



**ÇOK AMAÇLI BULANIK HEDEF
PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI İLE
TÜRKİYE'NİN ENERJİ YATIRIMLARININ
BÖLGESEL PLANLANMASI**

Mesliha GEZEN

**Doktora Tezi
Ekonometri Ana Bilim Dalı
Doç. Dr. Abdulkerim KARAASLAN
2022
Her Hakkı Saklıdır.**

**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
EKONOMETRİ ANA BİLİM DALI**

Mesliha GEZEN

**ÇOK AMAÇLI BULANIK HEDEF PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI
İLE TÜRKİYE'NİN ENERJİ YATIRIMLARININ BÖLGESEL
PLANLANMASI**

DOKTORA TEZİ

**TEZ YÖNETİCİSİ
Doç. Dr. Abdulkerim KARAASLAN**

ERZURUM -2022



TEZ BEYAN FORMU

SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

BİLDİRİM

Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Uygulama Esaslarının ilgili maddelerine göre hazırlamış olduğum “ÇOK AMAÇLI BULANIK HEDEF PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI İLE TÜRKİYE’NİN ENERJİ YATIRIMLARININ BÖLGESEL PLANLANMASI” adlı tezin/raporun tamamen kendi çalışmam olduğunu ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi taahhüt eder, tezimin/raporumun kâğıt ve elektronik kopyalarının aşağıda belirttiğim koşullarda saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Gereğini bilgilerinize arz ederim *.

- ☐ Tezimin/Raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir.
- ☐ Tezimin/Raporumun makale için **altı ay**, patent için **iki yıl** süreyle erişiminin ertelenmesini istiyorum.

26/08/2022

Aslı Islak İmzalıdır

Mesliha GEZEN

*** LİSANSÜSTÜ TEZLERİN ELEKTRONİK ORTAMDA TOPLANMASI, DÜZENLENMESİ VE ERİŞİME AÇILMASINA İLİŞKİN YÖNERGE**

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Çeşitli ve Son Hükümler

Lisansüstü tezlerin erişime açılmasının ertelenmesi MADDE 6– (1) Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu **iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.**

(2) Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile **altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.**

Gizlilik dereceli tezler MADDE 7– (1) Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.

(2) Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.



SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Social Sciences

TEZ KABUL TUTANAĞI

SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Doç. Dr. Abdulkerim KARAASLAN danışmanlığında, Mesliha GEZEN UÇAR tarafından hazırlanan bu çalışma 26/08/2022 tarihinde aşağıda isimleri yazılı jüri tarafından, Ekonometri Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Erkan OKTAY	İmza Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Üstün ÖZEN	İmza Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi : Doç. Dr. Abdulkerim KARAASLAN	İmza Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi : Doç. Dr. M. Çağatay KORKMAZ	İmza Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi : Doç. Dr. Emre YAKUT	İmza Aslı Islak İmzalıdır

Prof. Dr. Sait UYLAŞ
Enstitü Müdürü
Aslı Islak İmzalıdır

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	IV
ABSTRACT	V
TABLOLAR DİZİNİ	VI
GRAFİKLER DİZİNİ	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
KISALTMALAR DİZİNİ	IX
ÖNSÖZ.....	X
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

TÜRKİYE’DE ENERJİ PLANLAMALARI

1.1. ENERJİ ARZ GÜVENLİĞİ	6
1.2. ENERJİ TİCARETİ	7
1.3. TÜRKİYE’DE ENERJİ KAYNAKLARININ GÖRÜNÜMÜ	11
1.3.1. Fosil Kaynaklar	11
1.3.1.1. Petrol.....	11
1.3.1.2. Doğalgaz	13
1.3.1.3. Türkiye’de Kömür Sektörünün Görünümü	14
1.3.2. Yenilenebilir Enerji	16
1.3.2.1. Hidroelektrik.....	19
1.3.2.2. Güneş	21
1.3.2.3. Rüzgâr.....	24
1.3.2.4. Jeotermal.....	27
1.3.2.5. Biokütle.....	29
1.4. ENERJİ VE ÇEVRE POLİTİKALARI	31

İKİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR

2.1. KLASİK HEDEF PROGRAMLAMA	33
2.2. ENERJİ PLANLAMASI VE KAPASİTE GENİŞLETME	
UYGULAMALARI.....	35

2.3. ENERJİ KAYNAKLARINI KONU ALAN HEDEF PROGRAMLAMA UYGULAMALARI.....	38
2.4. LİTERATÜRE KATKI.....	39

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

METODOLOJİ

3.1. DOĞRUSAL PROGRAMLAMA.....	43
3.2. HEDEF PROGRAMLAMA.....	43
3.2.1. Hedef Programlamada Kullanılan Tanım ve Kavramlar.....	48
3.2.1.1. Karar Değişkenleri.....	48
3.2.1.2. Amaç Fonksiyonu.....	48
3.2.1.3. Model Kısıtları.....	48
3.2.1.4. Hedef.....	49
3.2.1.5. Sapma değişkenleri.....	49
3.2.1.6. Teknolojik katsayılar	50
3.2.1.7. Ağırlıklar.....	50
3.2.2. Hedef Programlamanın Varsayımları.....	50
3.2.3. Hedef Programlamanın Genel İlkeleri	51
3.3. BULANIK HEDEF PROGRAMLAMA.....	52
3.3.1. Önerilen Model: Çok Amaçlı Bulanık Hedef Programlama Yaklaşımı (A Goal Programming Model Under Fuzzy Multi-Objectives) GP-FMO	55
3.3.2. Üyelik Fonksiyonlarının Karakterizasyonu.....	58

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

MODELİN TANIMLANMASI

4.1. UYGULAMA: VİZYON-2023 HEDEFLERİ DOĞRULTUSUNDA TÜRKİYE'NİN ENERJİ PLANLAMASI	60
4.2. MODELİN TANIMLANMASI	61
4.3. MODELİN KURULMASI	65
4.4. MODELİN ÇÖZÜMÜ	72

BEŞİNCİ BÖLÜM**MODELİN UYGULANMASI**

5.1. MALİYET VE SALINIM ANALİZİ	74
5.2. YERLİ VE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ BÖLGESEL KAPASİTE PLANLAMASI	76
SONUÇ	81
KAYNAKÇA	84
ÖZGEÇMİŞ	98



ÖZET**DOKTORA TEZİ****ÇOK AMAÇLI BULANIK HEDEF PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI İLE
TÜRKİYE'NİN ENERJİ YATIRIMLARININ BÖLGESEL PLANLANMASI****Mesliha GEZEN****Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdulkerim KARAASLAN****2021, 98 Sayfa****Jüri: Prof. Dr. Erkan OKTAY****Prof. Dr. Üstün ÖZEN****Doç. Dr. Abdulkerim KARAASLAN****Doç. Dr. M. Çağatay KORKMAZ****Doç. Dr. Emre YAKUT**

Küresel ısınma ve iklim değişikliği problemleri, tüm dünyada enerji planlamalarını yenilenebilir enerji lehine artırmıştır. Enerji planlamalarının nihai hedefi %100 yenilenebilir enerjiye ulaşmak olsa da, ekonomik, teknik ve çevresel kısıtlamalar nedeniyle bu günümüzde pek mümkün değildir. Bu kısıtlamalar altında belirlenen hedeflerin ulaşılabilirliği araştırılmalıdır. Bu tez çalışmasında minimum maliyet, minimum salınım, maksimum kapasite faktörü ve maksimum kaynak potansiyeli çelişkili amaçları altında ETKB'nin belirlediği 2023 yerli ve yenilenebilir enerji hedeflerinin gerçekleştirilebilirliği sorgulanmıştır. Bu problem belirsiz amaçlara sahip bir hedef programlama problemidir. Bu problemde karar verici ulaşmak istediği hedefleri belirleyebilirken bu hedeflere ulaşmayı kısıtlayan belirsiz amaçlara sahiptir. Böyle bir problemi modellemek için GP-FMO modeli önerildi. Elde edilen model klasik LP ve non-dominated genetic algorithm II (NSGA II) ile çözüldü. Klasik LP ile elde edilen çözüm feasible çözüm seçeneklerinden sadece biridir. NSGA II ile elde edilen pareto etkin küme üzerindeki domine edilemeyen noktalar, karar vericilere, belirsiz amaçların ortak tatmin seviyelerine göre, çözüm alternatifleri olarak sunuldu. Bu tezde enerji kaynaklarının önceliklendirilmesi, bölgesel tahsis ve kapasite artırımı planlaması tek bir çalışmada entegre edilmiştir. Türkiye'nin enerji tedarik sistemlerinde yer alan tüm kaynaklar ele alındı. Sonuçlar, enerji yatırımları için çok boyutlu bir bakış açısı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji planlaması, matematiksel modelleme, çok amaçlı hedef programlama

ABSTRACT**Ph. D. DISSERTATION****REGIONAL PLANNING OF TURKEY'S ENERGY INVESTMENTS WITH A
MULTI-PURPOSE FUZZY GOAL PROGRAMMING APPROACH****Mesliha GEZEN****Advisor: Assoc. Dr. Abdulkarim KARAASLAN****2021, 98 Pages****Jury: Prof. Dr. Erkan OKTAY****Prof. Dr. Üstün ÖZEN****Assoc. Prof. Dr. Abdulkarim KARAASLAN****Assoc. Prof. Dr. M. Çağatay KORKMAZ****Assoc. Prof. Dr. Emre YAKUT**

Global warming and climate change problems have increased energy planning in favor of renewable energy all over the world. Although the ultimate goal of energy planning is to reach 100% renewable energy, this is not possible today due to economic, technical and environmental constraints. The achievability of the targets set under these constraints should be investigated. In this thesis, the feasibility of the MENR's vision-2023 targets is questioned under the contradictory objectives of minimum cost, minimum emission, maximum capacity factor and maximum resource potential. This problem is a goal programming problem with ambiguous objectives. In this problem, while the decision maker can determine the goals he wants to achieve, he has undetermined goals (such as cost minimization) that limit reaching these goals. To model such a problem, the GP-FMO model was proposed. The resulting model was solved by classical LP and non-dominated genetic algorithm II (NSGA II). The solution obtained with the classical LP is only one of the feasible solution options. The non-dominated points on the Pareto efficient set obtained by the NSGA II Algorithm were presented to the decision makers as solution alternatives according to the common satisfaction levels of the uncertain goals. In this study, prioritization of energy resources, regional allocation and capacity increase planning were integrated with a single study. All resources in Turkey's energy supply systems were discussed. The results offer a multidimensional perspective for energy investments.

Keywords: Energy planning, mathematical modeling, multi objective goal programming

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. Yıllara Göre Yenilenebilir Enerji Kurulu Gücü Gelişimi	18
Tablo 2. Türkiye'nin En Büyük On Enerji Santrali ve Kurulu Güçleri	19
Tablo 3. Dünya'da Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kurulu Gücü	22
Tablo 4. Çok Amaçlı Matematiksel Programlama İle Hedef Programlamanın Karşılaştırılması	46
Tablo 5. Sapma Değişkenlerinin Belirlenmesi	50
Tablo 6. Modellerin Karşılaştırılması.....	57
Tablo 7. Bölgelere Göre Yerli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kurulu Gücü	63
Tablo 8. Bölgelere Göre İthal Enerji Kaynakları Kurulu Gücü	63
Tablo 9. Enerji Santrallerinde Enerji Üretmenin Birim Maliyeti (cent/KWh).....	64
Tablo 10. Yerli ve Yenilenebilir Enerji Kurulu Gücü Karşılaştırılması (2020 ve 2023).	66
Tablo 11. Modelin Amaç ve Hedef Fonksiyonlarının Tanımlanması	66
Tablo 12. Ödünleşme Tablosu.....	69
Tablo 13. Vizyon 2023 Enerji Planlamasında Modelin Çözümlerinin Karşılaştırılması (MW).....	74
Tablo 14. Enerji Planlamasının Maliyet (Milyon tl) ve Salınım (Bin Ton) Analizi	75
Tablo 15. $\eta=0.67$ Memnuniyet Düzeyinde (MW) Yedi Bölge İçin Yerli ve YE Kapasite Genişletme Planlaması	77
Tablo 16. $\eta=0.67$ memnuniyet Düzeyinde İthal Enerji Kaynaklarının Kapasite Planlaması (MW)	77
Tablo 17. $\eta=0.79$ Memnuniyet Düzeyinde (MW) Yedi Bölge İçin Yerli ve YE Kapasite Genişletme Planlaması	78
Tablo 18. $\eta=0.79$ Memnuniyet Düzeyinde İthal Enerji Kaynaklarının Kapasite Planlaması (MW)	78

GRAFİKLER DİZİNİ

Grafik 1. Yerli Üretimin Enerji Arzını Karşılama Oranı	8
Grafik 2. Toplam İthalat Harcamalarının(Milyon TL) Enerji İthalatına Ayrılan Kısmı(%)	9
Grafik 3. Enerji Tüketiminin Kaynaklara Göre Dağılımı (Ktoe).....	10
Grafik 4. Enerji Tüketiminin Kaynaklara Göre Dağılımı (%)	11
Grafik 5. Petrol İhracatının Petrol Ürünlerine Göre Dağılımı	12
Grafik 6. Türkiye’de Doğal Gaz Kullanımının Sektörlere Göre Dağılımı	13
Grafik 7. Türkiye’nin Yıllara Göre Hidroelektrik Kurulu Gücü (2010-2020)	21
Grafik 8. Türkiye’nin Yıllara Göre Güneş Enerjisi Kurulu Gücü (2010-2020)	24
Grafik 9. Türkiye’nin Yıllara Göre Rüzgâr Enerji Kurulu Gücü (2010-2020).....	27
Grafik 10. Türkiye’nin Yıllara Göre Jeotermal Enerji Kurulu Gücü (2010-2020).....	29
Grafik 11. Türkiye’nin Yıllara Göre Biyokütle Enerji Kurulu Gücü (2010-2020)	30

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Türkiye’de Petrole Dayalı Kurulu Gücün Dağılımı	12
Şekil 2. Türkiye’de Doğalgaza Dayalı Kurulu Gücün Dağılımı.....	14
Şekil 3. Kömüre Dayalı Kurulu Güç Dağılımı (MW).	15
Şekil 4. Elektrik Üretimi Amaçlı Kullanılabilecek Başlıca Kömür Sahalar.....	16
Şekil 5. Hidroelektrik Kurulu Güç Dağılımı (MW).....	20
Şekil 6. Türkiye Güneş Enerji Potansiyel Haritası	22
Şekil 7. Türkiye Güneş Enerji Sistemleri Kurulu Güç Dağılımı (MW).	23
Şekil 8. Türkiye Rüzgâr Enerji Potansiyeli Dağılım Haritası.....	25
Şekil 9. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Kurulu Güç Dağılımı (MW)	26
Şekil 10. Türkiye Jeotermal Enerji Potansiyeli Dağılım Haritası.....	28
Şekil 11. Türkiye Jeotermal Enerji Santrallerinin Kurulu Güç Dağılımı (MW)	28
Şekil 12. Türkiye Biyokütle Enerji Santrallerinin Kurulu Güç Dağılımı (MW)	30
Şekil 13. Çok Amaçlı Hedef Programlama Modeli	47
Şekil 14. Hedeflerden sapma (1st objective) ile amaçların tatmin düzeyi (2nd objective) arasındaki ilişki	73
Şekil 15. Farklı Tatmin Düzeylerinde Yatırım Maliyeti.....	75
Şekil 16. Farklı Tatmin Düzeylerinde Carbon Salınımı	76

KISALTMALAR DİZİNİ

TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TMMOB	: Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
MİLHES	: Milli Hidroelektrik Santral Teknolojisi
MİLGES	: Milli Güneş Enerjisi Santral Teknolojisi
YEKDEM	: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması
ELECTRE	: Elimination and Choice Translating Reality English
PROMOTHEE	: The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
AHP	: Analitik Hiyerarşi Prosesi
TOPSİS	: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
GP-FMO	: Goal Programming Model Under Fuzzy Multi-Objectives
NSGA	: Nondominated Sorting Genetic Algorithm

ÖNSÖZ

Tezimin yürütölme sürecinde destek sağlayan ve beni her aşamada cesaretlendiren danışmanım, kıymetli hocam Doç. Dr. Abdulkerim KARAASLAN'a teşekkürü borç bilirim.

Erzurum 2022

Mesliha GEZEN



GİRİŞ

Enerji mobilite, yemek pişirme, aydınlatma, ısıtma ve soğutma gibi tüm günlük ihtiyaçlar için insanların yaşamlarında her zamankinden daha merkezi bir rol üstlenmektedir. Üretim süreçlerinin sürdürülebilirliğinde ve buna bağlı olarak ekonominin gelişiminde de ülkeler için temel ihtiyaç kalemlerindendir. Bu kapsamda enerji ihtiyacının kesintisiz karşılanması ön plana çıkmaktadır. Enerjinin genişleyen kullanım alanları, dünyanın artan nüfusu ile birlikte düşünüldüğünde, enerji ihtiyacının karşılanabilirliği bölgesel ve küresel bir sorun olma yolunda ilerliyor. Günümüzde enerji ihtiyacı, küresel enerji payının %84'ünü oluşturan fosil yakıtlardan karşılanıyor (Rakpho ve Yamaka, 2021). Bu kaynakların rezervleri sınırlı olmasına rağmen talebi hızlı bir şekilde artıyor ve yakın gelecekte enerji arzına hâkim olmaya devam etmesi bekleniyor. Ancak fosil yakıtların artan üretim ve tüketiminin ülkeler üzerinde küresel ısınma, hava kirliliği ve artan sağlık riskleri dâhil olmak üzere birçok olumsuz çevresel etkisi olmaktadır. Fosil enerji tüketimi, tüketiminin kısıtlanması durumunda ekonomik kalkınmayı olumsuz yönde etkileyeceği, ek olarak tüketilmesi durumunda ise yine çevreyi olumsuz etkileyeceği anlamına gelen iki ucu keskin bir kılıç olarak adlandırılmıştır (Goswami et al, 2021). 21. yüzyılın en büyük zorluklarından biri, temiz, yenilenebilir ve ucuz enerji ile talep ve enerji arzı arasındaki boşluğu doldurmaktır.

Yenilenebilir enerjideki son gelişmeler, geleneksel fosil yakıt yaklaşımına pratik alternatifler sunmaktadır (Mohsin ve diğ., 2021). Fosil kaynakların aşırı kullanımının neden olduğu iklim değişikliği ve çevre kirliliği sorunları ülkeleri yenilenebilir enerji yatırımlarına yöneltmiştir. Ancak yenilenebilir enerji teknolojileri fosil enerjiye göre oldukça maliyetli olup kısa vadede ülke ekonomisine yük olmaktadır. Buna rağmen uzun vadede sürdürülebilir ekonomik büyümenin itici gücü olarak değerlendirilir. Dolayısıyla yenilenebilir enerji yatırımlarının ekonomik olarak uygulanabilirliğini sağlamak için sürdürülebilir finansal planlamaların yapılması ön plana çıkmıştır. Finansal planlama sürecindeki politik belirsizlikler ve öngörülemeyen riskler, yenilenebilir enerji yatırım kararlarını geciktirebilmektedir (Zhao ve diğ., 2022). Yenilenebilir enerji sürdürülebilir ekonomik kalkınma için mutlak surette gerekli olduğu göz önüne alındığında bu gecikme ülkelerin uzun vadede sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleşmemesi ile sonuçlanabilir. O halde, hükümetlerin kısa ve uzun vade için uygulanabilir bir politika

oluşturmaları gerekirken yatırımcıların da kararlarını çeşitli perspektiften kriterlere göre değerlendirerek vermeleri gerekir. Bir bölgeyi geliştirmek için birincil gereksinim, kesintisiz enerji tedarikini sağlamaktır (Das ve diğ., 2020). Bunun için bölgelerin mevcut yenilenebilir enerji potansiyelinin optimum kombinasyonunu analiz etmek gerekir. Yenilenebilir enerji sistemlerinden enerji üretimi bir ülkenin sürdürülebilir ekonomik kalınmaya önemli katkılar sağlar ve böylece ülkenin sosyal ve çevresel faktörleri de paralel olarak iyileşir.

Geleneksel fosil yakıtlara bağımlılık, sadece insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olmayıp aynı zamanda küresel ormansızlaşma ve sera emisyonları nedeniyle çevre üzerinde de olumsuz etkilere neden olmaktadır (Sovacool, 2012). Özellikle çevresel ve ekonomik kaygılar konusunda farkındalığın artması ile yenilenebilir enerji odaklı enerji planlamaları önem kazanmaya başladı. Yenilenebilir enerji her türlü çevresel soruna neden olan endüstriler için son derece güvenilir enerji sağlar (Meteo, 2012). Sürdürülebilir kalkınma yolunda gelen çevresel sorunların üstesinden gelebilmek için yenilenebilir enerji çok önemli bir rol oynayabilir. Bu nedenle politikacılar artan enerji talebini karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmak üzere gerekli yatırımları desteklemek için çalışmalar yapmaktadırlar (Şeker ve Kahraman, 2020). Birçok ülke mevcut enerji sistemlerini, yüksek verimli, temiz ve sürdürülebilir enerji sistemlerine dönüştürmek için yeni enerji planlarını uygulamaya koymuşlardır.

Türkiye'nin yerli ve yenilenebilir enerji hedeflerinin de yer aldığı 2019-2023 dönemini kapsayan onbirinci kalkınma planı, genel olarak sürdürülebilir ekonomik kalkınmaya odaklanmaktadır. Türkiye'nin gelişen bir ülke olmasının getirdiği hızlı enerji talep artışı ve dolar kurundaki yukarı yönlü dalgalanmalar ithalat bağımlılığının etkilerinin yıldan yıla daha fazla hissedilmesine sebep olmaktadır. Bu kapsamda yerli doğalgaz ve petrol kaynaklarının tesbitine yönelik Ar-Ge faaliyetleri ve yenilenebilir enerji için gerekli ekipmanların yerli üretilmesine yönelik çalışmalar önceliklendirilmiştir. Bununla birlikte ülkenin bol linyit rezervleri göz önünde bulundurularak, doğal gaz yerine linyitin bir enerji kaynağı olarak kullanılması teşvik edilmektedir (Mishra ve diğ., 2021). Enerjide dışa bağımlılığımızın azaltılmasında linyit ulusal politikalarımızın önemli bir parçasıdır. Yerli linyitin elektrik, ısınma ve sanayide kullanımının artırılması, enerji arz güvenliğinin sağlanabilmesi ve ekonomiye katkısı açısından teşvik edilmektedir. Ancak, İklim değişikliğine en çok etkisi olan santaller

kömürlü özellikle de linyit santralleridir. Çevresel ve sosyal maliyetler dikkate alındığında linyit ve kömür yakıtlı santraller yatırımcılar için ekonomik görülmemektedir. Bununla birlikte dünyada temiz kömür teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde kömür santrallerinin çevresel ve sosyal maliyetleri düşmeye başlamıştır. Bu durumda Türkiye'nin zengin linyit rezervlerinin işletmeye alınması durumunda çevresel riskler en aza indirilerek enerji bağımlılığı önemli ölçüde azaltılabilecektir.

Enerji, en önemli yerel ve küresel politika araçlarından biridir (Şekercioğlu ve Yılmaz, 2012). Yenilenebilir enerji, geleneksel enerji kaynaklarının insan, çevre ve doğal kaynaklar üzerindeki artan olumsuz etkileri nedeniyle bu politikaların belirleyicisi olarak öne çıkmaktadır. Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi, iklim ve hava koşullarına bağlı olduğu için arzın devamlılığı açısından risk oluşturmaktadır. Bu riski eşitlemek için iki veya daha fazla yenilenebilir kaynağın hibrit çalışması önerilir (Aydın ve diğ., 2013). Ayrıca doğalgaz gibi daha az zararlı fosil kaynaklarla entegrasyon da bir çözümdür. Yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut sisteme entegrasyonu çevre, ekonomi ve enerji arz güvenliğini kapsayan bir enerji planlama problemidir. Enerji planlaması, enerji ihtiyaçlarının öncelikle yerli kaynaklardan karşılanmasını sağlamak için optimal kaynak tahsisi gerektiren stratejik kararları içerir. Bu kararlar, planlama döneminde ekonomik kalkınma için enerji talebini karşılayacak alternatif enerji üretim yeniliklerinin ne zaman ve nerede geliştirileceğinin belirlenmesini içerir (Bagdadee ve Zhang, 2020). Bu planlama bir ülkenin sürdürülebilir kalkınması için önemlidir. Sürdürülebilir kalkınma, toplum yararını korur, yerli ve yenilenebilir enerji (YE) kaynaklarına öncelik verir, enerji teknolojilerinin yerli üretimine yönelik yatırımları teşvik eder, enerjinin verimli kullanımını destekler, çevreye verilen zararı azaltır. Çok yönlü enerji planlamasının bir yönü talep tahminleridir. Talep tahminleri, arz ve talep arasındaki sapmaları en aza indirmeyi amaçlar. Uzun vadeli talep tahminlerinde gerçekleşen değer ile tahmin edilen değer arasındaki fark yani sapmalar kaçınılmazdır. Bu sapmalar büyükse, bu arz fazlasına, ekonomik kayıplara ve enerji politikalarında başarısızlığa yol açabilir. Bu nedenle enerji sektöründe talep tahminlerinin güvenilirliği diğer sektörlerle göre çok daha önemlidir. Bu aynı zamanda hükümeti yatırım planlarını optimize etmede destekler ve yatırımcılara risklerini en aza indirmek için yol haritası planlaması sağlar (Nafil ve diğ., 2020). Enerji bakanlığının tahminlerine göre 2011-2023 döneminde birincil enerji talebinde yaklaşık yüzde 90'lık bir artış olacak. Bu rakamlar önümüzdeki on yılda

Türkiye'de enerjinin oynayacağı rol hakkında bir fikir verirken, artan talebin ekonomik kalkınma için bir darboğaz oluşturmaması için planlamanın kritik bir öneme sahip olduğunu gösteriyor. Bu durumda, yeni üretim yatırımının devreye alınması, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi (örneğin, kapasite artırımı için yerel ve yenilenebilir kaynaklar) ve enerji verimliliğinin en üst düzeye çıkarılması Türkiye için önemli bir konu olarak ortaya çıkmaktadır.

Dünyada artan fosil kaynaklarının kullanımından gelişmiş olan Çin, ABD ülkeleri ile gelişmekte olan Asya ülkeleri sorumludur. Asya ülkelerinde hızlı nüfus artışı ve sanayi sektöründeki gelişmeler nedeniyle artan enerji ihtiyacı fosil kaynakları ithal edilerek karşılanmaktadır. Bu nedenle fosil yakıt tüketimi artmış, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güç içindeki payı azalmıştır. Fosil kaynaklara olan ilginin temel nedeni, yenilenebilir enerji teknolojilerinin yüksek yatırım maliyetleri gerektirmesidir. Avrupa'da ise tam tersi bir politika planlanıyor. Yani, yenilenebilir enerji sistemleri mevcut fosil enerji sistemlerinin yerini almaya başlıyor. Yenilenebilir enerji teknolojilerine geçişin temel nedeni fosil yakıtların ekosisteme verdiği zarardır. Ancak yenilenebilir enerji, küresel düşük karbon ekonomisinin arka planında enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı için önemli bir yere sahiptir (Wu ve diğ., 2019). Karbon vergileri ve emisyon ticaret sistemleri, ekosisteme zarar vermemek için yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırıyor. Dünyanın küresel ısınmasından da sorumlu olan ülkeler, karbon emisyonlarını azaltmak için bu kaynaklara yatırımlarını artırmaya başladılar. Böylece kısa vadede enerji sistemlerinin büyük bir kısmının temiz enerji kaynakları oluşturmalarını hedeflerler. Bir başka açıdan bakıldığında, uluslararası ticarete serbestleşme sürecinden sonra kirlilik endüstrileri gelişmekte olan ülkelere kayarken, gelişmekte olan ülkelerin çevre kalitesi düşmeye başlarken, gelişmekte olan ülkelerin çevre kalitesi azalmaya başlamıştır. 2018 yılı sonuna kadar dünya genelinde neredeyse tüm ülkelerde yenilenebilir enerjiyi destekleme politikaları ve hedefleri belirlenmiştir. 2018 yılı sonuna kadar dünya genelinde neredeyse tüm ülkelerde yenilenebilir enerjiyi destekleme politikaları ve hedefleri belirlenmiştir. Ancak ülkelerin yenilenebilir enerji politikaları kapsamlılık açısından büyük farklılıklar göstermektedir. Alman hükümeti, elektrik tüketiminde yenilenebilir enerji oranını 2020'de %35 ve 2050'de %80 olarak açıkladı. AB, 2030'da %32 yenilenebilir enerji hedefine ulaşmayı hedefliyor (World

Energy Council, 2019). Türkiye'nin hedefi 2023'te %38,5 yenilenebilir enerjiye sahip olmaktır.

Doğalgaz ve petrol ithalatında dışarıya bağımlılığın getirdiği arz güvenliği riski ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin ithalat maliyetlerinin yüksek olması bu önceliklendirmenin ana sebepleridir. Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından oldukça zengin olan Türkiye, bu potansiyeli etkin bir şekilde enerji sistemlerine dâhil etmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda 2023 yılına kadar ulaşılması planlanan yenilenebilir enerji hedefi onbirinci kalkınma planında % 38,8 olarak belirlenmiştir (SBB, 2019). Belirlenen hedeflerin uygulanabilirliğinin araştırılması, bunun için bir yol haritasının oluşturulması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesi özelinde bu hedeflere optimum bir şekilde ulaşılacak ithal enerji kaynaklarını da kapsayan alternatif enerji planlamaları sunulmuştur. Bu planlamaların maliyet ve karbon salınımı analizleri yapılmış ve bölgesel yatırımlar için karar vericiye seçenekler sunulmuştur.

BİRİNCİ BÖLÜM

TÜRKİYE’DE ENERJİ PLANLAMALARI

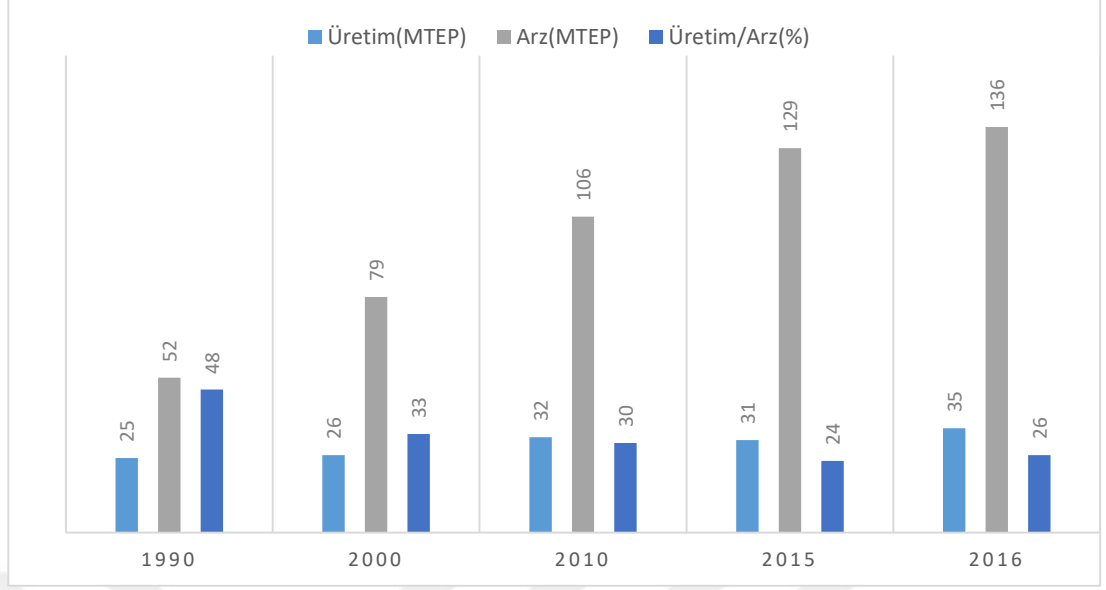
1.1. ENERJİ ARZ GÜVENLİĞİ

Enerji arz güvenliği; kısa vadede, arz ve talep arasındaki ani değişimleri yönetebilme yeteneği iken uzun vadede enerji talebinin kesintisiz bir şekilde karşılanması anlamına gelir. İlk kez 1973 petrol kriziyle birlikte ortaya çıkan enerji arz güvenliği kavramı, özellikle enerji ithalatına bağımlı ülkeler başta olmak üzere günümüzde tüm ülkelerin ulusal ve uluslararası enerji politikalarının en çok dikkat çeken sorunlarından biri oldu. Bu süreçte enerjinin sürdürülebilir ve satın alınabilir bir şekilde tedarik edilebilmesinin güvence altına alınması gerektiği anlaşıldı. Bugün geline nokta, enerji güvenliği iç politika olmaktan çıkıp küresel ve bölgesel gelişmelere yön veren stratejik bir hedef olmaya başladı. Bu hedefler arasında enerji rotalarını ve kaynak sağlayan ülkeleri çeşitlendirecek uluslararası enerji anlaşmalarının yapılması, ithalat bağımlılığının azaltılması amacıyla yerli enerji kaynaklarının araştırılması ve geliştirilmesini sağlayacak faaliyetlere yatırım yapılması gibi birçok uygulama ön plana çıkarılma başladı. Bu ve benzeri uygulamaların devlet tek eli ile yapılması günümüzde yeterli olmadığı anlaşıldı ve özel yatırımcılar enerji sektörüne dâhil edilerek enerji piyasalarının serbestleştirilmesi ve rekabet ortamının oluşturulması sağlandı. Bu sayede hızla artan enerji talebine karşılık milli enerjinin geliştirilmesine yönelik yapılan yatırımlar da hızla artmaya başladı. Başka bir açıdan çevre duyarlılığı politikaları enerji arz güvenliği sisteminde önemli değişiklikler yaratarak temiz enerji kaynakları olan yenilenebilir enerji kaynaklarını ön plana çıkarmaya başladı. Ülkeler ithal ettiği petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlara ikame olarak bu kaynakların teknolojilerini geliştirmeye öncelik vermeye başladılar (Mohsin ve diğ., 2021). Ancak bu kaynakların iklim şartlarına bağlı olarak üretim miktarlarının dalgalanması, enerji depolama teknolojilerinin henüz kısıtlı ve maliyetli olması, bu kaynakların istenen düzeyde kullanımını sınırlandıran temel sorunlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Önümüzdeki yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte bu sorunların üstesinden gelineceği ve böylece fosil yakıtların yerini yenilenebilir enerji teknolojilerinin alması beklenmektedir (Zhao ve diğ., 2022).

