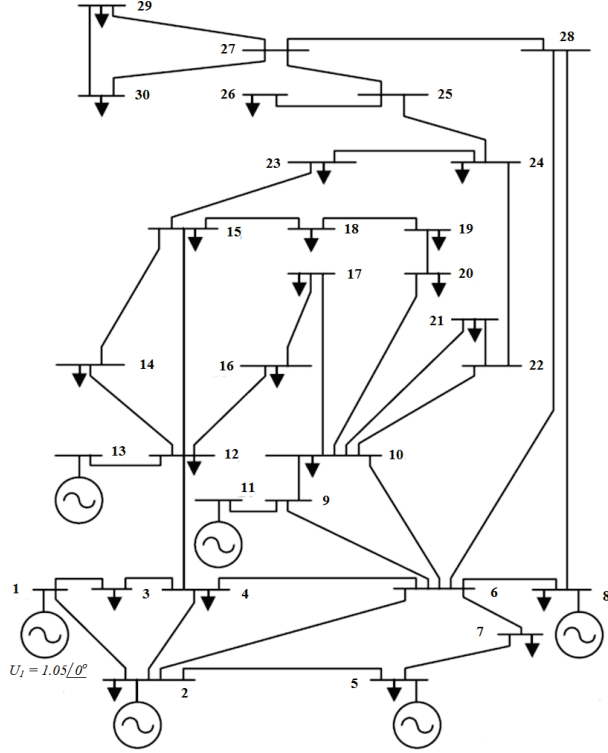
Bu çalışmada test sistemlerinin çözümü için kullanılan Delphi dilinde görsel bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Çözüm parametreleri kullanıcılar tarafından arayüzden kolaylıkla değiştirilebilmektedir. Program INTEL Core i7-2760QM 2.40 GHz işlemcili, 4 GB RAM bellekli ve 64 bit işletim sistemine sahip bir bilgisayarda çalıştırılmıştır.

4.1. Test Sistemi I (Test System I)

Çözümü yapılan Şekil 4'te tek hat diyagramı verilen IEEE 30 baralı 6 generatörlü kayıplı bir güç sistemidir. Önerilen metot bu konveks olmayan çevresel ekonomik güç dağıtım problemine $P_{yük}=283,4$ MW toplam yük talebi için kayıplar dikkate alınarak uygulanmıştır.

Test sisteminde 41 adet iletim hattı ve 21 adet yük barası bulunmaktadır [9]. Test sistemindeki enerji iletim hatlarının nominal π eşdeğer devrelerine ait parametreler Tablo 1'de, sisteme ait aktif ve reaktif yük değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Newton Raphson metoduyla yapılan yük akışı için başlangıç reaktif güç üretim değerleri $Q_{G,n}^{baş}=0,2$ pu, $n \in (2,5,8,11,13)$ alınmıştır [7]. Test sistemindeki üretim birimlerinin yakıt maliyeti her bir birim için aktif güç üretiminin 2. derece fonksiyonu olarak Eş. 1'deki gibi alınmıştır. Her bir üretim birimi tarafından çevreye yayılan NO_x emisyon miktarı ise üretim biriminin çıkış gücü cinsinden Eş. 3'teki gibi konveks olmayan bir fonksiyon şeklinde tanımlanmıştır. Bu bölümde önerilen metotla test sisteminin çözümü yapılmış ve literatürdeki çözümleriyle karşılaştırılması yapılmıştır. Üretim birimlerinin yakıt

maliyeti ve konveks olmayan fonksiyonlar içeren NO_x emisyon değerlerine ait katsayılar ve aktif güç üretim sınırları ise Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 4. Örnek güç sisteminin tek hat diyagramı (One-line diagram of the sample power system)

KSM kullanılarak skalerleştirilen Eş. 14'teki $TMF_{w,\beta}$ 'nin GA ile minimizasyonundan elde edilen w ve β 'nin farklı değerlerine göre optimal çözüm değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Çözüm yapılırken Eş. 15, Eş. 16 ve Eş. 17'deki parametreler $w=\beta=0,0$ alındığında $STEMM=194,240$ kg/h ve $w=1,0, \beta=0,0$ alındığında $STYMM=607,425$ \$/h olarak bulunmuş ve kullanılmıştır.

Tablo 4'de her w değeri için en iyi sonucu alıldığı β değerine karşılık düşen optimal çözüm değerleri verilmiştir. Halbuki aynı w değeri için birden fazla β değeri için çözüm değerleri bulunmuştur. Bunu örneklemek için $w=0,5$ için seçilen 11 farklı β değeri için TYM ve TEM değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Problem ATM'ye göre skalerleştirilmiş olsaydı (ATM'de β ifadesi olmadığından) $w=0,5$ için sadece bir adet TYM ve TEM değerleri bulunacaktı. Halbuki KSM'nin avantajlarından biri ise $w=0,5$ için birden fazla β değerleri elde edilen farklı TYM ve TEM değerlerinin bulunmuş olması ve bunların içinden en iyisinin seçilme olasılığıdır. Bu durum Tablo 5'de gözlenmektedir. Burada sadece β 'nin 11 farklı değeri için çözüm verilmiştir. β 'ya daha farklı değerler verilerek (örneğin 0,001 değerlerinden başlayarak 0,005 gibi artırılarak) daha fazla değerler için bu çalışma yapılabilir ve daha iyi sonuçların yakalanma olasılığı vardır. Bu işlem w 'nin 0,1 ile 0,9 değerleri arasında tüm değerler için bu şekilde tekrarlanır.

