



Review Paper / Derleme Makalesi
SCHEDULING IN ENERGY SYSTEMS

Seçil ERCAN*, Gülgün KAYAKUTLU

İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Maçka-İSTANBUL

Received/Geliş: 24.06.2015 Revised/Düzelme: 29.10.2015 Accepted/Kabul: 07.12.2015

ABSTRACT

Increasing population forces us to find the best ways of using the existing energy resources. In search of the best ways there is a higher need for optimisation applications. It is observed that applications in the energy fields are mainly focused on minimizing the investments, maximizing the efficiency of technological designs, and minimizing the operational costs. Operations scheduling or load planning as named in the energy field, is important in minimizing the operational costs. Besides, scheduling is one of the basic fields of operations research that is why it is a field of continuous improvement in line with the changes in the energy field. This research aims to analyse the scheduling literature to depict the subjects least studied. Our article handles the publications of research on scheduling with the objectives, decision variables, constraints, methods and the achievements. Furthermore, the uncertainties handles in primal energy or renewable energy utilization are covered by the analysis performed. The scheduling optimization studies found in literature is clustered using self-organizing maps (SOM) in order to observe the frequency of subjects analysed. This study confirming the literature survey and clustering of existing studies will lead the researchers working on energy systems scheduling.

Keywords: Energy optimization, scheduling.

ENERJİ SİSTEMLERİNDE ÇİZELGELEME

ÖZ

Enerji kaynaklarını doğru kullanmak, giderek artan nüfus için büyük önem taşıdığından bu alanda optimizasyon uygulamalarına gereksinim de artmaktadır. Enerji sektöründe eniyileme amaçlanan uygulamaların yatırım en küçükleme, en iyi verimi sağlayan teknolojik tasarımı bulma ve operasyon maliyetlerini en küçüklemeye yöneldiği görülmektedir. Enerji dilinde yük planlama olarak adlandırılan işletim çizelgeleme, operasyon maliyetlerini düşürmek için önem taşımaktadır. Aynı zamanda çizelgelemenin yöneylem araştırmasının en temel uygulama alanlarından biri olması bu alanın enerjideki değişikliklere paralel olarak sürekli geliştirilmesini sağlamaktadır. Bu araştırma, çizelgeleme alanında yapılan çalışmalarını inceleyerek az çalışılmış alanları saptamayı hedeflemektedir. Makalemizde enerji sistemlerinde çizelgeleme alanında yapılan çalışmalar, amaçları, karar değişkenleri, kısıtları, kullanılan eniyileme yöntemi ve sonuçları açısından analiz edilerek değerlendirilmektedir. Fossil veya yenilenebilir enerji kullanımında çözülmesi gereken belirsizliklerin literatürde nasıl ele alındığı da analizlerde kapsamaktadır. Bu nedenle literatürde bulunan çizelge eniyileme çalışmaları özdüzenleyici haritalar yöntemi kullanılarak kümelenmiş ve özelliklerin sıklıkları gösterilmiştir. Yazın incelemesi ve çalışmaların kümelenmesini içeren bu çalışma, enerji sistemlerinde çizelgeleme çalışması yapacak araştırmacılara yol gösterici niteliktedir.

Anahtar Sözcükler: Enerji optimizasyonu, çizelgeleme.

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: ercansec@itu.edu.tr, tel: (212) 293 13 00

1. GİRİŞ

Enerji kaynaklarının kısıtlı olması, yeni enerji kaynaklarının keşfedilmesi ve var olan enerji kaynakları ile bir arada kullanılması artan enerji talebini karşılamak üzere kullanılan çözümlerdendir. Ancak, enerjinin verimli kullanılması, gereksinimlerin ve kaynakların detaylı olarak planlanması ve bu planlara dayanarak gereksiz enerji kullanımının önlenmesi ile mümkündür.

Eniyileme çalışmaları her alanda olduğu gibi enerji sektöründe de kısıtlı kaynakların en iyi kullanımını sağlamak üzere yaygınlaşmaktadır. Yapılan çalışmaların yatırımları en küçükleme, en iyi verimi sağlayacak teknoloji tasarımlarını bulma ve operasyon maliyetlerini en küçükleme odaklı olduğu görülmektedir. Oysa enerji kaynaklarının ve teknolojilerin yenilenmesi yeni eniyileme sorunlarını da yaratmaktadır. Enerji portföyü yaratarak fosil enerji ile yenilenebilir enerjileri bir arada kullanmak, şebekeden elektrik alma yanında kendi elektriğini de üretmek, sadece ısıtma ve elektrik enerjisi ile kısıtlı olmayarak soğutmayı da düşünür olmak önemli değişikliklerdir. Hatta kömür yerine kaya gazı kullanır olmak, yeni enerji kaynakları oluşturmak, enerjiyi saklayabilir olmak da yeni eniyileme problemlerine neden olmaktadır.

Bu çalışmada enerji planlama ve çizelgelemesi konusunda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Değerlendirmeye alınan enerji planlama ve çizelgeleme yayınları, bir topoloji yaratmak amacı ile, odaklandığı enerji kaynağı, çözümlenen belirsizlikler ve üretilen enerji kaynakları dikkate alınarak özdüzenleyici haritalar gibi akıllı bir sistemle kümelenecektir. Kümeleme işleminin doğruluğu ise Dunn indeksi ile ölçülecektir. Yapılan kümeleme sonucunda hangi alanlarda yoğun çalışma yapıldığı hangi alanlarda boşluklar olduğu belirlenecektir.

Makalenin özü kaynakça topolojisi çıkarmak olduğu için, bir sonraki bölümde hemen özdüzenleyici haritaların tanımına girecek, üçüncü bölümde ise uygulaması detaylı olarak açıklanacaktır. Ortaya çıkan kümeler ve içeriklerinin değerlendirilmesi dördüncü bölümde ele alınacak ve beşinci bölümde çalışmanın sonuçları sunulacaktır. Bu çalışma, araştırmacılara konu seçiminde destek olacaktır.

