

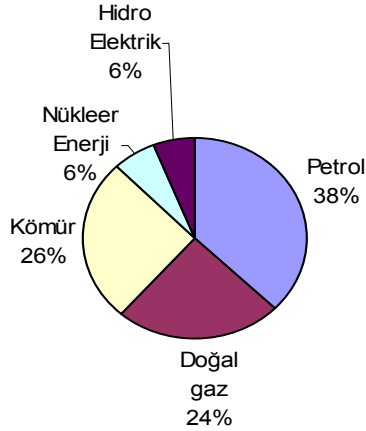
Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Geçiş Sürecinin Planlanmasında Doğrusal En İyileme Tekniğinin Kullanılması

Ahu Soylu, Metin Türkay*
Koç Üniversitesi
Endüstri Mühendisliği Bölümü
Sarıyer, İstanbul
ahusoylu@ku.edu.tr, mturkay@ku.edu.tr

Özet: Enerji, modern insanın gündelik yaşamını sürdürebilmesi için temel gereksinimlerinden biridir. Bu sebeple, enerji üretiminin ve tüketiminin planlanması ve enerji sistemlerinde verimliliğin artırılması tüm dünyanın üzerinde durduğu bir konudur. En iyileme, hedef fonksiyonunun var olan kısıtlar göz önüne alınarak mümkün olan en iyi değere ulaşması hedefleyen bir metod olup, bir karar destek mekanizmasıdır. En iyileme metodu enerji yatırımlarının planlanmasında da kullanılmaktadır. Bu makalede, varolan elektrik üretim tesislerinin kullanım oranlarını ve kurulabilecek elektrik üretim tesislerinin nerede ve ne zaman kurulmasını yıllar itibarıyla elektrik talebini karşılayacak şekilde maliyeti minimize edecek bir doğrusal programlama modeli anlatılmıştır. Model, Türkiye'ye özel verilerle çözülmüş ve gelecek on yılda atılması gereken adımlar için gerekli analiz ve değerlendirmeler yapılmıştır.

1. Giriş

Enerji, modern insanın gündelik yaşamını sürdürebilmesi için temel gereksinimleridir. Endüstriyel çağdan önce enerji ihtiyaçları doğada bulunan odun, rüzgar, su gibi temel kaynaklardan ve insan ve hayvanın kas gücünden karşılanırken, kömürle çalışan buhar makinelerinin keşfi kullanılan enerji kaynaklarını tamamen değiştirmiştir. Kömür, petrol, doğalgaz, hidro elektrik santraller ve nükleer santraller günümüzde kullanılan başlıca birincil enerji kaynaklarıdır. (Şekil 1)



Şekil 1. 2003 yılı Tüm Dünya'da Birincil Enerji Tüketimi Yakıt oranları (Kaynak: BP Yıllık Raporu[1]).

Bu kaynakların büyük bölümünü oluşturan fosil yakıtlarının tüketilmesi çevreye ve insan sağlığına zararlı bazı maddelerin, CO₂, SO_x, NO_x, emisyonuna neden olmaktadır. Bu maddelerin çevreye yayılması yalnız su ve hava kirliliği gibi bölgesel zararlara değil aynı zamanda küresel boyutlarda etkisi olan iklimsel değişikliklere de yol açmaktadır. Bu nedenle, küresel boyutlu anlaşmalarla devletlere bazı kısıtlamalar getirilmiş ve emisyonların azaltılması amacıyla çalışmalar gündeme gelmiştir. Örneğin, 11 Aralık 1997'de yürürlüğe giren Kyoto Protokolünü imzalayan ülkeler, 2012 yılında emisyon değerlerini 1990 yılı değerlerinin altına çekeceklerini taahhüt etmişlerdir[2]. Çevreye verdikleri emisyonların net değeri sıfır olan yenilenebilir enerji kaynakları yalnız çevresel nedenlerle değil aynı zamanda hızla azalan fosil kaynaklarının yerine sürdürülebilir enerji kaynakları aranması sebebiyle de önem kazanmıştır.

