

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**2018-2023 YILLARI ARASINDA TÜRKİYE’NİN YENİLENEBİLİR ENERJİ
YATIRIM PORTFÖYÜNÜN KURGULANMASI: ÇOK AMAÇLI DOĞRUSAL
PROGRAMLAMA METODU ÖNERİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Berker BAYAZIT

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**2018-2023 YILLARI ARASINDA TÜRKİYE’NİN YENİLENEBİLİR ENERJİ
YATIRIM PORTFÖYÜNÜN KURGULANMASI: ÇOK AMAÇLI DOĞRUSAL
PROGRAMLAMA METODU ÖNERİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Berker BAYAZIT
(301141004)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Gülgün KAYAKUTLU

HAZİRAN 2018

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301141004 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Berker BAYAZIT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “2018-2023 YILLARI ARASINDA TÜRKİYE’NİN YENİLENEBİLİR ENERJİ YATIRIM PORTFÖYÜNÜN KURGULANMASI: ÇOK AMAÇLI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA METODU ÖNERİSİ ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Gülgün KAYAKUTLU

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Önder GÜLER

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Barış SELÇUK

Bahçeşehir Üniversitesi

Teslim Tarihi : 25 Nisan 2018

Savunma Tarihi : 08 Haziran 2018

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının başından sonuna kadar her konuda bilgi ve birikimini benimle paylaşan, bana yol gösteren değerli danışman hocam Sn. Prof. Dr. Gülgün Kayakutlu'ya,

Yüksek Lisans eğitimim boyunca, bilgi ve deneyimlerini yansıtan, her konuda yardımcı olan İTÜ Enerji Enstitüsü'nün tüm öğretim üyeleri ve personeline,

Yüksek Lisans eğitimim süresince, iş hayatım ile birlikte eğitimimi sağlıklı bir şekilde sürdürmem noktasında beni destekleyen Eko Yenilenebilir Enerjiler A.Ş. CEO'su Sn.Serhan Süzer'e ve Çalık Enerji - Enerji Yatırımları Direktörü Sn.Hikmet Gökoğlu'na,

Ve desteğini sürekli yanımda hissettiğim ve bu çalışmayı yapmamda benim için büyük bir motivasyon kaynağı olan aileme ve zor zamanlarda desteğiyle sürekli bana yardımcı olan Müge Avşar'a

Sonsuz saygı ve sevgilerimle teşekkürlerimi sunarım.

Hazira 2018

Berker Bayazıt
(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. DÜNYA ELEKTRİK ENERJİSİ PİYASASINA BAKIŞ.....	3
2.1 Genel Görünüm	3
2.2 Elektrik Enerjisi Yatırımları	7
2.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	10
2.4 CO ₂ Salınımı ve Çevresel Kaygılar	14
3. TÜRKİYE VE ELEKTRİK PİYASASI	17
3.1 Elektrik Piyasasının Dinamikleri ve İşleyişi.....	17
3.2 Kurulu Güç ve Elektrik Üretim Kapasitesi.....	21
3.3 Cari Açık.....	24
3.4 Milli Enerji ve Maden Politikası.....	26
3.5 Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları	26
3.5.1 Güneş enerjisi	26
3.5.2 Rüzgâr enerjisi.....	28
3.5.3 Jeotermal enerji.....	29
3.5.4 Biyogaz enerjisi	30
3.5.5 Hidroelektrik enerjisi	31
3.6 Enerjide Öncelikli Hedefler.....	32
3.7 Yerel Enerji Piyasasında Dinamizm	34
4. YÖNTEM.....	37
4.1 Çok Amaçlı Programlama	38
4.2 Doğrusal Programlama	40
4.3 Doğrusallaştırma ve Parametrelendirme Yaklaşımı	41
5. PROBLEM VE ÖNERİLEN ÇÖZÜM MODELİ.....	45
5.1 Karar Değişkenleri.....	45
5.2 Kısıtlar	46
5.2.1 Elektrik üretimi kısıtı.....	46
5.2.2 Kurulu güç kısıtı	46
5.2.3 Pozitif olma kısıtı	48
5.2.4 Şebeke altyapı kısıtı.....	48
5.2.5 Kaynak dağılım kısıtı	48
5.3 Amaç Fonksiyonları.....	49
5.3.1 Toplam elektrik üretim maliyeti	49

5.3.2 Toplam CO ₂ salınım miktarı	49
5.3.3 Toplam istihdam miktarı (sosyal fayda)	50
5.3.4 Toplam ekonomik fayda	50
5.4 Parametreler ve Veriler	50
5.5 Matematiksel Model ve Çözüm Yaklaşımı	50
6. ÖRNEK ÇALIŞMA: 2018-2023 ARASI TÜRKİYE YENİLENEBİLİR	
ENERJİ KURULU GÜÇ DAĞILIMI.....	55
6.1 Parametre ve Veriler	55
6.1.1 Kapasite faktörü.....	55
6.1.2 Üretilen elektrik miktarı	56
6.1.3 Kurulu güç ve üretilen enerji	56
6.1.4 Yatırım ve işletme maliyetleri	57
6.1.5 Elektrik satış fiyatı ve uzun dönem öngörüsü.....	59
6.1.6 Ekonomik ömür	61
6.1.7 Degredasyon	61
6.1.8 Net bugünkü değer analizi.....	61
6.1.9 Çevresel katkı faktörü (CO ₂ emisyon salınımı).....	62
6.1.10 Elektrik üretim hedefi.....	63
6.1.11 Kurulu güç hedefi.....	63
6.1.12 Şebeke altyapı sınırı	64
6.1.13 Sosyal (istihdam) katkı faktörü	64
6.1.14 Ekonomik katkı faktörü.....	65
6.2 İşletim ve Çözücü	65
6.3 Çıktılar ve Değerlendirmeler	66
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	79
EKLER.....	85

KISALTMALAR

DGP	: Dengeleme Güç Piyasası
EDM	: Enerji Dengesizlik Miktarı
EPİAŞ	: Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
ETKB	: Enerji Tabi Kaynaklar Bakanlığı
EÜAŞ	: Elektrik Üretim A.Ş.
GİP	: Gün İçi Piyasası
GÖP	: Gün Öncesi Piyasası
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IRENA	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
MTYM	: Milli Tevzi Yük Merkezi
PTF	: Piyasa Takas Fiyatı
SMF	: Sistem Marjinal Fiyatı
TEDAŞ	: Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TETAŞ	: Türkiye Elektrik Ticaret A.Ş.
YAL	: Yük Alma Miktarları
YAT	: Yük Atma Miktarları

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Ülke bazında enerji politikaları.	7
Çizelge 2.2: Global enerji yatırımlarının durumu.....	7
Çizelge 2.3: Bazı ülkeler için yenilenebilir enerji hedefleri.	13
Çizelge 5.1: Örnek sonuç çizelgesi.....	45
Çizelge 6.1-a: Kapasite faktörü.	55
Çizelge 6.1-b: Kapasite faktörü.	56
Çizelge 6.2: Yıllık üretilen enerji miktarı (MWh/MW-Yıl).....	56
Çizelge 6.3: Şubat 2018 itibariyle Türkiye’de kurulu güç ve üretilen elektrik miktarı.	57
Çizelge 6.4: Yatırım maliyeti (\$/MW) (A_{ij}).	58
Çizelge 6.5: Sabit işletme maliyeti (\$/MW) (B_{ij}).	58
Çizelge 6.6: Değişken işletme maliyeti (\$/MWh) (C_{ij}).	59
Çizelge 6.7: Yakıt maliyeti (\$/MWh) (D_{ij}).	59
Çizelge 6.8: İhale satış fiyatı (\$/MWh) (E_{ij}).	60
Çizelge 6.9: Piyasa satış fiyatı projeksiyonu (\$/MWh) (E_{ij}).	61
Çizelge 6.10: Ekonomik ömür (n).	61
Çizelge 6.11: 1MWp kurulu güç için net Bugünkü Değer Analizi (NPV) (M\$/MWp) (N_{ij}).	62
Çizelge 6.12: Elektrik üretimi miktarı başına CO ₂ salınım miktarı.	63
Çizelge 6.13: Yenilenebilir enerji kaynakları kurulu güç tahmin ve hedefleri (MW) (ETKB, Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı, 2014) ve sektör öngörüsü.	64
Çizelge 6.14: Şebeke altyapı sınırı (MW-yıl) (D_i).	64
Çizelge 6.15: Yenilenebilir enerji kaynakları farklı yaşam döngülerinde Türkiye’de istihdama olan katkısı (Kişi/MW) (α_i).	64
Çizelge 6.16: Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye’de ki ekonomik katkısı (\$/MW-yıl) (δ_i).	65
Çizelge 6.17: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW) (hedef: %35). ...	66
Çizelge 6.18: q katsayıları ve iterasyon sayıları	67
Çizelge 6.22: Yıllar Bazında Toplam Yenilenebilir Enerji Üretim Miktarı (GWh) (hedef: maksimum %35)	71
Çizelge 6.23: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW) (hedef: minimum %35), (CO ₂ salınım faktörü eşit alınır).	72
Çizelge 6.24: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW) (hedef: minimum %35), (istihdam faktörü eşit alınır).	72
Çizelge 6.25: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW) (hedef: minimum %35), (cari açık faktörü eşit alınır).	72

Çizelge 6.26: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW) (hedef: minimum %30-%35-%40)	73
Çizelge 6.27: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW) (hedef: minimum %45).....	73
Çizelge 6.28: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW) (hedef: minimum %50).....	74
Çizelge 6.29: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW) (hedef: minimum %35), (şebeke sınırı her sene 4500MW)	74
Çizelge B.1: 2016 yılı ulusal enerji denge tablosu.....	91

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: 2016 itibariyle dünyada birincil enerji kaynaklarının tüketim miktarları ...	3
Şekil 2.2: Elektriğe erişimi olmayan nüfusun dünya üzerinde dağılımı.....	4
Şekil 2.3: Enerji talebinde geçmiş dönem yıllık ortalama artışı ve gelecekte büyüme öngörüsü.....	5
Şekil 2.4: 2017 yılında dünyada elektrik üretiminde kaynak dağılımı.....	5
Şekil 2.5: Kaynak bazında dünyada mevcut kurulu güç ve gelecek projeksiyonu.....	6
Şekil 2.6: Dünyada yıllık bazda eklenen kurulu güç miktarları.....	8
Şekil 2.7: Elektrik enerjisi sektöründe global yıllık ortalama ve toplam yatırım miktarı ve öngörüsü.....	9
Şekil 2.8: Ülke bazında 2016 yılında global yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırım.....	9
Şekil 2.9: 2017-2040 yılları arasında dünyanın farklı bölgelerinde mevcut kapasitelere eklenecek yenilenebilir enerji kapasitelerinin öngörülleri.....	11
Şekil 2.10: Yeni teknolojiler ve politikalar çerçevesinde 2017-2030 yılları arasında elektrik erişimi ne kavuşacak insan sayısı.....	12
Şekil 2.11:Yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya çapında gelişimi ve gelecek projeksiyonu ile bu kaynakların için sağlanan destek miktarının değişimi	12
Şekil 2.12: Elektrik üretim kaynaklarında CO ₂ 'in yaşam döngü değerlendirmesi. ..	15
Şekil 2.13: Farklı enerji üretim kaynaklarının yaşam döngüsü boyunca birim elektrik Şekil 2.13 (kWh) başına ürettiği CO ₂ emisyon miktarı.....	15
Şekil 2.14: Rüzgar ve güneş enerjisinin yaşam döngüsü boyunca ürettiği CO ₂ salınımının yüzde dağılımı.....	16
Şekil 3.1: Türkiye elektrik piyasası özet şeması.....	19
Şekil 3.2: GÖP Oranı(%), GDP Oranı(%), EDM Oranı(%)......	19
Şekil 3.3: Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü–2017 Kasım Sonu.....	22
Şekil 3.4: Türkiye’de elektrik üretimi–2017 Kasım Sonu.....	23
Şekil 3.5: Türkiye’nin değerlendirebileceği yenilenebilir enerji kapasitesi.....	24
Şekil 3.6: Sürdürülebilir büyüme senaryosunda 2030’a kadar Türkiye elektrik sektöründe yapılması öngörülen yatırım miktarı.....	24
Şekil 3.7: Türkiye Cumhuriyeti cari işlemler dengesi.....	25
Şekil 3.8: Güneş enerjisi potansiyel atlası.....	27
Şekil 3.9: Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyel atlası (REPA) – Rüzgar hızı (50m yükseklik).....	28
Şekil 3.10: Türkiye’de jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası.....	30
Şekil 3.11: Biyogaz üretim sisteminde hammadde ve enerji akışları diyagramı	31
Şekil 4.1: Çok amaçlı programlama çözüm tekniklerinin önceliklendirmeye göre sınıflandırılması.....	39
Şekil 4.2:Çok amaçlı programlamanın karar degiskenlerinin yapısına göre sınıflandırılması.....	40

Şekil 4.3: Bir fonksiyonda global maksimum noktası.....	43
Şekil 5.1: Çözüm yöntemine ilişkin akış şeması.	53
Şekil 6.1: Türkiye’de elektrik tüketimi: son veriler ve tahminler.....	63

2018-2023 YILLARI ARASINDA TÜRKİYE’NİN YENİLENEBİLİR ENERJİ YATIRIM PORTFÖYÜNÜN KURGULANMASI: ÇOK AMAÇLI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA METODU ÖNERİSİ

ÖZET

Dünya enerji görünümüne bakıldığında önümüzdeki birkaç on yıl içerisinde dünya enerji piyasalarının ciddi bir dönüşüm geçireceği öngörülmektedir. Öncelikle CO₂ emisyonunun azaltılması ve COP21’in getirdiği aksiyon planı ile birlikte özellikle yenilenebilir enerji üretim teknolojileri alanında yaşanan hızlı gelişmeler ülkelerin orta ve uzun vadede enerji üretim ve tüketim alışkanlıklarında etkili olacaktır. Bununla birlikte dünyada enerji tüketiminde elektrik enerjisinin payının 2040 yılında %40 oranına çıkması beklenmektedir. Elektrik enerjisinin bu gelişiminde öne çıkacak teknolojiler ve yenilikler; elektrikli araçlar, ısı pompaları, yeni elektronik cihazlar ve digital teknolojilerdir.

Tüketim tarafında talep edilen bu elektrik enerjisinin karşılanması için ülkelerin elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtım gibi alanlarında yeni yatırımlar yapması gerekmektedir. Özellikle CO₂ salınımlarının engellenmesi ve daha ucuz elektrik enerjisine erişim için ülkelerin elektrik enerjisi üretim portföyü hayati önem taşımaktadır dolayısıyla araştırma ve geliştirme yatırımlarının ağırlıklı kısmı elektrik enerjisinin üretimi için yapılacaktır.

Bu noktada bakıldığında bir ülkenin elektrik enerjisi üretiminde kaynak çeşitliliği ve kaynak planlaması gerek CO₂ salınım hedeflerine ulaşmasında gerekse elektrik enerjisini makul fiyatlarla vatandaşlarına sağlaması noktasında önem arzmetkedir. Tabiki elektrik enerjisi dediğimiz zaman konuya sadece CO₂ emisyonu ve ekonomik kaygılarla yaklaşmak yeterli olmayacaktır, bununla birlikte yapılan yatırımlarla yaratılan istihdam ve ülkelerin makroekonomik verilerinde yaratılan pozitif katkılar da önemli etkenlerdir.

Bu çalışmada yukarıda özetlenen bilgiler çerçevesinde Türkiye’nin 2018-2023 yılları arasında yenilenebilir enerji yatırımlarının (güneş, rüzgar, jeotermal, biyogaz ve hidroelektrik) 4 farklı amaç (CO₂ emisyonu, teşvikler ve elektrik fiyatları dâhil toplam yatırım miktarları, toplam istihdam miktarı ve toplan cari açığa pozitif katkı) gözetilerek nasıl kurgulanması gerektiği araştırılmıştır. Çok Amaçlı Programlama metodu kullanılarak R-Paket programında modelleme yapılmıştır. Bu metodda amaç fonksiyonlarının kullanıcı önceliği olmadan tekil hale getirilebilmesi için ise Dinkelbach’ın algoritması ve Güzel’in geliştirdiği yaklaşım kullanılmıştır. Ayrıca açıklanan mevcut hükümet politikalarıda bu çalışmanın sonuçlarına göre değerlendirilmiş ve tartışılmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda görülmektedir ki kurulu güç dağılımında teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel etkenler doğru şekilde değerlendirildiğinde en uygun yatırım planlaması doğru ve sağlıklı bir şekilde yapılabilir.

Ayrıca bu çalışmanın sonucunda, rüzgâr ve güneş enerjisi için büyük güçlerde kapasite tahsisi ve yerli ekipman üretim zorunluluğu, şebeke altyapısına yatırımı ve jeotermal-biyogaz santralleri için yeniden tasarlanmış teşvik mekanizmaları gibi bazı yeni politikaların uygulanması önerilmektedir.

CONSTRUCTION OF A RENEWABLE ENERGY INVESTMENT PORTFOLIO IN TURKEY (2017-2023): A MULTI-OBJECTIVE LINEAR PROGRAMING MODEL PROPOSAL

SUMMARY

The World Energy Outlook shows that energy markets will substantially change within a few forthcoming decades. First, determined action plans according to COP21 and aim of CO₂ emission reduction had a remarkable impact on country based policies. Secondly, swiftly changing technological developments, like high efficiency solar power panels and higher power output wind turbines, in the field of renewable energy is influential upon medium and long-term energy generation and consumption behaviors. Furthermore, share of electricity on global energy consumption is to be expected as high as 40 percent in 2040. Electrical vehicles, heat pumps, new electronical devices and digital improvements in all the industries will be the testimony of market modifications.

In order to respond to the highly increasing electricity demand caused by technologies and population growth, new investments are to be planned in electricity production, transmission and distribution infrastructure. Specifically, electricity generation mix becomes vital for both prevention of CO₂ emissions and reduction of electricity power prices. Majority of the research and development investments are made in the field of electricity generation. Lots of developed countries are investing renewable sources and making effort the point of creating international brands.

Hence, the prime source diversity and source planning of electricity generation are crucial for improving the wealth of citizen life. Approaches considering the CO₂ emission and total cost of power generation, are necessary but not sufficient to evaluate and construct the product mix. On the other hand, employment and positive contribution on macro-economic values are important factors that have to be taken into consideration.

In this study, multi objective lineer programing aproach has been used in order to solve multi-objective energy portfolio problem. In literature, multi objective aproach has been divided into four different processes; those are prioritization before, during, and after solution processes and non-prioritization process. When we evaluate mentioned portfolio problem, non-prioritization aproach has been choosen as a best fit aproach. Because energy generation problems are substantially related to different micro and macro factors so that prioritization should not be a direct parameter on future portfolio.

This study aims to constitute a new investment portfolio in renewable energies (solar, wind, geothermal, biogas and hydropower) in Turkey between 2018-2023 under 4 different goals. Therefore, a multi-objective programming model is proposed to optimize the goals of minimizing the CO₂ emission, investment amount, while maximizing the total employment and positive contribution on current deficit. In order

to avoid the user preference among the goals Dinkelbach's algorithm and Guzel's approach have been combined. When investment amount is calculated, net present value approach is used and lots of economic indicator related to sources like Capex (Capital Expenses), Opex (Operational Expenses), electricity prices and future prediction, fuel prices have been taken into consideration. The achievements have been discussed with comparison to the current policies.

In order to implement selected algorithm and approach, R programming tool is used. GLPK multi-objective solver has been selected and implemented. 4 main objective functions, 74 constraints and 30 decision variables have been defined and created in a unique code.

The study takes into account the crucial constraints like (i) renewable resources are foreseen to achieve 35% share in total electricity generation capacity of 2023. (ii) availability of grid infrastructure renewable capacity must be maximum 3.5GW at 2018 and increase 0.5GW each year up to 2023. (iii) total installed wind energy capacity must be minimum 20 GW at the end of 2023. Most of them were created and used in this model.

The predicted portfolio shows that wind energy should be the largest new constructed renewable energy source for Turkey. It is expected to have almost 2.5GW additional capacity each year to meet the constraints. Besides, solar and hydropower are pointed as the two important sources for a beneficial portfolio plan. When we reach up to 2023, cumulative solar and hydropower installed capacity have been expected to be 7.3GW and 34GW respectively.

The achieved results, have been compared with various national and international database and reports. Comparison tables have been shared in section 6. Obtained numbers of installed renewable capacity and generated energy from renewable sources generally coincide with published reports, however differences are observed for some distinct years. Especially IEA numbers and Turkey's targets do not match each other, updating of IEA database and Turkey's target will abolish incompatibility of value differences.

Outputs of this study directs for the discussions on new policies like huge capacity allotment, although obligation for local production is positive. In Turkey, Renewable Energy Projects are widely implemented thanks to 1GW solar and 1GW wind power plant allowances without licenses. With YEKA rules, local production of main equipment (pv panel for solar power plant and wind turbine for wind power plant) and use local products in construction of the power plants became compulsory for investors. Impact of these changes are also evaluated in the portfolio prediction realised in this thesis.

As a result of this study we can recommend that the grid infrastructure can be improved and re-design support can be given for the biogas and geothermal energy use in power production. Different kind of inspiring incentives can be provided or new mechanisms can be put into practice. Furthermore, increasing the capacity factor for existing power plants can be an advantage of satisfying the target rate of renewable energy share before targeted time.

It is also recommended that the regulator has to consider construction period of investments. It is known that the construction period for different sources of the same capacity is substantially different, so it should be taken as a parameter in the decision process.

Finally, this study can be improved by using a non-linear multi objective programming model using real time learning. Further studies should also take into account the risk calculations and interaction of different sources.

1. GİRİŞ

Türkiye Cumhuriyeti gelişen ekonomisi, sanayisi ve teknolojik altyapısı ile her geçen gün elektrik tüketimini arttırmaktadır. Elektrik enerjisi bir ülkenin gelişmişlik düzeyi için önemli bir gösterge olduğundan, elektrik enerjisinin üretiminden, kaynak teminine, iletim ve dağıtımından, son kullanıcı üzerindeki talep yönetimine kadar önemle ele alınması gerekli konular içerir.

Türkiye, hedefleri doğrultusunda yürüyerek bir taraftan ekonomisini büyütürken, gelişmişlik düzeyini arttırabilmek için elektrik üretim kapasitesini teknolojik, ekonomik, çevresel ve sosyal eğilimleri göz önüne alarak arttırmak zorundadır.

Bu çalışma kapsamında yakın vadede Türkiye'nin elektrik enerjisi üretimine büyük katkıyı sağlayacak yenilenebilir enerji kaynaklarının 2018-2023 projeksiyonu incelenmiş ve belirlenen politikalar, hedefler, teşvikler, beklentiler ve kısıtlar altında yakın gelecek modellenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın amacı, Türkiye'nin 2018-2023 arası döneminde artan elektrik talebini karşılamak için güneş-rüzgâr-jeotermal-biyogaz ve hidroelektrik kaynaklarından ne kadarlık bir kurulu gücü hangi yıllarda kurulması gerektiği tespit edilmeye çalışılmaktır.

Modelleme çalışmasında yöneylem araştırma alanlarından biri olan “Çok Amaçlı Doğrusal Programlama Modeli” R paket yazılımından yararlanılarak kurulmuştur. Ayrıca Dinkelbach algoritması ve Güzel'in geliştirdiği yaklaşım ile çok amaçlı problem tek amaçlı hale dönüştürülmüş, çözülmüş ve sonuçları elde edilmiştir (Güzel, 2013; Chen, 2015).

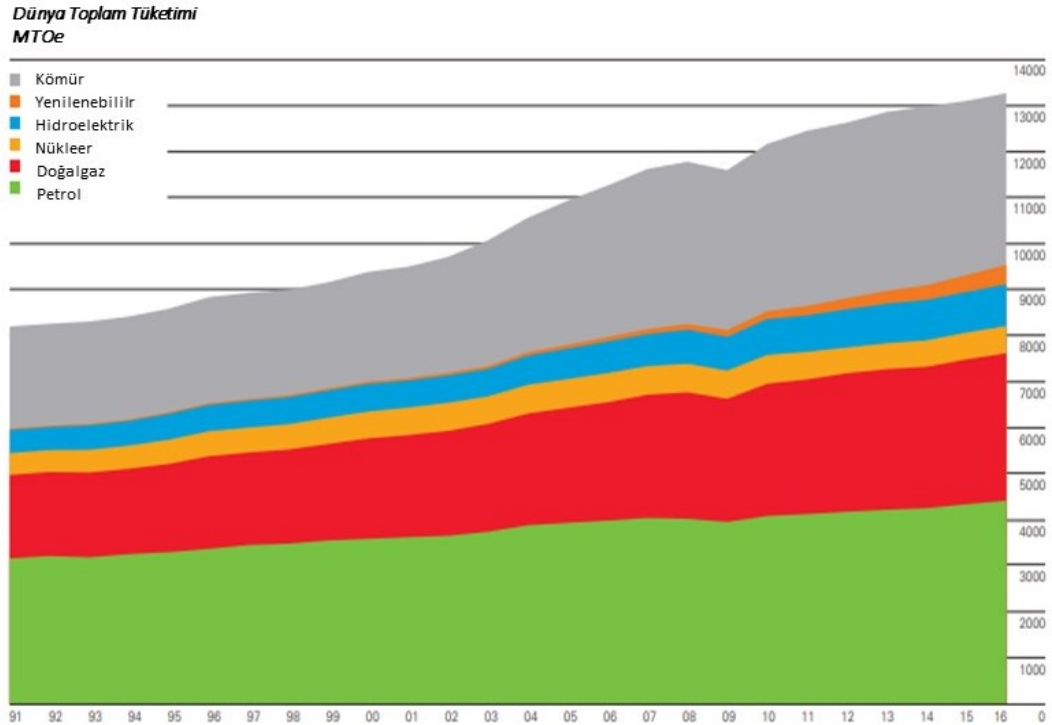
Çalışmanın ikinci ve üçüncü bölümünde sırasıyla dünya elektrik enerji piyasası ve Türkiye elektrik enerjisi piyasası incelenmiş, daha sonra dördüncü bölümde yapılacak çalışmanın yöntemine ilişkin bilgiler paylaşılmıştır. Beşinci bölümde problem ve önerilen model detaylıca tanıtılmış ve kullanılacak yöntem anlatılmıştır. Altıncı bölümde örnek çalışma olarak 2018-2023 yılları arasında Türkiye'de ki yenilenebilir enerji kurulu kapasiteleri ile ilgili senaryo işletilmiş ve çıktılar paylaşılmıştır. Son bölümde ise çalışmaya ilişkin sonuç ve öneriler verilmiştir.

2. DÜNYA ELEKTRİK ENERJİSİ PİYASASINA BAKIŞ

2.1 Genel Görünüm

Yapılan tahminlerde dünya ekonomisinin yılda %3.4 oranında büyümesi ve dünya nüfusunun 2040 yılı itibariyle 9 milyara ulaşacağı öngörülmektedir. Dünya nüfusu bu şekilde artarken, teknolojik gelişmelerde baş döndürücü bir hızda gerçekleşmektedir. İnsanların tüketim alışkanlıkları ve yaşam standartları değişmekte, bununla birlikte enerji alanında da ihtiyaç duyulan üretim-tüketim miktarları giderek artmaktadır.