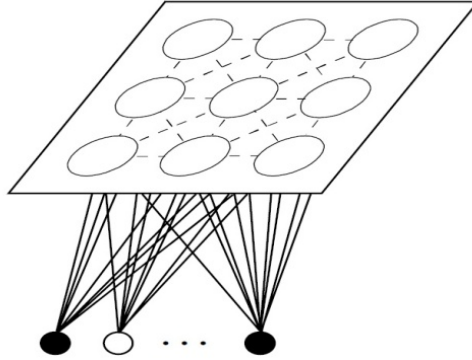
2. İNCELEME YÖNTEMİ

2.1. SOM (Özdüzenleyici Haritalar)

Yapay sinir ağları yöntemlerinden biri olan Özdüzenleyici Haritalar (Self-Organizing Map – SOM), keşifçi veri analizinde genellikle kümeleme amacıyla kullanılan bir gözetimsiz öğrenme algoritmasıdır. Yüksek boyutlu karmaşık girdilere sahip bir problemi daha düşük boyutlu basit bir haritaya indirgemektedir (Leopold vd., 2004). Kohonen ağı olarak da bilinen en sık kullanılan SOM modeli, 1982’de Kohonen tarafından geliştirilmiştir (Kohonen, 1990).

Tipik bir SOM ağ yapısı, Şekil 1’de gösterildiği gibi, girdi katmanı ve çıktı katmanından oluşmaktadır. Girdi katmanındaki düğümler, değişkenleri (veya özellikleri) içermektedir. Kohonen katmanı olarak da bilinen çıktı katmanındaki düğümler ise kümeleri ifade etmektedir. Çıktı katmanının yapısı genellikle iki boyutludur ve satırlar ve sütunlar oluşan bir ızgara şeklindedir (Reutterer, 1998).

SOM ile kümeleme analizinde m tane değişken, n tane düğüm (küme) olduğu varsayılırsa her bir girdinin her bir düğüme olan uzaklığına bakılmaktadır. Kümelerin oluşturulması için öncelikle her düğümün değişkenler için oluşturulan ağırlık vektörü (w) ile girdi vektörü (x) arasındaki uzaklık, Öklit uzaklığından yararlanılarak Denklem 1’de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir (Budayan, 2008; Haykin, 2009). Denklem 1’de i girdileri, j ise dikkate alınan değişkeni temsil eden indislerdir.



Şekil 1. Tipik bir SOM ağ yapısı (Reutterer, 1998)

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_j - w_{ij})^2} \quad (1)$$

İlk adımda ağırlık vektörü için başlangıç değerleri verilmektedir. Her girdi ile ağırlık vektörü arasındaki uzaklık Denklem 1 ile hesaplandıktan sonra en küçük uzaklığa sahip olan girdi kullanılarak ağırlıklar güncellenmektedir. Güncel ağırlıklar, öğrenme parametresi (α) yardımıyla Denklem 2'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Öğrenme parametresinin 0 ile 1 arasında, genellikle 0'a daha yakın, bir değer aldığı varsayılmaktadır (Alpaydın, 1998).

$$w_j(\text{new}) = w_j(\text{current}) + \alpha [x - w_j(\text{current})] \quad (2)$$

Her bir girdi için, düğümlere olan uzaklıkları arasında en küçük uzaklığa sahip olan düğüm “kazanan düğüm” (winner node) olarak belirlenmektedir.

Kategorik değerler alan özelliklerde SOM uygulaması için veri kümesinin uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Kategorik özellik, içinde barındırdığı farklı değerler kadar yeni özelliklere dönüştürülür ve yeni özellikler 0-1 ikili değerler alır (Hsu, 2006).

Kümelerin topolojileri genellikle kare yapıya uygun seçilmektedir. Kümenecek toplam eleman sayısının karekökü kadar ya da %10'u olacak kadar küme olacak şekilde çeşitli topolojiler denenebilmektedir. Kümelerin her birinde en az bir eleman olması beklenmektedir.

Farklı topolojilerin arasında en iyi kümelemeyi vereni bulmak için geçerlik (validity) indeksleri kullanılmaktadır. Bu indekslerden biri de “Dunn indeks”tir (DI). Optimal kümelemeyi bulmak üzere kullanılan Dunn indeks Denklem 3'te belirtildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$DI = \min_{1 \leq i \leq n} \left\{ \min_{\substack{1 \leq j \leq n \\ i \neq j}} \left\{ \frac{d(c_i, c_j)}{\max_{1 \leq k \leq n} \{d'(c_k)\}} \right\} \right\} \quad (3)$$

$d(c_i, c_j)$ i ve j kümeleri arasındaki uzaklığı, $\max_{1 \leq k \leq n} \{d'(c_k)\}$ ise k kümesi içindeki elemanlar arasındaki en büyük uzaklığı ifade etmektedir. Dunn indeksin ana amacı, kümeler arası uzaklığı en küçüklemek ve küme içi uzaklıkları en büyüklemektir. En büyük Dunn indekse sahip olan topoloji, en iyi kümelemeyi verecektir.

2.2. SOM YÖNTEMİ İLE KÜMELEME

Bu çalışmada kümeleme için dikkate alınan değişkenler “kullanılan enerji kaynakları”, “sistemdeki belirsizlikler” ve “üretilen enerji türleri”dir. Bu değişkenlerin alacağı değerler de aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

1. Kullanılan enerji kaynakları: fosil, rüzgar, güneş
2. Sistemdeki belirsizlikler: elektrik fiyatı, güneş çıktısı, rüzgar çıktısı, enerji talepleri
3. Üretilen enerji türleri: elektrik, ısı, soğutma

Bu değişkenler kategorik değerler aldığı için her bir değişkenin değeri, bir 0-1 ikili değişkeni ile tanımlanmıştır. Örneğin, fosil “0” değerini alıyorsa “enerji kaynağı olarak fosil yakıtıtan yararlanılmamıştır” anlamına gelecektir. Bu durumda kullanılan enerji kaynakları için üç, sistemdeki belirsizlikler için dört, üretilen enerji türleri için üç olmak üzere toplam on tane 0-1 değerleri alabilen değişkenle çalışılmıştır. Örneğin; doğalgaz ve güneş enerjisini birlikte kullanan, güneş çıktısı ve enerji talebini belirsiz olarak ele alan, elektrik ile ısıyı birlikte üreten bir enerji sistemi için değişkenler Çizelge 1’deki gösterilen değerleri alacaktır.

