

**ÇEVRE ETKİLEŞİMLİ ENERJİ SİSTEMLERİNİN BULANIK
OPTİMİZASYONU**

Ahmet SARUCAN

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Şubat 2006
ANKARA**

Ahmet SARUCAN tarafından hazırlanan ÇEVRE ETKİLEŞİMLİ ENERJİ SİSTEMLERİNİN BULANIK OPTİMİZASYONU adlı bu tezin doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Yrd. Doç. Dr. Mehmet ATA
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Orhan TÜRKBEY



Üye : Prof. Dr. Ahmet PEKER



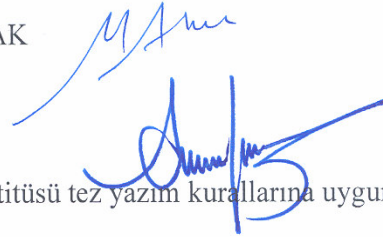
Üye : Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN



Üye : Doç. Dr. Abdullah EROĞLU



Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet ATA



Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

ÇEVRE ETKİLEŞİMLİ ENERJİ SİSTEMLERİNİN BULANIK OPTİMİZASYONU

(Doktora Tezi)

Ahmet SARUCAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Şubat 2006

ÖZET

Bu tezde Türkiye'nin çevre etkileşimli enerji sistemi analiz edilerek, bulanık doğrusal programlama ile modellenmiştir. İlk önce, ulusal mevcut enerji sistemi ve çevresel görünümü incelenmiştir. Daha sonra, bu sistemlerin şebeke kökenli matematiksel modellemesi yapılmıştır. Söz konusu analizlere uygun karar destek aracı olarak şebeke gösterimli doğrusal optimizasyon modeli olan EFOM-ENV (Energy Flow Optimization Modeling-ENVironmental) seçilmiştir. Bu optimizasyon modelinde tüm enerji sektörü, aralarındaki ilişkilerin doğrusal denklemlerle ifade edildiği modüler bir yapı ilişkisi içinde ele alınmaktadır. Modelin amacı, sisteme dışsal girilen enerji talebini karşılayacak enerji üretim ve emisyon azaltım maliyetlerini minimize etmektir.

Türkiye Enerji Sisteminin matematiksel modeli ayrıntılı olarak tanımlanmış ve sektörel bazda EFOM-ENV yapısal modeli geliştirilmiştir. Model öncelikli olarak dışsal girilen talep vektörü yönlü çalışması ve bu vektör elemanlarında bir bulanıklık söz konusu olması nedeniyle doğrusal programlama modeli, bulanık doğrusal programlama modeli şeklinde yeniden düzenlenmiştir. Bu modelin çözümü için bir algoritma geliştirilmiştir. Doğrusal optimizasyon çok dönemli olup zaman aralığı 2000-2030 yıllarını kapsamaktadır ve bu zaman aralığı da 5'şer yıllık 6 döneme ayrılmıştır. Oluşturulan veri setine göre kesin ve

bulanık model çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sonuçta bulanık doğrusal modelin kesin modele göre daha üstün olduğu gösterilmiştir.

Bilim Kodu : 919
Anahtar Kelimeler : Enerji, Çevre, Modelleme, Bulanık Doğrusal Programlama
Sayfa Adedi : 165
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Mehmet ATAĞ

FUZZY OPTIMIZATION OF ENVIRONMENTAL INTERACTED ENERGY SYSTEMS

(Ph.D. Thesis)

Ahmet SARUCAN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

February 2006

ABSTRACT

In this thesis, Turkey's environmental interactive national energy system is analyzed, and modeled with fuzzy linear programming. Firstly, current status of the national energy system and its environmental view is analyzed. Then, the Network based mathematical modeling of these systems are carried out. For these analysis, consistent decision support model based on network representation, EFOM-ENV (Energy Flow Optimization Modeling-ENVironmental), is selected. In this optimization modeling, the whole energy system is handled through modular structures, in those all interrelations are formulated by means of linear equations. The aim of the model is, to minimize the total cost as a result of production, conversion and transportation of the primary energy forms to meet the exogenously inserted demand for primary energy, and the costs resulting from the reduction of related emissions from these activities.

Mathematical modeling of the Turkey's national energy system is defined in detail, and sectoral basis of the structural model of EFOM-ENV is developed. Since the model is driven by the exogenously given demand vector, and there is a fuzziness, which has been observed in the elements of the demand vector, the linear optimization modeling has been revised as fuzzy linear programming. A consistent solution algorithm has been developed and adapted to the model. The

linear programming is multiperiod and covers a planning range of 2000-2030. This period is further considered as 6 periods, each having 5 years, called also as milestone years. According to the constructed data set, the model is run and the results are presented comparatively. Finally, it is shown that the fuzzy linear model out performed crisp model.

Science Code	: 919
Key Words	: Energy, Environment, Modelling, Fuzzy Linear Programming
Page Number	: 165
Adviser	: Assist. Prof. Dr. Mehmet ATAĞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet ATAĞ'a, yapıcı yönlendirmelerinden dolayı Prof. Dr. Orhan TÜRKBEY ve Prof. Dr. Ahmet PEKER'e, maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan Dr. M. Emin BAYSAL, İsmail KARAOĞLAN, Hakan ÇERÇİOĞLU, Elif KILIÇ, Ü. Sami SAKALLI, Duran TOKSARI ve çok değerli mesai arkadaşlarıma, özverili desteklerinden dolayı aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	6
2.1. Enerji Çevre Modellerine Genel Bir Bakış	6
3. TÜRKİYE’NİN ENERJİ VE GÜÇ SEKTÖRÜNE GENEL BİR BAKIŞ	20
3.1. Birincil Enerji Kaynakları ve Üretim Durumları	23
3.1.1. Linyit.....	24
3.1.2. Taşkömürü	26
3.1.3. Asfaltit	27
3.1.4. Petrol.....	27
3.1.5. Doğal gaz	29
3.1.6. Yenilenebilir enerji kaynakları	29
3.2. İkincil Enerji Üretim Seviyeleri	34
3.3. Nihai Enerji Sektörleri ve Talep Projeksiyonları	35
3.4. Türkiye’nin Çevre Görünümüne Genel Bir Bakış ve Emisyon Standardları ..	37
3.5. Emisyon Kontrol Önlemleri ve Yönetmelikler	42

	Sayfa
4. EFOM-GAMS İLE ULUSAL ENERJİ SİSTEMİNİN VE ALT SEKTÖRLERİN MODELLENMESİ	48
4.1. Türkiye için EFOM-ENV Model Versiyonu.....	48
4.2. Ulusal Enerji Sektörleri	56
4.2.1. Birincil enerji arz sektörleri	57
4.2.2. İkincil enerji sektörleri.....	61
4.2.3. Talep sektörleri	64
5. BULANIK DOĞRUSAL PROGRAMLAMA VE TÜRK ENERJİ-TALEP SEKTÖRÜNÜN MODELLENMESİ	67
5.1. Bulanık Küme Teorisi	67
5.2. Bulanık Doğrusal Programlama Problemi	71
5.2.1. Doğrusal programlamada bulanıklık durumu	74
6. ÖNERİLEN ALGORİTMA.....	81
6.1. Bulanık Enerji Çevre Modeli	82
6.2. Bulanık Enerji-Çevre Modeli için Önerilen Algoritma.....	84
6.3. Önerilen Algoritmanın Uygulanması	87
7. EFOM-ENV/GAMS MODELİNİN TÜRKİYE İÇİN UYGULANMASI	91
7.1. Referans Enerji Senaryosu	91
7.2. Yasal Senaryo.....	98
7.3. Maliyet Etkin Senaryo.....	101
7.4. Bulanık Model Sonuçları.....	104
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	110
KAYNAKLAR	114
EKLER.....	123

	Sayfa
EK-1 2000 Yılı genel enerji dengesi	124
EK-2 2000 Yılı Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına ve üretici kuruluşlara göre gelişimi	125
EK-3 İhalesi yapılan baca gazı tesisleri projelerine ait bilgiler	126
EK-4 ETKB senaryosuna göre genel enerji denge tabloları	127
EK-5 FEC1 senaryosuna göre genel enerji denge tabloları	134
EK-6 FEC2 senaryosuna göre genel enerji denge tabloları	141
ÖZGEÇMİŞ	148

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Türkiye birincil enerji kaynakları rezervi	23
Çizelge 3.2. Türkiye linyit rezervlerinin sınıflandırılması.....	25
Çizelge 3.3. Türkiye taşkömürü rezervleri.....	26
Çizelge 3.4. Filonlar itibariyle Türkiye asfaltit rezervleri.....	27
Çizelge 3.5. 2000 yılı petrol ürünleri ithalat, ihracat ve üretimi	28
Çizelge 3.6. 2002 yılı itibariyle Türkiye ham petrol rezervleri.....	29
Çizelge 3.7. 2002 yılı itibariyle Türkiye doğal gaz rezervleri	30
Çizelge 3.8. 2002 yılı itibariyle Türkiye orman potansiyeli	30
Çizelge 3.9. 2002 sonu itibariyle Türkiye hidrolik potansiyelinin havzalara dağılımı	31
Çizelge 3.10. Güneş enerjisi potansiyeli	32
Çizelge 3.11. Bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli	32
Çizelge 3.12. Bölgelere göre rüzgar potansiyeli	33
Çizelge 3.13. Elektrik enerjisi kurulu güç-üretim ve tüketimin gelişimi	34
Çizelge 3.14. Elektrik enerjisi tüketiminin sektörlere dağılımı	35
Çizelge 3.15. Türkiye’deki termik santrallerin adları ve diğer bilgiler.....	39
Çizelge 3.16. SO ₂ emisyon faktörleri.....	41
Çizelge 3.17. NO _x emisyon faktörleri	41
Çizelge 3. 18. Termik santrallerin kontrol cihazı öncesi hesaplanan emisyon faktörleri	42
Çizelge 3.19. Türk emisyon standardı	43
Çizelge 3.20. Mevcut santrallarda hava kirliliği azaltım sistemleri.....	45
Çizelge 5. 1. Bulanık doğrusal programlamada bulanıklık türleri	72

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.1. Bulanık model sonuçlarına göre birincil enerji tüketimi	105
Çizelge 7.1. (Devam) Bulanık model sonuçlarına göre birincil enerji tüketimi	106
Çizelge 7.2. Bulanık model sonuçlarına göre SO ₂ emisyonlarının gelişimi	107
Çizelge 7.3. Bulanık model sonuçlarına göre NO _x emisyonlarının gelişimi	108

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Enerji-çevre araçlarının yapısı	8
Şekil 3.1. Farklı talep senaryoları için enerji tüketimleri.....	36
Şekil 3.2. Birincil enerji kaynakları üretimi.....	37
Şekil 4.1. Türkiye EFOM-ENV modelinin yapısı	57
Şekil 4.2. EFOM-ENV/GAMS ağı: Türkiye kömür sektörü	59
Şekil 4.3. EFOM-ENV/GAMS: Türkiye doğal gaz sektörü	59
Şekil 4.4. EFOM-ENV/GAMS ağı: Türkiye petrol sektörü	60
Şekil 4.5. EFOM-ENV/GAMS ağı: Türkiye'nin merkezi elektrik sektörü	62
Şekil 4.6. EFOM-ENV/GAMS ağı: Türkiye endüstriyel otoprodüktörler ve sanayi sektörü.....	63
Şekil 4.7. EFOM-ENV/GAMS ağı: Türkiye kent güç (ısı-elektrik kombine) sektörü.....	64
Şekil 4.8. EFOM-ENV/GAMS ağı: Bölgesel ısınma sektörü.....	64
Şekil 4.9. Ulaştırma sektörü	65
Şekil 4.10. Konut sektörü.....	65
Şekil 4.11. Tarım sektörü	66
Şekil 5.1. Klasik ve bulanık kümeler için üyelik fonksiyonları.....	68
Şekil 5.2. Azalan üyelik fonksiyonu	73
Şekil 5.3. Artan üyelik fonksiyonu	73
Şekil 5.4. Üçgensel üyelik fonksiyonu.....	74
Şekil 5.5. Yamuk tipli üyelik fonksiyonu	74
Şekil 6.1. Bulanık enerji-çevre modeli için bir çözüm algoritması.....	86
Şekil 6.2. ETKB'nin bulanık talep projeksiyonları.....	88

Şekil	Sayfa
Şekil 6.3. Talep vektörü üçgensel üyelik fonksiyonunun t döneminde genel gösterimi.....	89
Şekil 7.1. Birincil enerji tüketimi - referans durumu	92
Şekil 7.2. Elektrik üretimi-referans durumu	93
Şekil 7.3. Birincil enerji kaynaklarına göre santralların kapasiteleri referans durumu	94
Şekil 7.4. SO ₂ emisyonlarının gelişimi - referans durumu.....	95
Şekil 7.5. NO _x emisyonlarının gelişimi - referans durum	95
Şekil 7.6. Farklı enerji talep projeksiyonları için SO ₂ emisyonlarının gelişimi.....	97
Şekil 7.7. Farklı enerji talep projeksiyonları için NO _x emisyonlarının gelişimi.....	97
Şekil 7.8. Elektrik üretimi – FEC1	98
Şekil 7.9. Elektrik üretimi – FEC2.....	98
Şekil 7.10. SO ₂ emisyonları gelişimi – referans ve yasal durumu için	99
Şekil 7.11. NO _x emisyonları gelişimi – referans ve yasal durumu için	100
Şekil 7.12. Farklı talep projeksiyonları için indirim oranı gelişimi	100
Şekil 7.13. Farklı talep projeksiyonları için faiz oranı gelişimi	101
Şekil 7.14. SO ₂ azaltımı için maliyet fonksiyonu	102
Şekil 7.15. NO _x azaltımı için maliyet fonksiyonu.....	102
Şekil 7.16. SO ₂ emisyonu kontrol yöntemlerinin sıralanışı	103
Şekil 7.17. NO _x emisyonu kontrol yöntemlerinin sıralanışı	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
btep	Bin ton petrol eşdeğeri
GWh	Gigawatt-saat
kcal/kg	Bir kilogramdaki kilo kalori
kWh	Kilowatt-saat
m³	Metreküp
Mtep	Milyon ton petrol eşdeğeri
MW	Megawatt
PJ	Peta Joule
S	Kükürt
sn	Saniye
tep	Ton petrol eşdeğeri
W	Watt
Kısaltmalar	Açıklama
AID	Alt Isıl Değer
BDP	Bulanık Doğrusal Programlama
BESOM	Brookhaven enerji sistemi optimizasyon modeli
BNL	Brookhaven Ulusal Laboratuvarı
BOTAŞ	Boru Hatları ile Petrol Taşımacılığı Anonim Şirketi
ÇED	Çevresel Etki Değerlendirme
DİE	Devlet İstatistik Enstitüsü
DSİ	Devlet Su İşleri
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
EFOM	Enerji akış optimizasyon modeli

Kısaltmalar	Açıklama
EFOM-ENV	Çevresel enerji akış optimizasyon modeli
EİEİ	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
ENPEP	Enerji ve güç değerlendirme programı
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
EÜAŞ	Elektrik Üretim Anonim Şirketi
FGD	Baca gazı arıtma sistemleri
GSMH	Gayri Safi Milli Hâsıla
GSYİH	Gayri Safi Yurt İçi Hâsıla
IAEA	Uluslar Arası Atom Enerjisi Kurumu
IIASA	Uluslararası Uygulamalı Sistemler Analiz Enstitüsü
IIP	Endüstriyel Üretim Enstitüsü
KDP	Klasik Doğrusal Programlama
LEAP	Uzun vade enerji alternatifleri planlama sistemi
MAED	Enerji talebinin analizi modeli
MEDEE	Avrupa için enerji talep modeli
MESSAGE	Enerji arz sistemleri analizi modeli ve bunların genel çevresel etkileri
MESAP	Modüler enerji sistem analizi ve planlama yazılımı
MIND	Çok periyotlu maliyet optimizasyon modeli
MODEST	Enerji sistemi optimizasyon modeli
MPEE	Enerji ekonomi ortam modeli
MTA	Maden Tetkik Arama
OREM	Optimal yenilenebilir enerji modeli
PİGM	Petrol İşleri Genel Müdürlüğü
POLES	Uzun dönemli enerji sistemleri modeli
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TESOM	Zaman adımlı enerji sistemi optimizasyon modeli
TETAŞ	Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi

Kısaltmalar**Açıklama****TKİ**

Türkiye Kömür İşletmeleri

TPAO

Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı

TTK

Türkiye Taşkömürü Kurumu

TÜPRAŞ

Türkiye Petrol Rafineleri Anonim Şirketi

1. GİRİŞ

Enerjide doyma noktasına ulaşmış olan batı ülkelerinde enerji politikaları, daha az enerji ile daha fazla faydayı, daha temiz ve güvenilir enerji elde etmeyi hedeflemek üzere oluşturulmuştur. Kalkınma süreci içerisinde olan Türkiye’de ise enerji tüketim seviyeleri, gerek fert başına birincil enerji, gerekse fert başına elektrik enerjisi tüketimleri, gelişmiş ülkelerin çok gerisindedir.

Dünya pazarlarında Türkiye’nin rekabet gücünü artırmak üzere ekonomiyi büyütecek ve yaşam standartlarını yükseltecek yeterli, sürekli ve temiz enerjinin temini için enerji hedefi VIII. beş yıllık kalkınma programında şu şekilde belirlenmiştir: Sürdürülebilir bir kalkınma yaklaşımı içinde, ekonomik ve sosyal gelişimi destekleyecek, çevreyi en az düzeyde tahrip edecek, asgari miktar ve maliyette enerji tüketimi ve arzı hedef alınmalıdır (1).

Türkiye’de, özellikle 1950’li yıllardan sonra, sanayileşme, şehirleşme, gelir seviyesinin yükselmesi ve hızlı nüfus artışına paralel olarak gelişen enerji tüketimi, yerli kaynak üretimi ile karşılanamayacak boyutlara ulaşmıştır. Oluşan enerji açığını karşılamadaki acil ve en ucuz kaynak ise dış alımla elde edilen petrol ve petrol ürünleri olmuştur. Ancak 1973 yılında yaşanan petrol krizleri sonucunda, enerji kısıtlamasına gidilmiş ve yerli kaynaklardan enerji üretimine hız verilmiştir. Elektrik üretimi için hidrolik santrallerin ve yeni linyit santrallerin yapılması, bu politikanın doğal sonucu olmuştur. Ancak kısa ve orta vadede alınan bu tedbirlerin sonucunda, özellikle düşük kaliteli linyit tüketiminin meydana getirdiği bir çok çevre kirliliği problemleri yaşanmıştır (2).

Öte yandan enerji sektöründeki gelişmeleri etkileyen pek çok etken mevcuttur. Global ekonomik gelişmeler, enerji kaynaklarının üretim ve kullanım düzeyleri, emisyonların sınırları ve sera gazı etkisi nedenleriyle ülkeler arası enerji-çevre ilişkilerini düzenleyici anlaşmalar bu etkenlerden bazılarıdır.

Bu tezde; ekonomik, siyasi ve çevresel kısıtlar belli bir teknik-ekonomik yaklaşımla dikkate alındığında çözümlenmeye çalışılan problem: “Türkiye’nin 2030 yılına kadar dışarıdan empoze edilen nihai enerji talep ve bulanık enerji talep projeksiyonları altında çevresel kısıtları karşılayacak olan planlama döneminde; birincil enerji kaynaklarının miktarı, teknolojik kapasite ihtiyaçları ve yatırımların maliyet gelişimi ne olacaktır?” sorusuna cevap aramaktır.

Bu şekilde uzun zaman aralıklı ve çok kriterli bir problemin çözümü EFOM-ENV modeli gibi çok amaçlı bir modelin kullanımını gerektirmektedir. Enerji sistem modeli ayrıştırılmış bir yolla modellenmiş ve politik, ekonomik ve çevresel kısıtlarla sınırlandırılmıştır. Dinamik bir sistem olarak, enerji üretimi sektörünün ana görevi arz ve talep arasındaki dengenin sürekli bir şekilde sağlanmasını temin etmektir.

Bu çalışmada temel amaç, ulusal enerji sistemin mevcut yapısının analiz edilmesi, bunun bir modele oturtulması, ayrıca gelecek yıllar için tahmin edilen talebi ve bu talebin bulanıklık boyutunu karşılayacak olan üretim-çevre tümleşik alternatiflerin ortaya konulmasıdır.

EFOM-ENV modelinin Türkiye için geliştirilmiş versiyonu, ülkenin enerji ve çevre durumunu tam olarak temsil edebilmektedir. Bu modelle yukarıda bahsedilen ana amaca ulaşabilmek için aşağıdaki sorulara cevap aranmıştır.

- Türkiye’de 2000–2030 yılları arasında enerji talebini karşılayacak optimal enerji tedarik stratejisinin çevresel etkileri ve maliyeti nedir?
- Türkiye’de minimum maliyetle enerji arzı sağlamak için hangi enerji dönüşüm ve emisyon kontrol teknikleri kullanılmalıdır?
- Türkiye’de maliyet temelli enerji stratejilerinin uygulanmasını takiben, teknolojik enerji tedarik yapısında hangi değişiklikler meydana gelecek ve ek olarak ne tür enerji tedarik maliyetleri ortaya çıkacaktır?

- NO_x ve SO₂ emisyonlarına uygulanan dışsal faktörlerin etkisi ne olacaktır ve ilgili maliyetler tahmin edilebilecek midir?
- Türkiye’de enerji talebinin bulanık olduğu durumda birincil enerji kaynaklarının planlanması, çevresel etkileri ve maliyet fonksiyonu nasıl olacaktır?

Enerji arz sisteminin modellenmesinde ve analizinde karar destek aracı olarak EFOM-ENV/GAMS modeli kullanılmıştır. Bir bütün halinde tüm enerji sisteminin modellenemediği bu paket program, modüler yapısı dolayısıyla, kullanıcıya istenilen detay düzeyinde modelleme imkanı sunabilmektedir.

Enerji planlaması ve emisyon kontrol stratejileri tanımlamaları için değişik yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar ekonomik modellerden enerji tüketimlerini detaylı olarak analiz eden tekno-ekonomik modellere kadar değişiklik göstermektedir. Doğrusal programlamaya dayalı olarak geliştirilen, MARKAL (3, 4), MESSAGE (Model for Energy Supply Systems Analysis and their General Environmental Impact – enerji arz sistemleri analizi modeli ve bunların genel çevresel etkileri) (5) ve EFOM (6-8) gibi enerji tedarik optimizasyon modellerinin uygun olduğu değişik çalışmalarda ispatlanmıştır. Doğrusal optimizasyon enerji tedarik modeli EFOM, Avrupa Birliği tarafından geliştirilmiş ve daha sonra emisyon kontrol hedeflerini ve enerji politikaları kararlarının çevreye olan etkilerini bütünleştirmek amacıyla, IIP¹ tarafından enerji-çevre modeli olarak genişletilmiştir. EFOM-ENV (9) adı verilen bu model, birbiri ile uyum sağlamış emisyon kontrol stratejileri geliştirmek için Avrupa Birliği ülkelerinde ve diğer bazı ülkelerde başarı ile uygulanmıştır. Bu planlama modelinin, Türkiye’nin spesifik enerji ve çevre durumlarına adapte edilebileceği ve Avrupa Birliği’ne katılım sürecinde yapılacak olan enerji-çevre çalışmalarına katkı sağlayacağı düşünülmüştür.

Çalışma çeşitli varsayım ve kısıtlamalar altında incelenmiştir. Bunlar şu şekilde ifade edilebilir: Türkiye’nin enerji sisteminin planlanması için, çalışma dönemi olarak

¹ Endüstriyel Üretim Enstitüsü (Institute for Industrial Production), University of Karlsruhe

2000-2030 yılları arası alınmıştır. Çalışmada temel girdilerden birisi olan enerji talebi için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın projeksiyonu referans alınmıştır. Mevcut termik santrallerin teknik, yakıt ve işletme maliyeti bilgileri için 1995-2000 yılları arasında gerçekleşen değerlerden yararlanılmıştır. Aday termik santral bilgileri Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ) ile diğer ilgili kurum ve kuruluşlardan elde edilmiştir. Bütün maliyetler (yatırım, yakıt, işletme) 2000 yılı fiyatları olup plan dönemi boyunca sabit kalacağı varsayılmıştır. Model en detaylı biçimde analize elverişli olmasına rağmen, bu çalışma, faydalı enerji kısmının modellemesini kapsamamaktadır. Modelde girdi olarak kullanılan teknoloji, akım, çevre ve ekonomiyi içeren tüm veriler resmi kaynaklara dayandırılmıştır. Modelin kapsadığı zaman aralığı her ne kadar otuz yıllık bir periyodu kapsasa da aslen bu zaman aralığı da kendi içinde beşer yıllık dönemler halinde incelenmektedir. Zamana dayalı detayın seçimi, tamamen kullanıcı tanımlı olmaktadır. Enerji üretim ve kullanımından kaynaklanan çevresel etki analizlerinde SO₂ ve NO_x emisyonları ile sınırlı kalmıştır.

Yukarıda tanımlanan problemi çözmek ve belirlenen hedeflere ulaşmak için çalışma şu şekilde planlanmıştır: Giriş bölümünde; problemin tanımı, çalışmanın amaçları ve kullanılan metodoloji ile ilgili genel bir giriş yapılmış, ikinci bölümde çevre etkileşimli enerji sistemlerinin bulanık optimizasyonu konusunda kaynak araştırması verilmiştir. Üçüncü bölümde ulusal enerji, çevre ve güç sektörleri genel olarak değerlendirilmiş ve modelde kullanılacak olan teknik ve ekonomik veriler incelenmiştir. Bu incelemenin amacı, ülkenin birincil enerji kaynak potansiyelini değerlendirmek, enerji sektörünün teknolojik, ekonomik ve kurumsal yapısını tanımlamak ve son olarak da çevresel emisyon faktörlerini belirlemektir. Bu analizin sonuçları, belirlenen hedeflere ulaşılması için gerekli olan teknolojik, ekonomik ve çevresel verileri de içeren bir veritabanı olarak kullanılacaktır. Dördüncü bölümde enerji ve çevre ile ilgili kararların verilmesinde kullanılabilecek bazı analitik araçlardan bahsedilmiştir. Bu amaçla, Türkiye enerji sektörünün mevcut yapısı ve gelecekteki seçeneklerin teknik ve ekonomik analizine dayalı olarak, bir enerji-çevre planlama aracı geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Beşinci bölümde bulanık küme teorisi ve bulanık doğrusal programlama hakkında genel bilgiler verilmiştir. Altıncı

bölümde talebin bulanık olduğu durumlar için bulanık doğrusal programlama çözüm algoritması geliştirilmiştir. Yedinci bölümde ise çalışmanın temel parametreleri üzerinde çeşitli varsayımlar altında senaryolar tanımlanmıştır. Bu senaryolar ışığında EFOM-ENV/GAMS modelinin sonuçları elde edilmiştir. Son bölümde sonuç ve öneriler sunulmuştur.

2. KAVRAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde enerji-çevre modellerine genel bir bakış yapıldıktan sonra literatürde kullanılan optimizasyon modelleri, bulanık doğrusal programlama çalışmaları ve Türkiye'nin enerji sektörüyle ilgili yapılan 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 yatırımlarına 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 (10).

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 yoğunlaşılacak 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 (11).

İlk enerji modelleri Gayri Safi Milli Hasıla (GSMH) benzeri, makro ekonomik göstergelerle enerji talebini ilişkilendiren ve ekonometri teorilerine dayanarak

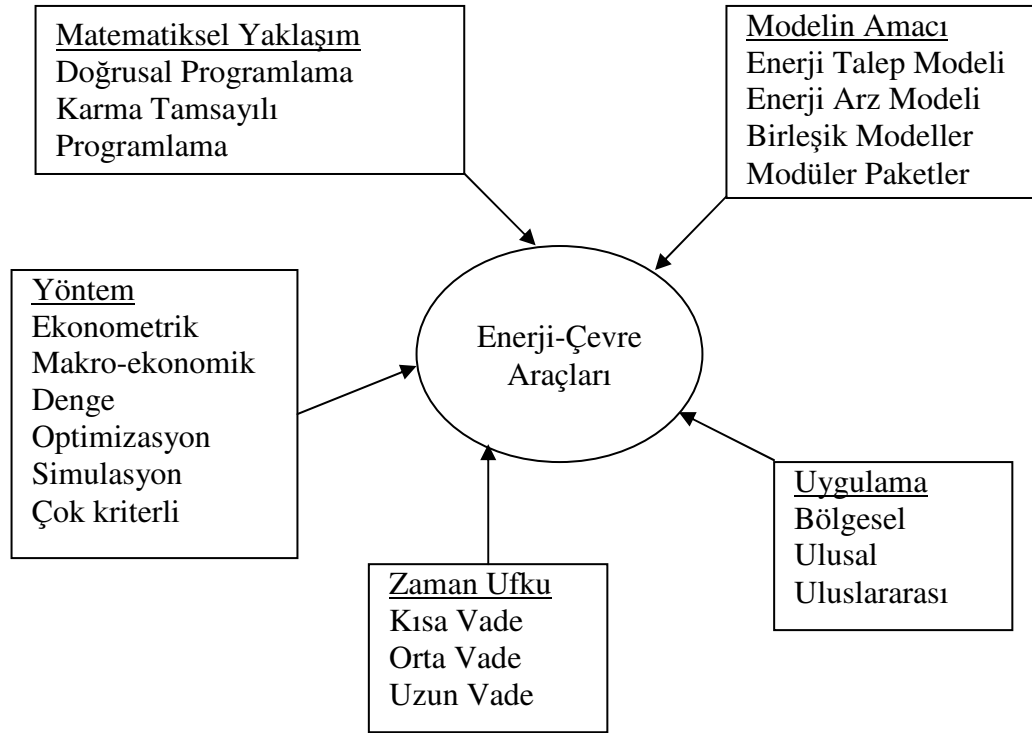
yazılan modeller idi (12). Modeller prosedür dilleri kullanılarak oluşturulmuş ve modelin matematiksel algoritması üzerine odaklanılmıştı. Bilgi, birleştirilen algoritmanın prosedür akışına göre düzenlenmişti. Enerji sorunlarının bütünleşik doğası ve ekonomi-çevre etkileşimleri 1970’lerde yaygınlaşmıştı.

Eski modeller karmaşık planlama işlemlerinin büyüyen zorluğuna uygun değillerdi. Bu modellerin rekabet edemeyecek yapıları bir yana, 1970’lerde artan enerji kullanımının çevreye etkisi tahmin edilemiyordu. 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 kullanılmıştı. Bunlar ayrıntılı bir şekilde enerji tüketimini sektörel bazda analiz eden ekonometrik modellerden, tekno-ekonomik modellere kadar değişkenlik göstermektedir (10).

Farklı modelleri tanımlamanın birçok yolu mevcutken, çok az model belli bir sınıfa uymaktadır. Bu yollar şu şekilde sayılabilir: (13) 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 ufku ve veri ihtiyacı. Şekil 2.1’de 5 kategoriye ayrılarak sınıflandırılmış enerji-çevre araçları gösterilmektedir (10).

Enerji modelleri genelde belirli sorulara cevap vermek için geliştirilir ve hangi amaçla tasarlanmışlarsa ona uygundurlar. Enerji modelleri enerji talebi, enerji arz, etkileri, değerlendirme (appraisal), birleşik yapı ve modüler yapı amaçlarına göre şu şekilde sınıflandırılabilirler (13):

Enerji Talep Modelleri: Enerji talep modelleri, sektörel enerji talebini incelemek üzere kurulmuşlardır ve gelişmeleri son ve faydalı enerji üzerinedir. Enerji talep modelleri içinde mühendislik-proses yöntemi yaygındır. Ancak ekonomik modellerde kullanılmaktadır (14). 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)’dır.



Şekil 2.1. Enerji-çevre araçlarının yapısı (10)

Enerji Arz Modelleri: Enerji arz modelleri belirli kısıtlar altında enerji arzında, bir artışın maliyetinin minimizasyonu ile ilgilenirler. Bunlara teknolojik finansal ve çevresel kısıtlar dâhildir. Bunlar talebi verilmiş olarak alırlar ve talep ve arzı dengeye getiren enerji talep yönetiminin diğer araçlarını ve kullanılan fiyatların etkilerini araştırmazlar. Modeller genellikle simülasyon veya optimizasyon yöntemlerini kullanırlar. Optimizasyon yöntemin genellikle doğrusal ve doğrusal olmayan programlamayı kullanırlar. 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 (15).

En önemli modellere genel bir bakış aşağıdaki şekilde 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 (16).

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 (15). Enerji ve elektrik talebi tahmini için geliştirilen MAED üç modülden oluşmaktadır: sosyo-ekonomik teknolojik gelişim senaryolarını 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 modülü. 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 (17).

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 arzedilen 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 (18, 19).

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 sistem 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. (12)

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 simulasyon modelidir (20). 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 (21, 22). 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. MARKAL, Avrupa ülkelerinde, Kuzey ve Güney Amerika'da, Afrika ve Asya'da kullanılmaktadır. Birleşik devletlerde, MARKAL-MACRO, 1992'de İklim Değişiklikleri Çerçeve Toplantısı (Framework Convention on Climate Change) nda varılan anlaşma ile Küresel İklim Değişikliği İnsiyatifi (Global Climate Change Initiative) ni desteklemek için seçilmiştir.

ENPEP: ENPEP modeli Argon Ulusal Laboratuvarında geliştirilmiştir (23). 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

et Juridque de l'Energie) tarafından geliştirilmiştir (24). 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 (25).

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 (26).

Bir deterministik doğrusal programlama modeli, Kuzey Amerika'nın doğusundaki asit yağmurlarının azaltılması stratejilerinin geliştirilmesi için Ellis ve arkadaşları tarafından 1985 yılında geliştirilmiştir (27).

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 (28).

Satsangi ve Sarma (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 modelin amacını oluşturmuştur (29).

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 (30).

Pasternak ve diğerleri (1990) enerji dönüşüm projelerini başlangıç zamanına vurgu yapmak suretiyle ekonomik açıdan değerlendirmek için bir optimizasyon modeli formüle etmişlerdir (31).

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 (32).

Luhanga ve diğerleri (1993), enerji planlama araştırmalarına yönelik bir değerlendirme 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 açığını minimize etmek için ağaçlandırılacak hektar ve son kullanıcı biyokütle planlarının optimum sayısı aranmıştır (33).

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 faydalanılma modelin içerisine yerleştirilmiştir (34).

Dinamik doğrusal programlama modelinin stokastik bir versiyonu Messner ve diğerleri (1996) tarafından sunulmuştur (35).

Taiwan'daki enerji ithalat strateji için bir maliyet minimizasyonu modeli JengWen ve Chia-Yon (1996) tarafından geliştirilmiştir. Model gelecekteki kömür ithalat stratejini planlamak için kullanılmıştır. Bunun yanında duyarlılık analizi ile maliyet değişimlerin etkileri araştırılmıştır (36).

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 içererek sunulmuştur. Enerji yoğun kağıt ve hamurlaştırma endüstri için önemli bir alt model, geliştirilen modele birleştirilmiştir (37).

Xie ve Kuby (1997), Çin'deki kömür ve elektrik dağıtım sisteminin ağ tabanlı yatırım planlaması optimizasyon modeli için stratejik bir basamak geliştirmişlerdir (38).

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 (39).

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 tabanlıdır (40).

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 yenilebilir enerji modeli formüle etmişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının 2020-21 yılları için aydınlatma, pişirme, ısıtma, soğutma, taşıma gibi çeşitli son kullanımlara pay edilmesi OREM modeli kullanılarak başarılmıştır. 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 (41).

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 matematik modeli geliştirilmiştir (42).

Hindistan'da 2020–21 yılları için çeşitli son kullanımlara yenilenebilir enerjinin optimal bir biçimde pay edilmesi amacıyla bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir (43).

Talep, potansiyel, güvenilirlik ve çalışan faktörleri değiştirilerek duyarlılık analizi yapılmıştır. Optimal yenilenebilir enerji modeli (OREM) maliyet / verimlilik oranını minimize etmek ve çeşitli son kullanımlara yenilenebilir enerjinin optimal bir biçimde pay etmek için Iniyen ve Sumathy (2000) tarafından geliştirilmiştir (44).

Cormio ve diğerleri (2003), yenilebilir 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 dâhil edilmiştir (45).

Drozd (2003), jeotermal enerji kaynakları için bir optimizasyon modeli sunmuştur. Model kaynağın net gücünü maksimize etmeye çalışmıştır (46).

Gong (2003) tarafından, endüstriyel enerji sistemleri için çok periyotlu maliyet optimizasyon modeli (MIND) geliştirilmiştir (47).

Sinha ve Dudhani (2003) yenilenebilir enerji kaynaklarını çeşitli teknolojik ve maliyet katsayılarına göre paylaştırmaya dayanan bir doğrusal programlama modeli sunmuşlardır (48).

Buraya kadar olan kısımda literatürde olan enerji-çevre ve optimizasyon modelleri incelenmiştir. Şimdi de Bulanık Doğrusal Programlama (BDP) problemleri incelenecektir.

