

ZAMANA BAĞLI ELEKTRİK FİYATLANDIRMASINA GÖRE TEK MAKİNE ÇİZELGELEME PROBLEMİ

Mustafa TACETTİN*, Ümit TERZİ, Alpaslan FIGLALI

Kocaeli Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İzmit, Kocaeli
m.tacettin@brisa.com.tr, umitterzi@gmail.com, figlalia@kocaeli.edu.tr

Geliş Tarihi: 7 Ağustos 2009; Kabul Ediliş Tarihi: 6 Temmuz 2011
Bu makale 2 kez düzeltilmek üzere 242 gün yazarlarda kalmıştır.

ÖZET

Gelişen birçok ülkede, talep yükünün dengelenmesi için günün farklı zaman dilimlerinde birim elektrik tüketiminin farklı fiyatlandırıldığı, TOU (Time of Usage) adı verilen bir tarife uygulanmaktadır. Bu çalışmada, birim zamandaki elektrik tüketimleri farklı olan işlerin çizelgelemesinde, TOU tarifesine göre toplam elektrik maliyetinin en aza indirilmesi amacıyla çözüm yolları önerilmiştir. Başarımın değerlendirilmesi amacıyla bir lastik fabrikasındaki çizelgeleme problemi verilerine dayanılarak üretilen problemler kullanılmıştır. Tek makine çizelgeleme problemi olarak ele alınan problemin NP-zor olduğu gösterilmiştir. İşlerin gecikmemesinin birincil amaç olarak ele alındığı problemde, toplam elektrik maliyeti en az olan çizelgenin belirlenmesi ikincil amaçtır. Çalışmada matematiksel bir model önerilmiş ve iş sayısı az olan (≤ 15) problemler için optimum sonuçlar elde edilmiştir. Uygulamada karşılaşılan büyük boyutlu problemlerin çözümü için ise Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılmıştır. Algoritmanın gerçek verilere dayanılarak çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar ile fabrikada uygulanan çizelgeleme algoritmasının başarımı karşılaştırıldığında, herhangi bir gecikmeye yol açmaksızın toplam elektrik maliyetinde %10'u aşan bir iyileştirme elde edilebileceği hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tek makine çizelgeleme, diferansiyel gelişim algoritması, enerji maliyeti

SINGLE MACHINE SCHEDULING PROBLEM WITH TIME DEPENDENT ELECTRICITY PRICE

ABSTRACT

In many developing countries, TOU (Time of Usage) tariff is used for electricity, where the price depends on the time of usage, in order to flatten the system load curve. In this study, solution methods are proposed to minimize total electricity cost, for scheduling of jobs in a single machine with different unit time energy consumption under TOU tariff, without concession for jobs' tardiness. Problem instances are generated based on a tyre manufacturing plant environment and are used to evaluate the quality of the proposed method. It is proven that the single machine scheduling problem for TOU tariff is NP-Hard. The primary objective of the problem is minimizing the total tardiness while minimizing the total electricity cost is the secondary objective. A mathematical model is proposed for the problem, and optimum results are achieved when the number of jobs is small (≤ 15). For the problem instances that represent real-world problem sizes, differential evolution algorithm (DEA) is used. The results of DEA are compared with the scheduling algorithm used in the tyre manufacturing plant. More than %10 improvement opportunity for electricity expenditure is observed, without causing any tardy jobs.

Keywords: Single machine scheduling, differential evolution algorithm, energy costs

* İletişim yazarı

1. GİRİŞ

Enerji maliyetleri, son yıllarda petrol fiyatlarındaki büyük dalgalanmalara paralel olarak giderek önemini arttırmaktadır. İşletmelerin, rekabette avantajlı olabilmek için, üretim maliyetlerinde enerjinin payını da göz önünde bulundurmaları gerekmektedir. Gelişen birçok ülkede, talep profilinden dolayı elektrik üreten şirketler, TOU (Time of Usage) olarak adlandırılan bir tarife uygulamaktadır. Sistemin yük eğrisinin düzleştirilmesinin amaçlandığı tarifede, farklı zaman dilimlerinde (periyot) elektrik tüketimi için farklı fiyatlandırma uygulanmaktadır.

Bazı endüstri alanlarında, elektrik maliyetlerinin kontrol altına alınabilmesi için çizelgeler bu tarife göre yapılmaktadır. Ashok (2006) tarafından, çelik imalatında enerji tüketiminin enazlanması için, karmaşık tam sayılı matematiksel bir model önerilmiştir. Bu model partilerin belirlenen bir periyot içinde hangi makinede hangi sırada üretileceğini belirler. Ancak model, her bir zaman dilimi için ikili (binary) değişken kullanımını önermiştir ve bu tür bir model ile zaman diliminin dakika olarak belirlendiği durumlarda makul sürede çözüm elde edilemez. Lee (2007)'nin optimum sözleşme kapasite seçimiyle ilgili çalışmada önerilen modelde, toplam elektrik maliyetini eniylemek için sözleşme maliyeti ve sözleşmede belirtilen kapasiteyi aşma durumunda ödenen ceza maliyetleri ele alınmıştır.

Meta-sezgisel yöntemler; karıncalar, genetik seçim, sinir ağları gibi doğadaki bazı başarılı yapıların çalışma prensiplerinden esinlenerek geliştirilmiş çözüm yaklaşımlarıdır. Sezgisel yöntemlerle karşılaştırıldığında, daha geniş bir çözüm uzayını tarayabilen, farklı problemler üzerine uygulanabilen meta-sezgiseller, özellikle konveks olmayan, türevlenemeyen, klasik çözüm yöntemleriyle çok daha uzun sürede çözülebilen ya da modelleme zorluklarının karşılandığı problemlerde ve bir çok endüstri mühendisliği probleminde sıklıkla kullanılmaktadırlar (Tapkan vd. 2010; Akgül vd. 2008).

Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) popülasyon tabanlı yeni bir meta-sezgisel eniyileme yöntemi

midir. Yöntem, vektörler arasındaki benzerliklerden yararlanarak daha iyi çözümler elde etmeye çalışan genetik algoritma ve karınca kolonileri algoritmaları gibi, meta-sezgisellerden farklı olarak vektörler arasındaki farklılıklardan da yararlanarak popülasyonu geliştirmektedir. Gerçek değerli tasarım parametrelerini içeren fonksiyonları küresel eniyileme amacıyla kullanan bir algoritma olarak geliştirilmiştir. Ancak sürekli eniyileme alanındaki başarılı uygulamalarının (Price vd. 2005; Storn, 2010) yanında, kesikli/kombinatöryel eniyileme problemleri için de uygulamaları (Nearchou, 2008; Al-Anzi ve Allahverdi 2007; Onwubolu ve Davendra 2006) mevcuttur. Terzi (2009) çalışmasında DGA'nın, genel olarak diğer meta-sezgisellerle benzer seviyede, bazı durumlarda ise üstün başarımlar gösterdiğini belirtmektedir.

Türkiye'de uygulanan TOU tarifesine göre, gün üç parçaya bölünmüştür. Sabah saat 06:00'dan 17:00'ye kadar olan kısım "gün periyodu," 17:00'den 22:00'e kadar olan kısım "prime-time" periyodu, kalan zaman ise "gece periyodu" olarak adlandırılmaktadır. Gece periyodunda ücretlendirme 1 TL/kWh iken, prime-time için ücret 3,44 TL/kWh, gün periyodu içinse 2 TL/kWh olabilmektedir. Fiyatların periyotlar arası oldukça farklı olması nedeniyle maliyet eniyilemesi için işlerin elektrik fiyatlarına göre sıralanması oldukça önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada Türkiye'de faaliyet gösteren bir lastik fabrikasındaki çizelgeleme problemi ele alınmıştır. 2. bölümde, ele alınan problem anlatılmış, problemle ilgili varsayımlar sunulmuş ve problemin karmaşıklığı değerlendirilmiştir. 3. bölümde, problemin çözümü için önerilen matematiksel model ve 15 işlik bir problem için elde edilen sonuçlar verilmiştir. 4. bölümde, uygulamada karşılaşılan büyüklükteki çizelgeleme problemleri için kullanılan Diferansiyel Gelişim Algoritması ve parametre eniyilemesi için gerçekleştirilen deney tasarımı anlatılmıştır. 5. ve son bölümde ise lastik fabrikası verilerine göre üretilen problemler için elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. LASTİK FABRİKASI ÇİZELGELEME PROBLEMİ

Lastik sektöründe, ilk olarak mikserlerde hazırlanan karışımlar, daha sonrasında lastiği oluşturan bileşenleri hazırlamak üzere şekillendirilir. Bu şekillendirme ve karıştırma işlemleri çok fazla miktarda elektrik tüketen işlerdir ve tüketilen enerji miktarları karışım özelliklerine göre (sertlik, akışkanlık) büyük farklılık gösterir. Bu bileşenlerin hazırlandığı ekstruderlerde birbirinden farklı lastik bileşenleri (sırt, yanak, dolgu vb.) üretilir. Bir bileşen sadece bir makinede tanımlıdır ve çizelgelemeye başlamadan önce hangi bileşenin hangi ekstruderde üretileceği bellidir. Her bir ekstruderin çizelgenmesi tek makine çizelgeleme problemi olarak ele alınabilir. Kapasite kısıtından dolayı bu makinelerde boşluk bırakılmaması hedeflenmiştir. Bu sebeple bizim çözümlerimizde de işler arası boş zaman bırakılmasına izin verilmemiştir.

Bu çalışmada ele alınan problemde, çizelgelenen işlerin sonraki işlem adımı için belli bir zamanda hazır olması gerektiğinden, önerilen çözümlerde birincil öncelik olarak işlerin gecikmemesi hedeflenmiştir. İşlerin gecikmediği ya da gecikme olacaksa toplam gecikmenin en az olduğu alternatif çözümler arasında, elektrik maliyeti en az olanının seçilmesi amaçlanmıştır. Tek makine çizelgeleme problemlerinde toplam gecikmenin eniyilenmesi probleminin NP-Zor olduğu Du ve Leung (1990) tarafından gösterilmiştir.

Zaman pencerelerine bağlı olarak tek makine çizel-

geleme problemi oldukça çalışılmış bir konudur. Tek makine çizelgeleme probleminde zaman pencerelerine bağlı olarak işlem zamanı Lahlou ve Peres (2006) tarafından çalışılmıştır. Aynı zamanda ortak termin penceresi içeren problemler de zaman penceresine bağlı problemler olarak düşünülebilir. Biskup ve Feldman (2005) tek makine çizelgeleme problemlerinde ortak termin penceresi problemiyle ilgili matematiksel model tabanlı çözüm önerisi geliştirmişlerdir.

2.1 Varsayımlar

Tüm işlerin sıfır anında yapılmaya hazır olduğu varsayılmıştır. Çizelgenin sıfır anı 17:00 olarak alınmıştır. Dolayısıyla, periyotların tanımları ve enerji maliyetleri Tablo 1'de görüldüğü gibi olmaktadır. İşlerin işlem zamanları periyot uzunluğuna göre çok kısa olduğundan, başlangıç ve bitiş zamanı farklı periyotlarda olan bir iş için birim elektrik tüketim fiyatı olarak, işin başlangıcına ait periyottaki birim tüketim fiyatı kullanılmıştır. Yukarıda da bahsedildiği üzere, işler arası boşluğa izin verilmediği için C_{max} değeri tüm işlerin işlem zamanlarının toplamına eşittir.

