

**KAYNAK KÖKENLİ AYRIŞTIRMA YÖNTEMİYLE
ENERJİ SİSTEMLERİNİN OPTİMİZASYONU**

Mustafa YILMAZ

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MART 2009
ANKARA**

Mustafa YILMAZ tarafından hazırlanan KAYNAK KÖKENLİ AYRIŞTIRMA YÖNTEMİYLE ENERJİ SİSTEMLERİNİN OPTİMİZASYONU adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ATAK

Tez Danışmanı, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Zülal GÜNGÖR

.....

Endüstri Mühendisliği A.B.D., Gazi Üniv.

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

.....

Endüstri Mühendisliği A.B.D., Gazi Üniv.

Prof. Dr. Cafer ÇELİK

.....

Endüstri Mühendisliği A.B.D., Atatürk Üniv.

Prof. Dr. Mehmet EROĞLU

.....

Makine Mühendisliği A.B.D, Gazi Üniv.

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ATAK

.....

Endüstri Mühendisliği A.B.D., Gazi Üniv.

Tarih: 03/03/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mustafa YILMAZ

**KAYNAK KÖKENLİ AYRIŞTIRMA YÖNTEMİYLE
ENERJİ SİSTEMLERİNİN OPTİMİZASYONU
(Doktora Tezi)**

Mustafa YILMAZ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mart 2009

ÖZET

Bu tezde, Türkiye enerji sisteminin çevresel kısıtları da içeren optimal kaynak dağıtım modeli geliştirilmiş ve farklı senaryolar altında 2030 yılına kadar alternatif projeksiyonlar sunulmuştur. Bu amaçla ulusal enerji-çevre sistemi analiz edilmiş, doğrusal optimizasyon esaslı teknolojik yapısının şebeke modeli oluşturularak gelecek yıllar için tahmin edilen talepleri karşılayacak olan üretim ve teknolojik alternatifler gelişim yolları belirlenmiştir. Modüler modelleme esaslı olarak, birincil enerji biçimleri olan kömür, petrol, doğalgaz, nükleer ve yenilenebilir enerji kaynakları, doğrusal programlama akış modeline dâhil edilip, ikincil enerji yada dönüşüm sektöründen geçirilerek nihai kullanım kesimi olan sanayi, ulaştırma, konut ve tarım sektörlerinin enerji taleplerinin karşılanmasına yönelik bir teknik-ekonomik model geliştirilmiştir. Model, çevresel kısıtlayıcılar altında da çalıştırılmış ve CO₂, SO₂ ve NO_x emisyon değerlerinin aynı periyot içerisindeki değişimi yine sektörel olarak incelenmiştir. Çalışmada, Avrupa Birliği ülkelerinin hemen hemen tamamına yakın kısmına da uygulanan, bir enerji-çevre optimizasyon modeli, EFOM-ENV, temel alınmış ve bu model üzerinde kaynak kökenli ayrıştırma metodu geliştirilmiştir. Modelde, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından yayınlanan referans senaryo ve Uluslararası Enerji Ajansı tarafından yayınlanan FEC1 ve FEC2 senaryoları göz önünde bulundurulmuş ve bu üç senaryoya göre karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma

kapsamında geliştirilen optimizasyon modelinde çevresel kirleticilerin etkilerin minimizasyonu ve sektörel enerji talebinin farklı birincil enerji kaynakları ile karşılanması amaçlanmıştır.

Bilim Kodu : 906.1.148
Anahtar Kelimeler : Enerji, Çevre, Modelleme, Ayrıştırma
Sayfa Adedi : 109
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Mehmet ATAK

**OPTIMIZATION OF ENERGY SYSTEMS USING
RESOURCE DIRECTIVE DECOMPOSITION METHOD**

(Ph.D. Thesis)

Mustafa YILMAZ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

March 2009

ABSTRACT

In this thesis, optimal resource allocation model of Turkey's energy system including environmental constraints has developed and alternative projections under the different scenarios till 2030 have presented. For this purpose, the national energy and environment system has analyzed, constructing a network model of the technological structure representing the current and future status of the system, production and technological alternatives satisfying the estimated demands for next years have been determined. As being modular oriented, a technical and economic model has been developed through inserting the primary energy sources like coal, oil, natural gas, nuclear and renewable energy to linear programming flow model and converting them in the secondary sector in order to satisfy an exogenously given energy demands of end-users such that industry, transportation, residential and agriculture sectors. Also, the model has also run as being subject to environmental constraints representing some environmental pollutants and the changes of CO₂, SO₂ and NO_x emission values by sectors in same period have been analyzed. In this study, an energy environment optimization model EFOM-ENV, Energy flow optimization model with an environmental module, which was implemented to almost all the European Union member states, has been considered as the basic tool and, on which, the resource directive decomposition method is applied. In the proposed model, as for the demand inputs, those of the reference scenarios of the Ministry

of Energy and Natural Resources (MENR) and FEC1 and FEC2 scenarios of the International Energy Agency are considered. The comparative results according to these scenarios have been obtained. Minimization of the effects of environmental pollutants and satisfying the sectors' energy demands with different primary energy sources are considered as objectives of the proposed model within the study.

Science Code : 906.1.148

Key Words : Energy, Environment, Modeling, Decomposition

Page Number : 109

Adviser : Assist. Prof. Mehmet ATAK

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet ATAK'a, engin bilgi birikimlerini benimle paylayan Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. Zülal GÜNGÖR ve Prof. Dr. Mehmet EROĞLU'na, maddi manevi destekleri ile beni yalnız bırakmayan değerli mesai arkadaşlarıma ve özverili desteklerinden dolayı aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
2.1. Enerji Çevre Modellerine Genel Bir Bakış	6
3. TÜRKİYE’DE ENERJİ VE ÇEVRE.....	18
3.1. Türkiye’nin Enerji Yapısına Genel Bakış.....	18
3.2. Enerji Kaynaklarımızın Genel Durumu ve Dışa Bağımlılık.....	23
3.2.1. Genel durum.....	23
3.2.2. Kömür	23
3.2.3. Hidrolik enerji	25
3.2.4. Petrol	26
3.2.5. Doğalgaz	27
3.2.6. Yenilenebilir enerji.....	28
3.3. Türkiye’de Enerji Kullanımından Kaynaklı Çevre Kirliliği.....	35
4. AYRIŞTIRMA YÖNTEMİ	40
4.1. Kaynak kökenli Ayrıştırma Yöntemi	45
4.2. Kaynak Dağıtım Teorisi.....	48

	Sayfa
4.3. Optimalite Koşulları.....	49
4.4. Kaynakların Optimal Paylaşımı	52
4.5. Optimal Kaynak Dağıtım Prensipleri	54
4.6. Enerji Sistemlerinin Ayırıştırılması	55
4.6.1. Kaynak kökenli ayırıştırma algoritması	58
5. ENERJİ AKIŞ OPTİMİZASYON MODELİ (EFOM).....	59
5.1. Modele Ait Genel Özellikler, Girdi ve Raporlama Özellikleri.....	61
5.1.1. Genel özellikler	61
5.1.2. Girdi özellikleri	61
5.1.3. Raporlama özellikleri.....	62
5.2. EFOM-GAMS ile Enerji Sisteminin Modellenmesi.....	63
5.2.1. Merkezi elektrik üretim sektörü.....	64
5.2.2. Endüstriyel otoprodüktör elektrik üretim sektörü.....	65
5.2.3. Verilerin girilmesi	66
5.3. Matematiksel Model.....	68
5.3.1. Denge denklemleri	68
5.3.2. Kapasite denklemleri.....	69
5.3.3. Emisyon azaltım denklemleri.....	70
5.3.4. Maliyet denklemi	72
6. AYRIŞTIRILMIŞ MODELDEN ELDE EDİLEN SAYISAL SONUÇLAR.....	76
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR	93
EKLER.....	99

	Sayfa
EK-1 Ayrıştırma Yöntemi için Sayısal Örnek	100
ÖZGEÇMİŞ	108

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Birincil Enerji Kaynakları Üretimi	19
Çizelge 3.2 Genel Enerji Tüketiminin Kaynaklara Dağılımı.....	19
Çizelge 3.3. Nihai Enerji Tüketiminin Kaynaklara Dağılımı	20
Çizelge 3.4. Nihai Enerji Tüketiminin Sektörel Dağılımı	20
Çizelge 3.5. Enerji Talep –Üretim- İthalat ve İhracatının Gelişimi.....	21
Çizelge 3.6. Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyeli.....	22
Çizelge 3.7. Kömür kaynağının üretim ve tüketim değerleri.....	24
Çizelge 3.8. Doğalgaz için üretim ve tüketim değerleri.....	28
Çizelge 3.9. Türkiye'nin Aylık Ortalama Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	30
Çizelge 3.10. Türkiye'nin Yıllık Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı	31
Çizelge 3.11. 10 Metre Yükseklikteki Aylık Ortalama Rüzgâr Hızları.....	32
Çizelge 3.12. Türkiye'de Hayvansal Atık Potansiyeline Karşılık Gelen Üretilebilecek Biyogaz Miktarı ve Taşkömürü Değeri.....	35
Çizelge 3.13. Farklı ülkeler için karşılaştırmalı CO ₂ emisyon değerleri	38
Çizelge 3.14. AB ülkeleri ve Türkiye'deki kişi başı GHG emisyon değerlerinin karşılaştırması	39
Çizelge 5. 1. Model Karakteristikleri.....	61
Çizelge 6.1. Referans senaryo için 2010–2030 yılları arasındaki kaynak dağılımı ...	78
Çizelge 6.2. FEC1 senaryosu için 2010–2030 yılları arasındaki kaynak dağılımı	79
Çizelge 6.3. FEC2 senaryosu için 2010–2030 yılları arasındaki kaynak dağılımı	80
Çizelge 6.4. Farklı senaryolar için CO ₂ emisyonlarının sektörel dağılımı	85
Çizelge 6.5. Farklı senaryolar için SO ₂ emisyonlarının sektörel dağılımı.....	87

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.6. Farklı senaryolar için NO _x emisyonlarının sektörel dağılımı	88

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2. 1. Enerji-Çevre araçları.....	8
Şekil 3.1. Enerji üretiminin talebi karşılama oranı	22
Şekil 3.2. Sektörlerden kaynaklanan sera gazı emisyon değerleri.....	37
Şekil 4.1. İteratif denge prosesi.....	43
Şekil 4. 2. Kaynak kökenli ayrıştırma algoritması Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	
Şekil 5.1. EFOM-GAMS modelinin modüler yapısı	59
Şekil 5.2. EFOM-ENV/GAMS Ağı: Türkiye'nin Merkezi Elektrik Sektörü	65
Şekil 5. 3. EFOM-ENV/GAMS Ağı: Türkiye Endüstriyel Otoprodüktörler Sektörü	66
Şekil 6.1. Birincil enerji tüketimi.....	77
Şekil 6.2. Birincil enerji kaynaklarının sektörel dağılımı	81
Şekil 6.3. Farklı senaryolar için toplam birincil enerji kaynaklarındaki değişim	81
Şekil 6.4. Birincil enerji kaynaklarındaki birim değişimin maliyete etkisi (%)......	82
Şekil 6.5. Birincil enerji kaynaklarındaki birim değişimin toplam emisyona etkisi (%)......	83
Şekil 6.6. Temiz enerji kaynakları ile emisyon arasındaki ilişki	84
Şekil 6.7. Fosil tabanlı enerji kaynaklarından kaynaklanan emisyon değişimi	84
Şekil 6.8. Toplam CO ₂ emisyonlarının değişimi	86
Şekil 6.9. Toplam SO ₂ emisyonlarının değişimi.....	87
Şekil 6. 10. Toplam NO _x emisyonlarının değişimi	88

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Btep	Bin ton eşdeğer petrol
GWh	Gigawatt-saat
kWh	Kilowatt-saat
m³	Metreküp
Mtep	Milyon ton eşdeğer petrol
MW	Megawatt
PJ	Peta Joule
tep	Ton eşdeğer petrol
W	Watt
Kısaltmalar	Açıklama
BESOM	Brookhaven enerji sistem optimizasyon modeli
ÇED	Çevresel etki değerlendirme
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri
EFOM	Enerji akış optimizasyon modeli
EFOM-ENV	Çevresel enerji akış modeli
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FEC	Nihai enerji tüketimi
GEF	Küresel Çevre Fonu
GHG	Sera gazı
GSMH	Gayri safi milli hasıla
İDÇS	İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

Kısaltmalar	Açıklama
IRP	Bütünleşik kaynak planlaması
IAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu
LEAP	Uzun vadeli enerji alternatifleri planlama sistemi
MAED	Enerji Talebinin analiz modeli
MEDEE	Avrupa için enerji talep modeli
MESSAGE	Enerji arz sistemleri analiz modeli
MESAP	Modüler enerji sistem analizi
MIND	Çok periyotlu maliyet optimizasyon modeli
MODEST	Enerji sistemi optimizasyon modeli
MPEE	Enerji ekonomi ortam modeli
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
OREM	Optimal yenilenebilir enerji modeli
POLES	Uzun dönemli enerji sistemleri modeli
TESOM	Zaman adımlı enerji sistemi optimizasyon modeli
TÜREB	Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
UNDP	Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı

1. GİRİŞ

Enerjinin ekonomik ve sosyal kalkınmanın önemli bileşenlerinden biri olduğu, yaşam standartlarının yükseltilmesinde hayati bir rol oynadığı bilinmektedir. Sürdürülebilir bir kalkınmanın sürekli ve kaliteli bir enerji arzıyla mümkün olacağı da çok bilinen bir diğer husustur.

Sürdürülebilir kalkınmanın enerjiyle olan bağlantısı, çok uzun bir süre boyunca enerjinin tüketicilere güvenli biçimde sunulması ekseninde ele alınmış, enerji-kalkınma ilişkisi bu çerçevede değerlendirilmiştir. Ancak, hâlihazırda en önemli enerji kaynağı olan fosil yakıtların (kömür, petrol, doğalgaz) gittikçe ve süratle azalmakta oluşu, diğer yandan bu kaynakların yarattığı çevresel problemler, hem bu kaynakların rasyonel ve ekonomik biçimde kullanımı olgusunu, hem de enerji verimliliği kavramını gündeme getirmiş, sürdürülebilir kalkınmayla ilgili çalışmalara bu konuların dahil edilmesi sonucunu doğurmuştur [1].

Bugün itibarıyla dünya enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılamakta olan fosil yakıt rezervlerinin kullanım hızı sürekli artmaktadır. Özellikle kalkınmakta olan ülkelerin fosil yakıt taleplerinde kesintisiz bir artış söz konusudur. Buna karşılık fosil yakıt rezervlerinde paralel bir artış meydana gelmemektedir. Mevcut kullanım düzeylerinin sabit kalması durumunda bile özellikle petrol rezervlerinin uzun olmayan bir süre içerisinde tükeneceği tahmin edilmektedir. Biraz daha fazla ömür biçilen doğalgaz kaynakları için de benzer bir durumun söz konusu olduğunu söylemek mümkündür.

Hızla tükenen fosil yakıtların yerine bir yandan alternatif enerji kaynakları aranırken, diğer yandan mevcut kaynakların etkin biçimde değerlendirilmesi gündeme gelmekte ve enerji tüketiminin konforu etkilemeden düşürülmesi yönünde eğilimler oluşmaktadır. Bu eğilimler genel olarak enerji verimliliği başlığı altında değerlendirilmektedir [2].

Çağımızda enerjiye ulaşmak temel ihtiyaç haline gelmiştir. Ekonomik ve sosyal kalkınma için; güvenilir, satın alınabilecek fiyattan ve temiz enerji talebinin karşılanması zorunludur. Dünya'daki mevcut enerji kaynaklarına petrol için 40, Doğalgaz için 60 ve kömür için 200 yıl ömür biçilmiş de olsa, mevcut kaynaklar dünya için oldukça yeterlidir. Enerji sektöründe üretim, çevrim ve taşıma teknolojileri inanılmaz bir hızla gelişmektedir. Birkaç yıl önce hayal bile edilemeyen yeni projelerle, enerji dünyanın her yerine taşınmaktadır.

Bugün dünyadaki enerji sektörünü şekillendiren diğer bir husus da jeopolitik gelişmeler olmaktadır. Petrol zengini Ortadoğu'da artan gerilimler, politik amaçlı enerji kesintileri dünya enerji arzını hassas ve enerji fiyatlarını çok değişken hale getirmiştir. Ancak yine de bu endişeler tüm enerji kaynaklarını kapsamamaktadır ve sadece petrol ve Doğalgaz gibi sayılı ülkenin kontrolünde olan kaynaklar için geçerlidir.

Dünyada devam eden özelleştirme ve serbestleştirme ve bu amaçla süregelen yasal ve yapısal değişim ve dönüşüm süreci dünya enerji pazarında bugüne kadar olan en büyük belirsizlik dönemini yaratmıştır. Belirsizlik ortamı, kullanılabilir durumda olan yerli kaynaklara daha çok yatırım yapılmasını ve dengeli bir enerji karışımı için daha dikkatli ve uzun dönemli planların yapılmasını gerekli kılmaktadır [3].

Bu çalışmada; Türkiye'nin 2030 yılına kadar söz konusu ekonomik ve teknolojik gelişmeleri de göz önüne alacak biçimde ve çevresel kısıtlayıcılar altında son kullanıcı sektörler olan sanayi, ulaştırma, konut ve tarım sektörlerinin taleplerini karşılayacak olan birincil enerji kaynaklarının nasıl dağıtılacağı sorusuna cevap aranmıştır.

Çalışmada enerji sistem gelişiminin çevresel kısıtlayıcılar (örneğin CO₂, SO₂, NO_x ve emisyonları) üzerindeki standartları sağlayacak biçimde sistemin çevresel zararlı etkilerini minimize edici yani çevresel uyumunun maksimize edilmesi ve kaynak kullanım oranının maksimizasyonu amaçlanmıştır. Ayrıca modelde çevresel

kirleticilerin (CO₂, SO₂, NO_x) 2030 yılına kadarki değişimi de incelenmiş ve nihai sektörlerden kaynaklanan emisyon değerleri hesaplanmıştır.

Yukarıda çerçevesi çizilen çalışmada, yöntem olarak kaynak kökenli ayrıştırma yöntemi kullanılmıştır. Yöntem, hem metodoloji hem de enerji sistemlerine uygulanması açısından ilk olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Kullanılan kaynak kökenli ayrıştırma yöntemi ile birincil enerji kaynaklarının sektörel dağıtımının yanı sıra kaynaklarda meydana gelen bir birimlik değişimin diğer kaynaklar üzerindeki maliyet etkisi ve çevresel kirleticilerden kaynaklanan emisyon değerlerindeki değişim de incelenmiştir.

Bu amaçla çalışmada, enerji sistemini bir bütün olarak ele alan ve Avrupa Birliği (AB) ülkeleri tarafından da kullanılan Enerji Akış Optimizasyon Modeli (EFOM) kullanılmıştır. EFOM modeli etkin bir şekilde enerji sistemleri için stratejiler geliştirmek amacıyla, çevresel problemlerin önemli rol oynadığı birçok ülkede başarı ile uygulanmıştır. Modelin modüler ve dinamik bir yapıya sahip olması nedeniyle ayrıştırma yöntemi için daha uygun olacağı düşünülmüştür. Model nihai enerji kullanan sektörler bazında kaynak kökenli ayrıştırma yöntemi ile ayrıştırılmıştır. 2030 yılına kadar talepleri tahmin edilmiş olan bu sektörler için en uygun birincil enerji kaynak karışımı elde edilmiştir. Bunun yanı sıra her bir birincil enerji kaynağındaki bir birimlik değişimin maliyete olan etkisi de incelenmiştir. Ayrıca halen kullanılmakta olan fosil tabanlı yakıtların yerine alternatif enerji kaynaklarının kullanılması durumunda enerji kullanımından kaynaklanan çevresel etkilerin ne kadar değişeceği de çalışma kapsamında incelenmiştir.

EFOM modelinin Türkiye için geliştirilmiş versiyonu ülkenin enerji ve çevre durumunu tam olarak temsil edebilmektedir. Bu modelle yukarıda bahsedilen amaca ulaşmak için aşağıdaki şu sorulara cevap aranmıştır.

- Türkiye'nin 2030 yılına kadarki nihai enerji sektörlerinin talebini karşılayacak optimum birincil enerji kaynak dağıtımı nasıl olmalıdır?

- Birincil enerji kaynaklarındaki bir birimlik değişimin toplam enerji maliyetine olan etkisi ne kadardır?
- Çevresel kirleticilerden kaynaklanan emisyon değerlerine nihai enerji sektörlerinin katkısı ne kadardır?
- Alternatif enerji kaynaklarının kullanımı durumunda çevresel kirleticilerin emisyon değerlerindeki değişim ne olacaktır?

Çalışma çeşitli varsayımlar altında incelenmiştir. Bunlar; Türkiye'nin enerji sisteminin planlaması için çalışma dönemi olarak 2010–2030 yılları seçilmiştir. Çalışmada temel girdilerden birisi olan enerji talebi için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın projeksiyonu kullanılmıştır. Mevcut enerji üretim ve dönüşüm sistemlerine ait olan teknik, yakıt ve işletme maliyet bilgileri için 1990–2006 yılları arasındaki değerler kullanılmıştır. Bütün maliyetler 2006 yılı fiyatları olup çalışma planı dönemince sabit kalacağı varsayılmıştır. Modelde girdi olarak kullanılan teknoloji, akım, çevre ve ekonomik göstergeleri içeren tüm veriler, resmi kaynaklardan elde edilmiştir. Model 2010–2030 yılları arasını kapsamaktadır ve Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) tarafından yapılan kalkınma planına paralel olarak beşer yıllık dönemler halinde incelenmiştir.

Yukarıda tanımlanan probleme çözüm elde etmek için çalışma şu şekilde planlanmıştır: Giriş bölümünde problemin tanımı, çalışmanın amacı ve kullanılan metodoloji ile ilgili genel bir giriş yapılmıştır. İkinci bölümde enerji ve çevre konusunda yapılmış optimizasyon çalışmalarının incelendiği literatür araştırması verilmiştir. Üçüncü bölümde Türkiye'nin enerji yapısı ve çevresel emisyon değerleri genel olarak değerlendirilmiştir. Bu bölümde özellikle birincil enerji kaynaklarının durumu incelenmiş ve emisyon faktörleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler model için girdi değerleri olarak kullanılmıştır. Dördüncü bölümde çalışmada kullanılan kaynak kökenli ayrıştırma yöntemi hakkında bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde kaynak kökenli ayrıştırma yöntemini kullanarak EFOM modelinin ayrıştırılması için

kullanılan algoritma sunulmuştur. Altıncı bölümde farklı senaryolar altında model sonuçlarına yer verilmiştir. Son bölümde ise sonuç ve gelecek dönemler için politikalar sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde enerji-çevre modellerine genel bir bakış yapıldıktan sonra literatürde kullanılan optimizasyon modelleri, ayrıştırma yöntemi ile yapılan çalışmalar ve Türkiye’de enerji ve çevre alanında yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir.

2.1. Enerji Çevre Modellerine Genel Bir Bakış

Bir karar verme aracı olarak kullanılan enerji ve çevresel planlama çalışmaları, enerji tüketim artışına bağlı olarak artan çevresel kirlenme ile yüz yüze kalan dünyamızda, çok önemli bir yer tutmaktadır. Gelişmekte olan birçok ülkede toplam kamu yatırımının büyük bir bölümü enerji yatırıma ayrıldığından ekonomik büyümenin önündeki en büyük engel enerjiye ilişkin problemlerdir. Ulaşılması güç çevresel araçları yakalamak ve sürdürülebilir bir çevresel yolla, artan nüfusa güvenilir bir arz sistemi ile yeterli enerjiyi sağlamak için çok büyük yatırımlar gereklidir. Enerji ve çevrenin karmaşıklığı; enerji, çevre ve ekonomi arasındaki birçok etkileşimle tanımlanabilir [4].

Enerji planlama çalışmalarının geçmişi 1970’lerdeki petrol krizine kadar uzanır. Çalışmaların amacı, enerji arz sistemi için optimal yakıt karışımının bulunması yönünde olmuştur. Bu spesifik modelleme konuları üzerine yoğunlaşılana geçmişte yeni enerji-teknoloji planlama araçlarının uygunluğuna rağmen, elde edilebilir tüm potansiyel kaynakların değerlendirilmesini gerekli kılmıştır. Bunların yöntemleri genellikle, maliyetler, çevresel zarar veya enerji arzı güvenliği gibi problemin sadece bir yönü üstünde yoğunlaşmıştır. Genelde konut sektörü veya sanayi gibi sadece bir sektör analiz edilmiş veya elektrik gibi sadece bir enerji taşıyıcısı düşünülmüştür.

Teknolojiye yönelik proses mühendisliği modeli jenerasyonu, başlangıçta, 1960’lardaki gibi elektrik üretim planlama modelleri türünden enerji alt sektörleri veya tekli yakıt konuları üzerine yoğunlaşmışlardır [5].

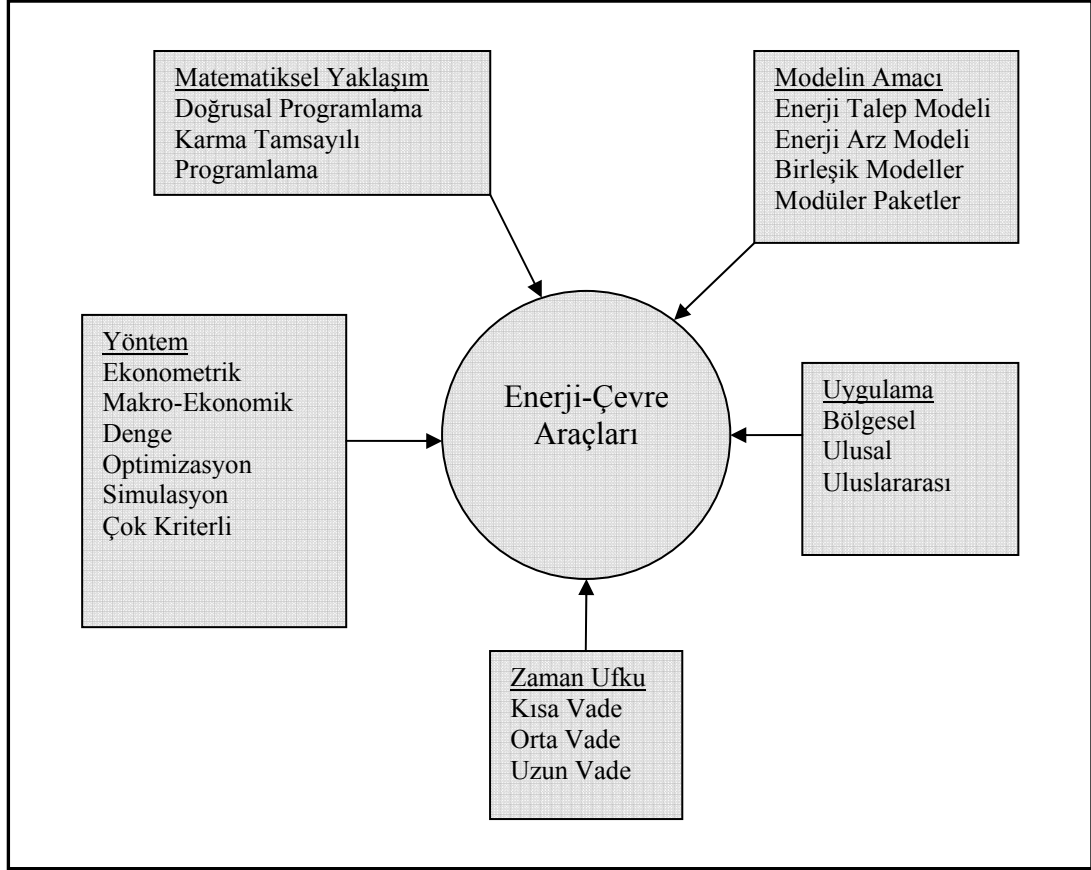
İlk enerji modelleri, Gayri Safi Milli Hasıla (GSMH) benzeri, makro ekonomik göstergelerle enerji talebini ilişkilendiren ve ekonometri teorilerine dayanarak yazılan modeller olarak geliştirilmiştir [6]. Modeller prosedür dilleri kullanılarak oluşturulmuş ve modelin matematiksel algoritması üzerine odaklanılmıştır. Kullanılan veriler, birleştirilen algoritmanın prosedür akışına göre düzenlenmiştir. Enerji sorunlarının bütünlük doğası ve ekonomi-çevre etkileşimleri 1970'lerde yaygınlaşmıştır.

1970 öncesi enerji modelleri karmaşık planlama işlemlerinin karmaşıklığını karşılayacak özelliğe sahip olamamışlardır. Bu modellerin rekabet edemeyecek yapıları bir yana, 1970'lerde artan enerji kullanımının çevreye olan etkisini de tahmin edememişlerdir. Çevre, ekonomi ve enerji konularını tek bir çevrede birleştiren yeni planlama araçlarına ihtiyaç duyulmuştu. Geçmiş yıllarda, planlama için çoğu ulusal boyutta birçok model geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bunlar ayrıntılı bir şekilde enerji tüketimini sektörel bazda analiz eden ekonometrik modellerden, tekno-ekonomik modellere kadar değişkenlik göstermektedir [4]. Farklı modelleri tanımlamanın birçok yolu mevcutken, çok az model belli bir sınıfa uymaktadır. Bu araçlar şu şekilde sayılabilir: [7] genel ve özel amaçlı enerji modelleri; model yapısı (içsel ve dışsal varsayım); analitik yaklaşım (yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarıya), metodoloji; matematiksel yaklaşım; coğrafi kapsam (uluslararası, bölgesel, ulusal); sektörel kapsam; zaman utku ve veri ihtiyacıdır. Şekil 2.1'de 5 kategoriye ayrılarak sınıflandırılmış enerji-çevre araçları gösterilmektedir [4].

Enerji modelleri genelde belirli sorulara cevap vermek için geliştirilir ve hangi amaçla tasarlanmışlarsa ona uygun sonuçlar vermektedir.. Enerji modelleri enerji talebi, enerji arz, etkileri, değerlendirme, birleşik yapı ve modüler yapı amaçlarına göre şu şekilde sınıflandırılabilirler [7]:

Enerji Talep Modelleri: Enerji talep modelleri, sektörel enerji talebini incelemek üzere kurulmuşlardır ve gelişmeleri nihai ve faydalı enerji üzerine olmuştur. Enerji talep modelleri içinde mühendislik-proses yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak ekonomik modellerde kullanılmaktadır [8]. Önemli talep araçları Avrupa için

enerji talep modeli (MEDEE -Model for Demand of Energy for Europe) ve enerji talebinin analizi modeli (MAED -The Model for Analysis of Energy Demand)'dir.



Şekil 2. 1. Enerji-Çevre araçları

Enerji Arz Modelleri: Enerji arz modelleri teknolojik finansal ve çevresel kısıtlar altında enerji arzındaki artışın maliyete olan etkisi ile ilgilenmektedirler. Bu modeller talebi verilmiş olarak alırlar ve talep ve arzı dengeye getiren enerji talep yönetiminin diğer araçlarını ve bu araçların maliyete olan etkilerini araştırmazlar.

Modeller genellikle simülasyon veya optimizasyon yöntemlerini kullanırlar. Literatürde optimizasyon yöntemi olarak genellikle doğrusal ve doğrusal olmayan programlama kullanılmaktadır. EFOM, MARKAL ve MESSAGE optimizasyon yöntemleri ile ilgi araçlardandır.

Modüler Paketler: Bu araçlar, bir enerji arz ve talep dengesi, sadece bir enerji talebi vb. türden pakete birleştirilmiş çok farklı çeşitte modelleri barındırırlar. Kullanıcı tüm modelleri koşturma ihtiyacı duymaz, ancak incelenen durumun doğasına uygun bir set seçebilir. Bu araçlardan iyi bilinen bazıları enerji ve güç değerlendirme programı (ENPEP -Energy and Power Evaluation Program), uzun vade enerji alternatifleri planlama sistemi (LEAP -Long-Range Energy Alternatives Planning System) ve modüler enerji sistem analizi ve planlama yazılımı (MESAP –Modular Energy System Analysis and Planning Software)’dır [9].

En önemli modellere genel bir bakış aşağıda tanımlanmıştır:

MEDEE: MEDEE modeli son enerji talebini tahmin için geliştirilen tekno-ekonomik bir modeldir. Göz önüne alınan sanayi, ulaştırma, konut, hizmetler ve tarım sektörleri için değişik tipteki enerji talebi her bir sektör için temel yıl ve gelecek yıllar için tahmin edilir [10].