Çizelge 1. Değişkenlerin gösterim şekli

Enerji kaynağı			Belirsizlik				Üretilen enerji türü		
Fosil	Rüzgar	Güneş	Elektrik Fiyatı	Rüzgar Çıktısı	Güneş Çıktısı	Enerji Talebi	Elektrik	Isıtma	Soğutma
1	0	1	0	0	1	1	1	1	0

Çalışmaların kümeleneğinde Cluster 3.0 yazılımı kullanılarak SOM yöntemi uygulanmıştır. 0-1 arasında olması gerek öğrenme oranının başlangıç değeri için 0,1’e yakın ve 0,01’den büyük olması tercih edilmektedir (Haykin, 2009). Yüksek değerler yerel en iyiye takılma riski taşımaktadır. Bu nedenlerle yazılımda, öğrenme parametresine başlangıç değeri olarak 0,02 verilmiştir. Benzerlik ölçütü olarak “Öklit uzaklığı” kullanılmıştır.

Bu çalışmada 2001 yılından itibaren yayınlanan 46 çizelgeleme makalesinden yararlanılmıştır. İlgili makalelerin kümeleme analizinde küme sayısının 4,6 civarında (46*%10) olması, diğer bir yaklaşıma göre ise 6,8 civarında (veri sayısının karekökü kadar) olması beklenmektedir. Bu amaçla, küme sayıları 3-7 arasında olacak şekilde tüm iki boyutlu topolojiler denenmiştir: 1x3, 1x4, 2x2, 1x5, 1x6, 2x3, 1x7. Bunların arasından 2x2, 1x5, 1x6, 2x3, 1x7 topolojilerinde boş kümelere rastlanmıştır. SOM tekniğinde her kümede en az bir eleman olması beklendiği için bu topolojiler elenmiştir. 1x3 ve 1x4 topolojileri için ise kümenin geçerliği hakkında yorumda bulunabilmek için Dunn indeksi hesaplanmıştır. Çizelge 2’de belirtilen Dunn indeksi sonuçlarına göre 1x3 topolojisinin daha yüksek indeks değerine sahip olması sebebiyle daha iyi bir kümeleme oluşturduğuna karar verilmiştir.

Çizelge 2. 1x3 ve 1x4 topolojilerinin Dunn indeksi değerleri

Topoloji	Dunn indeksi
1x3	0.98995
1x4	0.00042

2.3. KÜMELEME SONUÇLARI

46 adet enerjide çizelgeleme çalışmasının SOM yöntemi ile kümeleme analizi sonucunda 1x3 topolojisinde kümelemenin, incelenen topolojilere arasında en iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 2’de en iyi kümelemeyi veren topoloji ve her küme içinde yer alan makale sayısı görülmektedir.

NODE(0,0)	NODE(0,1)	NODE(0,2)
34	4	8

Şekil 2. 1x3 topoloji yapısı ve kümelerin eleman sayıları

Her küme içine düşen makalelerin yazar(lar)ı ve yılları ise Çizelge 4’te verilmektedir.

Çizelge 4. 1x3 topolojisindeki kümelerin elemanları

Küme 1	
Yazar	Yıl
Osorio vd.	2015
Logenthiran vd.	2015
Rezvani vd.	2015
Izadbakhsh vd.	2015
Dominguez vd	2014
Morales vd	2014
Tian vd	2014
Vijayakumar ve Malathi	2014
Rigo-Mariani vd.	2014
Alipour vd. (Applied Energy)	2014
Alipour vd. (Energy)	2014
Tan vd.	2014
Kim ve Edgar	2014
Aghaei ve Alizadeh	2013
Karami vd	2013
Khodr vd	2012
Peng vd	2012
Varkani vd.	2011
Uyar vd	2011
Pritchard vd	2010
Morais vd	2010
Benhamida ve Abdelbar	2010
Garces ve Conejo	2010
El-Sharkh vd	2010
Morales vd	2009
Logenthiran ve Srinivasan	2009
Tuohy vd	2009
Choling vd	2009
Hetzer vd	2008
Wu vd	2007
Maturana ve Riff	2007
Bath vd	2004
El Desouky vd	2001
Chen vd.	2005

Küme 2	
Yazar	Yıl
Liu vd	2014
ElDesouky	2014
Guan vd	2010
Wongvisanupong ve Hoonchareon	2013

Küme 3	
Yazar	Yıl
Lima vd	2015
Zhang ve Scaar	2014
Mohammadi ve Mohammadi	2014
Cau vd.	2014
Pandzic vd.	2013
Zein Alabedin vd	2012
Saber ve Venaya	2012
Liang ve Liao	2007

Çizelge 5, en iyi kümelemeyi veren topolojiye göre her bir kümenin, değişkenler temelinde ortalama değerlerini göstermektedir. Bu değerler incelenerek her kümenin gösterdiği özellikler için çıkarımlarda bulunmak mümkündür.

Küme 1'deki çalışmaları, diğer kümelere ayıran en önemli özellik fosil yakıt kullanan çalışmaları da içermesidir. Fosil yakıtların ve rüzgar enerjisini kullanımı yarı yarıya ve birbirlerine yakın oranlardadır. Az sayıda çalışmada ise güneş enerjisinden yararlanılmıştır. Bu kümede yer alan çalışmalar, sistemdeki belirsizlikleri düşük bir oranda dikkate almıştır ve elektrik üretiminin yanı sıra düşük bir oranda ısı enerjisi üreten çalışmayı da içermektedir.