Klasik Doğrusal Programlama (KDP) problemlerinde kesin sayılarla çalışılır ve bir belirlilik söz konusudur. Halbuki, pratikte modeli oluşturan parametrelere ilişkin net değerlere ulaşmak çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu belirsizlik durumu, Zadeh (1965) tarafından önerilen "bulanık küme teorisi" ile dilsel olarak "az çok", "biraz" gibi formlarda ifade edilebilir hale gelmiştir (49). Kesin olmayan bilginin sayısal gösterimi olan bulanık sayıların kullanılması ile gerçek dünya problemlerinin belirsiz yapısının modellenmesinde kullanılacak yeni matematiksel teknikler geliştirilmiştir. Bu belirsizlik içinde geliştirilen yöntemler, klasik doğrusal programlamadan hayli farklıdır. Bazı durumlarda, amaç fonksiyonu maksimizasyon veya minimizasyon yerine, "maliyetin önemli ölçüde düşürülmesi" gibi belirsiz bir hedef olabilmektedir. Bazen de, teknoloji matrisinin elemanları veya sağ taraf sabitleri tat, koku, ağrı gibi kesin tanımlanamayan duyuları yada nitel özellikleri yansıttıkları için doğal yapıları gereği bulanık bir karakter taşıyabilirler. Son olarak, her hangi bir kısıttaki ihlalin mümkün olmayan çözüme sebebiyet verdiği KDP'den farklı olarak BDP, küçük ihlaller kabul edilebilir. Tüm bu farklılıklardan anlaşılacağı üzere BDP, KDP'nin daha genişletilmiş bir halidir. BDP'de, KDP'nin aksine tek tip bir model yoktur ve modellenecek sistemin özelliklerine ve kabullerine bağlı olarak pek çok varyasyon mümkündür. Bu çeşitliliği karşılayabilmek için BDP çok sayıda yöntem önerir (50).

BDP konusundaki ilk çalışma, Bellman ve Zadeh (1970) tarafından yapılmıştır. Ardından Tanaka ve diğerleri (1974), Negoita ve Sularia (1976), Zimmermann (54), Orlovsky (1976) BDP konusunda çalışmışlardır (51-55). Chanas (1983), BDP'de parametrik programlamayı kullanmıştır (56). Tanaka ve Asai (1984), teknoloji

matrisi ve amaç fonksiyonu katsayılarını, sağ taraf sabitlerini bulanık sayılar olarak alıp, kısıtları bulanık fonksiyonlar olarak düşünmüşlerdir (57). Yine Tanaka ve Asai (1984), amaç fonksiyonuna bir tatmin düzeyi vererek onu da bir kısıt gibi düşünen bir yöntem önermişlerdir (58). Carlsson ve Korhonen (1986), doğrusal programlamadaki tüm katsayıları bulanık olarak ele alan ve parametrik bir çözüm sunan bir yaklaşım önermişlerdir (59). Werners (1987), etkileşimli bir model üzerinde, Inuiguchi ve diğerleri (1990), parçalı doğrusal üyelik fonksiyonları olan bir BDP çalışmıştır (60, 61). Son yıllarda Tanaka ve diğerleri (2000), Jamison ve Lodwick (2001), Chiang (2001), Liu (2001), Bector ve Chandra (2002) BDP'nin teori ve metodolojisine katkıda bulunmuşlardır (62-66).

Enerji sektöründe yapılan çalışmalarda ise Pendharkar (1997) kömür madenlerinin üretim planlamasında, Vlasisavljevic ve Ojukanovic (1999), güç sistemlerinin çizelgelenmesinde, Gupta ve diğerleri (2000) tarımsal alanların planlamasında, Venkatesh ve diğerleri (2001) reaktif güç ünitelerinin denetiminde BDP kullanmışlardır (67-70).

Oder ve diğerleri (1993) gerçek ekonomik senaryolara göre Litvanya'nın son enerji tüketimini bulanık kümeler kullanılarak araştırmışlardır. Burada enerji tüketimini etkileyen başlıca parametreler; gayri safi milli hasıla (GSMH) ve enerji toptan satış fiyatıdır. Litvanya'nın ekonomisinde belirsizlikler yüzünden bu parametreler bulanıklık olarak tanımlanmıştır. GSMH ve fiyat gelişmeleri için temel senaryolar resmi Litvanya projeksiyonlarından alınmıştır. Bulanık modelin sonuçları resmi son enerji talep projeksiyonları ile kıyaslanmıştır (71).

Canz (1996) yaptığı çalışmada, belirsizlik altında enerji sistem planlamaları için karar verme sürecinin bulanık doğrusal programlamayla değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışmada Almanya'nın enerji sistem planlamalarında karar vermeyi desteklemek için kullanılan metot ve araçlar gözden geçirilmesi sağlanmıştır (72).

Sadeghi ve Hosseini (2006), İran'ın enerji arz sisteminin optimizasyonu için Bulanık Doğrusal Programlama uygulaması yapmışlardır. Kullanılan BDP modelinde yatırım maliyetleri bulanık katsayılardan oluşmuştur (73).

1980'li yıllarla birlikte ekonomik politikadaki köklü değişiklikler Türkiye'de büyüme hızını yukarılara çekerken ekonomide görülen iyileşme GSMH artışını bile geride bırakan hızlı bir enerji ihtiyacı artışına yol açmıştır (74, 75).

Bu nedenle de Türkiye'nin enerji arz sisteminin gelişmelere paralel olarak gerek yönetim organizasyonun yeniden biçimlenmesi ve gerekse de üretim kapasitesi genişlemesi üzerinde artan ihtiyaçlar kendini göstermiştir. Ekonomik gelişimi destekleyebilmek için kıt ekonomik kaynakların verimli kullanımını sağlayacak enerji stratejilerinin geliştirilmesi enerji politikasının önemli bir hedefini oluşturmaktadır. Bu kapsamda, 70'lerde yaşanan enerji krizine bir tepki olarak petrolü mümkün mertebe ikame edebilmek amacıyla yerli kaynakların, bilhassa linyitin, geliştirilmesine büyük önem verilmiştir (76).

Ancak, gerek gitgide büyüyen enerji talebi ve gerekse de düşük kalite yerli linyitlerin güç santrallerinde, endüstride ve konut sektöründe tüketilmeleri Türkiye'de hava kirliliğindeki artışları da beraberinde getirmiştir. Sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik 2000 yılında, Dünya Bankası desteği ile ETKB'nin koordinatörlüğünde başlatılan “Enerji ve Çevre Projesi” kapsamında, enerji ilişkin tüm sektörlerde enerji kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik alternatif senaryoların oluşturulması ve bu senaryolara ilişkin olarak maliyetlerin hesaplanması amaçlanmıştır (77). Bu çalışmanın öncesinde, 6. Beş-yıllık Kalkınma Planı'nda da çevre boyutuna öncelik kazandırılmıştır (78).

Hava kirliliğini azaltım konusunda bu türden faaliyetler ve artan enerji ihtiyaçları da göz önüne alındığında, gelecekteki on yıl içinde Türkiye'de hangi türden emisyon kontrol önlemleri alınması gerektiği sorusunu gündeme gelmiştir. Pek çok durumda, enerji arzının mümkün en düşük maliyetle gerçekleştirilmesi ekonomik hedefiyle hava kirliliğini azaltmak gibi çevresel hedefler birbiriyle çelişmektedir. Bu nedenle,

maliyet-etkin stratejiler yani sisteme empoze edilen bir emisyon azaltım hedefini mümkün en düşük ilave enerji arz maliyetinde karşılamayı mümkün kılan uyumlu stratejiler hava kirliliği kontrolü için gerekli olmaktadır.

1990 yılında yapılan bir çalışmada, EFOM-12C modeli Türkiye'nin enerji yapısına uyarlanmıştır(79). Bu çalışmada Türkiye'nin enerji şebekesi çıkarılmış; enerji arz, dönüşüm ve iletim prosesleri ile ilgili parametre değerleri belirlenmiştir. Model bilgisayarda çalıştırılarak ilk optimizasyon ve simülasyon sonuçları alınmıştır. Ayrıca, enerji şebekesi basitleştirilerek model enerji arz-talep denge çizelgelerinin elde edilmesine uygun bir hale getirilmiş ve 2010 yılına kadar Türkiye'nin enerji arz-talep denge çizelgeleri elde edilmiştir.

Avrupa Topluluğu tarafından geliştirilen EFOM-12C enerji arz modelinde, modelin amacı uzun vadeli enerji talebini karşılamak için mümkün olan tüm alternatifleri analiz etmiş ve değerlendirmiştir (8, 80, 81). Model birincil enerji sağlayan, enerjiyi dönüştüren ve kullanan sektörlerin teknolojilerini temel almış ve talebi karşılamak için prosesler ve yakıt türleri arasında, belirli bir amaç fonksiyonunu verilen sınırlamalar içinde minimum yapacak seçimleri sağlamıştır.

EFOM-ENV modeli Volkswagen-Stiftung, Hannover kurumunun finansal desteğiyle ve IIP tarafından bir araştırma projesi kapsamında Türkiye için yürütülmüştür (82-84). Model incelendiğinde, enerji politikalarının oluşturulması ve enerji üretim, dönüşüm ve kullanım sektörünün davranışları ile ilgili çeşitli senaryo çalışmaları yapılması için uygun bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.

Ercan (1999) Türkiye'de İzmir Sanayi Bölgesi ve Lueth (1997) merkezi ve Doğu Avrupa için emisyon azaltım stratejileri geliştirmişlerdir (85, 86).

Türkiye'deki enerji, ekonomi ve ortamsal ilişkilerin uzun dönemde tahmini için bir doğrusal optimizasyon modeli Tırıs ve diğerleri (1994) tarafından açıklanmıştır (87).

3. TÜRKİYE’NİN ENERJİ VE GÜÇ SEKTÖRÜNE GENEL BİR BAKIŞ

İnsanların ihtiyaçlarının karşılanmasında ve gelişmenin sağlıklı olarak sürdürülmesinde gerekli olan enerji özellikle sanayi, konut ve ulaştırma gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Ancak enerji, yaşantımızdaki vazgeçilmez yararlarının yanı sıra üretim, çevrim, taşınma ve tüketim esnasında büyük oranda çevre kirlenmesine de yol açmaktadır. Nüfus artışına, sanayinin gelişmesine paralel olarak kurulan büyük ölçekli enerji üretim ve çevrim sistemleri ekolojik dengeyi büyük ölçüde etkiledikleri gibi sınırlar ötesi etkileri de beraberinde getirmektedir. Bu nedenle çevre sorunları ulusal olduğu gibi uluslararası nitelikler de taşımaktadır. Yine bu nedenle çevre sorunlarını gidermek için, gerekli tedbirlerin alınmasında, uluslararası işbirliğinin rolü önem kazanmaktadır (88).

Bu bölümde Türkiye’nin enerji, çevre ve güç sektörlerinin genel bir değerlendirmesine yer verilmiştir. Modelde kullanılacak olan teknik ve ekonomik veriler incelenmiştir. Bu incelemenin amacı, ülkenin birincil enerji kaynak potansiyelini değerlendirmek, enerji sektörünün teknolojik, ekonomik ve kurumsal yapısını tanımlamak ve son olarak ta çevresel emisyon faktörlerini belirlemektir. Bu analizin sonuçları, belirlenen hedeflere ulaşılması için gerekli olan teknolojik, ekonomik ve çevresel verileri de içeren bir veritabanı olarak kullanılmıştır.

Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına bağlı kuruluşlar ile birlikte, diğer ilgili kamu ve özel sektör kuruluşlarıyla koordineli bir şekilde enerji politikalarının hazırlanmasından ve uygulanmasından sorumludur. Enerji sektöründe yer alan kuruluşların büyük çoğunluğu kamu kuruluşu olup, sorumlulukları kısaca aşağıda verilmiştir (89):

Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK): Elektriğin ve doğal gazın yeterli, kaliteli, sürekli, düşük maliyetli ve çevreye uyumlu bir şekilde tüketicilerin kullanımına sunulması için, rekabet ortamında özel hukuk hükümlerine göre faaliyet gösterebilecek, mali açıdan güçlü, istikrarlı ve şeffaf bir enerji piyasasının oluşturulması ve bu piyasada bağımsız bir düzenleme ve denetleme sağlamasıdır.

Petrol İşleri Genel Müdürlüğü (PİGM): Türk ve yabancı şirketlere ülke sınırları içerisinde petrol arama ve üretim ruhsatları verilmesinin yanı sıra, ülkedeki rafineri faaliyetleri ile ham petrol ve petrol ürünleri satış fiyatlarını takip etmekten sorumludur.

Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü (MTA): Her türlü mineral kaynakların sistematik olarak araştırılıp, bulunmasından sorumlu en eski kuruluştur.

Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİEİ): Ülkenin su kaynaklarını etüt ederek, elektrik enerjisi üretimine elverişli olanlarını belirlemek, baraj ve hidroelektrik santral tesislerinin teknik ve yapılabilirlik etütleri ile ilgili projeleri hazırlamak, enerjinin rasyonel kullanımı ve tasarrufu ile ilgili çeşitli faaliyetleri yürütmek, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine yönelik faaliyetleri yürütmek bu kuruluşun sorumluluğundadır.

Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş Genel Müdürlüğü (TEDAŞ): Kamu adına elektrik enerjisi dağıtımını ile ilgili faaliyetleri yürütmek, bu faaliyetlerle ilgili tesisleri yapmak ve işletmek, elektriğin üretici kuruluşlardan alışı, abonelere satışı ve ticaretini yapmak ve yaptırmakla sorumludur.

Elektrik Üretim A.Ş Genel Müdürlüğü (EÜAŞ): Mülkiyeti kamuya ait, işletme hakları özel sektöre devredilmemiş termik ve hidrolik santrallerin işletilmesi, inşa halindeki tesislerin tamamlanması, DSİ tarafından yeni tesis edilenlerin devir alınarak işletilmesi, EPDK tarafından onaylanacak yeni üretim tesislerinin kurulması, işletilmesi ve kiralanmasından sorumludur.

Türkiye Elektrik İletim A.Ş Genel Müdürlüğü (TEİAŞ): Devletin genel enerji ve ekonomi politikasına uygun olarak elektrik iletim faaliyetlerinde bulunmak bu çerçevede, tüm iletim tesislerini devralmak, mülkiyetindeki tesislerde tüm iletim faaliyetlerini yürütmek, kurulması öngörülen yeni iletim tesislerinin etüd ve planlamasını yapmak, buna bağlı olarak gerekli tesislerin yatırım programına alınarak, yapılmasını sağlamak, ülkenin teknik ve sosyo ekonomik gelişim verilerine

dayanılarak hazırlanan elektrik enerjisi talep tahminlerini esas alarak ve dağıtım şirketleri tarafından hazırlanan talep tahminlerini de değerlendirerek üretim kapasite projeksiyonunu hazırlamak ve kurul onayına sunmaktır.

Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt A.Ş Genel Müdürlüğü (TETAŞ): Devletin genel enerji ve ekonomi politikasına uygun olarak elektrik ticaret ve taahhüt faaliyetlerinde bulunmakla sorumludur.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ): Sulama tesisleri kurmak, hidrolik santralleri tesis etmek, taşkın sular ve sellere karşı koruyucu tesisler meydana getirmek, büyük şehirlere içme, kullanma ve endüstri suyu sağlamakla sorumludur.

Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu Genel Müdürlüğü (TKİ): Yerli kömürlerin (linyit ve asfaltit) araştırılması, çıkarılması ve pazarlanmasını yapmakla sorumludur.

Türkiye Taşkömürü Kurumu Genel Müdürlüğü (TTK): Yerli taşkömürünün araştırılması, çıkarılması ve pazarlamasını yapmakla sorumludur.

Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı Genel Müdürlüğü (TPAO): Ülke içinde ve dışında petrol ve gaz kaynaklarının araştırılması, bulunması ve üretiminden sorumludur.

Boru Hatları ile Petrol Taşımacılığı A.Ş Genel Müdürlüğü (BOTAŞ): Doğal gazın taşınması ve ticareti, Gaz Piyasası Kanunu ile doğal gazın ithalatı, iletimi, dağıtımı, depolanması ve satışından sorumludur.

Türkiye Petrol Rafineleri A.Ş Genel Müdürlüğü (TÜPRAŞ): Sahip olduğu 4 rafineri ile ham petrolü işlemek ve petrol ürünleri üretmekle sorumludur.

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Başkanlığı (TAEK): Atom enerjisi konusundaki araştırma ve geliştirme faaliyetlerini yürütmek, radyoaktif malzeme ve araçların

kullanımını kontrol etmek ve bunlara ilişkin ruhsat vermek, nükleer santrallerin yer seçimi, inşası ve işletilmesinde yetkili olmak ile sorumludur.

3.1. Birincil Enerji Kaynakları ve Üretim Durumları

Türkiye 8. beş yıllık plan dönemi Gayri Safi Yurt İçi Hasılası (GSYİH) %6,5 civarında öngörülürken birincil enerji üretiminde artışın %4,5 civarında olacağı tahmin edilmektedir. Toplam birinci enerji rezerv varlığı ve potansiyeli ise kömür, jeotermal ve hidrolik enerji ile dünya kaynak potansiyelinin %1'i dolayındadır. Petrol ve doğal gaz potansiyeli ise kıyaslanmayacak kadar küçüktür. Birincil enerji kaynakları üretimi 2002 yılı itibarıyla 24,6 Mtep. dir. 2002 yılı toplam birincil enerji üretiminin %47,4'ünü kömür, petrol ve doğal gaz ise %11,8'ini, hidrolik ve jeotermal kökenli elektrik %12,2' ini, diğer yenilenebilir kaynaklar %4,3'ünü, ticari olmayan yakıtlarda %24,3'ünü oluşturmaktadır. Türkiye birincil enerji kaynakları rezerv ve potansiyellerine ilişkin bilgiler Çizelge 3.1'de toplu olarak verilmektedir (90).

Çizelge 3.1. 2002 yılı sonu itibariyle Türkiye birincil enerji kaynakları rezervi (90)

Kaynaklar	Görünür	Muhtemel	Mümkün	Toplam
Taşkömürü (Milyon Ton)	428*	456	245	1129
Linyit				
Elbistan	3357			3357
Diğer	3982	626	110	4718
Toplam	7339	626	110	8075
Asfaltit	45	29	8	82
Bitümler	555	1086		1641
Hidrolik				
GWh/Yıl	126109			126109
MW/Yıl	35539			35539
Ham Petrol (Milyon Ton)	39			39
Doğal Gaz (Milyar m ³)	10,2			10,2
Nükleer Kaynaklar (Ton)				
Tabii Uranyum	9129			9129
Toryum	380000			380000
Jeotermal (MW/Yıl)				
Elektrik	200		4300	4500
Termal	2250		28850	31100
Güneş				
Elektrik				8,8
Isı				26,4

* Hazır rezerv dahil.

Türkiye’de yerli olarak üretilen taşkömürü, linyit ve asfaltitten, taşkömürünün üretimi kurumsal olarak TTK tarafından, linyitin bir kısmı ve asfaltitin tamamı TKİ tarafından üretilmektedir. 2002 yıl bazında toplam linyit üretimin %60’ı TKİ geri kalan kısmı ise özel sektör (%8) ve EÜAŞ denetimindeki işletmelerde (Sivas-Kangal, Afşin-Elbistan ve Çayırhan, %32) tarafından gerçekleştirilmiştir. 2002 yılı itibarıyla taşkömürü rezervi 1,1 milyar ton civarındadır.

Türkiye birincil enerji kaynaklarının durumu aşağıda ayrıntılı olarak incelenmiştir.

3.1.1. Linyit

Yerli fosil enerji kaynakları içinde en önemli yeri linyit yatakları almaktadır. En önemlilerini Elbistan, Muğla, Soma, Tunçbilek, Seyitömer, Konya, Ankara ve Sivas havzalarından oluşmaktadır. Yerli linyit yakıtı ısısal değer ve içerdiği çevresel faktörler bakımından büyük farklılıklar ortaya koymaktadır. Üstelik yakma tekniği ve teknolojisine bağlı olarak da çevresel etkileri oldukça kötü olmaktadır (91).

Linyit sahaları ülkemizde bütün bölgelere yayılmış olup ısı değerleri 1000 – 5000 kcal/kg arasında değişmektedir. Toplam linyit rezervlerimizin yaklaşık %6,9'u 3000 kcal/kg'ın üzerinde, %13,2'si 2500-3000 kcal/kg arasında, %79,9'u ise 2500 kcal/kg'ın altında ısı değerine sahiptir (91). Türkiye’nin linyit kaynakları ısı değer ve kükürt (S) yoğunluğuna göre Çizelge 3.2’de gösterildiği gibi dört kategoride gruplandırılmıştır:

Linyit 1: düşük ısı değer, yüksek S (%)

Linyit 2: orta-yüksek ısı değer, yüksek S (%)

Linyit 3: düşük ısı değer, düşük S (%)

Linyit 4: yüksek ısı değer, düşük S (%)

Çizelge 3.2. Türkiye linyit rezervlerinin sınıflandırılması

	Rezerv (10 ⁶ ton)	Isı Değeri (kcal/kg)	Kükürt (%)
Linyit 1			
K.Maraş-Elbistan	3226,203	1150	1,5-2
Linyit 2			
Ankara-Çayırhan	383,186	2370	3,6
Bolu-Göynük	39,200	2750	1,8
Bursa-Orhaneli	41,796	2500	2
Çanakkale-Çan	91,235	3000	4,2
Erzurum-Aşkale	0,216	3400	3,7
Sivas-Kangal	155,049	1300	2
Muğla-Karacahisar	85,770	2260	4,3
Muğla-İkizköy-Sekköy	116,488	2190	3,2
Muğla-Hüsamlar	99,820	1650	3,1
Muğla-Eskihisar	99,884	2200	3
Muğla-Tınaz-Bağyaka	43,486	2150	2,3
Konya-Ermenek	4,821	3330	4,7
Bursa-Davutlar	39,062	2340	4,5
Erzurum-Karakütük	0,543	3700	2,6
Adana-Tufanbeyli	214,160	1350	2,2
Linyit 3			
Bingöl-Karlıova	88,662	1460	0,6
Konya-Beyşehir	81,082	1110	1,1
Erzurum-Pekçik	2,577	1150	0,5
Bursa-Keles	28,851	1900	1,5
Çorum-Ayvaköy	14,038	1470	1
Çankırı-Orta	50,710	1090	0,6
Linyit 4			
Kütahya-Seyitömer	158,255	2080	1,2
Kütahya-Tuğbilek	335,378	2560	1,6
Manisa-Soma	125,456	2940	1,2
Manisa-Deniş	203,449	2080	1,2
Manisa-Eynez	297,220	3150	1,3
Erzurum-İspir	5,638	2570	0,2
Konya-İlgın	10,987	2180	1,1
Çorum-Dodurga	17,835	3150	1,6
Çorum-Evlik	2,255	2290	1,7
Erzurum-Balkaya	0,793	3240	0,6
Tekirdağ-Saray	129,204	2110	1,9

3.1.2. Taşkömürü

Ülkemizin en önemli taşkömürü rezervleri Zonguldak ve civarındadır. Zonguldak havzasında bugüne kadar yapılan çalışmalar sonucunda 1,1 milyar ton rezerv saptanmıştır. Bu rezervin yaklaşık 423 milyon tonu görünür niteliktedir. Havza, Karadeniz Ereğli'den başlayarak Kandilli, Zonguldak, Amasra, Pelitovası, Azdavay ve Söğütözü'ne kadar uzanan bölgeyi kapsamaktadır. Üretim, +284 ve -560 kotlarında tamamen yeraltı işletmeciliğiyle yürütülmektedir. Kömürün ortalama kimyasal özellikleri %55 sabit karbon, %26 uçucu madde, %11 kül, %8 nem, ısı değeri ise, 6000 kcal/kg düzeyindedir (91).

Zonguldak taşkömür Havzası'nın dışında rezerv açısından önemsiz birkaç taşkömürü yatağı daha bulunmaktadır. Bunlar Antalya - Pamucak yaylası ve Akseki İlçesi Güzelsu ve Çukurköy mevkiinde yaklaşık 1 milyon ton görünür rezervli sahalar ile Diyarbakır - Hazro ilçesindeki yaklaşık 400 000 ton rezervli sahadır (91).

Türkiye taşkömürü rezervleri Çizelge 3.3'de verilmiştir (90). Çizelgeden görüldüğü gibi, taşkömürü rezerv hesabında yalnızca Zonguldak Havzası esas alınmış olup toplam taşkömürü rezervi 1,1 milyar tondur. Buna karşılık görünür rezerv ise 0,4 milyar ton (%38) düzeyinde bulunmaktadır. Antalya ve Diyarbakır yörelerindeki rezervler, miktarların önemsizliği nedeniyle dikkate alınmamıştır.

Çizelge 3.3. Türkiye taşkömürü rezervleri (10⁶ ton) (90)

Müesseseler	Görünür	Muhtemel	Mümkün	Toplam
Armutçuk	25,751	8,206	6,000	39,957
Kozlu	62,367	60,487	47,975	170,829
Üzülmüş	155,491	94,342	74,020	323,853
Karadon	147,604	159,407	117,144	424,155
Amasra	31,779	133,304	-	165,083
Toplam	422,992	455,746	245,139	1123,877

3.1.3. Asfaltit

Asfaltit, petrol kökenli bir kayadır. Derinlerde bulunan sıvı veya yarı sıvı durumdaki asfalt maddesinin hidrostatik basınç, gravitasyon, sıcaklık gibi etkenlerle taşınarak, yarık, çatlak ve boşluklara yerleşmesiyle oluşmuştur. Ekonomik kalınlıkta filon tipi yataklar Şırnak ve Silopi'dedir. Yapılan etüt ve sondajlarla 79,9 milyon ton asfaltit rezervi belirlenmiştir. Bu rezervin 44,5 milyon tonu görünür niteliktedir. Güney Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan asfaltit filonlarının isimleri ve rezervleri ise Çizelge 3.4'de detaylı olarak verilmiştir (90).

Çizelge 3.4. Filonlar itibariyle Türkiye asfaltit rezervleri (10⁶ ton) (90)

Filon Adı	Görünür	Muhtemel	Mümkün	Toplam
Silopi-Harbul	17,914	7,851	-	25,765
Silopi-Silip	3,071	1,335	-	4,406
Silopi-Üçkardeşler	9,472	10,861	-	20,333
Şırnak-Avgamasya	6,969	0,673	-	7,462
Şırnak-Mili	1,981	2,900	1,600	6,481
Şırnak-A.Karatepe	0,500	2,000	2,500	5,000
Şırnak-Seridahlı	3,534	1,254	1,279	6,067
Şırnak-Nivekara	0,300	1,000	0,700	2,000
Şırnak-A.İspindoruk	0,100	0,500	0,500	1,100
Şırnak-Segürük	0,121	0,450	-	0,571
Şırnak-Rutkekurat	0,551	0,053	-	0,604
Toplam	44,513	28,877	6,579	79,969

3.1.4. Petrol

Petrol ürünleri sanayi, ham petrolün rafinerilerde stoklanıp artırılması, üretilen ürünlerin dağıtım kuruluşları vasıtasıyla tüketicilere ulaştırılması gibi bir dizi aktiviteyi kapsayan entegre bir sektördür (92).

Türkiye'nin toplam 98 petrol sahasından 93'ü Güneydoğu Anadolu Bölgesinde yer almaktadır. Petrol üretiminin %52'si Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı tarafından yapılmaktadır. Ülkemizin 2000 yılı itibariyle petrol ürünleri ithalat, ihracat ve üretim durumu Çizelge 3.5'de görülmektedir (93).

Çizelge 3.5. 2000 yılı petrol ürünleri ithalat, ihracat ve üretimi (metrik bin ton) (93)

Ürünler	İthalat	İhracat	Üretim
Rafineri yakıt gazı			556,982
Lpg	3878,183	14,920	669,642
Nafta	132,014	382,173	1851,164
Normal benzin	104,624		959,072
Süper benzin	121,432	23,320	917,650
Kurşunsuz benzin	602,156	8,980	801,164
Solvent	264,474		2,833
Jet yakıtı	165,619	12,667	1023,526
Gazyağı			26,241
Motorin	2474,710	75,752	6646,908
Kalorifer yakıtı	49,913	0,697	1458,968
Fuel oil-6	664,587	692,889	6563,104
Asfalt		1,033	1282,265
Madeni yağ	164,410	3,443	317,232
H.V.G.O.		335,109	456,007
Diğerleri			113,952
Toplam	8622,152	1550,983	23646,710

2002 yılı sonu itibariyle Türkiye'deki ham petrol rezervleri Çizelge 3.6'da şirketler bazında verilmiştir (90). Çizelge'den de görüldüğü gibi, 2002 sonu itibariyle kalan üretilebilir rezerv 38992 bin ton olup, bu rezervin yaklaşık %67'i TPAO, %24'i Perenco kalan %9'u diğer ortak şirketlerindir. Türkiye'nin mevcut üretim durumuna göre bu rezervin yaklaşık on dört yıl sonra tükenmesi gerekecektir.

Petrolün nihai üretimi ürün bazında olduğundan, ülkemizdeki ham petrol tüketimi, toplam ürün üretimine bağlı olarak, rafineri gazı ve rafinasyon kayıpları göz önüne alınarak eş değer bazda belirleneceği gibi, doğrudan doğruya rafinerilerimizde işlenen ham petrol miktarı da tüketim olarak alınabilir. Rafinerilerimizde işlenen petrolün yerli üretimle karşılanma oranı 1994'de %14 iken, 1998'de %12'ye düşmüştür.

Petrol tüketimi genel olarak enerji, ulaştırma, sanayi, tarım ve ısınma amaçlarına yöneliktir. Ham petrol rafinerilerimizde ürün haline getirilerek, tüketilmektedir.

Çizelge 3.6. 2002 yılı itibariyle Türkiye ham petrol rezervleri (bin ton) (90)

Şirket Adı	Rezervardaki Petrol*	Üretilebilir Petrol	Kümülatif Üretim	Kalan Üretilebilir Petrol
TPAO	682812	88686	62725	25961
N.V.Turkse Perenco	175736	48512	39026	9486
Petrom E.M.I. + Dorches.	73087	12746	10808	1938
Madison Oil Turkey Inc. + TPAO	6967	2411	2084	327
N.V.Turkse Perenco + T.P.A.O.	4624	1796	1297	499
Ersan + Aladdin + Trans Med.	6157	924	755	169
Ersan + Aladdin M.E.	2420	426	359	67
Aladdin + Madison (Turkey) Inc.	2094	628	210	418
Aladdin+Transmed.	362	74	3	71
Amity Oil + TPAO	81	57	1	56
Toplam	954340	156260	117268	38992

* İspatlanmış, muhtemel ve mümkün rezervler toplamıdır.

3.1.5. Doğal gaz

Ülkemizde 1976 yılından bu yana tüketilmekle birlikte, büyük ölçüde tüketimi 1987 yılında Rusya'dan ithalatla birlikte başlayan doğal gaz ise, enerji, ulaştırma, sanayi, tarım ve ısınma amaçlı kullanılmaktadır. Türkiye'nin mevcut doğal gaz rezervleri Çizelge 3.7'de verilmiştir (90). Doğal gazın Türkiye'de üretilen miktarının tüketimi, sanayideki tüketicilere ve BOTAS'a yapılan satışla gerçekleşmektedir.

Halen yerli üretim az olduğundan, doğal gaz talebi büyük ölçüde ithalat yoluyla karşılanmaktadır. TPAO tarafından üretilen doğal gaz büyük ölçüde BOTAS'ın ana iletişim hattına verilerek Rusya'dan ithal edilen doğal gaz ile birlikte kullanıma arz edilmekte, kısmen de TPAO'nun doğrudan gaz sattığı sanayi müşterilerine verilmektedir.

3.1.6. Yenilenebilir enerji kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları bilindiği gibi, sürekliliği itibariyle sürdürülebilir olmasından başka dünyanın her ülkesinde var olabilen bir özelliği ile büyük önem taşımaktadır. Fosil yakıtları esas alan enerji kullanımı; yakıt konusunda dışa bağımlılık, yüksek ithalat giderleri ve çevre sorunları gibi önemli olumsuzlukların

yanında, dünya fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini arttırmaktadır. Diğer taraftan çevresel etkileri, yenilenemeyen enerji kaynaklarına oranla çok azdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, mevcut teknik ve ekonomik sorunların çözümlenmesi halinde 21. yüzyılda en önemli enerji kaynağı olacağı kabul edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları; odun, hidrolik güç, güneş enerjisi, rüzgar gücü, jeotermal enerji ve biyokütle enerji kaynaklarıdır (88).

Çizelge 3.7. 2002 yılı itibariyle Türkiye doğal gaz rezervleri (milyon m³) (90)

Şirket Adı	Rezervuardaki Gaz*	Üretilebilir Gaz	Kümülatif Gaz Üretimi	Kalan Üretilebilir Rezerv
TPAO	12634	9060	5368	3692
N.V.Türkse Perenco	4654	3258	67	3191
Amity Oil + TPAO	2718	1897	45	1852
Thrace Bas. + Pinna.	1431	1073	12	1061
Thrace Bas. Nat. Gas	701	526	104	422
TOPLAM	22138	15814	5596	10218

* İspatlanmış, muhtemel ve mümkün rezervler toplamıdır.

Odun: Yenilenebilir enerji kaynağı olarak, önemli potansiyele sahip olmakla birlikte, tüketimi o derece hızlıdır ki yenilenebilme kapasitesi oldukça düşmüştür. Odun tüketimi, ayrıca sanayi hammaddesi olarak kullanılması halindeki yararı çok yüksek olmasına rağmen, en verimsiz şekilde yakıt olarak yaygın kullanılmaktadır. Ülkemizin orman potansiyeli Çizelge 3.8’de verilmiştir (90).

Çizelge 3.8. 2002 yılı itibariyle Türkiye orman potansiyeli (90)

İşletme Şekli	Potansiyel Servet	Yıllık Ortalama Artış
Koru-Normal	758732	20792
Baltalık-Normal	88300	4813
Toplam	847032	25605
Koru-Bozuk	54350	1344
Baltalık-Bozuk	34129	1115
Toplam	88479	2459
Genel Toplam	935511	28064

Çizelge 3.9. 2002 sonu itibariyle Türkiye hidrolik potansiyelinin havzalara dağılımı
(90)

Havza Adı	Kurulu Güç (MW)	Enerji	
		Ortalama (GWh)	Güvenilir (GWh)
Meriç	23,90	68	28
Marmara	4,30	2	1
Susurluk	373,26	1336	955
Kuzey Ege	22,00	60	30
Gediz	123,00	359	144
Küçük Menderes	48,00	143	62
Büyük Menderes	278,80	1053	254
Batı Akdeniz	596,79	2321	769
Antalya	1432,12	5262	1762
Sakarya	1177,54	2523	1515
Batı Akdeniz	507,35	1747	995
Yeşil Irmak	1270,84	5321	4171
Kızılırmak	2060,51	6181	4004
Konya Kapalı	42,48	123	1
Doğu Akdeniz	1632,12	6039	3188
Seyhan	2048,29	8012	3847
Asi	53,57	166	46
Ceyhan	1663,20	5558	2824
Fırat	9672,93	38072	30096
Doğu Akdeniz	3462,55	11346	5288
Çoruh	3178,90	10706	6217
Aras	834,92	2539	1775
Van Kapalı	62,06	260	157
Dicle	4969,88	16912	10641
Toplam Potansiyel	35539,31	126109	78770

Hidrolik Güç: Yenilenebilir enerji kaynakları arasında odundan sonra ikinci sırayı almaktadır ve dünyada her yıl üretimi % 4 artmaktadır. Bugün hidrolik güçten oldukça yararlanılmasına rağmen, kullanılamayan potansiyel yine de çok fazladır. Hidrolik barajların ayrıca, büyük toprak alanlarını sular altında bırakması, ekolojik yapıda bitki ve hayvan türlerini değiştirmede de dolaylı etkisi gibi, pek fazla zararlı olmayan etkileri de bulunmaktadır.

Ulusal kaynaklarımızdan ve işletme masrafları çok düşük olan ancak hala % 35'i kadarını değerlendirebildiğimiz hidroelektrik enerji santralleri yatırımları desteklenmeli, ancak büyük hidroelektrik santrallerin ekolojik ve sosyo ekonomik

dengede oluşturduğu Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) yapılarak belirlenecek olumsuz etkilerini azaltacak tedbirler alınmalıdır. Ülkemizdeki hidrolik güç ile ilgili bazı bilgiler Çizelge 3.9’da verilmiştir (90).

Güneş Enerjisi: Dünyanın global olarak halen pek fazla kullanmadığı, ancak geleceğin en fazla kullanılabilecek enerji kaynağı olmaktadır. Ülkemizde brüt olarak yaklaşık 88 milyar tep güneş enerjisi potansiyeli olduğu hesaplanmıştır. Bu potansiyel Çizelge 3.10’da ve bölgelere dağılımı Çizelge 3.11’de gösterilmiştir (90). Güneş enerjisinden elektrik üretimi doğrudan dönüşüm ve dolaylı dönüşüm olmak üzere iki ayrı yöntemle gerçekleştirilir. Bazı ülkelerde kullanımı her geçen yıl artmaktadır. Ancak yeterli değildir. Güneş enerjisi teknolojisindeki ilerlemeler ümit vermektedir.

Çizelge 3.10. Güneş enerjisi potansiyeli (90)

	Brüt	Teknik*	
		Elektrik	Isı
(Milyar tep)	88	9	26

* Termal kullanımlarda sistem verimi % 30, elektrik üretiminde sistem verimi % 10 alınarak teknik potansiyel hesaplanmıştır.

Çizelge 3.11. Bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli (90)

Bölgeler	Toplam güneş enerjisi (KWh/m ² -yıl)	Yıllık toplam güneşlenme süresi (saat/yıl)
Güney Doğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Ege	1304	2738
İç Anadolu	1314	2628
Doğu Anadolu	1365	2664
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971
Türkiye Ortalaması	1311	2640

Rüzgar Enerjisi: Çok eskiden beri bilinmesine rağmen halen çok az kullanılmaktadır. Son yıllarda özellikle Kaliforniya ve İskandinavya’da yerel elektriğin rüzgar türbinleri ile üretilmesi uygulamaları yaygınlaşmıştır. Ülkemizde ağırlıklı olarak Ege ve Marmara olmak üzere çeşitli bölgelerde yer alan 7 ölçüm istasyonu tamamlanmış

ve halen 14 ölçüm istasyonda ölçüm çalışmaları sürdürülmektedir. Yapılan uzay çalışmaları ile saptanan meteorolojik çalışmalar neticesinde ülkemizin rüzgar enerjisi bakımından zengin olduğu belirlenmiştir (Çizelge 3.12) (90). 1999 yılında toplam 23,7 milyon kilowat-saat elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu enerjinin de 21. yüzyılda elektrik üretim sistemleri ile rekabet edebileceği öngörülmektedir. Rüzgar gücünün dezavantajı, enerji üretiminin çok gürültülü olmasıdır (88).

