

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE’DE ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN ENERJİ
KAYNAK ALTERNATİFLERİNİN ETKİNLİĞİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Tamer ÖZYİĞİT**

Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

NİSAN 2007

**TÜRKİYE’DE ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN ENERJİ
KAYNAK ALTERNATİFLERİNİN ETKİNLİĞİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Tamer ÖZYİĞİT
507012019**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Nisan 2007**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. M. Nahit SERARSLAN

Eş Danışman: Prof.Dr. E. Ertuğrul KARSAK

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ahmet Fahri ÖZOK (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Cengiz KAHRAMAN (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Ethem TOLGA (G.S.Ü.)

Prof.Dr. Ziya ULUKAN (G.S.Ü.)

Prof.Dr. Alpaslan FIĞLALI (KO.Ü.)

NİSAN 2007

ÖNSÖZ

Performans analizlerinin temelde iki amacı vardır. Bunların birincisi kişi ya da kuruluşların yaptıkları işlerde ne kadar başarılı olduklarının anlaşılması, diğeri ise birçok alternatif arasından seçim yapmaktır. En basitinden en karmaşığına kadar performans analizleri, herhangi bir karar almadan önce yapılması zorunlu bir iştir. Alınması gereken karar, bir ülkenin enerji politikalarının belirlenmesi kadar önemli ve karmaşık, bir müşterinin mağazadan giysi seçmesi kadar basit olabilir. Her iki durumda da kararı etkileyecek ölçütlerin belirlenmesi ve bu ölçütlere dayanarak bir değerlendirme yapılması gerekmektedir. Alınacak kararların önemi, sistemlerin karmaşıklığı ve belirsizliği arttıkça performans değerlendirme daha zor hale gelmekte ve karar destek yöntemlerinden yararlanma ihtiyacı doğmaktadır. Veri zarflama analizi, karar vericilere objektif değerlendirmeler yapma olanağının yanında, bulanık kümeler teorisinden yararlanarak, belirsiz durumları analiz etme imkanı da sunmasıyla değerini kanıtlamış bir performans analizi yöntemidir. Bu tezde, bulanık veri zarflama analizi ile enerji kaynak alternatiflerinin etkinliği belirlenerek, ülkemizin, enerji politikalarının belirlenmesi gibi sosyo-ekonomik alandaki en önemli kararlarından biri için bilgi sağlanması amaçlanmıştır.

Doktora süresince benden hiçbir yardımını esirgemeyen değerli hocalarım ve tez eş-danışmanlarım Prof. Dr. M. Nahit SERARSLAN ve Prof. Dr. E. Ertuğrul KARSAK'a, sevgili meslektaş ve arkadaşlarım Ar. Gör. Hakan AKYÜZ ve Ar. Gör. Mehtap DURSUN'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Tamer Özyiğit

11 Mayıs 2006

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. PERFORMANS ANALİZİ YÖNTEMLERİ VE TEMEL ETKİNLİK KAVRAMLARI	4
2.1. Temel Performans Analizi Yöntemleri	4
2.1.1. Oran Analizleri	5
2.1.2. Regresyon Analizi	5
2.1.3. Veri Zarflama Analizi	6
2.2. Tanım ve Kavramlar	7
2.2.1. Üretim Teknolojisi	7
2.2.2. Üretim Fonksiyonu	8
2.2.3. Eş Ürün Eğrisi (Isoquant)	8
2.2.4. Açısal (Radial) ve Açısal Olmayan (Non-Radial) Etkinlik Ölçüleri	9
2.2.5. Ölçeğe Göre Getiriler (Returns to Scale)	10
2.3. Etkinlik Tanımları	12
3. VERİ ZARFLAMA ANALİZİ	14
3.1. Veri Zarflama Analizine Grafik Yaklaşım	15
3.2. Doğrusal Programlama Formülasyonu	17
3.3. BCC Formülasyonu	19
3.4. Diğer Veri Zarflama Analizi Formülasyonları	20
4. BELİRSİZLİK ORTAMINDA KARAR VERME	22
4.1. Bulanık Kümeler Teorisi	22
4.2. Bulanık Doğrusal Programlama	27
4.2.1. Zimmermann Modeli	28
4.2.2. Carlsson-Korhonen Modeli	29
4.3. Belirsiz Ortamda Veri Zarflama Analizi	31
4.3.1. Revize Edilmiş Veri Zarflama Analizi (RVZA)	31
4.3.2. Belirsiz Veri Zarflama Analizi	33
5. BULANIK VERİ ZARFLAMA ANALİZİ FORMÜLASYONLARI	37
5.1. Sengupta'nın Bulanık Veri Zarflama Analizi Modeli	40
5.2. Kahraman ve Diğerlerinin Bulanık Veri Zarflama Analizi Yöntemi	41
5.2.1. Kullanılan Formülasyon	42
5.3. VZA'da Bulanık Etkinlik Değerleri	43

5.3.1. Kullanılan Model	43
5.3.2. Bulanık Model	44
5.4. Bulanık VZA: Algısal bir değerlendirme yöntemi	45
5.4.1. CCR Temelli Bulanık Veri Zarflama Formülasyonu	46
5.4.2. Bir Bulanık Sayının Enbüyüklenmesi	47
5.4.3. Bulanık Eşitsizlik	47
5.4.4. Bulanık Eşitlik	48
5.4.5. Doğrusal Model	49
5.5. Saati ve Diğerlerinin Bulanık Etkinlik Analizi	50
5.5.1. Kullanılan Formülasyon	51
5.6. VZA ile Etkinlik Değerlendirmeye Bulanık Matematik Programlama Yaklaşımı	53
5.6.1. LR-Bulanık Sayılar	53
5.6.2. LR-Bulanık Sayıların Doğrusal Kombinasyonu	53
5.6.3. Bulanık Büyüklüklerin Karşılaştırılması	54
5.6.4. BCC Temelli Bulanık VZA Modeli	55
5.6.5. Özel Durum: Üçgen Bulanık Veriler	58
5.7. Bulanık VZA: Bir Olabilirlik Yaklaşımı	58
5.7.1. Bulanık CCR Modeli (FCCR)	59
5.7.2. Olabilirlik Temelli VZA Modeli	59
6. DUAL BULANIK VERİ ZARFLAMA ANALİZİ	61
6.1. Dual Bulanık Veri Zarflama Analizi Modeli	63
6.2. Bulanık Girdi ve Çıktılar	63
6.3. Bulanık Etkinlik Alanı	65
6.4. Dual Bulanık Veri Zarflama Analizi Formülasyonu	67
6.5. Örnek Uygulama	72
7. TÜRKİYE'DE ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN ENERJİ KAYNAK ALTERNATİFLERİNİN ETKİNLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	76
7.1. Elektrik Üretiminde Kullanılan Enerji Kaynakları	77
7.1.1. Fosil Yakıtlar	77
7.1.2. Nükleer Enerji	78
7.1.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları	79
7.1.3.1. Hidrolik Enerji	79
7.1.3.2. Rüzgar Enerjisi	81
7.1.3.3. Güneş Enerjisi	82
7.1.3.4. Biyokütle Enerjisi	84
7.2. Türkiye'deki Durum	85
7.3. Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesinde Kullanılan Ölçütler	89
7.3.1. İndirgenmiş Maliyet	90
7.3.2. CO ₂ Salınımı	90
7.3.3. SO ₂ Salınımı	90

7.3.4. NO _x Salınımı	91
7.3.5. Sürdürülebilirlik	91
7.3.6. Güvenilirlik	91
7.3.7. Uyumluluk	92
7.3.8. Bulanık Çıktıların Üyelik Fonksiyonları	92
7.4. Sonuçlar	94
7.4.1. Kao ve Liu'nun Formülasyonu Sonuçları	95
7.4.2. Saati ve Diğerlerinin Formülasyonu Sonuçları	97
7.4.3. Olabilirlik Yaklaşımı Sonuçları	98
7.4.4. Dual Bulanık Veri Zarflama Analizi Formülasyonu	99
7.5. Sonuçların Değerlendirilmesi	101
8. SONUÇLAR	104
8.1. Kullanılan Yöntemlerin Değerlendirilmesi	105
8.2. Uygulama Sonuçlarının Değerlendirilmesi	108
8.3. Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler	113
KAYNAKLAR	114
EK A: Dual Bulanık VZA (DBVZA) GAMS Kodu	119
EK B: DBVZA Formülasyonun j_0 karar birimi ve “α” seviyesi için sayısal değerlerle ifadesi	123
ÖZGEÇMİŞ	125

KISALTMALAR

VZA	: Veri Zarflama Analizi
KB	: Karar Birimi
CCR	: Charnes, Cooper ve Rhodes
BCC	: Banker, Charnes ve Cooper
BCCR	: Bulanık CCR
DBVZA	: Dual Bulanık Veri Zarflama Analizi
RVZA	: Revize Edilmiş Veri Zarflama Analizi
BVZA	: Belirsiz Veri Zarflama Analizi
ÖSG	: Ölçeğe Göre Sabit Getiri
ÖDG	: Ölçeğe Göre Değişken Getiri
TMMOB	: Türkiye Mimar ve Mühendis Odaları Birliği
EMO	: Elektrik Mühendisleri Odası
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EİEİ	: Elektrik İşleri Etüd İdaresi
DSİ	: Devlet Su İşleri
CO₂	: Karbon dioksit
SO₂	: Kükürt dioksit
NO_x	: Azot oksit
kWs	: Kilowatt saat
GWs	: Gigawatt saat
MWs	: Megawatt saat
lb	: Pounds (1 lb = 0,4536 kg)
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı)
DEA	: Data Envelopment Analysis (Veri Zarflama Analizi)
DMU	: Decision Making Unit (Karar Birimi)
FCCR	: Fuzzy CCR (Bulanık CCR)
IDEA	: Imprecise DEA (Belirsiz VZA)
DFDEA	: Dual Fuzzy Data Envelopment Analysis (Dual Bulanık VZA)
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
GAMS	: General Algebraic Modeling System

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 6.1 Örnek uygulama için girdi ve çıktı değerleri.....	73
Tablo 6.2 Saati ve diğerleri formülasyonu ile örnek uygulama sonuçları.....	73
Tablo 6.2 DBVZA formülasyonu ile örnek uygulama sonuçları	74
Tablo 7.1 Bulanık çıktılar için uzman görüşleri.....	93
Tablo 7.2 Bulanık çıktıların değerleri.....	93
Tablo 7.3 Enerji alternatiflerinin girdi değerleri.....	94
Tablo 7.4 Kao ve Liu'nun formülasyonu etkinlik değerlerinin alt ve üst sınırları.....	95
Tablo 7.5 Enerji kaynaklarının sıralama değerleri.....	96
Tablo 7.6 Saati ve diğ. formülasyonu ile ulaşılan etkinlik değerleri.....	97
Tablo 7.7 Olabilirlik yaklaşımı ile elde edilen etkinlik değerleri.....	98
Tablo 7.8 DBVZA ile ulaşılan etkinlik değerleri.....	100

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Örnek regresyon analizi grafiği.....	6
Şekil 2.2 : y^0 seviyesinde eş ürün eğrisi.....	9
Şekil 2.3 : CCR Modeli için etkinlik sınırı.....	11
Şekil 2.4 : BCC Modeli için etkinlik sınırı.....	11
Şekil 3.1 : Veri Zarflama Analizine grafik yaklaşım.....	15
Şekil 5.1 : Simetrik üçgen bulanık girdi ve çıktı.....	46
Şekil 5.2 : Bir simetrik üçgen bulanık sayının enbüyüklenmesi.....	47
Şekil 5.3 : Simetrik üçgen bulanık sayıların eşitsizliği.....	48
Şekil 5.4 : Bir simetrik üçgen bulanık sayının $\tilde{1}$ 'e eşitlenmesi.....	49
Şekil 5.5 : LR-Bulanık sayısı.....	53
Şekil 5.6 : Trapezoidal bulanık sayının üyelik fonksiyonu.....	59
Şekil 6.1 : Üçgen ve trapezoidal bulanık girdi ve α -kesmeleri.....	64
Şekil 6.2 : Bulanık etkinlik alanı.....	65
Şekil 6.3 : DBVZA ile örnek uygulama sonuçlarının grafiği.....	74
Şekil 7.1 : Hidroelektrik santral şeması.....	80
Şekil 7.2 : Rüzgar türbini.....	81
Şekil 7.3 : Fotovoltaik sistem.....	83
Şekil 7.4 : PV Enerji maliyeti.....	84
Şekil 7.5 : Türkiye rüzgar atlası.....	87
Şekil 7.6 : Türkiye'nin 2002 kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı....	88
Şekil 7.7 : 2000 yılı dünya elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı...	89
Şekil 7.8 : Bulanık çıktılar için sözel ifadelerin üyelik fonksiyonları.....	92
Şekil 7.9 : Saati ve diğ. etkinlik değerleri grafik gösterimi.....	97
Şekil 7.10 : Olabilirlik yaklaşımı ile ulaşılan etkinlik değerleri.....	99
Şekil 7.11 : DBVZA ile ulaşılan etkinlik değerleri.....	100

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{x}, \mathbf{y}$	: Sırasıyla girdi ve çıktı vektörleri
$L(y)$	: Etkin alt küme
$IsoqL(y)$	: Eş ürün eğrisi
$EffL(y)$	: Etkin alt küme
$\mathbf{y}^0$	: $\mathbf{y}^0$ çıktı seviyesi
TE	: Teknik etkinlik değeri
h_0	: Etkinliği ölçülen karar biriminin (KB_0) etkinlik değerini
Z_0	: Dual formülasyonda etkinlik değeri
θ	: Dual formülasyonda etkinlik değeri
y_{rj}, x_{ij}	: j 'inci karar biriminin r 'inci çıktısı ve i 'inci girdisi
$\tilde{y}_{rj}, \tilde{x}_{ij}$	: j 'inci karar biriminin r 'inci bulanık çıktısı ve i 'inci bulanık girdisi
u_r, v_i	: sırasıyla r 'inci çıktının ve i 'inci girdinin ağırlıkları
n	: Karar birimi sayısı
t	: Çıktı sayısı
m	: Girdi sayısı
λ_j	: j 'inci karar biriminin çözümdeki ağırlığı
$\tilde{A}$	: A bulanık kümesi
$\mu_{\tilde{A}}(x)$	: A bulanık kümesinin üyelik fonksiyonu
x^L, x^M, x^R	: Üçgen bulanık sayının sol sınırı, en olabilir değeri, sağ sınırı
ε	: Yeterince küçük pozitif bir sayı
CARD	: Sayısal veriler kümesi
ORD	: Sıra sayılı veriler kümesi
BORN	: Sınırlı veriler kümesi
α	: Alfa
$\prec$	: Yaklaşık olarak küçük veya eşit
$\succ$	: Yaklaşık olarak büyük veya eşit
$\tilde{A}_\alpha$	: Bulanık kümenin α -kesmesi
$(E)_\alpha^L, (E)_\alpha^U$	: Etkinlik değerinin alt ve üst sınırları
c_l, c_u	: Amaç fonksiyonun için alt ve üst sınırlar
p_i, p_o	: Girdiler ve çıktılar kısıtlarının aşılma sınırı
I_j	: Chen ve Klein yöntemine göre sıralama değeri
$\phi(y_{rj}), \phi(x_{ij})$	: y_{rj} ve x_{ij} 'nin normalize edilmiş değerleri
β, α_0, α	: Sırasıyla ilk, ikinci ve diğer kısıtların olabilirliği
$\hat{y}_{rj}, \hat{x}_{ij}$	: α -kesmeleri içinde tanımlanan çıktı ve girdi değişkenleri
R_+	: Pozitif gerçekte sayılar kümesi

TÜRKİYE’DE ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN ENERJİ KAYNAK ALTERNATİFLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

21. yüzyılın başlarında, dünyadaki enerji tüketimi geçen yüzyıla göre çok daha hızlı bir şekilde artmaktadır. Bugün enerji, ekonomik ve endüstriyel kalkınmanın en önemli girdisi haline gelmiştir. Özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için elektrik santrallerinde kullanılacak enerji kaynaklarının seçimi büyük bir stratejik önem arz etmektedir. Birçok ülkede olduğu gibi Türkiye’de de elektrik üretimi büyük ölçüde fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar, fosil yakıtların kısıtlı ömürleri ve olumsuz çevresel etkileri tüm ülkelerde olduğu gibi gelişmekte olan ülkelerde de enerji politikalarının gözden geçirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Birçok enerji kaynağının elektrik üretimindeki etkinliği ülkeden ülkeye değişen coğrafi ve çevresel faktörlerin etkisi altındadır. Bu yüzden her ülke, kendisine özgü arz-talep dengesi, enerji alanında dışa bağımlılık, çevresel faktörler, nüfus değişimleri gibi koşullarını göz önüne alarak bir enerji politikası belirlemek durumundadır.

Türkiye, petrol ve doğalgaz gibi konvansiyonel enerji kaynakları açısından fakir ve bu kaynakların büyük bölümünü dışarıdan ithal eden bir ülkedir. Gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye, dünyada en hızlı büyüyen enerji pazarlarından biridir. OECD ülkeleri arasında enerji üretimi payı 1995’te %2 olan Türkiye’nin, 2020 yılında bu payını %7’ye çıkararak OECD ülkeleri arasında önemli bir ekonomik güç olacağı tahmin edilmektedir. Ancak bu büyümenin gerçekleşmesi doğru enerji politikaları ve etkin enerji kaynaklarının kullanımına bağlıdır.

Değişik enerji kaynakları arasında seçim yapmak, bu kaynakların elektrik üretimindeki etkinliğinin belirsiz ve uzman görüşü gerektiren ölçütlere bağlı olmasından dolayı oldukça güç bir iştir. Sürdürülebilirlik, güvenilirlik, uyumluluk gibi ölçütler sayısal olarak ifade edilemediğinden ancak sözel ifadelerin bulanık kümelerden yararlanılarak sayısallaştırılmasıyla analize dahil edilebilir. Dolayısıyla enerji alternatiflerinin etkinliklerinin ölçülmesi için bulanık girdi ve çıktı değerlerinin analizde

kullanılabilmesine imkan tanıyan performans ölçüm tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tezde, enerji alternatiflerinin etkinliklerinin değerlendirilmesi için bulanık veri zarflama analizi (bulanık VZA) kullanılmıştır. Türkiye’de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatifleri olarak petrol, kömür, doğalgaz gibi fosil yakıtlar ve nükleer gücün yanında hidrolik enerji, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve biyokütle enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları analizde yer almıştır. Kullanılan performans ölçütleri girdi olarak, indirgenmiş maliyet, CO₂, SO₂ ve NO_x salınımlarıdır. Sürdürülebilirlik, uyumluluk ve güvenilirlik çıktıları için uzman görüşlerine başvurulmuş ve sözel olarak ifade edilen bu çıktılar analize bulanık sayılar olarak dahil edilmiştir. Elektrik santrallerindeki elektrik üretiminin kW’s başına toplam maliyeti olan indirgenmiş maliyet girdisi de, bu ölçütün kullanılan teknoloji ve diğer birçok etkene bağlı olarak değişiklik gösterebileceği göz önüne alınarak, bulanık bir girdi olarak analizde yer almıştır.

Tezin giriş bölümünden sonra, 2. Bölüm’de performans analizlerinde kullanılan başlıca yöntemler ve temel etkinlik kavramları anlatılmaktadır. 3. Bölüm’de, Charnes ve diğerleri tarafından geliştirilen ve CCR formülasyonu olarak adlandırılan klasik veri zarflama analizi (VZA) yöntemi incelenmiştir. CCR formülasyonunun literatürde rastlanan varyasyonları da 3. Bölüm’de yer almaktadır. 4. Bölüm’de belirsizlik ortamında karar verme, bulanık matematiksel programlama yöntemleri ve belirsiz VZA formülasyonları incelenmiştir. Literatürdeki Belli başlı bulanık VZA formülasyonları 5. Bölüm’de sıralanmıştır. 6. Bölüm’de, alternatif bir bulanık VZA yöntemi olan dual bulanık VZA (DBVZA) önerilmektedir. 7. Bölüm’de, Türkiye’de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatiflerinin etkinliği, 5. Bölüm’de incelenen bulanık VZA formülasyonlarının üçü ve 6. Bölüm’de önerilen Dual Bulanık VZA (DBVZA) formülasyonları ile ölçülmüştür. Yapılan etkinlik analizlerinin sonuçları birbirleriyle uyumludur. 8. Bölüm ise sonuç bölümüdür. Analizler sonucu enerji kaynakları, elektrik üretimindeki etkinliklerine göre aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır: Rüzgar, doğalgaz, hidrolik enerji, biyokütle, kömür, petrol, güneş ve nükleer enerji.

Güneş enerjisi ve nükleer güç, Saati ve diğerleri, Lertworasirikul ve diğerleri tarafından geliştirilen bulanık VZA formülasyonları ve DBVZA ile yapılan değerlendirmelerde α -kesmelerine göre 7. veya 8. sırada yer almaktadır. Kao ve Liu tarafından geliştirilen formülasyondan elde edilen sonuçlarının Chen ve Klein tarafından önerilen yöntem ile sıralanmasında güneş enerjisi 7., nükleer enerji ise son sırada yer almaktadır.

Türkiye fosil enerji kaynakları açısından fakir ve dışa bağımlı olmasına rağmen, yenilebilir enerji kaynakları açısından son derece şanslı bir konumdadır. Bu potansiyelin etkin bir biçimde değerlendirilmesi ile Türkiye uzun vadede enerji ihraç eden ve sürdürülebilir bir enerji politikası uygulayan bir ülke konumuna gelebilir. Ancak bunun gerçekleşmesi için rüzgar, hidrolik ve biyokütle gibi yeni ve yenilebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların artırılması gerekmektedir. Ayrıca bu yeni enerji kaynaklarına yönelinirken kısa ve orta vadede doğalgaz gibi görece olarak ucuz ve temiz, kömür gibi ülkemizde bol bulunan kaynakların da önemi göz ardı edilmemelidir.

Dikkat edilmesi gereken konu, enerji alternatiflerinin etkinlik değerlerinin mevcut veriler ve uzmanların görüşleriyle elde edilmiş sonuçlar olduğudur. Gelişen teknolojiler, değişen ekonomik konjonktürler ve değişik uzmanlardan alınan görüşler farklı sonuçlara ulaşılmasına yol açabilir.

Uygulama sonuçlarından, enerji kaynakları gibi bulanık ölçütlerle değerlendirilen karar birimlerinin etkinliklerinin ölçülmesi için bulanık kümeler teorisinden yararlanılan bulanık VZA formülasyonlarının, karar birimlerinin etkinliklerine göre sıralanması için uygun olduğu gözlemlenmiştir. Tezde önerilen DBVZA formülasyonundan elde edilen sonuçların da gerek diğer formülasyonların sonuçlarıyla uyumluluğu, gerekse karar birimlerinin etkinliklerine göre sıralanmasının kolaylığı açısından kullanışlı bir yöntem olduğu görülmüştür.

EVALUATING THE EFFICIENCIES OF ENERGY RESOURCE ALTERNATIVES FOR ELECTRICITY GENERATION IN TURKEY

SUMMARY

With the beginning of 21st century, the consumption of energy all over the world is increasing far more rapidly than in the last century. Today, energy is the most important basic input for economical and industrial development. Especially for developing countries like Turkey, alternative energy resources for power plants have a very high strategic importance.

In Turkey, like in many other countries, the generation of electric power is based on fossil fuels. The volatility of oil prices, the exhaustibility of fossil fuels and environmental issues force developing industries to revise their alternatives for electricity generation. Now, it is time to give more attention to stable, reliable and non-polluting energy resources.

Most forms of alternative energy resources are dependent on geographical and environmental factors which vary from country to country. Every country has to determine its energy policy considering its specific conditions like demand and supply equilibrium, dependency on other countries, geographical conditions, variations of population, etc.

Turkey is a country that lacks sufficient conventional energy resources and imports oil and natural gas from other countries. As an emerging country, Turkey has been one of the fastest growing energy markets in the world. Turkey's share in total OECD production is expected to increase from 2% in 1995 to 7% in 2020s, making Turkey a significant economic power within the OECD countries. But this will be possible only with a proper energy policy and efficient selection of alternative energy resources.

Selecting among multiple resource alternatives is a very difficult task as the factors which affect the efficiency of energy resources are very imprecise and require expert knowledge. The criteria, such as sustainability, security etc. are defined in linguistic form as it is impossible to quantify them. As a result, some of the decision criteria have to be introduced into the analysis as fuzzy data. The performance assessment

methods which enable us to use fuzzy inputs and outputs are suitable for the valuation of energy alternatives.

In this thesis, our goal is to rank potentially viable electricity resources for Turkey. Eight potential energy resources are included in analysis: oil, coal, natural gas, hydropower, nuclear power, wind power, solar power and biomass power. The criteria for measuring the effectiveness of energy resources are levelized costs, CO₂ emissions, SO₂ emissions, NO_x emissions. These are cost criteria considered as inputs in the analysis. The outputs are sustainability, reliability and compatibility.

The thesis is organized as follows: After the introduction, performance analysis methods and basic concepts of technical efficiency are introduced in Chapter 2. In Chapter 3, the classical data envelopment analysis (DEA) model (CCR model) developed by Charnes et al. and some variations of CCR model are given. Chapter 4 is concerned with decision making in imprecise environment. Chapter 5 is a literature survey of fuzzy DEA formulations. The suggested fuzzy DEA method (Dual Fuzzy DEA – DFDEA) to perform efficiency analysis with fuzzy data is presented in Chapter 6. In Chapter 7, the efficiencies of alternative energy resources are measured with three fuzzy DEA formulations and the DFDEA method proposed in section 6. Chapter 8 is the conclusion. The results and the ranking of energy alternatives by their efficiency scores obtained from different fuzzy DEA formulations are in accordance with each other. The ranking is given below: Wind, natural gas, hydropower, biomass, coal, oil, solar and nuclear energy.

According the results of Saati et al., Lertworasirikul et al. and the DFDEA formulations, solar energy and nuclear power are in 7th or 8th places by α or possibility levels. After the Chen and Klein ranking of the Kao and Liu formulation results, solar energy is in 7th, and nuclear power is in the last place of ranking.

Turkey has an important resource potential of renewable energy and with an efficient use of these resources, it can be a country which exports electricity to other countries. However, in order to achieve this goal, governments should increase the investments on new and renewable technologies like wind turbines, small hydropower plants and biomass energy plants. On the other hand, coal and natural gas will remain important not to face energy crisis in the short and medium term.

The rankings of energy alternatives are obtained using current data and expert opinions. Different results can be obtained by different expert opinions, new technologies and changing economical conjunctures.

The results of the analysis reported in Chapter 7 have shown that fuzzy DEA formulations are very useful for measuring the efficiencies of decision making units (DMUs) with fuzzy performance criteria. DFDEA is an alternative fuzzy DEA formulation and we observed that it is suitable for performance analysis of DMUs that use fuzzy inputs to produce fuzzy outputs. As can be seen in Chapter 7, since there are not many DMUs on the efficient frontier in all alpha levels, it is easy to rank DMUs by their efficiency scores. Unlike the majority of other fuzzy DEA formulations, dual fuzzy DEA permits the decision makers and researchers to take into account the entire alpha cut interval instead of only the boundary points.

1. GİRİŞ

21. yüzyılın başlarında enerji, özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için ekonomik kalkınmanın en önemli girdilerinden biri haline gelmiştir. Günümüzde dünyada enerjiye olan talep her geçen gün artmakta ve gelişmekte olan ülkelere bu artış çok daha hızlı gerçekleşmektedir. Diğer taraftan dünya enerji talebini karşılayan fosil yakıtlar gün geçtikçe tükenmekte ve bunların yanma ürünleri de çevremiz ve gezegenimizdeki hayat için büyük tehlike arz eden sera etkisi, ozon tabakasında delinme ve kirlilik gibi küresel problemlere yol açmaktadır.

Türkiye, kişi başına düşen enerji tüketiminde dünya ve Avrupa ortalamalarının çok gerisindedir. Gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye'nin enerji ihtiyacının önümüzdeki 15-20 yıllık bir gelecekte çok büyük bir artış göstereceği mutlaklıdır. Ancak bu talebin karşılanması için bugün fosil yakıtlara dayalı ve dışa bağımlı olan enerji politikasının, çağın gereklerine uygun olarak ve ülkenin iç kaynaklarından maksimum düzeyde yararlanılmak suretiyle gözden geçirilmesi bir zorunluluktur. Türkiye'nin sosyo-ekonomik kalkınmasının devamı ve gelecekteki enerji darboğazlarının aşılması buna bağlıdır.

Her ülke gibi Türkiye için de, yeni, yenilenebilir ve çevreyle uyumlu enerji kaynaklarının kullanımının arttırılması için planlamalar yapılması ve kullanılacak enerji kaynak alternatiflerinin etkinliklerinin belirlenmesi kaçınılmaz bir ihtiyaçtır. Enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki etkinliklerinin tüm sosyal, ekonomik ve çevresel etkenler göz önüne alınarak belirlenmesi uzman bilgisi gerektiren bir iştir. Bu tezde, enerji kaynaklarının etkinliklerinin ölçülmesi için kullanılan sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve uyumluluk gibi ölçütlerin değerlerini belirlemek amacıyla Elektrik Mühendisleri Odası (EMO) uzmanlarının görüşlerinden yararlanılmıştır. Enerji kaynaklarının etkinliğini belirleyen ölçütler, kullanılan teknoloji, coğrafi konum, kaynaklara erişim kolaylığı gibi etkenler nedeniyle ülkeden ülkeye değişebilmektedir. Bu yüzden her ülke kendi enerji planlamasını yapmak durumundadır. Ayrıca sürdürülebilirlik, güvenilirlik gibi ölçütler, kesin sayılarla değil ancak sözel olarak ifade edilebildiklerinden ve maliyet girdisinin de teknoloji ve bölgesel farklılıklar nedeniyle belirsiz olmasından dolayı bu veriler etkinlik analizinde bulanık sayılar olarak yer almaktadır.

Bu tezde, Türkiye’de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatiflerinin etkinliklerinin değerlendirilmesinde bulanık veri zarflama analizi (bulanık VZA) kullanılmıştır. Analizde, petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtlarla beraber, nükleer enerji, güneş, rüzgar, hidrolik ve biyokütle gibi alternatif enerji kaynakları yer almıştır.

Charnes ve diğerleri [1] tarafından geliştirilen veri zarflama analizi, birçok girdi ve çıktıyı bir skaler etkinlik ölçütüne dönüştüren doğrusal programlama bazlı bir yöntemdir. Analizin temelinde birbirine benzer karar birimlerinin üretim etkinliklerinin değerlendirilmesi yatar. Analize konu olacak karar birimlerinin aynı hedefe yönelik benzer işlevleri görmesi, aynı pazar şartlarında çalışması ve gruptaki performansı ölçülecek bütün karar birimlerinin verimliliklerini nitelendiren etmenlerin, yoğunluk ve büyüklüklerdeki farklılıklar hariç aynı olması şartları aranır. Birden çok girdi ve çıktının kullanılabilmesinin yanı sıra, VZA’nın en büyük avantajı, etkinlik ölçümü sırasında girdi ve çıktılara verilecek ağırlıkların model tarafından, performansı ölçülen karar biriminin etkinliğini enbüyükleyecek şekilde belirlenmesi ve bu sayede karar vericilerin veya analizcilerin öznel görüşlerine ihtiyaç duyulmamasıdır.

VZA, performans ölçümünde son derece kullanışlı bir yöntem olmasına rağmen, modelin bazı sınırlamaları vardır. Bunların en önemlilerinden biri, VZA’nın, kullanılan verilere karşı çok hassas olmasıdır. Performans değerlerinin ölçümünde kullanılan etkinlik sınırları, verilerdeki hata ve belirsizliklerden çok etkilenir. Bu nedenle VZA ile doğru bir performans değerlendirmesi yapabilmek için eldeki verilerin kesin ve hatasız olması gerekir. Öte yandan kullanılmak istenen veriler sözel olarak ifade ediliyor olabilir (örneğin: “eski” donanım, “iyi” servis). Enerji kaynak alternatiflerinin etkinlik analizindeki sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve uyumluluk gibi ölçütler sözel olarak ifade edilmektedir.

Bulanık veriler kullanan VZA (Bulanık VZA), gerçek hayattaki durumları, klasik VZA’ya göre daha gerçekçi bir şekilde ifade eder. Aynı zamanda, bulanık kümeler teorisi, sözel olarak ifade edilen verilerin VZA’da direkt olarak kullanılmasına olanak tanır.

Bulanık veriler kullanılan VZA formülasyonlarında, model, olasılık seviyeleri ve α - kesmeleri gibi yaklaşımlardan yararlanarak doğrusallaştırılmaktadır. Modeldeki eşitlik ve eşitsizlikler ise Bulanık Kümeler Teorisinden yararlanılarak tanımlanmakta ve modelin doğrusal matematiksel programlama yöntemleri kullanılarak çözülmesine olanak sağlanmaktadır.

Bu tezde, enerji kaynak alternatifleri, literatürde rastlanan üç farklı bulanık VZA formülasyonu ve 6. Bölüm’de yeni bir bulanık VZA formülasyonu olarak önerilen dual bulanık VZA (DBVZA) ile değerlendirilmiştir. Yapılan uygulamaların sonuçları incelendiğinde tüm formülasyonların sonuçlarının birbirleriyle uyumlu ve enerji kaynaklarının etkinliklerine göre sıralamasının aynı olduğu görülmüştür. Buna göre rüzgar enerjisinin en etkin enerji kaynağı olduğu görülmüştür. Doğalgaz ikinci, hidrolik enerji üçüncü sıradadır. Biyokütle, kömür ve petrol, hidrolik enerjiden sonra gelmektedir. Etkinlik sıralamasının son iki sırasında ise güneş enerjisi ve nükleer enerji yer almaktadır.

Tezin 2. Bölüm’ünde temel performans analizi yöntemleri ve etkinlikle ilgili kavramlar anlatılmış, 3. Bölüm’de performans analizi yöntemlerinden VZA ayrıntılı olarak incelenmiştir. 4. Bölüm’de belirsizlik ortamında karar verme teknikleriyle, belirsiz verilerle VZA ile ilgili literatürde rastlanan iki formülasyon yer almaktadır. 5. Bölüm’de literatürdeki belli başlı bulanık VZA formülasyonları ve 6. Bölüm’de bu tezde öne sürülen yöntem olan DBVZA incelenmiştir. 7. Bölüm’deki uygulamalarda, Türkiye’de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatiflerinin etkinliği 5. Bölüm’de anlatılan üç farklı bulanık VZA formülasyonu ve 6. Bölüm’de önerilen DBVZA ile ölçülmüş ve sonuçlar tartışılmıştır. 8. Bölüm olan sonuç bölümünde, kullanılan yöntemler üzerinde düşünceler, uygulama sonuçlarının yorumlanması ve gelecek araştırmalar için önerilere yer verilmiştir.

2. PERFORMANS ANALİZİ YÖNTEMLERİ VE TEMEL ETKİNLİK KAVRAMLARI

Bu bölümde, ilk olarak performans analizi için kullanılan bazı temel yöntemler kısaca anlatılmaktadır. Söz konusu yöntemler, oran analizleri, regresyon analizi ve veri zarflama analizidir. Temel performans analizi yöntemleri kısaca sıralandıktan sonra üretim teknolojisi, üretim fonksiyonu ve etkinlik ile ilgili tanım ve kavramlara yer verilecektir.

2.1 Temel Performans Analizi Yöntemleri

Kar amacı güden veya gütmeyen bütün organizasyonlarda, performans değerlendirmesi ve bu değerlendirmeye göre karar alma, yöneticilerin en önemli görevlerinden biridir. Örneğin bir işletme için, çalışanlarının veya bir banka için, şubelerinin performansını değerlendirmek oldukça önemlidir. Performansı ölçülmek istenen bu tip birimlere “karar birimi” (KB) adı verilir. Sadece karar birimlerinin performansını değerlendirme değil, değişik alternatifler arasından seçim yapmak için de performans analizine gerek duyulmaktadır. Bu analiz sırasında yönetici ve karar vericilerin karşılaştığı en büyük sorun, karar birimlerinin performanslarının genellikle birden çok ölçüte bağlı olması ve bu ölçütlerin çok farklı ölçek ve birimlerde ifade edilmesidir. Ayrıca, söz konusu ölçütlerin değerlerinin sayısal olarak değil, sözel ifadelerle tanımlanması ve bazı durumlarda belirsiz ve yetersiz verilerle çalışılmak zorunda kalınması da karar sürecini zorlaştıran etkenlerdir.

Karar birimlerinin etkinliğinin ölçülmesi için, oran analizleri, parametrik ve parametrik olmayan metotlar kullanılmaktadır. Bunların arasında en çok kullanılanlardan biri parametrik yöntemlerden biri olan regresyon analizidir. VZA, matematiksel programlamayı kullanan ve parametrik olmayan bir performans değerlendirme yöntemidir.

2.1.1 Oran Analizleri

Oran analizleri performans ve etkinlik ölçümünde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Ancak karar birimlerinin girdi ve çıktıları birden fazlaysa oran analizleri kullanışlı değildir. Eğer söz konusu girdi ve çıktılar tek bir ölçüm birimine indirgenemiyorsa bu yöntemle performans analizi yapmak mümkün olmaz. Dolayısıyla analizde kullanılacak girdi ve çıktılar ayrı ayrı ele alınmak zorundadır. Bu da, analiz sonunda, yetersiz veya öznel sonuçlar elde edilmesine yol açabilir.

Özellikle finansal oran analizlerinde oldukça sık kullanılmasına rağmen, sadece bir girdi ve çıktının kullanıldığı bu yöntem genelde işletmelerin performansı hakkında sağlıklı bilgi vermez.

Oran analizlerinin en büyük avantajı, uygulanmasının son derece basit olmasıdır. Ayrıca elde edilen büyüklük tek bir girdinin tek bir çıktıya oranı olduğundan, yetersiz olmasına rağmen kolay anlaşılabilir ve değerlendirilebilir bir analiz sonucudur.

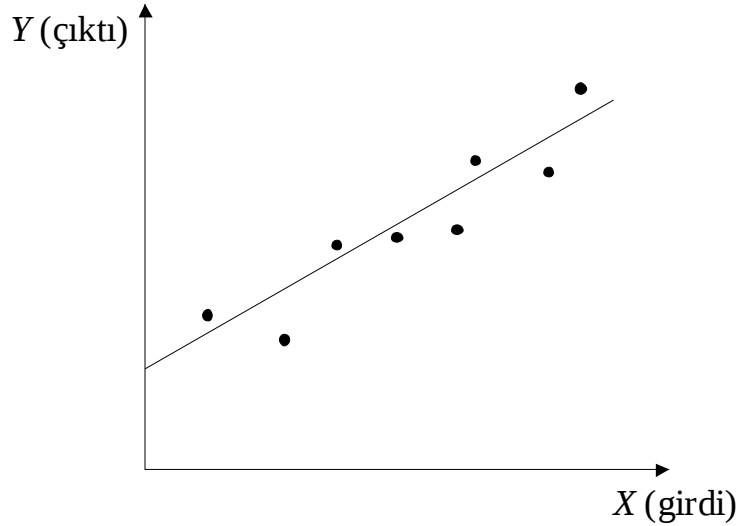
2.1.2 Regresyon Analizi

Regresyon analizi, oran analizinin bazı yetersizliklerine çözüm getirmektedir. Bu analizde, girdi ve çıktılar arasında analitik bir fonksiyon bulunmaya çalışılmaktadır. Bu şekilde, regresyon analizi, girdi değerlerine dayanarak, tek bir çıktı değeri hakkında karar vericiye bir fikir vermektedir. Regresyon analizinde elde edilen sonuçtan daha yüksek çıktı değerine sahip bir karar birimi etkin olarak tanımlanır.

Regresyon analizinin iki temel zayıf noktası vardır. Bunlardan ilki; analiz sadece bir tek çıktı değeri verdiği için, birden fazla çıktının mevcut olduğu durumlarda bu çıktıları tek bir çıktıya indirmek gerekmektedir. Eğer çıktıların birimleri değişirse bu indirgeme mümkün olmaz. Regresyon analizinin bir diğer zayıf noktası ise, performans kriteri olarak ortalama değeri kullanmasıdır. Herhangi bir karar biriminin performansı ölçülürken, en etkin karar birimine göre değil ortalamaya göre değerlendirme yapılmaktadır. Bunun sonucu olarak, sadece ortalamanın üzerinde performans gösteren karar birimleri etkin olarak kabul edilir.

Kısaca regresyon analizi, karar birimlerinin tek bir üretim fonksiyonuna sahip olduğunu varsaymaktadır. Ancak farklı karar birimleri girdilerin farklı bileşimlerinden yararlanarak değişik çıktı oranlarına sahip olabilir [2].

Şekil 2.1’de bir regresyon analizi grafiği verilmiştir.



Sekil 2.1 : Örnek regresyon analizi grafiği [2].

2.1.3 Veri Zarflama Analizi

Veri Zarflama Analizi (VZA), birden fazla girdi ve çıktının matematiksel programlama kullanılarak tek bir sayısal etkinlik değerine dönüştürüldüğü bir performans analizi yöntemidir. VZA aynı girdi ve aynı çıktıları kullanan karar birimlerinin etkinliklerinin ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Etkinliği ölçülen karar birimleri, birbirlerine benzer şartlarda, benzer pazarlarda ve benzer yöntemlerle çalışmalıdır. Doğal olarak, üretim için kullandıkları girdi ve çıktılar da, miktarları dışında aynı olmalıdır.

Etkinlik, basit olarak, çıktıların girdilere oranı olarak ifade edilir. Ancak, üretim yöntemleri karmaşıktıkça ve üretilen ürün miktarı arttıkça etkinlik, ağırlıklı çıktı toplamının, ağırlıklı çıktı toplamına oranı haline gelir. Girdi ve çıktı sayısı arttıkça ağırlıklı toplamların belirlenmesi oldukça güç bir hale gelmektedir. Veri Zarflama Analizin en büyük avantajı, girdi ve çıktı ağırlıklarının belirlenmesinde öznel ölçütlere ihtiyaç duyulmamasıdır. Charnes ve diğerleri [1] tarafından geliştirilen yöntemde, girdi ve çıktı ağırlıkları her bir karar birimi için, o karar biriminin etkinlik değerini enbüyükleyecek şekilde model tarafından belirlenmektedir. Ağırlıklar belir-

lenirken uyulması gereken kısıt ise, aynı ağırlıklarla, hiçbir karar biriminin etkinlik değerinin 1'i aşmamasıdır. Veri zarflama analizi hakkında detaylı bilgi ve literatür araştırması 3. Bölüm'de ele alınacaktır.

2.2 Tanım ve Kavramlar

Yönetim bilimleri literatüründe, verimlilik ve performans ölçümü geleneksel olarak organizasyonun bütününden çok bazı etkenler (girdi ve çıktı), yöntemler veya ekipmanlarla ilişkilendirilmektedir. Örneğin, ölçüm tekniklerinden biri toplam çıktının özel bir girdiye oranlanmasıdır (kısmi etken verimliliği). En çok karşılaşılan ölçüler işgücü verimliliği (çıkıtı / işgücü saati) ve sermaye verimliliğidir (sermayenin verim oranı (rate of return of capital)). Stainer'e [3] göre bu tip oranların en büyük sorunu dış etkenlerden etkilenebilmeleri ve etkin kaynak kullanımı ile ilişkilerinin olmamasıdır.

Üretim sistemleri ile ilgili araştırmalar, tüm önemli etkenleri bütün olarak değerlendiren yeni ölçülerin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu ölçüler organizasyonların teknik ve finansal performansları hakkında daha geniş bilgi vermektedirler. Farrell [4] tarafından ortaya atılan teknik etkinlik kavramı bunlardan biridir. Charnes ve diğerleri [1] Farrell'in [4] çalışmalarını geliştirerek karar birimlerinin göreceli etkinliklerini ölçmek için bir matematiksel programlama yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımın temel kavramları ve tanımları 3. Bölüm'de özetlenmiştir.