Türkiye henüz Kyoto Protokolünü imzalamamış olsa da yenilenebilir enerji kaynaklarının gelecekte enerji üretimimizde büyük rol oynayacağı kesindir. Bu nedenle, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin planlanmasında etkin stratejiler geliştirmek, hem ülkemiz hem de tüm dünya ülkeleri için gereklidir. Bu tür stratejilerin geliştirilmesinde planlamanın önemi açıktır, çünkü kısıtlı kaynaklarla, yatırım için ihtiyaç duyulan kapital, hammadde stoğu, yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyeti ve kullanılabilirliğinin birlikte düşünülmesi ve istenen hedeflere ulaşılması gerekmektedir. En iyileme metodu, Karar Destek Sistemlerinde sıkça kullanılan bir metodolojidir. Buna göre matematiksel olarak en iyilenmesi istenen hedef fonksiyonunun var olan veya olabilecek kısıtlar göz önüne alınarak mümkün olan en iyi değere ulaşması hedeflenir.

En iyileme metodunun yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişte, enerji yatırımlarının planlanmasında ve enerji tedarik zincirlerinin modellenmesinde akademik literatürde sıkça kullanıldığına şahit olmaktayız. Örneğin, Koroneos ve ark. (2003) [3] Yunanistan'ın Midilli Adası'nda enerji sistemini varolan enerji ağı ve yenilenebilir enerji kaynakları potansiyelini göz önüne alarak çevresel etki minimizasyonu ve maliyet minimizasyonu olmak üzere iki amaç fonksiyonu bulunan bir çok amaçlı en iyileme programı ile inceler. Buna göre karar vericiye verilen duruma uygun karar verme esnekliği sağlarken, yapılan tercihe göre en iyi planlamayı önermektedir. Bir başka en iyileme modeli uygulaması Cormio ve ark. (2002) [4] tarafından modellenmiş Güney İtalya'daki Apulia bölgesi verileriyle çalışılmıştır. Buna göre, enerji akışı en iyileme modeli doğrusal programlama metodolojisiyle modellenmiştir. Aşağıdan yukarı bir modelleme stratejisi kullanıldığı için varolan kojenerasyon sistemlerinden son kullanıcıya kadar bölgeye özel pek çok detay modele dahil edilmiştir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişte bölgeye özel sonuçlar elde edilmiştir. Oliveria ve ark.(2004) [5] ekonomi, enerji ve çevre etkileşimlerini sektörlerin birbirleriyle ilişkilerini doğrusal olarak modelleyerek en iyileme metoduyla çalışmıştır. Buna göre çevre kirliliği, yerel enerji üretimi, işsizlik,brüt yurtiçi hasıla ve ihraç edilen enerji gibi kaygılarla yapılan modelleme Portekiz için çözülmüş ve farklı senaryolar altında en iyi karar verme yöntemleri önerilmiştir.

Bu makalede önerilen sistem bir doğrusal en iyileme metodu olup, Türkiye'nin yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinde karar verme mekanizmalarına bir destek olma amacını taşımaktadır. Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü'nün yaptığı çalışmaya göre, rüzgar enerjisi için en uygun potansiyel Çanakkale-Kuşadası-Bandırma bölgesinde bulunmuş olup, bu bölgeler için elde edilen veriler modelimizde kullanılmıştır[6]. Güneş enerjisi ise aylık toplam güneş enerjisine bağlı olduğu kadar, ısıma süresine de bağlıdır. Bu nedenle, elde edilecek verim bölgeler arasında büyük farklılıklar göstermektedir. Güneş enerjisi kullanımında, evlerde ısıtma amacıyla kullanılan düzenekler göz önüne alınmamış, kurulabilecek güneş elektrik santralleri modellenmiştir. Burada dünyadaki uygulamalarda termal güneş elektrik santralleri çok verimli bulunmadıkları için modellenmemiş, onun yerine gelecek vaat eden fotovoltaik elektrik santralleri modellenmiştir. Bir başka yenilenebilir enerji kaynağı olan Biyokütle modellemesinde ise Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü'nden ve 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı'ndan [7] alınan veriler kullanılmıştır. Ülkemizin bir diğer önemli yenilenebilir enerji kaynağı da jeotermal enerji kaynaklarıdır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, Türkiye jeotermal enerji kaynaklarının yoğun olduğu bir bölgede bulunmaktadır[8]. Halihazırda kurulu bir jeotermal elektrik santrali vardır ve diğer bazı jeotermal kaynaklardan da ısıtmada faydalanılmaktadır. Jeotermal enerjiyle ilgili veriler, Tübitak tarafından hazırlanan "Çevre Dostu ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile İlgili Teknolojiler-Alt Grup Raporu"ndan alınmıştır[9]. Sayılanlar dışındaki yenilenebilir enerji kaynakları, henüz gelişme aşamasında oldukları için çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.