Çizelge 3.12. Bölgelere göre rüzgar potansiyeli (90)

BÖLGELER	Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı (m/sn)	Yıl. Orta. Rüz. Gücü Yoğunluğu (W/m ²)
Güney Doğu Anadolu	2,69	29,33
Akdeniz	2,45	21,36
Ege	2,65	23,47
İç Anadolu	2,46	20,14
Doğu Anadolu	2,12	13,19
Marmara	3,29	51,91
Karadeniz	2,38	21,31

Jeotermal Enerji: Doğal yer altı ısı kaynaklarından gelen enerjinin kullanımı hızla artmaktadır. Sıcaklığın uygun olduğu şartlarda jeotermal enerjiden elektrik üretilmektedir. Bugün için dünyada toplam elektrik kurulu gücü 8274 MW'e, ülkemizde ise 20,4 MW'e'dir. Ülkemizdeki jeotermal sahalardan 5 tanesi elektrik üretimine elverişlidir. Mevcut şartlara göre ülkemizde, 2005 yılı hedefi 185 MW, 2010 yılı hedefi 500 MW ve 2020 yılı hedefi 1000 MW olarak öngörülmektedir.

Biyokütle Enerjisi: İlk çağlardan günümüze değin odun ve bitki artıkları enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. 1997 yılı verilerine göre yerli enerji üretiminin % 25,5'i odun ve tezekten sağlanmış, toplam birincil enerji tüketiminin ise % 9,8'i odun ve tezek ile karşılanmıştır. Türkiye'nin biyogaz potansiyelinin 1400-2000 btep/yıl düzeyinde olduğu belirtilmektedir.

Ülkemizde biyogaz ile ilgili çalışmalara 1957 yılında başlanılmış ancak 1987 yılında kesilmiştir. Çalışmalar günümüzde yeniden başlamış ve çöp termik santrallerin kurulması girişimleri hız kazanmıştır.

Verilen tüm bu bilgiler ışığı altında Ek-1 de Türkiye'nin 2000 yılı için genel enerji denge çizelgesi görülmektedir (90).

3.2. İkincil Enerji Üretim Seviyeleri

Elektrik enerjisi talebindeki artışa rağmen Türkiye'de kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketim miktarı gelişmiş ülkelere göre hâlâ düşük seviyelerdedir. Türkiye, 2000 yılı itibarıyla net 1458 kWh'lik kişi başı elektrik tüketim miktarına sahiptir. Bu miktar OECD ülkelerinin ortalama 8089 kWh'lik kişi başı elektrik tüketim miktarı ile Avrupa Birliği'nin ortalama 6547 kWh'lik kişi başı elektrik tüketim miktarının altındadır.

Kişi başına düşen düşük elektrik tüketim miktarı, hızlı kentleşme, artan nüfus ve artan ekonomik büyüme dikkate alınarak yapılan tahminlere göre, Türkiye elektrik tüketiminin hızla artması beklenmektedir.

Enerjiye doymuş sanayileşmiş ülkelerde bile talebi artan ikincil enerji kaynağı olarak ülke kalkınmasında kritik bir önemi olan elektrik enerjisinin; ülkemiz için kurulu güç, üretim ve tüketim gelişimi Çizelge 3.13'de görülmektedir. Üretici kuruluşlara göre kurulu birincil enerji kaynaklarının gelişimi Ek-2 de verilmektedir (90).

Çizelge 3.13. Elektrik enerjisi kurulu güç-üretim ve tüketimin gelişimi

	1990	1995	1999	2000
Kurulu Güç (MW)	16318	20954	26119	27264
Üretim (GWh)	57543	86297	116440	124922
İthalat (GWh)	176	-	2330	3791
İhracat (GWh)	907	696	285	437
Brüt Arz (GWh)	56812	85551	118485	128276
Net Tüketim (GWh)	46820	67394	91202	98296
Kişi Başı Net Tüketim (kWh)	834	1092	1376	1458
Kişi Başı Brüt Tüketim (kWh)	1012	1386	1787	1903

1990 yılında 16318 MW olan ülke kurulu güç kapasitesi, son dönemlerde devreye alınan ek kapasiteler ile 2000 yılında 27264 MW'a ulaşmıştır. 1990 yılında üretim 57543 GWh'dan 2000 yılında 124922 GWh çıkmış olup bunun 94043,1 GWh'ı termik, 30878,5 GWh'ı hidrolik üretimdir. 1990-1996 yılları arasında net elektrik enerjisi ihracatçısı olan Türkiye, bu yıldan itibaren arz kapasitesi artışının talep artışından daha düşük olması nedeniyle net ithalatçı konumuna gelmiştir. 1990 yılında net tüketim 46820 GWh, kişi başına net tüketim 834 kWh, kişi başına brüt tüketim ise 1012 kWh iken bu miktarlar 2000 yılında yaklaşık iki kat artarak sırası ile 98296 GWh, 1458 kWh ve 1903 kWh olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.14'de verilen elektrik enerjisinin sektörel tüketimi incelendiğinde, 1990 yılında 29212 GWh ile %62 pay alan sanayi sektörünün, 2000 yılında 48842 GWh'a ulaştığı ancak payının %50 seviyesine indiği gözlenmektedir. Buna karşılık konut ve hizmetler sektöründe tüketim 16688 GWh'den 45664 GWh'e ulaşırken payı da aynı şekilde %36'dan %47'e ulaşmıştır. Tarım sektörünün payı %1'den %3'e çıkmış, ulaştırma sektörünün de ise önemli bir değişiklik olmamıştır.

Çizelge 3.14. Elektrik enerjisi tüketiminin sektörlere dağılımı (GWh)

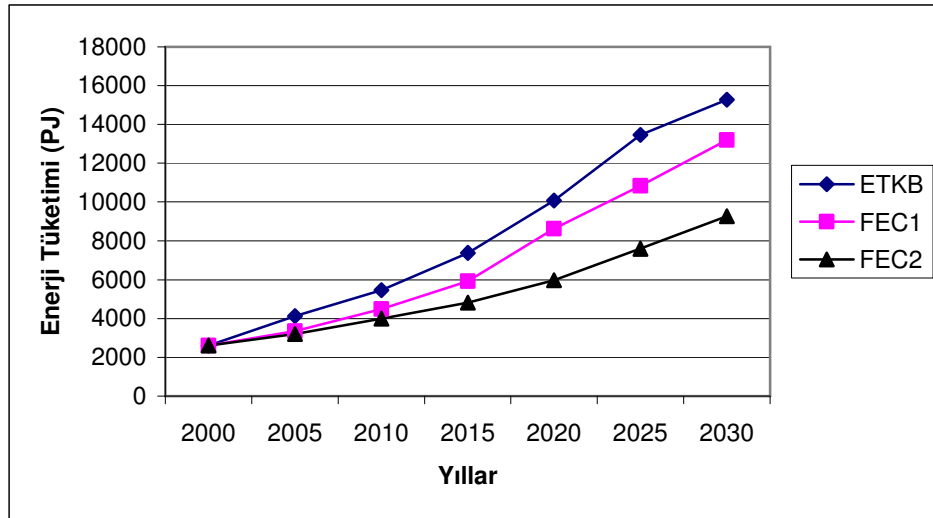
	1990	1995	1999	2000
Sanayi	29212	38007	46481	48842
Konut ve Hizmet	16688	27384	41433	45664
Tarım	575	1513	2624	3070
Ulaştırma	345	490	664	720
Toplam Net Tüketim	46820	67394	91202	98296
Kişi Başı Net Tüketim (kWh)	834	1092	1376	1458

3.3. Nihai Enerji Sektörleri ve Talep Projeksiyonları

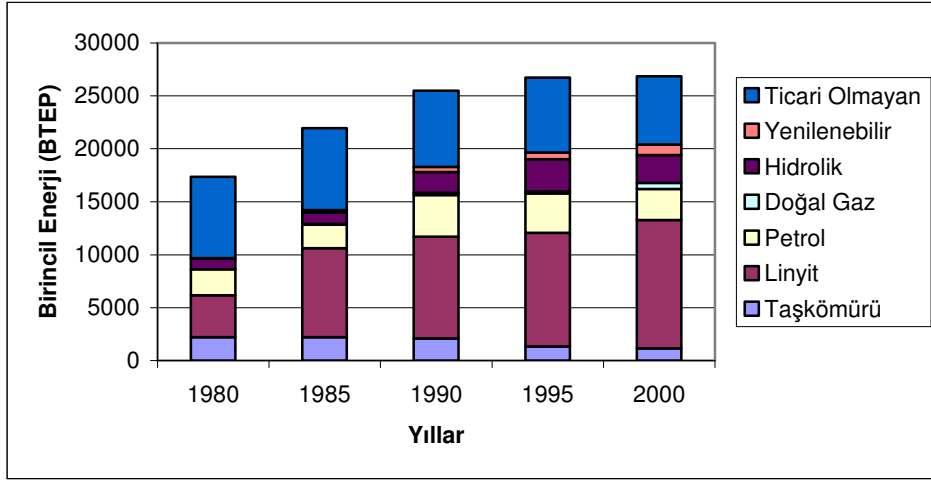
Tüm enerji sistemi içinde nihai enerji tanım olarak fatura bedeli kullanıcı tarafından ödenen enerji türüdür. Müteakiben faydalı enerji gelmektedir. Şekil 3.1'de görülen ETKB, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (94) resmi projeksiyonu, baz senaryo tahminleri (FEC1) ve düşük senaryo tahminleri (FEC2) ise Kavak'ın (95) çalışmasından alınan farklı projeksiyonlardır. ETKB'nin projeksiyonu (94) 2020 yılına kadar yapılmıştır. Geri kalan 2025 ve 2030 yılındaki tahminleri ise Matlab

programı kullanılarak bulunmuştur. Bu projeksiyonların değerleri Ek-4, Ek-5 ve Ek-6 da gösterilmiştir. Talep projeksiyonları modele girilirken sektörlere göre ihtiyaç duyulan enerji kaynakları ayrıştırılarak girilmiştir. Ayrıştırma yapılırken geçmiş yıllarda gerçekleşen enerji ihtiyaç oranları dikkate alınmıştır.

Şekil 3.2 Türkiye birincil enerji kaynakları üretimini göstermektedir. Enerji talebinin yükselişi nedeniyle 1980 yılına kıyasla 2000 yılında birincil enerji kaynakları üretimi %55 oranında artmıştır (90). Grafikte asfaltit üretimi linyitin, jeotermal, rüzgar ve güneş enerjisi yenilenebilir; odun ve hayvansal ve bitkisel artıklar ise ticari olmayan yakıtların içinde gösterilmiştir. Hidrolik güç de yenilenebilir bir enerji kaynağı olmasına rağmen grafikte ayrı gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Farklı talep senaryoları için enerji tüketimleri (94, 95)



Şekil 3.2. Birincil enerji kaynakları üretimi (90)

3. 4. Türkiye'nin Çevre Görünümüne Genel Bir Bakış ve Emisyon Standartları

İnsanların ihtiyaçlarının karşılanmasında ve gelişmenin sağlıklı olarak sürdürülmesinde gerekli olan enerji özellikle sanayi, konut ve ulaştırma gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Ancak enerji; yaşantımızdaki vazgeçilmez yararlarının yanı sıra üretim, çevrim, taşınım ve tüketim esnasında büyük oranda çevre kirlenmesine de yol açmaktadır.

Nüfus artışına, sanayinin gelişmesine paralel olarak kurulan büyük ölçekli enerji üretim ve çevrim sistemleri ekolojik dengeyi büyük ölçüde etkiledikleri gibi sınırlar ötesi etkileri de beraberinde oluşturmaktadır. Bu nedenle çevre sorunları ulusal olduğu gibi uluslararası nitelikler de taşımaktadır. Yine bu nedenle çevre sorunlarını gidermek için, gerekli tedbirlerin alınmasında, uluslararası iş birliğinin rolü önem kazanmaktadır. 1960'lı yılların başından itibaren dünyanın her tarafında görülen hızlı nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme, ısınma, trafik, sanayi faaliyetleri ve buna bağlı elektrik üretimi için artan bir yakıt tüketimini de beraberinde getirmiştir (88). Bunun sonucu olarak enerji yakıtlarından salınan gazlardan dolayı çevre kirlenmesi de artmıştır.

Öncelikle, sera gazı salınımlarını azaltmaya yönelik politika ve önlemler belirlenirken, sistematik bir bakış açısıyla, salınlara neden olan enerji üretim-tüketim etkinlikleri ve ülke ekonomisiyle olan ilişkiler irdelenmeli; çeşitli salım hedeflerinin ve bu hedeflere ulaşılmasını sağlayabilecek olası önlemlerin, enerji arz-talep sistemi ve ekonominin genel dengeleri üzerine etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Bu ilişkilerin irdelenebilmesi ve sağlıklı bir değerlendirme yapılabilmesi için, enerji-ekonomi-çevre bütüncül modellerden yararlanılması gerekmektedir.

Bu nedenle, ulusal enerji ve ekonomik sistemini ayrıntılı olarak benzeştiren, sera gazı salınımlarını hesaplayan ve salımları sınırlandırmanın ülke ekonomisine getireceği yükü ortaya koyabilecek şekilde enerji-ekonomi-çevre üçlüsünün karşılıklı etkileşimlerini ayrıntılı bir biçimde modelleyen, geri besleme ilişkileri tanımlanmış, bütüncül planlamaya olanak sağlayacak yeni modellerin kullanımına gereksinim duyulmaktadır (97).

Fosil yakıt emisyonları arasında SO_2 , NO_x , CO_2 ve çeşitli organik bileşikler, kurum ve partikül maddeler sayılabilir.

Termik santraller kömür, fuel-oil, motorin, doğal gaz ve jeotermal enerji kaynaklarının kullanılmasıyla elektrik enerjisinin üretildiği tesislerdir. Kömüre dayalı bir termik santraldeki ana işlem, kömürdeki kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Bu dönüşüm, büyük miktardaki kömürün kazan adı verilen yanma odalarında yakılması ile elde edilen ısıyla bir dizi arıtma işlemleri ile saflaştırılan suyun buharlaştırılması ve bu buharın türbin-jenaratör ikilisinde elektrik enerjisi üretiminde kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Türkiye'deki termik santrallerin adları, kurulu güçleri, kullandıkları yakıt cinsleri ve diğer bilgiler Çizelge 3.15'de verilmiştir (96).

Çizelge 3.15. Türkiye’deki termik santrallerin adları ve diğer bilgiler (96)

Proje Adı	Gücü MW	Santral Dizaynına Esas Yakıt Özellikleri					Yıllık Yakıt Tüketimi (Ton)
		Cinsi	AID kcal/kg	Kül %	Nem %	Kükürt %	
Soma B Termik Santralı 1-4 Üniteler	4x165	Linyit	2400	41	27	1,5	4 200 000
Soma B Termik Santralı 5-6 Üniteler	2x165	Linyit	1550	51,2	20,84	1,5	3 320 000
Seyitömer Termik Santralı 1-2-3. Üniteler	3x150	Linyit	1800	35	34	1,5-2	3 900 000
Seyitömer Termik Santralı 4. Ünite	1x150	Linyit	1800	47	40	1,5-2	1 375 000
Tunçbilek Termik Santralı 3. Ünite	1x65	Linyit	3900	25	23	1,5	1 840 000
Tunçbilek Termik Santralı 4-5. Üniteler	2x150	Linyit	2170	40	21	1,5	2 150 000
Kangal Termik Santralı 1-2. Üniteler	2x150	Linyit	1300	21	47	2,3	3 600 000
Afşin Elbistan A Termik Santralı 1-2-3-4. Üniteler	4x340	Linyit	1050	15,3	57,7	1,4-2,2	20 000 000
Ambarlı Fuel-Oil Santralı 1-2-3. Üniteler	3x110	Fuel-Oil	9600	--	--	3,5	530 000
Ambarlı Fuel-Oil Santralı 4-5. Üniteler	2x150	Fuel-Oil	9600	--	--	3,5	490 000
Hopa Fuel-Oil Santralı	2x25	Fuel-Oil	9600	--	--	3,5	100 000
Yatağan Termik Santralı 1-2-3. Üniteler	3x210	Linyit	2000	28-35	32-40	2,7	4 900 000
Yeniköy Termik Santralı 1-2. Üniteler	2x210	Linyit	1750	43	33	2,7	3 750 000
Kemerköy Termik Santralı 1-2-3. Üniteler	3x210	Linyit	1750	43	33	2,7	5 600 000
Kangal Termik Santralı 3. Ünite	1x157	Linyit	1300	19,2	52	2,3	1 840 000
Orhaneli Termik Santralı 1. Ünite	1x210	Linyit	2560	23,8	32	1,9	1 340 000
Çayırhan Termik Santralı 1-2. Üniteler	2x150	Linyit	2800	30	27	4	1 780 000
Çayırhan Termik Santralı 3-4. Üniteler	2x160	Linyit	2000	30-45	20-30	4	2 500 000
Afşin Elbistan B Termik Santralı 1-2-3-4. Üniteler	4x360	Linyit	950-1500	15-28	45-55	2,2	18 480 000
Çatalağzı Termik Santralı 1. Ünite	1x150	T.Kömürü	3300	47	18	0,5-2	800 000
Çatalağzı Termik Santralı 2. Ünite	1x150	T.Kömürü	3300	47	18	0,5-2	800 000
18 Mart Çan Termik Santralı 1-2. Üniteler	2x160	Linyit	2600	32	22	2-7	1 800 000
Hamitabat Doğal Gaz Kombine Çevrim Santralı	1200	Doğal Gaz	8100	--	--	--	*1 700 000
Ambarlı Doğal Gaz Kombine Çevrim Santralı	1350	Doğal Gaz	8100	--	--	--	*1 900 000
Bursa Doğal Gaz Kombine Çevrim Santralı	1409	Doğal Gaz	8100	--	--	--	*1 950 000

* Doğal Gaz tüketimleri bin nm³ cinsindendir.

Genelde enerji talebinin karşılanmasında kullanılabilecek yöntemler arasında, hidroelektrik enerji santralleri ile kömür, fuel-oil veya doğal gaz ile çalışan termik santraller ön sıralarda yer almaktadır. Bu teknolojilere alternatif olarak, nükleer enerji santralleri ile jeotermal, rüzgar veya güneş enerjisiyle çalışan enerji santralleri de vardır.

Fosil yakıtına dayalı bir termik santralin çevreye vereceği zararın en aza indirilebilmesi için öncelikle yer seçimi aşamasında ekolojik faktörler dikkate

alınmalı ve ÇED çalışması yapılmalıdır. Önceki yıllarda, yerel meteorolojik koşullar ve santralin tasarım parametreleri göz önüne alınarak yöredeki hava kalitesi değerlerinin belirlenen standart değerlerin altında kalmasını sağlayacak yükseklikte baca inşa edilerek önlenmeye çalışılan çevresel etkiler; son yıllarda sınır ötesi taşınım ve asit yağmurları nedeniyle, kaynakta kirletici gazların tutulması yolu ile önlenilmeye çalışılmaktadır.

Kömür yakıtlı termik santrallerin Türkiye’de ağırlıklı bir elektrik enerjisi üretim biçimi olarak seçilmesinin başlıca nedeni, kömürün fuel-oil veya doğal gaz gibi ülkemizde pahalı ya da kıt olan yakıtlara göre daha ucuz olarak kabul edilmesidir. Ancak, bir enerji cinsinin “Fizibilite Raporu” hazırlanırken, çevreye verebilecek zararların ve bu zararların en aza indirilebilmesi için gerekli önlemlerin maliyetleri de dikkate alınmalıdır. Çünkü, linyit kullanan termik santrallerin bacalarından atmosfere atılan başta SO₂, NO_x ve CO₂ gazları farklı tozlar ve ayrıca üretmiş oldukları çok büyük miktarlara ulaşan küllerle, çevreyi yoğun olarak kirlettiği bilinmektedir. Bu nedenle ve özellikle düşük kaliteli linyit kullanan termik santrallerde, kömürün yanma prosesleri, atıkları ve emisyon kontrolü metotlarına ait bazı bilgilerin incelenmesinde fayda vardır.

Çevresel faktörlerin modellenmesinde kullanılan girdi değerler birincil enerji bazında SO₂ faktörleri Çizelge 3.16 ve teknoloji kökenli NO_x faktörleri ise Çizelge 3.17’de verilmiştir (33).

Ülkemizde kurulu termik santrallerin büyük bir çoğunluğunda, yakıt olarak linyit kullanılmaktadır. Toplam elektrik üretiminde linyitin payı % 45; linyit kullanımında termik santrallerin payı % 60’dır. Bir başka deyişle linyitlerimizin büyük bir kısmı termik santrallerde tüketilmektedir. Mevcut santrallerimizde ortalama 2000 kcal/kg düşük ısı değerli kömürler kullanılmaktadır (88).

Çizelge 3.16. SO₂ Emisyon faktörleri (33)

Yakıtlar	SO ₂ Emisyon Faktörleri (ton/PJ)
Kömür	
Yerli	617
İthal	655
Kok	546
Linyit	
Santral	3735
Sanayi	2090
Konut	1882
Asfaltit	543
Odun	120
Biyomas	104
Sıvı Yakıtlar	
Fuel oil	943
Motorin	141
Gaz	177

Çizelge 3.17. NO_x Emisyon faktörleri (33)

Sektör	NO _x Emisyon Faktörleri (ton/PJ), (ton/GWh) ^a
Santral	
Kömür	3,2
Linyit	2,68-3,34
Petrol	2,36
Gaz	0,54
Temiz Kömür Teknolojileri	0,35-0,43
Sanayi	
Kömür	160
Linyit	150
Fuel-oil	150
Motorin	60
Gaz	100
Konut	
Kömür	52
Linyit	103-130
Asfaltit	85
Fuel-oil	120
Lpg	40
Gaz	53
Odun	50
Ulaştırma	
Benzin	980
Motorin	350

^a Elektrik santralleri için kullanılır

Güç santrallerinde teknoloji kökenli emisyon faktörleri, emisyon azaltım teknolojilerine girmeden önceki değerler de Çizelge 3.18’de verilmektedir (102).

Çizelge 3.18. Termik santrallerin kontrol cihazı öncesi hesaplanan emisyon faktörleri (kg/GJ) (102)

Santrallar	Toz	SO ₂	NO _x	CO ₂ *
LİNYİT				
Afşin-Elbistan A	30,8583	4,0325	0,1737	99,176
Seyitömer	25,675	2,097	0,19	99,176
Soma-A	17,7179	0,9934	0,1224	99,176
Soma-B	7,294	0,885	0,259	99,176
Tunçbilek A-B	37,3456	2,4739	0,1994	99,176
Yatağan	22,299	3,537	0,314	99,176
Yeniköy	51,1469	4,9712	0,2015	99,176
Kemerköy	46,2468	6,1032	0,1704	99,176
Orhaneli	39,173	3,398	0,395	99,176
Çayırhan	39,9892	5,3822	0,4701	99,176
Kangal	85,584	10,361	0,358	99,176
TAŞKÖMÜRÜ				
Çatalağzı B	33,241	0,422	0,364	92,708
FUEL-OIL				
Ambarlı	0,1287	1,99	0,2	72,6
Hopa	0,1287	1,99	0,2	72,6
Mobil santralar	0,1287	1,99	0,2	72,6
Otoprodüktörler	0,1287	1,99	0,2	72,6
Ayrıcalıklı Şirketler	0,1287	1,99	0,2	72,6
MOTORİN				
Aliağa	0	0,4634	0,2	72,6
Teko	0	0,4634	0,2	72,6
Mobil santrallar	0	0,4634	0,2	72,6
Üretim Şirketleri	0	0,4634	0,2	72,6
Otoprodüktörler	0	0,4634	0,2	72,6
DOĞAL GAZ				
Hamitabad	0	0,0059227	0,797	55,8195
Ambarlı	0	0,0059227	0,301	55,8195
Bursa	0	0,0059227	0,039	55,8195
Üretim Şirketleri	0	0,0059227	0,039	55,8195
Otoprodüktörler	0	0,0059227	0,039	55,8195
* CO2 emisyon faktörleri IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Metodolojisine göre hesaplanmıştır.				

3.5. Emisyon Kontrol Önlemleri ve Yönetmelikler

1983 yılında, Türkiye'de çevre politikasının ana çizgilerini ve ilkelerini belirleyen Çevre Kanunu yürürlüğe konmuştur. Bu kanunun birkaç yönetmeliğe ihtiyaç göstermesi dolayısıyla da 1986'da hava kirletici emisyonların belli başlı önemli kaynakları için standartları tanımlayan Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği yürürlüğe girmiştir (Çizelge 3.19) (98, 99). Bununla birlikte ulusal politikada

hedeflenen hızlı sanayileşme nedeniyle çevresel yönetmeliklerin gerekli biçimde uygulamadaki etkinlikleri gösterilememiştir (100).

Modellemede çevresel kısıtlarda önemli bir kaynak oluşturan emisyonlar için çevresel kısıtları tanımlayan ulusal yönetmelik değerleri Çizelge 3.19'da sunulmaktadır (98, 99).

Çizelge 3.19. Türk emisyon standardı (98, 99)

Türk Emisyon Standardı (mg/Nm ³)						
	Yeni Santraller			Eski Santraller		
Kirletici	Katı Yakıtlar	Sıvı Yakıtlar	Gaz Yakıtlar	Katı Yakıtlar	Sıvı Yakıtlar	Gaz Yakıtlar
Partiküller	< 5 MW: 350 <15 MW: 200 >50 MW: 150	> 15 MW : Dizel: 70 Fueloil: 110	10	< 5 MW: 450 <15 MW: 250 >50 MW: 250	>15 MW: 170	10
SO ₂	<300 MW: 2000 >300 MW: 1000 FBC: 400	<300 MW: 1700 >300 MW: 800	>100 MW: 60	3200	3200	-
NO _x	>50 MW: 800	>100 MW: 500	>50 MW: 1000	>50 MW: 1000	>100 MW: 500	>100 MW: 500

Yasal zorlamalar yada onun ötesi hedefler dikkate alındığında emisyonların azaltımı için teknolojik önlemler alınmalıdır. Enerji çevrim ve kullanımında emisyonların azaltımı için söz konusu teknolojik önlemler şu biçimde gruplanabilir (101):

- yakıt dönüşümü
- teknoloji ikamesi
- emisyon kontrol teknolojilerinin tatbik edilmesi.

Yakıt dönüşümü: değişik türden yakıtların kullanılabileceği yakma sistemlerinde yüksek-emisyonlu yakıtların temiz yakıtlarla ikame edilmesidir.

Teknoloji ikamesi: yüksek-emisyonlu enerji çevrim proseslerinin düşük-emisyonlularla değiştirilmesidir. Burada, örneğin, linyit yakıtlı güç santrallerinin doğal gaz yakıtlı yada basınçlı akışkan yataklı yada kömür gazlaştırmaya dayalı

kombine çevrim (Integrated gasification combined cycle) benzeri “temiz kömür teknolojileri” ile ikame edilmesi önerilmektedir. Buradaki ikame kavramı yüksek emisyonlu mevcut santrallerin kapatılmasının yanısıra gelecekte kurulması düşünülen kapasitelerin değiştirilmesini ifade etmektedir.

Emisyon kontrol teknolojileri: Yanma sonrası ve yanma düzenlemesi önlemlerini ele almaktadır. Büyük kapasiteli yakma sistemlerinde SO₂ azaltımı için baca gazı arıtma sistemleri kullanılabilir. Bunlar arasında da, örneğin ıslak kireçtaşı yöntemi büyük sistemler için uygulanacağı gibi (%95 civarı bir etkinlik ve alçı yan ürün olarak edinilebilir), küçük kapasiteli olanlar için ise kuru kirecin doğrudan yakma sistemi içerisine püskürtme yöntemi (yaklaşık %60 verimlilikle) uygulanabilir (98).

Ülkemizde Termik Santrallarda kullanılan kömürün yanması sonucunda ortaya çıkan kükürt oksitleri emisyonunun “Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği” sınır değerlerinin üzerinde olması nedeniyle belli bir program dahilinde tüm santrallarımıza “Baca Gazı Desülfürizasyon (FGD) Tesisi” entegre edilmesi gerekli görülmüş olup, uygulanacak proses olarak dünyadaki benzeri tesislerde ticari boyutta en çok uygulanmış olan konvansiyonel yaş kireçtaşı prosesi (wet limestone scrubbing process) seçilmiştir (96).

Konvansiyonel yaş kireçtaşı prosesi, baca gazını yıkama maddesi olarak kireçtaşı (CaCO₃) çözeltisi kullanan ve son ürün olarak alçıtaşı (CaSO₄.2H₂O) üreten bir yaş yıkama sistemidir. Söz konusu sistem, termik santralda üretilen baca gazının FGD tesisi kapsamında yer alan yıkayıcı kulelere (scrubber) gönderir. Burada baca gazı içerisinde mevcut kükürt oksitlerinin yıkayıcı kulede devirdaim edilen çözelti ile temas ettirilmeleri esasına dayanmaktadır. Baca gazının ihtiva ettiği kükürt oksitlerinin kireçtaşı çözeltisi ile reaksiyona girerek oluşturduğu alçıtaşı çamurunun yıkayıcı kulenin alt kısmında toplanması ve bu çamurun yıkayıcı kule dışındaki alçıtaşı su giderme tesislerine gönderilerek suyunun alınması ve oluşan yoğun alçıtaşı çamurunun santraldan gelen kül ile karıştırılarak nihai ürünün atık sahasında depolanması prosesin ana hatlarını oluşturmaktadır. İhtiva ettiği kükürt oksitlerinden minimum %95 temizlenen baca gazı ise tekrar ısıtılarak santral bacasından atmosfere

verilmektedir. Dolayısıyla FGD tesisi esas itibarıyla üç ana bölümden oluşmaktadır (96):

Yıkayıcı kule: Yıkayıcı kule kirli baca gazının kireçtaşı çözeltisi ile karşılaştığı ve desülfürizasyon reaksiyonlarının gerçekleştiği ortamdır.

Kireçtaşı depolama, transfer ve çözelti hazırlama ünitesi: Kireçtaşı ocağından getirilen parça kireçtaşının kırma-öğütme ve çözelti hazırlama işlemlerinin tamamlanarak oluşturulan kireçtaşı çamurunun pompalarla yıkayıcı kulelere gönderildiği tesis kısmıdır.

Alçıtaşı Su giderme ve alçıtaşı / kül karıştırma ünitesi: Yıkayıcı kulelerden alınan alçıtaşı çözeltisinin su giderme ünitesinde susuzlaştırılması ile oluşturulan konsantre alçıtaşı çamurunun, kül ile karıştırıldığı tesis kısmı olup meydana gelen son ürün, santralin mevcut kül bantları ile kül atma sahasına gönderilmektedir (96).

Ülkemizdeki mevcut üretim sistemlerinde kurulu emisyon azaltım teknolojilerinden toz ve kükürt arındırma için söz konusu olanlar tip itibarıyla Çizelge 3.20’de (102), ihalesi yapılan baca gazı kükürt arıtma tesisi yapılan termik santraller Ek-3 de yer almaktadır (96).

Çizelge 3.20. Mevcut santrallarda hava kirliliği azaltım sistemleri (102)

Santralin Adı	Elektrofiltre	Baca Gazı Kükürt Arıtma		
	Verim (%)	Verim (%)	Teknoloji	Durumu
Çatalağzı B1-2	99	-	-	-
Afşin-Elbistan A 1-4	99	-	-	-
Çayırhan 1-2	99,5	95	Islak	Mevcut
Çayırhan 3-4	99,9	95	Islak	Mevcut
Kangal 1-2	98	-	-	-
Kangal 3	99,9	95	Islak	Mevcut
Kemerköy 1-3	99,9	95	Islak	Mevcut
Orhaneli 1	99,8	95	Islak	Mevcut
Seyitömer 1-4	98	-	-	-
Soma A 1-2	83	-	-	-
Soma B 1-2	98	-	-	-
Soma B 3-4	99	-	-	-
Soma B 5-6	99,9	-	-	-
Tunçbilek 3-5	98	-	-	-
Yatağan 1-3	99,4	95	Islak	Mevcut

2x160 MW Çan Termik Santralı Akışkan Yatak teknolojisine göre yapılmış olup işletmeye alınma aşamasındadır.

Orhaneli Termik Santralı ve Kangal Termik Santralı 3. Ünitesinde DESO₂ yöntemiyle baca gazı arıtılmakta, kömürle çalışan tüm termik santrallerimizde baca gazındaki kül, elektrofiltrelerde tutulmaktadır (96).

NO_x emisyonlarının azaltımı için ise büyük ve küçük ölçekli sistemler için yanma prosesinin ayarlanması %60'lara varan bir azaltma verimliliği sağlayabilir (103).

Bacagazı NO_x arıtma yöntemleri üç ana grupta toplanmaktadır (88):

- Kuru NO_x arıtma yöntemleri,
- Yaş NO_x arıtma yöntemleri,
- Birleşik SO₂/NO_x arıtma yöntemleri.

Termik Santrallardan kaynaklanan ve çevre kirlenmesine neden olan etkenlerden;

- Uçucu küllerin tutulması için santrallarda %99,9 verimle çalışan Elektrofiltreler mevcuttur.
- Kazanda yanma olayı sırasında oluşacak NO_x gazının limit değerlerde tutulması için santral dizaynında gerekli önlemler alınmaktadır.
- Baca gazı içindeki SO₂ gazının limit değerlerinin altında tutulması için son yıllarda kömür yakıtlı termik santraller Baca Gazı Kükürt Arıtma Tesisli veya Akışkan Yatak Teknolojisi ile yapılmaktadır.

Mevcut değişik emisyon kontrol seçenekleri ve Türkiye'de gitgide büyüyen enerji ihtiyacını düşük maliyetle karşılamak konusu göz önünde bulundurulursa şu sorunun cevaplandırılması gerekmektedir:

Türkiye'de enerji sisteminin maliyet-etkin bir yöntemle farklı emisyon kontrol yönetmeliklerine uyumunu yada hedeflerini gerçekleştirebilmek için ne tür bir emisyon kontrol önlemleri karışımı ele alınmalı ve bunun getireceği maliyet yükü ne olabilir?

Bu soruya verilecek cevap ancak EFOM-ENV ve benzeri enerji- emisyon modellerinin uygulanması ve sonuçlarının analiziyle mümkün olabilir.

4. EFOM-GAMS İLE ULUSAL ENERJİ SİSTEMİNİN VE ALT SEKTÖRLERİN MODELLENMESİ

Bu bölümde EFOM-ENV doğrusal programlama modeli verilmiştir (9). Model incelendiğinde iç tüketim oranının dikkate alınmadığı tespit edilmiştir. Sonuçların daha tutarlı olması için bu oran modele ilave edilmiştir. Modelin orijinal ve düzeltilmiş hali amaç fonksiyonunda gösterilmiştir. Ayrıca enerji sektörlerinin tanımları ve şekilsel gösterimleri bu bölümde verilmiştir.

EFOM-ENV Modeli, etkin bir şekilde enerji sistemleri için stratejiler geliştirmek amacıyla, çevresel problemlerin önemli rol oynadığı birçok ülkede uygulanmıştır. Bu modelleme prosedüründeki temel sorun, uygun teknik, ekonomik ve çevresel parametrelerin belirlenmesidir. Bu, mevcut yakıtlar, talep, jeografik ve iklim şartları türünden bir ülkenin ekonomik yapısının geniş bir analizini gerektirmektedir.

Türkiye'deki mevcut enerji arz sisteminin yapısının analizi ve değerlendirilmesinden sonra, modelin ağ yapısı değiştirilmiştir. Daha sonra, emisyon kontrol teknolojileri tanımlanmış ve detaylı enerji dönüşüm analizleri yapılmıştır. Tüm ulusal enerji sistemini ve emisyon azaltma ve enerji arzı için gelecekteki teknolojileri içeren bir veri tabanı Türkiye'nin enerjiden sorumlu kuruluşunda mevcut değildir. Bu nedenle enerji ile ilgili bazı veriler resmi kurumlardan çıkarılmış bazı veriler ise diğer kurumlardan tahmin yoluyla elde edilmiştir.

4.1. Türkiye için EFOM-ENV Model Versiyonu

Enerji çevre araçlarının çoğu sanayileşmiş ülkeler için geliştirilmiştir. Gelişmekte olan birçok ülkede güvenilir ve düzgün veri eksikliği çok kapsamlı ve detaylı bazı modellerin kullanımını sınırlamaktadır. Yeterli bir enerji çevre planlama aracı; kırsal alan yapısı, ticari olmayan yakıtların temsili, bölgesel dengesizliklerin gözönüne alınması, enerji ve ekonomi arzındaki etkileşim, yenilenemeyen kaynakların yönetimi ve döviz ihtiyacını yansıtmalıdır.

Türkiye’de, ekonomik ve sosyal yapılanma eşit dağılmamıştır. Batı bölgeleri fazla sanayileşmişken, diğer bölgeler zayıf bir ekonomiye sahiptir. Ülkenin çeşitli bölümlerindeki ekonomik gelişim farklılıkları genelde bölgelere göre enerji talebi farklılıklarını doğurmaktadır. Enerji arz modellerinin çoğu, enerji sisteminin sadece teknik boyutları ile temsil edilmektedir. Bu tür modelleri geliştirmekte olan ülkelere uygulamak için genellikle bölgesel boyutunu da gözönüne alan değişiklikler yapılması gereklidir. EFOM-ENV modeli bir ülkedeki bölgesel dengesizlikleri gözönüne alabilecek özelliklere sahiptir.