Dünyada bu gelişmeler yaşanırken Türkiye’de de milli bir servet olan yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı kurulu güç son yıllarda hızla artış göstermeye başlamıştır. Yapılan yatırımların önünü açmak amacıyla özel sektör için çeşitli teşvik sistemleri oluşturularak enerji piyasaları hareketlendirilmiştir. Bu sayede ithalat bağımlılığının ve buna bağlı olarak cari açığın önemli kalemlerden biri olan enerji harcamalarının azaltılması hedeflenmektedir. Türkiye’de yerli kaynaklara yönelik arz güvenliği politikalarının yanında ithalata yönelik politikalarda geliştirilmektedir. Enerji üretim ve tüketim merkezleri arasında köprü konumunda olan Türkiye’nin coğrafi konumunun getirdiği fırsatlardan faydalanarak rezervine sahip olmadığı petrol ve doğal gazdan uluslararası anlaşmalarla faydalanmaktadır. Coğrafi konumunun getirdiği stratejik önem uluslararası enerji siyasetinde söz sahibi olmasını sağlayacaktır. Bu amaçla boru hattı projeleri son yıllarda gündeme alınmış ve hızla hayata geçirilmiştir. Bununla birlikte 2023 hedefleri doğrultusunda yerli ve yenilenebilir enerji, verimlilik ve kaliteli hava konularında geliştirilen politikalar doğrultusunda arz güvenliği sağlanmaya çalışılmaktadır. 2010 yılında ulusal iklim değişikliği stratejisi ve bu stratejiye dayalı faaliyet planı, 2012 yılında enerji verimliliği stratejisi, elektrik piyasası ve arz güvenliği stratejileri geliştirilmiştir. Bu stratejilerin temel amacı enerji arz güvenliğinin sağlanması adına Türkiye’nin ulusal çıkarlarının maksimum düzeyde korunması, enerji kaynaklarının mümkün olduğunca çeşitlendirilmesi ve enerjinin katlanılabilir maliyetle ve yeterli miktarda tedarik edilebilmesine yönelik adımları içermektedir.

1.2. ENERJİ TİCARETİ

Yerli ve yenilenebilir enerji üretiminin enerji arzını yıldan yıla azalan oranda karşılaması enerji ithalatının hızla arttığının bir göstergesidir. Özellikle 2000’li yıllarda hızlı sanayileşme ve kentleşme ile enerji ihtiyacı hızla artmış, buna bağlı olarak ithalat miktarında ve ithal edilen kaynak ve ülkelerin çeşitliliğinde artış gözlenmiştir. Enerji ithalatının artması Türkiye’nin yıldan yıla dışa bağımlılığını artırmıştır. 2017 yılında enerjide dışa bağımlılık %75 iken 2019 yılında bu oran yaklaşık %85’e yükselmiştir (TÜİK, 2019).

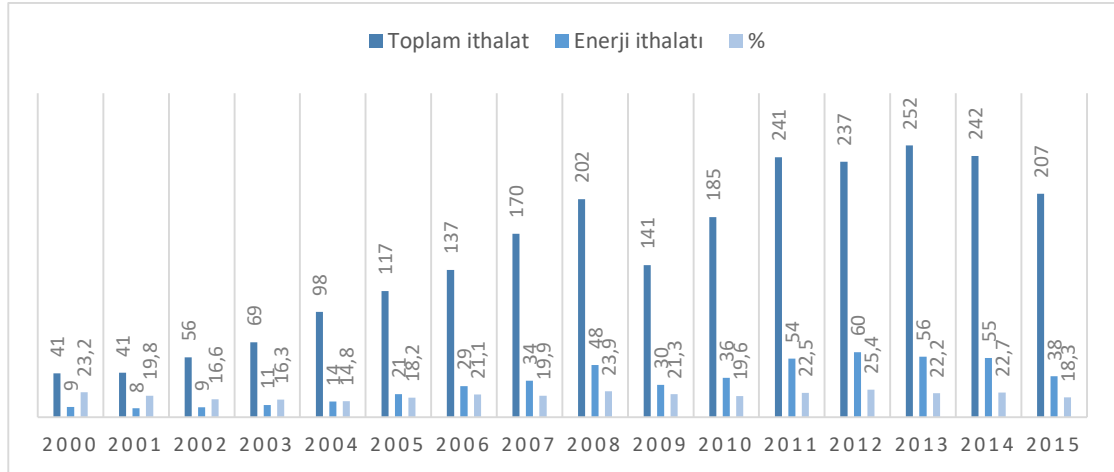


Grafik 1. Yerli Üretimin Enerji Arzını Karşılama Oranı

Kaynak: TMMO, 2018 verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

Türkiye'nin toplam birincil enerji arzı 1990-2016 yılları arasında %160 artarken yerli enerji üretimi sadece %34 artış göstermiştir. Bu dönemde toplam yerli ve yenilenebilir enerji üretiminin enerji arzını karşılama oranı %48 den %26'ya düşmüştür (Grafik 1).

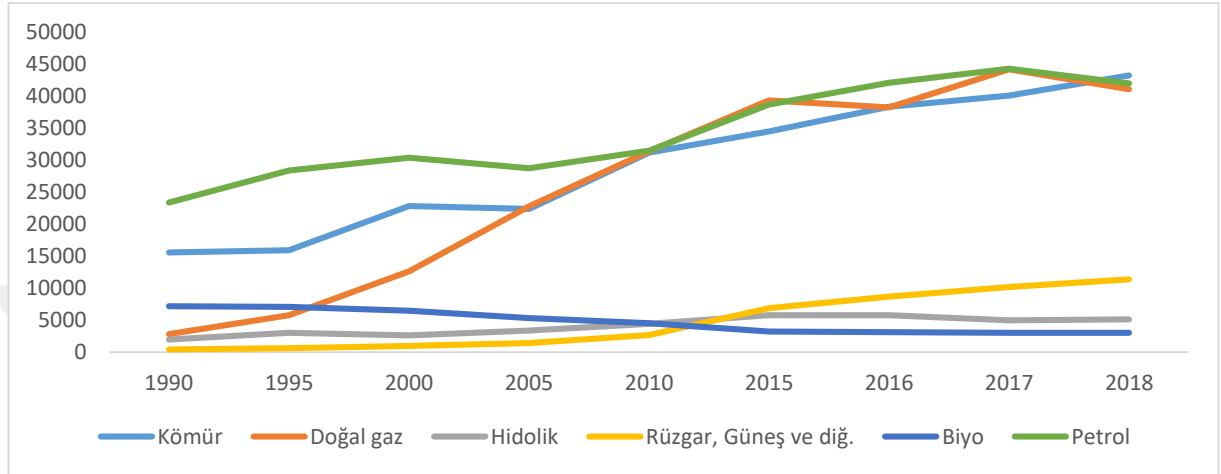
Sanayinin hızlı gelişmesi ile birlikte enerji ithalatının artması ekonominin olması gerekenden daha yavaş büyümesine sebep olmuştur. İthal edilen fosil yakıtların fiyatlarındaki dalgalanmaların oluşturduğu riskler sürdürülebilir kalkınma hedeflerini sektöre uğratmıştır. 10. Kalkınma planında enerji ithalatı şöyle değerlendirilmiştir: *“Enerji ithalatının toplam ithalatımızın yaklaşık dörtte birini oluşturması nedeniyle, önümüzdeki dönemde küresel enerji piyasalarındaki fiyat ve arz gelişmeleri, Türkiye ekonomisini hem büyüme dinamikleri hem de cari açık açısından etkilemeye devam edecektir. Enerjide dışa bağımlılığımızı azaltmaya yönelik alternatif politikalar oluşturulması, büyüme ve cari açık üzerinde olumlu etkiler yaratacaktır. Bu kapsamda, arz tarafında linyit başta olmak üzere yerli kaynakların daha fazla değerlendirilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payının yükseltilmesi önem taşımaktadır”* (SBB, 2019).



Grafik 2. Toplam İthalat Harcamalarının(Milyon TL) Enerji İthalatına Ayrılan Kısımı(%)

Son 16 yılda toplam ithalatın ortalama % 21’ini enerji ithalatı oluşturmuştur. Ancak 2012 yılından sonra bu oranda düşüş gözlenmektedir (Grafik 2). Yani enerji ithalat harcamalarının toplam ithalat harcamalarındaki payı azalmaya başlamıştır. Kriz dönemlerinde (2008-2009) toplam ithalat daralma olmasına rağmen enerji ithalat miktarında daralma gözlenmemiştir. Bu da enerji tüketiminin temel ihtiyaç olduğunu ve her koşulda karşılanması gerektiğinin bir göstergesidir. Ülke ekonomisi için önemli bir adım olarak değerlendirilen enerji ithalatındaki azalmanın temel sebebi Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın yerli ve yenilenebilir enerji planlamalarını uygulamaya geçirmeye başlamasıdır (Özev, 2017). Bu planlama, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının 2023 yılına kadar değerlendirilmesine yönelik detaylı hedefleri içermektedir. Ayrıca her beş yılda bir güncellenen kalkınma planlarında da enerji sektörüne yönelik planlamalara büyük ölçüde yer verilmektedir. 11. kalkınma planında enerji planlamalarının amacı şöyle açıklanmıştır: “*Enerji arzının sürekli, kaliteli, sürdürülebilir, güvenli ve katlanılabilir maliyetlerle sağlanması temel amaçtır*” (SBB, 2019). Burada özellikle beş bileşen vurgulanmıştır. Bunlardan enerji arzının sürekli, güvenli ve sürdürülebilir olması enerji ihtiyacının yerli kaynaklardan karşılanmasını gerektirir. Ancak bunu kısıtlayan katlanılabilir maliyet ilkesi nedeniyle gerektiğinde ithalata başvurmak suretiyle enerji ihtiyacının karşılanabileceği de vurgulanmaktadır. Nitekim Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı da planlamalarını bu amaç doğrultusunda gerçekleştirmektedir. Yüzde yüz yenilenebilir enerji için katlanılabilir maliyet ancak uzun vadede makul görülürken kısa vadede ihtiyaç duyulan enerjinin bir kısmının ithal

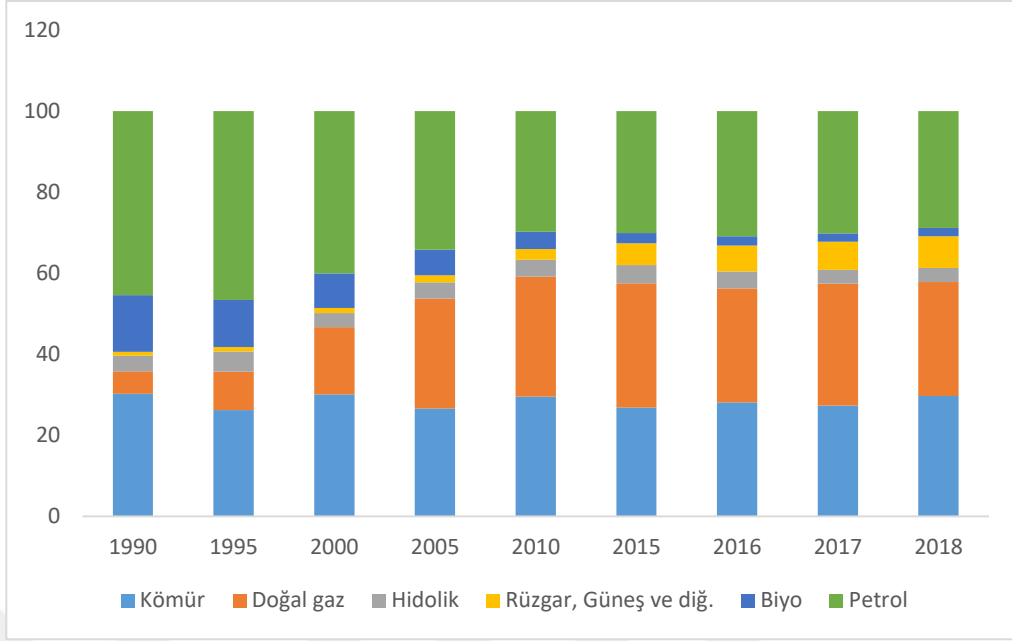
edilmesi gerekmektedir. Türkiye’de ithalat ve yerli üretim dengesi yıldan yıla açık vermektedir (Grafik 3). Yerli üretim artmasına rağmen ithalat artışına oranla bu artış oldukça düşük gerçekleşmektedir. 2010 yılından buyana gelişen yenilenebilir enerji sektöründen de maliyetin yüksek olması sebebiyle beklenen büyüme elde edilememiştir. Enerji ithalatı her yıl daha da hızlı artarak enerjide bağımlılığa sebebiyet vermiştir.



Grafik 3. Enerji Tüketiminin Kaynaklara Göre Dağılımı (Ktoe)

Kaynak: IEA verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

Yıllara göre enerji tüketimi değerlendirildiğinde en fazla ithal edilen kaynak 2010 yılından bu yana doğal gazdır. Doğal gaza dayalı çalışmalar ilk olarak 1976 yılında petrol arama faaliyetleri sırasında bulunan kuyuların işletmeye açılmasıyla başlamış ve (Türkyılmaz, 2007) günümüze kadar tüketimi en fazla artan kaynak olmuştur. 1990 yılında toplam tüketim içerisindeki payı %5,5 iken 2018 yılına gelindiğinde bu oranın yaklaşık % 29 olduğu gözlenmiştir. Yine fosil yakıt olan petrol kaynağının ithalat oranı 1990 yılında %45 iken günümüzde % 28 civarına düşmüş ancak ithalat oranı doğalgazdan sonra en fazla olan ikinci fosil yakıt olmuştur. Petrol Türkiye’de en fazla ulaşım sektöründe kullanılmaktadır. 2017 yılında dengeler değişmiş ve kömür ithalatı ilk sırayı almıştır. Kömürün toplam tüketim içerisindeki oranı 1990 yılından günümüze pek fazla değişim göstermemiş olup %29 civarlarında seyretmiştir (Grafik 4).



Grafik 4. Enerji Tüketiminin Kaynaklara Göre Dağılımı (%)

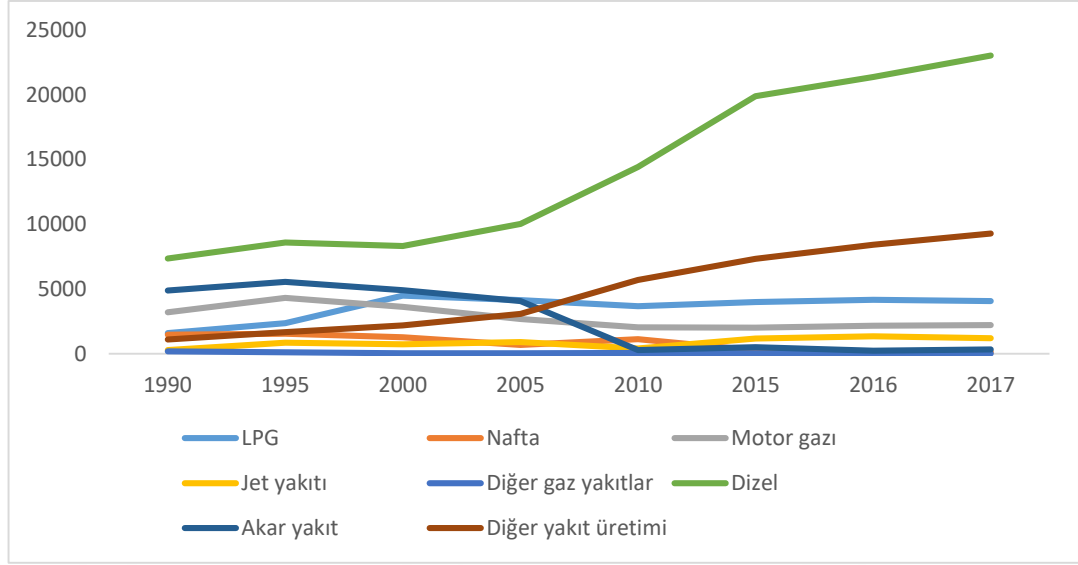
Kaynak: IEA verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

1.3. TÜRKİYE’DE ENERJİ KAYNAKLARININ GÖRÜNÜMÜ

1.3.1. Fosil Kaynaklar

1.3.1.1. Petrol

Türkiye’de petrol arama ve geliştirme çalışmaları oldukça maliyetli olup petrolün üretim miktarı ithalat fiyatına bağlı olarak değişmektedir. En fazla ithalat %27 oranı ile Irak’tan yapılmaktadır. Bunu sırasıyla Rusya (% 19) ve İran (% 11) takip eder. Geri kalanı ise altı farklı ülkeden farklı oranlarda gerçekleşmektedir. Enerji ithalatının yapıldığı ülkelerde çeşitliliğin fazla olması arz güvenliğinin garantiye alınması bakımından önemli bir enerji politikasıdır. Petrolün bir kısmı işlenerek ihracatı da yapılmaktadır. 2019 yılının aralık ayında 2,5 milyon ton petrol ithal edilmişken 1,2 milyon ton petrol ürünü ihraç edilmiştir. Havacılık ve denizcilik yakıtları (%57) ve benzin türleri (%31) en fazla ihraç edilen petrol ürünleridir (EPDK, 2018) (Grafik 5).



Grafik 5. Petrol İhracatının Petrol Ürünlerine Göre Dağılımı
Kaynak: IEA verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

Enerji atlası verilerine göre Türkiye’de fueloil, nafta ve motorine dayalı çok yakıtlı santrallerinin kurulu gücü 4386 MW’ tır. Petrole dayalı elektrik santrallerinin kullanımı diğer kaynaklara oranla pek yaygın olmadığı söylenebilir (Şekil 1). Petrol en çok ulaşım sektöründe sıvı yakıt olarak kullanılmaktadır. Petrol ürünleri talebi ulaşım sektörünün dışında genel olarak düşüş eğilimindedir.



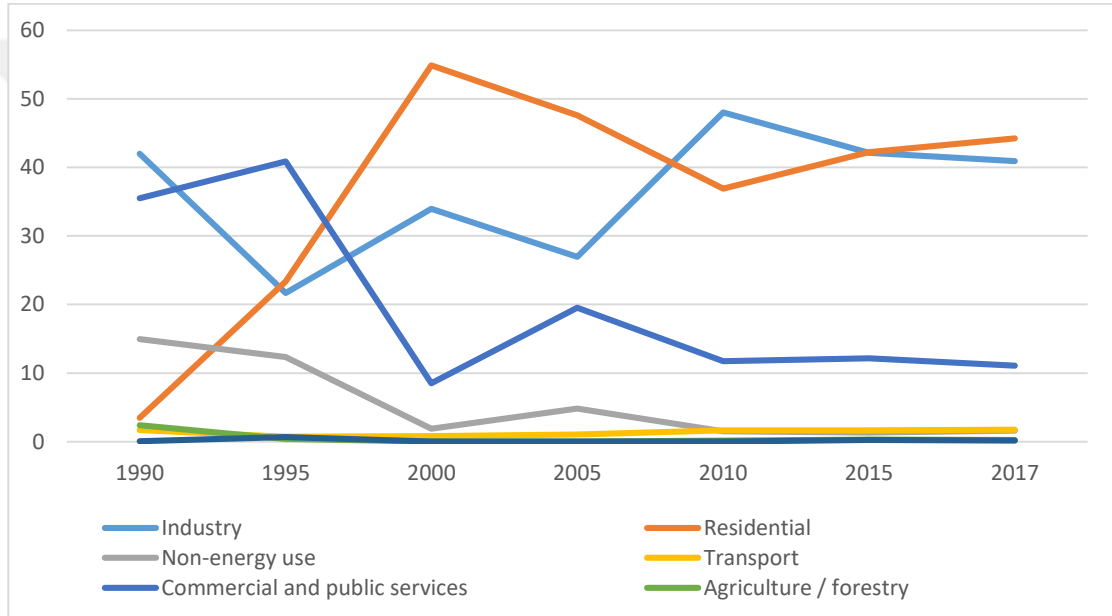
Şekil 1. Türkiye’de Petrole Dayalı Kurulu Gücün Dağılımı
Kaynak: Enerji Atlası verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

Türkiye’de petrol ithalatının artışı etkileyecek en önemli faktör elektrikli araçların ulaşım sektöründe yaygınlaşmaya başlamasıdır. Bunun bir sonucu olarak artan elektrik talebinin yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklardan karşılanması enerji bağımlılığın petrol

yönünü zayıflatacaktır. Bu açıdan yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi uzun vadede enerji güvenliği açısından önemli bir politikadır.

1.3.1.2. Doğalgaz

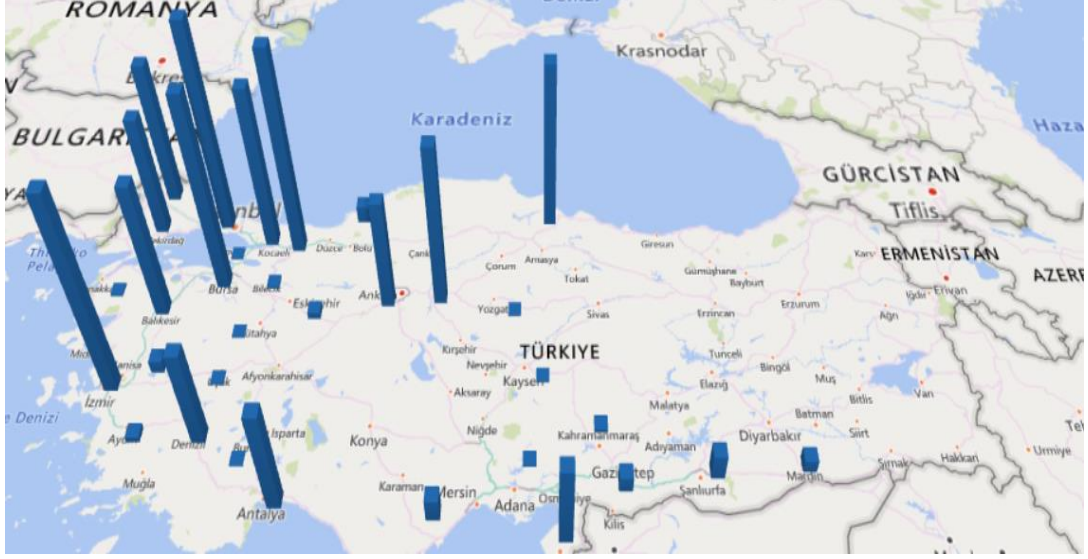
Fosil yakıt olan doğal gazın Türkiye’deki Kurulu gücü 22162 MW’tır. Toplam kurulu güç içindeki payı ise yaklaşık %29 civarındadır. Doğal gazın yaklaşık % 40’ı sanayide elektrik enerjisi olarak ve % 44’ü konutlarda ısınma enerjisi olarak kullanılmaktadır. Geriye kalan % 16’lık kısmı ise kamu ve hizmet, tarım, ulaşım ve pişirme sektörlerinde kullanılmaktadır (Grafik 6).



Grafik 6. Türkiye’de Doğal Gaz Kullanımının Sektörlere Göre Dağılımı

Kaynak: IEA verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

Kurulu güç, özellikle sanayinin ve nüfusun yoğun olduğu iller ile doğal gaz rezervine sahip İstanbul, Edirne, Düzce, Tekirdağ, Adıyaman, Mardin ve Kırklareli illerinde yoğunlaşmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Türkiye’de Doğalgaza Dayalı Kurulu Gücün Dağılımı

Kaynak: Enerji Atlası verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

Türkiye’nin doğalgaz rezervi oldukça sınırlı olmasına karşın toplam enerji arzının %35’i kadar ithalata dayalı yoğun bir kullanımı söz konusudur. Rusya, Azerbaycan ve İran gibi sınır ülkelerde bol rezervlerinin bulunması ve bu ülkelerden boru hatları ile Türkiye’ye girişinin kolaylıkla ve minimum maliyetle sağlanması bunda önemli bir faktör olmaktadır. Ayrıca Asya ülkelerinin rezervinin tüketim merkezi olan Avrupa’ya bu boru hatları ile ulaştırılmasından da kar elde edilmektedir. Ancak yurt içi istikrarsızlıklar, rezerv bölgelerindeki çeşitli gerginlikler ve tüketici ülkelerle olan anlaşmazlıklar doğalgaz üzerinde kurulabilecek hâkimiyeti ve dolayısı ile elde edilebilecek fırsatları zayıflatmaktadır.

1.3.1.3. Türkiye’de Kömür Sektörünün Görünümü

Yerli kömürün elektrik piyasasına girmesi 1970 petrol krizi döneminden sonra denk düşmektedir. Yatırımlar bu tarihten sonra hızla artmaya başlamış 1986 yılında yerli kömüre dayalı kurulu gücün toplam kurulu güce oranı %37 düzeyine ulaşarak tüm yılların en yüksek seviyesini yakalamıştır. Bu tarihten itibaren yerli kömürün elektrik üretimi amaçlı değerlendirilmesi hususunda yeterli yatırımlar yapılamamış ve bu oran 2019 yılında %12 seviyelerine düşmüştür. Bu düşüşteki en önemli faktör doğalgazın elektrik sektöründeki payının 1980 itibari ile artmaya başlaması olmuştur. Bugün geline nokta

Türkiye doğal gaz bağımlısı bir ülke konumunda iken önemli yerli kömür rezervleri tam kapasite ile kullanılmamaktadır.

Türkiye’de toplam kurulu gücün %22’sini kömür kaynağına dayanmakta olup 18970 MW kapasiteye sahiptir (Şekil 3). Bu kapasitenin 10.288 MW’ı yerli kömürden ve 8,682 MW’ı ise ithal kömürden oluşmaktadır. Elektrik üretiminde artan dışa bağımlılığın önünü alabilmek amacıyla yerli kaynakların arzının artırılmasına yönelik çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Elektrik enerjisi piyasası ve arz güvenliği strateji belgesinde yerli kömürün bilinen rezervlerinin tamamının 2023 yılında devreye alınması hedefi belirlenmiştir. Bu durumda yerli kömüre dayalı toplam kurulu gücün 20000 MW artırılabilceği öngörülmüştür.

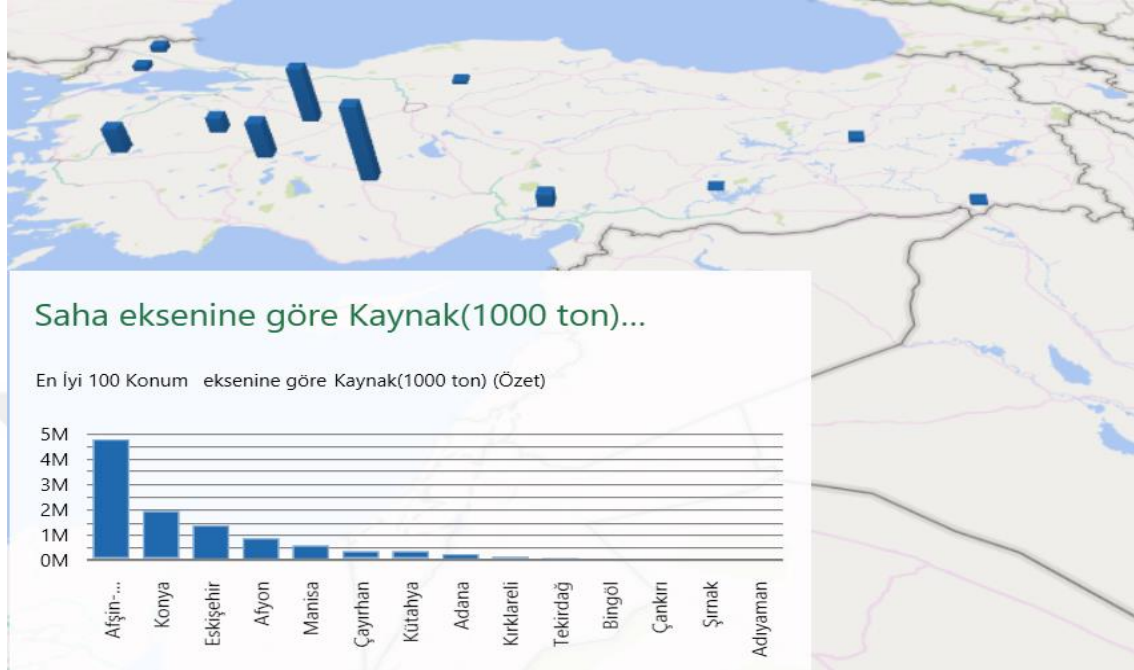


Şekil 3. Kömüre Dayalı Kurulu Güç Dağılımı (MW).

Kaynak: Enerji Atlası verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

Linyit rezervleri; Ege, Trakya ve İç Anadolu bölgesi’nde ve taş kömürü rezervleri ise Batı Karadeniz Bölgesi’nde yoğunlaşmaktadır. Yerli linyit üretiminin %88’i, yerli taş kömürü üretiminin ise %48’i elektrik üretiminde kullanılmaktadır. 1980 yılında az bir miktarda yapılan kömür ithalatı 2000’li yıllara kadar 20 milyon tona ulaşmış ve günümüzde 39 milyon tonu aşmıştır. Son yıllarda kömür ithalatındaki bu artışın en önemli sebebi olarak elektrik talebindeki hızlı artış gösterilmektedir. Özellikle termik santrallerde ve demir çelik sanayinde kullanılan taş kömürünün neredeyse tamamı ithal edilmektedir. 2015 yılında imzalanan Paris İklim Antlaşması ile özellikle gelişmekte olan ülkeler başta olmak üzere dünya genelinde kömür tükeminde önemli bir azalış

gerçekleşti. Türkiye bu antlaşmaya 2021 yılının Ekim ayında dâhil olmuştur. Bu antlaşmanın getirdiği yaptırımların, kömür ithalatı üzerinde azaltıcı bir etki yaratacağı düşünülebilir.



Şekil 4. Elektrik Üretimi Amaçlı Kullanılabilecek Başlıca Kömür Sahalar
Kaynak: Enerji Atlası verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

1.3.2. Yenilenebilir Enerji

Yenilenebilir enerji kaynakları doğal kaynaklardan elde edilen işlem görmelerine rağmen tükenme sorunu olmayan çevreci kaynaklardır (Selvi, 2016). Dünya üzerinde her ülke sahip olduğu coğrafi özelliğe göre yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitleri açısından belli bir potansiyele sahiptir. Fosil yakıtların kısa vadede tükenme tehlikesi düşünüldüğünde yenilenebilir enerji çeşitliliğine sahip ülkeler enerji jeopolitiği açısından uzun vadede şanslı olacağı aşikârdır. Bu ülkeler diğer bir ülkenin kaynaklarına ihtiyaç duymadan enerji ihtiyacını karşılayabileceklerdir (Uysal ve Gümüş). Özellikle enerji talebi hızla artan ülkeler kendi kendilerine yetebilir duruma gelebilmek amacıyla fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş politikalarını önceliklendirmişlerdir. Ancak bu geçişin önündeki en büyük engeller teknolojik ve finansal kısıtlardır (Kayışoğlu ve Diken, 2019). Potansiyeline rağmen yararlanma oranının düşük olmasının en belirleyici unsuru teknolojisinin pahalı oluşudur. Yenilenebilir enerji teknolojilerindeki

gelişmeler yakın geçmişte başlamış olup ciddi finansal destekler gerektirmektedir. 21 yüzyılda özellikle gelişmiş ülkelerde yenilenebilir enerji teknolojilerine ciddi yatırımlar yapıldığı görülmektedir. Fosil yakıtların tükeneyeceği varsayımı altında geleceğin enerji kaynaklarının yenilenebilir enerji kaynakları olacağı öngörülmektedir. Ayrıca yenilenebilir enerji tüketimindeki artış ile ekonomik büyüme arasında eşbütünleşik bir ilişki olduğu ortaya konmuştur (Erdoğan ve diğ., 2018). Cari dengenin sağlanmasındaki en önemli etkenin enerji talebinin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması olduğu düşünülmektedir (Eraslan ve Solak, 2019). Gelişmiş ülkeler artan enerji ihtiyaçlarını yenilenebilir enerjiden karşılayabilmek amacıyla ilgili teknolojilerin geliştirilmesi yönünde enerji politikaları geliştirmektedirler. Gelişmekte olan ülkeler ise artan enerji ihtiyaçlarını maliyetlerinin daha düşük olması nedeniyle ithal fosil kaynaklardan karşılamaktadırlar. Türkiye de yenilenebilir enerji çeşitliliği ve potansiyeli bakımından zengin olmasına rağmen ihtiyaç duyduğu enerjinin büyük bir kısmını maliyetinin düşük olması sebebiyle ithal etmektedir. Artan enerji ithalatı ekonomi üzerinde ciddi baskı oluşturmaktadır. Bu durumun üstesinden gelmek amacıyla Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından mevcut yerli potansiyelin değerlendirilmesi için politikalar geliştirilmiş ve yatırım teşvik sistemleri oluşturulmuştur. Özel sektörün de dâhil olduğu yatırımlarla birlikte yenilenebilir enerjiye dayalı kurulu güç son 20 yılda yaklaşık dört kat artırıldı (Tablo 1). Bununla birlikte ETKB'nin Enerji Strateji Planı'nda yer verilen yenilenebilir enerji teknolojilerinin yerli üretiminin geliştirilmesi hedefi doğrultusunda ekipman maliyetlerinin düşeceği ve gelecek yıllarda yenilenebilir enerjiye dayalı kurulu gücün katlanarak artacağı öngörülebilir. Böylece Türkiye dahil olduğu Paris İklim Antlaşması gereği 2030 yılında karbon emisyon oranı hedefini yakalamayı garanti etme fırsatı elde edebilecektir. Bu açıdan da enerji planlamalarında daha çevreci bir strateji ve politika geliştirilerek geleceğe yönelik etkin kararların alınması sağlanacaktır.