Tablo 1. Örnek sistemdeki iletim hatlarının nominal π eşdeğer devrelerine ait seri empedans, paralel admitans ve suseptans değerleri

(Serial impedance, parallel admittance and susceptance values belonging to nominal π equivalent circuits of transmission lines in the sample system)

Baradan baraya	R (pu)	X (pu)	$0,5.B_{cap}$ (pu)	Baradan baraya	R (pu)	X (pu)	$0,5.B_{cap}$ (pu)
1-2	0,0192	0,0575	0,0264	15-18	0,1070	0,2185	---
1-3	0,0452	0,1852	0,0204	18-19	0,0639	0,1292	---
2-4	0,0570	0,1737	0,0184	19-20	0,0340	0,0680	---
3-4	0,0132	0,0379	0,0042	10-20	0,0936	0,2090	---
2-5	0,0472	0,1983	0,0209	10-17	0,0324	0,0845	---
2-6	0,0581	0,1763	0,0187	10-21	0,0348	0,0749	---
4-6	0,0119	0,0414	0,0414	10-22	0,0727	0,1499	---
5-7	0,0460	0,1160	0,0045	21-22	0,0116	0,0236	---
6-7	0,0267	0,0820	0,0102	15-23	0,1000	0,2020	---
6-8	0,0120	0,0420	0,0085	22-24	0,1150	0,1790	---
6-9	---	0,2080	---	23-24	0,1320	0,2700	---
6-10	---	0,5560	---	24-25	0,1885	0,3292	---
9-11	---	0,2080	---	25-26	0,2544	0,3800	---
9-10	---	0,1100	---	25-27	0,1093	0,2087	---
4-12	---	0,2560	---	28-27	---	0,3960	---
12-13	---	0,1400	---	27-29	0,2198	0,4153	---
12-14	0,1231	0,2559	---	27-30	0,3202	0,6027	---
12-15	0,0662	0,1304	---	29-30	0,2399	0,4533	---
12-16	0,0945	0,1987	---	8-28	0,6360	0,2000	0,0214
14-15	0,2210	0,1997	---	6-28	0,0169	0,0599	0,0065
16-17	0,0824	0,1932	---				

Tablo 2. Örnek sistemdeki aktif ve reaktif yük değerleri (Active and reactive load values in the sample system)

Bara no	P (pu)	Q (pu)	Bara no	P (pu)	Q (pu)
1	--	--	16	0,035	0,018
2	0,217	0,127	17	0,090	0,058
3	0,024	0,012	18	0,032	0,009
4	0,076	0,016	19	0,095	0,034
5	0,942	0,190	20	0,022	0,007
6	--	--	21	0,175	0,112
7	0,228	0,109	22	--	--
8	0,300	0,300	23	0,032	0,016
9	--	--	24	0,087	0,067
10	0,058	0,020	25	--	--
11	--	--	26	0,035	0,023
12	0,112	0,075	27	--	--
13	--	--	28	--	--
14	0,062	0,016	29	0,024	0,009
15	0,082	0,025	30	0,106	0,019
			TOPLAM	2,834	1,262

Tablo 3. Örnek sistemdeki üretim birimlerine ait yakıt maliyeti fonksiyonu ile NO_x emisyon fonksiyonu katsayıları ve aktif güç üretim sınırları(The coefficients and active generation limits of the fuel cost, NO_x emission functions belonging to the generation units in the sample system)

Katsayılar	Üretim birimlerinin bağlı olduğu bara no, (n)						
	1	2	5	8	11	13	
Yakıt Maliyet fonksiyonu	a	10	10	20	10	20	10
	b	200	150	180	100	180	150
	c	100	120	40	60	40	100
Emisyon fonksiyonu	d	4,091	2,543	4,258	5,326	4,258	6,131
	e	-5,554	-6,047	-5,094	-3,550	-5,094	-5,555
	f	6,49	5,638	4,586	3,38	4,586	5,151
	g	2,0E-4	5,0E-4	1,0E-6	2,0E-3	1,0E-6	1,0E-5
	h	2,857	3,333	8,0	2,0	8,0	6,667
$P_{G,n}^{min}$ (MW)	5	5	5	5	5	5	
$P_{G,n}^{max}$ (MW)	150	150	150	150	150	150	

Bu işlem oldukça fazla yer ve zaman alacağından bu çalışmada sadece $w=0,5$ için Tablo 5'te durum özetlenmiştir. Tablo 4 ve 5'de yer alan farklı ağırlık değerlerine karşılık KSM ile elde edilen Toplam NO_x emisyon miktarı ve toplam yakıt maliyeti üzerinde w ve β 'nin etkilerini gösteren grafik Şekil 5'te verilmiştir. Örnek sistem için önerilen metotla elde edilen toplam yakıt maliyeti (TYM), toplam NO_x emisyon miktarı (TEM) ve iletim hattı kayıpları, literatürdeki farklı algoritmalar ile elde edilmiş sonuçlar ile ağırlık değeri $w=0,0$ ve $1,0$ için Tablo 6'da karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken bütün algoritmalarda iletim hattı kayıplarının yük akışı yapılarak bulunmuş olmasına ve skalerleştirilmiş fonksiyon kullanılmasına dikkat edilmiştir. Değerlendirmelerin doğru yapılabilmesi için aynı örnek problemlerin bütün algoritmalar için aynı şartlar ve kısıtlar altında çözülmüş olmasına özen gösterilmiştir. Tablo 6'daki algoritmaların seçimi; test probleminin çözümünde aynı