MAED: MAED modeli bir ülke veya bölgedeki enerjiye olan orta ve uzun vadeli talebi değerlendirmek üzere tasarlanmış bir simulasyon modelidir. Model Uluslar Arası Atom Enerjisi Kurumu (IAEA-International Atomic Energy Agency) tarafından geliştirilmiş ve ilk defa Fransa Grenoble üniversitesinde yapılan bir çalışmaya dayanmaktadır [9]. Enerji ve elektrik talebi tahmini için geliştirilen MAED üç modülden oluşmaktadır. Bunlar; sosyo-ekonomik ve teknolojik gelişimi tanımlayan değişik parametrelere göre her bir referans yıl için, ekonomik sektör ve enerji şekli başına son enerji talebini hesaplayan bir enerji talep modülü, toplam yıllık talebi her bir sektördeki saatlik elektrik talebine dönüştüren saatlik elektrik gücü talep modülü ve yük süresi eğrisini veren ve büyüklüğü azalan sırada elektrik şebekesi üzerinde saatlik taleplerin sıralandığı bir yük süresi eğrisi modülüdür. MAED modelinin çıktısı seçilen her bir yıl için her bir alt sektörde kullanılan alternatif enerji şekillerinin ayrıntılı tahminlerini içerir.

LEAP: LEAP bir enerji-çevre planlama ve sera gazı azaltma analizi aracıdır. Boston-Stockholm çevre Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir ve belirli bir alan için mevcut

enerji durumunu temsil eden simulasyon yaklaşımını kullanır, belirli varsayımlar altında gelecek için tahminler yapar. LEAP odun enerjisi planlaması için çok uygundur. Çünkü mevcut odun kaynaklarını değerlendirebilen toprak kullanım modülünü içermektedir [11].

MESSAGE: MESSAGE modeli Uluslararası Uygulamalı Sistemler Analiz Enstitüsü (IIASA-International Institute for Applied Systems Analysis) tarafından geliştirilmiş, genelde enerji arz sistemlerinin optimizasyonu için kullanılan talebe dayalı yarı doğrusal programlama modelidir. Model, pazara giriş ve etkinlikler, maliyet varsayımları ve son enerji talebi kısıtları altında arz edilen enerji indirgenmiş maliyetlerini minimize eder. Geliştirilen MESSAGE'de özel teknolojilerin yatırım maliyetleri öğrenme eğrileri kullanılarak kümülatif kurulu kapasite ile bağlanmıştır. Karmaşık enerji teknolojileri maliyetleri toplam kurulu kapasite ve ticari yatırımlar olarak azalır. MESSAGE aynı zamanda, enerji karışımındaki CO₂ vergilerinin etkisi ve enerji sistem maliyetlerini de değerlendirir [12, 13].

MESAP: MESAP modeli, Enerji Ekonomi ve Enerjinin Rasyonel Kullanım Enstitüsü (IER-Institute for Energy Economics and Rational Use of Energy) tarafından bütünleşik enerji yönetimi için geliştirilen bir karar destek sistemidir. Şu araçları içermektedir: yatırım hesabı, enerji ve çevre muhasebesi, talep analizi, bütünleşik kaynak planlama, talep kesim yönetimi, elektrik işlemleri ve büyüme planı, hayat çevrimi ve yakıt zinciri analizi. MESAP mimarisinin üç katmanı, veritabanı araçları, modeller ve merkezi bilgi sistemleridir. MESAP'ın çekirdeği veritabanı yönetim sistemi NetWork'u içerir. MESAP şu modellerden oluşmaktadır: talep analizi ve arz simulasyon modeli, yatırım hesabı ve finansal analiz modeli, enerji sistemleri optimizasyon modeli ve elektrik, bölgesel ısı işlemleri ve büyüme planları modeli. Bütün planlama modelleri, girdi verilerini, varsayımları ve sonuçları değiştirebilen aynı veri girişi ve analiz araçlarını kullanan NetWork'e bağlıdır [6].

POLES: POLES (Prospect Outlook on Long-term Energy Systems) bölgesel ve uluslararası düzeyde alt modellerin birbirine bağlı olduğu hiyerarşik sistemler bazında uzun vadeli enerji arz ve talep senaryoları üreten bir simülasyon modelidir

[14]. Enerji tüketim senaryoları bazında, uygun teknolojik değişiklikler ve stratejiler tanımlanarak ve stratejik hareket alanları belirlenerek gelecekteki sera gazı emisyonları analiz edilebilir. Ayrıca uluslararası enerji pazarlarındaki emisyon azaltma stratejilerinin etkileri değerlendirilebilir. Dünya çapında, petrol, kömür ve gaz pazarının ayrıntılı tanımı modelin karmaşıklığı ve boyutunda önemli artışa neden olur.

MARKAL-MAKRO: Model, Brookhaven Ulusal Laboratuvarı tarafından stratejik enerji planlamayı destek için geliştirilmiştir. MARKAL (pazar tahsisi) ve ekonomik, çevresel ve enerji faktörlerini analiz eden MACRO'yu birleştirmektedir. MARKAL, enerji sektörünün teknolojiye yönelik dinamik doğrusal programlama modelidir. MARKAL-MACRO versiyonunda, enerji hizmeti talepleri makro ekonomik faaliyet ve tasarrufu belirlenir. Enerji ekonomi bağlantısı, MARKAL'dan MACRO'ya enerjinin fiziksel akışı ve MACRO'dan MARKAL'a enerji maliyet ödemeleri ile kurulmuştur. Modelin MARKAL bölümü enerjinin rolünü, doğal kaynakları, taşıma, enerji kaynak işlemleri ve diğer üretim/tüketim faktörlerini belirtir. Modelin çıktıları, yakıtların ve teknolojilerin optimal karışımını, emisyon kaynak ve seviyeleri için değişik stratejileri, değişik teknoloji ve uygulamaların marjinal maliyetleri ve marjinal emisyon maliyeti gibi özellikleri ihtiva eder [15, 16].

MARKAL, Avrupa ülkelerinde, Kuzey ve Güney Amerika'da, Afrika ve Asya'da kullanılmaktadır. Birleşik devletlerde, MARKAL-MACRO, 1992'de iklim Değişiklikleri Çerçeve Toplantısı (Framework Convention on Climate Change) nda varılan anlaşma ile Küresel iklim Değişikliği inisiyatifi (Global Climate Change Initiative)'ni desteklemek için seçilmiştir.

ENPEP: ENPEP modeli Argon Ulusal Laboratuvarında geliştirilmiştir [17]. ENPEP, yarışan kaynakların görelî maliyetleri ve elde edilebilirlikleri, genel ekonomik büyüme ile ilgili bilgiyle 30 yıllık planlama ufkunda elektrik üretim sistemlerinin büyümesi için alternatif değerlendirme ile alternatif arz sistemlerinin çevresel etkilerini birleştirmiştir. ENPEP dokuz parçadan oluşan modüler bir sistemdir. Her bir modül enerji ve güç değerlendirme işleminin belirli bir özelliği ile ilgilenmektedir.

Kullanıcılara geniş bir alanda parametreleri değiştirme imkanı verebilmektedir ve her bir modülde temsil edilen teknoloji, yakıt tipi ve özel faaliyetler seçilebilmektedir. EFOM-ENV: EFOM modeli, Avrupa Topluluğu tarafından bir enerji arz optimizasyon modeli olarak 1970’de Fransa Grenoble’de IEJE (Insitut Economique 12 et Juridque de i’ Energie) tarafından geliştirilmiştir [18]. Bu model dördüncü bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Ülkelerin enerji sistem yapıları farklı olduğu için aynı optimize modeli veya değişik optimizasyon teknikleri birden çok ülkede kullanılmaktadır. Örneğin EFOM modeli tüm Avrupa Birliği ülkelerine uygulanmıştır. Bu yüzden enerji optimizasyon modelleri üzerine literatürde bir çok çalışma vardır. Bu çalışmalara örnekler verecek olursak: 1979 yılında Gurfel, yüksek doğrulukla yakıt enerji dengesi için bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Yapılan çalışmada, bir dağıtım modeli formülasyonu ile Hindistan’ın gelecekteki enerji talebini karşılamada yenilenebilir enerji kaynaklarının uygun dağıtılması sağlanmıştır [19].

De Musgrove (1984), 1980–2020 yılları arasında Avustralya enerji sisteminin minimum maliyet değerlerini analiz etmek için MARKAL programını kullanmıştır. Bu doğrusal programlama modelinde toplam sistem maliyeti amaç fonksiyonu olarak kabul edilmiş ve petrol çevrim ile talep kısıtları altında model çözülmüştür [20].

Bir deterministik doğrusal programlama modeli, Kuzey Amerika’nın doğusundaki asit yağmurlarının azaltılması stratejilerinin geliştirilmesi için Ellis ve arkadaşları tarafından 1985 yılında geliştirilmiştir [21].

Das 1987 yılında Hindistan’daki Tamil Nadu firması için yenilenebilir enerji politikasını analiz etmek amacıyla dinamik optimizasyon modeline dayalı çok amaçlı doğrusal programlama modelini geliştirmiştir [22].

Satsangi ve Sarna (1988), 2000–2001 yılı için Hindistan ekonomisinin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için mümkün olabilecek seçenekleri tartışmışlardır. Kaynaklar, kapasite ve kısıtların alt/üst sınırlarına bağlı olarak maliyetin minimizasyonu modelinin amacını oluşturmuştur [23].

Kysdes (1990), akış modelleri için genel bir metodoloji incelemiş ve Brookhaven enerji sistemi optimizasyon modeli (BESOM) ile zaman adımlı enerji sistemi optimizasyon modellerini (TESOM) tanıtmıştır. Her iki modelde rekabete uygun kaynak ve teknolojiler üzerinde kısıtların genel yapısındaki ara-yakıt değişimlerini sınamak için kullanmıştır [24].

Pastemak ve diğerleri (1990) enerji dönüşüm projelerini başlangıç zamanına vurgu yapmak suretiyle ekonomik açıdan değerlendirmek için bir optimizasyon modeli formüle etmişlerdir [25].

Matematiksel programlama enerji-ekonomi-ortam modeli (MPEE) Suganthi ve Jagadeesan (1992) tarafından geliştirilmiştir. Model Hindistan'ın 2010–2011 yıllarındaki enerji ihtiyaçlarını karşılamak için ortamsal kısıtlara bağlı olarak gayri safi milli hasıla ile enerji oranını maksimize etmiştir [26].

Luhanga ve diğerleri (1993), enerji planlama araştırmalarına yönelik bir değerlendirme yaparak optimizasyon modellerinin tahmin yöntemleri modelleri ile kombineli bir şekilde kullanılması yoluyla LEAP modeli üzerinde uygulamasını göstermişlerdir. Geliştirilen iki modelden birincisinde minimum maliyetle optimum enerji karışımı belirlenmiş, ikinci modelde ise tahta yakıt açığı minimize etmek için ağaçlandırılacak hektar ve son kullanıcı biokütle planlarının optimum sayısı aranmıştır [27].

1995 yılında Groscurth ve diğerlerinin geliştirmiş olduğu modelde, bölgesel ve kentsel enerji sistemlerinin veri akış ağı tanımlanmıştır. Geliştirilen model öncelikle enerji talebi, zararlı maddelerin emisyonu ve parasal maliyetlerin dinamik ve stokastik minimizasyonu için yüksek derecede esnek bir araç olarak tasarlanmıştır. Geleneksel enerji tedarik teknikleri, oransal enerji kullanımı, talep miktarları ve yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanma düzeyi modelin içerisine yerleştirilmiştir [28].

Dinamik doğrusal programlama modelinin stokastik bir versiyonu Messner ve diğerleri (1996) tarafından sunulmuştur [29].

Taiwan'daki enerji ithalat strateji için bir maliyet minimizasyonu modeli Jeng Wen ve Chia Yon (1996) tarafından geliştirilmiştir. Model gelecekteki kömür ithalat stratejini planlamak için kullanılmıştır. Bunun yanında duyarlılık analizi ile maliyet değişimlerinin etkileri araştırılmıştır [30].

Lehtila ve Pirila (1996) Finlandiya'da sürekli kullanılabilir enerji için politika planlamasını desteklemek amacıyla bir alt üst enerji sistemi optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Finlandiya EFOM modelinin metodolojisi enerji için biyo kütle kullanımı, ısı ve güç üretimi, emisyon ve son kullanım enerjisi tanımlarını içerecek biçimde sunulmuştur. Enerji yoğun kağıt ve hamurlaştırma endüstri için önemli bir alt model, geliştirilen modele birleştirilmiştir [31].

Xie ve Kuby (1997), Çin'deki kömür ve elektrik dağıtım sisteminin ağ tabanlı yatırım planlaması optimizasyon modeli için stratejik bir basamak geliştirmişlerdir [32].

Bir enerji sistemi optimizasyon modeli olan MODEST Henning (1997) tarafından tanımlanmıştır. MODEST enerji tedarikinin ve talep yönetiminin sermaye ve operasyon maliyetlerini minimize etmek için doğrusal programlama modelini kullanmıştır [33].

Raja ve diğerleri (1997), Tamil Nadu'da sürdürülebilir tarım gelişimi için doğrusal programlama tekniklerini kullanarak bir enerji planlama optimizasyon modeli sunmuşlardır. Geliştirilen model kullanılabilir çeşitli enerji kaynakları ve çeşitli insan ve tarım aktivite ihtiyaçları tabanıdır [34].

Iniyan ve diğerleri (1998) yenilebilir enerji kaynaklarından etkili bir şekilde faydalanmak için, amaç fonksiyonu maliyet/verimlilik oranını minimize eden, kısıtları ise sosyal kabul, güvenilirlik, talep ve potansiyelden oluşan bir optimal

yenilenebilir enerji modeli formüle etmişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının 2020–2021 yılları için aydınlatma, pişirme, ısıtma, soğutma, taşıma gibi çeşitli son kullanıcı sektörlerine pay edilmesi amacı ile optimal yenilenebilir enerji modeli (OREM) kullanılmıştır. Değiştirilmiş ekonometrik bir model -bu model enerji tüketimi ile ekonomi, teknoloji ve ortam arasında ilişki kurar- ekonometrik ve zaman serisi regresyon modeli ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır [35].

Değiştirilmiş modelden elde edilen kömür, yağ ve elektriğin gerçek ihtiyaçları matematiksel program modeli (MPEE) için girdi olarak kullanılmıştır. Farklı son kullanımlar için önceden belirlenmiş yenilenebilir enerji talebini pay etmek amacıyla bir optimal yenilenebilir enerji matematiksel modeli geliştirilmiştir [36].

Hindistan'da 2020–21 yılları için çeşitli son kullanımlara yenilenebilir enerjinin optimal bir biçimde pay edilmesi amacıyla bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir [37].

Iniyan ve Sumathy (2000) tarafından geliştirilen modelde, talep, potansiyel, güvenilirlik ve çalışan faktörleri değiştirilerek duyarlılık analizi yapılmıştır. Model, optimal yenilenebilir enerji modeli (OREM) maliyet/verimlilik oranını minimize etmek ve çeşitli son kullanımlara yenilenebilir enerjinin optimal bir biçimde pay etmek için geliştirilmiştir [38].

Cormio ve diğerleri (2003), yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını geliştirmek amacıyla planlama politikalarına destek sağlamak için doğrusal programlama metodolojisi kullanarak enerji akış optimizasyon modeli (EFOM) tabanlı bir alt-üst enerji sistemi optimizasyon modeli sunmuşlardır. Ortamsal kısıtlar modele dahil edilmiştir [39].

Drozd (2003), jeotermal enerji kaynakları için bir optimizasyon modeli sunmuştur. Model kaynağın net gücünü maksimize etmeye çalışmıştır [40].

Gong (2003) tarafından, endüstriyel enerji sistemleri için çok periyotlu maliyet optimizasyon modeli (MIND) geliştirilmiştir [41].

Berglund ve Söderholm (2006) literatürdeki büyük boyutlu enerji modellerini incelemişler ve enerji sistem analizindeki teknik değişikliklerin ne gibi yenilikler ortaya çıkardığını ve bunların sonuçlarını ortaya koymuşlardır [42].

Urban ve diğerleri (2007) yaptıkları çalışmada gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için enerji modelleri arasındaki farklılıkları ortaya koymuşlardır. Özellikle gelişmekte olan Asya ülkelerini göz önünde bulundurmuşlar ve bu ülkelerdeki enerji karakteristiklerini belirlemişlerdir [43].

Shrestha ve diğerlerinin (2007) yaptıkları çalışmada ise dört farklı senaryo altında Tayland için enerji sistemindeki gelişmeleri ve bunların çevresel etkilerini 2050 yılına kadar incelemişlerdir [44].

Sohn ve diğerleri (2007), geçmiş dönemlerde yapılmış küresel enerji projeksiyonlarını inceleyerek üç farklı fosil tabanlı yakıtın gelecek dönemlerdeki değişimini incelemişlerdir [45].

Barker ve diğerleri (2007) İngiltere için, enerji-yoğun sektörlerdeki enerji verimliliği politikalarındaki çevre etkileşimli makroekonomik göstergelerin ne kadar etkin olduğunu gösterebilmek için ekonometrik bir model geliştirmişlerdir. Model sonucunda 2010 yılına kadar enerji talebi ve emisyon değerindeki değişimi tahmin etmişlerdir [46].

Kancs ve Wohlgemuth (2008) bütünleşik ekonomi-enerji-çevre modelini geliştirmişler ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının sosyo-ekonomik etkilerini incelemişlerdir [47].

Yukarıda literatürdeki enerji-çevre alanında yapılmış optimizasyon çalışmalarına kısaca yer verilmiştir. Çalışmada kullanılan ayrıştırma yönteminin literatürde kullanıldığı çalışmalar ise 4. bölümde incelenecektir.

3. TÜRKİYE'DE ENERJİ VE ÇEVRE

3.1. Türkiye'nin Enerji Yapısına Genel Bakış

Hâlihazırda dünya enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılamakta olan fosil yakıtların rezervleri hızla tükenmektedir. Bu yüzyılın ikinci yarısında petrol ve doğalgaz gibi bazı fosil yakıtların rezervlerinin sonuna gelineceği tahmin edildiğinden, bütün enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması büyük önem taşımaktadır. Enerji ihtiyacının sürekli arttığı ama kaynakların gittikçe azaldığı dünyada, enerjinin verimli kullanılmasını sağlamak için çok çeşitli programlar uygulanmaktadır.

Türkiye sürekli gelişen ve nüfusu artan bir ülkedir. Buna bağlı olarak enerji talebi de hızla artmakta ve gelecek dönemlerde de hızla artması beklenmektedir [48]. Ülkemizin ana enerji kaynakları başta linyit olmak üzere kömür ve hidrolik enerjidir. Ancak yerli enerji kaynakları bu talebi karşılayacak miktarda değildir. Türkiye enerji ihtiyacının yaklaşık % 74'ünü ithal yolu ile karşılamaktadır. Birincil enerji tüketimi yıllık ortalama %2,8 oranında bir artışla 2005 yılı sonu itibariyle 92,5 milyon ton petrol eşdeğerine (Mtep), elektrik enerjisi tüketimi ise yıllık %4,6 oranında bir artışla 160,8 milyar kwh'e ulaşmıştır [49].

2001 krizinin etkilerinin hafiflediği 2003 sonrası dönemde ise birincil enerji tüketimi yıllık ortalama %5,7, elektrik enerjisi tüketimi ise %6,7 oranında büyümüştür. Çizelge 3.1'de görüldüğü gibi 2006 yılında kömür, birincil enerji kaynakları üretiminin %48,3'ünü, petrol %8,5'ini, Doğalgaz %3,1'sini, hidrolik (+jeoterm elek) %12,6'sını, jeotermal (ısı) %4'ünü, diğer yenilenebilir kaynaklar (güneş+rüzgâr) %1,5'ini, ticari olmayan yakıtlar (odun, hayvan ve bitki atıkları) ise %19,2'sini oluşturmaktadır. Birincil enerji tüketimi yıllık ortalama %2,8 oranında bir artışla 2005 yılı sonu itibariyle 92,5 milyon ton petrol eşdeğerine (Mtep), elektrik enerjisi tüketimi ise yıllık %4,6 oranında bir artışla 160,8 milyar kwh'e ulaşmıştır [50].

Çizelge 3.1. Birincil Enerji Kaynakları Üretimi [50]

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Taşkömürü (Bin Ton)	2 745	2 248	2 392	2 494	2 319	2 059	1 946	2 170	2 319
Linyit (Bin Ton)	44 407	52 758	60 854	59 572	51 660	46 168	43 709	57 708	61 484
Asfaltit (Bin Ton)	276	67	22	31	5	336	722	888	452
Petrol (Bin Ton)	3 717	3 516	2 749	2 551	2 442	2 375	2 276	2 281	2 176
Doğalgaz (Milyon M ³)	212	182	639	312	378	561	708	897	907
Hidrolik (Gwh)	23 148	35 541	30 879	24 010	33 684	35 330	46 084	39 561	44 338
Jeoterm. Elek. (Gwh)	80	86	76	90	105	89	93	94	
Jeoterm. Isı (Bin Tep)	364	437	648	687	730	784	811	926	1 081
Rüzgâr (Gwh)			33	62	48	61	58	59	127
Güneş(Bin Tep)	28	143	262	287	318	350	375	385	403
Odun (Bin Ton)	17 870	18 374	16 938	16 263	15 614	14 991	14 393	13 819	13 293
Hay. Bit. Art. (Bin Ton)	8 030	6 765	5 981	5 790	5 609	5 439	5 278	5 127	4 984
Toplam (Bin Tep)	25 478	26 719	26 047	24 576	24 282	23 783	24 332	24 559	26 802
Toplam Yıllık Artış (%) (Bin Tep)	-1,1	0,8	-5,8	-5,6	-1,2	-2,1	2,3	0,9	9,1

1990 yılında 944 kep/k. olan kişi başına enerji tüketimi, 2006 yılında 1365 kep/k. olmuştur. Türkiye'nin toplam enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı çizelge 3.2'de verilmiştir:

Çizelge 3.2 Genel Enerji Tüketiminin Kaynaklara Dağılımı [50]

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Taşkömürü (Bin Ton)	8 181	8 548	15 525	11 176	13 830	17 535	18 904	19 421	22 798
Linyit (Bin Ton)	45 891	52 405	64 384	61 010	52 039	46 051	44 823	56 571	60 184
Asfaltit (Bin Ton)	287	66	22	31	5	336	722	738	602
Petrol (Bin Ton)	22 700	27 918	31 072	29 661	29 776	30 669	31 729	31 062	31 395
Doğalgaz (Milyon M ³)	3 418	6 937	15 086	16 339	17 694	21 334	22 446	27 488	31 313
Hidrolik (Gwh)	23 148	35 541	30 879	24 010	33 684	35 330	46 084	39 561	44 338
Jeotermal. Elek.(Gwh)	80	86	76	90	105	89	93	94	
Jeotermal Isı (Bin Tep)	364	437	648	687	730	784	811	926	1 081
Rüzgâr (Gwh)	-	-	33	62	48	61	58	59	127
Güneş(Bin Tep)	28	143	262	287	318	350	375	385	403
Odun (Bin Ton)	17 870	18 374	16 938	16 263	15 614	14 991	14 393	13 819	13 293
Hay. Bit. Art. (Bin Ton)	8 030	6 765	5 981	5 790	5 609	5 439	5 278	5 127	4 984
Net Elek. İthali (Gwh)	-731	-696	3 354	4 146	3153	570	-680	-1 162	-1 663
İkincil Kömür (Bin Ton)	453	1 024	2 184	1 949	2 310	2 259	2 209	2 573	2 343
Toplam (Bin Tep)	52 987	63 679	80 500	75 402	78 331	83 826	87 818	91 362	99 590
Yıllık Artış (%)		3,7	10,0	-8,9	6,1	9,3	6,2	4,0	9,0
Kişi başına Tük. (Kgpe)	944	1 031	1 194	1 100	1 125	1 185	1 231	1 268	1 365

Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'de ise Türkiye'nin nihai enerji tüketiminin kaynaklara ve sektörlere göre dağılımı verilmiştir:

Çizelge 3.3. Nihai Enerji Tüketiminin Kaynaklara Dağılımı [50]

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Taşkömürü (Bin Ton)	2 747	3 040	9 244	5 344	8 211	9 747	9 965	9 904	12 395
Linyit (Bin Ton)	15 739	12 420	11 070	7 454	9 336	10 339	10 808	8 009	9 330
Asfaltit (Bin Ton)	285	66	18	30	5	336	722	738	602
Petrol (Bin Ton)	19 380	24 193	24 750	23 399	23 335	24 613	26 100	26 333	26 553
Doğalgaz (Milyon M ³)	862	3 335	5 201	5 392	5 858	8 537	9 112	11 725	14 272
Elektrik (Gwh)	45 670	65 724	96 140	95 445	101 298	110 748	120 305	129 416	142 216
Jeotermal Isı (Bin Tep)	364	437	648	687	730	784	811	3 153	3 280
Güneş(Bin Tep)	28	143	262	287	318	350	375	385	403
Odun (Bin Ton)	17 870	18 374	16 938	16 263	15 614	14 991	14 393	13 819	13 268
Hay. Bit. Art. (Bin Ton)	8 030	6 765	5 981	5 790	5 609	5 439	5 278	5 127	4 984
İkincil Kömür (Bin Ton)	3 644	4 158	5 112	4 538	4 910	5 185	5 357	5 596	5 629
Net (Bin Tep)	41 611	49 976	61 556	56 048	59 486	64 990	69 004	71 798	77 366
Yıllık Artış (%)		3,7	10,0	-8,9	6,1	9,3	6,2	4,1	7,8

1990 yılında 41,6 Mtep olan nihai enerji tüketimi yıllık ortalama %2,9'luk artışla 2004 yılında 69,0 Mtep, 2006 yılında 77,4 Mtep değerine ulaşmıştır. Bu dönemde nihai enerji tüketim yapısındaki önemli değişiklik elektrik ve Doğalgaz tüketiminde olmuştur. 1990 yılında nihai enerji tüketimi içinde Doğalgazın payı %1,9'dan 2006 yılında %17,4'e, elektrik tüketiminde ise %9,4'den %15,8'e yükselmiştir.

Çizelge 3.4. Nihai Enerji Tüketiminin Sektörel Dağılımı (BİN TEP) [50]

Sektörler	1990	%	1995	%	2000	%	2004	%	2005	%	2006	%
Sanayi	14 542	35	17 372	35	24 501	40	28 789	42	28 282	39	30 984	40
Konut ve Hizmetler	15 358	37	17 596	35	20 058	33	20 952	30	23 013	32	23 726	31
Ulaştırma	8 723	21	11 066	22	12 008	20	13 775	20	13 849	19	14 884	19
Tarım	1 956	5	2 556	5	3 073	5	3 314	5	3 359	5	3 610	5
Enerji Dışı	1 031	2	1 386	3	1 915	3	2 174	3	3 296	5	4 163	5
Net	41 611	100	49 976	100	61 555	100	69 001	100	71 798	100	77 366	100
Çevrim-Enerji	11 376	21	13 702	22	18 945	24	18 814	21	19 564	21	22 223	22
Genel Enerji Tüketimi	52 987	100	63 678	100	80 500	100	87 818	100	91 362	100	99 590	100

Bu dönem içerisinde gerek jeotermal ısı kullanımında ve gerekse güneş enerjisinde önemli artışlar gözlenirken, ticari olmayan yakıtların tüketimlerinde düşüşler olmuştur. 1999 yılından itibaren ülkemizde rüzgârdan elektrik enerjisi üretimine de başlanmıştır.

2006 yılında nihai enerji tüketiminde petrol %35,6 ile en yüksek paya sahip olurken, petrolü %10,6 ile taşkömürü izlemiştir.

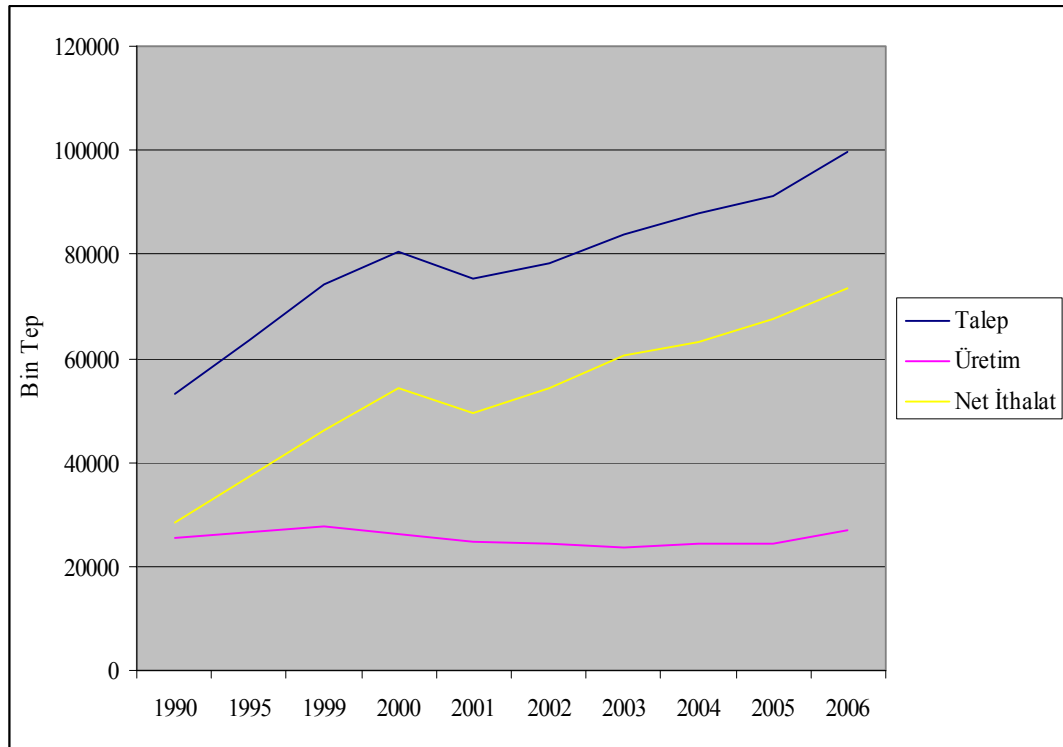
Nihai enerji tüketimi içerisinde sanayi sektörünün payı 1990'da %35'den 2006 yılında % 40'a yükselmiştir. Bu dönem içerisinde nihai tüketim toplamı içerisinde petrolün payı ise %36'dan % 35,6'ya düşmüştür. Türkiye'nin enerji talebine bağlı olarak toplam enerji üretimi ve ithalat ve ihracat miktarlarındaki değişim çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Enerji Talep –Üretim- İthalat ve İhracatının Gelişimi (BİN TEP) [50]

	1990	1995	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Talep	52 987	63 679	74 275	80 501	75 403	78 354	83 826	87 818	91 362	99 590
Üretim	25 656	26 749	27 729	26 156	24 681	24 324	23 783	24 332	24 549	26 802
İthalat	30 936	39 779	49 406	56 342	52 780	58 629	65 239	67 885	73 480	80 514
İhracat	2 104	1 947	2 791	1 584	2 620	3 162	4 090	4 022	5 171	6 572
İhrakiye	355	464	587	467	624	1 233	644	631	628	588
Net İthalat	28 477	37 368	46 028	54 291	49 536	54 234	60 505	63 232	67 681	73 354
TYÜKO (%)	48,1	42,0	37,2	33,1	32,6	31,0	28,4	27,7	26,9	26,9

Yerli kaynaklarımızdan üretilen enerji miktarındaki artışın enerji talebimizden daha düşük olması nedeniyle, net enerji ithalatımız 1990'daki 28,5 Mtep değerinden 2006'da 73,4 Mtep değerine ulaşmıştır. Bu miktardaki ithal enerji kaynaklarına yalnızca 2006 yılında 29 milyar dolar ödenmiştir.

Geçmiş yıllarda olduğu gibi, 2006 yılında da başta petrol olmak üzere Doğalgaz, taş kömürü ve elektrik enerjisi ithalatı yapılmıştır. Kömür ithalatları toplam olarak 15,1 Mtep (%18,8), ham petrol ve petrol ürünleri ithalatı 37,4 (Mtep) (%46,5), Doğalgaz ithalatı 30,0 Mtep (%37,3), elektrik enerjisi ithalatı ise 0,05 (Mtep) olmuştur. 2006 yılında enerji talebimizin %73,3'ü ithalat ile karşılanırken ancak %26,7'si yerli kaynaklar (üretim) ile karşılanmıştır.