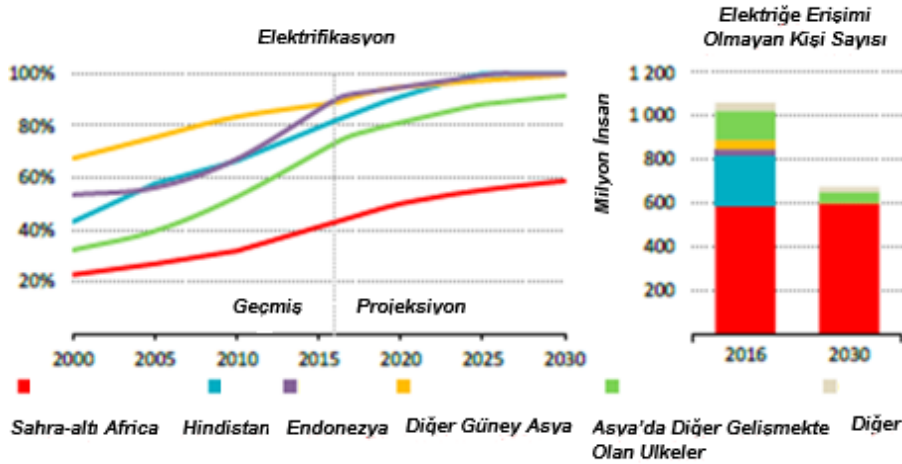
2016 yılı itibariyle dünyada birincil enerji tüketimine baktığımızda hala fosil kaynaklı petrol, doğalgaz ve kömürün yüksek bir orana sahip olduğu görülmektedir. Buna karşın yenilenebilir enerji kaynakları kendine son yıllarda yer bularak bu grafikte daha büyük yere sahip olacak şekilde gelişmektedir.



Şekil 2.1: 2016 itibariyle dünyada birincil enerji kaynaklarının tüketim miktarları (BP, 2017).

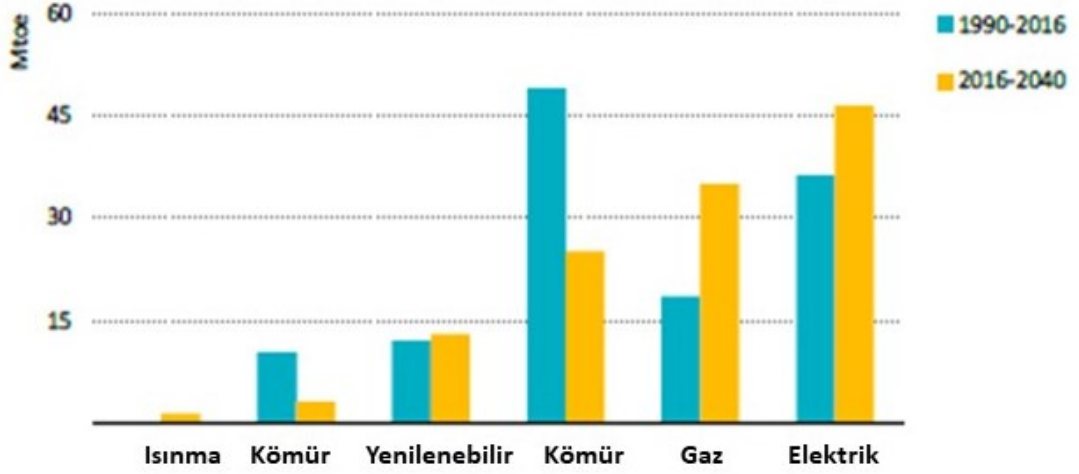
Elektrik enerjisi, enerjinin son kullanımında bir alt türev olarak hayatımızda yer edinmektedir. Farklı kaynak tipleri, petrol, doğalgaz, kömür, yenilenebilir enerji kaynakları, enerjinin son kullanım alanı olan ısınma, ulaşım, elektrik enerjisi gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Enerjinin son kullanımında giderek öne çıkan elektrik, 2040'a kadar nihai tüketimin %40'ını oluşturacak, bu da petrolün son yirmi beş yıldaki büyümesine eşit olacaktır. Ayrıca uluslararası enerji ajansının oluşturduğu yeni öngöründe elektriğin son kullanıcıların temel enerji kaynağı haline geleceği vurgulanmaktadır (IEA, 2017).

Dünyada alım gücünün artmasıyla birlikte, elektrikli cihazlar insanların evlerine daha çok girmeye başlamıştır. Elektriğe evrensel erişim tam olarak sağlanamamış olsada, erişim noktasında her yıl 100 milyon insan elektrik tüketicisi olarak dünya nüfusuna katılmaktadır. Özellikle Hindistan ve Endonezya'da büyük ilerleme kaydedilirken, Sahra Altı Afrika'da elektrifikasyon çalışmaları ilk kez 2014 yılında nüfus artış hızını geçmiştir.



Şekil 2.2: Elektriğe erişimi olmayan nüfusun dünya üzerinde dağılımı (IEA, 2017).

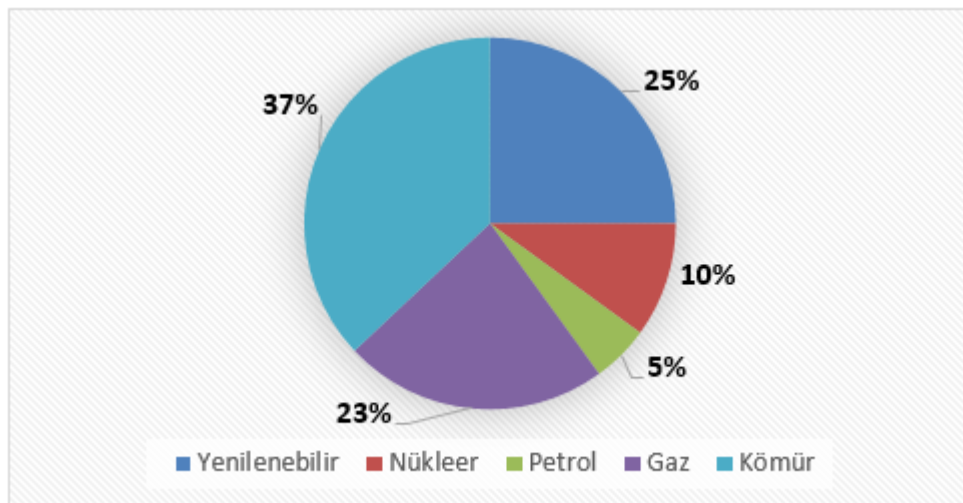
Elektrikli araçların yavaş yavaş hayatımıza girmesi, ısı pompası uygulamaları, endüstriyel dönüşüm ve dijital dönüşüm ile talebin karşılanması noktasında teknolojik olanaklar elektrik enerjisini çok önemli bir konuma oturtmaktadır. Aşağıdaki grafikte uluslararası enerji ajansının verilerine baktığımızda 2040'a kadar yıllık ortalama enerji talebinin artışının büyük bir kısmının elektrik enerjisinden geleceği görülmektedir. Buna karşın Şekil 2.3'de görüleceği üzere gerek ekonomik gerekse çevresel kaygılardan dolayı kömür ve petrol gibi enerji kaynaklarının talebinde geçtiğimiz yıllara oranla ciddi azalmalar meydana gelecektir. (IEA, 2017)



Şekil 2.3: Enerji talebinde geçmiş dönem yıllık ortalama artışı ve gelecekte büyüme öngörüsü (IEA, 2017).

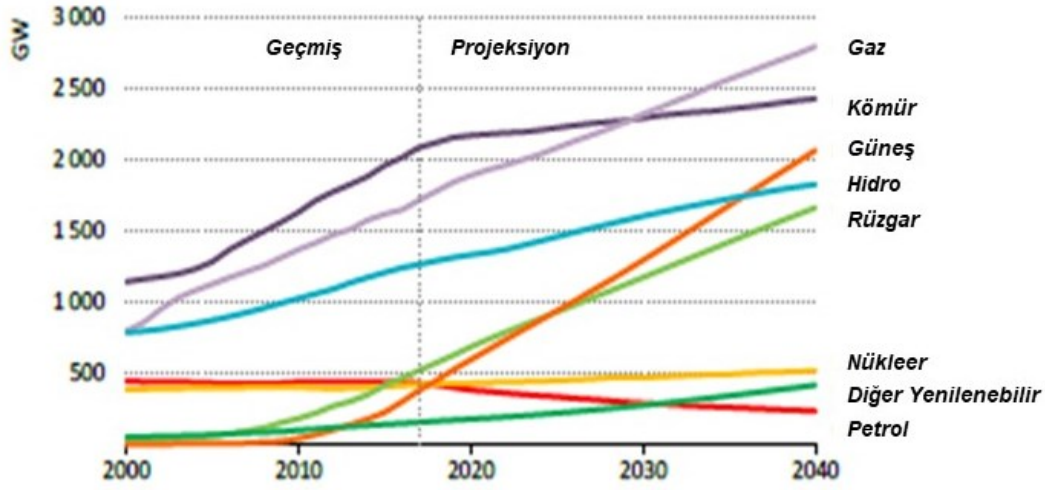
Devletlerin enerjiye hızlı, güvenilir, sürdürülebilir ve ucuz yoldan erişme arzusu; dünya üzerinde yeni perspektifler oluştururken, enerji kullanım alışkanlıkları ve güvenliği ile ilgili mevcut yaklaşımların sorgulanmasına sebep olmaktadır.

Elektrik enerjisinin üretiminde temel olarak 3 farklı kaynak tipi vardı, bunlar karbon kaynaklı fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerjidir. Günümüzde elektrik üretimi ağırlıklı olarak fosil kaynaklı kaynaklardan sağlanmaktadır. Bu oran son yıllarda yenilenebilir enerjinin hayatımıza girmesiyle düşmesine karşın Şekil 2.4’de görüldüğü üzere halen dünyada hakim olan kaynak fosil yakıtlı kaynaklardır.



Şekil 2.4: 2017 yılında dünyada elektrik üretiminde kaynak dağılımı (IEA, 2018).

Fakat bu kaynaklarla yapılan yeni santrallerin kapasitelerinde ciddi azalmalar mevcuttur. Aynı zamanda inşaatı devam eden yenilenebilir enerji projeleride düşünüldüğünde özellikle kömürden üretilen elektrik miktarının oranında ciddi bir azalma meydana gelecektir. Fosil kaynaklı yakıtlar arasında doğalgazdan elektrik üretimi 2030’da lider pozisyona gelecek, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde ise güneş enerjisi hidroelektrik kaynakları da geçerek zirveye oturacaktır fakat elektrik üretim miktarındaki oranı muhtemelen hidroelektrik ve rüzgar enerjisinin daha altında seyredecektir (IEA, 2018).



Şekil 2.5: Kaynak bazında dünyada mevcut kurulu güç ve gelecek projeksiyonu (IEA, 2017).

Dünyada bu dönüşüm öngörülürken birçok ülkede bu yönde yeni politikalar belirlemektedir. Bunlardan bazıları Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere genel olarak kömürden uzaklaşma politikası ve yenilenebilir enerjiye yatırım yapma politikası hakimdir. Nükleer enerji konusunda gelişmekte olan ülkeler yatırım yaparken, geçmişte nükleer enerjiden yararlanmış ülkeler yeni yatırımlarını durdurmaktadır. Gaz santrallerinde ise genel olarak yatırım trendi ülkeler bazında devam etmektedir. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri’nde politika bazlı değişen stratejik hedeflerle birlikte yatırım trendi, birçok ülkenin izlediği yatırım trendinin aksi yönünde seyretmektedir.

Çizelge 2.1: Ülke bazında enerji politikaları (IEA, 2017).

Bölge	Politika	İlgili Kurum	Yayınlanma Tarihi	Kaynaklara Göre Değerlendirme			
				Yenilenebilir	Nükleer	Gas	Kömür
Çin	13. 5 Yıllık Enerji Geliştirme Planı (2020)	NEA	Aralık 2016	↑	↑	↑	↓
Hindistan	Ulusal Elektrik Planı (2022)	CEA	Aralık 2016	↑	↑	↑	↓
Kore	Önerilen Enerji Planı (2025)	Yeni Yönetim	2017	↑	↓	↑	↓
Fransa	Yeni Enerji Politikası (2025)	Yeni Yönetim	2017	↑	↓	–	↓
Avrupa Birliği	Yeni Kömür Santralsiz Politikası (2025)	26 Ülke	2017	–	–	↑	↓
Endonezya	PLN Elektrik Tedariği İş Planı (2017-2026)	PLN	Mart 2017	↑	↑	↑	↓
Kanada	2030'a Kömürün Kademeli Bitirilmesi	Yeni Yönetim	Kasım 2016	↑	–	↑	↓
ABD	Yenilenebilir Enerji Santrallerinin Kaldırılması	Yeni Yönetim	2017	↓	–	↓	↑

2.2 Elektrik Enerjisi Yatırımları

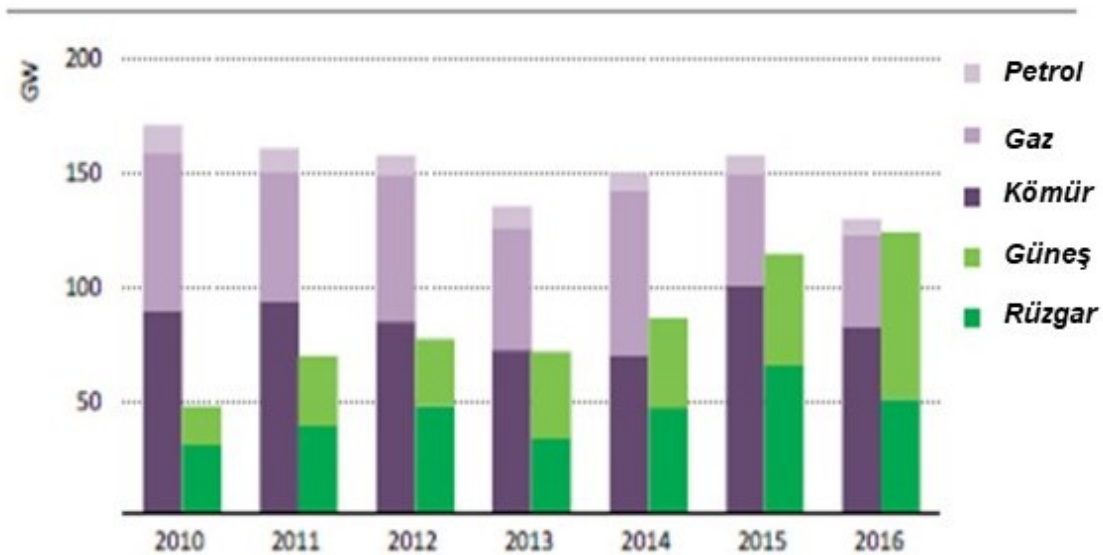
İlk bölümde verilen bilgiler çerçevesinde değerlendirildiğinde, elektrik enerjisi gelecekte insanoğlunun hayatında çok önemli ve yatırım yapılması gereken bir konu olmayı sürdürecektir. Dünya enerji görünümüne baktığımızda 2010-2016 yılları arasında toplam enerji yatırımının %41'i elektrik enerjisi sektörüne yapılırken, %54'ü petrol ve doğalgaz sektörüne yapılmaktaydı. Fakat aşağıdaki şekilde gösterilen uluslararası enerji ajansının sürdürülebilir gelecek öngörüsünde 2040 için bu oranın %63'e %35 şeklinde elektrik enerjisi lehine değişeceği, en azından değişmesi gerektiği tahmin edilmektedir.

Çizelge 2.2: Global enerji yatırımlarının durumu (IEA, 2017).

	Yıllık	Yeni Politikalar		Mevcut Politikalar		Sürdürülebilir Gelişme	
		Toplam	Yıllık	Toplam	Yıllık	Toplam	Yıllık
Fosil Yakıtlar	1103	24713	1007	29932	1247	15496	646
Yenilenebilir	297	7950	331	6350	265	12828	534
Dağıtım-İletim	236	8025	334	8524	355	8145	339
Diğer Düşük Karbonlar	14	1127	47	1095	46	2325	97
Tedarik/Üretim	1650	41276	1720	45901	1913	38795	1616
Elektrik Sektör Payı	41%		47%		41%		63%
Petrol-Doğalgaz Payı	54%		50%		55%		33%
Son Kullanıcı	295	18809	784	11912	496	30340	1264

Bu durum hali hazırda kendini hissettirmeye başlamıştır, 2016 yılında dünyada, elektrik enerjisi üretim ve iletim sektöründe 720Milyar\$ yatırım yapılmış, buna karşın petrol ve gaz sektöründe yapılan yatırımın miktarı 650Milyar\$ mertebesinde kalmıştır. Ve ilk defa elektrik enerjisine yapılan yatırım miktarı, petrol ve gaz sektörüne yapılan yatırımı geride bırakmıştır. (IEA, 2017)

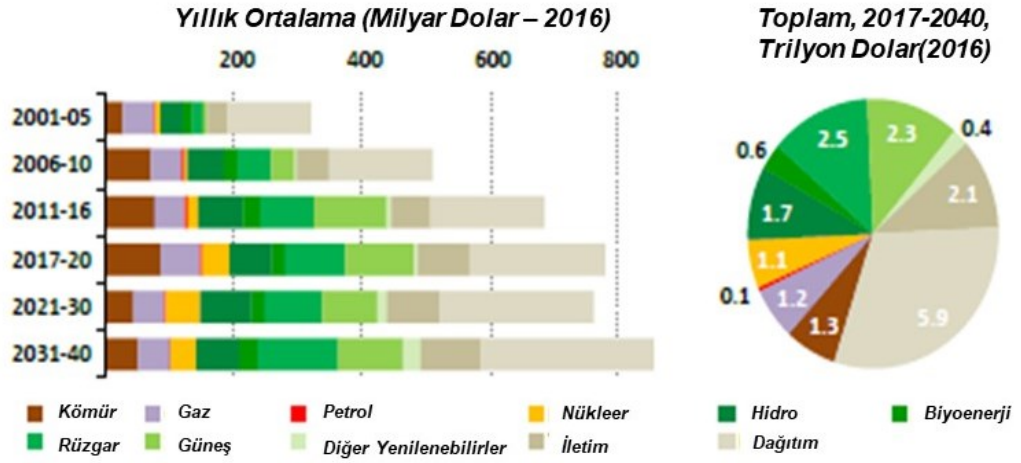
Ayrıca dünya çapındaki bu gelişimin elektrik sektörü içerisinde de yansımalarına baktığımızda, Şekil 2.6’da görüleceği üzere 2016 yılında kurulu kapasite olarak rüzgâr ve güneş enerjisine yapılan yatırımlar ile karbon kaynaklı yakıtlara yapılan yatırımlar neredeyse birbirine eşittir.



Şekil 2.6: Dünyada yıllık bazda eklenen kurulu güç miktarları (IEA, 2017).

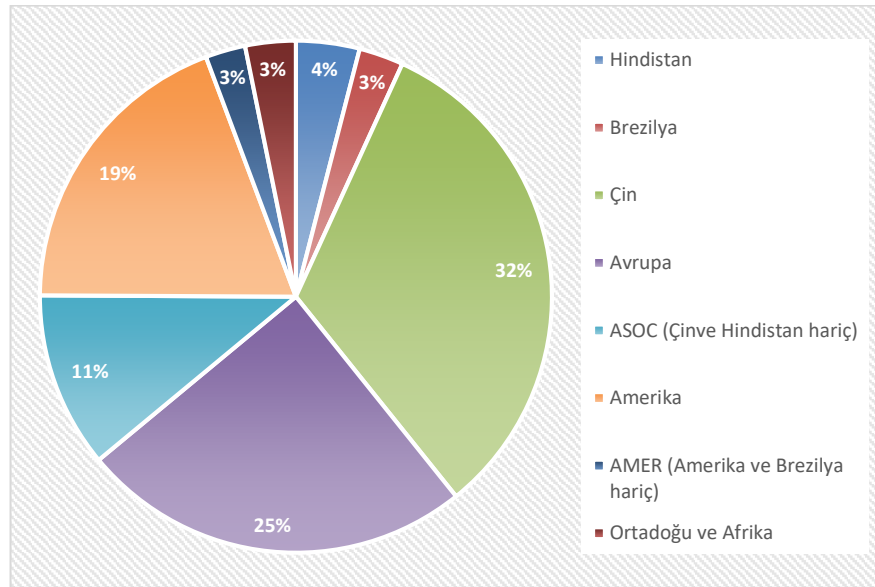
Ülke profillerine baktığımızda ise gelecek dönemde dünyada elektrik enerjisi talebinin sadece 6’da 1’i gelişmiş ülkelerden gelecek olmasına karşın, elektrik üretim tesisi yatırımlarının yarısı bu ülkeler tarafından yapılacaktır. Bununla başlıca sebebi konulan hedeflerdir, özellikler CO₂ emisyonunu azaltmak yönünde izlenen politikalarla ciddi bir dönüşümün kapısı aralanmıştır.

Ayrıca bu gelişmiş ekonomilerde yapılacak yatırımların %40’ı doğrudan yenilenebilir enerji kaynakları için planlanırken, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde’de 3’te2’lik payı güneş ve rüzgar enerjisi kaynakları olacaktır. %12’lik payı gaz santralleri, %10’luk payı ise nükleer santraller olacaktır (IEA, 2017).



Şekil 2.7: Elektrik enerjisi sektöründe global yıllık ortalama ve toplam yatırım miktarı ve öngörüsü (IEA, 2017).

Mevcut duruma göz atıldığında ise 2016 yılında yenilenebilir enerjiler alanında yapılan yatırımların en büyük kısmı Çin’de gerçekleşirken, sırasıyla Avrupa ve Amerika Çin’i takip etmiştir.



Şekil 2.8: Ülke bazında 2016 yılında global yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırım (Frankfurt School of Finance & Management GmbH, 2017).

Elektrik, bilinen alanların yanı sıra ısınma ve ulaşım da aşama kaydederek toplam tüketimdeki payını dörtte bire çıkaracaktır. Sektördeki girişimlerin ve politika desteğinin, örneğin Fransa ve Birleşik Krallık'ta benzinli ve dizel araç satışının 2040'a kadar durdurulacak olması gibi kararların ışığında, bugün 2 milyon civarında olan elektrikli araç adedinin 2040 itibariyle 280 milyona çıkması öngörülmektedir. (IEA, 2017)

2.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

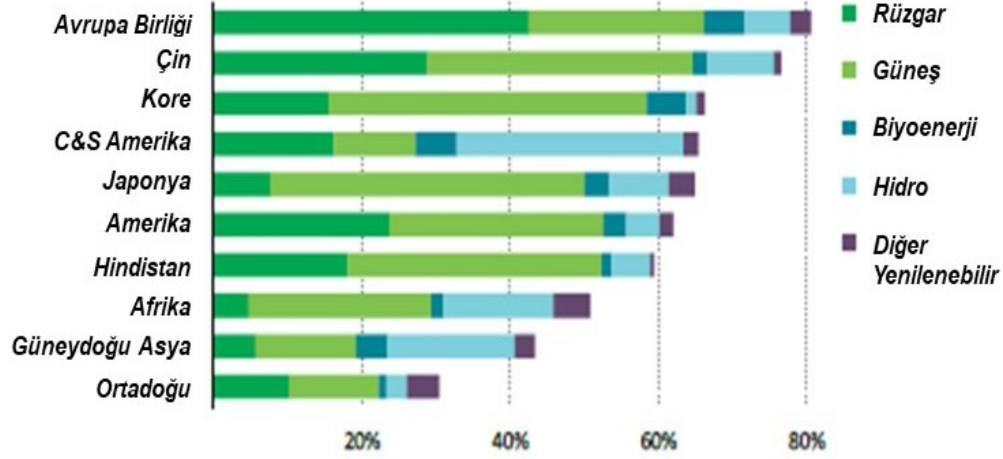
Yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya çapındaki birincil enerji talebini karşılama oranı 2016 yılında %9 olarak seyretmiştir. Buna karşın elektrik üretimindeki payı ise %25 mertebesinde olmuştur. Hidroelektrik santraller bu katkı içerisinde başı çekmektedir fakat yıllar geçtikçe hidroelektrik santrallere yapılan yatırım oranlarında da azalmalar gözükmemektedir. Bunun sebebi gerek olası kaynakların zamanla azalıyor olması gerek se rüzgar ve güneş enerjisinden üretimin hızla düşen maliyetleridir. Rüzgar ve güneş enerji kaynaklarının yatırım maliyetleri her yıl yaklaşık %6 oranında azalmaktadır. (Lazard, 2017)

Gelecekteki elektrik ihtiyacının boyutu ve enerji sistemlerini karbonsuzlaştırma hedefi, elektriğe yapılan global yatırımın neden ilk kez 2016'da petrol ve gazı geride bıraktığını ve elektriğin neden politika gündeminde kendine yer bulmaya başladığını anlatıyor. Etkili karbonsuzlaştırma ve güvenilir arzı sağlamak için, yenilenebilir enerjideki maliyet düşüşü tek başına yeterli değildir. En büyük güçlükler, elektrik şebekelerine yeterli yatırım yapılması ve güneş, rüzgar gibi enerji kaynaklarının yaygınlaşmasıyla daha çok önem kazanan esneklik ve yönetilebilirlik ihtiyacını karşılayacak bir enerji karışımının elde edilmesidir.

Güneş enerjisi kullanan fotovoltaik (PV) sistemlerin Çin ve Hindistan öncülüğünde hızla uygulamaya geçirilmesi, 2040 itibarıyla güneş enerjisinin en büyük düşük karbonlu kapasite haline gelmesini, bu sırada toplam elektrik üretiminde yenilenebilir enerjinin payının %40'a çıkmasını sağlayacaktır. IEA Yeni Politikalar Senaryosu'na göre dünyanın yeni rüzgar ve güneş enerjisi tesislerinin üçte biri Çin'de kurulacaktır (IEA, 2017).

Avrupa Birliği'nde ise yeni kapasitenin %80'ini yenilenebilir enerji oluştururken, 2030 geride kaldığında rüzgar enerjisi gerek karada gerek açık denizdeki uygulamalarla başlıca elektrik kaynağı haline gelecektir. Buna ek olarak Avrupa Birliği ülkelerinde, özellikle tarımın yoğun olarak yapıldığı ülkelerde biyogaz santrallerinde yatırımlar devam edecektir. Ek olarak yapılan araştırma-geliştirme faaliyetleri ile birlikte Avrupa Birliği ülkelerinde diğer yenilenebilir enerji kaynakları kapsamında adlandırılan yeni teknolojilerde nispeten az olsa da hatırısayılır bir kapasitede elde edecektir.

Rüzgar ve güneş alanında gerçekleşen kurulumların üçte dördü Çin, Amerika ve Japonya'dan gelmektedir.

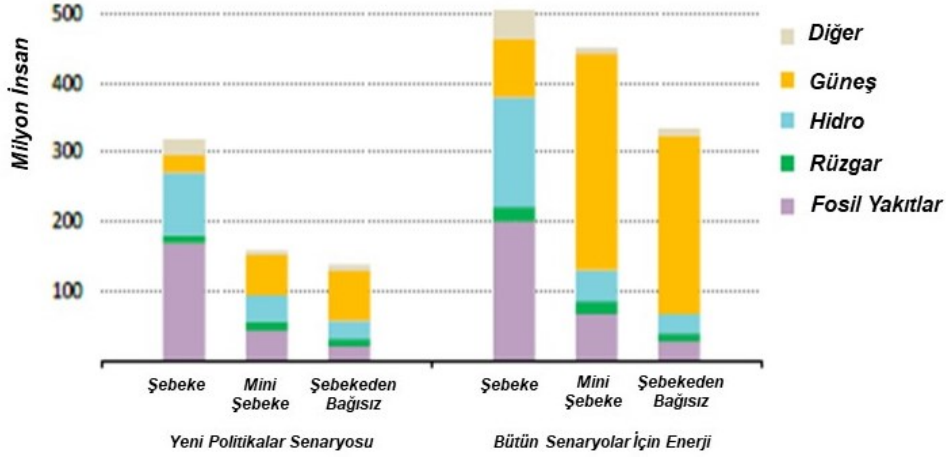


Şekil 2.9: 2017-2040 yılları arasında dünyanın farklı bölgelerinde mevcut kapasitelere eklenecek yenilenebilir enerji kapasitelerinin öngörülmesi (IEA, 2017).