Yeterli bir enerji-çevre planlama modeli aracı, ülkenin enerji alanındaki emisyon gelişimi üzerine dışsal etkileri, bölgesel dengesizlikleri ve döviz kurlarındaki oranlar türünden problemleri yansıtmalıdır. Model enerji sisteminin yapısı üzerine döviz oranlarının etkisini analiz edebilmelidir.

Matematiksel Model: EFOM-ENV doğrusal optimizasyon modeli olup tüm enerji sektörünü modüler bir yapı ilişkisi içinde inceler. Bu yapıda modüller arasındaki ilişkiler doğrusal denklemlerle ifade edilmiştir. Modelin amacı sisteme girilen enerji talebi için enerji arz ve emisyon azaltım maliyetlerini minimize etmektir. Bunun için modelde kullanılan kısıtlar; denge denklemleri, kapasite denklemleri, piyasa tahsis denklemleri ve emisyon azaltım denklemleri kısıtından meydana gelmektedir. Model, şebeke içindeki enerji akımları, emisyon azaltım prosesleri ve enerji dönüşümlerinin kapasite ve üretim düzeylerini optimize eder (9).

Amaç Fonksiyonu: Maliyet denklemi, tüm planlama periyodunu içeren enerji sistemindeki yedi farklı maliyetin bir araya gelmesinden oluşur. Bu denklem optimizasyon programı için amaç fonksiyonu olarak kullanılır. Tüm planlama periyodunda enerji sistemi aracılığıyla hesaplanan maliyetlerin tamamı minimize edilir. Tüm maliyetler planlama periyodunun başlangıcına indirgenir. Bu yolla hesaplanan toplam maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibidir (Eş. 4.1):

$$\text{Toplam Maliyet} = \sum_t DF_t \times (KM_t + DM_t + TM_t + PM_t + SM_t + YM_t + AM_t) \quad [4.1]$$

Buradaki değişkenler aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$DF_t = \sum_i^{Y_{it}} (1 + \text{discrete})^{-i - \sum_b^{b \leq t} Y_{it_b}}$$

$$KM_t = \sum_e \sum_n \sum_i R_{e,i,n,t} \times (\text{Purprice}_{e,i,n,t} + \text{Costvar}_{e,i,n,t})$$

$$DM_t = \sum_e \sum_n \sum_n (I_{e,n',n,t} \times \text{Costvar}_{e,n',n,t})$$

$$TM_t = \sum_e \sum_n \sum_d D_{e,n,d,t} \times (\text{Costvar}_{e,n,d,t} - \text{Selpric}_{e,n,d,t})$$

$$PM_t = \sum_p (P_{p,t} \times \text{Costvar}_p)$$

Orijinal durum

$$PM_t = \sum_p (P_{p,t} \times \text{Costvar}_p) / (1 - \text{Intcons}_{p,t})$$

Düzeltilmiş durum

$$SM_t = \sum_u (\text{Capac}_{u,t} \times \text{Costfix}_u)$$

$$YM_t = \sum_u \text{Anfac}_u \times \left(\sum_b \min(\text{RL}_{u,b,t}, \text{Year}_t) \times \text{CapacBUI}_{u,b} \right) \times \text{Costinv}_u / \text{Year}_t$$

$$\text{Anfac}_u = \frac{\text{Irate}}{1 - (1 + \text{Irate})^{-\text{Lifetec}_u}}$$

$$AM_t = \sum_a \sum_p (\text{Abat}_{a,p,t} \times \text{Costabat}_{a,p})$$

$$\text{Costabat}_{a,p} = \frac{\text{Irate} \times \text{Costinv}_{a,p} \times \text{Convabat}}{(1 - (1 + \text{Irate})^{-\text{Lifetec}_a}) \times \text{Avaifac}_{a,p}} + \text{Costvar}_{a,p}$$

Kısıtlar

Denge Denklemleri: Denge denklemlerinin tamamı, “Enerji sistemine giren enerji, harcanan enerji ve sistemde kaybedilen enerjinin toplamına eşittir” kavramını yansıtır. Bu denge denklemleri üreticiler düzeyinde tanımlanırlar; böylece onlar model şebekesinin düğümleri olarak kabul edilirler. Denge denklemleri: genel denge denklemleri, yük eğrisi modeli için özel denge denklemleri, enerji depolama modeli için denge denklemi olmak üzere üçe ayrılır.

Enerji sisteminde, giren enerji akımları toplamı çıkan enerji akımları toplamına eşittir (Eş. 4.2). Üreticiye giren enerji akımları; ithal enerji kaynakları, yerli kaynaklar veya diğer üreticilerden gelen ara enerji kaynaklarıdır. Üreticiden çıkan enerji akımları ise diğer üreticilere giden ara enerji kaynakları veya iletim kayıplarının dahil edildiği talep sektörleridir. Eş. 4.3’deki mevsimsel denge denklemi elektrik, buhar veya ısıyı kullanan veya ulaştıran üreticileri açıkça göstermek için oluşturulmuştur. Eş. 4.4 ve Eş. 4.5’deki mevsimsel denge denklemi ise her zaman periyodunda mevsimsel bir enerji taşıyıcısı ile kojenerasyon üreticisi veya elektrik üreticisinin her kombinasyonu için oluşturulmuştur. Bu eşitlikler aracılığıyla pik yük birimleri ve temel yük birimleri arasındaki ayırım belirlenmiş olur. Eş. 4.6’deki mevsimsel denge denklemi; yaz ve kış süresince temel ve pik üretim miktarlarına ilaveler için gereklidir. Bu denge denklemi elektrik veya kojenerasyon üreticilerinin her kombinasyonu ve her zaman periyodunda giren enerji taşıyıcısı için oluşturulmuştur. Eş. 4.7 elektrik depolama denklemi gösterilmiştir.

$$\sum_i R_{e,i,n,t} + \sum_{n'} I_{e,n',n,t} + \sum_{pen} (P_{p,t} \times Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n',n,t} + \sum_d D_{e,n,d,t} \quad [4.2]$$

$$\sum_i R_{e,i,n,t,seas} + \sum_{n'} I_{e,n',n,t,seas} + \sum_{pen} (F_{p,seas} \times P_{p,t} \times Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n',n,t,seas} + \sum_d F_{e,n,d,seas} \times D_{e,n,d,t} \quad [4.3]$$

$$\sum_{pen} (P_{p,t,peak} \times Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n',n,t,peak} \quad [4.4]$$

$$\sum_{pen} (P_{p,t,base} \times Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n',n,t,base} \quad [4.5]$$

$$\sum_i R_{e,i,n,t} + \sum_{n'} I_{e,n',n,t} + \sum_{seas} \sum_{pen} (P_{p,t,s} \times Y_{e,p}) = 0 \quad [4.6]$$

$$\sum_{n'} I_{e,n',n,t,base} + (P_{p,t} \times Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n,n',t,peak} \quad [4.7]$$

Kapasite Denklemleri: Kurulu olan kapasiteler ve her periyotta kurulması gereken ek kapasiteler, kapasite denklemleri tarafından belirlenir. Model içinde, yatırım maliyetleri veya sabit maliyetleri verilen her birim için kapasiteler tanımlanır. Enerji sisteminin dinamik özelliğinden dolayı kurulu olan kapasiteyi bir periyotdan diğer periyoda transfer etmek için Eş. 4.8'deki transfer kapasite denklemi kullanılır. Bir birim kurulu kapasitenin durumu, üretim için kullanılabilir kapasiteyi hesaplayıp kesin bir çıktı elde etmekte birim kapasite denklemi (Eş. 4.9) kullanılır.

$$CAPAC_{u,t} = RESC_{u,t} + \sum_{b < t} MIN(RI_{u,b,t}/Year_t, 1) \times BUI_{u,b} \quad [4.8]$$

$$CAPAC_{u,t} \times Avaifac_u \times Convfac_u \geq P_{p,t} \times Outelec_p \quad [4.9]$$

Piyasa Tahsis Denklemleri: Pazar tahsis denklemleri, maliyet optimizasyonunun gerçekçi olmayan sonuçlar üretmesi durumunda, pazardaki enerji teknolojilerinin paylarının modellenmesinde kullanılır. İki tip pazar tahsisi mevcuttur.

- Proses seviyesi ve prosesin birim seviyesi arasındaki orana dayalı kısıtlar. Birim seviyesi, bu birime ait olan proses seviyelerinin toplamıdır (Eş. 4.10-12).
- Birim seviyesi ve onun üretici seviyesi arasındaki orana dayalı kısıtlar. Üretici seviyesi, o üreticiye ait olan birim seviyelerinin toplamıdır (Eş. 4.13-15).

Bir proses için pazar tahsis denklemleri (u, p, t) :

$$Y_{e,p,t} \times P_{p,t} = Mal_{e,p,t} \times \sum_{peu} (Y_{e,p} \times P_{p,t}) \quad [4.10]$$

$$Y_{e,p,t} \times P_{p,t} > A_{min,e,p,t} \times \sum_{peu} (Y_{e,p} \times P_{p,t}) \quad [4.11]$$

$$Y_{e,p,t} \times P_{p,t} \leq A_{max,e,p,t} \times \sum_{peu} (Y_{e,p} \times P_{p,t}) \quad [4.12]$$

Bir birim için pazar tahsis denklemleri (n , u , t):

$$\sum_{peu} (Y_{e,p,t} \times P_{p,t}) = M_{a,e,p,t} \times \sum_{pen} (Y_{e,p} \times P_{p,t}) \quad [4.13]$$

$$\sum_{peu} (Y_{e,p,t} \times P_{p,t}) > A_{min,e,p,t} \times \sum_{pen} (Y_{e,p} \times P_{p,t}) \quad [4.14]$$

$$\sum_{peu} (Y_{e,p,t} \times P_{p,t}) \leq A_{max,e,p,t} \times \sum_{pen} (Y_{e,p} \times P_{p,t}) \quad [4.15]$$

Emisyon Azaltım Denklemleri: Belirli bir proses için kullanılan azaltım teknolojisinin derecesi, azaltım düzeyi tarafından belirlenir. Azaltım düzeyleri için birinci kısım, atanan enerji prosesi aktivite düzeylerinden daha yüksek olmayan aktivite düzeylerine uymaktır (Eş. 4.16). Çevresel yasal düzenlemeler belirli enerji proseslerini bağlayan açıkça belirtilen bir yıldan sonraki azaltım teknolojileri ile düzenlenir. Bu düzenlemeler Eş. 4.17'deki Envreg parametresi ile modellenebilir. Eş. 4.18'deki emisyon denklemi, emisyon indirgenmesi için geliştirilen kontrol stratejilerine uygulanır. Farklı çevresel kirletici maddelerin (SO₂, NO_x gibi) emisyon üst sınırları, zaman periyodunun her yıl başında belirlenebilir. Emisyon denklemlerinde belirli kirletici maddelerin emisyonlarının hepsinin toplam limiti enerji sistemleri tarafından tespit edilir. Optimizasyon modeli elde edilen bu emisyon hedeflerine en ucuz indirgeme teknolojilerini aramak için çalışır.

$$P_{p,t} \geq A_{bat,a,p,t} \quad [4.16]$$

$$Envreg_{a,t} \times P_{p,t} = A_{bat,a,p,t} \quad [4.17]$$

$$\begin{aligned}
& \sum_e \sum_n \sum_i (\text{Flowemiss}_{c,e,i,n,t} \times R_{e,i,n,t}) + \sum_e \sum_{n'} \sum_n (\text{Flowemiss}_{c,e,n',n,t} \times I_{e,n',n,t}) + \\
& \sum_e \sum_n \sum_d (\text{Flowemiss}_{c,e,n,d,t} \times D_{e,n,d,t}) + \sum_p (P_{p,t} \times \text{Procemiss}_{p,c} / \text{Proceff}_p) + \\
& \sum_a \sum_p (\text{Abat}_{a,p,t} \times \text{Abatemiss}_{a,p,c} / \text{Proceff}_p) \leq \text{Emissmax}_{c,t}
\end{aligned} \tag{4.18}$$

Amaç fonksiyonu ve denklemlerdeki parametrelerin açıklanması aşağıdaki gibidir:

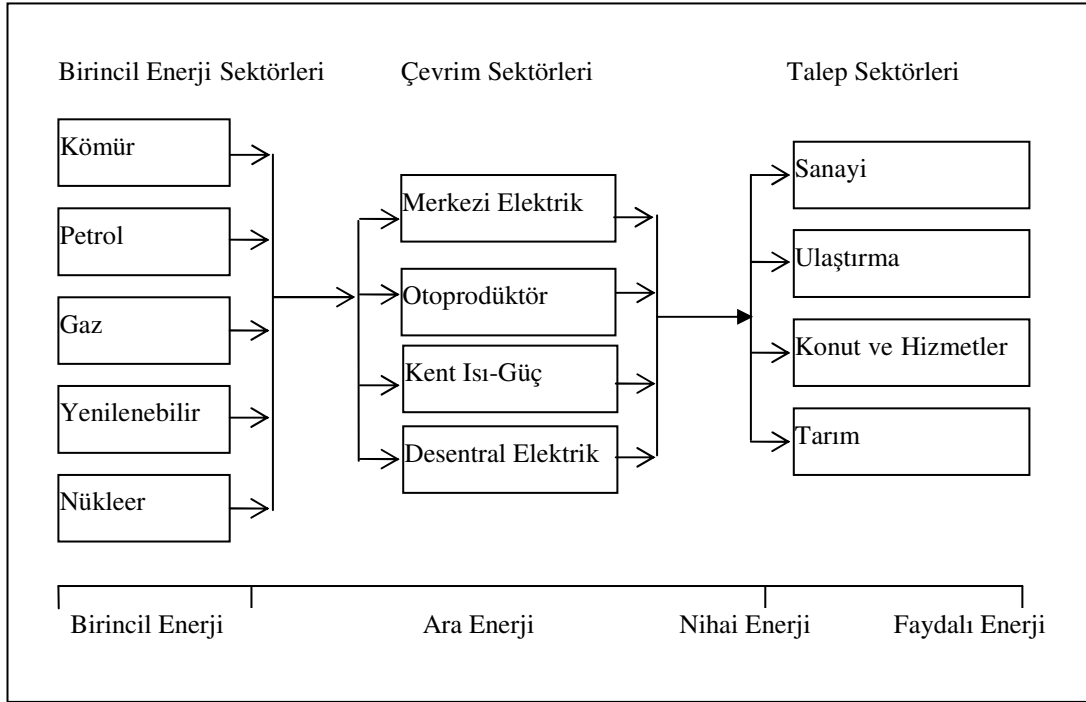
DF	İndirgeme faktörü
KM	Kaynak maliyeti
DM	Dağıtım maliyeti
TM	Talep maliyeti
PM	Proses maliyeti
SM	Sabit maliyet
YM	Yatırım maliyeti
AM	Azaltım maliyeti
t	zaman indeksi ($T_0 < t < T$);
Discfact _t	t periyodu için indirgeme faktörü;
e	elektrik, ısı veya buhar enerji taşıyıcısı indeksi;
n, n'	elektrik, ısı veya buhar üretici indeksi;
i	ithalat/kaynak kategori indeksi;
$R_{e,i,n,t}$	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);
$D_{e,n,d,t}$	t periyodunda d talep kategorisi için n üreticisinden çıkan e enerji taşıyıcısının son talebi (PJ/yıl);
$P_{p,t}$	p prosesinin t periyodundaki proses düzeyi (PJ/yıl);
$\text{Intcons}_{p,t}$	p prosesinin t periyodundaki iç tüketimi;
$\text{Capac}_{u,t}$	t periyodu süresince p prosesinin kapasitesi;
Anfac_u	u birimini yıllık ödeme faktörü;
Avaifac_u	p prosesinin kullanabilirlik faktörü;
Convfac_u	birim PJ/Y ise 1, MW ise 0,0315 alınır;

$Outelec_p$	p prosesinin çıktısı elektrikse $Out-elec_p = 1$ olur;
$RL_{u,b,t}$	b periyodu içinde kurulan $CAPAC_u$ süresince yılların sayısı;
$Year_t$	t periyodundaki yıllarının sayısı;
$BUI_{u,b}$	b periyodunda kurulan u biriminin kapasitesi;
$RESC_{u,t}$	eğer planlama periyodunun başlangıcından beri yeni kapasite yatırımı yapılmamışsa, u biriminin artık kapasitesi t periyodu içinde kullanılabilir kapasitesi;
$Abat_{a,p,t}$	t periyodu boyunca p prosesinin emisyonlarının indirgendiği azaltım teknolojilerinin azaltım düzeyi;
$Envreg_{a,t}$	a azaltım teknolojisi ile düzenlenmiş p enerji prosesi bölümü;
$Flowemiss_{c,e,i,n,t}$	t periyodu süresince i'den n kaynak akımlarına uygun olan c (SO_2 , NO_x) 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_2 , NO_x) emisyonu (ton/PJ);
$Flow-emiss_{c,e,n,d,t}$	t periyodu süresince n'den d talep akımlarına uygun olan c (SO_2 , NO_x) emisyonu (ton/PJ);
$Procemiss_{p,c}$	her bir p girdi proses düzeyleri içi c emisyonu (ton/PJ);
$Proceff_p$	p prosesinin verimliliği;
$Abatemiss_{a,c}$	çıktı proses düzeyleri başına c emisyonunun indirgenmesi (ton/PJ);
$Emissmax_{c,t}$	t periyodu süresince c emisyonunun üst sınırı;
$Costvar$	değişken maliyet; akım, proses düzeyi veya azaltım düzeyi için önerilen maliyetlerin toplamıdır. Maliyetlere değişken işletme ve bakım maliyetleri dahildir;
$Costfix$	sabit maliyetler; kurulu kapasite için önerilen tüm işletme maliyetlerini gösterir;
$Costinv$	yatırım maliyetleri; enerji prosesi veya azaltım teknolojisinin bir birim kapasitesini inşa etmek için girilmiş tüm fiyatların toplamını gösterir;
$Purpric$	satınalma fiyatı; sadece ithal edilen enerji kaynakları için düşünülmüştür. Bu fiyat ithal edilen bir birim akımın maliyetlerini gösterir;

Selpric	satış fiyatı, yalnızca ithal edilen enerji için düşünülmüştür. Bu fiyat ihraç edilen bir birim akımdan sağlanan karları gösterir;
Lifetec	ekipmanların ekonomik ömürlerini yıllar içinde gösterir. Yıllık ödenekler ekonomik ömrü geri ödeme peryotlarına eşitlemek için hesaplanır;
Irate	faiz oranı (%5 olarak alınır);
Discrate	indirim oranı (%5 olarak alınır);
$Y_{e,p}$	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)
Seas	=Pgs, Pgw, Bgs, Bgw = yaz ve kış mevsimlerindeki temel ve pik yük indeksi
Peak	Pgs, Pgw
Base	Bgs, Bgw

4.2. Ulusal Enerji Sektörleri

Ulusal enerji sistemi temel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar birincil enerji arz sektörü (kömür, petrol, gaz, yeni ve yenilenebilir ve nükleer), ikincil enerji yada dönüşüm sektörü (merkezi elektrik) ve nihai enerji kullanıcı sektörü (sanayi, konut ve hizmetler, taşıma ve tarım). Şekil 4.1 genel olarak bu sektörleri vermektedir. 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 ileri yönde kapasite hesaplamaları biçiminde oluşmaktadır. Ana hatlarıyla verilen sistem sektörel bazda ve detaylı olarak ilerleyen kısımlarda sunulacaktır.



Şekil 4.1. Türkiye EFOM-ENV modelinin yapısı

4.2.1. Birincil enerji arz sektörleri

Kömür sektörü

Kömür, termik santralda elektrik enerjisi üretiminde, konutlarda, sanayide, ulaşımda, ısınma amaçlarıyla kullanılır. Ayrıca, kömürlerden astleştirme ve teknolojik yöntemlerle bir çok ürün elde edilebilir. Bu yöntemlerden başlıcaları; koklaştırma, sıvılaştırma ve gazlaştırmadır.

Kok, taşkömürünün 7000 °C üzerinde havasız bir ortamda ısıtılarak uçucu maddelerini kaybetmesi neticesinde elde edilmektedir. Ülkemizde, Karabük, Ereğli ve İskenderun demir çelik kok fabrikalarında kok üretimi yapılarak sanayi ve ısınma amaçlı olarak tüketime sunulmaktadır. Zonguldak merkez ve Çatalağzı lavvarı ürünleri 0,5-6 mm ve 0-10 mm boyutlu kömürler, demir çelik fabrikalarına verilmekte ve bu kömürlerin uçucu maddelerinin alınması neticesinde kok elde edilmektedir. Demir-çelik fabrikalarında kullanılan koklaşabilir taşkömürünün %60-

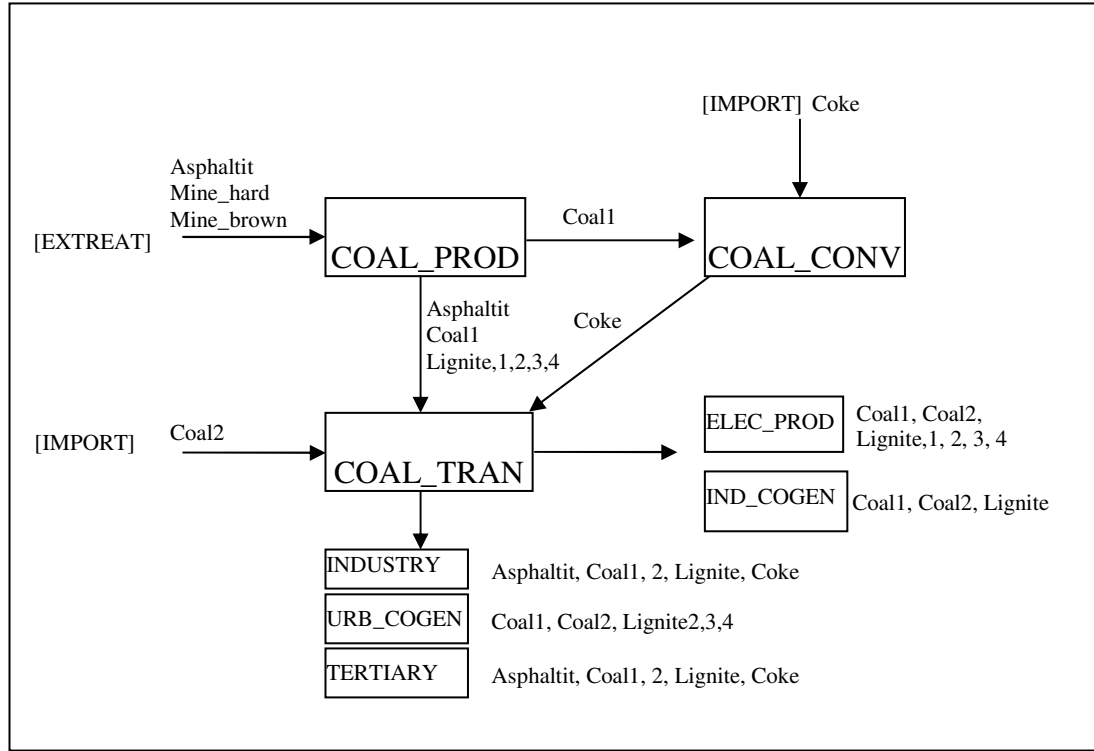
65'i dış kaynaklardan temin edilmektedir. Linyitler üzerinde yapılan koklaştırmaya yönelik araştırmalardan olumlu bir sonuç alınamamıştır (91).

Türkiye'de taşkömürü ve linyitlerin gazlaştırılması ve sıvılaştırılmasına yönelik endüstriyel çapta bir tesis bulunmamaktadır. Buna karşılık, amonyak üretiminde kullanılacak olan linyitler, azot sanayinde kullanılan gazlaştırıcılarda gazlaştırılarak, sentez gazlar elde edilmektedir.

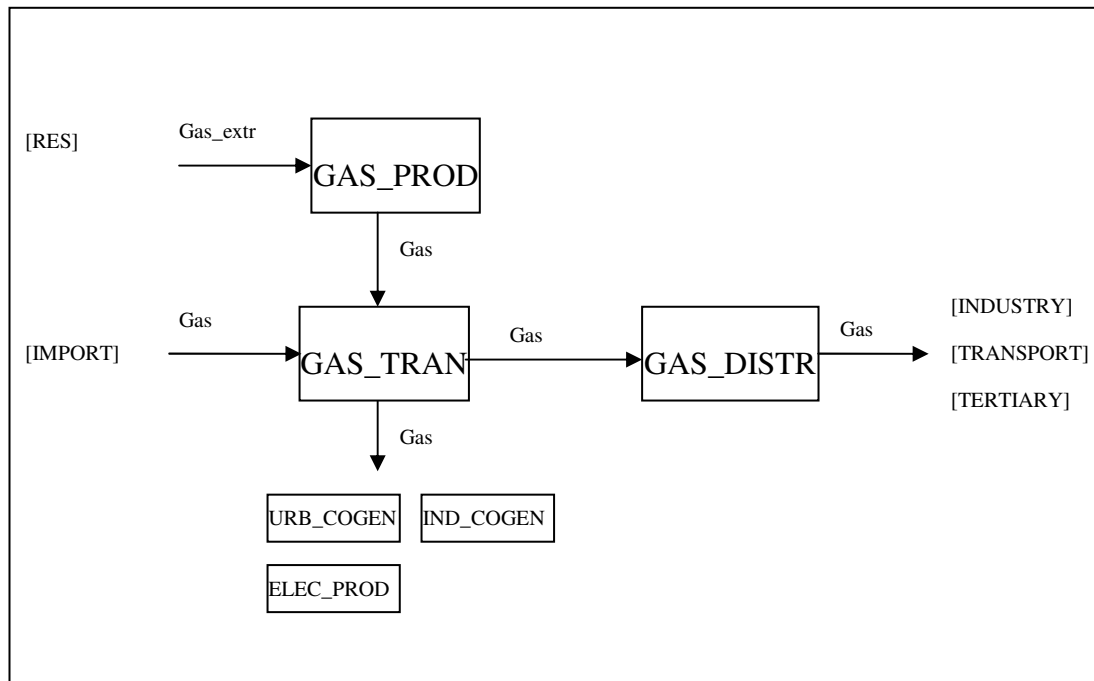
Kömür sektörünün önemli girdilerini linyit, taşkömürü -1 (yerli), taşkömürü-2 (ithal), kok ve asfaltit oluşturmaktadır. Sektörde önemli faaliyet alanlarını üretim (COAL_PROD) ve termik santrallere kullanım (COAL_TRAN) ile verilirken, (COAL_CONV) ile koklaştırma dönüşümü verilmektedir. Bu dönüşümün ürünü kok (Coke) COAL_TRAN ile konut ve endüstriye gönderilmektedir (Şekil 4.2).

Gaz sektörü

Gaz sektörü doğal gaz üretim ve ithal faaliyetlerini modellemektedir. GAS_PROD ile yerli doğal kaynaklardan üretim ve GAS_TRANS ile hem yerli üretim hemde ithalat modellenmiştir. Kullanım sektörleri ise endüstriyel otoprodüktörler (IND_COGEN), ileriye dönük teknolojiler olan (URB_COGEN) santralleri ve merkezi elektrik sektöründe kombine çevrim santralleri için (ELEC_PROC) olarak sıralanmaktadır. İletim hattı ile (GAS_DISTR) nihai kullanım sektörlerine (INDUSTRY, TRANSPORT ve TERTIARY) bağlanmaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.2. EFOM-ENV/GAMS ağı: Türkiye kömür sektörü

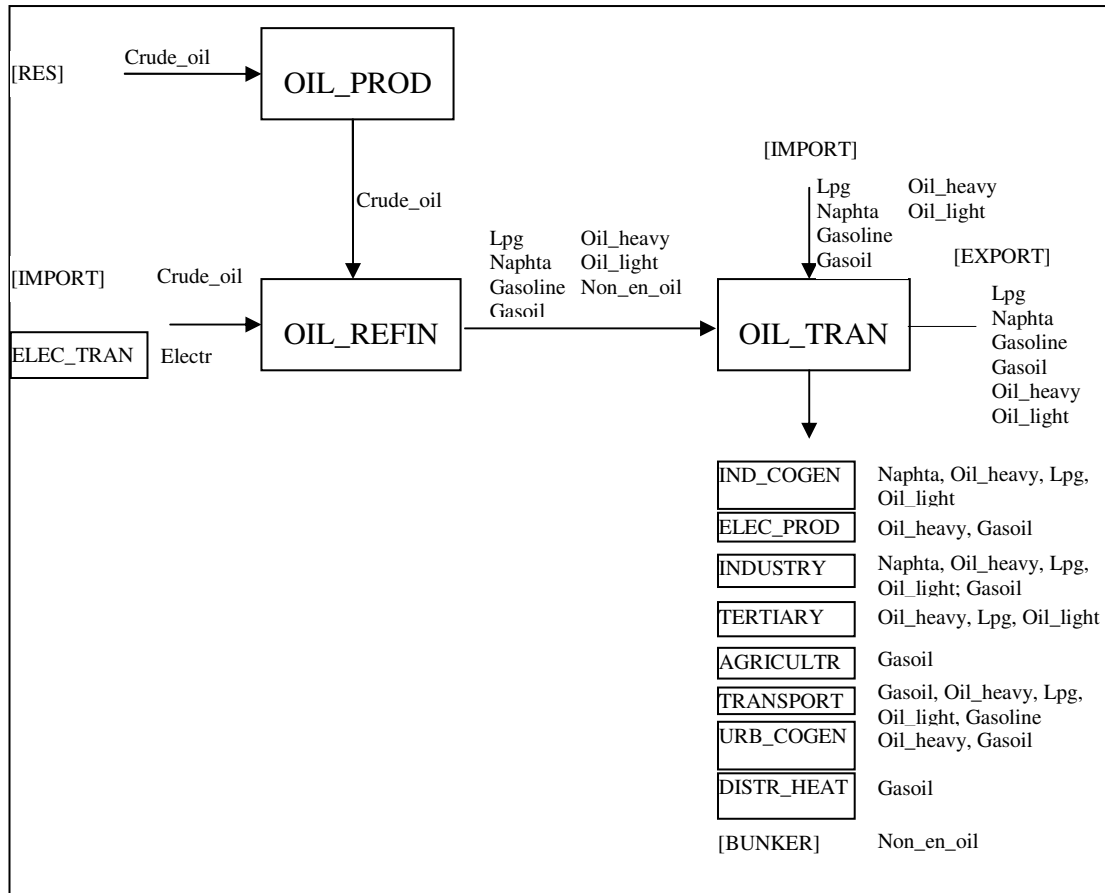


Şekil 4.3. EFOM-ENV/GAMS: Türkiye doğal gaz sektörü

Petrol alt sektörü

Birincil kaynaklar içinde önemli bir yere sahip olan petrol büyük ölçüde ithalata dayalı olup ulusal rafinerilerde işlenerek ihtiyaç duyulan petrol ürünlerinin büyük bir kısmı bunlardan sağlanmaktadır (Şekil 4.4).

Modelde ham petrol yerel olarak [RES]’den sağlanmakta. Diğer önemli kaynak ithalat ise [IMPORT]’dur. OIL_REFIN petrolün rafineri kısmını gösteren sistemdir. Buraya gelen ham petrol ürünlere ayrıştırılıp OIL_TRAN’e gönderilmektedir. OIL_TRAN rafineri çıkışı ürünlerin talep sektörlerine dağıtım sistemini modellemektedir.



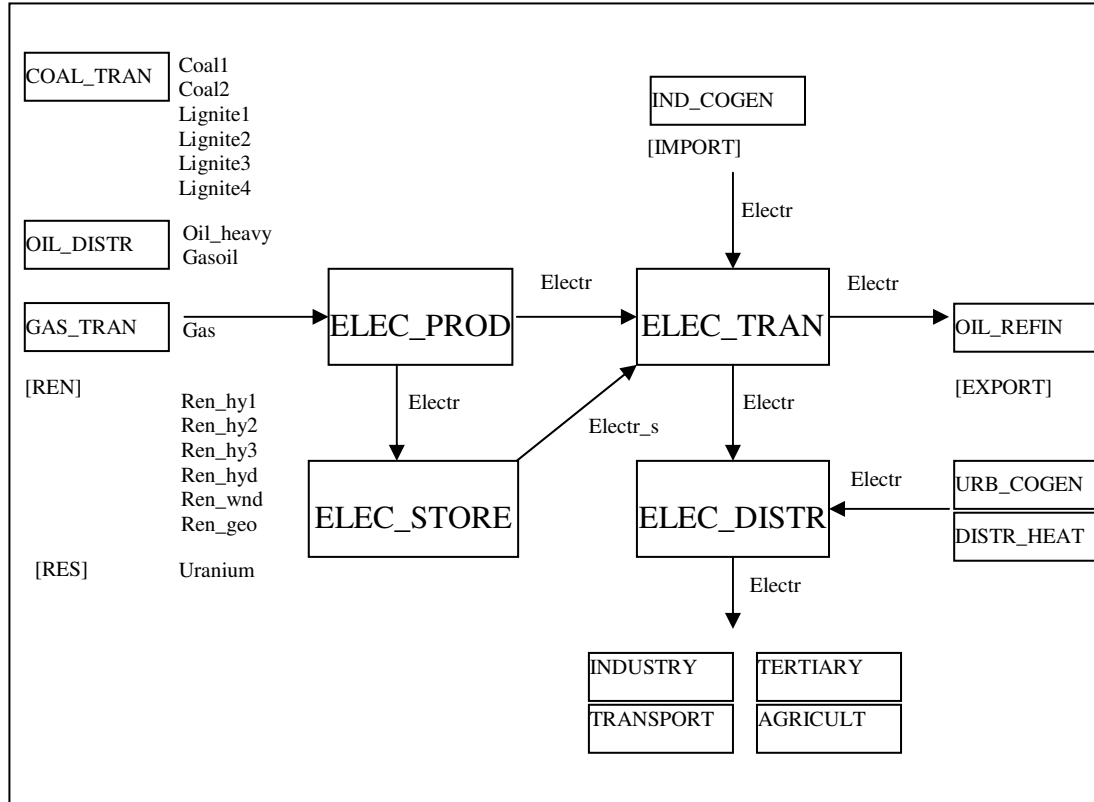
Şekil 4.4. EFOM-ENV/GAMS ağı: Türkiye petrol sektörü

4.2.2. İkincil enerji sektörleri

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 tarafından üretilmektedir. Üretimi için ihtiyaç duyulan birincil enerji biçimleri açısından oldukça esnek imkanlar 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 4.5’de verilmektedir. EFOM-FORTRAN’da CENTELEC olarak anılmaktadır.

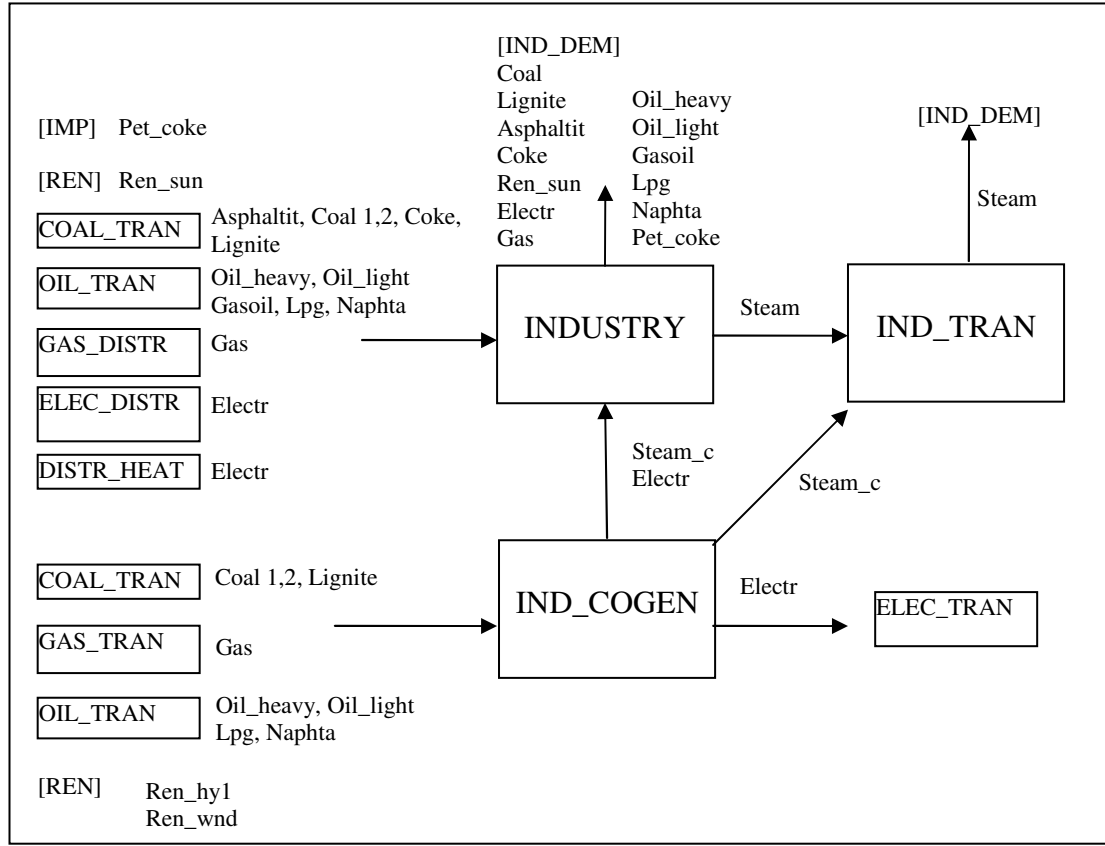
Merkezi elektrik sektörü enerji girdileri kömür alt sektöründen (COAL_TRAN); Coal1, Coal2 ve Linyit, Petrol alt sektöründen (OIL_TRAN); oil_heavy ve gasoil ve gaz alt sektöründen (GAS_TRAN) doğal gaz almaktadır. Ayrıca (RENewable) ile gösterilen yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının gruplandırıldığı kısımdan büyük barajlar (Ren_hy1), akarsu santralleri (run-of-river-ren_hyd, Ren_hy2) ve küçük ölçekli akarsu santralleri (Ren_hy3) modellenmektedir. Diğer yeni ve yenilenebilir enerji girdileri için rüzgar (ren_wnd) ve jeotermal (Ren_geo) ile verilmektedir. ELEC_PROD ile üretici teknolojiler modellenirken ELEC_STORE ile elektriğin depolanmasına imkan verecek olan geleceğe yönelik teknolojiyi sunmaktadır. ELEC_TRAN aracılığıyla ihracat ile OIL_REFIN için gerekli olan elektrik belirtilmektedir. ELEC_DISTR ile elektriğin kaynaktan ana kullanım alanlarına ve büyük kullanıcı endüstriye taşınması ve aynı zamanda küçük ölçekli sanayi ve konutlara iletimi modellenmektedir. IMPORT ile diğer ülkelerden ithal edilen elektrik kaynağı gösterilmektedir.