Şekil 2. Jeotermal Enerji Kaynaklarının Coğrafi Dağılımı

2. Problemin Modellenmesi

Türkiye'nin yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinde karar verme mekanizmalarına bir destek olma amacıyla olan model, doğrusal en iyileme metodu ile modellenmiştir. Yapılan çalışmalarda Türkiye'nin farklı coğrafi

yeksem 2005
III. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI SEMPOZYUMU

bölgelerinde farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının daha elverişli olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, Ege Bölgesi rüzgar enerjisi için uygunken, hayvancılığın yoğun olduğu Doğu Anadolu Bölgesi de biyogaz üretimi için uygun bulunmuştur. Buna göre Türkiye’de potansiyel olarak kurulabilecek ve halihazırda varolan termal, hidroelektrik, jeotermal, biyogaz, güneş enerjisi ve rüzgar santralleri Türkiye’nin yedi coğrafi bölgeye ayrılması ile modellenmiştir.

Türkiye’nin gelecek elli yıllık elektrik talebi, geçmiş yirmi yıllık verinin incelenmesi ve trendin belirlenmesi yoluyla tahmin edilmiştir. Buna göre modelimiz, varolan elektrik santrallerinin kullanım oranlarını ve kurulabilecek elektrik üretim santrallerinden hangilerinin ne zaman kurulması gerektiğini, maliyet minimizasyonu yöntemiyle belirlemektedir. Varolan ve kurulabilecek enerji santralleri şunlardır: kömürle çalışan termik, doğalgazla çalışan termik, fuel-oil ile çalışan termik, hidroelektrik, rüzgar, güneş, biyokütle ve jeotermal elektrik santralleri.

İndeksler

t = zaman indeksi [2005 –2054]
e = varolan enerji santralleri indeksi
p = potansiyel enerji santralleri indeksi
r = bölge indeksi

Parametreler

d_t = dönemlik elektrik talebi [GWh]
 $fc_{p,r}$ = potansiyel enerji santrali kurulum maliyeti [M\$/GWh]
 $ce_{e,r}$ = varolan enerji santrallerinin kapasitesi [GWh/yıl]
 $cp_{p,r}$ = potansiyel enerji santrallerinin kapasitesi [GWh/yıl]
 uce_e = varolan enerji santrallerinin birim elektrik maliyeti [M\$/GWh]
 $ucp_{p,r}$ = potansiyel enerji santrallerinin birim elektrik maliyeti [M\$/GWh]
 use_e = varolan enerji santrallerinin birim SO_x emisyonu [çevresel kalite indeksi]
 usp_p = potansiyel enerji santrallerinin birim SO_x emisyonu [çevresel kalite indeksi]
 mc_i = yapılabilecek maksimum dönemlik yatırım miktarı [M\$]
 $spen$ = Birim SO_x emisyonunun maliyeti [M\$/çevresel kalite indeksi]
 ec = elektriği ithal etmenin maliyeti [M\$/GWh]
 ep = elektriği ihraç etmenin fiyatı [M\$/GWh]

Karar değişkenleri

$XE_{e,t}$ = var olan enerji kaynaklarından üretilen enerji
 $XP_{p,r,t}$ = bir bölgede sonradan kurulan enerji kaynaklarından üretilen enerji
 $SP_{p,r,t}$ = bir bölgedeki potansiyel enerji kaynaklarından yüzde kaçının o dönemde kurulduğu
 SO_t = bir dönemdeki toplam SO_x gazı emisyonu
 IM_t = bir dönemdeki toplam elektrik ithalatı
 EX_t = bir dönemdeki toplam elektrik ihracatı