Yenilenebilir enerjideki artış enerji sektörüyle sınırlı kalmayacaktır: Dünya genelinde ısınma ve ulaşım için yenilenebilir enerjinin kullanımı, başlangıç seviyesi düşük olsa da, iki kat artacaktır. Brezilya'da nihai enerji tüketiminde doğrudan ve dolaylı yenilenebilir kullanımı bugünkü %39 düzeyinden 2040'ta %45'e çıkarken, aynı dönemde dünya çapında %9'dan %16'ya artış kaydedilecektir.

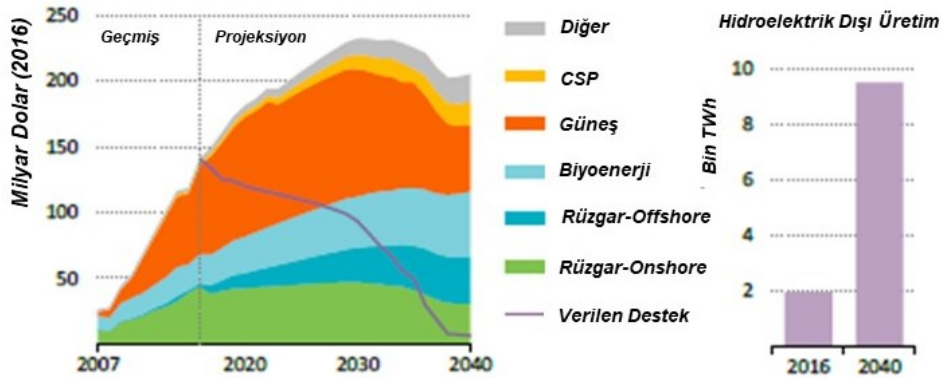
Teknolojik gelişmelerle birlikte dağıtık enerji sistemleri de elektrik enerjisinin üretiminde özellikle Afrika coğrafyasında kendine önemli bir yer bulacaktır. Farklı iş modelleri ile elektrik şebekesinin olmadığı alanlarda da elektrik kullanımı mümkün olacaktır. Güneş enerjisi ve batarya sistemleri ile küçük ölçekli yerel şebekeler yaratılacak ve insanların basit bir ödeme yöntemiyle kullanması sağlanacaktır. Bu piyasa şu anda küçük olmasına karşın Şekil 2.10'da görüleceği üzere gelecekte 30'dan fazla ülkede 700.000 eve elektrik sağlamayı hedeflemektedir (REN21,2017).

Yenilenebilir enerjiler alanında dünyadaki önemli gelişimlerde biride çatı üstü güneş enerjisi uygulamalarıdır. Bu alanda gerçekleştirilen kurulumlar, şebeke ölçekli güneş enerji kurulumlarında yakalanan gelişim ivmesiyle paralellik göstermektedir. Özellikle Amerika, Almanya ve Avustralya gibi müstakil yapılanmanın çok olduğu bölgelerden sıklıkla tercih edilen bir uygulamadır. Son dönemde şebeke altyapısındaki iyileştirmeler ve devlet teşvikleri ile birlikte kullanımda her geçen gün artmaktadır.



Şekil 2.10: Yeni teknolojiler ve politikalar çerçevesinde 2017-2030 yılları arasında elektrik erişimi ne kavuşacak insan sayısı (REN21,2017).

Günümüzde hükümetlerin yenilenebilir enerji kaynaklarının payını arttırmak için ciddi teşvikler sağladığı görülmektedir. Şekil 2.11’de görüleceği üzere yenilenebilir enerji alanında yatırımlar gelecekte artarak devam ederken, devletlerin sağlayacağı desteklerde giderek azalacaktır, fakat hiçbir dönemde tamamen sıfırlanmayacağı öngörülmektedir.



Şekil 2.11: Yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya çapında gelişimi ve gelecek projeksiyonu ile bu kaynakların için sağlanan destek miktarının değişimi (IEA, 2017).

Ülkelerin ve hükümetlerin yenilenebilir enerji kaynaklarını destekleme ve geliştirme hedefleri bu kaynakların güçlü bir şekilde pazarlara girmesinde en önemli etkenlerden biridir. Ağırlıklı olarak elektrik sektöründe olmasına karşın, ısıtma ve ulaşım sektöründe de yenilenebilir enerjinin payını arttıracak bir hedefler ülkeler tarafından belirlenmektedir. Aşağıdaki tabloda bazı örnek ülkelerin yenilenebilir enerjiler için belirlediği hedefler sıralanmıştır.

Çizelge 2.3: Bazı ülkeler için yenilenebilir enerji hedefleri (IEA, 2017).

Ülke	Sektör	2016'da Yeni/Revize Edilmiş Hedefler
Arjantin	Ulaşım	Harmanlanmış bioethanolu %10'dan %12'e çıkarmak
Brezilya	Elektrik	2024'e kadar 174GW kurulu güç(%10 biokütle-%5 küçük hidro-%14 rüzgar-%4 güneş
	Ulaşım	2017'de %8 olan biodieseli 2019'da %10'a çıkarmak
Çin	Elektrik	2020'e kadar 380GW hidro, 210GW rüzgar, en az 110GW Güneş
Küba	Elektrik	2030'a kadar 2.1GW
Mısır	Elektrik	2015-2017 yılları arasında 4.3GW kurulu güç (%53 güneş, %47 rüzgar)
Ethiopia	Elektrik	2030'a kadar 7GW rüzgar
Avrupa Birliği	Isınma	2030'a kadar ısınma ve soğutmada her sene %1 artış
	Ulaşım	2030'da en az %6.8 olaca şekilde düşük emisyon salımlı - yenilenebilir yakıtların kullanımı ve konvensiyonel biyoyakıtların oranının 2021'de %7'den 2030'da %3.8'e düşürülmesi.
Finlandiya	Ulaşım	Yakıtların ulaşımdaki payını %40 olması ve bunun %30 kadarı harmanlanmış biyoyakıt olması
Fransa	Elektrik	2023'e kadar 18GW güneş, 22GW rüzgar ve 2030'a kadar 26GW hidro
	Isınma	Yenilenebilir enerjinin ısınma ve soğutmadaki payının arttırılması
Hindistan	Ulaşım	2022'de harmanlanmış biyoethanolun %22.5 ve biyodizelin %10 olması
Endonezya	Elektrik	2020'de 5GW güneş
	Ulaşım	2016'da harmanlanmış biyodizel oranının %20 olması
Ürdün	Elektrik	2020'de 1.8GW güneş
Malezya	Ulaşım	2016'da harmanlanmış biyoethanol ve biyodizel oranlarının %10 olması
Meksika	Ulaşım	2016'da harmanlanmış biyoethanol %5 olması
Suudi Arabistan	Elektrik	2023'te 9GW ek kurulu güç
Thailand	Elektrik	2021'de 3GW güneş, 2036'da 6GW güneş
Amerika	Ulaşım	2017'de 73 milyon litre biyoyakıt kullanımı
Vietnam	Ulaşım	2017'de harmanlanmış ethanolun en az %5 olması
Zimbambe	Ulaşım	2016'de harmanlanmış ethanolun en az %10 olması
Climate Vulnerable Forum	Üretim	2050'de enerji üretiminin %100 yenilenebilir bazlı kaynaklardan sağlanması için çabalanması

2.4 CO₂ Salınımı ve Çevresel Kaygılar

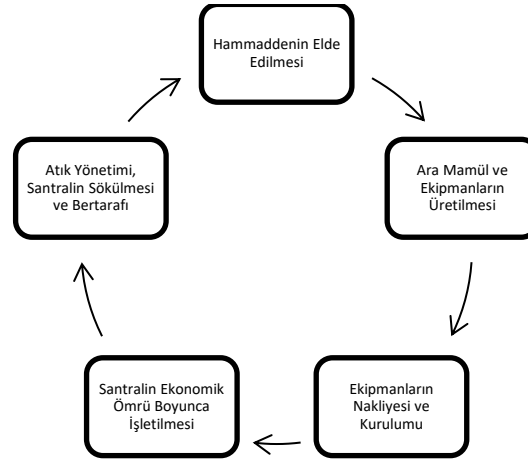
CO₂ salınımı konusu dünyamızın en büyük problemlerinden biri olup, Aralık 2015'te aralarında Türkiye'nin de bulunduğu 195 ülkenin mutabakatı ile imzalanan Paris İklim Anlaşması ile birlikte insanlığın bu sorununun ne kadar ciddi olduğu bir kez daha teyit edilmiştir. Anlaşma, iklim değişikliğiyle mücadelede gelişmiş/gelişmekte olan ülke sınıflandırmasına ve tüm ülkelerin "ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar ve göreceli kabiliyetler" ilkesi tahtında sorumluluk üstlenmesi anlayışına dayandırılmıştır. (T.C. Dışişleri Bakanlığı) Bu anlaşma çerçevesinde ülkelerin temel olarak mutabakata vardığı konular (European Commission, 2018);

- Dünya çapında sıcaklık artışını uzun dönemde endüstri öncesi seviye olarak kabul edilen 2°C'nin altında tutmak.
- Artışı 1,5°C ile sınırlandırarak, iklim değişikliğinin risk ve etkilerini azaltmak.
- Adaptasyon için gelişmekte olan ülkelere uluslararası destek sağlamak.

Emisyon azaltımı hususunda Anlaşma'da, gelişmiş ülkelerin mutlak emisyon azaltımı hedeflerini sürdürmeleri; gelişmekte olan ülkelerin ise emisyon azaltımı hedeflerini yükselterek farklı milli koşulları uyarınca, zaman içinde tüm sektörleri kapsayacak yeni, artırılmış hedefler benimsemeleri telkin edilmektedir.

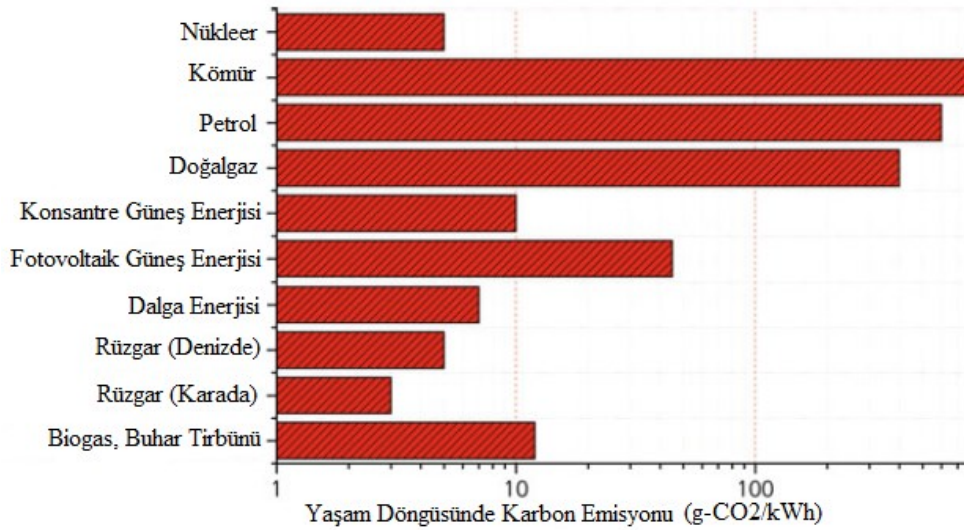
Bu hedeflerin sağlanmasında önemli etkenlerden biride fosil yakıt (petrol, kömür) kullanımının kademeli olarak azaltılarak, yenilenebilir enerjiye kaynaklarının daha fazla kullanılmasıdır. Bu kapsamda farklı enerji teknolojilerinin çevresel etkileri daha da kritik bir öneme sahip olup, çevreci politikaların uygulanması noktasında iyi irdelenmesi gereken bir konudur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi noktasında yaşam döngüsü değerlemesi (Life Cycle Assessment(LCA)) yaklaşımı ile elektrik üretimi noktasında çevreye salınan CO₂ emisyonu hesaplanabilmektedir. (Francesco A. ve diğ., 2014)

Yaşam döngüsü değerlendirme analizi bir enerji kaynağından elektrik üretebilmek için bütün bir döngü boyunca salınan CO₂ miktarının hesaplanmasına yardımcı olur. Şekil 2.12'de de gösterildiği üzere bu döngü içerisinde temel olarak şu basamaklar bulunmaktadır; hammaddenin elde edilmesi, taşınması, işlenmesi, üretilmesi, iletimi, uygulanması/kurulması, işletilmesi, atık yönetimi ve bertarafı ile geri dönüşümü. Kaynak tipine göre bu adımlar azalıp artabilmektedir.(Nana Yaw Amponsah, 2014)



Şekil 2.12: Elektrik üretim kaynaklarında CO₂'nin yaşam döngü değerlendirmesi.

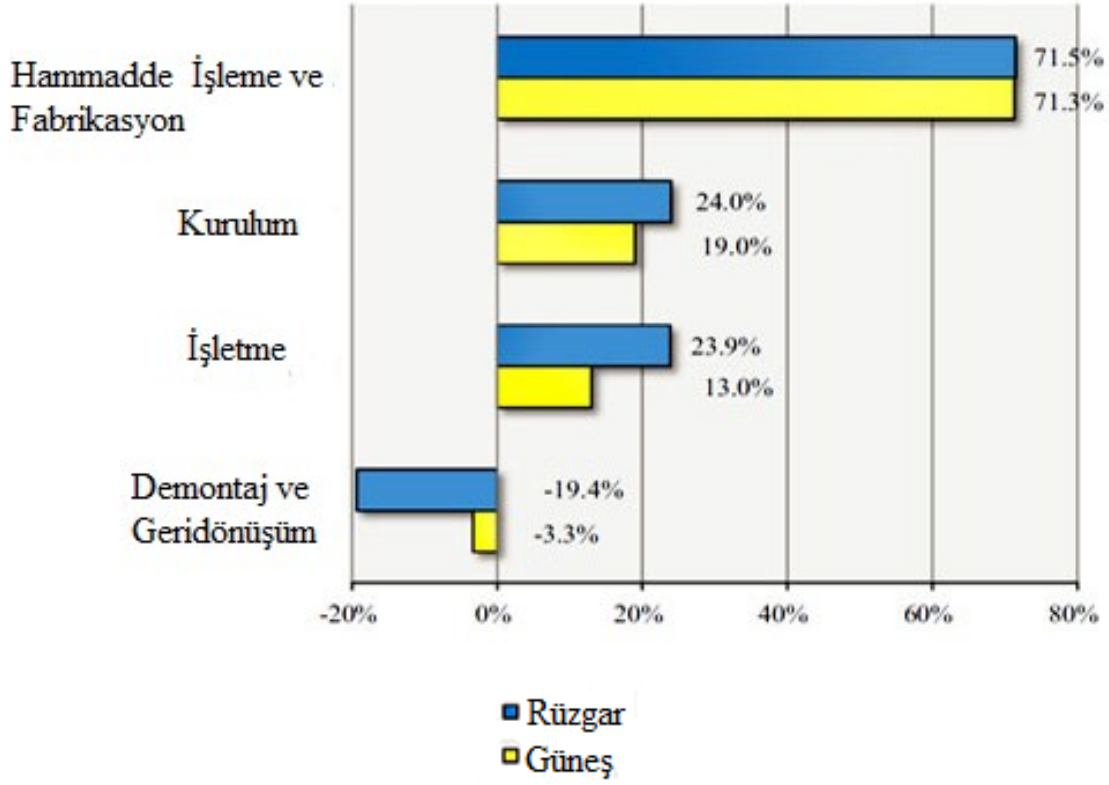
Yukarıdaki şekilden de görüleceği üzere bir elektrik üretim tesisinin yaşamı boyunca doğaya saldıgı CO₂ miktarı sadece o santrale özgü olmakla birlikte, temelde aynı fakat uygulama teknolojileri farklı olan santral tiplerinde bile bu değerler birbirinden farklıdır. Örneğin kara sınıfı bir rüzgâr tirübünü ile kurulan tesis ile deniz sınıfı (offshore) bir rüzgâr tirübünü ile kurulan tesis arasında bile farklılık vardır. Örnek olarak Şekil 2.13'de farklı kaynak tipleri için birim elektrik (kWh) üretimi başına doğaya salınan CO₂ miktarı verilmiştir.



Şekil 2.13: Farklı enerji üretim kaynaklarının yaşam döngüsü boyunca birim elektrik (kWh) başına ürettiği CO₂ emisyon miktarı (Guerrero-Lemus R., 2012).

Bu farklı kaynakların yaşam döngüsü boyunca saldıkları CO₂ emisyon miktarına detaylı olarak baktığımızda ise Şekil 2.14'de görüleceği üzere hammadde aşamasından nihai elektrik üretimi ve demontajına kadar birçok evrede farklı oranlarda CO₂

salınımı gerçekleştiği görülmektedir. Dolayısıyla bir elektrik üretim kaynağının CO₂ salınım miktarını değerlendirirken sadece yakıtın/ana kaynağın karbon esaslı olup olmamasına bakmak doğru bir değerlendirme yöntemi değildir.



Şekil 2.14: Rüzgar ve güneş enerjisinin yaşam döngüsü boyunca ürettiği CO₂ salınımının yüzde dağılımı (Ordway D.M ve Kille L.W., 2015).

Özetle bu bölümde 3 ana başlık altında anlatılan dünyada elektrik enerjisi piyasası ile dünyanın mevcut durumu ve geleceğe doğru yönlendiği alanlar incelenmiştir. Elbette ki ülkemizde de dünya trendine benzer bir gelişme hedefi seyredecek ve daha gelişmiş, kendine yetebilen, sürdürülebilir ve temiz bir gelecek elektrik sektörü sürekli bir dönüşümün içerisinde olacaktır. Bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde incelenecek temel konuda, yenilebilir enerji kaynakları Türkiye gündemine girerken kısa vadede nasıl bir portföy oluşturulması gerektiğidir.

3. TÜRKİYE VE ELEKTRİK PİYASASI

3.1 Elektrik Piyasasının Dinamikleri ve İşleyişi

Ülkemizde elektrik sektörünün işleyişi birkaç kurum tarafından şekillendirilmektedir. Bunlardan ilki Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB)'dir. Bakanlık, hükümetin belirlediği politikalar çerçevesinde sektörü yöneten kurumlarını, mekanizmalarını devreye sokarak piyasanın dinamik bir şekilde işlemesini sağlamaktadır. Bakanlık teşkilatı içerisinde öncelikle direk olarak bakanlığı bağlı olan genel müdürlük ve daire başkanlıkları vardır, bunlardan elektrik piyasasını ilgilendiren en önemli iki tanesi: Enerji İşleri Genel Müdürlüğü ve Yenilenebilir Enerjiler Genel Müdürlüğü'dür.

Buna ilaveten 3 alt başlıkta bakanlığın irtibatlı olduğu kurumlar vardır, bu kurumlar şu şekildedir; bağlı kuruluşlar, ilgili kuruluşlar ve ilişkili kuruluşlardır. Elektrik piyasasını yakından ilgilendiren en önemli kurumların yer aldığı sınıf ilgili kuruluşlar sınıfıdır. Bu sınıfta Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ), Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ), Türkiye Elektrik Ticaret A.Ş. (TETAŞ) gibi direkt olarak fiili piyasanın 4 saçı ayağında oluşturan kurumlar yer almaktadır.

Buna ilaveten ilişkili kurumlar başlığı altında ise elektrik piyasasının direkt olarak işleyişinden sorumlu ve bağımsız bir kurum olan EPDK yer almaktadır. EPDK temel olarak Elektrik, Petrol, Doğalgaz ve Sıvılaştırılmış Petrol Gazları Piyasalarını düzenlemekle görevlidir. Sorumluluğu ilgili piyasa kanunları ile kendisine ifa edilen piyasa düzenleme ve diğer görevleri yerine getirmektedir.

Türkiye'de elektrik piyasasının temelleri 2000'li yılların başına dayanmaktadır. İlk olarak 2001 yılında 4628 sayılı Elektrik Piyasa Kanunu'nun yayımlanmasıyla, piyasanın oluşması yönünde hukuksal yol açılmıştır. Bunu izleyen senelerde piyasanın gelişmesinde çeşitli kilometre taşları şu şekilde olmuştur (TEİAŞ, 2018).

- ❖ (2004) Geçici Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği'nin yayınlanması
- ❖ (2006) Dengeleme Güç Piyasası 1. Aşama'nın devreye girmesi
- ❖ (2006) Dengesizliklerin Gece, Gündüz ve Puant periyotlarda uzlaştırılması

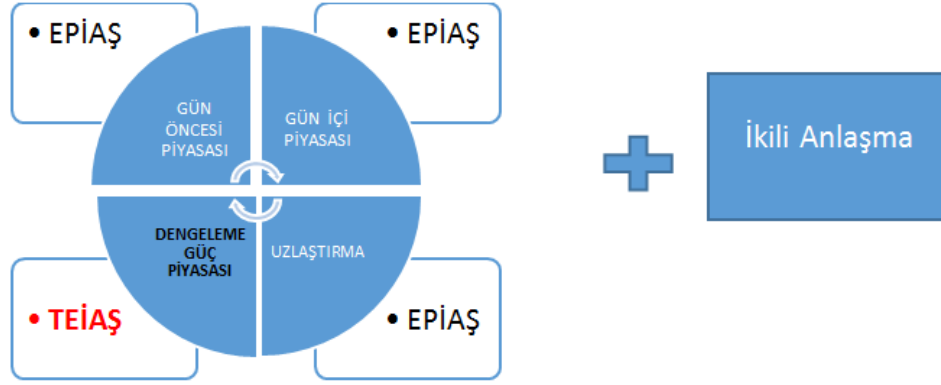
- ❖ (2009) Gün Öncesi Planlama Mekanizması'nın devreye girmesi
- ❖ (2009) Saatlik fiyatlandırma ve uzlaştırma işlemine başlanması
- ❖ (2011) Gün Öncesi Piyasası Mekanizması'nın devreye girmesi
- ❖ (2011) Teminat ve Avans Ödeme Mekanizması'nın devreye girmesi
- ❖ (2011) Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması
- ❖ (2013) 6446 Sayılı Elektrik Piyasa Kanunu ile EPIAŞ'ın kurulmasının hükmü
- ❖ (2015) EPIAŞ'ın kurulması
- ❖ (2015) Gün İçi Piyası'nın açılması
- ❖ (2015) EPIAŞ'ın piyasa işletim lisansı alması ve faaliyete geçmesi

Yukarıda da görüldüğü üzere Türkiye'de piyasa oluşumunun temelleri 17 senelik bir geçmişe sahip olup, bu süreçte ciddi bir gelişme kat edilmiştir.

Piyananın ticari işlerliği içerisinde 4 adet ana evre bulunmaktadır.

- ❖ Gün Öncesi Piyasasında; işlemler günlük olarak saatlik bazda gerçekleşmektedir. Her gün 00:00'da başlayıp, ertesi gün 00:00'da sona eren saatlik zaman dilimlerinden oluşmaktadır. Katılımcılar gün öncesi piyasası kapsamında belirli bir zaman dilimi için, blok ve/veya esnek teklifler sunabilmektedir.
- ❖ Gün İçi Piyasası; Gün Öncesi Piyasası ile Dengeleme Güç piyasası arasında köprü görevi görmekte, bu özelliği ile de Elektrik Piyasasının dengelenmesine ve sürdürülebilirliğine sağlamaktadır. Örneğin Rüzgâr santrallerinin rüzgâr tahminleri 1 gün öncesinde yapmasında hata payı azımsanmayacak derecede olup, gün içi piyasası sayesinde ortaya çıkan dengesizliklerini azaltabilmesi için bir fırsat olmaktadır.
- ❖ Uzlaştırma ve Dengeleme Güç Piyasası; Dengeleme güç piyasası uzlaştırma işlemleri aylık olarak yapılır ve dengeleme birimi bazındadır. Bu düzenlemeler Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği'ne göre hesaplanarak gerçekleştirilmelidir. (EPIAŞ, 2018)

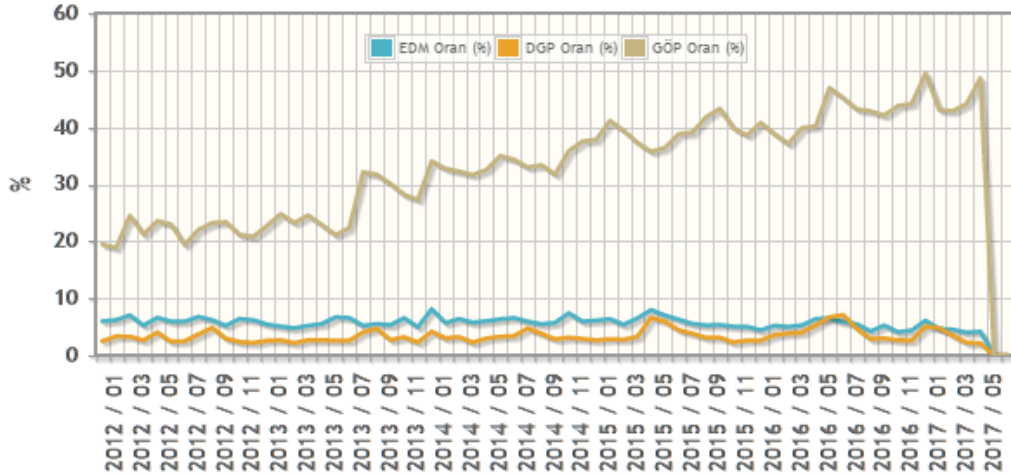
Bunlara ek olarak ikili anlaşmalar ile elektrik satım imkânında piyasa oyuncularına tanınmaktadır.(Şekil 3.1)



Şekil 3.1: Türkiye elektrik piyasası özet şeması.

Yukarıdaki sıralanmış olan piyasa işlemlerinin hepsi EPIAŞ kurulmadan önce TEİAŞ'ın Piyasa Uzlaştırma Daire Başkanlığı tarafından yürütülmekte iken, EPIAŞ'ın kurulmasıyla Dengeleme Güç Piyasası hariç bütün işlemler EPIAŞ'a devredilmiştir.

Yıllar geçtikçe piyasanın daha etkin ve şeffaf şekilde yönetilmesiyle her geçen gün GÖP(Gün Öncesi Piyasa) oranının daha da arttığını ve daha fazla katılımcının GÖP piyasasında işlem yaptığını aşağıdaki şekilde görülmektedir. GÖP oranını 2012 yılında yaklaşık %20 civarında iken, yani piyasa katılımcılarının büyük çoğu ikili anlaşmayı tercih ederken iken günümüzde bu oran %50'ler mertebesine gelmiştir.



Şekil 3.2: GÖP Oranı(%), GDP Oranı(%), EDM Oranı(%) (TEİAŞ, 2018).

Elektrik piyasasında kritik olan iki çeşit fiyat türünden bahsetmekte fayda var. Bunlar;

- ❖ PTF (Piyasa Takas Fiyatı) : Gün öncesi piyasasında(GÖP) verilmiş olan teklifler sonucu arz ve talebin kesiştiği noktada meydana gelen fiyat diyebiliriz.

- ❖ SMF (Sistem Marjinal Fiyatı) : Dengeleme Güç Piyasası kapsamında Yük Alma (YAL) ve Yük Atma (YAT) talimatlarına göre net talimat hacmine takabül eden teklif fiyatına da SMF denilmektedir.

Yani kısaca Gün Öncesi Piyasasında oluşan fiyat PTF, gerçek zamanda yani Dengeleme Güç Piyasasında oluşan fiyata ise SMF denilmektedir.