2.2 Problemin Karmaşıklığı

1'den n 'ye kadar olan işlerin tek makinedeki çizelgeleme problemini düşünelim. Bu işlerin toplam işlem zamanlarının iki farklı elektrik periyodunu içerdiğini varsayalım. Bu periyotlardan birincisinin 1 kWh elektrik için fiyatının 1 birim, ikinci periyodun 1 kWh elektrik için birim fiyatının 0 birim olduğunu

Tablo 1. Periyotların Başlama ve Bitiş Zamanları

	Başlama Zamanı	Bitiş Zamanı	Periyot Uzunluğu (dak)	Birim Fiyat (TL/kWh)
Periyot 1	0	300	300	3,44
Periyot 2	300	780	480	1
Periyot 3	780	1440	660	2
Periyot 4	1440	1740	300	3,44
Periyot 5	1740	2220	480	1
Periyot 6	2220	2880	660	2
⋮			⋮	

varsayalım. İkinci periyodun uzunluğuna t diyecek olursak, bizim amacımız elektrik faturasındaki değeri minimuma düşürmek için işleri mümkün olduğunca ikinci periyotta çizelgelemek olmalıdır. Anlatıldığı şekliyle problem aşağıdaki gibi özetlenebilir:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n X_i \cdot E_i$$

öyle ki

$$\sum_{j=1}^n P_j X_j \leq t$$

$$X_j \in \{0,1\}$$

Burada X_j değişkeni 1 değerini almışsa, ikinci periyotta çizelgelenmiş demektir. Bu problem klasik sırt çantası (knapsack) problemidir. Sırt çantası probleminin NP-zor olduğu Karp (1972) tarafından gösterilmiştir. Dolayısıyla, bu çalışmada ele alınan problem, termin kısıtı olmasa dahi NP-zordur.

3. MATEMATİKSEL MODEL

Karar Değişkenleri:

S_i i işinin başlama zamanı

X_{ik} ikili değişken, eğer i işi k işinden önce

Kurulan model aşağıdaki gibidir:

$$\text{Min } \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n C_j \cdot E_i \cdot V_{ji} + \sum_{i=1}^n T_i \cdot F_i$$

öyle ki

$$S_i + P_i \leq S_k + R (1 - X_{ik}) \quad i=1, \dots, n-1 \quad k=i+1, \dots, n \quad (3.1)$$

$$S_k + P_k \leq S_i + R \cdot X_{ik} \quad i=1, \dots, n-1 \quad k=i+1, \dots, n \quad (3.2)$$

$$S_i \geq 0 \quad i=1, \dots, n \quad (3.3)$$

$$X_{ik} \in \{0,1\} \quad i=1, \dots, n-1 \quad k=i+1, \dots, n \quad (3.4)$$

$$S_i + P_i \leq \sum_{i=1}^n P_i \quad i=1, \dots, n \quad (3.5)$$

$$R \cdot Y_{ji} > S_i - A_j \quad i=1, \dots, n \quad j=1, \dots, m \quad (3.6)$$

$$R \cdot Z_{ji} \geq B_j - S_i \quad i=1, \dots, n \quad j=1, \dots, m \quad (3.7)$$

$$V_{ji} \geq Y_{ji} + Z_{ji} - 1 \quad i=1, \dots, n \quad j=1, \dots, m \quad (3.8)$$

$$V_{ji}, Y_{ji}, Z_{ji} \in \{0,1\} \quad i=1, \dots, n \quad j=1, \dots, m \quad (3.9)$$

$$T_i \geq S_i + P_i - D_i \quad i=1, \dots, n \quad (3.10)$$

çizelgelenmişse 1, değilse 0'dır.

V_{ji} ikili değişken, eğer i işi j periyodunda çizelgelenmişse 1, değilse 0'dır.

Y_{ji} ikili değişken, eğer $S_i > A_j$ ise 1, değilse 0'dır.

Z_{ji} ikili değişken, eğer $S_i \leq B_j$ ise 1, değilse 0'dır.

T_i i işinin gecikme miktarı = $\max\{0, S_i + P_i - D_i\}$

Kümelere ve Parametrelere:

P_i i işinin işlem zamanı

C_j j periyodundaki birim tüketim fiyatı

A_j j periyodunun başlama zamanı

B_j j periyodunun bitiş zamanı

R Oldukça büyük bir sayı

E_i i işinin enerji tüketim miktarı

D_i i işinin termin zamanı

F_i i işinin birim gecikme maliyeti

F_i değeri tüm işler için 1000 gibi oldukça büyük bir sayı alınmıştır. İlk dört kısıt Manne (1960) tarafından kullanılan sıra bağımlı ikili değişkenlerle ilişkilidir. Beşinci kısıt işler arasında boşluk olmamasını amaçlar. 6, 7, 8 ve 9. kısıtlar i işinin hangi periyotta olduğunu anlamak içindir. Son kısıt ise gecikme miktarını belirler. Kurulan model AMPL ile kodlanmış ve GAMS/CPLEX

Tablo 2. 15 İşlik Problem Verisi ve Çözümü

İş No	Enerji Tüketim Miktarı (kw)	İşlem Zamanı (dk)	Termin Zamanı	En Az Maliyetli Sıra
1	23	22	414	9
2	29	27	249	2
3	25	25	590	7
4	37	24	227	4
5	24	21	200	1
6	36	26	731	15
7	37	28	355	5
8	40	28	354	13
9	40	25	538	14
10	32	23	598	8
11	28	29	683	11
12	25	27	618	12
13	26	30	477	6
14	37	29	314	3
15	20	25	628	10

ile çözülmeye çalışılmıştır. 15 işlik problemin çözümü dahi çok zaman aldığı için, bir meta-sezgisel arayışına girilmiştir. İş sayısı 15'ten büyük olan verilerle ise matematiksel modelin çalıştırılması mümkün olmamıştır. 15 işlik bir problemin verileri ve elde edilen en az maliyetli sıra, Tablo 2'de gösterilmiştir (12953,92 TL maliyet).

4. DİFERANSİYEL GELİŞİM ALGORİTMASI

Büyük boyutlu problemlerin çözümünde, ilk olarak Storn ve Price (1997) tarafından öne sürülmüş popülasyon tabanlı yeni bir sezgisel eniyileme yöntemi olan Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılmıştır. Genetik algoritmalara çok benzeyen bu yöntemin temelde farklılığı, önerdiği çaprazlama ve mutasyon işlemlerine dayanmaktadır. DGA temel adımları Şekil 1'de görüldüğü gibidir.

DGA'nın ilk aşamasında D boyutlu parametre vektörleri $X_{i,G}$ oluşturulur. Burada i, N_p adet eleman içeren popülasyonun i . elemanını ve G ise popülasyonun ait olduğu jenerasyonu göstermektedir.

$$X_{i,G} = [x_{1,i,G}, x_{2,i,G}, x_{3,i,G}, \dots, x_{D,i,G}]^T, i=1,2,\dots,N_p \quad (4.1)$$

Popülasyon büyüklüğü iterasyonlar süresince değişmemektedir ve yöntemin kontrol parametrelerinden biridir. Başlangıçta popülasyondaki bireyler rastgele olarak yaratılmakta ve tüm parametre uzayını eşit olasılıkla kaplayabilmektedir. Bireylerin yaratılmasını her vektörün uygunluk fonksiyonuyla değerlendirilmesi ve sonuçlarının saklanması izlemektedir.