Tablo 1. Yıllara Göre Yenilenebilir Enerji Kurulu Gücü Gelişimi

Yıl	Hidrolik	Jeotermal	Rüzgâr	Güneş	Biokütle	Yenilenebilir	Türkiye Toplam	Yenilenebilir %
2000	11.175	18	19		10	11.222	27.264	41
2001	11.673	18	19		10	11.719	28.332	41
2002	12.241	18	19		14	12.291	31.846	39
2003	12.579	15	19		14	12.626	35.587	36
2004	12.645	15	19		14	12.693	36.824	35
2005	12.906	15	20		14	12.955	38.844	33
2006	13.063	23	59		20	13.164	40.565	33
2007	13.395	23	148		21	13.587	40.836	33
2008	13.829	30	364		38	14.260	41.817	34
2009	14.553	77	792		65	15.487	44.761	35
2010	15.831	94	1.320		86	17.331	49.524	35
2011	17.137	114	1.729		104	19.084	52.911	36
2012	19.609	162	2.261		147	22.180	57.059	39
2013	22.289	311	2.760		178	25.538	64.008	40
2014	23.643	405	3.630	40	227	27.945	69.520	40
2015	25.868	624	4.503	249	277	31.521	73.147	43
2016	26.681	821	5.751	833	364	34.450	78.497	44
2017	27.273	1.064	6.516	3.421	477	38.751	85.200	46
2018	28.291	1.283	7.005	5.063	622	42.264	88.551	48
2019	28.546	1.515	7.670	6.116	1.179	45.026	91.380	49

Kaynak: TEİAŞ verileri ile hazırlanmıştır.

İthalat oranı 2015 yılında %80'lere çıkmış ve sonrasında azalarak 2019 yılında %77'lere düşmüştür. 2023 hedeflerinin gerçekleştirilmesi halinde oranın daha da düşeceği bekleniyor. Özellikle petrolde dışa bağımlılığımız %96 civarında olup elektrikli araçların artması halinde petrol bağımlılığının da azalacağı öngörülüyor. Bu durumda artan elektrik ihtiyacının karşılanabilmesi için yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi önem kazanacaktır. Gelişen teknolojinin getireceklerinin doğru bir şekilde öngörülmesi ve gerekli yerli gelişmelerin zamanında sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmalıdır.

1.3.2.1. Hidroelektrik

Bir akarsu havzasının brüt enerji potansiyeli, o havzanın düşü ve ortalama debisi dikkate alınarak hesaplanır. Brüt potansiyelin değerlendirilebilir olduğu düşünülen kısmına teknik potansiyel ve faaliyete geçirilebilir kısmına ise ekonomik potansiyel denir. Türkiye'nin brüt enerji potansiyeli 433 milyar KWh iken teknik potansiyeli 215 milyar ve ekonomik potansiyeli ise 129 milyar KWh civarındadır. Ancak nüfusun hızla artmasının ve su kaynaklarının yoğun bir şekilde bilinçsiz tüketimi bu potansiyelin düşmesine neden olmaktadır. Bugün Türkiye'nin sahip olduğu hidroelektrik santral sayısı 642 olup toplam kurulu gücü 28547 MW'tır. Bu kurulu gücün yaklaşık üçte birini sadece on büyük santral oluşturmaktadır (Tablo 2). Hidroelektrik sektörü devlet tek elinde olmayıp aynı zamanda özel sektöründe dâhil olduğu yatırımlarla gelişmektedir. ETKB'nin 2004 yılında yayınladığı 'Elektrik enerjisi sektörü reformu ve özelleştirme strateji belgesi' ile yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırımlarda özel sektörün etkin rol alması sağlanmıştır.

Tablo 2. Türkiye'nin En Büyük On Enerji Santrali ve Kurulu Güçleri

S.	Santral Adı	İl	Firma	Kurulu Güç
1)	Atatürk Barajı ve HES	Şanlıurfa	EÜAŞ	2.405 MW
2)	Karakaya Barajı ve HES	Diyarbakır	EÜAŞ	1.800 MW
3)	Keban Barajı ve HES	Elazığ	EÜAŞ	1.330 MW
4)	Altinkaya Barajı ve HES	Samsun	EÜAŞ	703 MW
5)	Birecik Barajı ve HES	Şanlıurfa	EÜAŞ	672 MW
6)	Deriner Barajı ve HES	Artvin	EÜAŞ	670 MW
7)	Yukarı Kaleköy Barajı ve HES	Bingöl	Cengiz Enerji	627 MW
8)	Beyhan Barajı ve HES	Elazığ	Cengiz Enerji	582 MW
9)	Oymapınar Barajı ve HES	Antalya	Cengiz Enerji	540 MW
10)	Boyabat Barajı ve HES	Sinop	Boyabat Elektrik	513 MW

Kaynak: Enerji Atlası

Türkiye'nin doğusu hidroelektrik potansiyeli açısından avantajlıdır. Bu bölgelerde akarsu havza sayısı fazla olup bu akarsuların debileri diğer bölgelere göre daha yüksektir. Örneğin, Fırat ve Dicle havzası en önemli hidroelektrik enerji potansiyeline sahip akarsu yataklarından biridir. Doğu Anadolu Bölgesi'nden doğup Güneydoğu Anadolu

Bölgesi'nden ülkeyi terk eder. Bu havza üzerinde kurulu olan toplam beş büyük santralden üçü, aynı zamanda Türkiye'nin en büyük santralleri olma özelliğini taşımaktadırlar (Şekil 7).

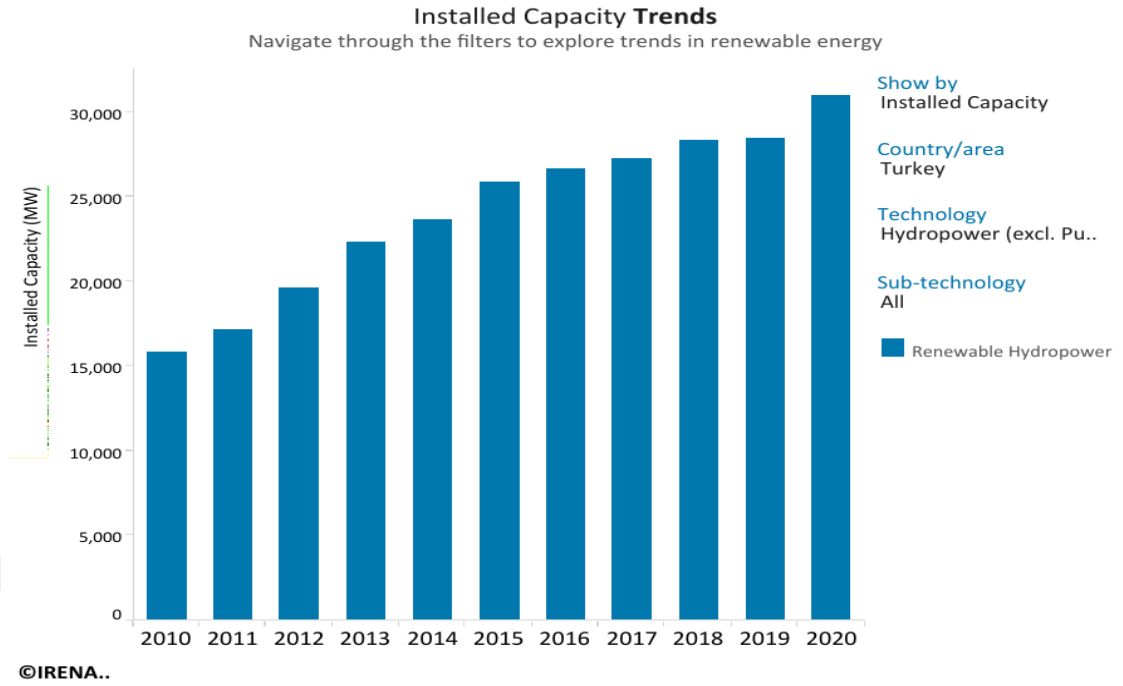


Şekil 5. Hidroelektrik Kurulu Güç Dağılımı (MW)

Kaynak: Enerji Atlası verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

Türkiye'nin batısı ise havza bakımından zengin olmasına rağmen akarsuların debi düşüklüğü nedeni ile değerlendirilebilir ekonomik potansiyeli azdır. Buradaki akarsular daha çok tarımsal sulama amaçlı kullanılmaktadır.

Hidroelektrik teknolojileri 2015 yılından önce ithal edilmekteydi. 2015 yılında başlatılan “Hidroelektrik Santral Bileşenlerinin Yerli Olarak Tasarımı ve Üretimi Projesi – MİLHES” ile ilgili teknolojiler 2018 yılında milli olanaklar kullanılarak üretilmeye başlandı. MİLHES projesinin sonuçlanması ile santral kurulum ve işletim maliyetleri azaltılması amaçlandı. Bu projenin avantajları kendini göstermeye başlamış ve 2020 yılında kurulu güç miktarında önemli ölçüde artış görülmüştür (Grafik 7).



Grafik 7. Türkiye'nin Yıllara Göre Hidroelektrik Kurulu Gücü (2010-2020)

Yenilenebilir bir enerji kaynağı olan hidroelektrik, çevresel etkileri nedeniyle dünyada bazı insanlar tarafından desteklenmemektedir. Bu çevresel etkiler arasında; yaban hayat habitatlarının ve göç yollarının zarar görmesi, bölgesel iklimin yağış düzenini etkilemesi, barajın mansabındaki suyun kontrollü olarak nehre bırakılması, baraj rezervuarı altındaki yerleşim yerlerinde yaşayan insanların zorunlu göçü vb. Tüm bu olumsuz etkilere rağmen, hidroelektrik enerji üretimi günümüzde elektrik üretmenin en ucuz yoludur.

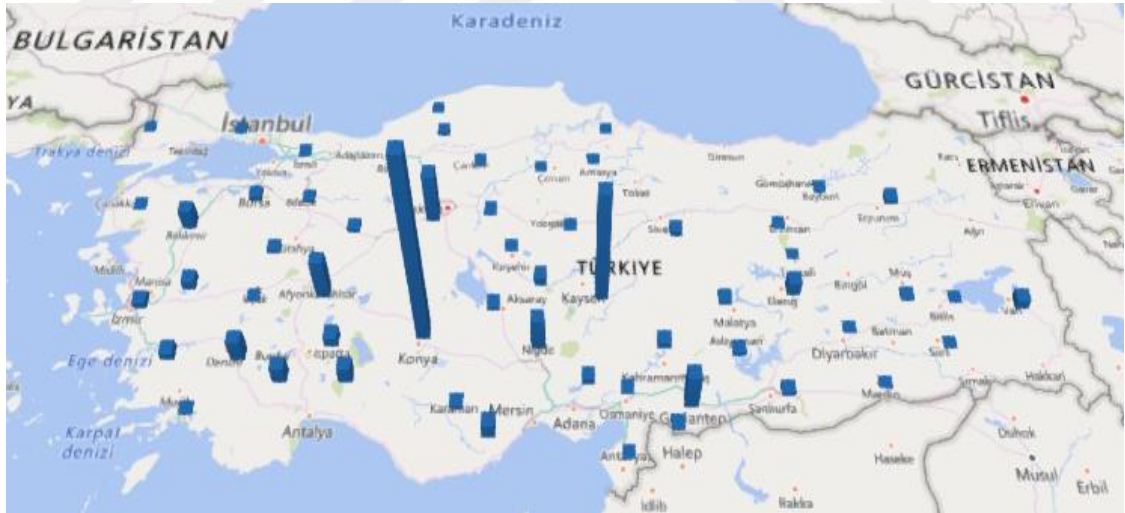
1.3.2.2. Güneş

Güneşten gelen ışınlar panel teknolojisi kullanılarak kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu işlem fotovoltaik etki olarak adlandırılır. Bu teknoloji sayesinde güneş günümüzde bir ışık kaynağı olmanın çok daha ötesine evrilmiştir. Yeryüzüne ulaşan tüm güneş ışınları -fotonlar- enerji üretme potansiyeline sahiptir. Bu sayede bulutlu günlerde bile kesintisiz enerji üretilebilir. Güneş enerjisi, termal veya elektrik enerjisine dönüştürülebilen modern bir yenilenebilir enerji türüdür ve dünya çapında birçok ülkede hızla büyümektedir. Çin, Dünya'da en büyük üretim payına sahip

Kaynak: Enerji Atlası

Güneş enerji teknolojilerinin diğer kaynaklara nazaran daha maliyetli olması, ülkenin henüz yeterli ekonomik gelişmişliğe sahip olmaması ve dolayısıyla bu sistemlere yatırım yapılamaması en büyük kısıtlayıcılardır. Bununla birlikte 2015 yılında başlatılan Milli Güneş Enerji Santrali Geliştirme (MİLGES) projesi ile güneş enerji santrallerinin tüm teknolojik bileşenlerinde yerli üretime geçilerek sektörün ithalat maliyetinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Öyle ki 2030 yılına gelindiğinde maliyeti diğer fosil enerji kaynakları ile rekabet edebilecek seviyeye geleceği tahmin edilmektedir.

Yatırımcıya tanınan ücretsiz yer tahsisi, ulusal şebekeye bağlanma (lisanslama) gibi çeşitli teşvikler ve üretilen enerji için devlet tarafından alım garantisinin verilmesi gibi atılımlar da son yıllarda sektöre yapılan yatırımları artırdı. Bu yatırımlarla birlikte 2014-2020 yılları arasında güneş enerji kapasitesi sıfırdan 6 bin MW'ın üzerine çıkarıldı. Böylece ETKB'nin 2023 yılı için öngördüğü hedef olan 5 bin MW şimdiden aşılmış oldu ve yeni hedef 10 bin MW olarak belirlendi. Türkiye'nin en büyük güneş enerji kapasitesine sahip illeri Konya (440 MW), Kayseri (263) Ankara (115) ve Gaziantep (85)'tir (Şekil 9).

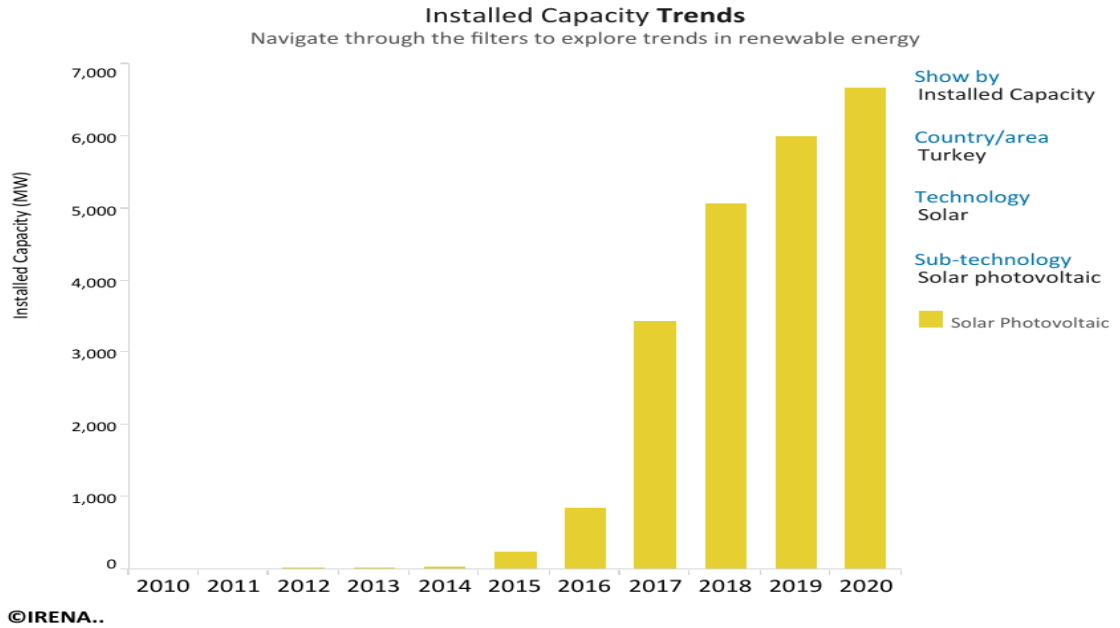


Şekil 7. Türkiye Güneş Enerji Sistemleri Kurulu Güç Dağılımı (MW).

Kaynak: Enerji Atlası verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

Kayıtlı toplam santral sayısı, 15'i lisanslı ve 549'u lisanssız olmak üzere 564'tür. Ülkenin toplam kurulu gücünün yaklaşık %7'sini oluşturur ve toplam kurulu gücü 2020 yılının ortalarında 6136 MW'a ulaşmıştır (Grafik 8). Sektörün gelişim hızı dikkate

alındığında hedeflenen 3 yıl içerisinde 2 kat artış gerçekleştirilebilir bir hedef olarak öngörülebilir.



Grafik 8. Türkiye'nin Yıllara Göre Güneş Enerjisi Kurulu Gücü (2010-2020)

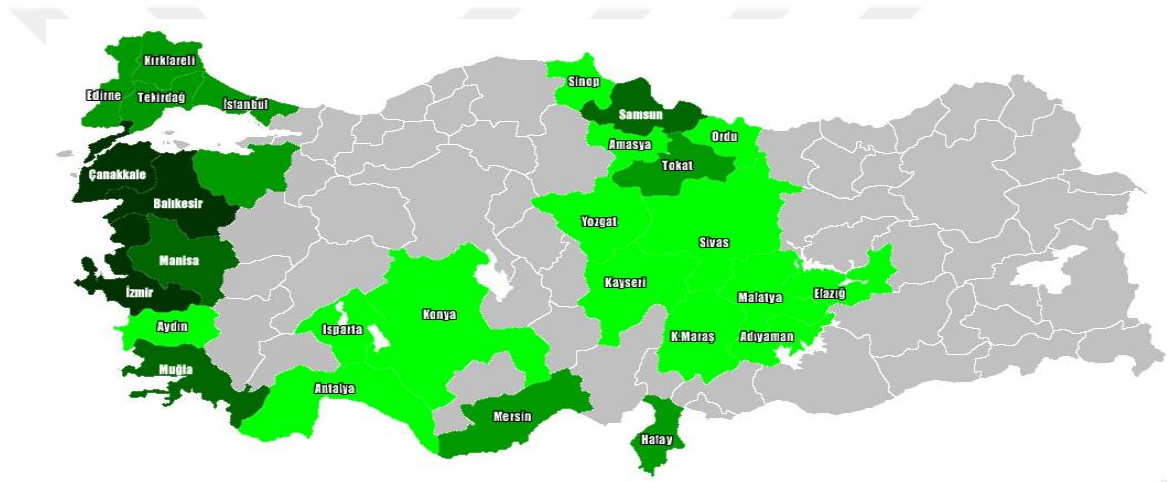
1.3.2.3. Rüzgâr

Rüzgâr enerjisi, Güneş'in yeryüzünü ısıtması sonucu oluşan düşük ısı ile yüksek ısı arasındaki akım farklılıklarının bir ürünüdür. Bu akımın oluşturduğu kinetik enerji, rüzgâr türbinleri ile önce mekanik enerjiye ve sonra elektrik enerjisine dönüştürülür. Türkiye'de ilk rüzgâr enerji santrali 1998 yılında kurulmuş ve 2005 yılında yenilenebilir enerji kanununun çıkması ile birlikte getirilen alım garantisi sayesinde sektöre yapılan yatırımlar artmaya başlamıştır. Türkiye'de yapılacak yatırımların önündeki en büyük engel ithal edilen Rüzgâr enerji teknolojilerinin maliyetli olmasıdır. Bu teknolojilerin tamamen yerli üretiminin yapılmasını amaçlayan 'Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi Projesi - MİLRES' geliştirildi. Henüz çalışmaları devam eden projenin hedefi dünya standartları ile rekabet edebilen ve kapasitesi 2.5 MW olan yerli ve özgün türbinler üretmektir.

Türkiye'de rüzgâr enerji potansiyel haritası dikkate alındığında ekonomik potansiyelin (115000 MW) ülkenin belirli bölgeleri ile sınırlı kaldığı gözlenmektedir. En yüksek potansiyel ise Ege Bölgesi'nin Balıkesir (13827), Çanakkale (13013) ve İzmir

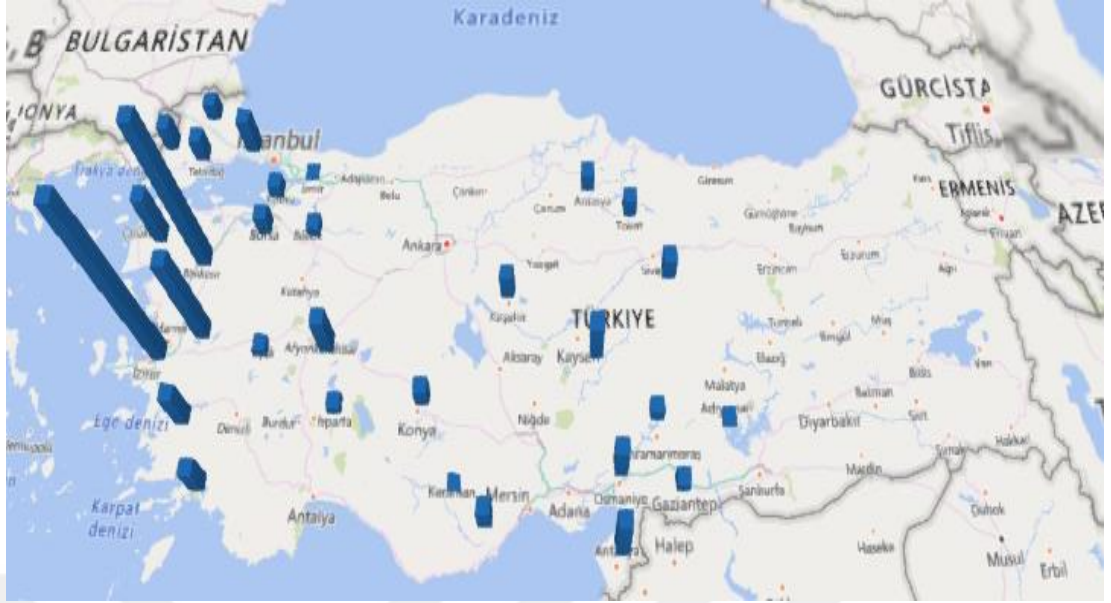
(11854) illerinde yoğunlaştığı görülüyor. Bu potansiyellerin de sadece %15'i değerlendirilebilmiş durumdadır (Şekil 10). Bu santrallerin en büyük dezavantajı, oluşturdukları ses kirliliğinden ötürü şehir merkezlerinin uzağına kurulması gerektiğidir. Bu sebeple şehirleşme ve sanayileşmenin yoğun olduğu illerde kurulum için alan bulma sorunu ön plana çıkar.

Türkiye’de toplam santral sayısı 195 ve toplam kurulu güç ise 7760 MW’tır. Kurulu gücün yoğunlaştığı bölge, potansiyelin nispeten fazla olduğu Ege bölgesidir. Toplam kurulu gücün yaklaşık yarısı İzmir (1300), Balıkesir (1100) Manisa (640) ve Çanakkale (338) illerinde kuruludur (Şekil 8). Örneğin, Samsun potansiyel bakımından beşinci büyük il olmasına rağmen kurulu güce sahip değildir.



Şekil 8. Türkiye Rüzgâr Enerji Potansiyeli Dağılım Haritası

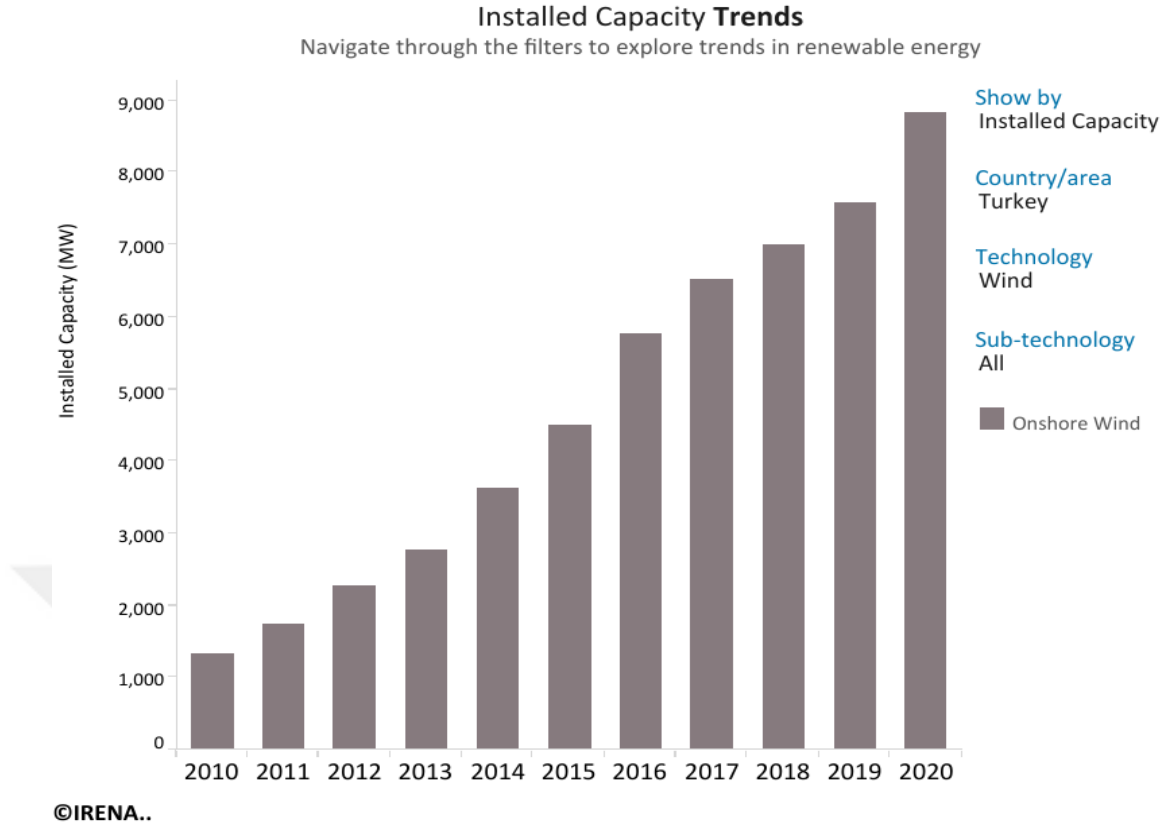
2020 itibariyle inşaat halinde ve proje aşamasında olan 14957 MW ek kurulu güç planlanmaktadır. ETKB’nin 2023 hedefi ise 20000 MW’tır. Buna göre önümüzdeki üç yıl içerisinde mevcut kapasiteye göre iki kat artışın sağlanabilmesi zor görülmekle birlikte geliştirilecek hukuki alt yapı ile birlikte gayet mümkün de olabilir. Türkiye’de rüzgâr kurulu gücü Marmara ve Ege bölgesinde yoğunlaşmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Kurulu Güç Dağılımı (MW)

Kaynak: Enerji Atlası verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

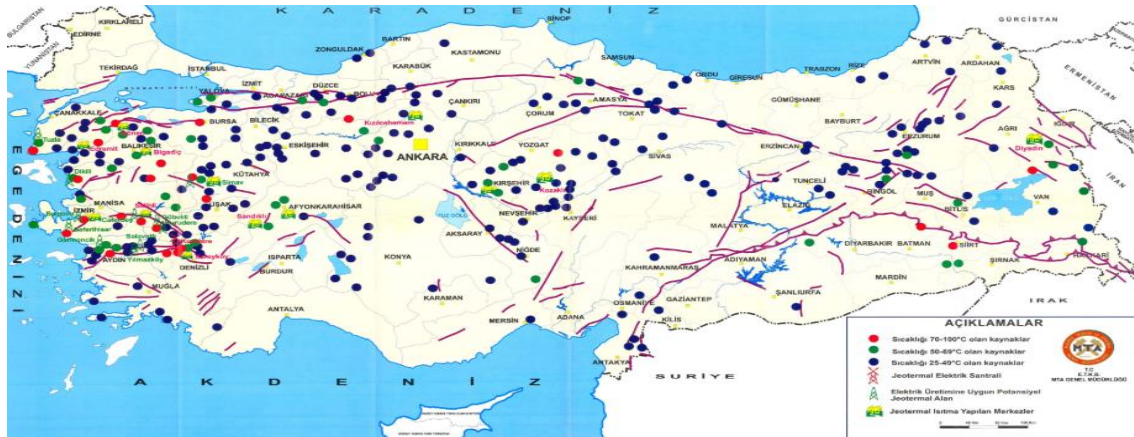
Dünyada ilk rüzgâr çiftliği ilk kez 1980 yılında ABD'de 30 kW'lık türbinle ve Türkiye'de ise ilk kez 1986 yılında 55 kW'lık türbinlerle kurulmuştur. Türkiye'nin uluslararası düzeyde kabul gören ilk rüzgâr enerji tesisi 1998 yılında Ege bölgesinde kurulmuştur. Bu tarihten sonra Türkiye'nin brüt elektrik üretiminde rüzgâr enerjisinin payı hızla artmıştır. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM)'nin 2010 yılında yürürlüğe girmesiyle birlikte özel sektör kapasite genişletme planlamalarına dâhil edilmiş ve özel sektör yatırımlarının artmasıyla birlikte 2010 yılında 1320 MW olan rüzgâr kurulu güç kapasitesi 2020 yılında sekiz kat artarak 8 MW civarına ulaşmıştır.



Grafik 9. Türkiye'nin Yıllara Göre Rüzgâr Enerji Kurulu Gücü (2010-2020)

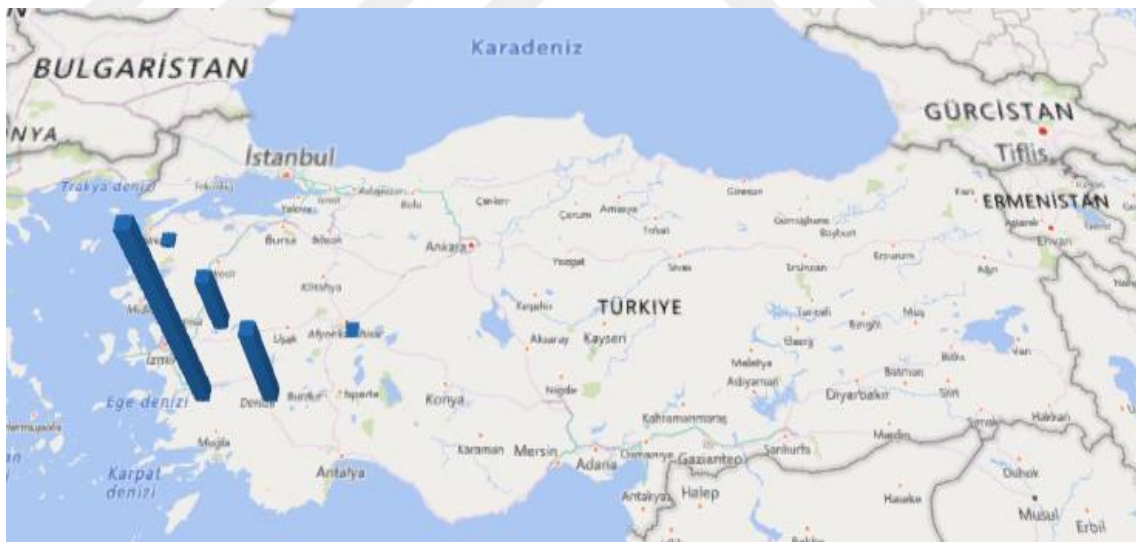
1.3.2.4. Jeotermal

Türkiye, volkanik fay hatları üzerinde kurulu bir ülke olduğundan özellikle bu hatları takip eden çeşitli sıcaklıklarda jeotermal sahalara sahiptir. Bu sıcaklıklar düşük (20-70 °C), orta (70-180 °C), ve yüksek (>180 °C) entalpili sahalardan oluşmaktadır. Türkiye'de jeotermal sahalardan %90'ı düşük ve orta entalpili ve %10'u yüksek entalpili sahalardır. Elektrik üretimine uygun sahalardan yüksek entalpili sahalardan oluşmaktadır. Türkiye'de özellikle Ege Bölgesi'nde yoğunlaşır (Şekil 12). Geriye kalan düşük ve orta entalpili sahalardan sera ve konut ısıtma, kurutma ve termal turizm amaçlı olarak faydalanılmaktadır.