2.2.1 Üretim Teknolojisi

Üretim teknolojisi girdilerin $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in R_+^m$ çıktılarına $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_t) \in R_+^t$ dönüştürüldüğü $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ vektör çifti olarak tanımlanır. Färe ve diğerleri [5] üretim teknolojisi aşağıdaki şekilde tarif eder:

$L(\mathbf{y})$ bir çıktı kümesidir, öyle ki:

$$L(\mathbf{y}) = \{\mathbf{x} : (\mathbf{y}, \mathbf{x}) \text{ olurludur}\}, \quad (2.1)$$

$\forall \mathbf{y} \in R_+^t \exists$ eş ürün eğrisi $IsoqL(\mathbf{y})$ öyle ki:

$$IsoqL(y) = \{x : x \in L(y), \lambda x \notin L(y), \lambda \in [0,1)\}, \quad (2.2)$$

ve $EffL(y)$ etkin alt kümedir, öyle ki:

$$EffL(y) = \{x : x \in L(y), x' \notin L(y), x' \leq x\}^1 \quad (2.3)$$

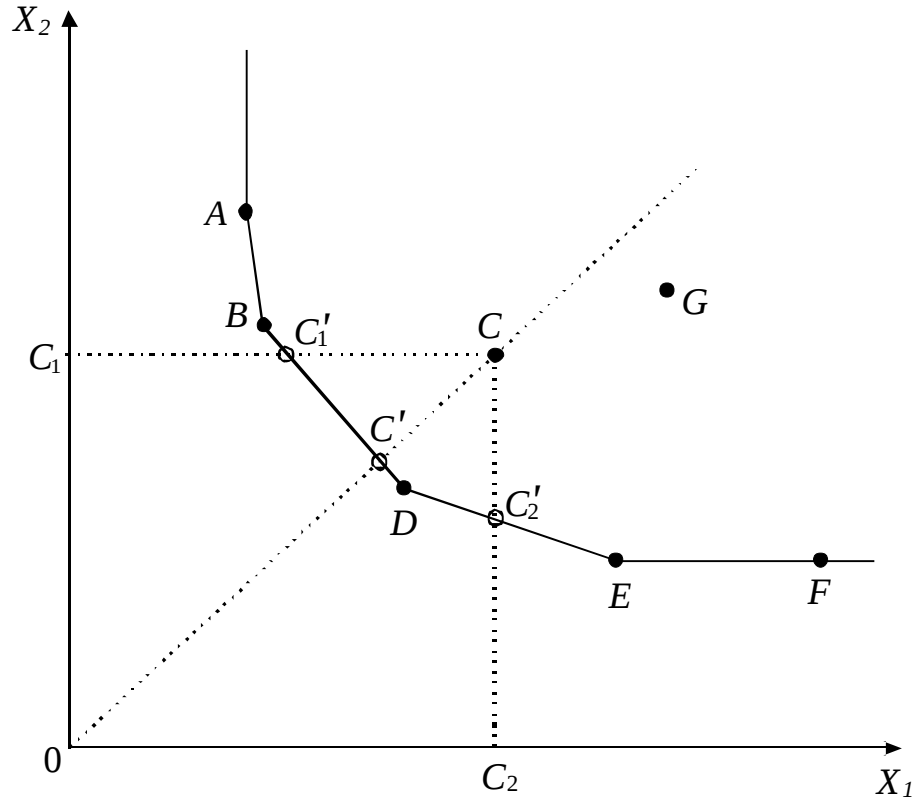
2.2.2 Üretim Fonksiyonu

Üretim fonksiyonu, üretim teknolojisinin girdileri ve çıktıları arasındaki ilişki olarak tanımlanır. Matematiksel olarak üretim fonksiyonu, çıktı miktarını (y), bu miktarı üretmek için kullanılan girdi miktarına (x) ilişkilendiren fonksiyondur. Teknik etkinlik kavramı (bkz. Bölüm 2.3), üretim fonksiyonu için tanımlanmıştır; her olurlu girdi kombinasyonu mümkün olan en çok çıktıyı üretmektedir veya her çıktı mümkün olan en az olurlu girdi kombinasyonu ile üretilmektedir. Örneğin x girdi vektörü ve y çıktı vektörü için üretim fonksiyonu $y = f(x)$ 'dir .

2.2.3 Eş Ürün Eğrisi (Isoquant)

Bir eş ürün eğrisi, sabit bir girdi veya çıktı seviyesinde bütün mümkün girdi-çıkıtı kombinasyonlarını temsil eden noktalar bölgesi olarak tanımlanır. Eş ürün eğrisinin her noktası tek bir üretim teknolojisini temsil etmektedir. Örneğin y^0 çıktı seviyesi için (girdi odaklı) bir eş ürün eğrisi, x girdi vektörünün eş ürün eğrisi $y^0 = g(x)$ olarak ifade edilir. Şekil 2.2'de y^0 çıktı seviyesi için eş ürün eğrisi gösterilmiştir. Burada A, B, C, D, E, F ve G firmaları, X_1 ve X_2 girdileri ile aynı y^0 çıktı seviyesinde üretim yapmaktadırlar. A, B, D, E ve F firmaları y^0 üretimini yapabilmek için mümkün olan en az girdiyi kullanmakta ve eş ürün eğrisini oluşturmaktadırlar. C ve G firmaları ise y^0 seviyesinde üretim yapmak için daha çok girdi kullanmakta oldukları için etkin değildirler.

¹ $x'_i \leq x_i, \forall i = 1, \dots, m$ ve $x'_i < x_i$, en az bir i için.



Şekil 2.2 : y^0 çıktı seviyesinde eş ürün eğrisi

2.2.4 Açısal (Radial) ve Açısal Olmayan (Non-radial) Etkinlik Ölçüleri

Eş ürün eğrisi karar birimlerinin standart karşılaştırılması açısından önemlidir. Bu kavram, Bölüm 2.3'te incelenecek olan göreceli etkinlik kavramının temelini oluşturur. Bir karar biriminin etkinliğinin ölçülmesinin iki yolu vardır: açısal ve açısal olmayan etkinlik ölçüleri.

Bu bölümde, Şekil 2.2'deki etkinsiz C firması üzerinde bu etkinlik ölçülerini inceleyeceğiz. C' , B ve D firmalarının konveks birleşiminden oluşan sanal bir firma olsun. Bu durumda C' eş ürün eğrisi üzerinde yer alır ve C firmasının açısal teknik etkinliği aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$TE_{\text{Radial}}(C) = \frac{OC'}{OC} \quad (2.4)$$

C firmasının etkin olması için C' firmasının girdi seviyelerinde üretim yapması gerekmektedir yani C , girdilerini açısal olarak C' firmasının seviyesine indirmek durumundadır. Diğer taraftan C firmasının her iki girdi seviyesini de düşürmesi

mümkün olmayabilir. Bu durumda açısal olmayan etkinlik ölçüsü daha uygundur. C firmasının X_1 ve X_2 girdileri için açısal olmayan etkinliği aşağıdaki şekilde hesaplanır.

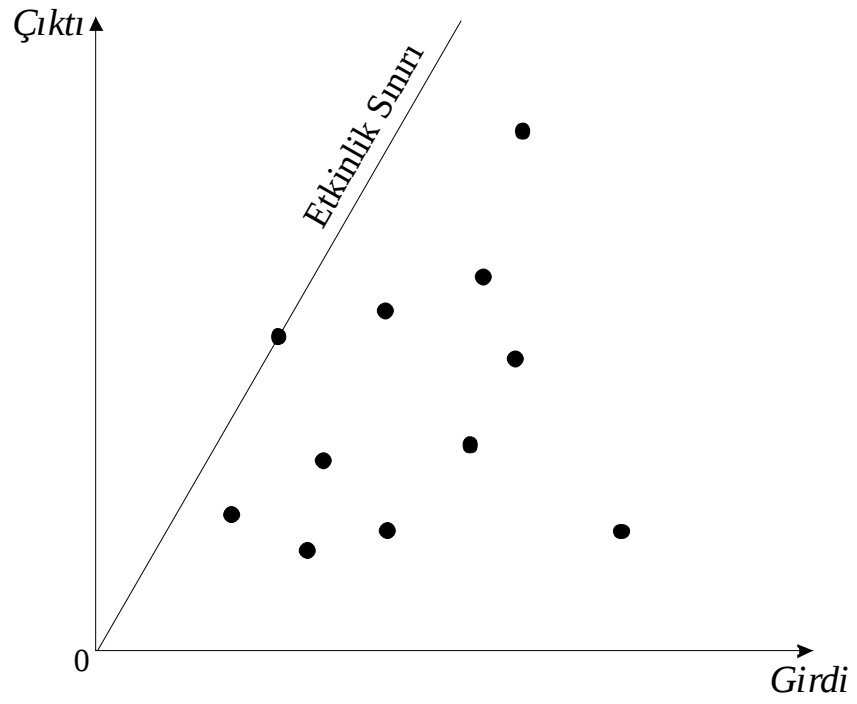
$$X_1 \text{ için: } TE_{\text{Non-Radial}}(C) = \frac{C_1 C'_1}{C_1 C} \quad (2.5)$$

$$X_2 \text{ için: } TE_{\text{Non-Radial}}(C) = \frac{C_2 C'_2}{C_2 C} \quad (2.6)$$

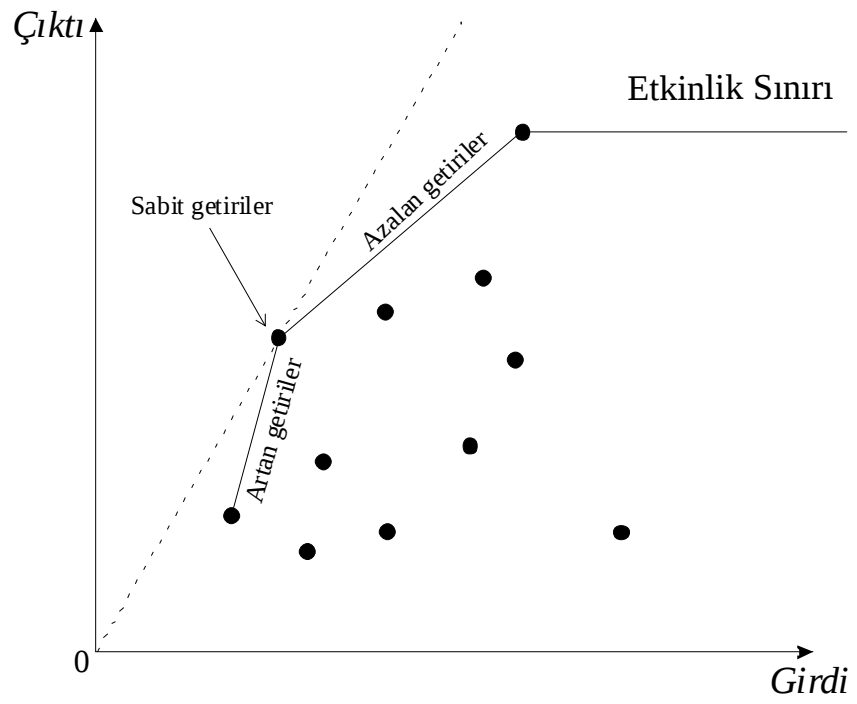
Açısal olmayan etkinlik ölçümünde, aynı çıktı seviyesi için diğer girdiler aynı kalmak şartıyla $ABDE$ etkin alt kümesine ulaşmak için X_1 veya X_2 girdileri ayrı ayrı ve değişik oranlarda azaltılır. Bu şekilde her girdi için değişik etkinlik değerleri elde edilir.

2.2.5 Ölçeğe Göre Getiriler (Returns to Scale)

Üretim teorisinde, girdi seviyelerindeki herhangi bir değişime bağlı çıktı seviyeleri değişimleri ölçeğe göre getiriler olarak adlandırılmaktadır. Ölçeğe göre getiriler değişken veya sabit olabilir. Ölçeğe göre sabit getiriler (ÖSG), girdi seviyelerindeki herhangi bir değişimin, çıktı seviyelerinde aynı oranda değişime yol açtığı durumdur. Ölçeğe değişken getiriler (ÖDG) ise girdi seviyelerindeki herhangi bir değişimin çıktı seviyelerinde değişik oranda değişimine yol açtığı durumdur. Ölçeğe göre değişken getiriler söz konusu olduğunda girdilerdeki herhangi bir artış, çıktı seviyelerinde mutlaka aynı oranda bir artışa yol açmaz. Çıktı seviyeleri, girdi artışından daha yüksek oranda (ölçeğe göre artan getiriler) veya daha düşük oranda (ölçeğe göre azalan getiriler) artabilir. Charnes ve diğerleri tarafından geliştirilen temel VZA modeli [1] (CCR Modeli) ölçeğe göre sabit getiriler öngörmektedir. Banker ve diğerleri [6] tarafından geliştirilen BCC modelinde ise ölçeğe göre değişken getiriler söz konusudur. Bu modeller 3. Bölüm'de ayrıntılı olarak incelenecektir. Şekil 2.3 ve 2.4'de bu iki modelin, tek girdi ve tek çıktı olduğu durumdaki etkinlik sınırları gösterilmiştir [7].



Şekil 2.3 : CCR Modeli için etkinlik sınırı (ölçeğe göre sabit getiriler)



Şekil 2.4 : BCC modeli için etkinlik sınırı (ölçeğe göre değişken getiriler)

2.3 Etkinlik Tanımları

Bundan önceki bölümlerde incelenen kavramlardan yola çıkarak teknik etkinliğin iki değişik tanımı yapılmaktadır. Bunlarda ilki Debreu [8] ve Farrell [4] tarafından yapılmış olan açısal (radial) etkinlik tanımıdır. Girdiye bağlı açısal teknik etkinlik ölçüsü, %100 etkinlikle, çıktı seviyesi değişmeden, tüm girdilerin, aynı oranda maksimum azaltılmasıyla elde edilen seviyesi arasındaki farktır. Bu fark sıfır (0) ise birim etkin, değilse etkinsizdir. Çıktıya bağlı açısal etkinlik ölçüsü ise, %100 etkinlikle, çıktıların, girdi seviyesi değişmeden maksimum arttırılmış seviyesi arasındaki farktır.

İkinci tanım ise Pareto – Koopmans etkinliği olarak da adlandırılan etkinlik tanımıdır. Bir firma sadece ve sadece, bir çıktısındaki herhangi bir artış, başka bir çıktısında düşüşe ya da herhangi bir girdisinde artışa yol açıyorsa etkindir. Girdiler açısından da Pareto- Koopmans etkinliği şu şekilde tanımlanabilir: Herhangi bir girdideki azalma, bir başka girdideki artışa veya bir çıktıda düşüşe yol açıyorsa firma etkindir [9].

İki tanım arasındaki fark Şekil 2.2 üzerinde incelenebilir. Debreu [8] ve Farrell [4], y^0 çıktı seviyesinde, eş ürün eğrisi üzerindeki tüm firmaları etkin kabul eder. Buna karşılık Koopmans'ın [9] açısal olmayan (non-radial) etkinlik tanımına göre F firması etkin değildir. F firması, eş ürün eğrisi üzerinde olmasına rağmen, eş ürün eğrisinin etkin alt kümesi {A, B, D, E} içinde değildir. E firması, çıktı seviyesi F ile aynı olmasına rağmen, daha az girdi kullanmaktadır (kullandığı x_1 girdisi daha azdır).

Üretim teorisi geleneksel olarak işgücü etkinliğini etkinliğin toplam ölçüsü olarak ele alınmaktadır. Farrell'e göre bu oran (üretilen ürün / işgücü saati), enerji, malzeme, sermaye gibi etkenleri göz ardı ettiği için teknik etkinliği (TE) ölçmek için yetersizdir. Bu nedenle Farrell bütün etkenlerin toplandığı bir etkinlik ölçüsü ortaya atmıştır [4].

$$TE = \frac{\text{Ağırlıklı Çıktı Toplamı}}{\text{Ağırlıklı Girdi Toplamı}} \quad (2.7)$$

Girdiler, çıktıları üretmek için kullanılan tüm kaynaklardır. (2.7) eşitliğinden yola çıkarak, bir firmanın etkinliğinin iki özelliğine bağlı olduğu söylenebilir:

- Sabit girdi kullanımıyla mümkün en çok çıktıyı üretmek.
- Sabit çıktı üretimi için mümkün en az girdiyi kullanmak.

Genel olarak teknik etkinlik, bir karar biriminin (KB) üretim teknolojisinin, eş ürün eğrisi veya etkinlik sınırındaki üretim teknolojisi ile karşılaştırılmasıyla elde edilir. (Fried ve diğ. [10], Färe ve diğ. [5], Charnes ve diğ. [11]). Bölüm 2.2.1’de açıklandığı üzere, üretim teknolojisi, bir firmanın girdi kullanımı ve çıktı üretimini temsil etmektedir. Üretim teknolojilerinin karşılaştırılması kavramı “benchmark” görevini görebilecek bir mükemmellik standardı gereksinimi doğurmaktadır. Yukarıdaki iki maddeyle açıklanan özelliklere sahip firmalar bu standardı oluşturur.

Literatürde teknik etkinliğin ölçümü için genel olarak üç yaklaşım vardır. Bunlardan ilki olan indeks sayılar yaklaşımına Bölüm 2.1.1’de de değinilen finansal oran analizleri örnek gösterilebilir. İkinci yaklaşım olan ekonometrik yaklaşım, teorik bir üretim fonksiyonunu teknik etkinliğin standardı olarak ele alır (Bölüm 2.2.2). Üçüncü yaklaşım olan matematiksel programlama yaklaşımı ise teorik bir üretim fonksiyonunun varlığına ihtiyaç duymaz. Veri Zarflama Analizi etkinliği bu yaklaşımla ölçer. Ekonometrik yöntemler, “ortalama gözlemler” üzerinden etkinliği ölçerken, matematiksel programlama yöntemleri “etkinlik sınırları”nı mükemmellik standardı olarak kullanırlar. Giokas [12] veri zarflama analizini aşağıdaki şekilde tanımlamıştır:

Veri zarflama analizi, (karar birimlerinin) görelî etkinliğini, belli bir girdi veya kaynak seviyesiyle üretilmesi mümkün olan en yüksek çıktı veya yarar seviyesini temsil eden bir üretim fonksiyonu (etkinlik sınırı) oluşturarak ölçer [12].

3. VERİ ZARFLAMA ANALİZİ

Veri Zarflama Analizi, Charnes, Cooper ve Rhodes [1] tarafından 1978 yılında geliştirilmiştir. Charnes, Cooper ve Rhodes'un geliştirdiği model, bugün CCR formülasyonu olarak adlandırılmaktadır. CCR modeli, karar birimlerinin etkinlik değerlerini ölçmek için doğrusal programlamayı kullanmaktadır.

Bir karar biriminin göreceli etkinlik değeri, çıktı değerlerinin ağırlıklı toplamının, girdi değerlerinin ağırlık toplamına oranlanmasıyla elde edilir. Burada karşılaşılan problem, girdi ve çıktılara verilecek ağırlık değerlerinin belirlenmesidir. Girdi ve çıktı değerleri, birçok durumda farklı birimlerde ifade edilir. Veri Zarflama Analizinin, performans analizinde yaygın olarak kullanılmasının en büyük nedeni, ağırlıkların belirlenmesinde karar vericilere sağladığı avantajdır. Girdi ve çıktı ağırlıkları, model tarafından her karar birimi için, etkinlik değerini enbüyükleyecek şekilde belirlenir. Bu ağırlıklandırma sırasında uyulması gereken tek kısıt, aynı ağırlıklarla hiçbir karar biriminin etkinlik değerinin birden yüksek olmaması ve bütün ağırlıkların pozitif olmasıdır. Model, performansı ölçülen karar birimlerinin göreceli olarak en avantajlı oldukları çıktılara yüksek ağırlık değerleri ve dezavantajlı oldukları çıktılara düşük ağırlık değerleri atayacaktır. Bu ağırlık atamaları girdi değerleri için de aynı şekilde gerçekleşir. Sonuç olarak ağırlıklar belirlenirken öznel ölçütlere ihtiyaç duyulmamakta, karar verici veya analizcinin bilinçli veya bilinçsiz olarak bazı karar birimlerine avantaj sağlayacak ağırlık değerleri atamasının önüne geçilmekte ve her karar birimi için nesnel bir etkinlik değerine ulaşılmaktadır.

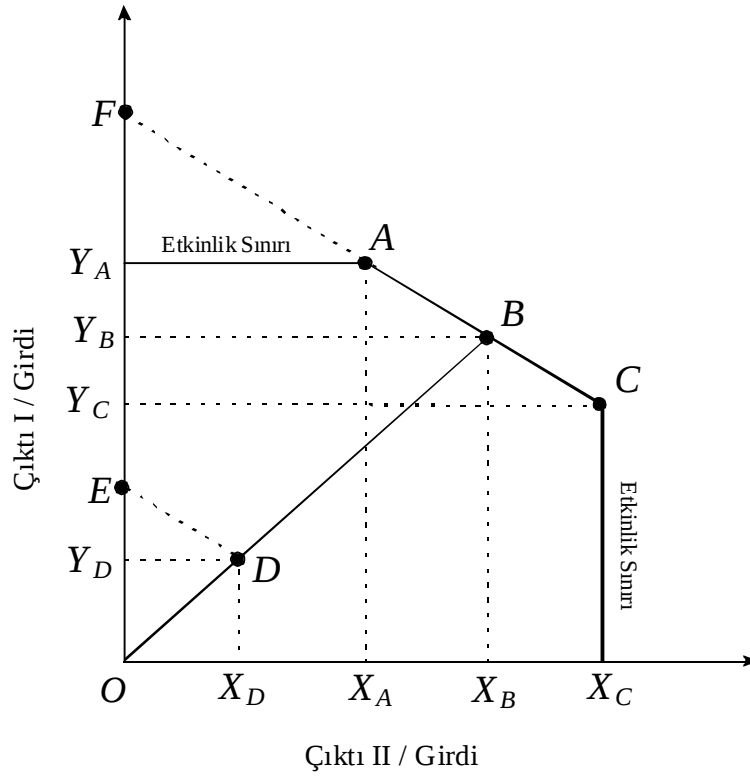
Modelde, bir karar biriminin etkin olması için iki şart vardır [2]:

- a) Hiçbir çıktının değeri, bir veya daha fazla girdinin değeri artırılmadan ya da bir veya daha fazla çıktının değeri azalmadan artırılamaz.
- b) Hiçbir girdinin değeri, bir veya daha fazla girdinin değeri artırılmadan ya da bir veya daha fazla çıktının değeri azalmadan düşürülemez.

Bu kurallara uyan karar birimleri etkinlik sınırını oluşturur ve etkinlik değeri 1'dir. Etkin olmayan bir karar birimin performansı, etkinlik sınırına uzaklığı ile belirlenir.

3.1 Veri Zarflama Analizine Grafik Yaklaşım

Bu bölümde Veri Zarflama Analizinin yöntemini görselleştirmek için grafiksel yaklaşımdan yararlanılacaktır. Sekil 3.1'de iki çıktı ve bir girdi kullanan üç adet karar birimi (A, C, D) görülmektedir.



Şekil 3.1 : Veri Zarflama Analizine Grafik Yaklaşım

Diğer noktalara göre daha yukarıda ve sağda yer alan noktalar yani karar birimleri, diğerlerine göre daha etkindir. O noktası, etkinlik değerinin en düşük olduğu noktadır. Bu örnekte, A, C ve D karar birimleri, bir adet girdi kullanarak iki adet çıktı vermektedir. Bu iki çıktının girdiye oranı, karar birimlerinin grafikteki pozisyonlarını belirlemektedir. O noktasına en uzakta bulunan A ve C noktaları etkinlik sınırını oluşturmaktadır. Bu şekilde, D noktasının etkinlik değeri, etkinlik sınırına göre olan konumundan yararlanarak belirlenir. Öncelikle O noktasından çıkıp D noktasından geçerek etkinlik sınırına ulaşan bir OB doğru parçası çizilir. D noktasının etkinlik değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$D \text{ noktasının etkinlik değeri} = \frac{OD}{OB} = \frac{OE}{OF} \quad (3.1)$$

Şekil 3.1’deki AC doğru parçasının fonksiyonunu göz önüne alırsak:

$$Y = a - bX$$

öyle ki:

$$OE = Y_D + bX_D \quad (3.2)$$

$$OF = Y_A + bX_A = Y_C + bX_C$$

OF’ye bölersek:

$$\begin{aligned} \frac{OE}{OF} &= \frac{1}{OF} Y_D + \frac{b}{OF} X_D \\ 1 &= \frac{OF}{OF} = \frac{1}{OF} Y_A + \frac{b}{OF} X_A \\ 1 &= \frac{OF}{OF} = \frac{1}{OF} Y_C + \frac{b}{OF} X_C \quad \text{burada: } Y = \frac{O_1}{I} \quad \text{ve} \quad X = \frac{O_2}{I} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Bu eşitlikler yeniden düzenlendiğinde:

$$\begin{aligned} \frac{\left(\frac{1}{OF} \times \frac{1}{I_D}\right) \times O_{1D} + \left(\frac{b}{OF} \times \frac{1}{I_D}\right) \times O_{2D}}{\left(\frac{1}{I_D}\right) \times I_D} &= \frac{OE}{OF} = D \text{ karar biriminin etkinlik değeri} \\ \frac{\left(\frac{1}{OF} \times \frac{1}{I_D}\right) \times O_{1A} + \left(\frac{b}{OF} \times \frac{1}{I_D}\right) \times O_{2A}}{\left(\frac{1}{I_D}\right) \times I_A} &= \frac{OF}{OF} = 1 = A \text{ karar biriminin etkinlik değeri} \\ \frac{\left(\frac{1}{OF} \times \frac{1}{I_D}\right) \times O_{1C} + \left(\frac{b}{OF} \times \frac{1}{I_D}\right) \times O_{2C}}{\left(\frac{1}{I_D}\right) \times I_C} &= \frac{OF}{OF} = 1 = C \text{ karar biriminin etkinlik değeri} \end{aligned}$$

Görüldüğü gibi, eşitlikler, A, C ve D karar birimlerinin girdi ve çıktılarını aynı ağırlıklarla ağırlıklandırılacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Bu sayede ağırlıklı çıktı toplamının, ağırlıklı girdi toplamına oranlaması mümkün olmuştur. İstisnai olarak bu örnekte sadece bir adet girdi vardır. Ağırlıklı çıktı toplamının, ağırlıklı

girdi toplamına oranı, etkinlik sınırını oluşturan A ve C karar birimleri için 1'dir. D karar biriminin etkinlik değeri ise, etkinlik sınırına uzaklığıyla ölçülmektedir.

3.2 Doğrusal Programlama Formülasyonu

Grafik örneğinde iki çıktı (O_1 ve O_2) ve bir girdiye (I) sahip karar birimleri için $\frac{aO_1+bO_2}{cI}$ formunda bir etkinlik ölçüsü bulunmuştur. a , b ve c ağırlıkları, bütün karar birimlerinin etkinlik değerleri en fazla 1 olmak şartıyla, etkinliği ölçülen karar biriminin etkinlik değerlerini enbüyükleyecek şekilde belirlenmektedir. Veri Zarflama Analizi formülasyonu, bu ifadeyi temel almaktadır. n adet karar birimi, t adet çıktı ve m adet girdinin olduğu bir analizde, CCR formülasyonu aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\text{enb } h_0 = \frac{\sum_{r=1}^t u_r y_{rj_0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij_0}}$$

kısıtlar:

$$\frac{\sum_{r=1}^t u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n \quad (3.4)$$

$$u_r, v_i \geq 0, \quad \forall r \text{ ve } i$$

Yukarıdaki formülasyonda:

h_0 = etkinliği ölçülen karar biriminin (KB_0) etkinlik değerini,

y_{rj} = j . karar biriminin r . çıktısını,

x_{ij} = j . karar biriminin i . girdisi

u_r = r çıktısının ağırlığını,

v_i = i girdisinin ağırlığını,

n = karar birimi sayısını,

t = çıktı sayısını,

m = girdi sayısını ifade etmektedir.

3.4 formülasyonu, etkinliği ölçülmek istenen j_0 karar birimi için tanımlanmıştır. Tüm karar birimleri için n adet doğrusal programın çözülmesiyle, her karar birimi için etkinlik değerine ulaşılır.

Görüleceği gibi her karar birimi için girdi ve çıktılarına verilecek ağırlık kümeleri 3.4'ün çözümüyle elde edilmektedir. Formülasyondaki kısıtlar, ağırlık kümelerinin, hiçbir karar biriminin etkinlik değerinin 1'i aşmamasını sağlamaktadır.

Veri Zarflama Analizi modelinde etkinlik değeri, çıktıların ağırlıklı toplamının, girdilerin ağırlık toplamına bölünmesiyle elde edilmektedir. Bu modelin doğrusal programlama yöntemleriyle çözülebilmesi için modelde bir takım değişiklikler yapmak gerekmektedir. Model, aşağıdaki şekilde doğrusallaştırılır:

$$\text{enb } h_0 = \sum_{r=1}^t u_r y_{rj_0}$$

kısıtlar:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij_0} = 1 \quad (3.5)$$

$$\sum_{r=1}^t u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq 0, \quad \forall r, i.$$

Yukarıdaki formülasyon, CCR modelinin primal formudur. Primal formülasyona alternatif olarak bu modelin duali de çözülebilir. Primal modelde $t + m$ karar değişkeni ve karar birimi sayısı kadar artı 1, yani $n+1$ adet kısıt varken, dual formülasyonda $t + m+1$ adet kısıt ve n adet karar değişkeni vardır. Veri Zarflama Analizi uygulamalarında genelde karar birimi sayısı, girdi ve çıktı sayısı toplamından daha yüksek olduğu için, çözüm aşamasında dual formülasyon daha avantajlı olabilir:

enk Z_0

kısıtlar:

$$\begin{aligned} x_{ij_0} Z_0 - \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j &\geq 0, & i = 1, \dots, m \\ -y_{rj_0} + \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j &\geq 0, & r = 1, \dots, t \\ \lambda_j &\geq 0, & j = 1, \dots, n, \\ Z_0 &\text{ kısıtsız.} \end{aligned} \tag{3.6}$$

Dual problemde, girdileri $i = 1, \dots, m$ için $\sum x_{ij} \lambda_j$, çıktıları $r = 1, \dots, t$ için $\sum y_{rj} \lambda_j$ olan ve j_0 karar biriminden daha üstün performans gösteren bileşik bir karar birimi aranmaktadır. λ_j , j 'inci karar biriminin yoğunluk değerini göstermektedir. j_0 karar birimi 3.6'daki ilk ve ikinci kısıtlara ait aylak değişkenlerin (sırasıyla S_i^- ve S_r^+) sıfıra ve Z_0 'ın bire eşit olduğu durumda etkinlik sınırında yer alır. Bu durumda j_0 'dan daha iyi performans gösteren bir bileşik karar birimi bulunamayacağı gösterilmiş olur. Buna karşılık eğer Z_0 birden küçük ve atıl değişkenler sıfırdan büyükse, j_0 etkinsiz bir karar birimidir. Optimal λ_j değerleri j_0 'dan daha iyi performans gösteren ve j_0 için hedefler oluşturan bir bileşik karar birimi meydana getirmektedirler [1].

3.3 BCC Formülasyonu

Veri Zarflama Analizinin dual formunun çözümüyle elde edilen λ değerleri, karar birimlerinin ölçeğe göre getirileri hakkında bilgi vermektedir. Ölçeğe göre getiriler, bir karar birimi için, üretim ölçeği arttıkça veya azaldıkça yani kullandığı girdi miktarı arttıkça veya azaldıkça, ürettiği çıktı miktarının hangi oranda değişeceği, dolayısıyla etkinlik değerinde ne yönde bir değişim olacağını belirlemektedir (Bölüm 2.2.5). Herhangi bir karar birimi için, $\sum \lambda_j$ değeri 1'den küçükse ölçeğe göre artan, 1'den büyükse ölçeğe göre azalan, $\sum \lambda_j = 1$ ise ölçeğe göre sabit getiri söz konusudur.

Banker ve diğerleri tarafından ortaya atılan ve ölçeğe göre değişken getiriler öngören BCC formülasyonu [6] aşağıdaki şekilde yazılır:

enk Z_0

kısıtlar:

$$\begin{aligned} x_{ij_0} Z_0 - \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j &\geq 0, & i = 1, \dots, m \\ -y_{rj_0} + \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j &\geq 0, & r = 1, \dots, t \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1, \\ \lambda_j &\geq 0, & j = 1, \dots, n \\ Z_0 &\text{ kısıtsız.} \end{aligned} \tag{3.7}$$

Görüleceği gibi 3.7 ile 3.6 arasındaki tek fark, diğer karar birimlerinin çözümdeki ağırlığını belirleyen λ değerlerinin toplamının 1'e eşitlenmesini sağlayan kısıttır.

3.4 Diğer Veri Zarflama Analizi Formülasyonları

Son yirmi yılda, değişik veri türleri ve analiz ihtiyaçlarına göre temel VZA modelinin bir çok farklı yapısıyla karşılaşılmaktadır. BCC modeli [6], ağırlık kısıtlamaları [13], çapraz etkinlik modeli [14,15], belirsiz VZA (IDEA) [16], revize edilmiş VZA (Revized DEA) [17,18] gibi modeller bunlara örnek olarak gösterilebilir. CCR modelinde yapılan bu değişikliklerin büyük bölümüne, VZA'nın iki temel zayıf noktasına çözüm bulmak amacıyla gereksinim duyulmuştur.

Bunların birincisi, CCR modelinin çözümünde bazı karar birimlerinin sadece bir girdi veya çıktıdaki göreceli performansları dikkate alınarak etkinlik sınırında yer alabilmesidir. Özellikle az sayıda karar birimi ve çok sayıda girdi ve çıktı olduğunda bu durum ortaya çıkar. Bunun sonucunda karar birimlerinin büyük bir çoğunluğu etkinlik sınırında yer alıyor gözükülebilir ve analiz sonucunda sağlıklı bir sıralama elde etmek mümkün olmaz. Bu soruna çözüm amacıyla ağırlık kısıtları [13] ve çapraz etkinlik modeli [14,15] öne sürülmüştür.

CCR modelinin bir diğer zayıf noktası ise, modelin kullanılan verilere karşı çok duyarlı olmasıdır. Performans değerlerini ölçümünde kullanılan etkinlik sınırları, verilerdeki hata ve belirsizliklerden çok etkilenir. Bu nedenle VZA ile doğru bir performans değerlendirmesi yapabilmek için eldeki verilerin kesin ve hatasız olması

gerekir. Öte yandan kullanılmak istenen veriler sözel olarak ifade ediliyor olabilir. (örneğin: “eski” donanım, “iyi” servis) [19].

Bulanık veriler kullanan VZA (Bulanık VZA), gerçek hayattaki durumları, klasik VZA’ya göre daha gerçekçi bir şekilde ifade eder. Aynı zamanda, bulanık kümeler teorisi, sözel olarak ifade edilen verilerin Veri Zarflama Analizinde direkt olarak kullanılmasına olanak tanır.

Bulanık veriler kullanılan Veri Zarflama Analizi formülasyonlarında, model, olasılık seviyeleri ve α -kesmeleri gibi yaklaşımlardan yararlanarak doğrusallaştırılmaktadır. Modeldeki eşitlik ve eşitsizlikler ise Bulanık Kümeler Teorisinden yararlanılarak tanımlanmakta ve modelin doğrusal programlama kullanılarak çözülmesine olanak sağlanmaktadır. Kısıtlardaki eşitlik ve eşitsizliklerin değişik şekilde tanımlanması, farklı sıralama yöntemleri, olasılık ve α -kesmeleri yaklaşımları bir çok Bulanık Veri Zarflama Analizi formülasyonunun ortaya çıkmasına neden olmuştur [19-24]. Bulanık veri zarflama analizi ile ilgili literatür araştırması ve değişik bulanık veri zarflama analizi formülasyonları 5. Bölüm’de ayrıntılı olarak incelenecektir.

4. BELİRSİZLİK ORTAMINDA KARAR VERME

Bu bölümde bulanık ortamda karar verme konusu ele alınacaktır. Bulanık ortamda karar verme ile ilgili literatür araştırması iki bölüme ayrılmıştır. İlk olarak bulanık kümeler ile ilgili temel matematiksel özellikler ele alınacak, sonra bulanık kümeler teorisi ile çok amaçlı karar verme yöntemleri ilişkilendirilecektir. Bulanık kümeler teorisi ve çok amaçlı karar verme ile ilgili bölümde, bulanık amaç fonksiyonu, bulanık kısıtlar, bulanık karar alma gibi kavramlar açıklanacaktır. Üçüncü olarak ise bulanık karar alma ve Zimmermann [25] ve Carlsson-Korhonen [26] tarafından geliştirilen bulanık matematiksel programlama modelleri ele alınacaktır. Son olarak ise belirsiz ortamda veri zarflama analizi, sıra sayılı ve aralık olarak verilen verilerle performans ölçümü için geliştirilen modeller incelenecektir.

4.1 Bulanık Kümeler Teorisi

Bulanık kümeler teorisi 1965 yılında Lotfi Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Zadeh “Bulanık Kümeler” [27] adlı ünlü makalesinde bulanık kümeler teorisinin temel kavramlarını ve matematiksel özelliklerini ilk olarak tanımlamıştır. Zadeh bulanık bir kümeyi “sürekli üyelik derecelerine sahip olan ve her elemana 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecesi atayan bir üyelik fonksiyonuyla tanımlanan bir küme” olarak tanımlamıştır [27]. Zadeh, bulanık kümelerle ilgili aşağıdaki tanımlamaları yapmıştır:

X bir elemanlar kümesi ve x bu kümede bir eleman olsun. Bu durumda X kümesindeki bir $\tilde{A}$ bulanık kümesi aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\tilde{A} = \{x, \mu_{\tilde{A}}(x) | x \in X\} \quad (4.1)$$

X içindeki $\tilde{A}$ bulanık kümesi, X 'in her noktasını $[0, 1]$ aralığındaki bir gerçekte sayıyla ilişkilendiren bir $\mu_{\tilde{A}}(x)$ üyelik fonksiyonu ile karakterize edilmektedir. $\mu_{\tilde{A}}(x)$ üyelik fonksiyonunun $[0, 1]$ aralığı içindeki değeri, x 'in $\tilde{A}$ bulanık kümesine üyelik

derecesini temsil etmektedir. 1'e yakın $\mu_{\tilde{A}}(x)$ değerleri yüksek üyelik derecelerini, 0'a yakın değerler ise düşük üyelik derecesini ifade eder. Eğer $\mu_{\tilde{A}}(x)$ üyelik fonksiyonu yalnızca 0 ve 1 değerlerini alabiliyorsa, söz konusu küme klasik bir kümedir (crisp set).

Zadeh, klasik kümelerdeki bir takım özellikleri, bulanık kümelerde uygulanacak şekilde tanımlamıştır. Bu tanımlamalar, boş küme, eşitlik, kümenin tümleyeni, kapsama, birleşim, kesişim, cebirsel çarpım, normal küme, kümenin tabanı, bağıntı, bileşke, gönderim, içbükeylik, dışbükeylik gibi kavramları kapsar.

Boş Küme: Bir bulanık küme, X üzerindeki üyelik fonksiyonunun değeri 0 ise boş kümedir.

$$\tilde{A} = \emptyset \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) = 0, \quad \forall x \in X \quad (4.2)$$

Eşitlik: $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ bulanık kümeleri, X üzerindeki üyelik fonksiyonları eşitse, eşit kümelerdir.

$$\tilde{A} = \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{B}}(x), \quad \forall x \in X \quad (4.3)$$

Tümleme işlemi: $\tilde{A}$ bulanık kümesinin tümleyeni $\tilde{A}'$ bulanık kümesinin üyelik fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\mu_{\tilde{A}'}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x), \quad \forall x \in X \quad (4.4)$$

Kapsama işlemi: $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ iki bulanık küme olsun, her x için $\tilde{A}$ 'nın üyelik fonksiyonunun değeri $\tilde{B}$ 'nin üyelik fonksiyonunun değerine eşit veya küçükse $\tilde{A}$, $\tilde{B}$ tarafından kapsanır.

$$\tilde{A} \subset \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(x), \quad \forall x \in X \quad (4.5)$$

Birleşim işlemi: Sırasıyla $\mu_{\tilde{A}}(x)$ ve $\mu_{\tilde{B}}(x)$ üyelik fonksiyonları ile tanımlanmış $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ bulanık kümelerinin birleşimi $\tilde{C}$ bulanık kümesi olsun. Bu durumda $\tilde{C}$, $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ kümelerini kapsayan en küçük bulanık kümedir.

$$\begin{aligned}
& \therefore \mu_{\tilde{C}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \vee \mu_{\tilde{B}}(x) \\
& \Leftrightarrow \mu_{\tilde{C}}(x) = \text{enb}[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)] = \mu_{\tilde{A}}(x) \quad \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \mu_{\tilde{B}}(x) \text{ ise,} \\
& \quad \mu_{\tilde{C}}(x) = \text{enb}[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)] = \mu_{\tilde{B}}(x) \quad \mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(x) \text{ ise,}
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Kesişim işlemi: Sırasıyla $\mu_{\tilde{A}}(x)$ ve $\mu_{\tilde{B}}(x)$ üyelik fonksiyonları ile tanımlanmış $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ bulanık kümelerinin kesişimi $\tilde{C}$ bulanık kümesi olsun. Bu durumda $\tilde{C}$, $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ kümelerini tarafından kapsanan en büyük bulanık kümedir.

$$\begin{aligned}
& \therefore \mu_{\tilde{C}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(x) \\
& \Leftrightarrow \mu_{\tilde{C}}(x) = \text{enk}[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)] = \mu_{\tilde{A}}(x) \quad \mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(x) \text{ ise,} \\
& \quad \mu_{\tilde{C}}(x) = \text{enk}[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)] = \mu_{\tilde{B}}(x) \quad \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \mu_{\tilde{B}}(x) \text{ ise,}
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Cebirsel çarpma: $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ bulanık kümelerinin çarpımı $\tilde{A}\tilde{B}$ olarak tanımlanır ve aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\mu_{\tilde{A}\tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x)\mu_{\tilde{B}}(x) \tag{4.8}$$

Cebirsel toplama: $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ bulanık kümelerinin toplamı $\tilde{A} \oplus \tilde{B}$ olarak tanımlanır ve aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\mu_{\tilde{A} \oplus \tilde{B}} = \mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x) - (\mu_{\tilde{A}}(x)\mu_{\tilde{B}}(x)) \tag{4.9}$$

Bağıntı: $X_1 \times X_2$ uzayındaki R bulanık bağıntısı, her (x_1, x_2) ikilisine, $\mu_R(x_1, x_2)$ üyelik fonksiyonu ile tanımlanan bir üyelik derecesi atayan bir bağıntıdır.

Gönderim (mapping): $T : X \rightarrow Y$, X uzayından Y uzayına bir gönderim olsun. $\tilde{B}$, Y uzayında $\mu_{\tilde{B}}(y)$ üyelik fonksiyonuyla tanımlanan bir bulanık küme ise T^{-1} ters gönderimi, T gönderimi ile Y uzayına gönderilmiş her $x \in X$ için X uzayında, aşağıdaki üyelik fonksiyonu ile tanımlanmış bir $\tilde{A}$ bulanık kümesi meydana getirir.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{B}}(y), \quad y \in Y \tag{4.10}$$

X uzayında bir $\tilde{A}$ bulanık kümesini ele aldığımızda, T gönderimi, Y uzayında aşağıdaki üyelik fonksiyonuna sahip bir $\tilde{B}$ bulanık kümesi tanımlar.

$$\mu_{\tilde{B}}(y) = \text{enb}_{x \in T^{-1}(y)}(\mu_{\tilde{A}}(x)) \quad (4.11)$$

Burada, $T^{-1}(y)$, T ile X uzayından Y uzayına gönderilmiş noktalar kümesini temsil etmektedir.

İçbükeylik ve dışbükeylik: Bir $\tilde{A}'$ bulanık kümesi, tümleyeni olan $\tilde{A}$ bulanık kümesi içbükeyse dışbükeydir. $\tilde{A}$ bulanık kümesi her $x_1, x_2 \in X$ ve $\beta \in [0,1]$ için (4.12) gerçekleşirse içbükeydir.

$$\mu_{\tilde{A}}(\beta x_1 + (1 - \beta)x_2) \geq \text{enk}[\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_2)] \quad (4.12)$$

Alternatif olarak, bir bulanık küme, bütün α -kesmeleri içbükeyse içbükeydir.

Normal bulanık küme: Bir $\tilde{A}$ bulanık kümesi, X uzayındaki $\mu_{\tilde{A}}(x)$ üyelik fonksiyonunun üst sınırı 1 ise normal bulanık kümedir.

$$\sup \mu_{\tilde{A}}(x) = 1 \quad (4.13)$$

Bir bulanık kümenin tabanı: Bir $\tilde{A}$ bulanık kümesinin tabanı, $S(\tilde{A})$, $\tilde{A}$ 'nın aşağıdaki şekilde tanımlanan bir alt kümesidir.

$$S(\tilde{A}) = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) > 0\} \quad (4.14)$$

Alfa kesmeleri: Bir $\tilde{A}$ bulanık kümesinin herhangi bir alfa kesmesi, üyelik derecesi en az söz konusu alfa derecesi kadar olan alt kümesidir.

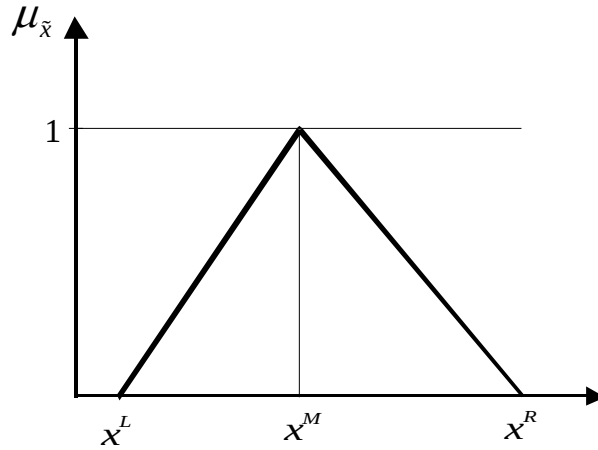
$$\tilde{A}_\alpha = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\} \quad (4.15)$$

Bulanık sayı: Bulanık sayı, içbükey ve normal bulanık kümedir [28].