Küme 2'deki tüm çalışmalarda güneş enerjisi kaynak olarak kullanılmaktadır ve elektrik enerjisi ile birlikte ısı enerjisi de üretilmektedir. Bütün çalışmalar içerisinde az sayıda soğutma sağlayan çalışma da bu küme içerisinde yer almaktadır. Enerji kaynağı olarak rüzgar enerjisi de az da olsa kullanılmaktadır. Tamamen yenilenebilir kaynakların kullanıldığı bu kümede güneş çıktısı ve enerji talebindeki belirsizlik yüksek oranda dikkate alınmaktadır.

Küme 3, tamamen rüzgar enerjisi kullanan ve yüksek oranda da bununla beraber güneş enerjisi kullanan hibrit sistemleri içermektedir. Bu kümedeki çalışmaların tamamında rüzgar gücü çıktısı, büyük bir kısmında güneş çıktısı ve enerji talebi, yaklaşık yarısında ise elektrik fiyatı belirsizlik olarak ele alınmaktadır. Rüzgar enerjisi ağırlıklı bu enerji sistemlerinde elektrikle beraber az sayıda ısı enerjisi üretimini de içeren çalışmalar bulunmaktadır.

Çizelge 5. 1x3 topolojisine göre her küme için değişkenlerin ortalama değerleri

NODE	Enerji Kaynağı			Sistem Belirsizliği				Üretilen enerji türü		
	Fos	Ruz	Gun	Fiy	BRuz	BGun	Tlp	Elk	Isı	Sog
NODE(0,0)	0,471	0,500	0,206	0,088	0,353	0,029	0,206	1,000	0,265	0,000
NODE(0,1)	0,000	0,250	1,000	0,000	0,250	0,750	0,750	1,000	1,000	0,250
NODE(0,2)	0,000	1,000	0,750	0,500	1,000	0,750	0,750	1,000	0,125	0,000

3. ÇİZELGELEME ÇALIŞMALARININ KÜMELERE GÖRE DEĞERLENDİRMESİ

Küme 1'de fosil yakıt kullanan enerji sistemlerinin de yer alması, bu kümeyi diğer kümelere ayıran en belirgin özelliktir. Fosil enerji kaynağı temelli enerji sistemlerinde herhangi bir belirsizliği dikkate almadan maliyeti en küçükleme amacıyla Lagrange gevşetmesi ve evrimsel algoritmanın bir arada olduğu hibrit modelleme (Benhamida & Abdelbar, 2010; Thillainathan Logenthiran, Woo, & Phan, 2015), evrimsel algoritma (Maturana & Riff, 2007; Vijayakumar & Malathi, 2014), diferansiyel evrimsel algoritma ile Lambda-iterasyon tekniği (Uyar, Türkay, & Keleş, 2011) yöntemlerini kullanan çalışmalar vardır. Benzer şekilde fosil kaynaklı kojenerasyon sistemlerinde karı enbüyüklemek üzere karma tamsayılı doğrusal programlama (Alipour, Zare, & Mohammadi-Ivatloo, 2014) ve karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama (Kim & Edgar, 2014) ile de sistemlerin çizelgelemesi yapılabilmektedir.

Elektrik ile birlikte ısı enerjisi de üreten fosil yakıtlı kojenerasyon sistemlerinin çizelgenmesi için de evrimsel algoritma ile tepe tırmanma (hill climbing) algoritmasıyla oluşturulan hibrit modelleme (El-Sharkh, Rahman, & Alam, 2010), harmoni arama algoritması (Karami, Sanjari, Tavakoli, & Gharehpetian, 2013) ve geliştirilmiş bağımsızlık algoritması (Chen, Tsay, & Gow, 2005) yöntemlerini kullanan çalışmalar da bulunmaktadır.

Bir başka fosil kaynaklı sistemde, elektrik fiyatlarındaki belirsizlik dikkate alınarak ve kardaki dalgalanma riski kontrol edilerek karın enbüyüklenmesi için üç-aşamalı stokastik programlama ile karma tamsayılı doğrusal programlama kullanılmıştır (Garces & Conejo, 2010). Elektrik fiyatlarıyla birlikte enerji taleplerindeki belirsizliği de göz önünde bulunduran fosil kaynaklı kojenerasyon sistemleri için üretimden ve fazla elektriğin satışından gelen karın enbüyüklenmesi için ARIMA (auto-regressive integrated moving average) ve karma tamsayılı

doğrusal programlamadan yararlanılmıştır (Alipour, Mohammadi-Ivatloo, & Zare, 2014). Benzer bir kojenerasyon sisteminde ise sırasıyla yakıt maliyetini enküçüklenmesi, salınım miktarının enküçüklenmesi, güç üretiminin değişkenliğinden kaynaklanan riskin enküçüklenmesi amaçlarıyla sistemin çizelgelenmesi bulanık, stokastik çok-amaçlı programlama ile çözülmüştür (Bath, Dhillon, & Kothari, 2004). Yalnızca enerji talebi belirsizliğini dikkate alarak beklenen maliyeti enküçükleyecek problemler için de beklenti modeli (expectation modeli) (Tian, Mao, & Zhai, 2014), Lagrange gevşetmesi ile karma tamsayılı programlama ve Monte Carlo simülasyonu (Wu, Shahidehpour, & Li, 2007), yapay sinir ağları ile genetik algoritma (El Desouky, Aggarwal, Elkateb, & Li, 2001) da kullanılan yöntemler arasındadır.

Toplam maliyetin enküçüklenmesi için güneş enerjisinden yararlanarak ancak belirsizlikleri dikkate almadan dinamik programlama tabanlı yöntem uygulanmıştır (Rigo-Mariani, Sareni, Roboam, & Turpin, 2014). Benzer durumda güneş ve rüzgar enerjisi kullanan enerji sistemlerinde karma tamsayılı karesel (quadratic) programlama (Khodr, El Halabi, & García-Gracia, 2012), karma tamsayılı doğrusal programlama (Morais, Kádár, Faria, Vale, & Khodr, 2010), Lagrange gevşetmesi ve genetik algoritmanın bir arada kullanıldığı hibrit modelleme (T. Logenthiran & Srinivasan, 2009) yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Osorio vd. (2015) tarafından beklenen operasyon maliyetini enküçüklemek amacıyla enerji üretim miktarı ve üreticinin statüsü (kullanılıyor/kullanılmıyor) karar değişkenleri ile karma tamsayılı doğrusal programlama kullanılmıştır. Enerji talebi ve rüzgar çıktısındaki belirsizliği de dikkate alarak Monte Carlo simülasyonundan da yararlanılmıştır (Osório vd., 2015).