Ancak gün içi piyasası nispeten yeni devreye alınması sebebiyle piyasa katılımcıları arasında henüz yaygınlaşmamış olup, 2016 yılı toplam piyasa hacimlerine baktığımızda Gün İçi Piyasası (GİP)'in %1'in altında kaldığını görülmektedir. Gün İçi Piyasası sürekli devam eden bir piyasa olup, Gün içi piyasasına fiziksel teslimattan 1,5 saat (90 dk.) öncesine kadar teklif verilebilir, verilen teklifler güncellenebilir, iptal edilebilir veya pasif yapılabilir.

Dengeleme Güç Piyasası TEİAŞ tarafından işletilmektedir. Gerçek zamanlı dengeleme ve yan hizmetler ve dengeleme güç piyasasından oluşur. Bağımsız olarak 15 dk içerisinde asgari 10 MW yük alabilen veya yük atabilen dengeleme birimleri DGP'ye katılmakla yükümlüdür. Gün Öncesi Piyasası ile Sistem İşletmecisi 'ne (MYTM) her ne kadar üretim ve tüketim miktarları dengelenmiş bir piyasa sunulmuş olsa da gerçek zamanda sapmalar olmaktadır. Örneğin, bir santralin arızadan dolayı devre harici olması veya büyük bir tüketim tesisinin bir anda çalışmaya başlaması/çalışmayı durdurması dengeyi bozmaktadır, bu durumda MYTM dengeyi sağlamak için Dengeleme Güç Piyasası'na sunulmuş teklifleri kullanarak, sistem dengesini sağlamaya çalışmaktadır (TEİAŞ, 2018).

TEİAŞ %100 olarak devlete kontrolünde olmakla birlikte, EPIAŞ'ın %30'u TEİAŞ'ın, %30'u Borsa İstanbul'un, %40'ı ise özel sektöre oyuncularına ait hisselerden oluşmaktadır (EPIAŞ, 2018).

Bu piyasa akışının yanı sıra elektrik piyasasında özellikle yenilenebilir enerji santrallerinin teşvik edilmesine yönelik kurulmuş teşvik mekanizmaları bulunmaktadır. Bunların başında Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) mekanizması gelmektedir. YEKDEM mekanizması ile yenilenebilir enerji statüsünde olan bir santral YEKDEM Kanunu'nda belirtilen birim fiyatlar üzerinden belirli bir yıl boyunca günlük piyasa işlemlerine tabi olmadan ürettiği elektriği direkt olarak devlete satabilmektedir. Eğer yatırımcılar serbest piyasada yani EPIAŞ üzerinden elektrik satmak isterlerse, bu imkânda yatırımcılara

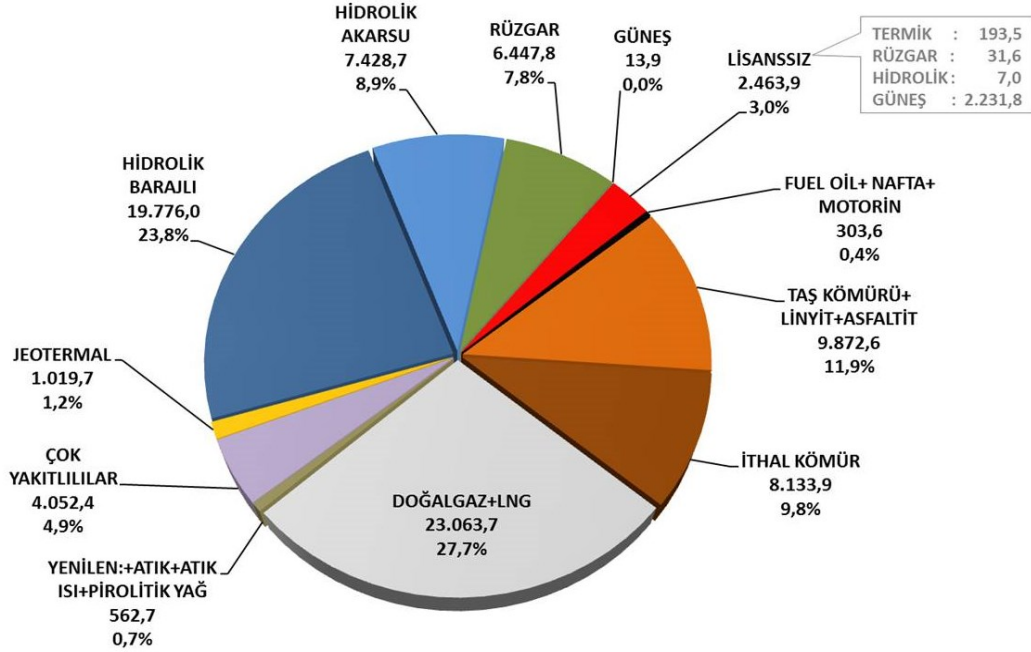
alternatif olarak tanımlanmıştır. Mevcut durumda YEKDEM tarafından uygulanan teşvik mekanizmaları cezbedici olduğu için yenilenebilir enerji santrallerinin birçoğu direk olarak YEKDEM'e satış yapmaktadır. Ayrıca 1MW altı yenilenebilir enerji santralleri için çıkarılmış lisans muafiyeti ile bu statüde kurulan tesislerin 10 sene boyunca piyasadan bağımsız elektrik satışı yapmalarında mümkün olmuştur. Ancak gelişen piyasa şartları ve Türkiye'nin uzun dönem stratejilerinin yatırımcı nezdinde karşılık bulmasıyla birlikte bazı yenilenebilir enerji kaynaklı santrallerde 2017-2018 döneminde yapılan ihalelerde yatırımcılar teşvik mekanizmasına dâhil olmak istemeyerek serbest piyasada hiçbir teşvik almadan rekabet etme kararı almıştır. Bu durum göstermektedirki yenilenebilir enerji santralleri çok yakın bir gelecekte elektrik piyasamız içerisinde gerek GÖP gerekse GİP'te aktif olarak yer alacaklardır.

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde jeotermal, biyogaz ve hidroelektrik kaynaklı santraller baz santral olarak çalışmakta olup, dengeleme noktasında yük alıp, yük atabilirken, rüzgâr ve güneş enerji santralleri değişken doğal kaynakları sebebiyle bu şekilde bir operasyona dahil olamamaktadır. Piyasa içerisinde bu üretim kaynaklarının entegrasyonu için geliştirilmiş çeşitli tahmin sistemleri olup, gerek yatırımcılar gerekse şebeke işletmecisi bu sistemler üzerinden elektrik satışını ve şebekenin işletilmesini sağlamaya çalışmaktadır. Bu durumda özellikle rüzgâr ve güneş alanında yönetilebilir kapasitenin hep belli bir oranda sınırlanmasına sebep olmaktadır. Fakat günümüzde geline nokta teknolojik gelişmelerle birlikte elektrik enerjisinin depolanması alanında ciddi gelişmeler katedilmiş buna ilaveten şebeğe bağlı büyük santrallerde kullanılabilecek tipte (şebeke-ölçekli) batarya sistemlerinin birim maliyetlerinde de düşüşler olmuştur. Bu bilgiler ışığında önümüzdeki yıllarda depolamalı rüzgâr ve güneş enerji santrallerinde devreye girmesiyle, piyasanın ağırlıklı fosil kaynaklardan yenilenebilir enerji kaynaklarına kayması ve bu sistemlerin teknik kabiliyetleri sebebiyle piyasa işletme modelinin daha gelişmiş, farklı bir modele evrilmesi beklenmektedir.

3.2 Kurulu Güç ve Elektrik Üretim Kapasitesi

Türkiye elektrik piyasasında 2017 Kasım ayı sonu itibariyle kurulu güç ve enerji üretim dağılımları şu şekilde gerçekleşmiştir. İlk olarak doğalgaz santralleri gerek kurulu güçte gerekse enerji üretim miktarında en büyük payı alarak göze çarpmaktadır. Kurulu güç dağılımında %22 civarı bir ağırlığının olmasına karşın enerji üretimi

dağılımda %38 gibi ciddi bir paya sahiptir. Aynı şekilde ithal kömür ve linyit bazlı santrallerde kurulu güç açısından ciddi bir orana sahip olmakla birlikte üretim miktarı içerisindeki dağılımları da sırasıyla %17,3 ve %13,7 şeklinde yüksek bir payla seyretmektedir.



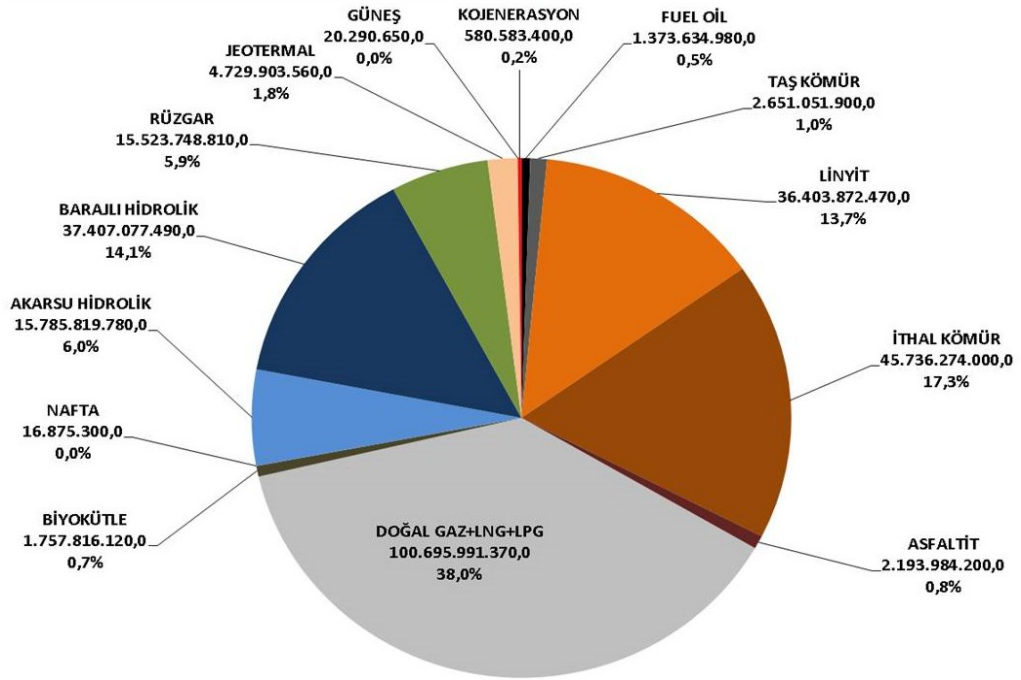
KURULU GÜÇ (11/2017) : 83.138,9 MW

Şekil 3.3: Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü–2017 Kasım Sonu (EMO, 2018).

Hidroelektrik santrallerinin elektrik enerjisi üretimindeki payı nispeten kurulu güçteki payından düşük olmakla birlikte, bu oran %20,1 seviyesindedir. Bu oran Türkiye’nin yenilenebilir enerji üretim hedeflerini yakalamasında ciddi bir paya sahip olacak olup, hidroelektrik santraller yenilenebilir enerji portföyü içerisinde başı çekmektedir. Fosil olmayan bir kaynak olması ve baz yük olarak çalışması sebebiyle hidroelektrik santrallerin, yenilenebilir enerji portföyü içinde payı Türkiye için oldukça önemlidir.

Şekil 3.4’de görüleceği üzere hızlı gelişen lisanssız pazar ile birlikte özellikle güneş enerjisi alanında ciddi yatırımlar yapılmış ve toplam lisanslı kapasite ile birlikte güneş enerjisi santrallerinde hatırı sayılır bir kurulu güç elde edilmiştir. Buna karşın güneş enerjisi santrallerinin üretimdeki payı oldukça düşük kalmıştır, bunun ana sebebidir güneş enerjisi alanında yapılan yoğun yatırımların 2017 son yarısında gerçekleşmiş olması ve yıllık üretim değerlerinin istatistiklere tam olarak yansımamış olmasıdır.

Rüzgâr enerjisine baktığımızda ise yaklaşık 6.5GW’lık kurulu güç kapasitesi ve üretimdeki %6 payı ile hidroelektrik santrallerden sonra yenilenebilir enerjiler arasında portföye katkı yapma noktasında ikinci sırada olan yenilenebilir enerji kaynağıdır.

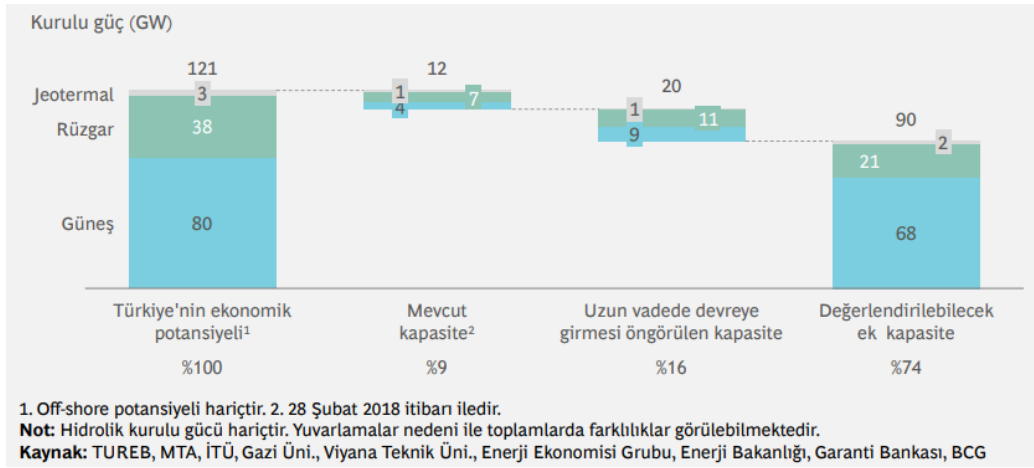


ÜRETİM (11/2017) : 264.876.924.030 kWh
TÜKETİM (11/2017) : 264.380.709.320 kWh
NOT: Lisanssız Üretim Hariçtir.

Şekil 3.4: Türkiye’de elektrik üretimi–2017 Kasım Sonu (EMO, 2018).

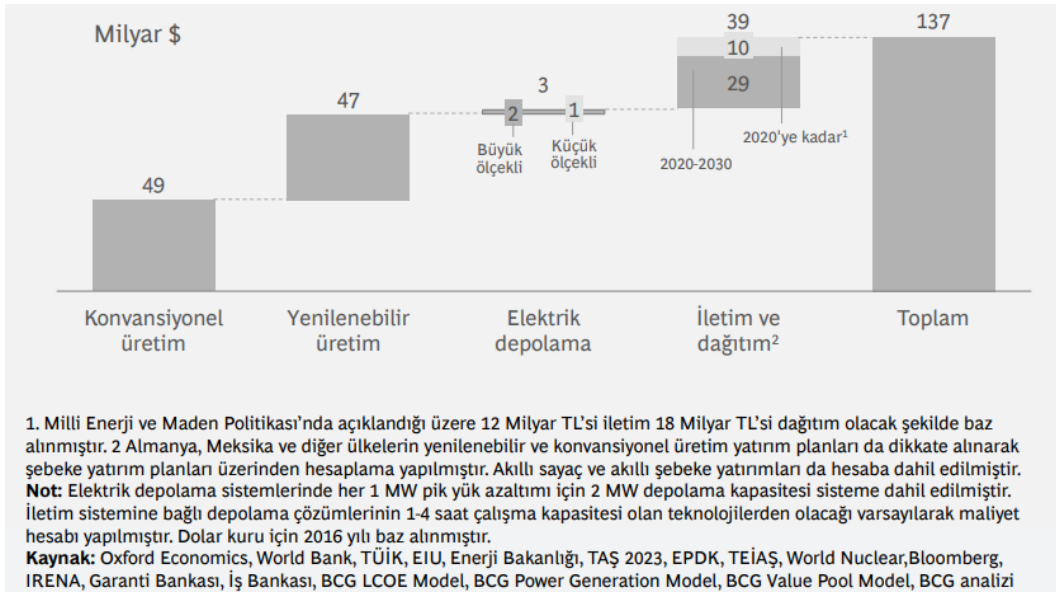
Son olarak jeotermal ve biyogaz tesislerine baktığımızda ise ikisinin birlikte kurulu gücü, toplam kurulu gücün yaklaşık %1,5’u mertebelerinde olup, üretimdeki payları ise yaklaşık %2.5 mertebelerindedir. Bu sayısal değerler göstermektedirki biyogaz ve jeotermal kaynaklı santraller yüksek kapasite faktörleri ile hidroelektrik, rüzgar ve güneş enerji santrallerine nazaran portföy içerisinde enerji üretimi oransal değeri, kurulu güç oransal değerinden daha fazla olan yenilenebilir enerji santral tipleridir.

TÜSİAD tarafından Nisan 2018’de yayınlanan Sürdürülebilir Gelecek için Sürdürülebilir Enerji başlıklı raporda Türkiye’nin toplam rüzgar, güneş ve jeotermal kurulu güç potansiyeli belirtilmiş ve uzun vadede devreye girmesi öngörülen kapasite miktarları güneş enerjisi için 9GW, rüzgar enerjisi için 11GW, jeotermal enerji içinde 1GW olarak Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5: Türkiye'nin değerlendirebileceği yenilenebilir enerji kapasitesi (BCG-TÜSİAD, 2018).

Ayrıca aynı raporda 2018-2030 yılları arasında elektrik sektörüne yapılması öngörülen yatırım miktarı verileride paylaşılmıştır. Şekil 3.6'da paylaşılan grafikten görüleceği üzere ülkemizde elektrik piyasası için 2030'a kadar 137Milyar\$ yatırım öngörülmüşken, bunun 47Milyar\$'ı yenilenebilir enerji kaynaklarına, 3Milyar\$'ı depolama sistemlerine, 39Milyar\$'ı ise iletim dağıtım altyapısına yapılacaktır.

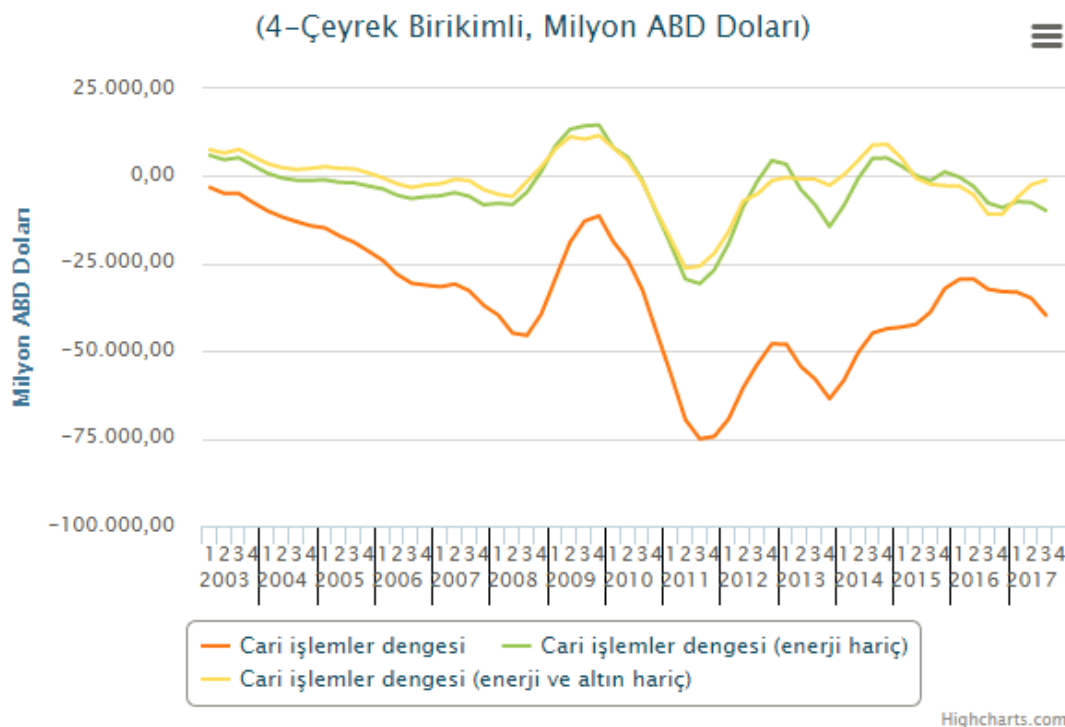


Şekil 3.6: Sürdürülebilir büyüme senaryosunda 2030'a kadar Türkiye elektrik sektöründe yapılması öngörülen yatırım miktarı (BCG-TÜSİAD, 2018).

3.3 Cari Açık

Ülkemizde cari açık yıllardır süre gelen bir sorun haline gelmiş olup, ekonominin yumuşak karnı olarak değerlendirilmektedir. Sağlıklı ve istikrarlı bir gelişim için cari açığın belirli oranların altında tutulması şarttır.

Türkiye’de son 15 yıl içerisinde elektrik kurulu gücü 3 kat, elektrik üretim miktarı 2 kat, doğalgaz tüketimi 3 kat artmıştır. (ETKB, "Milli Enerji Ve Maden Politikası" Tanıtım ProgramıPaylaş:, 2017) Bu artışlar cari işlemler dengesinde negatif bir baskı oluşturmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar bakanı Berat Albayrak’ın paylaştığı bilgiler çerçevesinde son 10 yılda ortalama enerji ithalatı 44 milyar dolar, maden ithalatı ise 10,6 milyar dolar seviyesindedir. Yaklaşık 55 milyar dolar olan bu ithalat ülkemizin cari açığında önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 3.7’de de görüleceği üzere toplam cari açık içerisinde enerjinin payı %75 oranında seyretmektedir. Türkiye enerji üretim görünümünde petrol ve doğalgaz büyük bir yere sahip olup, bu iki emtianın neredeyse tamamı ithal edilmektedir.



Şekil 3.7: Türkiye Cumhuriyeti cari işlemler dengesi (2003-2017) (TCMB, 2017).

Cari açığın azaltılması Türkiye için oldukça kritik bir konudur. Cari açığın azalmasında elektrik üretim sektörü önemli bir paya sahip olup, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü'nün yayınladığı ve Ek-2'de paylaşılan 2016 enerji denge tablosuna göre toplam ithal edilen enerji hammaddesinin yaklaşık %23'ü elektrik üretim sektöründe kullanılmaktadır. Dolayısıyla Türkiye'nin önümüzdeki yıllardaki hedefi bu %23 olan oranın yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları ile azaltılması olacaktır.

3.4 Milli Enerji ve Maden Politikası

T.C. Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı çerçevesinde bir süredir yürütülen çalışmalarla Milli Enerji ve Maden Politikası yürürlüğe sokulmuştur. Türkiye'nin enerjide en büyük iki sorunsalı arz güvenliği (dışa bağımlılık) ve önceki bölümde bahsedilen ithal fosil yakıtların ağırlıklı kullanımına bağlı cari açığıdır. Bunların azaltılabilmesi için bir takım tedbirlerin alınması kaçınılmaz durumdadır. Milli Enerji ve Maden Politikası'nın üç saçı ayağı bulunmaktadır; arz güvenliği, yerlileştirme ve öngörülebilir piyasa. (Karagöl E.T. ve diğ., 2017)

Yerlileştirme ve arz güvenliği hedefleri çerçevesinde Türkiye'nin mutlak suretle yerli kaynak kullanımı olan enerji üretim yöntemlerine yönelmesi kaçınılmazdır. Bunlar politika çerçevesinde şu şekilde özetlenmiştir; yerli maden kullanımlarının arttırılması, nükleer santrallerin kurulması ve AR-GE ve yerli üretimde dayalı yenilenebilir enerji kaynaklarının payının arttırılmasıdır. Bu çalışmanın konusunda oluşturan yenilenebilir enerji kaynaklarının ülkemiz elektrik üretim sektöründeki yeri, önemi ve hedeflerine ilişkin gerek 10. Kalkınma planında, gerek ETKB 2015-2019 Strateji Planı raporunda, gerek 2017-2023 Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı raporunda ve Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı raporunda birçok atıf yapılmış, ayrıca strateji, hedef ve politikalar belirtilmiştir. Bunlar ileriki bölümlerde daha detaylı olarak irdelenecek ve kurulan modelin dayanak noktalarını oluşturacaktır.

3.5 Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynakları

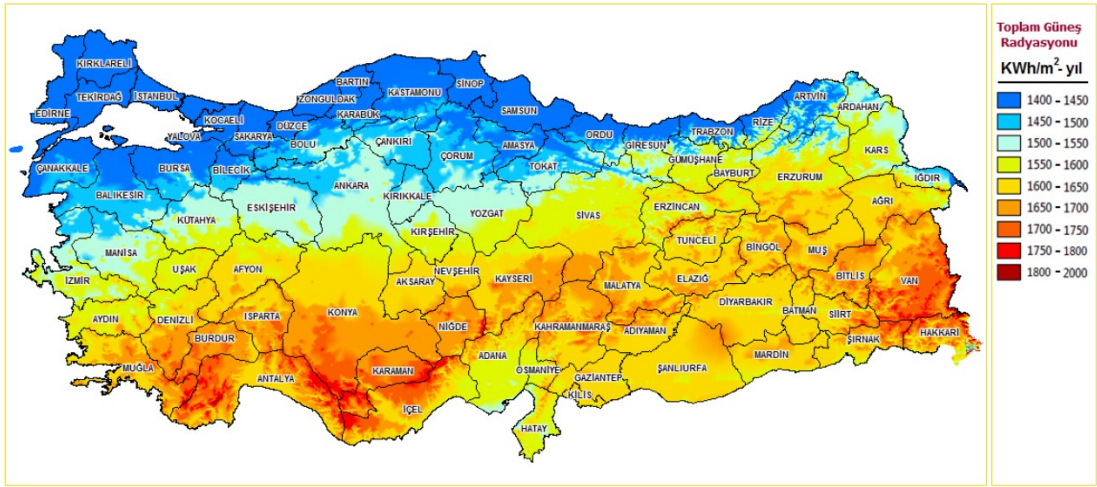
3.5.1 Güneş enerjisi

Güneş enerjisi, dünyamızın temel enerji kaynağı olup, hayatımızın birçok evresinde etkisini hissettirmektedir. Güneş enerjisinin birçok uygulama alanı olup, bu çalışmada güneş enerjisinden elektrik üretim konusu irdelenmektedir. Teknolojik olarak baktığımızda ise fotovoltaik güneş enerji santralleri gerek dünyadaki gerekse Türkiye'de ki kurulu gücün çok büyük bir kısmını oluşturduğu için bu teknolojinin özelliklerinden ve Türkiye'de ki durumundan bahsedilecektir.

Fotovoltaik güneş panellerinden elektrik üretimi konusunu hem dünya perspektifinde hemde Türkiye'nin enerji dönüşümünde yıkıcı bir potansiyele sahiptir. Geçtiğimiz yıl içerisinde dünyada gerçekleşen kurulu güç yaklaşık 95 GW mertebelerinde olmuştur. Bu oranla birlikte güneş enerjisinde dünya çapında eklenen kapasite miktarı ilk defa

nükleer santral miktarından fazla olmuştur. Türkiye ise yeni gelişen pazarıyla birlikte 3.4GW'lık kurulu güce ulaşmış ve 1GW'lık YEKA projesinin ihale sürecini tamamlamıştır. (Lacey S., 2017)

Ülkemiz güneş enerji potansiyeli olarak İspanya'dan sonra Avrupa'nın en zengin ülkesi konumundadır. İkliminin elverişli olması sayesinde Türkiye'de güneş enerjisi alanında yapılacak yatırımlarında önümüzdeki yıllarda katlanarak devam edeceği öngörülmektedir. Şekil 3.8'de görüleceği üzere ülkemizin iç anadolu, doğu anadolu, güneydoğu anadolu, akdeniz ve ege bölgeleri yüksek ışıınım oranına sahiptir.



Şekil 3.8: Güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA) (YEGM-GEPA, 2018).