Mutasyon, popülasyon içerisinde rastgele seçilen bir bireye, yine rastgele seçilen iki vektörün ölçeklendirilmiş farkını ekleyen bir süreçtir. Her bir $X_{i,G}$, $i = 1,2,\dots,N_p$ vektörü için mutasyona uğramış vektör aşağıdaki formüldeki şekilde hesaplanır.

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (4.2)$$

4.2'de geçen r_1, r_2 ve r_3 parametreleri $[1, N_p]$ aralığında değişen birbirinden farklı tamsayılardır. F ise sıfırdan büyük, $[0,2]$ aralığında değişen bir ölçek faktörüdür. Bu nedenle her hedef vektör $X_{i,G}$ için yeni bir $v_{i,G+1}$ mutant vektörünün oluşturulması gerekmektedir.

BAŞLA

Rasgele Bireyler Oluştur

İlk Popülasyon Uygunluğunu Değerlendir

KOŞUL (Durdurma kriteri == 0)

DGA Mutasyon

DGA Çaprazlama

Aday Popülasyon Uygunluğunu Değerlendir

Seçilim

SON VER

BİTİR

Şekil 1. Klasik DGA Adımları

Aday vektörün bileşenleri mutant vektör $v_{i,G+1}$ ya da mevcut popülasyon üyesi hedef vektör $x_{i,G}$ vektör elemanlarından Denklem 4.3'te görülen ilişkiye göre oluşturularak çaprazlama gerçekleştirilir.

$$u_{k,i,G+1} = \begin{cases} v_{k,i,G+1} & \text{eger } \text{rasg} \leq CR \text{ ya da} \\ x_{k,i,G} & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad k \in [1, D], i \in [1, N_p] \quad (4.3)$$

Burada rasg , $[0,1]$ aralığında eş olasılıkla üretilmiş bir gerçel sayı, CR kullanıcı tarafından belirlenen çaprazlama olasılığı ve $\text{RasgTams}(1, D)$ ise $[1, D]$ aralığında rasgele tamsayı üreten bir fonksiyondur. Bu en son fonksiyon en azından bir parametrenin mutant vektörden alınmasını garantilemektedir.

Seçilim işlemi hedef ya da aday vektörlerden hangisinin yeni jenerasyonda yer alacağına uygunluk fonksiyonu değerlerini karşılaştırarak karar vermektedir. Eğer hedef vektörün uygunluk fonksiyonu değeri aday vektörün değerinden daha iyi ise, hedef vektör yaşamını devam ettirerek bir sonraki jenerasyonda yer alır; aksi takdirde aday vektör yeni jenerasyonda hedef vektörün yerini alır.

Tablo 3. Sıralama Vektörüne Dönüşüm

Gerçel Sayı Vektörü	0,23	0,82	0,03	0,47	0,11	0,15	0,68
İş Sıralama Vektörü	3	5	6	1	4	7	2

Gerçel sayı formatında çalışmak üzere tasarlanan DGA'nın mevcut çözüm başarımının değerlendirilmesi için sıralama vektörüne çevrilmesi gerekmektedir. Bu dönüşümde Bean [1994] tarafından önerilen Rasgele Sayı Kodlama yöntemi uygulanmıştır. Örnek bir gerçel sayı vektörü, Tablo 3'te görüldüğü gibi sıralama vektörlerine dönüştürülebilmektedir. Gerçel sayı vektöründe 3. sıradaki 0,03 değeri, en küçük değer olduğundan, 3. iş 1. sırada yer alacaktır. Benzer şekilde 0,47 değeri, yani 4. sıra, 5. en küçük olduğundan; 4. iş 5. sırada yer almakta ve diğer işler de yerleştirilerek, sıralama tamamlanmaktadır. Bu kodlama yönteminde işler sabittir; ancak öncelik değerlerini gösteren gerçel sayı vektörü ve dolayısıyla indeks değerleri değişerek işin çizelgedeki önceliğini belirlemektedirler.