Rüzgar enerjisinden yararlanan birçok çalışmada ise yalnızca rüzgar çıktısındaki belirsizlik dikkate alınarak maliyetin enküçüklenmesi için iki-aşamalı çizelgeleme ile ikili parçacık sürü optimizasyonu (Tan, Ju, Li, Li, & Zhang, 2014), sinir ağları (Varkani, Daraeepour, & Monsef, 2011), iki seviyeli stokastik programlama (Juan M. Morales, Zugnoa, Pineda, & Pinson, 2014), iki-aşamalı stokastik programlama (J.M. Morales, Conejo, & Perez-Ruiz, 2009; Pritchard, Zakeri, & Philpott, 2010), senaryo ağaçlarıyla stokastik programlama (Hetzler, Yu, & Bhattarai, 2008; Tuohy, Meibom, Denny, & O'Malley, 2009), karma tamsayılı doğrusal programlama (Choling, Yu, & Venkatesh, 2009) kullanılmıştır.

Peng vd. (2012) rüzgar türbinlerinden yararlanarak hem elektrik hem ısı enerjisi üretirken rüzgar çıktısındaki belirsizliği dikkate almış, maliyeti enküçüklemek üzere iki-popülasyonlu kaotik diferansiyel evrimsel algoritmayı kullanmıştır (Peng, Sun, Guo, & Liu, 2012).

Güneş ve rüzgar enerjisini bir arada kullanan hibrit bir enerji sisteminde ise yenilenebilir enerji kaynaklarının çıktısı belirsiz olarak ele alınarak toplam beklenen maliyeti enküçüklemek amacıyla iki-aşamalı stokastik programlama ile karma tamsayılı doğrusal programlamadan yararlanılmıştır (Domínguez, Conejo, & Carrión, 2014).

Çalışmaların çoğu maliyeti enküçüklemeyi amaçlamaktayken bununla beraber çevresel etkileri de göz önünde bulunduran çok amaçlı programlama modelleri de bulunmaktadır. Bunlardan birinde Rezvani vd. (2015) karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama tabanlı çok amaçlı eniyileme uygulaması yapmıştır. İlk amaç maliyeti enküçüklemek iken ikinci amaç gaz salınımını enküçüklemektir. Elde edilen pareto optimumları arasında, bulanık karar verme yöntemiyle seçim yapılmıştır (Rezvani, Gandomkar, Izadbakhsh, & Ahmadi, 2015). Benzer bir çalışmada ise "Normal Boundary Intersection" yöntemiyle elde edilen pareto optimumları arasında seçim yapmak için yine bulanık karar verme yönteminden yararlanılmıştır (Izadbakhsh, Gandomkar, Rezvani, & Ahmadi, 2015). Bir diğer çok amaçlı eniyileme çalışmasında ise Aghaei ve Alizadeh (2013), enerji talebi ve rüzgar üretimi belirsizliğini de dikkate alarak bir kojenerasyon sisteminin çizelgelenmesi için karma tamsayılı programlama modelini çalıştırmıştır (Aghaei & Alizadeh, 2013).

Küme 2'de yer alan çalışmalar fosil yakıt kullanmamakla birlikte hepsi de güneş enerjisinden yararlanmıştır (ElDesouky, 2014; Guan, Xu, & Jia, 2010; Liu, Fu, & Kargarlar marvasti, 2014; Wongvisanupong & Hoonchareon, 2013). ElDesouky (2014) tahmini talebi karşılamak üzere yeni üretim miktarını verecek üretim maliyetinin enküçüklenmesi için genetik algoritma ve

yapay sinir ağlarından oluşan bir hibrit model kullanmıştır. Hem rüzgar hem güneş enerjisinden yararlanılarak elektrik ve ısı enerjisi üreten bu sistemde, rüzgar ve güneş çıktılarıyla birlikte enerji talebi de belirsiz olarak ele alınmıştır (ElDesouky, 2014). Güneş enerjisinden yararlanan bir kojenerasyon sistemi için Guan vd. (2010) karma tamsayı programlama kullanırken Liu vd. (2014) çok-aşamalı stokastik karma tamsayı programlama ve senaryo ağacı oluşturma yöntemlerinden yararlanmıştır (Guan et al., 2010; Liu et al., 2014). Her iki çalışma da hem enerji talebi hem güneş çıktısındaki belirsizlikleri dikkate almıştır. Wongvisanupong ve Hoonchareon (2013) ise bu analizde, elektrik ve ısı ile birlikte soğutma da üreten tek çalışmayı yapmışlardır. Fotovoltaik ile çalışan bir trijenerasyon sisteminin çizelgelenmesi için satın alınan elektrik miktarı ile üretilen enerji miktarları değişkenlerini dikkate alarak doğrusal programlama uygulaması yapılmıştır (Wongvisanupong & Hoonchareon, 2013).

Küme 3'teki çalışmaların da tamamının rüzgar enerjisi kullanılmış, büyük bir kısmında da güneş enerjisi ile birlikte hibrit sistemler değerlendirilmiştir (Cau, Cocco, Petrollese, Knudsen Kær, & Milan, 2014; Liang & Liao, 2007; Lima, Novais, & Conejo, 2015; Mohammadi & Mohammadi, 2014; Pandžić, Morales, Conejo, & Kuzle, 2013; Saber & Venayagamoorthy, 2012; Zein Alabedin, El-Saadany, & Salama, 2012; Zhang & van der Schaar, 2014).