Şekil 4.5. EFOM-ENV/GAMS ağı: Türkiye'nin merkezi elektrik sektörü

Endüstriyel otoprodüktör ısı-elektrik üretim ve sanayi sektörü

Türkiye ikincil enerji üretim sektörü içinde elektrik üretim sektörü en detaylı ayrıştırılan sektör konumundadır. Bu sektörde merkezi elektrikten sonra gelen en önemli ve halihazırda var olan ikinci sektör ısı ve elektrik birleşik sisteminin birlikte modellendiği endüstriyel oto-prodükörler gelmektedir (Şekil 4.6). EFOM-FORTRAN ile SELFEEC olarak modellenmiştir. Bu sektör endüstrinin ihtiyaç duyduğu elektrik ve ısı kaynağını kendi kendine üretmesi modellenmektedir. Üretilen fazla elektrik merkezi sisteme de sunulabilmektedir. Sektöre birincil enerji kaynakları COAL_TRAN ile kömür sektöründen, OIL_TRAN ile petrol alt sektöründe ve GAS_TRAN ile gaz alt sektöründen birincil enerji girdileri sağlanmaktadır. IND_COGEN üreticisi buharı (steam) IND_TRAN ile kendine proseslerde kullanılmak üzere ve elektriği (Electr) yine IND_TRAN ile kendine sağlarken aynı zamanda fazlasını ulusal enterkonnekte sisteme de sunabilmektedir.

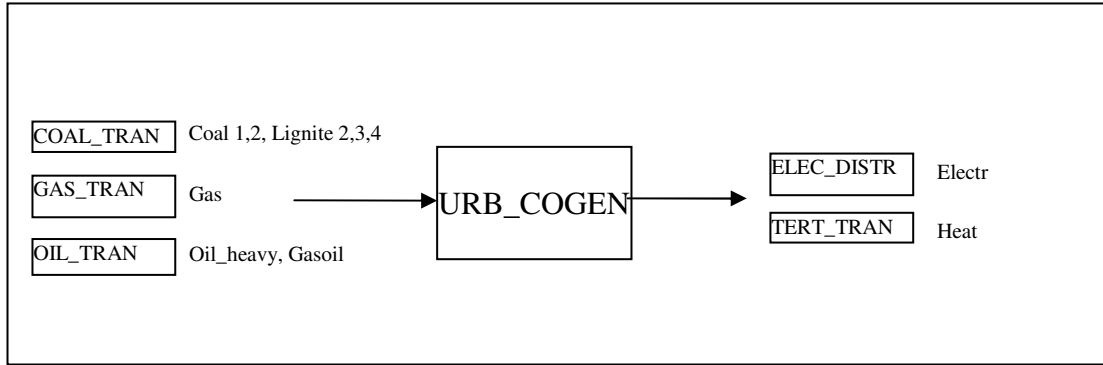


Şekil 4.6. EFOM-ENV/GAMS ağı: Türkiye endüstriyel otoprodüktörler ve sanayi sektörü

Kentsel ısı-elektrik kombine üretim sektörü

Bu alt sektör ikincil enerji üretiminde konut yoğunluğunun yüksek olduğu büyük şehirlerde güç üretim (ısı+elektrik) sektörünün gelecekteki yapısını temsil etmektedir. Hâlihazırdaki Türkiye enerji arz sisteminde böylesi bir yapı söz konusu değildir. EFOM-FORTRAN’da bu alt sektör URB_COMB (Urban_Combined) olarak geçmektedir. Bu alt sektör Şekil 4.7’de sunulmaktadır.

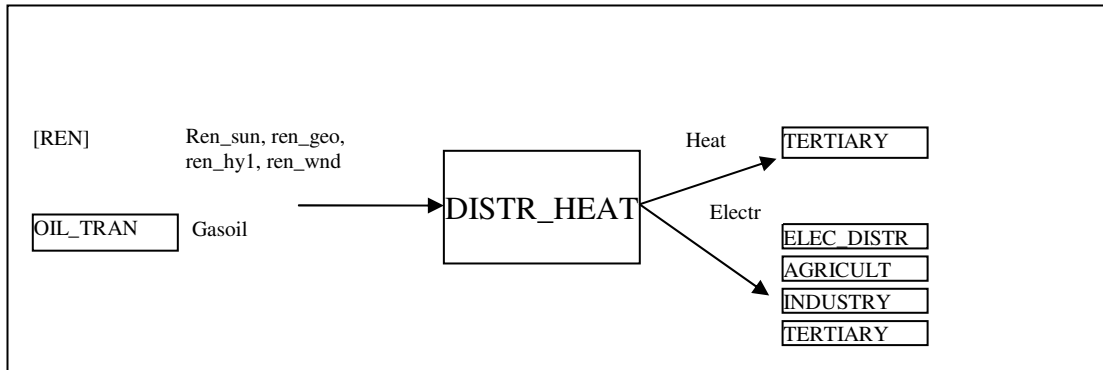
Teknolojik olarak ısı+elektrik kombine üreticiler (Cogenerator) kullanılmaktadır. Hem konutların elektrik ihtiyacına yönelik üretim yapılırken diğer taraftan da aynı teknolojilerde üretilen gücün bir kısmı da ısı kaynağı oluşturmada kullanılmaktadır.



Şekil 4.7. EFOM-ENV/GAMS ağı: Türkiye kent güç (ısı-elektrik kombine) sektörü

Bölgesel ısınma sektörü

Bu alt sektör ikincil enerji üretiminde kırsal bölgelerdeki güç üretim (ısı+elektrik) sektörünün gelecekteki yapısını temsil etmektedir. Halihazırdaki Türkiye enerji arz sisteminde böylesi bir yapı söz konusu değildir. Sadece küçük çaplı üretimler söz konusudur ama bunlarda dikkate alınmamaktadır. Bu alt sektör Şekil 4.8’de sunulmaktadır.



Şekil 4.8. EFOM-ENV/GAMS ağı: Bölgesel ısınma sektörü

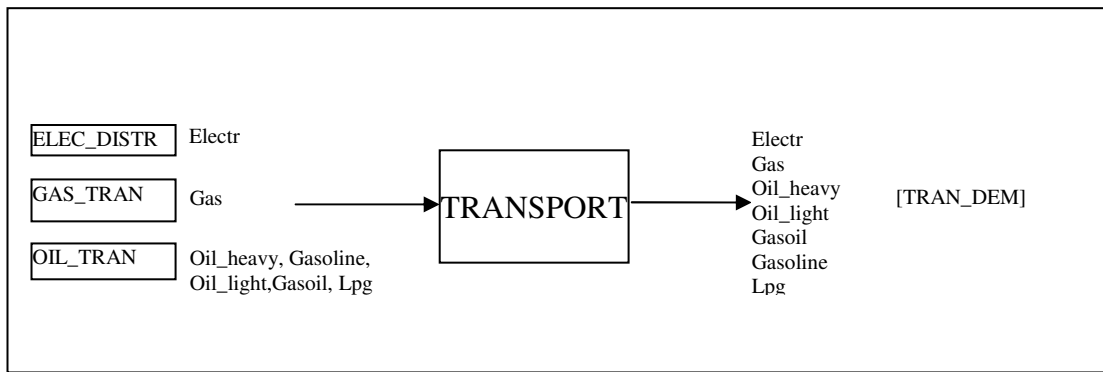
4.2.3. Talep sektörleri

Talep sektörleri ulaştırma, konut, tarım ve sanayi (Bkz. Şekil 4.1)’den oluşmaktadır. Bu sektörlerle ilgi şematik gösterimler Şekil 4.9-11’de görülmektedir. Bu sektörlerdeki çalışma nihai enerji boyutuyla sınırlı kalmıştır. Faydalı enerji ile ilgili veriler bulunamadığı için modelde nihai enerji verileri kullanılmıştır. Ulaştırma

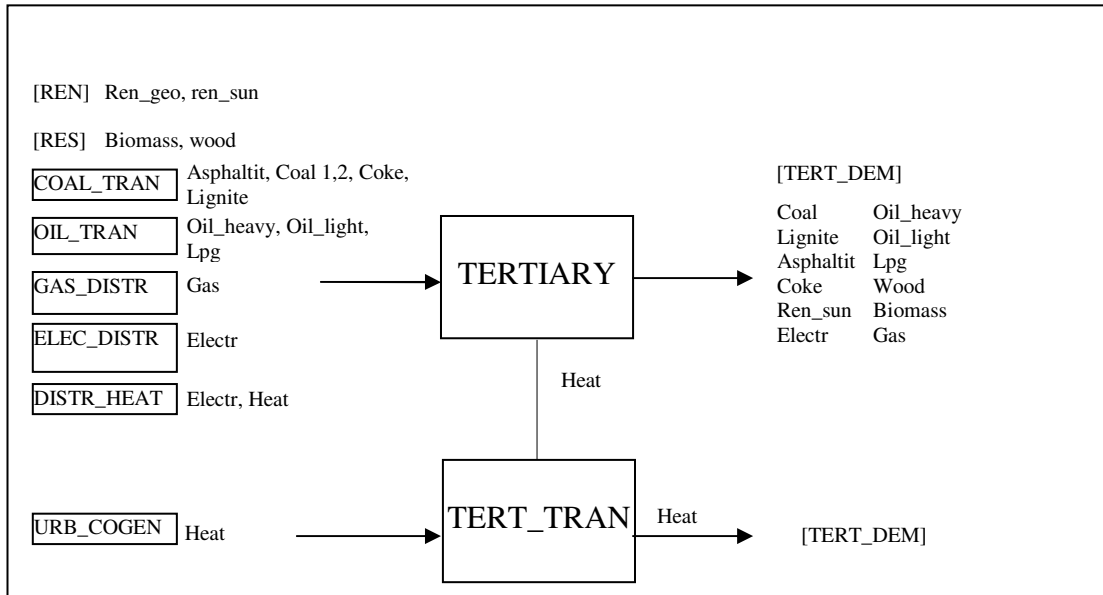
modelinin talep ettiği enerji kaynakları; elektrik, doğal gaz, fuel-oil, dizel , benzin ve lpg olmaktadır.

Konut sektörünün talep ettiği nihai enerji kaynakları ise taşkömürü, linyit, asfaltit, kok, fuel-oil, lpg, doğal gaz, elektrik, ısı ve yenilenebilir enerji kaynaklarıdır.

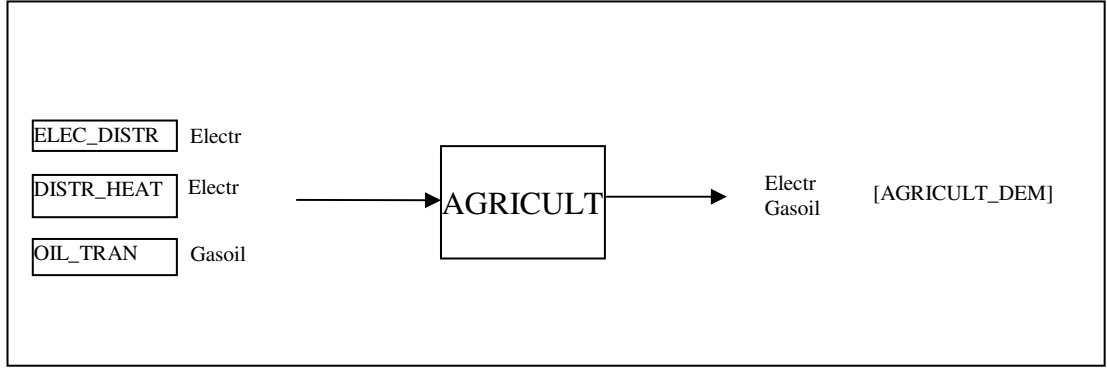
Tarım sektörü sadece elektrik ve dizel yakıtı talep etmektedir.



Şekil 4.9. Ulaştırma sektörü



Şekil 4.10. Konut sektörü



Şekil 4.11. Tarım Sektörü

5. BULANIK DOĞRUSAL PROGRAMLAMA VE TÜRK ENERJİ-TALEP SEKTÖRÜNÜN MODELLENMESİ

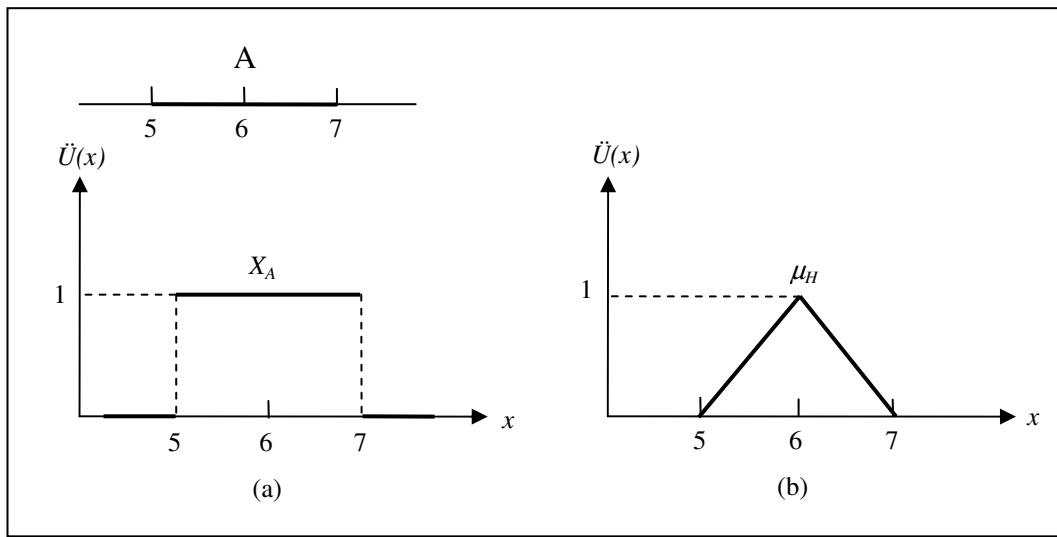
Çalışmanın bu bölümünde, bulanık küme teorisi ve bulanık doğrusal programlama problemi genel hatlarıyla tanıtılarak, Türk enerji talep sektörünün bulanık durumu incelenmiştir. Bölüm dörtte verilen doğrusal programlama modelindeki talep parametreleri bulanık olarak gösterilip model yeniden yazılmıştır. Bu modelin çözümü için bir algoritma önerilmiştir.

5.1. Bulanık Küme Teorisi

Üyeleri kesin olarak belirli olmayan ama aday üyelerin bu kümeye ait olma derecelerinin bulunduğu kümeye “*bulanık küme*” denir. Bulanık küme teorisinin kilit kavramı bir elemanın bulanık kümeye olan üyelik derecesidir. Aristo mantığına göre çalışan klasik küme kavramında, bir kümeye giren öğelerin oraya ait oluşları durumunda üyelik dereceleri 1’e, ait olmamaları durumunda ise 0’a eşit var sayılmıştır. İkisi arasında hiçbir üyelik derecesi düşünülemez, buna karşın bulanık kümelerde 0 ile 1 arasında değişen, değişik üyelik derecelerinden söz etmek mümkündür. Üyelik derecelerinin aşağıda verilen üç temel özelliği sağlaması gerekir (104):

- Bulanık kümede yer alan elemanlardan en az bir tanesinin üyelik derecesinin 1’e eşit olması gerekir. Bu özelliğe bulanık kümenin normal olması özelliği denir.
- Üyelik derecesi 1’e eşit olan öğeye yakın sağda ve soldaki öğelerin üyelik derecelerinin de 1’e yakın olması gerekir. Bu özelliğe bulanık kümenin monoton olması denir.
- Üyelik derecesi 1’e eşit olan öğeden sağa ve sola eşit mesafede hareket edildiği zaman bulunan öğelerin üyelik derecelerinin birbirine eşit olması gerekir. Bu özelliğe bulanık kümenin simetrik olması denir.

Bir elemanın bulanık kümeye olan üyelik derecesi üyelik fonksiyonları ile belirlenir. Klasik kümelerle bulanık kümeler arasındaki önemli farklardan birisi, klasik kümelerin sadece bir tane dikdörtgen üyelik fonksiyonu bulunmasına karşılık, bulanık kümenin yukarıdaki üç şarttan ilk ikisini mutlaka sağlayacak biçimde değişik üyelik fonksiyonlarına sahip olmasıdır (104). Şekil 5.1’de 5 ile 7 arasında değişen sayıların A klasik kümesine ve H bulanık kümesine göre üyelik fonksiyonları verilmiştir.



Şekil 5.1. Klasik ve bulanık kümeler için üyelik fonksiyonları (100)
(a) klasik küme (b) bulanık küme

Şekil 5.1’de klasik A kümesindeki $5 \leq x \leq 7$ aralığı için tüm üyelik fonksiyonu değerleri 1’e eşitken, H kümesinde üyelik derecesi 1 olan tek değer 6’dır. $5 \leq x < 6$ ve $6 < x \leq 7$ arasında yer alan değerler 0 ile 1 arasında değişen farklı üyelik derecelerine sahiptirler.

Zadeh (1965) sıradan küme tanımlarını, bulanık kümeler için tanımlar türetmek için genişletmiştir. Bu tanımlamalar eşitlik, tümleme, kapsama, birleşme, kesişme, cebirsel çarpma, cebirsel toplama, normalite, destek, ilişki, kompozisyon, konvekslik, konkavlık, α -kesme gibi topolojik kavramlarla örtüşmektedir. Bu tanımlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir (49):

Boş Küme: Bir A bulanık kümesi sadece ve sadece X üzerindeki üyelik fonksiyonu değeri sıfır ise boş kümedir.

$$A = \emptyset \Leftrightarrow \mu_A(x) = 0 \quad \forall x \in X \quad [5.1]$$

Eşitlik: A ve B bulanık kümeleri sadece ve sadece tüm $x \in X$ elemanları için eşit üyelik fonksiyonu derecelerine sahip ise eşittir.

$$A = B \Leftrightarrow \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad [5.2]$$

Tümleme: Bir A bulanık kümesinin tümlenyeni $\mu_{A'}(x)$ üyelik fonksiyonuna sahip olan bir A' bulanık kümesidir ve şu şekilde tanımlanır;

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X \quad [5.3]$$

Kapsama: Sadece ve sadece tüm $x \in X$ için $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ B bulanık kümesi A bulanık kümesini kapsar.

$$A \subset B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad [5.4]$$

Birleşim: Sırasıyla $\mu_A(x)$ ve $\mu_B(x)$ üyelik fonksiyonlarına sahip A ve B iki kümesinin birleşimi, A ve B kümesini içeren *en küçük* bulanık küme olan $\mu_C(x)$ üyelik fonksiyonuna sahip C bulanık kümesi olarak tanımlanır.

$$\therefore \mu_C(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad [5.5]$$

$$\mu_C(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_A(x) \quad \text{eğer } \mu_A(x) \geq \mu_B(x) \quad [5.6]$$

$$\mu_C(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_B(x) \quad \text{eğer } \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad [5.7]$$

$\vee$ işlemi birleşme özelliğine sahiptir, $A \vee (B \vee C) = (A \vee B) \vee C$

Kesişim: Sırasıyla $\mu_A(x)$ ve $\mu_B(x)$ üyelik fonksiyonlarına sahip A ve B iki kümesinin kesişimi, A ve B kümelerinin her ikisinin de içinde bulunan *en büyük* bulanık küme olan $\mu_C(x)$ üyelik fonksiyonuna sahip C bulanık kümesi olarak tanımlanır.

$$\therefore \mu_C(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad [5.8]$$

$$\mu_C(x) = \text{Max}[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_A(x) \quad \text{eğer } \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad [5.9]$$

$$\mu_C(x) = \text{Max}[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_B(x) \quad \text{eğer } \mu_A(x) \geq \mu_B(x) \quad [5.10]$$

Cebirsel Çarpım: A ve B bulanık kümelerinin cebirsel çarpımı AB olarak gösterilir ve tüm $x \in X$ için şu şekilde tanımlanır:

$$\mu_{AB}(x) = \mu_A(x) \mu_B(x) \quad [5.11]$$

Cebirsel Toplam: A ve B bulanık kümelerinin cebirsel toplamı $A \oplus B$ olarak gösterilir ve tüm $x \in X$ için şu şekilde tanımlanır:

$$\mu_{A \oplus B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \mu_B(x) \quad [5.12]$$

İlişki: $X_1 \times X_2$ çarpımından oluşan çarpım uzayındaki bir R ilişkisi, $\mu_R(x): X_1 \times X_2$ üyelik fonksiyonuna sahip bir bulanık kümedir. R $\mu_R(x_1, x_2)$ üyelik fonksiyonu ile her bir (x_1, x_2) sıralı ikilisini birleştirmektedir.

Gevşetme: $\mu_C(x, y)$ üyelik fonksiyonuna sahip $X \times Y = \{x, y\}$ içerisinde yer alan bir C bulanık kümesi ve sırasıyla $\mu_A(x)$ ve $\mu_B(y)$ üyelik fonksiyonlarına sahip A ve B bulanık kümeleri olduğunu varsayalım. Bu durumda C bulanık kümesi X ve Y üzerinde sadece ve sadece şu durumda gevşetilebilir:

$$\mu_C(x, y) = \text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad [5.13]$$

Konkavlık ve Konvekslik: Bir A bulanık kümesi eğer tümleyeni A konveks ise konkavdır. Bir A bulanık kümesi de eğer tüm $x_1, x_2 \in X$ ve tüm $\beta \in [0,1]$ için

$$\mu_A(\beta x_1 + (1-\beta)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)) \quad [5.14]$$

ise konvekstir.

Normalite: Bir A bulanık kümesi sadece ve sadece eğer X üzerinde $\mu_A(x)$ 'in supremumu $\sup_x \mu_A(x)$ 1'e eşitse normaldir. Aksi takdirde alt normaldir.

Destek: Bir A bulanık kümesinin desteği;

$$x \in S(A) \Leftrightarrow \mu_A(x) > 0 \quad [5.15]$$

olacak şekilde bir $S(A)$ altkümesidir.

α -kesme: $\alpha \in [0, 1]$ olmak üzere, A bulanık kümesinin α -kesme kümesi aşağıdaki gibidir:

$$A_\alpha = \{x : \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad [5.16]$$

Burada $\geq$ yerine $>$ olursa, buna “*güçlü α -kesim kümesi*” adı verilir.

5.2. Bulanık Doğrusal Programlama Problemi

Üretim planlama, organizasyon planlama, askeri planlama doğrusal programlama modelleriyle formüle edilip çözüldüğünden beri doğrusal programlama uygulamalı matematik bilim dalının en önemli alanlarından biri olmuştur (105).

Kısıtlı kaynakların en iyi biçimde kullanılması olarak özetlenebilecek doğrusal programlamanın en temel karakteristikleri elemanlar arasında doğrusal ilişki var olduğu ve bu ilişkinin oranlama ve toplanabilirlik şartlarını sağlamasıdır.

Standart doğrusal programlama problemi:

$$\text{Max } Z = CX$$

Kısıtlar:

$$AX \leq b$$

$$x \geq 0$$

[5.17]

Burada X , karar değişkenleri vektörü ($n \times 1$), C karar değişkenlerinin kazanç ya da maliyet değerleri vektörü ($1 \times n$), A teknolojik katsayılar matrisi ($m \times n$) ve b kısıtlı kaynaklar vektörüdür ($m \times 1$) (54, 106). Doğrusal programlama probleminin girdileri olan C , A ve b vektörleri çeşitli nedenlerle, bulanık olabilirler. Böyle kesin olmayan (imprecise), bulanık sayıları formüle etmek için duruma bağlı olarak üyelik (membership) fonksiyonu ya da olabilirlik (possibility) fonksiyonu kullanılır.

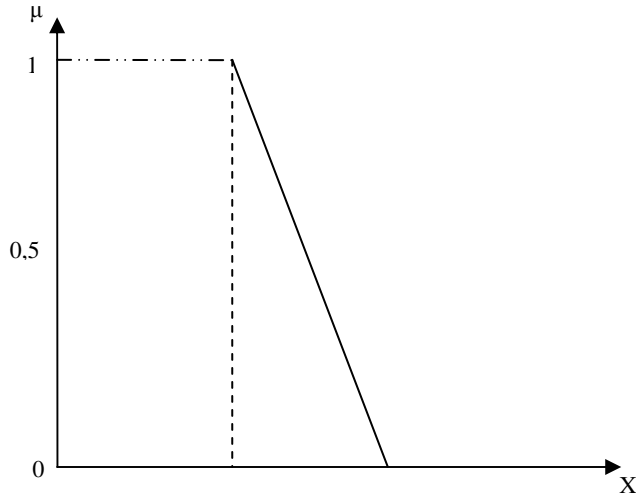
Eş. 5.17’de verilen standart doğrusal programlama problemi girdilerinin bulanık veya kesin olmayan veriler olmasına göre bulanık doğrusal programlama olarak adlandırılır. Çizelge 5.1’te bulanık doğrusal programlamada bulanıklık türleri gösterilmektedir (105).

Çizelge 5.1. Bulanık doğrusal programlamada bulanıklık türleri

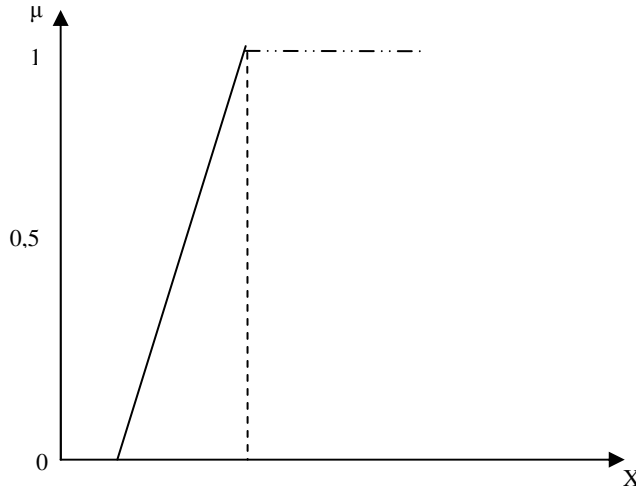
CX	$\tilde{C} X$	$\tilde{C} X$	CX	$\tilde{C} X$	CX
$AX \leq \tilde{b}$	$AX \leq b$	$\tilde{A} X \leq \tilde{b}$	$\tilde{A} X \leq b$	$\tilde{A} X \leq b$	$\tilde{A} X \leq \tilde{b}$
$X \geq 0$	$X \geq 0$	$X \geq 0$	$X \geq 0$	$X \geq 0$	$X \geq 0$

Burada ‘ $\approx$ ’ ile ‘ $\tilde{\cdot}$ ’ üzerinde bulunan elemanın bulanık özellikte olduğu, sabit olmadığı vurgulanmaktadır. Kısıt işareti genel olarak ($\leq$) biçiminde verilmiştir. Tersisi veya eşitlik biçiminde de olabilir. ($\leq$) biçiminde kısıtlar için monoton azalan üyelik

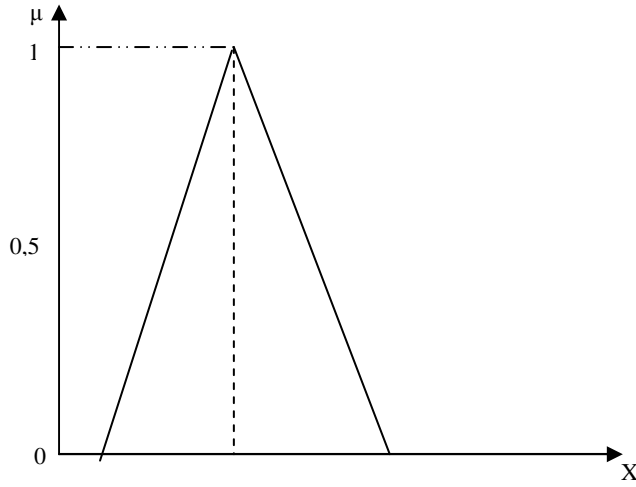
fonksiyonu (Şekil 5.2), $(\geq)$ biçiminde kısıtlar için monoton artan üyelik fonksiyonu (Şekil 5.3), eşitlik için ise üçgensel (Şekil 5.4) ve yamuk (Şekil 5.5) tipli üyelik fonksiyonu, minimizasyon problemi için azalan maksimizasyon problemleri için artan üyelik fonksiyonu kullanılır.



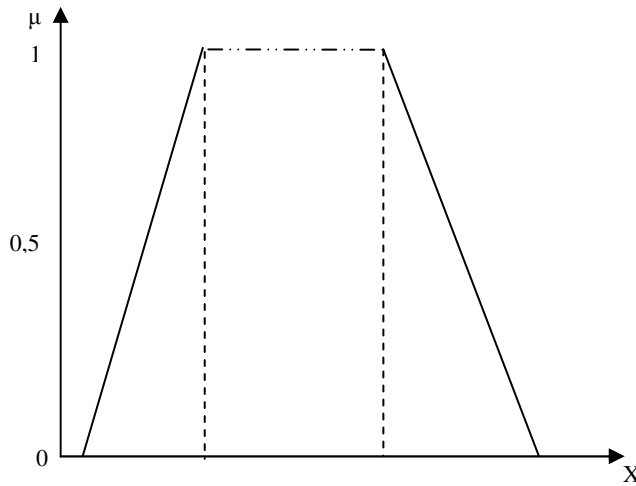
Şekil 5.2. Azalan üyelik fonksiyonu



Şekil 5.3. Artan üyelik fonksiyonu



Şekil 5.4. Üçgensel üyelik fonksiyonu



Şekil 5.5. Yamuk tipli üyelik fonksiyonu

5.2.1. Doğrusal programlamada bulanıklık durumu

Kaynak sınırları olarak adlandırılan sağ taraf sabitleri, bulanığa en çok imkan veren doğrusal programlama modeli parçasıdır. Çünkü işgücü, makine zamanı, hammadde miktarı gerçekten birçok faktöre bağlıdır. Aslında, sabit düşünülmesi olayı etkileyen faktörlerin tümünü gözardı ederek problemi basitleştirmektedir. Örneğin insan gücü kullanan bir üretimde insanlarla ilgili onlarca olay çalışma zamanının sabit bir değerde gitmesine imkan vermez. Dolayısıyla çalışma zamanı sabit değer artı-eksi çevresinde, belli bir aralıkta gerçekleşecektir. Ya da karı en büyükmek için

kaynakları sonuna kadar kullanmak veya ek kaynak imkanları karlı olacak ise bunun değişim aralığı ve getirisi bilinmek istenecektir (105).

Doğrusal programlama probleminin bulanıklık durumu için önerilen çözüm yaklaşımları aşağıdaki gibi incelenmiştir.

Verdegay yaklaşımı

Önceki kesimde bahsedilen nedenlerle kaynaklarda, $(b_i \ i = 1, \dots, m)$ kısıtların sağ tarafında, modelin tüm kısıtlarında ya da bir kısmında, bulanıklık olduğunda sabit değerlere karşılık mümkün değişim miktarları (tolerans limitleri) karar vericiden istenir. Her, b_i verilen tolerans limiti p_i ile $[b_i, b_i + p_i]$ aralığındadır. Üyelik fonksiyonlarının $\mu_i: R \rightarrow [0, 1]$ varlığında, karar verici $(Ax)_i > b_i$ 'ye belli dereceye kadar izin vermekte demektir. Bulanık kısıtlar için üyelik fonksiyonu sürekli ve tekbiçimli (monotone) ise,

$$\begin{aligned} \mu_i(x) &= 0 & (Ax)_i &> b_i + p_i \\ &= 1 - [(Ax)_i - b_i] / p_i & b_i \leq (Ax)_i < b_i + p_i \\ &= 1 & (Ax)_i < b_i \end{aligned} \quad [5.18]$$

değerini alır.

Bulanık kısıtlar için α - kesimi,

$$\{ x \in R^n \mid \mu_i(A_i x, b_i) \geq \alpha, i=1, \dots, m, \alpha \in [0, 1] \} \quad [5.19]$$

standart doğrusal programlama problemi kaynaklarında bulanıklık olduğunda,

$$\begin{aligned} \text{enb} \quad & Cx \\ \text{kısıtlar} \quad & Ax \leq b \\ & \approx \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad [5.20]$$

modelinin çözümü,

$$\begin{aligned} \text{enb } & Cx \\ \text{kısıtlar } & (Ax)_i \leq b_i + (1 - \alpha) p_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \\ & x \geq 0, \alpha \in [0, 1] \end{aligned} \quad [5.21]$$

parametrik programlama ile bulunur. Amaç fonksiyonu kısıtlar gibi değerlendirilmediğinden bu çözüm biçimi simetrik olmayan yaklaşım olarak adlandırılır (107).

Werners yaklaşımı

Genel olarak bulanık programlama problemi modellenirken karar vericinin hedeflere ilişkin üyelik fonksiyonunu dikte edebileceği varsayılır. Werners karar vericinin kısıtlar altında problemin çözümünü görmeden bunu yapamayacağını düşünerek amaçların gerçekleşebilir en küçük ve en büyük değerlerini bulup üyelik fonksiyonunu kurar (108). Werners yöntemi Belman ve Zadeh'in (109) bulanık karar; bulanık hedef ve bulanık kısıtların kesişimidir tanımına uyarak tamamıyla simetrik bir çözüm yaklaşımı önermektedir. Her $(\langle \rangle)$ biçimindeki kısıtlar için karar verici b_i^{-1} , b_i^{-1} alt ve üst sınırları belirler. Hiçbir durumda b_i^{-1} değeri aşılamaz. b_i^{-1} değerine ulaşıncaya kadar kısıt tamamıyla sağlanır. Böylece b_i^{-1} değerinden küçük değerler için üyelik değeri bir, b_i^{-1} sınırının üstündeki değerleri için üyelik değeri sıfırdır. b_i^{-1} ve b_i^{-1} arasında ise doğrusal üyelik fonksiyonu varsayılır. Diğer tip kısıtlar içinde benzer biçimde sınır değerleri belirlenir. Notasyon uyumu için, $b_i^{-1} - b_i^{-1} = p_i$ diyeceğiz. Dolayısıyla diğer çözüm yaklaşımlarında olduğu gibi her bir bulanık amaç için tolerans limitleri karar vericiden alınır.

$$\begin{aligned} \text{enb } & Cx \\ \text{kısıtlar } & (Ax)_i \langle \approx b_i \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad [5.22]$$

modelinin çözümü için Werners'in algoritması şöylece özetlenebilir.

1. Adım: Bulanık kısıt kümesi I olsun. Karar vericiden bulanık kısıtlar için p_i ($i \in I$) tolerans değerleri alınır.

2. Adım:

$$\begin{aligned} \text{enb} \quad & Cx \\ \text{kısıtlar} \quad & Ax \leq b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad [5.23]$$

modeli çözülerek $\underline{Z}$ bulunur. Tolerans değerleri modele alınmadığında $\underline{Z}$ çözümlerin en küçüğüdür.

3. Adım:

$$\begin{aligned} \text{enb} \quad & Cx \\ \text{kısıtlar} \quad & (Ax)_i \leq b_i + p_i \quad i \in I \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad [5.24]$$

modeli çözülerek bulunur. Tolerans sınırları tam olarak kullanılarak $\bar{Z}$ çözümlerin en büyüğüdür. $\underline{Z}$ ve $\bar{Z}$ arasında sürekli artan üyelik fonksiyonu,

$$\begin{aligned} \mu_Z(x) &= 0 & Cx &\leq \underline{Z} \\ &= 1 - (-Cx) / (-\underline{Z}) & \underline{Z} &\leq Cx \leq \bar{Z} \\ &= 1 & Cx &> \bar{Z} \end{aligned} \quad [5.25]$$

biçimindedir.

Her ne kadar en iyi model olmasa da matematiksel olarak en kolay kesişim, en küçük işlemcisi. Bulanık kısıtlar için doğrusal üyelik fonksiyonları

$\mu_i(x)$ ($i \in I$),

$$\begin{aligned} \mu_{ki}(x) &= 0 & k_i(x) &> b_i + p_i \\ &= 1 - (k_i(x) - b_i) / p_i & b_i &\leq k_i(x) \leq b_i + p_i \\ &= 1 & k_i(x) &< b_i \end{aligned} \quad [5.26]$$

en küçük işlemcisi ile (5.22) modeli,

$$\begin{aligned} \alpha &= \min [\mu_z(x) \wedge \prod_i^m \mu_{ki}] , \text{ ve bunların en büyüğü} \\ \text{enb } \alpha, x \geq 0 \text{ ile, yani,} \\ \text{enb } \alpha \\ \mu_z(x) &\geq \alpha \\ \mu_i(x) &\geq \alpha \\ x \geq 0, \alpha &\in [0, 1] \end{aligned} \quad [5.27]$$

4. Adım : $\theta = 1 - \alpha$ alınır. θ sıfırdan bire kadar Δt adımları ile (5.25) modeli çözülür.

5. Adım : En büyük değerli Z 'yi veren X değerleri aranan çözümdür. Durulur.

Zimmermann yaklaşımı

Zimmermann'a (110) göre doğrusal programlama modelinin değişik parçaları bulanık olabilir. A , b veya C elemanları kesin sayılar yerine bulanık sayılar olabilir. Kısıtlar ve amaç fonksiyonu bulanık küme veya fonksiyonlarla gösterilebilir. Son olarak karar veya çözüm bulanık küme veya kesin çözüm olabilir. Amaç fonksiyonu ve kaynaklar bulanık olduğunda bulanık programlama problemi,

$$\text{enb } \tilde{Z} = Cx$$

$$\text{kısıtlar } Ax \preceq b$$

$$x \geq 0$$

[5.28]

biçiminde gösterilir. Ve problem,

x bul, öyleki

$$Cx \preceq Z$$

$$Ax \preceq b$$

$$x \geq 0$$

[5.29]

şekline dönüşür. Z hedefi standart modeldeki amaç fonksiyonu için üst sınır olarak görülür. (5.27) modeli amaç fonksiyonu ve kısıtlara göre simetriktir.