3.1 Deney Tasarımı

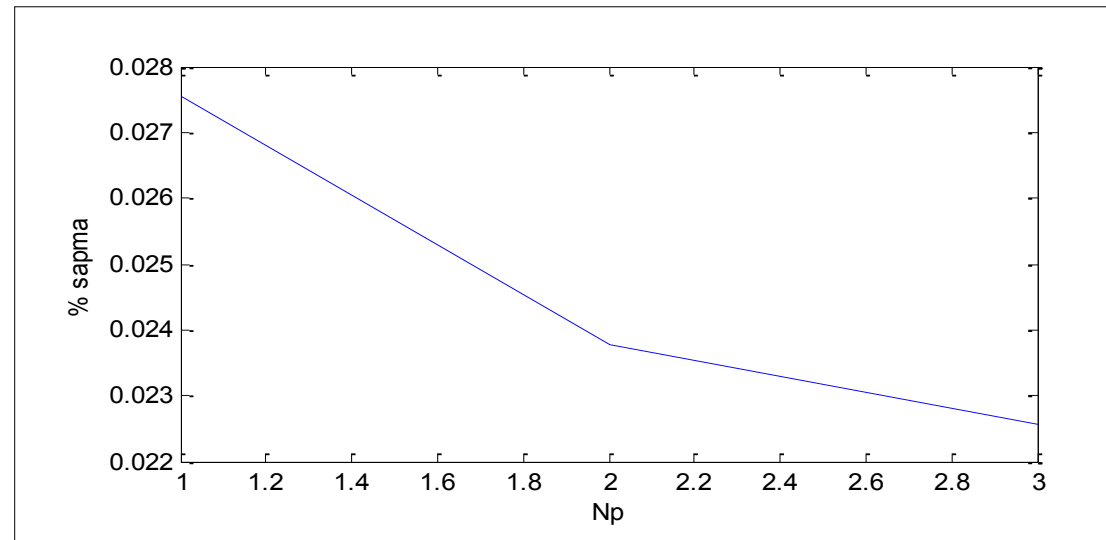
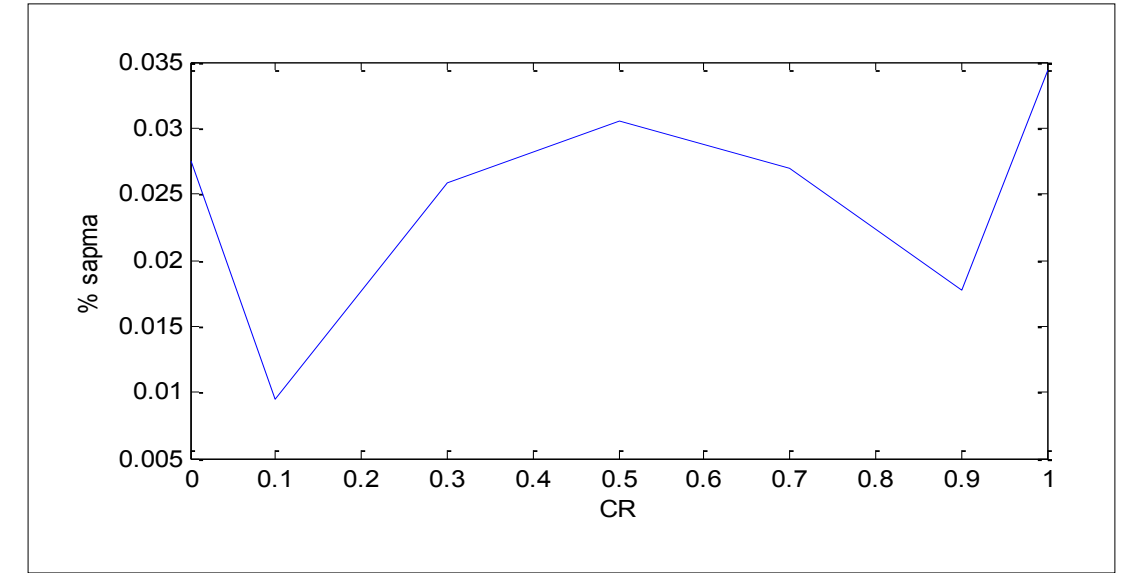
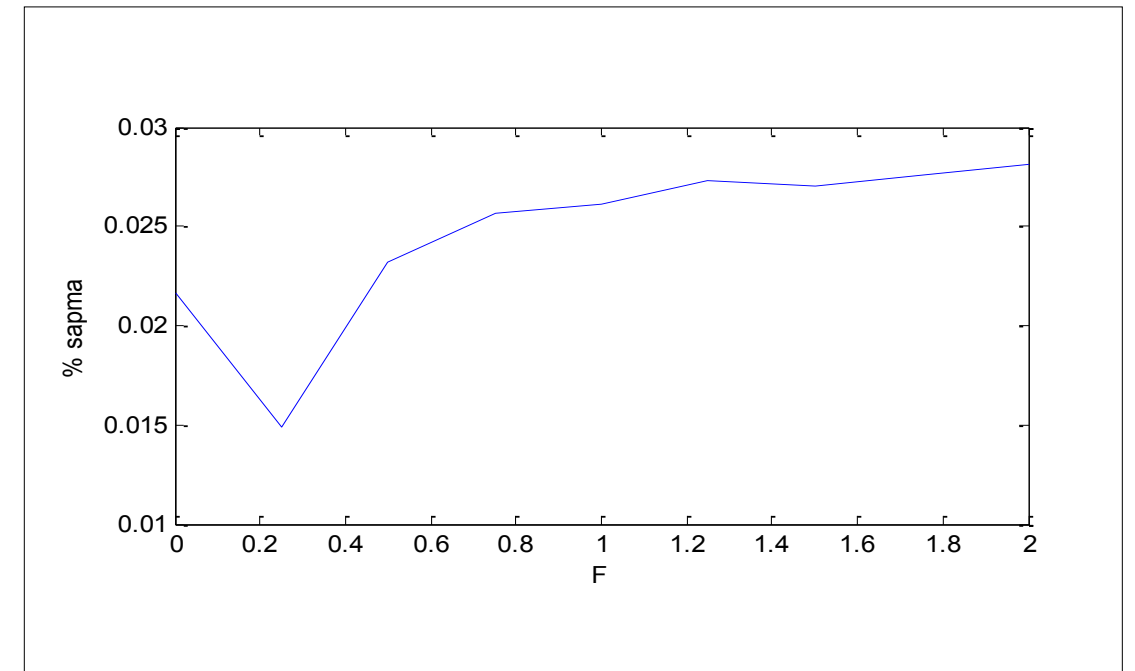
Kontrol faktörleri olan popülasyon büyüklüğü, mutasyon ölçekleme faktörü ve çaprazlama oranı değerleri için, en iyi düzeylerinin belirlenebilmesi için deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada mutasyon ölçekleme faktörü F için dokuz