Şekil 3.1. Enerji üretiminin talebi karşılama oranı

Türkiye, rüzgâr, güneş ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları konusunda önemli bir potansiyele sahiptir [47]. Ayrıca nükleer enerji de yakın zamanda önemli bir enerji kaynağı olarak kullanılacaktır. Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyeli çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyeli [47]

Yenilenebilir Enerji Kaynakları	Büyükük (GWh/yıl)	Teknik (GWh/yıl)	Ekonomik Kullanılabilirlik (GWh/yıl)	% Kullanım
Hidro	430-450	215	100-130	30
Jeotermal	16	8	4	22,5
Güneş	365	182	91	4,5
Rüzgar	400	124	98	62
Biogaz	1,58	0,79	0,4	16,8

3.2. Enerji Kaynaklarımızın Genel Durumu ve Dışa Bağımlılık

3.2.1. Genel durum

Türkiye 9. beş yıllık kalkınma planında Gayri Safi Yurt İçi Hasıla artışı (GSYİH) % 5,5 civarında öngörülürken birincil enerji kaynaklarındaki artışın % 3,8 seviyelerinde olacağı tahmin edilmektedir. Ülkemizin ana enerji kaynakları başta linyit olmak üzere kömür ve hidrolik enerjidir. Toplam birincil enerji potansiyeli bakımından kömür ve hidrolik enerji toplamı dünya kaynak potansiyelinin yaklaşık olarak % 1'i civarındadır. Türkiye birincil enerji kaynaklarının durumu aşağıda ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

3.2.2. Kömür

Ülkemizde 2006 yılında üretilen birincil enerjinin yaklaşık %49'u kömürdür. Ancak yerli kömürün tüketimdeki payı Türkiye'de tüketilen enerjide aşırı dışa bağımlılık nedeniyle %13,2 seviyesine gerilemiştir. Bu olumsuz gelişme daha ziyade ithal edilen ve oldukça pahalı olan Doğalgazın elektrik üretiminde aşırı ölçüde kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Halen Türkiye elektrik üretiminin %46'sı doğalgazdan elde edilmektedir. Hatalı talep tahminlerine dayalı planlamalar sonucu verilmiş olan satın alma ve fiyat garantileri nedeniyle, elektrik talebi Doğalgazla çalışan termik santrallerden karşılanmış ve yerli kömürle çalışmak üzere inşa edilmiş, yatırımları tamamlanmış işgücü hazır termik santraller ve linyit madenlerine dayalı üretim tesisleri çalıştırılmamıştır. Enerji Yönetimi 2001 yılından bu yana bu çarpık durumu düzeltmemiştir. Bu çarpıklığın bir sonucu olarak yerli kömür üretimi giderek düşmüş ve Türkiye, sanayisine 10 cent/kwh'den enerji veren dünyada sayılı pahalı ülkeler içinde yer almıştır. 1998 yılında 65,2 milyon ton linyit üreten Türkiye 2006 yılında 61,5 milyon ton linyit üretmiştir. 2006 yılı kömür üretim ve tüketim değerleri çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Kömür kaynağının üretim ve tüketim değerleri [51]

ISIL DEĞER (Kcal/kg) BİRİM	T.Köm. (B.Ton)	Linyit (B.Ton)	Asfaltit 4300 (B.Ton)	Kok 7000 (B.Ton)	P.Kok 7700 (B.Ton)
Yerli Üretim (+) İthalat (+) Stok Değişimi (+/-)	2 319 20 286 193	61 484 29 -1 329	452 150	454 -19	1 889 92
Toplam Enerji Arzı	22 798	60 184	602	435	1 981
Çevrim ve Enerji Sektörü	-10 403	-50 854	0	3 213	
Elektrik Santralleri	-5 618	-50 584			
Kok Fabrikaları	-4 745			3 213	
Briket		-190			
İç Tüketim ve Kayıp	-40	-80			
Toplam Nihai Enerji Tüketimi	12 395	9 330	602	3 648	1 981
Sektörler Toplamı	12 395	9 330	602	3 648	1 981
Sanayi Tüketimi	11 530	4 021	120	3 612	1 981
Demir Çelik	89			3179	
Kimya-Petrokimya		169			
Çimento	2 215	1 876		20	1 946
Şeker	72	722		48	
Demir dışı Metaller	94			20	
Diğer Sanayi	9 148	1 254	120	345	36
Diğer Sektörler	865	5 309	482	36	0
Konut ve Hizmetler	865	5 309	482	36	

Türkiye’de 9,4 milyar ton linyit ve 1,3 milyar ton taşkömürü rezervi vardır. Linyit rezervimizin 4,3 milyar tonu Afşin-Elbistan linyit havzasındadır. Bu rezervlerden ekonomik olarak elektrik üretimi elde edilebileceği bilinmektedir. Afşin-Elbistan havzası ile birlikte diğer linyit havzaları süratle elektrik üretimi için geliştirilirse ilave 10.000 MW gücünde termik santral yerli kaynaklar ile beslenebilir. Yerli kömür ile çalışan mevcut 8845 MW gücündeki termik santraller ile birlikte 18.845 MW gücündeki elektrik santrallerinden yılda minimum 116 milyar kwh elektrik üretilebilir. Bu değer 2006 yılında Türkiye’nin tüketmiş olduğu 176 milyar kwh’in %66’dır. Yerli hidrolik kaynakların da geliştirilmesi ile Türkiye’nin bugün için mevcut elektrik tüketiminin tümünü yerli kömür ve hidrolik kaynaklardan karşılaması mümkündür. Bu teşebbüs Türkiye’nin %75’e varan ve çok tehlikeli boyutlarda olduğu tüm enerji çevrelerince ifade edilen enerjideki dışa bağımlılığını önemli seviyelerde azaltacaktır.

3.2.3. Hidrolik enerji

Türkiye'nin en önemli yerli ve yenilenebilir enerji kaynağı sudur ve maalesef bu değerli kaynak enerji üretiminde yeterince kullanılmamaktadır. Artan sulama ve içme suyu ihtiyaçları nedeniyle enerji üretiminde olabilecek azalmalar ve diğer faktörler de göz önünde bulundurularak yapılan çalışmalar sonucunda ekonomik olarak kullanılabilir hidroelektrik potansiyelimizin 170 milyar kwh/yıl olacağı tahmin edilmektedir. Bu potansiyelin sadece %27'si işletmede %6'sı ise inşa halindedir. Geriye kalan %77'lik potansiyel ise enerjisi alnamadan denizlere ulaşmakta ve Türkiye bu yüzden her yıl yaklaşık 7–8 milyar \$ kaybetmektedir.

3-5 dakika içinde devreye girebilme özellikleri nedeniyle hidroelektrik santraller frekans kontrolü ve sistem stabilitesi açısından hayati öneme sahiptir. İletim sistemimizin, Avrupa iletim sistemine senkron paralel bağlanabilmesi, arz güvenilirliği ve kalite kriterlerinin sağlanması, frekans kontrolü ve yük alma, yük atmadaki sorunların yaşanmaması için de bu hidrolik santrallerin hızla devreye alınmaları gerekmektedir.

Çok kısa sürede devreye girebilme özellikleri nedeniyle klasik ve pompa depolamalı hidroelektrik santraller puant güç ihtiyacını karşılamak açısından hayati öneme sahiptir. Bu nedenle, biran önce bu konuda etüt ve fizibilite çalışmalarına başlanmalıdır.

Rüzgâr ve dalga gibi kesintili karaktere sahip olan diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme uyumunu sağlamak için bu santraller hidroelektrik santrallerle bütünleşik planlanmalıdır.

İnşa süreleri daha kısa olan ve özellikle dağıtım hatlarına bağlantıda problemler yaşanan nehir ve kanal tipi hidroelektrik santrallerin bir an önce devreye alınabilmeleri için önlerindeki engellerin kaldırılması gerekmektedir.

Önümüzdeki yıllarda geliştirilmesi beklenen çeşitli ölçekte 1000'in üzerinde toplam 34070 MW Gücünde hidro elektrik santrali potansiyelimiz mevcuttur. Bu güçteki

potansiyelin yatırım maliyeti yaklaşık 51 milyar \$'dır ve yatırım maliyetinin %30'unu elektromekanik teçhizat oluşturmaktadır. Bunun da parasal değeri 14 Milyar \$'dır. 14 Milyar \$'ın sadece 3 Milyar \$'lık kısmı yerli sanayi ürünlerinden karşılanabilmekte asıl katma değer oluşturan türbin ve jeneratör ise ithal edilmektedir. Bunun anlamı ise yerli sanayimizi geliştirememekten dolayı yatırım maliyetinin yaklaşık %20'si dış ülkelere gidecektir. Yatırımcılar yatırım maliyetlerini düşürmek için ucuz ve dolayısıyla düşük kalitede teçhizat alımına yönelmektedir. Bu ürünlerin ülkeye girişinde gerekli denetimler yapılmazsa ülkemiz yakın zamanda kalitesiz ürünlerin pazarı haline gelecektir. Bu nedenle yerli elektromekanik imalat sanayimizin geliştirilmesi gerekmektedir [51].

3.2.4. Petrol

Ülkemizin 2006 yılında tükettiği toplam enerjinin % 61'i petrol ve doğalgazdır. 2006 yılında harcanan 31 milyon ton petrolün yaklaşık %90'ı ve 30 milyar metreküp Doğalgazın ise tamamına yakını ithal edilmiştir. Yapılan ithalat için ödediğimiz döviz uluslararası petrol piyasalarındaki fiyat hareketlerine bağlı olarak önemli rakamlara ulaşmaktadır. Petrol fiyatlarındaki 1 dolar/varillik artışın petrol faturamıza 200 milyon dolar civarında ek yük getirdiğini dikkate aldığımızda petrol fiyatları Türkiye'nin makro ekonomik dengeleri açısından çok büyük önem taşımaktadır. Ülkenin her yıl giderek artan enerji talebi nedeniyle yakın bir zamana kadar ihtiyacın yüzde 25'ini karşılayan iç üretim bugün yüzde 7'sini ancak karşılamaktadır. Yeni rezervlerin bulunamaması halinde doğalgazın yanı sıra petrolde de tamamen dışa bağımlı hale gelinmesi söz konusudur. Sorunu aşmanın yolu ise tespit edilen miktardan daha fazla rezerv varlığını ortaya koyabilecek yeni kuyuların açılmasından geçmektedir.

Bu amaçla, önümüzdeki yıllarda yerli yabancı petrol şirketleri ile gerek kara, gerekse deniz aramalarına daha fazla ağırlık verilmesi, yurtdışı arama ve üretim faaliyetlerinin artırılması gerekmektedir. Ayrıca, doğalgaz depolama tesisi projelerinin hızlandırılması, petrol alanında arz güvenliği için ulusal stok ajansının kurulması, Ortadoğu ve Hazar bölgesi ülkelerine boru hatları ile bağlanması

amacıyla projeler geliştirilmesi ve Ceyhan terminalinin uluslararası bir enerji merkezi haline getirilmesi gerekmektedir.

Diğer taraftan petrolün en çok kullanıldığı ulaştırma sektöründe alınacak önlemler ile petrol tüketimimiz süratle azaltılmalıdır. Stratejik önemi dikkate alınarak 17.01.2007 tarihli “Türk Petrol Kanunu” tekrar gözden geçirilmeli ve TPAO’nun mevcut yasada olduğu gibi kamu adına arama ve üretim yapan konumu korunmalı ve aynı zamanda yerli kaynak yaratmak için TPAO’da arama, taşıma rafinaj ve pazarlama fonksiyonlarını içerecek bir yapılanmaya gidilmelidir.

Enerji ürünlerinde (motorin, fuel oil, LPG vb.) uygulanmakta olan vergi miktarı ülkelerin vergi gelirlerinde önemli bir pay teşkil etmekte ve çoğu kez ülkelerin enerji politikalarını belirlemede önemli bir ekonomik araç olarak kullanılmaktadır. Enerji ürünleri üzerinde uygulanan vergiler, tüketim üzerinde doğrudan bir etki yaratarak, tüketim miktarlarını ve ülkelerin vergi gelirlerini de şekillendirebilmektedir. Enerji fiyatlarında yer alan vergilerin kullanım yerlerine ve birim enerji bazına göre daha makul seviyelere çekilmesi gerekmektedir [51].

3.2.5. Doğalgaz

Doğalgaz üretimi, Türkiye Petrolleri A.O.’nın 1 nolu Marmara petrol bölgesindeki Hamitabat, Umurca, Değirmenköy, Karaçalı, Silivri, Yulaflı, Sevindik, Güney Karaçalı, Seymen, Vakıflar, Kavakdere, Turgutbey, Kumrular ve Kuzey Marmara, X no.lu Siirt petrol bölgesindeki Çamurlu sahaları ile Thrace Basin Nat. Gas Corp. + Pinnacle Turkey Inc. ortaklığının 1 nolu Marmara petrol bölgesindeki Hayrabolu ve Gelindere sahaları, Thrace Basin Nat. Gas Corp.+Enron Thrace Exploration and Production B.V. ortaklığının Tekirdağ Sığ, Gazioğlu ve Mavi Marmara sahaları ve Thrace Basin Nat. Gas Corp. şirketinin Tatarlı sahası ile Amity Oil İnt.+Türkiye Petrolleri A.O nun Göçerler, Adatepe, D.Adatepe Çayırdere sahasından ayrıca N.V.Turkse Perenco şirketinin 11 nolu Diyarbakır petrol bölgesindeki Derin Barbeş sahasından yapılmaktadır.

1976 yılında kullanılmaya başlanan Doğalgazın tüketimi, özellikle 1980’li yılların ortasından itibaren hızla artmıştır. 2006 yılında toplam birincil enerji arzının %28,6’sını doğalgaz oluşturmuş, toplam doğalgaz arzının ise %52,8’i elektrik santrallerinde tüketilmiştir. Doğalgazın nihai tüketimi (sanayi ve konut) de hızla artarak 2006 yılında 14,3 milyar m³’e ulaşmış ve toplam nihai enerji tüketiminin %17,4’ünü oluşturmuştur (çizelge 3.8.).

Çizelge 3.8. Doğalgaz için üretim ve tüketim değerleri (m³) [51]

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Üretim	212	182	639	312	378	561	708	897	907
İthalat	3 257	6 859	14 821	16 368	17 326	20 823	21 797	26 947	30 742
Arz	3 418	6 937	15 086	16 339	17 694	21 374	22 446	27 488	31 313
Santral	2 556	3 602	9 495	10 523	10 538	12 459	12 666	15 757	17 035
İç Tüketim			0	9	280	246	8	6	6
Nihai Tüketim	862	3 335	5 592	5 807	6 876	8 669	9 772	11 725	14 272
Sanayi	813	2 341	2 314	2 913	3 962	4 792	5 385	5 882	7 044
Ulaştırma		1	4	4	4	4	4	5	5
Konut ve Hizmet	49	993	3 274	2 890	2 910	3 873	4 383	5 838	7 223

3.2.6. Yenilenebilir enerji

Yenilenebilir enerji, doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağını ifade etmektedir. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun Tasarısı Taslağı’nın 3. maddesinde yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biokütle, biyogaz, dalga ve gel-git gibi kaynaklar sıralanmaktadır.

Günümüzde AB ülkeleri enerji tüketimlerinin %5,6’sını yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamaktadır. Avrupa Birliği’nin 2010 yılında, toplam elektrik üretiminin %22,1’inin, toplam enerji tüketiminin ise, %12’sinin yenilenebilir kaynaklardan karşılaması hedeflenmektedir. Türkiye’de ise yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketim içindeki payı 2000 yılında sadece %1 seviyesindedir. Bu rakamın uygulanan politikalar sonucunda 2010 yılında %7’ye düşmesi beklenmektedir. Türkiye bugün mevcut enerji tüketiminin sadece %36’sını öz kaynaklarından karşılıyor iken, bu oranın 2023’de %20’lere düşmesi kaçınılmaz görülmektedir.

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarını geliştirmek amacıyla gerçekleştirilen bir takım projeler bulunmaktadır. Bunlardan 2004–2010 yıllarını kapsayan ve Dünya Bankası Takım Lideri Ranjit Lamech öncülüğü ile başlatılan ‘Yenilenebilir Enerji Kaynakları Projesi’nin amacı; hükümet garantileri olmaksızın, yeni Elektrik Piyasası Kanununda yer alan piyasa esaslı çerçevede, özel sektörün sahip olacağı ve işletilen yenilenebilir kaynaklardan dağıtılmış üretimin arttırılmasını sağlamaktır. Projenin toplam kredi tutarı 202,03 milyon dolardır. Projeyi Türkiye Sınai ve Kalkınma Bankası ile Türkiye Kalkınma Bankası yönetmektedir.

Hidrojen Enerjisi

Hidrojen, güneş ve diğer yıldızların termonükleer tepkimeye vermiş olduğu ısının yakıtıdır. Sıvı hidrojenin hacmi gaz halindeki hacminin sadece 1/700’ü kadardır. Hidrojen, tüm yakıtlar içinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahip gazdır. 1 kg hidrojen 2,1 kg doğalgaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Ancak birim başına enerji hacmi yüksektir.

Hidrojen dünyanın en basit ve en çok bulunan bir elementidir. Aynı zamanda renksiz, kokusuz, havadan 14,4 kez daha hafif ve zehirsiz bir gazdır. Yerel olarak da üretimi mümkün olan hidrojen enerjisi ayrıca kolay ve güvenli bir şekilde taşınımı ile enerji kaybı az olan, her alanda kullanılabilen bir enerji türüdür.

Hidrojen doğada bileşikler halinde bulunmaktadır ve en çok bilinen bileşiği sudur. Hidrojenin yakıt olarak kullanılması halinde atmosfere atılan ürün sadece su ve su buharıdır. Bunun dışında çevreyi kirletici veya sera etkisini artırıcı hiçbir zararlı madde üretilmemektedir. Ayrıca hidrojen petrol yakıtlara göre ortalama 1,33 kat daha verimli bir yakıttır. Hidrojen kömür, doğalgaz gibi fosil kaynaklarının yanı sıra su, rüzgar, dalga ve biokütleden de üretilebilmektedir.

Hidrojenin dünyadaki gelişimi yakıt olarak kullanıldığı yakıt pili teknolojisi yönündedir. Ancak tüm yakıtlar gibi hidrojenin de bazı dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin diğer yakıtlardan üç kat pahalı bir yakıt türüdür. Bu özelliğinin ortadan

kaldırılabilmesi ise üretiminde kullanılacak maliyet düşürücü teknolojik gelişmelere bağlıdır. Ayrıca ihtiyaç fazlası oluşabilecek elektrik enerjisinin hidrojen olarak depolanarak enerjinin yaygın kullanılabilmesi sağlanabilir. Yine yapılan barajlarla oluşan baraj göllerinin doğal kaynakları olduğu kadar kültürel zenginliği yok etme tehlikesi üzerinde durulması gereken diğer bir tehdit unsurudur.

Güneş Enerjisi

Günesin gün boyunca atmosfere verdiği ısı ve ışık, insanların ihtiyaç duyduğu elektrik ve proses ısı olarak kullanımına sunulmaktadır. Günesin ulaştığı yere düz depolayıcı koyularak bunun ısısıyla 70–80 derece su elde edilebilmektedir. Güneşten gelen ısı ve ışıktan dağınık enerji kaynağını odaklayarak daha fazla yararlanabilmek için yoğunlaştırıcı ya da odaklı toplayıcı adı verilen bir araç kullanılmaktadır. Ayrıca güneşten elektrik üretmek için yar iletken malzemelerin özelliğinden yararlanılmaktadır. Yine güneş ışınının 500 aynayla yansıtıldığı bir kulede çok yüksek sıcaklıklara ulaşılabilmektedir. Bu kuleden geçirilen bir akışkan yardımıyla da elde edilen buhardan elektrik üretilmektedir.

Çizelge 3.9. Türkiye'nin Aylık Ortalama Güneş Enerjisi Potansiyeli [51]

Aylar	Aylık Toplam Güneş Enerjisi (Kcal/Cm ² -Ay) (Kwh/M ² -Ay)		Güneşlenme Süresi (Saat/Ay)
Ocak	4,45	51,75	103,0
Şubat	5,44	63,27	115,0
Mart	8,31	96,65	165,0
Nisan	10,51	122,23	197,0
Mayıs	13,23	153,86	273,0
Haziran	14,51	168,75	325,0
Temmuz	15,08	175,38	365,0
Ağustos	13,62	158,40	343,0
Eylül	10,60	123,28	280,0
Ekim	7,73	89,90	214,0
Kasım	5,23	60,82	157,0
Aralık	4,03	46,87	103,0
Toplam	112,74	1 311	2 640
Ortalama	308,0 Cal/cm ² -Gün	3,6 Kwh/m ² -Gün	7,2 Saat/Gün

Ülkemiz sahip olduğu coğrafi konum nedeniyle güneş enerji potansiyeli yüksek ülkeler arasında yer almaktadır. Ülkemizde güneş enerjisi yaygın olarak, ancak verimsiz bir şekilde kullanılmaktadır.

Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık güneşlenme süresi 2640 saat yani günlük toplam 7,2 saat ve ortalama toplam ışınım şiddeti 1311 kWh/m²-yıl, yani günlük 3,6 kWh/m² olarak tespit edilmiştir (Çizelge 3.9.).

Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz bölgesi izlemektedir (Çizelge 3.10).

Çizelge 3.10. Türkiye'nin Yıllık Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı [51]

Bölge	Toplam Güneş Enerjisi (Kwh/m ² -Yıl)	Güneşlenme Süresi (Saat/Yıl)
G.Doğu Anadolu	1 460	2 993
Akdeniz	1 390	2 956
Doğu Anadolu	1 365	2 664
İç Anadolu	1 314	2 628
Ege	1 304	2 738
Marmara	1 168	2 409
Karadeniz	1 120	1 971

Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr, güneşin doğuşundan batışına kadar yeryüzündeki farklı yüzeylerin, farklı hızlarda ısınıp soğumasıyla oluşmaktadır. Rüzgâr hareket halindeki havanın kinetik enerjisidir. Gelen hava kanatları döndürürken, kanatların bağlı olduğu mil jeneratörü çalıştırmaktadır.

Rüzgâr türbinleri fosil yakıt santrallerine kıyasla işletme maliyetinin sıfır olması açısından daha ekonomik üretim yapmaktadır. Bozcaada'daki rüzgâr türbinlerinde

bir kwh kapasite maliyeti 1000 dolar iken, bir hidroelektrik santrali için 2000–4000 doları bulmaktadır. OECD kaynaklarına göre Türkiye’de yılda tüketilen elektriğin en az iki mislinin rüzgârdan karşılanabileceğini göstermektedir.

Dünyanın pek çok bölgesinde rüzgâr parkları bulunmaktadır. 500 kw’lık bir rüzgar pervanesinin tüm kuruluş masrafları dahil fiyatı 600 bin dolardır. Yani böyle bir üniteden Akkuyu’daki nükleer santrale özdeş bir tesisin kurulması için gerekli olan masrafların tamamı 2,2 milyar dolardır. Bu gerçek göz ardı edilmemelidir.

Türkiye’de genel amaçlı rüzgâr ölçümleri, diğer meteorolojik ölçümlerle birlikte Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır. Rüzgâr enerjisi kaynağına dayalı planların yapılabilmesi ise, öncelikle kaynağın potansiyelinin belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Bu amaçla ülkemizde, rüzgâr enerjisi yönünden yüksek potansiyel vaat eden yerlerde yapılan etütler ile rüzgârdan enerji üretimine elverişli olabilecek bölgelere rüzgâr enerjisi gözlem istasyonları kurulup veri toplanmaya başlanmıştır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından rüzgâr enerjisi gözlem istasyonlarına ait aylık ortalama rüzgâr hızları ve rüzgâr yönleri güncellenerek yayınlanmaktadır. Bu sonuçlar ile bazı firmalar rüzgâr tarlaları kurmak için harekete geçebilmekte ve kendi rüzgâr ölçümlerini yapabilmektedirler (Çizelge 3.11).

Çizelge 3.11. 10 Metre Yükseklikteki Aylık Ortalama Rüzgâr Hızları (M/S) [51]

Yer	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A	ORT.
Bababurnu	6,1	7,1	N/A	4,9	4,4	5,4	5,2	-	-	-	-	-	5,5
Belen	5,8	5,7	5,1	6,1	7,6	9,3	10,8	11,3	7,9	4,9	4,7	3,9	6,9
Datca	5,7	5,8	5,8	5,7	5,5	6,9	6,9	7,0	7,3	5,6	N/A	N/A	6,2
Kocadağ	N/A	11,5	7,4	19,9	6,1	7,8	N/A	7,4	6,9	8,2	9,5	9,7	9,4
Karaman	4,7	5,4	4,9	4,2	3,9	4,1	4,5	4,4	3,8	3,6	4,2	3,0	4,2
Van	-	-	-	2,9	3,5	3,1	2,9	2,8	2,9	-	-	-	3,0

Ayrıca EİE, DMİ ile işbirliği yaparak rüzgâr enerji kaynağının değerlendirilmesine ve planlamalarına referans oluşturmak, rüzgâr enerji dönüşüm sistemlerine uygun olan yerleri belirlemek amacıyla Türkiye’nin Rüzgâr Atlasını hazırlamıştır.

Bazı rüzgâr türbini üretici firmalar şunlardır: Dewind, NEG-Micon, Vestas, Nordex, Bonus Energy, MADE Technologies, Ecotecnia, Enercon. EİE'nin iki adet mekanik rüzgâr enerjisi su pompalama sistemi bulunmaktadır. Bu proje ile mevcut teknoloji ile ilgili bilgi birikiminin sağlanması, bu sistemlerin bakım-onarım ve işletme konularında deneyim kazanılması, yurt içinde imalat ve kullanım olanaklarının araştırılması amaçlanmaktadır.

Yine EİE'nin rüzgâr enerjisi ile ilgili geliştirdiği birkaç proje bulunmaktadır. EİE'nin IRESMED (Integration of Renewable Energies into Electricity Network) adlı projesi Avrupa Birliği JOULE ve INCO programı kapsamında finanse edilmiş olan bir projedir. Proje, kırsal alan elektrifikasyonu için PV ve rüzgâr gücünün elektrik üretimine entegrasyonunu sağlamak olmak üzere iki ayrı çalışma grubunda yürütülmektedir. MED 2010 Projesi AB tarafından desteklenmiş ve OME (Observatoire Mediterranien de l'Energie) koordinatörlüğünde organize edilmiş olup aşağıda sıralanan kuruluşlar tarafından yürütülmüştür.

EİE, Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB) ile Türkiye'de rüzgâr enerjisi kullanımını özendirmek ve sistem tasarımı için metodoloji oluşturmak amacıyla Gökçeada'da "Rüzgâr Enerjisi Fizibilite Projesi " hazırlamıştır. Bu amaçla TÜREB (Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği - Türkiye Şubesi) ile bir ortak girişim protokolü yapılmıştır. Proje Avrupa Yatırım Bankası METAP (Mediterranean Technical Assistance Programme) Programından desteklenmiştir.

Rüzgâr enerjisinin avantajları arasında; temiz bir enerji kaynağı olması, emisyonunun olmaması; yerel bir enerji kaynağı olup, dışa bağımlılığının bulunmaması; yatırım alanının %1'inin kullanılması, bu alanda tarım ve hayvancılık faaliyetlerinin sürdürülebilirliği; ucuz olması; atıl alanların kullanılabilirliği ve son olarak yüksek istihdam alanları oluşturması sıralanabilir.

Rüzgâr enerjisinin sağladığı pek çok avantaja karşın bir takım dezavantajlarından bahsetmek de mümkündür. Bunlar arasında; gürültü kirliliği oluşturması; görüntü

kirliliğine yol açması; radyo ve TV sinyallerini bozma ihtimali ve kus göç yollarında, kuşlara zarar verme ihtimalleri sayılabilir.

Jeotermal Enerji

Yeraltındaki magmada artan sıcaklığın yer altı sularının ısıtması sonucunda yeryüzüne çıkan suların buharının gücüyle yapılmaktadır. Türkiye’de Denizli, Kütahya ve İzmir – Aliğa benzeri bölgelerde jeotermal enerji kaynaklarından konut ısıtma ve elektrik üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Halen jeotermal enerji kaynaklarından üretilen elektrik miktarı 20 megavat’tır. Türkiye’de jeotermal enerji kaynaklarından 2010 yılında 500 megavat, 2020 yılında 1000 megavat elektrik kapasitesi kurulabilecektir.

Biokütle

Bitkilerin fotosentez yaparken atmosferden aldıkları karbondioksitin karbonunu bünyelerinde biriktirip biokütleyi oluştururken oksijeni dışarıya verirler. Bitkilerin yakılması sırasında ise karbondioksit yeniden atmosfere verilmektedir. Büyüyen bitkilerle enerji ormanları oluşturulmakta, ayrıca bitkiler yetiştirilerek ya da yakılarak elde edilecek buhardan da elektrik üretimi yapılabilmektedir. Türkiye enerji ormanları konusunda pilot bölgelerde çalışmalarını sürdürmektedir.

Biyogaz

Bilindiği gibi hayvansal ve bitkisel organik atık/atık maddelerin çürütülmesiyle oluşan metan gazı çevreye zarar veren bir etkidir. Ancak aktif gazın depolanması, depolanan gazların arıtılması ve daha sonra oluşan metan gazın yakılması yoluyla enerjiye dönüştürülmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca yakılması mümkün olmayan atıklar da tarım topraklarında gübre olarak kullanılmaktadır.

Biyogaz, her şeyden önce çevre dostu bir enerji ve gübre kaynağıdır. Hayvan gübrelere kaynaklanan gerek insan sağlığını gerekse yer altı sularını tehdit edici

hastalık nedenlerinin ortadan kalmasını sağlamaktadır. Atıkların geri kazanımı bu sayede ve oldukça ucuz bir maliyetle sağlanmış olmaktadır. Yine biyogaz üretimi sonucunda hayvan gübresinde bulunabilecek yabancı ot tohumları çimlenme özelliğini kaybetmektedir. Ayrıca biyogaz üretiminin ardından atıklar yok olmamakta daha değerli bir organik gübre haline dönüşmektedir.

Türkiye’de toplam biyogaz miktarı 1,67 milyar m³/yıl’dır (Çizelge 3.12). Bugün bir adet büyükbaş hayvan 3,6 ton/yıl yaş gübre, 1 adet küçükbaş hayvan 0,7 ton/yıl yaş gübre, 1 adet kümes hayvanı ise 0,022 ton/yıl yaş gübre üretmektedir. 1 ton sığır gübresinden 33 m³/yıl biyogaz, 1 ton kümes hayvanı gübresinden 78 m³/yıl biyogaz ve 1 ton koyun gübresinden de 58 m³/yıl biyogaz üretilebilmektedir.