sayısal parametre değerlerinin kullanıldığına dikkat edilerek yapılmıştır. Tablo 6 incelendiğinde sadece NO_x emisyon miktarına ($w=0,0$) göre optimizasyon yapıldığına göre önerilen metotla NSGA-II metodu hariç diğerlerine göre daha iyi sonuç alınmıştır. Sadece yakıt maliyetine ($w=1,0$) göre optimizasyon yapıldığında ise önerilen metotla diğer algoritmalarından daha iyi sonuç vermiştir. Bu durum önerilen metodun farklı problemlere de rahatlıkla uygulanabileceğini ve en iyi değeri yakalama şansı olduğunu göstermektedir. KSM'nin avantajı w 'nin 0,1 ile 0,9 değerleri arasında daha fazla alternatif sunması şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

4.2. Test Sistemi II (Test System II)

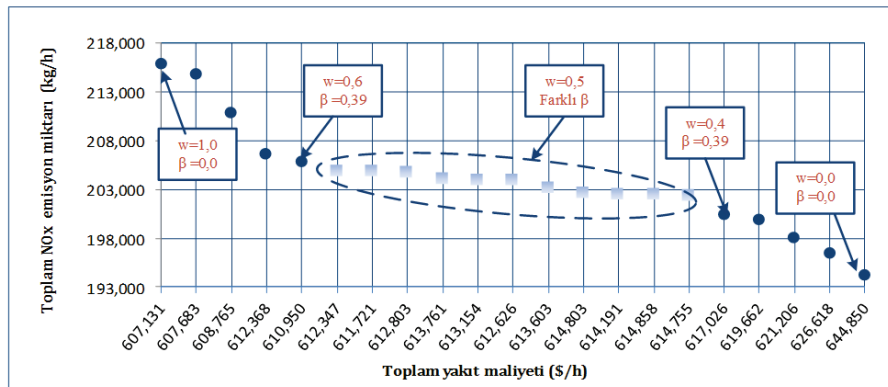
Tek hat diyagramı Şekil 6'da verilen ikinci test sistemi olarak 10 baralı 5 generatörlü güç sistemi seçilmiştir. Sistemde hem yakıt maliyeti hem de NO_x emisyon miktarı

Tablo 4. KSM ile elde edilmiş, w ve β 'nin bazı değerleri için üretim birimlerinin çıkış güçleri, toplam yakıt maliyeti, toplam NO_x emisyon miktarı ve iletim hatlarındaki kayıp miktarları (The output powers, total fuel cost, total NO_x emission amount and the amount of the loss in the transmission lines of the generation units obtained by CSM for some values of w ve β)

w	β	Üretim birimlerinin çıkış güçleri (MW)							TYM	TEM	$P_{kayıp}$
		$P_{G,1}$	$Q_{G,1}$	$P_{G,2}$	$P_{G,5}$	$P_{G,8}$	$P_{G,11}$	$P_{G,13}$			
1,0	0,0	08,4873	28,4090	32,5067	64,3895	95,7082	52,5348	32,4664	607,131	220,234	2,6929
0,9	0,09	14,7962	30,1732	32,7216	58,3810	90,9902	56,9658	32,3858	607,683	214,795	2,8406
0,8	0,19	18,5679	27,0043	32,4933	64,4359	85,8791	46,5495	38,0672	608,764	210,800	2,5929
0,7	0,29	17,4755	32,1230	29,0281	56,2466	76,8364	58,6361	48,0867	612,367	206,564	2,9094
0,6	0,39	21,0405	28,9746	33,8230	59,9353	78,4090	52,4884	40,4042	610,950	205,843	2,7004
0,5	0,49	22,9026	27,8277	32,4933	64,4127	75,3199	49,5189	41,3175	612,347	204,837	2,5649
0,4	0,39	24,2634	31,3456	36,7509	56,9658	66,0806	58,4505	43,6813	617,026	200,414	2,7925
0,3	0,29	23,9482	33,8930	39,8132	52,4884	62,7387	64,3895	42,9829	619,662	199,845	2,9609
0,2	0,19	30,0640	29,8974	39,3565	58,4505	61,5031	53,9731	42,8083	621,206	198,069	2,7555
0,1	0,09	33,9424	31,9657	39,3700	55,1331	55,3248	58,4505	44,0977	626,617	196,412	2,9185
0,0	0,0	41,0132	32,7856	46,2735	53,9731	39,2894	55,4811	50,5446	644,850	194,192	3,1749