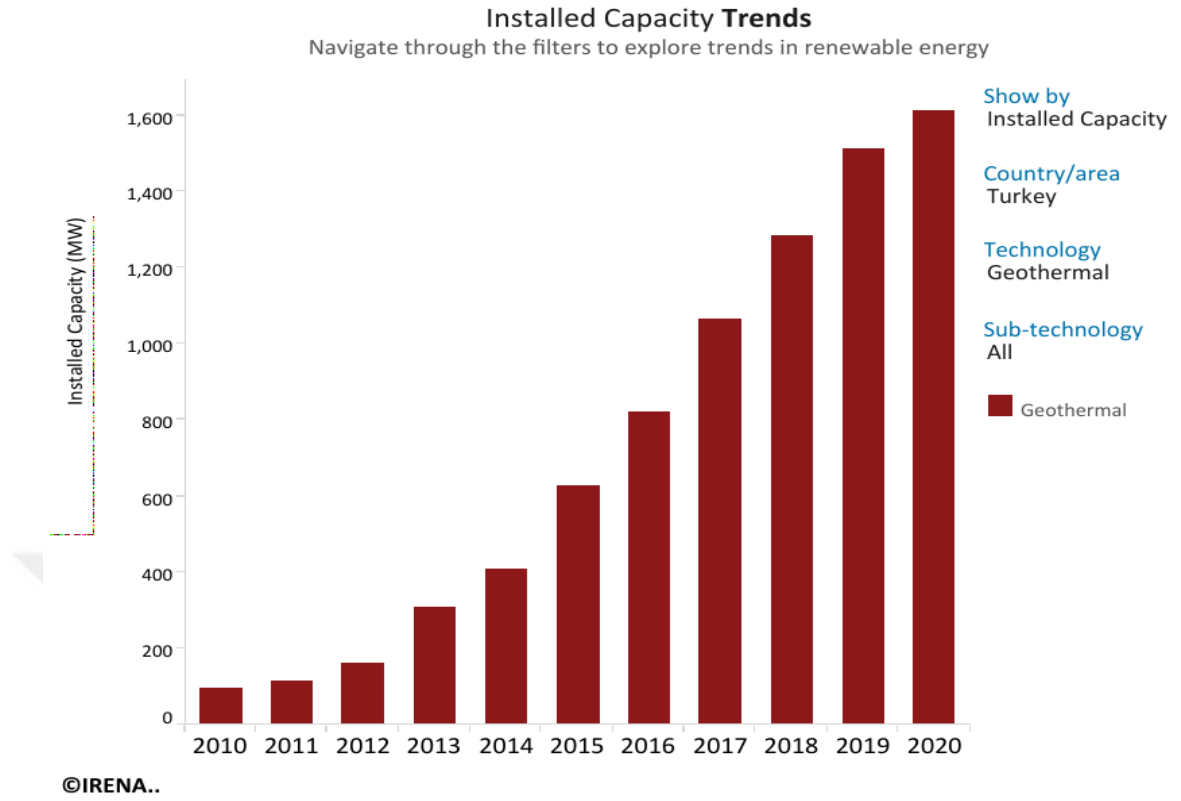
Şekil 10. Türkiye Jeotermal Enerji Potansiyeli Dağılım Haritası
Kaynak: MTA

MTA tarafından Türkiye'nin teorik jeotermal ısı potansiyelinin 31500 MWt olduğu tespit edilmiş olup bu potansiyelin %5'inin elektrik üretimi için uygun olduğu tahmin edilmiştir. Toplam 48 adet santral ve 1515 MW Kurulu güç, ülkenin sadece beş ilinde yoğunlaşır. Aydın'da 743 MW, Denizli'de 322 MW, Manisa'da 221 MW, Çanakkale'de 15.5 MW ve Afyonkarahisar'da 2.76 MW'lık santraller ile elektrik üretimi yapılmaktadır (Şekil 13).



Şekil 11. Türkiye Jeotermal Enerji Santrallerinin Kurulu Güç Dağılımı (MW)
Kaynak: Enerji Atlası verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

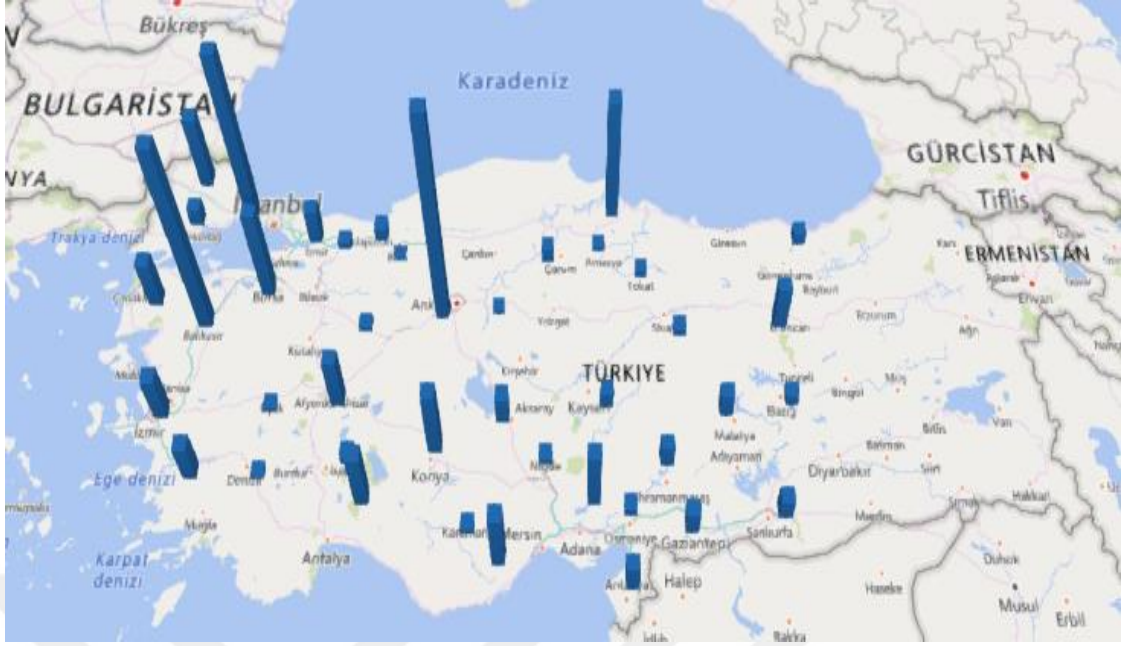
2020 itibariyle, üretim lisansı almış toplam 104 MW'lık dört santral ve ön lisans almış toplam 396 MW kapasiteli on sekiz santral ile toplam kapasitenin artırılması planlanmaktadır.



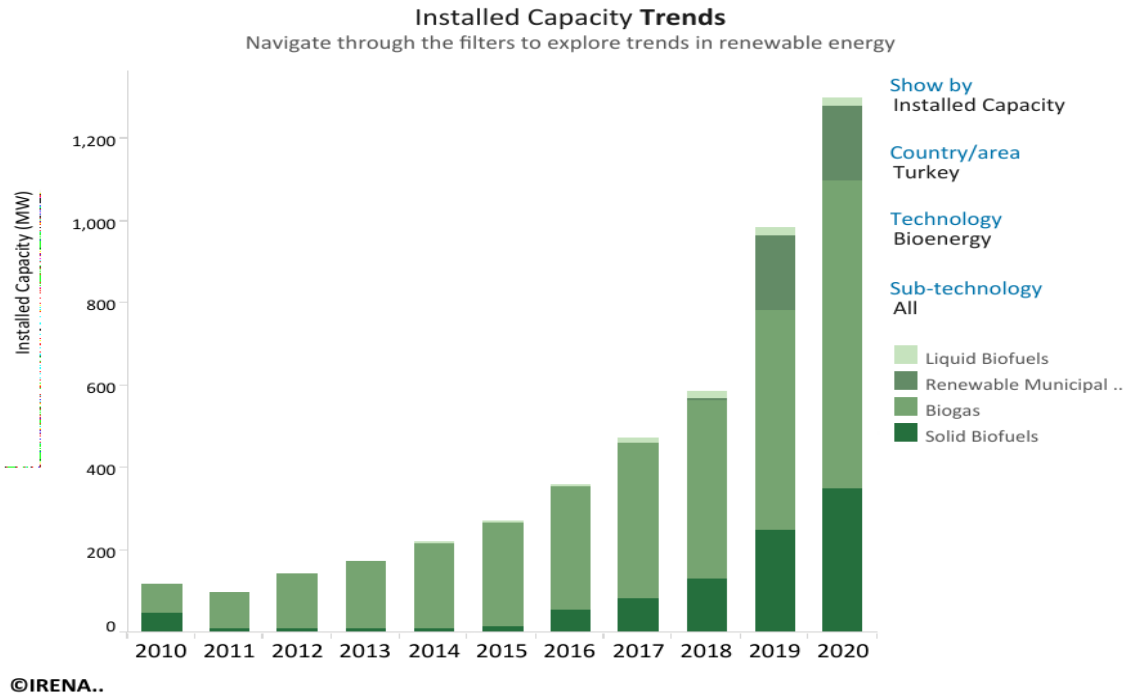
Grafik 10. Türkiye'nin Yıllara Göre Jeotermal Enerji Kurulu Gücü (2010-2020)

1.3.2.5. Biokütle

Modern biokütle enerjisinin temel kaynaklarını tarım, hayvancılık ve orman atıkları ile kentsel ve sanayi atıkları oluşturmaktadır. Bu kaynaklar doğrudan yakılarak ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülür. Ayrıca farklı teknikler kullanılarak çeşitli yakıtlara ve organik gübreye de dönüştürülebilir. Modern biokütle santrallerinin kurulumunun maliyetli olması yapılacak yatırımların önündeki en büyük engeldir. Türkiye'de biokütle santralleri kentsel atıklara dayalı olarak büyük kentlerin çevrelerinde ve orman atıklarına dayalı olarak kıyı şeridinde yoğunlaşmıştır. Toplam 100 adet santralin kurulu kapasitesi 815 MW'tır. En yüksek potansiyele sahip illerden bazıları sırasıyla Ankara (67 MW), Balıkesir (60 MW), İstanbul (58 MW) ve Samsun (38 MW)'dur (Şekil 14).



Şekil 12. Türkiye Biyokütle Enerji Santrallerinin Kurulu Güç Dağılımı (MW)
Kaynak: Enerji Atlası verileri kullanılarak hazırlanmıştır.



Grafik 11. Türkiye'nin Yıllara Göre Biyokütle Enerji Kurulu Gücü (2010-2020)

1.4. ENERJİ VE ÇEVRE POLİTİKALARI

Küresel ısınmaya sebep olan atmosferdeki sera gazı emisyonlarının yaklaşık üçte ikisi; ısınma, elektrik, ulaşım ve endüstride tüketilen fosil yakıt kaynaklıdır. Fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan sera gazları, ekosisteme geri dönüşü olmayan zararlar verir. Sera gazları dünya sıcaklığını her yüz yılda 0,5 °C artırdığı tespit edilmiştir. Özellikle sanayi devrimi ile birlikte artan fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan sera gazları bugün ve gelecek onlarca yıl boyunca küresel ısınmayı artırmaya devam edecektir. Bu gerçeklere dayanarak fosil yakıtların tüketilmesine sınırlamalar getirilmekte ve alternatif enerji kaynaklarının devreye alınması politikaları tüm dünya ülkelerinin enerji gündeminde yerini almaktadır. İlk kez 20. yy da küresel bir sorun olarak dikkat çeken bu konu ülkeleri çeşitli adımlar atmaya zorladı. Nitekim 1992 yılında uluslararası platformda iklim değişikliğinin temel sebebi olan sera gazlarının azaltılmasına yönelik hukuki yaptırımları içeren ‘Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve 1997’de Kyoto Protokolü oluşturuldu ve imzaya açıldı. Bugüne gelindiğinde ise iklim değişikliği, artık küresel bir sorun olmanın çok ötesinde yerel ölçekte hissedilen bir sorun olmaya başlamıştır. Bu da çözümü devlet politikalarının da ötesinde kişisel farkındalığa kadar indirgemektedir.

AB üyesi ülkeler atmosfere salınan sera gazlarının %78’inden sorumlu tutulurlar. Bu sorumluluğun bir sonucu olarak ülkeler kısa ve uzun vadede çeşitli hedefler belirlediler. Bu hedefler; 2020 yılına kadar sera gazlarını %20 oranında azaltmak, 2030 yılına kadar yenilenebilir enerjinin payının %20’den %27’ye yükseltmek ve 2050 yılına gelindiğinde 1990 öncesi sera gazı salınımı seviyelerini yakalamaktır. Bu hedeflerin gerçekleştirilebilmesi 2050 ye kadar elektrik üretiminin neredeyse tamamının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmasını gerektirir. Bu da kademeli olarak fosil kaynaklı santrallerin devreden çıkarılmasını ve bunların yerine temiz enerji kaynaklarının almasının sağlanması ile gerçekleşebilecektir. Ancak bu geçiş kısa vadede pek mümkün görülmemektedir. Çünkü yeni santrallerin devreye alınması büyük yatırımları gerektirir ve hâlihazırda devrede olan santrallerin ömürlerini tamamlamaları uzun yıllar alır. Fosil enerji kaynaklarına dayalı santrallerin ortalama kurulum ve birim üretim maliyetleri yenilenebilir enerjiye kıyasla daha düşüktür. Buna rağmen yenilenebilir enerjiye geçişin özellikle ithalat bağımlısı ülkeler için pek çok ekonomik getirisi olacaktır. Öncelikle

enerji ithalat harcamalarını azalacak ve enerji bağımlısı ülkelerin en önemli ekonomik sorunlarından biri olan cari açık sorununa çözüm olabilecektir. Küresel enerji fiyatlarındaki artışları ithalatçı ülkelerin enerji ithalat bedelini artırarak cari açığı artıracaktır (Eraslan ve çolak, 2019). Ek olarak bu geçiş özellikle kırsal kesimde istihdamı artırarak iç piyasada hareketliliği sağlayacaktır.



İKİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR

2.1. KLASİK HEDEF PROGRAMLAMA

Hedef programlama ilk kez Charnes and Cooper (1957) tarafından geliştirilmiştir. Değerlendirilmesi gereken birçok alternatif ve bu alternatiflerle ilgili birden fazla hedef olduğunda böyle bir probleme esnek bir model sunar (Bakhtavar, et al., 2017). Çok amaçlı problemleri modellemek için iyi bilinen bir toplama metodolojisidir (Jayaraman et al., 2015). Her bir model kriterinin başarı seviyeleri ile hedefleri (istenen seviye) arasındaki istenmeyen sapmaları minimize edecek bir mesafe metriğini kullanır (Jayaraman et al., 2015). Bir GP modelinin temel unsurlarından biri olan istenmeyen sapma değişkenlerinin en aza indirilmesi, diğer bir deyişle ilgili hedeflere ulaşamaması durumunun en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Bu, her hedef için birden fazla hedef etrafında belirsizliğe izin verir (Akbari et al., 2020). Uygulamada elde edilen çözüm ile hedef arasındaki mesafe minimize edilmiştir. Genel olarak, hedef programlama fikri, orijinal çoklu hedefleri tek bir hedefe dönüştürmeye dayanır. Bu, hedeflerin modele bir kısıt olarak eklenmesi ve bu hedeflerden sapmaların toplamının tek bir amaç fonksiyonu olarak modellenmesi ile gerçekleştirilir. Hedef programlamada hedeflerin tam olarak sağlanması beklenmez. Her bir hedeften sapmaların en aza indirilmesiyle en tatmin edici çözümün elde edilmesi beklenir. Burada temel amaç, bir veya daha fazla hedefi ortak tatmin edebilecek çözümler elde etmektir (Deb, 2001).

•Hedef programlamanın uygulama alanları ile ilgili literatür aşağıda sunulmuştur.

Yoshikawa ve Okada, havzalar arası çok modlu su tahsisi problemine doğrusal olmayan hedef programlama yaklaşımı ile çözüm önermişlerdir (Yoshikawa ve Okada, 1977).

McCammon ve Thompson, transdüserin davranışı hakkında teorik bir araştırma sunmuşlardır (McCammon ve Thompson, 1980).

Chang ve arkadaşları, pirinç üretim ve depolama sistemlerini optimize etmek hedef programlama modeli önermişlerdir (Chang ve diğ., 1983).

Kumar ve arkadaşları, bir imalat sektöründe yükleme problemi için bir hedef programlama modeli geliştirilmiştir (Kumar ve diğ., 1987).

Ravi ve arkadaşları, bir petrol rafinerisi karar modelini bir hedef programlama problemi olarak formüle edilmiştir (Ravi ve diğ., 1998).

Dash ve Kajiji, mülkiyet sorumluluk sigortacılarının etkin varlık-borç yönetimi için doğrusal olmayan hedef programlama modeli önermişlerdir (Dash ve Kajiji, 2005).

Jiménez ve arkadaşları, bulanık hedef programlama modelinin doğrusal olmayan üyelik fonksiyonlarıyla bir yaklaşık çözüm elde etmişlerdir (Jiménez ve diğ., 2005).

Dhahri ve Chabchoub, doğrusal olmayan hedef programlama modelleri ile ARIMA parametrelerine dayalı tedarik zincirindeki kamçı etkisini ölçmüşlerdir (Dhahri ve Chabchoub, 2007).

Strang, bir kömür madenciliği şirketinde lojistik planlama için elektronik çizelge yazılımı kullanarak hedef programlamanın nasıl uygulanabileceğini göstermiştir (Strang, 2012).

Pang ve Wu, hedef programlama metodunu kullanarak çift hatlı tersanenin ortak programlanması için bir optimizasyon modeli oluşturmuşlardır (Pang ve Wu, 2014).

El-Quliti ve arkadaşları, üniversiteye giriş kapasite planlaması için modifiye edilmiş diferansiyel evrim algoritması ile hedef programlama modeli önermişlerdir (El-Quliti ve diğ., 2015).

Nixon, Çok amaçlı doğrusal olmayan hedef programlama yaklaşımı ile elektrik maliyetini en aza indirmeye, enerji potansiyelini ve ham madde kütlesindeki azaltmayı en üst seviyeye çıkarma hedeflerine dayanarak ideal işletme tankı sıcaklığını ve hidrolik tutma süresini belirleyen bir model geliştirmişlerdir (Nixon, 2016).

He ve arkadaşları, demir madenciliği üretim kalite optimizasyonu için birleşik 'doğrusal olmayan hedef programlama temelli 'diferansiyel evrim' (DE) ve 'yapay sinir ağları' (YSA) metodolojisini önermişlerdir (He ve diğ., 2016).

2.2. ENERJİ PLANLAMASI VE KAPASİTE GENİŞLETME UYGULAMALARI

Stratejik bir enerji planlama ile hem enerjinin verimli ve etkin kullanım hem de gelecekte enerji sistemlerini güvence altına alınabilecektir. Genel olarak, optimum enerji planlama ve politika analizi, gelecekle ilgili olası varsayımlara dayanarak gerçekleştirilir.

• Enerji planlamalarını genel bir çerçevede değerlendiren çalışmalar:

Cany ve arkadaşları, 2030 Düşük senaryo ve 2050 Yüksek senaryoya göre yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam talep içindeki paylarının farklı oranlarının nükleer enerji sistemlerini nasıl etkiyeceğini değerlendirmişlerdir (Cany ve diğ., 2018).

Gacitua ve arkadaşları, yenilenebilir enerji kaynaklarına öncelik vererek bu konudaki en önemli politika araçlarını, mevcut karar destek araçlarını ve optimizasyon modellerini incelemişlerdir (Gacitua ve diğ., 2018).

Wright ve arkadaşları Güney Afrika'nın 2050 yılına kadar toplam talebin %75'inin yenilenebilir enerjiden üretilmesi hedefi için elektrik sektörü genişleme planlamasını üç farklı senaryoda değerlendirmişlerdir (Wright ve diğ., 2019).

Kim ve arkadaşları, Kore hükümetinin *yenilenebilir enerji kapasitesinin genişletilmesi* amacıyla Elektrik Enerjisi Kurumu (KEPCO) tarafından atılan adımları değerlendirmişlerdir (Kim ve diğ., 2018).

Dagoumas ve Koltsaklis, yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim genişleme planlamalarını optimizasyon modelleri, genel / kısmi denge modelleri ve alternatif modeller olmak üzere üç genel kategoride sınıflandırarak bir literatür taraması yapmışlardır (Dagoumas ve Koltsaklis, 2019).

Brouwer ve arkadaşları, RES tarafından yıllık elektrik üretiminin % 40'ı, % 60'ı ve % 80 senaryolarına göre 2050 yılında Batı Avrupa için enerji planlamasını güç sistemi simülasyonu aracıyla değerlendirilmiştir (Brouwer ve diğ., 2016).

Bhuvanesh ve arkadaşları, Alternatif Planlama (LEAP) ve EnergyPLAN yazılımlarını kullanarak Hindistan'ın elektrik talebi 2030 yılına kadar planlamışlardır (Bhuvanesh ve diğ., 2018).

•**Enerji sistemlerinin kapasite genişletme planlaması için literatürde kullanılan farklı yöntemler**

Enerji sistemlerinin kapasite genişletme planlaması, farklı santrallerin optimal karışımına, her bir santralin inşa edilmesi gereken yerlere ve her santral için gelecek planlamasına ilişkin kapasite genişletme kararlarına ilişkindir.

San Cristóbal, **Hedef Programlama** modelini kullanarak ispanyanın her bölgesi için yenilenebilir enerji endüstrisinin kapasite genişletme planlamasını yapmışlardır (San Cristóbal, 2012).

Mourmouris ve Potolias, Yunanistan'ın Taşöz adası için Enerji planlaması ve bölgesel düzeyde yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi için çok kriterli bir metodoloji olan **REGIME** metodunu uygulamıştır (Mourmouris ve Potolias, 2013).

Chang, yenilenebilir enerji santrallerinin optimum karışımı için kapasite genişletme planlaması problemini çözmek amacıyla **çok seçimli bir hedef programlama modeli** önermektedir (Chang, 2015).

Solangi ve arkadaşları, Bütünleşik **bir SWOT-AHP ve Bulanık-TOPSIS yaklaşımı** ile Pakistan'da sürdürülebilir enerji planlaması için geliştirilen stratejileri değerlendirmişlerdir (Solangi ve diğ., 2019).

Aryanpur ve arkadaşları, 2015-2050 dönemi için **AHP-TOPSIS** yöntemi kullanılarak gelecekteki elektrik senaryolarının sürdürülebilirliğini değerlendirmek amacıyla farklı senaryolarda güç planlama çerçeveleri önermektedir (Aryanpur ve diğ., 2019).

Wujing ve arkadaşları, **karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP)** yaklaşımı kullanılarak çok enerjili sistem planlaması yapmışlardır (Wujing ve diğ., 2018).

Dhakouani ve arkadaşları, Tunus elektrik sistemi için **OSEMOSYS'e** (Açık Kaynaklı enerji modelleme SYStem) dayalı 2010-2030 yıllarını kapsayan % 30 RES hedefini gerçekleştirebilecek şekilde uzun vadeli bir model sunmuşlardır (Dhakouani ve diğ., 2017).

Luz ve arkadaşları, Brezilya'nın 2030 yılına kadarki enerji üretim ve genişletme planlaması için **çok amaçlı bir matematiksel model** önermişlerdir (Luz ve diğ., 2018).

Zappa, W ve van den Broek, 2050 yılında Avrupa'da rüzgar ve güneş enerji sistemlerinin bir karışımını ve mekansal dağılımını optimize etmek için **yeni bir algoritma** sunmuşlardır (Zappa ve diğ., 2018).

Min ve arkadaşları, yenilenebilir enerji teknolojilerine dayalı elektrik enerji sistemi için 2015-2030 yıllarını kapsayan bir kapasite genişletme **genel planlama modeli** önermişlerdir (Min ve diğ., 2018).

Senatla ve arkadaşları, **ARİMA metodu ve PLEXOS modelleme aracı** kullanarak 2050 yılı için elektrik kapasitesi genişletme planlaması yapmışlardır (Senatla ve diğ., 2018).

Arancibia ve arkadaşları, **Dinamik Programlamayı ve Çok Amaçlı'yı** birleştiren yeni bir yaklaşımla enerji santralleri kapasite genişletme planlaması yapmışlardır (Arancibia ve diğ., 2016).

Park ve Baldick, Üretim kapasitesi genişletme problemi için **çok aşamalı karma tamsayılı stokastik bir program** geliştirmişlerdir (Park ve Baldick, 2016)

Krukanont ve Tezuka, Japonya için **İki aşamalı stokastik programlamaya** dayalı bir optimizasyon modeli ile kısa vadeli kapasite genişleme planlaması yapmışlardır (Krukanont ve Tezuka, 2007).

Iyer ve arkadaşları, Krey ve Riahi tarafından geliştirilen metrik kullanarak **elektrik kapasitesi genişleme senaryolarının tutarlılığını** incelemişlerdir (Iyer ve diğ., 2019).

Balussou ve arkadaşları, Almanya'nın biyogazın enerjisinin değerlendirilmesi amacıyla 2030 yılına kadar kapasite geliştirme planlaması için bir **optimizasyon modeli** önermişlerdir (Balussou ve diğ., 2018).

Coester ve arkadaşları, Yenilenebilir enerji kapasitesinin genişletme hedeflerinden bağımsız ancak **dinamik bir modelleme** yaparak Almanya'nın hem elektrik arzını hem de yenilenebilir enerji genişlemesini güvence altına almak için tasarlanmış beş politika senaryosu sunmuşlardır (Coester ve diğ., 2018).

Hou ve arkadaşları, Çin'nin mevcut enerji sistemleri için talep analizi ve mevcut RES genişlemesini içeren **ekonometrik model ve optimizasyon modeli** incelemişlerdir (Hou ve diğ., 2018).

2.3. ENERJİ KAYNAKLARINI KONU ALAN HEDEF PROGRAMLAMA UYGULAMALARI

Ramanathan ve Ganesh, Bütünleşik hedef programlama-AHP modeli kullanılarak evlerde aydınlatma için kullanılabilen yedi **enerji kaynağının verimliliğini** değerlendirilmiştir (Ramanathan ve Ganesh, 1995).

Mezher ve arkadaşları, Lübnan için çok amaçlı hedef programlaması kullanarak **enerji kaynaklarının optimum tahsisini** çalışmışlardır (Mezher ve diğ., 1998).

Daim ve arkadaşları, bulanık hedef programlama yöntemi ile Oregon'un Yenilenebilir Portföy Standardı (RPS) mevzuatında yer alan yönergeler kullanılarak 2025'te toplam elektrik talebinin %25'ini karşılayacak bir **yenilenebilir enerji planlaması** oluşturmuşlardır (Daim ve diğ., 2010).

Ballarin ve arkadaşları, çiftçilerin gelirlerini ve biokütle enerji üretimini en üst düzeye çıkaran **en uygun arazi kullanım kombinasyonlarını belirlemek** için Ağırlıklı Hedef Programlama modelini uygulamışlardır (Ballarin ve diğ., 2011).

Jinturkar ve Deshmukh, bulanık karma tam sayılı hedef programlama yaklaşımı ile Hindistanın Chikhli taluka kırsalında **enerji planlaması** yapmışlardır (Jinturkar ve Deshmukh, 2011).

La Scala ve arkadaşları, **enerji merkezlerinin optimum enerji akışı yönetimi** sorununu doğrusal olmayan çok amaçlı optimizasyon problemi için bir hedef programlama yöntemi önermişlerdir (La Scala ve diğ., 2014).

Jayaraman ve arkadaşları, Birleşik Arap Emirlikleri'nin 2030 yılına kadar ekonomik, sosyal ve çevresel hedefleriyle ilgili sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için **işgücü kaynaklarının verimli bir şekilde tahsis edilmesini** entegre eden bir hedef programlama modeli önermişlerdir (Jayaraman ve diğ., 2015).

Zografidou ve arkadaşları, Yunanistan'da güneş enerjisi santralleri kurmak amacıyla ağırlıklı hedef programlama yöntemi kullanarak bir **enerji haritası tasarlamayı** amaçlamışlardır (Zografidou ve diğ., 2016).

Huang ve arkadaşları **enerji akışının dinamik varyasyon analizini** yapmak için bir hedef programlama tabanlı model sistemi (GPMS) önermişlerdir (Huang ve diğ., 2017).

Zografidou ve arkadaşları, Yunanistan'ın yenilenebilir **enerji üretim planlamasının** en uygun tasarımı için 0-1 Ağırlıklı Hedef Programlama modelini kullanmayı uygun görmüşlerdir (Zografidou ve diğ., 2017).

Hocine ve arkadaşları, **yenilenebilir enerji kaynaklarını seçmek** için bir bulanık hedef programlama yaklaşımı önermiştir (Hocine ve diğ., 2018).

2.4. LİTERATÜRE KATKI

Son zamanlarda, geleneksel enerji sistemlerinin planlanması geniş çapta araştırılan bir konu haline gelmiştir. Literatürde enerji planlamalarının bir ayağı olan enerji kaynaklarının önceliklendirilmesi genellikle ELECTRE, PROMOTHEE, AHP, TOPSİS gibi çok kriterli karar verme metotları ile çalışılmıştır. Bu yöntemlerin kullanıldığı çalışmalarda enerji kaynakları genellikle ekonomik, teknik, çevresel ve sosyal olmak üzere dört ana çerçevede değerlendirilmiştir. Bu ana çerçeveye dayalı birçok alt kriterler tanımlanmış ve bunlardan bazıları araştırmacının tercihinine göre çalışmalarda kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmaların çoğunda aynı ülke için enerji kaynaklarının farklı sıralamalarda önceliklendirildiği tespit edilmiştir. Örneğin, Türkiye için en uygun yenilenebilir enerji kaynaklarının seçildiği çalışmalardan birinde öncelikli olarak rüzgar enerji kaynağı seçilmiş ve diğer kaynaklar eşit öncelikli olarak ele alınmıştır (Karaman ve diğ., 2010). Başka bir çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları sırasıyla güneş, rüzgar, hidroelektrik ve jeotermal olarak önceliklendirilmesi gerektiği savunulmuştur (Ertay ve diğ., 2013). Bu çalışmalardan elde edilen farklı sonuçların ardındaki temel nedenlerden biri, çalışmaların veri toplama perspektifidir. Ülkelere özgü verilerin bulunamaması, verilerin uzman görüşlerinden elde edilmesi, verilerin sayısal net değerler veya dilsel değerler olarak alınması enerji kaynaklarının farklı önceliklerle planlanmasına neden olmaktadır. Sıralamadaki farkın diğer olası nedenleri; üretim teknolojilerindeki varsayımların değişkenlik göstermesi, kısıtların seçim ilkeleri, verilerin ham veri olarak veya işlenerek kullanılması, normalizasyon yönteminin seçimi, ağırlıklandırma tercihleri ve farklı modellerin seçimidir. Geniş bir perspektifte, Çalışmamız da dahil olmak üzere

tüm literatür araştırmalarında, fosil enerji kaynaklarının sürdürülebilir bir bakış açısına göre uygun seçenekler olmadığı ve uzun vadede yenilenebilir teknolojilere geçişin sağlanması gerektiği gösterilmiştir. Enerji kaynaklarının sadece sıralanması, bir ülkenin enerji planlaması için yol haritası oluşturmada yeterli bilgi sağlayamamaktadır. Bu sıralamanın yanı sıra kurulum için yer seçimi, mevcut kapasitenin genişletilmesinin uygun olup olmadığı, uygunsa hangi bölgelerde hangi kaynak veya kaynakların öncelikli olarak ne kadar genişletilmesi gerektiği gibi sorularının da cevaplanması gerekmektedir. Literatürde bu soruların tümüne cevap veren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmalar genellikle enerji kaynaklarının seçimi, yer tahsisi ve genel kapasite genişletme planlaması başlıkları ile sınırlı kalmıştır. Çalışmaların bazılarında ülkelerin sadece yenilenebilir enerji kaynakları değerlendirilmiştir. Bu durumda ülkenin hali hazırda kullandığı tüm enerji kaynaklarının bir bütünlük içerisinde değerlendirilmemesi, elde edilen sonuçların enerji planlaması yapılmasında yeterli bilgi sağlayamamaktadır. Örneğin İspanyanın kuzeyinde belirlenen beş bölge için yenilenebilir enerji kaynaklarının tahsisi (San Cristobal, 2012), Yunanistan'ın Taşöz adası için yenilenebilir enerji kaynaklarının önceliklendirilmesi ve yer seçimi (Mourmouris ve Potolias, 2013), Brezilya için yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı santrallerin kapasite genişletme planlaması (Luz ve diğ., 2018) gibi sadece yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendiren çalışmaların planlayıcıya yol göstermekte yetersiz kalacağı görüşündeyiz. Bu ve benzeri birçok çalışmada yenilenebilir enerji santrallerinde ne kadarlık bir kapasite genişletilmesine gidilmesi gerektiğine dair bilgi verilmemiştir. Yine çalışmaların bazılarında hangi kaynaktan ne kadar kapasite genişletilmesine gidilmesi gerektiğinin sonucunu veren ancak bu genişletmenin hangi bölgelerde yapılması gerektiğini belirlemeyen çalışmalar da mevcut. Örneğin; Kore'nin tüm enerji kaynaklarının 2030 yılına kadarki kapasite genişletme planlaması (Min ve diğ., 2018), Güney Afrika için tüm enerji kaynaklarının 2050 yılına kadar kapasite genişletme planlaması (Wright ve diğ., 2019) gibi. Bununla birlikte en detaylı çalışma Zografidou ve arkadaşları tarafından Yunanistan için yapılmıştır. Bu çalışmada tüm illerdeki mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasitelerinde yapılması gereken artış miktarı tespit edilmiştir (Zografidou ve diğ., 2016). Ancak bu çalışmada da sadece yenilenebilir enerji kaynakları değerlendirilmiştir. Türkiye için yapılmış çalışmalar incelendiğinde; tüm enerji kaynaklarının dikkate alınarak hangi bölgelerde veya illerde ne kadarlık bir kapasite genişletilmesinin yapılması

gerektiğine dair bütünleşik bir enerji planlama çalışmasına rastlanmamıştır. Çalışmaların genellikle en uygun kaynakların seçimine odaklandığı görülmüştür. Bu tez çalışmasının çıkış noktası enerji planlama çalışmalarına bir bütünlük kazandırma düşüncesi olmuştur. Bu çalışmada enerji kaynaklarının önceliklendirilmesi, yer tahsisi ve kapasite genişletme planlaması tek bir çalışmada bütünleşik olarak ele alınmıştır. Bu çalışmanın yukarıda ifade edilen eksikliklerin giderilmesine yönelik örnek bir çalışma olacağı kanaatindeyiz. Çalışmamızın varsayımları Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları için belirlediği 2023 hedefleridir. Veriler, ulusal ve uluslararası veri sağlayıcıların resmi sitelerinden elde edilmiştir.