Güneş enerji teknolojileri özelinde fotovoltaik uygulamalarda elektrik üreten temel ekipman güneş panelleridir. Güneş enerji teknolojisi ve güneş panellerinin diğer yenilenebilir enerji üretim yöntemlerinden en büyük farkı, enerji üretim döngüsü içerisinde herhangi bir evresinde dönen/hareket eder bir parça olmaması ve herhangi bir mekanik gücün elektrik enerjisine çevrilmemesidir.

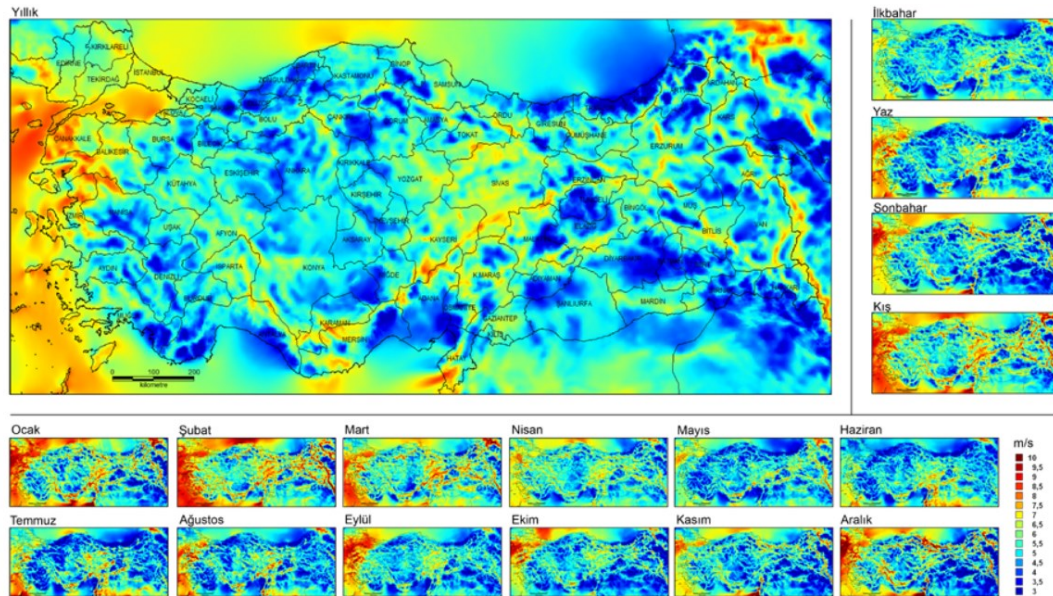
Güneş panellerinin ana ekipmanı, yani güneş ışığındaki fotonları yakalayıp elektrik enerjisine dönüştüren kısmı güneş hücreleridir. Güneş hücrelerinin çalışma mantığı yarıiletken malzemelerin jonksiyon etkisine dayanmaktadır. Güneş hücresi içerisinde oluşturulan n-tip ve p-tip özellikli katmanlar sayesinde, güneş hücresi yüzeyine düşen güneş ışınlarının etkisiyle elektron üretilmektedir. Üretilen bu elektronlarda güneş hücresinin yüzeyindeki özel iletkenler sayesinde toplanmaktadır. Daha sonra oluşturulan panel yapısı sayesinde toplanan elektronlar, elektrik üretim tesislerinde kullanılabilecek, çevresel şartlara uygun, yüksek gerilim seviyesine sahip güneş panellerine dönüştürülmekte ve elektrik sistemine aktarılmaktadır. (GÜNAM, 2018)

3.5.2 Rüzgâr enerjisi

Rüzgâr, güneş radyasyonunun yer yüzeyini farklı ısıtmasından kaynaklanır. Yer yüzeyinin farklı ısınması, havanın sıcaklığının, neminin ve basıncının farklı olmasına, bu farklı basınç da havanın hareketine neden olur. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık %2'si kadarı rüzgâr enerjisine çevrilir. Meteorolojik açıdan rüzgâr enerjisi şu bölgelerde oluşabilir; basınç değişiminin fazla olduğu yerler, yüksek, engebesiz tepe ve vadiler, güçlü jeostrofik rüzgârların etkisi altında kalan bölgeler, kıyı şeritleri, kanal etkilerinin meydana geldiği dağ silsileleri, vadiler ve tepeler. (ETKB, 2018)

Rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerji santrallerinin ana yapı elemanı olup hareket halindeki havanın kinetik enerjisini öncelikle mekanik enerjiye ve sonrasında elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir.

Türkiye'de yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7.5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilmiştir. Bu kabuller ışığında, orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak üretilen rüzgâr kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Bakanlık tarafından Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenmiştir. Bu potansiyele karşılık gelen toplam alan Türkiye yüz ölçümünün %1.30'una denk gelmektedir.



Şekil 3.9: Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyel atlası (REPA) – Rüzgar hızı(50m yükseklik) (YEGM-REPA, 2018).

Rüzgâr enerjisinin en büyük özelliklerinden biri sürekli değişebilen bir üretim kaynağı olmasıdır. Bu durumun şebeke tarafında yönetilebilmesi için bütün santrallerin detaylı olarak takip edilmesi ve çeşitli yöntemlerle sonraki gün veya günler için tahminde bulunması gerekmektedir. Bu gereklilik çerçevesinde ülkemizde Enerji Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü ve Tübitak MAM biraraya gelerek RİTİM'i, Türkiye'de Rüzgârdan Üretilen Elektriksel Güç İçin İzleme ve Tahmin Sistemi Geliştirilmesi Projesi, hayata geçirmiştir. Bu sayede bütün santraller tek bir merkezden takip edilmekte ve daha sürdürülebilir bir şekilde işletilebilmektedir. (RİTİM Projesi, 2018)

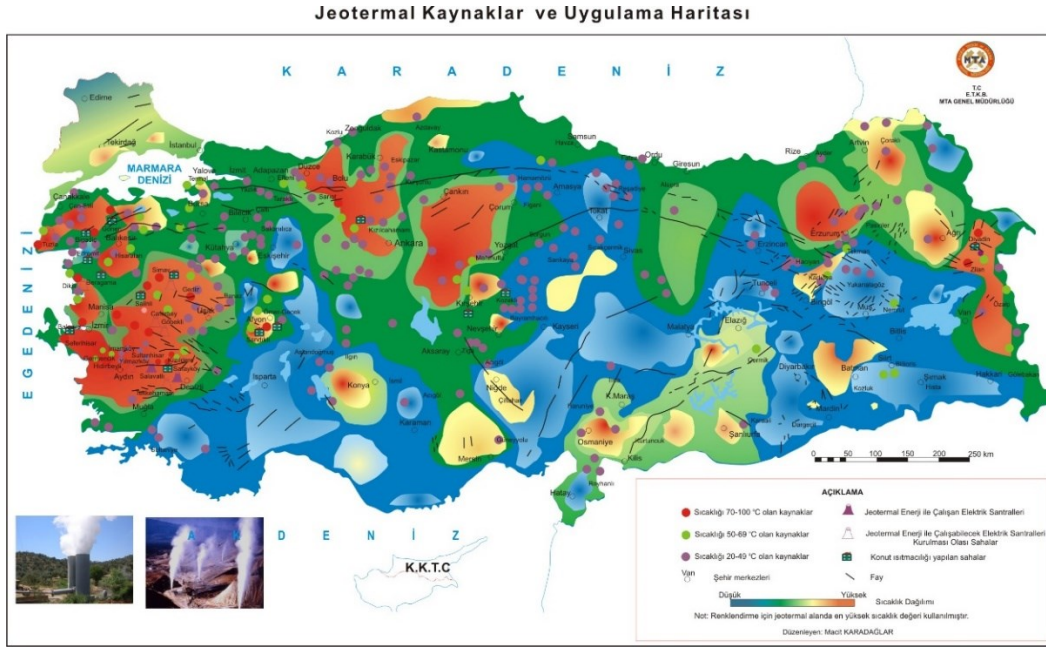
2017 yılı sonu itibariyle işletmede olan lisanslı rüzgâr enerji santrallerinin kurulu gücü 6.516 MW'dır. Buna ilaveten yaklaşık 2,5GW mertebesinde yeni projeninde ihaleleri gerçekleştirilmiştir.

3.5.3 Jeotermal enerji

Jeotermal enerji, yerin derinliklerindeki kayalar içinde birikmiş olan ısının akışkanlarca taşınarak rezervuarlarda depolanması ile oluşmuş sıcak su, buhar ve kuru buhar ile kızgın kuru kayalardan yapay yollarla elde edilen ısı enerjisidir.

Ülkemiz jeolojik ve coğrafik konumu itibarı ile aktif bir tektonik kuşak üzerinde yer aldığı için jeotermal açıdan dünya ülkeleri arasında zengin bir konumdadır. Jeotermal enerjiden elektrik üretiminde dünyada ilk 5 ülke; ABD, Filipinler, Endonezya, Türkiye ve Yeni Zelanda şeklindedir. Dünya'da doğrudan kullanım uygulamalarındaki ilk beş ülke ise Çin, ABD, İsveç, Türkiye ve İzlanda'dır. (ETKB, 2018)

Ülkemizde jeotermal ile ilgili faaliyetler 5686 sayılı Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Kaynaklı Sular Kanunu ile düzenlenmiştir. Ayrıca ülkemizin her tarafında yayılmış 1.000 adet civarında doğal çıkış şeklinde değişik sıcaklıklarda birçok jeotermal kaynak mevcuttur. Ülkemizin jeotermal potansiyeli teorik olarak 31.500 MWt olup potansiyel oluşturan alanların % 78'i Batı Anadolu'da, % 9'u İç Anadolu'da, % 7 si Marmara Bölgesinde, % 5'i Doğu Anadolu'da ve % 1'i diğer bölgelerde yer almaktadır. Jeotermal kaynaklarımızın % 90'ı düşük ve orta sıcaklıklı olup, doğrudan uygulamalar (ısıtma, termal turizm, mineral eldesi v.s.) için uygundur, % 10'u ise dolaylı uygulamalar (elektrik enerjisi üretimi) için uygundur. Elektrik Üretimi 2002 yılında 15 MWe iken 2017 yılı sonu itibariyle sonunda 1063 MWe çıkmıştır.



Şekil 3.10: Türkiye’de jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası (MTA, 2018).

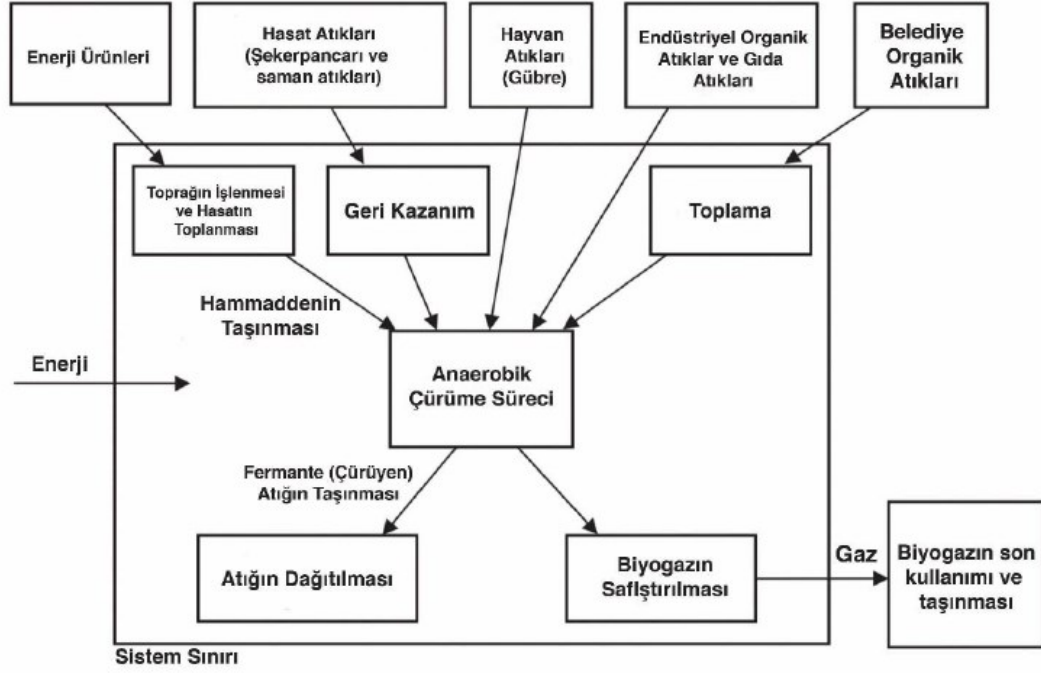
Türkiye Jeotermal Enerji Derneği’nin yaptığı çalışmaya göre Türkiye’de şu anda elektrik üretimi, jeotermal merkezi ısıtma, karbondioksit üretimi, termal turizm ve diğerleri ile Türk Milli Ekonomisine jeotermalin katkısı yaklaşık 12 Milyar TL olarak hesap edilmiştir. Sektörde yapılan toplam istihdam ise 42.000 kişidir. Ayrıca, mevcut tüm jeotermal değerlendirmelerinin doğal gaz eşdeğeri yılda 2,4 Milyar TL’dir. (TJD, 2018)

3.5.4 Biyogaz enerjisi

Biyogaz, Organik bazlı atık/artıkların oksijensiz ortamda (anaerobik) fermentasyonu sonucu ortaya çıkan renksiz - kokusuz, havadan hafif, parlak mavi bir alevle yanan ve bileşimininde organik maddelerin bileşimine bağlı olarak yaklaşık; % 40-70 metan, % 30-60 karbondioksit, % 0-3 hidrojen sülfür ile çok az miktarda azot ve hidrojen bulunan bir gaz karışımdır. (YEGM, 2018)

Aşağıdaki şekilde de görüleceği üzere biyogaz üretiminde kullanılan atık ve artıklar olarak hayvansal atıklar, bitkisel atıklar, endüstriyel organik atıkları, gıda atıkları ve belediye atıkları gibi atık ve artıklar kullanılabilir.

Bu atıklar toplanarak anaerobik çürüme sürecine maruz bırakılır. Bu işlem sonucunda çıkan fermante olmuş atık uzaklaştırıldıktan sonra, elde edilen biyogaz farklı işlemlere tabi tutularak saflaştırılır ve nihai kullanımı için ilgili ünitelere iletilir.



Şekil 3.11: Biyogaz Üretim Sisteminde Hammadde ve Enerji Akışları Diyagramı (Ersoy A.E., 2017).

Elde edilen biyogaz farklı amaçlarla farklı sektörlerde kullanılabilmektedir, bu çalışma kapsamında biyogazdan elektrik üretimi konusunun üzerinde durulduğu için biyogaz kaynağına ilişkin elektrik üretimi ile ilgili bilgiler verilecektir. Farklı organik kaynaklardan elde edilen biogaz ısı ile birlikte yakılarak buhar elde edilmekte ve bir buhar tribünü yardımı ile farklı ısı çevrimler kullanılarak bu buhar elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Yaklaşık olarak 1m^3 biyogazdan $4,7\text{kWh}$ elektrik üretilmektedir. (Şenol H. ve diğ., 2017)

Ülkemizde 2017 yılı sonu itibariyle kurulu biogazdan elektrik üretim tesisi kapasitesi 632.7MW olup, bu kapasitenin Türkiye'nin toplam elektrik üretimine etkisi $\%0,7$ 'dir. Verilerden de görüleceği üzere hayvansal ve bitkisel atık noktasında zengin bir potansiyele sahip olan ülkemizde, biogaz enerjisinde elektrik üretimi halen çok düşük seviyede olup, bu alanda değerlendirmeye değecek ciddi bir potansiyel bulunmaktadır.

3.5.5 Hidroelektrik enerjisi

Hidroelektrik enerji santralleri suyun hareket etmesiyle oluşan mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü elektrik üretim tesisleridir. Suyun akış ve düşüş hızı tribün vasıtasıyla üretilen gücü etkileyen önemli etkenlerdir. Temelde hidroelektrik santralleri iki tipte bulunmaktadır, bunlar; nehir tipi, yani akan suyun

potansiyelinin kullanıldığı santraller veya rezervuar tipli, yani suyun yüksek bir noktadan aşağı düşürüldüğü santrallerdir. Her iki santral tipinde de akan su, tribünler vasıtasıyla mekanik enerjiye çevrilir ve sonrasında generatör sistemine bağlanarak elektrik enerjisi üretilir. Hidroelektrik santrallerin en önemli özelliklerinden biri hem baz yük olarak kullanabilmeleri hem de hızlıca devreye girip çıkabilmeleri sebebiyle pik yük olarak kullanılabilmeleridir.

Ülkemizin yenilenebilir enerji potansiyeli içinde en önemli yeri tutan hidrolik kaynaklarının teorik hidroelektrik potansiyeli 433 milyar kWh olup teknik olarak değerlendirilebilir potansiyel 216 milyar kWh ve ekonomik hidroelektrik enerji potansiyel 140 milyar kWh/yıl'dır. Gelişen piyasa ve değişen maliyetlerle birlikte 2017 sonu itibarıyla Türkiye'de ki HES (Hidroelektrik santral) kurulu gücü 27,2GW, bu santrallerin ürettiği toplam elektrik miktarı ise 53,5 milyar kWh/yıl olmuştur. Bakanlığımız tarafından yapılan açıklamada ayrıca 2023 yılına kadar teknik ve ekonomik olarak değerlendirilebilecek tüm hidroelektrik potansiyelinin elektrik enerjisinde kullanımı hedeflenmektedir. (ETKB, 2018)

3.6 Enerjide Öncelikli Hedefler

Türkiye'nin enerji görünümüne baktığımızda 7 konu başlığının kritik önem taşıdığı ve bunların iyileştirilmesi ve geliştirilmesi noktasında politikalar ve hedefler gözetildiği, bunların bir kısmında gelişmeler katedilirken bazılarında ise yolun başında olduğumuzu söyleyebiliriz. Bu konu başlıkları;

- 1) Arz Güvenliği
- 2) Alternatif Enerji Kaynakları
- 3) Kaynak Çeşitliliği
- 4) Yerli ve Yenilenebilir Kaynakların Ekonomiye Kazandırılması
- 5) Sürdürülebilirlik
- 6) Enerji Piyasalarının Şeffaflığı ve Serbestleşmesi
- 7) Enerji Verimliliği

Bu konu başlıkları altında Türkiye'nin belirlediği birçok hedef olmakla birlikte öncelikle genel politika ile ilgili bazı hedefler ve bu tezin konusunu oluşturan yenilenebilir enerji kaynaklarını yakından ilgilendiren diğer bazı hedefler şu şekildedir (EÜAŞ, 2017)

- ❖ Enerji verimliliğinin artırılması
- ❖ Serbest piyasa koşullarına tam işlerlik kazandırılması ve yatırım ortamının iyileştirilmesi,
- ❖ Petrol ve doğalgaz alanlarında kaynak çeşitliliğinin sağlanması ve ithalattan kaynaklanan riskleri azaltacak tedbirlerin alınması,
- ❖ Ülkemizin enerji üssü ve terminali haline getirilmesi,
- ❖ Endüstriyel hammadde, metal ve metal dışı madenlerimizin üretimlerinin artırılarak yurt içinde değerlendirilmesinin sağlanmasıdır.
- ❖ Yerli kaynaklara öncelik vermek suretiyle kaynak çeşitliliğinin sağlanması,
- ❖ Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji arzındaki payının artırılması,
- ❖ Enerji ve doğal kaynaklar alanındaki faaliyetlerin çevreye duyarlı şekilde yürütülmesinin sağlanması,
- ❖ Yerli doğal kaynakların ülke ekonomisine katkısının artırılması,
- ❖ Maliyet, zaman ve miktar yönünden enerjinin tüketiciler için erişilebilir kılınması,

Bu temel politika ve genel hedeflerin özelinde 2019 ve 2023 için belirlenmiş bazı somut hedefler ise şu şekildedir;

- ❖ Yerli kömürden üretilen elektrik enerjisi miktarının yıllık 60 milyar kWh'e çıkarılması,
- ❖ Yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretim santrallerinin toplam kurulu gücünün 46.710 MW'a çıkarılması,
- ❖ Hidrolik santral kurulu güç toplamının 32.000 MW'a çıkarılması,
- ❖ Jeotermal enerjisinden elektrik üretimi açısından kurulu gücün 1.000 MW'a çıkarılması,
- ❖ Fotovoltaik güneş enerjisine dayalı kurulu gücün 3.000 MW'a çıkarılması hedeflenmektedir.
- ❖ Bilinen linyit ve taşkömürü kaynaklarımızın tamamının elektrik üretiminde kullanılması,
- ❖ İki nükleer santralin ilgili ünitelerinin işletmeye alınması ve üçüncü nükleer santralin inşaatına başlanması,
- ❖ Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının yükseltilmesi,
- ❖ Teknik ve ekonomik olarak değerlendirilebilecek hidroelektrik potansiyelin tamamının elektrik üretiminde kullanılması,

- ❖ Rüzgâr enerjisi kurulu gücünün 20.000 MW'a çıkarılması,
- ❖ Elektrik enerjisi kurulu güç kapasitesinin 110.000 MW'ın üzerine çıkarılması,
- ❖ Toplam elektrik üretiminin 400 milyar kWh'ye yükseltilmesi.

Bu hedeflerin bir kısmı bu tezin konusunu çerçevesinde yapılan modelleme çalışmasında sistemin kısıtı olarak dikkate alınacak ve oluşacak yenilenebilir enerji portföyünün şekillenmesinde rol oynayacaktır. Modelin detayına ilişkin bilgiler Bölüm-4 ve Bölüm-5'te verilmiştir.

3.7 Yerel Enerji Piyasasında Dinamizm

Türkiye Elektrik Piyasası'nın incelendiği bu bölümde son olarak piyasanın dinamizminden bahsedilecektir. Türkiye Cumhuriyeti gerek jeopolitik konumu, gerek gerek gelişen ekonomi ve sanayisi ile birlikte enerji sektöründe ve özelinde elektrik piyasasında büyük bir dinamizme sahiptir. Belirlediği politikalar çerçevesinde gerek arz güvenliği, gerek yerli kaynakların devreye sokulması ve gerekse piyasaların şeffaflaşması adına yaptığı çalışmalar sektör ve sektör oyuncularının ciddi değişikliklere itmiştir. Bu örneklerden bazılarını sıralamak gerekirse, EPIAŞ'ın kurulmasıyla birlikte yatırımcıların piyasaya olan güveni artmış, elektrik fiyatlarında pozitif gelişmeler yaşanmış ve yatırımlar daha da rekabetçi hale gelmiştir. Aynı zamanda yerli kaynakların devreye sokulmasına ilişkin politika çerçevesinde rüzgâr ve güneş enerjisi için öncelikli olarak teşvik mekanizmaları uygulanmış, lisanssız olarak faaliyet gösterilebilen bir pazar yaratılmıştır. Bu durum özellikle güneş enerjisi alanında çok hızlı gelişmeler yaşanmasına sebep olmuştur. Gelişmeler bununlada kalmamış yeni geliştirilen bir model olan, YEKDEM mekanizmasının devamı olarak görülen ve Türkiye'ye teknoloji transferinde içerisinde barından bir model ile YEKA projeleri yaratılmış ve 1'er GW gücündeki rüzgâr ve güneş enerji santralleri için ihaleler yapılmıştır. Bu YEKA projeleri ile birlikte kazanan yatırımcıya getirilen zorunluluklar çerçevesinde Türkiye'de fabrika kuralacak, yerli üretim yapılacak ve her yıl AR-GE faaliyetlerine ciddi miktarda kaynak ayrılacaktır. AR-GE faaliyetlerinin önemini vurgulamak gerekirse 2.bölümde belirtildiği üzere rüzgâr ve güneş enerjisi kurulu güçleri önümüzdeki dönemde dünyada en fazla kurulu güç yatırımı gerçekleştirilecek kaynaklardır. Bu kaynaklara ilişkin teknolojilerin gelişimi dünyada büyük bir hızla gelişmekte ve rekabetçi bir dünya pazarında bütün global markalar kendilerine avantaj sağlayabilmek için sürekli olarak AR-GE faaliyetlerini arttırarak

yeni ürünler çıkarmaktadır. Bu sebeple Türkiye’de de kurulacak tesislerin faaliyetlerini rekabetçi olarak sürdürebilmeleri için ciddi miktarda AR-GE kaynağı ve personeli ayırmaları gerekecektir.

Türkiye bugünlerde enerji kaynakları özelinde jeopolitik konumunun hem avantajını hemde dezavantını yaşarken, yenilenebilir enerjilerle ilgili teknolojik gelişmeleride yakından takip etmekte ve teknoloji üretme noktasında bir oyuncu olmak için çabalamaktadır. Digitalleşen dünyada elektrik şebeke altyapılarının geliştirilmesiyle birlikte yenilenebilir enerjilerin özellikle değişken kaynaklı ve maliyeti daha düşük olan rüzgâr ve güneş enerjisinin şebekeye bağlanabilirliğide artmaktadır. İlaveten yeni çıkan batarya teknolojileri ile rüzgâr ve güneş enerji santralleri önümüzdeki yıllarda elektrik piyasası içerisinde farklı bir oyuncu haline dönüşecektir. Bunun ilk sinyallari 2018 senesinin ilk aylarında verilmiş ve Türkiye’de yapılacak yeni güneş enerjisi YEKA ihalesinde batarya sisteminin entegre olacağı güneş enerji santrallerinin talep edileceği açıklamıştır.

Bunların yanı sıra Türkiye coğrafyası ve yetişmiş insan kaynağı sayesinde Amerika-Avrupa bloğu ile Orta Asya-Uzak Doğu arasında yapılan ticarete önemli bir ülke konumundadır. Gerek hammadde üretimi konusunda gerekse elektrik yatırım ve ticareti noktasında birçok uluslararası firma Türkiye pazarında oluşan rekabete katılmak istemektedir. Buda pazarın dinamizmini sürekli ayakta tutmaktadır.

Bu bilgiler ışığında görülmektedirki Türkiye Elektrik Enerjisi Piyasası önümüzdeki dönemde oldukça hareketli olacak, özellikle yenilenebilir enerjiler alanında gerek devlet tarafında yeni politikalar belirlenecek ve duyurulacak gerekse yatırımcılar tarafından farklı tipte yatırımlar için girişimlerde bulunulacaktır. Bu ortamda en çok gündeme gelebilecek sorulardan bir taneside; bu tezinde temel olarak konusunu oluşturan ve sonraki bölümlerde anlatılan yöntem ve örnek ile açıklanmaya çalışılacak olan “Kısa vadede mevcut politika ve hedefler çerçevesinde hangi yıllarda, hangi kaynak türünden, kaç MW’lık bir kurulu güç elde etmeliyiz ?” olacaktır.

4. YÖNTEM

Yöneylem araştırmaları içerisinde Hedef Programlama önemli bir yere sahiptir. Bu tip modellemelerde karar verici mevcut bir problemi belirli şartlar ve kısıtlar altında en iyilemeye veya belirli değerlere eşitlemeye çalışır. Bu tip problemler çok çeşitli alanlarda literatürde yer almaktadır; üretim iyileştirme, kapasite artışı, maliyet azaltma, stok planlama, tasarım nceliklendirme ve yer seçimi problemleri bunlardan bazılarıdır. Bu problemlerde temel olarak amaç fonksiyonu/fonksiyonları, karar değişkenleri, kısıtlar ve veriler vardır.

Amaç Fonksiyonu: Matematiksel eşitliklerle ifade edilebilen, vektör içinde tanımlanabilen, karar değişkenleri ile en iyileme veya en küçükleme edilmeye çalışılan denklemlerdir. (Multi-Objective Optimization Problems, 2017)

Karar Değişkeni: Karar vericinin kontrolünde olan ve en iyileme çalışması yapılırken değiştirilebilir konumdaki veriler bütünüdür.