Tablo 5. $w=0,5$ değeri için β değerleri değiştirilerek elde edilen üretim birimlerinin çıkış güçleri, toplam yakıt maliyeti, toplam NO_x emisyon miktarı ve iletim hatlarındaki kayıp miktarları (The output powers, total fuel cost, total NO_x emission amount and the amount of the loss in the transmission lines of the generation units obtained by changing β values for $w=0,5$ value)

w	β	Üretim birimlerinin çıkış güçleri (MW)							TYM (\$/h)	TEM (kg/h)	$P_{kayıp}$ (MW)
		$P_{G,1}$	$Q_{G,1}$	$P_{G,2}$	$P_{G,5}$	$P_{G,8}$	$P_{G,11}$	$P_{G,13}$			
0,5	0,01	24,1539	29,8942	32,4933	61,4432	69,6752	55,6435	42,6471	614,754	202,293	2,6562
	0,05	24,9083	28,2375	36,4957	58,6593	73,2698	46,5495	46,2735	614,857	202,408	2,7561
	0,10	23,3676	29,5321	35,9182	57,1282	72,8205	51,7460	45,2125	614,191	202,451	2,7930
	0,15	21,4181	27,9661	39,8669	64,3895	69,6752	51,0269	39,5446	614,802	202,614	2,5212
	0,20	23,7025	30,7549	36,6838	52,3956	75,3199	54,5763	43,6813	613,602	203,155	2,9594
	0,25	22,7275	29,9769	36,1197	57,5690	74,8706	55,5043	39,3700	612,626	203,835	2,7611
	0,30	24,0214	30,2776	39,3834	52,3028	77,0330	54,2283	39,3700	613,154	203,862	2,9389
	0,35	21,2405	33,3492	34,9243	53,9731	72,4274	64,3895	39,3700	613,761	204,038	2,9248
	0,40	23,0182	32,7132	32,4933	52,4652	75,9939	61,4432	40,9817	612,802	204,730	2,9955
	0,45	22,2911	29,4822	34,9243	58,4505	76,8926	53,9963	39,5849	611,721	204,811	2,7397
0,49	22,9026	27,8277	32,4933	64,4127	75,3199	49,5189	41,3175	612,347	204,837	2,5649	



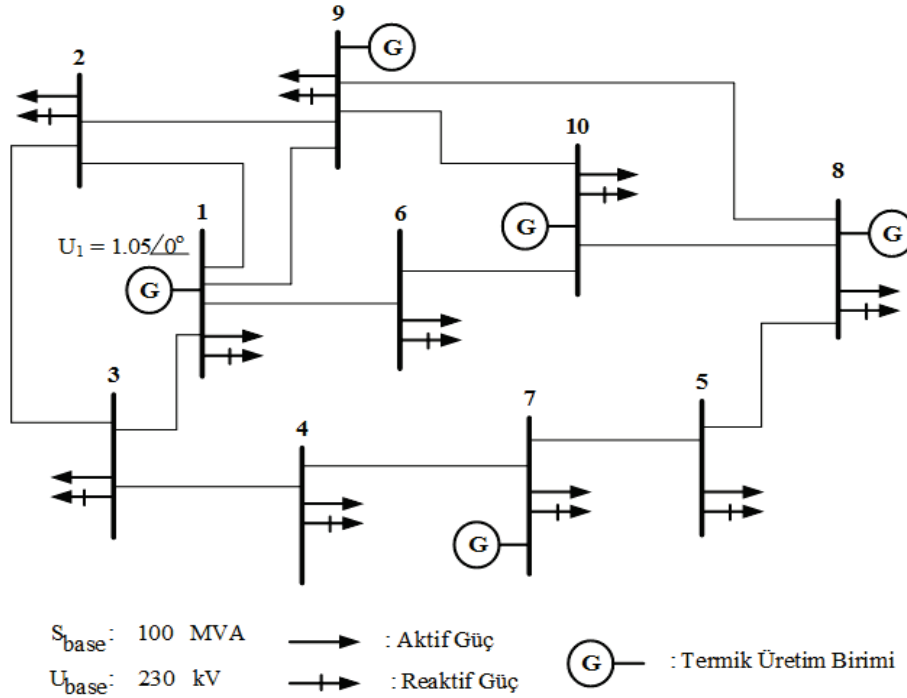
Şekil 5. Toplam NO_x emisyon miktarı ve toplam yakıt maliyeti üzerinde w ve β 'nin etkisi (The effect of w ve β on total NO_x emission amount and total fuel cost)

fonksiyonları konveks olmayan fonksiyonlardan oluşmaktadır. Bu sistemin KSM ile skalerleştirilmesiyle, ATM ile bulunamayan pareto optimal değerlerinin bulunması amaçlanmıştır. Önerilen metod, konveks olmayan çevresel ekonomik güç dağıtım problemine 225,0 MW yük

talebi için uygulanmıştır. Bu test sisteminde 13 adet iletim hattı ve 10 adet yük barası bulunmaktadır [1, 7]. Bu test sistemi bu değerlerle ilk kez bu çalışmada kullanıldığından literatürdeki farklı algoritmalarla karşılaştırılamamıştır. Fakat metodun performans değerlendirilmesi bir önceki test

Tablo 6. $w=0,0$ ve $w=1,0$ için elde edilen optimal çözüm değerlerinin literatürde farklı metotlarla bulunan sonuçlarla karşılaştırılması(The comparison of the optimum solution values obtained for $w=0,0$ ve $w=1,0$ with the results found by different methods in literature)