Çizelge 3.12. Türkiye’de Hayvansal Atık Potansiyeline Karşılık Gelen Üretilebilecek Biyogaz Miktarı ve Taşkömürü Değeri [51]

Hayvan Cinsi	Hayvan Sayısı (Adet)	Yaş Gübre (Ton-Yıl)	Biyogaz (m ³ /Yıl)	Taşkömürü Eşd. (Ton-Yıl)
Sığır	11 054 000	40 347 100	994 860 000	710 613
Koyun-Keçi	38 030 000	26 621 000	1 901 500 000	1 358 215
Tavuk-Hindi	243 510 453	5 357 207	487 020 906	347 871
Toplam	292 594 453	72 325 307	1 672 030 906	2 416 699

3.3. Türkiye’de Enerji Kullanımından Kaynaklı Çevre Kirliliği

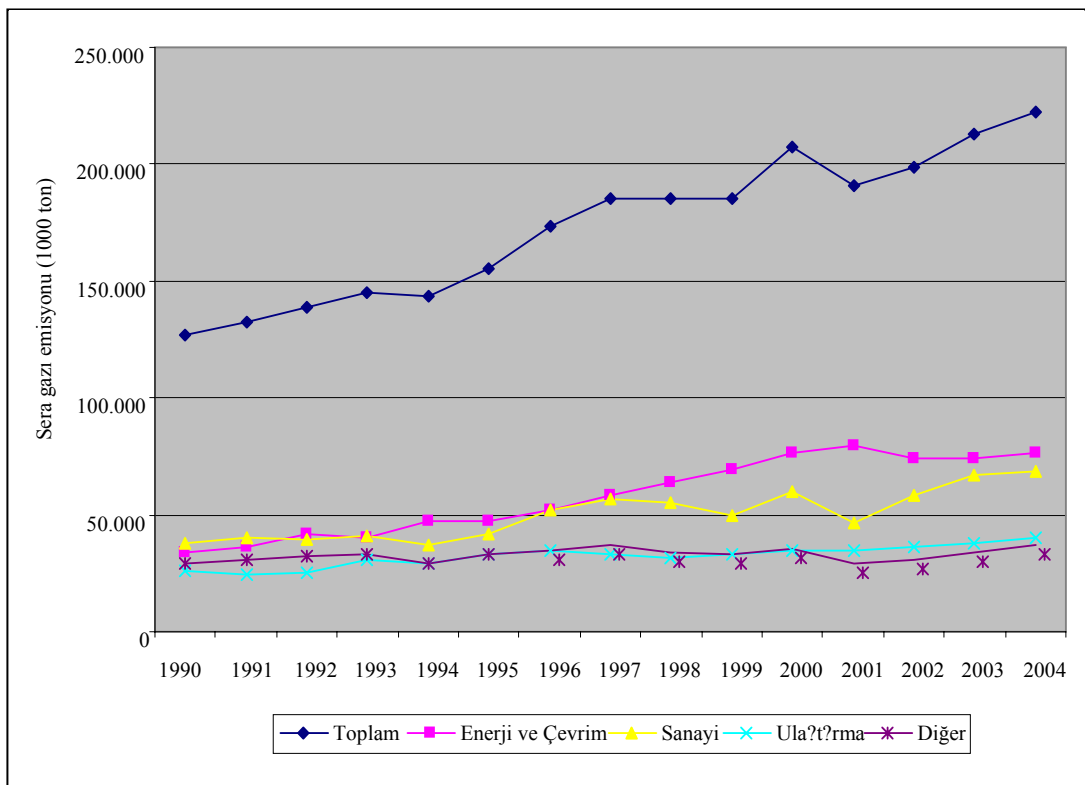
Dünya’da, çevresel hususların önem kazanması, çevre sorunlarının küreselleşmesi, uluslararası anlaşmalar, sürdürülebilir kalkınma kavramının ön plana çıkması v.b. gelişmeler, ülkemizde çevre konularında önemli adımların atılmasına, çevre politikalarının gelişmesine neden olmuş ve çevre yeni bir boyut kazanmıştır [52]. Ayrıca, Türkiye’nin AB üyeliği yolunda olması ve İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesine taraf olması da çevre alanındaki bu gelişmelerde itici unsur olmuştur [53]. Türkiye’nin AB üyeliğinin söz konusu olmasını takiben, 3 Ekim 2005 tarihi itibarıyla resmen AB’ye katılım müzakerelerine başlanmıştır. AB Müktesebatı içinde, çevre çok önemli bir yer tutmakta olup, oldukça kapsamlıdır. Diğer önemli

bir husus da, çevre müktesebatına uyum maliyetinin çok yüksek olmasıdır. Dolayısıyla, çevre faslı müzakere sürecinin en zorlu fasıllardan biridir [54]. Tarama sürecinin ilk aşaması “Tanıtıcı Toplantı” olup, bu toplantıda Komisyon tarafından AB müktesebatı ile ilgili bilgi verilmiş ve sunuşlar yapılmıştır. İkinci aşama ise Türkiye sunuşlarının yer aldığı “Ayrıntılı Toplantı”dır. Bu kapsamda, 27. fasıl olarak ele alınan Çevre Faslı 3–11 Nisan 2006 tarihlerinde “Tanıtıcı Toplantı”, 29 Mayıs–2 Haziran 2006 tarihlerinde ise “Ayrıntılı Toplantı” gerçekleştirilmiştir. Söz konusu tarama sürecinde sürdürülen çalışmalarda enerji sektörü de dahil olmak üzere, ülkemizdeki tüm sektörlerin ilgili bakanlıkları, kurum ve kuruluşları yer almıştır.

İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (İDÇS) Türkiye Büyük Millet Meclisinde onaylanmış olup, 24 Mayıs 2004 tarihi itibariyle ülkemiz Sözleşmeye resmen taraf olmuştur. Sözleşmenin hükümlerine göre, İDÇS’ne taraf olunmasından sonra Ulusal Sera Gazları Envanterinin (National Inventory) ve Ulusal Bildirimin (National Communication) Birleşmiş milletler İDÇS Sekreteryasına sunulması gerekmektedir. Bu çerçevede, 1990–2004 yıllarını kapsayan ilk Ulusal Envanter IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Kılavuzu doğrultusunda sera gazı emisyon hesaplama yöntemine göre hazırlanarak 2006 yılında BM’e sunulmuştur. BM Kalkınma Programı (UNDP) çerçevesinde, finansmanı Küresel Çevre Fonu (Global Environment Fund-GEF) tarafından karşılanmak üzere, Çevre ve Orman Bakanlığı koordinasyonunda, ilgili bakanlıkların, üniversitelerin, kurum ve kuruluşların, sivil toplum kuruluşlarının katılımı Ulusal Bildirim hazırlanmış ve Ocak 2007 tarihinde BM’e sunulmuştur [55].

Birleşmiş Milletler tarafından yayımlanan raporlara ve istatistikî verilere göre, İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesinin Ek-I listesinde yer alan ülkelerin 1990–2004 yılları arasındaki CO₂-eşdeğer (CO₂ ve CO₂ cinsinden diğer sera gazlarının toplamı) olarak ifade edilen sera gazı emisyonlarına ilişkin artış yüzdelerinin verildiği grafikte, %72,6 artışla, Türkiye birinci sıradadır.

Türkiye'deki sera gazı emisyonuna en fazla katkı sağlayan sektörler enerji ve sanayi sektörleridir. Bu sektörler Türkiye'deki toplam emisyonun yaklaşık olarak % 90'ını oluşturmaktadır. Enerji ve çevrim sektörü, elektrik üretimi ve petrol rafinelerinden oluşmaktadır ve enerji kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonunun % 34'üne ve toplam emisyonunu % 31'ine sebep olmaktadır. Diğer bir sektör ise sanayi sektörüdür ve demir-çelik, maden üretimi ve kimyasal madde üretimini kapsamaktadır. Bu sektörün toplam sera gazı emisyonuna katkısı ise yaklaşık olarak % 28'dir. Ulaştırma sektörü ise, karayolu, havayolu, demiryolu ve denizcilikte kullanılan enerjiye bağlı olarak toplam sera gazı emisyonunun % 17'sine sebep olmaktadır. Konutlarda kullanılan enerji ve tarım, ormancılık ve balıkçılıktan kaynaklanan emisyonun toplam emisyon içerisindeki payı ise % 15 olmaktadır [1]. Şekil 3.2'de sektörlerle ait emisyon değerlerinin 1990–2004 yılları arasındaki değişimi görülmektedir.



Şekil 3.2. Sektörlerden kaynaklanan sera gazı emisyon değerleri

Türkiye'nin, sera gazları artış oranında Ek-1 ülkeleri arasında ön planda yer almasına karşılık, ülkemizin toplam sera gazı emisyonları düşük seviyededir. Türkiye'nin 2004 yılı CO₂ emisyon miktarlarına bakıldığında, dünya toplamının %0.79'unu, OECD ülkeleri toplamının ise %1.62'sini oluşturduğu görülmektedir.

Aşağıda, çizelge 3.13'de enerji kaynaklı CO₂ emisyonları ile ilgili olarak, karşılaştırmalı bir şekilde dünya, OECD, bazı Avrupa üyeleri ve Türkiye için bazı göstergeler verilmektedir.

Çizelge 3.13. Farklı ülkeler için karşılaştırmalı CO₂ emisyon değerleri [52]

	CO ₂ Emisyonları (Milyon Ton CO ₂)	CO ₂ / Kişi başı (Ton CO ₂ /kb)	CO ₂ / TBK (Ton CO ₂ /TEP)	CO ₂ / GSMH (kgCO ₂ /2000 \$)
Türkiye	209	2,92	2,56	0,91
OECD	12 911	11,09	2,34	0,47
Dünya	26 583	4,18	2,37	0,76
ABD	5 800	19,73	2,49	0,54
Çin	4 769	3,66	2,93	2,50
Rusya	1 529	10,63	2,38	4,65
Almanya	849	10,29	2,44	0,43
İngiltere	537	8,98	2,30	0,34
Fransa	387	6,22	1,41	0,27

Çizelge 3.14'de ise Türkiye ve Avrupa Birliği (AB) ülkelerindeki sera gazı emisyon değerleri kişi başı CO₂ verilmiştir [50]. Türkiye'deki enerji tüketim miktarının hızla artmasına rağmen kişi başı GHG emisyon değerleri Avrupa Birliği ülkelerinin oldukça altındadır.

Sera gazları, çeşitli sektörlerden ve faaliyetlerden kaynaklanmakla birlikte, enerji-ilişkin faaliyetlerin sorumluluk payı önemli ölçüdedir. Ülkemiz verilerine göre, 2004 yılı için, enerjiye yönelik faaliyetlerden kaynaklanan sera gazları %76,7'lik bir orana sahiptir. Sera gazları içinde ise üzerinde en fazla üzerinde durulan CO₂ emisyonlarıdır. CO₂ fosil yakıtların kullanımından büyük miktarlarda atmosfere verilmektedir. CO₂ kimyasal proseslerden de kaynaklanmakla birlikte küçük bir orana sahiptir. Türkiye verilerine göre, enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının toplam CO₂ içindeki payı %81,5'dir.

Çizelge 3.14. AB ülkeleri ve Türkiye'deki kişi başı GHG emisyon değerlerinin karşılaştırması [49]

Ülke	Yıl								
	1995	1997	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Belçika	0,010236	0,009901	0,009791	0,009806	0,009743	0,009583	0,009695	0,009686	0,008855
Bulgaristan	0,007452	0,007002	0,005905	0,005933	0,00618	0,005955	0,006526	0,006537	0,011854
Çek Cum.	0,007616	0,007896	0,007036	0,007394	0,007422	0,007192	0,00737	0,007335	0,009001
Danimarka	0,021109	0,021857	0,019761	0,018443	0,018788	0,018516	0,019838	0,018193	0,014599
Almanya	0,001092	0,001071	0,001014	0,001013	0,001022	0,001004	0,001009	0,001	0,000958
Estonya	0,035633	0,038193	0,032483	0,032942	0,033065	0,033353	0,036652	0,037008	0,068274
İrlanda	0,029353	0,031163	0,032367	0,032612	0,033003	0,031719	0,030931	0,030464	0,027499
Yunanistan	0,009618	0,0102	0,010505	0,010877	0,010978	0,010922	0,01123	0,011222	0,011279
İspanya	0,002793	0,002897	0,003211	0,003316	0,003283	0,003391	0,003384	0,003493	0,002672
Fransa	0,001671	0,001684	0,001666	0,001637	0,001627	0,001602	0,001605	0,0016	0,0016
İtalya	0,001803	0,001799	0,001857	0,001874	0,001896	0,001897	0,001938	0,001936	0,001599
Kıbrıs	0,185156	0,189854	0,198272	0,205069	0,20172	0,20567	0,213676	0,202912	0,20022
Letonya	0,018835	0,018733	0,017006	0,016081	0,017426	0,017435	0,017714	0,017894	0,039888
Litvanya	0,01765	0,013935	0,011848	0,011645	0,011471	0,011077	0,009761	0,011579	0,026859
Lüksemburg	0,193739	0,177501	0,168694	0,176199	0,178815	0,194551	0,200981	0,222099	0,158242
Macaristan	0,006608	0,006669	0,006681	0,006486	0,006715	0,006496	0,006714	0,006722	0,009309
Malta	0,331258	0,320856	0,332629	0,339295	0,302504	0,354283	0,35263	0,364871	0,362582
Hollanda	0,006814	0,00679	0,006383	0,00631	0,006311	0,006228	0,006207	0,006249	0,005765
Avusturya	0,01279	0,01322	0,012816	0,012859	0,01344	0,013639	0,014465	0,014214	0,010601
Polonya	0,001913	0,001957	0,001836	0,001764	0,00177	0,001713	0,001771	0,001791	0,002462
Portekiz	0,011859	0,011973	0,013903	0,013448	0,013611	0,014241	0,013413	0,013461	0,012062
Romanya	0,002968	0,002732	0,002192	0,00224	0,002323	0,002492	0,002604	0,002717	0,004248
Slovenya	0,046092	0,048566	0,046555	0,046836	0,049093	0,049448	0,048772	0,049689	0,046055
Slovakya	0,01361	0,013702	0,01296	0,012484	0,01333	0,012828	0,012976	0,012955	0,017085
Finlandiya	0,019711	0,020809	0,019556	0,019028	0,020459	0,020982	0,023145	0,021936	0,019096
İsveç	0,011569	0,011374	0,010899	0,010653	0,010729	0,010854	0,01095	0,01074	0,011541
İngiltere	0,001583	0,001575	0,001473	0,00147	0,001481	0,001434	0,001442	0,001439	0,001457
Hırvatistan	0,014739	0,0169	0,017751	0,017778	0,019132	0,019959	0,021116	0,021298	0,021378
Türkiye	0,002106	0,002948	0,002808	0,002684	0,002469	0,002651	0,002725	0,002971	0,003002
İzlanda	0,355056	0,380882	0,393906	0,36129	0,340861	0,333217	0,325477	0,333138	0,374689
Norveç	0,023043	0,024108	0,02434	0,023981	0,024404	0,02374	0,023966	0,024096	0,021926

Enerji - ilişkin sektörler arasında, sera gazı emisyonlardan en fazla sorumlu olan elektrik enerjisi sektörüdür. 1990 yılında enerji kaynaklı emisyonların sektörel dağılımında elektrik enerjisinin payı %27 iken, bu oran önemli bir artış göstermiş ve 2004 yılında %34'e ulaşmış en fazla sorumlu olan bir sektör olarak yerini almıştır [56].

4. AYRIŞTIRMA YÖNTEMİ

Doğrusal programlama sınırlı kaynakların kullanımını optimum kılmak için tasarlanmış bir matematiksel modelleme yöntemidir. Askerlik, endüstri, tarım, ulaştırma, ekonomi, sağlık sistemleri, hatta davranış bilimleri ile sosyal bilimler gibi alanlarda başarılı uygulamaları vardır. Yöntemin kullanırlığı bilgisayar yazılımındaki gelişmelerle daha da artmıştır. Gerçekte, doğrusal programlama, hesaplamalardaki yüksek verimliliği ile tamsayılı, doğrusal olmayan ve stokastik programlama gibi başka tip yöneylem araştırması modellerinin çözüm algoritmalarının geliştirilmesinin de temelini oluşturmuştur.

Matematiksel programlama problemleri çok büyük veya çok karmaşık hale geldiğinde çözüme ulaşabilmek için büyük ölçekli matematiksel programlama yaklaşımlarının kullanılması zorunlu veya daha uygun hale gelmektedir. Büyük ölçekli problemlerin tam olarak tanımlanabilmesi için daha küçük değişken ve kısıt kümesine sahip olması gerekmektedir.

Bölünebilen amaç ve kısıt fonksiyonlarını içeren büyük boyutlu matematiksel programlama modelleri yakın zamanda oldukça fazla ilgi çekmektedir. Bu tip modellerin geniş çaplı uygulanabilme özellikleri ve yapılarından dolayı daha küçük alt problemlere ayrılmaları doğal bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır.

Ayrıştırma prensipleri büyük ölçekli doğrusal programlama modelleri veya özel yapıya sahip kısıtlar içeren doğrusal programlama modelleri için sistematik prosedür öne sürmektedir. Buna göre kısıtlar, genel (karmaşık) kısıtlar ve özel yapıya sahip kısıtlar iki kümeye ayrılırlar.

Ayrıştırma yöntemi maliyet-etkin ve kaynak-etkin olmak üzere iki mekanizmaya sahiptir. Maliyet-etkin ayrıştırma yönteminde ayrışma, maliyetlerin veya dual değişkenlerin bağlı oldukları kısıtların üzerine konulmasıyla ve onların amaç fonksiyonuna yerleştirilmesiyle sağlanır. Kaynak-etkin ayrıştırmada ise, R tane alt problemin her biri q adet paylaşılmış kaynağın bir oranı olarak verilir. Kaynak

kökenli koordinasyon problemi her bir alt problemi ayrık olarak optimize ederek problemin optimize edilmesine izin veren bir payın kaynaklara tahsisi ile ilgilenir. Literatürde maliyet-etkin ayrıştırma tekniğinin kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. Enerji optimizasyonu konusunda kaynak-etkin ayrıştırma yöntemi sektörel bazda kullanılmış ancak bütün sistemin optimize edilmesi problemlerine uygulanmamıştır. Bu açıdan orjinal olması sebebiyle çalışmamızda kaynak-etkin ayrıştırma yöntemi kullanılacaktır.

Ayrıştırma prosedürünün stratejisi ise işlem yapabilmek için doğrusal programlama modelini ikiye bölmektir. Bunlardan birisi genel kısıtlar üzerinden diğeri ise özel yapıya sahip kısıtlar üzerinden işlem yapar. Bu iki doğrusal programlama modeli ortak bir noktaya ulaşana kadar iterasyonlarda bulunan sonuçlar ileri ve geri yönlerde kontrol edilerek orijinal problemin optimum sonucuna ulaşılmaya çalışılır. Genel kısıtlar üzerindeki doğrusal programlama modeline ana (master) problem, özel yapıya sahip kısıtlar üzerindeki doğrusal programlama modeline ise alt (sub problem) problem adı verilir. Ana problem alt probleme yeni bir maliyet katsayısı kümesi sağlar ve maliyet katsayısı olarak bu yeni katsayılarla çözüme devam edilir. Bu sebepten dolayı bu prosedür kolon jenerasyonu (column generation) tekniği ile anılır. Yöntemde çözüme başlayabilmek için özel yapıya sahip kısıt kümesinin sınırlı olduğu varsayımı kabul edilmektedir [57].

Ayrıştırma yönteminin temel fikrini daha iyi anlayabilmek için aşağıdaki doğrusal programlama modelini inceleyelim.

$$\begin{aligned}
 Z &= \sum_i c_i x_i \\
 \sum_i A_i x_i &= b \\
 \sum_i B_i x_i &= b_i \\
 x_i &\geq 0 \\
 i &= 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

1. değişken kümesinin elemanları x_1, x_2, \dots, x_n olsun. Bu noktalar bize 1. kısıt kümesi için mümkün çözüm uzayının uç noktalarının konveks kombinasyonunu ifade eder. Mümkün çözüm uzayının uç noktalarını P_1, P_2, \dots, P_k kabul edersek 1. kısıt kümesi içindeki herhangi bir nokta aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2 + \dots + \mu_n P_n \quad (4.2)$$

Burada $\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n = 1$ ve $\mu_i \geq 0$ dir.

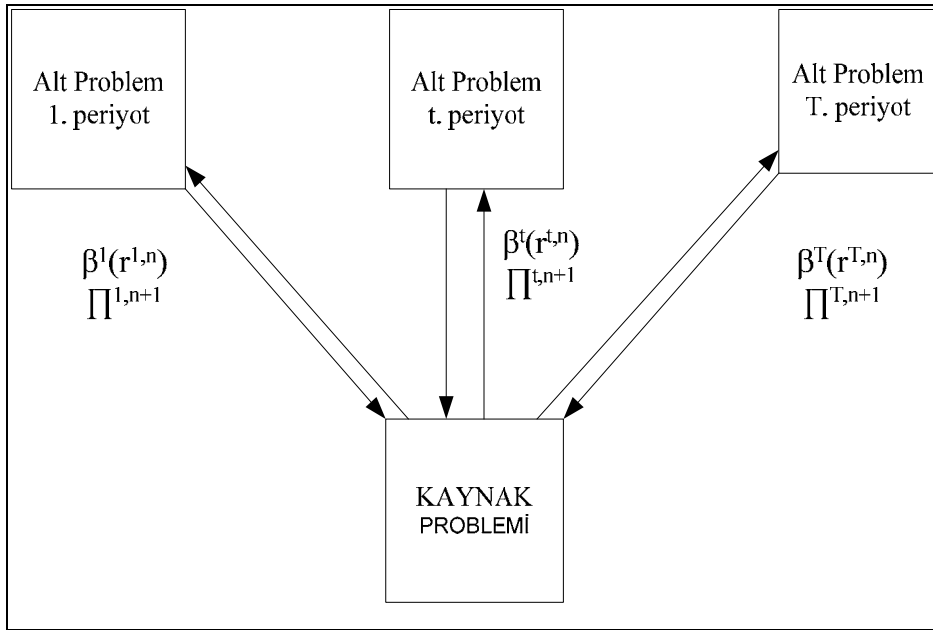
2. değişken kümesinin elemanları $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_k$ olsun. Bu noktalar bize 2. kısıt kümesi için mümkün çözüm uzayının uç noktalarının konveks kombinasyonunu ifade eder. Mümkün çözüm uzayının uç noktalarını Q_1, Q_2, \dots, Q_m kabul edersek 2. kısıt kümesi içindeki herhangi bir nokta aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} x_{n+1} \\ x_{n+2} \\ \cdot \\ x_k \end{bmatrix} = \lambda_1 Q_1 + \lambda_2 Q_2 + \dots + \lambda_k Q_m \quad (4.3)$$

Burada $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k = 1$ ve $\lambda_k \geq 0$ dir.

Yukarıdaki ifadeler kullanılarak doğrusal programlama modeline ait amaç fonksiyonu ve μ_i ve λ_k ile ifade edilen merkezleştirilmiş kısıtlar yazılabilir. Bu modele konveks kısıtlar adı verilen $\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n = 1$, $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k = 1$ bu kısıtlar ve işaret kısıtları eklendiğinde sınırlandırılmış ana problemi elde ederiz. Daha sonra elde edilen bu model düzeltilmiş simpleks algoritması ile çözülür.

Ayrıştırma yöntemi genel olarak iki yapı altında ele alınmaktadır. Bunlar maliyet tabanlı ayrıştırma ve kaynak kökenli ayrıştırma yöntemidir. Maliyet tabanlı ayrıştırmada model maliyet mizimizasyonu üzerine kurulur. Kaynak kökenli ayrıştırmada ise zaman ve sektör bazında model alt problemlere ayrılarak her bir dönem için optimal kaynak karışımı elde edilmeye çalışılmaktadır. Burada amaç, enerji sistemindeki denge proseslerinin iteratif olarak kurulmasıdır. Şekil 4.1’de iteratif denge prosesi görülmektedir [58].



Şekil 4.1. İteratif denge prosesi

Her bir alt problem için kaynak seviyelerini ifade eden ve pozitif değerlere sahip r^1, r^2, \dots, r^T değerleri toplam talep miktarını karşılıyor ve ana modeldeki amacımız olan maliyet minimizasyonuna olanak sağlıyorsa kaynaklar ve alt problemler arasında bir dengenin olduğunu söyleyebiliriz. Söz konusu denge aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$V_T(R) = \sum_{t=1}^T \alpha^{t-1} \left\{ \phi^t(0) - \phi^t(r^t) - g^t \left(\sum_{j=1}^{t-1} r^j, r^t \right) \right\} + \alpha^T \beta^{T+1} \left(R - \sum_{t=1}^T r^t \right) \quad (4.4)$$

Şekil 4.1’de gösterildiği gibi kaynaklar ve alt problemler arasındaki denge iteratif olarak sağlanır. Şekildeki n indeksi n . iterasyonu ifade etmektedir. Modele ilk olarak kullanılacak kaynaklar vektörü girilir. Daha sonra ekonomik ve sosyal gelişmeler dikkate alınarak her periyot için talebi karşılayacak kaynak karışım miktarları ve bunların toplam maliyete etkisi incelenir. Hangi kaynağın hangi periyotta amaç fonksiyonuna daha uygun olduğunu bulabilmek için model uygun kaynaklara ait gölge fiyatlarını (π^T) düşürerek tepki vermektedir. Her bir kaynak için bu işlem tekrarlanarak amaç fonksiyonundaki değişim miktarı (β^T) incelenmektedir. Modeldeki denge öncesi her iterasyonda, kaynak problemini etkileyen birçok faktör göz ardı edilir. Bu iterasyonlarda ulaşılan amaç fonksiyonu değeri, üst sınır tahmin değeri ile karşılaştırılarak optimum noktaya erişim sağlanır. İteratif olarak tekrarlanan bu işlemlerden sonra kaynak alt problemleri ile ana problem arasında bir denge sağlanmış olur.

Ayrıştırma yönteminde öncelikle büyük boyutlu bölünebilen problemler daha küçük ve daha basit alt problemlere ayrıştırılırlar. Burada amaç, alt problemlere ait optimal sonuçları elde ederek orijinal sistemin optimal sonucuna ulaşmaktır. Bu çalışmada da bölünebilen problemlerin koordine edilebilmesi için kaynak kökenli ayrıştırma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem kaynakların optimal dağıtımını esas almaktadır.

Büyük ölçekli bölünebilir problemler daha küçük ve daha kolay alt problemlere ayrıldığında, alt sistemlerin optimum çözümlerinin orijinal sistemin optimum çözümünü oluşturduğundan emin olmak için bunların bir şekilde koordineli olması gerekmektedir. Bu kaynakta ortaya koyulan materyaller, bölünebilir programlama problemlerini koordine edebilmek için kaynak kökenli ayrıştırma yöntemi ile ilgilenmektedir. Kullanılan yöntem rekabet halinde olan alt sistemler arasındaki kaynakların tahsis ve yeniden tahsisi ile ilgili bir teoriden uyarlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan yöntemi doğru bir şekilde inceleyebilmek için, genel ayrıştırma yöntemleri ve kaynak kökenli ayrıştırma yöntemi bir sonraki bölümde kısaca ele alınacaktır.

4.1. Kaynak kökenli Ayırıştırma Yöntemi

1960 yılında Dantzig-Wolfe Ayırıştırma prensibinin yayımından itibaren büyük ölçekli matematiksel programlama ile ilgili geniş kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmaların amacı bir defada ele alınması zor olan problemlerin çözümünü mümkün kılmak veya özünde büyük yapıya olmasalar bile özel yapılara sahip problemlerin çözümünü kolaylaştırmaktır [59].

Bütün ayırıştırma prensipleri aynı temel şema üzerinde çalışırlar: Orijinal problem daha küçük alt problemlere ayırıştırılır ve bunlar arasındaki koordinasyon sağlanarak orijinal problemin ne istediği sorusuna cevap aranır [60]. Alt problemlerden ana probleme transfer edilen bilgilere göre koordinasyon, maliyet tabanlı veya kaynak kökenli ayırıştırma yöntemi ile sağlanır. Kaynak kökenli ayırıştırma yöntemi ile maliyet tabanlı ayırıştırma yöntemi arasındaki fark primal ve dual yöntemleri arasındaki farka benzemektedir. Primal yöntemler hesaplama boyunca mümkün çözümü korurken, dual yöntemler optimaliteye ulaşana kadar mümkün sonuç vermezler [61].

Dantzig-Wolfe yöntemi sadece ilk değil aynı zamanda da ayırıştırma yöntemlerinin en iyi örneğidir. Önceleri blok angular yapıya doğrusal programlama problemleri için geliştirilmiş olmasına rağmen, daha sonra tüm doğrusal programlama problemlerine ve konkav maksimizasyon tipindeki doğrusal olmayan problemlere de uygulanabilmektedir.

Dantzig-Wolfe yönteminde “merkezde bilgi yokken merkezi planlamanın” yürümesine olanak sağlanmaktadır. Temel olarak, koordinasyon sistemi organizasyonun bölümlerinde ortak olan kaynaklar için fiyat belirler. Bu bölümler diğer bölümlerin fizibilitesine bakmadan alt sistemleri en uygun hale getirirler ve hesaplanan miktarları ortaya koyarlar. Koordinatör de bu teklifleri global fizibiliteyi koruyarak optimum şekilde birleştirir.

Alt problemlere getirilen alt çözümler bileşeni diğer bölümlerden yeni teklifler ortaya çıkmasına neden olur. Bu süreç, koordinasyon otoritesinin bölümleri bağımsız bir şekilde optimize ettikten ve böylelikle bütün sistemi en uygun hale getirdikten sonra sona erer.

Matematiksel olarak ise, yöntem her bir iterasyonda alt problemlere ait optimumun tüm problemin optimumunu dolaylı olarak taşıması gibi alt problemlerin hedef fonksiyonunu değiştiren bir yol bulur. Değişim etkenleri alt sistemler arasında rekabetçi denge kuran fiyatlardır.

Dantzig-Wolfe ayrıştırma yöntemi, ortaya çıkışından itibaren, büyük ölçekli problemlerin çözümünde etkili bir hesaplama vaat etmiştir. Büyük problemlerin çözümüyle ilgili umut veren gelişmeler kaydedilmesine rağmen, bu tür vaatler henüz tam olarak yerine getirilememiştir. Genellikle, problemler baş edilemeyecek kadar büyük boyutlara ulaşırlar ve önceden belirlenmesinin imkânı olmaz. Diğer zamanlarda ise optimum yaklaşım aşırı sayıda yinelemeler gerektirebilir. Hatta problemin özel bir yapısı olmadığı zaman, yöntem genelde sıradan basit algoritmadan daha uzun hesaplamalar gerektirir. Böyle durumlarda Dantzig-Wolfe yönteminin uygulanması genelde alışlagelmiş yöntemlerle hesaplanamayacak kadar zor olan karmaşık problemlere neden olur.

1962’de J.F. Benders, tamsayılı, yarı doğrusal problemler için alt problemlere ayırma yöntemini geliştirmiştir [62]. Bu yöntemde temel olarak, problem tam sayı ve sürekli olmak üzere iki parçaya bölünmektedir. Ayrık değişkenleri sabitleştirerek primal ve dual çözümler yardımıyla çözülen bir sürekli problem edinilir. Bu kolaylaştırılmış karmaşık probleme, tamamen tam sayılı bir problem elde edebilmek için sabitleştirilmiş primal ve dual çözümler yardımıyla Lagrange fonksiyonu uygulanır.

Her bir yinelemede yeni bir kısıt primal ve dual alt problem parametreleri olarak kullanılarak orjinal probleme eklenir. Dantzig-Wolfe algoritmasının kolon üretme sürecinin duali olarak düşünülebilen bu kısıt çoğalma süreci tahmin edilemeyecek kadar fazla sayıda kısıtlara neden olmaktadır.

Geoffrion doğrusal olmayan problemlerin çözümü için Benders algoritmasını genelleştirdi [63]. Bu algoritmanın en önemli özelliği hesaplama sırasında her bir iterasyonda orijinal amaç fonksiyonu değeri için alt ve üst limitleri belirleyerek kolay çözümlere ulaşmasıdır. Bu özellik hesaplamanın optimum öncesi durdurulması gerektiği zaman çok yararlı sonuçlar sağlamaktadır.

Benders prosedürünün çizgisindeki diğer algoritmalar Rosen ve Ornea [64] ve Rosen [65] algoritmalarıdır. Her iki algoritmada da, karmaşık değişkenleri sabitleyerek ve böylelikle problemi daha düşük bir boyutta ele alarak, ayrıştırma prensibini kullanır. İlgili değişkenler tarafından bağlanan alt problemlerle etkileşimli olarak çalışarak, kendilerini blok diagonal problemin dualine yönlendirir. Her iki yöntem de (ikincisi birincisinin doğrusal problemler için özelleştirilmiş halidir) karmaşık değişkenlerin değerlerini sabitleyip sadece alt problemlere ait çözüm değerlerini elde ederek problemi ayrıştırırlar.

1964'te Darnel Pigot özel yapılı doğrusal problemleri kendi primal ve dual yönlerinde ele almayı amaçlayan "çifte ayrıştırma yöntemi"ni yayımladı [66]. Daha sonra doğrusal programlama problemlerine ve konkav maksimuma çıkaran doğrusal olmayan problemlere genişletilen yöntem, bir kompleks primal, bir kompleks dual ve bir ortak alt problemle çalışmaktadır. Primal ve dual problemlerin simpleks çarpanları Danzig-Wolfe ayrıştırmasında olduğu gibi amaç fonksiyonunu tüm problemin etkisine taşıyan ortak alt problemi değiştirmek için kullanılmaktadır. Hesaplama sırasında keşfedilen belli başlı avantajlara göre, alt problemler birincil ya da ikincil kompleksi ya da her ikisini de geliştirmek için çözülebilirler. Yöntemin ilginç bir özelliği komplekslerin her ikisinin de çok işlemcili bir bilgisayarda eş zamanlı olarak işlenebilmesidir. Bu bağlamda, yöntem, Danzig-Wolfe ve Benders yaklaşımlarının birleşimidir. Alt sınır birincil kompleksten, üst sınır ise ikincil kompleksten gelmektedir (maksimuma doğru çıkan orijinal bir problemin varlığını varsayarak).

Nemhauser, dinamik programlama teknikleri kullanarak blok diyagonal doğrusal problemleri ayrıştırmak için 1964 yılında yeni bir yöntem geliştirmiştir [67]. Bu

yöntemde alt problemler ardışık dinamik programlama yoluyla çözülür. İşlem $j=1$ ($y_0=0$ olarak tanımlanır) kabul edilerek başlar ve daha sonra bağlayıcı kısıtların sağ tarafının y_1 (vektör) değişkeni olduğu parametrik bir probleme dönüşür. Bu dönüşüm sonrasında alt problem 2'nin bağlayıcı kısıtlarında ve amaç fonksiyonunda ortaya çıkarak alt problem 1 ile alt problem 2'yi birbirine bağlayan değişkeni hesap eder. İkinci alt problem sağ taraf vektörü y_2 'nin parametrize edilmesiyle çözülür ki bu durum zaten alt problem 3'de ortaya çıkacaktır. İşlem, en son alt problemin bağlayıcı kısıtlarının sağ tarafta olmasıyla ve asıl kaynak vektör b ile çözümü sonuçlanmaktadır. y_j değişkenleri daha sonra alt sisteme ilişkin kaynakların miktarını bulmak için kullanılır.