Kısıtlar: Karar değişkenlerinin durumunu etkileyen/kısıtlayan ve eşitlik veya eşitsizlik şeklinde modele etkisi olan sınırlayıcı faktörlerdir.

Veriler (Sabitler): Kurulan model içerisinde kısıtları ve amaç fonksiyonlarını etkileyen, matris formunda ifade edilebilir, değiştirilemez durumdaki sabit verilerdir.

Amaç foksiyonları temelde iki farklı şekilde gruplanabilmektedir. Bunlar problemin özünde bulunan amaç fonksiyonun tek veya tekden fazla olmasıdır. Örneğin bir ulaşım probleminde tekil amaç fonksiyonu maliyetin minimize edilmesi olabilir, fakat gerçek dünyada birçok problemde olası farklı amaçlardan sadece bir tanesini seçmek gerçekçi değildir. Yani ulaşım maliyetlerini minimize etmeye çalışırken, bir taraftan yolcu konforunu maksimize etmek de reel bir amaç olarak karşımıza çıkar. Bu yüzden birçok reel problem doğası gereği birden fazla amaç içerebilir. Mendoza ve Prabhu tarafından çok amaçlı problemlerde karar verme; eş zamanlı uygulanan birden çok kısıt arasından, en iyi tercihin seçilmesini sağlayan karar verme aracı olarak tanımlanmıştır. (Mendozaa G.A. ve Prabhub R., 2000) Bu tez kapsamında incelediğimiz enerji probleminde maliyet ve CO₂ salımının minimize edilmesi amalanmışken, üretilen

sosyal ve ekonomik faydalar maksimize edilmeye çalışılmıştır. Dolayısıyla bu çalışmada incelenecek sınıf çok amaçlı programlardır.

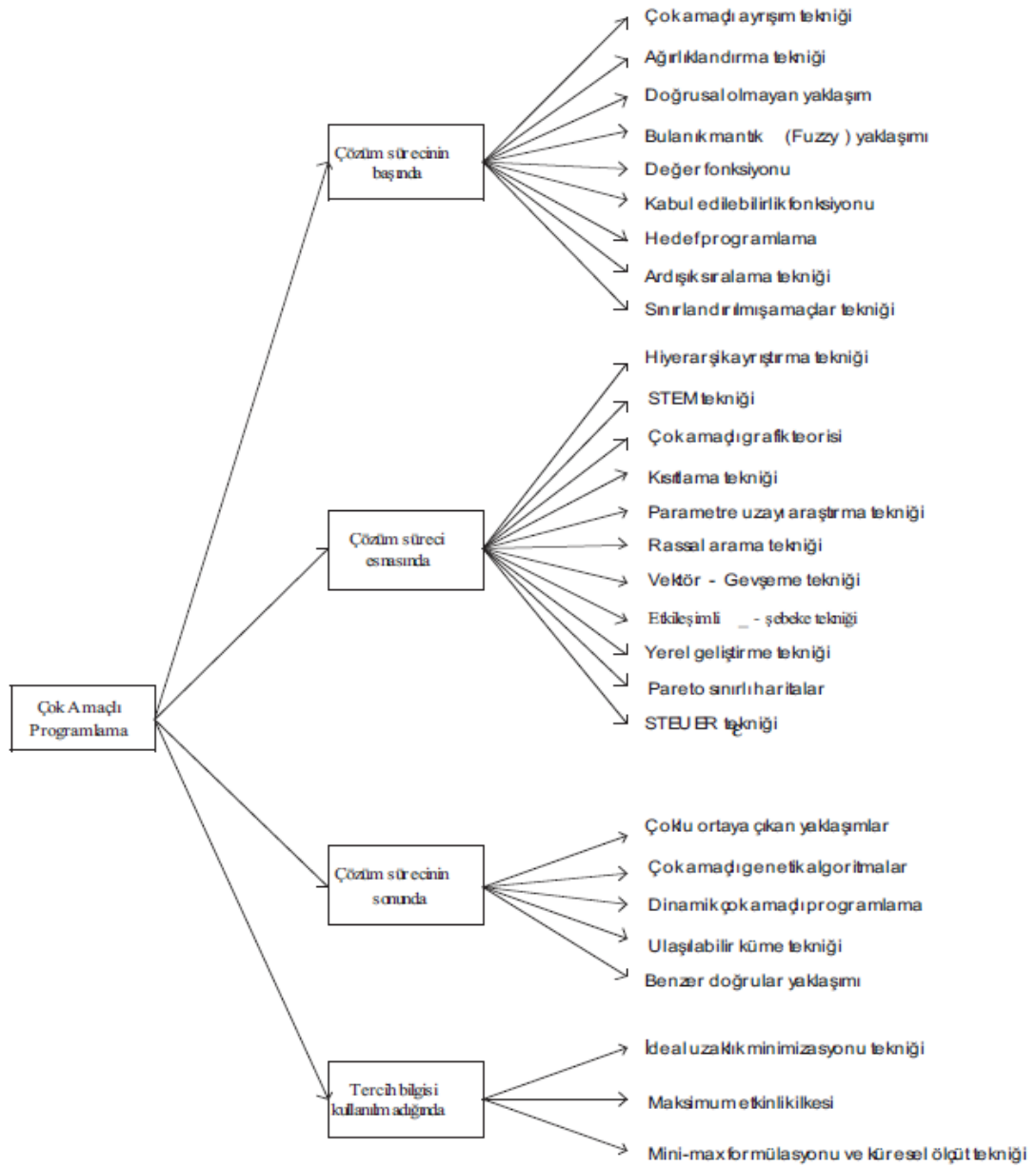
4.1 Çok Amaçlı Programlama

Çok amaçlı programlama metodunun kullanılmasının birkaç sebebi vardır; bunlardan ilki problemlerin doğasında birden fazla amaçlılık olmasıdır; ikincisi gelişen endüstri ve standartlaşma ile bugün incelenen problemlerin birden fazla amaçlı duruma geçmiş olmasıdır. Örneğin ISO9001 veya ISO5001 gibi standartlara uyma yükümlülükleriniz varsa, incelediğiniz probleme sadece bütçe veya sadece üretim artışı yönünden bakmanız uygun olmayacaktır. Üçüncüsü ise gelişen bilgisayar altyapıları ve geliştirilen paket programlar yardımıyla bu tip problemleri kurup çözecek kabiliyetin kazanılmış olmasıdır. (Atlas M., 2008)

Çok amaçlı programlama problemleri iki tipte ele alınabilmektedir, bunlardan ilki tercih bilgisinin durumudur. Daha detaylı incelemek gerekirse çok amaçlı problemlerde farklı amaçlar genellikle birbirine tezat durumlar içerirler, bu sebeple bütün amaçların tamamen sağlandığı bir çözüm bulmak neredeyse imkânsızdır (Taha H., 2000). Bu gibi durumlarda karar verici en makul çözüme ulaşmak için farklı amaçlar arasında bir önceliklendirme çalışma yapma yoluna gider. İşte bu noktada yapılacak önceliklendirme çalışmasına göre problemler sınıflandırılabilir. Bunlar aşağıda sıralanmış olup, Şekil 4.1’de detaylı olarak şematize edilmiştir.

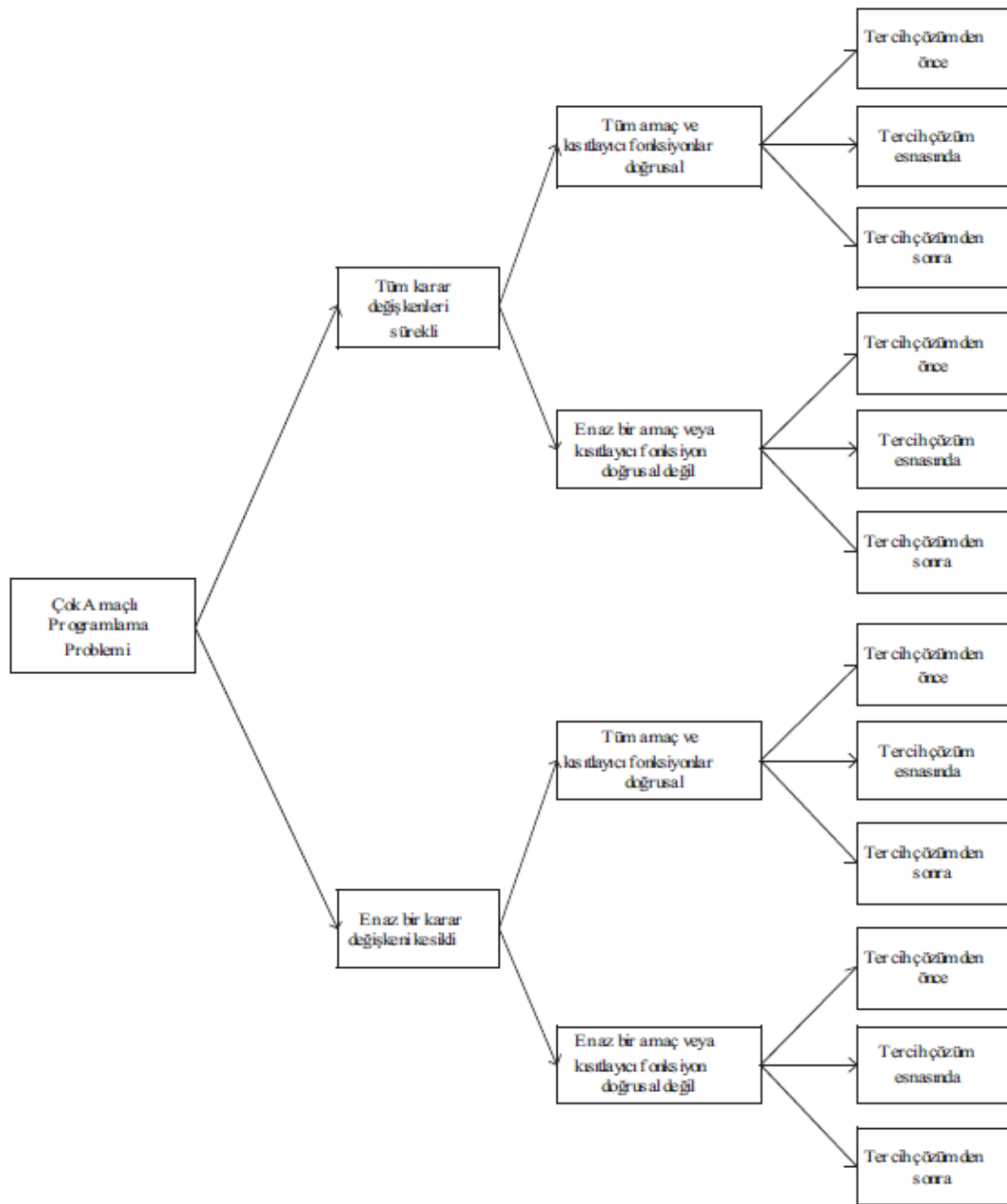
- i. Önceliklendirmeyi çözüm sürecinin başında isteyen teknikler
- ii. Önceliklendirmeyi çözüm süreci esnasında isteyen teknikler
- iii. Önceliklendirmeyi çözüm sürecinin sonunda isteyen teknikler
- iv. Tercih bilgisini/önceliklendirmeyi herhangi bir aşamada istemeyen (kullanılan metodoloji ile örtülü isteyen) teknikler (Atlas M., 2008)

Bu tez kapsamında incelenecek problem bu seçenekler arasında iv sınıfa girmekte olup, kurulan modele herhangi bir önceliklendirme girilmeyecektir. Çünkü makro ölçekte enerji problemlerine baktığımızda bu problemler gerek ekonomik, gerek çevresel etkiler, gerekse sosyal ve ekonomik olarak ölçeklendirilemeyecek kadar önemli problemlerdir. Bir amacı en iyilemeye çalışırken diğerlerinden verilecek taviz, mikro ölçüde birçok sonucu etkileyebilmektedir.



Şekil 4.1: Çok amaçlı programlama çözüm tekniklerinin önceliklendirmeye göre sınıflandırılması (Atlas M., 2008).

Çok amaçlı modeller için ikinci tip sınıflandırma ise karar değişkeninin tam sayı olup olmaması ve problemin lineer olup olmamasına göre değişmektedir. Bu sınıflandırmaya ilişkin şema Şekil 4.2’de verilmiştir. Bazı tip problemlerde karar değişkenleri tam sayı olmak zorundadır. Örneğin üretim problemleri buna bir örnektir. Yumurta üreten bir tesiste 0.3 adet yumurta üretilmesi gibi bir çıktı olmayacağı için bu problem tipinin karar değişkenleri tam sayı olmak zorundadır. Bu çalışmada kurulacak problemin karar değişkenleri için böyle bir sınırlandırma bulunmamaktadır.



Şekil 4.2: Çok Amaçlı Programlamanın Karar Değişkenlerinin Yapısına Göre Sınıflandırılması (Atlas M., 2008).

4.2 Doğrusal Programlama

Diğer bir önemli konu ise problemin doğrusal veya doğrusal olmaması durumudur. Eğer bir veya daha fazla amaç fonksiyonu veya kısıt fonksiyonu doğrusal değil ise bu problem doğrusal olmayan çok amaçlı programlama olarak adlandırılır ve buna uygun çözüm yöntemleri kullanılır. Eğer problemin amaç fonksiyonları ve kısıt fonksiyonları doğrusal ise, bu problem çok amaçlı doğrusal programlama olarak adlandırılır ve buna uygun çözüm yöntemleri uygulanır.

Bir denklemin doğrusal olması için şu şartları sağlaması gerekmektedir;

- Denklemin bütün değişken elemanlarının ve bunların türevlerinin kuvvetleri 1'e eşit olmalı
- Denklemin değişken elemanları ve varsa bunların türevlerinin aldığı bütün katsayılar ya sabit değer olmalı ya da bağımsız eleman olmalı

Bu kapsamda incelenen tez konusunun bütün amaç ve kısıt fonksiyonları doğrusal olup, problem “Çok Amaçlı Doğrusal Programlama” olarak adlandırılmaktadır.

4.3 Doğrusallaştırma ve Parametrelendirme Yaklaşımı

4.1’de anlatıldığı üzere çok amaçlı programlama modellerinde farklı amaçlar arasında önceliklendirmenin gerekliliğinden bahsetmiştik. Kullanılan 4 farklı önceliklendirme yöntemi (önceliklendirmenin çözüm sürecinin başında, çözüm süreci esnasında ve çözüm sürecinin sonunda istenmesi veya önceliklendirme istenmemesi) arasında bu tez konusu kapsamında kurulacak modelde, 4.tip olan önceliklendirme istenmeyen bir yöntem kullanılacaktır.

Kullanılacak yöntem olarak bunun seçilmesinin temel sebebi, incelediğimiz konunun amaçlarını oluşturan etkenlerin birbiri arasında önceliklendirilemeyecek kadar önemli olmasıdır.

Literatürde benzer konular farklı bilim insanları tarafından çalışılmış ve farklı önceliklendirme teknikleri kullanılmıştır. Bunlardan bazıları;

Ağırlıklandırma (weighted goal); farklı amaç fonksiyonları arasında direkt olarak sayısal bir ilişki kurulmasıyla, problemin tek amaçlı hale getirilmesi yöntemidir. Örneğin Ballarian yaptığı çalışmada gelir ve enerji üretim miktarı arasında bu yöntem ile bir ilişkilendirme yapmıştır (Ballarin A. ve diğ., 2011). Benzer şekilde Hartmanna ve arkadaşlarının Macaristan için yaptığı çalışmada da 5 farklı amaç için ağırlıklandırma metodu kullanılmıştır (Hartmanna B. ve diğ., 2017). Başka bir çalışmada ise yenilenebilir enerji yatırımlarının planlanması için bu yöntem kullanılmıştır (Zografidou E. ve diğ., 2017).

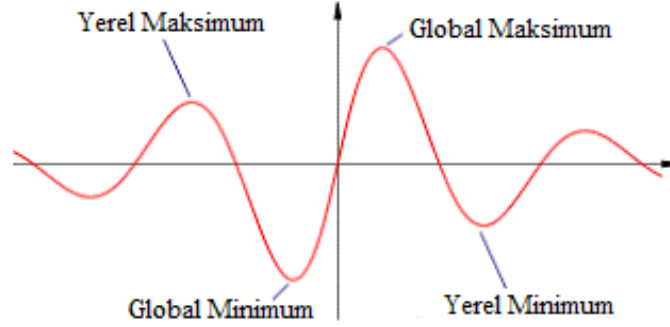
Hiyerarşik Ayırıştırma ve Pareto Yaklaşımları; hiyerarşik ayırıştırma büyük boyutlu problemlerin çözümünde, çözümü kolaylaştırmak adına uygulanan bir yöntemdir. **n-amaçlı** vektör optimizasyonu problemi, **n-tane** optimizasyon problemine

ayrıştırılmakta ve en önemli amaç dışında kalan **n-1 adet alt problem**, kısıtlayıcıya dönüştürülmektedir. Pareto yöntemi ise çoklu amaç fonksiyonunu tek bir amaç fonksiyonuna bütünleştirir ve daha sonra sonuç fonksiyonunu optimize etmeye çalışır. Bunu yaparken, aday sonuçların bir kümesini elde etmek üzere, ölçeğin parametresini sistematik olarak değiştirir. Bu aday sonuçların kendi içinde etkileşimi, karar vericinin tercihleri dikkate alınarak belirlenir. Bazı problemlerde bu farklı yöntemler birlikte kullanılabilir (Zakariazadeh A. ve diğ., 2014). Bazende mevcut metodolojileri iyileştirmek adına yöntemlerin probleme özgü geliştirilmiş versiyonları kullanılabilir. Örneğin Choobineh ve arkadaşlarının uyguladığı yöntemde Pareto yaklaşımına ilaveten çözücü hedeflenen uygun bir çözüm bulsa dahi problemi iyileştirmeye yönelik optimizasyona devam etmektedir (Choobineh M. ve Mohagheghi S., 2016). Xidonas'ın çalışmasında ise Monte-Carlo simülasyonu ile birlikte çalışan farklı bir Pareto yaklaşımı geliştirilmiştir (Xidonas P. ve diğ., 2015).

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada ise Dinkelbach'ın teoremi ve Güzel'in yaklaşımıyla Chen ve arkadaşları tarafından geliştirilen linerizasyon ve parametrelendirme modeli kullanılacaktır. Bu model sayesinde birden fazla olan amaç fonksiyonu, tek bir amaç fonksiyonunu haline getirilecek ve tek amaçlı doğrusal problem olarak ele alınacaktır. (Chen F. ve diğ., 2015) (Guzel N., 2013) (Dinkelbach W., 1967). Bu modelin geliştirilmesinde yazarın amaçlarından biri şu olmuştur; önceliklendirme gerektirmeyen modellerde çözüm için önerilen yaklaşımlar modelin çözümünü etkiler, bu tip durumların üstesinden gelebilmek adına yeni bir model geliştirme ihtiyacı doğmuştur. Bu metodun adımları şu şekildedir;

- 1) İlk olarak doğrusal problemin, oransal-doğrusal problem haline getirilmesi. Bu adımda oransal parametrelendirme işlemi uygulanacaktır. Amaç, farklı amaç fonksiyonlarını orantısal parametreler haline getirerek ifade etmektir. Oransal programlamalarda temel konu, problemin özünde farklı amaç fonksiyonlarından oluşan oranların olması ve bunların kısıtlar çerçevesinde en iyilenmeye çalışılmasıdır. Bu oranlar farklı türde parametreleri ölçmeye yarar, örneğin; maliyet/karlılık, maliyet/zaman, maliyet/hacim veya çıktı/işçi gibi farklı oransal parametreler olabilir.
- 2) İkinci adım olarak; Guzel tarafından oransal problemlerin çözümü için geliştirilen yaklaşımın ilk bölümü olan, çok amaçlı doğrusal oransal problemin her bir amaç

fonksiyonuna ait global maksimum noktaları bulunacaktır. Bu sayede problem tek amaçlı problem haline getirilebilecektir.



Şekil 4.3: Bir fonksiyonda global maksimum noktası.

- 3) Üçüncü adımda; her çok amaçlı doğrusal programlama probleminde olduğu gibi, bir önceki adımda önerilen yaklaşım ile indirgeme yapılarak, tüm problem tek bir amaç fonksiyonu haline getirilecektir. Çok amaçlı bir problemde aynı kısıtlar çerçevesinde farklı amaç fonksiyonları için en iyi çözümler aynı değildir. Bu sebeple bütün amaç fonksiyonları için kabul edilebilecek ve kısıtları sağlayacak 1 adet uygun çözüm bulmak gerekmektedir. Bu çözüme baskın olmayan çözüm denmektedir. (Guzel N., 2013)
- 4) Dördüncü adımda; elde edilen tek amaçlı doğrusal programın çözümü için Dinkelbach tarafından geliştirilen tek amaçlı doğrusal oransal programların çözümüne ilişkin algoritma / çözüm metodolojisi kullanılacaktır. Bu algoritma sayesinde;
 - a. Herbir oransal parametre için problemi tek amaç fonksiyonuymuş gibi ele alarak, verilen kısıtlar çerçevesinde modeli çözüp, ilgili amaç fonksiyonunu maksimum yapan karar değişkenleri (X_i^*)'ler bulunacaktır.
 - b. Bulunan bu karar değişkenleri sabit tutularak, ilgili amaç fonksiyonunu sıfıra götürecek, fonksiyonun global maksimum noktası olan q_i^* değerleri elde edilecek ve kaydedilecektir.
 - c. Son olarak bulunan bütün q_i^* değerleri 3. adımda elde edilen tekil amaç fonksiyonunda yerine konacak ve program mevcut kısıtlar altında tekrar çalıştırılarak en optimum, baskın olmayan ve çözüme ait nihai karar değişkenleri olan (X) elde edilecektir.

5. PROBLEM VE ÖNERİLEN ÇÖZÜM MODELİ

Elektrik Piyasası'nda en önemli iki konu arz güvenliği ve arz-talep dengesidir. Bu kapsamda karar vericinin politikasına ve önceliklerine göre uzun vadede yapılacak yeni enerji santrallerinin arz güvenliği ve talep karşılamada toplam portföy içerisinde nasıl bir dağılıma sahip olacağı önem arz etmektedir. Bu çalışmada 2018-2023 yılları arasında Türkiye'nin hedefleri ve politikası çerçevesinde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından oluşturulabilecek en uygun kaynak çeşitliliği Çok Amaçlı Doğrusal Programlama kullanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır.

Doğrusal programlama problemlerinde temel olarak amaç ve amaçlar ile bunları etkileyen kısıtlar, parametreler ve karar değişkenleri yer almaktadır. Bu çalışmada 4 adet kritik etken amaç olarak belirlenmiş olup, 11 ana başlıkta 74 adet alt kısıt ve birçok veri seti kullanarak 30 adet karar değişkeni optimize edilerek amaçlara ulaşılmaya çalışılmıştır.

5.1 Karar Değişkenleri

Kurulan modelde Türkiye'de 2018-2023 yılları arasında devreye alınması gereken yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı kurulu güç kapasitelerinin bulunması hedeflenmiştir. Kurulan modelleme çerçevesinde değişken olan ve sonuç olarak bulunacak değerlere ilişkin örnek gösterim Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Örnek sonuç çizelgesi.

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Güneş	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
Rüzgâr	X_{21}	X_{23}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}
Jeotermal	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}	X_{36}
Biyogaz	X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}	X_{45}	X_{46}
Hidroelektrik	X_{51}	X_{52}	X_{53}	X_{54}	X_{55}	X_{56}

Bu çizelgedeki her bir yıla ait kurulu güç kapasitesinin ilgili yılın ilk günü itibariyle devrede olduğu varsayılmıştır. Bu değerler model içerisindeki karar değişkenleri olup, amaç fonksiyonu ve kısıtlar çerçevesinde nihai halini almaktadır.

5.2 Kısıtlar

Modeli oluşturan ana birleşenlerden biriside kısıtlardır, 11 ana başlıkta 74 adet alt kısıt belirlenmiş olup, bu kısıtlar paket program üzerinden çözümün oluşmasında modeli etkileyen faktörler olmuşlardır. Bu kısıtlar;

5.2.1 Elektrik üretimi kısıtı

Bu kısıt, Türkiye'nin 2023 hedefleri çerçevesinde ulaşmaya çalıştığı yenilenebilir enerjiden üretilecek enerji miktarı minimum %35 oranında olma hedefini yerine getirecektir. Resmi raporlarda bu oran %30 olarak belirlenmiştir, fakat elektrik piyasasının gelişimi göz önüne alındığında %30 rekabetçi bir değer olmadığı için ana senaryoda bu değer %35 olarak kabul edilmiştir. (ETKB, Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı, 2014)

$$\sum_{i=1}^{i=5} e_i + \sum_{i=1, j=1}^{i=5, j=6} X_{ij} * y_i > (%35) * E_g \quad (5.1)$$

e_i : 2017 yılı sonu itibariyle Türkiye'nin her bir yenilenebilir enerji kaynağından bir yılda ürettiği elektrik miktarı

X_{ij} : 2018-2023 yılları arasında kaynak ve yıl bazında kurulacak yeni santrallerin kurulu güçleri

y_i : y_i : her bir kaynak tipi için yıllık olarak MW başına üretilen elektrik miktarı (MWh/MW-Yıl)

E_g : 2023 yılı sonu itibariyle Türkiye'de üretilmesi planlanan toplam elektrik miktarı

5.2.2 Kurulu güç kısıtı

Bu kısıtlar; Türkiye devleti karar vericilerinin 2023 için koydukları kurulu güç hedeflerinin yerine getirilmesi sağlayacaktır.