- i. Kurulu güç planlamalarında literatürdeki çalışmalar genellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasite planlanmasına odaklanmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kapasitesi planlanırken fosil enerji sistemleri ile birlikte planlanması yatırım risklerini en aza indirebilir. Bu amaç doğrultusunda bu çalışma, Türkiye'nin tüm enerji kaynaklarının planlanmasına odaklanması bakımından literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.
- ii. Literatürün yenilenebilir enerji kaynakları için uygun enerji kaynaklarının seçimi veya yer seçimi ile sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Ancak çalışmamız, tüm enerji kaynakları için eş zamanlı olarak kaynak seçimi, yer seçimi ve kapasite genişletme planlama problemlerine bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.
- iii. Bu çalışma, Türkiye'nin 2023 enerji hedeflerine odaklanarak ulaşılabilirliklerini araştırıyor ve Türkiye'nin yedi bölgesinde bu hedefler doğrultusunda bir kapasite genişletme yol haritası sunuyor. Yazarın gördüğü kadarıyla Türkiye için bu kapsamda ilk kez bir çalışma yapılıyor.
- iv. Belirsiz ve çelişkili amaçlar altında belirli hedeflere ulaşılmasını sağlayan bir GP-FMO modeli önerildi. Belirsiz ve çelişkili amaçları ortak tatmin eden farklı çözüm alternatifleri sunuldu.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

METODOLOJİ

Bir sistemin değişen koşullar altındaki davranışlarını incelemek, kontrol etmek ve geleceği hakkında varsayımlarda bulunmak amacı ile sistemin elemanları arasındaki bağıntıları kelimeler ya da matematiksel formüllerle belirleyen ifadeler topluluğuna “model” adı verilir. Modeller, büyük kapsamlı bir sistemin tüm özelliklerini yansıtacak daha küçük boyutlardaki yapılardır. Modellerin kullanım amacı, bir problemi çözmek için kısıt kaynakların dikkate alındığı bir tasarım geliştirmek ve böylece problemin yönetimini ve planlamasını kolaylaştırmaktır. Bir sistemin elemanlarının simgeler ile tanımlanıp bunlar arasındaki ilişkilerin fonksiyonlar ile gösterimine ise "matematiksel model" adı verilir. Matematiksel model, herhangi bir alandaki problemin temsili olup bu problemin en uygun şekilde çözülmesi sürecinin önemli bir bileşenidir (Sarker ve Newton, 2007). Gerçek problemleri matematiksel olarak modellemek için sayısız varsayım ve yaklaşım sunulabilir. Her problemin yapısına uygun özgün bir model tasarımı yapılabilir. Bir matematiksel modelin temel bileşenleri; amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıt denklemleridir.

Amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ile ifade edilen ve problemin amacını belirten denklemdir. Problemin yapısına göre tek bir amaç fonksiyonu ile model kurulabileceği gibi birden çok amaç fonksiyonu ile de model kurulabilir. Problemdeki amaç sayısı arttıkça model çok amaçlı probleme dönüşür ve bu amaçların birbirleri ile çelişmesi kaçınılmaz olacağından model karmaşıklaşır. Bu çok amaçlı problemleri çözmek için farklı algoritmalar (maksimum programlama, hedef programlama gibi) ve teknikler (ideal uzaklık minimizasyonu ve maksimum etkinlik ilkesi gibi) geliştirilmiştir.

Karar değişkenleri, bir matematiksel modelde değeri bilinmeyen hesaplanarak elde edilebilecek olan simgelerdir. Tüm modelin performansı karar değişkenlerine bağlıdır ve karar vericinin kontrolü altındadır. Çok amaçlı programlama modellerinin çözüm yaklaşımları karar değişkenlerinin sürekli veya kesikli olup olmamasına göre değişir

Kısıt denklemleri, bir karar değişkeninin alabileceği değerlerin sınırlamalarıdır.

3.1. DOĞRUSAL PROGRAMLAMA

Doğrusal programlama karar vericinin tek bir amacın bulunduğu durumlarda kullanılan bir matematiksel programlama tekniğidir (Cinemre, 2011). Bu programlamada hedefi açıklayan amaç fonksiyonunun birimi tek boyutta (maliyet minimizasyonu, kar maksimizasyonu gibi) ölçeklendirilir. Doğrusal programlama (LP), amaç fonksiyonunun bilinmeyen değişkenlerin doğrusal bir fonksiyonu olduğu, kısıtların doğrusal eşitlikler ve doğrusal eşitsizliklerden oluştuğu bir optimizasyon problemidir. Kısıtlamalar, problemin yapısına göre farklılık gösterebilir ancak sonuç olarak bir doğrusal program aşağıdaki standart olarak formüle edilebilir:

$$\begin{aligned} \min \quad & c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\ \text{s.t.} \quad & a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ & a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ & \vdots \\ & a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \\ & x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \end{aligned}$$

Burada b_i , c_i ve a_{ij} önceden belirlenmiş reel sabitler, x_i 'ler problemin araştırılan, bilinmeyen değişkenleridir. Standart formda verilen bu doğrusal modelde b_i 'lerin pozitif olduğu varsayılır. Eğer gerekliyse $b_i \geq 0$ olması için ilgili denklemin -1 ile çarpılması gerekebilir. Bu denklem sistemi matris formatı ile aşağıdaki gibi sıkıştırılarak formüle edilebilir.

$$\begin{aligned} \min \quad & C^T X \\ \text{s.t.} \quad & AX = b \quad \text{ve} \quad X \geq 0 \end{aligned}$$

Burada X ve b , n -boyutlu sütun vektörü; C^T , n -boyutlu satır vektörü; A boyutlu bir matris ve x değişkeninin her bir bileşeninin negatif olmaması şartı.

3.2. HEDEF PROGRAMLAMA

Gerçek hayatta problemler birçok ölçütü aynı anda dikkate alıp karar vermeyi gerektiren karmaşık problemlerdir. Bu problemleri çözmek için esnek model ve çözümlere gereksinim vardır. Bazı karmaşık problemlerde hedeflerden ödün vererek en tatmin edici kararı vermek problemin çözümünü kolaylaştırabilir. Bu da hedeflerden kabul edilebilir ölçüde sapmalara izin vermeyi gerektirir. Sonuçta ortaya çıkan model,

problemin tüm çelişkili hedeflerine optimum olmasa da etkin ve tatmin edici bir çözüm sunar. Bunun nedeni, her bir hedefi her zaman tatmin etmenin nadir görülmesidir (Orumie ve Ebong, 2014).

Geleneksel doğrusal programlama problemindeki amaç fonksiyonu, birbirleri ile çelişen amaçların eşzamanlı olarak dikkate alınması konusunda yeterli esneklik sağlayamamaktadır. Bu açıdan birçok çalışmanın çözüme ulaşmasında sınırlayıcı olduğu kabul edilir (Cinemre, 2011). Çok sayıda amacın eş zamanlı olarak sağlanmasının istendiği durumlarda problem karmaşık hale gelir ve geleneksel yöntemlerle uygun çözüm bulmak zorlaşır. Ayrıca tüm amaçların aynı birim ile ölçeklenmediği problemlerde doğrusal programlamanın uygulanması söz konusu olamaz. Farklı birimlerle ölçülmüş farklı hedeflerin olduğu problemlerde doğrusal programlamanın bir uzantısı sayılabilecek hedef programlama kullanılabilir. Çok amaçlı problemlerin çözümü için geliştirilen hedef programlama, farklı birimlerden oluşan birden fazla hedefin aynı anda ele alınarak tatmin edici bir çözümün bulunmasını sağlayan bir tekniktir (Erpolat, 2010). Hedef programlama ile klasik doğrusal programlama arasındaki temel fark amaç fonksiyonlarının tanımlama biçimleridir (Cinemre, 2011). Genel olarak, hedef programlama, orijinal çoklu hedefleri tek bir hedefe dönüştürür. Bu da birden fazla olan hedeflerin kısıt olarak değerlendirilmesi ve bu hedeflerden sapmaların toplamının tek bir amaç fonksiyonu olarak minimize edilmesi ile gerçekleştirilir. Hedef programlamada amaçlara tam olarak ulaşılması beklenmez, bu hedeflerden en az sapma ile en tatmin edici çözüme ulaşılması beklenir. Böylece çok amaçlı problem tek amaçlı probleme dönüştürülerek çözüm basite indirgenmiş olur ve klasik doğrusal programlama için geliştirilen teknikler ile çözüm elde edilebilir. Yöntemde öncelikli amaç, bir veya daha fazla amacı eşanlı tatmin edebilecek çözümleri elde edebilmektir (Deb, 2001). Bu özelliği, hedef programlamanın avantajlarından biri olup onu doğrusal programlama problemlerinden farklı kılar. Literatürde hedef programlama için farklı tanımlamalar yapıldığı gözlenmiştir. Burada en sık kullanılanlarının belirtilmesinde fayda görülmektedir.

Hedef Programlama, çok amaçlı matematiksel programlama problemlerini çözmek için geliştirilen tekniklerden biridir (Saber ve Ravindran, 1993).

Matematiksel programlamanın bir alt kümesi olan hedef programlama, her bir hedefin göreceli önemine dayanan uygun bir çözüm bulmayı amaçlar (Inan ve diğ., 2018).

Hedef programlama problemlerinde tüm kriterleri sağlayacak hiçbir çözüm bulunamıyorsa, istenen hedeften sapmayı en küçükleyen etkili çözümler aranır (Deb, 2001).

Hedef programlamanın temel konsepti, belirlenen hedeflerin ulaşılabilir olup olmadığına bakılmaksızın, istenen hedeflere mümkün olduğunca yaklaşan tatmin edici bir çözümün elde edilmesidir (Orumie ve Ebong, 2014).

Tüm hedefler eşzamanlı olarak optimize edilmesi, klasik doğrusal programlama yöntemi ile mümkün değildir. Bu durumda doğrusal programlamanın bir kolu olan hedef programlamaya başvurulabilir. Bu yöntemde, her bir amaç fonksiyonu için karar vericiden bir aspirasyon (doyum) seviyesi belirlemesi istenir. Belirlenen aspirasyon seviyeleri karar vericinin kriterlerini karşılayan çözümlere ulaşmak için yerine getirilmesi gereken asgari bir eşiktir. Daha sonra beklenen duruma göre bu aspirasyon seviyesinden sapmaların toplamı minimize edilmek suretiyle karar vericinin beklentilerine göre tatmin edici bir çözüm elde edilir. Sapmaların toplamının sıfıra yaklaştırılmaya çalışılması hedefin fiilen gerçekleştirilebileceği anlamına gelir. Her bir hedef için karar vericinin bir aspirasyon seviyesi belirlemesi zordur. Uygulamada, belirlenecek aspirasyon seviyeleri hakkında karar vericinin tam bilgiye sahip olmadığı birçok karar verme durumları vardır. Örneğin, “biraz daha büyük” veya “büyük ölçüde küçük” gibi belirsiz hedefler problemi karmaşıktırmaktadır. Bu karmaşıklık, hedef programlamanın en büyük dezavantajlarından biridir. Bu tür durumlarda ‘fuzzy goal programming’ ve ‘multi-choice goal programming’ gibi çeşitli tekniklerle hedef programlama gerçek hayat problemlerine uyarlanabilmiştir (Honice ve diğ., 2018).

Hedef programlamanın ana fikri, bir $f(x)$ fonksiyonu için önceden tanımlanmış bir hedefe (t) ulaşabilen çözümler elde etmektir. Tüm kısıt fonksiyonları ile birlikte hedeflere ulaşan hiçbir çözüm bulunamıyorsa, hedeflerden sapmayı en aza indiren çözümler bulmak gerekmektedir. Bir programlama probleminde hedefler için dört farklı durum söz konusu olabilir.

1. $f(x) \leq t$
2. $f(x) \geq t$
3. $f(x) = t$
4. $f(x) = [t^l, t^u]$

Optimum çözümün elde edilebilmesi için bu denklemlere sırasıyla d^- ve d^+ negatif ve pozitif sapma değişkenleri eklenerek aşağıdaki forma dönüştürülürler.

$$f(x) - d^- + d^+ = t$$

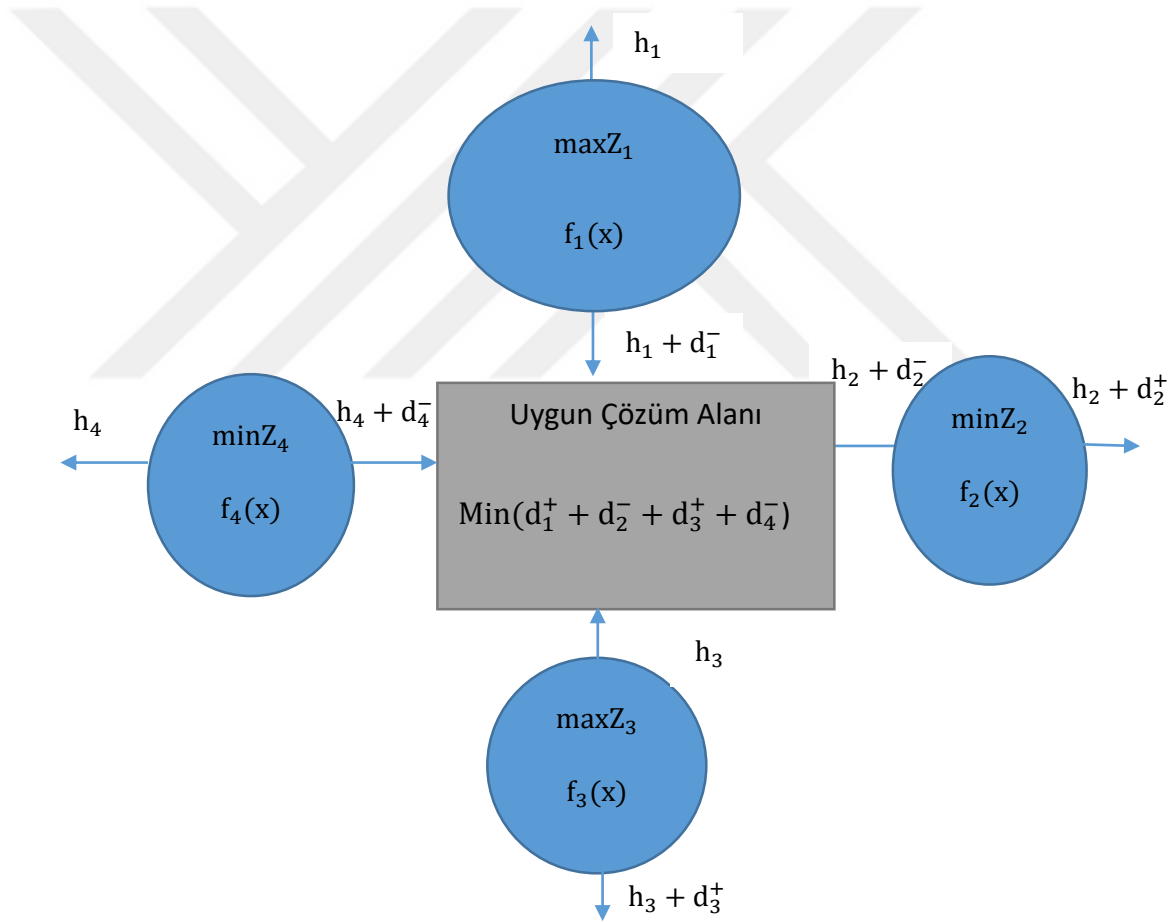
Bu eşitlik kısıtı ile d^- ve d^+ sapma değişkenleri minimize edilerek yukarıda belirtilen dört kısıtın her biri tatmin edilmeye çalışılır (Deb,2001).

Hedef programlama mantık olarak çok amaçlı matematiksel programlamaya benzer. Ancak çözüm yöntemleri farklıdır. Çok amaçlı matematiksel programlamada bütün amaçların gerçekleşmesi istenir, eğer bu mümkün değilse problem çözülemez. Hedef programlamada amaçların tümünü tatmin eden bir çözüm aranır ve program mutlaka bir çözüm üretir. Tablo.3'te çok amaçlı programlama ile hedef programlama farkının kavranabilmesi için iki matematiksel modelin genel formülasyonları karşılaştırılmıştır.

Tablo 4. Çok Amaçlı Matematiksel Programlama İle Hedef Programlamanın Karşılaştırılması

	Çok amaçlı matematiksel programlama	Hedef programlama
Amaç	$\max Z_1 = f_1(x)$ $\min Z_2 = f_2(x)$	$\min(d_1^+ + d_2^-)$
Kısıtlar	$\sum_{j=1}^n a_{1j}x_{1j} \leq b_1$ $\sum_{j=1}^n a_{2j}x_{2j} \geq b_2$ $\sum_{j=1}^n a_{3j}x_{3j} = b_3$ $x_{ij} \geq 0$	$f_1(x) - d_1^- + d_1^+ = h_1$ $f_2(x) - d_2^- + d_2^+ = h_2$ $\sum_{j=1}^n a_{1j}x_{1j} \leq b_1$ $\sum_{j=1}^n a_{2j}x_{2j} \geq b_2$ $\sum_{j=1}^n a_{3j}x_{3j} = b_3$ $x_{ij} \geq 0$ $d_{ij}^-, d_{ij}^+ \geq 0$

Burada h_1 ve h_2 , ilgili amaçlar için karar verici tarafından belirlenen hedef değerleridir. Birinci amaç maksimizasyon olup $f_1(x)$ fonksiyonunun, h_1 'den küçük değerler alması istenmeyen bir durumdur. O halde d_1^+ pozitif sapma değişkeninin mümkün olduğunca sıfıra yakın bir değer alması beklenir. Benzer mantıkla ikinci amaç, minimizasyon olup $f_2(x)$ 'in, h_2 'den büyük değerler alması istenmeyen bir durumdur. Bu durumda d_2^- negatif sapma değişkeninin mümkün olduğunca sıfıra yakın bir değer alması beklenir. Dolayısıyla hedef programlamanın amacı $d_1^+ + d_2^-$ değerini minimize etmek olacaktır. Eğer herhangi bir hedefin tam olarak gerçekleşmesi isteniyorsa bu durumda, o hedefle ilgili negatif ve pozitif sapma değişkenlerinin toplamının minimize edilmesi gerekir.



Şekil 13. Çok Amaçlı Hedef Programlama Modeli

Son olarak, istenmeyen sapma değişkenlerinin amacı onları en aza indirmek ve böylece istenen hedeflere “mümkün olduğunca yakın” bir çözüm bulunmasını sağlamak için bütün hedeflerin tek bir amaç fonksiyonunda bir araya getirilmesini sağlamaktır. Elde

edilen çözüme optimal çözüm değil, ödün vermeyen (uyumlaştırılmış) çözüm denir ve bu yüzden hedef programlama tatmin edici çözümler sunan bir teknik olarak adlandırılır.

3.2.1. Hedef Programlamada Kullanılan Tanım ve Kavramlar

3.2.1.1. Karar Değişkenleri

Bir matematiksel modelin bilinmeyen ve değerleri araştırılan değişkenleridir. Bu değişkenler karar vericinin kontrolü altında olup kontrol değişkenleri olarak da tanımlanır. Literatürde genellikle x_{ij} ile gösterilir. Bu değişkenin değerleri modelin çözülmesi ile elde edilir.

3.2.1.2. Amaç Fonksiyonu

Bir matematiksel programlamada amaç, karar vericinin değişkenleri istekleri doğrultusunda yönlendirmeleri anlamına gelmektedir. Amaç fonksiyonu ise, karar vericinin amacı (maksimizasyon veya minimizasyon) doğrultusunda modelin değişkenleri ile bu değişkenlerin parametrelerinin bir matematiksel ifadesidir. Amaç fonksiyonu, sistemin performans ölçütüdür. Örneğin bir işletmeci üretim planlaması yaparken amacı karını maksimize etmek ise amaç fonksiyonu, üretim elemanlarının birim kar değerleri ile karar değişkenlerinin doğrusal bir fonksiyonu olarak yazılır. Hedef programlamada amaç fonksiyonu bu klasik yapıdan farklı bir şekilde oluşturulur. Çünkü hedef programlamada birbirleriyle çelişen birçok amaç vardır ve bu amaçların tek fonksiyonda birleştirilmesi esas alınır. Bu nedenle hedef programlamada amaç fonksiyonu, tüm hedeflerden sapmaların minimizasyonunu amaçlayan bu sapmaların doğrusal birleşimi ile oluşturulur.

3.2.1.3. Model Kısıtları

Karar değişkenlerinin birbirleri ile olan ilişkilerini tanımlayan fonksiyonlardır. Hedef programlamada kısıtlar iki grupta değerlendirilmektedir. Bunlar, modelde zorunlu olarak sağlanması gereken yapısal kısıtlar ve karar vericinin ulaşmak istediği hedefleri ifade eden hedef kısıtlarıdır. Hedef kısıtlarının sağlanması zorunlu değildir, minimum sapma ile sağlanması amaçlanır.

3.2.1.4. Hedef

Hedefler, karar verici tarafından amaçların kesin olarak belirlendiği somutlaştırılmış değerlerdir. Diğer programlama modellerinden farklı olarak burada ulaşılmak istenen amaç değeri bellidir. Hedef kısıtlarının sağ taraf değerleri ulaşılmaması istenen ve karar verici tarafından model kurulurken belirlenen başarı seviyeleridir. Örneğin klasik programlamada maliyetin minimum olması amaçlanırken ki bu değer modelleme sırasında belli değildir, hedef programlamada ulaşılmaması istenen maliyet değeri karar verici tarafından hedef olarak belirlenmiştir. Hedef programlamanın amacı ise belirlenen maliyet değerinden en az sapma ile uygun çözüm kümesine ulaşılmasıdır.

3.2.1.5. Sapma Değişkenleri

Sapmalar, hedeflenen başarı ile gerçekleşen başarı arasındaki farkın ölçüsüdür. Sapma değişkenleri ise hedef kısıtlarının erişim düzeylerinden ne kadar uzaklaşıldığının ölçülmesini sağlayan değişkenlerdir. Her bir hedef için d^- negatif sapma değişkeni ve d^+ pozitif sapma değişkeni olmak üzere iki değişken bulunur. Bu değişkenlerin aldığı değerler mesafe ölçüsü olup ilgili hedeften ne kadar uzaklaşıldığını gösterir. Negatif sapma değişkeninin pozitif bir değer alması, karar verici tarafından belirlenen hedefin ne kadar altında kaldığını; pozitif sapma değişkeninin pozitif bir değer alması bu hedefin ne kadar aşıldığını gösterir. Sapma değişkenleri, değişkenlerin negatif olamama varsayımını sağlamak zorundadır. Negatif ve pozitif sapma değişkenlerinin her ikisinin sıfıra eşit olması durumu ise ilgili hedefe tam olarak ulaşıldığını gösterir. Bir hedef programlama probleminin çözümünde negatif ve pozitif sapma değişkenleri aynı anda pozitif değer alamazlar.

Tanıma göre büyük eşit ile ifade edilen bir kısıt için hedefin altında kalmak ve küçük eşit ile ifade edilen bir kısıt için hedefi aşmak istenmeyen durumlardır. Eşitlik durumunda ise hedefin altında kalmak ve hedefi aşmak istenmeyen durumlardır.

Tablo 5. Sapma Değişkenlerinin Belirlenmesi

Hedefler	Hedef programlama	İstenmeyen sapma değişkenleri
$f(x) \geq t$	$f(x) + d_i^- - d_i^- = t$	$\min(d_i^-)$
$f(x) \leq t$	$f(x) + d_i^- - d_i^- = t$	$\min(d_i^+)$
$f(x) = t$	$f(x) + d_i^- - d_i^- = t$	$\min(d_i^- + d_i^+)$

3.2.1.6. Teknolojik Katsayılar

Bir faaliyetin gerçekleştirilebilmesi için kullanılması gereken birim kaynak miktarını gösterir. Genellikle a_{ij} ile sembolize edilir.

3.2.1.7. Ağırlıklar

Hedeflerin önem düzeyine göre amaç fonksiyonunda sapma değişkenlerine ağırlık değerleri tayin edilir. Bu ağırlık değerleri hedef programlamanın genel formülasyonunda w_{ik} ile gösterilir. Bu ağırlıklar her bir sapmanın göreceli önemini gösterir. Bu yaklaşım özellikle sapmalar arasında boyut farklılığı olduğunda önem kazanır. Ancak bu yaklaşımda hedeflerin göreceli ağırlık değerinin bulunması ve sapmalar arasındaki boyut ilişkisinin bilinmesinin gerekliliği yöntemi zorlaştırmaktadır.

3.2.2. Hedef Programlamanın Varsayımları

Winston, doğrusal hedef programlama modellerinin varsayımlarını ve genel ilkelerini aşağıdaki gibi ifade etmiştir (Orumie ve Ebong, 2014).

Toplanabilirlik: herhangi bir hedef seviyeden istenmeyen sapma değişkenlerinin alabileceği değerlerin diğer bir hedef seviyesinin istenmeyen sapma değişkeninin alabileceği değere bağlı olmadığını ifade eder.

Orantılılık: Bir hedef seviyeden istenmeyen sapma değişkeninin alacağı değerlerin, hedef seviyesine olan uzaklıkla doğrudan orantılı olması gerekir.

Bölünebilirlik: Tüm karar değişkenlerinin belirtilen aralık içinde herhangi bir değeri almakta serbest olması gerektiği anlamına gelir, yani bir karar değişkeni bir tam sayı veya ayrık bir değer almaya zorlanamaz.

Kesinlik: Bu varsayım, tüm veri katsayılarının kesin olarak bilindiği anlamına gelir.

Bir problemin hedef programlama ile modellenenebilmesi için doğrusal programlamanın varsayımlarının geçerli olması gerekmektedir. Aksi takdirde doğrusal hedef programlamanın uygulanması mümkün değildir. Toplanabilirlik varsayımı geçerli olmadığında, problem doğrusal olmayan hedef programlama ile formüle edilebilir. Bölünebilirlik varsayımı geçerli olmadığında tam sayılı hedef programlama veya binary hedef programlama ile formüle edilebilir. Kesinlik aksiyomu geçerli değilse, belirsizlik bulunan katsayıların türüne göre bulanık hedef programlama yöntemi kullanılabilir.

3.2.3. Hedef Programlamanın Genel İlkeleri

Hedef programlama değişkenlerinin doğru seçildiğinden ve parametrelerin uygun şekilde ayarlandığından emin olmak için hedef programlamanın genel prensiplerini ve kavramlarını görmek ve anlamak gerekir.

Tatmin edici çözüm: Karar vericilerin belirledikleri hedeflere mümkün olduğu kadar yakın olacak şekilde ulaşmaları anlamına gelmektedir. Hedef programlamanın temel felsefesi elde edilen çözümlerinin karar vericinin hedeflerini ne kadar iyi karşıladıkları ve problemlerine pratik bir çözüm üretip üretmediğidir. Hedef programlama Pareto¹ verimsiz çözümler üretiyorsa bunun temel nedeni, karar vericinin tercihlerini ve hedef seviyelerini uygun belirleyememiş olması veya hedef programını oluşturan analistin zayıf modellemesidir.

Optimizasyon: Bir problem için mümkün olan çözüm seçenekleri içerisinde en iyi çözümü aramayı ifade eder. Çoklu amaçların varlığında, çelişen amaçların tümünü tatmin edebilecek bir çözümün aranması gerekebilir. Bu durumda optimizasyon teorisi

yerine Pareto optimallik kavramı modele uyarlanarak tanımlanır. Hedef programlamada pareto optimallik, tatmin edici ve optimize edici felsefelerinin bir karışımını içerir.

Sıralama: Karar vericinin belirlediği hedefleri önem sırasına göre sıralayabileceğini ifade etmektedir.

3.3. BULANIK HEDEF PROGRAMLAMA

Hedef programlama bütün parametrelerin kesin olarak bilindiğini varsayar. Ancak gerçek dünya problemlerinde kesin bilgi çok nadirdir ve bu parametrelerde belirsizliğe yol açar. Belirsizliğin üstesinden gelebilmek amacıyla ana model üyelik fonksiyonları yardımıyla bulanıklaştırılabilir. Belirsizliği ele almak için güçlü bir araç olan bulanık küme teorisi, Bellman ve Zadeh (1970) tarafından karar verme sürecine dâhil edildi. Bulanık küme tekniğinin hedef programlamaya ilk olarak Narasimhan (1980), tarafından entegre edilmiştir. Kouaissah ve Hocine (2020), Bulanık hedef programlama (BHP)'nin MCDM problemlerinde var olan belirsizlikle başa çıkmak için en iyi bilinen tekniklerden biri olduğunu iddia eder. Bakhtavar et al. (2020), karmaşık optimizasyon problemlerinin çözüm süresini azaltmak için BHP'nin kullanışlı olduğunu iddia eder. BHP model daha yüksek memnuniyet seviyelerinde hedeflere uyum sağlamak için önerilmiştir (Hocine et al., 2020). BHP algoritmasının temel avantajı, karar vericiyi tatmin edebilecek bir karara ulaşmak için üyelik fonksiyonları yardımıyla problemi yeniden tanımlayarak problemin tekrar tekrar değerlendirilmesi olasılığını ortaya çıkarmamasıdır (Lachhwani, 2014). Bulanık küme teorisinin karar verme sürecine girmesinden bu yana çeşitli modeller ve yaklaşımlar geliştirilmiştir (Razmi et al., 2016). Bu modelin farklı varyantlarından bazıları model 1, model 2 ve model 3'te sunulmuştur.

Model 1

Bu model klasik hedef programlamalama modelinin basit bir bulanık versiyonuna örnektir. Uddin et al. (2021), tarafından kullanılan bu model geleneksel ulaştırma probleminin çözümü için bir belirsiz hedef programlama modeli sunar. Bu modelde karar vericinin ulaşmak istediği hedeflerde belirsizlik olduğu varsayılmıştır. Böyle bir model, doğrusal üyelik fonksiyonları kullanılarak belirsiz hedefler için elde edilen alt ve üst değerleri modele dâhil eder. Böylece belirsiz hedef programlama klasik net doğrusal programlama problemine dönüşür. Önerilen bu yöntem hedef fonksiyonları için bir

maksimum memnuniyet derecesi (η) belirlemek amacıyla iyi yapılandırılmış bir algoritma sunar.

$$\max \eta \quad (5)$$

$$\mu_k(F_k) \geq \eta \quad (6)$$

$$F_k(x) + d_k^- - d_k^+ \cong \underline{G_k} \quad (7)$$

$$\eta \in [0 \ 1] \quad (8)$$

$$AX \leq a$$

$$d_k^-, d_k^+ \geq 0 \quad (9)$$

$$x \in X \{feasible\ set\}$$

Bu model hedeflerin eş zamanlı tatmin edilmesini sağlayan amaçların ortak memnuniyet seviyesini (η), maksimize eder (Eq 5). Pratikte, model 1'in amaç fonksiyonu uygun sapma seviyeleri ile genişletilebilir. Böylece yeni bir tek amaçlı hedef programlama modeli elde edilir. Benzer yöntemi Ilbahar et al. (2021), enerji santralleri için en uygun yerlerin seçimi için kullanmışlardır.