Üçgen bulanık sayı: Bir üçgen bulanık sayı, (x^L, x^M, x^R) olarak gösterilir. Burada x^L , mümkün olan en küçük değeri, x^M orta değeri ($x^M = (x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) = 1)$) ve x^R mümkün olan en büyük değeri ifade eder. x^L ve x^R sırasıyla üçgen bulanık sayının sağ ve sol sınırları olarak da adlandırılabilir. Bir üçgen bulanık sayının üyelik fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\mu(x) = \begin{cases} (x - x^L)/(x^M - x^L), & x^L \leq x \leq x^M \\ (x^R - x)/(x^R - x^M), & x^M < x \leq x^R \\ 0, & \text{aksi halde.} \end{cases} \quad (4.16)$$

Şekil 4.1’de örnek bir üçgen bulanık sayı verilmiştir:

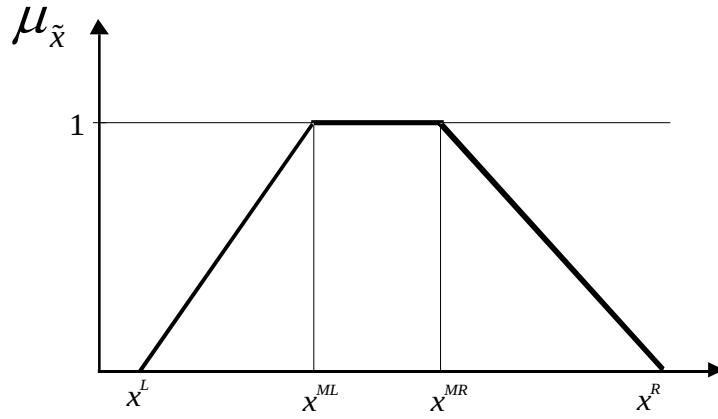


Şekil 4.1 : Üçgen bulanık sayı

Trapezoidal bulanık sayı: Bir trapezoidal bulanık sayı $(x^L, x^{ML}, x^{MR}, x^R)$ şeklinde gösterilir. Burada x^L , mümkün olan en küçük değeri, x^{ML} , üyelik derecesi 1 iken en küçük değeri, x^{MR} , üyelik derecesi 1 iken en büyük değeri ve x^R mümkün olan en büyük değeri ifade eder. Bir trapezoidal bulanık sayının üyelik fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\mu(x) = \begin{cases} (x - x^L)/(x^{ML} - x^L), & x^L \leq x \leq x^{ML} \\ 1, & x^{ML} < x \leq x^{MR} \\ (x^R - x)/(x^R - x^{MR}), & x^{MR} < x \leq x^R \\ 0, & \text{aksi halde.} \end{cases} \quad (4.17)$$

Şekil 4.2’de örnek bir trapezoidal bulanık sayı gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Trapezoidal bulanık sayı

4.2 Bulanık Doğrusal Programlama

Doğrusal programlama tekniği, bir doğrusal kısıtlar kümesi altında, bir amaç fonksiyonunu enbüyüklemeye veya enküçüklemeye dayanmaktadır. Doğrusal programın kanonik formu aşağıda verilmiştir [29].

$$\text{enk } z = \mathbf{c}\mathbf{x}$$

kısıtlar:

$$\mathbf{A}\mathbf{x} \geq \mathbf{b},$$

$$\mathbf{x} \geq 0.$$

(4.18)

(4.18) formülasyonunda, $\mathbf{x} = [x_j]$, karar değişkenleri vektörünü, $\mathbf{c} = [c_j]$, amaç fonksiyonu katsayılar vektörünü, $\mathbf{A} = [a_{ij}]$, kısıt denklemlerinin katsayılar matrisini, $\mathbf{b} = [b_i]$ kaynak değerlerinin vektörünü ifade etmektedir.

Karar uzayındaki en iyi çözüm, (4.18) doğrusal programının çözümüyle elde edilmektedir.

Bulanık doğrusal programlama, $\mathbf{A}$, $\mathbf{b}$ ve $\mathbf{c}$ parametrelerinin belirsiz olduğu veya sözel olarak ifade edildiği ve bulanık üyelik fonksiyonlarıyla sayısallaştırıldığı karar alma ortamlarında kullanılmaktadır. Belirsiz karar alma ortamlarında, $\mathbf{A}$, $\mathbf{b}$ ve $\mathbf{c}$ parametrelerinin hepsi veya bazılarının bulanık olabileceği gibi, kısıtların sağlanmasında da karar vericiye belli tolerans limitleri altında bir serbestlik tanınabilmektedir. Bulanık doğrusal programın, parametrelerin aralıkları ve/veya kısıtlardaki tolerans

sınırları içinde kalarak optimuma yakın bir sonuç verecektir. Bulanık doğrusal programlama teknikleri bu yönüyle klasik doğrusal programlama tekniklerindeki duyarlılık analizinden farklılık göstermektedir. Duyarlılık analizi, elde edilen optimal çözümün etrafındaki optimal çözümleri değerlendiren bir “post-optimizasyon” tekniğidir. Bulanık doğrusal programlamada ise A , b ve c parametrelerinin değerleri, bu parametrelerin bulanık üyelik fonksiyonlarına göre değişmektedir. Diğer taraftan belirsiz kısıtların olduğu durumlarda, optimal çözüm hem parametrelerin üyelik fonksiyonlarına hem de kısıtların tolerans limitlerine bağlıdır. Dolayısıyla optimal sonuç, parametrelerin yakın değerlerine göre değil, parametrelerin üyelik fonksiyonlarına ve tolerans limitlerine göre değişmektedir.

Zimmermann [25], direkt olarak Bellman ve Zadeh’in bulanık karar alma tanımını [30] temel alan bir bulanık doğrusal programlama formülasyonu geliştirmiştir. Carlsson ve Korhonen [26] ise alt ve üst sınırları bilinen belirsiz parametre değerlerinin kullanılmasına olanak sağlayan doğrusal programlama modeli ortaya atmıştır.

4.2.1 Zimmermann Modeli

Karar vericilerin amaç fonksiyonu için hedef değerleri kısıtlar için tolerans limitleri olduğu durumda, Zimmermann aşağıdaki modeli geliştirmiştir [25].

$$x \in X$$

kısıtlar:

$$(cx) \prec (z) \tag{4.19}$$

$$(Ax) \prec (b)$$

$$x \geq 0.$$

Burada $\prec$, yaklaşık olarak eşit veya küçük anlamındadır.

(4.18), $B=(c, A)$ ve $d=(z, b)$ matrisleriyle yeniden yazılabilir:

$$(Bx) \prec (d) \tag{4.20}$$

$$x \geq 0.$$

Bu formülasyonda $(Bx) \prec (d)$ kısıtının her satırı, kısıtın x_i tarafından sağlanma derecesini temsil eden ve üyelik fonksiyonu $\mu_i(x)$ olan bir bulanık kümedir.

Görüleceği gibi bulanık ortamda, amaç fonksiyonu da bir kısıt olarak ele alınmaktadır. Üyelik fonksiyonları aşağıdaki koşullara uyacak şekilde öznel olarak belirlenmektedir:

$$\begin{aligned} \mu_i(x) &= 1 & Bx_i &\leq d_i & i &= (1, 2, \dots, m+1) \text{ ise,} \\ \mu_i(x) &\in [0, 1] & d_i &\leq Bx_i \leq d_i + p_i & i &= (1, 2, \dots, m+1) \text{ ise,} \\ \mu_i(x) &= 0 & Bx_i &\geq d_i & i &= (1, 2, \dots, m+1) \text{ ise.} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Burada p_i , bulanık kısıtlar için belirlenmiş tolerans limitleridir. (4.20)'nin optimal çözümü, Zimmermann [25] tarafından $m + 1$ adet kısıtın kesişimi olarak verilmiştir. Bu durumda bulanık karar için belirlenen üyelik fonksiyonu aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\mu_K(x) = \text{enk}_{i=(1, \dots, m+1)}(\mu_i(x)) \quad (4.22)$$

Zimmermann $\mu_K(x) = \lambda$ olarak tanımlayarak, (4.19)'u aşağıdaki bulanık doğrusal programa dönüştürmüştür:

$$\begin{aligned} &\text{enb } \lambda \\ &\text{kısıtlar:} \\ &\lambda \leq \mu_i(x), \\ &0 \leq \lambda \leq 1, \\ &x \geq 0. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Burada λ ve x bilinmemekte, p_i 'ler kısıtların tolerans limitlerini ifade etmektedir. B ve d ise kesin (crisp) katsayılarıdır.

4.2.2 Carlsson-Korhonen Modeli

Carlsson ve Korhonen [26], Zimmermann'dan [25] farklı olarak klasik bir doğrusal programdaki kısıtların değil parametrelerin bulanıklaştırılması öngören bir model önermişlerdir. A , c ve b parametrelerinin kesin olarak bilinmediği ama karar vericinin bu parametreler için alt ve üst sınırları belirlediği klasik bir doğrusal problem (4.18) ele alalım. Bu durumda söz konusu parametreler için alt sınırlar ulaşılması kesin olan risksiz (kötümser) değerleri, üst sınırlar ise ulaşılması imkansız (iyimser) değerleri temsil etmektedir.

A , b ve c bulanık parametrelerinin alt ve üst sınırları sırasıyla A^L, b^L, c^L ve A^R, b^R, c^R olsun. Carlsson ve Korhonen bu parametrelerin bulanık üyelik fonksiyonlarının, risk derecelerini ifade ettiğini öne sürmüşlerdir. Bu durumda parametrelerin üst sınırlarında (imkansız) üyelik fonksiyonlarının sıfır değerini, alt sınırlarında (risksiz) ise bir değerini alması gerekmektedir. A , c ve b parametreleri için bulanık üyelik fonksiyonları aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\begin{aligned}\mu_A(a_{ij}) &= (a_{ij} - a_{ij}^R) / (a_{ij}^R - a_{ij}^L) & a_{ij} &\in [a_{ij}^L, a_{ij}^R] & i = 1, \dots, m, & j = 1, \dots, n. \\ \mu_b(b_i) &= (b_i - b_i^R) / (b_i^R - b_i^L) & b_i &\in [b_i^L, b_i^R] & i = 1, \dots, m. \\ \mu_c(c_i) &= (c_i - c_i^R) / (c_i^R - c_i^L) & c_i &\in [c_i^L, c_i^R] & i = 1, \dots, m.\end{aligned}\tag{4.24}$$

Carlsson ve Korhonen [26], μ bulanık kararının kesinlik derecesini parametreler arasında en riskli olana bağlı olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu durumda probleme çözüm oluşturan μ üyelik fonksiyonu aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\mu = \mu_A(a_{ij}) \cup \mu_b(b_i) \cup \mu_c(c_i) = \text{enk}\{\mu_A(a_{ij}), \mu_b(b_i), \mu_c(c_i)\}\tag{4.25}$$

Carlsson ve Korhonen [26], belli bir μ risk derecesinde amaç fonksiyonun en iyi değerine $\mu = \mu_A = \mu_b = \mu_c$ olduğunda, yani bütün parametrelerin, amaç fonksiyonunun enbüyüklediği aynı risk derecesinde değerlendirildiği durumda ulaşıldığını ortaya atmışlardır.

Parametrelerin değerlerini risk derecelerine göre yazarsak:

$$\begin{aligned}a_{ij} &= (a_{ij}^L - a_{ij}^R)\mu_A + a_{ij}^R \\ b_i &= (b_i^L - b_i^R)\mu_b + b_i^R \\ c_i &= (c_i^L - c_i^R)\mu_c + c_i^R\end{aligned}\tag{4.26}$$

Bulanık Doğrusal Model aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\begin{aligned}\text{enb } z &= (c_i^L - c_i^R)\mu_c + c_i^R \\ \text{kısıtlar :} & \\ ((A^L - A^R)\mu + A^R)x &\leq b_i = (b_i^L - b_i^R)\mu_b + b_i^R \\ x &\geq 0.\end{aligned}\tag{4.27}$$

(4.27)'deki üyelik fonksiyonları doğrusaldır. Dolayısıyla problem doğrusal matematiksel programlama teknikleri kullanarak çözülebilir. Üyelik fonksiyonlarının doğrusal olmadığı durumlarda, doğrusal olmayan matematiksel programlama tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

4.3 Belirsiz Ortamda Veri Zarflama Analizi

Performansı ölçülmek istenen karar birimleri ile ilgili girdi-çıkıtı verileri bazı durumlarda sıra sayılı olarak veya aralıklarla ifade edilmiş olabilir. Bu bölümle, bu tip verilerin kullanılmasına olanak sağlayan iki veri zarflama analizi formülasyonu incelenecektir. Bunlardan birincisi, Cook ve Kress [17] ile Cook, Kress ve Seiford'un [18] geliştirdiği, sıra sayılı verilerin kullanılmasına olanak sağlayan “revize edilmiş” veri zarflama analizi formülasyonudur (Revized DEA). İkincisi ise Cooper, Park ve Yu [16] tarafından geliştirilen ve hem sıra sayılı hem de sınırlı (aralık halindeki) verilerin kullanılmasına imkan tanıyan Belirsiz Veri Zarflama Analizi (BVZA) formülasyonudur (Imprecise DEA – IDEA). Aralıklar halindeki girdi ve çıktılarla yapılacak performans analizlerinde, bulanık veri zarflama analizi formülasyonları son derece kullanışlıdır. Literatürde rastlanan belli başlı bulanık veri zarflama analizi formülasyonları ise ayrıntılı olarak 5. Bölüm’de yer verilecektir.

4.3.1 Revize Edilmiş Veri Zarflama Analizi (RVZA)

Klasik veri zarflama analizinde sadece kesin sayısal verilerin kullanılabildiği bundan önceki bölümlerde açıklanmıştı. Oysa bazı durumlarda analizde kullanılmak istenen veriler sıra sayılı olarak ifade edilmiş olabilir. Cook ve diğerleri veri zarflama analizi formülasyonunu bu tip verilerin kullanılmasına olanak sağlayacak şekilde düzenlemişlerdir [18]. Geliştirdikleri formülasyon, “revize edilmiş” veri zarflama analizi (RVZA, revized VZA) olarak adlandırılmaktadır. RVZA’da öncelikle her karar biriminin sıra sayılı veriye göre hangi sırada olduğu belirlenmelidir. Daha sonra karar birimlerinin ilgili kategoriye göre sıra numarası bir veri olarak formülasyonda kullanılmaktadır. RVZA formülasyonu aşağıda verilmiştir:

$$\text{enb } h_0 = \sum_r u_r y_{r0} + \sum_{r \in ORD_1} W_r^1 \gamma_{r0}$$

kısıtlar:

$$\begin{aligned} \sum_i v_i x_{i0} + \sum_{i \in ORD_2} W_i^2 \delta_{i0} &= 1 \\ \sum_r u_r y_{rj} + \sum_{r \in ORD_1} W_r^1 \gamma_{rj} - \sum_i v_i x_{ij} - \sum_{i \in ORD_2} W_i^2 \delta_{ij} &\leq 0, \quad j = 1, \dots, n \\ \mu_r &\geq \varepsilon > 0, \quad r \in CARD_1 \\ v_i &\geq \varepsilon > 0, \quad r \in CARD_2 \\ \{W_r^1, W_i^2\} &\in \psi \\ \psi &= \left\{ (W_r^1, W_i^2) \mid w_{rk}^1 - w_{rk+1}^1 \geq \varepsilon, w_{rm}^1 \geq \varepsilon, w_{ik+1}^2 - w_{ik}^2 \geq \varepsilon, w_{im}^2 \geq \varepsilon, \forall r, i, k \right\} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Yukarıdaki formülasyonda,

n :karar birimi sayısını,

y_{rj} : j 'inci karar birimi tarafından üretilen r 'inci çıktı miktarını,

x_{ij} : j 'inci karar birimi tarafından kullanılan i 'inci girdi miktarını,

u_r : r 'inci çıktıya verilen ağırlığı,

v_i : i 'inci girdiye verilen ağırlığı,

$CARD_1$: sayısal olarak ifade edilen çıktılar kümesini,

$CARD_2$: sayısal olarak ifade edilen girdiler kümesini,

$$\gamma_{rkj} = \begin{cases} 1, & j' \text{inci karar birimi } r' \text{inci sıra sayılı çıktıya göre } k' \text{inci kategoride yer alıyorsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$\gamma_{rkj} = \begin{cases} 1, & j' \text{inci karar birimi } i' \text{inci sıra sayılı girdiye göre } k' \text{inci kategoride yer alıyorsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

W_r^1 : r 'inci sıra sayılı çıktıya göre k 'inci sırada olmanın ağırlığı olan w_{rk}^1 değişkeninin m boyutlu vektörünü

W_i^2 : i 'inci sıra sayılı girdiye göre k 'inci sırada olmanın ağırlığı olan w_{ik}^2 değişkeninin m boyutlu vektörünü

ε : yeterince küçük bir pozitif sayıyı göstermektedir.

4.3.2 Belirsiz Veri Zarflama Analizi

Cook ve diğerleri [16] tarafından geliştirilen Belirsiz Veri Zarflama Analizi (Belirsiz VZA) modeli (Imprecise DEA – IDEA) sıra sayılı ve sınırlı (aralık halindeki) girdi ve çıktıların veri zarflama analizinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu model, aralık halindeki veriler için, aralığın üst sınırının bir (1) olmasını ön-görmektedir. Bu koşul, belirsiz VZA'nın kullanım alanını oldukça kısıtlamaktadır. Beşinci Bölüm'de incelenecek olan bulanık veri zarflama analizi modellerinde ise bulanık aralıklarda böyle bir koşul aranmamaktadır. Belirsiz VZA'nın klasik Veri Zarflama Analizi (VZA) formülasyonlarına göre avantajı ise hem kesin sayılarla, hem sıra sayılı olarak hem de aralıklarla ifade edilen verilerin performans ana-lizlerinde kullanılabilmesidir.

$$\begin{aligned}
 \text{enb } h_0 &= \sum_r u_r y_{r0} \\
 \text{kısıtlar:} \\
 \sum_i v_i x_{i0} &= 1 \\
 \sum_r u_r y_{rj} - \sum_i v_i x_{ij} &\leq 0, \quad j = 1, \dots, n \\
 y_r &\in D_r^+ \\
 x_i &\in D_i^- \\
 u_r, v_i &\geq 0, \quad \forall r, i.
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

(4.29)'un Charnes ve diğerleri tarafından geliştirilen CCR formülasyonu [1] ile ara-sındaki farkı üçüncü ve dördüncü kısıtlardır. Bu kısıtlardaki D_r^+ ve D_i^- kümeleri, y_{rj} çıktılarının ve x_{ij} girdilerinin yapısına göre aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

a) Sayısal veriler için

$$\begin{aligned}
 D_r^+ &= \{y_{rj} = (y_{rj} \text{ 'nin sayısal değeri}), j = 1, \dots, n\}, \quad \forall r \in CARD^+ \\
 D_i^- &= \{x_{ij} = (x_{ij} \text{ 'nin sayısal değeri}), j = 1, \dots, n\}, \quad \forall r \in CARD^- \\
 \text{burada:} \\
 CARD^+ &= \text{sayısal çıktılar kümesi} \\
 CARD^- &= \text{sayısal girdiler kümesi}
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

b) Sıra sayılı veriler için:

$$D_r^+ = \{y_{rn_1} \geq y_{rn_2} \geq \dots \geq y_{rn_{n_l}}\}, \quad \forall r \in ORD^+ \quad (4.31)$$

burada

n_l : i 'inci girdiye göre l 'inci sırada yer alan karar birimleri sayısı

ORD^+ : sıra sayılı çıktılar kümesi

$$D_i^- = \{x_{in_1} \geq x_{in_2} \geq \dots \geq x_{in_{n_l}}\}, \quad \forall i \in ORD^- \quad (4.32)$$

burada

n_l : i 'inci girdiye göre l 'inci kategoride yer alan karar birimleri sayısı

ORD^+ : sıra sayılı çıktılar kümesini ifade etmektedir.

c) Sınırlı (aralıklar halinde ifade edilen) veriler için:

Daha önce de bahsedildiği gibi, BVZA'da aralık halindeki veriler için üst sınırın bir (1) olması öngörülmektedir. Bu şart altında D_r^+ ve D_i^- kümeleri aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\begin{aligned} D_r^+ &= \{(y_{rj} \text{ 'nin alt sınırı}) \leq y_{rj} \leq (y_{rj} \text{ 'nin üst sınırı}) \mid \forall j \neq j_{enb}, j_{enb} = 1\}, \quad \forall r \in BORN^+ \\ D_i^- &= \{(x_{ij} \text{ 'nin alt sınırı}) \leq x_{ij} \leq (x_{ij} \text{ 'nin üst sınırı}) \mid \forall j \neq j_{enb}, j_{enb} = 1\}, \quad \forall i \in BORN^- \end{aligned} \quad (4.33)$$

burada:

$BORN^+$: sınırlı çıktılar kümesi

$BORN^-$: sınırlı girdiler kümesi

Sıra sayılı ve sınırlı verilerin varlığı, modeli doğrusal olmaktan çıkarmaktadır. Modelin doğrusallaştırılması için iki aşamadan oluşan değişikliklere ihtiyaç duyulmaktadır.

1. Aşama: Verilerin normalize edilmesi

$$\begin{aligned} \varphi(y_{rj}) &= y_{rj} / \text{enb}_j \{y_{rj}\} = \hat{y}_{rj} \\ \varphi(x_{ij}) &= x_{ij} / \text{enb}_j \{x_{ij}\} = \hat{x}_{ij} \end{aligned} \quad (4.34)$$

Sınırlı verilerin en büyük değerleri bir (1) olduğu için bu verilerde herhangi bir değişme olmayacaktır. Sıra sayılı verilerin de sıraları normalizasyondan sonra aynı kalacaktır. Girdi ve çıktı değerleri normalize edildikten sonra formülasyon aşağıdaki şekli alır.

$$\begin{aligned}
\text{enb } h_0 &= \sum_r u_r \hat{y}_{r0} \\
\text{kısıtlar :} \\
\sum_i \hat{v}_i x_{i0} &= 1 \\
\sum_r \hat{u}_r \hat{y}_{r0} - \sum_i \hat{v}_i x_{i0} &\leq 0, \quad j = 1, \dots, n \\
\{\hat{y}_{rj} = (\hat{y}_{rj} \text{ 'nin s.d.}), j = 1, \dots, n\}, \quad \forall r \in \text{CARD}^+ \\
\{\hat{x}_{ij} = (\hat{x}_{ij} \text{ 'nin s. d.}), j = 1, \dots, n\}, \quad \forall i \in \text{CARD}^- \\
\{\hat{y}_{rn_1} \geq \hat{y}_{rn_2} \geq \dots \geq \hat{y}_{rn_l}\}, \quad \forall r \in \text{ORD}^+ \\
\{\hat{x}_{in_1} \geq \hat{x}_{in_2} \geq \dots \geq \hat{x}_{in_l}\}, \quad \forall i \in \text{ORD}^- \\
\{(\hat{y}_{rj} \text{ 'nin s. d.}) \leq \hat{y}_{rj} \leq (\hat{y}_{rj} \text{ 'nin s.d.}), \forall j \neq j_{\text{enb}}, \hat{y}_{rj_{\text{enb}}} = 1\}, \quad \forall r \in \text{BORN}^+ \\
\{(\hat{x}_{ij} \text{ 'nin s.d.}) \leq \hat{x}_{ij} \leq (\hat{x}_{ij} \text{ 'nin s.d.}), \forall j \neq j_{\text{enb}}, \hat{x}_{ij_{\text{enb}}} = 1\}, \quad \forall i \in \text{BORN}^- \\
u_r, v_i &\geq \varepsilon.
\end{aligned} \tag{4.35}$$

2. Aşama: Değişken dönüşümleri

Bu aşamada, değişken dönüşümleri ile modele yeni değişkenler eklenir.

$$\begin{aligned}
Y_{rj} &= u_r \hat{y}_{rj} \\
X_{ij} &= v_i \hat{x}_{ij}
\end{aligned} \tag{4.36}$$

Normalizasyondan sonra, çıktı ve girdilerin en yüksek değerleri (sırasıyla $\hat{y}_{rj}^*$ ve $\hat{x}_{ij}^*$) bir (1) olacağı için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$Y_{rj}^* = y_{rj}^* u_r = u_r \quad \text{ve} \quad X_{ij}^* = x_{ij}^* v_i = v_i \tag{4.37}$$

Bu durumda dönüşümlerden sonraki tüm değişkenler Y_{rj}^* ve X_{ij}^* 'ye göre aşağıdaki şekilde düzenlenebilir:

$$\hat{y}_{rj} Y_{rj}^* = Y_{rj} \quad \text{ve} \quad \hat{x}_{ij} X_{ij}^* = X_{ij} \tag{4.38}$$

Bu değişimler ile modeldeki değişken dönüşümleri tamamlanır. Değişkenlerin pozitif olma kısıtları aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$Y_{rj}, X_{ij} \geq \varepsilon \quad (4.39)$$

Sayısal değişkenler: Değişken dönüşümlerinden sonra,

$$\begin{aligned} \hat{D}_r^+ &= \{\hat{y}_{rj} = (\hat{y}_{rj} \text{ 'nin sayısal değeri}), j = 1, \dots, n\}, \quad \forall r \in CARD^+ \\ \hat{D}_i^- &= \{\hat{x}_{ij} = (\hat{x}_{ij} \text{ 'nin sayısal değeri}), j = 1, \dots, n\}, \quad \forall i \in CARD^- \end{aligned}$$

kümeleri aşağıdaki şekli alır:

$$\begin{aligned} Y_{rj}^* (\hat{y}_{rj} \text{ 'nin sayısal değeri}) - Y_{rj} &= 0, \quad \forall r \in CARD^+ \\ X_{ij}^* (\hat{x}_{ij} \text{ 'nin sayısal değeri}) - X_{ij} &= 0, \quad \forall i \in CARD^- \end{aligned} \quad (4.40)$$

Sıra sayılı veriler: Değişken dönüşümlerinden sonra, sıra sayılı değişkenler, kendi aralarındaki sıralama ilişkilerini muhafaza ederler. Örneğin $Y_{12} \geq Y_{13}$ için $Y_{12} / Y_{rj}^* \geq Y_{13} / Y_{rj}^*$ yazılır ki bu da $Y_{12} \geq Y_{13}$ ile aynıdır.

Sınırlı veriler: Sayısal verilerle aynı şekilde işlem görürler. Aşağıdaki kısıtlar yazılır.

$$\begin{aligned} (\hat{y}_{rj} \text{ 'nin alt sınırı}) Y_{rj}^* &\leq Y_{rj} \leq (\hat{y}_{rj} \text{ 'nin üst sınırı}) Y_{rj}^*, \quad \forall r \in BORN^+ \\ (\hat{x}_{ij} \text{ 'nin alt sınırı}) X_{ij}^* &\leq X_{ij} \leq (\hat{x}_{ij} \text{ 'nin üst sınırı}) X_{ij}^*, \quad \forall i \in BORN^- \end{aligned} \quad (4.41)$$

Belirsiz VZA'nın, sınırlı veriler için en yüksek değerin bir (1) olma koşulu kullanım alanını oldukça kısıtlamaktadır. Gerçek hayatta bu koşula tam olarak uyan karar birimlerine ender rastlanmaktadır. Yapılan etkinlik analizlerde karşılaşılan bir diğer sorun ise, etkinlik sınırında yer alan karar birimi sayısının yüksek olmasıdır. Bu durum, karar birimlerinin etkinliklerine göre sıralanmasını güçleştirmektedir.

5. BULANIK VERİ ZARFLAMA ANALİZİ FORMÜLASYONLARI

Bu bölümde literatürde karşılaşılan belli başlı bulanık veri zarflama analizi formülasyonları incelenecektir. Sengupta [31], Kahraman ve diğerleri [32], Kao ve Liu [19], Guo ve Tanaka [20], Saati ve diğerleri [22], León ve diğerleri [23] ve Lertworasirikul ve diğerleri [24] tarafından geliştirilen bulanık veri zarflama analizi formülasyonları ayrıntılarıyla ele alınmıştır. Tezin 7. Bölüm’ünde, Kao ve Liu, Saati ve diğerleri, Lertworasirikul ve diğerleri tarafından geliştirilen modeller, elektrik üretimi için enerji alternatiflerinin etkinliklerinin değerlendirilmesi uygulamasında kullanılmış, her formülasyondan elde edilen sonuçlar dual bulanık veri zarflama analizi ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

VZA, performans ölçümünde son derece kullanışlı bir yöntem olmasına rağmen, modelin bazı sınırlamaları vardır. Bunların en önemlilerinden biri, VZA’nın, kullanılan verilere karşı çok hassas olmasıdır. Performans değerlerinin ölçümünde kullanılan etkinlik sınırları, verilerdeki hata ve belirsizliklerden çok etkilenir. Bu nedenle VZA ile doğru bir performans değerlendirmesi yapabilmek için eldeki verilerin kesin ve hatasız olması gerekir. Öte yandan kullanılmak istenen veriler sözel olarak ifade ediliyor olabilir. (örneğin: “eski” donanım, “iyi” servis).

Bulanık veriler kullanan VZA (Bulanık VZA), gerçek hayattaki durumları, klasik VZA’ya göre daha gerçekçi bir şekilde ifade eder. Aynı zamanda, bulanık kümeler teorisi, sözel olarak ifade edilen verilerin VZA’da direkt olarak kullanılmasına olanak tanır.

Bulanık veriler kullanılan VZA formülasyonlarında, model, olasılık seviyeleri ve α -kesmeleri gibi yaklaşımlardan yararlanarak doğrusallaştırılmaktadır. Modeldeki eşitlik ve eşitsizlikler ise bulanık kümeler teorisinden yararlanılarak tanımlanmakta ve modelin doğrusal matematiksel programlama yöntemleri kullanılarak çözülmesine olanak sağlanmaktadır. Kısıtlardaki eşitlik ve eşitsizliklerin değişik şekilde tanımlanması, farklı sıralama yöntemleri, olasılık ve α -kesmeleri yaklaşımları bir çok

Bulanık VZA formülasyonunun ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu bölümde son birkaç yılda ortaya atılmış değişik Bulanık Veri Zarflama formülasyonları ele alınacak ve bunların birbirine benzer ve farklı yönleri, avantajları ve dezavantajları incelenecektir.

Bulanık kümeler teorisini veri zarflama analizinde ilk kullanan Sengupta [31] olmuştur. Sengupta'ya göre veri zarflama analizindeki kesin girdi ve çıktı değerleri ihtiyacı, kullanım alanını sadece kesin verilere dayalı, belirsiz olmayan sistemlerle kısıtlamaktadır. Deterministik olmayan sistemler için bir alternatif olan stokastik veri zarflama analizi ise, verilerin belli bir matematiksel dağılıma göre belirlendiği kabul etmektedir. Oysa veri zarflama analizinde girdi ve çıktı değerleri, matematiksel bir formun varlığına ihtiyaç duymadan, gözlemlere dayanarak belirlenmelidir. Sengupta, bulanık amaç bir fonksiyonu ve bulanık kısıtları olan bir formülasyon için bulanık kümeler teorisini, veri zarflama analizi modelinde kullanmıştır. Sengupta'nın modelinde karar verici, her kısıt için tolerans limitlerini kendisi belirlemektedir.

Kahraman ve diğerleri [32], Zimmermann'ın [25] bulanık matematiksel programlama yöntemini temel alan bir bulanık veri zarflama analizi modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde, girdi ve çıktı değerleri değil, kısıtlar, bulanık olaylar olarak ele alınmıştır. Karar verici tarafından belirlenen tolerans limitleri bu kısıtların ne kadar aşılabileceğini belirlemektedir.

Kao ve Liu [19], α -kesmeleri yaklaşımını kullanarak Bulanık Veri Zarflama modelini bir lineer model ailesine dönüştürmüşlerdir. Trapezoidal bulanık verilerin kullanılmasına olanak sağlayan bu modelde, bir çift parametrik programla eldeki model kesin verilerin kullanıldığı bir modele dönüştürülür. Etkinlik değerleri de üyelik fonksiyonlarıyla tanımlandığı için karar vericilere daha kullanışlı ve esnek bilgi sağlanmış olur.

Guo ve Tanaka [20], temel VZA Modelinin (CCR Modeli), bulanık girdi ve çıktılarla kullanılacak şekilde düzenlemişlerdir. Guo ve Tanaka'nın geliştirdikleri model, etkinlik değerlerini belli bir α -kesmesinde karşılaştırmaktadır. Öne sürülen model iki seviyeli bir doğrusal matematiksel programın çözülmesini gerektirmektedir.

Saati ve diğerleri [22] tarafından geliştirilen yöntemde, α -kesmelerinin alt ve üst sınırlarını kullanmak yerine, söz konusu aralık içinde, kısıtları sağlayan ve ilgili karar

biriminin performansını enbüyükleyecek edecek bir nokta bulunmaktadır. Bu nokta formülasyona yeni bir değişken olarak katılmaktadır. Bu şekilde her karar birimi için bir adet etkinlik skoruna ulaşmakla kalmayıp, α -kesmesinin bütün değerleri performans ölçümünde kullanılmaktadır.

Saati ve diğerlerinin [22] geliştirdiği Bulanık VZA Modelinde, CCR formülasyonu temel alınmıştır. Bu modelde karar birimlerinin performansları, hiçbir karar biriminin etkinlik değeri 1'i aşmayacak şekilde enbüyüklenmiştir. Modelde girdi ve çıktıların α -kesmelerinin uç noktaları yerine, α -kesmelerinin içinde bir noktanın kullanılması diğer formülasyonlara göre büyük bir serbestlik sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak karar birimlerinin etkinlik değeri yüksek çıkmakta, birçok karar birimi etkinlik sınırında yer almaktadır ve bu durum sağlıklı bir sıralama yapmaya güçleştirmektedir.

León ve diğerleri [23], α -kesmelerine benzer bir yaklaşım olan olabilirlik seviyelerini (h levels) kullanarak trapezoidal ve üçgen bulanık verilerin kullanılmasına imkan sağlayan bir model öne sürmüşlerdir. Modelde 0 ile 1 arasındaki olabilirlik seviyelerinde doğrusallaştırılan model aileleri çözülür. Karar birimlerinin hangi olabilirlik seviyesine kadar etkin oldukları belirlenir. Böylece 0 ile 1 arasında tek bir etkinlik değeri bulunur.

Lertworasirikul ve diğerleri [24] ise yine olabilirlik seviyelerinden yola çıkarak, her karar biriminin belli bir olabilirlik seviyesindeki etkinlik değerini belirleyen bir model geliştirmişlerdir. Bu modelde, kısıtlar bulanık faaliyetler olarak ele alınmış ve bulanık sıralama yöntemleri kullanılarak doğrusallaştırılmıştır.

Bulanık VZA'da yukarıdaki modeller dışında bir çok model öne sürülmüştür. Bu modellerin ortak özelliği, klasik VZA formülasyonunun α -kesmeleri veya olabilirlik seviyelerinden yararlanılarak birden çok doğrusal programa dönüştürülmesidir. Bundan sonraki bölümlerde bu modeller ayrıntılı olarak incelenecektir.

Bu modellere alternatif olarak 6. Bölüm'de CCR formülasyonunun [1] dual formunu temel alan bir bulanık veri zarflama analizi (dual bulanık VZA – BDVZA) önerilmiştir.

5.1 Sengupta'nın Bulanık Veri Zarflama Analizi Modeli

Sengupta [31], birden çok girdi ve tek bir çıktı için CCR modelinin primal formülasyonunu aşağıdaki şekilde bulanıklaştırmıştır.

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_m)$$

kısıtlar:

$$\text{enk } z_0 = \sum_i v_i x_{i0} \quad (5.1)$$

$$\sum_i v_i x_{ij} \geq y_j, \quad j = 1, \dots, n$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m.$$

Yukarıdaki formülasyonda n karar birimi sayısını, m girdi sayısını, x_{ij} j . karar biriminin i . girdisini, y_j j . karar biriminin çıktısını, z_0 etkinliği ölçülen karar biriminin etkinlik değerini, v_i , i . girdinin ağırlığını ifade etmektedir.

Karar birimi 0 için etkinlik değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$E_{CCR} = \text{enk } y_0 / z_0 \quad (5.2)$$

Sengupta [31], bu (5.1)'i aşağıdaki şekilde bulanıklaştırmıştır:

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_m)$$

kısıtlar:

$$\text{enk } z_0 = \sum_i v_i x_{i0} \quad (5.3)$$

$$\sum_i v_i x_{ij} \succ y_j, \quad j = 1, \dots, n$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m.$$

Zimmermann'ın [25] modeli temel alındığından, (5.3)'daki amaç fonksiyonu için karar vericinin bir istek derecesi p_0 ve tolerans sınırı q_0 belirlemelidir. Aynı şekilde kısıtlar için de birer tolerans sınırı r_j gerekmektedir. Tolerans sınırları ile birlikte karar verici amaç fonksiyonu ve kısıtlar için üyelik fonksiyonları da belirler. Üyelik fonksiyonları aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

Amaç fonksiyonu için:

$$\begin{aligned}
\mu_0(v) = 1 & \quad \sum_i v_i x_{i0} \leq p_0 & \text{ise,} \\
\mu_0(v) = 1 - \sum_i v_i x_{i0} - p_0 / q_0 & \quad q_0 \leq \sum_i v_i x_{i0} \leq p_0 + q_0 & \text{ise,} \\
\mu_0(v) = 0 & \quad \sum_i v_i x_{i0} \geq p_0 + q_0 & \text{ise.}
\end{aligned} \tag{5.4}$$

Kısıtlar için:

$$\begin{aligned}
\mu_j(v) = 1 & \quad \sum_i v_i x_{ij} \geq y_j & \text{ise,} \\
\mu_j(v) = 1 - y_j - \sum_i v_i x_{ij} / r_j & \quad y_j \geq \sum_i v_i x_{ij} \geq y_j - r_j & \text{ise,} \\
\mu_j(v) = 0 & \quad y_j - r_j \geq \sum_i v_i x_{ij} & \text{ise.}
\end{aligned} \tag{5.5}$$

Yukarıdaki formülasyonun çözümü $\lambda_0 = \text{enk}_j \{\mu_0(v), \mu_j(v)\}$ olarak ifade edildiğinde, aşağıdaki doğrusal modelin çözümüyle bulunur:

$$\begin{aligned}
& \text{enb } \lambda_0 \\
& \text{kısıtlar:} \\
& \lambda_0 q_0 + \sum_i v_i x_{i0} \leq p_0 + q_0 \\
& \lambda_0 r_j - \sum_i v_i x_{ij} \leq r_j - y_j, \quad j = 1, \dots, n \\
& 0 \leq \lambda_0 \leq 1 \\
& v_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m.
\end{aligned} \tag{5.6}$$

λ_0 'ı enbüyükleyen v^* vektöründen yararlanarak, karar birimi 0 için etkinlik değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$E_0 = y_0 / \sum_i v_i x_{i0} \tag{5.7}$$

5.2 Kahraman ve Diğerlerinin Bulanık Veri Zarflama Analizi Yöntemi

Kahraman ve diğ. [32], Zimmerman [25] tarafından öne sürülen bulanık matematiksel programlama yöntemini temel alan bir bulanık veri zarflama analizi formülasyonu geliştirmişlerdir. Bu formülasyonda, bundan sonraki bölümlerde ince-

lenecek olan bulanık veri zarflama analizi formülasyonlarından farklı olarak, girdi ve çıktı değerleri kesin sayılarla ifade edilmektedir. Formülasyondaki kısıtlar ise, belli bir tolerans aralığında gerçekleşmesi beklenen bulanık olaylar olarak ele alınmaktadır. Karar verici veya araştırmacı, her bir bulanık kısıt için bir tolerans sınırı belirler. Amaç fonksiyonu için de birer alt ve üst sınır belirlenmesiyle karar birimlerinin etkinlik değerlerine ulaşılır .

5.2.1 Kullanılan Formülasyon

Zimmerman'ın [25] geliştirdiği bulanık matematiksel programlama yöntemini temel alan bulanık veri zarflama analizi formülasyonu aşağıdaki şekilde yazılır:

enb ψ

kısıtlar:

$$\begin{aligned} \psi(c_u - c_l) - \varepsilon \sum_i S_i^- - \varepsilon \sum_r S_r^- + \theta &\leq -c_l \\ \psi p_I + \sum_j \lambda_j I_{ij} - S_i^- + \theta I_{ik} &\leq p_I, & i = 1, \dots, \text{girdi sayısı} \\ \psi p_O + \sum_j \lambda_j O_{rj} - S_r^+ + O_{rk} &\leq p_O, & r = 1, \dots, \text{çıkıtı sayısı} \\ \lambda_j, S_r^+, S_i^- &\geq 0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

Yukarıdaki formülasyonda ψ , Zimmermann modelinde tanımlanan amaç fonksiyonunun bulanık üyelik fonksiyonu için kullanılan değişkendir. Diğer değişkenlerin tanımları aşağıda verilmiştir:

c_u : amaç fonksiyonun gerçekleşmesi için üst sınırı,

c_l : amaç fonksiyonun gerçekleşmesi için alt sınırı,

ε : yeterince küçük pozitif skaleri,

S_i^- : etkinliği ölçülen karar biriminin kullanılmayan i . girdi miktarını,

S_r^- : etkinliği ölçülen karar biriminin kullanılmayan r . çıktı miktarını,

θ : etkinliği ölçülen karar biriminin etkinlik değerini,

p_I : girdiler kısıtının aşılma sınırını,

p_O : çıktılar kısıtının aşılma sınırını,

I_{ij} : j . karar biriminin i . girdisini,

O_{rj} : j . karar biriminin r . çıktısını,

I_{ik} : etkinliği ölçülen karar biriminin i . girdisini,

O_{rk} : etkinliği ölçülen karar biriminin r . çıktısını,

λ_j : j . karar biriminin çözümdeki ağırlığını temsil etmektedir.

Görüleceği gibi (5.8) formülasyonu, Zimmermann'ın bulanık matematiksel programlama formülasyonunun, veri zarflama analizine uyarlanmış halidir. Bu formülasyonda, veri zarflama analizinde kullanılan girdi ve çıktılar değil, kısıtların gerçekleşme derecesi bulanık kümelerle ifade edilmiştir. Karar verici, her kısıt ve amaç fonksiyonu için bulanık üyelik fonksiyonları, başka bir deyişle, bu kısıtların gerçekleşme derecesi için tolerans limitleri belirlemektedir. Bu yaklaşımla, bulanık girdi ve çıktılarının kullanılması mümkün olmamakla beraber, karar vericiye kısıtların gerçekleşmesinde bir esneklik sağlanmaktadır.

5.3 VZA'da Bulanık Etkinlik Değerleri

Kao ve Liu [19] tarafından öne sürülen bu yöntemde, bulanık veriler kullanılarak karar birimlerinin bulanık etkinlik değerlerinin her α -kesmesi için alt ve üst sınırları bulunarak üyelik fonksiyonlarının şekli belirlenmektedir.

5.3.1 Kullanılan Model

Modelde, Banker ve diğerleri [6] tarafından geliştirilen ölçeğe göre değişken getiriler öngören VZA formülasyonundan yararlanılmıştır. Aşağıda bu formülasyon verilmiştir:

$$E_r = \text{enb} \left(\sum_{r=1}^t u_r Y_{rj_0} \right) / \left(v_0 + \sum_{i=1}^m v_i X_{ij_0} \right)$$

kısıtlar:

$$\sum_{r=1}^t u_r Y_{ij} / \left(v_0 + \sum_{i=1}^m v_i X_{ij} \right) \leq 1, \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq \varepsilon > 0, \quad v_0 \text{ kısıtsız}$$

(5.9)

Yukarıdaki formülasyonda, X_{ij} ve Y_{rj} sırasıyla j . karar birimi için i girdisini ve r çıktısını ifade etmektedir. Burada n adet karar birimi, m adet girdi ve t adet çıktı vardır. j_0 endisi ise etkinliği ölçülen karar birimini ifade etmektedir.

Bu formülasyon aşağıdaki şekilde doğrusallaştırılır:

$$E_{j_0} = \text{enb} \sum_{r=1}^t u_r Y_{rj_0}$$

kısıtlar:

$$v_0 + \sum_{i=1}^m v_i X_{ij_0} = 1 \quad (5.10)$$

$$\sum_{r=1}^t u_r Y_{rj} - (v_0 + \sum_{i=1}^m v_i X_{ij}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq \varepsilon > 0, \quad v_0 \text{ kısıtsız.}$$

5.3.2 Bulanık Model

Kesin veriler kullanan yukarıdaki modelde, girdi ve çıktı değerlerini sırasıyla $\tilde{X}_{ij}$ ve $\tilde{Y}_{ij}$ olarak bulanık sayılar şeklinde tanımlarsak genel Bulanık Veri Zarflama modeline ulaşırız:

$$\tilde{E}_{j_0} = \text{enb} \sum_{r=1}^t u_i \tilde{Y}_{rj_0}$$

kısıtlar:

$$v_0 + \sum_{i=1}^m v_i \tilde{X}_{ij_0} = 1 \quad (5.11)$$

$$\sum_{r=1}^t u_i \tilde{Y}_{rj} - (v_0 + \sum_{i=1}^m v_i \tilde{X}_{ij}) \leq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq \varepsilon > 0, \quad v_0 \text{ kısıtsız.}$$

Bu modelden yola çıkarak 0 ile 1 arasındaki her α seviyesi için, etkinlik değeri $(\tilde{E}_j)$ 'nin alt ve üst sınırını belirleyen iki adet lineer programla doğrusal bir model elde edilir.