Güneş Enerjisi

$$k_1 + \sum_{j=1}^{j=6} X_{1j} > H_g \quad (5.2)$$

k_1 : 2017 yılı sonu itibariyle Türkiye’de güneş enerjisi kurulu gücü

X_{1j} : 2018-2023 yılları arasında yıl bazında kurulacak yeni güneş enerji santrallerin kurulu güçleri

H_g : 2023 yılı sonu itibariyle Türkiye’de devreye alınması planlanan güneş enerji santrali kurulu gücü

Rüzgâr Enerjisi

$$k_2 + \sum_{j=1}^{j=6} X_{2j} > H_r \quad (5.3)$$

k_2 : 2017 yılı sonu itibariyle Türkiye’de rüzgâr enerjisi kurulu gücü

X_{2j} : 2018-2023 yılları arasında yıl bazında kurulacak yeni rüzgâr enerji santrallerin kurulu güçleri

H_r : 2023 yılı sonu itibariyle Türkiye’de devreye alınması planlanan rüzgâr enerji santrali kurulu gücü

Jeotermal Enerjisi

$$k_3 + \sum_{j=1}^{j=6} X_{3j} > H_j \quad (5.4)$$

k_3 : 2017 yılı sonu itibariyle Türkiye’de jeotermal enerjisi kurulu gücü

X_{3j} : 2018-2023 yılları arasında yıl bazında kurulacak yeni jeotermal enerji santrallerin kurulu güçleri

H_j : 2023 yılı sonu itibariyle Türkiye’de devreye alınması planlanan jeotermal enerji santrali kurulu gücü

Biyogaz Enerjisi

$$k_4 + \sum_{j=1}^{j=6} X_{4j} > H_b \quad (5.5)$$

k_4 : 2017 yılı sonu itibariyle Türkiye’de biyogaz enerjisi kurulu gücü

X_{4j} : 2018-2023 yılları arasında yıl bazında kurulacak yeni biyogaz enerji santrallerin kurulu güçleri

H_b : 2023 yılı sonu itibariyle Türkiye’de devreye alınması planlanan biyogaz enerji santrali kurulu gücü

Hidroelektrik Enerjisi

$$k_5 + \sum_{j=1}^{j=6} X_{5j} > H_h \quad (5.6)$$

k_5 : 2017 yılı sonu itibariyle Türkiye’de hidroelektrik enerjisi kurulu gücü

X_{5j} : 2018-2023 yılları arasında yıl bazında kurulacak yeni hidroelektrik enerji santrallerin kurulu güçleri

H_h : 2023 yılı sonu itibariyle Türkiye’de devreye alınması planlanan hidroelektrik enerji santrali kurulu gücü

5.2.3 Pozitif olma kısıtı

Bu kısıt çözücünün herhangi karar değişkenini negatif atamasını engellemektedir.

$$\sum_{i=1, j=1}^{i=5, j=6} X_{ij} > 0 \quad (5.7)$$

5.2.4 Şebeke altyapı kısıtı

Bu kısıt, her sene yeni eklenecek kurulu gücün şebeke altyapısının izin vereceği değerler ölçüsünde olmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{i=1}^{i=6} X_{(1,2,3,4,5,6),i} < D_i \quad (5.8)$$

5.2.5 Kaynak dağılım kısıtı

Bu kısıt ile farklı tipte kaynakların dengeli dağılması ve uygulanabilir bir projeksiyon oluşması için her bir sene için ve her bir kaynak için maksimum kurulu güç üst limiti belirlenmiştir.

$$\exists X_{ij} < 2500 \quad (5.9)$$

5.3 Amaç Fonksiyonları

Model içerisinde 4 adet amaç fonksiyonu belirlenmiş olup, bu amaç fonksiyonları özelliklerine göre minimize veya maksimize edilmekte ve kullanılan çözüm yöntemi sayesinde tek bir lineer amaç fonksiyonuna indirgenerek çözülebilmektedir. Bu amaç fonksiyonları;

- Toplam elektrik üretim maliyetinin minimize edilmesi
- Toplam CO₂ salınım miktarı minimize edilmesi
- Toplam istihdamın maksimize edilmesi
- Toplam ekonomik faydanın maksimize edilmesi

5.3.1 Toplam elektrik üretim maliyeti

Belirlenen bu amaçla toplam elektrik üretim maliyetinin minimize edilmesi amaçlanmıştır.

$$f_1 : \left(\sum_{i=1, j=6}^{i=5, j=6} N_{i,j} * X_{i,j} \right) \min \quad (5.10)$$

X_{ij} : 2018-2023 yılları arasında kaynak ve yıl bazında kurulacak yeni santrallerin kurulu güçleri

N_{ij} : 2018-2023 yılları arasında kaynak ve yıl bazında 1MW kurulu güç için net bugünkü değer katsayısı

5.3.2 Toplam CO₂ salınım miktarı

Belirlenen bu amaçla toplam CO₂ salınımı minimize edilmesi amaçlanmıştır.

$$f_2 : \left(\sum_{i=1, j=1}^{i=5, j=6} X_{ij} * y_i * \beta_j \right) \min \quad (5.11)$$

y_i : y_i : her bir kaynak tipi için yıllık olarak MW başına üretilen elektrik miktarı (MWh/MW-Yıl)

β_j : elektrik üretimi miktarı başına CO₂ salınım miktarı (kg-CO₂ /MWh)

5.3.3 Toplam istihdam miktarı (sosyal fayda)

Belirlenen bu amaçla kurulu güç başına sağlanan istihdam edilen personel sayısının maksimize edilmesi amaçlanmıştır

$$f_3 : \left(\sum_{i=1, j=1}^{i=5, j=6} X_{ij} * y_i * \alpha_i \right) \max \quad (5.12)$$

5.3.4 Toplam ekonomik fayda

Belirlenen bu amaçla kurulu güç başına cari açığa yapılacak katkının maksimize edilmesi amaçlanmıştır

$$f_4 : \left(\sum_{i=1, j=1}^{i=5, j=6} X_{ij} * y_i * \delta_i \right) \max \quad (5.13)$$

5.4 Parametreler ve Veriler

Diğer önemli model elemanları ise sabit değerlerdir, bu katsayılar ve değerler formülasyonların içerisinde geçen ve çeşitli notasyonların hesaplanmasında kullanılan katsayı ve değerlerdir. Geniş bir literatür taraması ile ulusal raporlar, teknik raporlar, sektör raporları, bakanlık ve ilgili kurum raporları, uluslararası kuruluş raporları gibi birçok farklı kaynaktan toplanmıştır. Bunlara ilişkin detaylı bilgi **Bölüm 6**'da verilmiştir.

5.5 Matematiksel Model ve Çözüm Yaklaşımı

Bu tip birçok amaçlı problemin çözümü için kullanacağımız yöntem Güzel'in yaklaşımı ve Dinkelbach'ın metodolojisi ile Chen tarafından geliştirilen çözüm yöntemi olacaktır. Bu çözüm yönteminin adımları şu şekildedir;

Önceki bölümde verilen amaç fonksiyonlarını ele aldığımızda, oransal olarak parametrelendireceğimiz ve maksimize etmeye çalıştığımız ifadeler;

- i. Birim maliyet başına ekonomik fayda

$$q_1 = \frac{N_1(X)}{D_1(X)}$$

ii. Birim maliyet başına sosyal fayda

$$q_2 = \frac{N_2(X)}{D_2(X)}$$

iii. Birim CO₂ emisyonu başına ekonomik fayda

$$q_3 = \frac{N_3(X)}{D_3(X)}$$

iv. Birim CO₂ emisyonu başına sosyal fayda

$$q_4 = \frac{N_4(X)}{D_4(X)}$$

Bu yaklaşım ile 4 adet amaç fonksiyonu öncelikle 4 adet oransal parametre haline getirilecek ve problem dört amaçlı doğrusal oransal problem haline dönüştürülecektir. Problemin amacı eş zamanlı olarak bu 4 oranı maksimize etmektir.

Önceki adımda belirtilen oransal parametreleri şu şekilde genel olarak ifade edecek olursak;

$$\text{Maksimum} \left\{ q_1 = \frac{N_1(X)}{D_1(X)}, q_2 = \frac{N_2(X)}{D_2(X)}, q_3 = \frac{N_3(X)}{D_3(X)}, q_4 = \frac{N_4(X)}{D_4(X)} \right\} \quad (5.14)$$

$N_i(X)$ ve $D_i(X)$ 'ler problemin ana amaç fonksiyonlarını temsil etmekte olup, aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\text{Maksimum} \left\{ \sum_{i=1}^4 \left[\frac{N_i(X)}{D_i(X)} \right] IAX \leq B, \text{ve } X \geq 0 \right\} \quad (5.15)$$

Bu noktada $N_i(X)/D_i(X)$ 'i maksimum yapan bir X_i^* çözüm kümesi vardır. X_i^* orantısal olarak ifade edilen iki amaç fonksiyonuna ait fonksiyonun global maksimum noktası ve en ideal karar değişkeni çözüm kümesidir.

Yukarıdaki ifadeyi tekrar düzenlediğimizde;

$$\text{Maksimum} \left\{ \sum_{i=1}^4 [N_i(X) - q_i * D_i(X)] IAX \leq B, \text{ve } X \geq 0 \right\} \quad (5.16)$$

Ve bulunan X_i^* ideal karar değişkeni çözüm kümesini yazarak;

$$\text{Maksimum} \left\{ \sum_{i=1}^4 [N_i(X_i^*) - q_i^* D_i(X_i^*)] IAX \leq B, \text{ ve } X \geq 0 \right\} = 0 \quad (5.17)$$

eşitliğini sıfıra eşitlediğimizde, $[N_i(X_i^*) - q_i^* D_i(X_i^*)]$ ifadesini sıfıra götüren bir q_i^* değeri vardır. q_i^* ait olduğu fonksiyonun global maksimum noktası ve en ideal çözüm kümesidir.

Özetle, her bir i katsayısı için $N_i(X) - q_i^* D_i(X)$ şeklinde düzenlenen denklemi sıfır yapan q_i^* değeri olduğunda bu değer $q_i^* = N_i(X_i^*)/D_i(X_i^*)$ şeklinde olur. Burada q_i^* ve X_i^* ilgili fonksiyonların ayrı ayrı global maksimum noktalarıdır.

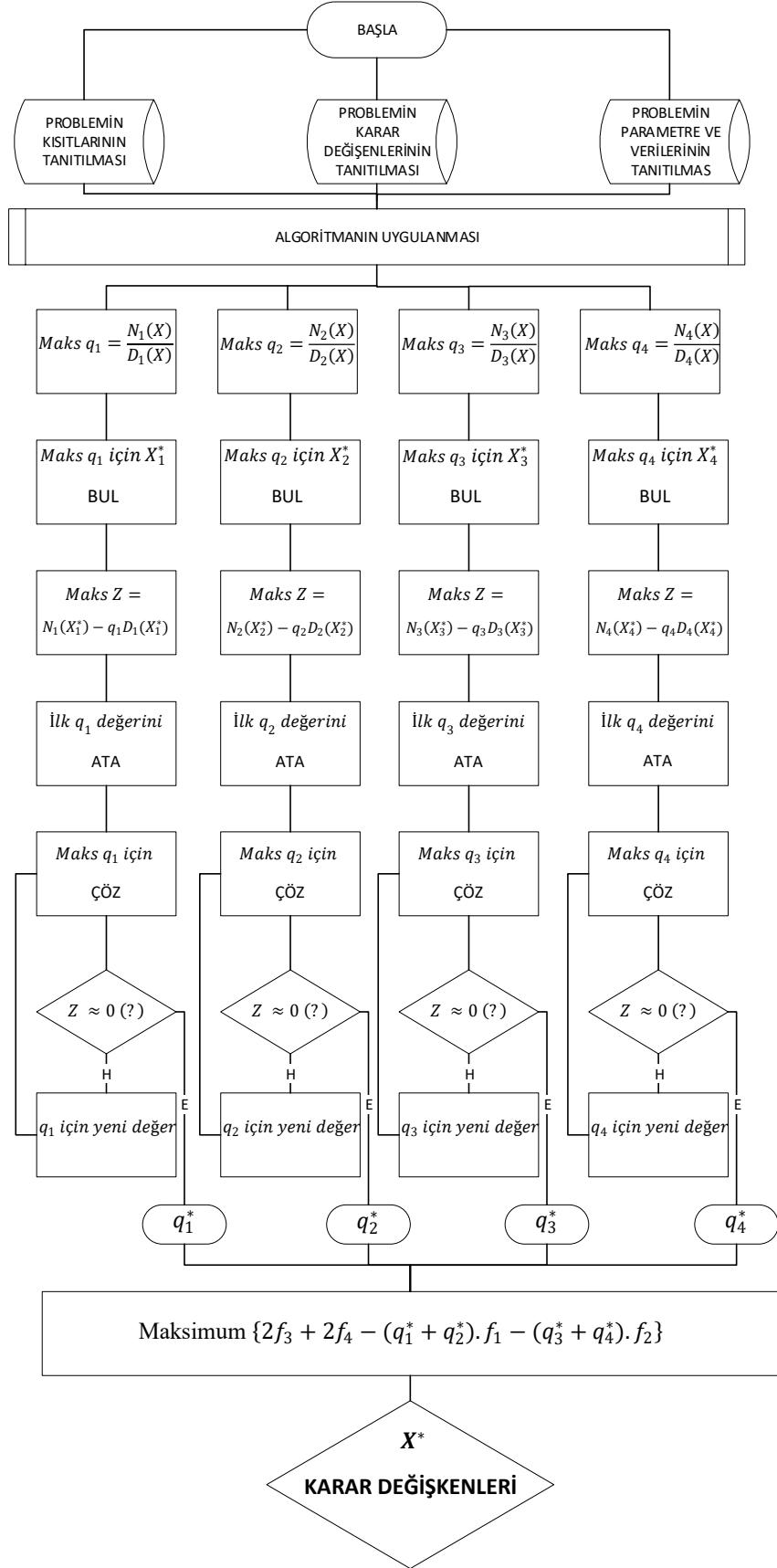
Daha basit şekilde anlatmak gerekirse; iki amaç fonksiyonunu $N_i(X_i)/D_i(X_i)$ şeklinde oranladığımızda ve bu oranı maksimum yapan değeri aradığımızda, çözüm kümesini yani karar değişkenleri buluruz. Bu çözüm kümesi X_i^* 'dir ve $N_i(X_i)/D_i(X_i)$ 'in global maksimum noktasıdır.

Daha sonra bulunan bu X_i^* 'yi kullanarak $N_i(X) - q_i^* D_i(X)$ 'yi sıfıra eşitlemeye çalıştığımızda bulduğumuz q_i^* değeride çözüm kümesinin bir elemanıdır ve ilgili fonksiyonun global maksimum noktasıdır. Bu yaklaşım sayesinde bir problemde farklı amaç fonksiyonları olan $N_i(X)$ ve $D_i(X)$ tekil hale getirilebilmektedir.

Bu çözümün bulunması içinde amaç fonksiyonlarının tekillenmesi gerekmektedir. Bizim problemimiz için oluşan tekil amaç fonksiyonu aşağıdaki şekildedir.

$$\text{Maksimum} \{ 2f_3 + 2f_4 - (q_1^* + q_2^*) \cdot f_1 - (q_3^* + q_4^*) \cdot f_2 \} \quad (5.18)$$

Uygulanacak algoritma / çözüm yöntemine ilişkin akış şeması Şekil 5.1'de verilmiş olup, Bölüm 6'da 2018-2023 yılları arasında Türkiye Yenilenebilir Enerji portföyüne ilişkin örnek çalışma uygulanmıştır.



Şekil 5.1: Çözüm yöntemine ilişkin akış şeması.

6. ÖRNEK ÇALIŞMA: 2018-2023 ARASI TÜRKİYE YENİLENEBİLİR ENERJİ KURULU GÜÇ DAĞILIMI

6.1 Parametre ve Veriler

6.1.1 Kapasite faktörü

2018-2023 seneleri arasında kurulması önerilen kapasiteler üzerinden enerji üretim miktarlarının hesaplanabilmesi için kaynak bazında Kapasite Faktörleri “cf” katsayısı ile tanımlanmış olup, 6.1.4’de belirtilen kaynaklarda geçen bilgilere ilaveten NREL (Amerikan Ulusal Enerji Laboratuvarı)’nın ve TEİAŞ’ın 2017 senesi için yayınladığı güncel çalışmalardan alınarak harmanlanmıştır. (NREL, 2018) (TEİAŞ, 2018).

Kapasite faktörü her yıl gelişen yeni teknolojilerle birlikte, proje sahasının yerine ve özellikleri bağlı olarak değişse de bu çalışma kapsamında kaynak taraması ile kapasite faktörü değeri aynı kaynak bazında her kurulucu güç değeri için sabit olarak kabul edilmiştir. Nihai değerler Çizelge 6.1-a’da gösterilmiştir.

Çizelge 6.1-a: Kapasite faktörü.

Kaynaklar	Kapasite Faktörü (%)	
Güneş	cf_1	21
Rüzgâr	cf_2	33
Jeotermal	cf_3	79
Biyogaz	cf_4	72
Hidroelektrik	cf_5	37

Ayrıca 2018 öncesi döneme ilişkin yapılan analizde Türkiye’nin kaynaklara göre kurulu gücü ve elektrik üretim miktarı incelenerek, kaynak bazında Türkiye için her bir yenilebilir enerji kaynağının kapasite faktörü çıkarılmış ve Çizelge 6.1-b’de paylaşılmıştır.

Çizelge 6.1-b: Kapasite faktörü.

Kaynaklar	Kapasite Faktörü (%)	
Güneş	cfe_1	19
Rüzgâr	cfe_2	29,9
Jeotermal	cfe_3	62,6
Biyogaz	cfe_4	36
Hidroelektrik	cfe_5	24,5

6.1.2 Üretilen elektrik miktarı

Yıllık bazda her bir kaynak için 1MW gücündeki bir tesisten üretilen enerji miktarı; kurulu güç, kapasite faktörü ve yıllık bazda çalışma süresinin çarpımıyla bulunmakta olup, aşağıdaki matematiksel gösterim ile ifade edilmiştir.

Ayrıca hesaplanan değerler “ y_i ” katsayısı ile tanımlanmış olup Çizelge 6.2’de gösterilmiştir.

$$(y_i = 1 * cf_i * 8760) \quad (6.1)$$

Çizelge 6.2: Yıllık üretilen enerji miktarı (MWh/MW-Yıl)

Kaynaklar	Üretilen Enerji	
Güneş	y_1	1839.6
Rüzgâr	y_2	2890.8
Jeotermal	y_3	6920.4
Biyogaz	y_4	6307.2
Hidroelektrik	y_5	3241.2

6.1.3 Kurulu güç ve üretilen enerji

2018 yılı Ocak ayı itibariyle Türkiye’de ki yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güçlerin ve üretilen elektrik enerjisi miktarının kaynak bazında dağılımı sırasıyla “k” ve “e” katsayıları ile tanımlanmış olup, gerçek veriler TEİAŞ, YEGM ve EPDK’nın 2018 Şubat Ayı güncel sektör istatistiklerinden alınarak Çizelge 6.3’te gösterilmiştir. Mevcut kapasitede üretime en büyük katkı hidroelektrik santrallerden sağlanmaktadır.

Çizelge 6.3: Şubat 2018 itibariyle Türkiye’de kurulu güç ve üretilen elektrik miktarı (TEİAŞ, 2018) (YEGM, 2018) (EPDK, 2017).

Kaynaklar	Kurulu Güç (MW)	Yüzdesel Katkı	Üretilen Elektrik Miktarı (GWh)	Yüzdesel Katkı*
Güneş	k_1 3.420,7	%4	e_1 286	%0.1**
Rüzgar	k_2 6.516,8	%7.6	e_2 15.659,1	%5.9
Jeotermal	k_3 1.063,7	%1.2	e_3 5.349,1	%2
Biyogaz	k_4 634,2	%0.7	e_4 1.831,3	%0.7
Hidroelektrik	k_5 27.273,1	%32	e_5 53.556,7	%20

* Kaynak bazında elektrik üretim istatistiği EPDK raporunda lisanslı ve lisanssız olarak ayrı verildiği için, toplamı hesaplanarak tabloya yazılmıştır.

** Türkiye’de güneş enerji kapasitesinin büyük bir kısmı 2017 senesinde devreye girdiği için elektrik üretimi içerisinde yüzdesel değeri kurulu güce göre düşük kalmıştır.

6.1.4 Yatırım ve işletme maliyetleri

Bu çalışmada önemli etkenlerden biri teknolojilerin kurulumu ve işletmesinde oluşan maliyetlerdir. Bu maliyetler her bir kaynağa göre ve her bir yıla göre değişiklik göstermektedir. Bir enerji üretim tesisinin maliyetleri 4 ana kalemden oluşmaktadır; Yatırım Maliyeti (Capital Cost), Sabit İşletme Maliyeti (Fixed O&M Cost), Değişken İşletme Maliyeti (Variable O&M Cost) ve Yakıt Maliyeti (Fuel Cost).

Bu maliyetlerden Yatırım Maliyeti ve Sabit İşletme Maliyeti, kurulu güç ile orantılı olup, Değişken İşletme Maliyeti ve Yakıt Maliyeti üretilen enerji miktarına göre değişmektedir.

Bu kapsamda, oluşan maliyetlere ilişkin farklı kaynaklarda detaylı bir literatür araştırması yapılmış. Aynı zamanda Türkiye piyasasında gözlemlenen fiyat trendleri ve kaynak bazında sektör uzmanlarının görüşü alınarak Türkiye piyasası için öngörülen harmanlanmış rakamlar aşağıda paylaşılmıştır. Maliyetlerin elde edilmesinde kullanılan kaynaklar;

- Renewable Energy Network, “Global Status Report 2017” (REN21, 2017)
- Lazard Group, “Levelized Cost of Energy 2017” (Lazard, 2017)
- International Renewable Energy Agency, “Renewable Power Generation Cost in 2017” (IRENA, 2018)
- International Energy Agency, “World Energy Outlook Model-Assumed Cost” (IEA, 2016)
- Sektör uzmanları

Ayrıca mevcut kaynaklarda yapılan incelemeler sonucunda son yıllarda rüzgâr ve güneş enerjisinin seviyelendirilmiş maliyetin %6 oranında azalma olurken, jeotermal, biyogaz ve hidroelektrik santrallerinin seviyelendirilmiş maliyetleri paralellik göstermiştir. Bu bilgiler ışığında 2018’den 2023’e uzanan yıllık maliyet kalemlerinde rüzgâr ve güneş için %6’lık yıllık düşüş uygulanmış, buna karşın jeotermal, biyogaz ve hidroelektrik santrallerinde bu oran %0 alınmıştır.

Kaynak ve yıl bazında Yatırım Maliyeti “ A_{ij} ” katsayısı ile tanımlanmış olup veriler Çizelge 6.4’te sunulmuştur.

Çizelge 6.4: Yatırım maliyeti (\$/MW) (A_{ij}).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Güneş	\$1,142,600	\$1,074,044	\$1,009,601	\$949,025	\$892,084	\$838,559
Rüzgâr	\$1,615,600	\$1,518,664	\$1,427,544	\$1,341,892	\$1,261,378	\$1,185,695
Jeotermal	\$4,043,600	\$4,043,600	\$4,043,600	\$4,043,600	\$4,043,600	\$4,043,600
Biyogaz	\$2,763,200	\$2,763,200	\$2,763,200	\$2,763,200	\$2,763,200	\$2,763,200
Hidroelektrik	\$2,058,000	\$2,058,000	\$2,058,000	\$2,058,000	\$2,058,000	\$2,058,000

Kaynak ve yıl bazında Sabit İşletme Maliyeti “ B_{ij} ” katsayısı ile tanımlanmış olup veriler Çizelge 6.5’de sunulmuştur. Ayrıca santralin ekonomik ömrü boyunca işletmedeki her bir dönem(sene) için uygulanacak maliyet artış endeksi %0 kabul edilmiştir.

Çizelge 6.5: Sabit işletme maliyeti (\$/MW) (B_{ij}).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Güneş	\$12,333	\$11,593	\$10,898	\$10,244	\$9,629	\$9,051
Rüzgar	\$40,000	\$37,600	\$35,344	\$33,223	\$31,230	\$29,356
Jeotermal	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Biyogaz	\$61,250	\$61,250	\$61,250	\$61,250	\$61,250	\$61,250
Hidroelektrik	\$70,000	\$70,000	\$70,000	\$70,000	\$70,000	\$70,000

Kaynak ve yıl bazında Değişken İşletme Maliyeti “ C_{ij} ” katsayısı ile tanımlanmış olup veriler Çizelge 6.6’da sunulmuştur. Ayrıca santralin ekonomik ömrü boyunca işletmedeki her bir dönem(sene) için uygulanacak maliyet artış endeksi %0 kabul edilmiştir

Çizelge 6.6: Değişken işletme maliyeti (\$/MWh) (C_{ij}).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Güneş	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Rüzgâr	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Jeotermal	\$46,000	\$46,000	\$46,000	\$46,000	\$46,000	\$46,000
Biyogaz	\$10,000	\$10,000	\$10,000	\$10,000	\$10,000	\$10,000
Hidroelektrik	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0

Kaynak ve yıl bazında Yakıt Maliyeti “ D_{ij} ” katsayısı ile tanımlanmış olup veriler Çizelge 6.7’de sunulmuştur.

Çizelge 6.7: Yakıt maliyeti (\$/MWh) (D_{ij}).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Güneş	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Rüzgâr	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Jeotermal	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Biyogaz	\$15	\$15	\$15	\$15	\$15	\$15
Hidroelektrik	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0

6.1.5 Elektrik satış fiyatı ve uzun dönem öngörüsü

Elektrik üretim santrallerin ömürleri boyunca oluşturduğu ekonomik değeri hesaplayabilmek için önemli bir etkende elektrik satış fiyatlarıdır. Ülkemizde farklı iş modellerinde enerji yatırımı yapılabilmektedir. Bunlardan bazıları; serbest piyasada elektrik satışı, YEKDEM (Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması), YEKA (Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı), ve EPDK’nın açıkladığı ve dönemsel olarak yaptığı ihaleleler kapasite tahsisi şeklindedir. Bu farklı modellerde kaynak türüne göre oldukça farklı fiyatlar oluşabilmektedir. Özellikle EPDK’nın açık eksiltme usulüyle tahsis ettiği kapasitelerde ülkenin farklı bölgelerinde çok değişik elektrik satış fiyatları oluşmuştur.

Güneş ve rüzgâr alanında sektör trendleri YEKA modeline doğru kaymaktadır. Bu modelde büyük güçlerde (1GW) kapasite tahsisi tek seferde tek bir şirketler birliği tarafından alınmakta ve karşılığında katılımcılar arasındaki en düşük fiyat aranmaktadır. Buna ilavetende YEKA şartnamesine istenen teknolojik transfer ve

üretim tesisi kurma gibi ek hizmetler ihaleyi kazanan firma tarafından yerine getirilmektedir. Özetle güneş ve rüzgâr enerjisi için 2023'e kadar yapılacak santrallerde uygulanacak elektrik satış fiyatını bulmak adına 2017 yılında Türkiye'de gerçekleştirilmiş 2 adet YEKA ihalesinin fiyatı temel alınacak ve dünya çapında yıllık bazda rüzgâr ve güneş enerjisinin birim fiyatındaki düşüş oranı uygulanarak fiyat eskale edilecektir. 2017'de gerçekleştirilen YEKA ihalelerinde güneş için en düşük fiyat 6.99\$cent/kWh, rüzgâr için ise 3.48\$cent/kWh olarak oluşmuştur. Ayrıca Lazard'ın yayınladığı son rapora göre dünyada rüzgâr ve güneş enerjisinde yıllık maliyetlerdeki azalma %6 oranında olmuştur. (Lazard, 2017)

Diğer yenilenebilir kaynaklar olan Jeotermal, Biogas ve Hidroelektrik için 5346 numaralı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun'nun 1 numaralı cevtelinde belirtilen rakamlar sırasıyla şu şekildedir; 10.5\$cent/kWh, 13.3\$cent/kWh, 7.3\$cent/kWh. Ayrıca Jeotermal, Biogas ve Hidroelektrik kaynakları için yıllık bazda maliyet düşüşü %0 kabul edilmiş, bu sebeple elektrik satış fiyatında da herhangi bir düşüş öngörülmemiştir.

Bu kapsamda kaynak ve yıl bazında belirlenen ilk Elektrik Satış Fiyatı (İSF: İhale Satış Fiyatı) “ E_{ij} ” katsayısı ile tanımlanmış olup veriler Çizelge 6.8'de sunulmuştur.

Çizelge 6.8: İhale satış fiyatı (\$/MWh) (E_{ij}).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Güneş	69.9	65.7	61.8	58.1	54.6	51.3
Rüzgâr	34.8	32.7	30.7	28.9	27.2	25.5
Jeotermal	105	105	105	105	105	105
Biyogaz	133	133	133	133	133	133
Hidroelektrik	73	73	73	73	73	73

Ayrıca santrallerin ekonomik ömrü boyunca değişik zaman aralıklarında uygulanacak değişken fiyatlara ilişkin projeksiyonlarda aşağıdaki Çizelge 6.9'da sunulmuştur. Rüzgâr ve Güneş Enerjisi için Uygulanan YEKA modellerinde ihale satış fiyatı (İSF) 15 yıl boyunca geçerli olup, sonraki yıllarda serbest piyasadaki piyasa satış fiyatı (PSF) geçerli olacaktır. Aynı şekilde jeotermal, biyogaz ve hidroelektrik santraller içinde YEKDEM kapsamında ilk 10 sene İSF geçerli olacak olup, sonrasında serbest piyasadaki piyasa satış fiyatı (PSF) geçerli olacaktır

Çizelge 6.9: Piyasa satış fiyatı projeksiyonu (\$/MWh) (E_{ij}) (TUREB, 2016).