Model 2:

Bu model amaç fonksiyonunda hem hedeften sapmaların minimizasyonu hem de ortak tatmin seviyesinin maksimizasyonu (çelişen amaçlar) tek bir amaç ile ifade etme esnekliği sunar (Eq. 10). Bu model memnuniyet derecesinin maksimum değerini ($\eta = 1$) hedef olarak varsayar ve bu hedeften negatif yönde sapma değişkenini (ξ^-) modelin amaç fonksiyonuna ekler (Eq 11). ξ^- sapmasının küçük olması maksimum memnuniyet seviyesinde çözüm sunar. Burada sapma değişkenleri d_k^-, d_k^+ ve ξ^- farklı büyüklükteki aralıklarda değişebilir ve bu da hedeflere yönelik kasıtsız bir önyargıya neden olur (Chang, 2011). Yani problemin çözümü sadece baskın olan amaçlara dayalı olarak sonuç verebilir. O halde amaçların çözüm üzerindeki etkilerinin aynı düzeye indirgenmesini sağlamak için sapmaların normalleştirilmiş değerleri minimize edilir.

$$\min \left(\sum_{k=1}^n (d_k^- \text{ or } d_k^+) / \overline{G_k} \right) + \xi^- \quad (10)$$

$$\mu_k(F_k) \geq \eta$$

$$\eta + \xi^- - \xi^+ = 1 \quad (11)$$

$$F_k(x) + d_k^- - d_k^+ \cong \underline{G_k}$$

$$AX \leq a$$

$$d_k^-, d_k^+ \geq 0$$

$$\eta \in [0 \ 1]$$

$$x \in X \{feasible\ set\}$$

Model 3:

Model 1’de Eq. 7 revize edilerek Eq. 13 ve Eq. 14 modele dâhil edilmiştir. Bu model Mamashli et al. (2021) tarafından, toplam seyahat süresini, toplam çevresel etkileri ve toplam talep kaybını en aza indirmeyi amaçlayan bir problem için kullanıldı. Problemin genel formülasyonu aşağıda sunulmuştur.

$$\min \left(\sum_{k=1}^n (d_k^- \text{ or } d_k^+) / \overline{G_k} \right) + \xi^-$$

$$\mu_k(F_k) \geq \eta$$

$$\eta + \xi^- - \xi^+ = 1$$

$$F_k(x_{ij}) + d_k^- - d_k^+ \cong y_k \quad (13)$$

$$\underline{G_k} \leq y_1 \leq \overline{G_k} \quad (14)$$

$$AX \leq a$$

$$d_k^-, d_k^+ \geq 0$$

$$\eta \in [0 \ 1]$$

$$x \in X \{feasible\ set\}$$

Bu nedenle, karar verme sürecinde karar kilitlenmesi durumundan kaçınmak için amaç fonksiyonlarının doğrusal olduğu durumda uzlaşık optimal çözümü belirleme kavramı kullanılır (Lachhwani, 2014). Yukarıda tanımlanan modellerde bulanıklık hedeflerde idi. Ancak problemin yapısına göre bulanıklığın karar değişkenlerinde (Edalatpanah, 2020), sağ taraf sabitlerinde (Behera et al., 2021) veya modelin bütün parametrelerinde (Pérez-Cañedo et al., 2019) olduğu bulanık hedef programlama

yöntemleri literatürde incelenebilir. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak bulanıklık, karar vericinin kontrol edemediği ve problemin hedeflerine ulaşmayı kısıtlayan amaç fonksiyonlarındadır. Böyle bir problemi modellemek için model 3'ten ilham alınarak aşağıdaki model geliştirildi.

3.3.1. Önerilen Model: Çok Amaçlı Bulanık Hedef Programlama Yaklaşımı (A Goal Programming Model Under Fuzzy Multi-Objectives) GP-FMO

Yukarıda bahsi geçen BHP varyantlarında bulanıklaştırılacak konu, belirsiz hedeflerle ilgiliydi. Önerdiğimiz bu model problemin amaçlarındaki belirsizliğe odaklanır. Bu modeller ile belirsiz birden fazla amacı eş zamanlı tatmin ederken aynı zamanda ulaşılmak istenen net hedeflere maksimum yaklaşmayı amaçlayan (Eq. 15 and Eq. 16) bir model geliştirilmek istenmiştir. Belirsiz çoklu amaçlar üyelik fonksiyonları yardımıyla modelin kısıtlarına dâhil edilmiş ve model tek amaçlı forma ulaştırılmıştır.

Model 4

Amaç fonksiyonları

$$Z_0 = \min \left(\sum_{k=1}^n (d_k^- \text{ or } d_k^+) / G_k \right) + \xi^- \quad (15)$$

Amaç kısıtları

$$\begin{aligned} \mu_{obj}(Z_{obj}) &\geq \eta \\ \eta + \xi^- - \xi^+ &= 1 \\ Z_{obj}(x) + d_{obj}^- - d_{obj}^+ &\cong Y_{obj} \\ \underline{Z'_{obj}} &\leq Y_{obj} \leq \overline{Z'_{obj}} \\ Z_{obj} &\in [\underline{Z'_{obj}}, \overline{Z'_{obj}}] \end{aligned} \quad (16)$$

Hedef kısıtları

$$F_k(x) + d_k^- - d_k^+ = G_g$$

Yapısal kısıtlar

$$\begin{aligned} AX &\leq a \\ d_k^-, d_k^+, d_{obj}^-, d_{obj}^+ &\geq 0 \\ \eta &\in [0 \ 1] \\ x &\in X \text{ \{uygun çözüm kümesi\}} \end{aligned}$$

Model 4'teki ortak tatmin düzeyi ana amaç fonksiyonundan ayrılarak maksimize edilmek üzere ikinci amaç olarak tanımlanmıştır (Eq. 17). Bu adımın sebebi, sapmalar ile tatmin seviyesi arasındaki ilişkinin gözlenmek istenmesidir.

Amaç fonksiyonları

$$Z_0 = \min \left(\sum_{k=1}^n (d_k^- \text{ or } d_k^+) / G_k \right) \quad (17)$$

$$Z_1 = \max(\eta)$$

Amaç kısıtları

$$\mu_{obj}(Z_{obj}) \geq \eta$$

$$Z_{obj}(x) + d_{obj}^- - d_{obj}^+ \cong Y_{obj}$$

$$\underline{Z'_{obj}} \leq Y_{obj} \leq \overline{Z'_{obj}}$$

$$Z_{obj} \in [\underline{Z'_{obj}}, \overline{Z'_{obj}}]$$

Hedef kısıtları

$$F_k(x) + d_k^- - d_k^+ = G_k$$

Yapısal kısıtlar

$$AX \leq a$$

$$d_k^-, d_k^+, d_{obj}^-, d_{obj}^+ \geq 0$$

$$\eta \in [0 \ 1]$$

$$x \in X \{feasible\ set\}$$

Çok amaçlı problemlerde her bir amaç, diğerlerinden bağımsız olarak en iyileşmek ister. Tüm amaçların en iyileşmesi istendiğinde bu bir karar çıkmazı ile sonuçlanır. Elde edilen çözümün en iyi çözüm olduğu şüphelidir. Çok amaçlı modellerin en iyi tatmin edici çözümü, Pareto-optimal çözümlerinin kümesinden seçilmesi gerektiği açıktır. Bu çözüm ile benzer optimizasyon yöntemlerine kıyasla belirsizliklerin daha iyi ele alınması için daha zengin bir çözümler kümesi sağlanır (Razmi et al., 2016).

NSGA-II: Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritma-II

Gerçek dünya problemlerinde amaç fonksiyonlarının çelişkili doğası nedeniyle, çok amaçlı modellerin çözümünde her bulanık amacın en yüksek tatmini veren tek bir çözüm

nadiren olur (Lachhwani, 2014). Çok amaçlı bulanık hedef programlama problemlerine Pareto-optimal çözümleri belirlemek için NSGA II algoritması kullanılabilir. NSGA II, çok amaçlı optimizasyon problemini çözmek için geliştirilmiş bir sezgisel çözüm algoritmasıdır. Algoritmanın her iterasyonunda belirlenen amaç fonksiyonları için daha iyi bir çözüm olmadığında elde edilen çözüm pareto çözümü olarak adlandırılır (Vukadinović et al., 2021). Vilfredo Pareto'ya göre bir optimizasyon hedefini diğerini tehlikeye atmadan iyileştirebilecek başka bir çözüm yoksa elde edilen çözüm pareto çözümdür (Delgarm et al., 2016). Pareto optimal kümede, bir amaç kötüleşmeden bir diğer amaçta iyileşme gözlenemez. Literatürde atama problemleri (Xu et al., 2015), tedarik zinciri dağıtım problemleri (Fallah-Mehdipour et al., 2012), stok kontrol problemleri (Chan et al., 2016) gibi birçok araştırmada Pareto etkin kümenin bulunmasında NSGA-II algoritmasından yararlanılmıştır. Bu modellerin karşılaştırılmasını Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 6. Modellerin Karşılaştırılması

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4: GP-FMO
Amaç fonksiyonları	$\max \eta$	$\min \left(\sum_{k=1}^n (d_k^- \text{ or } d_k^+) / \bar{G}_k \right) + \xi^-$	$\min \left(\sum_{k=1}^n (d_k^- \text{ or } d_k^+) / \bar{G}_k \right) + \xi^-$	$Z_0 = \min \left(\sum_{k=1}^n (d_k^- \text{ or } d_k^+) / G_k \right)$ $Z_1 = \max(\eta)$
Amaç kısıtları				$\mu_{obj}(Z_{obj}) \geq \eta$ $Z_{obj}(x) + d_{obj}^- - d_{obj}^+ \cong Y_{obj}$ $\underline{Z'_{obj}} \leq Y_{obj} \leq \overline{Z'_{obj}}$ $Z_{obj} \in [\underline{Z'_{obj}}, \overline{Z'_{obj}}]$
Hedef kısıtları	$\mu_k(F_k) \geq \eta$ $F_k(x) + d_k^- - d_k^+ \cong \underline{G_k}$	$\mu_k(F_k) \geq \eta$ $\eta + \xi^- - \xi^+ = 1$ $F_k(x_{ij}) + d_k^- - d_k^+ \cong \bar{G_k}$	$\mu_k(F_k) \geq \eta$ $\eta + \xi^- - \xi^+ = 1$ $F_k(x_{ij}) + d_k^- - d_k^+ \cong y_k$ $\underline{G_k} \leq y_1 \leq \bar{G_k}$	$F_k(x_{ij}) + d_k^- - d_k^+ = G_k$

Tablo 6. (Devam)

Kesin kısıtlamalar	$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, i = 1, 2, \dots, m$ $\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq b_j, j = 1, 2, \dots, n$ $x_{ij} \geq 0$ $\eta \geq [0 \ 1]$ $d_k^-, d_k^+, \xi^-, \xi^+ \geq 0$	$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, i = 1, 2, \dots, m$ $\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq b_j, j = 1, 2, \dots, n$ $x_{ij} \geq 0$ $\eta \geq [0 \ 1]$ $d_k^-, d_k^+, \xi^-, \xi^+ \geq 0$	$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, i = 1, 2, \dots, m$ $\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq b_j, j = 1, 2, \dots, n$ $x_{ij} \geq 0$ $\eta \geq [0 \ 1]$ $d_k^-, d_k^+, \xi^-, \xi^+ \geq 0$	$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, i = 1, 2, \dots, m$ $\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq b_j, j = 1, 2, \dots, n$ $x_{ij} \geq 0$ $\eta \geq [0 \ 1]$ $d_k^-, d_k^+, d_o^-, d_o^+ \geq 0$
--------------------	---	---	---	---

3.3.2. Üyelik Fonksiyonlarının Karakterizasyonu

Çatışan amaçlar nedeniyle tüm amaç fonksiyonlarının mutlak tatmin edilmesi mümkün değildir. Bu durumda tüm amaçlardan istenmeyen sapma değişkenlerini minimize edilmek suretiyle çatışan amaçları mümkün olduğunca eşzamanlı tatmin eden üyelik fonksiyonunu maksimize etmeye çalışılmalıdır. Böylece aslında tüm amaçların optimum olduğu karar vericiyi tatmin eden çözümler elde edilmiş olur. Bu çalışmada Zimmerman max min yaklaşımı bulanık değerlere sahip amaç fonksiyonlarının üyelik fonksiyonlarını tanımlamak için kullanılmıştır. Zimmerman üyelik fonksiyonları çatışan amaç fonksiyonları için iki tip üyelik fonksiyonu tanımlar (Mamashli et al., 2021).

Maksimizasyon için üyelik fonksiyonu

$$\mu_{obj}(Z_{obj}) = \begin{cases} 1, & Z_{obj} \leq \underline{Z'_{obj}} \\ \frac{Z_{obj} - \underline{Z'_{obj}}}{\overline{Z'_{obj}} - \underline{Z'_{obj}}}, & \underline{Z'_{obj}} \leq Z_{obj} \leq \overline{Z'_{obj}} \\ 0, & Z_{obj} \geq \overline{Z'_{obj}} \end{cases} \quad (18)$$

Minimizasyon için üyelik fonksiyonu

$$\mu_{obj}(Z_{obj}) = \begin{cases} 1, & Z_{obj} \geq \overline{Z'_{obj}} \\ \frac{Z_{obj} - \underline{Z'_{obj}}}{\overline{Z'_{obj}} - \underline{Z'_{obj}}}, & \underline{Z'_{obj}} \leq Z_{obj} \leq \overline{Z'_{obj}} \\ 0, & Z_{obj} \leq \underline{Z'_{obj}} \end{cases} \quad (19)$$

Bu üyelik fonksiyonları belirsiz amaç fonksiyonlarının aralık değerlerinin ayarlanmasına olanak sağlar (Hocine et al., 2020). $\underline{Z'_{obj}}$ and $\overline{Z'_{obj}}$, ilgili amaç fonksiyonunun alt ve üst sınır değerlerini gösterir. $\underline{Z'_{obj}}$ minimizasyon problem için en iyi değeri ve $\overline{Z'_{obj}}$ maximizasyon problem için en iyi değeri gösterir. Üyelik fonksiyonlarının oluşturulabilmesi için her bir amaç fonksiyonunun bireysel en iyi çözümlerini (maksimum ve minimum değerlerini) içeren bir ödünleşme tablosu elde edilir. Bu tablo yardımıyla her bir amaç için üyelik fonksiyonları oluşturulabilir. her bir amaç için problem ayrı ayrı hesaplandığında elde edilen optimal çözüm en iyi çözüm olarak kabul edilecektir ve amaç fonksiyonunun ilişkili değeri, karşılık gelen bulanık hedefin aspirasyon seviyesi olarak kabul edilebilir (Lachhwani, 2014).

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

MODELİN TANIMLANMASI

4.1. UYGULAMA: VİZYON-2023 HEDEFLERİ DOĞRULTUSUNDA TÜRKİYEİN ENERJİ PLANLAMASI

Türkiye yedi coğrafi bölgeye sahip bir Avrupa-Asya ülkesidir. Yenilenebilir enerji rezervleri bol olmasına rağmen enerji ihtiyacının %90'ını fosil kaynaklı yakıtları ithal ederek karşılamaktadır. İthal kaynaklara bağımlılığın neden olduğu arz güvenliği riski, tükenme tehlikesi ve çevreye verdikleri zarar göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş kaçınılmaz bir sonuçtur. Bu farkındalık, Türkiye'nin 2023 yılı için yerli ve yenilenebilir enerji kapasitesini artırmaya yönelik genel hedefinin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Çalışmamızın çıkış noktası, bu hedeflerin fizibilitesini araştırmak ve bir eylem planı yol haritası oluşturmaktır. Bu çalışmada, karar verici tarafından belirlenemeyen maliyet, salınım, kapasite faktörü ve potansiyel kullanımı amaçlarının belirsiz olarak kabul edildiği ulaşılması istenen hedeflerin karar verici tarafından belirlendiği GP-FMO modeli önerildi. BHP enerji sistemlerinin kapasite genişletme problemlerinde sıklıkla kullanılan güncel bir yöntemdir. Hocine et al. (2020), tarafından rüzgâr enerji sistemlerinin kapasite genişletilmesini amaçlayan bir yer seçimi problem için, Zografidou et al. (2016) tarafından bölgesel bir yenilenebilir enerji haritası tasarlamak için ve Ilbahar et al. (2021) atıktan enerji santralleri için en uygun yerleri belirlemek için bulanık hedef programlama yönteminin varyantlarını kullandılar. Literatürdeki bu makalelerde genellikle ulaşılması istenen hedeflerin net olarak belirlenemediği problemleri konu alır. Enerji planlamasında enerji kaynakları için ulaşılması istenen hedefler net olarak belli olduğunda bu hedeflere ulaşılmasını kısıtlayan çevresel, ekonomik ve teknik kriterleri dikkate almak gerekir. Bu çalışma, belirsiz amaçlar altında hedeflerin gerçekleştirilebilirliğine odaklanır. Yani, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından belirlenen 2023 yenilenebilir enerji hedeflerinin minimum maliyet, minimum salınım, maksimum kapasite faktörü ve maksimum potansiyel kullanımı kısıtlamaları altında gerçekleştirilebilirliği araştırılır. Ayrıca ETKB'nin hedefleri doğrultusunda Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesinde yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları için bölgesel kapasite planlaması önerir. Böylece hem

bölge ve enerji kaynağı seçimi problemi hem de ilgili bölgelere kaynak tahsisi problemi eş zamanlı ele alınmış olur.

Tezde öncelikle ETKB'nin 2023 yılı için belirlediği hedeflerin ulaşılabilirliğini ölçmek istendi. Bu sebeple hedeflere kesin bir şekilde ulaşılmasını modele dayatılmamalıydı. Bu durumda modelin kısıtlarının esnek tutulması gerekir. Bu açıdan hedef programlama modeli istenilen bu esnekliği sunmaktadır ve bu açıdan ve klasik doğrusal programlamadan ayrılmaktadır. Bu tekniğin diğer bir avantajı, çoklu ve çelişen hedeflerin dikkate alınabilmesidir. Tüm bu sebeplerle hedef programlamanın problemimiz için uygun bir yöntem olabileceği kanaatindeyiz.

4.2. MODELİN TANIMLANMASI

İndisler

i: Coğrafi Bölgeler

1. Güneydoğu Anadolu Bölgesi (GAB)
2. Akdeniz Bölgesi (AB)
3. Doğu Anadolu Bölgesi (DAB)
4. İç Anadolu Bölgesi (İAB)
5. Ege Bölgesi (EB)
6. Marmara Bölgesi (MB)
7. Karadeniz Bölgesi (KB)

j: Yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları

1. Hidrolik
2. Rüzgar
3. Güneş
4. Biyokütle
5. Jeotermal
6. Linyit
7. Taş kömürü

n : İthal kaynaklar

1. İthal kömür
2. Doğalgaz
3. Diğer (Akaryakıt, Nafta, and Dizel)

Parameters

P	i 'nci bölgedeki j 'ninci kaynağın mevcut potansiyeli (MW)
YM	Kaynakların yatırım maliyetleri
Kap	Kaynakların kapasite faktörleri (%)
CO_2	Kaynakların karbon emisyon miktarları (Bin ton)
$yer(i, j)$	Yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut kurulu kapasitesi (MW)
$yab(i, j)$	Fosil enerji kaynaklarının mevcut kurulu kapasitesi (MW)

Türkiye bulunduğu coğrafi konum, yerşekilleri ve iklim şartları itibariyle enerji ihtiyacınının büyük bir kısmını karşılayabilecek yenilenebilir enerji kaynağı potansiyeline sahip bir ülkedir. Ancak yenilenebilir enerji teknolojilerinin maliyetleri bu kaynakların değerlendirilmesinin önündeki en büyük engel olmuştur. Enerjiyi ithal etmenin kısa vadede nisbeten daha avantajlı olması kendi öz kaynaklarımızın potansiyelinin altında değerlendirilmesine neden olmuştur. Hali hazırda mevcut güneş enerji potansiyelinin %3'ü ve rüzgâr enerji potansiyelinin %15'i elektrik üretiminde kullanılmaktadır.

Türkiye'de toplam kurulu güç kapasitesi 2021 yılının son çeyreğinde 93 GW'a ulaşmıştır. Bu kurulu gücün yaklaşık 43 GW'ı fosil enerji kaynaklarını kullanırken 31 GW'ını hidroelektrik santralleri oluşturur. Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı kurulu gücü 2008 yılından buyana artan bir eğilim izlemektedir. Özellikle son beş yıl içerisinde bu güç %50 oranında artırılarak dünyada en büyük artışı gerçekleştiren 15. ülke olmuştur. 2021 yılının son çeyreğine gelindiğinde toplam yenilenebilir enerji kurulu gücü yaklaşık 50 GW'a ulaşmıştır. Bunun %62'si hidroelektrik, %18'i rüzgâr, %14'ü güneş, %3'ü biyokütle ve %3'ü jeotermal kaynaklarından oluşur. Sahip olunan yerli kaynakların kullanımının artırılması dışa bağımlılığın azaltılması ve böylece enerji arz güvenliğinin sağlanması açısından da önemlidir. Bu amaçla yerli doğalgaz ve petrol arama çalışmaları da hızlandırıldı.

Enerji kapasite genişletme planlamalarında öncelikle mevcut santral kapasitelerinin dikkate alınması gerekir. Türkiye'nin yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik santrallerinin bölgelere göre kurulu güçleri tablo 8'de verilmiştir. Bu değerler için kullanılan parametre $yer(i, j)$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 7. Bölgelere Göre Yerli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kurulu Gücü

	Hidrolik	Rüzgâr	Güneş	Biyokütle	Jeotermal	Linyit	Taşkömürü
Güney D.A.	4167	111	1233	207	0	279	0
Akdeniz	5717	1110	1587	262	0	450	0
Doğu Anadolu	9284	0	1200	242	0	150	0
İç Anadolu	3212	1391	932	327	0	1260	0
Ege	1722	2927	1417	259	1638	3333	0
Marmara	1300	2915	565	203	4	869	0
Karadeniz	5130	254	16	158	0	270	1400
Toplam	30532	8708	6950	1658	1642	6611	1400

Türkiye'nin ithal enerji kaynaklarına dayalı kurulu santral gücü Tablo 9'de verilmiştir. İthal yani yabancı kaynakların kurulu gücünü temsil etmek üzere kullanılan parametre $yab(i, j)$ ile gösterilmiştir.

Tablo 8. Bölgelere Göre İthal Enerji Kaynakları Kurulu Gücü

	İthal kömür	Doğalgaz	Diğer
Güney D.A.	0	255,67	206,8
Akdeniz	2320	3125,38	36,34
Doğu Anadolu	0	410,07	47,34
İç Anadolu	35	3173,3	186,7
Ege	770	3683,74	317,27
Marmara	990	11967,09	229,86
Karadeniz	5010	230,38	70,91

Enerji santrallerinin kapasite genişletme çalışması, kaynağın toplam rezerv durumuna göre ve birim üretim maliyetini dikkate alarak geliştirdik. İthal kaynaklardan enerji üretmenin maliyeti, yerli kaynaklara dayalı santrallerin kapasite genişletme maliyetinden daha az ise model ithalat yapılmasına izin verecek şekilde geliştirilmiştir.

Bu nedenle maliyet değerlerini yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları ile ithal kaynaklar olmak üzere iki farklı parametreye ayırarak modelin amaç fonksiyonlarında kullandık.

Tablo 4'te enerji kaynaklarından bir birim elektrik üretmenin maliyet değerleri verilmiştir.

$m(j)$: j . Yerli ve yenilenebilir enerji kaynağından birim elektrik üretim maliyeti

$nn(n)$: n . Yabancı enerji kaynağından birim elektrik üretim maliyeti

Tablo 9. Enerji Santrallerinde Enerji Üretmenin Birim Maliyeti (cent/KWh)

Santraller		Birim Üretim Maliyeti	
		Min	Max
Doğal Gazlı Termik	Dışa Bağımlı	3,6	10,6
Linyit Termik	Yerli	4,6	12
İthal Kömürlü Termik	Dışa Bağımlı	4,5	8,8
Hidroelektrik	Yerli	2,7	3,5
Nükleer	Yerli	3	8,20
Rüzgâr	Yerli	5,1	14,6
Jeotermal	Yerli	3,3	4
Güneş	Yerli	12,3	24,5
Biokütle	Yerli	4,8	8

Değişkenler

Z_0	Hedeflerden minimum sapma
Z_1	Ortak memnuniyet düzeyinin maksimizasyonu
Z^1_{obj}	Maliyet minimizasyonu
Z^2_{obj}	Teknik potansiyelden maksimum fayda
Z^3_{obj}	Kapasite faktöründen maksimum fayda
Z^4_{obj}	Karbon emisyonunun miniizasyonu
E	Yerli ve yenilenebilir enerji kapasite artışı
K	İthal enerji kapasite artışı

d_k^-	k'nıncı hedeften negatif yönde sapma $k = 1, 2, \dots, 6$
d_k^+	k'nıncı hedeften pozitif yönde sapma $k = 1, 2, \dots, 6$
$d_{obj_t}^-$	k'nıncı amaçtan negatif yönde sapma $t = 1, 2, \dots, 4$
$d_{obj_t}^+$	k'nıncı hedeften pozitif yönde sapma $t = 1, 2, \dots, 4$
η	Amaçların ortak memnuniyet düzeyi
ξ^-	η ortak memnuniyet düzeyinden negatif yönde sapma

Teknik potansiyel: Ekonomik olarak değerlendirilebilirlik koşulu göz önüne alınmadan, ülkenin yerli kaynak rezervlerinden tümünün değerlendirilmesi durumunda oluşabilecek üretim miktarını temsil eder (Noorollahi et al., 2021).

Yatırım maliyetleri: Santral çalışma aşamasına gelene kadar yapılan masrafları kapsar (Hocine et al., 2020), (Alao et al., 2020). Yeni santrallerin devreye alınmasında yatırım maliyetlerinin dikkate alınması, enerji planlamasında temel konulardan biridir (Nair et al., 2021). Kapasite artırma problemlerinde ekonomik sürdürülebilirliği sağlamak için maliyet minimizasyonu gereklidir. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin maliyetleri günümüzde oldukça yüksektir.

Kapasite faktörü: Santralin belli bir periyotta ürettiği toplam enerjinin tam kapasitede üretebileceği enerjiye bölümüdür (Lavidas, 2020). Kapasite faktörü kullanılan yakıt türüne bağlı olarak aşırı derecede değişir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi iklim şartlarına bağlı olduğundan bu kaynaklara dayalı santrallerde tam kapasite üretime çok nadir ulaşılır. Bu açıdan ithal kaynaklar daha avantajlıdır. Ancak bu avantaj RE hedeflerine ulaşmak için bir dezavantajdır.

Karbon salınımı: İklim değişikliği etkilerini azaltma çabasıyla kaynaklanan karbon emisyon kısıtlamaları yenilenebilir enerjiye dayalı enerji planlamalarını ön plana çıkardı. Dünya genelinde birçok ülke enerji planlamalarında emisyon azaltma kriterini dikkate almaya başladı.

4.3. MODELİN KURULMASI

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 2023 yılı için belirlenen kurulu güç hedefi 11.0000 MW ile 120.000 MW arasındadır (İlbahar et al., 2021). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 2023 yılında toplam kurulu gücün 78000 MW'ının yerli

ve yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşması hedeflenmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından belirlenen 2023 kurulu güç hedefleri ve mevcut kurulu güç verileri Tablo 2'de verilmiştir. Modelin hedef kısıtlamaları ve yapısal kısıtlamaları bu tabloya göre oluşturuldu.

Tablo 10. Yerli ve Yenilenebilir Enerji Kurulu Gücü Karşılaştırılması (2020 ve 2023).

	Hidrolik	Rüzgar	Güneş	Jeotermal	Biokütle	Toplam RE	Linyit	Taş kömürü	Toplam
2020	30531	8708	6950	1642	1638	49469	6611	1400	57500
2023	34000	15000	15000	3000	3000	70000	-*	-	78000

*Hedef belirlenmemiştir.

Bu hedeflere ulaşılmasılırken karar vericinin katlanması gereken bazı maliyetler ve elde edeceği bazı faydalar olacağı açıktır. Karar verici bu iki belirsiz çelişki (maliyet-fayda) arasında hedeflerine ulaşmak ister. Gerçek dünya problemlerinde bu çelişkili amaçlar altında tüm hedeflere ulaşılması pek mümkün olmayabilir. Böyle bir durumda eşzmanlı olarak hem maliyetin minimum ve faydanın maksimum olduğu hem de hedeflere en en yakın çözümlerin elde edilmesi önemlidir. Bu problemde ETKB, başlangıçta maliyetleri ve karı hakkında net verilere sahip değildir (Tablo 3).

Tablo 11. Modelin Amaç ve Hedef Fonksiyonlarının Tanımlanması

Amaçlar	Ekonomik	Z1	Min	Minimum Maliyet	belirsiz
	Çevresel	Z2	Min	Minimum Salınım	belirsiz
	Teknik	Z3	Max	Maksimum faktörü	Kapasite belirsiz
		Z4	Max	Maksimum kullanma	rezerv belirsiz
Hedefler	2023-Yenilenebilir enerji hedefleri	G1	$\geq$	Hidroelektrik Kurulu güç	34000
		G2	$\geq$	Rüzgar enerjisi Kurulu güç	15000
		G3	$\geq$	Güneş Kurulu güç	15000
		G4	$\geq$	Jeotermal enerji Kurulu güç	3000
		G5	$\geq$	Biyo enerji Kurulu güç	2000

Geçek dünyadaki karar verme durumlarında karar verici net olarak belirleyebildiği hedeflere ulaşırken aynı zamanda birden fazla amacı eş zamanlı olarak sağlamak zorunda kalabilir. Bu amaç değerleri karar verici tarafından belirlenemediğinde bu problem bulanık çok amaçlı hedef programlama problemine dönüşür. Klasik hedef programlama varyantları bu sorunun üstesinden gelemeyebilir. Bu tezde sadece amaç fonksiyonlarının değerleri kesin olarak bilinemediği belirsizlik dikkate alınmıştır. Bu belirsizliği ele almak için Bellman ve Zadeh'in max min yaklaşımı (Adım 1-4) kullanılmıştır. Son adımda problem önerilen model yardımı ile modellenmiştir.

Adım 1. Karar vericiden ulaşmak istediği hedefleri belirlemeleri istenir.

Adım 2. Bu hedeflere tam olarak ulaşıldığı durumdaki maliyet ve fayda değerlerini elde edebilmek için problem klasik doğrusal çok amaçlı tamsayılı model olarak düşünülür [56]. Bu model hedeflere tam olarak ulaşılmasını garantiler.

Amaç fonksiyonları

Burada tüm katsayılar $X(i, j) = \frac{X(i, j)}{\sum_{i=1}^n X(i, j)}$, $\forall j = 1, \dots, m$ için $X(i, j) \in [0, 1]$ formülü kullanılarak normalleştirilmiştir.

$$Z^1_{obj} = \min \left(\sum_{i=1}^7 YM(j) * E(i, j) + \sum_{n=8}^{10} YM(n) * K(n) \right), \forall j = 1, 2, \dots, 7$$

$$Z^2_{obj} = \min \left(\sum_{j=1}^7 CO_2(j) * E(i, j) + \sum_{n=8}^{10} CO_2(n) * K(n) \right), \quad \forall i = 1, 2, \dots, 7$$

$$Z^3_{obj} = \max \left(\sum_{j=1}^7 Kap(j) * E(i, j) + \sum_{n=8}^{10} Kap(n) * K(n) \right), \quad \forall i = 1, 2, \dots, 7$$

$$Z^4_{obj} = \max \left(\sum_{i=1}^7 P(i, j) * E(i, j) \right), \quad \forall j = 1, 2, \dots, 7$$

Yapısal kısıtlar

$$\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{10} yer(i, j) + E(i, j) + \sum_{i=1}^7 \sum_{n=8}^{10} yab(i, n) + K(i, n) \leq 120000$$

$$\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{10} yer(i, j) + E(i, j) + \sum_{i=1}^7 \sum_{n=8}^{10} yab(i, n) + K(i, n) \geq 110000$$

$$\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{10} yer(i, j) + E(i, j) \geq 78000$$

$$\sum_{i=1}^{10} \sum_{n=8}^{10} yer(i, n) + K(i, n) \leq 42000$$

$$\sum_{i=1}^7 yer(i, Linyit) + E(i, Linyit) \geq 6611$$

$$\sum_{i=1}^7 yer(i, Hidrolik) + E(i, Hidrolik) \geq 34000$$

$$\sum_{i=1}^7 yer(i, Rüzgar) + E(i, Rüzgar) \geq 15000$$

$$\sum_{i=1}^7 yer(i, Güneş) + E(i, Güneş) \geq 15000$$

$$\sum_{i=1}^7 yer(i, Jeotermal) + E(i, Jeotermal) \geq 3000$$

$$\sum_{i=1}^7 yer(i, Biokütle) + E(i, Biokütle) \geq 3000$$

$$E(i, j) \geq 0 \text{ ve } K(i, j) \geq 0$$

Adım 3. Elde edilen bu model diğer amaçlar göz ardı edilerek her bir amaç için tek amaçlı olarak çözülür. Bu çözüm tüm hedeflere ulaşıldığında her bir amaç fonksiyonunun bireysel optimumlarını verir. Böylece her bir amacın minimum ve maksimum değerlerinin ($\underline{Z'_{obj}}$ and $\overline{Z'_{obj}}$) bulunduğu bir ödünleşme tablosu (Pay-off table) elde edilir.