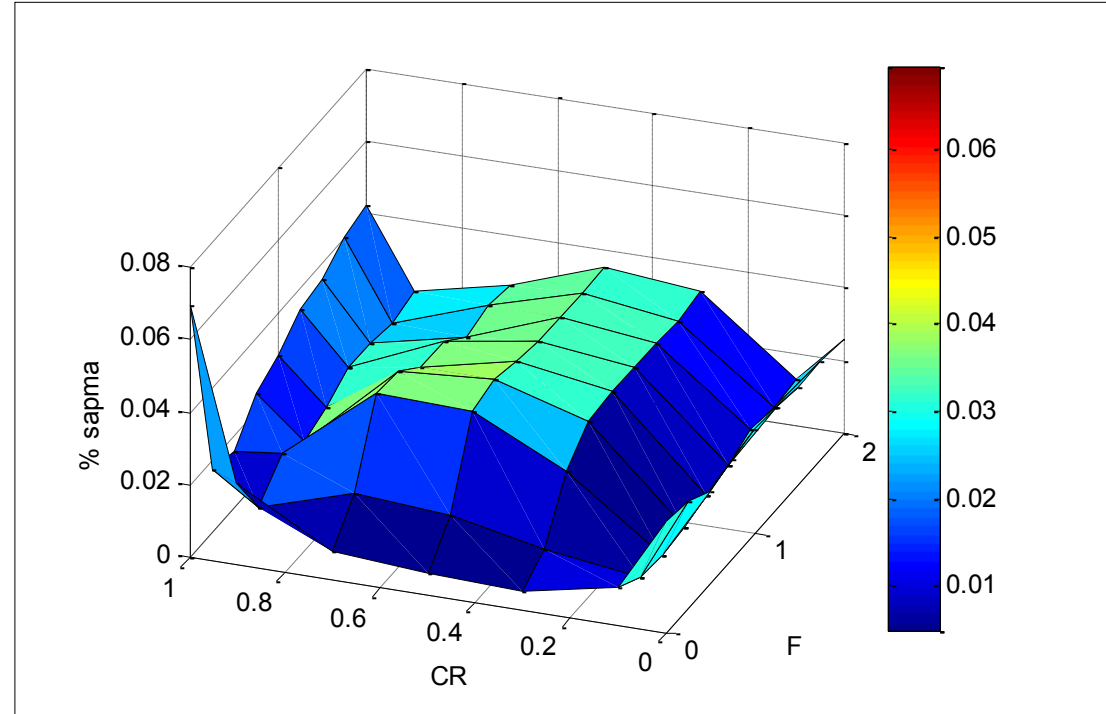
Tablo 4. Varyans Analizi Sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalaması	F	p
CR	321674,10	6	53612,3500	Inf	NaN
F	84681,04	8	10585,1300	Inf	NaN
Np	23891,03	2	11945,5100	Inf	NaN
CR*F	344280,70	48	7172,5150	Inf	NaN
CR*Np	45076,89	12	3756,4080	Inf	NaN
F*Np	13242,72	16	827,6701	Inf	NaN
CR*F*Np	17576,63	96	183,0898	Inf	NaN
Hata	2,33E-10	0	0,0000		
TOPLAM	850423,10	188			

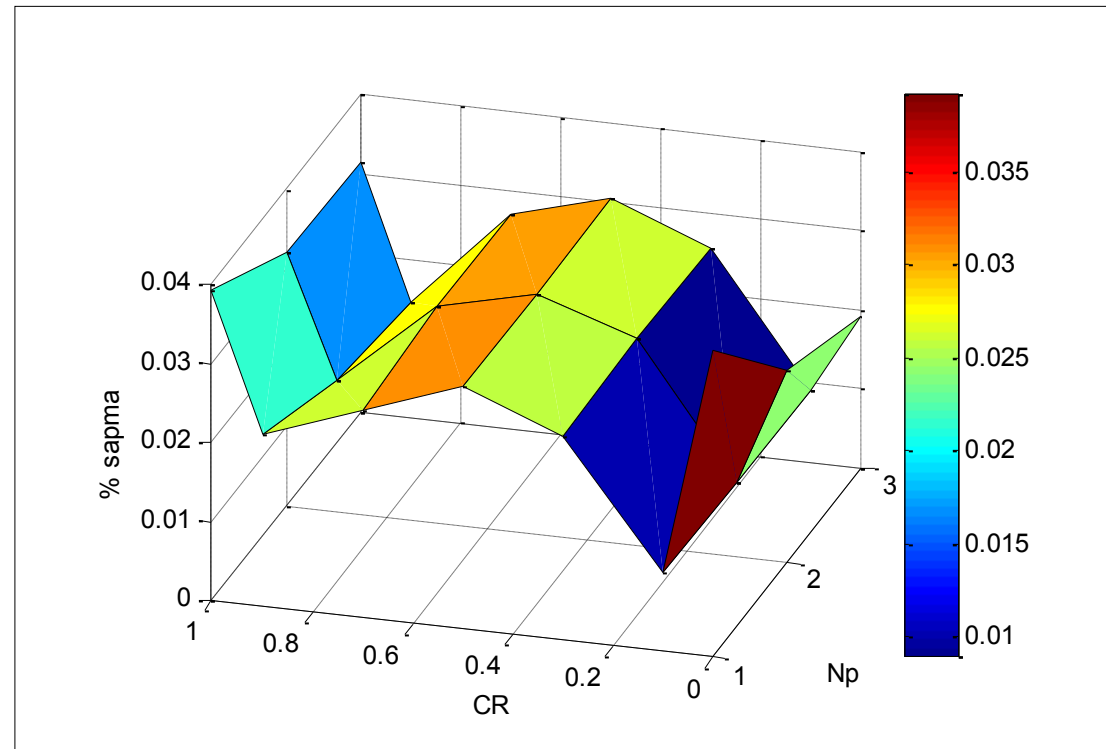
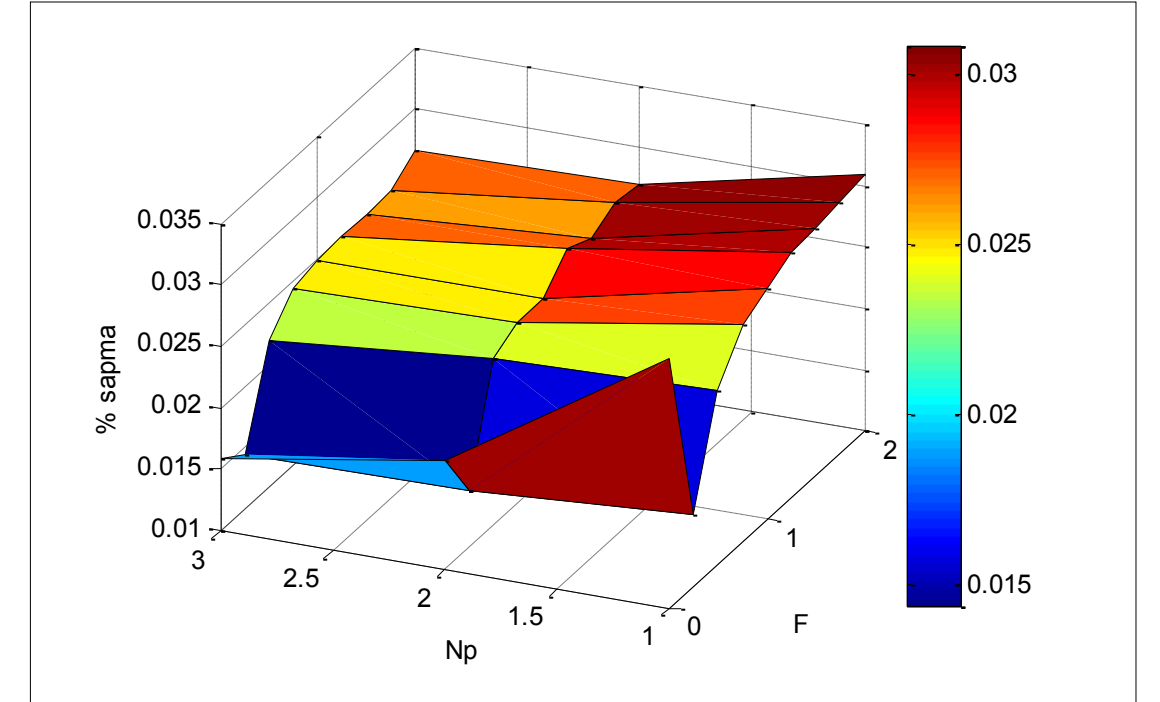
seviye {0, 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,25, 1,5, 1,75, 2} çaprazlama olasılığı CR için yedi seviye {0, 0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 0,9, 1} popülasyon büyüklüğü Np için üç seviye {D, 2D, 3D} olmak üzere tam faktöryel, beş tekrarlı deneme yapılmıştır. Durdurma kriterinin, sonuç üzerindeki etkisini en aza indirebilmek amacıyla maksimum iterasyon sayısı oldukça büyük bir değer (20*D) olarak belirlenmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlara ait varyans analizi sonuçları Tablo 4'te özetlenmiştir. Tüm faktörlerin tekil etkilerinin yanı sıra, ikili ve üçlü etkileşimlerinin de önemli olduğu görülmektedir.