$(Cx) = B$ ve $(Zx) = d$ konularak (5.27) modeli,

x bul, öyleki

$$Bx \preceq d$$

$$x \geq 0$$

[5.30]

(5.28) modelinin $(m+1)$. satırı bulanık küme ile gösterilecek ve üyelik fonksiyonu $\mu_i(x)$, X 'in bulanık eşitsizlikleri ne derece sağladığı biçiminde yorumlanır. (5.30) modelinin 'kararı', bulanık kümenin üyelik fonksiyonu,

$$\mu_D(x) = \text{enk } \mu_i(x) \quad i = 1, 2, 3, \dots, m+1 \quad [5.31]$$

Karar verici bulanık küme ile değil de kesin 'optimal' çözüm ile ilgilendiğini varsayarsak (5.29) ifadesinin en büyüğü aranan çözümdür:

$$\mu_m(x) = \text{enb } \{ \text{enk } \mu_i(x), i=1, \dots, m+1, x \geq 0 \} \quad [5.32]$$

$\mu_i(x)$ üyelik fonksiyonu, (amaç fonksiyonu da dahil olmak üzere) tolerans limitleri fazla ihlal edildiğinde 0, tam sağlandığında 1, 0-1 aralığında sürekli artandır. Sisteme yeni bir değişken ekleyerek,

enb λ

$$\text{öyleki } \lambda p_i + (Bx)_i \leq d_i + p_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, m+1 \quad [5.33]$$

elde edilir. Zimmermann'ın algoritması öncekilerle aynı, sadece çözüm modeli (5.33) biçimindedir.

6. ÖNERİLEN ALGORİTMA

Bu bölümde çalışmada kullanılan matematiksel modelin talep vektöründe bulanıklık tespit edilmiş ve buna göre doğrusal programlama modeli, bulanık doğrusal programlama modeli şeklinde yeniden düzenlenmiştir. Bu modelin çözümü için bir algoritma geliştirilmiştir. Önerilen çözüm algoritması ilk olarak akış şeması çizilerek adım adım tanıtılmış, izleyen aşamada örnek alınan talep değerleri üzerinde algoritmanın uygulanması yapılmıştır.

Enerji modellemeye ilgili şu ana kadar doğrusal, dinamik ve çok amaçlı programlama çalışmaları başarı ile yapılmıştır. Literatürde enerji sistemleriyle ilgili talep vektörünün bulanık olduğu bir çalışma bulunmamaktadır. Enerji talep tahmin çalışmalarında tahmin edilen değerler farklı senaryolara göre verilmesine rağmen, doğru gelecek değerlerini içermeleri mümkün değildir. Bu yüzden, enerji sistem modellerinde tahmin edilmiş kesin (crisp) sayı değerlerini kullanmak çok doğru olmayacaktır.

Talep vektörü değerlerinin bulanıklaştırılmasının nedenleri şöyle açıklanabilir:

- Enerji bakanlığının kullandığı talep tahmin modeli MAED için istenen veriler, Devlet İstatistik Enstitüsü (DİE) ve Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) gibi resmi kuruluşların projeksiyonlarından alınmaktadır. Türkiye'nin hızla değişen sosyo-ekonomik yapısından dolayı bu projeksiyonlar bulanık yapıdadır.
- Ülkenin enerji politikaları, bürokrat ve yöneticilerin aldığı kararlar doğrultusunda şekillenmektedir. Bu yapıdaki değişim sirkülasyonunun fazla olması projeksiyonları değiştirmektedir.
- Ülke, durağan bir ekonomik yapıya sahip değildir.

- Girdi olarak kullanılan GSYİH, nüfus projeksiyonları, konut, sanayi, ulaştırma ve tarım sektöründe kullanılan parametrelerin değişken yapısı bulanıklığın sebeplerini oluşturmaktadır.

Talep vektöründe bulanıklık tespit edilmesinden sonra doğrusal programlama modeli, bulanık doğrusal programlama modeli şekline dönüştürülmüştür. Buna göre bulanık doğrusal programlama modeli aşağıdaki şekilde yazılmıştır.

6.1. Bulanık Enerji Çevre Modeli

$$\text{Toplam Maliyet} = \sum_t DF_t \times (KM_t + DM_t + TM_t + PM_t + SM_t + YM_t + AM_t) \quad [6.1]$$

Buradaki değişkenler aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$DF_t = \sum_i^{Y_{it}} (1 + \text{discrete})^{-i - \sum_b^{b \leq t} Y_{ib}}$$

$$KM_t = \sum_e \sum_n \sum_i R_{e,i,n,t} \times (\text{Purprice}_{e,i,n,t} \times \text{Costvar}_{e,i,n,t})$$

$$DM_t = \sum_e \sum_{n'} \sum_n (I_{e,n',n,t} \times \text{Costvar}_{e,n',n,t})$$

$$TM_t = \sum_e \sum_n \sum_d D_{e,n,d,t} \times (\text{Costvar}_{e,n,d,t} - \text{Selpric}_{e,n,d,t})$$

$$PM_t = \sum_p (P_{p,t} \times \text{Costvar}_p) / (1 - \text{Intcons}_{p,t})$$

$$SM_t = \sum_u (\text{Capac}_{u,t} \times \text{Costfix}_u)$$

$$YM_t = \sum_u \text{Anfac}_u \times \left(\sum_b \min(\text{RL}_{u,b,t}, \text{Year}_t) \times \text{CapacBUI}_{u,b} \times \text{Costinv}_u / \text{Year}_t \right)$$

$$\text{Anfac}_u = \frac{\text{Irate}}{1 - (1 + \text{Irate})^{-\text{Lifetec}_u}}$$

$$AM_t = \sum_a \sum_p (\text{Abat}_{a,p,t} \times \text{Costabat}_{a,p})$$

$$\text{Costabat}_{a,p} = \frac{\text{Irate} \times \text{Costinv}_{a,p} \times \text{Convabat}}{(1 - (1 + \text{Irate})^{-\text{Lifetec}_a}) \times \text{Avaifac}_{a,p}} + \text{Costvar}_{a,p}$$

Kısıtlar

Denge Denklemleri

$$\sum_i R_{e,i,n,t} + \sum_{n'} I_{e,n',n,t} + \sum_{pen} (P_{p,t} \times Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n',n,t} + \sum_d \bar{D}_{e,n,d,t} \quad [6.2]$$

$$\sum_i R_{e,i,n,t,seas} + \sum_{n'} I_{e,n',n,t,seas} + \sum_{pen} (F_{p,seas} \times P_{p,t} \times Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n',n,t,seas} + \sum_d F_{e,n,d,seas} \times \bar{D}_{e,n,d,t} \quad [6.3]$$

$$\sum_{pen} (P_{p,t,peak} \times Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n',n,t,peak} \quad [6.4]$$

$$\sum_{pen} (P_{p,t,base} \times Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n',n,t,base} \quad [6.5]$$

$$\sum_i R_{e,i,n,t} + \sum_{n'} I_{e,n',n,t} + \sum_{seas} \sum_{pen} (P_{p,t,s} \times Y_{e,p}) = 0 \quad [6.6]$$

$$\sum_{n'} I_{e,n',n,t,base} + (P_{p,t} \times Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n',n,t,peak} \quad [6.7]$$

Kapasite Denklemleri

$$CAPAC_{u,t} = RESC_{u,t} + \sum_{b < t} \text{MIN}(RI_{u,b,t}/Year_t, 1) \times BUI_{u,b} \quad [6.8]$$

$$CAPAC_{u,t} \times Avaifac_u \times Convfac_u \geq P_{p,t} \times Outelec_p \quad [6.9]$$

Piyasa Tahsis Denklemleri

Bir proses için pazar tahsis denklemleri (u, p, t) :

$$Y_{e,p,t} \times P_{p,t} = Mal_{e,p,t} \times \sum_{peu} (Y_{e,p} \times P_{p,t}) \quad [6.10]$$

$$Y_{e,p,t} \times P_{p,t} > Amin_{e,p,t} \times \sum_{peu} (Y_{e,p} \times P_{p,t}) \quad [6.11]$$

$$Y_{e,p,t} \times P_{p,t} \leq A_{max_{e,p,t}} \times \sum_{peu} (Y_{e,p} \times P_{p,t}) \quad [6.12]$$

Bir birim için pazar tahsis denklemleri (n , u , t):

$$\sum_{peu} (Y_{e,p,t} \times P_{p,t}) = M_{a_{e,p,t}} \times \sum_{pen} (Y_{e,p} \times P_{p,t}) \quad [6.13]$$

$$\sum_{peu} (Y_{e,p,t} \times P_{p,t}) > A_{min_{e,p,t}} \times \sum_{pen} (Y_{e,p} \times P_{p,t}) \quad [6.14]$$

$$\sum_{peu} (Y_{e,p,t} \times P_{p,t}) \leq A_{max_{e,p,t}} \times \sum_{pen} (Y_{e,p} \times P_{p,t}) \quad [6.15]$$

Emisyon Azaltım Denklemleri

$$P_{p,t} \geq Abat_{a,p,t} \quad [6.16]$$

$$Envreg_{a,t} \times P_{p,t} = Abat_{a,p,t} \quad [6.17]$$

$$\begin{aligned} & \sum_e \sum_n \sum_i (Flowemiss_{c,e,i,n,t} \times R_{e,i,n,t}) + \sum_e \sum_{n'} \sum_n (Flowemiss_{c,e,n',n,t} \times I_{e,n',n,t}) + \\ & \sum_e \sum_n \sum_d (Flowemiss_{c,e,n,d,t} \times \bar{D}_{e,n,d,t}) + \sum_p (P_{p,t} \times Procemiss_{p,c} / Proceff_p) + \\ & \sum_a \sum_p (Abat_{a,p,t} \times Abatemiss_{a,p,c} / Proceff_p) \leq Emissmax_{c,t} \end{aligned} \quad [6.18]$$

Burada;

$\bar{D}_{e,n,d,t}$ t periyodunda d talep kategorisi için n üreticisinden çıkan e enerji taşıyıcısının bulanık talebini gösterir (PJ/yıl).

6.2. Bulanık Enerji-Çevre Modeli için Önerilen Algoritma

Bulanık doğrusal programlama problemi için önerilen çözüm yaklaşımları bölüm 5’de incelenmiştir. İncelenen Verdegay yaklaşımında; bulanık olan değişkenlerin sabit değerlerine karşılık mümkün tolerans limitleri karar vericiden istenmektedir. Bu

keyfiliği ortadan kaldırmak için önerilen algoritmada tolerans limitleri p_i 'ler, belli bir sistematığe göre belirlenmektedir. Şöyle ki, bulanık değişkenlerin önceki yıllarda gerçekleşmiş verileri test edilerek hangi dağılıma uyduğu tespit edilir. Dağılımın sapmaları tolerans limitlerini belirler.

Verdegay yaklaşımında ve diğer çözüm algoritmalarında bulanık modelin sonuçları $\alpha \in [0, 1]$ aralığında parametrik programlama ile bulunur.

Verdegay'ın simetrik olmayan yaklaşımını temel alan ancak bu yaklaşımın yukarıda bahsedilen dezavantajlarını giderecek yeni bir çözüm algoritması bulanık enerji çevre modeli için önerilmiştir (Şekil 6.1). Algoritmanın adımları aşağıdaki gibidir.

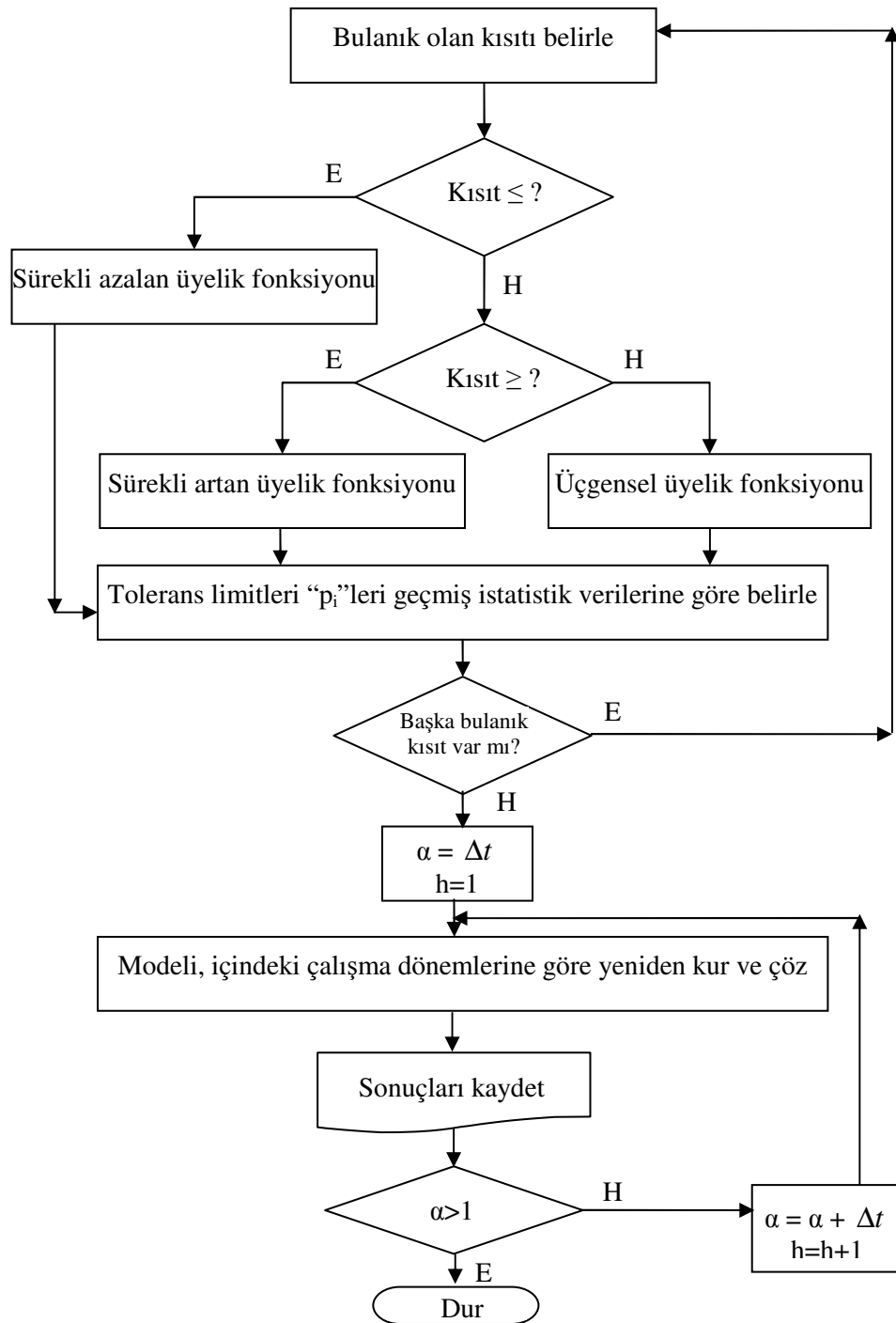
Adım 1: Bulanık olan kısıt/kısıtlar belirlenir. I bulanık kısıt numaraları kümesi olsun. Hassaslık ölçüsü Δt ve tolerans limitleri p_i ($i \in I$) ile değerlerini gösterilmektedir.

Adım 2: Kısıt işareti yönüne göre üyelik fonksiyonu belirlenir. ($\leq$) Biçimindeki kısıtlar için monoton azalan üyelik fonksiyonu, ($\geq$) biçiminde kısıtlar için monoton artan üyelik fonksiyonu, eşitlik için ise üçgensel ve yamuk tipli üyelik fonksiyonu kullanılır.

Adım 3: Tolerans limitleri p_i 'ler gerçekleşmiş verilere göre belirlenir. Bu verilerin hangi dağılıma uyduğu test edilerek tolerans aralığı tespit edilir.

Adım 4: Bulanık modeli durulaştırmak için α kesme işlemi uygulanır. $\alpha = \Delta t$ ve iterasyon sayacı $h=1$ kabul edilir. $\alpha=0$ üçgensel bulanık sayının kendisine eşitken, $\alpha=1$ üçgensel bulanık sayının orta değerine karşılık gelir.

Adım 5: Matematiksel model kurulur ve çözülür. Her döngü için α amaç ve kaynakların kullanım miktarları çıktı olarak verilir.



Şekil 6.1. Bulanık enerji-çevre modeli için bir çözüm algoritması

Adım 6: $\alpha > 1$ şartı sağlanmadıysa $\alpha = \alpha + \Delta t$ ve $h=h+1$ alınarak Adım 5'e geri gidilir. Aksi halde 'Dur'ulur. Sonuçlar kaydedilir.

6.3. Önerilen Algoritmanın Uygulanması

Bu kısımda önerilen algoritmanın bulanık talep vektör matrisi üzerinde uygulamasına yer verilmiştir.

Adım 1: Bulanık olan talebin bulunduğu eşitlik numaraları Eş. 6.1, 6.2, 6.3 ve 6.18'dir. I bulanık kısıt numaraları kümesi olsun. Tolerans limitleri p_i , $i \in I$ değerlerini göstermektedir. Hassaslık ölçüsü $\Delta t = 0,1$ kabul edilmiştir.

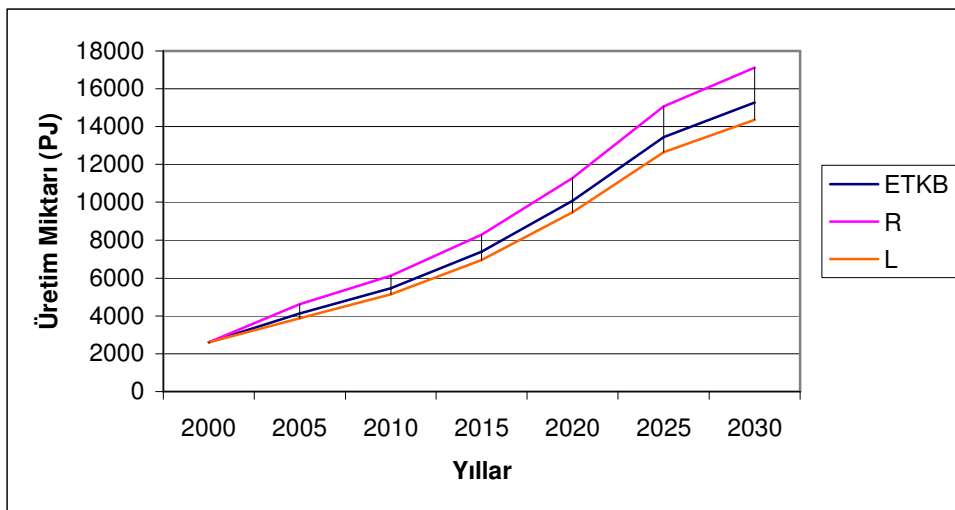
Adım 2: Talep vektör kısıtının yönü eşitlik olduğundan üçgensel üyelik fonksiyonu kullanılır.

Adım 3: Tolerans limitleri p_i 'ler Çizelge 6.1'deki 1971 ile 2000 yılları arasında gerçekleşen birincil enerji tüketim artış oranlarına göre belirlenmiştir. Bu veriler analiz edildiğinde üçgensel dağılıma uyduğu tespit edilmiştir. Analiz sonucuna göre sol taraf değerleri = -%6, sağ taraf değerleri = %12 olacaktır. Buna göre ETKB'nin bulanık talep projeksiyonları (PJ) Şekil 6.2'de görülmektedir.

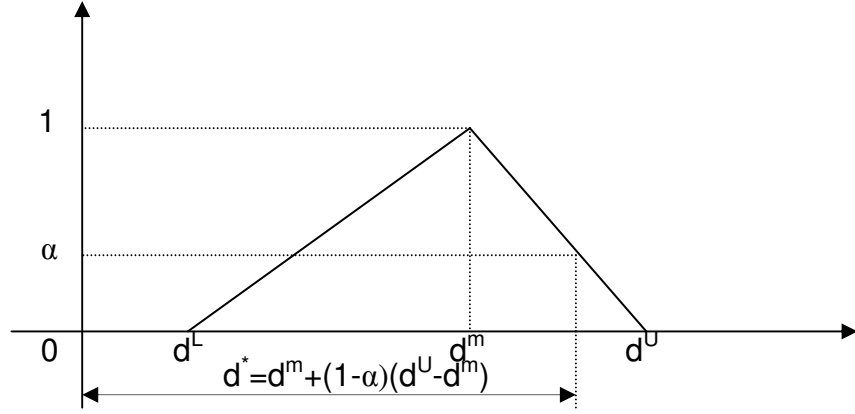
Adım 4: Üçgen benzerliğinden faydalanılarak bulanık üçgen $\bar{D}_i = (d_i^L, d_i^m, d_i^U)$ sayısı, α -kesme yöntemiyle durulaştırılır. Üçgensel üyelik fonksiyonunun genel gösterimi Şekil 6.3'de görülmektedir. Burada d_i^m t döneminde üçgensel bulanık sayının karşılaştırılabilir en mümkün talep değerini, d_i^L ve d_i^U değerleri ise sırasıyla alt ve üst sınırlarını göstermektedir. $\alpha = \Delta t$ ve iterasyon sayacı $h=1$ kabul edilir. Bulanık talep vektöründe $\bar{D}_{e,n,d,t} = D_{e,n,d,t}^m + (1-\alpha)(D_{e,n,d,t}^U - D_{e,n,d,t}^m)$ dönüşümü yapılarak Adım 5'e gidilir.

Çizelge 6.1. Yıllara göre birincil enerji tüketim artış oranları

1971	6,4
1972	11,6
1973	9,4
1974	4,2
1975	7,4
1976	8,2
1977	9,3
1978	0,4
1979	-5,7
1980	4,1
1981	0,2
1982	7,3
1983	3,8
1984	4,8
1985	5,3
1986	7,8
1987	10,4
1988	2,2
1989	5,8
1990	4,5
1991	2,4
1992	4,4
1993	6,3
1994	-1,9
1995	7,7
1996	9,7
1997	5,6
1998	1,3
1999	-0,6
2000	9,4



Şekil 6.2. ETKB'nin bulanık talep projeksiyonları (PJ)



Şekil 6.3. Talep vektörü üçgensel üyelik fonksiyonunun t döneminde genel gösterimi

Adım 5: Matematiksel modelde bulanıklığın görüldüğü kısıtlar aşağıda görüldüğü gibi yeniden yazılır.

$$\sum_i R_{e,i,n,t} + \sum_{n'} I_{e,n',n,t} + \sum_{pen} (P_{p,t} \times Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n',n,t} + \sum_d D^m_{e,n,d,t} + (1-\alpha)(D^U_{e,n,d,t} - D^m_{e,n,d,t}) \quad [6.20]$$

$$\sum_i R_{e,i,n,t,seas} + \sum_{n'} I_{e,n',n,t,seas} + \sum_{pen} (F_{p,seas} \times P_{p,t} \times Y_{e,p}) = \sum_{n'} I_{e,n',n,t,seas} + \sum_d F_{e,n,d,seas} \times [D^m_{e,n,d,t} + (1-\alpha)(D^U_{e,n,d,t} - D^m_{e,n,d,t})] \quad [6.21]$$

$$\begin{aligned} & \sum_e \sum_n \sum_i (\text{Flow-emiss}_{c,e,i,n,t} \times R_{e,i,n,t}) + \sum_e \sum_{n'} \sum_n (\text{Flow-emiss}_{c,e,n',n,t} \times I_{e,n',n,t}) + \\ & \sum_e \sum_n \sum_d [\text{Flow-emiss}_{c,e,n,d,t} \times D^m_{e,n,d,t} + (1-\alpha)(D^U_{e,n,d,t} - D^m_{e,n,d,t})] + \sum_p (P_{p,t} \times \text{Proc-emiss}_{p,c} / \text{Proc-eff}_p) + \sum_a \sum_p (\text{Abat}_{a,p,t} \times \text{Abat-emiss}_{a,p,c} / \text{Proc-eff}_p) \\ & \leq \text{Emiss-max}_{c,t} \end{aligned} \quad [6.22]$$

$\alpha = [0, 1]$ aralığında çözümler bulunur.

Adım 6: $\alpha \geq 1$ şartı sağlanmadıysa $\alpha = \alpha + \Delta t$ ve $h=h+1$ alınarak Adım 5'e geri gidilir. Eğer şart sağlandıysa 'Dur'ulur. Kaydedilen sonuçlar analiz edilir.

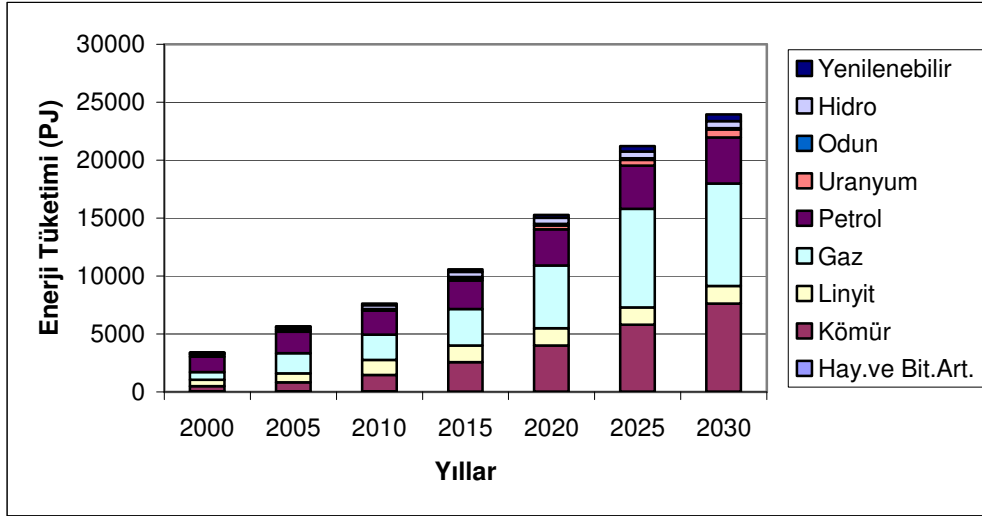
7. EFOM-ENV/GAMS MODELİNİN TÜRKİYE İÇİN UYGULANMASI

Bu bölümde ulusal enerji arz sistemi için geliştirilen EFOM-ENV model sonuçları referans ve yasal senaryoya göre bulunmuştur. Türkiye'nin 2030 yılına kadar enerji arz sistemin gelişimi için çevresel kısıtlayıcılar (SO_2 ve NO_x) dikkate alınmıştır. Sistemin çevresel zararlı etkilerini minimize edilmesine yönelik teknolojik ve ekonomik yönlerin analiz edildiği bir çalışma sergilenmiştir. Ayrıca bulanık model sonuçları referans senaryo ile kıyaslanmıştır.

Ulusal enerji sisteminin optimizasyonu için EFOM-GAMS isimli bir paket program kullanılmıştır. Söz konusu model tüm Avrupa Topluluğu ve bazı Avrupa Topluluğuna girmeye aday ülkelerde sorumlu enstitülerce yürütülmüş bulunmaktadır. Öncelikle ulusal enerji sisteminin mevcut teknolojik, ekonomik, akım ve çevresel açıdan analizi yapıp, modelin sistemi tam olarak yansıtması yani gerçek verilerle sistemi temsil etmesi sağlanmıştır. Bu adaptasyon süreci sistemin geleceği gerçekçi biçimde projekte edebilmesi açısından oldukça önem taşımaktadır. Sisteme empoze edilecek olan çevresel kısıtlayıcılar ve farklı talepler altında (Bkz. Şekil 3.1) karşılanacak olan enerji üretim programı beşer yıllık periyotlar bazında hazırlanmıştır.

7.1. Referans Enerji Senaryosu

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 7.1'de EFOM-ENV herhangi bir kısıtlama olmadan çalıştırıldığında referans durum için birincil enerji tüketim gelişimini göstermektedir. Toplam birincil enerji tüketimi 3400 PJ'dan 2030 yılıyla birlikte 23940 PJ'a çıkacaktır. Çalışma dönemi içinde ticari olmayan (odun ve hayvansal ve bitkisel artıklar) hariç diğer tüm yakıtların tüketimi artacaktır.



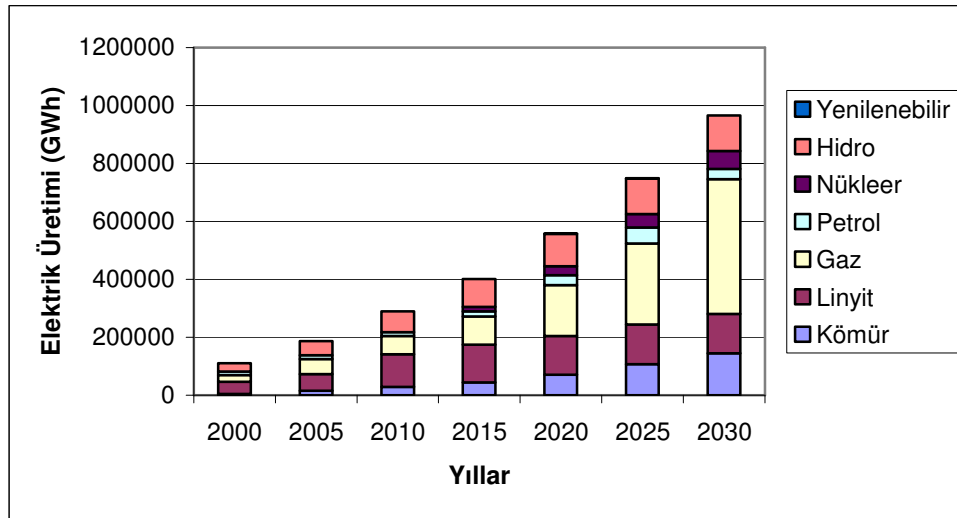
Şekil 7.1. Birincil enerji tüketimi - referans durumu

Bu sonuç, doğal gazın yakıt olarak sanayi ve konut sektöründe kullanımının yaygınlaşması, ithal taşkömürünün konut ve güç sektöründeki tüketim artışı ve elektrik tüketiminin sanayi ve konut sektöründe hızlı bir artış ortaya koyduğunu göstermiştir. Sözü edilen enerji biçimleri özellikle sanayi sektöründe petrolü ve konut sektöründe ise geleneksel yakıtlar petrol ve linyiti ikame edecektir. Ayrıca birincil enerji tüketiminin yakıt kompozisyonu elektrik sektörünün gelişimiyle belirlenecektir. Bu durumda model sonuçlarında ithal taş kömürü yakıtlı güç santralleri yani ‘temiz kömür teknolojileri’ yanı sıra, hidrolik potansiyelin hızla artan elektrik tüketimini karşılamakta sınırlı kalacağından 2015 yılıyla beraber nükleer güç ve gaz yakıtlı santrallerde hissedilir bir artış olacaktır.

Elektrik enerjisi üretiminde birincil enerji kaynakların gelişimi Şekil 7.2’de verilmiştir. 2000 yılında %37 payla linyit santralleri elektrik üretiminde ilk sırayı almıştır. 2030 yılında yeni linyit santralleri kurulsa bile doğal gaz santrallerinin devreye girmesi ile bu oran %14’lere düşecektir. Doğal gaz santralleri ise %48’lik pay ile ilk sırayı alacaktır. İthal kömür santrallerinin devreye alınması ile taşkömürü santrallerinin payının 2000 yılında %4’den 2030 yılında %15’e çıkacağı öngörülmektedir. Yenilenebilir enerji, kaynakları içinde olan hidrolik santraller 2000 yılında 29700 GWh’lik üretimle 2. sırada yer alırken 2030 yılında 122860 GWh üretimle 4. sıraya geçilecektir. Bunun sebebi ise 2015 yılında nükleer santrallerin

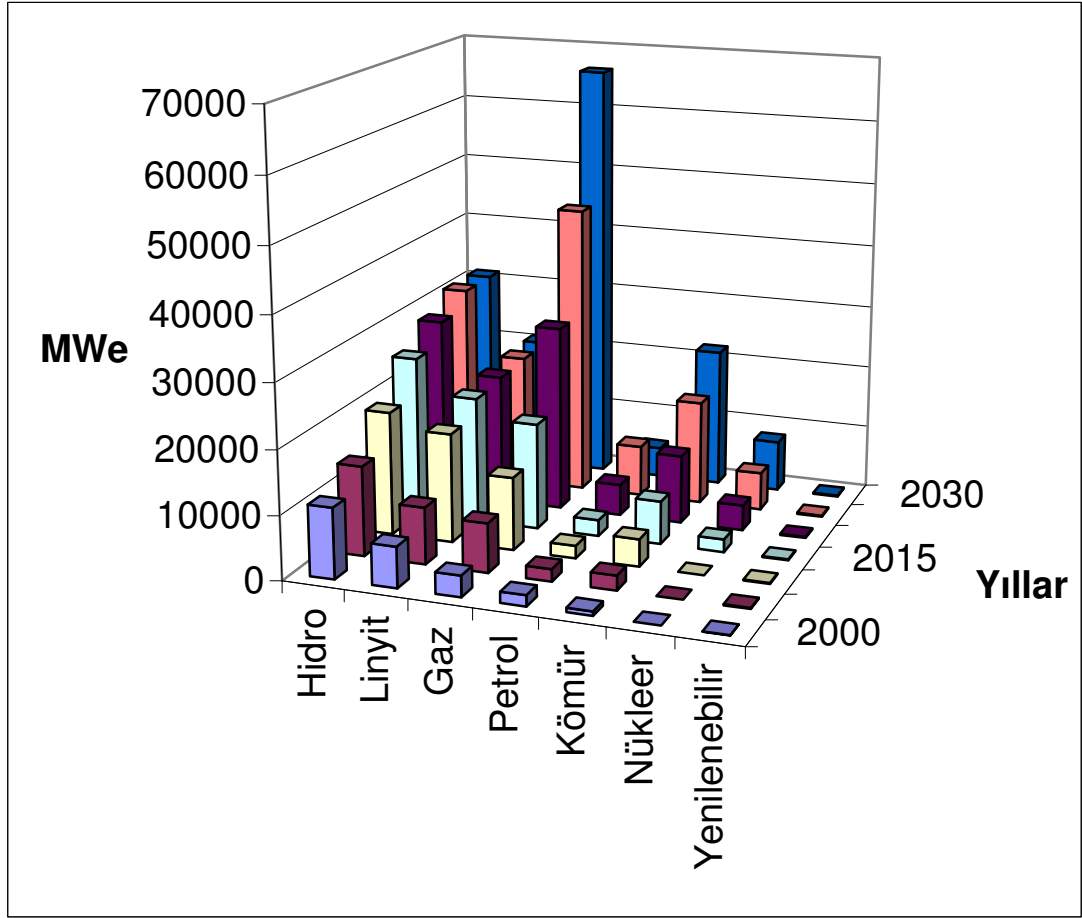
devreye girecek olmasıdır. 2030 yılında nükleer santrallerin üretimdeki payının %6 olması beklenmektedir.

Türkiye’de elektrik üretiminin termik hidrolik oranları ise; 2000 yılında %73 termik, %27 hidrolik iken 2030 yılında %87 termik, %13 hidrolik olacaktır.



Şekil 7.2. Elektrik üretimi-referans durum

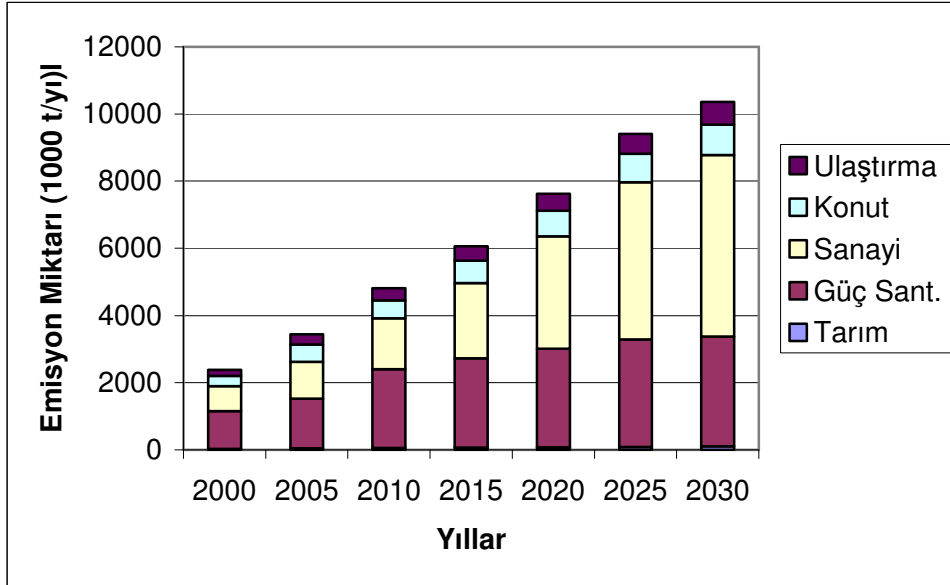
2030 yılına kadarki kurulu kapasite gelişimi aşağıdaki şekilde verilmiştir. Şekil 7.3 incelendiğinde en fazla artış doğal gaz yakıtlı santrallerde olacaktır. 2000 yılında 3334 MW doğal gaz kurulu gücü 2030 yılında 66000 MW olacağı projekte edilmiştir. Hidrolik kurulu gücü ise 2000 yılında 11000 MW’dan 2030 yılında 31000 MW’a çıkarak ikinci en fazla artışı göstermiştir. Nükleer santraller ise 2015 yılında 2000 MW kapasite ile devreye girip 2030 yılında 8000 MW’a çıkacaktır. Petrol yakıtlı santrallerde ise 2000 yılında 1738 MW olan kurulu güç 2030’da 4700 MW’a ulaşacaktır. Yenilenebilir enerji santrallerinde ise ciddi bir artış olacağı görülmemektedir.