Tablo 12. Ödünleşme Tablosu

	Z^1_{obj}	Z^2_{obj}	Z^3_{obj}	Z^4_{obj}
$minZ^1_{obj}$	1091	7000	2110	42
$minZ^2_{obj}$	9642	47	164	115
$maxZ^3_{obj}$	2102	3000	2656	720
$maxZ^4_{obj}$	1654	250	250	1261

Adım 4. Elde edilen bu alt ve üst sınır değerlere göre Eq. 18 and Eq. 19 kullanılarak her bir amaç için üyelik fonksiyonları oluşturulur. Oluşturulan üyelik fonksiyonları, maksimize edilecek ortak tatmin seviyesinden büyük olacak şekilde mevcut kısıtlara eklenir. Bu kısıtlar modelin amaç fonksiyon kısıtlarını oluşturur.

Adım 5. Amaç fonksiyonlarından sapma değişkenleri Model 3 ilham alınarak tek bir fonksiyonda birleştirilir ve model tek amaçlı bulanık doğrusal modele dönüştürülür. Aşağıda iki farklı amaç seçeneğine göre GP-FMO modeli kurulmuştur.

Amaç fonksiyonları

Eq. 15 dikkate alınarak model tek amaçlı modele dönüştürüldü (Eq. 20).

$$Z_0 = \min \left(\frac{d_1^-}{78000} + \frac{d_2^-}{34000} + \frac{d_3^-}{15000} + \frac{d_4^-}{15000} + \frac{d_5^-}{3000} + \frac{d_6^-}{2000} \right) + \xi^- \quad (20)$$

Eq. 17 ye göre hedeflerden sapmaların minimize edildiği Z_0 amacı ve ortak tatmin seviyesinin maksimize edildiği Z_1 amacı iki ayrı amaç olarak düşünülür (Eq. 21).

$$Z_0 = \min \left(\frac{d_1^-}{78000} + \frac{d_2^-}{34000} + \frac{d_3^-}{15000} + \frac{d_4^-}{15000} + \frac{d_5^-}{3000} + \frac{d_6^-}{2000} \right) \quad (21)$$

$$Z_1 = \max(\eta)$$

Kısıtlar

I. Amaç fonksiyonları kısıtlamaları

$$\begin{aligned}
 1 - \left(\frac{Z^1_{obj} - 1091}{3642 - 1091} \right) &\geq \eta \\
 1 - \left(\frac{Z^2_{obj} - 47}{7000 - 47} \right) &\geq \eta \\
 \left(\frac{Z^3_{obj} - 164}{2656 - 164} \right) &\geq \eta \\
 \left(\frac{Z^4_{obj} - 42}{1261 - 42} \right) &\geq \eta
 \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
 Z^1_{obj} + d^-_{obj_1} - d^+_{obj_1} &= Y_{obj}^1 \quad \& \quad 9642 \leq Y_{obj}^1 \leq 1091 \\
 Z^2_{obj} + d^-_{obj_2} - d^+_{obj_2} &= Y_{obj}^2 \quad \& \quad 7000 \leq Y_{obj}^2 \leq 47 \\
 Z^3_{obj} + d^-_{obj_3} - d^+_{obj_3} &= Y_{obj}^3 \quad \& \quad 2656 \leq Y_{obj}^3 \leq 164 \\
 Z^4_{obj} + d^-_{obj_4} - d^+_{obj_4} &= Y_{obj}^4 \quad \& \quad 1261 \leq Y_{obj}^4 \leq 42
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{10} yer(i,j) + E(i,j) + d_1^- - d_1^+ &= 78000 \\
 \sum_{i=1}^7 yer(Hidrolik) + E(i,Hidrolik) + d_2^- - d_2^+ &= 34000 \\
 \sum_{i=1}^7 yer(i,Rüzgar) + E(i,Rüzgar) + d_3^- - d_3^+ &= 15000 \\
 \sum_{i=1}^7 yer(i,Güneş) + E(i,Güneş) + d_4^- - d_4^+ &= 15000 \\
 \sum_{i=1}^7 yer(i,Jeotermal) + E(i,Jeotermal) + d_5^- - d_5^+ &= 3000 \\
 \sum_{i=1}^7 yer(i,Biokütle) + E(i,Biokütle) + d_6^- - d_6^+ &= 2000
 \end{aligned} \tag{23}$$

$$\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{10} yer(i,j) + E(i,j) + \sum_{i=1}^7 \sum_{n=8}^{10} IC_i(i,n) + K(i,n) \leq 120000$$

$$\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{10} yer(i,j) + E(i,j) + \sum_{i=1}^7 \sum_{n=8}^{10} IC_i(i,n) + K(i,n) \geq 110000$$
(24)

$$\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{10} yer(i,j) + E(i,j) \geq 57000$$

$$\sum_{i=1}^{10} \sum_{n=8}^{10} yab(i,n) + K(i,n) \geq 33000$$

$$\sum_{i=1}^7 yer(i, Linyit) + E(i, Linyit) \geq 6611$$

$$\sum_{i=1}^7 yer(i, Hidrolik) + E(i, Hidrolik) \geq 30531$$

$$\sum_{i=1}^7 yer(i, Rüzgar) + E(i, Rüzgar) \geq 8708$$

$$\sum_{i=1}^7 yer(i, Güneş) + E(i, Güneş) \geq 6950$$

$$\sum_{i=1}^7 yer(i, Jeotermal) + E(i, Jeotermal) \geq 1642$$

$$\sum_{i=1}^7 yer(i, Biokütle) + E(i, Biokütle) \geq 1058$$
(25)

$$\eta + \xi^- = 1$$
(26)

$$yer(i,j) + E(i,j) \leq P(i,j), \forall i,j = 1,2, \dots 7$$
(27)

$$d_{obj_i}^-, d_{obj_i}^+, d_k^-, d_k^+, \xi^- \geq 0$$
(28)

Eq. 22 amaç fonksiyonlarının eşzamanlı tatmin seviyesi ile ilişkisini gösteren amaç kısıtlamaları denklemleridir. Bu denklemler Eq. 15 ve Eq. 16 yardımıyla ve model 3 dikkate alınarak tanımlandı. Eq. 23 hedeflerden sapmaların minimize edildiği hedef kısıtlamaları denklemlerinden oluşur. Eq. 24 toplam enerji talebinin belli bir aralıkta olmasını garantileyen kısıtlamalar. Böylece arz eksikliği veya fazlası riskinden kaçınılır. Eq.

25 mevcut kurulu gücün üzerine çıkılmasını yani her bir kaynak için kapasite genişletmesini garantiler. Eq. 26 memnuniyet düzeyinin $[0 \ 1]$ aralığında olmasını garantiler. Eq. 27 yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut kapasiteleri ve ek kapasite genişletmesi ile birlikte bölgesel rezervlerini aşmayacak şekilde atanmasını garantiler. Eq. 28 sapma değişkenlerinin pozitif olma şartını garantiler.

4.4. MODELİN ÇÖZÜMÜ

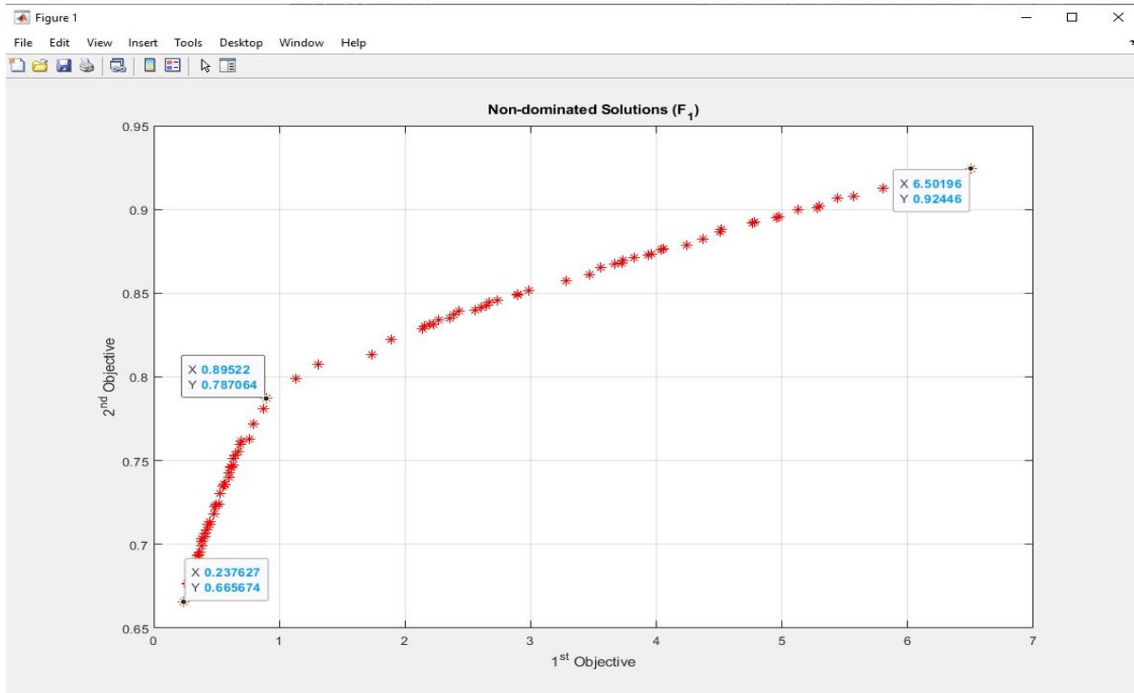
Amaçların çelişkileri ve mevcut bilgilerin belirsizliği, karar vericilerin maksimum memnuniyet düzeyinde minimum sapmaya ulaşmasını neredeyse imkânsız kılmaktadır. Yani amaçların ortak memnuniyet düzeyi arttıkça hedeflerin gerçekleştirilme düzeyi düşmektedir. Elde edilen çözümler birer uygun çözümdür. Bu çözümlerden beklenen tüm amaçların en iyi tatmin edildiği, minimum sapmaya sahip bir çözüme ulaşılmasıdır. Model 4 dikkate alınarak tanımlanan problem iki farklı yöntemle çözüldü. Böylece farklı tatmin düzeylerinde birçok çözüm alternatifi elde edildi.

1. GP-FMO modeli klasik LP ile GAMS programında çözülür.
2. GP-FMO modeli NSGA II algoritması ile matlabda çözülür.

BEŞİNCİ BÖLÜM

MODELİN UYGULANMASI

Klasik LP ile edilen çözüm feasible çözüm seçeneklerinden sadece biridir. NSGA II Algoritma ile elde edilen Pareto etkin küme üzerindeki domine edilemeyen noktalar (F1), karar vericilere amaçların ortak tatmin seviyelerine göre çözüm alternatifleri olarak sunulur [71]. Figure 1’de %65 ortak tatmin seviyesi üzerindeki etkin çözümler grafiği sunulmuştur. Y eksenini tüm amaçların ortak tatmin seviyeleri ve X eksenini hedeften sapma. Bu grafikte minimum tatmin düzeyinde minimum sapma ve maksimum tatmin düzeyinde maksimum sapma gözlemlendi. Bu iki durum problemimiz için istenmeyen durumlardır. Fig. 1’de % 80 ve daha fazla memnuniyet düzeyinde hedeften sapmalar çok hızlı büyümeye başladığı gözlemlendi. Bu kırılma noktasındaki çözüm en tatmin edici çözüm olarak değerlendirilebilir. %79 memnuniyet seviyesi oldukça kabul edilebilir bir seviyedir.



Şekil 14. Hedeflerden Sapma (1st objective) ile Amaçların Tatmin Düzeyi (2nd objective) Arasındaki İlişki

GP-FMO modelinin çözümünde klasik LP ve NSGA II algoritması kullanıldı. NSGA II algoritması aracılığıyla elde edilen çözümler klasik LP’ye göre daha yüksek memnuniyet düzeyinde enerji hedeflerine ulaşacak şekilde üretim planlaması sundu. Ciro

et al. [72] NSGA II ve NSGA III çözüm algoritmalarını küçük ve büyük boyutlu problemler için karşılaştırmıştır. İkiiden fazla amaca sahip çok amaçlı problemlerde NSGA III algoritmasının daha anlamlı sonuçlar ürettiğini iddia ettiler. Bizim problemimiz iki amaçlı olup ciro et al. [72] iddiaları doğrultusunda NSGA II algoritmasının kullanılması uygun görülmüştür.

Toplam yenilenebilir enerji hedefini (70000) geçen çözüm %67 tatmin düzeyinde elde edildi. Bu memnuniyet düzeyinin altında hedeflerden pozitif yönde sapmalar artacağı anlamına gelir. Bu pozitif sapmalardan dolayı çok fazla maliyete katlanılacağı açıktır (Tablo 5). Yenilenebilir enerji teknolojilerinin yüksek maliyetleri, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeleri bu teknolojilere yatırım yapma konusunda sınırlar. Bu sebeple önerilen kapasite planlaması kısa vadede (2023) %79 ortak tatmin düzeyindeki planlamadır. Ancak ETKB, kısa vadede belirlediği hedeflere ulaşmak için bu maliyeti göze almak isteyebilir. Bu durumda özel sektör yatırımcısı ile iş birliğini artıracak adımlar atması önerilir.

Tablo 13. Vizyon 2023 Enerji Planlamasında Modelin Çözümlerinin Karşılaştırılması (MW)

	η	Hidrolik	Rüzgar	Güneş	Bio	jeo	Linyit	Taş K.	İthal K.	Doğalgaz	Diğer	Toplam*
LP	0.68	34261	11443	9450	3677	4155	9977	2275	9125	26161	1095	111619
NSGA II	¹ 0.92	31998	11077	7400	1896	1642	10237	1400	9962	24099	1683	101394
	² 0.79	33282	12455	8250	3051	1642	6847	1410	9942	24182	1751	102812
	³ 0.67	36420	19200	11200	3331	1777	6671	1414	9291	23499	1107	113910

¹maksimum ortak tatmin seviyesindeki çözüm, ²kırılma noktasındaki çözüm, ³minimum ortak tatmin seviyesindeki çözüm.

5.1. MALİYET VE SALINIM ANALİZİ

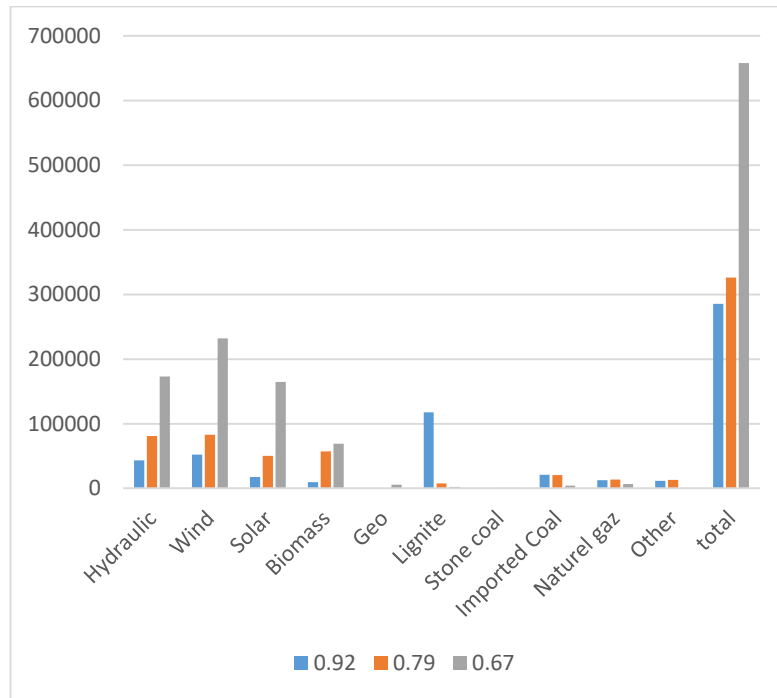
Günümüz koşullarında yenilenebilir enerji teknolojilerinin maliyetleri ithal kaynaklarınkinden daha yüksektir. Dolayısıyla hem maliyeti minimize etmek hem de yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmak birbiri ile çelişen iki amaçtır. Türkiye, 2019-2023 yıllarını kapsayan onbirinci kalkınma planında tüm kamu harcamalarının %5 (39772 Milyon TL)'ini enerji için ayırmıştır (SBB, 2019). Tablo 14'te maliyet analizi incelendiğinde bu bütçenin yetersiz kalacağı açıktır. Ayrılan bu bütçe direk olarak enerji

yatırımları için değil özel sektörü desteklemek içindir. Bu sebeple Türkiye’de yenilenebilir enerji yatırımları devlet desteği ile özel sektör tarafından yapılır.

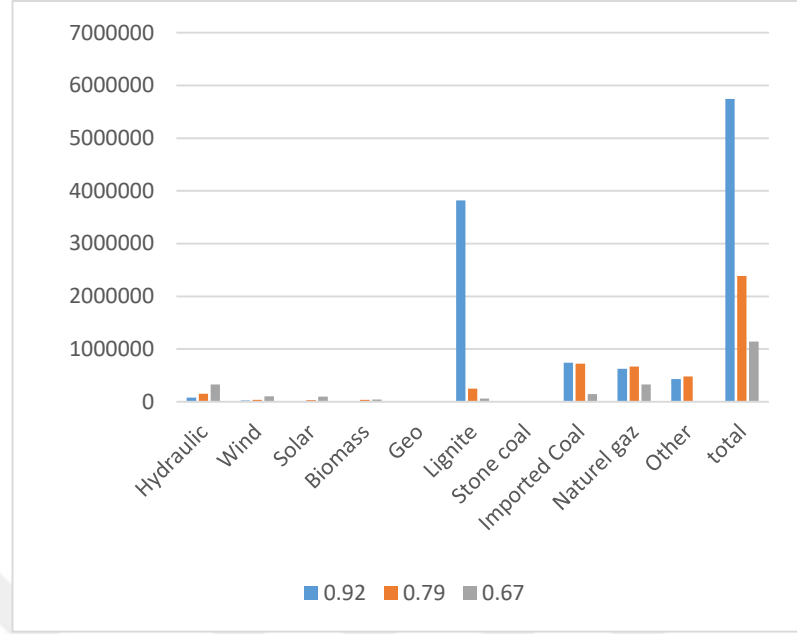
Tablo 14. Enerji Planlamasının Maliyet (Milyon tl) ve Salınım (Bin Ton) Analizi

	Hidrolik	Rüzgar	Güneş	Bio	jeo	Linyit	Taş K.	İthal K.	Doğalgaz	Diğer	Toplam*
Z^1_{obj}											
0,92	43042	52426	17429	9791	0	117700	0	20925	12540	11760	285613
0,79	80740	82921	50349	57308	0	7661	325	20425	13370	13120	326218
0,67	172872	232188	164603	68827	5889	1948	454	4150	6540	240	657710
Z^2_{obj}											
0,92	82096	23690	10350	6188	0	3821804	0	743256	625746	431004	5744134
0,79	154000	37470	29900	36218	0	248744	8880	725496	667163	480848	2388719
0,67	329728	104920	97750	43498	5130	63240	12432	147408	326346	8796	1139248

Şekil 15’te yenilenebilir enerji yatırımlarının maksimum olduğu %67 ortak tatmin düzeyinde maliyetin maksimum olduğu görülür. %92’de RE yatırımları minumum ve maliyetin de minumum olduğu görülür. Ancak bu seviyede hedeflerden sapmalar çok büyük olduğu için minumum maliyetine rağmen doğru bir yatırım planı olarak değerlendirilmemelidir. Bu durumda kırılma noktasındaki enerji kurulu güç planlaması yatırımlar için önerilebilir.



Şekil 15. Farklı Tatmin Düzeylerinde Yatırım Maliyeti



Şekil 16. Farklı Tatmin Düzeylerinde Carbon Salınımı

Küresel ısınma ve iklim değişikliği problemleri, özellikle gelişmiş ülkeler dâhil tüm dünyada enerji yatırımlarını yenilenebilir enerji lehine artırmıştır. Bu kapsamda Türkiye de yenilenebilir enerji yatırımlarını son yıllarda artırmış ve hedefler belirlemiştir. Türkiye, 2020’de 430 milyon ton karbon salınımı gerçekleştirdi. Enerji üretimi sonucu ortaya çıkan karbon salınımı, enerji kaynaklarının türüne göre büyük farklılıklar gösterir. Rüzgâr ve güneş enerjisi, en az sera gazı emisyonuna neden olan elektrik üretim kaynağı olarak dikkat çekerken linyit ve kömür ise en fazla sera gazı emisyonunu doğuran birincil kaynaklardır. Şekil 16’ya göre %67 seviyesinde toplam karbon salınımının yaklaşık dört kat azalacağı tahmin edilmektedir. Hedeflere neredeyse hiç ulaşılmadığı % 92 ortak tatmin düzeyinde maksimum salınım elde edilir. Kırılma noktasında yaklaşık %50 karbon salınımı azaltılması öngörülmüyor.

5.2. YERLİ VE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ BÖLGESEL KAPASİTE PLANLAMASI

Türkiye, sırasıyla Güneydoğu Anadolu Bölgesi (GAB), Akdeniz Bölgesi (AB), Doğu Anadolu Bölgesi (DÇ), İç Anadolu Bölgesi (CA), Ege Bölgesi (A), Marmara Bölgesi (MA) ve Karadeniz Bölgesi (BS) olmak üzere yedi coğrafi bölgeye sahiptir. Kullanılabilir yerli ve yenilenebilir enerji potansiyeli bu bölgelere farklı oranlarda

yayılmıştır. Bu çalışmanın ana konusu olan kurulu güç planlamasında kaynakların ekonomik, teknik ve çevresel kriterleri göz önünde bulundurulmuştur. Böylece yatırımların olası riskleri (kaynakların yetersiz olması, tam kapasite verim alınamaması ve karbon yoğunluğunun artması gibi) bertaraf edilmeye çalışılmıştır. GP- FMO modeli ile elde edilen sonuçlara göre bölgesel kurulu güç planlaması Tablo 6 ve Tablo 8'da sunulmaktadır. Analiz sonucumuza göre yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasite artırımı yedi bölgenin her biri için bölgelerin teknik potansiyeline göre dengeli bir şekilde planlanmıştır. Böylece her bölgenin enerji ihtiyacı potansiyeli oranında kaynak çeşitliliği sağlanarak karşılanmıştır. Ayrıca bölgeler arası enerji iletiminden kaynaklanabilecek riskler en aza indirilir.

Tablo 15. $\eta=0.67$ Memnuniyet Düzeyinde (MW) Yedi Bölge İçin Yerli ve YE Kapasite Genişletme Planlaması

	Hidrolik	Rüzgar	Güneş	Bio	jeo	Linyit	Taş K.	Toplam
Güney D.A.	1070	723	707	221	0	5	0	2726
Akdeniz	1322	1716	1267	312	0	1	0	6089
Doğu Anadolu	973	3187	985	281	0	28	0	2267
İç Anadolu	1402	1738	841	33	0	23	0	4037
Ege	668	1543	425	48	135	1	0	2820
Marmara	73	0	0	146	0	2	0	1937
Karadeniz	380	1585	25	632	0	0	14	2636
Total	5888	10492	4250	1673	135	60	14	22512

Tablo 16. $\eta=0.67$ Memnuniyet Düzeyinde İthal Enerji Kaynaklarının Kapasite Planlaması (MW)

İthal Kömür	Doğalgaz	Diğer	Toplam
166	654	12	832

Tablo 17. $\eta=0.79$ Memnuniyet Düzeyinde (MW) Yedi Bölge İçin Yerli ve YE Kapasite Genişletme Planlaması

	Hidrolik	Rüzgar	Güneş	Bio	jeo	Linyit	Taş K.	Toplam
Güney D.A.	348	640	1039	285	0	0	0	1312
Akdeniz	588	1276	741	363	0	8	0	2976
Doğu Anadolu	493	610	41	222	0	141	0	1507
İç Anadolu	758	617	166	210	0	4	0	1755
Ege	419	1261	274	71	0	65	0	1090
Marmara	58	0	0	67	0	18	0	143
Karadeniz	86	343	39	175	0	0	10	653
Toplam	2750	4747	2300	1393	0	236	10	9436

Tablo 18. $\eta=0.79$ Memnuniyet Düzeyinde İthal Enerji Kaynaklarının Kapasite Planlaması (MW)

İthal Kömür	Doğalgaz	Diğer	Toplam
817	1337	656	2810

Tablo 16 ve Tablo 18 karşılaştırıldığında amaçların ortak tatmin seviyesi artmasının sonucunda kurulu güç planlamasının ithalat lehine sonuçlandığı görülmektedir. Günümüzde ithal enerji kaynakları yenilenebilir kaynaklara oranla daha ucuz ve kapasite faktörleri daha yüksek kaynaklardır. Bu sebeple amaçların memnuniyet düzeyinin artırılması bu kaynakları ön plana çıkarmıştır. Ancak bu ETKB'nin yenilenebilir enerji hedefleri ile çelişir. Bu sebeple $\eta = 0.79$ kırılma noktasındaki çözüm sürdürülebilir bir planlama olarak önerilebilir. %79 ortak memnuniyet düzeyi oldukça kabul edilebilir bir seviyedir. Ancak karar verici amaçların daha küçük tatmin düzeyine rağmen hedeflerin gerçekleştirilmesine odaklanmak isteyebilir. Bu durumda da karar verici daha fazla maliyete razı olmak zorundadır. Bu senaryo için $\eta = 0.67$ ortak tatmin düzeyinde kurulu güç planlaması modelin önerdiği en uygun çözüm olarak değerlendirilebilir. Bu seviyenin altındaki tatmin seviyelerinde ETKB'nin belirlediği hedeflerin üzerinde planlamalar gözlendiği için %67'nin altı analize dâhil edilmedi.

Tablo 15 ve Tablo 17 incelendiğinde, M bölgesinde en yüksek kurulu güç planlaması dikkat çekmiştir. Bu bölge rüzgâr ve güneş enerji rezervleri açısından oldukça

zengindir. Bu durumda Türkiye'nin yenilenebilir enerji için özellikle M bölgesine odaklanması gerektiği açıktır. Ayrıca her iki tabloda rüzgâr enerji kaynağı ön plana çıkmıştır. Hidrolik en fazla CA bölgesinde, solar, M ve SA bölgesinde wind M ve EA Bölgelerinde and biomass M bölgesinde, lignite EA bölgesinde ve stone coal BS bölgesinde ön plana çıkmaktadır.

Hidrolik kaynak yatırım maliyetleri açısından nispeten ucuz yenilenebilir bir kaynaktır. Bu enerji kaynağı, yenilenebilir enerji kaynakları arasında teknolojik gelişme açısından en gelişmiş enerji kaynağıdır [73]. Türkiye'de hidrolik, yenilenebilir enerji kurulu gücünde en büyük paya (%63) sahiptir. Bu kaynağın büyük bir kısmı hâlihazırda kullanıldığı için kapasite artış hızının zamanla azalacağı öngörülebilir. Literatürdeki birçok çalışma [74-78] Hidroliğin Türkiye için en önemli yenilenebilir enerji kaynağı olduğunu öne sürüyor.

ETKB'nin rüzgâr hedefine ulaşmak için mevcut kapasiteye ek olarak 6292 MW kurulmalıdır. Türkiye 2014 yılında rüzgâr enerjisinden elektrik üretmeye başlasa da, hem yenilenebilir enerjiden üretilen elektrikteki payları hem de toplam elektrik üretimindeki payları önemli ölçüde artmıştır. Önemli güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olan Türkiye, teknoloji ve finansal kısıtlamalar nedeniyle bu kaynakları değerlendirememektedir [79]. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yüksek yatırım maliyetine sahip kaynaklar güneş ve rüzgârdır. Hedeflerin ekonomik uygulanabilirliği, Türkiye gibi ekonomik koşulları kısıtlı olan ülkeler için planlamada dikkate alınması gereken önemli bir kriterdir.

Modelin öngördüğü maksimum güneş enerjisi kurulu güç planlaması %67 tatmin seviyesinde 4250 MW. ETKB 2023 yılında 13050 MW güneş enerjisi kapasite artışını hedeflemiştir. Gerçek şu ki, son on yıldaki gelişimi 6950 MW ile sınırlı. Bu da mevcut koşullarda kısa sürede bu hedefe ulaşamayacağını göstermektedir. Benzer bir görüş Cınar ve ark. [80] tarafından iddia edildi. Literatür incelendiğinde bazı çalışmalar bu sonuçlar ile çelişir. Bu çalışmanın aksine, Türkiye'nin güneş ve rüzgâr enerjisine yatırım yapılması gerektiğini iddia edildi [81]. Deveci ve Güler [39], Türkiye'de 2023 için belirlenen hedefler arasında biyokütle ve Hidrolik'in optimal olmadığını ve belirlenen güneş ve rüzgar hedeflerinin erişilebilir olduğunu savundu. Melikoğlu et al. [82],

Jeotermal ve biyokütle hedeflerinin, 2023'ten önce karşılanacak ilk yenilenebilir enerji hedefleri olduğunu iddia etti. Çalışmamız biomass için bu sonucu destekler.

Küresel ısınma ve iklim değişikliği problemleri, özellikle gelişmiş ülkeler dâhil tüm dünyada enerji yatırımlarını yenilenebilir enerji lehine artırmıştır. Yenilenebilir enerji planlamalarının nihai hedefi %100 yenilenebilir enerjiye ulaşmak olsa da, kaynak potansiyeli ve ekonomi ile ilgili kısıtlamalar nedeniyle bu günümüzde pek mümkün değildir. Türkiye, yenilenebilir enerji yatırımları son yıllarda artırmış ve yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam üretimdeki payını enazından %65'e çıkarmayı hedeflemiştir. Ancak yenilenebilir enerji teknolojilerinin günümüzde maliyetli olması ve kapasite faktörlerin iklim şartlarına bağlı değişmesi bu hedeflerin ulaşılabilirliğinin sorgulanmasına neden olur. Ulaşılması istenen yenilenebilir enerji hedefleri net olarak belli olduğunda bu hedeflere ulaşılmasını kısıtlayan ekonomik, çevresel ve teknik amaçların dikkate alınması gerekir. Bu çalışmada, çelişkili amaçları kabul edilebilir tatmin seviyesinde tutarken ETKB'nin yenilenebilir enerji hedeflerine mümkün olduğunca yaklaşmanın fizibilitesini değerlendirilmektir. Karar vericinin, belirlediği hedeflere belirsiz amaçların kısıtlamaları altında ulaşmayı istediği problemler için yeni bir bulanık çok amaçlı bir model önerilmiştir. Bu modeller hem klasik LP hem de NSGA II algoritması kullanılarak çözüldü ve bu çözümler doğrultusunda tüm amaçları ortak tatmin eden farklı yatırım seçenekleri sunuldu. Önerilen model, yatırım yapılacak bölgeyi seçmesi ve bu seçilen bölgelerde uygun yatırım miktarının belirlenmesi açısından hem seçim problemi hem de atama probleminin eş zamanlı çözülmesini sağladı. Ayrıca elde edilen planlama seçenekleri için maliyet ve salınım analizlerinin elde edilmesini sağladı.

SONUÇ

Fosil yakıt enerjisinin yenilenebilir enerji kaynakları ile ikame edilebilmesi için geçerliliği kanıtlanmış bir politika formülasyonu gereklidir. Yenilenebilir enerji endüstrisinin kapasite artırımı planlama problemi, farklı santral türlerinin optimum birleşimine, mevcut santrallerin kapasite genişletilmesine ve yeni kurulacak santrallerin inşa yerine ilişkin kararları içerir. Bu çalışma, fosil ve yenilenebilir enerji santrallerinin optimum bileşimi için kapasite genişletme planlamasını içerir. Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesi için bölgelerin yerli ve yenilenebilir enerji rezervleri dikkate alınarak Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının 2023 enerji hedefleri doğrultusunda bir planlama modeli geliştirildi. Geliştirilen bu model, enerji arz güvenirliliğinin sağlanması açısından fosil kaynakların gerekli ve yeterli ithalatına da izin veren enerji kaynaklarının optimum kombinasyonunu, bu kaynakların kurulu güç gelişimini ve kurulacak bölge planlamasını sunar. Genel enerji hedeflerine ulaşılmaya çalışılırken bölgelerin rezervlerinin en doğru şekilde kullanılması çalışmanın temel amacıdır. Bu hedeflerin planlamasının sonuçları çok yönlü katkılar sunacaktır. Çok sayıda çelişen hedeflerin bulunduğu enerji sistemlerinde bu hedeflerin tümüne eşzamanlı olarak mümkün olduğunca yaklaşacak etkili bir planlama yapmak sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Bu amaçla geliştirilen çok amaçlı hedef programlama modeli, karar vericiye belirlenen hedeflerden sapmayı minimum düzeye indirgeyecek etkili bir planlama aracı sunar. Kabul edilebilir bir sapma planlamanın güvenirliliğinin göstergesidir. Türkiye, ülkenin enerji ve doğal kaynaklarda kendi kendine yeterli olmasının önemli bir boyutunun da yerli teknolojik kapasitenin varlığı olduğuna inanmaktadır. Bu strateji, ülkede Ar-Ge, yenilik ve teknolojiyi ilerletmek için bir dizi önlemlerde yansıtılmaktadır. Hükümet, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretiminde kullanılan makine ve teçhizatın yerli üretimini ve gerekli malzemelerin üretimini artırmaya yönelik politikalar uygulamıştır. Türkiye son on yılda yenilenebilir kaynaklarda (özellikle güneş, rüzgâr ve jeotermal), elverişli bir kaynak tahsisi, güçlü enerji talebi büyümesi ve destekleyici hükümet politikaları sayesinde etkileyici bir büyüme elde etmiştir. Özellikle yenilenebilir elektrik üretimi son on yılda neredeyse üç katına çıktı ve toplam elektrik üretimindeki payı 2019'da %44'e ulaştı. Analiz sonucuna göre bu oranın 2023 yılında %50'ye ulaşabileceği öngörülmüştür.