Ana faktörlerin seviyelerine göre tekli etkileri aşağıdaki görüldüğü gibidir. Şekillerde verilen seviyeler için yapılan tüm deneylerde elde edilen çözümlerin, bilinen en iyi çözümden yüzde olarak sapma değerlerinin ortalamaları yer almaktadır. Buna göre Şekil 2'de görüldüğü gibi popülasyon büyüklüğü arttıkça başarımlar artmaktadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi Çaprazlama oranı (CR) için en uygun değer 0,1 olmaktadır. Şekil 4'te görüldüğü gibi Mutasyon ölçekleme faktörü F için ise en uygun seviye 0,25'dir. İkili etkileşimler de bu parametre seviyelerini doğrulamaktadır. İkili etkileşimlerle ilgili seviye karşılaştırmaları Şekil 5, 6 ve 7'de görülmektedir.

**Şekil 2.** Popülasyon Büyüklüğü (Np) Seviyelerine Göre Başarım**Şekil 3.** Çaprazlama Oranı (CR) Seviyelerine Göre Başarım**Şekil 4.** Mutasyon Ölçekleme Faktörü (F) Seviyelerine Göre Başarım



Şekil 5. Çaprazlama Oranı (CR) / Mutasyon Ölçekleme Faktörü (F) Etkileşimi

Şekil 6. Çaprazlama Oranı (CR) / Popülasyon Büyüklüğü (N_p) EtkileşimiŞekil 7. Mutasyon Ölçekleme Faktörü (F) / Popülasyon Büyüklüğü (N_p) Etkileşimi

3.2 Deneysel Sonuçları

Mevcut durumda lastik fabrikasında uygulanan, en erken teslim tarihine göre (EDD) teslim yöntemi ile DGA elektrik maliyetleri açısından kıyaslanmıştır. Lastik fabrikasındaki üretim koşullarına benzeyecek şekilde türetilmiş 50 adet problem örneği, her iki yöntem kullanılarak deneye sokulmuş ve test edilmiştir. Bu problemler iş sayısının 60, 90, 100, 110 ve 120 olduğu, her bir işin elektrik tüketim miktarının [25, 35] kWh arası tekdüze dağıldığı, işlem zamanlarının ise [20, 30] dakika arası tekdüze dağıldığı varsayılarak yaratılmıştır. Termin zamanı ise her bir iş için $[C_{max}/2, 2*C_{max}]$ arasında tekdüze dağıtılmıştır. Her bir problem büyüklüğü için toplam 10 örnek türetilmiştir. Üretilen problemler için deney tasarımı ile en uygun DGA parametrelerinin belirlenmesi ve DGA ile çözüm aşamalarında MATLAB'da kodlama yapılmış, varyans analizi için MATLAB kütüphanelerindeki fonksiyonlar kullanılmıştır. Geliştirilen DGA'nın 15 ve daha küçük iş sayılı problemlerde en iyi çözüme ulaştığı görülmüştür. DGA'nın başarımını görebilmek amacıyla

herhangi bir yerel arama yöntemi kullanılmamıştır.

Yukarıdaki matematiksel modeldeki amaç fonksiyonu esas alınarak elde edilen değerler Tablo 5'te verilmiştir. Sonuçlardan da görüleceği gibi, elektrik maliyetini göz önüne almadan işleri termin tarihine göre sıralayan (EDD) eski yöntemle, geliştirilen meta-sezgisel yöntem arasında maliyet açısından oldukça ciddi farklar bulunmakta ve meta-sezgisel yöntem daha iyi sonuç vermektedir. Ayrıca, elde edilen kazanın problem boyutundan bağımsız olduğu görülmektedir. Çözüm süresinin artış hızının, problem büyüklüğü artış hızından daha büyük olduğu söylenebilir.