Şekil 7.3. Birincil enerji kaynaklarına göre santrallerin kapasiteleri – referans durum

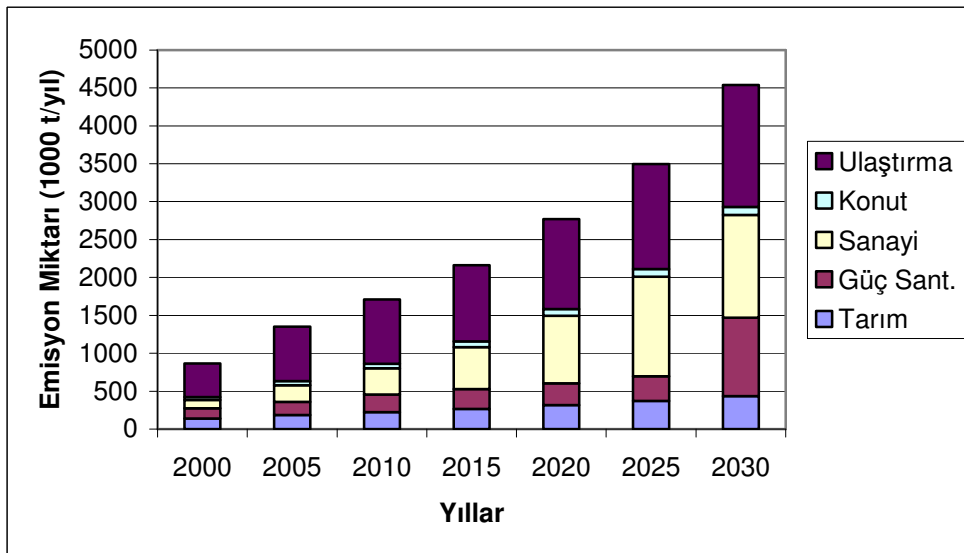
Referans durumdaki enerji arz stratejisinin hava kirliliği gelişimindeki etkisi ne olacaktır?

Toplam SO₂ emisyonlarının 2000'deki yıllık 2,4 milyon tondan 2030 yılıyla birlikte yıllık 10,4 milyon tona artış göstereceği projekte edilmiştir (Şekil 7.4). Bu durum, elektrik tüketimindeki artış nedeniyledir. Sonuç olarak güç sektörü toplam SO₂ emisyonlarına katkısı 2000 yılında %47 oranındadır. Sanayinin payı 2000'de %31'den 2030 yılında %52'e ulaşacaktır. Bunun sebebi; Türkiye'nin büyüme oranındaki artış ve sanayinin kendi elektrik ihtiyacını üretmek için otoprodüktör santral sayısının artmasıdır.



Şekil 7.4. SO₂ emisyonlarının gelişimi - referans durum

NO_x emisyonları ise 2000 yılında 0,86 milyon tondan 2030 yılıyla birlikte yıllık yaklaşık 4,5 milyon tona erişmektedir (Şekil 7.5). 2000 yılı itibariyle termik santrallerin miktarı 135 bin ton iken 2030 yılında 1035 bin tona çıkacaktır.



Şekil 7.5. NO_x emisyonlarının gelişimi - referans durum

Buraya kadar Referans Durumun sonuçları ETKB'nin Talep Senaryosu'na bağlı tutuldu. Daha öncede bahsedildiği gibi Referans Durum bu çalışmada yürütülen

bütün diğer senaryo çalışmaları için bir karşılaştırma temeli teşkil etmektedir. Bununla birlikte, referans durum çalışması içinde, farklı talep senaryolarındaki değişimleri ve bazı önemli girdi parametrelerindeki değişimleri içeren bir duyarlılık analizi de yürütülmüş bulunmaktadır. Kavak'ın (95) çalışmasından alınan diğer talep senaryoları aşağıdaki şekilde adlandırılacaktır:

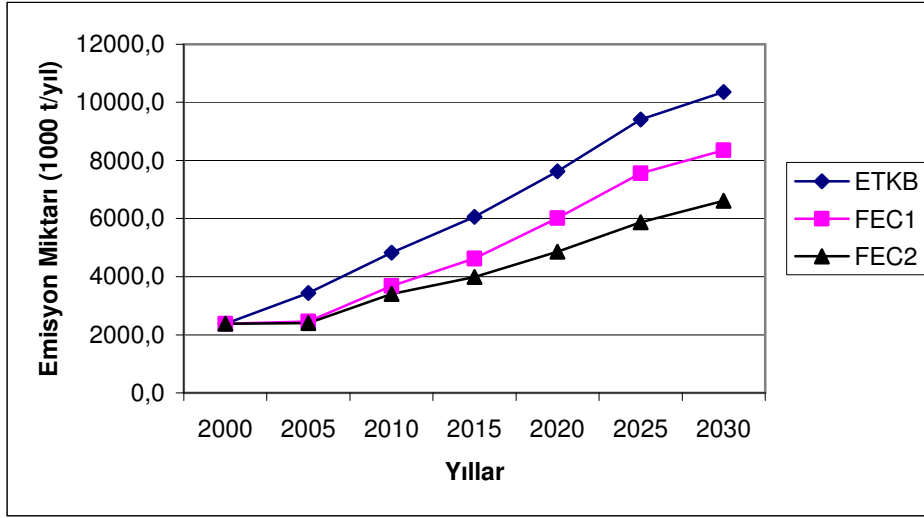
FEC1 senaryo: Son enerji tüketimi 1 senaryosu

FEC2 senaryo: Son enerji tüketimi 2 senaryosu

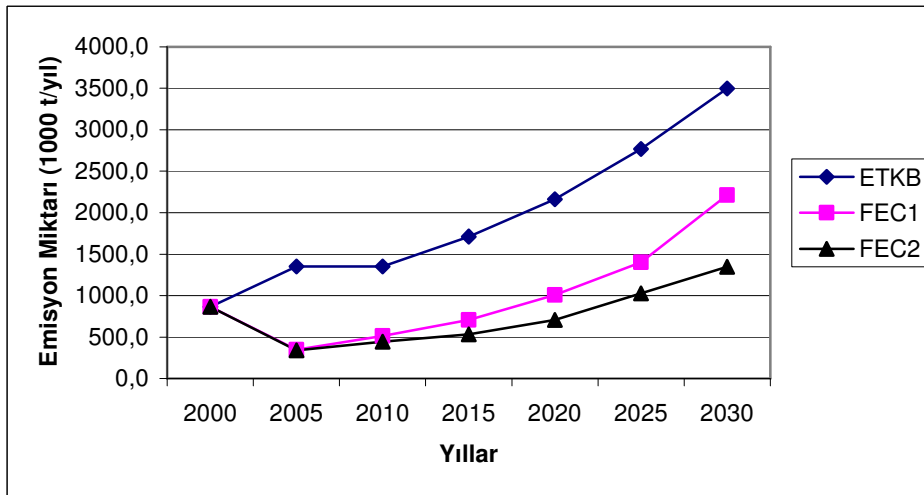
Farklı talep senaryolarının SO_2 ve NO_x emisyonlarında neden olduğu gelişimlerin etkisi Şekil 7.7-8'de verilmiştir. Açık ki, SO_2 ve NO_x emisyonları, Referans Senaryo'ya kıyasla, Düşük Senaryo için düşük seviyede kalırken Yüksek Senaryo için yüksek miktarlarda olacaktır.

Bununla birlikte, tüm çalışma periyodu boyunca, emisyon miktarlardaki artma (yada azalma) ile enerji talebindeki artma (yada azalma) oransal değildir. Bu durum özellikle SO_2 için Şekil 7.6'da görmek mümkündür. FEC1 Senaryo'da, SO_2 emisyonlarının 2030 yılıyla birlikte yılda yaklaşık 6,6 milyon tona erişeceği beklenmektedir. Bu miktar FEC2 Senaryo'ya kıyasla %20 düşük kalırken bu yıldaki birincil enerji tüketimi ise %20'lerin daha da üzerinde gerçekleşecektir

SO_2 emisyonlarının tersine, NO_x emisyonları yaklaşık olarak enerji talebiyle nispi bir gelişim sergileyecektir (Şekil 7.7).

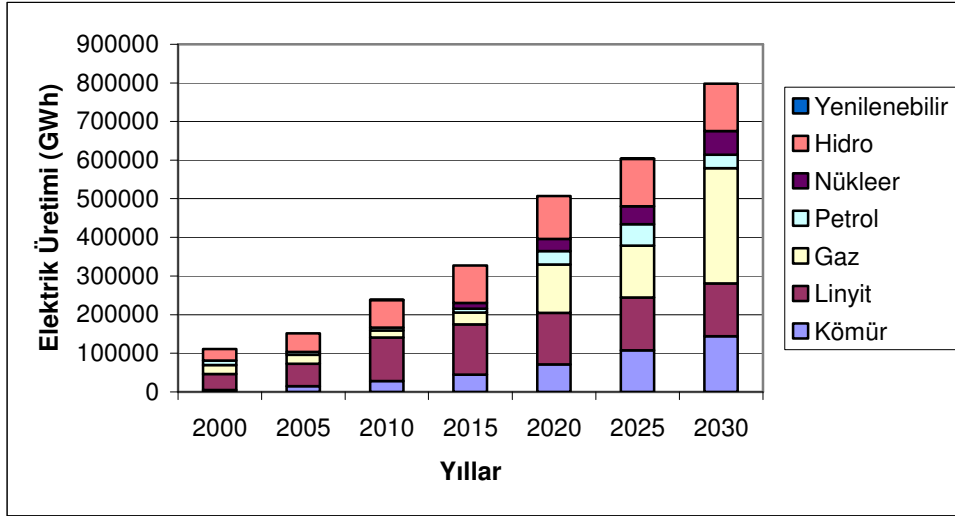


Şekil 7.6. Farklı enerji talep projeksiyonları için SO₂ emisyonlarının gelişimi



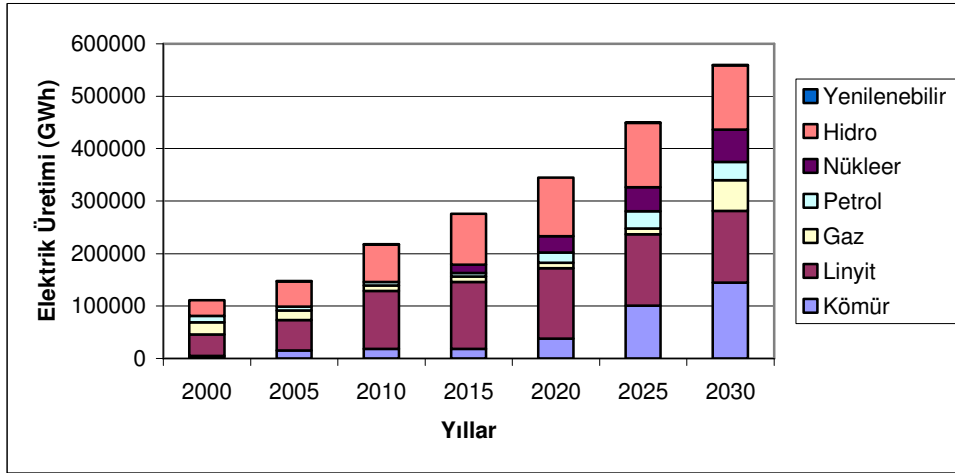
Şekil 7.7. Farklı enerji talep projeksiyonları için NO_x emisyonlarının gelişimi

FEC1 talep senaryosunun elektrik enerjisi üretiminde birincil enerji kaynakların gelişimi Şekil 7.8’de verilmektedir. Bu senaryoda 2000 yılında kömür 4598 GWh’den 2030 yılında 144500 GWh’e, sırasıyla linyit 41452 GWh’den 136628 GWh’e, doğal gaz 23266 GWh’den 297493 GWh’a, petrol ürünleri 11993 GWh’den 34386 GWh’e, hidrolik kaynaklar 29710 GWh’den 122859 GWh’e, nükleer enerji arzı ise 2015 yılında 15412 GWh’den 2030 yılında 61650 GWh’e çıkacaktır.



Şekil 7.8. Elektrik üretimi – FEC1

Şekil 7.9’da görülen FEC2 talep senaryosunun talep miktarı diğer senaryolara göre düşük olduğundan 2030 yılında ilk sırayı %25 payla kömür arzı almaktadır. 2030 yılında sırasıyla linyit %24 oranla ikinci sırayı, hidro %22, nükleer %11, doğal gaz %10, petrol ürünleri %6 ve yenilenebilir %1 ile sıralanacaklardır.



Şekil 7.9. Elektrik üretimi – FEC2

7.2. Yasal Senaryo

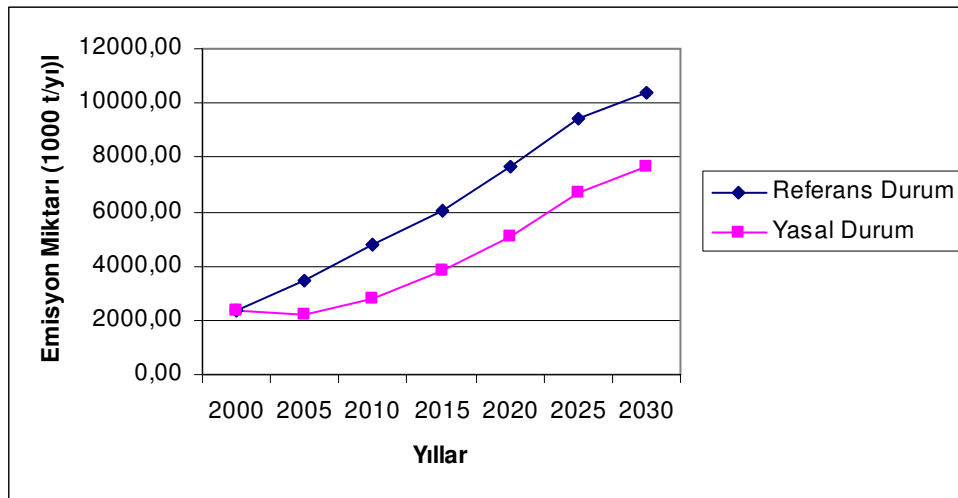
Referans senaryonun ortaya koyduğu emisyon seviyelerindeki kayda değer artış, Türkiye’de kontrol önlemlerinin biran önce alınması gereğini vurgulamaktadır.

EFOM-ENV modeli uygulanarak, farklı emisyon önlem hedefleri için maliyet-etkin emisyon kontrol stratejileri belirlenmiştir.

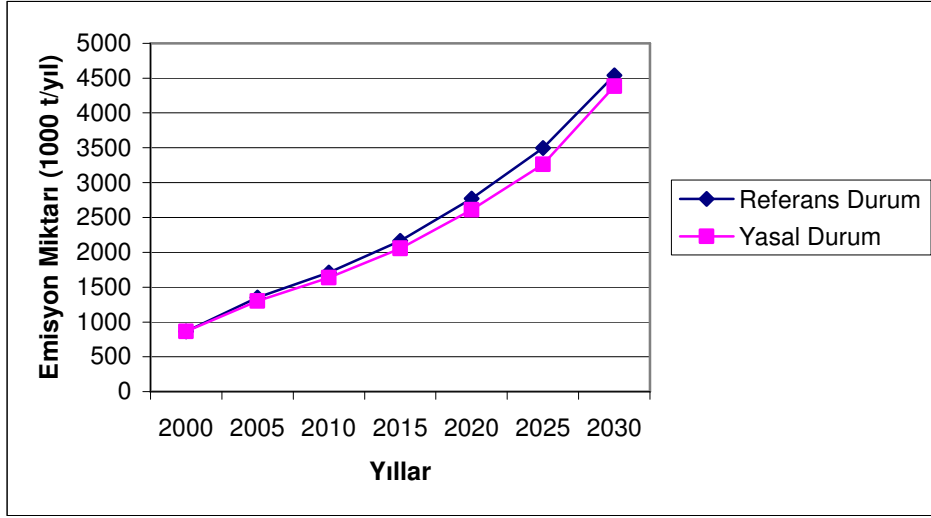
Eğer Türkiye'de enerji sisteminde, yasal senaryo uygulanacak olursa, emisyon standartları maliyet-etkin biçimde karşılamak için aşağıdaki kontrol önlemleri önerilmektedir:

- *güç santrallerinde yakıt dönüşümü*: yüksek kükürtlü fuel-oilin doğal gaz ve düşük kükürtlü fuel-oil tarafından ve yüksek kükürtlü linyitin ise düşük kükürtlü linyit ve taş kömürü tarafından ikame edilmeleri,
- *teknoloji ikamesi*: yeni kömür ve linyit yakıtlı güç santrallerinin kuruluşlarında azalma olurken doğal gaz yakıtlı kombine çevrim güç santrallerinin kuruluşlarında artış,
- *emisyon kontrol teknolojileri*: FGD teknolojilerinin büyük ve küçük kapasiteli güç santrallerinde uygulanması ve NO_x azaltım önlemlerinin ise kömür ve fuel-oil yakıtlı sistemlere tatbik edilmesi.

2030 yılında SO₂ emisyonlarının gelişimi yasal duruma göre 7,6 milyon ton civarında olacaktır (Şekil 7.10). Aynı yılda NO_x emisyonlarının gelişimi ise yasal duruma göre 4,4 milyon tona ulaşacaktır (Şekil 7.11).

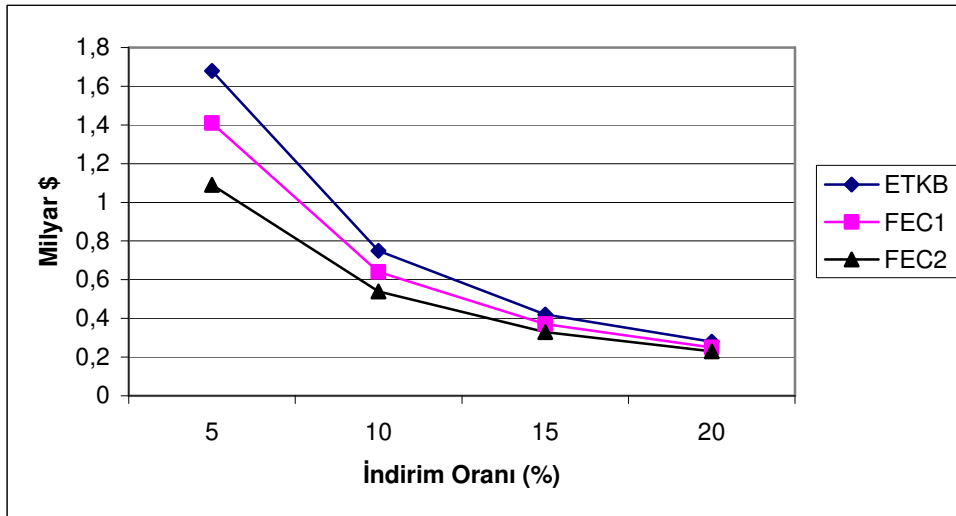


Şekil 7.10. SO₂ emisyonları gelişimi – referans ve yasal durumu için

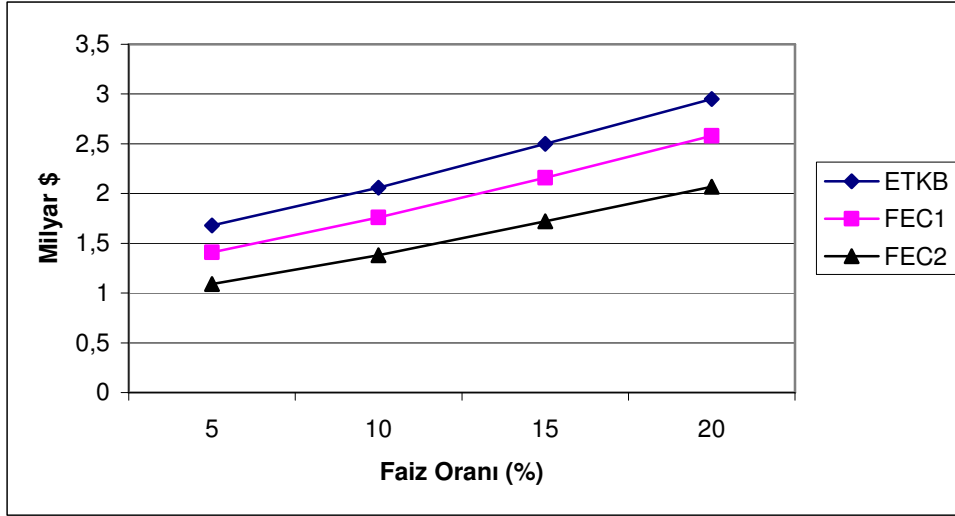


Şekil 7.11. NO_x emisyonları gelişimi – referans ve yasal durumu için

Farklı talep senaryolarındaki indirim ve faiz oranlarındaki değişimlere karşılık maliyet fonksiyonunun alacağı değerler Şekil 7.12-13'de verilmiştir. Şekil 7.12'de faiz oranı %5 iken indirim oranının %5-20 aralığında değişmesi sonucu toplam maliyet fonksiyonunun aldığı değerler görülmektedir. Şekil 7.13'de ise indirim oranı %5 iken faiz oranının %5-20 aralığında değişmesi sonucu maliyet fonksiyonunun alacağı değerler izlenmektedir.



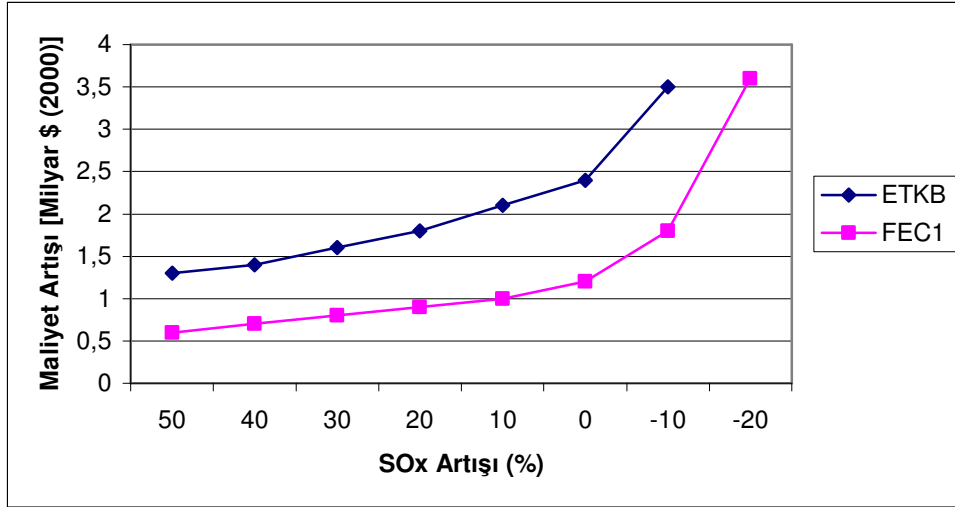
Şekil 7.12. Farklı talep projeksiyonları için indirim oranı gelişimi



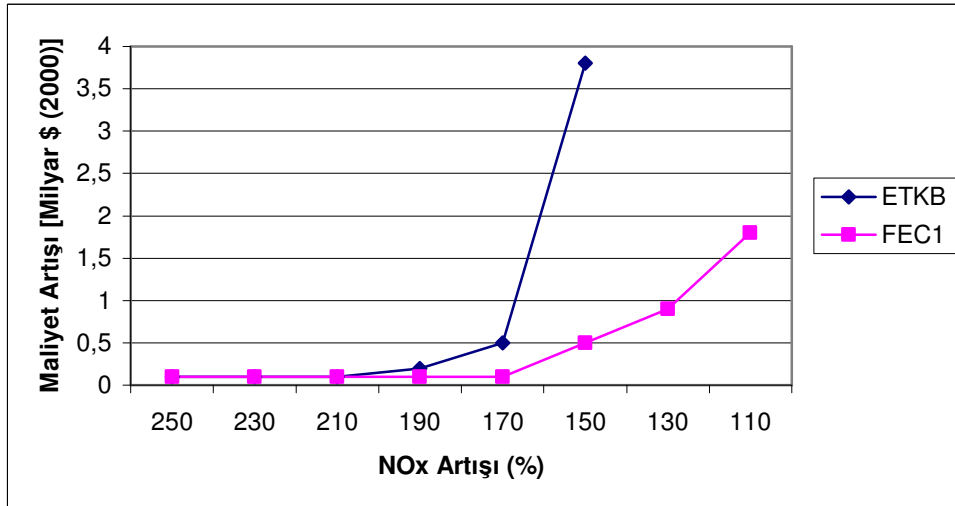
Şekil 7.13. Farklı talep projeksiyonları için faiz oranı gelişimi

7.3. Maliyet Etkin Senaryo

Maliyet-Etkin Senaryolarda toplam emisyonların arzulanan seviyelerinde değişiklikler yapılarak, Şekil 7.14-15'de verildiği gibi, emisyon kontrol maliyet fonksiyonları SO_2 ve NO_x azaltım hedefleri farklı kombinasyonlar için belirlenmiştir. Bu şekillerde, Referans Senaryo ile mukayese edilirse, emisyon kontrol maliyeti 2000-2030 çalışma dönemindeki toplam SO_2 ve NO_x emisyonlarının arzulanan indirimini sağlamak için doğan ilave maliyetin bu günkü değerini göstermektedir. 2000 yılına kıyasla şekildeki bu emisyonların 2010-2030 yıllarındaki değerleri maksimum izin verilen değerlerdir. Bu senaryo sonuçlarının irdelenmesiyle, emisyon kontrol önlemlerinin bir sıralaması elde edilir (Şekil 7.16).



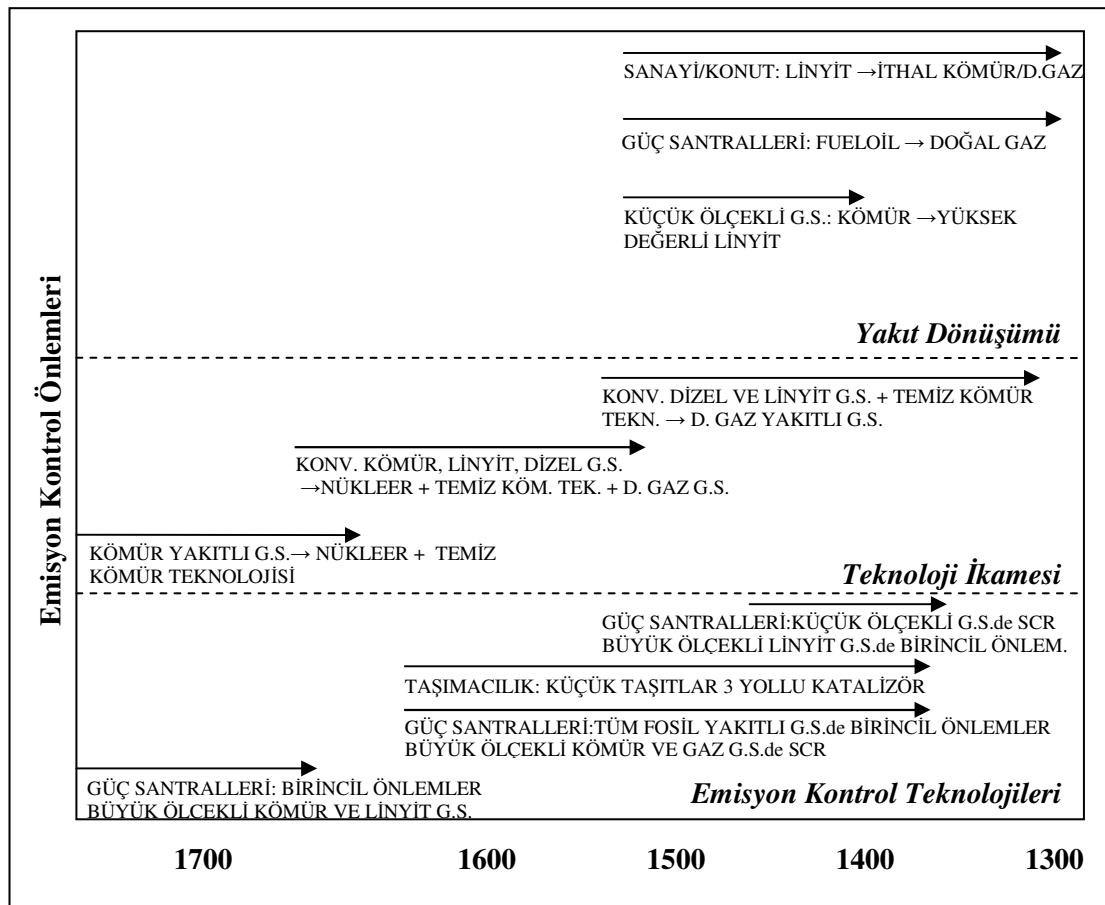
Şekil 7.14. SO₂ azaltımı için maliyet fonksiyonu



Şekil 7.15. NO_x azaltımı için maliyet fonksiyonu

SO₂ emisyonlarını azaltmak için maliyet-etkin yöntemler, güç santrallerinde fuel-oil'den gaza ve yüksek kükürtlü linyitten düşük kükürt içerikliye şeklinde gerçekleşen yakıt dönüşümü, yeni konvensiyonel kömür ve linyit santrallerinin temiz kömür teknolojileri ile ikame edilmesi ve FGD sistemlerinin yüksek kükürtlü linyit kullanan santrallerde kurulmasıdır. Eğer daha fazla oranda SO₂ azaltımı başarılacaksa burada sanayi ve konut sektöründe yakıt dönüşümü, konvensiyonel kömür ve linyit yakıtlı güç santrallerinin doğal gaz yakıtlı kombine çevrim santralleri ile ikamesi ve FGD sistemlerinin tüm kömür ve linyit yakıtlı güç santrallerine

Özetlenecek olursa, Türkiye'de SO_2 kontrol stratejilerinde ağırlıklı çözüm yolu linyit yakıtlı güç santrallerinde ya emisyon kontrol teknolojilerinin uygulanması ya da teknoloji ikame yöntemleri biçiminde olmaktadır. Buna ek olarak, katı yakıtların nispeten yüksek oranda tüketildiği konut ve sanayi sektöründe ise yakıt dönüşüm yöntemleri düşünülmelidir. NO_x 'e gelince, toplam emisyonların etkin biçimde azaltımı gerçekleştirmek için ulaştırma sektöründe önlemler alınması kaçınılmaz gözükmektedir.



Şekil 7.17. NO_x emisyonu kontrol yöntemlerinin sıralanışı

7.4. Bulanık Model Sonuçları

Bulanık ulusal enerji çevre modelinin sonuçları $\alpha \in [0,1]$ aralığında $\alpha=0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ ve 1 değerleri için bulunmuştur. Sonuçlar, birincil enerji tüketim miktarları, SO_2 ve NO_x emisyon gelişimlerine göre düzenlenmiştir. Çizelge 7.1'de toplam birincil

enerji tüketimleri incelendiğinde $\alpha=1$ değerine karşılık gelen çözümlerin referans durumu sonuçları ile aynı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi talep vektörünün üçgensel üyelik fonksiyonu ile ifade edilmesidir. Burada $\alpha=1$ değeri üçgenin tepe noktasını oluşturmaktadır. $\alpha=0$ değerine doğru inildiğinde birincil enerji tüketim miktarlarının arttığı görülmektedir. Bu sonuçlardan hangisinin kullanılacağı tamamen karar vericinin tercihinin bırakılmıştır.

Çizelge 7.1. Bulanık model sonuçlarına göre birincil enerji tüketimi (PJ)

		2005	2010	2015	2020	2025	2030
$\alpha=1$	Hay.ve Bit.Art.	49,4	43,2	38,8	35,6	33,9	34,4
	Kömür	792,61	1433,1	2522,5	3979,4	5762,7	7600,2
	Linyit	768,35	1276,3	1439,6	1483	1508,7	1510,1
	Gaz	1726,5	2184,6	3151,3	5434,4	8475,9	8824,2
	Petrol	1863,2	2075,9	2468,2	3084	3742	3994
	Uranyum	0	0	168	336	504	672
	Odun	173,6	141,6	128,7	128,7	128,7	128,7
	Hidro	215,16	330,01	457,08	534,03	590,31	590,31
	Yenilenebilir	81,02	160,42	225,62	256,12	460,5	586,39
	Toplam	5669,8	7645	10600	15271	21207	23940
$\alpha=0,8$	Hay.ve Bit.Art.	50,5	44,3	39,7	36,4	34,7	35,3
	Kömür	805,33	1457,1	2567,8	4051,5	5866,4	7780,5
	Linyit	773,15	1281,2	1444,5	1487,9	1513,8	1515,3
	Gaz	1869,6	2400,9	3448,6	5840,7	9016,6	9231,8
	Petrol	1904,4	2122,3	2522,6	3149,1	3817,5	4082
	Uranyum	0	0	168	336	504	672
	Odun	177,8	145	131,8	131,8	131,8	131,8
	Hidro	215,16	330,01	457,08	534,03	590,31	590,31
	Yenilenebilir	82,72	164,02	230,72	335,71	471,2	600,39
	Toplam	5878,7	7944,8	11011	15903	21946	24639
$\alpha=0,6$	Hay.ve Bit.Art.	51,7	45,3	40,6	37,3	35,6	36,1
	Kömür	819,97	1483,1	2614,8	4125,2	5972	7920,4
	Linyit	777,95	1286	1449,4	1493	1518,9	1520,4
	Gaz	2012,2	2619,3	3744,4	6245,9	9559,1	9638,7
	Petrol	1945,3	2168,3	2577,2	3213,9	3892,5	4169,8
	Uranyum	0	0	168	336	504	672
	Odun	181,9	148,4	134,9	134,9	134,9	134,9
	Hidro	215,16	330,01	457,08	534,03	590,31	590,31
	Yenilenebilir	84,32	167,52	235,82	343,22	482	614,39
	Toplam	6088,5	8247,9	11422	16463	22689	25297

Çizelge 7.1. (Devam) Bulanık model sonuçlarına göre birincil enerji tüketimi (PJ)

		2005	2010	2015	2020	2025	2030
$\alpha=0,4$	Hay.ve Bit.Art.	52,9	46,4	41,6	38,2	36,4	36,9
	Kömür	834,58	1508,9	2661,7	4199,2	6077,7	8060,1
	Linyit	782,65	1290,8	1454,3	1497,9	1524	1525,6
	Gaz	2155,4	2836,7	4041	6651,9	10100	10047
	Petrol	1986,4	2214,9	2631,7	3279,1	3968	4257,9
	Uranyum	0	0	168	336	504	672
	Odun	186,1	151,8	138	138	138	138
	Hidro	215,16	330,01	457,08	534,03	590,31	590,31
	Yenilenebilir	85,92	171,22	240,92	350,72	492,7	628,29
	Toplam	6299,1	8550,7	11834	17025	23431	25956
$\alpha=0,2$	Hay.ve Bit.Art.	54,1	47,4	42,5	39	37,2	37,7
	Kömür	849,2	1534,9	2708,8	4273	6183,3	8199,8
	Linyit	787,55	1295,6	1459,1	1502,9	1529,1	1530,8
	Gaz	2298	3053,9	4337,8	7057,8	10642	10453
	Petrol	2028,5	2261,2	2686,5	3344,4	4043,1	4345,5
	Uranyum	0	0	168	336	504	672
	Odun	190,2	155,2	141,1	141,1	141,1	141,1
	Hidro	215,16	330,01	457,08	534,03	590,31	590,31
	Yenilenebilir	87,72	174,72	246,02	358,42	503,4	642,29
	Toplam	6510,4	8852,8	12247	17587	24174	26613
$\alpha=0$	Hay.ve Bit.Art.	55,3	48,4	43,4	39,9	38	38,6
	Kömür	863,72	1560,8	2755,8	4346,8	6289	8339,5
	Linyit	792,25	1300,5	1464	1507,9	1534,3	1535,9
	Gaz	2441,1	3272,2	4633,6	7463,2	11185	10861
	Petrol	2068,9	2307,8	2740,9	3409,5	4118,3	4433,3
	Uranyum	0	0	168	336	504	672
	Odun	194,4	158,6	144,2	144,2	144,2	144,2
	Hidro	215,16	330,01	457,08	534,03	590,31	590,31
	Yenilenebilir	89,32	178,22	251,12	365,92	514,1	656,29
	Toplam	6720,1	9156,5	12658	18147	24917	27271

SO₂ emisyonlarının gelişimi ise Çizelge 7.2’de verilmiştir. Referans senaryoda 2030 yılında toplam SO₂ emisyonlarının miktarı 10,4 milyon ton olacakken, bulanık durumda bu değerler $\alpha=0,8$ için 11,17 milyon ton, $\alpha=0,6$ için 10,72 milyon ton, $\alpha=0,4$ için 10,88 milyon ton $\alpha=0,2$ için 11,04 milyon ton ve $\alpha=0$ için 11,19 milyon ton olacaktır. Sektörel gelişime bakıldığında ise 2005 yılında güç sektörünün SO₂ emisyon miktarı ilk sıradayken 2030 yılında bu yeri sanayi sektörü alacaktır. Bunun sebebi ise kendi enerji ihtiyaçlarını kendilerinin üretecek olması gösterilebilir.