Küresel ölçekte sürekli artan enerji talebinin karşılanabilmesinde geçerli ve güvenilir öngörülerin yapılabilmesi ve bu öngörüler doğrultusunda güvenilir hedeflerin belirlenmesi doğru yatırım kararının alınmasında ilk adımı oluşturur. Bu farkındalıkla ülkeler, geleceğe yönelik enerji hedeflerini belirlerler. Belirlenen hedeflerin minimum maliyetle gerçekleştirilmesinde bir yol haritasının oluşturulması ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanması için önemlidir.

Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik maliyetleri, gelişen teknolojiler, ölçek ekonomileri, artan rekabetçi tedarik zincirleri ve artan geliştirici deneyimi nedeniyle son yıllarda düşüş eğilimine geçmiştir. Yani yenilenebilir enerji üretim teknolojileri, dünyanın hemen her yerinde yatırım için düşük maliyetli bir seçenek haline gelmiştir. Bu sayede yenilenebilir enerji yatırımları artmış ve dünya genelinde fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye geçiş hız kazanmıştır. Türkiye’de yenilenebilir enerji teknolojileri ithal edildiğinden dolayı yatırım maliyetleri yüksektir. Bu sebeple yenilenebilir enerji, kaynak bolluğuna rağmen ek kapasite yatırımları, beklenen hızda gerçekleşmeyerek genel olarak 2023 hedeflerinin altında kalınacağı öngörülmüştür.

Türkiye’nin enerji politikalarının temel ilkeleri piyasa reformu ve enerji güvenliğidir. Son yirmi yılda hızlı ekonomik büyüme ve nüfus artışı, yalnızca enerji talebinde güçlü bir büyüme sağlamakla kalmamış, aynı zamanda ithalat bağımlılığında da buna bağlı bir artışa neden olmuştur. Türkiye, enerji talebindeki artışı rasyonelleştirmek, tüketiciler için enerji fiyatlarını düşürmek ve ithalat büyüme hızını yavaşlatmak amacıyla enerji sistemini yeniden yapılandırma yoluna gitti. Bu reformlar, daha fazla özel ve yabancı yatırım yoluyla, modernizasyon, liberalizasyon ve artan yerli üretim kapasitesini hedefleyen önlemleri içermektedir. Türkiye’de enerji ithalat bağımlılığının azaltılmasındaki en önemli stratejilerden biri de yerli teknoloji üretiminin geliştirilmesidir. Bu strateji, Ar-Ge çalışmaları ve teknolojiyi ilerletmek gibi önlemleri içerir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretiminde kullanılan makine ve teçhizatın üretimini geliştirmeye yönelik adımlar atılmıştır. Türkiye’de son yıllarda hibrit enerji sistemlerinin önemli ölçüde artmıştır. Özellikle son on yılda yenilenebilir enerjiden elektrik üretiminin üç katına çıkmasıyla bu hibrit sistemler dikkate değer bir büyüme kaydetti. Türkiye'nin yakıt karışımını daha da çeşitlendirmeyi amaçlayan 2023 enerji hedefleri doğrultusunda önerdiğimiz bu bölgesel planlama enerji ithalatının optimum düzeyde nasıl azaltılabileceğinin cevabını sunmuştur.

Türkiye YE santrallerinin kurulumu için gerekli teknolojiyi ithal ettiği için RE yatırım maliyetleri, enerjiyi ithal etmenin maliyetlerinden daha yüksektir. Bu da enerji yatırımlarını ithal fosil enerjiye yönlendirmektedir. Kısa vadede önerilen enerji yatırım planlaması, belirlenen hedeflerin altında kalacağını gösterdi. Özellikle rüzgâr ve güneş enerji kaynakları için ETKB'nin belirlediği hedeflerin oldukça iddialı olduğu bu hedeflere kısa vadede ulaşmak için bazı önlemler alınması gerektiği söylenebilir. Bu önlemlerden en önemlisi, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji teknolojilerini (Güneş paneli, rüzgâr tribünleri gibi) üretebilecek yerli sanayilerin açılması ve böylece yatırım maliyetlerinin düşürülmesidir. Ayrıca, mevcut destek programlarının geliştirilmesi ve özel sektör yatırımcılarının kapasite genişletme planlarındaki etkinliğinin daha çok artırılması, ETKB'nin hedeflerine ulaşılması ve ithalatın en aza indirilmesi açısından önemlidir.

KAYNAKÇA

- Afful-Dadzie, A., Mallett, A., & Afful-Dadzie, E. (2020). "The Challenge of Energy Transition in the Global South: The Case of Electricity Generation Planning in Ghana". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 126, 109830.
- Alao, M. A., Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., & Popoola, O. M. (2020). *Multi-criteria Decision Based Waste to Energy Technology Selection Using Entropy-weighted TOPSIS Technique: The Case Study of Lagos, Nigeria*. *Energy*, 201, 117675.
- Alkan, Ö., & Albayrak, Ö. K. (2020). "Ranking of Renewable Energy Sources for Regions in Turkey by Fuzzy Entropy Based Fuzzy COPRAS and Fuzzy MULTIMOORA". *Renewable Energy*, 162, 712-726.
- Arancibia, A. L., Marques, G. F., & Mendes, C. A. B. (2016). "Systems Capacity Expansion Planning: Novel Approach for Environmental and Energy Policy Change Analysis". *Environmental Modelling & Software*, 85, 70-79.
- Aryanpur, V., Atabaki, M. S., Marzband, M., Siano, P., & Ghayoumi, K. (2019). "An Overview of Energy Planning in Iran and Transition Pathways Towards Sustainable Electricity Supply Sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 58-74.
- Aydin, N. Y., Kentel, E., & Duzgun, H. S. (2013). "GIS-based Site Selection Methodology for Hybrid Renewable Energy Systems: A Case Study From Western Turkey". *Energy Conversion and Management*, 70, 90-106.
- Bagdadee, A. H., & Zhang, L. (2020). "Electrical Power Crisis Solution by the Developing Renewable Energy Based Power Generation Expansion". *Energy Reports*, 6, 480-490.
- Bakhtavar, E., Prabatha, T., Karunathilake, H., Sadiq, R., & Hewage, K. (2020). "Assessment of Renewable Energy-Based Strategies for Net-Zero Energy Communities: A Planning Model Using Multi-Objective Goal Programming". *Journal of Cleaner Production*, 272, 122886.

- Ballarin, A., Vecchiato, D., Tempesta, T., Marangon, F., & Troiano, S. (2011). "Biomass Energy Production in Agriculture: A Weighted Goal Programming Analysis". *Energy Policy*, 39(3), 1123-1131.
- Balussou, D., McKenna, R., Möst, D., & Fichtner, W. (2018). "A Model-Based Analysis of the Future Capacity Expansion for German Biogas Plants Under Different Legal Frameworks". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 119-131.
- Baris, K., & Kucukali, S. (2012). "Availability of Renewable Energy Sources in Turkey: Current Situation, Potential, Government Policies and the EU Perspective". *Energy Policy*, 42, 377-391.
- Behera, D., Peters, K., Edalatpanah, S. A., & Qiu, D. (2021). "New Methods for Solving Imprecisely Defined Linear Programming Problem Under Trapezoidal Fuzzy Uncertainty". *Journal of Information and Optimization Sciences*, 42(3), 603-629.
- Belman, R. E. Zadeh, L.A. (1970). "Decision-Making in a Fuzzy Environment". *Management Science* 17 141-164.
- Bhuvanesh, A., Christa, S. J., Kannan, S., & Pandiyan, M. K. (2018). "Aiming Towards Pollution Free Future by High Penetration of Renewable Energy Sources in Electricity Generation Expansion Planning". *Futures*, 104, 25-36.
- Brouwer, A. S., van den Broek, M., Zappa, W., Turkenburg, W. C., & Faaij, A. (2016). "Least-Cost Options for Integrating Intermittent Renewables in low-Carbon Power Systems". *Applied Energy*, 161, 48-74.
- Broz, D., Vanzetti, N., Corsano, G., & Montagna, J. M. (2019). "Goal Programming Application for the Decision support in the Daily Production Planning of Sawmills". *Forest Policy and Economics*, 102, 29-40.
- Cany, C., Mansilla, C., Mathonnière, G., & Da Costa, P. (2018). "Nuclear Contribution to the Penetration of Variable Renewable Energy Sources in a French Decarbonised Powermix". *Energy*, 150, 544-555.
- Chan F.T.S., Jha A., Tiwari M.K. (2016). "Bi-Objective Optimization of Three Echelon Supply Chain Involving Truck Selection and Loading Using NSGA-II With Heuristics Algorithm", *Appl. Soft Comput*, 38, 978-987.

- Chang, C. T. (2011). "Multi-Choice Goal Programming With Utility Functions". *European Journal of Operational Research*, 215(2), 439-445.
- Chang, C. T. (2015). "Multi-Choice Goal Programming Model for the Optimal Location of Renewable Energy Facilities". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 379-389.
- Chang, D. I., Chung, D. S., & Hwang, C. L. (1983). "Nonlinear Goal Programming for Optimizing Rice Conditioning and Storage Systems: Part I... Modeling". *Journal of Biosystems Engineering*, 8(2), 69-85.
- Charnes, A., Cooper, WW, DeVoe, JK, Öğrenen, DB ve Reinecke, W. (1968). ""Medya Planlaması için bir Hedef Programlama Modeli". *Yönetim Bilimi*, 14 (8), B-423.
- Cinar, D., Kayakutlu, G., & Daim, T. (2010). "Development of Future Energy Scenarios With Intelligent Algorithms: Case of Hydraulic in Turkey". *Energy*, 35(4), 1724-1729.
- Ciro, G. C., Dugardin, F., Yalaoui, F., & Kelly, R. (2016). "A NSGA-II and NSGA-III Comparison for Solving an Open Shop Scheduling Problem With Resource Constraints". *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1272-1277.
- Coester, A., Hofkes, M. W., & Papyrakis, E. (2018). "Economics of Renewable Energy Expansion and Security of Supply: A Dynamic Simulation of the German Electricity Market". *Applied Energy*, 231, 1268-1284.
- Colak, H. Ebru, Memisoglu T., and Gercek, Y. (2020): "Optimal Site Selection for Solar Photovoltaic (PV) Power Plants Using GIS and AHP: A Case Study of Malatya Province, Turkey." *Renewable Energy*, 149, 565-576.
- Çolak, M., & Kaya, İ. (2017). "Prioritization of Renewable Energy Alternatives by Using an Integrated Fuzzy MCDM Model: A Real Case Application for Turkey". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 840-853.
- Dagoumas, A. S., & Koltsaklis, N. E. (2019). "Review of Models for Integrating Renewable Energy in the Generation Expansion Planning". *Applied Energy*, 242, 1573-1587.

- Daim, T. U., Kayakutlu, G., & Cowan, K. (2010). "Developing Oregon's Renewable Energy Portfolio Using Fuzzy Goal Programming Model". *Computers & Industrial Engineering*, 59(4), 786-793.
- Dash, G., & Kajiji, N. (2005). "A Nonlinear Goal Programming Model for Efficient Asset-Liability Management of Property-Liability Insurers". *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 43(2), 135-156.
- Deb, K. (2001). "Nonlinear Goal Programming Using Multi-Objective Genetic Algorithms". *Journal of the Operational Research Society*, 52(3), 291-302.
- Delgarm, N., Sajadi, B., Kowsary, F., & Delgarm, S. (2016). "Multi-Objective Optimization of the Building Energy Performance: A Simulation-Based Approach by Means of Particle Swarm Optimization (PSO)". *Applied Energy*, 170, 293-303.
- Dhahri, I., & Chabchoub, H. (2007). "Nonlinear Goal Programming Models Quantifying the Bullwhip Effect in Supply Chain Based on ARIMA Parameters". *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1800-1810.
- Dhakouani, A., Gardumi, F., Znouda, E., Bouden, C., & Howells, M. (2017). "Long-Term Optimisation Model of the Tunisian Power System". *Energy*, 141, 550-562.
- Durmaz, E. D., & Şahin, R. (2017). "NSGA-II and Goal Programming Approach for the Multi-Objective Single Row Facility Layout Problem". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(3), 941-955.
- Edalatpanah, S. A. (2020). "A Direct Model for Triangular Neutrosophic Linear Programming". *International Journal of Neutrosophic Science*, 1(1), 19-28.
- El-Quliti, S. A., Ragab, A. H. M., Abdelaal, R., Mohamed, A. W., Mashat, A. S., Noaman, A. Y., & Altalhi, A. H. (2015). "A Nonlinear Goal Programming Model for University Admission Capacity Planning With Modified Differential Evolution Algorithm". *Mathematical Problems in Engineering*. ????
- Erdoğan, S. (2016). "Enerji Arz Güvenliği Bağlamında Türkiye'de Nükleer Enerji". *Liberal Düşünce Dergisi*, (82), 79-98.
- Erpolat, S. (2010). "Üretim Planlamasında Hedef Programlama ve Bulanık Hedef Programlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması", *Dergi*, 34(9), 233-246.

- Ertay, T., Kahraman, C., & Kaya, I. (2013). "Evaluation of Renewable Energy Alternatives Using MACBETH and Fuzzy AHP Multicriteria Methods: the Case of Turkey". *Technological and Economic Development of Economy*, 19(1), 38-62.
- Fallah-Mehdipour, E., Haddad, O. B., Tabari, M. M. R., & Mariño, M. A. (2012). "Extraction of Decision Alternatives in Construction Management Projects: Application and Adaptation of NSGA-II and MOPSO". *Expert Systems With Applications*, 39(3), 2794-2803.
- Gacitua, L., Gallegos, P., Henriquez-Auba, R., Lorca, A., Negrete-Pincetic, M., Olivares, D., ... & Wenzel, G. (2018). "A Comprehensive Review on Expansion Planning: Models and Tools for Energy Policy Analysis". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 346-360.
- Gen, M., Ida, K., Lee, J., & Kim, J. (1997). "Fuzzy Nonlinear Goal Programming Using Genetic Algorithm". *Computers & Industrial Engineering*, 33(1-2), 39-42.
- He, Y., Gao, S., Liao, N., & Liu, H. (2016). "A Nonlinear Goal-Programming-Based DE and ANN Approach to Grade Optimization in Iron Mining". *Neural Computing and Applications*, 27(7), 2065-2081.
- Hocine, A., Kouaissah, N., Bettahar, S., & Benbouziane, M. (2018). "Optimizing Renewable Energy Portfolios Under Uncertainty: A Multi-Segment Fuzzy Goal Programming Approach". *Renewable Energy*, 129, 540-552.
- Hocine, A., Zhuang, Z. Y., Kouaissah, N., & Li, D. C. (2020). "Weighted-Additive Fuzzy Multi-Choice Goal Programming (WA-FMCGP) for Supporting Renewable Energy Site Selection Decisions". *European Journal of Operational Research*, 285(2), 642-654.
- Hou, J., Xu, P., Lu, X., Pang, Z., Chu, Y., & Huang, G. (2018). "Implementation of Expansion Planning in Existing District Energy System: A Case Study in China". *Applied Energy*, 211, 269-281.
- Huang, Z., Yu, H., Chu, X., & Peng, Z. (2017). "A Goal Programming Based Model System for Community Energy Plan". *Energy*, 134, 893-901.

- Hwang, C. L., Lee, H. B., Tiliman, F. A., & Lie, C. H. (1984). "Nonlinear Integer Goal Programming Applied to Optimal System Reliability". *IEEE Transactions on Reliability*, 33(5), 431-438.
- Ilbahar, E., Kahraman, C., & Cebi, S. (2021). "Location Selection for Biomass Plants by Using Fuzzy Linear Programming". *Energy*, 121189.
- Inan, E., Tekbacak, F., & Ozturk, C. (2018). "Moreopt: A Goal Programming Based Movie Recommender System". *Journal of Computational Science*, 28, 43-50.
- Iyer, G. C., Brown, M., Cohen, S. M., Macknick, J., Patel, P., Wise, M., ... & Voisin, N. (2019). "Improving Consistency Among Models of Overlapping Scope in Multi-sector Studies: The Case of Electricity Capacity Expansion Scenarios". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109416.
- Jayaraman, R., La Torre, D., Malik, T., & Pearson, Y. E. (2015). "Optimal Work Force Allocation for Energy, Economic and Environmental Sustainability in the United Arab Emirates: A Goal Programming Approach". *Energy Procedia*, 75, 2999-3006.
- Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Uría, M. R. (2005). "Approximate Resolution of an Imprecise Goal Programming Model With Nonlinear Membership Functions". *Fuzzy Sets and Systems*, 150(1), 129-145.
- Jinturkar, A. M., & Deshmukh, S. S. (2011). "A Fuzzy Mixed Integer Goal Programming Approach for Cooking and Heating Energy Planning in Rural India". *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11377-11381.
- Kabak, M., & Dağdeviren, M. (2014). "Prioritization of Renewable Energy Sources for Turkey by Using a Hybrid MCDM Methodology". *Energy Conversion and Management*, 79, 25-33.
- Karatop, B., Taşkan, B., Adar, E., & Kubat, C. (2021). "Decision Analysis Related to the Renewable Energy Investments in Turkey Based on a Fuzzy AHP-EDAS-Fuzzy FMEA approach". *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106958.
- Kim, S., Lee, H., Kim, H., Jang, D. H., Kim, H. J., Hur, J., ... & Hur, K. (2018). "Improvement in Policy and Proactive Interconnection Procedure for Renewable

- Energy Expansion in South Korea”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 150-162.
- Krog, L., & Sperling, K. (2019). “A Comprehensive Framework for Strategic Energy Planning Based on Danish and International Insights”. *Energy Strategy Reviews*, 24, 83-93.
- Krukanont, P., & Tezuka, T. (2007). “Implications of Capacity Expansion Under Uncertainty and Value of Information: the Near-Term Energy Planning of Japan”. *Energy*, 32(10), 1809-1824.
- Kumar, P., Singh, N., & Tewari, N. K. (1987). “A Nonlinear Goal Programming Model for the Loading Problem in a Flexible Manufacturing System”. *Engineering Optimization*, 12(4), 315-323.
- La Scala, M., Vaccaro, A., & Zobaa, A. F. (2014). “A Goal Programming Methodology for Multiobjective Optimization of Distributed Energy Hubs Operation”. *Applied Thermal Engineering*, 71(2), 658-666.
- Lachhwani, K. (2014). “On Solving Multi-Level Multi Objective Linear Programming Problems Through Fuzzy Goal Programming Approach”. *Opsearch*, 51(4), 624-637.
- Lavidas, G. (2020). “Selection Index for Wave Energy Deployments (SIWED): A Near-deterministic Index for Wave Energy Converters”. *Energy*, 196, 117131.
- Lee, H. B. (1978). *Integer Programming and Nonlinear Integer Goal Programming Applied to System Reliability Problems*.
- Luz, T., Moura, P., & de Almeida, A. (2018). “Multi-Objective Power Generation Expansion Planning With high Penetration of Renewables”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2637-2643.
- Mamashli, Z., Bozorgi-Amiri, A., Dadashpour, I., Nayeri, S., & Heydari, J. (2021). “A Heuristic-Based Multi-Choice Goal Programming for the Stochastic Sustainable-resilient Routing-Allocation Problem in Relief Logistics”. *Neural Computing and Applications*, 1-27.

- Mateo, J. R. S. C. (2012). *Multi-Criteria Analysis. In Multi Criteria Analysis in the Renewable Energy Industry* (pp. 7-10). London: Springer.
- McCammon, DF ve Thompson Jr, W. (1980). "Tonpilz Piezoelektrik Transdüserlerin Tasarımı, Nonlineer Hedef Programlama Kullanarak". *Amerika Akustik Derneği Dergisi*, 68 (3), 754-757.
- Melikoglu, M. (2017). "Modelling and Forecasting the Demand for Jet Fuel and Bio-based Jet Fuel in Turkey till 2023". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 19, 17-23.
- Mezher, T., Chedid, R., & Zahabi, W. (1998). "Energy Resource Allocation Using Multi-Objective Goal Programming: the Case of Lebanon". *Applied Energy*, 61(4), 175-192.
- Min, D., Ryu, J. H., & Choi, D. G. (2018). "A Long-Term Capacity Expansion Planning Model for an Electric Power System Integrating Large-Size Renewable Energy Technologies". *Computers & Operations Research*, 96, 244-255.
- Mishra, S., Panda, S., & Akcil, A. (2021). "Indispensable Role of Coal as an Energy Source in Turkey With Focus on Bodesulphurization Studies and Advances". *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100139.
- Mohsin, M., Kamran, H. W., Nawaz, M. A., Hussain, M. S., & Dahri, A. S. (2021). "Assessing the Impact of Transition From Nonrenewable to Renewable Energy Consumption on Economic Growth-Environmental Nexus From Developing Asian Economies". *Journal of Environmental Management*, 284, 111999.
- Monarchi, DE, Weber, JE ve Duckstein, L. (1976). "Doğrusal Olmayan Hedef Programlamayı Kullanan Etkileşimli Çok Amaçlı Karar Verme Yardımı". *İçinde Birden Fazla Karar Verme Kyoto 1975* (s. 235-253). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Mourmouris, J. C., & Potolias, C. (2013). "A Multi-Criteria Methodology for Energy Planning and Developing Renewable Energy Sources at a Regional Level: A Case Study Thassos, Greece". *Energy Policy*, 52, 522-530.

- Nafil, A., Bouzi, M., Anoune, K., & Ettalabi, N. (2020). "Comparative Study of Forecasting Methods for Energy Demand in Morocco". *Energy Reports*, 6, 523-536.
- Narasimhan R., (1980). "Goal Programming in A Fuzzy Environment", *Decision Science*, 11, 325–36.
- Nixon, J. D. (2016). "Designing and Optimising Anaerobic Digestion Systems: A multi-Objective Non-Linear Goal Programming Approach". *Energy*, 114, 814-822.
- Noorollahi, Y., Ghenaatpisheh Senani, A., Fadaei, A., Simaee, M., & Moltames, R. A (2021). "Framework for GIS-Based Site Selection and Technical Potential Evaluation of PV Solar Farm Using Fuzzy-Boolean Logic and AHP Multi-Criteria Decision-Making Approach.
- Odası, T. M. M. (2018). *Türkiye'nin Enerji Görünümü 2018*. Oda Raporu.
- Okada, N., & Yoshikawa, K. (1977). "Nonlinear Goal Programming Model of Area-wide, Multi-Modal Water Utilization System". *IFAC Proceedings Volumes*, 10(7), 271-278.
- Orumie, U. C., & Ebong, D. (2014). "A Glorious Literature on Linear Goal Programming Algorithms". *American Journal of Operations Research*, 4(02), 59.
- Ozcan, O., & Ersoz, F. (2019). "Project and Cost-Based Evaluation of Solar Energy Performance in Three Different Geographical Regions of Turkey: Investment Analysis Application". *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(4), 1098-1106.
- Ozturk, M., & Yuksel, Y. E. (2016). "Energy Structure of Turkey for Sustainable Development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1259-1272.
- Pang, Q. H. ve Wu, X. Y. (2014). "Optimization Scheduling Model of Double Line Shiplock Based on Nonlinear Goal Programming". *Journal of Applied Research and Technology*, 12(2), 192-200.
- Park, H., & Baldick, R. (2016). "Multi-Year Stochastic Generation Capacity Expansion Planning Under Environmental Energy Policy". *Applied Energy*, 183, 737-745.

- Pérez-Cañedo, B., Concepción-Morales, E. R., & Edalatpanah, S. A. (2019). "A Revised Version of a Lexicographical-Based Method for Solving Fully Fuzzy Linear Programming Problems With Inequality Constraints". *Fuzzy Information and Engineering*, 11(4), 474-493.
- Raju, K. S. (1978). Iterative Nonlinear Goal Programming and Application to Production Planning Problems.
- Rakpho, P., & Yamaka, W. (2021). "The Forecasting Power of Economic Policy Uncertainty for Energy Demand and Supply". *Energy Reports*, 7, 338-343.
- Ramanathan, R., & Ganesh, L. S. (1995). "Energy Alternatives for Lighting in Households: An Evaluation Using an Integrated Goal Programming-AHP Model". *Energy*, 20(1), 63-72.
- Ravi, V., Reddy, P. J., & Dutta, D. (1998). "Application of Fuzzy Nonlinear Goal Programming to a Refinery Model". *Computers & Chemical Engineering*, 22(4-5), 709-712.
- Razmi, J., Jafarian, E., & Amin, S. H. (2016). "An Intuitionistic Fuzzy Goal Programming Approach for Finding Pareto-Optimal Solutions to Multi-Objective Programming Problems". *Expert Systems With Applications*, 65, 181-193.
- Romero, C. (2004). "Bir Hedef Programlama Modeli İçin Başarı Fonksiyonunun Genel Bir Yapısı". *Avrupa Operasyonel Araştırma Dergisi*, 153 (3), 675-686.
- Saber, H. M., & Ravindran, A. (1993). "Nonlinear Goal Programming Theory and Practice: A Survey". *Computers & Operations Research*, 20(3), 275-291.
- San Cristóbal, J. R. (2012). "A Goal Programming Model for the Optimal Mix and Location of Renewable Energy Plants in the North of Spain". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4461-4464.
- Scott, I. J., Carvalho, P. M., Botterud, A., & Silva, C. A. (2019). "Clustering Representative Days for Power Systems Generation Expansion Planning: Capturing the Effects of Variable Renewables and Energy Storage". *Applied Energy*, 253, 113603.

- Seker, S., & Kahraman, C. (2020). "Socio-Economic Evaluation Model for Sustainable Solar PV Panels Using a Novel Integrated MCDM Methodology: A Case in Turkey". *Socio-Economic Planning Sciences*, 100998.
- Şekercioğlu, S., & Yılmaz, M. (2012). "Renewable Energy Perspectives in the Frame of Turkey's and the EU's Energy Policies". *Energy Conversion and Management*, 63, 233-238.
- Senatla, M., Nchake, M., Taele, B. M., & Hapazari, I. (2018). "Electricity Capacity Expansion Plan for Lesotho–Implications on Energy Policy". *Energy Policy*, 120, 622-634.
- Solangi, Y. A., Tan, Q., Mirjat, N. H., & Ali, S. (2019). "Evaluating the Strategies for Sustainable Energy Planning in Pakistan: An Integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS Approach". *Journal of Cleaner Production*, 236, 117655.
- Sovacool, B. K. (2012). "Design Principles for Renewable Energy Programs in Developing Countries". *Energy & Environmental Science*, 5(11), 9157-9162.
- Strang, K. D. (2012). "Logistic Planning With Nonlinear Goal Programming Models in Spreadsheets". *International Journal of Applied Logistics (IJAL)*, 3(4), 1-14.
- Şengül, Ü., Eren, M., Shiraz, S. E., Gezder, V., & Şengül, A. B. (2015). "Fuzzy TOPSIS Method for Ranking Renewable Energy Supply Systems in Turkey". *Renewable Energy*, 75, 617-625.
- Taguchi, T., Ida, K., & Gen, M. (1997). "Method for Solving Nonlinear Goal Programming With Interval Coefficients Using genetic Algorithm". *Computers & Industrial Engineering*, 33(3-4), 597-600.
- Taylor III, B. W., Moore, L. J., Clayton, E. R., Davis, K. R., & Rakes, T. R. (1985). "An Integer Nonlinear Goal Programming Model for the Deployment of State Highway Patrol Units". *Management Science*, 31(11), 1335-1347.
- Uddin, M. S., Miah, M., Khan, M. A. A., & AlArjani, A. (2021). "Goal Programming Tactic for Uncertain Multi-Objective Transportation Problem Using Fuzzy Linear Membership Function". *Alexandria Engineering Journal*, 60(2), 2525-2533.

- Vukadinović, A., Radosavljević, J., Đorđević, A., Protić, M., & Petrović, N. (2021). "Multi-Objective Optimization of Energy Performance for a Detached Residential Building With a Sunspace Using the NSGA-II Genetic Algorithm". *Solar Energy*, 224, 1426-1444.
- Wright, J. G., Bischof-Niemz, T., Calitz, J. R., Mushwana, C., & van Heerden, R. (2019). "Long-Term Electricity Sector Expansion Planning: A Unique Opportunity for a Least Cost Energy Transition in South Africa". *Renewable Energy Focus*, 30, 21-45.
- Wu, Y., Zhang, T., Xu, C., Zhang, B., Li, L., Ke, Y., ... & Xu, R. (2019). "Optimal Location Selection for Offshore Wind-PV-Seawater Pumped Storage Power Plant Using a Hybrid MCDM Approach: A Two-Stage Framework". *Energy Conversion and Management*, 199, 112066.
- Wujing, H., Zhang, N., Chongqing, K., Capuder, T., Holjevac, N., & Kuzle, I. (2018). "Beijing Subsidiary Administrative Center Multi-Energy Systems: An Optimal Configuration Planning". In *11th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*.
- Xu, Z., Ming, X. G., Zheng, M., Li, M., He, L., & Song, W. (2015). "Cross-Trained Workers Scheduling for Field Service Using Improved NSGA-II". *International Journal of Production Research*, 53(4), 1255-1272.
- Yılmaz, E. A., & Öziç C. H. (2018). "Turkey's Renewable Energy Potential and Future Goals". *ODU Journal of Social Sciences Research (ODÜSOBİAD)*, 8(3), 525-535.
- Yılan, G., Kadirgan, M. N., & Çiftçioğlu, G. A. (2020). "Analysis of Electricity Generation Options for Sustainable Energy Decision Making: The Case of Turkey". *Renewable Energy*, 146, 519-529.
- Yoshikawa, K., & Okada, N. (1977). "Nonlinear Goal Programming Approach to Inter-basin, Multi-Modal Water Assignment Problem. In Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers", *Japan Society of Civil Engineers*, No. 266, 135-147.

- Zappa, W., & van den Broek, M. (2018). “Analysing the Potential of Integrating Wind and Solar Power in Europe Using Spatial Optimisation Under Various Scenarios”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1192-1216.
- Zheng, D. W., Gen, M., & Ida, K. (1996). “Evolution Program for Nonlinear Goal Programming”. *Computers & Industrial Engineering*, 31(3-4), 907-911.
- Zhao, J., Patwary, A. K., Qayyum, A., Alharthi, M., Bashir, F., Mohsin, M., ... & Abbas, Q. (2022). “The Determinants of Renewable Energy Sources for the Fueling of Green and Sustainable Economy”. *Energy*, 238, 122029.
- Zografidou, E., Petridis, K., Arabatzis, G., & Dey, P. K. (2016). “Optimal Design of the Renewable Energy Map of Greece Using Weighted Goal-Programming and Data Envelopment Analysis”. *Computers & Operations Research*, 66, 313-326.
- Zografidou, E., Petridis, K., Petridis, N. E., & Arabatzis, G. (2017). “A Financial Approach to Renewable Energy Production in Greece Using Goal Programming”. *Renewable Energy*, 108, 37-51.

Kitaplar

- Cinemre, N. (2011). *Yöneylem Araştırması*. Evrim Yayınevi
- Jones, D., & Tamiz, M. (2010). *Practical goal programming (Vol. 141)*. New York: Springer.
- Sarker, R. A., & Newton, C. S. (2007). *Optimization modelling: a practical approach*. CRC Press.

Raporlar

- DPT, Y. P. (2009). Electricity Market and Supply Security Strategy Paper. TC. Prime Ministry Under secretariat of State Planning Organization.
- EPDK, (2018). Petrol Piyasası 2018 Yılı Sektör Raporu. <https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu>
- IEA, (2021). Turkey 2021: Energy Policy Evaluation, <https://www.iea.org/reports/turkey-2021>
- Özev, M. H. (2017). *Küresel Denklemden Türkiye'nin Enerji Güvenliği*. SETA.

SBB. (2019), Türkiye Cumhuriyeti cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 11. Kalkınma Planı (2019-2023).

World Energy Council (2019). World Energy Scenarios 2019.

https://www.worldenergy.org/assets/downloads/European_Scenarios_FINAL_for_website_v2.pdf.

Sempozyumlar

Türkyılmaz, O. 2007. Doğal Gaz Piyasasının Yeniden Yapılandırılması. TMMOB Türkiye VI. Enerji Sempozyumu-Küresel Enerji Politikaları ve Türkiye Gerçeği. 22-24 Ekim 2007, Ankara, S.159-184.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Mesliha GEZEN
Doğum Yeri ve Tarihi	
Eğitim Durumu	
Lisans Öğrenimi	Fırat Üniversitesi
Y. Lisans Öğrenimi	Atatürk Üniversitesi
Bildiği Yabancı Diller	
Bilimsel Faaliyetleri	
İş Deneyimi	
Stajlar	
Projeler	
Çalıştığı Kurumlar	
İletişim	
E-Posta Adresi	
Tarih	