Amaç Fonksiyonu

$$\begin{aligned} \text{minimize } & \sum_p \sum_r \sum_t fc_{p,r} \times SP_{p,r,t} \times cp_{p,r} + \sum_e \sum_r \sum_t (XE_{e,t} \times uce_{e,r}) + \sum_p \sum_r \sum_t (XP_{p,r,t} \times ucp_{p,r}) + \\ & \sum_t (IM_t \times ec) - \sum_t (EX_t \times ep) + \sum_t (SO_t \times spen) \end{aligned} \quad (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_e XE_{e,t} + \sum_p \sum_r XP_{p,r,t} + IM_t - EX_t = d_t \quad \forall t \quad (2)$$

$$XP_{p,r,t} \leq \sum_t SP_{p,r,t} \times cp_{pr} \quad \forall p,r,t \quad (3)$$

$$XE_{e,t} \leq ce_e \quad \forall e,t \quad (4)$$

$$\sum_p \sum_r \sum_t fc_{pr} \times SP_{p,r,t} \times cp_{pr} \leq \sum_t mc_t \quad \forall p,r,t \quad (5)$$

$$\sum_t SP_{p,r,t} \leq 1 \quad \forall p,r \quad (6)$$

$$\sum_e XE_{e,t} \times use_e + \sum_p \sum_r XP_{p,r,t} \times usp_p = SO_t \quad \forall t \quad (7)$$

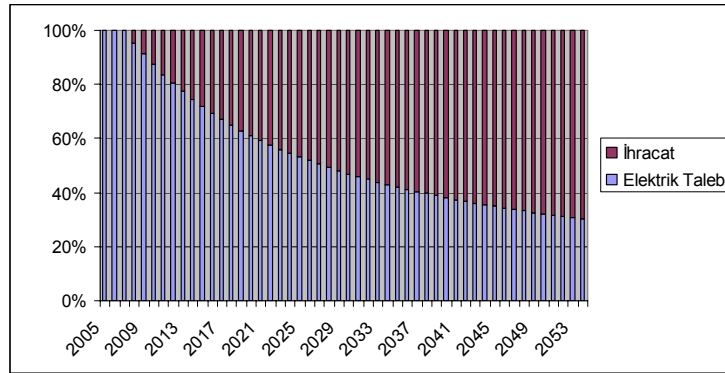
$$\text{tüm deęişkenler} \geq 0, SP_{p,r,t} \in [0,1]$$

Amaç fonksiyon sırasıyla, potansiyel kaynakların kurulum maliyeti, var olan ve kurulan kaynakların işletme maliyetleri, elektrik alım maliyeti, dışa satıştan gelen kazancın negatifi ve çıkan SO_x emisyonlarından dolayı çevresel zararın maliyetinden oluşur. Potansiyel kaynakların kurulum maliyeti toplam kapasiteyle orantılı olup, $SP_{p,r,t}$ değişkeni hangi kapasitede kurulacağını belirler. Denklem (2) ilk kısıt olup, toplam talebin üretim, ihracat ve ithalatın dengesine eşit olması gerektiğini gösterir. Denklem (3), herhangi bir potansiyel enerji kaynağının o ana kadar kurulan toplam kapasiteden fazla üretemeyeceğini, denklem(4) ise var olanların kapasitelerinden fazla üretemeyeceklerini gösterir. Denklem (5) yapılan yatırımları sınırlandırırken, denklem (6) kurulacak enerji kaynaklarının yüzdesini belirler. Denklem (7) ise toplam SO_x emisyonunu hesaplar.

3. Problemin Çözümü

Geleceğe dair yapılan planlamalarda en büyük gereklilik doğru ve kesin verilerle çalışmaktır. Bu nedenle, kurulan modelin Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesini yansıtmısına dikkat edilmiştir. Örneğin, biyogaz potansiyelinin belirlenmesinde her coğrafi bölgede kaç hayvan olduğu bulunmuş, potansiyel buna göre hesaplanmıştır[10]. Rüzgar türbinleri için EİE tarafından etüdü yapılan yerler alınmış, bunlar için gerçek değerler kullanılmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca, hidroelektrik santral potansiyeli de projelendirilmiş olanlar göz önüne alınarak belirlenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının teknolojiyle birlikte ucuzladığı ve daha verimli hale geldiği göz önüne alınarak, elli yıl içinde yapılacak yatırımların zamanla birlikte ilk yatırım ve birim elektrik üretim maliyetlerinin zamanla birlikte azalması modele eklenmiştir. Ayrıca yurtdışından alınan ve yurtdışına satılan elektriğin fiyatının zamanla arttığı da modellenmiştir. Model, ILOG OPL Studio ile çözülmüştür[11].