İlgili α seviyesi için $\tilde{X}_{ij}$ bulanık çıktısının alt ve üst sınırları sırasıyla $(X_{ij})_{\alpha}^L$ ve $(X_{ij})_{\alpha}^U$ ve $\tilde{Y}_{rj}$ bulanık girdisinin alt ve üst sınırları sırasıyla $(Y_{rj})_{\alpha}^L$ ve $(Y_{rj})_{\alpha}^U$ olarak tanımlanırsa, etkinlik değerinin alt ve üst sınırları, $(E_j)_{\alpha}^L$ ve $(E_j)_{\alpha}^U$, aşağıdaki iki modelin çözümüyle elde edilir:

$$(E_{j_0})_{\alpha}^L = \text{enb} \sum_{r=1}^t u_r (Y_{rj_0})_{\alpha}^L$$

kısıtlar:

$$v_0 + \sum_{i=1}^m v_i (X_{ij_0})_{\alpha}^U = 1$$

$$\sum_{r=1}^t u_r (Y_{rj})_{\alpha}^L - [v_0 + \sum_{i=1}^m v_i (X_{ij})_{\alpha}^U] \leq 0, \quad j = 1, \dots, n,$$

$$\sum_{r=1}^t u_r (Y_{rj})_{\alpha}^U - [v_0 + \sum_{i=1}^m v_i (X_{ij})_{\alpha}^L] \leq 0, \quad j = 1, \dots, n,$$

$$u_r, v_i \geq \varepsilon > 0, \quad v_0 \text{ kısıtsız.}$$
(5.12a)

$$(E_{j_0})_{\alpha}^U = \text{enb} \sum_{r=1}^t u_r (Y_{rj_0})_{\alpha}^U$$

kısıtlar:

$$v_0 + \sum_{i=1}^m v_i (X_{ij_0})_{\alpha}^L = 1$$

$$\sum_{r=1}^t u_i (Y_{rj})_{\alpha}^U - [v_0 + \sum_{i=1}^m v_i (X_{ij})_{\alpha}^L] \leq 0, \quad j = 1, \dots, n,$$

$$\sum_{r=1}^t u_r (Y_{rj})_{\alpha}^L - [v_0 + \sum_{i=1}^m v_i (X_{ij})_{\alpha}^U] \leq 0, \quad j = 1, \dots, n,$$

$$u_r, v_i \geq \varepsilon > 0, \quad v_0 \text{ kısıtsız.}$$
(5.12b)

Yukarıdaki formülasyonlarda j_0 indisi, etkinliği ölçülen karar birimini temsil etmektedir. Elde edilen $(E_{j_0})_{\alpha}^L$ ve $(E_{j_0})_{\alpha}^U$, j_0 karar birimin ilgili α seviyesindeki etkinlik değerinin alt ve üst sınırları, söz konusu karar biriminin etkinlik değerinin üyelik fonksiyonunun belirlenmesinde kullanılmaktadır.

5.4 Bulanık VZA: Algısal bir değerlendirme yöntemi

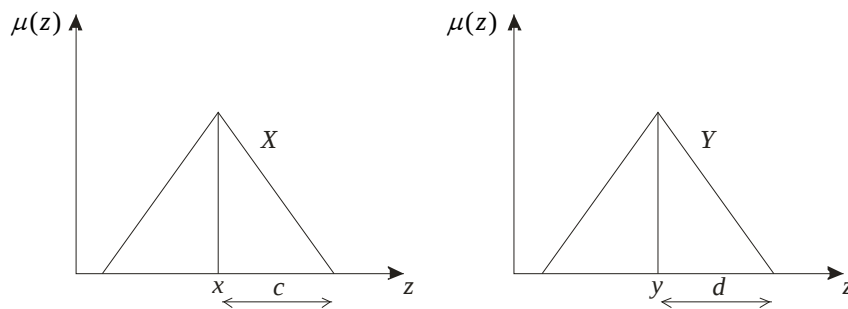
Guo ve Tanaka [20] tarafından öne sürülen modelde, simetrik üçgen bulanık sayılarla ifade edilen girdi ve çıktı değerleri kullanılarak, performansı ölçülen karar biriminin etkinlik değerinin alt, üst ve orta noktaları bulunmaktadır. Bu değerlerden yola çıkılarak ilgili karar biriminin bulanık üçgen üyelik fonksiyonu belirlenmektedir [20]. Temel VZA Formülasyonu olan CCR formülasyonundaki kısıtlar, bulanık doğrusal sistemlerdeki eşitlik ve eşitsizlik formüllerinden yararlanılarak yeniden tanımlanmakta ve model doğrusal matematiksel programlama çözüm yöntemlerine uygun hale getirilmektedir.

5.4.1 CCR Temelli Bulanık Veri Zarflama Formülasyonu

CCR modelindeki girdi ve çıktılar bulanık sayılarla ifade edildiğinde model aşağıdaki şekli alır:

$$\begin{aligned} \text{enb } & u^t Y_{j_0} \\ \text{kısıtlar:} \\ & v^m X_{j_0} \approx \tilde{1}, \\ & u^t Y_j < v^m X_j, \quad j = 1, \dots, n, \\ & u \geq 0, \\ & v \geq 0. \end{aligned} \tag{5.13}$$

Burada $X_j = (x_j, c_j)$ ve $Y_j = (y_j, d_j)$ sırasıyla t boyutlu girdi ve m boyutlu çıktı vektörlerini ifade etmektedir. Simetrik üçgen bulanık sayılar olarak tanımlanan bu girdi ve çıktılarda x ve y sırasıyla girdi ve çıktılarının orta noktalarını, c ve d ise orta noktadan yayılmaları göstermektedir (bkz. Şekil 5.1).

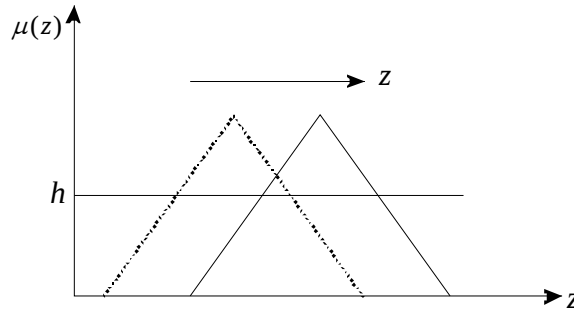


Şekil 5.1 : Simetrik üçgen bulanık girdi ve çıktı

Bulanık $\tilde{1}$ sayısı ise $\tilde{1} = (1, e)$ şeklinde tanımlanır. Burada 1, üçgen bulanık sayının orta noktası, önceden belirlenen $e < 1$ ise yayılımını ifade eder.

5.4.2 Bir Bulanık Sayının Enbüyüklenmesi

$Z = (z, w)$, tepe noktası z , yayılımı w olan bir simetrik üçgen bulanık sayı olsun. Z 'nin enbüyüklenmesi $z - (1-h)w$ ve $z + (1-h)w$ 'nin aynı anda enbüyüklenmesiyle sağlanır. Burada h , karar verici tarafından belirlenen olabilirlik seviyesini temsil eder ($0 \leq h \leq 1$). Şekil 5.2'de Z 'nin enbüyüklenmesi grafik olarak ifade edilmektedir.



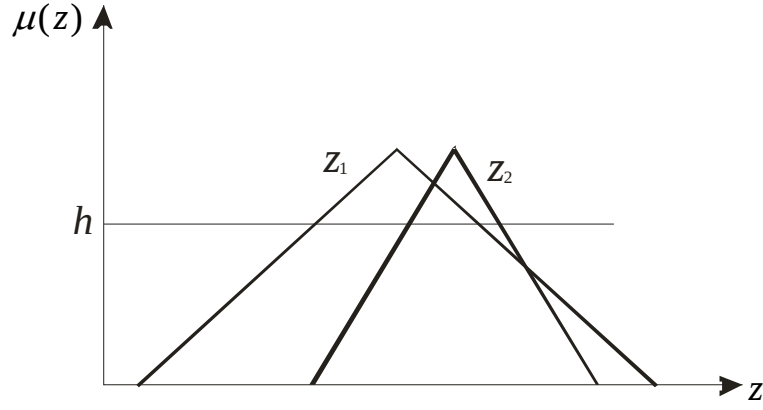
Şekil 5.2 : Bir simetrik üçgen bulanık sayının enbüyüklenmesi.

Enbüyükleme için $\lambda_1(z - (1-h)w) + \lambda_2(z + (1-h)w)$, $\lambda_1, \lambda_2 \geq 0$, $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ fonksiyonun ele alınmaktadır. $\lambda_1 = 1$ olarak alınırsa, kötümser bir yaklaşım söz konusudur çünkü en kötü durum göz önüne alınmıştır. Bu modelde $\lambda_1 = 1$ olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla $\text{enb } Z \Rightarrow \text{enb } (z - (1-h)w)$ olarak yazılabilir.

5.4.3 Bulanık Eşitsizlik

$Z_1 = (z_1, w_1)$ ve $Z_2 = (z_2, w_2)$ olmak üzere iki simetrik üçgen bulanık sayı için;

$Z_1 < Z_2 \Leftrightarrow z_1 - (1-h)w_1 \leq z_2 - (1-h)w_2$ ve $z_1 + (1-h)w_1 \leq z_2 + (1-h)w_2$ olarak tanımlanır. Yani belli bir h seviyesinde Z_1 'in alt ve üst sınırları Z_2 'ninkilerden küçük veya eşit olmalıdır. Bu durum Şekil 5.3'te görülebilir.



Şekil 5.3 : Simetrik üçgen bulanık sayıların eşitsizliği.

5.4.4 Bulanık Eşitlik

(5.13)'teki ilk kısıt olan $v^t X_{j_0} \approx \tilde{1}$ için bulanık bir sayının $\tilde{1}$ bulanık sayısına eşitlenmesinin tanımlanması gerekir. Bu eşitlik, belli bir h seviyesinde, söz konusu bulanık sayının alt sınırının $\tilde{1}$ bulanık sayısının alt sınırına eşitlenmesi, üst sınırının da $\tilde{1}$ bulanık sayısının üst sınırını aşmayacak şekilde enbüyüklenmesiyle sağlanır. Şekil 5.4'de bu durum grafiksel olarak açıklanmaktadır. Dolayısıyla $v^t X_0 \approx \tilde{1}$ bulanık eşitliği aşağıdaki şekilde sağlanır:

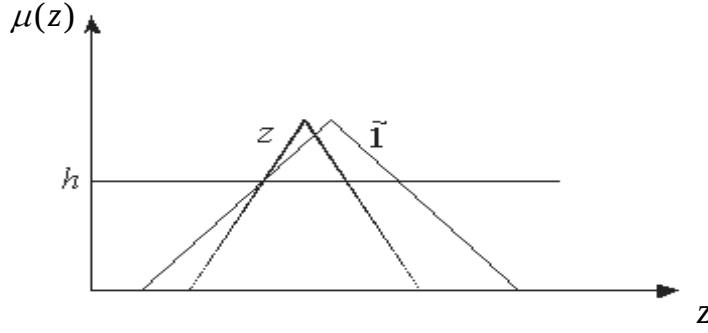
enb $v^m c_0$

kısıtlar :

$$v^m x_0 - (1-h)v^m c_0 = 1 - (1-h)e, \quad (5.14)$$

$$v^m x_0 + (1-h)v^m c_0 \leq 1 + (1-h)e,$$

$$v \geq 0.$$



Şekil 5.4 : Bir simetrik üçgen bulanık sayının $\tilde{1}$ 'e eşitlenmesi.

5.4.5 Doğrusal Model

5.4.2, 5.4.3 ve 5.4.4'teki tanımlardan yola çıkılarak (5.13)'ün doğrusallaştırılmış hali aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\text{enb } u^t y_0 - (1-h)u^t d_0$$

kısıtlar:

$$\text{enb } v^t c_0$$

kısıtlar:

$$v^m x_0 - (1-h)u^t c_0 = 1 - (1-h)e,$$

$$v^m x_0 + (1-h)u^t c_0 \leq 1 + (1-h)e,$$

$$v \geq 0,$$

$$u^t y_j + (1-h)u^t d_j \leq v^m x_j + (1-h)v^t c_j,$$

$$u^t y_j - (1-h)u^t d_j \leq v^m x_j - (1-h)v^t c_j,$$

$$u^t, v^m \geq 0.$$

(5.15)

Bu formülasyon, iki doğrusal programın çözümünü gerektirmektedir. (5.15)'nin optimum sonucuna g_0 dersek, model daha kısa bir biçimde yazılabilir:

$$\text{enb } u^t y_0 - (1-h)u^t d_0$$

kısıtlar:

$$v^m c_0 \geq g_0$$

$$v^m x_0 - (1-h)v^m c_0 = 1 - (1-h)e,$$

$$v^t x_0 + (1-h)v^m c_0 \leq 1 + (1-h)e, \quad (5.16)$$

$$u^t y_j + (1-h)u^t d_j \leq v^m + (1-h)v^m c_j,$$

$$u^t y_j - (1-h)u^t d_j \leq v^m - (1-h)v^m c_j,$$

$$v^t \geq 0,$$

$$u^m \geq 0.$$

Bu modelin çözümüyle bulunan u^* ve v^* değerlerinden yararlanılarak, ilgili karar biriminin bulanık etkinlik değeri $E = (w_\ell, \eta, w_r)$ 'nin alt sınırı, orta noktası ve üst sınırı aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$w_\ell = \eta - \frac{u^{*t}(y_0 - d_0(1-h))}{v^{*m}(x_0 + c_0(1-h))} \quad (5.17)$$

$$\eta = \frac{u^{*t} y_0}{v^{*m} x_0} \quad (5.18)$$

$$w_r = -\eta + \frac{u^{*t}(y_0 + d_0(1-h))}{v^{*m}(x_0 - c_0(1-h))} \quad (5.19)$$

5.5 Saati ve Diğerleri'nin Bulanık Etkinlik Analizi

Saati ve diğerlerinin [22] geliştirdiği Bulanık VZA Modelinde, CCR formülasyonu temel alınmıştır. Modelde girdi ve çıktıların α -kesmelerinin uç noktaları yerine, α -kesmelerinin içinde bir noktanın kullanılması, α -kesmeleri veya olabilirlik dereceleri kullanılarak doğrusallaştırılan veri zarflama analizi formülasyonları, α -kesmelerinin alt ve üst sınır değerlerini kullanmakta ve bunun sonucu olarak aralıkların ara değerleri dikkate alınamamaktadır [22]. α -kesmelerinin üst ve alt sınırlarının kullanılması, aynı yöntemde iyimser-kötümser bakış açıları dikkate alacak veya etkinlik değerinin alt ve üst değerlerini verecek şekilde birden çok formülasyon kullanılmasına yol açmıştır [19,23,24].

Fakat bu yaklaşımın sakıncası, girdi ve çıktıların α -kesmeleri içinde alabileceği değerlerin göz ardı edilmesidir. Saati ve diğerleri ise girdi ve çıktı değerleri için α -kesmelerinin içinde yer alacak şekilde yeni bir değişken tanımlamış ve bu sayede etkinlik değeri hesaplanırken bütün aralığın dikkate alınmasını sağlanmıştır [22]. Saati ve diğerlerinin formülasyonları bu yönüyle diğer formülasyonlara göre büyük bir serbestlik sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak karar birimlerinin etkinlik değeri yüksek çıkmakta, birçok karar birimi etkinlik sınırında yer almaktadır ve bu durum sağlıklı bir sıralama yapmayı güçleştirmektedir.

5.5.1 Kullanılan Formülasyon Formülasyonu

n adet karar birimi, t adet çıktı ve m adet girdinin olduğu durumda Saati ve diğerleri tarafından 2002 yılında geliştirilen bulanık veri zarflama analizi formülasyonu aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\begin{aligned} \text{enb } h_0 &= \sum_{r=1}^t u_r \hat{y}_{rj_0} \\ \text{kısıtlar:} \\ \sum_{i=1}^m v_i \hat{x}_{ij_0} &= 1 \\ \sum_{r=1}^t u_r \hat{y}_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i \hat{x}_{ij} &\leq 0, & j = 1, \dots, n & \quad (5.20) \\ \alpha x_{ij}^M + (1-\alpha)x_{ij}^L &\leq \hat{x}_{ij} \leq \alpha x_{ij}^M + (1-\alpha)x_{ij}^R, & j = 1, \dots, n \text{ ve } i = 1, \dots, n \\ \alpha y_{rj}^M + (1-\alpha)y_{rj}^L &\leq \hat{y}_{rj} \leq \alpha y_{rj}^M + (1-\alpha)y_{rj}^R, & j = 1, \dots, n \text{ ve } r = 1, \dots, t \\ u_r &\geq 0, & r = 1, \dots, t \\ v_i &\geq 0, & i = 1, \dots, m. \end{aligned}$$

Yukarıdaki formülasyonda, $\hat{x}_{ij}$ j . karar biriminin i . girdisi için α -kesmesi içinde tanımlanan değişkeni ve $\hat{y}_{rj}$ j . karar biriminin r . çıktısı için α -kesmesi içinde tanımlanan değişkeni ifade etmektedir. Formülasyondaki diğer değişkenler aşağıda tanımlanmıştır:

h_0 : etkinliği ölçülen karar biriminin etkinlik değerini,

u_r : r . çıktının ağırlığını,

v_i : i . girdinin ağırlığını,

x_{ij}^M : j . karar biriminin i . bulanık girdisinin en olabilir değerini,

x_{ij}^L : j . karar biriminin i . bulanık girdisinin alt sınırını,

x_{ij}^R : j . karar biriminin i . bulanık girdisinin üst sınırını,

y_{rj}^M : j . karar biriminin r . bulanık çıktısının en olabilir değerini,

y_{rj}^L : j . karar biriminin r . bulanık çıktısının alt sınırını,

y_{rj}^R : j . karar biriminin r . bulanık çıktısının üst sınırını ifade etmektedir.

(5.20)'deki 3. ve 4. kısıtlar, $\hat{x}_{ij}$ ve $\hat{y}_{rj}$ değişkenlerinin içinde yer aldığı α -kesmeleri aralıklarını tanımlamak için modelde yer almaktadır. $\hat{x}_{ij}$ ve $\hat{y}_{rj}$ birer karar değişkeni olduğu için (5.20) formülasyonu doğrusal değildir. Modeli doğrusallaştırmak için aşağıdaki değişken dönüşümleri uygulanır:

$$\begin{aligned}\bar{x}_{ij} &= v_i \hat{x}_{ij} \\ \bar{y}_{rj} &= u_r \hat{y}_{rj}\end{aligned}\tag{5.21}$$

Yukarıdaki değişken dönüşümlerinden sonra model son halini alır:

$$\text{enb } h_0 = \sum_{r=1}^t \bar{y}_{rj_0}$$

kısıtlar:

$$\sum_{i=1}^m \bar{x}_{ij_0} = 1$$

$$\sum_{r=1}^t \bar{y}_{rj} - \sum_{i=1}^m \bar{x}_{ij} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n \tag{5.22}$$

$$v_i (\alpha x_{ij}^M + (1-\alpha)x_{ij}^L) \leq \bar{x}_{ij} \leq v_i (\alpha x_{ij}^M + (1-\alpha)x_{ij}^R), \quad j = 1, \dots, n \text{ ve } i = 1, \dots, m$$

$$u_r (\alpha y_{rj}^M + (1-\alpha)y_{rj}^L) \leq \bar{y}_{rj} \leq u_r (\alpha y_{rj}^M + (1-\alpha)y_{rj}^R), \quad j = 1, \dots, n \text{ ve } r = 1, \dots, t$$

$$u_r \geq 0, \quad r = 1, \dots, t$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m.$$

5.6 VZA ile Etkinlik Değerlendirmeye Bulanık Matematiksel Programlama Yaklaşımı

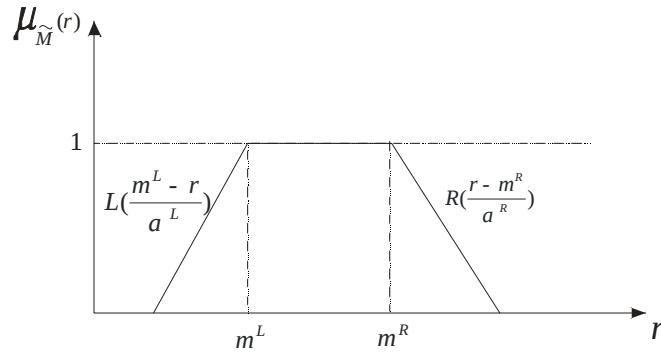
León ve diğerleri [23], Banker ve diğerleri [6] tarafından öne sürülen ve ölçeğe göre değişken getiriler öngören, girdi odaklı BCC modeline dayanarak bir bulanık VZA formülasyonu geliştirmişleridir. Bu formülasyonda LR-bulanık sayılar şeklindeki girdi ve çıktılar modelde kullanılmaktadır.

5.6.1 LR-Bulanık Sayılar

$\tilde{M}$ bir LR-bulanık sayısı olsun ($\tilde{M} = (m^L, m^R, \alpha^L, \alpha^R)_{L,R}$). $\tilde{M}$ 'in üyelik fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\mu_{\tilde{M}}(r) = \begin{cases} L(\frac{m^L - r}{\alpha^L}), & r \leq m^L \\ 1, & m^L \leq r \leq m^R \\ R(\frac{r - m^R}{\alpha^R}), & r \geq m^R \end{cases} \quad (5.23)$$

Burada L ve R referans fonksiyonlarıdır. $L, R: [0, +\infty[\rightarrow [0, 1]$, $\sup(\tilde{M}) = \{r : \mu_{\tilde{M}}(r) \geq 0\}$ ve $L(0) = R(0) = 1$ (Bkz. Şekil 5.5).



Şekil 5.5 : LR-Bulanık Sayısı

5.6.2 LR-Bulanık Sayıların Doğrusal Kombinasyonu

Bir LR-Bulanık sayı kümesi, $\tilde{a}_j = (a_j^L, a_j^R, \alpha_j^L, \alpha_j^R)$ ve $x_j \geq 0$ olsun ($j=1, \dots, n$).

Doğrusal kombinasyon aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\sum_{j=1}^n \tilde{a}_j x_j = \left(\sum_{j=1}^n a_j^L x_j, \sum_{j=1}^n a_j^R x_j, \sum_{j=1}^n \alpha_j^L x_j, \sum_{j=1}^n \alpha_j^R x_j \right)_{L,R} \quad (5.24)$$

Burada L ve R sol ve sağ referans fonksiyonlarını, $\sum_{j=1}^n \tilde{a}_j x_j$ ise $\tilde{a}_1 x_1 \oplus \tilde{a}_2 x_2 \oplus \dots \oplus \tilde{a}_n x_n$ kombinasyonunu ifade eder.

5.6.3 Bulanık Büyüklüklerin Karşılaştırılması

Tanım 5.1: $\tilde{M}$ ve $\tilde{N}$, iki bulanık sayı olsun. $\tilde{M} \succ \tilde{N} \Leftrightarrow \tilde{M} \vee \tilde{N} = \tilde{M}$.

$\forall h \in [0,1]$ için $\tilde{M} \succ \tilde{N} \Leftrightarrow \inf \{s : \mu_{\tilde{M}}(s) \geq h\} \geq \inf \{t : \mu_{\tilde{N}}(t) \geq h\}$ ve $\sup \{s : \mu_{\tilde{M}}(s) \geq h\} \geq \sup \{t : \mu_{\tilde{N}}(t) \geq h\}$ olarak yazılır.

Eğer $\tilde{M}$ ve $\tilde{N}$, $\tilde{M} = (m^L, m^R, \alpha^L, \alpha^R)_{L,R}$ ve $\tilde{N} = (n^L, n^R, \beta^L, \beta^R)_{L',R'}$ şeklinde iki LR-Bulanık sayısı ise ve $L=L'$, $R=R'$ ise $\tilde{M} \succ \tilde{N}$ için:

$$\begin{aligned} m^L &\geq n^L, & m^L - \alpha^L &\geq n^L - \beta^L, \\ m^R &\geq n^R, & m^R + \alpha^R &\geq n^R + \beta^R, \end{aligned} \quad (5.25)$$

yazılabilir. Basitliğine rağmen bazı durumlarda (5.25) bize tam bir fikir vermeyebilir. Bu olumsuzluğu gidermek için aşağıdaki tanımdan yararlanılır:

Tanım 5.2: $\tilde{M}$ ve $\tilde{N}$, iki bulanık sayı, $h \in [0,1]$ olmak üzere bir gerçektek sayı olsun.

$\tilde{M} \succ^h \tilde{N}$ eşitsizliği aşağıdaki durumda sağlanır:

$$\begin{aligned} \forall k \in [h,1] \\ \inf \{s : \mu_{\tilde{M}}(s) \geq k\} &\geq \inf \{t : \mu_{\tilde{N}}(t) \geq k\}, \\ \sup \{s : \mu_{\tilde{M}}(s) \geq k\} &\geq \sup \{t : \mu_{\tilde{N}}(t) \geq k\}, \end{aligned} \quad (5.26)$$

Sınırlı tabanları olan LR-Bulanık sayıları için (5.25) aşağıdaki şekli alır:

$$\begin{aligned} m^L - L^*(k)\alpha^L &\geq n^L - L^*(k)\beta^L \quad \forall k \in [h, 1], \\ m^R - R^*(k)\alpha^R &\geq n^R - R^*(k)\beta^R \quad \forall k \in [h, 1] \end{aligned} \quad (5.27)$$

Burada:

$$L^*(k) = \sup \{z : L(z) \geq k\}, \quad L'^*(k) = \sup \{z : L'(z) \geq k\},$$

$$R^*(k) = \sup \{s : R(s) \geq k\}, \quad R'^*(k) = \sup \{s : R'(s) \geq k\} \text{ olarak tanımlanır.}$$

5.6.4 BCC Temelli Bulanık VZA Modeli

Etkinliği ölçülecek n adet karar birimi ve bunların m adet girdisi, t adet çıktısı olsun.

$$\begin{aligned} \text{Girdi} \quad \text{ve} \quad \text{çıkıtlar} \quad \tilde{x}_{ij} &= (x_{ij}^L, x_{ij}^R, \alpha_{ij}^L, \alpha_{ij}^R)_{L_{rj}, R_{rj}} \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n \quad \text{ve} \\ \tilde{y}_{rj} &= (y_{rj}^L, y_{rj}^R, \beta_{rj}^L, \beta_{rj}^R)_{L'_{rj}, R'_{rj}} \quad r = 1, \dots, t, \quad j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

şeklinde verilen ve aşağıdaki özelliği sağlayan LR-Bulanık sayıları olsun:

$$\begin{aligned} L_{i1} &= \dots = L_{in} = L_i, \quad i = 1, \dots, m, \\ L'_{r1} &= \dots = L'_{rn} = L'_r \quad r = 1, \dots, t, \\ R_{i1} &= \dots = R_{in} = R_i, \quad i = 1, \dots, m, \\ R'_{r1} &= \dots = R'_{rn} = R'_r \quad r = 1, \dots, t. \end{aligned} \quad (5.28)$$

(Üçgen ve trapezoidal bulanık sayılarda (5.28) sağlanmaktadır.)

Bu durumda girdi odaklı BCC modeli aşağıdaki şekilde yazılır:

enk θ_0

kısıtlar:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j \tilde{x}_{ij} &\prec \theta_0 \tilde{x}_{i0}, \quad i = 1, \dots, m, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j \tilde{y}_{rj} &\succ \tilde{y}_{r0}, \quad r = 1, \dots, t, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1 \\ \lambda_j &\geq 0, \quad j = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (5.29)$$

Girdi ve çıktılar LR-Bulanık sayıları olduğu için Tanım 5.1'deki eşitsizlik tanımından yararlanılarak (5.28)'deki bulanık eşitsizlikler yeniden düzenlenir:

enk $\theta_0 A$

kısıtlar:

$$\begin{aligned}
\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^L &\leq \theta_0 x_{i0}^L, \quad i = 1, \dots, m, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^R &\leq \theta_0 x_{i0}^R, \quad i = 1, \dots, m, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^L - \sum_{j=1}^n \lambda_j \alpha_{ij}^L &\leq \theta_0 x_{i0}^L - \theta_0 \alpha_{i0}^L, \quad i = 1, \dots, m, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^R + \sum_{j=1}^n \lambda_j \alpha_{ij}^R &\leq \theta_0 x_{i0}^R + \theta_0 \alpha_{i0}^R, \quad i = 1, \dots, m, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^L &\geq y_{r0}^L; & r = 1, \dots, t, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^R &\geq y_{r0}^R, & r = 1, \dots, t, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^L - \sum_{j=1}^n \lambda_j \beta_{rj}^L &\geq y_{r0}^L - \theta_0 \beta_{r0}^L, & r = 1, \dots, t, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^R + \sum_{j=1}^n \lambda_j \beta_{rj}^R &\geq y_{r0}^R + \theta_0 \beta_{r0}^R, & r = 1, \dots, t, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1 \\
\lambda_j &\geq 0, \quad j = 1, \dots, n.
\end{aligned} \tag{5.30}$$

(5.30)'in optimum değeri ilgili karar birimi (DMU₀) için etkinlik değerini vermektedir. Diğer taraftan karar vericiler her olabilirlik seviyesi (h seviyesi) için karar birimlerinin etkinlik değeri hakkında bilgi sahibi olmak isteyebilir. Bu durumda Tanım 5.2'den yararlanarak (5.30)'ü aşağıdaki olabilirlik seviyelerini göz önüne alan doğrusal programa dönüştürebiliriz:

enk θ_0

kısıtlar:

$$\begin{aligned}
\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^L &\leq \theta_0 x_{i0}^L, \quad i = 1, \dots, m, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^R &\leq \theta_0 x_{i0}^R, \quad i = 1, \dots, m, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^L - L_i^*(h) \sum_{j=1}^n \lambda_j \alpha_{ij}^L &\leq \theta_0 x_{i0}^L - L_i^*(h) \theta_0 \alpha_{i0}^L, \quad i = 1, \dots, m, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^R + R_i^*(h) \sum_{j=1}^n \lambda_j \alpha_{ij}^R &\leq \theta_0 x_{i0}^R + R_i^*(h) \theta_0 \alpha_{i0}^R, \quad i = 1, \dots, m, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^L &\geq y_{r0}^L, \quad r = 1, \dots, t, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^R &\geq y_{r0}^R; \quad r = 1, \dots, t, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^L - L_r^*(h) \sum_{j=1}^n \lambda_j \beta_{rj}^L &\geq y_{r0}^L - L_r^*(h) \beta_{r0}^L, \quad r = 1, \dots, t, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^R + R_r^*(h) \sum_{j=1}^n \lambda_j \beta_{rj}^R &\geq y_{r0}^R + R_r^*(h) \beta_{r0}^R, \quad r = 1, \dots, t, \\
\sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1, \\
\lambda_j &\geq 0, \quad j = 1, \dots, n.
\end{aligned} \tag{5.31}$$

(5.31)'nin optimum sonucu $\theta_0^*(h)$, h olabilirlik seviyesinde ilgili karar birimi (DMU₀) için etkinlik değerini vermektedir. Her h değeri için modeli çözüm, olabilirlik seviyesi değıştikçe, karar birimlerinin etkinlik değerlerinin nasıl değıştiğı bu formülasyon sayesinde gözlemlenebilir. Görüldüğü üzere $h=0$ olduğu zaman (5.30) ve (5.31) aynı formülasyon haline gelir. Karar birimlerinin etkinlikleri olabilirlik seviyesinin azalan fonksiyonudur. Bütün olabilirlik seviyeleri için model çözüldükten sonra ilgili karar birimin etkinliğı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\tilde{E}f = \left\{ \left(DMU_i, \mu_{\tilde{E}f}(DMU_i) \right), \quad i = 1, \dots, n \right\} \tag{5.32}$$

Burada $\tilde{E}f$ 'nin üyelik fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\mu_{\tilde{E}f}(DMU_i) = \begin{cases} 0 & \theta_i^*(h) \neq 1 \\ \sup \{h : \theta_i^*(h) = 1\} & \theta_i^*(h) = 1 \end{cases} \quad (5.33)$$

5.6.5 Özel Durum: Üçgen Bulanık Veriler

Pratikte üçgen bulanık veriler uygulamalarda sıkça rastlanan bir durumdur. Girdi ve çıktılar simetrik üçgen bulanık sayılar şeklinde ifade edilmişse, (5.24) çok daha kısa ve basit bir şekilde yeniden düzenlenebilir. $\tilde{x}_{ij} = (x_{ij}, \alpha_{ij})$, $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, n$ şeklinde verilen girdiler ve $\tilde{y}_{rj} = (y_{rj}, \beta_{rj})$, $r = 1, \dots, s$, $j = 1, \dots, n$ şeklinde verilen çıktılar söz konusu olduğunda $L_i^*(h) = R_i^*(h) = L_r^*(h) = R_r^*(h) = 1 - h$, $0 \leq h \leq 1$ yazılabilir. fark edileceği üzere bu durumda formülasyon, Guo ve Tanaka'nın [20] geliştirdiği modelin duali haline gelir. Bu formülasyon aşağıda verilmiştir:

enk θ_0

kısıtlar:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} - (1-h) \sum_{j=1}^n \lambda_j \alpha_{ij} &\leq \theta_0 x_{i0} - (1-h) \theta_0 \alpha_{i0}, & i = 1, \dots, m, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + (1-h) \sum_{j=1}^n \lambda_j \alpha_{ij} &\leq \theta_0 x_{i0} + (1-h) \theta_0 \alpha_{i0}, & i = 1, \dots, m, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - (1-h) \sum_{j=1}^n \lambda_j \beta_{rj} &\geq y_{r0} - (1-h) \beta_{r0}, & r = 1, \dots, t, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} + (1-h) \sum_{j=1}^n \lambda_j \beta_{rj} &\geq y_{r0} + (1-h) \beta_{r0}^R, & r = 1, \dots, t, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1, \\ \lambda_j &\geq 0, \quad j = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (5.34)$$

5.7 Bulanık VZA: Bir olabilirlik yaklaşımı

Lertworasirikul ve diğerleri [24] tarafından geliştirilen bu modelde bulanık kümelerle ifade edilen belirsiz veriler kullanan bir VZA formülasyonu önerilmiştir. Bulanık kısıtlar, bulanık doğrusal programa ve bulanık küme sıralama yöntemleriyle çözülmüş, ayrıca kısıtların bulanık olaylar olarak ele alındığı bir olabilirlik yaklaşımı kullanılmıştır.

5.7.1 Bulanık CCR Modeli (FCCR)

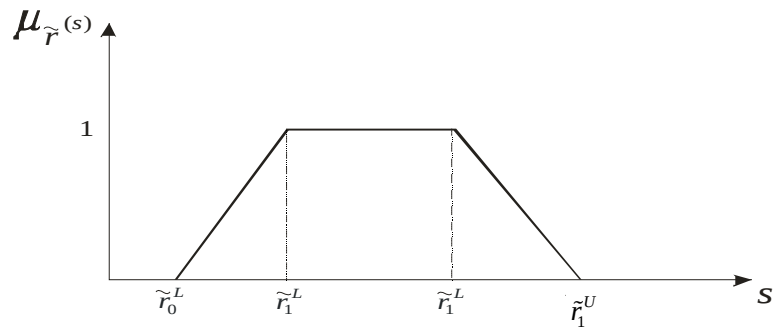
Geçmiş yıllarda, VZA modellerinde, belirsiz ve sözel veriler için bulanık kümeler teorisi önerilmiştir. Bulanık VZA modelleri, bulanık doğrusal programlamadan yararlanmaktadır. Aşağıda bulanık katsayılara göre düzenlenmiş CCR modeli verilmiştir:

$$\begin{aligned}
 &\text{enb } u^t \tilde{y}_0 \\
 &\text{kısıtlar:} \\
 &v^m \tilde{x}_0 = 1, \\
 &-v^m \tilde{X} + u^t \tilde{Y} \leq 0, \\
 &u, v \geq 0.
 \end{aligned} \tag{5.35}$$

Bu formülasyonda $\tilde{x}_0$ ve $\tilde{y}_0$ performansı ölçülen karar biriminin girdi ve çıktılarını, $\tilde{X}$ ve $\tilde{Y}$ bütün karar birimlerinin girdi ve çıktılarını, karar değişkenleri u girdilerin ağırlıklarını, v ise çıktılarının ağırlıklarını temsil etmektedir.

5.7.2 Olabilirlik Temelli VZA Modeli

Olabilirlik Temelli CCR (PCCR) modelinde, kısıtlar belli olabilirlik seviyelerine göre değerlendirilirler. Lertworasirikul ve diğerleri, trapezoidal bulanık sayıların kullanıldığı bir olabilirlik temelli bir formülasyon geliştirmişlerdir. Burada kısıtlar, gerçekleşme ihtimalleri α ve β olabilirlik seviyeleriyle belirlenmiş bulanık olaylar olarak ele alınmaktadır. Modelde kullanılan trapezoidal bulanık sayılar $\tilde{r} = (\tilde{r}_0^L, \tilde{r}_1^L, \tilde{r}_1^U, \tilde{r}_0^U)$ şeklinde ifade edilirler. Şekil 5.6'da modelde kullanılan bulanık trapezoidal sayının üyelik fonksiyonunun grafiği verilmiştir.



Şekil 5.6 : Trapezoidal bulanık sayının üyelik fonksiyonu

PCCR Modeli:

enb $\bar{f}$

kısıtlar:

$$\begin{aligned}
 \pi(\mathbf{u}^T \tilde{\mathbf{y}}_0 \geq \bar{f}) &\geq \beta, \\
 \pi(\mathbf{u}^T \tilde{\mathbf{x}}_0 = 1) &\geq \alpha_0, \\
 \pi(-\mathbf{v}^T \tilde{\mathbf{X}} + \mathbf{u}^T \tilde{\mathbf{Y}} \leq 0) &\geq \alpha, \\
 \mathbf{u}, \mathbf{v} &\geq 0.
 \end{aligned} \tag{5.36}$$

(5.29)'da, ilk kısıtın gerçekleşme olabilirliği β , ikinci kısıtın gerçekleşme olabilirliği α_0 , diğer kısıtların gerçekleşme olabilirliği ise α 'dır. Diğer taraftan trapezoidal bulanık sayılar söz konusu olduğunda aşağıdaki önermeler gerçekleşir:

$$\begin{aligned}
 \pi(\tilde{r}_1 + \dots + \tilde{r}_n \leq b) &\geq \alpha \Leftrightarrow (1-\alpha) \left[(\tilde{r}_1)_0^L + \dots + (\tilde{r}_n)_0^L \right] + \alpha \left[(\tilde{r}_1)_1^L + \dots + (\tilde{r}_n)_1^L \right] \leq b, \\
 \pi(\tilde{r}_1 + \dots + \tilde{r}_n \geq b) &\geq \alpha \Leftrightarrow (1-\alpha) \left[(\tilde{r}_1)_0^U + \dots + (\tilde{r}_n)_0^U \right] + \alpha \left[(\tilde{r}_1)_1^U + \dots + (\tilde{r}_n)_1^U \right] \geq b, \\
 \pi(\tilde{r}_1 + \dots + \tilde{r}_n = b) &\geq \alpha \Leftrightarrow (1-\alpha) \left[(\tilde{r}_1)_0^L + \dots + (\tilde{r}_n)_0^L \right] + \alpha \left[(\tilde{r}_1)_1^L + \dots + (\tilde{r}_n)_1^L \right] \leq b \text{ ve} \\
 &\quad (1-\alpha) \left[(\tilde{r}_1)_0^U + \dots + (\tilde{r}_n)_0^U \right] + \alpha \left[(\tilde{r}_1)_1^U + \dots + (\tilde{r}_n)_1^U \right] \geq b.
 \end{aligned} \tag{5.37}$$

Böylece PCCR modeli doğrusal programa modeli haline dönüştürülür:

enb $\bar{f}$

kısıtlar:

$$\begin{aligned}
 (1-\beta)(\mathbf{u}^T \tilde{\mathbf{y}}_0)_0^U + \beta(\mathbf{u}^T \tilde{\mathbf{y}}_0)_1^U &\geq \bar{f}, \\
 (1-\alpha_0)(\mathbf{v}^T \tilde{\mathbf{x}}_0)_0^U + \alpha_0(\mathbf{v}^T \tilde{\mathbf{x}}_0)_1^U &\geq 1, \\
 (1-\alpha_0)(\mathbf{v}^T \tilde{\mathbf{x}}_0)_0^L + \alpha_0(\mathbf{v}^T \tilde{\mathbf{x}}_0)_1^L &\leq 1, \\
 (1-\alpha)((-\mathbf{v}^T \tilde{\mathbf{X}})_0^L + (\mathbf{u}^T \tilde{\mathbf{Y}})_0^L) + \alpha((-\mathbf{v}^T \tilde{\mathbf{X}})_1^L + (\mathbf{u}^T \tilde{\mathbf{Y}})_1^L) &\leq 0, \\
 \mathbf{u}, \mathbf{v} &\geq 0.
 \end{aligned} \tag{5.37}$$

6. DUAL BULANIK VERİ ZARFLAMA ANALİZİ (DBVZA)

Klasik veri zarflama analizi (CCR modeli [1]) formülasyonunun en büyük dezavantajlarından biri, modelin kullanılan verilere karşı çok duyarlı olmasıdır. Performans değerlerinin ölçümünde kullanılan etkinlik sınırları, verilerdeki hata ve belirsizliklerden çok etkilenir. Bu nedenle VZA ile doğru bir performans değerlendirmesi yapabilmek için eldeki verilerin kesin ve hatasız olması gerekir. Öte yandan kullanılmak istenen veriler sözel olarak ifade ediliyor olabilir. (örneğin: “eski” donanım, “iyi” servis) [19].

Bulanık veriler kullanan VZA (Bulanık VZA), gerçek hayattaki durumları, klasik VZA’ya göre daha gerçekçi bir şekilde ifade eder. Aynı zamanda, bulanık kümeler teorisi, sözel olarak ifade edilen verilerin VZA’da direkt olarak kullanılmasına olanak tanır.

Bulanık veriler kullanan VZA formülasyonlarında, model, olasılık seviyeleri ve α -kesmeleri gibi yaklaşımlardan yararlanarak doğrusallaştırılmaktadır. Modeldeki eşitlik ve eşitsizlikler ise Bulanık Kümeler Teorisinden yararlanılarak tanımlanmakta ve modelin doğrusal programlama kullanılarak çözülmesine olanak sağlanmaktadır. Kısıtlardaki eşitlik ve eşitsizliklerin değişik şekilde tanımlanması, farklı sıralama yöntemleri, olasılık ve α -kesmeleri yaklaşımları bir çok Bulanık Veri Zarflama Analizi formülasyonunun ortaya çıkmasına neden olmuştur [19-24,32]. Bu formülasyonların bazıları 5. Bölüm’de ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Kullanılan birçok yöntemde, bulanık VZA modeli, α -kesmeleri [19,22] veya olabilirlik seviyelerine [23,24] göre parametrik doğrusal programlama modellerine dönüştürülmektedir. Yine birçok modelde bulanık girdi ve çıktının α -kesmelerinin uç noktaları kullanılmaktadır. Bu yaklaşım formülasyonları oldukça basitleştirmesine rağmen birçok verinin kaybolmasına yol açmaktadır. Herhangi bir bulanık girdi ve çıktının, herhangi bir α -kesmesi veya olasılık seviyesi bir aralık belirlemekte ve formülasyonda bu aralığın sadece uç noktalarının kullanılması, aradaki değerlerin

dikkate alınmamasına yol açmaktadır. Ayrıca aralıkların uç değerlerinin kullanılması, hangi uç değerin kullanıldığına göre performansı ölçülen karar birimlerinin etkinlik değerinin değişmesine yol açmaktadır. Bir karar birimi aynı girdi ve çıktı değerleriyle birden fazla etkinlik değerine sahip olabilir. Bazı formülasyonlar, girdi aralıklarının alt sınırlarını, çıktı aralıklarının üst sınırlarını kullanarak iyimser bir yaklaşım öngörürken bunun tam tersini uygulamak aynı karar birimi için farklı bir etkinlik değerine yol açacaktır [19,24].

Saati ve diğerleri [22] tarafından geliştirilen yöntemde ise α -kesmelerinin alt ve üst sınırlarını kullanmak yerine, söz konusu aralık içinde, kısıtları sağlayan ve ilgili karar biriminin performansını enbüyükleyecek edecek bir nokta bulunmaktadır. Bu nokta formülasyona yeni bir değişken olarak katılmaktadır. Bu şekilde her karar birimi için bir adet etkinlik skoruna ulaşılmakla kalmayıp, α -kesmesinin bütün değerleri performans ölçümünde kullanılmaktadır. Saati ve diğerlerinin geliştirdiği Bulanık VZA Modelinde, CCR formülasyonunun primal formu temel alınmıştır. Bu modelde karar birimlerinin performansları, hiçbir karar biriminin etkinlik değeri 1'i aşmayacak şekilde enbüyüklenmiştir. Modelde girdi ve çıktıların α -kesmelerinin uç noktaları yerine, α -kesmelerinin içinde bir noktanın kullanılması diğer formülasyonlara göre büyük bir serbestlik sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak karar birimlerinin etkinlik değeri yüksek çıkmakta, özellikle 0'a yakın α seviyelerinde birçok karar birimi etkinlik sınırında yer almaktadır ve bu durum sağlıklı bir sıralama yapmaya güçleştirmektedir.