Metotlar	$w=0,0$ (sadece emisyon miktarı optimize edilmektedir)			$w=1,0$ (sadece yakıt maliyeti optimize edilmektedir)		
	TYM (\$/h)	TEM (kg/h)	$P_{kayıp}$ (MW)	TYM (\$/h)	TEM (kg/h)	$P_{kayıp}$ (MW)
DGA [11]	645,0850	0,1942	3,1100	608,0658	0,2193	3,4180
FSBF [18]	645,3981	0,1942	3,0300	607,5081	0,2196	3,1900
NSBF [18]	647,7413	0,1944	2,9200	607,5901	0,2211	3,3100
MBFA [19]	644,4300	0,1942	3,0300	607,6700	0,2198	3,2600
PSO [20]	642,9000	0,1942	3,2800	607,8400	0,2192	3,2900
NSGA-II (2) [28]	648,7090	0,1942	3,0000	613,6759	0,2223	5,9500
NSGA-II+CAO [28]	650,7343	0,1942	3,1000	613,5488	0,2205	5,9500
NSGA-II (3) [29]	645,4787	0,1942	6,0400	608,1248	0,2199	3,4658
NSGA-II+DCD [29]	645,3998	0,1942	6,1900	608,1283	0,2199	3,4548
NSGA-II+DCD+CE [29]	645,6472	0,1942	3,3313	608,1247	0,2198	3,4709
PSO [32]	645,2300	0,1942	3,0900	607,7800	0,2198	3,3100
MOPSO [32]	644,7400	0,1942	3,0800	607,7900	0,2193	3,3300
FCPSO [33]	642,8964	0,1942	2,9200	607,7860	0,2201	3,3500
GA [34]	645,2200	0,1942	3,0900	607,7800	0,2199	3,3200
NSGA [35]	647,2510	0,1943	3,0403	608,2450	0,2166	3,4300
NPGA [36]	644,2300	0,1943	3,1100	608,0600	0,2207	3,3700
NSGA-II [37]	644,1330	0,1941	3,1400	607,8010	0,2189	3,3000
SPEA [38]	644,7700	0,1943	3,1900	607,8600	0,2176	3,3200
Önerilen Metot (GA-KSM)	644,8500	0,1941	3,1749	607,1310	0,2202	2,6929

**Şekil 6.** Örnek güç sisteminin tek hat diyagramı (One-line diagram of the sample power system)

sisteminde yapıldığından, bu test sisteminin çalışılmasının nedeni ileride benzer konuda çalışma yapacaklara kaynak oluşturacağını düşünülmesidir. Şekil 6'daki test

sistemindeki enerji iletim hatlarının nominal π eşdeğer devrelerine ait parametreler Tablo 7'de, sisteme ait aktif ve reaktif yük değerleri Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 7. Örnek sistemdeki iletim hatlarının nominal π eşdeğer devrelerine ait seri empedans, paralel admitans ve susseptans değerleri (Serial impedance, parallel admittance and susceptance values belonging to nominal π equivalent circuits of transmission lines in the sample system)

Baradan baraya	R (pu)	X (pu)	B _{cap} (pu)	Baradan baraya	R (pu)	X (pu)	B _{cap} (pu)
1-2	0,0600	0,2400	0,0200	4-7	0,0600	0,2400	0,0200
1-3	0,0600	0,2400	0,0200	5-7	0,0400	0,1600	0,0150
1-6	0,0400	0,1600	0,0150	5-8	0,0600	0,2400	0,0200
1-9	0,0100	0,0400	0,0100	6-10	0,0600	0,2400	0,0200
2-3	0,0200	0,0800	0,0300	8-9	0,0800	0,3200	0,0250
2-9	0,0400	0,1600	0,0150	8-10	0,0400	0,1600	0,0150
3-4	0,0600	0,2400	0,0200	10-22	0,0727	0,1499	0,0150

Tablo 8. Örnek sistemdeki aktif ve reaktif yük değerleri (Active and reactive load values in the sample system)

Bara no	P (pu)	Q (pu)	Bara no	P (pu)	Q (pu)
1	0,300	0,145	6	0,200	0,097
2	0,200	0,097	7	0,150	0,0726
3	0,300	0,145	8	0,200	0,097
4	0,200	0,097	9	0,200	0,097
5	0,300	0,145	10	0,200	0,097
			TOPLAM	2,250	1,0896

Tablo 9. Örnek sistemdeki üretim birimlerine ait parçalı yakıt maliyeti fonksiyonu ile NO_x emisyon fonksiyonu katsayıları ve aktif güç üretim sınırları (Piecewise fuel cost function with NO_x emission function coefficients belonging to the generation units in the sample system and active power generation limits)

Katsayılar	Üretim birimlerinin bağlı olduğu bara no, (n)	Üretim birimlerinin bağlı olduğu bara no, (n)				
		1	7	8	9	10
Yakıt Maliyet fonksiyonu	a_{1n}	20,0	10,0	10,0	10,0	10,0
	b_{1n}	1,8	1,8	2,0	1,5	1,5
	c_{1n}	4,E-3	1,2E-2	1,0E-2	6,0E-2	1,0E-2
	a_{2n}	--	34,0	--	34,0	--
	b_{2n}	--	1,5	--	1,2	--
	c_{2n}	--	1,2E-2	--	6,0E-3	--
Emisyon fonksiyonu	d	4,258	4,091	5,326	5,000	5,326
	e	-5,094	-5,554	-3,550	-6,047	-3,550
	f	4,586	6,49	3,38	5,638	3,38
	g	1,0E-6	2,0E-4	2,0E-3	5,0E-4	2,0E-3
u	h	8,0	2,857	2,0	3,333	2,0
	$P_{G,n}^{min}$ (MW)	5	5	5	5	5
	$P_{G,n}^{büküm}$ (MW)	--	80	--	80	--
	$P_{G,n}^{max}$ (MW)	150	150	150	150	150