Lima vd. (2015) optimal üretim çizelgesini hesaplamak üzere karın enbüyüklenmesi için iki-aşamalı "adaptive robust optimization" uygulaması yapmıştır. Su ve rüzgar enerjisinden yararlanan sistemde elektrik fiyatları ve rüzgar çıktısının belirsizliği de dikkate alınmıştır (Lima et al., 2015). Beklenen karı enbüyükleme amacıyla rüzgar ve suyu enerji kaynağı olarak kullanan, rüzgar çıktısını ve elektrik fiyatlarını belirsizlik olarak dikkate alan bir sistemde de iki-aşamalı stokastik programlama yapılmıştır (Pandžić et al., 2013).

Zhang ve Scaar (2014) enerji depolamasının çizelgelenmesi amacı ile Markov Karar Süreçleri yöntemini kullanmıştır. Rüzgar ve güneş enerjisinden yararlanan sistemde enerji kaynaklarındaki belirsizlikle beraber elektrik fiyatları ve enerji taleplerindeki belirsizlik de modele dahil edilmiştir (Zhang & van der Schaar, 2014). Rüzgar ve güneş enerjisini birlikte kullanan bir diğer çalışmada ise Mohammadi ve Mohammadi (2014) maliyeti enküçükleyerek eniyi depolama çizelgesini elde etmek üzere iki-aşamalı senaryo tabanlı stokastik programlama ile sezgisel Cuckoo algoritmasını kullanmıştır. Sistemdeki belirsizlik olarak rüzgar ve güneş çıktıları, elektrik ve ısı talepleri ile elektrik fiyatlarını alarak 15'er dakikalık zaman dilimi için depoları çizelgelemiştir (Mohammadi & Mohammadi, 2014). Enerji depolama çizelgesi yapan Cau vd. (2014) de maliyeti enküçüklemek üzere karma tamsayı doğrusal programlama yapmıştır. Elektrik talebi ile rüzgar ve güneş çıktılarının belirsizliğini de senaryo ağacı yöntemini kullanarak sisteme dahil etmiştir (Cau et al., 2014). Rüzgar ve güneş enerjisinden yararlanan, enerji talebi ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının çıktılarını da belirsizlik olarak ele alan bir çalışmada mikro-şebeke harcamalarının enküçüklenmesi amacıyla karma tamsayı doğrusal programlama kullanılırken (Zein Alabedin et al., 2012), bir diğer çalışmada toplam maliyetin enküçüklenmesi için bulanık eniyileme yöntemlerinden yararlanılmıştır (Liang & Liao, 2007). Maliyet enküçüklemesinin yanı sıra ikinci bir amaç olarak salınımın enküçüklemesini ele alan bir rüzgar-güneş hibrit sisteminde, rüzgar ve güneş çıktıları ile enerji talebi belirsizliklerini dikkate alan bu çok amaçlı problemi çizelgelemek üzere Parçacık Sürü Optimizasyonu uygulanmıştır (Saber & Venayagamoorthy, 2012).

4. SONUÇLAR

Enerji kaynaklarının kısıtlı olması ve sürekli yeni kaynakların bir arada kullanılması, enerji alanında eniyileme araştırmalarının önem taşımaya neden olmuştur. Bu çalışmada enerji kaynaklarının kullanımı ile enerji üretimini bir arada etkileyecek olan planlama ve çizelgeleme araştırmaları ele alınmıştır. 2000-2015 yılları arasında bulunan 49 bilimsel araştırma optimizasyon model elemanları, belirsizlikler, kullanılan enerji kaynakları ve üretilen enerji türleri açısından incelenmiştir. Özdüzenleyici haritalar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen

kümeleme, şimdiye kadar gerçekleştirilen enerji çizelgeleme çalışmalarının yoğunluklarını açıkça göstermiştir.

Kümeleme çalışmasında ortaya çıkan en önemli bilgi, enerji sistemlerinin çizelgeleme problemlerinde amaç fonksiyonu olarak genellikle maliyet en küçüklemesinin kullanılmasıdır. Sadece birkaç çalışmada çok amaçlı eniyileme ile çizelgeleme modelleri oluşturulurken, çevresel etki olarak karbon salınımının en küçüklemesi ikinci amaç olmaktadır.

Kümelerin tanımında enerji kaynakları olarak fosil, rüzgar ve güneş enerjisi; sistemdeki belirsizlikler için elektrik fiyatı, güneş ışınması, rüzgar hızı ve enerji talepleri; üretilen enerji türleri olarak elektrik, ısı ve soğutma ele alınmıştır. Kümeleme analizi sonucunda yenilenebilir enerji kaynaklarının ağırlıklı olduğu çalışmalarda sistem belirsizliklerine daha çok önem verildiği ve değinilen çalışmalarda elektrik enerjisinin yanı sıra ısı enerjisinin de üretilebildiği görülmektedir. Yöntem olarak en fazla karma tam sayılı uygulamalar ve genetik algoritmalar yanında yapay sinir ağları uygulamaları da görülmüştür. Ancak, stokastik, dinamik ve uyarlanabilir yöntemlerin son iki yılda tek tük çalışıldığı da çıkarımlar arasında yer almıştır.