Çizelge 7.2. Bulanık model sonuçlarına göre SO₂ emisyonlarının gelişimi (bin ton/yıl)

		2005	2010	2015	2020	2025	2030
$\alpha=1$	Tarım	43,738	52,508	62,378	74,081	87,448	102,03
	Güç Sant.	1482,9	2349,5	2661,7	2939,9	3200,9	3272,6
	Sanayi	1099,6	1516,9	2248,7	3337,1	4674,2	5404,9
	Konut	507,39	531,26	653,73	764,51	850,41	897,95
	Ulaştırma	307,8	364,77	428,92	504,25	589,9	683,14
	Toplam	3441,4	4814,9	6055,4	7619,9	9402,8	10361
$\alpha=0,8$	Tarım	44,782	53,777	63,873	75,858	89,563	3273,6
	Güç Sant.	1482,9	2349,5	2661,7	2939,9	3200,9	5519,4
	Sanayi	1122,2	1548,3	2294,6	3402,4	4763	968,72
	Konut	519,83	544,1	669,36	782,61	870,82	699,66
	Ulaştırma	315,22	373,62	439,27	516,34	604,09	716,05
	Toplam	3485	4869,2	6128,8	7717,1	9528,4	11177
$\alpha=0,6$	Tarım	45,825	55,018	65,368	77,635	91,65	106,93
	Güç Sant.	1482,9	2349,5	2661,7	2939,9	3200,9	3274,7
	Sanayi	1144,4	1578,7	2339,8	3467,2	4851,3	5633,1
	Konut	531,98	556,94	685,12	801,14	891,24	991,47
	Ulaştırma	322,51	382,26	449,5	528,37	618,23	716,05
	Toplam	3527,7	4922,4	6201,5	7814,3	9653,3	10722
$\alpha=0,4$	Tarım	46,868	56,287	66,862	79,411	93,737	109,39
	Güç Sant.	1482,9	2349,5	2661,7	2939,9	3200,9	3275,7
	Sanayi	1166,5	1609,3	2385	3531,8	4939,9	5747
	Konut	544	569,63	700,63	819,38	911,35	1014,1
	Ulaştırma	329,93	391,03	459,78	540,6	632,48	732,42
	Toplam	3570,2	4975,7	6274	7911,1	9778,4	10879
$\alpha=0,2$	Tarım	47,94	57,556	68,357	81,188	95,852	111,84
	Güç Sant.	1482,9	2349,5	2661,7	2939,9	3200,9	3276,8
	Sanayi	1188,8	1639,9	2430,1	3596,6	5028,2	5860,7
	Konut	556,44	582,34	716,4	837,6	931,9	1037
	Ulaştırma	337,36	399,88	470,13	552,69	646,6	748,79
	Toplam	3613,4	5029,2	6346,6	8008	9903,5	11035
$\alpha=0$	Tarım	48,983	58,797	69,851	82,964	97,939	114,27
	Güç Sant.	1482,9	2349,5	2661,7	2939,9	3200,9	3277,8
	Sanayi	1210,6	1670,4	2475,3	3661,1	5116,7	5974,4
	Konut	568,44	595,74	732,03	856,14	952,3	1059,6
	Ulaştırma	344,78	408,51	480,34	564,78	660,72	765,17
	Toplam	3655,8	5083	6419,2	8104,9	10029	11191

Çizelge 7.3. Bulanık model sonuçlarına göre NO_x emisyonlarının gelişimi (bin ton/yıl)

		2005	2010	2015	2020	2025	2030
$\alpha=1$	Tarım	186,12	223,44	265,44	315,24	372,12	434,16
	Güç Sant.	171,96	232,75	262,32	289,5	324,19	1035,8
	Sanayi	218,96	345,08	552,89	890,49	1312,9	1352,7
	Konut	55,913	60,128	75,889	90,077	99,708	108,24
	Ulaştırma	718,35	851,16	1003,7	1183,1	1387,2	1609,4
	Toplam	1351,3	1712,6	2160,3	2768,4	3496,1	4540,2
$\alpha=0,8$	Tarım	190,56	228,84	271,8	322,8	381,12	1042,6
	Güç Sant.	171,96	232,75	262,32	289,5	324,19	1374,4
	Sanayi	226,88	357,26	570,75	915,94	1347,6	117,08
	Konut	57,265	61,566	77,703	92,223	102,1	1648,1
	Ulaştırma	735,58	871,69	1027,9	1211,4	1420,6	1686,7
	Toplam	1382,2	1752,1	2210,5	2831,9	3575,6	5868,9
$\alpha=0,6$	Tarım	195	234,12	278,16	330,36	390	455,04
	Güç Sant.	171,96	232,75	262,32	289,5	324,19	1049,4
	Sanayi	234,78	369,49	588,54	941,38	1382,4	1396,1
	Konut	58,604	63,015	79,529	94,383	104,48	119,83
	Ulaştırma	752,76	892,02	1051,9	1239,7	1453,7	1686,7
	Toplam	1413,1	1791,4	2260,4	2895,4	3654,8	4707,1
$\alpha=0,4$	Tarım	199,44	239,52	284,52	337,92	398,88	465,48
	Güç Sant.	171,96	232,75	262,32	289,5	324,19	1056,2
	Sanayi	242,7	381,7	606,37	966,82	1417,2	1417,8
	Konut	59,936	64,454	81,326	96,546	106,86	122,57
	Ulaştırma	770,08	912,54	1076	1268,3	1487,1	1725,4
	Toplam	1444,1	1831	2310,5	2959	3734,2	4787,5
$\alpha=0,2$	Tarım	204	244,92	290,88	345,48	407,88	475,92
	Güç Sant.	171,96	232,75	262,32	289,5	324,19	1063,1
	Sanayi	250,61	393,9	624,19	992,28	1451,9	1439,5
	Konut	61,295	65,9	83,166	98,707	109,26	125,32
	Ulaştırma	787,7	933,02	1100,2	1296,7	1520,3	1763,9
	Toplam	1475,6	1870,5	2360,7	3022,7	3813,6	4867,7
$\alpha=0$	Tarım	208,44	250,2	297,24	353,04	416,76	486,24
	Güç Sant.	171,96	232,75	262,32	289,5	324,19	1069,9
	Sanayi	258,5	406,13	641,99	1017,7	1486,7	1461,1
	Konut	62,622	67,396	84,98	100,88	111,65	128,06
	Ulaştırma	804,58	953,35	1124,1	1325,1	1553,6	180,25
	Toplam	1506,1	1909,8	2410,6	3086,2	3893	3325,6

NO_x emisyonlarının gelişimi ise Çizelge 7.3’de verilmiştir. Referans senaryoda 2030 yılında toplam NO_x emisyonlarının miktarı 4,5 milyon ton olacakken, bulanık durumda bu değerler $\alpha=0,8$ için 5,9 milyon ton, $\alpha=0,6$ için 4,7 milyon ton, $\alpha=0,4$ için 4,79 milyon ton $\alpha=0,2$ için 4,87 milyon ton ve $\alpha=0$ için 3,3 milyon ton olacaktır. Sektörel gelişime bakıldığında ise ulaştırma sektörünün ilk sırayı aldığı görülmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sisteme dışarıdan girilen farklı talep vektörlerine göre Türkiye'nin mevcut enerji durumu geçmişteki performans değerleriyle birlikte incelenerek 2030 yılına kadarki enerji üretim programı çıkartılmıştır. Ülkenin gelecek yıllar için söz konusu ekonomik ve teknolojik gelişmeleri de göz önüne alarak enerji arz sistem gelişiminin çevresel kısıtlayıcılar üzerindeki standartları sağlayacak biçimde sistemin çevresel zararlı etkilerini minimize edici bir çalışma sergilenmiştir. Bunun için çok periyotlu doğrusal programlama modeli EFOM-ENV/GAMS kullanılmıştır. Enerji tedarik sisteminin analizi ve onun çevresel etkilerine inceleyen bu model Türkiye'nin enerji sistemini uygun biçimde göstermek için değiştirilmiştir. Sektörel, teknolojik, yakıt ve dönüşüm bazında emisyonlar belirlenmiş ve uygun emisyon azaltım teknoloji ve maliyet etkin yöntemler alternatif olarak göz önüne alınmıştır. Bulanık enerji çevre modeli sonuçları referans senaryo ile kıyaslamalı olarak verilmiştir.

Aşağıdaki dört senaryo için model uygulamasının sonuçları analiz edilmiştir.

- Türkiye için herhangi bir kısıtlama getirmeden mevcut durumun incelendiği referans senaryo;
- Türkiye'nin yasal yönetmeliğinin uygulandığı yasal senaryo;
- Emisyon indirgeme teknolojilerinin uygulandığı maliyet-etkin senaryo;
- Bulanık doğrusal programlama modeli sonuçlarının incelendiği bulanık durum senaryosu.

Referans enerji senaryosu için elde edilen sonuçların üstünlüğü varsayımların değişebilir olmasıdır. Çünkü model sonuçları, son enerji talep değerlerinden etkilenir. Modelde kullanılan üç talep senaryosu nüfus artış hızı ve Türkiye'nin ekonomik göstergeleri ile tanımlanmıştır. Çalışmada enerji talep tahminlerini, ETKB resmi projeksiyonları ve Kavak'ın çalışmasından alınmıştır. Referans senaryo olarak ETKB'nin projeksiyonu kullanılmıştır.

Projekte edilen enerji talebinin hızlı artış sergilemesi nedeniyle, eğer herhangi bir önlem alınmıyorsa, 2030 yılında SO₂ emisyonları çok artmış olacaktır. NO_x emisyonları ise daha düşük bir seviyeden başlayarak, daha hızlı bir artış kaydedecektir. Bu birincil enerji ihtiyacını karşılamakta doğal gaz ya da hidrolik gibi ‘daha temiz’ yakıtların tercihine rağmen gerçekleşecektir. Eğer enerji talebinde daha yavaş bir büyüme seyri dikkate alınsa elbette emisyon seyrinde de buna bağlı olarak bir düşüş sergilenecektir.

Türkiye’nin kendi yasal yönetmeliği uygulanacak olursa, güç üretiminde, düşük kalite yerli linyitlerin ikamesi yada ‘temiz kullanım’ı biçiminde gerçekleştirilecek olan SO₂ emisyonlarının azaltımında yoğunlaşacaktır. Büyük kapasiteli linyit yakıtlı güç santrallerinde baca gazı arıtma sistemleri dışında, Türkiye’de, SO₂ emisyonlarında esaslı bir maliyet-etkin azaltımı konvansiyonel linyit ve kömür yakıtlı santrallerin ‘temiz kömür teknolojileri’ yada gaz yakıtlı güç santralleri biçiminde gerçekleşecek olan teknoloji ikamesi yöntemleriyle sağlanabilecektir. Aynı zamanda katı yakıtların endüstri ve konut sektöründeki yakıt dönüşümünde SO₂ azaltımı için önemli bir maliyet – etkin potansiyel bulundurmaktadır. Bu durum Türkiye gibi hızla büyüyen enerji talebiyle karakterize edildiği ve bu nedenle enerji arzında önemli esnekliğe sahip bir ülke için enerji arz planlaması ve emisyon kontrol önlemlerinin neden birlikte yürütülmesi gerektiğinin önemi vurgulanmaktadır.

Yasal senaryo durumunda NO_x emisyonları üzerinde etkisi ancak küçük kalacaktır. Bunun nedeni ise ancak güç sektörünü etkileyeceği, halbuki NO_x emisyonlarının etkin biçimde azaltmanın yolu taşıma sektöründe alınacak önlemlerle sözkonusu olabilecektir.

Farklı talep projeksiyonları, farklı senaryolar ve bulanık model sonuçları; enerji planlayıcılarına değişik bir bakış açısı sunmakta ve önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Bulanık çevre-enerji modeli, Türkiye enerji sektöründe stratejik politikalar oluşturmakta kullanılabilir. Referans senaryo ile bulanık model sonuçları kıyaslandığında, geleneksel modellere ciddi bir alternatif olabileceği görülmüştür.

Çalışmanın Literatüre Katkısı

Enerji optimizasyonu üzerine literatürde bir çok çalışma vardır. Ülkelerin enerji sistemleri birbirlerinden farklı ve dinamik yapıda oldukları için yapılan her bir modelleme çalışması literatüre yeni bir katkı sağlamaktadır. Bu tezde EFOM-ENV/GAMS ile Türkiye enerji sektörünün modellenmesi ilk defa yapılmış ve bulunan sonuçlar tartışmaya sunulmuştur.

EFOM-ENV/GAMS'in orijinal matematiksel modelinde proses maliyetleri hesaplanırken iç tüketim oranının dikkate alınmamaktadır. Bu yaklaşım maliyetlerin daha düşük hesaplanmasına neden olmaktadır. Maliyetlerin daha gerçekçi hesaplanabilmesi için, bu parametre modele ilave edilmiştir.

Daha önce yapılan çalışmalarda talep vektörünün bulanık olduğu enerji modeli incelenmemiştir. Bölüm 6'da detaylı anlatılan sebeplerden dolayı talep vektörünün bulanık alınması daha tutarlı sonuçlar vereceğinden doğrusal programlama modeli, bulanık doğrusal programlama modeli şeklinde yeniden düzenlenmiştir. Düzenlenen bu model için bir çözüm algoritması geliştirilmiştir.

İleriki Çalışmalar

Faydalı enerjinin kullanıldığı ulaştırma, konut, sanayi ve tarım sektörleriyle ilgili ayrıntılı enerji talep kesim yönetimini çalışmaları yapılabilir. Yapılan çalışma sonunda elde edilen faydalı enerji verileri EFOM-ENV modeline girilerek ayrıntılı çözümler elde edilebilir.

Avrupa Topluluğu yönetmeliğinin modele empoze edilmesiyle sonuçların alınması ve referans-yasal senaryo ile kıyaslanması sağlanabilir. Bunun için Avrupa Birliği ülkelerinin uyguladığı çevresel standartlar elde edilmelidir.

Yapılan çalışmada talep vektörünün bulanık olduğu durum incelenmiştir. Modelin, maliyet parametrelerinin bulanıklık durumu incelenip doğrusal programlama modeli yeniden oluşturulabilir. Farklı çözüm algoritmaları geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Devlet Planlama Teşkilatı, “Uzun vadeli strateji ve sekizinci beş yıllık kalkınma planı 2001-2005”, **DPT**, Ankara, 142-152 (2000).
2. Ekinci, E., Tırıs, M., Türe, İ. E., “Ulusal çevre eylem planı: Enerji sektöründen kaynaklanan hava kirliliği”, **DPT**, Ankara, 2-12 (1997).
3. Fishbone, L. G., Abilock, H., MARKAL, A., “Linear programming model for energy systems analysis: Technical description of the BNL version”, **International Journal of Energy Research**, 5 (4): 353-375 (1981).
4. Berger, C., “MARKAL – Development of Material, Financial and Multi-Regional Capability”, **Ecole des Hautes Etudes Commerciales**, Montreal, (1988).
5. Agnew, M., Schrattenholzer, L., Voss, A., “A model for energy supply systems alternatives and their environmental impact”, **WP-79-6**, **International Institute of Applied Systems analysis**, Laxenburg, (1979).
6. Hoop, H., Thonet, C., Heirwegh, T., “Problems of data collection and validation for the linear programming model EFOM 12C”, **IPC Science & Technology Press**, Guildford, UK, (1979).
7. Kruijk, H., “The EU energy and environmental model EFOM-ENV specified in GAMS, Model description and user’s guide”, **ECN-C-94-021**, 11-46 (1994).
8. Van Der Voort, E., Donni, E. and Thonet, C., “Energy supply modeling package EFOM 12C Mark I, mathematical description”, **CABAY**, Louvian-la-Neuve, Belgium, (1984).
9. Oostvoorn, F., Brock, M., Harmelen, T., Arkel, W., “EFOM-ENV: GAMS version”, **Netherlands Energy Research Foundation ECN**, ESC-Energy Studies, Petten, 3-25 (1991).
10. Rostamihozori, M. E. N., “Development of energy and emission control strategies for Iran”, Dissertation, **Universität Karlsruhe, Fak. f. Wirtschaftswissenschaften**, Karlsruhe, 58-70 (2002).
11. 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 Technology for Stationary Source**, Nürnberg, (1991).

12. Voss, A., Schlenzig, C. and Reuter, A., "MESAP III: A tool for energy planning and environmental management - history and new developments", *Konferenzen des Forschungszentrums*, Jülich, (1995).
13. Beek, N., "Classification of energy models", Eindhoven University of Technology, *Tilburg University*, 7-16 (1999).
14. Reuter, A., Voss, A., "Tools for energy planning in developing countries", *Energy Journal*, 15 (7/8): 705-714 (1990).
15. International Atomic Energy Agency, "Computer tools for comparative assessment of electricity generation options and strategies", *IAEA*, Vienna, Austria, (1995).
16. 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).
17. Internet: Stockholm Environment Institute: What is LEAP?, <http://forums.seib.org/leap/> (2005).
18. Schrattenholzer, L., "The energy supply model MESSAGE". *International Institute for Applied System Analysis, IIASA*, Luxembourg, Austria, (1981).
19. Messner, S., Strubegger, M., "User's Guide for MESSAGE III", *WP-95-69; International Institute for Applied Systems Analysis*, Laxenburg, Austria, (1995).
20. Institut d'Economie et de Politique de l'Energie, "POLES 2.2", *Reference Guide*, (1996).
21. Abilock, H., "MARKAL, A multiperiod linear-programming model for energy system analysis", *Energy Systems Analysis, Proceedings of International Conference on Energy Systems Analysis*, Dordrecht, Netherlands, 482-493 (1980).
22. Fishbone, L.G, Abilock, H., "MARKAL, A linear-programming model for energy systems analysis: Technical description of the BNL version", *International Journal of Energy Research*, 5 (4): 353-375 (1981).
23. 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).
24. 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 modelling, 56-71 (1979).

25. Gurfel B., "Model of the economic efficiency of the exploitation of oil shale in comparison with other mineral sources of energy", *Appl. Energy*, 5: 205-213 (1979).
26. De Musgrove A. R., "A linear programming analysis of liquid-furl production and use options for Australia", *Energy*, 9: 281-302 (1984).
27. Ellis J. H., McBean E.A, Farquhar G. J., "Deterministic linear programming model for acid rain abatement", *Jour. Env. Eng.*, 111: 119-139 (1985).
28. Das T. K., "Multiobjective linear programming approach to renewable energy policy analysis", *Energy Management*, 55-121 (1987).
29. Satsangi P. S., Sarma 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).
30. Kydes A. S., "Flow models", *Energy*, 15: 561-571 (1990).
31. Pasternak H., Segal I., Engel H., "Economic evaluation of energy conservation projects with an emphasis on initiation time", *Energy Convers. Manage.*, 30: 381-385 (1990).
32. Suganthi L., Jagadeesan T.R., "A modified model for prediction of India's future energy requirement", *Int. Jour. Energy Environ.*, 3: 371-386 (1992).
33. Luhanga M.L., Mwandosya M.J., Luteganya P.R., "Optimization in computerized energy modeling for Tanzania", *Energy*, 18: 1171-1179 (1993).
34. Groscurth H. M., Bruckner T. H., Kummel R., "Modeling of energy-services supply systems", *Energy*, 20: 941-958 (1995).
35. Messner S., Golodnikov A., Gritsevskii A., "A stochastic version of the dynamic linear programming model message III", *Energy*, 21: 775-784 (1996).
36. Jeng Wen L., Chia Yon C., "A cost minimization model for coal import strategy", *Energy Policy*, 24: 1111-1117 (1996).
37. 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).

38. 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).
39. Henning D., "MODEST-An energy system optimization model applicable to local utilities and countries", *Energy*, 22: 1135-1150 (1997).
40. Raja R., Sooriamoorthi C.E., Kannappan P., Ramachandran T., "Energy planning and optimization model for rural development-a case of sustainable agriculture", *Int. Jour. Energy Res.*, 21: 527-548 (1997).
41. Iniyar S., Suganthi L., Jagadeesan T.R., "Renewable energy planning for India in 21st century", *Renew. Energy*, 14: 453-457 (1998).
42. Iniyar S., Sumathy K., Suganthi L., Samuel A.A., "Sensitivity analysis of optimal renewable energy mathematical model on demand variations", *Energy Convers. Manage.*, 41: 199-211 (2000).
43. Suganthi L., Williams A., "Renewable energy in India-a modeling study for 2020-2021", *Energy Policy*, 28: 1095-1109 (2000).
44. Iniyar S., Sumathy K., "An optimal renewable energy model for various end-uses", *Energy*, 25: 563-575 (2000).
45. Cormio C., Dicorato M., Minoia A., Trovato M., "A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints", *Renew. Sustain. Energy. Rev.*, 7: 99-130 (2003).
46. Drozd M., "An optimization model of geothermal-energy conversion", *Appl. Energy*, 74: 75-84 (2003).
47. Gong M., "Optimization of industrial energy systems by incorporating feedback loops into the MIND method", *Energy*, 28: 1655-1669 (2003).
48. Sinha A.K., Dudhani S., "A linear programming model of integrated renewable energy system for sustainable development. Energy technologies for sustainable development", *Uttar Pradesh, India: Prime Publishing House*, 193-200 (2003).
49. Zadeh, L. A., "Fuzzy Sets", *Information and Control*, 8: 338-353 (1965).
50. Paksoy, T., "Bulanık küme teorisi ve doğrusal programlamada kullanımı: karşılaştırmalı bir analiz", *S.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 17(1): (2002)
51. Bellman, R. E., Zadeh, L. A., "Decision making in a fuzzy environment", *Management Science*, 17: 141-164 (1970).

52. Tanaka, H., Okuda, T., Asai, K., "On fuzzy mathematical programming", *Journal of Cybernetics*, 3: 37-46 (1974).
53. Negoita, C. V., Sularia, M., "On fuzzy programming and tolerances in planning", *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 11: 3-15 (1976).
54. Zimmermann, H. J., "Description and optimization of fuzzy systems", *International Journal of General Systems*, 2: 209-215 (1976).
55. Orlovsky, S. A., "Decision-making with a fuzzy preference relation", *Fuzzy Sets and Systems*, 1(3): 155-167 (1978).
56. Chanas, S., "The use of parametric programming in fuzzy linear programming", *Fuzzy Sets and Systems*, 11(3): 243-251 (1983).
57. Tanaka, H., Asai, K., "Fuzzy linear programming problems with fuzzy numbers", *Fuzzy Sets and Systems*, 13: 1-10 (1984).
58. Tanaka, H., Asai, K., "Fuzzy solutions in fuzzy linear programming problems", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 14: 325-328 (1984).
59. Carlsson, C., Korhonen, P., "A parametric approach to fuzzy linear programming", *Fuzzy Sets and Systems*, 20: 17-30 (1986).
60. Werners, B., "An interactive fuzzy linear programming system", *Fuzzy Sets and Systems*, 23: 131-147 (1987).
61. Inuiguchi, M., Ichihashi, H., Kume, Y., "A solution algorithm for fuzzy linear programming with piecewise linear membership functions", *Fuzzy Sets and Systems*, 34: 15-31 (1990).
62. Tanaka, H., Guo, P., Zimmerman, H. J., "Possibility distributions of fuzzy decision variables obtained from possibilistic linear programming problems", *Fuzzy Sets and Systems*, 113(2): 323-332 (2000).
63. Jamison, K. D., Lodwick, W. A., "Fuzzy linear programming using a penalty method", *Fuzzy Sets and Systems*, 119(1): 97-110 (2001).
64. Chiang, J., "Fuzzy linear programming based on statistical confidence interval and interval-valued fuzzy set", *European Journal of Operational Research*, 129(1): 65-86 (2001).
65. Liu, X., "Measuring the satisfaction of constraints in fuzzy linear programming", *Fuzzy Sets and Systems*, 122(2): 263-275 (2001).

66. Bector, C. R., Chandra, S., “On duality in linear programming under fuzzy environment”, *Fuzzy Sets and Systems*, 125(3): 317-325 (2002).
67. Pendharkar, P. C., “A fuzzy linear programming model for production planning in coal mines”, *Computers & Operations Research*, 4(12): 1141-1149 (1997).
68. Vlasisavljevic, D., Djukanovic, M. B., “Fuzzy linear programming based optimal power system rescheduling including preventive redispatch”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(2): 525-532 (1999).
69. Gupta, A. P., Harboe, R., Tabucanon, M. T., “Fuzzy multiple-criteria decision making for crop area planning in Narmada river basin”, *Agricultural Systems*, 63(1): 1-18 (2000).
70. Venkatesh, B., Sadasivam, G., Khan, M. A., “An efficient multiobjective fuzzy logic based successive LP method for optimal reactive power planning”, *Electric Power Systems Research*, 59(2): 89-102 (2001).
71. Oder C., “Analysis of the Lithuanian final energy consumption using fuzzy sets”, *International Journal of Energy Research*, 17: 35-44 (1993).
72. Canz T., “Fuzzy linear programming in DSS for energy system planning”. *WP-96-132*, (1996).
73. Sadeghi, M., Hosseini H.M., “Energy supply planning in Iran by using fuzzy linear programming approach (regarding uncertainties of investment costs)”, *Energy Policy*, 34: 993-1003 (2006).
74. International Energy Agency, “Energy policies and programmes of IEA countries”, 1988 Review, *IEA*, Paris, (1989).
75. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD, “Turkey, OECD economic surveys 1989/90”, *OECD*, Paris, (1990).
76. Atak, M., Plinke, E., Haasis, H.D., Rentz, O., “Türkiye’nin enerji sistemine yönelik maliyet-etkin emisyon azaltım stratejilerinin geliştirilmesi”, *Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü I. Ulusal Sempozyumu*, Ankara, 652-674 (1991).
77. Tüzüner, S., Sakaryalı, Z., Sevgör, S. ve Güler, M., “Sera gazlarının azaltılmasına yönelik senaryoların oluşturulması”, *Türkiye 9. Enerji Kongresi*, İstanbul, 301-313 (2003).
78. Devlet Planlama Teşkilatı, “Altıncı beş yıllık kalkınma planı 1990-1994”, *DPT Yayını No.2174*, Ankara, (1989).

79. Ercan, Y., Durmaz, A., Sivrioğlu, M., “EFOM-12 C enerji arz modelinin Türkiye’ye uygulanması”, *Türkiye 5. Enerji Kongresi*, Ankara (1990).
80. Guilmoit. J.F., “Energy 2000, Commission of the European Communities”, *Cambridge University Press*, 32-35 (1988).
81. Voort, Donni, Thonet, “Energy supply modelling package EFOM-12C Mark I, User's Guide”. *CEC, Report EUR 8896 EN/II*, (1985).
82. Atak, M., Plinke, E., Haasis, H. D., Rentz, O., “EFOM karar destek modeli ile Türkiye'nin enerji arz sistemi için maliyet-etkin emisyon azaltım stratejilerinin geliştirilmesi”, *Türkiye 5. Enerji Kongresi*, 51-67 (1990).
83. Plinke, E., Atak, M., Haasis, H. D., Rentz, O., “Analysis of the Turkish energy supply system and its environmental impacts in the frame of the harmonization of emission control policies in the European Community”, *Final Report, Institute for Industrial Production*, University of Karlsruhe (1991).
84. Plinke, E., Haasis, H. D., Rentz, O., Sivrioğlu, M., “Analysis of energy and environmental problems in Turkey by using a decision support model”, *Ambio*, 19 (75): 742-758 (1990).
85. Ercan, Y., “Emission-reduction strategies for energy-supply systems near urban areas”, *Energy*, 24: 419-431 (1999).
86. Lueth, O., Jattke, A., Schoettle, H., Wietschel, M., Rentz, O., “Emission-reduction strategies for Central and Eastern Europe”, *Energy Policy*, 25(3): 305-312 (1997).
87. Tırıs M., Atangündüz G., Dinçer I., “Energy, economy and environment modeling: applications for Turkey”, *Energy*, 19:1005-1009 (1994).
88. Çevresel Etki Değerlendirmesi ve Planlama Genel Müdürlüğü Çevre Envanteri Dairesi Başkanlığı, “Türkiye çevre atlası”, *T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı*, Ankara, 181-226 (2004).
89. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, “Türkiye enerji raporu”, *Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi*, (2002).
90. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, “2002 enerji istatistikleri”, *Türkiye 9. Enerji Kongresi*, İstanbul, (2003).
91. Enerji Hammaddeler Alt Komisyonu Kömür Çalışma Grubu, “Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu”, *DPT: 2605-ÖİK: 616*, (2001).

92. Enerji Hammaddeleri Alt Komisyonu Petrol-Doğal gaz Çalışma Grubu, “Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu”, **DPT: 2606 - ÖİK: 617**, Ankara, (2001).
93. İnternet: T. C. Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, <http://www.pigm.gov.tr> (2005).
94. Devlet Planlama Teşkilatı, “Elektrik enerjisi özel ihtisas komisyonu raporu”, **Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı**, Ankara, (2001).
95. Kavak, K., “Türkiye enerji politikaları için bir stratejik planlama önerisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2003).
96. İnternet: Türkiye Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı, Bilgi edinme yasası kapsamında temin edildi, www.enerji.gov.tr (2005).
97. T.C. Devlet Planlama Teşkilatı, “İklim değişikliği özel ihtisas komisyonu raporu”, **Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı**, **DPT: 2532 - ÖİK: 548**, Ankara (2000).
98. T.C. Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü, “Hava kalitesinin korunması yönetmeliği”, **Çevre Genel Müsteşarlığı**, Ankara (1986).
99. Türkiye Elektrik Üretim-İletim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü, “Türkiye elektrik üretim-iletim istatistikleri (2000 yılı sonu)”, **APK-379, No: 10/1-222**, 1-17, 82-100, 113-116 (2000).
100. 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(TH), (1992).
101. Annex, I., “Economic Commission for Europe (ECE): “Protocol to the 1979 convention on long-range transboundary air pollution concerning the control of emmissions of nitrogen ozides and their transboundary fluxes”, **ECE/EB.AIR/18**, Geneva, (1988).
102. Elektrik Üretim A.Ş. Genel Müdürlüğü, “Enerji talep projeksiyonu”, **Çevre Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakaları Daire Başkanlığı**, (yayınlanmamış) (2003).
103. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı, “Altıncı beş yıllık kalkınma planı 1990-1994”, **DPT Yayını No.2174**, Ankara, (1989).
104. Şen. Z., “Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri”, **Bilgi Kültür Sarayı**, İstanbul, 9-44 (2001).

105. Alp İ., “Bulanık Programlama”, *Gazi Üniversitesi, Fen Edb. Fak. İstatistik Bölümü*, Ankara, (2002)
106. Zimmermann, H. J., “Application of Fuzzy set theory to mathematical programming”, *Information Science*, 36:29-58, (1985)
107. Verdegay, J. L., “Fuzzy mathematical programming”, *Approximate Reasoning in Decision Analysis*, Nort-Holland, Amesterdam, (1982).
108. Werners, B. , “Interactive multiple objective programming subject to flexible constraints”, *European Journal of Operational Research*, 31: 342-349, (1987).
109. Bellman, R. E., Zadeh L.A., “Decision making in fuzzy environment”, *Management Science*, 17: 141-164, (1970).
110. Zimmermann, H. J., “Fuzzy set theory and mathematical programming”, *Fuzzy Sets Theory and Applications*, D. Reidel Publishing Company, 99-114, (1986).

EKLER

	T.Kömür	Linyit	Asfaltit	İkincil Kömür	P. kok	Odun	Hay. ve Bit.Art.	Petrol	D.Gaz	Hidrolik	Jeo. Elektrik	Rüzgar	Elektrik	Jeo. Isı	Güneş	Toplam
Yerli Üretim	1159	12128	9			5081	1376	2887	582	2656	65	3		648	262	26855
İthalat	8741	3		506	1216			32001	13487				326			56280
İhracat								1546					38			1584
Stok Değ./İst.Hata(+/-)	83	1088		-39	-48			-219	-340							525
Birincil Enerji Arzı	9983	13219	9	467	1168	5081	1376	32188	13729	2656	65	3	288	648	262	81142
Rafine Dışı Üretim								109								109
Toplam Enerji Arzı	9983	13219	9	467	1168	5081	1376	32297	13729	2656	65	3	288	648	262	81251
Çevrim ve Enerji Sek.	-4046	-9653	-1	2049				-5724	-8640	-2656	-65	-3	7980	0	0	-20760
Elektrik Santralları	-909	-9652						-2802	-8640	-2656	-65	-3	10743			-13985
Kok Fabrikaları	-3101			2048												-1054
Briket		-1		1												
Petrol Rafineri								-1543					-185			-1728
İç Tüketim ve Kayıp	-35		-1					-1379					-2578			-3994
Toplam Nihai Enerji Tüketimi (NET)	5937	3566	8	2516	1168	5081	1376	26573	5088	0	0	0	8268	648	262	60490
Sektörler Toplamı	5937	3566	8	2516	1168	5081	1376	26573	5088	0	0	0	8268	648	262	60490
Sanayi	5472	2088	4	2482	1168			6203	2105				4015		97	23635
Ulaştırma	1							11940	4				62			12007
Konut ve Hizmetler	464	1477	4	34		5081	1376	3705	2979				3927	648	165	19860
Tarım								2809					264			3073
Enerji Dışı								1915								1915

ÜRETİCİ KURULUŞLAR	TERMİK KURULU GÜÇ									Toplam Termik				Toplam Kurulu Güç
	Katı Yakıtlar			Sıvı Yakıtlar				Diğer Yakıtlar						
	Taşkömürü	Linyit	İthal Kömür	Fuel Oil	Motorin	Lpg	Nafta	Çoklu Yak. ve diğer	Doğal Gaz					
480	6508,9		1260,8	229,5	23,7	71,6	434	7044	16052,5	17,5	18,9	11175,2	27264,1	
1,8	23,9		4,6	0,8	0,1	0,3	1,6	25,8	58,9	0,1	0,1	41	100	
EÜAŞ	300	3681		680	204,3				2782,9	7648,2	17,5		10108,7	17774,4
EÜAŞ'ın Bağlı Ort.		2084							1200	3284				3284
Ayrıcalıklı Şirk.													1120,3	1120,3
Üretim Şirketleri									3759,6	3759,6		17,4	882	4659
Otoprodüktörler	35	121,2	145	721,7	16	24	131,7	1716,6	695,6	3606,8		29,1	99,8	3735,7
Mobil Santrallar				607	15,3					622,3				622,3
İşletme Hakkı Dev.		620								620			30,1	650,1
TÜRKİYE	335	6506,2	145	2008,7	235,6	24	131,7	1716,6	8438,1	19540,9	17,5	46,5	12240,9	31845,8

Proje Adı	Kurulu Gücü (MW)	Sözleşme Bedeli (\$/kW)	Değişken İşletme Giderleri (\$)	Kireç Taşı Tüketimi (Ton/Saat) (%100 CaCO ₃)	Enerji Tüketimi (kW)	Baca Gazı Debisi (Nm ³ /Saat) (Kuru)	SO ₂ (mg/Nm ³)		Temizleme Oranı	
							Ham Baca Gazı	Temiz Gaz	SO ₂ (Min %)	Kül (Min %)
							Kuru Baz	Kuru Baz		
Yatağan Termik Santralı 1-2-3. Üniteler	3x210	124	8 775 000	49,5	18000	3 X 1045500	10240	504,2	95	80
Yeniköy Termik Santralı 1-2. Üniteler	2x210	123	6 570 000	39,14	12905	2 X 1293000	9689	440,1	95	80
Kemerköy Termik Santralı 1-2-3. Üniteler	3x210	134	9 195 000	48	17781	3 X 778560	12557	611	95	80
Kangal Termik Santralı 3. Ünite	1x157	223	2 270 000	20,4	3710	1 X 655700	19548	954	95	80
Orhaneli Termik Santralı 1. Ünite	1x210	206	2 785 000	11,9	5350	1 X 940000	9700	485	95	50
Çayırhan Termik Santralı 1-2. Üniteler	2x150	132		35,89	19130	2 X 601000 (Islak)	17580 (Islak)	800 (Islak)	95	-
Çayırhan Termik Santralı 3-4. Üniteler	2x160	180		45	8660	2 X 594568	24170	899	95	-
Afşin Elbistan B Termik Santralı 1-2-3-4. Üniteler	4x360	91	11 100 000	96	21420	4 X 1428600	9650	482	95	80

2005 YILI GENEL ENERJİ DENGESİ (PJ) - ETKB SENARYOSU

[illegible]

2010 YILI GENEL ENERJİ DENGESİ (PJ) - ETKB SENARYOSU

[illegible]

2015 YILI GENEL ENERJİ DENGESİ (PJ) - ETKB SENARYOSU

[illegible]

2025 YILI GENEL ENERJİ DENGESİ (PJ) - ETKB SENARYOSU

[illegible]

2005 YILI GENEL ENERJİ DENGESİ (PJ) - FEC1 SENARYOSU

[illegible]

2010 YILI GENEL ENERJİ DENGESİ (PJ) -FEC1 SENARYOSU

[illegible]

2015 YILI GENEL ENERJİ DENGESİ (PJ) - FEC1 SENARYOSU

[illegible]

2020 YILI GENEL ENERJİ DENGESİ (PJ) - FEC1 SENARYOSU

[illegible]

2025 YILI GENEL ENERJİ DENGESİ (PJ) - FEC1 SENARYOSU

[illegible]

2030 YILI GENEL ENERJİ DENGESİ (PJ) - FEC1 SENARYOSU

[illegible]

2020 YILI GENEL ENERJİ DENGESİ (PJ) - FEC2 SENARYOSU

[illegible]

ÖZGEÇMİŞ

1976 yılında Karacabey'de doğdu. İlköğrenimini İsmetpaşa Köyü'nde, ortaöğrenimini Karacabey'de, lise öğrenimini Bursa'da tamamladı. 1996 yılında Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1997 yılında Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'ne Araştırma Görevlisi oldu. 1999 yılında Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek Lisansını tamamladı. Aynı yıl Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora programını kazandı ve bu kuruma 35. maddeyle görevlendirildi. Halen aynı kurumda Araştırma Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.