4. SONUÇ

Elektrik tüketimleri arasında fark bulunan işlerin çizelgelendiği sektörlerde (çelik, çimento, lastik vb.) TOU tarifesine uygun olarak, bu çalışmada anlatıldığı üzere diferansiyel gelişim algoritması kullanarak çizelgeleme yapmak oldukça önemli getirileri olan bir seçim olacaktır. İnceleme konusu olarak seçilen lastik sektöründeki uygulamada toplam gecikme

Tablo 5. Deney Sonuçları

Problem	DGA	EDD	Kazanç (%)	Süre (Sn)
e_60_1	3035	3419	12,7	68
e_60_2	3298	3719	12,8	67
e_60_3	3212	3665	14,1	68
e_60_4	3306	3638	10,0	67
e_60_5	3403	3671	7,9	67
e_60_6	3236	3592	11,0	67
e_60_7	3244	3605	11,1	67
e_60_8	3373	3738	10,8	67
e_60_9	3189	3516	10,2	67
e_60_10	3356	3792	13,0	68
e_90_1	4556	5333	17,0	220
e_90_2	4696	5246	11,7	220
e_90_3	4533	5191	14,5	220
e_90_4	4550	5088	11,8	220
e_90_5	4699	5248	11,7	221
e_90_6	4737	5340	12,7	221
e_90_7	4625	5225	13,0	220
e_90_8	4850	5428	11,9	220
e_90_9	4509	5137	13,9	220
e_90_10	4612	5238	13,6	220
e_100_1	5167	5873	13,7	300
e_100_2	5351	6038	12,8	300
e_100_3	5206	5996	15,2	300
e_100_4	5240	5768	10,1	299
e_100_5	5233	5858	11,9	300
e_100_6	5101	5770	13,1	302
e_100_7	5418	6096	12,5	304
e_100_8	5239	5798	10,7	317
e_100_9	5313	5898	11,0	316
e_100_10	5454	6276	15,1	312
e_110_1	5771	6383	10,6	406
e_110_2	5834	6539	12,1	402
e_110_3	5870	6479	10,4	403
e_110_4	6063	6840	12,8	404
e_110_5	5866	6447	9,9	403
e_110_6	5958	6689	12,3	402
e_110_7	5862	6466	10,3	411
e_110_8	5919	6667	12,6	417
e_110_9	5734	6523	13,8	413
e_110_10	5910	6544	10,7	412
e_120_1	6512	7162	10,0	531
e_120_2	6529	7234	10,8	544
e_120_3	6526	7437	14,0	538
e_120_4	6581	7390	12,3	552
e_120_5	6482	7295	12,5	536
e_120_6	6718	7546	12,3	544
e_120_7	6696	7314	9,2	550
e_120_8	6368	7088	11,3	519
e_120_9	6430	7154	11,3	519
e_120_10	6347	7146	12,6	519

zamanını artırmadan elektrik maliyetlerinde yaklaşık %10'luk bir tasarruf mümkün görünmektedir. Benzer tasarrufun incelenen fabrika genelinde gerçekleştirilmesi durumunda yılda yaklaşık 2 milyon TL tasarruf sağlanabilecektir. DGA sonucunda elde edilen çözümün en iyi çözüm olması garantisi bulunmamakla beraber, çözüm süresi çok kısa olduğu için ve çıkan sonuçlar tatmin edici olduğu için gerçek hayat problemlerinde kullanımı uygun olabilir. Bundan sonraki bir araştırma konusu karmaşık tamsayılı doğrusal modelin en iyi sonucunun bulunması için algoritmalar geliştirilmesi ve büyük problem örnekleri için DGA'nın sonuçlarının bu eniyi değerle karşılaştırılması olabilir.

5. KAYNAKÇA

- Akgül, F.N., Düzce, M.Ç., Erdem, O., Kerimoğlu A., Koçak, M., Karaoğlu, İ. 2008. "TUSAŞ- Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ'de Paralel Makinalarda Çizelgeleme Problemi İçin Bir Çözüm Yaklaşımı," Endüstri Mühendisliği Dergisi, 19(3), 35-47.
- Al-Anzi, F., Allahverdi, A. 2007. "A self-adaptive differential evolution heuristic for two-stage assembly scheduling problem to minimize maximum lateness with setup times," European Journal of Operational Research, 182, 80-94.
- Ashok, S. 2006. "Peak-load management in steel plants," Applied Energy, 83, 413-424
- Bean, J. 1994. "Genetics and random keys for sequencing and optimization," ORSA Journal on Computing, 6(2), 154-160.
- Biskup, D., Feldmann, M. 2005. "On scheduling around large restrictive common due Windows," European Journal of Operational Research, 162, 740-761.
- Du, J., Leung, J. Y. T. 1990. "Minimizing total tardiness on one machine is NP-hard," Mathematics of Operations Research, 15, 483-495.
- Karp, R.M. 1972. Reducibility among combinatorial problems. In: Miller RE, Thatcher JW, editors. Complexity of computer computations. New York: Plenum Press, 85-103.
- Lahlou, C., Dauzère-Pérès, S. 2006. "Single-machine scheduling with time window-dependent processing times", Journal of the Operational Research Society, 57, 133-139.
- Lee T., Chen C. 2007. "Iteration particle swarm optimization for contract capacities selection of time-of-use rates industrial customers," Energy Conservation and Management, 48, 1120-1131.
- Manne, A.S. 1960. "On the job-shop scheduling problem." Operations Research, 8, 219-223.
- Nearchou, C.A. 2008. "A differential evolution approach for the common due date early/tardy job scheduling problem," Computers & Operations Research. 35,1329-1343.
- Onwubolu, G., Davendra, D. 2006. "Scheduling flow shops using differential evolution algorithm," European Journal of Operational Research, 171, 674-692.
- Price, K., Storn, R., Lampinen, J. 2005. "Differential Evolution A Practical Approach to Global Optimization," Springer Natural Computing Series, VI-VII .
- Storn, R., Price, K. 1997. "Differential Evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces," Journal of Global Optimization, 11, 241-354.
- Storn, R. 2010. "Differential Evolution (DE) for Continuous Function Optimization," <http://www.icsi.berkeley.edu/~storn/code.html>, Son erişim tarihi 26 Aralık 2010.
- Tapkan, P., Özbakır, L., Baykasoğlu, A. 2010. "Arı Algoritması ve Genelleştirilmiş Atama Problemi: Farklı Komşuluk Yapılarının Karşılaştırılması," Endüstri Mühendisliği Dergisi YA/EM 2008 Özel Sayısı, 21 (2), 2-13.
- Terzi, Ü. 2009. "Gezgin Satıcı Problemlerinin Çözümü için Diferansiyel Gelişim Algoritması Tabanlı Bir Metasezgisel Önerisi," Doktora Tezi, 71-77.