CCR modelinin dual formunu temel alan Dual Bulanık Veri Zarflama Analizi (DBVZA), bir enbüyükleme değil enküçükleme problemi olduğundan bu soruna çözüm teşkil etmektedir. Bu şekilde karar birimlerinin etkinlik değerleri görece olarak daha düşük çıkmaktadır. Etkinlik sınırında yer alan karar birimlerinin sayısının az olması, herhangi başka bir sıralama yöntemi kullanmaya gerek kalmadan, tüm karar birimlerinin etkinlik değerlerine göre sıralanmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca modelde α -kesmelerinin sadece 1 veya 2 noktasının değil, bütün α -kesmesi aralığının bulanık bir girdi veya çıktı için kullanılması daha gerçekçi bir analiz yapılmasına olanak sağlamaktadır.

6.1 CCR Formülasyonunun Dual Bulanık Formu

n adet karar birimi, m adet girdi ve t adet çıktının olduğu durumda CCR modelinin bulanık dual formu aşağıdaki şekilde yazılır:

enk Z_0

kısıtlar:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{ij_0} Z_0 - \sum_{j=1}^n \tilde{x}_{ij} \lambda_j &\geq 0, \quad i = 1, \dots, m, \\ \sum_{j=1}^n \tilde{y}_{rj} \lambda_j &\geq \tilde{y}_{rj_0}, \quad r = 1, \dots, t, \\ \lambda_j &\geq 0, \quad j = 1, \dots, n, \\ Z_0 &\text{ kısıtsız.} \end{aligned} \tag{6.1}$$

Yukarıdaki formülasyonda:

Z_0 : etkinliği ölçülen karar biriminin etkinlik değerini,

$\tilde{x}_{ij}$: j . karar biriminin i . bulanık girdisini,

$\tilde{y}_{rj}$: j . karar biriminin r . bulanık çıktısını,

λ_j : j . karar biriminin çözümdeki ağırlığını,

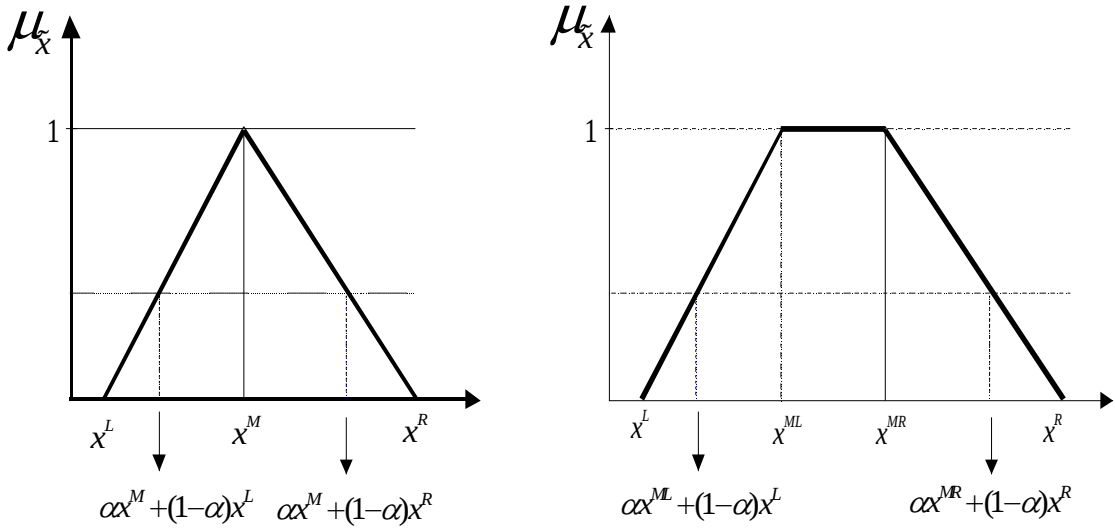
t : çıktı sayısını,

m : girdi sayısını,

n : karar birimi sayısını ifade etmektedir.

6.2 Bulanık Girdi ve Çıktılar

DBVZA formülasyonu, üyelik fonksiyonları doğrusal ve içbükey olan tüm bulanık girdi ve çıktılar için kullanılabilir. Bu bölümde örnek olarak üçgen ve trapezoidal bir bulanık girdi ve bunların α -kesmeleri şekil üzerinde incelenecektir.



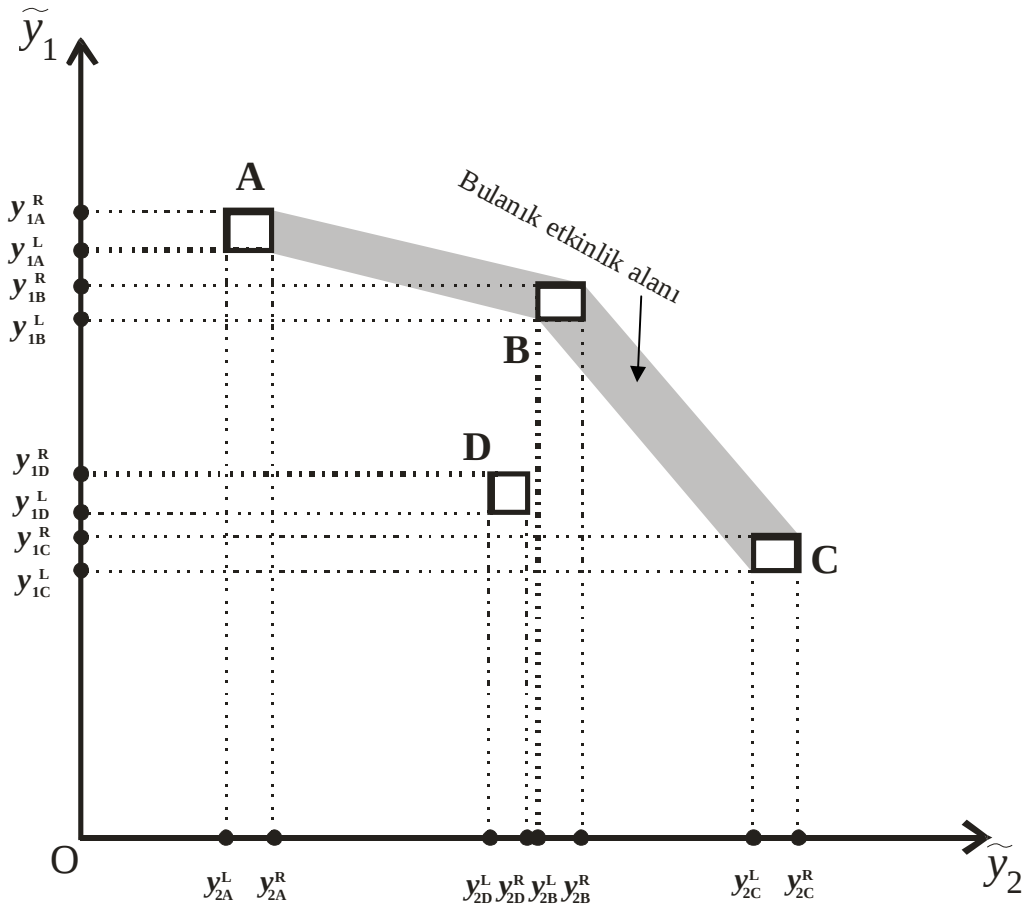
Şekil 6.1 : Üçgen ve trapezoidal bulanık girdi ve α -kesmeleri

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi, bulanık üçgen bir girdinin tabanının sol sınırı, orta noktası ve sağ sınırı sırasıyla x^L , x^M ve x^R ile ifade edilmektedir. Trapezoidal bir bulanık girdide ise, α seviyesi 0 iken sağ ve sol sınırlar sırasıyla x^L ve x^R , α seviyesi 1 iken ise sağ ve sol sınırlar sırasıyla x^{ML} ve x^{MR} olarak tanımlanmıştır.

Yine şekilde görüleceği gibi bir üçgen bulanık girdi için herhangi bir α seviyesinde α -kesmesi $[\alpha x^M + (1-\alpha)x^L, \alpha x^M + (1-\alpha)x^R]$, trapezoidal bir bulanık girdi için ise $[\alpha x^L + (1-\alpha)x^{ML}, \alpha x^{MR} + (1-\alpha)x^R]$ aralıklarıdır. Bulanık çıktılar için de aralıklar benzer şekilde tanımlanır. Dual Bulanık Veri Zarflama Analizi formülasyonunda bulanık girdi ve çıktılar bu aralıklar içinde herhangi bir değeri alabilecek birer değişken olarak tanımlanmakta ve bu şekilde analizde aralık içindeki bütün değerlerin dikkate alınması sağlanmaktadır. Bu değişkenler bulanık girdiler için $\hat{x}_{ij}$, bulanık çıktılar için $\hat{y}_{rj}$ ise şeklinde ifade edilir. Modelde, bu değişkenlerin aralık içindeki sayısal değerleri, etkinliği ölçülen karar birimi için optimum değeri alacak şekilde belirlenmektedir.

6.3 Bulanık Etkinlik Alanı

Girdi ve çıktı değerlerinin bulanık sayılarla ifade edildiği durumlarla, herhangi bir α -kesmesi için bir girdinin veya çıktının değeri bir nokta ile değil, genişliği α seviyesi tarafından belirlenen bir aralık olarak ifade edilmelidir. α -kesmesinin değeri 0 iken, bu aralık girdiler için $[x^L, x^R]$ ve çıktılar için $[y^L, y^R]$ şeklinde ifade edilebilir. $\alpha = 0$ iken girdi ve çıktıların mümkün olan değerleri için en geniş aralık söz konusudur. $0 < \alpha < 1$ iken bu aralık $[\alpha x^M + (1-\alpha)x^L, \alpha x^M + (1-\alpha)x^R]$ şeklinde ifade edilir. $\alpha = 1$ iken, başka bir deyişle bulanık üyelik fonksiyonunun değeri 1 olduğunda bulanık girdi ve çıktı değerleri sırasıyla x^M ve y^M şeklinde tek bir noktayla ifade edilebilir ki bu durumda kesin sayılı girdi ve çıktılar söz konusudur.



Şekil 6.2 : Bulanık etkinlik alanı

Karar verici, kendi belirlediği bir esneklik derecesini, α seviyesini seçerek uygulayabilir. Sıfıra yakın α seviyelerinde girdi ve çıktılar için daha geniş aralıklar, dolayısıyla daha esnek bir formülasyon kullanılabilir. Belirsizliğin yüksek olduğu

durumlarda α seviyesi sıfıra yakın olmalıdır. Belirsizlik azaldıkça daha yüksek α seviyeleri kullanılarak girdi ve çıktı aralıklarının sınırları x^M ve y^M 'ye daha yakın olacak şekilde daraltılabilir. Girdi ve çıktı değerleri bulanık aralıklar halinde olduğu durumlarda %100 etkin karar birimleri tarafından oluşturulan etkinlik sınırı bulanıklaşacaktır. Bu durumda bir etkinlik sınırı değil, bulanık bir etkinlik alanı oluşacaktır. Şekil 6.2’de bulanık girdi ve çıktılara sahip karar birimleri tarafından oluşturulan bir bulanık etkinlik alanı görülmektedir.

Sekil 6.2’deki A, B, C ve D karar birimleri aynı seviyede girdi kullanarak $\tilde{y}_1$ ve $\tilde{y}_2$ bulanık çıktıları üretmektedirler. $\alpha = 0$ iken, “A” karar biriminin birinci bulanık çıktısı için α -kesmesi aralığı $[y_{1A}^L, y_{1A}^R]$, ikinci bulanık çıktısı için $[y_{2A}^L, y_{2A}^R]$ şeklinde tanımlanmaktadır. B, C ve D karar birimlerinin bulanık çıktıları da benzer şekilde tanımlanır. Şekil 6.2’de görüldüğü gibi, çıktılar bulanık sayılarla ifade edildiğinde karar birimleri grafikte bir nokta ile değil, bir dörtgen ile gösterilmektedir. Şekil 6.2’deki gri alan, etkinlik sınırın çizilebileceği bir bulanık etkinlik alanını göstermektedir. Burada A, B ve C karar birimleri bulanık etkinlik alanını oluşturmaktadır. D firması ise bu alanın altında kaldığı için, başka bir deyişle aynı girdi seviyesinde A, B ve C firmalarına göre daha az çıktı ürettiği için etkin olmayan bir karar birimidir.

Etkinlik sınırının bulanık etkinlik alanının içindeki konumu DBVZA’da bulanık girdi ve çıktılar için α -kesmesi aralıkları içinde yer alacak şekilde tanımlanan $\hat{x}_{ij}$ ve $\hat{y}_{rj}$ değişkenlerinin optimum değerlerine göre değişir. Bu durumda D karar biriminin etkinliği bulanık etkinlik alanında yer alan karar birimlerinin bulanık girdi ve çıktıları için tanımlanan $\hat{x}_{ij}$ ve $\hat{y}_{rj}$ değişkenlerinin optimum değerlerine göre belirlenecektir. Şekil 6.2’den de fark edileceği gibi, D karar biriminin etkinlik değeri yalnızca bulanık etkinlik alanı içinde yer alan etkinlik sınırının konumuna bağlı değildir. D karar biriminin etkinlik değeri, kendi bulanık girdi ve çıktıları için tanımlanan $\hat{x}_{iD}$ ve $\hat{y}_{rD}$ değişkenlerinin optimum değerlerine göre de değişmektedir. Bu şekilde DBVZA ile karar birimleri için aralık içindeki bütün değerleri dikkate alan bir etkinlik değeri hesaplanmaktadır.

6.4 Dual Bulanık Veri Zarflama Analizi Formülasyonu

DBVZA formülasyonunda, herhangi bir α seviyesi için $\tilde{x}_{ij}$ bulanık girdisi, α -kesmesinin içinde yer alan bir $\hat{x}_{ij}$ değişkeni ve $\tilde{y}_{rj}$ bulanık çıktısı, α -kesmesinin içinde yer alan bir $\hat{y}_{rj}$ değişkeni olarak tanımlanır ve formülasyona aralıkları tanımlayan yeni kısıtlar eklenir. Aynı değişiklikler çıktılar için de uygulanır. Bu değişikliklerden sonra model aşağıdaki şekli alır:

enk Z_0

kısıtlar:

$$\begin{aligned}
 Z_0 \hat{x}_{ij_0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \hat{x}_{ij} &\geq 0, & i = 1, \dots, m, \\
 -\hat{y}_{rj_0} + \sum_{j=1}^n \lambda_j \hat{y}_{rj} &\geq 0, & r = 1, \dots, t, \\
 \alpha x_{ij_0}^M + (1-\alpha)x_{ij_0}^L &\leq \hat{x}_{ij_0} \leq \alpha x_{ij_0}^M + (1-\alpha)x_{ij_0}^R, & i = 1, \dots, m, \\
 \alpha y_{rj_0}^M + (1-\alpha)y_{rj_0}^L &\leq \hat{y}_{rj_0} \leq \alpha y_{rj_0}^M + (1-\alpha)y_{rj_0}^R, & r = 1, \dots, t, \\
 \alpha x_{ij}^M + (1-\alpha)x_{ij}^L &\leq \hat{x}_{ij} \leq \alpha x_{ij}^M + (1-\alpha)x_{ij}^R, & i = 1, \dots, m \text{ ve } j = 1, \dots, n, \\
 \alpha y_{rj}^M + (1-\alpha)y_{rj}^L &\leq \hat{y}_{rj} \leq \alpha y_{rj}^M + (1-\alpha)y_{rj}^R, & r = 1, \dots, t \text{ ve } j = 1, \dots, n, \\
 \lambda_j &\geq 0, & j = 1, \dots, n, \\
 Z_0 &\text{ kısıtsız.}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

(6.2)'deki 3, 4, 5 ve 6. kısıtlar, yeni tanımlanan $\hat{x}$ ve $\hat{y}$ değişkenlerinin içinde yer alacağı α -kesmelerini tanımlamak için formülasyonda bulunmaktadır. (6.2) formülasyonu üçgen bulanık girdi ve çıktılar için kullanılmaktadır. Trapezoidal bulanık veriler için 3, 4, 5 ve 6. kısıtlarda küçük değişiklikler gerekmektedir. Trapezoidal bulanık veriler için formülasyon aşağıdaki şekilde yazılabilir:

enk Z_0

kısıtlar:

$$\begin{aligned}
Z_0 \hat{x}_{ij_0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \hat{x}_{ij} &\geq 0, & i = 1, \dots, n, \\
-\hat{y}_{rj_0} + \sum_{j=1}^n \lambda_j \hat{y}_{rj} &\geq 0, & r = 1, \dots, t, \\
\alpha x_{ij_0}^{ML} + (1-\alpha)x_{ij_0}^L &\leq \hat{x}_{ij_0} \leq \alpha x_{ij_0}^{MR} + (1-\alpha)x_{ij_0}^R, & i = 1, \dots, m, \\
\alpha y_{rj_0}^{ML} + (1-\alpha)y_{rj_0}^L &\leq \hat{y}_{rj_0} \leq \alpha y_{rj_0}^{MR} + (1-\alpha)y_{rj_0}^R, & r = 1, \dots, t, \\
\alpha x_{ij}^{ML} + (1-\alpha)x_{ij}^L &\leq \hat{x}_{ij} \leq \alpha x_{ij}^{MR} + (1-\alpha)x_{ij}^R, & i = 1, \dots, m \text{ ve } j = 1, \dots, n, \\
\alpha y_{rj}^{ML} + (1-\alpha)y_{rj}^L &\leq \hat{y}_{rj} \leq \alpha y_{rj}^{MR} + (1-\alpha)y_{rj}^R, & r = 1, \dots, t \text{ ve } j = 1, \dots, n, \\
\lambda_j &\geq 0, & j = 1, \dots, n, \\
Z_0 &\text{ kısıtsız.}
\end{aligned} \tag{6.3}$$

Üçgen veya trapezoidal bulanık veriler için kullanılan formülasyonlar arasındaki tek fark, $\hat{x}$ ve $\hat{y}$ değişkenlerinin içinde yer alacağı α -kesmelerini tanımlanmasında görülmektedir. Enerji kaynaklarının etkinliğinin ölçülmesi uygulamasında bulanık veriler üçgen formda olduğu için, tezin bundan sonraki bölümlerinde üçgen bulanık veriler için geliştirilen formülasyon kullanılacaktır. Gerektiğinde iki veri tipi için kullanılan formülasyonlar arasında geçiş yapmak oldukça basittir.

Görüldüğü gibi (6.2) ve (6.3) formülasyonları doğrusal değildir. Bu formülasyonlardaki $Z_0 \hat{x}_{ij_0}$, $\lambda_j \hat{y}_{rj}$ ve $\lambda_j \hat{x}_{ij}$ çarpımları doğrusallığı bozmaktadır. Bu yüzden bu ifadelerin yeniden düzenlenmesi gerekmektedir.

Bu formülasyonları doğrusallaştırmak için aşağıdaki değişken dönüşümleri yapılır:

$$\begin{aligned}
Z_0 \hat{x}_{0i} &= \bar{x}_{ij_0} \\
\lambda_j \hat{x}_{ij} &= \bar{x}_{ij} \\
\lambda_j \hat{y}_{rj} &= \bar{y}_{rj}
\end{aligned} \tag{6.4}$$

Bu değişken dönüşümlerinden sonra (6.2) aşağıdaki doğrusal hali alır:

enk Z_0

kısıtlar:

$$\begin{aligned}
\bar{x}_{ij_0} - \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} &\geq 0 & i=1, \dots, m, \\
-\hat{y}_{rj_0} + \sum_{j=1}^n \bar{y}_{rj} &\geq 0 & r=1, \dots, t, \\
Z_0[\alpha x_{ij_0}^M + (1-\alpha)x_{ij_0}^L] &\leq \bar{x}_{ij_0} \leq Z_0[\alpha x_{ij_0}^M + (1-\alpha)x_{ij_0}^R] & i=1, \dots, m, \\
\alpha y_{rj_0}^M + (1-\alpha)y_{rj_0}^L &\leq \hat{y}_{rj_0} \leq \alpha y_{rj_0}^M + (1-\alpha)y_{rj_0}^R & r=1, \dots, t, \\
\lambda_j[\alpha x_{ij}^M + (1-\alpha)x_{ij}^L] &\leq \bar{x}_{ij} \leq \lambda_j[\alpha x_{ij}^M + (1-\alpha)x_{ij}^R] & i=1, \dots, m \text{ ve } j=1, \dots, n, \\
\lambda_j[\alpha y_{rj}^M + (1-\alpha)y_{rj}^L] &\leq \bar{y}_{rj} \leq \lambda_j[\alpha y_{rj}^M + (1-\alpha)y_{rj}^R] & r=1, \dots, t \text{ ve } j=1, \dots, n, \\
\lambda_j &\geq 0 & j=1, \dots, n.
\end{aligned} \tag{6.5}$$

(6.3) formülasyonu da değişken dönüşümlerinden sonra aşağıdaki şekilde yazılır:

enk Z_0

kısıtlar:

$$\begin{aligned}
\bar{x}_{ij_0} - \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} &\geq 0 & i=1, \dots, m, \\
-\hat{y}_{rj_0} + \sum_{j=1}^n \bar{y}_{rj} &\geq 0 & r=1, \dots, t, \\
Z_0[\alpha x_{ij_0}^{ML} + (1-\alpha)x_{ij_0}^L] &\leq \bar{x}_{ij_0} \leq Z_0[\alpha x_{ij_0}^{MR} + (1-\alpha)x_{ij_0}^R] & i=1, \dots, m, \\
\alpha y_{rj_0}^{ML} + (1-\alpha)y_{rj_0}^L &\leq \hat{y}_{rj_0} \leq \alpha y_{rj_0}^{MR} + (1-\alpha)y_{rj_0}^R & r=1, \dots, t, \\
\lambda_j[\alpha x_{ij}^{ML} + (1-\alpha)x_{ij}^L] &\leq \bar{x}_{ij} \leq \lambda_j[\alpha x_{ij}^{MR} + (1-\alpha)x_{ij}^R] & i=1, \dots, m \text{ ve } j=1, \dots, n, \\
\lambda_j[\alpha y_{rj}^{ML} + (1-\alpha)y_{rj}^L] &\leq \bar{y}_{rj} \leq \lambda_j[\alpha y_{rj}^{MR} + (1-\alpha)y_{rj}^R] & r=1, \dots, t \text{ ve } j=1, \dots, n, \\
\lambda_j &\geq 0 & j=1, \dots, n.
\end{aligned} \tag{6.6}$$

Önerme: DBVZA’da karar birimlerinin etkinlik değerleri, α seviyeleri düştükçe azalmakta veya aynı kalmaktadır. Yani:

$$\alpha_1 \geq \alpha_2 \quad \Rightarrow \quad Z_{\alpha_1}^* \geq Z_{\alpha_2}^* \tag{6.7}$$

Kanıt: (Üçgen bulanık girdiler için)

Herhangi bir üçgen bulanık girdi (veya çıktı) için α_1 ve α_2 kesmelerini sırasıyla $\tilde{x}_{\alpha_1}$ ve $\tilde{x}_{\alpha_2}$ aşağıdaki şekilde tanımlarsak:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_{\alpha_1} &= [\alpha_1 x^M + (1-\alpha_1)x^L; \alpha_1 x^M + (1-\alpha_1)x^R] \\ \text{ve} \\ \tilde{x}_{\alpha_2} &= [\alpha_2 x^M + (1-\alpha_2)x^L; \alpha_2 x^M + (1-\alpha_2)x^R]\end{aligned}\tag{6.8}$$

$$\begin{aligned}\forall \alpha_1, \alpha_2; \quad \alpha_1 \geq \alpha_2 \quad \text{ise,} \\ \tilde{x}_{\alpha_1} \subseteq \tilde{x}_{\alpha_2} \quad \Leftrightarrow \quad \forall \hat{x} \in \tilde{x}_{\alpha_1} \Rightarrow \hat{x} \in \tilde{x}_{\alpha_2}\end{aligned}\tag{6.9}$$

Aynı şekilde üçgen bulanık girdiler için de

$$\begin{aligned}\forall \alpha_1, \alpha_2; \quad \alpha_1 \geq \alpha_2 \quad \text{ise,} \\ \tilde{y}_{\alpha_1} \subseteq \tilde{y}_{\alpha_2} \quad \Leftrightarrow \quad \forall \hat{y} \in \tilde{y}_{\alpha_1} \Rightarrow \hat{y} \in \tilde{y}_{\alpha_2}\end{aligned}\tag{6.10}$$

(6.2) formülasyonunun α_1 ve α_2 alfa seviyeleri için olurlu çözüm kümeleri S_{α_1} ve S_{α_2} olarak tanımlanırsa,

(6.9) ve (6.10)'dan:

α_1 seviyesi için (6.2) formülasyonunun çözüm kümesinde yer alan $\hat{x}$ ve $\hat{y}$ değerleri, formülasyonun kısıtlarını α_2 seviyesi için de sağlayacaktır. Bir başka deyişle,

$$\forall \hat{x}, \hat{y} \in S_{\alpha_1} \Rightarrow \hat{x}, \hat{y} \in S_{\alpha_2} \Leftrightarrow S_{\alpha_1} \subseteq S_{\alpha_2}\tag{6.11}$$

yazılabilir.

Bu durumda:

$$\forall \alpha_1, \alpha_2; \quad \alpha_1 \geq \alpha_2 \quad \text{ise,} \quad S_{\alpha_1} \subseteq S_{\alpha_2} \quad \text{olacaktır.}$$

Sonuç olarak girdi ve çıktıların konveks bulanık sayılar olduğu durumlarda α_1 ve α_2 alfa seviyeleri için amaç fonksiyonu optimum değerlerini sırasıyla $Z_{\alpha_1}^*$ ve $Z_{\alpha_2}^*$ olarak tanımlanırsa, (6.2) bir enküçükleme problemi olduğundan (6.11)'den:

$$\alpha_1 \geq \alpha_2 \quad \Rightarrow \quad Z_{\alpha_1}^* \geq Z_{\alpha_2}^* \quad \text{yazabiliriz.} \quad \square$$

Kanıt: (Trapezoidal bulanık girdiler için)

Herhangi bir trapezoidal bulanık girdi (veya çıktı) için α_1 ve α_2 kesmelerini sırasıyla $\tilde{x}_{\alpha_1}$ ve $\tilde{x}_{\alpha_2}$ aşağıdaki şekilde tanımlarsak:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_{\alpha_1} &= [\alpha_1 x^{ML} + (1-\alpha_1)x^L; \alpha_1 x^{MR} + (1-\alpha_1)x^R] \\ \text{ve} \\ \tilde{x}_{\alpha_2} &= [\alpha_2 x^{ML} + (1-\alpha_2)x^L; \alpha_2 x^{MR} + (1-\alpha_2)x^R]\end{aligned}\tag{6.12}$$

$$\begin{aligned}\forall \alpha_1, \alpha_2; \quad \alpha_1 \geq \alpha_2 \quad \text{ise,} \\ \tilde{x}_{\alpha_1} \subseteq \tilde{x}_{\alpha_2} \quad \Leftrightarrow \quad \forall \hat{x} \in \tilde{x}_{\alpha_1} \Rightarrow \hat{x} \in \tilde{x}_{\alpha_2}\end{aligned}\tag{6.13}$$

Aynı şekilde üçgen bulanık girdiler için de

$$\begin{aligned}\forall \alpha_1, \alpha_2; \quad \alpha_1 \geq \alpha_2 \quad \text{ise,} \\ \tilde{y}_{\alpha_1} \subseteq \tilde{y}_{\alpha_2} \quad \Leftrightarrow \quad \forall \hat{y} \in \tilde{y}_{\alpha_1} \Rightarrow \hat{y} \in \tilde{y}_{\alpha_2}\end{aligned}\tag{6.14}$$

(6.3) formülasyonunun α_1 ve α_2 alfa seviyeleri için olurlu çözüm kümeleri S_{α_1} ve S_{α_2} olarak tanımlanırsa,

(6.13) ve (6.14)'dan:

α_1 seviyesi için (6.3) formülasyonunun çözüm kümesinde yer alan $\hat{x}$ ve $\hat{y}$ değerleri, formülasyonun kısıtlarını α_2 seviyesi için de sağlayacaktır. Bir başka deyişle,

$$\forall \hat{x}, \hat{y} \in S_{\alpha_1} \Rightarrow \hat{x}, \hat{y} \in S_{\alpha_2} \Leftrightarrow S_{\alpha_1} \subseteq S_{\alpha_2}\tag{6.15}$$

yazılabilir.

Bu durumda:

$$\forall \alpha_1, \alpha_2; \quad \alpha_1 \geq \alpha_2 \quad \text{ise,} \quad S_{\alpha_1} \subseteq S_{\alpha_2} \quad \text{olacaktır.}$$

Sonuç olarak girdi ve çıktıların konveks bulanık sayılar olduğu durumlarda α_1 ve α_2 alfa seviyeleri için amaç fonksiyonu optimum değerlerini sırasıyla $Z_{\alpha_1}^*$ ve $Z_{\alpha_2}^*$ olarak tanımlanırsa, (6.3) bir enküçükleme problemi olduğundan (6.15)'den:

$$\alpha_1 \geq \alpha_2 \quad \Rightarrow \quad Z_{\alpha_1}^* \geq Z_{\alpha_2}^* \quad \text{yazabiliriz.} \quad \square$$

Bu bölümde önerilen DBVZA formülasyonu üçgen ve trapezoidal bulanık girdiler ve çıktılar için kullanılabilir. 7. Bölüm'deki uygulamadaki bulanık veriler

üçgensel formdadır. Dolayısıyla üçgen bulanık veriler için geliştirilen (6.5) formülasyonu kullanılacaktır.

DBVZA ile elde edilen sonuçlar, diğer formülasyonların sonuçları ile birlikte 7. Bölüm’de, Tablo 7.8 ve Şekil 7.11’de verilmiştir.

6.5 Örnek Uygulama

Girdi ve çıktı değerlerinin bulanık sayılar halinde olduğu durumlarda VZA modellerinin serbestlik derecesi artmaktadır. Bu durum uygulamalarda birçok karar biriminin etkinlik sınırında yer almasına yol açmaktadır. Buna ek olarak, karar birimi sayısının az, girdi ve çıktı sayısının çok olduğu durumlarda, modelde, bazı karar birimlerine avantajlı olduğu girdi ve çıktı değerleri için (girdilerde diğer karar birimlerine göre düşük, çıktılarda diğer karar birimlerine göre yüksek) çok yüksek ağırlıklar, diğer girdi ve çıktı değerleri için ise çok düşük (veya sıfır) ağırlıklar atanarak ilgili karar biriminin etkinlik sınırında yer aldığı görülmektedir. Bu durum karar birimleri arasında, etkinlik değerlerine göre sıralama yapmayı imkansız hale getirmektedir.

DBVZA bu iki soruna birden çözüm getirmektedir. DBVZA formülasyonu, CCR modelinin dual formunu temel almaktadır ve dolayısıyla bir enbüyükleme değil enküçükleme problemidir. Bulanık veriler dolayısıyla modelin serbestliği arttığında, karar birimlerinin etkinlik değerleri yükselmeyecek, aksine düşecektir. Ayrıca karar birimi sayısının az, girdi ve çıktı sayısının çok olduğu durumlarda dahi bu serbestlik sebebiyle etkinlik sınırında yer alan karar birimi sayısı az olacaktır.

Bu durumu göstermek için, örnek bir uygulama olarak, dört bulanık girdiye ve dört bulanık çıktıya sahip A, B, C ve D karar birimlerinin etkinlikleri hem Saati ve diğerlerinin [22] formülasyonu hem de DBVZA ile hesaplanacaktır. Bölüm 5.5’te ayrıntılı olarak incelenen Saati ve diğerleri’nin [22] formülasyonu CCR modelinin primal formunu temel almaktadır ve dolayısıyla bir enbüyükleme problemidir.

A, B, C ve D karar birimlerinin bulanık girdi ve çıktı değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 : Örnek uygulama için girdi ve çıktı değerleri

	A	B	C	D
girdi 1	(2; 4; 7)	(3; 5; 6)	(3; 6; 9)	(5; 9; 11)
girdi 2	(18; 26; 33)	(13; 23; 25)	(12; 18; 20)	(8; 10; 11)
girdi 3	(0,3; 0,5; 0,7)	(2,2; 0,4; 0,6)	(0,4; 0,6; 0,8)	(0,2; 0,3; 0,3)
girdi 4	(10; 12; 14)	(12; 15; 18)	(9; 10; 11)	(14; 17; 20)
çıktı 1	(90; 102; 130)	(80; 95; 110)	(120; 140; 160)	(70; 80; 90)
çıktı 2	(1; 2; 4)	(1,5; 2,5; 3,5)	(0,2; 1; 1,8)	(2; 3; 4)
çıktı 3	(0,01; 0,03; 1)	(0,001; 0,006; 0,02)	(0,1; 0,2; 0,3)	(0,001; 0,01; 0,1)
çıktı 4	(20; 23; 36)	(21; 30; 39)	(15; 20; 25)	(19; 25; 31)

Tablo 6.1’deki verilerle Saati ve diğerleri’nin formülasyonu [22] kullanılarak etkinlik ölçümü yapıldığında, karar birimleri A, B, C ve D için, 0,0; 0,1;...; 1,0 alfa seviyelerinde Tablo 6.2’deki etkinlik değerleri elde edilmektedir.

Tablo 6.2 : Saati ve diğerleri [22] formülasyonu ile örnek uygulama sonuçları

Alfa	A	B	C	D
1,0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,9	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,8	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,7	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,6	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,5	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,4	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,3	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

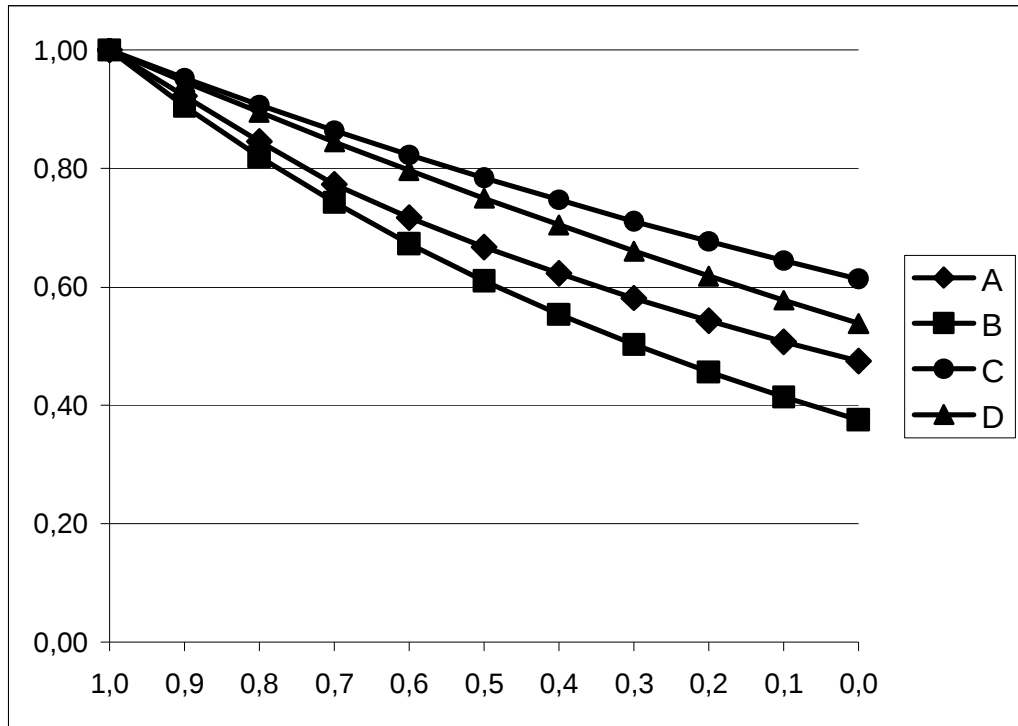
Tablo 6.2’de görüldüğü gibi Saati ve diğerleri’nin [22] formülasyonu ile yapılan uygulamada tüm karar birimleri, her alfa seviyesinde etkinlik sınırında yer almaktadır ve etkinlik değerleri bir (1)’dir. Doğal olarak böyle bir durumda A, B, C ve D arasında etkinlik değerlerine göre bir sıralama yapmak mümkün değildir.

Aynı verilerle DBVZA ile yapılan uygulamada elde edilen sonuçlar ise Tablo 6.3’te görülmektedir.

Tablo 6.3 : DBVZA formülasyonu ile örnek uygulama sonuçları

Alfa	A	B	C	D
1,0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,9	0,9227	0,9051	0,9526	0,9463
0,8	0,8462	0,8198	0,9074	0,8951
0,7	0,7729	0,7428	0,8643	0,8451
0,6	0,7166	0,6734	0,8233	0,7968
0,5	0,6678	0,6107	0,7841	0,7500
0,4	0,6229	0,5540	0,7468	0,7048
0,3	0,5814	0,5026	0,7111	0,6610
0,2	0,5431	0,4562	0,6771	0,6187
0,1	0,5075	0,4140	0,6446	0,5779
0,0	0,4746	0,3758	0,6136	0,5385

Tablo 6.3'te görüldüğü gibi DBVZA ile A, B, C ve D karar birimlerini etkinliklerine göre sıralamak mümkün olmuştur. Yukarıdaki tablodaki etkinlik değerleri Şekil 6.3'te grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.3 : DBVZA ile örnek uygulama sonuçlarının grafiği

Şekil 6.1'deki grafikte, alfa seviyesi 1 iken karar birimlerinin etkinlik sınırında yer almaktadır ki bu alfa seviyesinde model kesin sayılı hale gelmektedir. Alfa seviyeleri

azaldıkça modelin serbestliğı artmakta ve karar birimlerinin etkinlik değeri azalmaktadır. Şekil 6.1'i inceleyecek olursak C karar birimin etkinlik sıralamasında en üstte olduğunu söyleyebiliriz. D karar birimi ikinci sırada, A üçüncü ve B karar birimi ise son sıradadır. Bu bölümdeki uygulamadan da anlaşılacağı üzere, DBVZA, karar birimi sayısının az, bulanık girdi ve çıktı sayısının çok olduğu durumlarda dahi karar birimlerinin etkinlik değerlerine göre sıralanmasını mümkün kılmaktadır.

DBVZA'nın bu özelliğı, karar vericiler ve araştırmacılar için büyük bir avantaj teşkil etmektedir. Sıralama yapmak için karar birimi ve girdi/çıktı sayılarında herhangi bir kısıt olmaması DBVZA'nın diğer modellere göre tercih edilebilecek bir performans değerlendirme yöntemi olmasını sağlamaktadır.

7. TÜRKİYE’DE ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN ENERJİ KAYNAK ALTERNATİFLERİNİN ETKİNLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Enerjiyi kısaca bir cismin veya bir sistemin iş yapabilme yeteneği olarak tarif etmek mümkündür [33]. Başlıca enerji çeşitleri; kimyasal enerji, ısı enerjisi, elektrik enerjisi ve mekanik enerji olarak sıralanmaktadır. Bu enerjiler birbirlerine enerji dönüşüm sistemleri sayesinde dönüşebilirler ve iş yapabilirler. Örnek olarak, elektrik santalleri, ısı enerjisini veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Elektrikle çalışan cihazlar ise elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürürler. Geleneksel olarak iki enerji türünden bahsedilmektedir. Bunlardan olduğu gibi tüketilen kömür, doğalgaz ve petrol gibi kaynaklar birincil enerji kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Birincil enerji kaynaklarının fiziksel dönüşümlerinden elde edilen elektrik ise ikincil bir enerji kaynağıdır.

Bilinen enerji kaynaklarına alternatif olarak güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, biyokütle enerjisi gibi yeni kaynaklar ilave edilmektedir. Dünyada enerji kaynakları içerisinde en büyük paya fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğalgaz) sahiptir. Alternatif enerji kaynakları konusunda yapılan çok ciddi çalışma ve araştırmalara rağmen fosil yakıtların toplam dünya enerji tüketimi içerisindeki oranı halen %85-90 gibi yüksek bir seviyededir [33]. Günümüze kullandığımız elektrik enerjisinin büyük bir kısmı da petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtlardan elde edilmektedir.

Fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve bu kaynakların küresel ısınma, çevre kirliliği gibi sorunlara yol açması, 21. yüzyılın başlarında tüm dünya ülkelerinin enerji politikalarının belirlenmesinde en önemli faktörler olmuştur. Özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ve dolayısıyla enerji ihtiyacı gün geçtikçe artan ülkeler elektrik üretimi için kullanılan kaynakların verimli bir şekilde kullanılması zorunluluk haline gelmiştir. Ayrıca, yenilenebilir, çevresel etkileri düşük alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi de uzun dönemde karşılaşılabilecek enerji darboğazlarının çözümünde önemli bir etkidir.

Bu tezde, Türkiye’de elektrik üretimi için kullanılan enerji kaynaklarının değerlendirilmesinde, petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtlarla beraber, nükleer enerji, güneş, rüzgar, hidrolik ve biyokütle gibi alternatif enerji kaynaklarının elektrik üretimi için etkinliklerini değerlendirilecektir. İlk olarak söz konusu enerji

kaynakları hakkında kısaca bilgi verilecek daha sonra Dünya'daki ve Türkiye'deki mevcut durum incelenecektir. Analizde kullanılan etkinlik ölçütlerinin tanımından sonra, enerji kaynaklarının etkinliği literatürde rastlanan ve 5. Bölüm'de ayrıntılı olarak incelen bulanık veri zarflama analizi formülasyonları ve 6. Bölüm'de yer alan dual bulanık veri zarflama analizi formülasyonu ile değerlendirilecektir. Son olarak ise elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak yorumlanacaktır.

7.1 Elektrik Üretiminde Kullanılan Enerji Kaynakları

Elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynakları, santrallerdeki jeneratörlerin çalışmasını sağlayacak gücü üretmektedirler. Bu güç, termik santrallerdeki buhar gücü (petrol, kömür, doğalgaz, nükleer ve biyokütle enerjisi) olabileceği gibi rüzgar ve suyun itme gücü de olabilir (rüzgar ve hidrolik enerji). Güneş enerjisi ile elektrik üreten fotovoltaik paneller, istisnai olarak güneş enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu kaynakların temel özellikleri bundan sonraki bölümlerde kısaca tanıtılacaktır.

7.1.1 Fosil Yakıtlar

Fosil yakıtlar, petrol, kömür ve doğalgaz olarak sıralanabilir. Bu enerji kaynaklarını diğerlerinden ayıran en büyük özellikleri yenilenebilir olmamalarıdır. Dünyadaki petrol rezervlerinin 35-40 yıl, doğalgaz rezervlerinin 65 yıl ve kömür rezervlerinin 220 yıl sonra tükeneceği tahmin edilmektedir [33].

Fosil yakıtların bir diğer dezavantajı ise, olumsuz çevresel etkilerinin diğer enerji kaynaklarına göre yüksek olmasıdır. Özellikle küresel ısınmaya etkileri ve NO_x , SO_2 ve CO_2 emisyonları elektrik üretiminde fosil yakıtlardan başka alternatiflerin aranmasında en büyük etkenlerdir.

Petrol ve doğalgaz rezervlerinin bulunduğu ülkelerin genel olarak politik ve ekonomik istikrardan yoksun olması da bu kaynakların fiyatlarının dalgalı bir seyir izlemesine yol açmaktadır. Petrol ve doğalgaz fiyatları dünyadaki ekonomik konjonktüre ve sosyal değişimlere çok bağlı ve hassastır.

Fosil yakıtların en büyük avantajları, mevcut teknolojilerde, doğalgaz, kömür ve petrol santralleri yatırımlarının yeni teknolojilere göre ucuz ve basit olmasıdır. Özellikle kısa vadeli enerji darboğazlarının çözümünde doğalgaz ve kömür, Türkiye gibi ülkeler için kilit rolünü koruyacaktır.

Dünya elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık olarak %64,5'i fosil yakıtlardan sağlanmaktadır (%38,7 kömür, %18,3 doğalgaz, %7,5 petrol). İçinde bulunduğumuz yüzyılın özellikle ilk yarısında da fosil yakıtların baskınlığını koruması beklenmektedir [34]. Tahmin edilen en büyük değişiklik, doğalgazın fosil yakıt tüketimi içindeki payının artacağıdır. Uluslararası Enerji Ajansının (IEA) 2030 öngörülerinden bazıları aşağıda verilmiştir:

- Enerji kullanımı hızla artmaya devam edecektir.
- Fosil yakıtlar baskınlığını sürdürecektir.
- Doğalgazın kullanımı daha da artacaktır.
- Enerji ihtiyacı en fazla gelişmekte olan ülkelerde artacaktır.

7.1.2 Nükleer Enerji

Nükleer santrallerden ticari olarak elektrik üretimi 1950'li yıllarda başlamıştır. Halen (Ocak 2005 itibarıyla) dünyada 31 ülkede ticari olarak işletilmekte olan 439 nükleer reaktörün toplam kapasitesi 364 GW olup 2003 yılında üretilen elektrik enerjisi 2.525 milyar kW's'dir. Nükleer güç, dünya elektrik talebinin %16'sını karşılamaktadır. Dünyada 56 ülkede de toplam 284 araştırma reaktörü çalışmaktadır [35].