Newton Raphson metoduyla yapılan yük akışı için başlangıç reaktif güç üretim değerleri $Q_{G,n}^{baş}=0,2 pu$, $n \in (7,8,9,10)$ alınmıştır [1]. Test sistemindeki üretim birimlerinin maliyet fonksiyonu 1, 8 ve 10 nolu üretim birimleri için Eş. 1'deki, 7 ve 9 nolu üretim birimleri için parçalı bir fonksiyon olarak Eş. 2'deki gibi alınmıştır. Her bir üretim birimi tarafından çevreye yayılan NO_x emisyon miktarı ise Eş. 3'teki gibi konveks olmayan bir fonksiyon şeklinde tanımlanmıştır. Çevresel ekonomik güç dağıtım probleminin çözümünün uygulandığı bu test sistemindeki amaç fonksiyonu KSM ile skalerleştirilip GA çözülmüştür. Üretim birimlerinin yakıt maliyet fonksiyonları ve konveks olmayan ifadeler içeren NO_x emisyon fonksiyonuna ait katsayılar ve aktif güç üretim sınırları ise Tablo 9'da verilmiştir. Bu test sistemi için KSM

kullanılarak skalerleştirilen Eş. 14'teki amaç fonksiyonu $TMF_{w,\beta}$, GA ile w ve β 'nin farklı değerlerine göre çözümlenerek elde edilen optimal çözüm değerleri Tablo 10'da verilmiştir. Önerilen metotla çözüm yapılırken Eş. 15, Eş. 16 ve Eş. 17'de açıklanan parametrelerden $w=\beta=0,0$ iken $STEMM=166,730 kg/h$ ve $w=1,0$, $\beta=0,0$ iken ise $STYMM=516,848 \$/h$ olarak bulunmuş ve alınmıştır. KSM'nin avantajlarından biri olan farklı pareto optimal değerlerin bulunmasını gösteren $w=0,5$ değeri için elde edilen farklı çözümler Tablo 11'de verilmiştir. Kullanıcıya $w=0,5$ değerinde olduğu gibi w 'nin 0,1 ile 0,9 değerleri arasında farklı birçok değeri için β değeri değiştirilerek farklı birçok pareto-optimal çözüm değerleri sunulabilir. Önerilen metotla optimal çözümü yapılan test sisteminin sonuçlarının

verildiği Tablo 10 ve 11'deki toplam yakıt maliyeti ve toplam NO_x emisyon miktarı üzerinde (w , β)'nin etkilerini gösteren grafik Şekil 7'de verilmiştir.

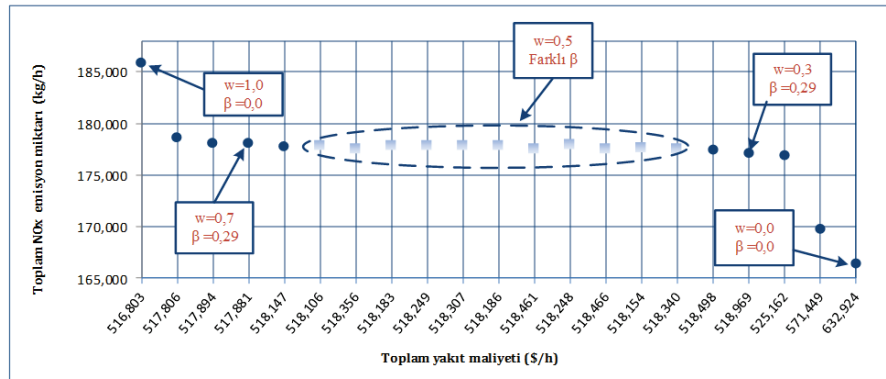
Şekilden sistemin işleticilerine daha fazla optimal noktada çalışma imkanının sunulduğu görülmektedir. Bu da KSM'nin avantajı olarak ortaya çıkmaktadır.

Tablo 10. KSM ile elde edilmiş, w ve β 'nin bazı değerleri için üretim birimlerinin çıkış güçleri, toplam yakıt maliyeti, toplam NO_x emisyon miktarı ve iletim hatlarındaki kayıp miktarları (The output powers, total fuel cost, total NO_x emission amount and the amount of the loss in the transmission lines of the generation units obtained by CSM for some values of w ve β)

w	β	Üretim birimlerinin çıkış güçleri (MW)						TYM	TEM	P _{kayıp}
		P _{G,1}	Q _{G,1}	P _{G,7}	P _{G,8}	P _{G,9}	P _{G,10}			
1,0	0,0	61,017	10,3660	23,518	15,410	88,140	38,921	516,803	185,882	2,0086
0,9	0,09	59,466	09,7661	23,023	23,129	80,598	40,656	517,806	178,638	1,8745
0,8	0,19	57,229	09,4247	25,006	23,129	80,350	41,081	517,894	178,119	1,7973
0,7	0,29	56,544	09,3659	25,501	22,562	80,350	41,825	517,881	178,100	1,7845
0,6	0,39	54,944	09,0293	27,661	22,810	80,067	41,223	518,147	177,710	1,7077
0,5	0,49	54,717	09,2679	25,926	23,094	80,350	42,675	518,106	177,813	1,7641
0,4	0,39	54,147	09,2500	25,360	25,678	80,350	41,223	518,498	177,456	1,7608
0,3	0,29	53,404	09,5430	23,094	27,059	80,067	43,206	518,969	177,102	1,8317
0,2	0,19	44,631	09,3642	22,102	41,258	80,102	38,709	525,162	176,928	1,8054
0,1	0,09	63,666	08,4937	40,125	43,525	23,377	55,953	571,449	169,780	1,6484
0,0	0,0	50,261	08,5852	36,726	36,691	43,454	59,529	632,924	166,359	1,6634