Bu çalışmada, Türkiye'deki enerji kaynaklarının optimal olarak dağıtımını ele alındığından ayrıştırma yöntemleri içerisinde kaynak kökenli ayrıştırma yöntemi kullanılmıştır. Sıradaki inceleme kaynak kökenli ayrıştırma algoritması üzerine yoğunlaşacaktır.

4.2. Kaynak Dağıtım Teorisi

Bu bölümde kaynakların optimal dağıtım teorisi konusundaki gelişmeler incelenecektir. Literatürde yapılmış çalışmalara bakıldığında, bu teori matematiksel programlama çerçevesinde sunulmasına rağmen çok fazla uygulama alanı bulamamıştır.

Birçok planlama, ekonomi ve mühendislik problemlerinde aşağıdaki kaynak dağıtım formu kullanılmaktadır.

$$Z_{\max} = \sum_{k=1}^K f_k(x_k)$$

kısıtla

$$\sum_{k=1}^K g_k(x_k) \leq b$$
(4.5)

Burada $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ ve x_k bir n_k -vektörü olarak ele alınmıştır. b ise pozitif sayılardan oluşan bir L -vektörünü ifade etmektedir. f_k ve g_k ise modeldeki teknolojik katsayıları ifade etmektedir. K alt sistemine dağıtımı yapılan b kaynağının bir payı olarak y_k kaynak vektörü tanımlandığında problem 4.5 aşağıdaki yapıya dönüşmektedir.

$$\begin{aligned}
 Z_{\max} &= \sum_{k=1}^K f_k(x_k) \\
 \text{kısıtla} & \\
 g_k(x_k) &\leq y_k \\
 \sum_{k=1}^K y_k &= b
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Bağlantı kısıtını içeren orijinal problem 4.5 bağlantı değişkeni ile problem 4.6'ya dönüşmüştür. Eğer y_k bağlantı değişkeni geçici olarak sabit bir sayı olarak düşünülürse, problem 4.6 K adet alt probleme ayrıştırılabilir. Bu durumda her alt sistem aşağıda görülen alt problem ile kendi çözümüne ulaşabilmektedir [68].

$$\begin{aligned}
 Z_{\max} &= f_k(x_k) \\
 \text{kısıtla} & \\
 g_k(x_k) &\leq y_k
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

4.3. Optimalite Koşulları

Problem 4.5'e Lagrange teoremi uygulandığında, eğer aşağıdaki şartlar sağlanırsa x^* ve μ^* vektörleri optimal olmaktadır. Burada μ^* problem 4.5 için ortak Lagrange çarpan vektörünü ifade etmektedir.

(M1) x^* problem 4.5'in yerel maksimum noktasını ifade eder ve aşağıdaki şekilde çözülebilir.

$$\begin{aligned}
Z_{\max} &= \sum_{k=1}^K f_k(x_k) - \mu^* \left[\sum_{k=1}^K g_k(x_k) - b \right] \\
Z_{\max} &= \sum_{k=1}^K [f_k(x_k) - \mu^* g_k(x_k)] + \mu^* b
\end{aligned} \tag{4.8}$$

(F1) Problem 4.5'in fizibilite şartı;

$$\sum_{k=1}^K g_k(x_k^*) \leq b \tag{4.9}$$

(C1) Problem 4.5 için tamamlayıcı gevşeklik;

$$\mu^* \left[\sum_{k=1}^K g_k(x_k^*) - b \right] = 0 \tag{4.10}$$

(N1) Problem 4.5'e ait olan Lagrange çarpanlarının negatif olmama şartı;

$$\mu^* \geq 0 \tag{4.11}$$

Aynı şekilde problem 4.6 için aşağıdaki şartların sağlandığı durumda x^* , y^* , u^* , λ^* vektörleri optimal olmaktadır. Burada u^* , λ^* sırasıyla g_k ve b -kısıtlarına ait ortak Lagrange çarpan vektörünü ifade etmektedir.

(M2) (x^*, y^*)

$$\begin{aligned}
Z_{\max} &= \sum_{k=1}^K f_k(x_k) - \sum_{k=1}^K u_k^* [g_k(x_k) - y_k] - \lambda^* \left[\sum_{k=1}^K y_k - b \right] \\
Z_{\max} &= \sum_{k=1}^K [f_k(x_k) - u_k^* g_k(x_k)] + \sum_{k=1}^K (u_k^* - \lambda^*) y_k + \lambda^* b
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Bir başka gösterim şekli ile x_k^* aşağıdaki gösterim ile de çözülebilir;

$$Z_{\max} = f_k(x_k) - u_k^* g_k(x_k) \quad (4.13)$$

Aynı şekilde y_k^* için;

$$Z_{\max} = (u_k^* - \lambda^*) y_k \quad (4.14)$$

(F2)

$$g_k(x_k^*) \leq y_k^* \text{ bütün } k\text{'lar için.} \quad (4.15)$$

$$\sum_{k=1}^K y_k^* = b \quad (4.16)$$

(C2)

$$u_k^* [g_k(x_k^*) - y_k^*] = 0 \text{ bütün } k\text{'lar için.} \quad (4.17)$$

(N2)

$$u_k^* \geq 0 \text{ bütün } k\text{'lar için.} \quad (4.18)$$

Problem 4.7 için aşağıdaki şartların sağlandığı durumda verilen y_k değeri için x_k^0 ve u_k^0 değerleri optimum olmaktadır [68].

(M3)

$$\begin{aligned} Z_{\max} &= f_k(x_k) - u_k^0 [g_k(x_k) - y_k] \\ Z_{\max} &= [f_k(x_k) - u_k^0 g_k(x_k)] + u_k^0 y_k \end{aligned} \quad (4.19)$$

(F3)

$$g_k(x_k^0) \leq y_k \quad (4.20)$$

(C3)

$$u_k^0 [g_k(x_k^0) - y_k] = 0 \quad (4.21)$$

(N3)

$$u_k^0 \geq 0 \quad (4.22)$$

4.4. Kaynakların Optimal Paylaşımı

Optimal kaynak teoremi sunulmadan önce aşağıdaki tanımlamaların yapılması gerekmektedir.

Tanım 1: Eğer problem 4.7'de sunulan alt problemlere dağıtılan kaynakların toplamı orijinal probleme atanmış b değerine eşit ise, y_k dağıtımı yapılmış kaynakların toplamı ve y^0 her bir alt probleme bu kaynaklardan düşen pay olarak ele alınır.

Tanım 2: Eğer x_k çözümleri problem 4.7'den elde edilmiş ise bu çözümler orijinal problemin de optimal sonuçlarını vermektedir.

Optimal Kaynak Teoremi: Problem 4.7'ye ait dual çözümlerinin vektörleri ayrı ayrı dual çözümlere eşit ise, $y^0 = (y_1^0, y_2^0, \dots, y_k^0)$ yerel optimum paya eşit olmaktadır.

Yani;

$$u_1^0 = u_2^0 = \dots = u_k^0 \Rightarrow y^0 = (y_1^0, y_2^0, \dots, y_k^0) = y^* \quad (4.23)$$

olmaktadır.

İSPAT

Bir önceki bölümdeki koşulları ve Tanım 1'i hesaba katarsak aşağıdaki ifadeler şunu belirtir:

$$(M): \quad (M3) \text{ için } k = 1, \dots, K, \text{ ve } u^{\circ}_1 = u^{\circ}_2 = \dots = u^{\circ}_k \Rightarrow (M2) \Leftrightarrow (M1) \quad (4.24)$$

$$(F): \quad (F3) \text{ için } k = 1, \dots, K \Rightarrow (F2) \Leftrightarrow (F1) \quad (4.25)$$

$$(C): \quad (C3) \text{ için } k = 1, \dots, K \Rightarrow (C2) \Leftrightarrow (C1) \quad (4.26)$$

$$(N): \quad (N3) \text{ için } k = 1, \dots, K \Rightarrow (N2) \Leftrightarrow (N1) \quad (4.27)$$

(M), (F), (C), ve (N) açıkça belirtmektedir ki eğer dual değişken olan $\delta = u^{\circ}_k (y^{\circ}_k) -$ her k için- ise o zaman $y^0 = (y^0_1, y^0_2, \dots, y^0_k) = y^*$ 'dir.

Global Optimalite (T1 Teoreminin neticesi): $k = 1, \dots, K$ ve $u^{\circ}_1 = u^{\circ}_2 = \dots = u^{\circ}_k$ denklemleri için 4.7'nin değeri içbükey programlama problemleriyse o zaman $y^{\circ} = (y^{\circ}_1, y^{\circ}_2, \dots, y^{\circ}_k)$ b'nin küresel bir optimal paylaşımıdır. (Bu kanıt Lagrange teoreminin bu tür bir probleme uygulanması sonucu elde edilmiştir.)

Eğer problem 4.7 sabit ise o zaman y_k 'nın tüm uygun değerleri için (M3), (F3), (C3), (N3) değerlerini tatmin eden en az bir adet u°_k vektörü bulunur.

Dual Çözümler (T1 Teoreminin neticesi): Problem 4.5'in dual çözüm vektörü $\mu^* = u^{\circ}_1 = u^{\circ}_2 = \dots = u^{\circ}_k$ vektörüdür. (T1 teoremiyle kanıtlandığı üzere (N), (C), (F), (M) içerisindeki (N1), (C1), (F1), (M1) ifadeleri boyunca desteklenmektedir.)

Optimal Paylaşırma için Gerekli Kriter (T1 Teoreminin neticesi): $k = 1, \dots, K$ için alt problem 4.7 sabit ise o zaman kaynakların her bir optimal payı tüm alt problemler

için ortak en az bir çarpan vektörüne sahip olmalıdır. Optimal bir paylaşım her zaman vardır.

4.5. Optimal Kaynak Dağıtım Prensibi

Optimal kaynak teoremi matematiksel olarak çok geneldir. Optimal kaynak teoremi, türevlenebilir ve türevlenebilir olmayan fonksiyonlar dâhil olmak üzere içbükey olan ve olmayan problemler üzerinde uygulanabilir. Bu teoremde sürekliliğe gerek duyulmamaktadır, çünkü optimal kaynak teoremi, genel problemler için kesikli ve aynı zamanda sürekli değişkenler içeren yeterli bir optimalite durumundan bahsetmektedir.

Lagrange çarpanlarının amaç işlevi üzerinde “marjinal etki”; söz konusu kaynakların üzerinde “marjinal artış” ölçü birimleri olarak kullanılmasının aşağıdaki (genel) tanımlamada verilmiştir.

En İyi Şekilde Kaynak Tahsisi Prensibi

“Eğer her bir kaynağın her bir alt sistem üzerindeki marjinal etkisi aynı ise o zaman tüm sistem kaynakları optimal bir şekilde tahsis edilir.”

Yukarıda verilen prensip bazı ekonomistler tarafından öne sürülmüş bir fikrin formüle edilmiş halidir ve bu prensip aynı zamanda bazı ayrıştırma yöntemlerinde ima edilmiştir. Prensip, matematiksel programlama problemi çatısı altında geliştirilen optimal kaynak teoreminin simülasyon ya da dinamik programlama da dahil olmak üzere daha geniş çapta matematiksel modeller üzerinde uygulanmasına izin verir. Prensip aynı zamanda matematiksel olarak formüle edilmemiş karar verme modellerinde de optimalite düzeyini ayarlama gerekliliği ve kullanışlı çözümler önerir [68].

Sıradaki bölümde yukarıda verilen kavramları daha somut terimlerle anlatmak için küçük boyutlu bir sayısal problem EK-1’de verilmiştir.

4.6. Enerji Sistemlerinin Ayrıştırılması

Farz edelim ki, son enerji talep eden n adet sektör olsun ve bu sektörlerin talebini D_j olarak kabul edelim. Bu talep miktarı her bir sektör için iletilen birim enerji maliyetine bağlı olmaktadır. Aynı şekilde m adet birincil enerji kaynağı ve bu kaynakların arz miktarları da R_i olarak belirlensin. Birincil enerji kaynaklarından farklı sektörlerle yapılan bir birimlik enerji taşıma maliyeti de c_{ij} olarak kabul edilsin. Yukarıdaki varsayımlara göre iteratif denge prosesinin matematiksel gösterimi şu şekildedir:

$$v^* = \max \sum_{j=1}^n \int_0^{D_j} p_j^d(\xi_j) d\xi_j - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} - \sum_{i=1}^m \int_0^{R_i} p_i^r(\mu_i) d\mu_i \quad (4.28)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - R_i = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (4.29)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} - D_j = 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (4.30)$$

$$R_i \geq 0, D_j \geq 0, x_{ij} \geq 0 \quad (4.31)$$

Yukarıdaki modelin optimalite analizi iki farklı yol ile yapılabilmektedir. Bunlardan

birincisi talep sektörlerine ait olan $\int_0^{D_j} p_j^d(\xi_j) d\xi_j$ artık terim ve kaynak grubuna ait

olan $\int_0^{R_i} p_i^r(\mu_i) d\mu_i$ artık terimlerinin türevinin alınmasıdır. Çalışmada enerji sektörü

bir bütün olarak ele alındığı için bu yöntem modeli çok karmaşık hale getirmektedir.

Dolayısı ile bu çalışmada optimalite analizi için Kuhn-Tucker şartları göz önüne alınmıştır. Bu amaçla kaynak vektörüne ait dual değişken olarak π_i ve sektörlerin talep vektörüne ait dual değişken olarak σ_j belirlenmiştir. Çözümün optimal ve mümkün olabilmesi için aşağıdaki şartların gerçekleşmesi gerekmektedir.

$$p_j^d(d_j) - \sigma_j \leq 0 \text{ ve } (p_j^d(d_j) - \sigma_j)d_j = 0 \quad (4.32)$$

$$-p_i^s(s_i) + \pi_i \leq 0 \text{ ve } (-p_i^s(s_i) + \pi_i)s_i = 0 \quad (4.33)$$

$$c_{ij} + \pi_i - \sigma_j \geq 0 \text{ ve } (c_{ij} + \pi_i - \sigma_j)x_{ij} = 0 \quad (4.34)$$

i enerji kaynaklarından j talep sektörlerine pozitif enerji akışının var olduğu kabul edildiğinde yukarıdaki şartlardan şu sonuç çıkarılabilir.

$$p_i^s(s_i) + c_{ij} = p_j^d(d_j) \quad (4.35)$$

Şöyle ki, her bir sektöre gönderilmiş enerjinin marjinal fiyatı birincil enerji kaynaklarının marjinal fiyatına eşit olduğundan iteratif denge oluşmaktadır. Optimalite için gerekli şartlar ise aşağıda verilmiştir.

$$\frac{dp_j^d(\cdot)}{dd_j} \geq 0 \text{ ve } \frac{dp_i^s(\cdot)}{ds_i} \leq 0 \quad (4.36)$$

Yukarıdaki şartlar sağlandığında problem 4.28 konkav maksimizasyon problemi olmaktadır. Elde edilen denge modeli oldukça basit olmasına rağmen bütün enerji sistemini ifade etmekte yetersiz kalmaktadır. Ancak marjinal fiyat fonksiyonu olan $p_j^d(\cdot)$ ve $p_i^s(\cdot)$ göz önünde bulundurulduğu sürece modele eklenebilecek diğer kısıtlar ve bunlara bağlı olan emisyon kontrol standartları model tarafından belirlenebilecektir.

Kaynak kökenli ayrıştırma yaklaşımı ile yukarıda verilen modele ait kaynak kökenli ana problem (RDMP) şu şekilde yazılabilir.

$$z^K = \max \sum_{j=1}^n v_j^d - \sum_{i=1}^m v_i^s - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (4.37)$$

s.t.

$$v_j^d \leq F_j^d(d_j^k) + p_j^d(d_j^k)(d_j - d_j^k) \quad F^d(d_j^k) = \int_0^{d_j^k} p_j^d(\xi_j) d\xi_j \quad (4.38)$$

$$v_i^s \geq F_i^s(s_i^k) + p_i^s(s_i^k)(s_i - s_i^k) \quad F^s(s_i^k) = \int_0^{s_i^k} p_i^s(\mu_i) d\mu_i \quad (4.39)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - s_i = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (4.40)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} - d_j = 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (4.41)$$

$$s_i \geq 0, d_j \geq 0, x_{ij} \geq 0 \quad (4.42)$$

Modeldeki d_j^k , s_i^k ve x_{ij} değerleri RDMP tarafından üretilen talep, kaynak ve enerji akış değerlerini ifade etmektedir. Modele ait kaynak ve talep alt problemleri ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

Kaynak kökenli Tedarik Alt Problemi:

$$\sigma_i^{s,k} = F_i^s(s_i^{k+1}) = \int_0^{s_i^{k+1}} p_i^s(\mu_j) d\mu_j \quad (4.43)$$

Kaynak kökenli Talep Alt Problemi:

$$\sigma_j^{d,k} = F_j^d(d_j^{k+1}) = \int_0^{d_j^{k+1}} p_j^d(\xi_j) d\xi_j \quad (4.44)$$

Yukarıdaki temel model genişletilip EFOM-ENV modeline benzer şekilde uygulanabilir. Çalışmada ele alınan EFOM-ENV modeli sanayi, ulaştırma, tarım ve konut sektörlerine ait talep vektörü, birincil enerji kaynaklarına ait kaynak vektörü, dönüşüm sistemleri ve bunlara ait sabit ve değişken maliyetler ve çevresel parametrelere ait kısıtlar ile genişletilmiştir. Ayrıca modele zaman boyutu da

eklenmiş ve gelecek dönemlere ait tahmin değerleri de hesaplanmıştır. EFOM-ENV modelinin kaynak kökenli ayrıştırma yöntemi ile ayrıştırılması amacı için aşağıdaki algoritma önerilmiştir.

4.6.1. Kaynak kökenli ayrıştırma algoritması

Çalışmada kullanılan kaynak kökenli ayrıştırma algoritması aşağıda verilmiştir. Algoritmanın çalışabilmesi için ilk adımda her alt probleme ait en az bir mümkün çözümün gerçekleşmesi gerekmektedir. Kaynak kökenli ayrıştırma yönteminde bu özellik başlangıç şartı olarak adlandırılmaktadır.

Adım 1. Mümkün paylaşım vektörü olan $y^0 = y_1^0, y_2^0, \dots, y_k^0$ ve $\sum_1^K y_k = b$ ile çözüme

başla. (Tüm alt problemler mümkün çözüme sahip)

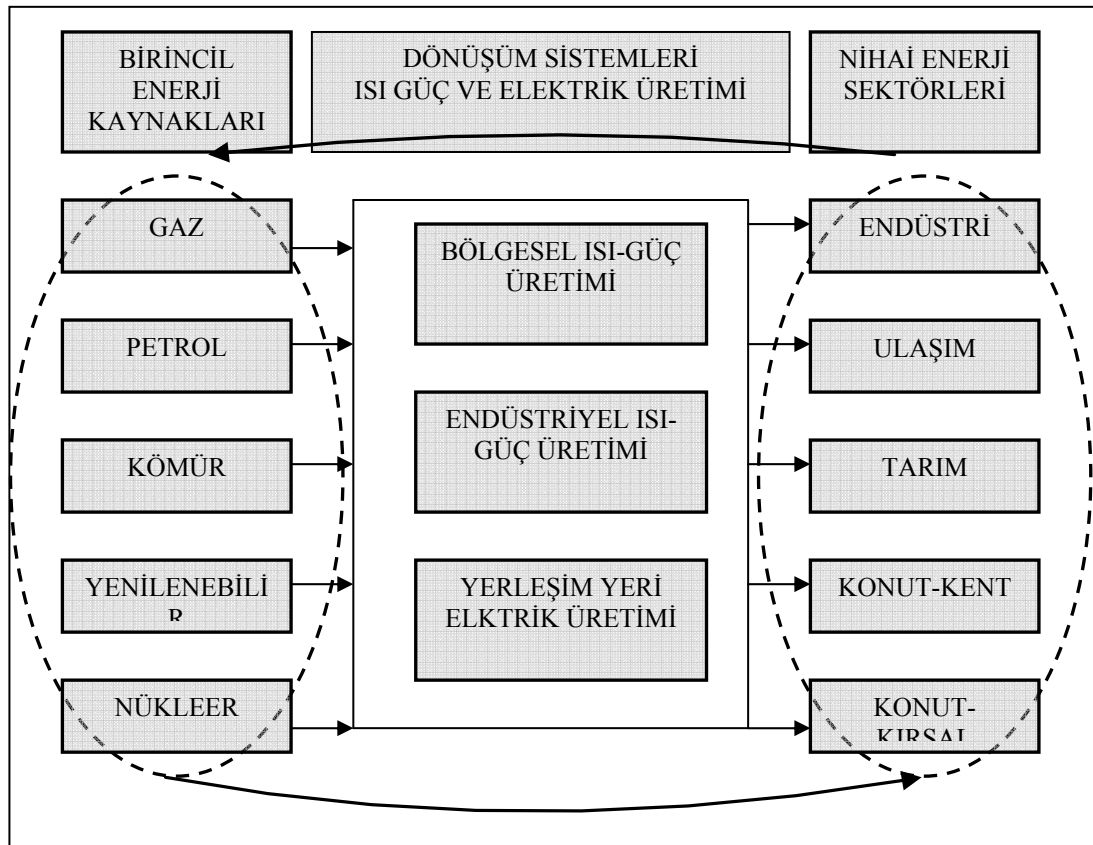
Adım 2. Tüm kaynaklar ile ilişkili dual çözümleri elde ederek her bir alt problemi mevcut paylaşıma göre çöz. İlk iterasyondan sonra eğer herhangi bir alt problem mümkün olmayan çözüme sahip ise 1. adımdaki kaynak paylaşım vektörünü güncelle. Eğer herhangi bir alt problem sınırlandırılmamış ise orijinal problemin çözümü yoktur.

Adım 3. Eğer en az bir dual çözüm tüm alt problemlerde ortak olarak sağlanıyorsa optimal paylaşım bulunmuştur. 2. adımdaki primal çözüm orijinal problemin çözümünü vermektedir. Eğer ortak bir dual çözüm yok ise 4. adıma git.

Adım 4. Dual çözümlerin yönlerini dikkate alarak mevcut paylaşımı güncelle ve alt problemlere dağıtılan kaynakları tekrar dağıt ve 2. adıma git.

5. ENERJİ AKIŞ OPTİMİZASYON MODELİ (EFOM)

EFOM-GAMS modeli de tıpkı EFOM-Fortran versiyonu gibi bir doğrusal optimizasyon modeli olup tüm enerji sektörü bir şebeke ilişkisi içerisinde yapılandırılmaktadır. EFOM-GAMS tüm teknoloji ve proseslerin (enerji dönüşüm, taşıma ve iletim) şebekenin düğümlerinde temsil edildiği ve linklerin sadece ilişkileri belirttiği bir şebeke yapısı ortaya koyarken, EFOM-Fortran modelinde ise bu özellik tam tersinedir. Yani linkler bazında sistemin tüm fonksiyonel özellikleri ortaya koyulurken düğümler sırasal ilişkileri belirlemektedir [69]. EFOM-GAMS modelinin modüler yapısı şekil 5.1’de görülmektedir.



Şekil 5.1. EFOM-GAMS modelinin modüler yapısı

Tüm veriler 5-seviyeli anahtar sözcük diziliminde sunulur. Bunlar ülke, sektör, alt sektör, proses ve yakıttır. EFOM-GAMS bu şebekede tüm enerji zinciri birincil enerji olarak arz sektöründen başlayıp ara sektörlerden geçmekte ve talep sektöründe

(nihai enerji) sona ermektedir Model her bir alternatif enerji çevrim teknolojisi setinin içerdiği modüler ya da alt programlar biçiminde organize edilir. Modelde teknolojiler, çevrim verimlilikleri, kurulu kapasiteleri, yatırım maliyetleri v.b. gibi kapasite ve maliyet parametreleri yanı sıra enerji üretim ve dönüşümüne yönelik olarak da her bir spesifik kaynağa dayalı emisyon parametreleri ile temsil edilmektedir. Modelin amaç fonksiyonu çalışma periyodu içerisindeki birikimli yıllık maliyetlerin net bugünkü değer üzerinden minimizasyonu biçimindedir. Bununla birlikte modelde diğer amaç fonksiyonları da tanımlanabilir. Modelin uygulanması sonucu edinilen çıktı, önceden tanımlanmış bir kalkınma hedefi doğrultusunda belirlenmiş ve modele dışarıdan girilen talebi karşılayacak olan optimum kaynak ve teknoloji karışımıdır. Model genel olarak tüm enerji sektörünü modelleyebildiği gibi belirgin bir alt sektörün, örneğin merkezi elektrik ya da güç sektörünün de bireysel modellemesinde kullanımı gibi esnekliğe sahiptir.

EFOM-ENV/GAMS kendi içinde yapısal olarak enerji proseslerini hiyerarşik bir yapı ile organize eder. Sonuç olarak açık yapıli enerji sistemlerini ilişkilendirerek aynı tip enerji proseslerini birlikte gruplandırır.

Enerji sistemi akımlar ve ara üreticiler tarafından EFOM-ENV/GAMS içinde modellenir. Akımlar; kaynak, ara ve son talep akımları olmak üzere üç gruba ayrılır [70]:

1. Enerji sistemine giren tüm akımlar kaynak akımlardır. Bu akımlar ya ithal ya da ihraç enerji taşıyıcılarını gösterir. Rüzgâr, güneş, hidro enerji veya yenilenebilir enerji de kaynak akımları olarak tanımlanır.
2. İkinci grup ara akımları çağrıştıran üreticiler arasındaki dağıtımlardan oluşur.
3. Talep kategorileri için üreticilerden gelen akımlar son akımlardır. Bu akımlar; elektrik, buhar, ısı veya ulaşım sektöründe yolcu kilometreleri vb. olabilir. Tüm talep akımları dışsal değişkenlerdir.

5.1. Modele Ait Genel Özellikler, Girdi ve Raporlama Özellikleri

5.1.1. Genel özellikler

EFOM-ENV/GAMS ana bilgisayarlar (IBM, CDC, VAX, v.b), iş istasyonları (SUN) ve kişisel bilgisayarlar üzerinde uygulanabilir ve UNIX ve MS-DOS işletim sistemleri ile uyumludur. Büyük çaplı modeller için yüksek hızlı mikro işlemciler ve matematiksel yardımcı işlemci ile donatılmış PC'lerin kullanılması önemlidir. EFOM-ENV/GAMS modelinin kapsamı bilgisayarın kapasitesi ile sınırlıdır. EFOM-ENV/GAMS'in ne kadar çalışma alanına ihtiyaç duyacağı, bütünleşiklik seviyesine, optimizasyon modelinin spesifikasyonuna (örn: azaltmalı veya azaltmasız), ülkeye ve periyot sayısına bağlıdır. Çizelge 5.1 bir EFOM-ENV/GAMS modelinin büyüklüğünün genel izlenimini vermektedir.

Çizelge 5. 1. Model Karakteristikleri

	<u>MODEL I</u>	<u>MODEL II</u>
Satır sayısı	2 339	4 134
Sütun sayısı	3 012	5 190
Sıfır olmayan eleman sayısı	12 258	20 000
Derleme zamanı (sn.)	11,22	11,25
Üretim zamanı (sn.)	17,92	31,93
Yerine getirme zamanı (sn.)	49,02	63,00
İterasyon sayısı	3 718	6 772
İhtiyaç duyulan çalışma alanı (Mb.)	2,80	6,67

5.1.2. Girdi özellikleri

EFOM-ENV/GAMS'te verinin çeşidine bağlı olarak verinin girişinde birçok farklı yol vardır. Girdi verileri EFOM-ENV/GAMS'te iki gruba ayrılabilir:

- Enerji dönüşüm proseslerinin ve azaltım teknolojilerin karakteristikleri

- Model yapısının ve pazar dağıtım ve kapasite kısıtları gibi senaryo ilişkili verilerin tanımlaması

EFOM-ENV/GAMS kullanıcısı birinci grup verileri DBASE IV'ün yardımıyla girebilir. Enerji dönüşüm prosesleri DBASE IV proses veri tabanında tanımlanmıştır. Onların karakteristikleri, girdi ve çıktı enerji taşıyıcısı, verimlilik, bulunabilirlik, yaşam ömrü, maliyetler ve emisyonlardır. Ayrıca sektörler, üreticiler, birimler ve prosesler arasındaki ilişkiler bu proses veri tabanında yer alır. Proses veri tabanı bir program yardımıyla DBASE IV'ten bir GAMS dosyasına dönüştürülür. Azaltım teknolojileri, azaltım veri tabanında tanımlanırlar. Karakteristikleri verimlilik, bulunabilirlik, maliyetler ve emisyon azaltımıdır. Bu veri tabanında ayrıca hangi enerji dönüşüm prosesleri için azaltımların kullanılacağı belirlenir. Yine, bir dönüşüm programı, veri tabanının GAMS dosyasını oluşturur.

İkinci grup veriler bir kelime işlemci kullanılarak tablolar halinde tanımlanırlar. Model yapısı üreticilerden üreticilere enerji akımları sayesinde belirlenir. Bu enerji akımları üç tabloda tanımlanabilir. Bunlar; RESOURCE, INTERMED ve DEMAND tablolarıdır ve sırasıyla kaynak, ara ve son taleplerdir. Ayrıca akım maliyetleri ve sınırları gibi akım ile ilgili veriler bu tablolarda yer alır.

Senaryo ilişkili veriler de yine tablolar halinde tanımlanırlar. Her tür veri için özel tablolar vardır. Örneğin; kapasite kısıtları için kapasite tabloları ve pazar dağıtımları için pazar dağıtım tabloları vardır.

5.1.3. Raporlama özellikleri

GAMS her zaman, bir optimizasyon koşturmasından sonra standart olarak sonuç listelemesi üretir. Bu, satır satır ve sütun sütun bir listelemedir. Böylece tüm eşitlikler ve değişkenler listelenir. Bu sonuç listesi çok kapsamlı ve dolayısıyla sonuçların hızlı bir değerlendirmesi için uygun değildir. Bu yüzden EFOM-ENV/GAMS bütünleşik sonuçlarla tablolar üretir. Bu tablolar aşağıda gösterilmiştir.

1. Her periyot için birincil enerji tablosu.
2. Sanayi, konut/hizmet ve taşıma sektörü için her periyottaki son enerji tabloları.
3. Her periyottaki her bir enerji taşıyıcısına düşen üretilen elektrik.
4. Her periyottaki her bir sektöre düşen yatırım maliyetleri.
5. Her periyottaki her bir sektöre düşen CO₂, SO₂ ve NO_x emisyonları.
6. Her periyottaki her bir proses için proses seviyesi, kapasite (eğer proses için yatırım maliyetleri ve/veya sabit maliyetler tanımlanmışsa), artık kapasite ve kullanım faktörü
7. Kaynak, ara seviye ve son talep akımları.

Eğer çözüm optimal değilse, GAMS tarafından üretilen sonuç listesi darboğazların bulunmasında kullanılabilir. Model çözümsüz çıktığında, çözümsüz eşitlik veya değişken INFES ile işaretlenir. Kaynak veya iterasyon limitlerine bağlı olarak daha erken bir safhada koşturma başarısız olursa, sonuç optimal olmayacaktır. Böyle bir durumda bazı değişkenler NOPT olarak işaretlenir. Eğer bir değişken limitsiz ise, UNBND ile işaretlenir.

Model istatistikleri ve çözüm özeti GAMS tarafından üretilir. Bunlar uygulama ve çözüm prosesleri hakkında genel bilgiler verirler. Model istatistikleri, uygulama zamanı, üretim zamanı, değişken sayısı, eşitlik sayısı ve “0” olmayan eleman sayısıdır. Çözüm özetinin önemli elementleri ise, koşturmanın durumu (örn; optimal, optimal değil, mümkün değil, sınırsız), iterasyon sayısı ve bilgisayarın ihtiyaç duyduğu çalışma alanıdır.