Günümüzde işletilmekte olan nükleer güç santrallerinin ilk yatırım maliyeti diğer enerji üretim teknolojilerine göre daha yüksektir. Bunda yüksek güvenlik ve kalite anlayışı önemli bir rol oynamaktadır. Nükleer santrallerin fosil yakıtlı santrallere göre en önemli avantajı yakıt maliyetinin düşüklüğü ve üretim maliyetine olan etkisinin görece azlığıdır. Şöyle ki; yakıt maliyetinin iki misline çıkması nükleerde üretim maliyetini %10 etkilerken, aynı durum doğalgaz santrallerinde yaklaşık %60-80 artış getirebilmektedir [36].

Nükleer santrallerin çevresel etkileri bilimsel ve politik çevrelerde bir tartışma konusudur. Emisyon ve atık kül miktarları fosil yakıtlara göre son derece düşük olmasına rağmen, nükleer atıkların depolanması sorunu ve meydana gelebilecek olası bir kazanın sosyal ve çevresel maliyetleri nükleer santrallerin “çevre dostu” olarak nitelendirilmesini kesin olarak engellemektedir.

Bütün bu bilgilerin ışığı altında, dünya'da nükleer santral satışlarını tekrar canlandırmak için çeşitli girişimler varolsa da, nükleer güç ile elektrik üretiminin geleceği pek parlak görünmemektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'ya göre nükleer enerjinin elektrik üretimindeki payı 2030 itibarıyla bugüne oranla neredeyse

yarı yarıya azalarak %9 seviyelerine düşeceği öngörülmektedir. Bunun nedenleri şöyle özetlenebilir [35]:

- Nükleer silah hammaddesi olan, çözümsüz, uzun ömürlü nükleer atıklar.
- Ülke ve zaman sınırı tanımayan radyasyon kazaları
- Gizlilik, yani bilgi edinme hakkının çiğnenmesi
- Yüksek yatırım maliyetleri ve çok uzun geri ödeme süreleri
- Nükleer reaktörler ve atıkların yarattığı terörist saldırı tehlikesi.

7.1.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Kömür, petrol ve doğalgaz gibi yakıt rezervlerinin tahmin edilen ömürleri Bölüm 7.1.1’de açıklanmıştı. Fosil yakıtların beklenen ömürleri, yeni rezervlerin bulunmasıyla uzayabilir ancak bu kaynakların gelecekte tükenmesi kaçınılmazdır. Yenilenebilir enerji kaynakları, enerjilerini direkt ve dolaylı olarak güneşten almakta, dolayısıyla sürekli olarak yenilendiklerinden tükenmemektedirler.

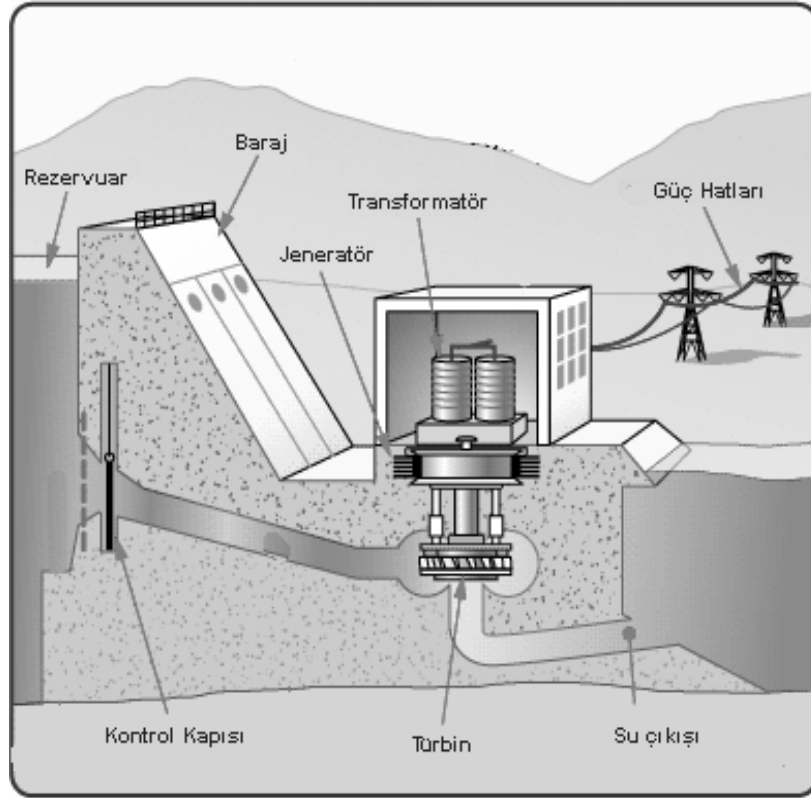
Yenilenebilir enerji kaynakları, yenilenebilir kaynak oluşları, en az düzeyde çevresel etki yaratmaları, yerel kaynaklarla temin edilebilmeleri ve güvenilir enerji sağlama özellikleri ile ülkemiz için oldukça önemli bir yere sahiptir.

Bu tezde, etkinliği ölçülen yenilebilir enerji kaynakları olarak, hidrolik, rüzgar, güneş ve biyokütle enerjileri incelenmiştir. Bundan sonraki bölümlerde bu enerji kaynaklarının ülkemiz açısından sahip olduğu potansiyel ve kullanım alanlarını kısaca açıklamaya çalışacağız.

7.1.3.1 Hidrolik Enerji

Hidrolik enerji, elektrik üretiminde en önemli kaynaklardan biridir ve birçok ülkede enerji ihtiyacının %25’ten fazlası bu kaynaktan karşılanmaktadır [33]. Hidrolik enerjinin en yaygın kullanım şekli nehirler üzerinde barajlar inşa ederek büyük su rezervuarlarında suyu biriktirmek ve bu suyun potansiyel enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek esasına dayanmaktadır.

Şekil 7.1’de örnek bir hidroelektrik santralinin şeması görülmektedir.



Şekil 7.1 : Hidroelektrik santral şeması²

Ülkemizde su kaynaklarının geliştirilmesinde görev üstlenen Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) ve Devlet Su İşleri (DSİ) gibi kuruluşların yeni enerji imkanlarının yaratılmasına yönelik yapmış oldukları ön inceleme çalışmalarıyla hidrolik enerji potansiyeline her yıl yeni ilaveler kazandırılmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda, Türkiye'nin ekonomik hidroelektrik potansiyeli yıldan yıla ufak da olsa farklılıklar göstermektedir. Türkiye'nin ekonomik hidroelektrik potansiyelinin 126 milyar kW's civarında olduğu bilinmektedir [36].

433 milyar kW's brüt teorik hidroelektrik potansiyeli ile dünya elektrik potansiyeli içinde %1 paya sahip olan Türkiye, 126 milyar kW's ekonomik olarak yapılabilir potansiyeli ile de Avrupa ekonomik potansiyelinin yaklaşık %15'i düzeyinde hidroelektrik potansiyele sahip bulunmaktadır [36].

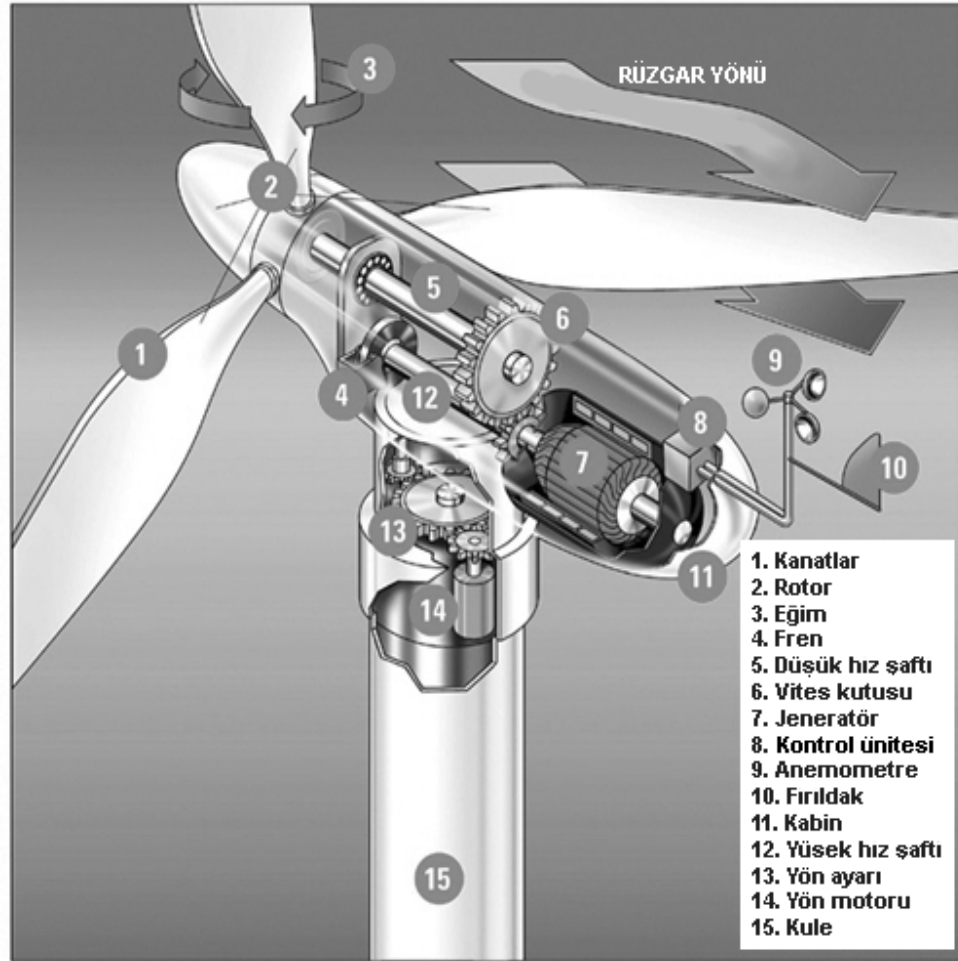
Hidrolik güç ile elektrik üretiminde CO₂, SO₂ ve NO_x emisyonları sıfırdır. Santral kurulduktan sonra işletme masrafları da düşüktür. Ancak hidroelektrik santraller için baraj inşaatı gerekmekte ve bu da ilk yatırım maliyetlerini büyük oranda art-

² Kaynak: www.alumni.ca

tırmaktadır. Ayrıca barajlar, bazı durumlarda bulundukları bölgenin tarihi dokusunu, doğal yaşamını ve sosyo-ekonomik düzenini olumsuz yönde etkilemektedir.

7.1.3.2 Rüzgar Enerjisi

Rüzgarın elektrik üretiminde ilk kullanımı 1882 yılında ABD'nin New York şehrinde gerçekleştirilmiş olup, bu konuda çalışmalar günümüzde yaygınlaşarak devam etmektedir. Özellikle 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizi modern rüzgar türbinlerinin gelişimine önemli katkıda bulunmuştur. Şekil 7.2'de bir rüzgar türbini şeması görülmektedir.



Şekil 7.2 : Rüzgar türbini³

Rüzgar türbini, kurulduğu arazinin ancak %5'ini işgal etmekte ve türbin kanatlarının yerden epeyce yüksekte olmasından dolayı kalan arazi otlatma, tarım ve diğer

³ Kaynak: www.powerhousetv.com/.../phtv_eb_re_000315.hcsp

amaçlar için rahatlıkla kullanılabilir. Rüzgar türbinleri, gece ve gündüz, rüzgar olduğu sürece sürekli enerji üretebilmektedir. Ayrıca rüzgar enerjisinin diğer elektrik üretim yöntemleri ile kıyaslandığında en önemli çevresel yararının hava kirleticisi ve sera gazları yayıcı özelliğinin olmamasıdır.

Dünyada kurulu bulunan rüzgar santrallerinin 2002 yılı sonu itibarıyla toplam nominal gücü 31 128 MW'tır [33]. ABD, Danimarka, Almanya ve İspanya dünyada kurulu bulunan toplam rüzgar gücünün %70'ini üretmektedir.

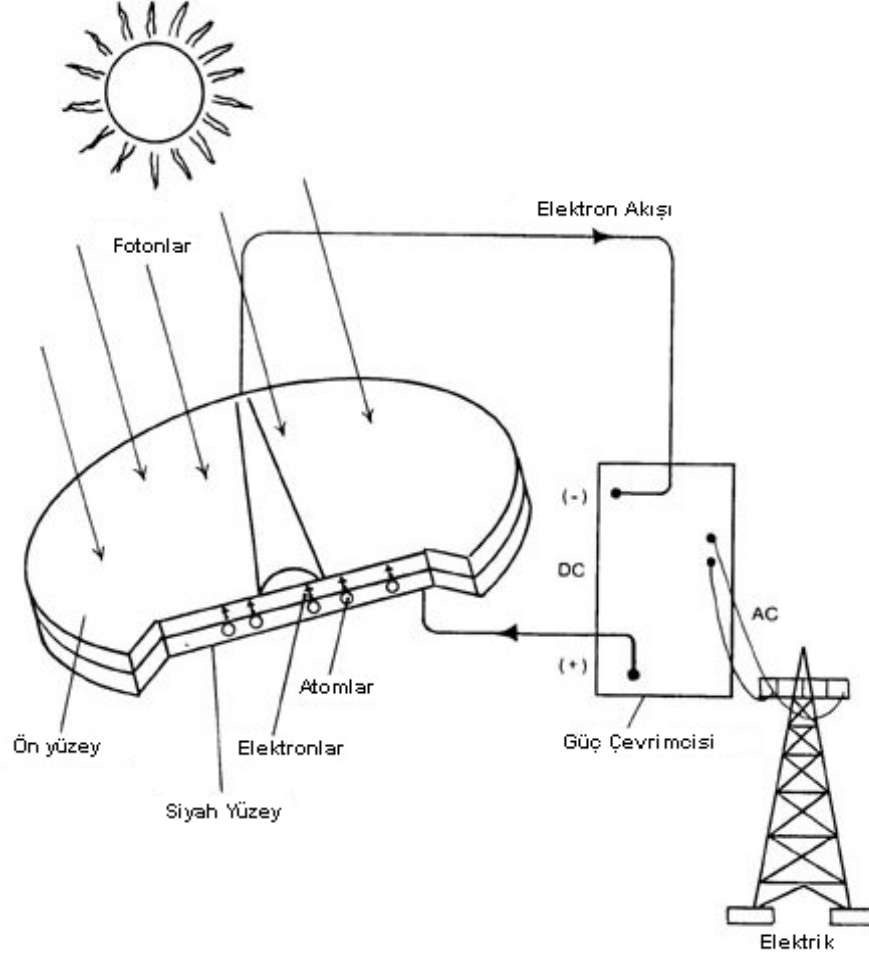
Türkiye'nin de içinde bulunduğu Avrupa kıtasını ele aldığımızda, Almanya 2002 yılında tesis ettiği 3 247 MW yeni kapasite ile toplamda 12 001 MW kurulu güce ulaşarak, tüm dünya üzerindeki kurulu gücün %38'ine ulaşmış durumdadır [33]. Türkiye, Avrupa'da rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından en iyi durumda olan ülkelerden biridir. Türkiye'deki rüzgar enerjisi kaynakları teorik olarak ülkenin elektrik ihtiyacının tamamını karşılayabilecek durumdadır. Türkiye'nin rüzgar enerjisi teknik potansiyeli 83 000 MW düzeyindedir. Bu nedenle ülkemiz bir an önce kullanması gereken önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir. Ancak günümüzde bu potansiyelin çok azı kullanılmaktadır. Ülkemizde genel kullanıma yönelik ilk rüzgar elektrigi 1986 yılında Çeşme Altinyunus tesislerinde kurulan 55 kW nominal güçlü rüzgar türbininden elde edilmiştir. Bugün Türkiye'de gerçekleştirme aşamasına girmiş rüzgar güç santrallerinin toplam kurulu gücü 1800 MW'a ulaşmıştır.

7.1.3.3 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneşten gelen ve yeryüzünde 0-1 100 W/m² değerlerinde bir ısı etkisi yaratan yenilenebilir bir enerjidir. Bu enerji ile ısıtmadan soğutmaya çok farklı ısı etkisinin kullanıldığı uygulamalar gerçekleşmektedir. Ülkemizde güneş enerjisi yaygın olarak evlerin sıcak su gereksinimlerinin karşılanmasında kullanılmaktadır. Ayrıca bazı endüstriyel uygulamalar, hacim ısıtma uygulamaları (güneş mimarisi) ile elektrik üretiminde fotovoltaik pillerin kullanılması yaygınlaşmaktadır.

Fotovoltaik hücreler (PV hücreler), gürültüsüz, çevreyi kirlilemeden, herhangi bir hareket eden mekanizmaya ihtiyaç duymadan, güneş enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Bu sistemlerdeki voltaik toplayıcılarda, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek için Cd S ya da silikon maddelerinden güneş pili imal edilir bu maddeler üzerine gelen güneş ışınları anında elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılır. Bu sistemlerde güneş izleme düzeni ile her an mümkün olan en yüksek güneş enerjisinden yararlanılır. Güneş izleme düzeni pahalı olduğundan bu tip toplayıcılardan, izleme düzeni olmadan da yararlanılmaktadır. Yapay uyduların elektrik enerjisi fotovoltaik toplayıcılardan sağlan-

maktadır. Fotovoltaik toplayıcıların çok yüksek maliyeti kadar, sadece %10 mertebesinde verimli çalışmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmamaktadır. Şekil 7.3'te fotovoltaik enerji sistemi görülmektedir.

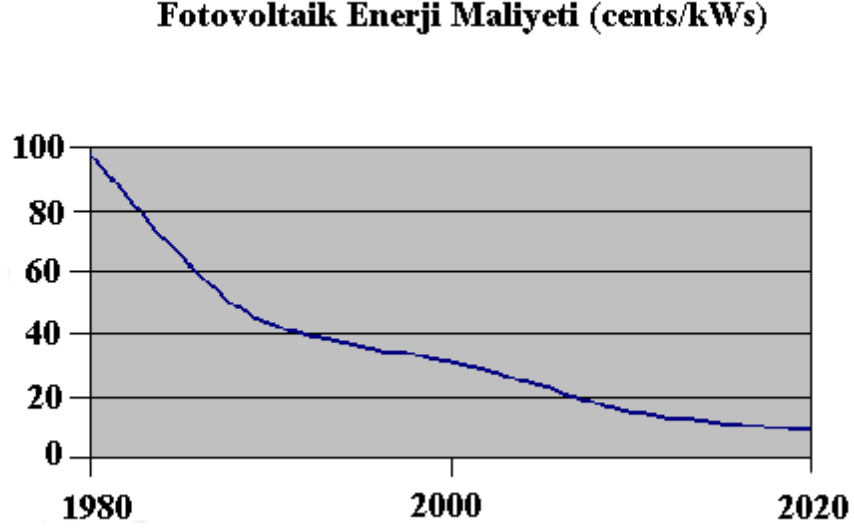


Şekil 7.3 : Fotovoltaik sistem

Türkiye, güneş enerjisi yönünden oldukça zengin bir ülkedir. EİEİ tarafından yapılan bir araştırmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık güneşlenme süresi 2 640 saat (günlük ortalama 7,2 saat), ortalama ışıyım şiddeti 1311 kWs/m^2 – Yıl olduğu tespit edilmiştir. Bu rakam dünya ortalamasının üzerindedir.

Güneş enerjisi şu an için diğer alternatiflere göre oldukça pahalıdır. Ayrıca fotovoltaik panellerin, üzerinde bulunduğu arazide çok yer kaplaması ve üretilen elektriğin depolanması sorunu bu teknolojinin yaygınlaşmasını engellemektedir. Geliştirilen yeni teknolojiler ve özellikle fotovoltaik panellerin veriminin artırılmasıyla uzun dönemde güneş enerjisinin elektrik üretiminde yaygınlaşacağı tahmin edilmektedir. Ancak günümüz şartlarında pahalı ve uygulanması zor bir teknoloji olarak kabul edilmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığınca yapılan bir çalışmada fotovoltaiik panellerle elektrik üretiminin geçmiş, mevcut ve gelecekteki tahmini maliyetleri Şekil 7.4’de gösterilmiştir [37].



Şekil 7.4 : PV enerji maliyeti⁴

Bu çalışma göstermektedir ki, güneş enerjisi günümüzde diğer alternatiflerden pahalı olmasına rağmen, gelecekte rekabet gücü artacaktır.

7.1.3.4 Biyokütle Enerjisi

Biyokütle yenilenebilir enerji kaynakları içinde ciddi bir teknik potansiyele sahiptir. Ana bileşenleri karbo-hidrat bileşikleri olan bitkisel ve hayvansal kökenli tüm maddeler “Biyokütle Enerji Kaynağı”, bu kaynaklardan üretilen enerji ise “Biyokütle Enerjisi” olarak tanımlanmaktadır.

Dünya Enerji Konseyinin 1990 yılı verilerine göre dünya enerjisinin %15’i biyokütleden sağlanmaktadır. Ancak bazı teorik çalışmalara göre biyokütle 2050 yılına kadar dünyanın katı ve sıvı yakıt gereksiniminin %38’ini ve elektriğin %15’ini sağlayabilecektir [38].

⁴ Kaynak: www.eere.energy.gov/.../solar_power_from_pv.html

Yenilenebilir biyokütle ve biyokütleden elde edilen yakıtlar çevresel fayda sağlaması sebebiyle günümüz enerji kullanımında kolaylıkla fosil yakıtların yerine geçebilecektir.

Biyokütlenin elektrik üretiminde kullanılmasında en yaygın sistem karbonlaştırma ve gazlaştırmadır. Biyokütlenin gazlaştırılması; katı yakıtların ısı çevirim teknolojisiyle yanabilen bir gaza dönüştürülmesi işlemidir. Sınırlandırılmış oksijen, hava, buhar veya bunların kombinasyonları reaksiyonu başlatmaktadır. Üretilen gaz karbon-monoksit, karbondioksit, hidrojen, metan, su ve azot'un yanı sıra kömür parçacıkları, kül ve katran gibi artıkları da içermektedir. Üretilen gaz temizlendikten sonra kazanlarda, motorlarda, türbinlerde ısı ve güç üretilmek üzere kullanılmaktadır. Gazlaştırma tekniği ile biyokütleden, yüksek bir randımanla petrolle çalışan güç ve ısı sağlayan türbinlerde kullanılacak bir gaz yakıt elde edilebilir.

Biyokütle kaynaklarının sağlanması fosil kaynak sağlanmasından daha pahalıdır. Fakat biyokütle yenilenebilir bir kaynak olmasıyla tükenmekte olan fosil yakıtların yanında sürdürülebilir global enerjinin önemli bir unsurudur. Buna ilaveten sera gazları emisyonu ve karbon döngüsünü azaltıp, kırsal ekonominin gelişimiyle yeşil endüstriyi desteklemektedir. Biyokütlenin gazlaştırılması ile elde edilen gaz yakıt doğal gazın kullanıldığı yerlerde küçük modifikasyonlar yapılarak kullanımı yaygınlaştırılabilir ve gelecekte kolaylıkla doğal gazın kullanıldığı yerlerde enerjinin büyük bir kısmı bu yakıttan sağlanabilir.

Türkiye, biyokütle enerjisi bakımından da avantajlı bir konumdadır. Türkiye'nin bir tarım ve havyancılık ülkesi olması bu enerji türünün özellikle tarımı canlandıracağı düşünülmektedir. Ülkemizde havyansal dışkı kaynaklı biyokütleden 2,8-2,9 milyar metreküp biyogaz üretebileceği anlaşılmıştır. Bununla da toplam enerji tüketiminin %5'i karşılanabilecektir. Ayrıca büyükşehir belediyeleri, kentlerin çöp atıklarını enerjiye çevirecek projelere başlamıştır. Bugün Türkiye'de İstanbul, Ankara, Bursa ve İzmit'te toplam 15,6 MWs kapasitesinde atık kaynaklı kojenerasyon tesisi bulunmaktadır [33].

7.2 Türkiye'deki Durum

Günümüzde enerji üretim ve tüketiminin ulaşılmış olduğu seviye bir ülkenin gelişmişlik düzeyini gösteren en önemli ölçütlerden biridir. 2000 yılı itibarıyla Türkiye'de kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketimi 1817 kW's'a ulaşmış olmasına rağmen, bu rakamın Avrupa ortalamasının 6 457 kW's, dünya ortalamasının da 2 343 kW's olduğu

dikkate alındığında ülkemizdeki enerji tüketiminin ne kadar düşük olduğu görülmektedir [39].

Türkiye, enerji ihtiyacını büyük bölümünü kendi öz kaynaklarından değil dışarıdan karşılayan bir ülkedir. Bu durum, Türkiye'yi dışa bağımlı hale getirmektedir. Yenilebilir enerji kaynaklarının bu kadar zengin ve ülkenin enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayabilecek olmasına karşın bu potansiyel ya hiç kullanılmamakta ya da çok az değerlendirilmektedir.

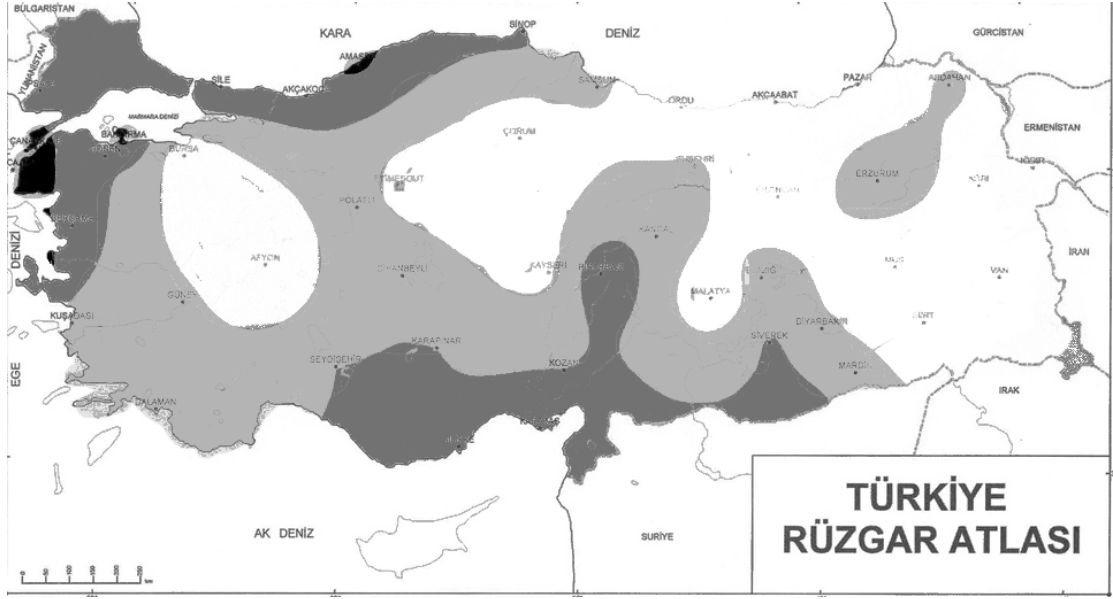
Kalkınma ve nüfus artışına paralel olarak toplam enerji tüketiminin hızla artmasına rağmen, enerji üretimimiz aynı oranda artış göstermemiştir. Ürettiğinden daha fazla enerji tüketen Türkiye'de üretim ile tüketim arasındaki fark son 15 yılda hızla büyümüştür. Türkiye'de, 1990 yılında enerji üretimi, tüketimin %47,73'ünü karşılarken, bu oran 1995'te %41,56'ya, 1997'de %38,8'e, 1999 yılında %35,28'e, 2001 yılında %33,2'ye, 2003 yılında 28,9'a ve 2005 yılında 26,3'e düşmüştür [40].

Türkiye, 2000 yılı itibarıyla yılda tükettiği yaklaşık 76 milyon ton kömürün %90'ını kendi üretirken, 30 milyon ton ham petrolün %91'ini, 12,6 milyar doğal gazın ise %93'ünü ithal etmektedir. Ülkemizde var olan yerli enerji kaynaklarının toplam üretim içindeki kullanım oranı 1998 yılında %38 iken, 2000 yılında %33'e düşmüştür [39].

Fosil yakıtların kısıtlı ömürleri, yarattıkları çevresel olumsuzluklar, istikrarsız fiyatları ve dışa bağımlılığı arttırıcı etkileriyle Türkiye günümüzde yenilenebilir kaynaklara yönelmek zorundadır.

Yapılan rüzgar ölçümleri sonucu Türkiye'nin, özellikle Marmara, Ege ve Doğu Akdeniz kıyı bölgesinin zengin bir rüzgar potansiyeline sahip olduğu görülmüştür.

EİE ve DMİ tarafından yapılan ve Şekil 7.5'te sunulan Türkiye rüzgar atlasında, Türkiye'nin rüzgar potansiyelinin bölgesel dağılımı görülmektedir.



Şekil 7.5 : Türkiye rüzgar atlası⁵

Şekil 7.5’deki haritada, en fazla rüzgar alan bölgeler siyah (12 m/s ve üstü), en az alan bölgeler beyazla (7 m/s ve altı) gösterilmiştir. Gri bölgelerdeki rüzgar potansiyeli koyudan açığa doğru azalmaktadır.

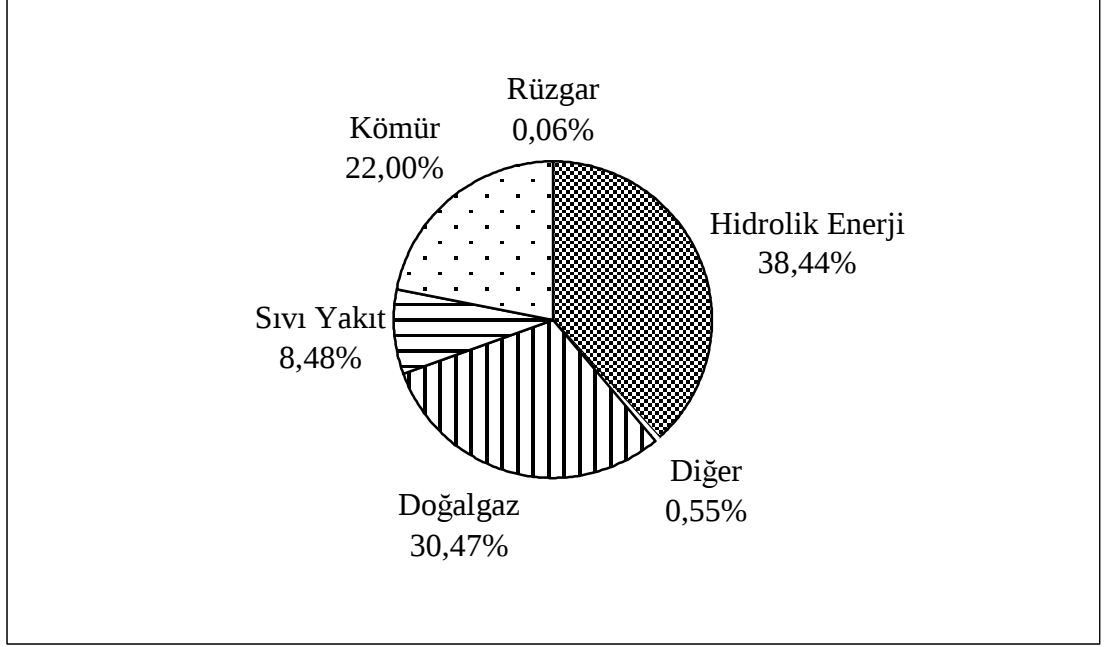
Ülkemizin brüt hidroelektrik enerji potansiyeli 433 milyar kW’s mertebesinde olup, teknik yönden değerlendirilebilir potansiyelimiz 216 milyar kW’s civarındadır. Bugün için 126,1 milyar kW’s olan hidroelektrik potansiyelimizin %35’i (44,388 GW’s) işletmede, %9’u (10,845 GW’s) inşa halinde ve %56’sı (70,876 GW’s) ise çeşitli aşamalardan oluşan proje düzeyindedir.

Türkiye, güneş enerjisi uygulamaları açısından da oldukça uygun bir coğrafi konuma sahiptir. Buna rağmen güneş pillerinden elde edilen toplam kurulu güç 350 kW’s civarındadır ve genellikle Türk Telekom ve orman gözetleme kulelerinde kullanılmaktadır. Güneş enerjisi ülkemizde daha çok su ısıtma amaçlı kullanılmaktadır.

Klasik biyokütle kaynakları olan odun ile bitki ve hayvan artıkları özellikle ısıtma ve pişirme alanlarında yıllardır kullanılmaktadır. 2002 yılı verilerine göre Türkiye’nin enerji üretiminde 15 614 milyon ton odun ve 5 609 milyon ton hayvan-bitki atıkları kullanılmıştır. Ülkemizde klasik biyokütle enerji kullanımı ilkel ve ekonomik

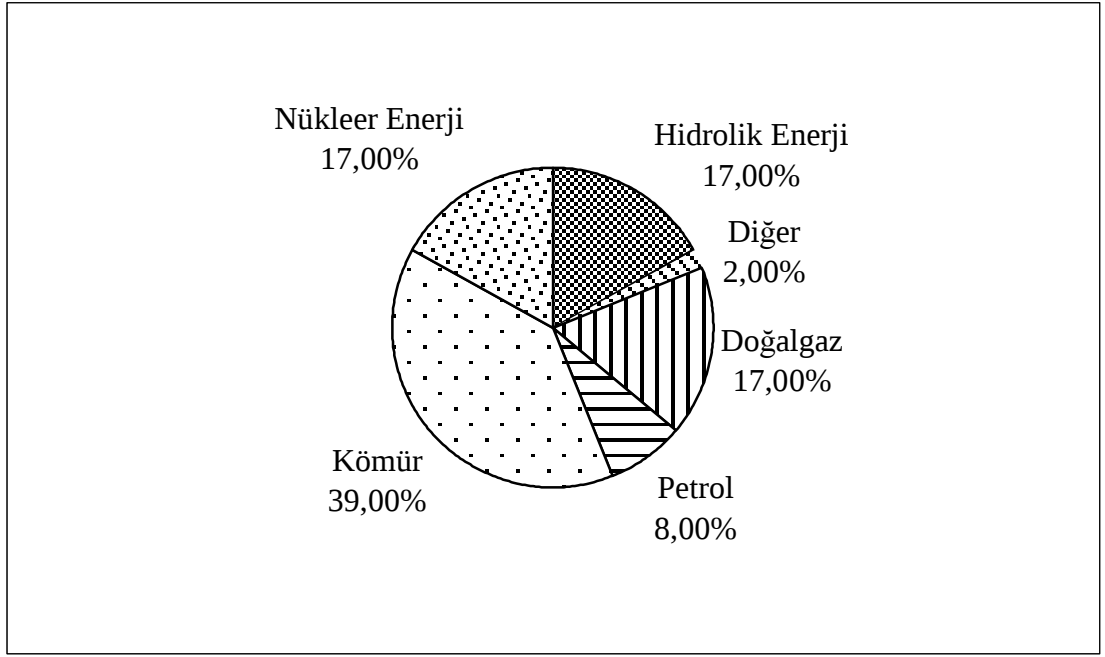
⁵ Kaynak: http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/tr_ruzgar_atlasi_buyuk.jpg

olmayan biçimde gerçekleşmektedir, enerji tarımı, tarımsal yan ürünler ile endüstriyel ve kentsel atıklardan enerji üretimini içeren modern biyokütle uygulamaları yok denecek kadar azdır.



Şekil 7.6 : Türkiye'nin 2002 kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı

Türkiye'nin 2002 yılı elektrik enerjisi kurulu gücü 31845,9 MW'tır. Bu gücün kaynaklara göre dağılımı Şekil 7.6'da verilmiştir. Elektrik enerjisi üretiminde hidrolik dışındaki diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı son derece düşüktür. Şekil 7.7'de dünyadaki durum gösterilmektedir. Yenilenebilir kaynakların kullanımının artırılması, ulusal ve küresel ölçekte sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılabilmesi için son derece önemli bir araçtır.



Şekil 7.7 : 2000 yılı dünya elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı

Bugüne kadar yeterince değerlendirilmeyen yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının gerek ülkemizin öz kaynakları olması, gerek çevrenin korunması, gerekse istihdam ve yerli teknolojiler oluşturulmasına katkı sağlaması ve bu kaynakların ulusal bir politika oluşturularak desteklenmesine ihtiyaç vardır.

7.3 Enerji Kaynaklarının Değerlendirmesinde Kullanılan Ölçütler

Bu bölümde enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki etkinliklerini ölçmek için kullanılan performans ölçütleri açıklanacaktır. Enerji kaynaklarının değerlendirilmesi ve bu değerlendirme için ölçütlerin belirlenmesi uzman bilgisi gerektirmektedir. Sağlıklı bir araştırma için alternatifler, tüm ekonomik, sosyal ve çevresel faktörler göz önüne alınarak değerlendirilmelidir. Bu tezdeki performans kriterleri ve özellikle bulanık ölçütlerin değerleri belirlenirken Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği (TMMOB) Elektrik Mühendisleri Odası (EMO) uzmanlarının görüşlerinden yararlanılmıştır [41-43]. Enerji Kaynaklarının performans analizindeki girdiler, birim elektrik üretimimi için indirgenmiş maliyet, CO₂, SO₂ ve NO_x emisyonlarıdır. Çıktılar ise sürdürülebilirlik, güvenlik-güvenilirlik ve uyumluluk olarak belirlenmiştir.

7.3.1 İndirgenmiş Maliyet

İndirgenmiş maliyet, birim elektrik üretimi için bütün maliyet kalemlerinin topladığı bir girdidir. İndirgenmiş maliyet, elektrik santralleri için yapılan ilk yatırım ve yenileme, işletme, bakım-onarım, yakıt gibi tüm maliyetlerin, santralin ekonomik ömrü boyunca değerlendirilerek, elektrik üretiminin kW's başına cent cinsinden maliyetinin hesaplanmasıyla bulunur. Elektrik santrallerindeki maliyetler kullanılan teknoloji, coğrafi özellikler gibi birçok etkenden etkilendikleri için, indirgenmiş maliyetler bulanık girdilerdir. Enerji alternatiflerinin indirgenmiş maliyetleriyle ilgili verilere Amerikan Rüzgar Enerjisi Birliği (AWEA) [44] ve Roth ve Ambs'ın 2004 yılındaki makalelerinden ulaşılmıştır [45].

7.3.2 CO₂ Salınımı

Çevresel etkiler, elektrik üretiminin en önemli maliyetidir. CO₂ gazının direkt olarak insan sağlığına olumsuz etkisi olmamakla beraber, neden olduğu sera etkisi ve küresel ısınmaya katkısı nedeniyle, CO₂ salınımları, fosil yakıtlarla çalışan santrallerin en büyük sorunudur. Bugün atmosferdeki CO₂ gazının %22'si insan faaliyetlerinden, bunun da %70-75 kadarlık bir kısmı, fosil yakıtlarla enerji üretiminden kaynaklanmıştır [46]. Etkinlik analizindeki CO₂ salınımı verileri, Bakan ve diğ. (2004) tarafından yazılan bildiriden alınmıştır [47]. Kullanılan birim pounds(lb)/kWh'dir.

7.3.3 SO₂ Salınımı

SO₂ salınımları da, bir çok endüstriyel faaliyetten kaynaklanabilmesine rağmen, temel olarak fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan bir sorundur. SO₂, insan sağlığına zararlı bir gazdır. Hava kirliliğine yol açmasının yanında, neden olduğu asit yağmurları çevreye, özellikle su kaynaklarına ve bitkisel hayata büyük zarar vermektedir. Dünyadaki SO₂ salınımlarını ve asit yağmurlarını önleme projelerinin belli çevresel yararları olmuş, özellikle 1985'ten itibaren SO₂ salınımları azalmaya başlamıştır [46]. Buna rağmen SO₂ salınımları fosil yakıtlarla çalışan elektrik santrallerinin en büyük sorunlarından biridir. Etkinlik analizindeki SO₂ salınımı verileri, Bakan ve diğerleri [47] tarafından yazılan bildiriden alınmıştır. Kullanılan birim lb/kWh'dir.

7.3.4 NO_x Salınımı

NO_x salınımları özellikle su ve hava kirliliği ve ozon tabakasının incelmesinin en büyük etkenlerinden biridir. Ayrıca SO₂ kadar olmasa da asit yağmurlarının nedenlerinden biri de NO_x salınımlarıdır. Etkinlik analizindeki NO_x salınımı verileri, Bakan ve diğerleri [47] tarafından yazılan bildiriden alınmıştır. Kullanılan birim lb/kWh'dir.

7.3.5 Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik, kelime anlamı olarak herhangi bir sistemin bir gerileme olmadan uzun süre çalışma yeteneği anlamına gelmektedir. Enerji alanında sürdürülebilirlik, tüm çevresel, ekonomik ve sosyal faktörler dikkate alındığında uzun vadede etkin ve ihtiyaçlara cevap veren bir sistemin yerleştirilmesi olarak tanımlanabilir. Örneğin petrole çalışan elektrik santralleri, günümüzde ucuzluğu ve basitliği nedeniyle bazı avantajlara sahipse de uzun vadede sürdürülebilir değildir. Türkiye gibi gelişmekte olan ve enerji ihtiyacı her geçen gün katlanarak artan ülkeler için sürdürülebilir enerji politikaları belirlemek hayati önem taşımaktadır.

Yapısı itibarıyla sürdürülebilirlik, sayısal olarak ifade edilmesi zor bir kavramdır. Enerji kaynaklarının etkinliklerinin değerlendirilmesinde, sürdürülebilirlik bir bulanık çıktı olarak analize katılmış, alternatiflerin sürdürülebilirliği için uzman görüşlerine başvurulmuştur [41-43].

7.3.6 Güvenilirlik

Güvenilirlik kavramı, enerji üretimi için kullanılan teknolojiyle doğrudan ilişkilidir. Teknolojik olarak güvenilirliğini kanıtlamış enerji üretim teknolojileri, sadece laboratuvar ortamında ve bazı pilot kullanım bölgelerinde geliştirilme aşamasında olan teknolojilere göre çok daha avantajlıdır.

Güvenilirliğin bir başka açılımı da, tüketicilere, sürekli, kesintisiz, uygun fiyatta ve istenilen miktarda elektrik sağlama kabiliyetidir. Sık sık elektrik kesintilerinin yaşandığı Türkiye'de, mevcut durumda enerji güvenilirliği oldukça düşük düzeydedir. Ayrıca enerji kaynaklarında dışa bağımlılık güvenilirliği azaltan önemli etkenlerden biridir. Sadece fiyat dalgalanmaları değil, politik istikrarsızlık da enerji kaynaklarının güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

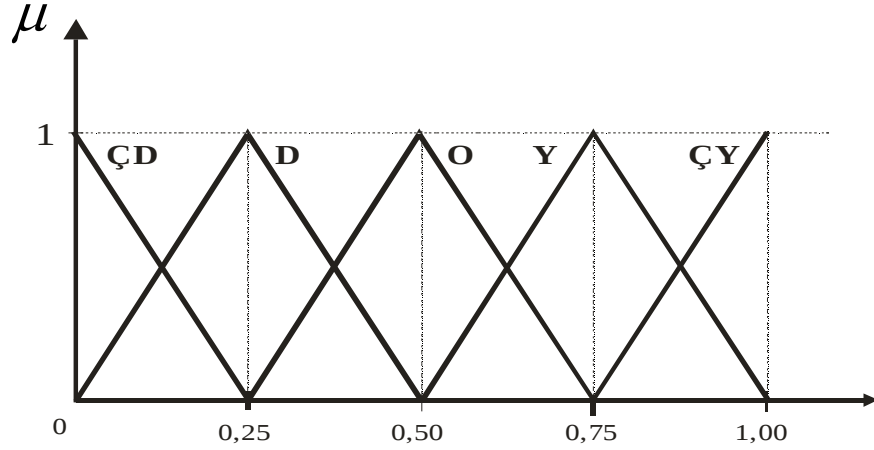
Güvenilirlik, sözel olarak ifade edilen bir kavramdır ve enerji alternatiflerinin değerlendirilmesinde bir bulanık çıktı olarak analizdeki ölçütler arasında yer almaktadır [41-43].

7.3.7 Uyumluluk

Enerji kaynaklarının bir diğer bulanık çıktısı da uyumluluktur. Enerji kaynaklarının ve elektrik üretim teknolojisinin çevre ile, ülkenin yerli kaynakları ile olduğu gibi, politik ve teknolojik olarak çevre ülkelerle işbirliği, kaynak ve teknoloji alışverişi gibi konularda da uyumlu olması gerekmektedir. Bu ölçütün de sayısal olarak ifadesi mümkün olmadığı için uzmanlardan sözel olarak görüş alınmış ve uyumluluk bulanık bir çıktı olarak analizde yer almıştır [41-43].

7.3.8 Bulanık Çıktıların Üyelik Fonksiyonları

Enerji alternatiflerinin etkinliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan bulanık çıktılar uzmanlar tarafından değerlendirilmiştir. Üç uzman enerji kaynaklarını, sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve uyumluluk açısından “çok düşük”, “düşük”, “orta”, “yüksek” ve “çok yüksek” olarak nitelendirmişlerdir. Kullanılan sözel ifadelerin bulanık üyelik fonksiyonları Şekil 7.8’de gösterilmiştir.