Bu çalışma enerji çizelgelemesi yapan araştırmacıların hangi konularda ileriye yönelik uzmanlaşma alanı seçecekleri konusunda aydınlatıcı olacaktır. Çalışmanın diğer yöneylem araştırması alanlarında genişletilmesi tüm eniyileme araştırmacılarına yönlendirici olacaktır. Enerji alanında belirsizlik gösteren alanlardaki tahmin çalışmaları, enerji kullanım ve üretim alanındaki çalışmalar incelenmesi gereken alanlardır. Araştırmacıların ele alacakları kriterler, kuracakları modelin parçaları ve kullanılacak yöntemi belirlerken bu tür çalışmalardan yararlanmaları beklenir.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Aghaei, J., & Alizadeh, M.-I. (2013). Multi-objective self-scheduling of CHP (combined heat and power)-based microgrids considering demand response programs and ESSs (energy storage systems). *Energy*, 55, 1044–1054. doi:10.1016/j.energy.2013.04.048.
- [2] Alipour, M., Mohammadi-Ivatloo, B., & Zare, K. (2014). Stochastic risk-constrained short-term scheduling of industrial cogeneration systems in the presence of demand response programs. *Applied Energy*, 136, 393–404. doi:10.1016/j.apenergy.2014.09.039.
- [3] Alipour, M., Zare, K., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2014). Short-term scheduling of combined heat and power generation units in the presence of demand response programs. *Energy*, 71, 289–301. doi:10.1016/j.energy.2014.04.059.
- [4] Alpaydın, E. (1998). Soft vector quantization and the EM algorithm. *Neural Networks*, 11, 467–477.
- [5] Bath, S. K., Dhillon, J. S., & Kothari, D. P. (2004). Fuzzy satisfying stochastic multi-objective generation scheduling by weightage pattern search methods. *Electric Power Systems Research*, 69(2-3), 311–320. doi:10.1016/j.epr.2003.10.006.
- [6] Benhamida, F., & Abdelbar, B. (2010). Enhanced Lagrangian relaxation solution to the generation scheduling problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(10), 1099–1105. doi:10.1016/j.ijepes.2010.06.007.
- [7] Budayan, C. (2008). *Strategic Group Analysis: Strategic Perspective, Differentiation and Performance in Construction*. Middle East Technical University.
- [8] Cau, G., Cocco, D., Petrollese, M., Knudsen Kær, S., & Milan, C. (2014). Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system. *Energy Conversion and Management*, 87, 820–831. doi:10.1016/j.enconman.2014.07.078.
- [9] Chen, S., Tsay, M., & Gow, H. (2005). Scheduling of cogeneration plants considering electricity wheeling using enhanced immune algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 27(1), 31–38. doi:10.1016/j.ijepes.2004.07.008.

- [10] Choling, D., Yu, P., & Venkatesh, B. (2009). Effects of security constraints on unit commitment with wind generators. In *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting* (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/PES.2009.5275977.
- [11] Domínguez, R., Conejo, A. J., & Carrión, M. (2014). Operation of a fully renewable electric energy system with CSP plants. *Applied Energy*, *119*, 417–430. doi:10.1016/j.apenergy.2014.01.014.
- [12] El Desouky, A. A., Aggarwal, R., Elkateb, M. M., & Li, F. (2001). Advanced hybrid genetic algorithm for short-term generation scheduling. *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, *148*(6), 511. doi:10.1049/ip-gtd:20010642.
- [13] ElDesouky, A. A. (2014). Security constrained generation scheduling for grids incorporating wind, photovoltaic and thermal power. *Electric Power Systems Research*, *116*, 284–292. doi:10.1016/j.epr.2014.06.017.
- [14] El-Sharkh, M. Y., Rahman, A., & Alam, M. S. (2010). Short term scheduling of multiple grid-parallel PEM fuel cells for microgrid applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, *35*(20), 11099–11106. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.07.033.
- [15] Garces, L. P., & Conejo, A. J. (2010). Weekly Self-Scheduling, Forward Contracting, and Offering Strategy for a Producer. *IEEE Transactions on Power Systems*, *25*(2), 657–666. doi:10.1109/TPWRS.2009.2032658.
- [16] Guan, X., Xu, Z., & Jia, Q.-S. (2010). Energy-Efficient Buildings Facilitated by Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *1*(3), 243–252. doi:10.1109/TSG.2010.2083705.
- [17] Hand, D.J., Manilla, H., Smith, P. (2001). Principles of Data Mining. India: Prentice Hall.
- [18] Haykin, S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines* (Third, pp. 425–474). New York: Prentice Hall.
- [19] Hetzer, J., Yu, D. C., & Bhattarai, K. (2008). An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *23*(2), 603–611. doi:10.1109/TEC.2007.914171.
- [20] Hsu, C. C. (2006). Generalizing self-organizing map for categorical data. *IEEE Transactions on Neural Networks*, *17*(2), 294–304. doi:10.1109/TNN.2005.863415.
- [21] Izadbakhsh, M., Gandomkar, M., Rezvani, A., & Ahmadi, A. (2015). Short-term resource scheduling of a renewable energy based micro grid. *Renewable Energy*, *75*, 598–606. doi:10.1016/j.renene.2014.10.043.
- [22] Karami, H., Sanjari, M. J., Tavakoli, A., & Gharehpetian, G. B. (2013). Optimal Scheduling of Residential Energy System Including Combined Heat and Power System and Storage Device. *Electric Power Components and Systems*, *41*(8), 765–781. doi:10.1080/15325008.2013.769032.
- [23] Khodr, H. M., El Halabi, N., & García-Gracia, M. (2012). Intelligent renewable microgrid scheduling controlled by a virtual power producer: A laboratory experience. *Renewable Energy*, *48*, 269–275. doi:10.1016/j.renene.2012.05.008.
- [24] Kim, J. S., & Edgar, T. F. (2014). Optimal scheduling of combined heat and power plants using mixed-integer nonlinear programming. *Energy*, *77*, 675–690. doi:10.1016/j.energy.2014.09.062.
- [25] Kohonen, T. (1990). The Self-Organizing Map. *Proceedings of the IEEE*, *78*(9), 1464–1480.
- [26] Leopold, E., May, M., & Paab, G. (2004). Data Mining and Text Mining For Science & Technology Research. H.F. Moed vd içinde, Handbook of Quantitative Science and Technology Research, 187-213. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- [27] Liang, R.-H., & Liao, J.-H. (2007). A Fuzzy-Optimization Approach for Generation Scheduling With Wind and Solar Energy Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, *22*(4), 1665–1674. doi:10.1109/TPWRS.2007.907527.