Modelin sonuçları incelendiğinde, önümüzdeki elli yılda çok ciddi yatırımlar yapılmazsa Türkiye'nin enerji kaynağı dağılımında bir değişim olmayacağı saptanmıştır. Dış alım elektrik fiyatları planlandığı gibi arttığı sürece ve geçmiş yirmi yılda yapılan enerji yatırımlarından yapılan tahmini enerji yatırımlarının üstüne çıkılmadığı sürece en ekonomik yol, elektrik ihtiyacının önemli bir bölümünün dış ülkelerden satın alınması olarak bulunmuştur (Şekil 3).



Şekil 3. Elektrik ihtiyacının karşılanmasında ihracatın payı

Model, dışardan elektrik alımı tamamen engellenmiş senaryo üzerinde tekrar çözüldüğünde, sonuçsuz kalmıştır. Çünkü, yenilenebilir enerji kaynakları için tespit edilen yapılabilecek kapasite ve yapılabilecek yatırımlar

yetersizdir. Bu nedenle, yapılacak yatırımların limiti artırılmış ve kapasitesi kendi ihtiyaçlarımızı karşılamaya yetecek, maliyeti yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyetinden biraz fazla olan bir enerji kaynağı tanımlanmıştır. Bu durumda, model çözüm üretmiş ve yatırımların öncelikle diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına ve sonra da bu enerji kaynağına yatırım yapılması gerektiği sonucunu vermiştir. Bu sonuca göre, yapılacak yatırımların artırılması durumunda bile tanımlı yenilenebilir enerji kaynakları kapasitesinin az olması nedeniyle kendi enerji ihtiyacımızın tamamını yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılamamız mümkün görünmemektedir. Var olan kapasitenin artırılması ve potansiyelin en doğru şekilde tanımlanması gerekmektedir. Ayrıca, yeni enerji kaynakları araştırmalarını destekleyerek yeni ve çevreye duyarlı enerji kaynakları geliştirilmelidir. Yapılacak daha verimli fizibilite çalışmalarıyla daha yüksek kapasitenin tespit edilmesi halinde yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin daha etkin planlanması beklenmektedir.

5. Sonuç

Enerji, üretimin ve tüketimin planlanması, tüm dünyanın üzerinde durduğu bir konudur. Bu makalede, doğrusal programlama ile eniyileme metodunun Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişinde kullanılmasını planlamayı amaçlayan bir model anlatılmıştır. Buna göre, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş için çalışmalarını artırması gerektiği ve tespit edilen kapasitelerin daha detaylı incelenip arttırılabileceğinin anlaşılması durumunda bu yatırımların Türkiye için verimli olacağı sonuçlarına varılmıştır.

6. Kaynaklar

- [1] Statistical Review of World Energy 2004, 18 Nisan 2005 tarihinde <http://www.bp.com/subsection.do?categoryId=95&contentId=2006480>
- [2] UNFCC, 2004. Climate Change Information Kit, 15 Nisan 2005 tarihinde <http://www.unfccc.int/resource/uuckit/cckit2001en.pdf>
- [3] C. Koroneos , M. Michailidis ve N. Moussiopoulos, “Multi-objective optimization in energy systems: the case study of Lesbos Island, Greece”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8 (2004) 91–100
- [4] C. Cormio, M. Dicorato , A. Minoia, M. Trovato, “A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 7 (2003) 99–130
- [5] Carla Oliveira, Carlos Henggeler Antunes, “A multiple objective model to deal with economy–energy–environment interactions”, European Journal of Operational Research, 153 (2004) 370–385
- [6] 18 Nisan 2005 tarihinde <http://www.eie.gov.tr/>
- [7] “8. Beş Yıllık Kalkınma Planı” 28 Nisan 2005 tarihinde <http://plan8.dpt.gov.tr/>
- [8] Belyaev L.S, Marchenko O.V., Filippov S.P, Solomin S.V., Stepanova T.B., Kokorin A.L “World Energy Transition to Sustainable Development” , Kluwer Academic Publishers, Hollanda, 2002, s. 115
- [9] “Çevre Dostu ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile İlgili Teknolojiler-Alt Grup Raporu” 25 Nisan 2005 tarihinde <http://www.tubitak.gov.tr/btpd/btspd/platform/enerji/index1pdf.html>
- [10] 28 Nisan 2005 tarihinde <http://www.die.gov.tr/konularr/table14.htm>
- [11] ILOG Software: OPL Studio Ürünü, library opl.lib, version 3.6.1, Tarih 20 Kasım 2002, Copyright (C) 1998-2002 ILOG.