Şekil 7.8 : Bulanık çıktılar için sözel ifadelerin üyelik fonksiyonları

Şekil 7.8’deki “ÇD” çok düşük, “D” düşük, “O” orta, “Y” yüksek ve “ÇY” çok yüksek anlamına gelmektedir. Uzmanların, enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve uyumluluk açısından değerlendirmeleri Tablo 7.1’de verilmiştir. Enerji kaynaklarının bu ölçütlerin değerleri için üyelik fonksiyonları, üç uzmanın görüşünün ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 7.1 : Bulanık çıktılar için uzman görüşleri

	Sürdürülebilirlik			Güvenilirlik			Uyumluluk		
	U1	U2	U3	U1	U2	U3	U1	U2	U3
Kömür	ÇD	ÇD	ÇD	D	O	D	D	Y	D
Petrol	ÇD	ÇD	D	D	O	D	ÇD	O	D
Doğalgaz	D	D	D	D	Y	O	O	Y	O
Nükleer	D	D	Y	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	O	ÇD
Rüzgar	Y	ÇY	ÇY	O	ÇY	ÇY	ÇY	Y	ÇY
Güneş	ÇY	ÇY	ÇY	Y	ÇY	ÇY	ÇY	O	ÇY
Biyokütle	Y	ÇY	Y	ÇY	Y	O	O	Y	O
Hidrolik	Y	Y	O	O	Y	Y	Y	ÇY	Y

Tablo 7.1’deki verilerle bulanık çıktılar için üyelik fonksiyonları hesaplanmıştır. Bulanık çıktılar için analizde kullanılan değerler Tablo 7.2’de verilmiştir.

Tablo 7.2 : Bulanık çıktılarının değerleri

	Sürdürülebilirlik	Güvenilirlik	Uyumluluk
Kömür	(0,00; 0,00; 0,25)	(0,17; 0,42; 0,67)	(0,17; 0,42; 0,67)
Petrol	(0,00; 0,08; 0,33)	(0,08; 0,33; 0,58)	(0,08; 0,25; 0,50)
Doğalgaz	(0,00; 0,25; 0,50)	(0,17; 0,42; 0,67)	(0,33; 0,58; 0,83)
Nükleer	(0,17; 0,42; 0,67)	(0,00; 0,00; 0,25)	(0,08; 0,25; 0,50)
Rüzgar	(0,67; 0,92; 1,00)	(0,58; 0,83; 0,92)	(0,58; 0,83; 0,92)
Güneş	(0,58; 0,83; 1,00)	(0,67; 0,92; 1,00)	(0,33; 0,58; 0,83)
Biyokütle	(0,58; 0,83; 1,00)	(0,42; 0,67; 0,92)	(0,33; 0,58; 0,83)
Hidrolik	(0,42; 0,67; 0,92)	(0,42; 0,67; 0,92)	(0,58; 0,83; 1,00)

Enerji alternatiflerinin etkinliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan girdi değerleri ise Tablo 7.3'te görülmektedir. Bu girdilerden indirgenmiş maliyet, üçgen bulanık sayılarla ifade edilmektedir.

Tablo 7.3 : Enerji alternatiflerinin girdi değerleri

	İndirgenmiş Maliyet (€/kWs)	CO ₂ Salınımı (lb/kWs)	SO ₂ Salınımı (lb/kWs)	NO _x Salınımı (lb/kWs)
Kömür	(4,80; 5,15; 5,50)	2,12	0,0136	0,0079
Petrol	(5,30; 5,70; 6,10)	1,96	0,0123	0,0036
Doğalgaz	(3,90; 4,15; 4,40)	1,34	0,000007	0,0046
Nükleer	(11,1; 12,8; 14,5)	0	0	0
Rüzgar	(4,00; 5,00; 6,00)	0	0	0
Güneş	(21,6; 26,5; 32,4)	0	0	0
Biyokütle	(5,80; 8,70; 11,6)	0,723	0	0
Hidrolik	(5,10; 8,20; 11,3)	0	0	0

7.4 Sonuçlar

Tablo 7.2 ve 7.3'teki çıktı ve girdi değerleri, enerji kaynaklarının etkinliklerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Literatür araştırması bölümünde anlatılan modellerden Kao ve Liu'nun [19] geliştirdiği ve Bölüm 5.3'te incelenen bulanık VZA formülasyonu, Saati ve diğerleri [22] tarafından geliştirilen ve Bölüm 5.5'te incelenen model ve Lertworasirikul ve diğerleri [24] tarafından geliştirilen ve Bölüm 5.7'de anlatılan olabilirlik yaklaşımı ile enerji kaynaklarının performansı ölçülmüştür. Bulanık VZA Modelleri GAMS [48] ile çözülmüştür. Bu formülasyondan elde edilen sonuçlar birbirleriyle ve 6. Bölümde önerilen Dual Bulanık Veri Zarflama Analizi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bundan sonraki bölümlerde yukarıdaki modellerle elde edilen sonuçlar sıralanacaktır.

7.4.1 Kao ve Liu Formülasyonu Sonuçları

Uygulamalarda kullanılan formülasyonlardan ilki, Kao ve Liu'nun karar vericilerin VZA'da Bulanık Etkinlik Değerleri'ne [19] ulaşmasına olanak sağlayan formülasyonudur. Bu formülasyonla elde edilen sonuçlar Tablo 7.4'te görülmektedir.

Tablo 7.4 : Kao ve Liu Formülasyonu, etkinlik değerlerinin alt ve üst sınırları

α seviyesi	$\rightarrow$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Kömür	E^L	0,134	0,161	0,189	0,219	0,251	0,285	0,321	0,360	0,401	0,445	0,491
	E^U	1,000	1,000	1,000	1,000	0,950	0,855	0,768	0,689	0,617	0,551	0,491
Petrol	E^L	0,057	0,078	0,101	0,125	0,151	0,179	0,209	0,240	0,274	0,310	0,349
	E^U	1,000	1,000	0,907	0,811	0,724	0,645	0,574	0,510	0,451	0,397	0,349
Doğalgaz	E^L	0,326	0,365	0,407	0,451	0,498	0,547	0,600	0,656	0,714	0,776	0,842
	E^U	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,929	0,842
Nükleer	E^L	0,047	0,056	0,066	0,077	0,089	0,101	0,115	0,129	0,144	0,161	0,178
	E^U	0,541	0,486	0,437	0,392	0,352	0,316	0,283	0,253	0,226	0,201	0,178
Rüzgar	E^L	0,447	0,487	0,530	0,576	0,625	0,678	0,734	0,794	0,858	0,927	1,000
	E^U	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Güneş	E^L	0,093	0,101	0,109	0,119	0,129	0,139	0,151	0,164	0,178	0,193	0,209
	E^U	0,479	0,438	0,401	0,368	0,338	0,311	0,287	0,265	0,245	0,226	0,209
Biyokütle	E^L	0,200	0,221	0,244	0,269	0,296	0,326	0,358	0,393	0,431	0,473	0,519
	E^U	1,000	1,000	1,000	1,000	0,974	0,873	0,784	0,706	0,636	0,574	0,519
Hidrolik	E^L	0,223	0,248	0,275	0,304	0,336	0,372	0,411	0,454	0,501	0,553	0,610
	E^U	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,954	0,851	0,760	0,680	0,610

Kao ve Liu [19] tarafından önerilen bulanık VZA formülasyonu ile, her α seviyesi için iki etkinlik değerine ulaşılmaktadır. Bu değerler, ilgili α seviyesinde karar birimlerinin etkinliklerinin alt ve üst sınırlarını oluşturur ve bu şekilde etkinlik değerlerinin üyelik fonksiyonları elde edilir. Tablo 7.4'teki E^L ve E^U değerleri her α seviyesi için sırasıyla enerji kaynaklarının etkinliklerinin alt ve üst sınırlarıdır.

Kao ve Liu [19], makalelerinde, karar birimlerinin etkinliklerine göre sıralanabilmesi için Chen ve Klein'in [49] bulanık sayı sıralama yöntemini kullanmışlardır. Chen ve Klein'in sıralama yöntemi ile karar birimlerinin her α seviyesindeki alt ve üst sınırları kullanılarak, tek bir indeks değerine ulaşılmaktadır. Bu yöntem kullanılarak karar birimlerini etkinliklerine göre sıralanması mümkün olmaktadır. Chen ve Klein bulanık sayıların sıralanması için aşağıdaki indeksi önermişlerdir:

$$I_j = \sum_{i=1}^n ((E_j)_{\alpha_i}^U - c) / \left[\sum_{i=1}^n ((E_j)_{\alpha_i}^U - c) - \sum_{i=1}^n ((E_j)_{\alpha_i}^L - d) \right] \quad (7.1)$$

Burada $(E_j)_{\alpha_i}^U$ ve $(E_j)_{\alpha_i}^L$ ilgili α seviyesinde etkinlik değerin sırasıyla alt ve üst sınırdır. n , α seviyesi sayısını göstermektedir. Enerji kaynaklarının performans analizinde on bir adet α seviyesi vardır (0,0; 0,1;...;1,0). c ve d sabitleri aşağıdaki şekilde bulunur.

$$c = \text{enk} \left\{ (E_{ji})_{\alpha_i}^L \right\} \text{ ve } d = \text{enb} \left\{ (E_{ji})_{\alpha_i}^U \right\} \quad (7.2)$$

Teorik olarak bu yöntem n sonsuza giderken tam olarak geçerlidir ancak Chen ve Klein [49] $n=3$ veya 4 olduğunda sıralama için yeterli sayıda α seviyesi olduğunu öne sürmektedir.

Chen ve Klein'ın sıralama metodu [49] ile elde edilen indeks değerleri Tablo 7.5'te verilmiştir. Bu sonuçlar Tablo 7.4'teki değerlere (7.1) formülasyonunun uygulanması ile elde edilmiştir.

Tablo 7.5 : Enerji kaynaklarının sıralama değerleri

Enerji Kaynağı	Etkinlik Değeri
Kömür	0,7327
Petrol	0,6088
Doğalgaz	0,8500
Nükleer	0,3932
Rüzgar	0,8771
Güneş	0,5165
Biyokütle	0,7626
Hidrolik	0,7903

Tablo 7.5'teki değerleri göre enerji kaynakları, bulanık etkinlik değerlerine göre aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır:

Rüzgar > Doğalgaz > Hidrolik > Biyokütle > Kömür > Petrol > Güneş > Nükleer

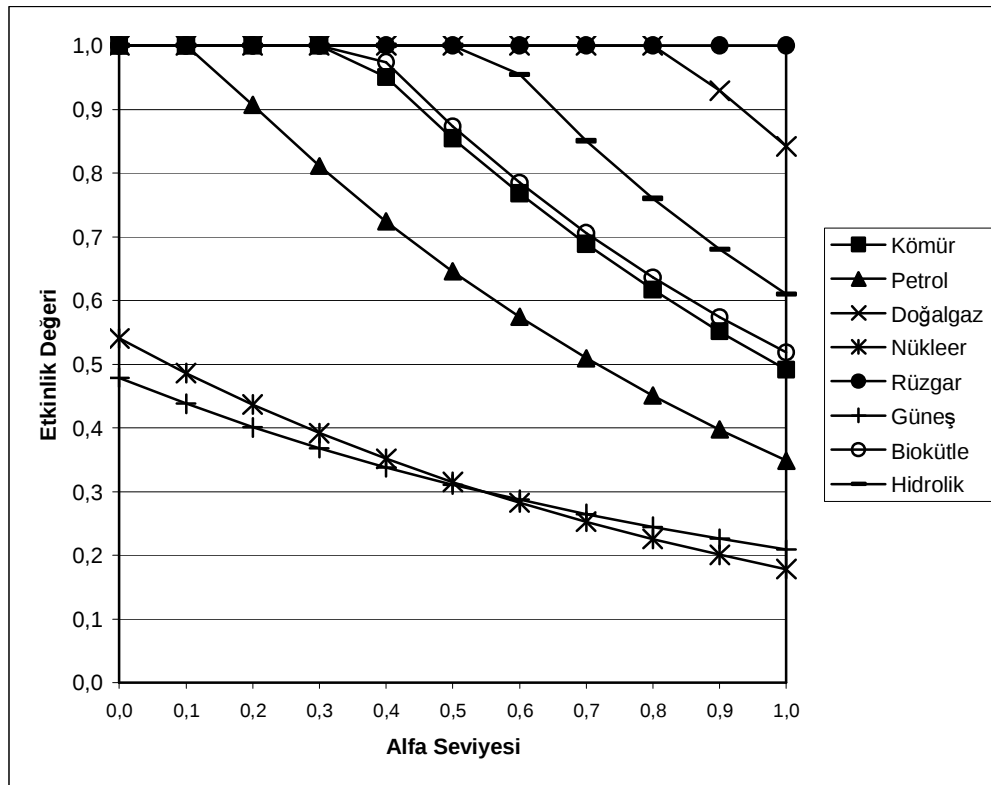
7.4.2 Saati ve Diğ. Formülasyonu Sonuçları

Saati ve diğerlerinin [22] geliştirdiği formülasyon 5. Bölüm’de ayrıntılı olarak incelenmişti. Bu formülasyonun enerji kaynaklarının verileri kullanılarak uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar Tablo 7.6’da görülmektedir.

Tablo 7.6 : Saati ve dig. formülasyonu ile ulaşılan etkinlik değerleri

Alfa	Kömür	Petrol	Doğalgaz	Nükleer	Rüzgar	Güneş	Biyokütle	Hidrolik
0,0	1,0000	1,0000	1,0000	0,5405	1,0000	0,4789	1,0000	1,0000
0,1	1,0000	1,0000	1,0000	0,4859	1,0000	0,4379	1,0000	1,0000
0,2	1,0000	0,9069	1,0000	0,4366	1,0000	0,4012	1,0000	1,0000
0,3	1,0000	0,8108	1,0000	0,3921	1,0000	0,3682	1,0000	1,0000
0,4	0,9502	0,7240	1,0000	0,3519	1,0000	0,3384	0,9739	1,0000
0,5	0,8546	0,6454	1,0000	0,3155	1,0000	0,3114	0,8731	1,0000
0,6	0,7678	0,5742	1,0000	0,2825	1,0000	0,2870	0,7843	0,9544
0,7	0,6888	0,5095	1,0000	0,2526	1,0000	0,2648	0,7057	0,8507
0,8	0,6168	0,4508	1,0000	0,2255	1,0000	0,2445	0,6360	0,7599
0,9	0,5512	0,3974	0,9292	0,2008	1,0000	0,2260	0,5739	0,6801
1,0	0,4913	0,3488	0,8419	0,1783	1,0000	0,2091	0,5185	0,6098

Tablo 7.6’daki değerler grafik olarak Şekil 7.9’da görülmektedir. Saati ve diğerlerinin formülasyonunda, α seviyeleri sıfıra yaklaştıkça karar birimlerinin etkinlikleri artmaktadır. Düşük α seviyelerinde etkinlik sınırında yer alan karar birimi sayısı yüksektir ve bu durum sıralama yapmayı güçleştirmektedir.



Şekil 7.9 : Saati ve diğ. [22] etkinlik değerleri grafik gösterimi

Şekil 7.9'daki grafiğe göre en etkin enerji kaynağı rüzgardır. Doğalgaz ve hidrolik enerji, etkinlik sıralamasında rüzgar enerjisinden sonra gelmektedir. Daha sonra aralarında az bir fark olan biyokütle ve kömür gelmektedir. Petrol altıncı sırada yer alırken, en etkinsiz enerji kaynakları nükleer güç ve güneştir. Şekil 7.9'da da görüldüğü gibi, α seviyeleri azaldıkça, yani α aralıkları göreceli olarak büyük olduğunda modelin serbestliği artmakta ve birçok karar birimi etkinlik sınırında yer almakta ve karar birimleri arasında sıralama yapmak zorlaşmaktadır.

7.4.3 Olabilirlik Yaklaşımı Sonuçları

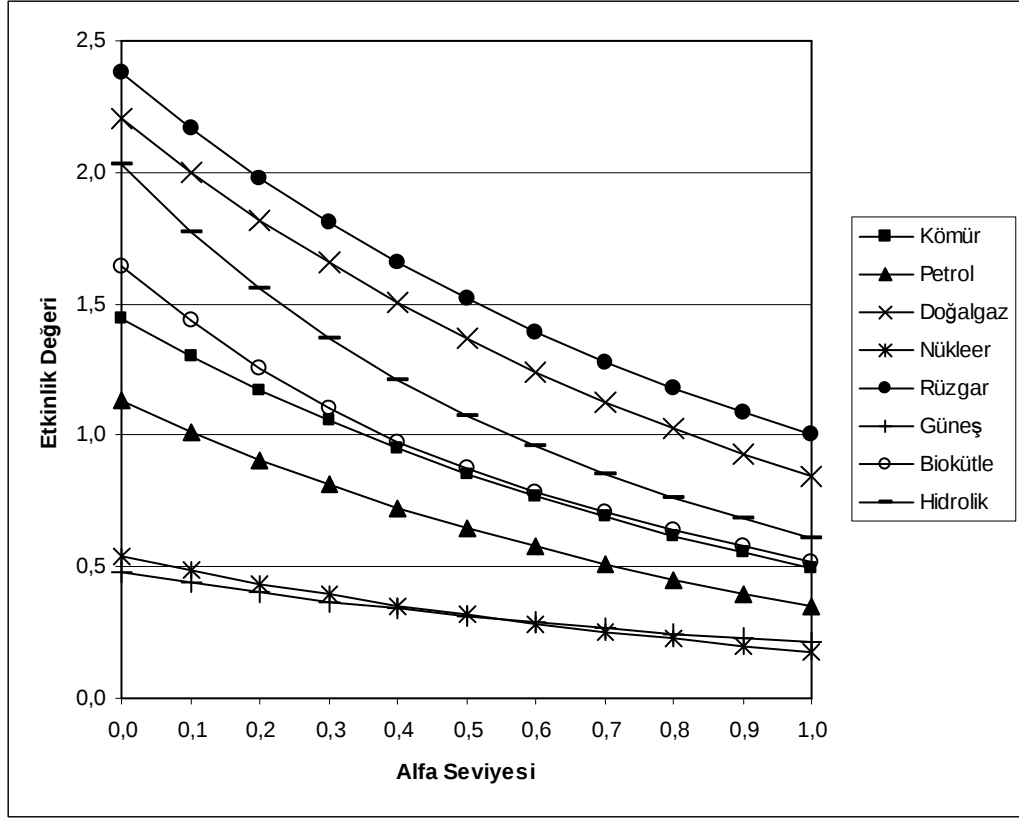
Lertworasirikul ve diğerleri [24] tarafından geliştirilen ve α kesmelerine benzer bir yaklaşım olan olabilirlik yaklaşımı ile bulanık etkinlik analizine imkan tanıyan model enerji alternatiflerinin etkinliklerinin ölçülmesinde kullanılmıştır. Bu formülasyonun uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar Tablo 7.7'de verilmiştir.

Tablo 7.7 : Olabilirlik yaklaşımı [24] ile elde edilen etkinlik değerleri

alfa	Kömür	Petrol	Doğalgaz	Nükleer	Rüzgar	Güneş	Biyokütle	Hidrolik
0,0	1,4440	1,1321	2,2016	0,5405	2,3793	0,4789	1,6409	2,0284
0,1	1,3009	1,0136	2,0001	0,4859	2,1669	0,4379	1,4332	1,7720
0,2	1,1721	0,9069	1,8180	0,4366	1,9772	0,4012	1,2554	1,5548
0,3	1,0556	0,8108	1,6529	0,3921	1,8072	0,3682	1,1025	1,3696
0,4	0,9502	0,7240	1,5029	0,3519	1,6545	0,3384	0,9739	1,2106
0,5	0,8546	0,6454	1,3665	0,3155	1,5169	0,3114	0,8731	1,0734
0,6	0,7678	0,5742	1,2420	0,2825	1,3926	0,2870	0,7843	0,9544
0,7	0,6888	0,5095	1,1283	0,2526	1,2800	0,2648	0,7057	0,8507
0,8	0,6168	0,4508	1,0244	0,2255	1,1778	0,2445	0,6360	0,7599
0,9	0,5512	0,3974	0,9292	0,2008	1,0848	0,2260	0,5739	0,6801
1,0	0,4913	0,3488	0,8419	0,1783	1,0000	0,2091	0,5185	0,6098

Görüldüğü gibi olabilirlik yaklaşımı ile yapılan analizde, α seviyeleri sıfıra yaklaştıkça karar birimlerinin etkinlik değerleri artmaktadır. Dikkat çeken bir diğer özellik ise, özellikle düşük α seviyelerinde, etkinlik değerlerinin birden yüksek çıkabilmesidir. Bunun nedeni, karar vericilerin, kısıtların gerçekleşme ihtimalini, olabilirlik seviyeleri ile kendileri belirlemesidir. Klasik VZA formülasyonundaki (CCR formülasyonu, Bölüm 3) ilk kısıtın aşılması, karar birimlerinin etkinlik değerlerinin biri (1) aşmasına yol açabilmektedir. (5.36) formülasyonunda görüleceği gibi girdilerin ağırlıklı toplamının bire eşitlenmesi kısıtı α_0 olabilirlik seviyesine bağlıdır. Bu kısıtın olabilirliği azaldıkça karar birimlerinin etkinlik değerlerinin bir (1)'i aşması mümkün olmaktadır. Etkinlik analizlerinde genel olarak kabul gören durum, etkinliğin 0 ile 1 aralığında bir değer almasıdır. Bir (1)'den yüksek etkinlik değerleri karar vericiler açısından dezavantaj teşkil edebilir. Normalde etkinlik değeri bir (1)

olan bir karar birimi etkin olarak kabul edilirken, olabilirlik yaklaşımında etkinlik değerinin bir (1) olan bir karar birimi etkin olmayabilir. Bu durum, bir takım karışıklara yol açabileceği gibi, etkinlik değerlerinin üst sınırının bilinmemesi analizin karar vericilere daha az bilgi sunmasına yol açar. Ancak bu durum karar birimlerinin etkinlik değerlerine göre sıralanmasını engellemez. Şekil 7.10’da, Tablo 7.7’deki etkinlik değerleri grafik olarak görülmektedir.



Şekil 7.10 : Olabilirlik yaklaşımı ile ulaşılan etkinlik değerleri

Şekil 7.10’daki grafikte, önceki iki formülasyondan elde edilen sonuçlarda olduğu gibi en etkin enerji alternatifinin rüzgar olduğu görülmektedir. Rüzgar enerjisini doğalgaz ve hidrolik enerji izlemektedir. Biyokütle ve kömür yine birbirlerine yakın etkinlik değerleri ile 4. ve 5. sıradadır. 6. sırada petrol yer almakta, nükleer güç ve güneş enerjisi de yine son iki sırayı paylaşmaktadır.

7.4.4 Dual Bulanık Veri Zarflama Analizi Sonuçları

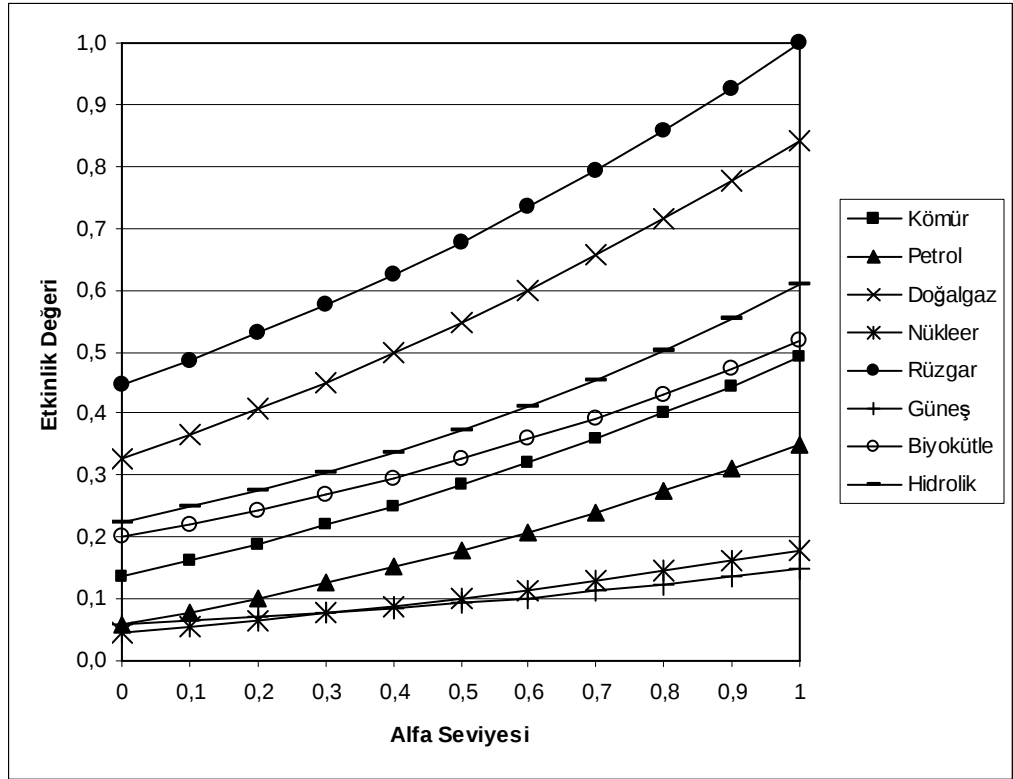
Enerji kaynaklarının etkinlikleri son olarak bu tezde önerilen yöntem olan dual bulanık veri zarflama analizi (DBVZA) ile değerlendirilecektir. DBVZA’nın diğer yöntemlerden en büyük farkı bir enküçükleme problemi olmasıdır. Bu nedenle α seviyeleri arttıkça karar birimlerinin (enerji kaynaklarının) etkinlik değerleri

artmaktır. Şekil 7.9 ve 7.10’da görüldüğü gibi, Saati ve diğerleri [22] ve Lertworasirikul ve diğerleri [24] tarafından geliştirilen modellerde, α seviyeleri arttıkça etkinlik değerleri azalmaktadır. DBVZA ile yapılan uygulamanın sonuçları Tablo 7.9’da verilmiştir.

Tablo 7.8 : DBVZA ile ulaşılan etkinlik değerleri

Alfa	Kömür	Petrol	Doğalgaz	Nükleer	Rüzgar	Güneş	Biyokütle	Hidrolik
0,0	0,1344	0,0570	0,3261	0,0469	0,4467	0,0582	0,2000	0,2232
0,1	0,1606	0,0780	0,3652	0,0562	0,4869	0,0640	0,2211	0,2478
0,2	0,1887	0,1006	0,4068	0,0663	0,5299	0,0702	0,2440	0,2747
0,3	0,2187	0,1248	0,4509	0,0772	0,5758	0,0771	0,2689	0,3041
0,4	0,2507	0,1508	0,4977	0,0888	0,6250	0,0845	0,2961	0,3364
0,5	0,2849	0,1787	0,5474	0,1013	0,6776	0,0926	0,3256	0,3719
0,6	0,3213	0,2085	0,5999	0,1147	0,7337	0,1017	0,3577	0,4108
0,7	0,3601	0,2403	0,6555	0,1291	0,7938	0,1120	0,3928	0,4535
0,8	0,4012	0,2742	0,7143	0,1444	0,8580	0,1233	0,4310	0,5006
0,9	0,4449	0,3103	0,7764	0,1608	0,9266	0,1358	0,4728	0,5525
1,0	0,4913	0,3488	0,8419	0,1783	1,0000	0,1496	0,5185	0,6098

DBVZA ile elde edilen etkinlik değerlerine göre en etkin enerji kaynağı yine rüzgar enerjisidir. Sıralamanın daha kolay görülebilmesi için Tablo 7.9’daki değerler Şekil 7.11’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 7.11 : DBVZA ile ulaşılan etkinlik değerleri

Şekil 7.11’de de görülebileceği gibi, DBVA ile yapılan etkinlik analizinin sonuçları, önceki üç yöntemle uyumludur. Enerji kaynaklarının etkinliklerine göre sıralamaları tüm bulanık VZA formülasyonları uygulamalarında aynı çıkmıştır. Enerji kaynaklarını etkinliklerine göre büyüktten küçüğe doğru sıralayacak olursak:

Rüzgar — Doğalgaz — Hidrolik — Biyokütle — Kömür — Petrol — Güneş
Nükleer

Güneş enerjisinin, nükleer enerjiye göre bazı α seviyelerinde daha etkin, bazılarında ise daha etkinsiz olduğu görülmekte ve bu yüzden ikisi arasında bir sıralama yapmayı güçleştirmektedir. Kao ve Liu’nun [19] formülasyonu ile yapılan etkinlik analizinin sonuçlarına göre bir sıralama yapmak için Chen ve Klein’in [49] sıralama yöntemi uygulandığında güneş enerjisi etkinlik açısından, nükleer enerjinin üstündedir. Kısaca bu nükleer ve güneş enerjilerinin son iki sırayı paylaştığı söylenebilir.

7.5 Sonuçların Değerlendirilmesi

7. Bölüm’de Türkiye’de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatiflerinin değerlendirilmesinde, literatürde rastlanan üç bulanık veri zarflama analizi ile bu tezde önerilen yöntem olan dual bulanık veri zarflama analizi (DBVZA) kullanılmıştır. Yapılan analizlerde enerji kaynaklarının etkinliklerine göre sıralamasının, tüm yöntemlerde aynı çıktığı gözlemlenmiştir.

Kullanılan dört formülasyonun sonucu da rüzgar enerjisini etkinlik açısından ilk sırada yer almaktadır. Rüzgar enerjisinin, sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve uyumluluk ölçütlerinde diğer alternatiflere göre son derece avantajlı konumda olmasının yanı sıra, gaz emisyonlarının sıfır olması, dolayısıyla olumsuz çevresel etkilerinin minimum düzeyde kalmasıyla da tüm uygulamalarda en etkin enerji kaynağı olduğu gözlemlenmiştir.

Doğalgaz, yine tüm uygulamalarda rüzgardan sonra ikinci sırada yer almaktadır. Tüm fosil yakıtlar gibi elektrik üretiminde kullanımının kolaylığı ve maliyetinin azlığı doğalgazın etkinliğinin yüksek çıkmasında önemli rol oynamıştır. Ancak doğalgazın etkinlik sıralamasında üstlerde yer almasının en büyük sebebi, küresel ısınma ve hava kirliliğine etkisinin diğer fosil yakıtlara göre düşük olmasıdır.

Hidrolik enerji, yani akarsulardan sağlanan güç, elektrik üretiminde ülkemizde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrolik enerjinin en büyük avantajları, gaz emisyonlarının olmaması ve hidroelektrik santrallerinin işletme maliyetlerinin düşük olmasıdır. Ayrıca bedava ve yenilenebilir bir kaynak olması da performans

analizinde üst sıralarda yer almasını sağlamıştır. Yapılan dört uygulamada da hidrolik enerji rüzgar ve doğalgazdan sonra üçüncü sırada yer almaktadır.

Yapılan analizlerin hepsinde, biyokütle ve kömür alternatiflerinin etkinlik değerleri birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Yine tüm uygulamalarda biyokütle enerjisi 4., kömür 5. sırada yer almıştır. Biyokütle, göreceli olarak pahalı ve salınım değerlerinin diğer yenilenebilir kaynaklara göre yüksek olmasına rağmen, gelecekte petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtların yerini alacağı tahmin edilmektedir.

Fosil yakıtlardan biri olan kömürün Türkiye’de bol miktarda bulunması etkinliğinin petrolden yüksek olmasının en büyük sebebidir. Petrol, olumsuz çevresel etkileri, fiyatlarındaki dalgalanmalar ve sınırlı bir kaynak olmasına rağmen ucuzluğu, mevcut teknolojilerle kullanım kolaylığı gibi nedenlerde güneş enerjisi ve nükleer enerjiden daha etkin bir enerji kaynağıdır. Yapılan tüm uygulamalarda petrol, etkinlik açısından 6. sırada yer almaktadır.

Yine tüm analizlerde nükleer enerji ve güneş enerjisi son sırada bulunmaktadır. Kao ve Liu [19] formülasyonu kullanılarak elde edilen bulanık etkinlik değerleri için Chen ve Klein’in [49] sıralama yöntemi uygulandığında güneş enerjisi 7., nükleer enerji son sırada yer almaktadır. Diğer uygulamalarda bu sıralama α ve olabilirlik seviyelerine göre değişmektedir. Dikkat edilmesi gereken bir nokta ise CCR formülasyonunun [1] primal formunu temel alan Saati ve diğerleri [22] ve Lertworasirikul ve diğerleri [24] tarafından önerilen bulanık VZA formülasyonlarında, düşük α seviyeleri için nükleer enerji etkinlik açısından güneş enerjisinin üstünde, yüksek α seviyelerinde altında yer almaktadır. CCR formülasyonunun dual formunu temel alan DBVZA’da ise bunun tersi bir durum söz konusudur. Bunun nedeni, DBVZA’nın diğer iki formülasyondan farklı olarak bir enküçükleme problemi olmasıdır.

Kullanılan yöntemlerden Kao ve Liu [19] formülasyonu, karar verici veya analizciye her karar birimi (enerji alternatifi) için tek bir etkinlik sıralaması sunmakta, diğer yöntemler her α veya olabilirlik seviyesi için ayrı bir etkinlik değeri vermektedir. Elektrik üretimini için enerji kaynaklarının değerlendirilmesinde 11 adet (0.0, ..., 1) seviye kullanılmıştır. Dolayısıyla Saati ve diğerleri’nin [22], Lertworasirikul ve diğerleri’nin [24] formülasyonları ve bu tezde önerilen DBVZA ile yapılan uygulamalarda her alternatif için 11 etkinlik değeri elde edilmiştir. Ancak Kao ve Liu [19] formülasyonu ile yapılan uygulamalarda karar birimlerinin etkinliklerine göre sıralanabilmesi için bir sıralama yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Şekil 7.9’da da gözlemlenebileceği gibi, Saati ve diğerleri’nin [22] formülasyonu ile yapılan uygulamada, özellikle düşük α seviyelerinde bir çok karar biriminin etkinlik

sınırında yer aldığı görülmüştür. Bu durum karar birimlerinin etkinliklerine göre sıralanmasını güçleştirmektedir.

Genel olarak performans analizlerinde karar birimlerinin etkinlik değerleri $[0, 1]$ aralığındadır. Etkinlik değeri bir (1) olan karar birimleri %100 etkin olarak tanımlanır. Lertworasirikul ve diğerleri [24] tarafından geliştirilen olabilirlik yaklaşımı ile yapılan uygulamada ise düşük olabilirlik seviyelerinde karar birimlerinin etkinlik değerleri 1'i aşmaktadır (Şekil 7.10). Bu durum en etkin karar birimleri için bile %100 etkin tanımı yapılmasını engellemekte, etkin olmayan karar birimlerinin etkinsizlik oranının hesaplanmasında güçlük yaratmakta ve karar vericiler açısından olası karışıklıklara yol açmaktadır.

Şekil 7.11'de DBVZA formülasyonu ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, tüm α seviyelerinde karar birimlerinin etkinliklerine göre sıralanabildiğini gözlemlenmektedir. Her α seviyesinde, etkinlik sınırında yer alan karar birimi sayısı görece olarak azdır. Yapılan uygulamada, etkinlik değerlerinin en yüksek olması beklenen bir (1) α seviyesinde dahi tek bir karar biriminin (rüzgar enerjisi) %100 etkin olduğu görülmektedir. VZA analizinin en büyük dezavantajlarından biri, özellikle az sayıda karar birimi ve çok sayıda girdi-çıkı olduğu, modelin serbestliğinin artması ve bir çok karar biriminin etkinlik sınırında yer almasıdır. DBVZA ile yapılan uygulamalarda bu sorun görülmemektedir. Bu da DBVZA'nın gerçek hayattaki uygulamalarda karar birimlerinin etkinliklerine göre sıralanması için son derece uygun olduğunu göstermektedir.

DBVZA ile elde edilen etkinlik sıralaması, diğer yöntemlerle ulaşılan sonuçlarla tamamen uyumludur. Enerji alternatifleri, etkinliklerine göre hem kullanılan üç yöntemle, hem de DBVZA'ya göre aynı şekilde sıralanmıştır. Bu da DBVZA'nın karar vericiler için doğru ve sağlıklı bir performans analizi yöntemi olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca α kesmelerinin tamamı formülasyonda kullanıldığı için analizde karar birimleri hakkında daha fazla bilgi yer almakta ve böylece daha sağlıklı bir performans değerlendirmesi mümkün olmaktadır.

8. SONUÇLAR

Etkinliğin ölçümü ve performans analizi, günümüzün ileri üretim teknolojileri ve organizasyonların iş görme süreçlerini etkileyen iç ve dış etkenler göz önüne alındığında karar vericilerin kritik görevlerinden biridir. Değerlendirilecek karar birimlerinin üretim için kullandığı girdiler ve bu girdilerin kullanımıyla üretilen çıktılar birden çok olduğunda bu problem daha da karmaşık hale gelmektedir. Buna bir de girdi ve çıktıların çok farklı birimlerde (zaman, para, ağırlık, adet, vs.) olabileceği, hatta bir çok durumda yetersiz bilgi, belirsizlik gibi nedenlerle kesin olarak bilinemeyeceği eklenirse, karar birimleri arasında bir performans karşılaştırması yapmanın ne kadar zor bir iş olduğu ortaya çıkar. Belirsizliği arttıran ve karar vericilerin işini güçleştiren bir diğer unsur da performans analizi için kullanılacak ölçütlerin bazı durumlarda sayısal değil yalnızca sözel olarak ifade edilebilmesidir.

Veri Zarflama Analizi (VZA), karar birimlerinin performanslarının ölçülmesi için son derece kullanışlı bir tekniktir. Birden çok ve değişik birimlerde girdi ve çıktının analizde kullanılmasına olanak sağlaması ve etkinlik analizi sırasında karar vericilerin öznel görüşlerine ihtiyaç duyulmaması VZA'nın performans ölçüm tekniklerinin en önemlilerinden biri haline gelmesine yol açmıştır. Ancak VZA, klasik haliyle yalnızca kesin sayılarla ifade edilebilen ölçütlerin etkinlik analizinde kullanılmasına izin verir. Bu sorunun çözümü için literatürde klasik VZA formülasyonunun (CCR formülasyonu) bir takım versiyonlarına rastlanmaktaysa da [16-18] belirsiz, kesin olmayan, sözel olarak ve aralıklarla ifade edilen ölçütlerin analizlerde kullanılmasını sağlayan en önemli araç bulanık kümeler teorisi ve bulanık matematiksel programlama yöntemleridir.

Bu tezde Türkiye'de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatiflerinin etkinliklerinin değerlendirilmesinde bulanık VZA kullanılmıştır. 2. Bölüm'de performans analizi ve etkinlik ile ilgili temel kavramlar, 3. Bölüm'de veri zarflama analizi yöntemi anlatılmıştır. 4. Bölüm'de bulanık kümeler teorisinin temel kavramları kısaca sıralanmış ve belirsizlik ortamında karar alma teknikleri üzerinde durulmuştur. 5. Bölüm'de literatürde rastlanan belli başlı bulanık VZA formülasyonları ayrıntılarıyla incelendikten sonra 6. Bölüm'de yeni bir bulanık VZA yöntemi olan Dual Bulanık VZA (DBVZA) yöntemi öne sürülmüştür. 7. Bölüm'deki uygulamada Türkiye'de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatiflerinin etkinlik-

leri literatürdeki üç farklı bulanık VZA formülasyonu ve 6. Bölüm’de önerilen DBVZA ile ölçülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç bölümünün ilk kısmında kullanılan yöntemler üzerinde yorumlar, bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları teorik olarak ve uygulama sonuçlarına göre tartışılacak, ikinci kısımda uygulamaların sonuçları üzerinde görüşler belirtilecektir. Sonuç bölümünün son kısmında ise gelecek araştırmalar için önerilere yer verilecektir.

8.1 Kullanılan Yöntemlerin Değerlendirilmesi

Bulanık kümeler teorisi, matematiksel programlama yöntemlerine ilk olarak Zimmermann [25] tarafından uygulanmıştır. 4. Bölüm’de ayrıntılı olarak incelen Zimmermann’ın bulanık matematiksel programlama formülasyonu, matematiksel programdaki parametrelerin değil kısıtların bulanık olaylar olarak ele alınmasına olanak sağlamaktadır. Carlsson ve Korhonen’in [26] öne sürdükleri bulanık matematiksel programlama yönteminde ise, programdaki değişkenler bulanık üyelik fonksiyonlarıyla ifade edilmektedir. Bulanık matematiksel programlama tekniğini VZA’da ilk kez uygulatan Sengupta’dır [31]. Sengupta tarafından önerilen bulanık VZA formülasyonu Zimmermann’ın [25] bulanık matematiksel programlama yöntemini temel almıştır.

Literatürde rastlanan bulanık VZA formülasyonları temel olarak iki gruba ayrılabilir. Bölüm 5.1.1’de anlatılan Sengupta’nın modeli [31] ve Bölüm 5.1.2’de anlatılan Kahraman ve diğerlerinin modeli [32], Zimmerman’ın bulanık matematiksel programlama yöntemini [25] temel almışlardır. Bu modellerde, VZA’daki kısıtların bulanık olaylar olarak ele alınmış ve bu kısıtların gerçekleşme dereceleri karar vericiler tarafından belirlenen tolerans limitleri içinde değerlendirilmiştir [31,32]. Bu durum, karar vericiye belli bir esneklik tanınmasına ve analizde aktif rol oynamasına imkan vermesine rağmen genelde gerçek hayatta VZA’daki kısıtlar için değil girdi ve çıktılar için belirsizlik söz konusudur.

Literatürde rastlanan bulanık VZA formülasyonlarının diğerleri ise, kısıtların değil, karar birimlerinin kullandığı girdi ve ürettiği çıktı miktarlarının bulanık sayılar olarak ifade edildiği modellerdir. 5. Bölümde incelenen diğer formülasyonlar bu tip verilerin VZA’da kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Girdi ve çıktı değerlerinin bulanık sayılarla ifade edildiği durumlarda VZA bir doğrusal programlama problemi olmaktan çıkmaktadır. Bulanık VZA formülasyonlarının doğrusallaştırılması için bulanık kümeler teorisi kavramları, α -kesmeleri ve olabilirlik seviyeleri kullanılmıştır.

Bulanık kümeler teorisinin temel kavramları ve bulanık küme işlemlerini kullanan formülasyonlara Bölüm 5.1.4'te incelen Guo ve Tanaka [20] tarafından ortaya atılan bulanık VZA: Algısal bir değerlendirme yöntemi örnek gösterilebilir. Guo ve Tanaka [20], VZA'daki eşitlik, büyük eşit ve küçük eşitlik kısıtlarını bulanık kümeler teorisini kullanarak yeniden tanımlamıştır. Amaç fonksiyonundaki bulanıklığı da bir bulanık sayının enbüyüklenmesi tanımıyla (Bölüm 5.4.2) doğrusallaştırmıştır. Guo ve Tanaka'nın modeli bulanık sayıların kullanılmasına izin vermesine rağmen, iki seviyeli bir matematiksel programın çözümünü gerektirmesi işlem yükü ve zamanını artırmakta, modelin uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca modelin çözümünden sonra etkinlik değerlerinin hesaplanması için ayrı işlemlere ihtiyaç duyulması da bu modelin dezavantajlarından biridir.

Bulanık modellerin doğrusallaştırılmasında kullanılan en yaygın yöntemlerden biri α -kesmeleri kullanarak modeli bir parametrik doğrusal modeller ailesine dönüştürmektir. Kao ve Liu [19] bu yöntemi kullanarak VZA'da bulanık etkinlik değerleri elde edilmesini sağlayan bir formülasyon geliştirmişlerdir. 7. Bölüm'de, enerji kaynak alternatiflerinin etkinliklerinin değerlendirilmesinde de kullanılan bu model, her α seviyesi için etkinlik değerinin alt ve üst sınırını teşkil eden ve etkinlik değerinin bulanık üyelik fonksiyonunu oluşturan iki adet etkinlik değeri vermektedir. Bu modelin zayıf noktası ise, karar birimlerinin etkinliklerine göre sıralanması için bir bulanık sıralama yöntemine ihtiyaç duyulmasıdır. Kao ve Liu [19] bulanık etkinlik değerlerinin sıralanması için Chen ve Klein tarafından önerilen bulanık sayıları sıralama yöntemini [49] kullanmışlardır.