Tablo 11. $w=0,5$ değeri için β değerleri değiştirilerek elde edilen üretim birimlerinin çıkış güçleri, toplam yakıt maliyeti, toplam NO_x emisyon miktarı ve iletim hatlarındaki kayıp miktarları (The output powers, total fuel cost, total NO_x emission amount and the amount of the loss in the transmission lines of the generation units obtained by changing β values for $w=0,5$ value)

w	β	Üretim birimlerinin çıkış güçleri (MW)						TYM (\$/h)	TEM (kg/h)	P _{kayıp} (MW)
		P _{G,1}	Q _{G,1}	P _{G,7}	P _{G,8}	P _{G,9}	P _{G,10}			
0,5	0,01	54,368	08,9832	27,661	23,943	80,067	40,656	518,340	177,508	1,6977
	0,05	54,731	09,1749	26,528	23,094	80,067	42,321	518,154	177,631	1,7424
	0,10	54,029	09,1974	25,785	25,395	80,350	41,188	518,466	177,472	1,7485
	0,15	53,734	09,2964	25,466	24,262	80,917	42,391	518,248	177,936	1,7719
	0,20	54,067	09,2079	25,714	25,395	80,350	41,223	518,461	177,475	1,7510
	0,25	54,376	09,0205	27,661	23,094	80,350	41,223	518,186	177,794	1,7062
	0,30	56,852	09,6237	23,094	25,466	80,350	41,081	518,307	177,821	1,845
	0,35	53,974	08,9649	28,051	23,094	80,350	41,223	518,249	177,759	1,6937
	0,40	54,295	08,9757	28,086	22,739	80,350	41,223	518,183	177,841	1,6957
	0,45	53,944	08,9851	27,661	23,802	80,067	41,223	518,356	177,474	1,6989
0,49	54,717	09,2679	25,926	23,094	80,350	42,675	518,106	177,813	1,7641	



Şekil 7. Toplam NO_x emisyon miktarı ve toplam yakıt maliyeti üzerinde w ve β 'nin etkisi (The effect of w ve β on total NO_x emission amount and total fuel cost)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Literatürde genelde çok amaçlı optimizasyon problemlerinin skalerleştirilmesinde giriş bölümünde bahsedilen yedi farklı skalerleştirme metodu kullanılmaktadır. Bu çalışmada alternatif olarak konveks olmayan fonksiyonları skalerleştirmek için KSM'nin uygulaması gösterilmiştir. KSM hem konveks hem de konveks olmayan fonksiyonlar üzerine kolaylıkla uygulanabilmektedir. Çözümü yapılan test sistemlerinde KSM'nin diğer skalerleştirme metotlarına göre avantajları belirtilmiştir. Diğer skalerleştirme metotlarıyla elde edilemeyen pareto optimal çözümler KSM ile kolaylıkla bulunmuştur. Bu çalışmada skalerleştirilmiş çevresel ekonomik güç dağıtım problemi GA yöntemi ile çözülmüştür. Örnek olarak 30 baralı 6 generatörlü ve 10 baralı 5 generatörlü iki adet kayıplı sistem üzerinde metodun uygulaması yapılmıştır. İletim hattı kayıpları Newton Raphson yük akışı metoduyla bulunmuştur.