5.2. EFOM-GAMS ile Enerji Sisteminin Modellenmesi

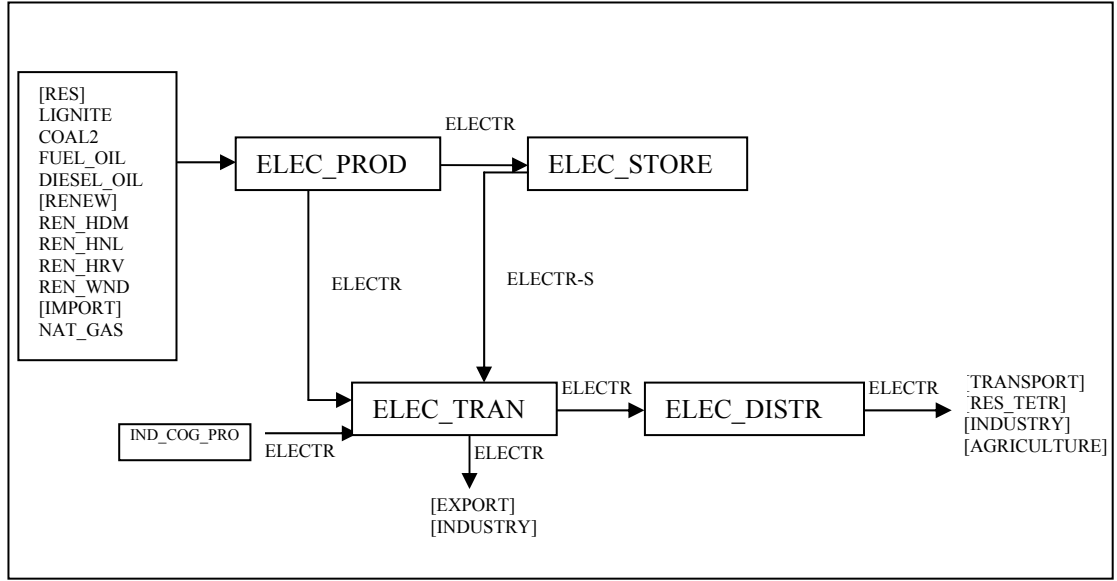
Ulusal enerji sistemi temel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar birincil enerji arz sektörü (kömür, petrol, gaz, yeni ve yenilenebilir ve nükleer), ikincil enerji ya da dönüşüm sektörü (merkezi elektrik) ve nihai enerji kullanıcı sektörü (endüstri, taşıma, tarım, konut-kırsal ve konut-kent) olarak sınıflandırılır. Bu sistemde hesaplamalar dışarıdan girilen talep değerlerine dayalı olarak birincil enerjiler

tarafına geriye yönelik hesaplamalarla enerji akım değerlerinin bulunması ve bu kez akım değerlerine bağlı olarak da ileri yönde kapasite hesaplamaları biçiminde oluşmaktadır [71].

5.2.1. Merkezi elektrik üretim sektörü

İkincil enerji formu olan elektriği üreten bu sektör enerji sistemi içinde modelleme açısından en önemli sektör konumundadır. Elektriğin çok büyük bir kısmı bu sektör tarafında üretilmektedir. Üretimi için ihtiyaç duyulan birincil enerji biçimleri açısından oldukça esnek imkânlar sunarken çevre dostu yeni ve yenilenebilir enerji biçimlerinin doğrudan dönüştürülebileceği bir enerji kaynağıdır. Bu girdilerdeki esnekliği teknolojilere de yansımaktadır. Nihai kullanım biçimi olarak ta oldukça geniş bir alana sahiptir. Yalnız, şu anki teknolojik durumda üretildiği anda da tüketilmesi gereken kaynaktır. Türkiye merkezi elektrik üretim sektörü şekil 5.2’de verilmektedir.

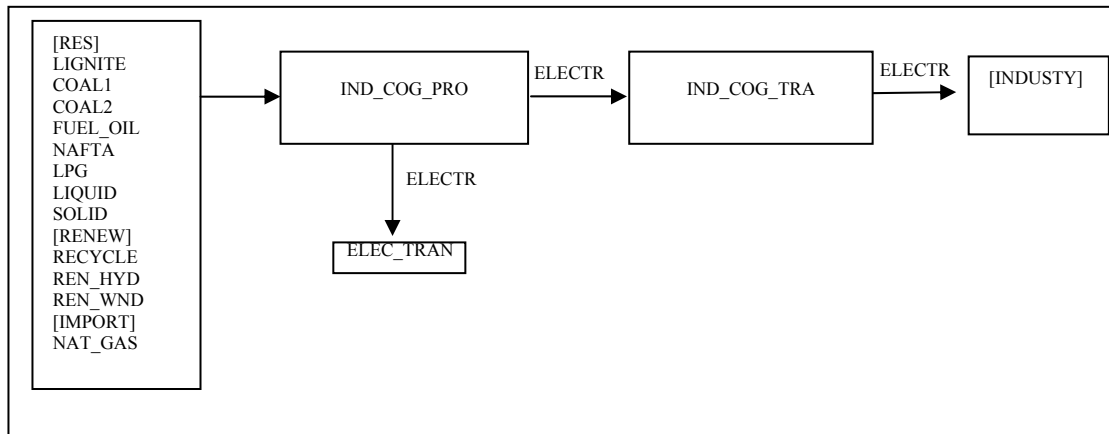
Merkezi elektrik sektörü enerji girdileri RESource kaynak kategorisinden lignite, coal2, fuel_oil ve diesel_oil, RENewable ile gösterilen yenilenebilir enerji kaynaklarının gruplandırıldığı kaynak kategorisinden büyük barajlar Ren_hdm, doğal göl santralleri Ren_hnl ve akarsu santralleri Ren_hrv ile modellenmektedir. Diğer yenilenebilir enerji girdileri olan rüzgâr için Ren_wnd ve jeotermal için ise Steam ile verilmektedir. Ayrıca ithal edilen Doğalgaz da IMPORT kaynak kategorisinde Nat_gas olarak belirtilmiştir. ELEC_PROD ile üretici teknolojiler modellenirken ELEC_STORE ile elektriğin depolanmasına imkân verecek olan geleceğe yönelik teknolojiyi sunmaktadır. ELEC_TRAN ile elektriğin kaynaktan ana kullanım alanlarına ve büyük kullanıcı endüstriye taşınması, ELEC_DISTR ile elektriğin küçük ölçekli sanayi ve konutlara iletimi modellenmektedir. İthal elektrik ulusal sisteme IMPORT ile diğer ülkelerden ithal edilen kaynağı göstermektedir.



Şekil 5.2. EFOM-ENV/GAMS Ağı: Türkiye'nin Merkezi Elektrik Sektörü

5.2.2. Endüstriyel otoprodüktör elektrik üretim sektörü

Türkiye ikincil enerji üretim sektöründe merkezi elektrikten sonra gelen bir diğer elektrik üretim sektörü de endüstriyel oto-prodükörler gelmektedir (Şekil 5.3). Bu sektörde endüstrinin ihtiyaç duyduğu elektrik kaynağını kendi kendine üretmesi modellenmektedir. Üretilen fazla elektrik merkezi sisteme de sunulabilmektedir. Sektöre birincil enerji kaynakları RESource kaynak kategorisinden lignite, coal, fuel_oil, naphta ve LPG olabildiği gibi, RENEWable kaynak kategorisinde yenilenebilir atıklar için Recycle, hidroelektrik santralleri için Ren_hyd ve rüzgar santralleri için Ren_wnd olabilmektedir. Ayrıca ithal edilen Doğalgaz da IMPORT kaynak kategorisindeki Nat_gas ile modellenmiştir.



Şekil 5. 3. EFOM-ENV/GAMS Ağ: Türkiye Endüstriyel Otoprodüktörler Sektörü

5.2.3. Verilerin girilmesi

Enerji sisteminin optimizasyonu EFOM-GAMS(Söz konusu model tüm Avrupa Topluluğu ve bazı Avrupa Topluluğuna girmeye aday ülkelerde sorumlu enstitülerce yürütülmüştür.) isimli paket program ile yürütülmüştür. Öncelikle ulusal ikincil enerji sisteminin mevcut teknolojik, ekonomik ve akım açısından analizi yapıp, modelin sistemi tam olarak yansıtması yani gerçek verilerle sistemin aynen ve model halinde temsil etmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Bu adaptasyon süreci sistemin geleceği gerçekçi biçimde gösterebilmesi açısından oldukça önem taşımaktadır.

EFOM-ENV/GAMS'te modelin oluşturulması aşamasında 5 farklı dosya yaratılmaktadır. Bu dosyalar sırasıyla, STRUCTUR.INC, CATEGORY.INC, INOUT.INC, SCENARIO.INC, EN_FLOW.INC'dir.

STRUCTUR.INC'de sektörler, üreticiler, birimler ve prosesler tanımlanırlar. Ayrıca bunlar arasındaki hiyerarşik yapı ve enerji taşıyıcıları ile bunlar arasındaki ilişkiler de bu dosya içerisinde belirtilir. Yani modeldeki tüm tanımlamalar, yapılar ve ilişkiler bu dosyada açıklanırlar.

CATEGORY.INC'de kullanıcı, zaman periyotları, kaynak ve talep kategorileri depo üreticileri, mevsimsel enerji taşıyıcıları ve üretim/talep sektörleri gibi raporda

görülmesi istenen veriler girilir. Amaç bilgileri kategorize ederek istenen rapor çıktılarının alınmasıdır.

INOUT.INC'de tüm prosesler ve bu proseslere ait -girdi/çıkıtı enerji taşıyıcıları, bu taşıyıcıların payları, değişken ve sabit maliyetler, yatırım maliyeti ve verimlilik gibi-teknolojik parametreler bulunur.

SCENARIO.INC'de kapasiteler ve proses kısıtları tanımlanırlar. Birimlerin her periyottaki alt ve üst kapasite limitleri, proseslere veya birimlere ait enerji taşıyıcılarının oran limitleri, azaltım teknolojileri ile ilgili veriler bu dosyaya girilir.

EN_FLOW.INC'de akımlar RESOURCE, INTERMED ve DEMAND olmak üzere üç tabloda tanımlanırlar. RESOURCE tablosunda sisteme giren tüm enerji akımları min/max akım, değişken maliyet, satın alma fiyatı gibi karakteristikleri ile birlikte verilir. INTERMED tablosunda üreticiler arasındaki tüm enerji akımları min/max akım, değişken maliyet, verimlilik gibi karakteristikleri ile birlikte verilir. DEMAND tablosunda üreticilerden talep kategorilerine olan tüm enerji akımları talebin min. ve beklenen seviyesi, değişken maliyet, enerji taşıyıcısının satış fiyatı ve verimlilik gibi karakteristikleri ile birlikte verilir.

Modelin çalıştırılması esnasında bu beş dosya ve Efom_env.gms aynı dizinin içerisinde yer alması gerekir. Model çalıştırdıktan sonra sonuca bağlı olarak GAMS üç dosya üretir. Bunlardan EFOM_ENV.LST çalıştırma esnasında bir hata oluştuysa, oluşan bu hataların nerede oluştuklarını ve hata kodlarını **** ile belirtir. Eğer optimizasyon başarılı ve sonuç optimal ise EFOM_ENV.LST'deki "Solution Report" başlığı altında OPTIMAL olarak görülür. Eğer optimizasyon mümkün çözüme sahip değil ise, MESSAGE.LST dosyasından hatalar görülebilir. Model durumu optimal olarak elde edilmişse RESULT.LST dosyasındaki sonuçlar geçerlidir. Daha detaylı veri görmek istendiğinde EFOM_ENV.LST'de tüm değişkenlere erişilebilir.

5.3. Matematiksel Model

5.3.1. Denge denklemleri

Enerji sistemine; giren enerji = tüketilen enerji + sistem içindeki enerji kayıplarıdır. Bu denge denklemi şebeke modelinin düğümleri olarak hesaplanıp üretici düzeylerinde tanımlanır.

Genel Denge Denklemi

Her bir “n” üretici ve “e” enerji taşıyıcısının genel denge denklemi kombinasyonu için optimum zaman uzayı, her “t” periyodunda oluşturulur. Böylece giren enerji akımları toplamı dönüşüm kayıpları hariç çıkan enerji akımları toplamına eşittir.

Üreticiye giren akımlar; ithal edilmiş enerji, kaynaklar veya diğer üreticilerden gelen ara dağıtımlardır. Bir üreticiden çıkan enerji akımları; diğer üreticiler için ara dağıtımlar veya iletim kayıplarının hesaplanmasını içine alan talep kategorileridir. Üreticinin enerji kayıpları, enerji proseslerinin etkinliği aracılığıyla hesaplanır.

Genel denge denklemi (n, e, t):

$$\sum_i R_{e,i,n,t} + \sum_{n'} I_{e,n',n,t} + \sum_{pen} (P_{p,t} * Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n',n,t} + \sum_d D_{e,n,d,t} \quad (5.1)$$

$R_{e,i,n,t}$: t periyodunda n üreticisi için e enerji taşıyıcısının i kaynak/ithal kategorisi (PJ/yıl)

$I_{e,n',n,t}$: t periyodunda n' üreticisinden n, e enerji taşıyıcısının ara dağıtımı (PJ/yıl)

$P_{p,t}$: t periyodunda p prosesinin proses düzeyi (PJ/yıl)

$Y_{e,p}$: t periyodunda p prosesi içinde e enerji taşıyıcısının verimliliği

$Y_{e,p} = -1/\text{verim}$ (eğer e sadece p'nin girdisiyse)

$Y_{e,p} = 1$ (eğer e sadece p'nin çıktısıysa)

$D_{e,n,d,t}$: t periyodunda d talep kategorisi için n üreticisinden e enerji taşıyıcısının son talebi (PJ/yıl)

5.3.2. Kapasite denklemleri

Her periyotta inşa edilecek ek kapasiteler ve gerekli kurulu kapasiteler, kapasite denklemleri tarafından belirlenir. Kapasiteler yatırım maliyetleri veya sabit maliyetleri verilen her birim için belirlenir.

Enerji sisteminin dinamik karakterinde transfer kapasitesi bir periyottan diğerine, transfer kapasitesi denklemi ile elde edilir. Bir birimin kapasitesi 2 bölümden oluşur. Birinci bölüm; planlama periyoduna başlamadan önceki mevcut kapasitedir. İkinci bölüm; t periyodu içinde veya önceki periyotlarda yatırımları tamamlanmış kapasitelerdir. Model için aşağıdaki varsayımlar yapılır:

- Yeni kapasite yatırımda periyodun başlangıcı alınır. Yatırım PJ/Y veya MW birimi cinsinden alınır.
- Kapasite maksimum düzeyde doğrudan kullanılabilir.
- Eğer santralin ekonomik ömrü periyodun ortasında sona ererse kapasite tüm periyoda dağılır.

Transfer kapasite denklemi (u, t):

$$CAPAC_{u,t} = RESC_{u,t} + \sum_{b<t} \text{Min}(R1_{u,b,t} / Year_t, 1) * BUI_{u,b} \quad (5.2)$$

$RI_{u,b,t}$: b periyodu içinde (hala t periyodu içinde kalır) yapılan $CAPAC_u$ süresince yılların sayısı

$Year_t$: t periyodu yıllarının sayısı

$BUI_{u,b}$: b periyodu içinde kurulan u biriminin kapasitesi

$RESC_{u,t}$: t periyodu içerisindeki u biriminin kullanılabilir artık kapasitesi

Birim kapasite denklemi için; bir birim kurulu kapasitenin durumu, üretim için kullanılabilir kapasiteyi hesaplayıp kesin çıktı vermesi yeterlidir.

Birim kapasite denklemi (u, t):

$$CAPAC_{u,t} * Avai - fac_u * Conv - fac_u \geq P_{p,t} * Out - elec_p \quad (5.3)$$

$CAPAC_{u,t}$: t periyodu süresince p prosesinin kapasitesi

$Avai-fac_u$: p prosesinin geçerlilik faktörü

$Conv-fac_u$: Birim PJ/Y ise 1, MW ise 0,0315 alınır.

$Out-elec_p$: p prosesinin çıktısı elektrikse $Out-elec_p = 1$ olur.

5.3.3. Emisyon azaltım denklemleri

Bir azaltım teknolojisinin derecesi azaltım düzeylerini gösteren belirli prosesler için kullanılır. Azaltım düzeyleri için kısıt, atanan enerji prosesi aktivite düzeylerinden daha yüksek olmayan aktivite düzeylerine uymaktır.

Azaltım teknolojisi denklemi (p, a, t):

$$P_{p,t} \geq Abat_{a,p,t} \quad (5.4)$$

$Abat_{a,p,t}$: t periyodu süresince p prosesinin emisyonlarının indirgendiği azaltım teknolojilerinin azaltım düzeyi

Çevresel yasal düzenlemeleri belirli enerji proseslerini bağlayan açıkça belirtilen bir yıldan sonraki azaltım teknolojileri ile düzenlenir. Bu düzenlemeler aşağıdaki denklemde Env_reg parametresi ile modellenebilir.

Çevresel yasama denklemi (p, a, t):

$$Env_reg_{a,t} * P_{p,t} = Abat_{a,p,t}$$

(5.5)

$Env_reg_{a,t}$: a azaltım teknolojisi ile düzenlenmiş p enerji prosesi bölümü

Bir emisyon denklemi emisyon indirgenmesi için geliştirilen kontrol stratejilerine uygulanır. Farklı çevresel kirlenici maddeler (SO_x , NO_x , CO_2) in emisyon üst sınırları zaman periyodunun her yıl başında belirlenebilir. Emisyon denklemlerinde belirli kirlenici maddelerin emisyonlarının hepsinin toplam limiti enerji sistemleri tarafından belirlenir. Optimizasyon modeli elde edilen bu emisyon hedeflerine en ucuz indirgeme teknolojilerini aramak için çalışır.

Emisyon denklemleri (c, t):

$$\begin{aligned} & \sum_e \sum_n \sum_i (Flow-emiss_{c,e,i,n,t} * R_{e,i,n,t}) + \sum_e \sum_n \sum_n (Flow-emiss_{c,e,n',n,t} * I_{e,n',n,t}) + \\ & \sum_e \sum_n \sum_d (Flow-emiss_{c,e,n,d,t} * D_{e,n,d,t}) + \sum_p (P_{p,t} * Proc-emiss_{p,c} / Proc-eff_p) + \quad (5.6) \\ & \sum_a \sum_p (Abat_{a,p,t} * Abat-emiss_{a,p,c} / Proc-eff_p) \leq Emiss-max_{c,t} \end{aligned}$$

Flow-emiss_{c,e,i,n,t} : t periyodu süresince i'den n kaynak akımlarına uygun olan c (SO_x, NO_x, CO₂) emisyonu (ton/PJ)

Flow-emiss_{c,e,n',n,t} : t periyodu içinde n'den n için enerji taşıyıcısı ara akımlarına uygun olan c (SO_x, NO_x, CO₂) emisyonu (ton/PJ)

Flow-emiss_{c,e,n,d,t} : t periyodu süresince n'den d talep akımlarına uygun olan c (SO_x, NO_x, CO₂) emisyonu (ton/PJ)

Proc-emiss_{p,c} : her bir p girdi proses düzeyleri içi c emisyonu (ton/PJ)

Proc-eff_p: p prosesinin verimliliği

Abat-emiss_{a,c} : çıktı proses düzeyleri başına c emisyonunun indirgenmesi (ton/PJ)

Emiss-max_{c,t} : t periyodu süresince c emisyonunun üst sınırı

5.3.4. Maliyet denklemi

Maliyet denklemi tüm planlama periyodu için enerji sistem maliyetlerinin hepsini belirler. Bu denklem optimizasyon programı için amaç fonksiyonu olarak da kullanılabilir. Tüm planlama periyodunda enerji sistemi aracılığıyla hesaplanan maliyetlerin tamamı minimize edilir. Toplam maliyet fonksiyonu hesaplanmasında kullanılan parametreler aşağıdadır:

Cost-var: Değişken maliyet; proses düzeyi veya azaltım düzeyindeki bir akım için önerilen maliyetlerin toplamıdır. Maliyetlere değişken işletme ve bakım maliyetleri dahildir.

Cost-fix: Sabit maliyetler; kurulu kapasite için önerilen işletme maliyetlerinin hepsini gösterir.

Cost-inv: Yatırım maliyetleri; enerji prosesi veya azaltım teknolojisinin bir birim kapasitesini inşa etmek için girilmiş tüm fiyatların toplamını gösterir.

Pur-price: Satınalma fiyatı; yalnızca ithal edilen enerji kaynakları için düşünülmüştür. Bu fiyat ithal edilen bir birim akımın maliyetini gösterir.

Sel-price: Satış fiyatı, yalnızca ithal edilen enerji için düşünülmüştür. Bu fiyat ihraç edilen bir birim akımdan sağlanan karları gösterir.

Life-tec: Ekipmanların ekonomik ömürlerini yıllar içinde gösterir. Yıllık ödenekler ekonomik ömrü geri ödeme periyotlarına eşitlemek için hesaplanır.

Irate: Faiz oranı (%5 olarak alınır)

Discrate: İndirim oranı (%5 olarak alınır)

Enerji sisteminde toplam maliyet fonksiyonu 7 farklı maliyet türünden oluşur (aşağıdaki maliyetler her bir t periyodu için verilir):

1. İthal ve üretim maliyetleri, KAYNAK MALİYETLERİ (t):

$$\sum_e \sum_n \sum_i R_{e,i,n,t} * (Pur - price_{e,i,n,t} * Cost - var_{e,i,n,t}) \quad (5.7)$$

2. Üreticiler arasındaki akımların maliyetleri, DAĞITIM MALİYETLERİ (t):

$$\sum_e \sum_{n'} \sum_n (I_{e,n',n,t} * Cost - var_{e,n',n,t}) \quad (5.8)$$

3. İhraç veya son talep akımlarının maliyetleri, TALEP MALİYETLERİ (t):

$$\sum_e \sum_n \sum_d D_{e,n,d,t} * (Cost - var_{e,n,d,t} - Sel - price_{e,n,d,t}) \quad (5.9)$$

4. Proseslerin değişken maliyetleri, PROSES MALİYETLERİ (t):

$$\sum_p (P_{p,t} * Cost - var_p) \quad (5.10)$$

5. Birim kapasitelerin sabit maliyetleri, SABİT MALİYETLER (t):

$$\sum_u (CAPAC_{u,t}) * Cost - fix_u \quad (5.11)$$

6. Birim kapasitelerin yatırım maliyetleri, YATIRIM MALİYETLERİ (t):

Burada yıllık ödenek yöntemunu kullanarak her yıl ödenmiş yatırım maliyetleri tahmin edilir. Bu kapasitenin ekonomik ömrü boyunca her yıl eşit miktarlar ile faiz geri ödenir, ek olarak yatırılmış para miktarını içerir. Son planlama periyodundan sonra ödenmesi zorunlu yatırım maliyetleri hesaplanan toplam maliyet fonksiyonuna dahil değildir. Bu yol planlama periyodundan sonra kapasitenin kalan değerini hesaba alır.

$$\sum_u Anfac_u * \left(\sum_b \min(RL_{u,b,t}, Year_t) * CAPAC - BUI_{u,b} \right) * Cost - inv_u / Year_t \quad (5.12)$$

$$Anfac_u = \frac{Irate}{1 - (1 + Irate)^{-Lifetech_u}} \quad (5.13)$$

7. Azaltım maliyetleri, AZALTIM MALİYETLERİ (t):

$$\sum_a \sum_p (Abat_{a,p,t} * Cost - abat_{a,p}) \quad (5.14)$$

$$Cost - abat_{a,p} = \frac{IratexCost - inv_{a,p} x Conv - abat}{(1 - (1 + Irate)^{-Life-tec_a}) x Avai - fac_{a,p}} + Cost - var_{a,p} \quad (5.15)$$

Son olarak toplam maliyet fonksiyonu hesaplanır. Adı anılan tüm maliyetler planlama periyodunun başlangıcından bu yana hesaplanır. Bu yolla planlama periyodunun sonunda maliyetler birinci yıl maliyetleri ile karşılaştırılır. Toplam hesaplanan maliyet fonksiyonu:

$$Tot - cost = \sum_i Disc - fact_i * \left(Kaynak_Maliyetleri_i + Distrubution_Maliyetleri_i + Talep_Maliyetleri_i + Proses_Maliyetleri_i + Sabit_Maliyetleri_i + Yatirim_Maliyetleri_i + Azaltim_Maliyetleri_i \right) \quad (5.16)$$

$$Disc - fact_i = \sum_i^{Y_{it}} (1 + discrate)^{-i - \sum_b^{b < t} Y_{ib}} \quad (5.17)$$

i: bir periyot içindeki yılların sayısı

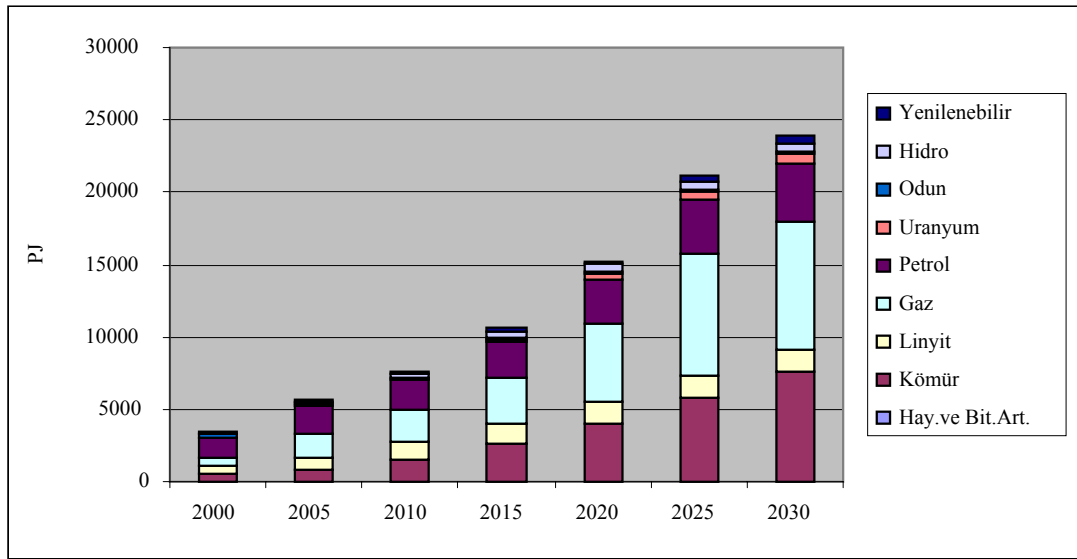
Disc-fac_t: t periyodu için indirim faktörü

6. AYRIŞTIRILMIŞ MODELDEN ELDE EDİLEN SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde ulusal enerji sistemi için farklı senaryolar altında geliştirilen ve kaynak kökenli ayrıştırma yöntemi ile ayrıştırılmış EFOM-ENV model sonuçları sunulmuştur. Türkiye'nin 2030 yılına kadar nihai sektörlerin taleplerinin karşılandığı kaynak karışımı elde edilmiştir. Model, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan referans senaryoya göre çalıştırılmış ve IEA (International Energy Agency) tarafından yayınlanan FEC1 (Final Energy Consumption 1) ve FEC2 (Final Energy Consumption 2) senaryoları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca modelde çevresel kirleticilerin (CO_2 , SO_2 , NO_x) 2030 yılına kadarki değişimi de incelenmiş ve nihai sektörlerden kaynaklanan emisyon değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan kaynak kökenli ayrıştırma yöntemi sayesinde kaynaklarda meydana gelen bir birimlik değişimin diğer kaynaklar üzerindeki maliyet etkisi ve çevresel kirleticilerden kaynaklanan emisyon değerlerindeki değişim de incelenmiştir.

Ulusal enerji sisteminin optimizasyonu için EFOM-GAMS isimli paket program kullanılmıştır [72]. Söz konusu model tüm Avrupa Topluluğu ve bazı topluluk dışı aday ülkelerde sorumlu enstitülerce başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Model çalıştırılmadan önce ulusal enerji sisteminin mevcut teknolojik, ekonomik, akım ve çevresel açıdan analizi yapıp, modelin sistemi tam olarak yansıtması yani gerçek verilerle temsil edilmesi sağlanmıştır.

Referans durum, 2000–2030 çalışma dönemi boyunca hiç bir emisyon kontrol önleminin sisteme empoze edilmeyeceğini kabul ettiğinden farklı enerji arz stratejilerinin karşılaştırmalı analizlerine bir zemin oluşturmaktadır. Şekil 6.1'de EFOM-ENV modeli girdi olarak kullanılan bir dizi önemli parametre seti üzerinde çalıştırıldığında referans durum için birincil enerji tüketim gelişimini göstermektedir. Çalışma dönemi içerisinde tüm birincil enerji kaynaklarının artması beklenmektedir.



Şekil 6.1. Birincil enerji tüketimi

Model sonuçlarına göre 2010–2030 yılları için referans senaryoya göre kaynakların sektörel olarak dağıtımı aşağıdaki şekilde görülmektedir. Buna göre, kaynakların toplamı göz önüne alındığında, en fazla artışın kömürde olduğu görülmektedir. 2010 yılında kömüre olan talep 1433 PJ iken bu değer 2030 yılında yaklaşık 5,3 kat artarak 7600 PJ seviyelerine çıkması beklenmektedir. Doğalgaza olan talep artışı ise ikinci sırada yer almakta ve bu talebin 2030 yılına kadar yaklaşık dört kat artarak 8824 PJ miktarında olacağı tahmin edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebin 2010–2030 yılları arasında geçmiş dönemlere nazaran 3,6 kat gibi önemli bir artış göstereceği ve bu enerji kaynağının talep miktarının 586 PJ ve petrole olan talebin ise yaklaşık iki kat artış göstereceği beklenmektedir.

Sektörel olarak incelendiğinde de sanayi, konut ve tarım sektörlerinde en fazla talebin kömür kaynağına olacağı görülmektedir. Bu sektörlerde kömür kaynağını Doğalgaz, yenilenebilir ve petrol izlemektedir. Ulaştırma sektöründe ise petrole olan ihtiyaç aynı dönem içerisinde yaklaşık olarak iki kat oranında artacaktır. Çalışma kapsamında göz önünde bulundurulmuş referans senaryo ile farklı iki senaryoya göre kaynakların sektörel olarak dağılımı ise aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir. Çizelge 6.1’de referans senaryosuna göre kaynakların 2010–2030 yılları arasındaki değişimi verilmiştir.

Çizelge 6.1. Referans senaryo için 2010–2030 yılları arasındaki kaynak dağılımı

Talep (2010)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	915	0	417	101	1 433
Petrol	1 037	769	193	76	2 075
Doğalgaz	1 064	0	877	243	2 184
Nükleer Enerji	0	0	0	0	0
Yenilenebilir Enerji	55	0	70	35	160
Talep (2015)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	1 611	0	734	177	2 522
Petrol	1 234	914	229	91	2 468
Doğalgaz	1 535	0	126	351	3 151
Nükleer Enerji	143	0	6	20	168
Yenilenebilir Enerji	77	0	99	50	225
Talep (2020)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	2 542	0	1158	279	3 979
Petrol	1 542,08	1 142,49	286,25	113,18	3 084
Doğalgaz	2 648	0	2 181,4	605	5 434,4
Nükleer Enerji	286	0	11	39	336
Yenilenebilir Enerji	872	0	112,4	56,52	256,12
Talep (2025)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	3 681	0	1 677	404	5 762
Petrol	1 871	1 386	347	137	3 742
Doğalgaz	4 129	0	3 401	944	8 475
Nükleer Enerji	429	0	17	59	504
Yenilenebilir Enerji	157	0	202	102	460
Talep (2030)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	4 855	0	2 212	533	7 600
Petrol	1 997	1 480	371	147	3 994
Doğalgaz	4 300	0	3 542	982	8 824
Nükleer Enerji	572	0	22	78	672
Yenilenebilir Enerji	200	0	257	129	586

Çizelge 6.2’de de FEC1 senaryosuna göre kaynakların 2010–2030 yılları arasındaki değişimi verilmiştir.