Bulanık VZA formülasyonlarının doğrusallaştırılması için kullanılan bir diğer yöntem de olabilirlik seviyelerini kullanmaktır. Temelde α seviyelerine benzer bir yöntem olan olabilirlik seviyeleri yönteminde, kısıtlar, belli olabilirlik seviyelerinde ele alınmakta ve model yine bir parametrik model ailesine dönüştürülmektedir. León ve diğerleri [23], Banker ve diğerleri tarafından öne sürülen ve ölçeğe göre değişken getiriler öngören, girdi odaklı BCC modeline [6] dayanarak bir bulanık VZA formülasyonu geliştirmişlerdir. Bu formülasyonda LR-bulanık sayılar şeklindeki girdi ve çıktılar modelde kullanılmaktadır. Modelde, karar biriminin etkinliği, etkinlik değerinin bir (1) olduğu en yüksek olabilirlik seviyesine göre belirlemektedir. Lertworasirikul ve diğerleri [24] ise, olabilirlik seviyelerini, kısıtların gerçekleşmesin olabilirliği olarak ele almaktadır. 7. Bölüm'de, enerji kaynaklarının etkinliklerinin değerlendirilmesinde de kullanılan bu modelin en büyük dezavantajı, etkinlik değerlerinin birden yüksek çıkabilmesidir. Genel olarak performans analizlerinde karar birimlerinin etkinlik değerleri [0, 1] aralığındadır. Etkinlik değeri bir (1) olan karar birimleri %100 etkin olarak tanımlanır. Lertworasirikul ve diğerleri [24]

tarafından geliştirilen olabilirlik yaklaşımı ile yapılan uygulamada ise özellikle düşük olabilirlik seviyelerinde karar birimlerinin etkinlik değerleri 1'i aşabilmektedir (Şekil 7.10). Bu durum en etkin karar birimleri için bile %100 etkin tanımı yapılmasını engellemekte, etkin olmayan karar birimlerinin etkinsizlik oranının hesaplanmasında güçlük yaratmakta ve karar vericiler açısından olası karışıklıklara yol açmaktadır.

α -kesmeleri veya olabilirlik seviyelerine göre parametrik doğrusal programlama modellerine dönüştürülen birçok modelde bulanık girdi ve çıktıların α -kesmelerinin uç noktaları kullanılmaktadır. Bu yaklaşım formülasyonları oldukça basitleştirmesine rağmen birçok verinin kaybolmasına yol açmaktadır. Herhangi bir bulanık girdi ve çıktının, herhangi bir α -kesmesi veya olasılık seviyesi bir aralık belirlemekte ve formülasyonda bu aralığın sadece uç noktalarının kullanılması, aradaki değerlerin dikkate alınmamasına yol açmaktadır. Ayrıca aralıkların uç değerlerinin kullanılması, hangi uç değer kullanıldığına göre performansı ölçülen karar birimlerinin etkinlik değerinin değişmesine yol açmaktadır. Bunun sonucunda bir karar birimi aynı girdi ve çıktı değerleriyle birden fazla etkinlik değerine sahip olabilir. Bazı formülasyonlar, girdi aralıklarının alt sınırlarını, çıktı aralıklarının üst sınırlarını kullanarak iyimser bir yaklaşım öngörürken bunun tam tersini uygulamak aynı karar birimi için farklı bir etkinlik değerine yol açacaktır.

Saati ve diğerleri [22] tarafından geliştirilen ve 7. Bölüm'deki enerji kaynaklarının etkinliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemde ise α -kesmelerinin alt ve üst sınırlarını kullanmak yerine, söz konusu aralık içinde, kısıtları sağlayan ve ilgili karar biriminin performansını enbüyükleyecek bir nokta bulunmaktadır. Bu nokta formülasyona yeni bir değişken olarak katılmakta ve bu şekilde her karar birimi için bir adet etkinlik skoruna ulaşılmakla kalmayıp, α -kesmesinin bütün değerleri performans ölçümünde kullanılmaktadır. Ancak girdi ve çıktıların α -kesmelerinin uç noktaları yerine, α -kesmelerinin içinde bir noktanın kullanılması diğer formülasyonlara göre büyük bir serbestlik sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak özellikle düşük α seviyelerinde karar birimlerinin etkinlik değerleri yüksek çıkmakta, birçok karar birimi etkinlik sınırında yer almaktadır ve bu durum sağlıklı bir sıralama yapmaya güçleştirmektedir. Şekil 7.9'da bu durum gözlemlenmektedir.

6. Bölüm'de önerilen Dual Bulanık Veri Zarflama Analizi Formülasyonu (DBVZA), CCR formülasyonunun [1] dual formunu temel almaktadır. α kesmeleri kullanılarak

doğrusallaştırılan model, aralıkların yalnızca uç noktalarının değil bütün aralığın dikkate alınmasına olanak sağlamakta ve bu sayede daha çok bilginin analizde kullanılmasına imkan tanımaktadır. DBVZA'nın bir enküçükleme problemi olması, uygulamada kullanılan diğer formülasyonlardan farklı olarak, α seviyeleri azaldıkça karar birimlerinin etkinlik değerlerinin de azalmasına yol açmaktadır. DBVZA'nın bir diğer özelliği de, her α seviyesinde etkinlik sınırında yer alan karar birimi sayısının görece olarak az olmasıdır. Şekil 7.11'deki grafikten de gözlemlenebileceği gibi, yapılan uygulamada sadece en yüksek α seviyesinde ($\alpha = 1$) ve yalnızca bir karar birimi (rüzgar enerjisi) etkinlik sınırında yer almıştır. Tüm α seviyelerinde etkinliklere göre sıralama yapılabilmesi karar vericiler açısından bir avantaj teşkil etmektedir. DBVZA ile elde edilen etkinlik sıralaması, diğer BVZA yöntemleriyle ve bu alandaki diğer çalışmalarla [50-52] sonuçlarla tamamen uyumludur. Enerji alternatifleri, etkinliklerine göre hem kullanılan üç yöntem, hem de DBVZA'ya göre aynı şekilde sıralanmıştır. Bu da DBVZA'nın karar vericiler için doğru ve sağlıklı bir performans analizi yöntemi olduğunu kanıtlamaktadır.

Modellerin çözümü için kullanılan GAMS 2.0, özellikle parametrik lineer matematiksel programların çözümü için oldukça kullanışlıdır [53]. Bu şekilde çok sayıda kısıt içeren matematiksel programlar kısa zamanda çözülebilmektedir.

Sonuç olarak DBVZA sadece bu tezdeki uygulama olan, Türkiye'de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatiflerinin etkinliklerinin değerlendirilmesinde değil, gerçek hayatta karşılaşılabilecek bir çok karar alma probleminde kullanılabilecek bir performans değerlendirme yöntemidir. Girdi ve çıktı değerlerinin hepsinin veya bir kaçının bulanık sayılar olarak ifade edilmesini gerektiren durumlarda DBVZA özellikle karar birimlerinin etkinliklerine göre sıralanmasında kolaylık sağlaması ve karar birimlerinin sıralanması için herhangi bir bulanık sıralama yöntemine ihtiyaç duyulmaması açısından diğer yöntemlere tercih edilebilecek kullanışlı bir yöntemdir.

8.2 Uygulama Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Gelişen teknoloji ve artan enerji ihtiyacı ile birlikte geleneksel enerji kaynakları toplumun enerji ihtiyacını karşılamada yetersiz kalmakta ve yine bu enerji kaynakları doğal yaşam ve çevreye kabul edilemez zararlar vermektedir. Endüstriyel kalkınmanın en önemli girdilerinden biri olan enerjiye yönelik ihtiyacın belirlenmesi, karşılanması, iletilmesi, kısaca enerjide planlama yapılması kaçınılmaz bir zorunluluktur. Özellikle Türkiye gibi kalkınmakta olan ve enerji ihtiyacının büyük bölümünü dışarıdan ithal eden ülkeler için kısa, orta ve uzun vadede enerji politikaları hayati önem taşımaktadır. Petrol, kömür, doğalgaz gibi geleneksel enerji kay-

naklarının kullanımı, gerek tükenebilir kaynaklar olmaları, gerek olumsuz çevresel etkileri ve gerekse politik ve ekonomik sebeplerle sürekli dalgalanan fiyatları nedeniyle önümüzdeki 30-40 yıllık gelecekte büyük oranda düşecektir. Geleneksel enerji kaynaklarının yerini alacak yeni-yenilenebilir kaynakların belirlenmesi ve bu geçiş döneminde uygulanacak enerji politikalarının oluşturulması açısından, enerji kaynaklarının etkinliklerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Türkiye, 1.817 kWs ile kişi başına düşen enerji tüketiminde Avrupa'nın en geride kalmış ülkelerinden biridir (Avrupa ortalaması 6 457 kWs, dünya ortalaması 2 343 kWs [33]). Ancak son 20 yılda dünyada en hızlı gelişen enerji pazarlarından biri olmuştur. Türkiye'nin toplam OECD üretiminde payı, 2020 yılında, 1995'teki %2'den %7'ye çıkması beklenmektedir [50]. Bu da Türkiye'nin önümüzdeki 15-20 yıllık gelecekte enerji ihtiyacı en fazla artacak ülkelerden biri haline getirmektedir. Bölüm 7'deki istatistiklerden anlaşılabileceği gibi bugün Türkiye, enerji konusunda dışarıya en bağımlı ülkelerden biridir. Planlanan kalkınma hedeflerine ulaşılabilmesi için bu bağımlılığın azaltılması ve yeni-yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarına yönelmesi gerek orta ve uzun vadedeki enerji darboğazlarının aşılması, gerekse çevresel faktörler göz önüne alınarak sürdürülebilir bir kalkınma gerçekleştirilmesi açısından hayati önem taşımaktadır.

Enerji kaynaklarının etkinliği, kullanılan teknoloji, coğrafi , politik ve ekonomik faktörlerin bölgeden bölgeye değişmesi sebebiyle ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Ülkede ulaşılacak yerli kaynaklar, dışa bağımlılığın azaltılması, çevresel ve sosyal etkiler, komşu ülkelerle uyum ve işbirliği ve maliyetler enerji kaynaklarının etkinliğinde rol oynayan önemli etkenlerdir. Bu yüzden her ülke kendi koşullarını göz önüne alarak enerji politikasını belirlemelidir. Diğer taraftan, enerji kaynaklarının etkinliğini ölçmek için dikkate alınması gereken sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve uyumluluk gibi ölçütlerin sayısal olarak kesin bir şekilde ifade edilmesi mümkün değildir. Ayrıca santrallerde elektrik üretiminin maliyetlerinin de, kullanılan farklı, zamanla değişen teknolojiler ve bölgesel özellikler nedeniyle kesin sayılarla değil bulanık aralıklarla ifade edilmesi, daha sağlıklı bir değerlendirme yapılmasına imkan verecektir.

Bu tezin 7. bölümündeki uygulamada Türkiye'de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatiflerinin etkinliği bulanık VZA ile değerlendirilmiştir. Analizde, petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtlarla beraber, nükleer enerji, güneş, rüzgar, hidrolik ve biyokütle gibi alternatif enerji kaynakları yer almıştır. Enerji kaynaklarının değerlendirilmesi ve bu değerlendirme için ölçütlerin belirlenmesi uzman bilgisi gerektirmektedir. Sağlıklı bir araştırma için alternatifler, tüm ekonomik,

sosyal ve çevresel faktörler göz önüne alınarak değerlendirilmelidir. Bu tezdeki performans kriterleri ve özellikle bulanık ölçütlerin değerleri belirlenirken Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği (TMMOB) Elektrik Mühendisleri Odası (EMO) uzmanlarının görüşlerinden yararlanılmıştır. Enerji Kaynaklarının performans analizindeki girdiler, birim elektrik üretimi için indirgenmiş maliyet, CO₂, SO₂ ve NO_x salınımlarıdır. Çıktılar ise sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve uyumluluk olarak belirlenmiştir. İndirgenmiş maliyet analizde bulanık bir girdi olarak yer alırken, çıktılar için de uzmanlar tarafından yapılan sözel değerlendirmeler, bulanık üyelik fonksiyonlarıyla ifade edilmiştir.

5. Bölüm’de incelenen bulanık VZA formülasyonlarının üçü ve 6. Bölüm’de önerilen Dual Bulanık VZA (DBVZA) formülasyonları ile yapılan etkinlik ölçümü sonuçları birbirleriyle tamamen uyumludur. Bu analizler sonucu enerji kaynakları, elektrik üretimindeki etkinliklerine göre aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır:

Rüzgar — Doğalgaz — Hidrolik — Biyokütle — Kömür — Petrol — Güneş — Nükleer

Güneş enerjisi ve nükleer güç, Saati ve diğ (2001), Lertworasirikul ve diğ. (2003) tarafından geliştirilen bulanık VZA formülasyonları ve DBVZA ile yapılan değerlendirmelerde α -kesmelerine göre 7. veya 8. sırada yer almaktadır. Kao ve Liu [19] tarafından geliştirilen formülasyondan elde edilen sonuçlarının Chen ve Klein tarafından önerilen yöntem [49] ile sıralanmasında güneş enerjisi 7., nükleer enerji ise son sırada yer almaktadır.

Rüzgar enerjisinin, tüm analizlerde en etkin enerji kaynağı olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, bu alanda yapılan diğer çalışmalarla da uygunluk göstermektedir [50-52]. Analizler, rüzgar enerjisinin Türkiye’nin gelecekteki en önemli enerji kaynaklarından biri olacağını göstermektedir. Rüzgar enerjisinin en büyük avantajları, çok yeni bir teknoloji olmasına rağmen rüzgardan gücünün elektrik üretiminde ekonomik açıdan şimdiden geleneksel kaynaklarla rekabet edebilecek düzeye gelmiş olmasıdır. Yenilenebilir bir kaynak olması ve olumsuz çevresel etkilerinin minimum düzeyde kalması da rüzgar enerjisinin etkinliğini arttıran önemli faktörlerdir. Türkiye açısından rüzgar enerjisinin bir başka avantajı da, ülkemizin, rüzgar türbinlerinin kurulabileceği coğrafi bölgeler açısından son derece zengin ve bu bölgelerdeki rüzgar şiddetinin yüksek olmasıdır (Şekil 7.5). Türkiye, günümüz itibarıyla rüzgar enerjisi potansiyelinin çok küçük bir bölümünü kullanmaktadır. Rüzgar türbinlerinden üretilen elektriğin 1 800 MW’ta kalması, tam kapasite ile kullanıldığında Türkiye’nin elektrik ihtiyacının tamamını karşılayabilecek bu kaynaktan ne kadar az yararlanıldığının bir göstergesidir. Bu kadar etkin bir enerji kaynağının, potansiyel açısından Avrupa’daki en zengin ülke olan Türkiye’de çok daha yaygın olarak kulla-

nılması için özellikle Kuzey Ege, Marmara, Batı Karadeniz ve Doğu Akdeniz Bölgelerinde rüzgar türbini yatırımlarına hızla başlanmalıdır.

Doğalgaz, kullanım kolaylığı ve ucuzluğu ile şu anda Türkiye’de en hem ısıtma hem de elektrik üretimi için yaygın olarak kullanılan enerji kaynaklarından biridir. Şekil 7.6’da görülebileceği gibi 2002 yılı itibariyle Türkiye’nin elektrik üretiminin %30,47’si doğalgazdan sağlanmaktadır. Ucuzluğunun yanında doğalgazın en büyük avantajı, fosil bir yakıt olmasına rağmen, küresel ısınma ve hava kirliliğine katkısı petrol ve kömür gibi kaynaklara göre daha az olmasıdır. Ancak tükenebilir bir kaynak olması ve Türkiye’nin enerji alanında dış bağımlılığını arttırması doğalgazın olumsuz yönleridir. Bunlara rağmen özellikle kısa ve orta vadedeki enerji darboğazlarının aşılmasında doğalgaz etkin enerji kaynaklarından biri olarak görülmektedir.

Etkinlik analizlerinde 3. sırada yer alan hidrolik enerji Türkiye’de yaygın olarak kullanılmaktadır (bkz. Şekil 7.6). Yenilenebilir ve kirlilik yaratmayan bir kaynak olması hidrolik enerjinin en büyük avantajlarıdır. Ayrıca uygun coğrafi bölgeler tespit edilip baraj vs. gibi ilk yatırımlar tamamlandıktan sonra hidrolik enerji ile elektrik üretiminin yakıt maliyeti rüzgar gibi sıfırdır. Türkiye, teknik olarak değerlendirilebilir hidrolik enerji potansiyelinin %35’ini kullanmaktadır. Hidrolik enerji potansiyelinin kullanım oranının artması Türkiye açısından oldukça önemlidir. Özellikle yeni teknolojiler ile kurulan küçük hidroelektrik santrallerden sağlanan enerji, bölgesel enerji ihtiyaçlarını karşılamakta son derece etkili olacaktır.

Biyokütle enerjisi, son yıllarda önem kazanmaya başlayan ve gelecekte fosil yakıtların yerini alabilecek yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Olumsuz çevresel etkilerinin diğer yenilenebilir kaynaklara göre yüksek ve elektrik üretiminde maliyetlerinin fosil yakıtlara göre pahalı olması biyokütle enerjisinin dezavantajlarıdır. Yapılan uygulamaların hepsinde hidrolik enerjiden sonra 4. sırada yer alan biyokütle enerjisi, yenilenebilir olması nedeniyle Türkiye gibi tarım ve hayvancılık açısından zengin ülkelerde gelecekte önemini arttıracaktır. Ayrıca biyokütle enerjisinin kentsel atıkların değerlendirilmesi gibi faydaları da göz önünde bulundurulmalıdır.

Uygulama sonuçlarına göre, fosil yakıtlar olan kömür ve petrol etkinlik açısından 5. ve 6. sıradadır. Bu kaynakların etkinlik değerlerinin düşük olmasının en büyük sebebi, küresel ısınma ve hava kirliliğine katkıları ve tükenebilir kaynaklar olmaları nedeniyle sürdürülebilirliklerinin düşük olmasıdır. Türkiye’nin kömür rezervleri açısından zengin olması kömürü petrolden daha avantajlı bir konuma getirmektedir. Özellikle kısa ve orta vadede ucuz enerji ihtiyacının karşılanmasında ve dışa bağımlı-

lğın azaltılmasında kömürün önemli bir rol oynayabileceğı mutlaka değerdendirilmelidir.

Yapılan uygulamalarda güneş enerjisi ve nükleer enerji son iki sırayı paylaşmaktadır. Nükleer enerjinin yakıt maliyetlerinin düşük olmasına rağmen ilk yatırım maliyeti oldukça yüksektir. Ancak nükleer enerjinin önündeki en büyük engeller, emisyon ve atık kül miktarları fosil yakıtlara göre son derece düşük olmasına rağmen, nükleer atıkların depolanması sorunu ve meydana gelebilecek olası bir kazanın sosyal ve çevresel maliyetleridir. Dünya’da nükleer santral satışlarını tekrar canlandırmak için çeşitli girişimler varolsa da, nükleer güç ile elektrik üretiminin geleceğı pek parlak görünmemektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)’ya göre nükleer enerjinin elektrik üretimindeki payı 2030 itibariyle bugüne oranda, neredeyse yarı yarıya azalarak %9 seviyelerine düşeceği öngörülmektedir.

Güneş enerjisinin etkinlik değerdlerinin düşük çıkmasındaki en büyük neden ise güneşten elektrik elde etmenin son derece yüksek maliyetidir. Güneş panellerinin çok geniş arazilere ihtiyaç duyması ve elektriğın depolanma sorunu da güneş enerjisinin diğer dezavantajlarıdır. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli bakımından zengin bir ülkedir ve güneş enerjisi özellikle güney bölgelerinde su ve hane ısıtma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Ancak güneşten elektrik üretme uygulamaları yok denecek kadar azdır. Güneşten elektrik üretmenin maliyetinin gelecekte diğer alternatiflerle rekabet edebilecek düzeylere ineceğı tahmin edilmektedir (bkz. Şekil 7.4) ancak şimdiki teknolojilerle yenilenebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olmasına rağmen güneş enerjisi elektrik üretiminde etkin bir kaynak olarak değerdendirilememektedir.

Sonuç olarak Türkiye fosil enerji kaynakları açısından fakir ve dışa bağımlı olmasına rağmen, yenilebilir enerji kaynakları açısından son derece şanslı bir konumdadır. Bu potansiyelin etkin bir biçimde değerdendirilmesi ile Türkiye uzun vadede enerji ihraç eden ve sürdürülebilir bir enerji politikası uygulayan bir ülke konumuna gelebilir. Ancak bunun gerçekleşmesi için rüzgar, hidrolik ve biyokütle gibi yeni ve yenilebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların arttırılması gerekmektedir. Ayrıca bu yeni enerji kaynaklarına yönelirken kısa ve orta vadede doğalgaz gibi gördeli olarak ucuz ve temiz, kömür gibi ülkemizde bol bulunan kaynakların da önemi göz ardı edilmemelidir.

Dikkat edilmesi gereken bir başka konu ise, enerji alternatiflerinin etkinlik değerdlerinin mevcut veriler ve uzmanların görüşleriyle elde edilmiş sonuçlar olduğudur. Gelişen teknolojiler, değışen ekonomik konjonktürler ve değışik uzmanlardan alınan görüşler farklı sonuçlara ulaşılmasına yol açabilir.

8.3 Gelecek Araştırmalar İçin neriler

Bu tezde, önerilen yeni bulanık veri zarflama analizi formülasyonu (dual bulanık veri zarflama analizi –DBVZA) ile yapılan uygulamada Türkiye’de elektrik üretimi için enerji kaynaklarının etkinliklerinin değerlendirilmesi ve bu değerlendirme sonucu enerji kaynaklarının etkinliklerine göre sıralanması amacına ulaşılmıştır. Ancak alışma sırasında bulanık girdi ve çıktı değerleri ile veri zarflama analizi uygulamalarında gelecek çalışmalar için üzerinde durulması gereken noktalar olduğu görülmüştür.

- Literatür araştırması sırasında Bulanık VZA ile ilgili çalışmalarda yapılan uygulamaların deneysel girdi ve çıktı değerleriyle gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca deneysel uygulamalardaki karar birimi ve girdi-çıktı sayıları genellikle yetersizdir. Bu tezdeki gerçek uygulamada bulanık VZA’nın belirsiz ortamda etkinlik ölçümü için uygun bir yöntem olduğu görülse de, bulanık VZA’nın değerinin anlaşılması için gerçek hayattan alınan verilerle yapılan uygulamaların sayısının artması gerekmektedir.
- Bulanık VZA formülasyonları normal ve içbükey üyelik fonksiyonuna sahip veriler için geliştirilmiştir. Genel yelik fonksiyonlarına sahip girdi-çıktı değerlerinin kullanımına izin veren bulanık VZA formülasyonları, VZA’nın özellikle gerçek hayattaki kullanım alanını genişletecektir.
- Bulanık VZA formülasyonunun sonuçlarının diğer performans ölçüm yöntemlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılması yöntemin karar vericilerin bilgilendirilmesi açısından değerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.
- Enerji kaynaklarının etkinliği, sosyo-ekonomik konjonktrlere ve zamanla gelişen teknolojilere bağlı olarak değişmektedir. Bu yüzden doğru ve güncel bir enerji politikasının uygulanabilmesi için enerji kaynakları ile ilgili karar destek uygulamaları sürekli şekilde yenilenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Charnes A., Cooper W., Rhodes E.**, 1978. Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research* **2**, 429-444.
- [2] **Özyiğit, T.**, 2000. Gelişmekte olan ülkelerin sosyo-ekonomik performanslarının değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Galatasaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Stainer, A.**, 1997. Productivity and strategic management accounting, *International Journal of Technology Management*, **13**, 57-67.
- [4] **Farrell, M.J.**, 1957. The measurement of productive efficiency, *Journal of the Royal Statistical Society*, **120**, 253-290.
- [5] **Färe, R., Lovell, C.A.K.**, 1978. Measuring the technical efficiency of production, *Journal of Economic Theory*, **1**, 150-162.
- [6] **Banker R.D., Charnes A., Cooper W.**, 1984. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis, *Management Science* **30**, 1078-1092.
- [7] **Lertworasirikul, S.**, 2002. Fuzzy data envelopment analysis, *PhD Thesis*, NCSU, North Carolina, USA.
- [8] **Debreu, G.**, 1951. The coefficient of resource utilisation, *Econometrica*, **19**, 273-292.
- [9] **Koopmans, T.C.**, 1951, Activity Analysis of Production and Allocation, John Wiley and Sons, New York.
- [10] **Fried, H., Lovell C.A.K., Schmidt, S.**, 1993. The measurement of productive efficiency: "Techniques and applications, Oxford University Press, London.

- [11] **Charnes, A., Cooper, W.W., Lewin, A.Y., Seiford, L.M.,** 1994. Data envelopment analysis: Theory, methodology and applications, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [12] **Giokas, D.,** 1997. The use of goal programming and data envelopment analysis for estimating efficient marginal costs of outputs, *Journal of the Operational Research Society*, **32**, 783-792.
- [13] **Boussofiane A., Dyson R.G., Thanassoulis E.,** 1991. Applied data envelopment analysis, *European Journal of Operational Research* **52**, 1-15.
- [14] **Doyle J., Green R.,** 1994. Efficiency and cross-efficiency in DEA: Derivations, meanings and uses, *Journal of the Operational Research Society* **45**, 567-578.
- [15] **Green R., Doyle J., Cook, W.D.,** 1996. Preference voting and project ranking using DEA and cross-evaluation, *European Journal of Operational Research* **90**, 461-472.
- [16] **Cooper W., Park K.S., Yu G.,** 1999. IDEA and AR-IDEA: Models for dealing with imprecise data in DEA. *Management Science* **45**, 597-607.
- [17] **Cook, W.D., Kress, M.,** 1990. A data envelopment model for aggregating preference rankings, *Management Science*, **36**, 1302-1310.
- [18] **Cook, W.D., Kress, M., Seiford, L.M.,** 1996. Data envelopment in the presence of both quantitative and qualitative factors, *Journal of the Operational Research Society*, **47**, 945-953.
- [19] **Kao, C., Liu, S.,** 2000. Fuzzy Efficiency Measures in Data Envelopment Analysis, *Fuzzy Sets and Systems*, **113**, 427-437.
- [20] **Guo, P., Tanaka, H.,** 2001. Fuzzy DEA: A Perceptual Evaluation Method, *Fuzzy Sets and Systems*, **119**, 149-160.
- [21] **Entani, T., Maeda, Y., Tanaka, H.,** 2002. Dual Models of interval DEA and its extension to interval data, *European Journal of Operations Research*, **136**, 32-45.

- [22] **Saati, S., Memariani, A., Jahanshahloo, G.R.,** 2002. Efficiency analysis and ranking of DMUs with fuzzy data, *Fuzzy Optimization and Decision Making*, **1**, 255-267.
- [23] **León, T., Liern, V. ve Ruiz, J.L., Sirvent, I.,** 2003. A Fuzzy Mathematical Programming to the Assessment of Efficiency with DEA Models, *Fuzzy Sets and Systems*, **139**, 407-419.
- [24] **Lertworasirikul S., Fang, S., Jeffrey, A.J., Nuttle, H.L.W.,** 2003. Fuzzy Data Envelopment Analysis(DEA): A Possibility Approach, *Fuzzy Sets and Systems*, **139**, 379-294.
- [25] **Zimmermann, H.J.,** 1976. Description and optimization of fuzzy systems, *International Journal of General Systems*, **2**, 209-215.
- [26] **Carlsson, C., Korhonen, P.,** 1986. A parametric approach to linear programming, *Fuzzy Sets and Systems*, **20**, 17-30.
- [27] **Zadeh, L.A.,** 1965. Fuzzy Sets, *Information and Control*, **8**, 338-353.
- [28] **Kahraman, C., Bozdag, C.E., Da Ruan, Ozok, A.F.,** 2004. Fuzzy sets approaches to statistical parametric and nonparametric tests, *International Journal of Intelligent Systems*, **9**, 1069-1087.
- [29] **Nimish, S.,** 1999. Measuring and evaluating efficiency and effectiveness using goal programming and data envelopment analysis in a fuzzy environment, *Master Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Fall Church, Virginia, USA.
- [30] **Bellman, R.E., Zadeh, L.A.,** 1970. Decision Making in a Fuzzy Environment, *Management Science*, **17**, 141-164.
- [31] **Sengupta, J.K.,** 1992. A Fuzzy Systems Approach in Data Envelopment Analysis, *Comput. Math. Appl.*, **24**, 259-266.
- [32] **Kahraman, C., Ulukan, Z., Tolga, E.,** 1999. Selection among advanced manufacturing technologies using fuzzy data envelopment analysis, *Tatra Math. Publ.*, **16**, 1-13.
- [33] **Enis, A.,** 2003, Enerji politikaları ile yerli, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları, *Türkiye IV. Enerji Sempozyumu*, Ankara, 10-12 Aralık, s. 295-324.

- [34] **Dündar, C., Arıkan, Y.,** 2003, Enerji, çevre ve sürdürülebilirlik, *Türkiye IV. Enerji Sempozyumu*, Ankara, 10-12 Aralık, s. 325-343.
- [35] **Keskin, M.,** 2003, Son on yılda Türkiye’de uygulanan enerji politikalarının ağır bedeli ve barışçıl enerji seçeneklerinin önemi, *Türkiye IV. Enerji Sempozyumu*, Ankara, 10-12 Aralık, s. 357-377.
- [36] **www.eie.gov.tr**, Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü resmi internet sitesi, Erişim Tarihi: Mart 2006.
- [37] **www.eia.doe.gov**, Energy Statistics, 2002, Energy Information Administration U.S. , Erişim Tarihi: Mart 2006.
- [38] **www.worldenergy.org**, Dünya Enerji Konseyi (World Energy Council) internet sitesi, Erişim Tarihi: Mart 2006.
- [39] **www.enerji.gov.tr**, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı resmi internet sitesi, Erişim Tarihi: Mart 2006.
- [40] **www.foreigntrade.gov.tr**, T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı resmi internet sitesi, Erişim Tarihi: Nisan 2006.
- [41] **Tekin, A.C.,** 2005. Kişisel görüşme.
- [42] **Yılmaz, B.,** 2005. Kişisel görüşme.
- [43] **Çevik, A.,** 2005. Kişisel görüşme.
- [44] **American Wind Energy Associaton**, 2001. Comparative cost of wind and other energy sources. *Wind Energy Factsheet*. **www.awea.org**. Erişim Tarihi: Ocak 2006.
- [45] **Roth, I.F., Ambs, L.L.,** 2004. Incorporating externalities into a full cost approach to electric power generation life-cycle costing, *Energy*, **29**, 2125-2144.
- [46] **Lindsay, C.L.,** 2004. The U.S. Acid Rain Program and its effect on SO₂ emission levels, *Issues in Political Economy*, **13**, 1-11.
- [47] **Bakan, G., Akdağ, Ö, Özkoç, H.B.,** 2004, Çevresel etki değerlendirmesinin önemi ve Samsun mobil santral örneği, *Türkiye IV. Enerji Sempozyumu*, Ankara, 10-12 Aralık, s. 379-390.

- [48] **General Algebraic Modeling System (GAMS)**, *GAMS Development Corporation*, 1217 Potomac Street, NW, Washington, DC 20007, USA.
- [49] **Chen, C.B., Klein, C.M.**, 1997. A simple approach to ranking a group of aggregated fuzzy utilities, *IEEE Trans. Systems Man Cybernet Part B, Cybernet*, **27**, 26-35.
- [50] **Topcu, Y.I., Ulengin F.**, 2004. Energy for the future: An integrated decision aid for the case of Turkey, *Energy*, **29**, 137-154.
- [51] **Karsak, E.E., Dursun, M.**, 2006. A fuzzy MCDM approach to energy resource planning for electricity generation in Turkey, *IEMS 2006*, Cocoa Beach, Florida, USA.
- [52] **Güngör, Z., Arikan, F.**, 2000. A fuzzy outranking method in energy policy planning, *Fuzzy Sets and Systems* **114**, 115-122.
- [53] **Karvelagen, E.**, 2002. Efficiently solving DEA models with GAMS, <http://www.gams.com/~erwin/dea/dea.pdf>.

EK A: Dual Bulanık VZA (DBVZA) Formülasyonunun GAMS Kodu

Sets

i inputs /1*4/

j outputs /1*3/

s DMUs /1*8/

h level /h1*h11 /

Option Limrow = 0;

Option Limcol = 0;

Option solprint = off;

Option sysout = off;

Table x(s,i) amount of input i used by DMU s

	1	2	3	4
1	5.15	2.12	0.0136	0.0079
2	5.7	1.96	0.00123	0.0036
3	4.15	1.34	0.000007	0.0046
4	12.8	0	0	0
5	5	0	0	0
6	26.5	0	0	0
7	8.7	0.723	0	0
8	8.2	0	0	0;

Table y(s,j) amount of output j produced by DMU s

	1	2	3
1	0	0.42	0.42
2	0.08	0.33	0.25
3	0.25	0.42	0.58

4	0.42	0	0.17
5	0.92	0.83	0.83
6	1	0.92	0.83
7	0.83	0.67	0.58
8	0.67	0.67	0.83;

Table al(s,i) left spread of input i

	1	2	3	4
1	4.8	2.12	0.0136	0.0079
2	5.3	1.96	0.00123	0.0036
3	3.9	1.34	0.000007	0.0046
4	11.1	0	0	0
5	4	0	0	0
6	21.6	0	0	0
7	5.8	0.723	0	0
8	5.1	0	0	0;

Table ar(s,i) right spread of input i

	1	2	3	4
1	5.5	2.12	0.0136	0.0079
2	6.1	1.96	0.00123	0.0036
3	4.4	1.34	0.000007	0.0046
4	14.5	0	0	0
5	6.0	0	0	0
6	32.4	0	0	0
7	11.6	0.723	0	0
8	11.3	0	0	0;

Table bl(s,j) left spread of output j

	1	2	3
1	0	0.17	0.17
2	0	0.08	0.08
3	0	0.17	0.33

4	0.17	0	0.08
5	0.67	0.58	0.58
6	0.75	0.67	0.58
7	0.58	0.42	0.33
8	0.42	0.42	0.58;

Table br(s,j) right spread of output j

	1	2	3
1	0.25	0.67	0.67
2	0.33	0.58	0.50
3	0.50	0.67	0.83
4	0.67	0.25	0.42
5	1	0.92	0.92
6	1	1	0.92
7	1	0.92	0.83
8	0.92	0.92	1;

scalar t "alpha level" / 1 /

scalar n;

Positive Variables

l(s) lambda

fx0(i) f*inputs of test DMU

y0(j) outputs of test DMU

ly(s,j) lambda*output j of DMU s

lx(s,i) lambda*input i of DMU s;

Variable

f efficiency value of test DMU;

parameter ef(h);

scalar ep "epsilon" /0.00/;

Equations

```

first(i)  f * inputs of test DMU greater than sum of lambda * inputs of all DMUs
first1(j) outputs of test DMU smaller than sum of lambda * outputs of all DMUs
interval1(i)  fx0(i) smaller than f*upper bound of test DMU's inputs' alpha cut
interval2(i)  fx0(i) greater than f*lower bound of test DMU's inputs' alpha cut
interval3(s,i) lambda*inputs smaller than lambda*upper bound of inputs' alpha cuts
interval4(s,i) lambda*inputs greater than lambda*lower bound of inputs' alpha cuts
interval5(s,j) lambda*outputs smaller than lambda*upper bound of ouputs' alpha cuts
interval6(s,j) lambda*outputs greater than lambda*lower bound of ouputs' alpha cuts
interval7(j)  y0(j) smaller than upper bound of test DMU's outputs' alpha cut
interval8(j)  y0(j) greater than lower bound of test DMU's outputs' alpha cut;

```

```

first(i)..      fx0(i) - (sum(s, lx(s,i))) =g= 0;
first1(j)..     -y0(j) + (sum(s, ly(s,j))) =g= 0;
interval1(i)..  f*(((t*x('8',i))) + ((1-t)*((ar('8',i))))) - fx0(i) =g= 0;
interval2(i)..  f*(((t*x('8',i))) + ((1-t)*((al('8',i))))) - fx0(i) =l= 0;
interval3(s,i).. l(s)*(((t*x(s,i))) + ((1-t)*((ar(s,i))))) - lx(s,i) =g= 0;
interval4(s,i).. l(s)*(((t*x(s,i))) + ((1-t)*((al(s,i))))) - lx(s,i) =l= 0;
interval5(s,j).. l(s)*(((t*y(s,j))) + ((1-t)*((br(s,j))))) - ly(s,j) =g= 0;
interval6(s,j).. l(s)*(((t*y(s,j))) + ((1-t)*((bl(s,j))))) - ly(s,j) =l= 0;
interval7(j)..  (t*y('8',j) + (1-t)*(br('8',j))) - y0(j) =g= 0;
interval8(j)..  (t*y('8',j) + (1-t)*(bl('8',j))) - y0(j) =l= 0;

```

```

Model DBVZA      /all/;

loop(h,

display t;

Solve  DBVZA using lp min f;

ef(h) = f.l;

t= t-0.1;);

option ef:4:0:1;

display ef;

```

EK B: DBVZA Formülasyonun j_0 karar birimi ve “ α ” seviyesi için sayısal değerlerle ifadesi

$$\begin{aligned}
 & \text{enk } Z_0 \\
 & \text{kısıtlar:} \\
 & \overline{x}_{1j_0} - (\overline{x}_{11} + \overline{x}_{12} + \dots + \overline{x}_{18}) \geq 0 \\
 & \overline{x}_{2j_0} - (\overline{x}_{21} + \overline{x}_{22} + \dots + \overline{x}_{28}) \geq 0 \\
 & \overline{x}_{3j_0} - (\overline{x}_{31} + \overline{x}_{32} + \dots + \overline{x}_{38}) \geq 0 \\
 & \overline{x}_{4j_0} - (\overline{x}_{41} + \overline{x}_{42} + \dots + \overline{x}_{48}) \geq 0 \\
 & -\hat{y}_{1j_0} - (\overline{y}_{11} + \overline{y}_{12} + \dots + \overline{y}_{18}) \geq 0 \\
 & -\hat{y}_{2j_0} - (\overline{y}_{21} + \overline{y}_{22} + \dots + \overline{y}_{28}) \geq 0 \\
 & -\hat{y}_{3j_0} - (\overline{y}_{31} + \overline{y}_{32} + \dots + \overline{y}_{38}) \geq 0 \\
 & Z_0[\alpha(5.15) + (1-\alpha)(4.80)] - \overline{x}_{1j_0} \leq 0 \\
 & Z_0[\alpha(2.12) + (1-\alpha)(2.12)] - \overline{x}_{2j_0} \leq 0 \\
 & Z_0[\alpha(0.0136) + (1-\alpha)(0.0136)] - \overline{x}_{3j_0} \leq 0 \\
 & Z_0[\alpha(0.0079) + (1-\alpha)(0.0079)] - \overline{x}_{4j_0} \leq 0 \\
 & Z_0[\alpha(5.15) + (1-\alpha)(5.50)] - \overline{x}_{1j_0} \geq 0 \\
 & Z_0[\alpha(2.12) + (1-\alpha)(2.12)] - \overline{x}_{2j_0} \geq 0 \\
 & Z_0[\alpha(0.0136) + (1-\alpha)(0.0136)] - \overline{x}_{3j_0} \geq 0 \\
 & Z_0[\alpha(0.0079) + (1-\alpha)(0.0079)] - \overline{x}_{4j_0} \geq 0 \\
 & \alpha(0.00) + (1-\alpha)(0.00) - \overline{y}_{1j_0} \leq 0 \\
 & \alpha(0.42) + (1-\alpha)(0.17) - \overline{y}_{2j_0} \leq 0 \\
 & \alpha(0.42) + (1-\alpha)(0.17) - \overline{y}_{3j_0} \leq 0 \\
 & \alpha(0.00) + (1-\alpha)(0.25) - \overline{y}_{1j_0} \geq 0 \\
 & \alpha(0.42) + (1-\alpha)(0.67) - \overline{y}_{2j_0} \geq 0 \\
 & \alpha(0.42) + (1-\alpha)(0.67) - \overline{y}_{3j_0} \geq 0 \\
 & \lambda_1[\alpha(5.15) + (1-\alpha)(4.80)] - \overline{x}_{11} \leq 0 \\
 & \lambda_1[\alpha(5.15) + (1-\alpha)(5.50)] - \overline{x}_{11} \geq 0 \\
 & 7 \lambda_1[\alpha(2.12) + (1-\alpha)(2.12)] - \overline{x}_{21} \leq 0 \\
 & \lambda_1[\alpha(2.12) + (1-\alpha)(2.12)] - \overline{x}_{21} \geq 0 \\
 & \lambda_1[\alpha(0.0136) + (1-\alpha)(0.0136)] - \overline{x}_{31} \leq 0 \\
 & \lambda_1[\alpha(0.0136) + (1-\alpha)(0.0136)] - \overline{x}_{31} \geq 0 \\
 & \lambda_1[\alpha(0.0079) + (1-\alpha)(0.0079)] - \overline{x}_{41} \leq 0 \\
 & \lambda_1[\alpha(0.0079) + (1-\alpha)(0.0079)] - \overline{x}_{41} \geq 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\lambda_2[\alpha(5.70) + (1-\alpha)(5.30)] - \bar{x}_{12} \leq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(5.70) + (1-\alpha)(5.30)] - \bar{x}_{12} \geq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(1.96) + (1-\alpha)(1.96)] - \bar{x}_{22} \leq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(1.96) + (1-\alpha)(1.96)] - \bar{x}_{22} \geq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(0.0123) + (1-\alpha)(0.0123)] - \bar{x}_{32} \leq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(0.0123) + (1-\alpha)(0.0123)] - \bar{x}_{32} \geq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(0.0036) + (1-\alpha)(0.0036)] - \bar{x}_{42} \leq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(0.0036) + (1-\alpha)(0.0036)] - \bar{x}_{42} \leq 0 \\
&\vdots \\
&(KB4- KB7 \text{ için olan kısıtlar atlanmıştır}) \\
&\vdots \\
&\lambda_8[\alpha(8.20) + (1-\alpha)(5.10)] - \bar{x}_{18} \leq 0 \\
&\lambda_8[\alpha(8.20) + (1-\alpha)(11.3)] - \bar{x}_{18} \geq 0 \\
&\lambda_8[\alpha(0) + (1-\alpha)(0)] - \bar{x}_{28} \leq 0 \\
&\lambda_8[\alpha(0) + (1-\alpha)(0)] - \bar{x}_{28} \geq 0 \\
&\lambda_8[\alpha(0) + (1-\alpha)(0)] - \bar{x}_{38} \leq 0 \\
&\lambda_8[\alpha(0) + (1-\alpha)(0)] - \bar{x}_{38} \geq 0 \\
&\lambda_8[\alpha(0) + (1-\alpha)(0)] - \bar{x}_{48} \leq 0 \\
&\lambda_8[\alpha(0) + (1-\alpha)(0)] - \bar{x}_{48} \leq 0 \\
&\lambda_1[\alpha(0.00) + (1-\alpha)(0.00)] - \bar{y}_{11} \leq 0 \\
&\lambda_1[\alpha(0.00) + (1-\alpha)(0.25)] - \bar{y}_{11} \geq 0 \\
&\lambda_1[\alpha(0.42) + (1-\alpha)(0.017)] - \bar{y}_{21} \leq 0 \\
&\lambda_1[\alpha(0.42) + (1-\alpha)(0.67)] - \bar{y}_{21} \geq 0 \\
&\lambda_1[\alpha(0.42) + (1-\alpha)(0.017)] - \bar{y}_{31} \leq 0 \\
&\lambda_1[\alpha(0.42) + (1-\alpha)(0.67)] - \bar{y}_{31} \geq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(0.08) + (1-\alpha)(0.00)] - \bar{y}_{12} \leq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(0.08) + (1-\alpha)(0.33)] - \bar{y}_{12} \geq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(0.33) + (1-\alpha)(0.08)] - \bar{y}_{22} \leq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(0.33) + (1-\alpha)(0.58)] - \bar{y}_{22} \geq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(0.25) + (1-\alpha)(0.08)] - \bar{y}_{32} \leq 0 \\
&\lambda_2[\alpha(0.25) + (1-\alpha)(0.50)] - \bar{y}_{32} \geq 0 \\
&\vdots \\
&(KB4- KB7 \text{ için olan kısıtlar atlanmıştır}) \\
&\vdots \\
&\lambda_8[\alpha(0.67) + (1-\alpha)(0.42)] - \bar{y}_{18} \leq 0 \\
&\lambda_8[\alpha(0.67) + (1-\alpha)(0.92)] - \bar{y}_{18} \geq 0 \\
&\lambda_8[\alpha(0.67) + (1-\alpha)(0.42)] - \bar{y}_{28} \leq 0 \\
&\lambda_8[\alpha(0.67) + (1-\alpha)(0.92)] - \bar{y}_{28} \geq 0 \\
&\lambda_8[\alpha(0.83) + (1-\alpha)(0.58)] - \bar{y}_{38} \leq 0 \\
&\lambda_8[\alpha(0.83) + (1-\alpha)(1.00)] - \bar{y}_{38} \geq 0 \\
&\lambda_1, \dots, \lambda_8 \geq 0 \\
&Z_0 \text{ kısıtsız.}
\end{aligned}$$

ÖZGEÇMİŞ

Tamer Özyiğit, 11 Mayıs 1972 yılında İstanbul'da doğmuş, orta öğrenimini 1991 yılında Galatasaray Lisesinde tamamlamıştır.

1996 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İşletme Fakültesi, İşletme Mühendisliği Lisans ve 2000 yılında Galatasaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Yüksek Lisans Programından mezun olmuştur. 1993 yılında Man Filtre A.Ş. ve 1994 yılında Yakın Doğu Denizcilik A.Ş.'de stajlarını tamamlamıştır..

2001 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Doktora Programına kaydını yapan Tamer Özyiğit, doktora tezini Prof. Dr. M. Nahit Serarslan ve Prof. Dr. E. Ertuğrul Karsak'ın danışmanlığında hazırlamıştır.