Test sistemi I için elde edilen sonuçlar, literatürde farklı metotlarla elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Önerilen metotla elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlara yakın olduğu görülmüştür. Performans açısından literatürdeki çalışmalarla benzer olmakla birlikte sistem işleticilerine daha fazla alternatif sunması KSM metodunun ilave avantajıdır. Bu nedenle KSM ile skalerleştirme metodu sonraki çalışmalarda farklı çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü için önerilebilir. Bilindiği kadarıyla KSM, ikinci dereceden parçalı maliyet fonksiyonlarına sahip çok amaçlı çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerinin skalerleştirilmesinde ilk kez uygulanmıştır. Dolayısıyla bu da çalışmanın yenilikçi yönü olarak belirtilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Özyön S., Genetik algoritmanın bazı çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerine uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2009.
2. Wood A.J. ve Wollenberg B.F., Power Generation Operation and Control, John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 1996.
3. Özyön S., Temurtaş H., Durmuş B., Kuvat G., Charged system search algorithm for emission constrained economic power dispatch problem, Energy, 46, 420-430, 2012.
4. Aydın D., Özyön S., Yaşar C., Liao T., Artificial bee colony algorithm with dynamic population size to combined economic and emission dispatch problem, Int. J. Electr. Power Energy Syst., 54, 144-153, 2014.
5. Modiri-Delshad M., Abd Rahim N., Multi-objective backtracking search algorithm for economic emission dispatch problem, Appl. Soft Comput., 40, 479-494, 2016.
6. Gasimov R.N., Characterization of the Benson proper efficiency and scalarization in nonconvex vector optimization, Lect. Notes Econ. Math. Syst., 507, 189-198, 2001.
7. Yaşar C., Özyön S., Solution to scalarized environmental economic power dispatch problem by using genetic algorithm, Int. J. Electr. Power Energy Syst., 38 (1), 54-62, 2012.
8. Yaşar C., A pseudo spot price of electricity algorithm applied to environmental economic active power dispatch problem, Turk. J. Elec. Eng. and Comp. Sci., 20, (6), 990-1005, 2012.
9. Augusteen W.A., Kumari R., Rengaraj, R., Economic and various emission dispatch using differential evolution algorithm, 3rd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), Chennai, 74-78, 2016.
10. Yu X., Yu X., Lu Y., Sheng J., Economic and emission dispatch using ensemble multi-objective differential evolution algorithm, Sustainability, 10, 418-465, 2018.
11. Bhattacharya A., Chattopadhyay P.K., Hybrid differential evolution with biogeography-based optimization algorithm for solution of economic emission load dispatch problems, Expert Syst. Appl., 38 (11), 14001-14010, 2011.
12. Ma H., Yang Z., You P., Fei M., Multi-objective biogeography-based optimization for dynamic economic emission load dispatch considering plug-in electric vehicles charging, Energy, 135, 101-111, 2017.
13. Özyön S., Yaşar C., Durmuş B., Temurtaş H., Opposition-based gravitational search algorithm applied to economic power dispatch problems consisting of thermal units with emission constraints, Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci., 23, 2278-2288, 2015.
14. Palanichamy C., Babu N.S., Analytical solution for combined economic and emissions dispatch, Electr. Power Syst. Res., 78 (7), 1129-1137, 2008.
15. Abdelaziz A.Y., Ali E.S., Abd Elazim S.M., Implementation of flower pollination algorithm for solving economic load dispatch and combined economic emission dispatch problems in power systems, Energy, 101, 506-518, 2016.
16. Pandi V.R., Panigrahi B.K., Hong W.C., Sharma R., A multiobjective bacterial foraging algorithm to solve the environmental economic dispatch problem, Energy Sources, Part B, 9, 236-247, 2014.
17. Hota P.K., Barisal A.K., Chakrabarti R., Economic emission load dispatch through fuzzy based bacterial foraging algorithm, Int. J. Electr. Power Energy Syst., 32 (7), 794-803, 2010.
18. Zhang Y., Gong D., Ding Z., A bare-bones multi-objective particle swarm optimization algorithm for environmental/economic dispatch, Information Sciences, 192, 213-227, 2012.
19. Liu T., Jiao L., Ma W., Ma J., Shang R., Cultural quantum-behaved particle swarm optimization for environmental/economic dispatch, Appl. Soft Comput., 48, 597-611, 2016.
20. Basu M., Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution, Appl. Soft Comput., 11 (2), 2845-2853, 2011.

21. Zhang H., Yue D., Xie X., Hu S., Weng S., Multi-elite guide hybrid differential evolution with simulated annealing technique for dynamic economic emission dispatch, *Appl. Soft Comput.*, 34, 312-323, 2015.
22. Alawode K.O., Jubril A.M., Komolafe O.A., Multiobjective optimal power flow using hybrid evolutionary algorithm, *Int. J. Electr. Electron. Eng.*, 4 (7) 506-511, 2010.
23. Dhanalakshmi S., Kannan S., Mahadevan K., Baskar S., Application of modified NSGA-II algorithm to combined economic and emission dispatch problem, *Int. J. Electr. Eng. Comput.*, 33 (4), 992-1002, 2011.
24. Guo C.X., Zhan J.P., Wu Q.H., Dynamic economic emission dispatch based on group search optimizer with multiple producers, *Electr. Power Syst. Res.*, 86, 8-16, 2012.
25. Cai J., Ma X., Li Q., Li L., Peng H., A multi-objective chaotic ant swarm optimization for environmental/economic dispatch, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 32 (5), 337-344, 2010.
26. Abido M.A., Multiobjective particle swarm optimization for environmental economic dispatch problem, *Electr. Power Syst. Res.*, 79 (7), 1105-1113, 2009.
27. Abido M.A., Multiobjective evolutionary algorithm for electric power dispatch problem, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 10 (3), 315-329, 2006.
28. Abido M.A., A niched pareto genetic algorithm for multiobjective environmental economic power dispatch, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 25 (2), 97-105, 2003.
29. Ah King R.T.F., Rughooputh H.C.S., Deb K., Evolutionary multi-objective environmental/economic dispatch: Stochastic vs. deterministic approaches, *Lect. Notes Comput. Sci.*, 34 (10):677-691, 2005.
30. Niknam T., Narimani M.R., Jabbari M., Malekpour A.R., A modified shuffle frog leaping algorithm for multi-objective optimal power flow, *Energy*, 36, 6420-6432, 2011.
31. Dağdeviren U., Kaymak B., Investigation of affecting optimum cost design of reinforced concrete retaining walls using artificial bee colony algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 239-253, 2018.
32. Eke İ., Tezcan S.S., Çelik C., Solving economic load dispatch problem valve-point effects using filled function, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (2), 429-438, 2017.
33. Çanakoğlu A., Yetgin A.G., Temurtaş H., Turan M., Induction motor parameter estimation using metaheuristic methods, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 22 (5), 1177-1192, 2014.
34. Üstün Ö., Çok amaçlı portföy optimizasyon problemi ve çözüm yaklaşımları, *Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir*, 2007.
35. Goldberg D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.