Çizelge 6.2. FEC1 senaryosu için 2010–2030 yılları arasındaki kaynak dağılımı

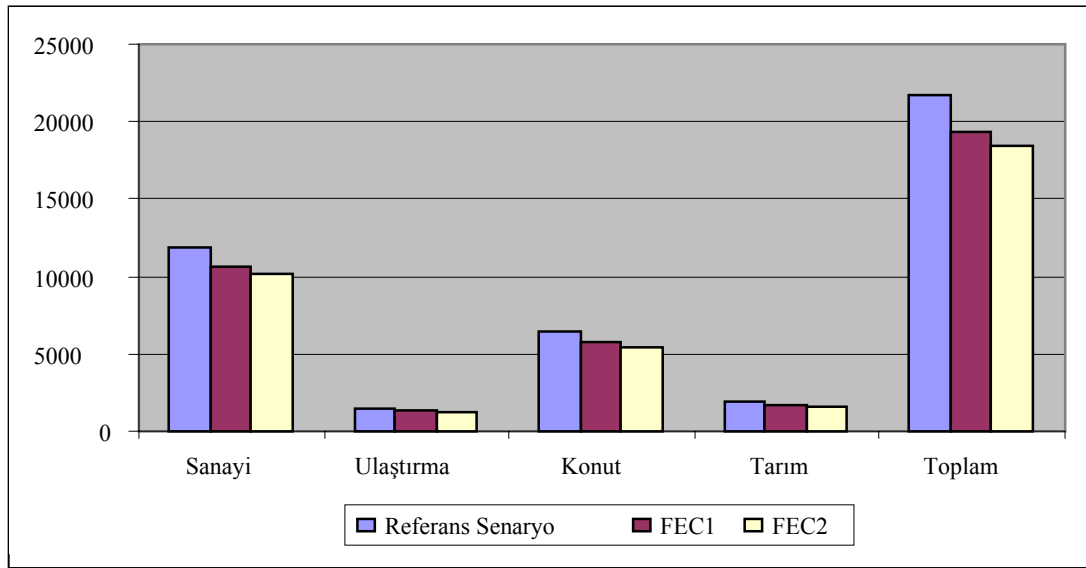
Talep (2010)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	796,05	0	362,79	87,87	1 246,71
Petrol	902,19	669,03	167,91	66,12	1 805,25
Doğalgaz	925,68	0	762,99	211,41	1 900,08
Nükleer Enerji	0	0	0	0	0
Yenilenebilir Enerji	47,85	0	60,9	30,45	139,2
Talep (2015)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	1 433,79	0	653,26	157,53	2 244,58
Petrol	1 098,26	813,46	203,81	80,99	2 196,52
Doğalgaz	1 366,15	0	112,14	312,39	2 804,39
Nükleer Enerji	127,27	0	5,34	17,8	149,52
Yenilenebilir Enerji	68,53	0	88,11	44,5	200,25
Talep (2020)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	2 313,22	0	1 053,78	253,89	3 620,89
Petrol	1 403,29	1 039,67	260,49	102,99	2 806,44
Doğalgaz	2 409,68	0	1 985,08	550,55	4 945,30
Nükleer Enerji	260,26	0	10,01	35,49	305,76
Yenilenebilir Enerji	793,52	0	102,28	51,43	233,07
Talep (2025)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	3 327,62	0	1 516,01	365,22	5 208,85
Petrol	1 691,38	1 252,94	313,69	123,85	3 382,77
Doğalgaz	3 732,62	0	3 074,50	853,38	7 661,4
Nükleer Enerji	387,82	0	15,37	53,34	455,62
Yenilenebilir Enerji	141,93	0	182,61	92,21	415,84
Talep (2030)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	4 345,23	0	1 979,74	477,04	6 802
Petrol	1 787,32	1 324,6	332,05	131,57	3 574,63
Doğalgaz	3 848,5	0	3 170,09	878,89	7 897,48
Nükleer Enerji	511,94	0	19,69	69,81	601,44
Yenilenebilir Enerji	179	0	230,02	115,46	524,47

Çizelge 6.3’de de FEC2 senaryosuna göre kaynakların 2010–2030 yılları arasındaki değişimi verilmiştir.

Çizelge 6.3. FEC2 senaryosu için 2010–2030 yılları arasındaki kaynak dağılımı

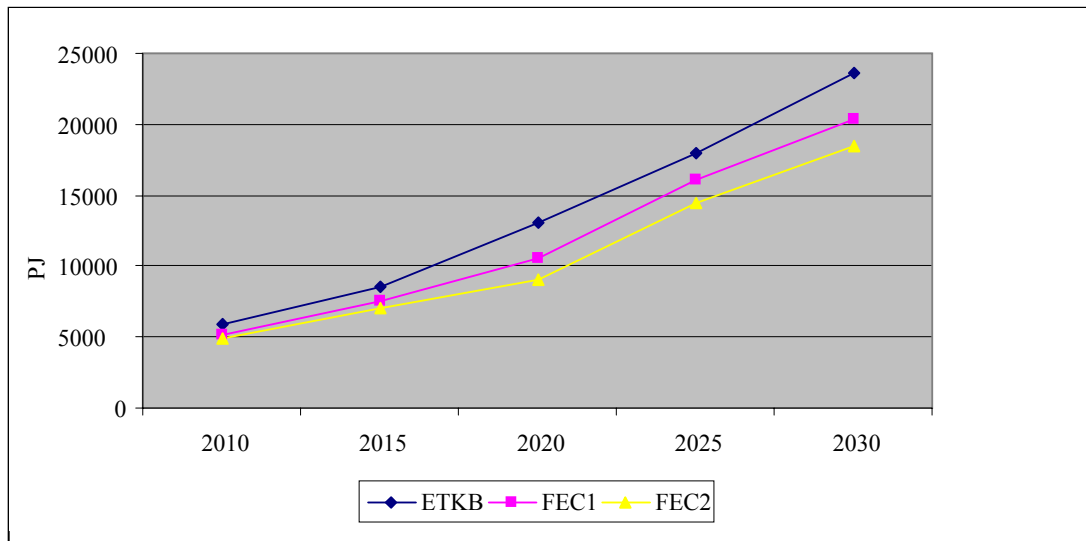
Talep (2010)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	764,21	0	348,28	84,36	1 196,84
Petrol	866,10	642,27	161,19	63,48	1 733,04
Doğalgaz	888,65	0	732,47	202,95	1 824,08
Nükleer Enerji	0	0	0	0	0
Yenilenebilir Enerji	45,94	0	58,46	29,23	133,63
Talep (2015)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	1 370,70	0	624,52	150,59	2 145,82
Petrol	1 049,94	777,67	194,84	77,43	2 099,87
Doğalgaz	1 306,04	0	107,21	298,65	2 680,99
Nükleer Enerji	121,67	0	5,11	17,02	142,94
Yenilenebilir Enerji	65,52	0	84,23	42,54	191,44
Talep (2020)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	2 241,51	0	1 021,11	246,02	3 508,64
Petrol	1 359,79	1 007,44	252,41	99,80	2 719,44
Doğalgaz	2 334,98	0	1 923,54	533,4	4 791,99
Nükleer Enerji	252,19	0	9,69	34,39	296,28
Yenilenebilir Enerji	768,92	0	99,11	49,84	225,84
Talep (2025)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	3 187,87	0	1 452,34	349,88	4 990,08
Petrol	1 620,35	1 200,32	300,51	118,65	3 240,69
Doğalgaz	3 575,85	0	2 945,38	817,53	7 339,62
Nükleer Enerji	371,53	0	14,72	51,09	436,48
Yenilenebilir Enerji	135,97	0	174,94	88,34	398,38
Talep (2030)					
Kaynak	Sanayi	Ulaştırma	Konut	Tarım	Toplam
Kömür	4 130,14	0	1881,74	453,42	6 465,30
Petrol	1 698,84	1 259,03	315,61	125,05	3 397,69
Doğalgaz	3 657,99	0	3 013,17	835,39	7 506,56
Nükleer Enerji	486,59	0	18,72	66,35	571,67
Yenilenebilir Enerji	170,14	0	218,63	109,74	498,51

Çalışmada göz önünde bulundurulmuş senaryolara göre 2010 yılında sektörel olarak birincil enerji kaynaklarının değişimi şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Birincil enerji kaynaklarının sektörel dağılımı

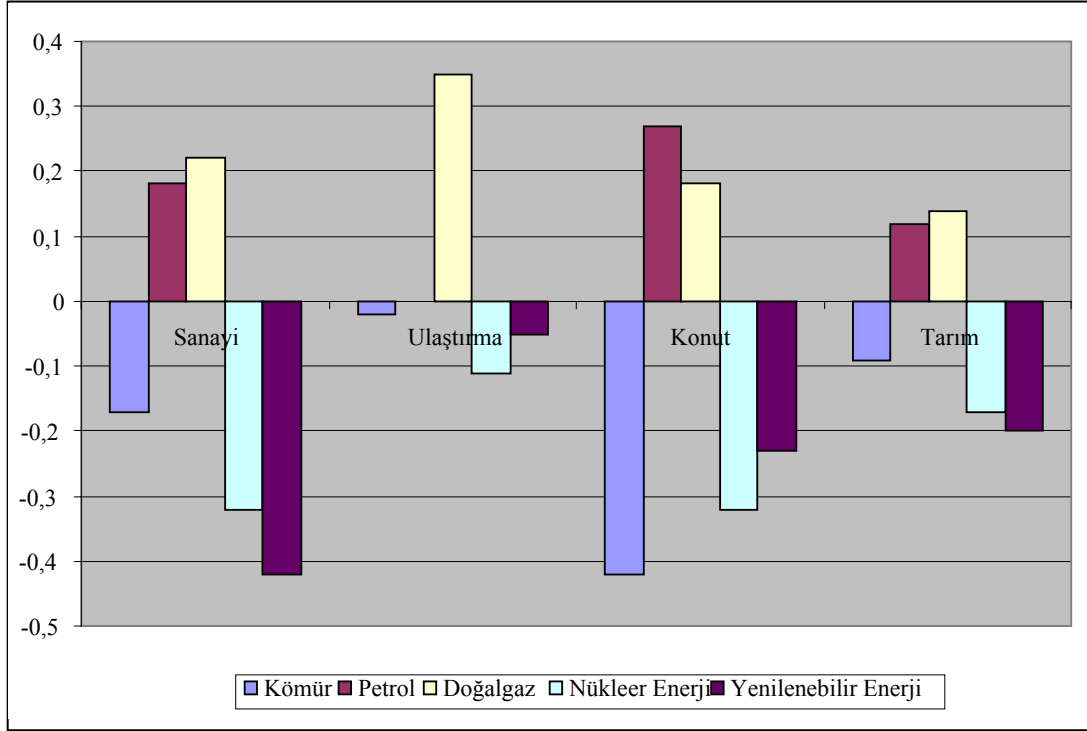
Senaryolara göre her bir birincil enerji kaynağındaki değişim ise şekil 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.3. Farklı senaryolar için toplam birincil enerji kaynaklarındaki değişim

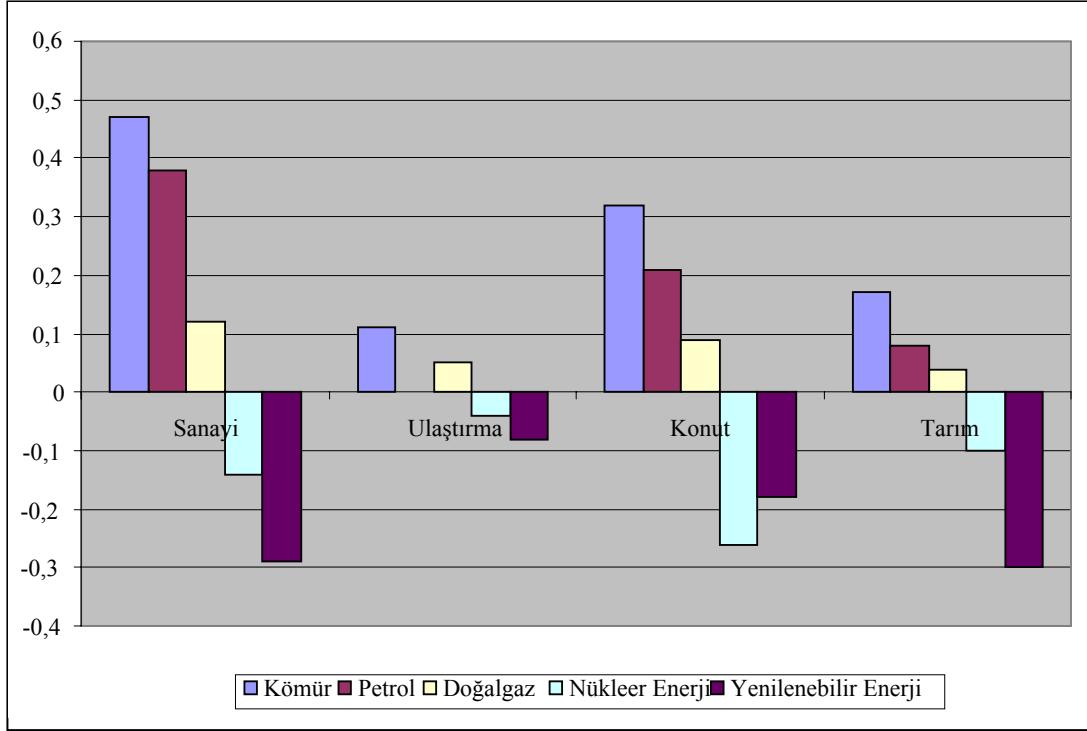
Çalışmada kaynakların birbirine göre etkinliği de incelenmiştir. Buna göre sektörlerin talep ettiği nihai enerjiyi üretmek için kullanılan birincil enerji kaynaklarındaki bir birimlik değişimin toplam enerji maliyetine olan etkisi şekil 6.4'de gösterilmiştir. Dışa bağımlılığımız olan Doğalgaz ve petroldeki bir birimlik

artışın enerji maliyetine pozitif bir katkı yaptığı görülmektedir. Bununla beraber yerli kaynağımız olan kömür, 2015 yılında faaliyete geçmesi beklenen nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı durumunda toplam enerji maliyetlerinin azalacağı beklenmektedir.



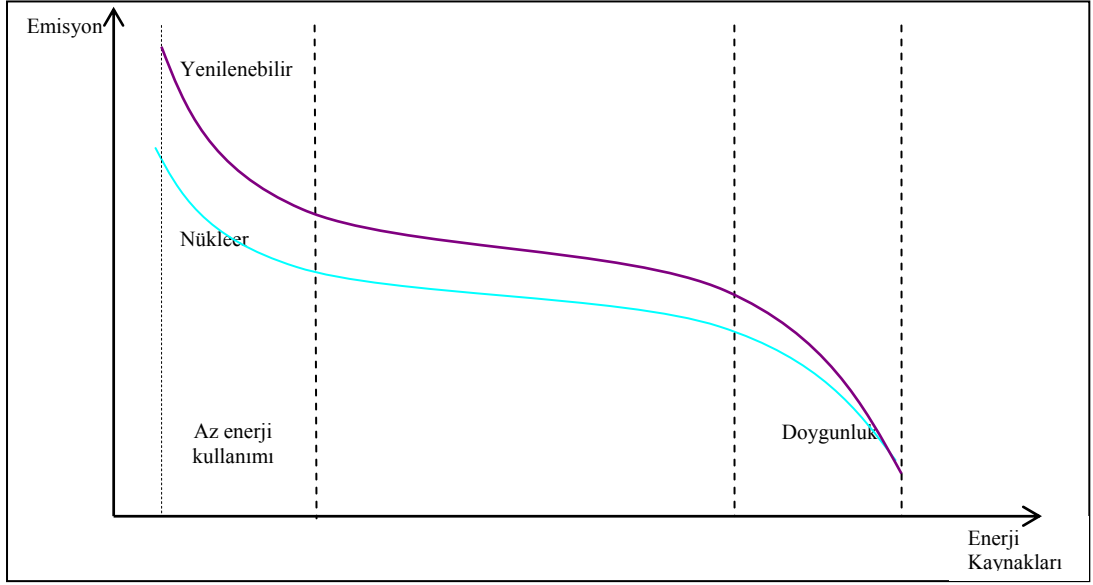
Şekil 6.4. Birincil enerji kaynaklarındaki birim değişimin maliyete etkisi (%)

Yalnızca enerji maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda kömür en uygun yakıt olarak görülmektedir. Ancak çevresel kirleticilerin sosyal hayattaki etkileri düşünüldüğünde kömür kullanımının çok da etkin olmadığı göze çarpmaktadır. Şekil 6.5'de birincil enerji kaynaklarındaki bir birimlik değişimin emisyon değerleri üzerindeki etkisi verilmiştir. Buna göre çevresel kirliliğin önlenmesi için nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kullanımının doğru olduğu söylenebilir.



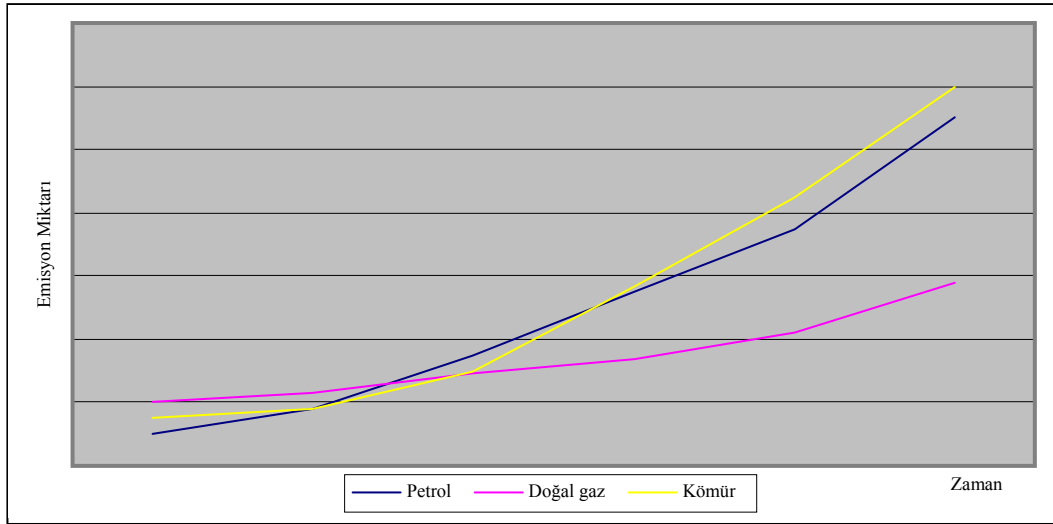
Şekil 6.5. Birincil enerji kaynaklarındaki birim değişimin toplam emisyon etkisi (%)

Nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynakları ile emisyon miktarı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik şekil 6.6'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde, her iki enerji için miktarın daha düşük seviyelerde olduğu durumda emisyon miktarında önemli bir düşüş göze çarpmaktadır. Aynı durum enerji kaynaklarına doyum olduğunda da gözlemlenmektedir. Dikkat çeken bir diğer husus ise, yenilenebilir enerji kaynağının nükleer enerjiye nazaran emisyon miktarındaki azalmaya daha fazla katkı yaptığıdır.



Şekil 6.6. Temiz enerji kaynakları ile emisyon arasındaki ilişki

Fosil tabanlı yakıtlardan kaynaklanan emisyon değişimi ise şekil 6.7’de verilmiştir. Buna göre bu yakıt türlerinden Doğalgazın çevreye daha az zarar verdiği görülmektedir. Kömür ve petrol ise eğer kullanıldıkları işletmelerde önlem alınmaz ise çevreye büyük ölçüde zarar vermeye devam edecektir.



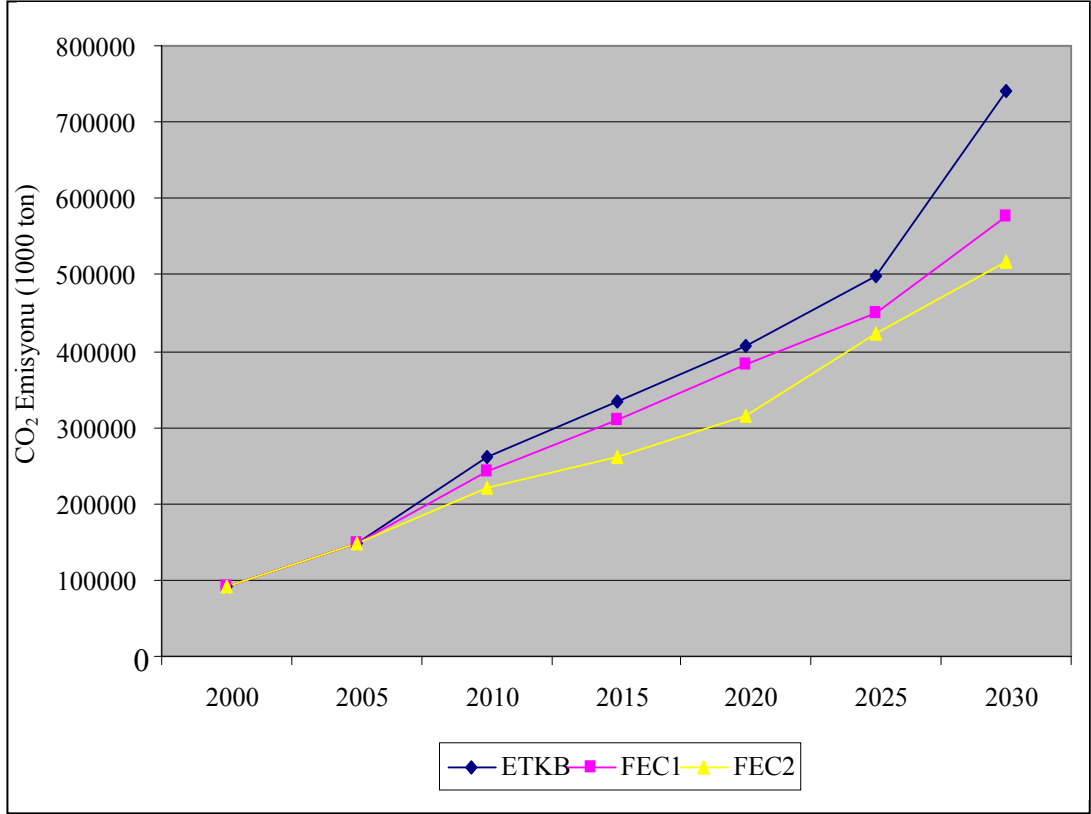
Şekil 6.7. Fosil tabanlı enerji kaynaklarından kaynaklanan emisyon değişimi

Çalışma kapsamında ele alınan çevresel kirleticilerden CO₂, SO₂, NO_x emisyon değerlerinin sektörel olarak dağılımı aşağıdaki çizelgelerde sunulmuştur. Emisyon değerleri hesaplanırken yine Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yapılmış olan yasal senaryo ile FEC1 ve FEC2 senaryoları göz önünde bulundurulmuş ve bu senaryolar için 2010–2030 yılları arasındaki CO₂ emisyon değerleri incelenmiştir. Çizelge 6.4’de her üç senaryo için hesaplanan değerler gösterilmiştir. Çevresel kirliliğe en fazla sebep olan CO₂ emisyon değerlerinin sektörel değişimine bakıldığında en fazla artışın yine sanayi sektöründe olduğu görülmektedir. Çizelge 6.4’de görüldüğü gibi sanayi sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonu toplam emisyon değerinin yaklaşık %60 ını oluşturmaktadır. Sanayi sektörünü ulaştırma konut ve tarım sektörleri izlemektedir.

Referans senaryoya göre 2000 yılında 90 milyon ton olan emisyon değerinin 2030 yılında yaklaşık 7,2 kat artarak 670 milyon ton değerine ulaşması beklenmektedir. CO₂ emisyon değeri FEC1’e göre 6,8 kat ve FEC2’ye göre 5,7 kat artış gösterecektir (şekil 6.7).

Çizelge 6.4. Farklı senaryolar için CO₂ emisyonlarının sektörel dağılımı

CO ₂ değerlerinin yasal senaryo için sektörel dağılımı							
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Sanayi	54 581,4	92 925,9	171 501	205 146	229 997	277 080	388 978
Tarım	3 743,45	6 169,28	10 864,2	13 841,1	16 891,4	20716,11	30744,69
Ulaştırma	16 778,7	26 164,4	43 456,8	55 364,2	63 493,4	82864,43	130390,7
Konut	15 130,8	23 448,6	38 674,2	52 608	60 129,8	68 750,7	109 445
CO ₂ değerlerinin FEC1 senaryo için sektörel dağılımı							
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Sanayi	54 581,4	92 925,9	152 636	182 580	204 697	246601,6	346 191
Tarım	3 743,45	6 169,28	9 669,13	12 318,5	15 033,4	18 437,3	27 362,8
Ulaştırma	16 778,7	26 164,4	38 676,5	49 274,1	56 509,2	73 749,3	116 048
Konut	15 130,8	23 448,6	34 420,1	46 821,1	53 515,5	61 188,1	97 405,7
CO ₂ değerlerinin FEC2 senaryo için sektörel dağılımı							
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Sanayi	54 581,4	92 925,9	146 530	175 277	196 509	236 738	332 343
Tarım	3 743,45	6 169,28	9 282,37	11 825,8	14 432	17 699,8	26 268,3
Ulaştırma	16 778,7	26 164,4	37 129,5	47 303,1	54 248,8	70 799,4	111 406
Konut	15 130,8	23 448,6	33 043,3	44 948,2	51 374,9	58 740,6	93 509,4



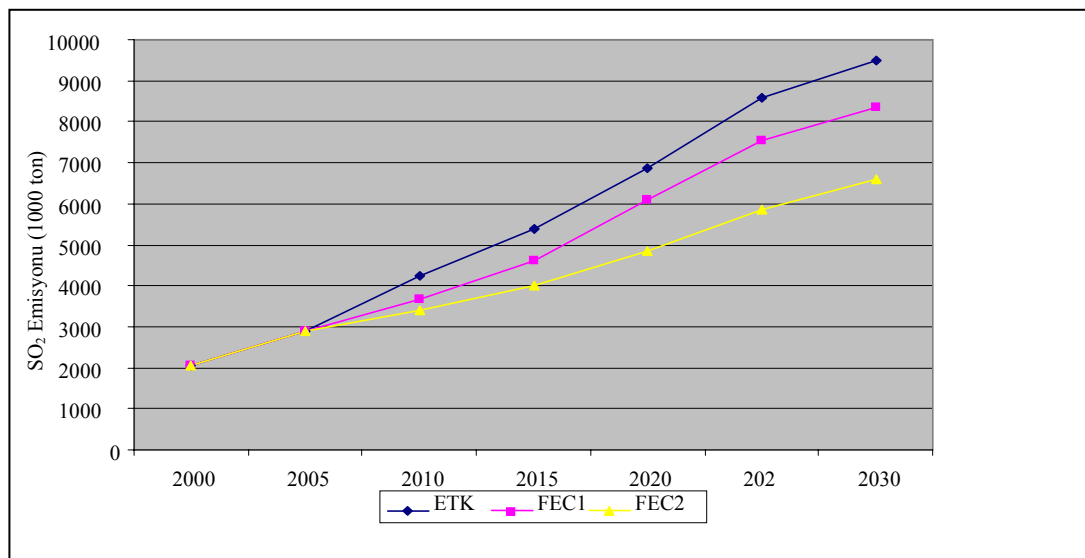
Şekil 6.8. Toplam CO₂ emisyonlarının değişimi

Çizelge 6.5’de SO₂ emisyonu için üç senaryo göz önünde bulundurularak hesaplanan değerler verilmiştir. Çevresel kirleticilerin gelecek dönemdeki değişimlerine bakıldığında toplam SO₂ emisyonlarının 2000’deki yıllık 2,4 milyon tondan 2030 yılıyla birlikte yıllık 10,4 milyon tona kadar artış göstereceği projekte edilmiştir. Bu durum, elektrik tüketimindeki artış nedeniyledir. Güç sektörünün toplam SO_x emisyonlarına katkısı 2000 yılında %47 oranındadır. Sanayinin payı ise 2030 yılında %80’ler seviyesine ulaşacaktır. Bunun sebebi; Türkiye’nin büyüme oranındaki artış ve sanayinin kendi elektrik ihtiyacını üretmek için otoprodüktör santral sayısının artmasıdır.

Çizelge 6.5. Farklı senaryolar için SO₂ emisyonlarının sektörel dağılımı

SO ₂ değerlerinin yasal senaryo için sektörel dağılımı							
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Sanayi	156,12	236,75	325,18	438,13	602,68	805,16	1 119,82
Tarım	209,54	317,75	436,43	588,02	808,86	1 080,62	1 502,91
Ulaştırma	8,22	12,46	17,11	23,06	31,72	42,38	58,94
Konut	36,98	56,07	77,02	103,77	142,74	190,69	265,22
SO ₂ değerlerinin FEC1 için sektörel dağılımı							
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Sanayi	156,12	236,75	263,41	338,53	481,25	607,37	917,79
Tarım	209,54	317,75	353,53	454,34	645,88	815,15	1 231,77
Ulaştırma	8,22	12,46	13,86	17,82	25,33	31,97	48,31
Konut	36,98	56,07	62,39	80,18	113,98	1 43,85	217,37
SO ₂ değerlerinin FEC2 için sektörel dağılımı							
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Sanayi	156,12	236,75	230,42	269,49	342,87	480,85	623,10
Tarım	209,54	317,75	309,26	361,69	460,17	645,36	836,27
Ulaştırma	8,22	12,46	12,12	14,18	18,05	25,31	32,79
Konut	36,98	56,07	54,58	63,83	81,21	113,89	147,58

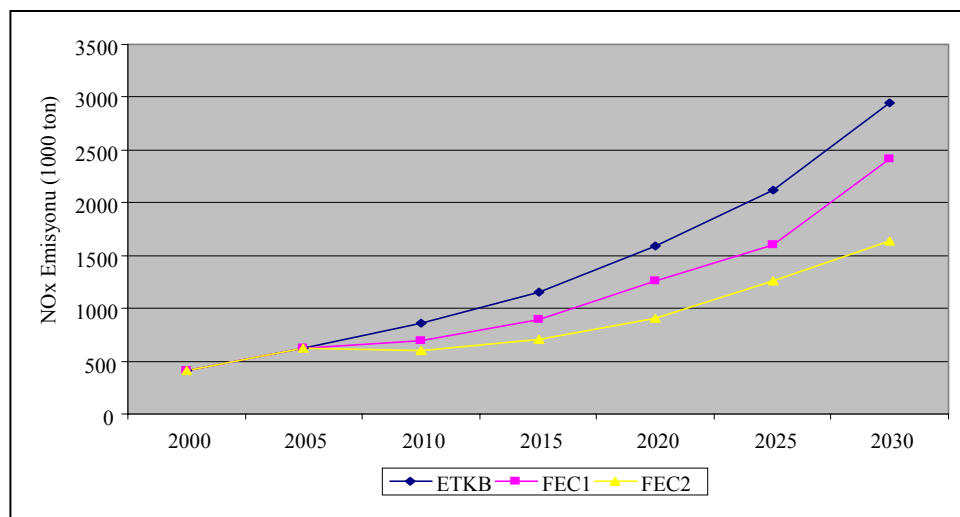
Toplam SO₂ emisyon değerlerinin senaryolara göre değişimi ise şekil 6.8'de verilmiştir. SO₂ emisyonu, referans senaryoya göre 2,1 kat FEC1'e göre 2,4 kat ve FEC2'ye göre 3,2 kat artış göstermesi beklenmektedir.

Şekil 6.9. Toplam SO₂ emisyonlarının değişimi

NO_x emisyonları ise 2000 yılında 0,5 milyon tondan 2030 yılıyla birlikte yıllık yaklaşık 3 milyon tona erişmektedir. Çizelge 6.6'da görüldüğü gibi yine sanayi sektörü en fazla NO_x emisyonu üretmektedir. 2000 yılında sanayi sektörünün NO_x emisyonundaki payı %59 iken bu oran 2030 yılında %81'e çıkmıştır.

Çizelge 6.6. Farklı senaryolar için NO_x emisyonlarının sektörel dağılımı

NO _x değerlerinin yasal senaryo için sektörel dağılımı							
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Sanayi	776,59	1 099,11	1 608,21	2 048,36	2 612,87	3 266,69	3 608,54
Tarım	1 042,28	1 475,12	2 158,38	2 749,11	3 506,75	4 384,25	4 843,04
Ulaştırma	40,87	57,85	84,64	107,81	137,52	171,93	189,92
Konut	183,93	260,32	380,89	485,14	618,84	773,69	854,66
NO _x değerlerinin FEC1 için sektörel dağılımı							
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Sanayi	776,59	1 099,11	1 400,36	1 755,47	2 318,77	2 870,87	3 174,78
Tarım	1 042,28	1 475,12	1 879,43	2 356,03	3 112,04	3 853,01	4 260,89
Ulaştırma	40,87	57,85	73,70	92,39	122,04	151,09	167,09
Konut	183,93	260,32	331,67	415,77	549,18	679,94	751,92
NO _x değerlerinin FEC2 için sektörel dağılımı							
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Sanayi	776,59	1 099,11	1 296,45	1 518,96	1 845,83	2 229,84	2 512,29
Tarım	1 042,28	1 475,12	1 739,97	2 038,61	2 477,29	2 992,69	3 371,77
Ulaştırma	40,87	57,85	68,23	79,95	97,15	117,36	132,23
Konut	183,93	260,32	307,05	359,75	437,17	528,12	595,02



Şekil 6. 10. Toplam NO_x emisyonlarının değişimi

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sunulan bu çalışmada, Türkiye enerji sistemi bir bütün olarak incelenmiş ve kaynak kökenli ayrıştırma yöntemi kullanılarak son kullanıcı olan sektörler için kaynak dağıtım planı çıkarılmıştır. Aynı zamanda modele çevresel kısıtlar da dahil edildiğinden CO₂, SO₂ ve NO_x emisyon değerlerinin gelecek dönemler içerisindeki değişimi de incelenmiştir. Birincil enerji kaynaklarının birim değişiminde meydana gelen maliyet ve emisyon değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Hem kaynak dağıtımında, hem de emisyon tahminlerinde farklı iki senaryo ile karşılaştırmalar yapılmış ve grafiksel olarak 6. bölümde sunulmuştur. Model sonuçlarına göre, enerji ihtiyacının büyük bölümünü ithal yolu ile karşılamak zorunda olan Türkiye'nin, bu problemini en kısa zamanda çözmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Türkiye özellikle kendi kaynaklarına öncelik vermelidir. Çevresel kirliliği de göz önünde bulundurduğumuzda, Türkiye için en önemli alternatif enerji kaynaklarının, yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerji olduğu açıkça görülmektedir.