- [28] Lima, R. M., Novais, A. Q., & Conejo, A. J. (2015). Weekly self-scheduling, forward contracting, and pool involvement for an electricity producer. An adaptive robust optimization approach. *European Journal of Operational Research*, 240(2), 457–475. doi:10.1016/j.ejor.2014.07.013.
- [29] Liu, P., Fu, Y., & Kargarian marvasti, A. (2014). Multi-stage Stochastic Optimal Operation of Energy-efficient Building with Combined Heat and Power System. *Electric Power Components and Systems*, 42(3-4), 327–338. doi:10.1080/15325008.2013.862324.
- [30] Logenthiran, T., & Srinivasan, D. (2009). Short term generation scheduling of a Microgrid. In *TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference* (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/TENCON.2009.5396184.
- [31] Logenthiran, T., Woo, W. L., & Phan, V. T. (2015). Lagrangian relaxation hybrid with evolutionary algorithm for short-term generation scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 356–364. doi:10.1016/j.ijepes.2014.07.044.
- [32] Maturana, J., & Riff, M.-C. (2007). Solving the short-term electrical generation scheduling problem by an adaptive evolutionary approach. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 677–691. doi:10.1016/j.ejor.2005.03.074.
- [33] Mohammadi, S., & Mohammadi, A. (2014). Stochastic scenario-based model and investigating size of battery energy storage and thermal energy storage for micro-grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61, 531–546. doi:10.1016/j.ijepes.2014.03.041.
- [34] Morais, H., Kádár, P., Faria, P., Vale, Z. A., & Khodr, H. M. (2010). Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming. *Renewable Energy*, 35(1), 151–156. doi:10.1016/j.renene.2009.02.031.
- [35] Morales, J. M., Conejo, A. J., & Perez-Ruiz, J. (2009). Economic Valuation of Reserves in Power Systems With High Penetration of Wind Power. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(2), 900–910. doi:10.1109/TPWRS.2009.2016598.
- [36] Morales, J. M., Zugnoa, M., Pineda, S., & Pinson, P. (2014). Electricity market clearing with improved scheduling of stochastic production. *European Journal of Operational Research*, 235, 765–774.
- [37] Osório, G. J., Lujano-Rojas, J. M., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2015). A new scenario generation-based method to solve the unit commitment problem with high penetration of renewable energies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 1063–1072. doi:10.1016/j.ijepes.2014.09.010.
- [38] Pandžić, H., Morales, J. M., Conejo, A. J., & Kuzle, I. (2013). Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming. *Applied Energy*, 105, 282–292. doi:10.1016/j.apenergy.2012.12.077.
- [39] Peng, C., Sun, H., Guo, J., & Liu, G. (2012). Dynamic economic dispatch for wind-thermal power system using a novel bi-population chaotic differential evolution algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 42(1), 119–126. doi:10.1016/j.ijepes.2012.03.012.
- [40] Pritchard, G., Zakeri, G., & Philpott, A. (2010). A Single-Settlement, Energy-Only Electric Power Market for Unpredictable and Intermittent Participants. *Operations Research*, 58(4-part-2), 1210–1219. doi:10.1287/opre.1090.0800.
- [41] Reutterer, T. (1998). Competitive Market Structure and Segmentation Analysis with Self-Organizing Feature Maps. In *Proceedings of the 27th EMAC Conference* (pp. 85–115). Stockholm.
- [42] Rezvani, A., Gandomkar, M., Izadbakhsh, M., & Ahmadi, A. (2015). Environmental/economic scheduling of a micro-grid with renewable energy resources. *Journal of Cleaner Production*, 87, 216–226. doi:10.1016/j.jclepro.2014.09.088.

- [43] Rigo-Mariani, R., Sareni, B., Roboam, X., & Turpin, C. (2014). Optimal power dispatching strategies in smart-microgrids with storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 649–658. doi:10.1016/j.rser.2014.07.138.
- [44] Saber, A. Y., & Venayagamoorthy, G. K. (2012). Resource Scheduling Under Uncertainty in a Smart Grid With Renewables and Plug-in Vehicles. *IEEE Systems Journal*, 6(1), 103–109. doi:10.1109/JSYST.2011.2163012.
- [45] Tan, Z., Ju, L., Li, H., Li, J., & Zhang, H. (2014). A two-stage scheduling optimization model and solution algorithm for wind power and energy storage system considering uncertainty and demand response. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63, 1057–1069. doi:10.1016/j.ijepes.2014.06.061.
- [46] Tian, J., Mao, Y., & Zhai, Q. (2014). Generation scheduling of autonomous power plant in energy intensive enterprises with unknown load demand distribution. In *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference* (pp. 7510–7515). IEEE. doi:10.1109/ChiCC.2014.6896250.
- [47] Tuohy, A., Meibom, P., Denny, E., & O'Malley, M. (2009). Unit Commitment for Systems With Significant Wind Penetration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(2), 592–601. doi:10.1109/TPWRS.2009.2016470.
- [48] Uyar, A. Ş., Türkay, B., & Keleş, A. (2011). A novel differential evolution application to short-term electrical power generation scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(6), 1236–1242. doi:10.1016/j.ijepes.2011.01.036.
- [49] Varkani, A. K., Daraeepour, A., & Monsef, H. (2011). A new self-scheduling strategy for integrated operation of wind and pumped-storage power plants in power markets. *Applied Energy*, 88(12), 5002–5012. doi:10.1016/j.apenergy.2011.06.043.
- [50] Vijayakumar, D., & Malathi, V. (2014). A real-time management and evolutionary optimization scheme for a secure and flexible smart grid towards sustainable energy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 62, 540–548. doi:10.1016/j.ijepes.2014.05.013.
- [51] Wongvisanupong, K., & Hoonchareon, N. (2013). Optimal Scheduling of Hybrid CCHP and PV Operation for Shopping Complex Load. In *10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology* (pp. 667–672). Krabi, Thailand: IEEE, Piscataway, NJ, USA.
- [52] Wu, L., Shahidehpour, M., & Li, T. (2007). Stochastic Security-Constrained Unit Commitment. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(2), 800–811. doi:10.1109/TPWRS.2007.894843.
- [53] Zein Alabedin, A. M., El-Saadany, E. F., & Salama, M. M. A. (2012). Generation scheduling in Microgrids under uncertainties in power generation. In *2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference* (pp. 133–138). IEEE. doi:10.1109/EPEC.2012.6474937.
- [54] Zhang, Y., & van der Schaar, M. (2014). Structure-Aware Stochastic Storage Management in Smart Grids. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 8(6), 1098–1110. doi:10.1109/JSTSP.2014.2346477.