Türkiye'nin rüzgâr haritası çıkarılmış olup bu haritaya göre uygun bölgelere rüzgâr santralleri kurması ve elektrik enerji talebinin bir kısmını buradan karşılaması gerekmektedir. Özellikle Türkiye'nin güney bölgesinde, güneş enerjisinden oldukça fazla yararlanma imkânı vardır. Bu bölgelerin elektrik enerjisi ihtiyacı kurulacak kolektörler sayesinde daha temiz ve daha ucuz olarak temin edilebilir. Türkiye'nin farklı bölgelerinde birçok jeotermal kaynaklar mevcuttur. Bu kaynaklar elektrik enerjisi üretiminde ve ısıtma amacı ile kullanılabilir. Bu kaynaklar elektrik enerjisi üretiminde ve ısıtma amacı ile kullanılabilir.

Türkiye son yıllarda enerji politikasında dışa bağımlılığı azaltmak için nükleer enerji konusunda çeşitli atılımlar yapmıştır. Şu anki projeksiyonlara göre, en erken 2015 yılından itibaren nükleer enerji santralleri faaliyete geçebilecektir. Bu yatırımların devlet tarafından hızlandırılması ve bir an evvel Türkiye'nin de nükleer enerji kullanması sürdürülebilir bir kalkınma için önem arz etmektedir.

Model sonucunda elde edilen bulgular ışığında enerji politikamızın şu şekilde düzenlenmesi önerilmektedir.

- Yerli kaynaklarımızın bir master plan dahilinde aranmasına ve özellikle fosil kaynak potansiyelimizin sağlıklı bir şekilde belirlenmesine ve çeşitli sektörler içinde dengeli bir şekilde kullanımını öngören bir genel enerji planlaması yapılmasına gereksinim vardır. Bu planlama enerji politikasının temelini oluşturacaktır.
- 2001 yılından itibaren başta elektrik, Doğalgaz ve petrol olmak üzere kabul edilen serbest piyasa modeli tekrar gözden geçirilmelidir. Bu modelin ülkenin ekonomik gelişmişlik durumuna ve çıkarlarına ters düşen ve uygulamada sorunlar yaratan hükümleri değiştirilmeli veya Türkiye koşullarına uygun yeni bir yapılanma modeli oluşturulmalıdır. Bu çerçevede kamu yatırımlarının önünü açacak önlemler alınmalı, tekelleşme ve yabancıların sektörde hakim duruma geçmeleri önlenmelidir. Aksi takdirde arz güvenilirliği riske girecek ve ulusal bir enerji politikası oluşturulamayacaktır.
- 2030 yılına kadar enerji sektörüne yaklaşık 200 milyar dolar tutarında yatırım yapılması gerekmektedir. Serbest piyasa modeline göre işleyen enerji sektörünün bugün için en önemli sorunu yatırımlar için finansman teminidir. Sektörün gelişmesini sağlayacak yatırımlar için kalıcı ve sürdürülebilir finansman temini şarttır. Bu nedenle yeni bir finansman modeli yaratılmalıdır.
- Enerji politikamız, ulusal çıkarlarımızı gözetken, enerjide dışa bağımlılığı azaltmak için yerli kaynaklara dayalı uzun vadede değişmeyen temel unsurları içerecek bir şekilde yeniden belirlenmelidir.
- Enerji politikalarını, ekonomi, güvenlik ve dış politikalardan ayrı düşünmek mümkün değildir. Bu nedenle, enerji politikasını oluştururken bu hususları göz önünde bulundurmak gerekmektedir.

- Enerji politikalarının her şeyden önce sürdürülebilir hedeflere göre, çevreye uyumlu, güvenilir, enerjinin tüketicilerin tamamının kullanabileceği ucuzlukta olması gerekmektedir.
- Enerji politikaları üretimden tüketime bir bütündür, enerjide bütüncül bir yaklaşım esas olmalıdır. Ülkemiz gerçekleri de göz önüne alınmak şartıyla, enerji sektörünün gerek stratejik önemi, gerekse kaynakların rasyonel kullanımı için düzenleme, planlama, eşgüdüm ve denetleme faaliyetlerinin koordinasyonu açısından özerk ve dikey entegre bir kamusal yapıya ihtiyaç vardır.
- Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi henüz kullanılmayan linyit ve hidroelektrik potansiyelimiz biran önce değerlendirilmelidir.
- Tamamına yakını ithal edilmekte olan Doğalgaza bağımlılığımız biran önce normal seviyelere (%25–30) indirilmelidir. Buna paralel olarak ithalatın yapıldığı ülke sayısı da çeşitlendirilmelidir.
- Yenilenebilir kaynak potansiyelimiz makul destek ve teşviklerle daha büyük ölçüde değerlendirilmeli, enerji tarımı olgusu enerji politikalarına entegre edilmelidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile ilgili orta ve uzun vadede tutarlı hedefler konulmalı, bu hedeflerin gerçekleşmesini sağlayacak stratejiler oluşturularak yol haritaları belirlenmelidir. Hedeflerin gerçekleşmesini takip etmek üzere izleme mekanizmaları oluşturulmalıdır.
- Petrolün en çok kullanıldığı ulaştırma sektöründe alınacak önlemler ile petrol tüketimimizi süratle azaltıcı önlemler alınmalıdır.
- Türkiye'nin bir enerji envanteri çıkarılmalıdır. Planlama, kamusal üretim ve yerli kaynak kullanımını reddeden özelleştirme ve serbestleştirme politikalarından vazgeçilmeli, kamu da özel sektör gibi yatırım yapabilmelidir. Yetişmiş ve nitelikli insan gücümüz özelleştirme uygulamaları ve politik müdahalelerle

tasfiye edilmemelidir. Enerjinin üretimi ve yönetiminde en temel unsur olan insan kaynağımızın eğitimi, istihdamı v.b. konular enerji politikalarının temeli olmalıdır.

Yapılması Planlanan Çalışmalar

Çalışmada temel model girdisi olarak ETKB tarafından gelecek dönemler için tahmini yapılmış nihai enerji sektörlerine ait talep vektörü göz önünde bulundurulmuştur. Modele faydalı enerji vektörü de dahil edilip kaynakların optimal paylaşımı yapılabilir.

Modelde sektörel talep vektörü sabit alınmıştır. Talep vektörünün değişken olduğu durumlar için model çalıştırılabilir ve bütünlük kaynak planlaması (IRP) modeli geliştirilebilir.

Modelde enerjiyi yoğun şekilde kullanan dört ana sektör ele alınmıştır. Bu sektörlerin içerdiği alt sektörler bazında model çalıştırılıp daha ayrıntılı bir şekilde her alt sektöre ait kaynak dağıtımı yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Çevre ve Orman Bakanlığı, “Türkiye Çevre Durum Raporu”, *Çevre ve Orman Bakanlığı 5, Ankara*, 45–76 (2007).
2. Devlet Planlama Teşkilatı, “Uzun vadeli strateji ve dokuzuncu beş yıllık kalkınma planı 2006–2010”, *DPT 26215, Ankara*, 115–176 (2005).
3. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, “2005–2006 Türkiye Enerji Raporu”, *DEKTMK ISSN 1301–6318, Ankara*, 9–38 (2007).
4. Rostamihozori, M.E.N., “Development of energy and emission control strategies for Iran”, Dissertation, *Universität Karlsruhe, Fak. f. Wirtschaftswissenschaften*, Karlsruhe, 58-70 (2002).
5. Amann, M., Haasis, H., D., Plinke, E., Wietschel, M., “Emission control and costs and their influence on international emission reduction strategies”, *Fifth Seminar on Emission Control Stationary Source*, Nürnberg 468-475 (1991).
6. Voss, A., Schlenzig, C., Reuter, A., “MESAP III: A tool for energy planning and environmental management-history and new developments”, *Konferenzen des Forschungszentrums*, Jülich, 265-271 (1995).
7. Beek, N., “Classification of energy models”, Eindhoven University of Technology, *Tilburg University*, 7-16 (1999).
8. Reuter, A., Voss, A., “Tools for energy planning in developing countries”, *Energy Journal*, 15 (7/8): 705-714 (1990).
9. International Atomic Energy Agency, “Computer tools for comparative assessment of electricity generation options and strategies”, *IAEA*, Vienna, Austria, (1995).
10. United Nation ESCAP, “Environment and natural resources development division: Sectoral energy demand analysis and long-term forecast: methodological manual”, *MEDEE-S*, No: ST/ESCAP/1521 (1995).
11. İnternet: Stockholm Environment Institute: What is LEAP?, www.seib.org/leap/ (2008).
12. Schratzenholzer, L., “The energy supply model MESSAGE”, *International Institute for Applied System Analysis, IIASA*, Laxenburg, Austria (1981).
13. Messner, S., Strubegger, M., “User’s Guide for MESSAGE II”, WP-95-69; *International Institute for Applied System Analysis, IIASA*, Laxenburg, Austria, (1995).

14. Russ, P., Criqui, P., "Post-Kyoto CO₂ emission reduction: The soft landing scenario analysed with POLES and other world models", *Energy Policy*, 35 (2): 786-796, (2007).
15. Abilock, H., "MARKAL, A multiperiod linear programming model for energy systems analysis", *Energy Systems Analysis, Proceedings of International Conference on Energy Systems Analysis*, Dordrecht, Netherland, 482-493, (1980).
16. Fishbone, L.G., Abilock, H., "A linear programming model for energy systems analysis: Technical description of the BNL version", *International Journal of Energy Research*, 5 (4): 353-375, (1981).
17. Buehering, W. A., Hamilton, B. P., Guziel, K. A., Cirillo, R. R., "Energy and Power Evaluation Program (ENPEP); An Integrated approach for modeling national energy systems", *Argonne National Laboratory*, (1991).
18. Finon, D., "Scope and limitations of formalized optimization of a national energy system: the case of EFOM model", *Energy Policy, special issue on European Energy modeling*, 56-71 (1979).
19. Gurfel B., "Model of the economic efficiency of the exploitation of oil shale in comparison with other mineral sources of energy", *Applied Energy*, 5: 205-213 (1979).
20. De Musgrove A. R., "A Linear programming analysis of liquid-furl production and use options for Australia", *Energy*, 9: 281-302 (1984).
21. Ellis J. H., McBean E.A, Farquhar G. J., "Deterministic Linear programming model for acid rain abatement", *Journal of Environment and Engineering*, 111: 119-139 (1985).
22. Das T. K., "Multiobjective Linear programming approach to renewable energy policy analysis", *Energy Management*, 55-121 (1987).
23. Satsangi P. S., Sanna E. A. S., "Integrated energy planning model for India with particular reference to renewable energy prospects", Solar Energy Society of India, energy options for the 90's, *McGraw Hill*, New Delhi: Tata, 596-620 (1988).
24. Kydes A. S., "Flow models", *Energy*, 15: 561-571 (1990).
25. Pastemak H., Segal I., Engel H., "Economic evaluation of energy conservation projects with an emphasis on initiation time", *Energy Conversion and Management*, 30: 381-385 (1990).

26. Suganthi L., Jagadeesan T.R., "A modified model for prediction of India's future energy requirement", *International Journal of Energy Environment*, 3: 371-386 (1992).
27. Luhanga M.L., Mwandosya M.J., Luteganya P .R., "Optimization in computerized energy modeling for Tanzania", *Energy*, 18: 1171-1179 (1993).
28. Groscurth H. M., Bruckner T. H., Kummel R., "Modeling of energy-services supply systems", *Energy*, 20: 941-958 (1995).
29. Messner S., Golodnikov A., Gritsevski A., "A stochastic version of the dynamic linear programming model message III", *Energy*, 21: 775-784 (1996).
30. Jeng Wen L., Chia Yon C., "A cost minimization model for coal import strategy", *Energy Policy*, 24: 1111-1117 (1996).
31. Lehtila A., Pirila P., "Reducing energy related emissions: using an energy systems optimization model to support policy planning in Finland", *Energy Policy*, 24: 805-819 (1996).
32. Xie Z., Kuby M., "Supply-side-demand side optimization and cost-environment tradeoffs for China's coal and electricity system", *Energy Policy*, 25: 313-326 (1997).
33. Henning D., "MODEST-An energy system optimization model applicable to local utilities and countries", *Energy*, 22: 1135-1150 (1997).
34. Raja R., Sooriamoorthi C.E., Kanniappan P., Ramachandran T., "Energy planning and optimization model for rural development-a cage of sustainable agriculture", *International Journal of Energy Resource*, 21: 527-548 (1997).
35. Iniyani S., Suganthi L., Jagadeesan T.R., "Renewable energy planning for India in 21st century", *Renewable Energy*, 14: 453-457 (1998).
36. Iniyani S., Sumathy K., Suganthi L., Samuel A.A., "Sensitivity analysis of optimal renewable energy mathematical model on demand variations", *Energy Conversion and Management*, 41: 199-211 (2000).
37. Suganthi L., Williams A., "Renewable energy in India-a modeling study for 2020-2021", *Energy Policy*, 28: 1095-1109 (2000).
38. Iniyani S., Sumathy K., "An optimal renewable energy model for various end-uses", *Energy*, 25: 563-575 (2000).
39. Cormio C., Dicorato M., Minoia A., Trovato M., "A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7: 99-130 (2003).

40. Drozd M., “An optimization model of geothermal-energy conversion”, *Applied Energy*, 74: 75-84 (2003).
41. Gong M., “Optimization of industrial energy systems by incorporating feedback loops into the MIND method”, *Energy*, 28: 1655-1669 (2003).
42. Berglund, C., Söderholm, P., “Modeling technical change in energy system analysis: analyzing the introduction of learning-by-doing in bottom-up energy models”, *Energy Policy*, 34: 1344-1356 (2006).
43. Urban, F., Benders, R.M.J., Moll, H.C., “Modelling energy systems for developing countries”, *Energy Policy*, 35: 3473–3482 (2007).
44. Shrestha, R.M., Malla, S., Liyanage, M.H., “Scenario-based analyses of energy system development and its environmental implications in Thailand”, *Energy Policy*, 35: 3179–3193 (2007).
45. Sohn, I., Binaghi, C., Güngör, P., “Long-term energy projections: What lessons have we learned?”, *Energy Policy*, 35: 4574–4584 (2007).
46. Barker, T., Ekins, P., Foxon, T., “Macroeconomic effects of efficiency policies for energy-intensive industries: The case of the UK Climate Change Agreements, 2000–2010”, *Energy Economics*, 29: 760–778 (2007).
47. Kancs, A., Wohlgemuth, N., “Evaluation of renewable energy policies in an integrated economic-energy-environment model”, *Forest Policy and Economics*, 10: 128–139 (2008).
48. Özgür, M.A., “Review of Turkey’s renewable energy potential”, *Renewable Energy*, 33: 2345–2356 (2008).
49. Bilen, K., Ozyurt, O., Bakırcı, K., Karlı, S., Erdogan, S., Yılmaz, M., Comaklı, O., “Energy production, consumption, and environmental pollution for sustainable development: A case study in Turkey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(6): 1529-1561 (2008).
50. İnternet: Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, http://www.enerji.gov.tr/EKLENTI_VIEW/index.php/raporlar/detaySec/4043 (2008)
51. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, "2002 Enerji İstatistikleri", *Türkiye 9. Enerji Kongresi*, İstanbul, 17-152 (2003).
52. Tiris, M., Türe, İ.E., Ekin, E., “Energy and environment strategies in Turkey”, *Renewable Energy*, 9(1-4): 1171-1174 (1996).

53. Ocak, M., Ocak, Z., Bilgen, S., Keleş, S., Kaygusuz, K., “Energy utilization, environmental pollution and renewable energy sources in Turkey”, *Energy Conversion and Management*, 45(6): 845-864 (2004).
54. Demirbaş, A., “Energy and environmental issues relating to greenhouse gas emissions in Turkey”, *Energy Conversion and Management*, 44(1): 203-213 (2003).
55. Akpınar, A., Kömürcü, M.İ., Kankal, M., Özölçer, İ.H., Kaygusuz, K., “Energy situation and renewables in Turkey and environmental effects of energy use”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(8): 2013-2039 (2008).
56. Çevre Envanteri Dairesi Başkanlığı, “Türkiye Çevre Durum Raporu”, *Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara*, 203-216 (2007).
57. Modiano E.M., Shapiro J.F., “A dynamic optimization model of depletable resources”, *Bell Journal of Economics*, 11: 212-236 (1980).
58. Shapiro J.F., White D.E., “A hybrid decomposition method for integrating coal supply and demand models”, *Operations Research*, 30(5): 887-906 (1982).
59. Dantzig G.B., Wolfe P., “Decomposition Principle for Linear Programs”, *Operations Research*, 8,(1): 101-111 (1960).
60. Dantzig G.B., Wolfe P., “The Decomposition Algorithm for Linear Programs”, *Econometrica*, 29: 767-778 (1961).
61. Freeland J.R., Moore J.H., “Implications of Resource Directive Allocation Models for Organizational Design”, *Management Science*, 23(10): 1050-1059 (1977).
62. Benders J.F., “Partitioning Procedures for solving Mixed-Variables Programming Problem”, *Numerische Mathematik*, 4: 238-252 (1962).
63. Geoffrion A.M., “Generalized Benders Decomposition”, Working Paper No: 159, *Western Management Science Institute, UCLA*, (1970).
64. Rosen J.B., Ornea J.C., “Solution of Nonlinear Programming Problem by Partitioning”, *Management Sciences*, 10(1): 93-98 (1963).
65. Rosen J.B., “Primal Partition Programming for Block Diagonal Matrices”, *Numerische Mathematic*, 6(3): 250-260 (1964).
66. Pigot D., “Double decomposition d’un Programme Lineaire”, *Actes de la 3e, Conference Internationale de Recherche Operationelle*, 72-78 (1964).
67. Nemhauser G.L., “Decomposition of Linear Programs Dynamic Programming”, *Naval Research Logistic Quarterly*, 11(2): 191-196 (1964).

68. Molina, F.W., “A Resource Directive Decomposition Method for Mathematical Programming Based on Lagrangean Theory”, (Phd), *Operations Research*, Los Angeles, 18-30 (1977)
69. Oostvoorn F., Brock M., Harmelen T., Arkel W., “EFOM-ENV:GAMS version”, *ESC-Energy Studies*, Petten, 3-25 (1991).
70. Rentz O., Plinke E., Atak M., Haasis H. D., “Analysis of the Turkish energy supply system and its environmental impact in the frame of the harmonization of emission control policies in the European Community”, *Institute for Industrial Production (IIP)*, University of Karlsruhe(TR), 131-145 (1992).
71. Sarucan, A., “Çevre Etkileşimli Enerji Sistemlerinin Bulanık Optimizasyonu”, (Doktora), *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 48-64 (2006)
72. Brooke A., Kendrick D., Meeraus A., Raman R., Rosenthal R.E., “GAMS: A User’s Guide”, *Scientific Press*, Redwood City, 1-163 (2003).

EKLER

EK-1 Ayırıştırma Yöntemi için Sayısal Örnek

$$Z_{\max} = 90x_1 + 80x_2 + 70x_3 + 60x_4$$

$$3x_1 + x_2 \leq 12$$

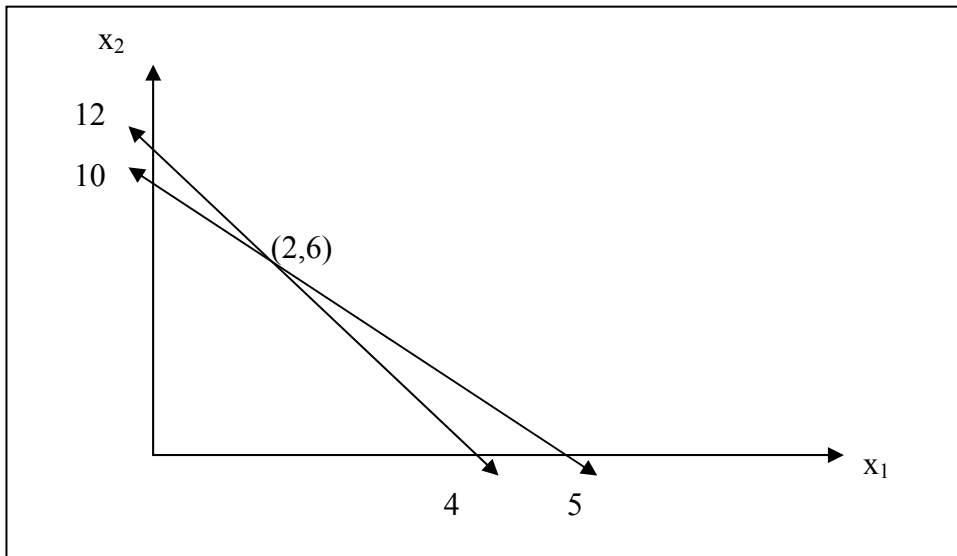
$$2x_1 + x_2 \leq 10$$

$$3x_3 + 2x_4 \leq 15$$

$$x_3 + x_4 \leq 4$$

$$8x_1 + 6x_2 + 7x_3 + 5x_4 \leq 80$$

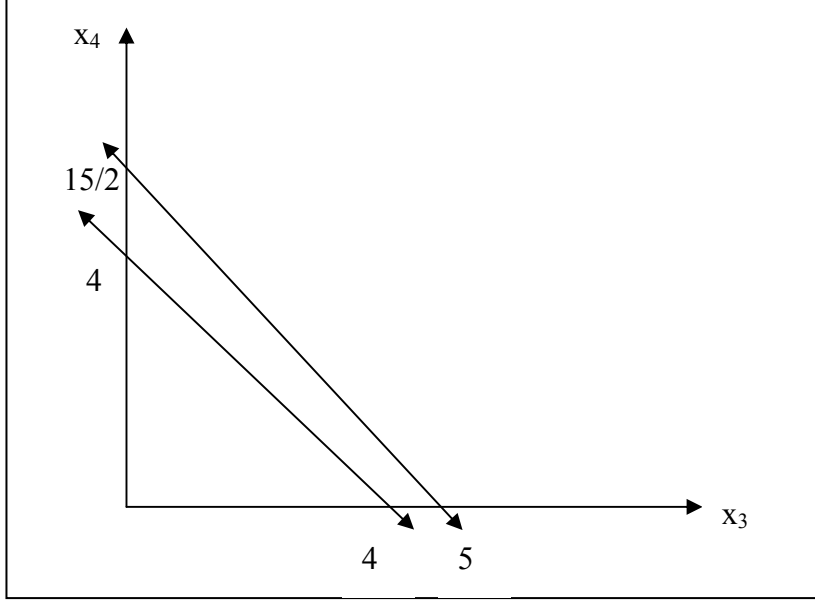
$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

Şekil 1.1. x_1 ve x_2 değişkenine ait grafik

Uç noktalar $(0,0)$, $(4,0)$, $(2,6)$, $(0,10)$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \mu_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mu_2 \begin{bmatrix} 4 \\ 0 \end{bmatrix} + \mu_3 \begin{bmatrix} 2 \\ 6 \end{bmatrix} + \mu_4 \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4\mu_2 + 2\mu_3 \\ 6\mu_3 + 10\mu_4 \end{bmatrix}$$

EK-1 (Devam) Ayrıştırma yöntemi için sayısal örnek

Şekil 1.2. x_3 ve x_4 değişkenine ait grafik

Uç noktalar $(0,0)$, $(4,0)$, $(0,4)$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \lambda_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda_2 \begin{bmatrix} 4 \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4\lambda_2 \\ 4\lambda_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} Z &= 90(4\mu_2 + 2\mu_3) + 80(6\mu_3 + 10\mu_4) + 70(4\lambda_2) + 60(4\lambda_3) \\ &= 360\mu_2 + 660\mu_3 + 800\mu_4 + 280\lambda_2 + 240\lambda_3 \end{aligned}$$

$$8(4\mu_2 + 2\mu_3) + 6(6\mu_3 + 10\mu_4) + 7(4\lambda_2) + 5(4\lambda_3) \leq 80$$

$$32\mu_2 + 52\mu_3 + 60\mu_4 + 28\lambda_2 + 20\lambda_3 \leq 80$$

$$Z_{\max} = 360\mu_2 + 660\mu_3 + 800\mu_4 + 280\lambda_2 + 240\lambda_3$$

$$32\mu_2 + 52\mu_3 + 60\mu_4 + 28\lambda_2 + 20\lambda_3 + s_1 \leq 80$$

$$\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4 = 1$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$$

$$\mu_i, \lambda_i \geq 0$$

EK-1 (Devam) Ayrıştırma yöntemi için sayısal örnek

Temel değişkenler $BV(0) = \{s_1, \mu_1, \lambda_1\}$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B_0^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_{BV} B_0^{-1} = [0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [0 \quad 0 \quad 0]$$

$$\mu_i = \begin{bmatrix} 8x_1 + 6x_2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{BV} B_0^{-1} \begin{bmatrix} 8x_1 + 6x_2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} - (90x_1 + 80x_2) = -90x_1 - 80x_2$$

Alt problem 1:

$$Z_{\min} = -90x_1 - 80x_2$$

$$3x_1 + x_2 \leq 12$$

$$2x_1 + x_2 \leq 10$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

$$Z = -800 \quad x_1 = 0, x_2 = 10$$

$$P_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \end{bmatrix}$$

EK-1 (Devam) Ayrıştırma yöntemi için sayısal örnek

$$\lambda_i = \begin{bmatrix} 7x_3 + 5x_4 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C_{BV} B_0^{-1} \begin{bmatrix} 7x_3 + 5x_4 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} - (70x_3 + 60x_4) = -70x_3 - 60x_4$$

$$Z_{\min} = -70x_3 - 60x_4$$

$$3x_3 + 2x_4 \leq 15$$

$$x_3 + x_4 \leq 4$$

$$x_3, x_4 \geq 0$$

$$Z = -280 \quad x_3 = 4, x_4 = 0 \quad \mu_1 \text{ temele girer.}$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 4 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -60 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_{BV} B_1^{-1} = [0 \quad 800 \quad 0] \begin{bmatrix} 1 & -60 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [0 \quad 800 \quad 0]$$

$$C_{BV} B_1^{-1} \begin{bmatrix} 8x_1 + 6x_2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} - (90x_1 + 80x_2) = 800 - 90x_1 - 80x_2$$

EK-1 (Devam) Ayırıştırma yöntemi için sayısal örnek

Alt problem 2:

$$\begin{aligned} Z_{\min} &= 800 - 90x_1 - 80x_2 \\ 3x_1 + x_2 &\leq 12 \\ 2x_1 + x_2 &\leq 10 \\ x_1, x_2 &\geq 0 \end{aligned}$$

$$Z = 0 \quad x_1 = 0, x_2 = 10$$

$$C_{BV} B_1^{-1} \begin{bmatrix} 7x_3 + 5x_4 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} - (70x_3 + 60x_4) = -70x_3 - 60x_4$$

$$Z = -280 \quad x_3 = 4, x_4 = 0 \quad \lambda_2 \text{ temele girer.}$$

$$BV(2) = \{\lambda_2, \mu_4, \lambda_1\}$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 4 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1/28 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1/28 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -60 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/28 & -60/28 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1/28 & 60/28 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_{BV} \cdot B_2^{-1} = [280 \quad 800 \quad 0] \begin{bmatrix} 1/28 & -60/28 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1/28 & 60/28 & 1 \end{bmatrix} = [10 \quad 200 \quad 0]$$

$$\lambda_2 \rightarrow 70x_3 + 60x_4 = 70 \cdot 4 + 60 \cdot 0 = 280$$

EK-1 (Devam) Ayrıştırma yöntemi için sayısal örnek

$$\mu_4 \rightarrow 90x_1 + 80x_2 = 90 \cdot 0 + 80 \cdot 10 = 800$$

$$C_{BV} B_2^{-1} \begin{bmatrix} 8x_1 + 6x_2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} - (90x_1 + 80x_2) = 200 - 10x_1 - 20x_2$$

$$Z_{\min} = 200 - 10x_1 - 20x_2$$

$$3x_1 + x_2 \leq 12$$

$$2x_1 + x_2 \leq 10$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

$$Z = 0 \quad x_1 = 0, x_2 = 10$$

$$C_{BV} B_2^{-1} \begin{bmatrix} 7x_3 + 5x_4 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} - (70x_3 + 60x_4) = -10x_4$$

$$Z_{\min} = -10x_4$$

$$3x_3 + 2x_4 \leq 15$$

$$x_3 + x_4 \leq 4$$

$$x_3, x_4 \geq 0$$

$$Z = -40 \quad x_3 = 0, x_4 = 4 \quad \lambda_3 \text{ temele girer.}$$

$$BV(3) = \{\lambda_3, \mu_4, \lambda_1\}$$

$$Q_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \end{bmatrix}$$

EK-1 (Devam) Ayırıştırma yöntemi için sayısal örnek

$$B_3^{-1} = \begin{bmatrix} 28/20 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -2/5 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/28 & -60/28 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1/28 & 60/28 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/20 & -3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1/20 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_3 \rightarrow 70x_3 + 60x_4 = 70.0 + 60.4 = 240$$

$$\mu_4 \rightarrow 90x_1 + 80x_2 = 90.0 + 80.10 = 800$$

$$\lambda_1 \rightarrow 0$$

$$C_{BV} \cdot B_3^{-1} = [240 \quad 800 \quad 0] \begin{bmatrix} 1/20 & -3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1/20 & 3 & 1 \end{bmatrix} = [12 \quad 80 \quad 0]$$

$$C_{BV} B_3^{-1} \begin{bmatrix} 8x_1 + 6x_2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} - (90x_1 + 80x_2) = 80 - 6x_1 - 8x_2$$

Alt problem 3:

$$Z_{\min} = 80 - 6x_1 - 8x_2$$

$$3x_1 + x_2 \leq 12$$

$$2x_1 + x_2 \leq 10$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

$$Z = 0 \quad x_1 = 0, x_2 = 10$$

$$C_{BV} B_3^{-1} \begin{bmatrix} 7x_3 + 5x_4 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} - (70x_3 + 60x_4) = -14x_3$$

EK-1 (Devam) Ayrıştırma yöntemi için sayısal örnek

$$Z_{\min} = -14x_3$$

$$3x_3 + 2x_4 \leq 15$$

$$x_3 + x_4 \leq 4$$

$$x_3, x_4 \geq 0$$

$$Z = 0 \quad x_3 = 0, x_4 = 4 \quad \text{BV}(3) = \{\lambda_3, \mu_4, \lambda_1\}$$

$$B_3^{-1} \cdot b = \begin{bmatrix} 1/20 & -3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1/20 & 3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 80 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0P_1 + 0P_2 + 0P_3 + 0P_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = 0Q_1 + 0Q_2 + 0Q_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \end{bmatrix}$$

$$\text{Optimal Çözüm: } x_1 = 0, x_2 = 10, x_3 = 0, x_4 = 4 \quad Z_{\max} = 1040$$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILMAZ, Mustafa
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 27.05.1973 Sivas
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 5823813
 e-mail : mustafay@gazi.edu.tr.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Endüstri Müh. Bölümü	2003
Lisans	Selçuk Üniversitesi/Endüstri Müh. Bölümü	1998
Lise	Sivas Anadolu Lisesi	1991

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1999–2000	Atatürk Üniversitesi	Araş. Görevlisi
2000–2009	Gazi Üniversitesi	Araş. Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Makaleler

1. Yılmaz M., Atak M., “Amaç Fonksiyonu kısıtlı Ulaştırma Problemlerinde Tamsayılı Bulanık Optimizasyon”, Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Dergisi, 2(2), 57-72 (2003).
2. Yılmaz M., Atak M., “Decomposition Analysis of Sectoral Energy Consumption”, Energy Sources Part: B (basım aşamasında).

3. Toksarı M.D., Yılmaz M., Atak M., Güner E., “Estimating transport energy demand of Turkey based on variable neighborhood search (VNS) approach”, Energy Sources Part: B (basım aşamasında).
4. Yılmaz M., Atak M., “Analysis of CO₂ Emissions from Turkey’s Industrial Sub-sector using Decomposition Analysis for 1990-2005” (incelemede).

Bildiriler

1. Yılmaz M., Atak M., Sarucan A., Kaynak tabanlı ayrıştırma yöntemi ile enerji sistemlerinin optimizasyonu, Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği XXVI. Ulusal Kongresi, Kocaeli (2006).
2. Sarucan A., Atak M., Yılmaz M. "Enerji Talebinin Bulanık olduğu Durumda Birincil Enerji kaynaklarının Planlanması", Türkiye 10. Enerji Kongresi, 235–249, İstanbul (2006).
3. Yılmaz M., Atak M., Sanayi ana sektörleri enerji tüketiminin 1980–2005 yılları için ayrıştırma yöntemi ile analizi, Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği XXVII. Ulusal Kongresi, İzmir (2007).