Kaynak/Yıl	1-10	11	12	13	14	15	16	17	18-25
Güneş	İSF	İSF	İSF	İSF	İSF	İSF	51,83	53,56	53,88
Rüzgâr	İSF	İSF	İSF	İSF	İSF	İSF	51,83	53,56	53,88
Jeotermal	İSF	49,77	50,15	51,01	51,34	51,15	51,83	53,56	53,88
Biyogaz	İSF	49,77	50,15	51,01	51,34	51,15	51,83	53,56	53,88
Hidroelektrik	İSF	49,77	50,15	51,01	51,34	51,15	51,83	53,56	53,88

6.1.6 Ekonomik ömür

Ekonomik ömür bir santralin ekonomik olarak çalıştırılabileceği süreyi belirtmekte olup, farklı lokasyonlar, teknolojiler ve birçok etken ile birlikte değişmekte olup, uluslararası literatürde bütün yenilebilir enerji kaynakları için biçilen yaklaşık ömür 25 yıldır.

Çizelge 6.10: Ekonomik ömür (n).

Kaynaklar	Ekonomik Ömür	
	Yıl	
Güneş	l_1	25
Rüzgâr	l_2	25
Jeotermal	l_3	25
Biyogaz	l_4	25
Hidroelektrik	l_5	25

6.1.7 Degredasyon

Güneş enerji santrallerine özgü bir durum olan bu üretimdeki azalma faktörü, güneş panellerinin malzemesel karakteristiği sebebiyle ortaya çıkan bir durumdur. Bu kapsamda “dg” katsayısı ile tanımlanan bu değer %0.06 oranında olup her yıl bir önceki yılda gerçekleşen üretime göre azalma meydana gelmektedir.

6.1.8 Net bugünkü değer analizi

Net bugünkü değer analizi bir yatırım için ileriki dönemde yapılan finansal girdi ve çıktıların belirli bir faiz oranı çerçevesinde günümüz değerine indirgenmesine katkı sağlar. Bu çerçevede ekonomik ömürleri 25 yıl olarak belirlenmiş mevcut yenilenebilir

enerji kaynaklarının uzun vadeli yatırım projeksiyonunda her 1 MW Kurulu güç için bugünkü değerini hesaplayarak, karar verici noktasında görece basit bir analiz yapma imkânı elde edilir.

$$\sum_{i=1, j=1}^{i=5, j=6} (x_{ij} * B_{ij})(P/F, \%i, n) + (y_i * (C_{ij} + D_{ij} + E_{ij}))(P/A, \%i, n) \quad (6.2)$$

Önceki bölümde belirtilen yatırım ve işletme maliyetleri, ayrıca ihale satış fiyatı ve elektrik satış fiyatı projeksiyonları yardımı ile her kaynak türü için 1MW’lık kurulu güce karşılık gelen net bugünkü değer hesaplanmış ve Çizelge 6.11’de sunulmuştur.

Bu hesaplama esnasında önceki bölümlerde bahsedilen şu detaylara ayrıca göz önünde bulundurulmuştur;

- Güneş enerji santralleri için elektrik üretiminde yıllık %0.6 degradasyon uygulanması.
- Güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi değişken maliyetlerinde yıllık %6’lık düşüş.
- Güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi için ihale satış fiyatı geçerlilik süresi 15 yıl, jeotermal, biyogaz ve hidroelektrik kaynaklar için 10 yıl olarak uygulanması.
- Türkiye Cumhuriyeti elektrik satış fiyatlarının yıllara saari tahmini.

Çizelge 6.11: 1MWp kurulu güç için net Bugünkü Değer Analizi (NPV) (M\$/MWp) (N_{ij}).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Güneş	\$3.79	\$3.57	\$3.36	\$3.17	\$2.99	\$2.82
Rüzgâr	\$5.11	\$4.83	\$4.56	\$4.32	\$4.10	\$3.88
Jeotermal	\$22.28	\$22.06	\$21.84	\$21.63	\$21.41	\$21.20
Biyogaz	\$19.50	\$19.31	\$19.11	\$18.93	\$18.74	\$18.55
Hidroelektrik	\$7.90	\$7.82	\$7.75	\$7.67	\$7.59	\$7.52

6.1.9 Çevresel katkı faktörü (CO₂ emisyon salınımı)

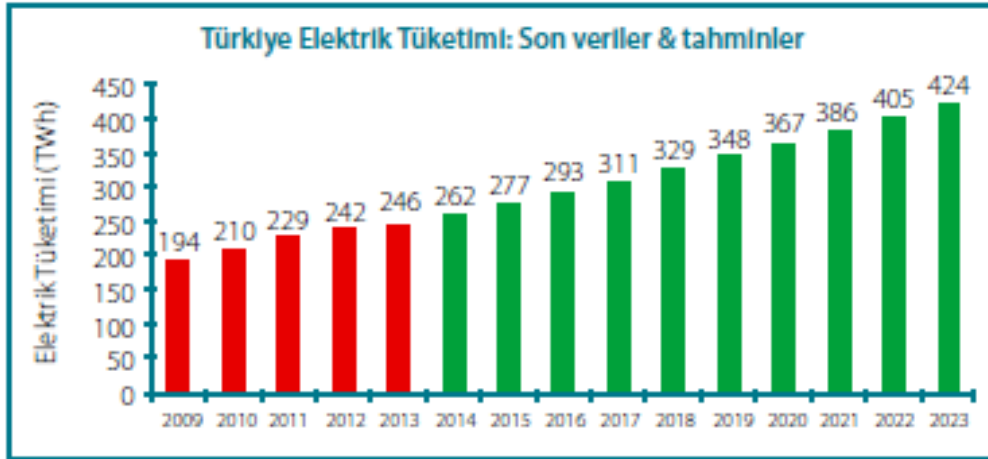
Yapılan geniş literatür araştırması sonucu farklı kaynaklardan elde edilmiş elektrik üretimi kaynağı bazında CO₂ salınım miktarları “ β_i ” olarak tanımlanmış olup Çizelge 6.12’de sunulmuştur.

Çizelge 6.12: Elektrik üretimi miktarı başına CO₂ salınım miktar. (kg-CO₂ /MWh) (Weisser D., 2006) (Peng J. ve diğ., 2012) (Nana Yaw Amponsah, 2014) (Edgar G. H. ve diğ., 2015) (Eberle A. ve diğ., 2017).

Kaynaklar	kg-CO ₂	D.Weiser's Study	Jinjing's Study	IPCC's Study	UK's Study	Amponsah's Study	Hertwicha's Study	Eberle's Study	Ortalama
Güneş	y ₁	43-72	23-44	46	-	9-300	57		69,7
Rüzgâr	y ₂	8-30	-	12	20-96	8-124	8.37		37.2
Jeotermal	y ₃	-	-	45	-	11-78	78	36,7	51
Biyogaz	y ₄	35-99	-	18	25-550	14-650			146
Hidroelektrik	y ₅	1-34	-	4	-	2-75			20

6.1.10 Elektrik üretim hedefi

E_g : 2023 yılı sonu itibariyle Türkiye’de üretilmesi planlanan toplam elektrik miktarı ETKB’nin Yenilenebilir Enerji Ulusal Eylem Planı’na göre 424 TWh’dir.



Şekil 6.1: Türkiye’de elektrik tüketimi: son veriler ve tahminler (ETKB, Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı, 2014).

6.1.11 Kurulu güç hedefi

2023 yılında gerçekleşmesi planlanan hedeflerle ilgili ETKB’nin Yenilenebilir Enerji Ulusal Eylem Planı’nda paylaşılan veriler ve sektörün mevcut durumu ve politikalar çerçevesinde ulaşmayı hedefledi kapasite değerleri Çizelge 6.13’de paylaşılmıştır. Bu çalışmada kısıt olarak kullanılacak veriler sektör hedefleri olacaktır, bunun sebebi bazı kaynaklarda son dönemde yaşanan gelişmelerle birlikte Türkiye’de ki kurulu güç değerlerinde ciddi artışlar meydana gelmiştir ve ETKB’nin 2023 hedeflerinin çok daha erken yakalanacağı tahmin edilmektedir.

Çizelge 6.13: Yenilenebilir enerji kaynakları kurulu güç tahmin ve hedefleri (MW) (ETKB, Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı, 2014) ve sektör öngörüsü.

Kaynak/Yıl		2023 (ETKB)	2023 (SEKTÖR)
Güneş	H_g	5.000	8.000
Rüzgâr	H_r	20.000	20.000
Jeotermal	H_j	1.000	3.000
Biyogaz	H_b	1.000	2.000
Hidroelektrik	H_h	34.000	34.000

6.1.12 Şebeke altyapı sınırı

Şebekeye her sene bağlanabilecek yenilenebilir enerji kaynaklı santral kurulu güç toplam sınırı Çizelge 6.14’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.14: Şebeke altyapı sınırı (MW-yıl) (D_i).

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Maks. Kurulu Güç	3.500	4.000	4.500	5.000	5.500	6.000

6.1.13 Sosyal (istihdam) katkı faktörü

Sosyal katkı noktasında her bir enerji kaynağına ilişkin MW başına istihdam edilen personel sayısı üretim, kurulum ve işletme dönemleri için ayrı ayrı verilmiş olup, ekonomik ömrü boyunca her bir kaynağın toplam istihdam etkisi Çizelge 6.15’te sunulmuştur.

Çizelge 6.15: Yenilenebilir enerji kaynakları farklı yaşam döngülerinde Türkiye’de istihdama olan katkısı (Kişi/MW) (REN21, 2017) (IRENA, 2017) (Renner M., 2017) (α_i).

Kaynak/Yıl	Kurulum Süresi	İşletme Süresi	Üretim	Kurulum	İşletme	Ekonomik Ömür Boyunca Toplam İstihdam
Güneş	1 Yıl		7.7*	6	0.2	16.39
Rüzgâr	2 Yıl		4.27*	2.5	0.3	15.5
Jeotermal	2 Yıl	25 Yıl	-	3.4	0.4	16.8
Biyogaz	2 Yıl		-	7	1	39
Hidroelektrik	2 Yıl		-	7.4	0.1	17.3

* Tüm üretim sürecinin %70’i yerli olarak üretilecektir.

6.1.14 Ekonomik katkı faktörü

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere enerji üretimi cari açığın üzerindeki en büyük etkenlerden biridir. Bu noktada kurulacak yenilenebilir enerji santralleri ve özelinde güneş ve rüzgar enerjisi için Türkiye’de geliştirilen YEKA modeli cari açığa katkı sağlayabilecek önemli bir modeldir. Bu çerçevede rüzgar ve güneş enerji santrallerinin ekipmanları için Türkiye’de kurulacak tesislerde üretilen ürünlerle önlenerek ithalat ve öngörülen ihracat miktarları Çizelge 6.16’da verilmiş olup, toplam cari açığa katkısı hesaplanarak, paylaşılmıştır. Bu bilgiler kurulacak tesislere özgü ticari bilgiler olup, sektör uzmanları ile yapılan görüşmeler sonucunda elde edilmiştir.

Çizelge 6.16: Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye’de ki ekonomik katkısı (\$/MW-yıl) (δ_i).

Kaynak/Yıl	Öngörülen İhracat	Önlenecek İthalat	Cari Açığa Katkısı
Güneş	54.000	126.000	180.000
Rüzgâr	134.000	312.000	446.000
Jeotermal	-	-	-
Biyogaz	-	-	-
Hidroelektrik	-	-	-

* Kurulu gücün yarısı kadar tesis kapasitesi yatırımı öngörülmüştür.

6.2 İşletim ve Çözücü

Karmaşık lineer programların çözülebilmesi için bilgisayar destekli paket programlara ihtiyaç duyulmaktadır. Piyasada farklı türlerde açık kaynak kodlu veya ticari şekilde 100 kadar paket program (çözücü) bulunmaktadır. Bu çözücüler ücretsiz olmaları veya düşük fiyatlı olmaları, kullanıcı dostu olmaları, lineer programların çözümü için uygun metodları içermeleri, genel olarak kabul görmüş ve düzenli olarak geliştirilen yapıda olmaları ve diğer program ve databseler ile rahat çalışabilmeleri gibi temel fonksiyonlarına göre gruplanmaktadır. (Sandia National Laboratories, 2013)

Bu çalışmada çözücü olarak GNU Linear Programming Kit (GLPK) paketi R programlama arayüzü ile birlikte kullanılmıştır. R programlama arayüzünün tercih edilmesindeki temel amaç açık kaynak kodlu olması, ücretsiz olması ve veri madenciliği çalışmalarına uygun olarak SAS, SPSS gibi programlarla çalışabilme

kabiliyetidir. Ayrıca son dönemde enerji piyasasında kullanılan izleme ve geliştirme programlarının birçoğunda R programına uygun veri analizi araçları entegre edilmiştir ve kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

R içerisinde birden çok çözücü bulunmaktadır. Bu çalışmada tercih edilen GLPK çözücüsü ilk defa matematik programlama projesi olarak, büyük çaptaki lineer programların çözümü için Moskova Üniversitesi'nden Andrew Makhorin tarafından geliştirilmiştir. Açık kaynak kodlu ve ücretsiz bir programdır. Ücretsiz çözücüler karşılaştırıldığında GLPK diğerlerine nazaran önemli derecede daha hızlıdır. Ayrıca R içerisinde ve literatürde ki zengin dokümanları ve örnek uygulamaları sayesinde de kullanıcı dostu olduğu için bu çalışmada tercih edilmiştir. (Meindl B. ve Templ M., 2013)

6.3 Çıktılar ve Değerlendirmeler

4 farklı amaç fonksiyonu, 74 adet alt kısıt ve birçok veri seti kullanılarak 30 adet karar değişkenin bulunmasına ilişkin paket programda kurulan modelleme çalışmasının sonuçları Çizelge 6.17'de paylaşılmıştır. Bu senaryoda 2023 için elektrik üretiminde yenilebilir enerjinin payı %35 olarak alınmıştır.

Çizelge 6.17: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW) (hedef: %35).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
Güneş	0	0	1500	0	1881.4	1179.9	3879.3
Rüzgâr	2391.7	2500	2500	2500	2500	2500	14891.7
Jeotermal	0	0	0	0	0	1963.3	1963.3
Biyogaz	0	0	0	0	0	265.8	365.8
Hidroelektrik	1108.3	1500	500	2500	1118.6	0	6726.9
Toplam	3500	4000	4500	5000	5500	6000	

Yukarıdaki çizelgede görüleceği üzere belirlenen şebeke kısıtları kurulu güçlerin dağılımında önemli bir rol oynamıştır. Belirlenen süre zarfında en fazla kurulu güç katkısı 14.8GW ile rüzgâr enerjisinden gelmiş olup, sonrasında sırasıyla 6.7GW hidroelektrik, 3.9GW güneş, 2GW jeotermal ve 0.4GW kadar biyogaz enerjisinin kurulması planlanmıştır.

Problemin çözümüne ilişkin bulunan q katsayılarının (amaç fonksiyonları arasındaki bağıntılar) ve bu değerlerin bulunması için gerçekleştirilen iterasyon sayıları Çizelge 6.18’de verilmiştir.

Çizelge 6.18: q katsayıları ve iterasyon sayıları.

q_1	9.19	iterasyon sayısı 1	8191
q_2	1.55	iterasyon sayısı 2	5543
q_3	1.93	iterasyon sayısı 3	9237
q_4	0.32	İterasyon sayısı 4	6759

Bulunan sonuçları Uluslararası Enerji Ajansı ve Türkiye Elektrik İletim A.Ş.’nin yayınladığı kapasite projeksiyonu çalışması ile karşılaştırdığımızda ise; TEİAŞ verilerinin 2018 – 2021 seneleri için bulunan sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmektedir. 2022 senesinde projeksiyon tahminindeki farkın ise Türkiye’de kurulacak nükleer enerji santrali sebebiyle TEİAŞ öngörüsündeki düşüş sebebiyle gerçekleştiği öngörülmektedir.

Çizelge 6.19: Yıllar bazında hesaplanan ve farklı kaynaklarda tahmin edilen kümülatif yenilenebilir enerji kurulu güçleri (MW)
(IEA, 2018), (TEİAŞ, 2017),
(ETKB, Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı, 2014).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Güneş	3420.7	3420.7	4920.7	4920.7	6102.1	7300.0
Rüzgâr	8908.5	11408.5	13908.5	16408.5	18908.5	21408.5
Jeotermal	1063.7	1063.7	1063.7	1063.7	1063.7	3027.0
Biyogaz	634.2	634.2	634.2	634.2	634.2	1000.0
Hidroelektrik	28381.4	29881.4	30381.4	32881.4	34000.0	34000.0
Toplam	42408.5	46408.5	50908.5	55908.5	60708.5	66735.5
IEA	39200	41400	43100	45400	48000	-
ETKB	45478	49697	52729	55488	58174	61000
TEİAŞ	42426	46320	50420	52574	-	-

Uluslararası Enerji Ajansı'nın öngörülerine baktığımızda ise kurulu güç farklarının yüksek olduğu ve Uluslararası Enerji Ajansı(IEA)'nın tahminlerinin büyüme hızının düşük alındığı görülmüştür. Örneğin 2017 yılı sonu itibariyle Türkiye'de yenilenebilir enerji kurulu gücünün 38.9GW olduğu görülmektedir ancak IEA'nın tahminlerinde bu orana 2018 sonu itibariyle ulaşılacağı öngörülmektedir. Bu durum IEA verilerinin güncellenmesi gerektiğinin bir göstergesidir.

Çizelge 6.20'de Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ)'ın yıllık bazda kaynak dağılım projeksiyonuna baktığımızda ise hidroelektrik, jeotermal ve biyogaz tesislerinin kurulu gücü için öngörülen değerlerin, bu çalışma kapsamında bulunan değerlerle örtüştüğü görülmekle birlikte Türkiye Cumhuriyeti Devleti adına en üst kurum olan Enerji Tabi Kaynaklar Bakanlığı (ETKB)'nin koyduğu hedeflerin aynı olmaması dikkat çeken bir konudur.

Ancak rüzgâr ve güneş enerjisi için kurulu güçler arasında ciddi farklar bulunmaktadır. Bunun göze çarpan ilk sebebi TEİAŞ çalışmasında ETKB'nin koyduğu hedeflerin farklı değerlendirilmiştir. Çizelge 6.13'de görüleceği üzere güneş enerjisi için 2023'de ETKB hedefi 5GW, sektör öngörüsü 8GW iken, TEİAŞ tahminlerine göre bu hedef 2 yıl erken olarak 2021'de yakalanmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı verilerine baktığımızda ise 2021-2022 yılları arasında kurulu güç öngörüsünün benzerlik gösterdiği söylenebilmektedir.

Buna karşın, rüzgâr enerjisi için 2023'de ETKB ve sektör hedefi 20GW iken, TEİAŞ tahminlerinde rüzgâr enerjisi kurulu gücünün 2021 sonu itibariyle 10GW mertebesinde kaldığı görülmektedir. Buna karşın ETKB hedefi 16.8GW, ayrıca modelde hesaplanan değer 16.4GW mertebesinde. Genel tabloya baktığımızda ETKB verilerinde rüzgâr enerjisi kurulu gücü daha yüksek iken TEİAŞ verilerinde güneş enerjisi kurulu güçleri daha yüksek seyretmektedir.

Uluslararası Enerji Ajansı'nın verilerinin ise Türkiye hedeflerinin ve model tahminlerinin oldukça altında kaldığı görülmektedir. Bu noktada gerek Türkiye'nin hedeflerinin gözden geçirilmesi, gerekse Uluslararası Enerji Ajansı'nın Türkiye'nin gelecek stratejileri ve planlamalarına göre hedeflerini revize etmesi, gelecek öngörüsünün kesişmesine adına atılması gereken adımlardan biridir.

Çizelge 6.20 Yıllar bazında hesaplanan ve farklı kaynaklarda tahmin edilen kaynaklara göre kümülatif yenilenebilir enerji kurulu güçleri (MW)
(IEA, 2018), (TEİAŞ, 2017),
(ETKB, Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı, 2014).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Güneş	3420.7	3420.7	4920.7	4920.7	6102.1	7300.0
IEA	-	-	-	-	5100	-
ETKB	2400	3000	3600	4000	4400	5000
TEİAŞ	4740	5350	6768.4	8262.8	-	-
Rüzgâr	8908.5	11408.5	13908.5	16408.5	18908.5	21408.5
IEA	-	-	-	-	10600	-
ETKB	11458	13308	15090	16800	18436	20000
TEİAŞ	7730.7	8761.9	9993.1	10303.3	-	-
Jeotermal	1063.7	1063.7	1063.7	1063.7	1063.7	3027
IEA	-	-	-	-	1200	-
ETKB	632	706	779	853	926	1000
TEİAŞ	1028.9	1046.9	1046.9	1046.9	-	-
Biyogaz	634.2	634.2	634.2	634.2	634.2	1000
IEA	-	-	-	-	900	-
ETKB	606	683	759	836	912	1000
TEİAŞ	558.1	565.7	565.7	565.7	-	-
Hidroelektrik	28381.4	29881.4	30381.4	32881.4	34000	34000
IEA	-	-	-	-	30100	-
ETKB	30382	32000	32500	33000	33500	34000
TEİAŞ	28368.6	30596.0	32045.9	32396	-	-

Çizelge 6.21’den üretilen elektrik enerjisi miktarı tahminlerine baktığımızda ise IEA hedeflerinin, hesaplanan değerlerden ilk 3 yıl yüksek olduğu görülmektedir. IEA kurulu güç tahminlemesi, hesaplanan değerlerden daha düşük olmasına rağmen üretilen elektrik enerjisi miktarının daha yüksek çıkması, IEA’nın kabul ettiği kapasite faktörleri ile ilgilidir. Çizelge 6.1’de görüleceği üzere uluslararası ortalamalar ile Türkiye’nin kapasite faktörü ortalamalarına baktığımızda, mevcut santrallerin beklenen kapasite faktörlerinin daha altında çalıştığı görülmektedir. İlerleyen yıllarda mevcut santrallerin daha yüksek kapasite faktörleri ile çalıştırılması ile MW başına

üretileen elektrik miktarlarında artışlar meydana gelebilir. Gerçekleşen 2017 verilerine baktığımızda ise Türkiye’de yenilenebilir enerjiden üretilen elektrik enerjisi miktarı 76.8TWh iken aynı yıl için Uluslararası Enerji Ajansı’nın tahmini 100.8TWh olmuştur (IEA, 2018).

Çizelge 6.21: Yıllar bazında toplam yenilenebilir enerji üretim miktarı (GWh) (hedef: minimum %35) (IEA, 2018), (ETKB, Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı, 2014).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Güneş	286.0	286.0	3045.4	3045.4	5218.7	7422.4
Rüzgâr	22573.0	29800.0	37027.0	44254.0	51481.0	58708.0
Jeotermal	5349.1	5349.1	5349.1	5349.1	5349.1	18935.9
Biyogaz	1831.3	1831.3	1831.3	1831.3	1831.3	4138.5
Hidroelektrik	57148.9	62010.7	63631.3	71734.3	75359.9	75359.9
Toplam						
Hesaplanan	87.2	99.3	110.9	126.2	139.2	164.6
Yen. (TWh)						
IEA	106.6	112	116.5	122.4	128.9	
(TWh)						
ETKB Eylem	120.474	131.196	138.687	145.678	152.485	159.433
Planı (TWh)						
ToplamTkt.	329.0	348.0	367.0	386.0	405.0	424.0
(TWh)						
Yüzde	27%	29%	30%	33%	34%	39%
Hesaplanan						
Yüzde	36.6%	37.7%	37.7%	37.7%	37.6%	37.6%
ETKB						

Ayrıca yukarıdaki tabloda, hesaplanan üretim değerlerinin tahmini toplam tüketim değerlerine bölünmesiyle bulunan yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payı 2018’de %27 mertebelerinden başlayarak %39’a kadar artarken, ETKB verilerine baktığımızda bu oranın %36.7 bandında yıllara göre sabit kaldığı görülmektedir. 2017 sonu itibarıyla bu oranın % 28.7 mertebelerinde olduğu TEİAŞ’ın gerçekleşen rakamlarından görülmektedir. Dolayısıyla önümüzdeki yıllarda yenilenebilir enerji payının %36.7 bandında sabit seyretmesi pek mümkün gözükmemektedir. Ancak agresif bir politika ile bu çalışmada hesaplanan değerlerde gördüğümüz üzere yıllar

bazında artacak ve %34-%39 bandının yakalanacağı bir üretimde yenilenebilir enerji payı trendi elde edilebilir.

Çizelge 6.22'deki sonuçlar ise 2023 yılı itibariyle yenilenebilir enerjinin toplam tüketimdeki payını %35'den küçük olarak sınırladığımızda çıkan sonuçlardır. Bu sonuçlar çerçevesinde 2023'de %32.1 oranında yenilebilir enerji payına ulaşılabilmektedir. Bu portföy dağılımında 2023'de ki kurulu güçler ise sırasıyla yaklaşık olarak 8GW, 20GW, 1GW, 0.6GW ve 31GW mertebelerinde oluşmaktadır.

Bunun yanı sıra 2023 yılı itibari ile yenilenebilir enerjinin toplam üretim miktarı 136 TWh mertebesine erişmektedir. Bu pay içerisinde de hidroelektrik santraller ve rüzgar enerji santralleri başı çekmektedir. En düşük katkı ise 1.8 TWh ile biyogaz enerjisinden gelmektedir.

Çizelge 6.22: Yıllar Bazında Toplam Yenilenebilir Enerji Üretim Miktarı (GWh)
(hedef: maksimum %35).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Güneş	4885	5950.7	8170.1	8170.1	8170.1	8170.1
Rüzgâr	18549.9	25776.9	33003.9	40230.9	47457.9	54636.3
Jeotermal	5349.1	5349.1	5349.1	5349.1	5349.1	5349.1
Biyogaz	1831.3	1831.3	1831.3	1831.3	1831.3	1831.3
Hidroelektrik	53556.7	56540.9	58161.5	65425.6	65425.6	65425.6
Toplam(TWh)	84.2	95.4	107.1	121.5	128.8	136
Hedef(TWh)	329.0	348.0	367.0	386.0	405.0	424.0
Yüzde	25.6%	27.4%	29.2%	31.5%	31.8%	32.1%

Ayrıca her bir amaç fonksiyonunun portföy oluşumuna etkisini incelediğimizde ise çıkan sonuçlar sırasıyla Çizelge 6.23-24-25'de verilmiştir. Bu analizde sırasıyla CO₂ salınım miktarı, istihdam katkı faktörü ve ekonomik katkı faktörü eşit kabul edilerek model çözülmüş ve sonuçlar elde edilmiştir. Bu analiz esnasında yenilenebilir enerjinin Türkiye'nin elektrik enerji üretim portföyü içerisindeki payı %35 olarak sabit kabul edilmiştir.

Çizelge 6.23: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW)
(hedef: minimum %35), (CO₂ salınım faktörü eşit alınır).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
Güneş	0	0	1500	0	1881.4	1197.9	3879.3
Rüzgâr	2391.7	2500	2500	2500	2500	2500	14891.7
Jeotermal	0	0	0	0	0	1963.3	1963.3
Biyogaz	0	0	0	0	0	365.8	365.8
Hidroelektrik	1108.3	1500	500	2500	118.6	0	6726.9
Toplam	3500	4000	4500	5000	5500	6000	

Çizelge 6.24: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW)
(hedef: minimum %35), (istihdam faktörü eşit alınır).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
Güneş	0	0	1500	0	1881.4	1197.9	3879.3
Rüzgâr	2391.7	2500	2500	2500	2500	2500	14891.7
Jeotermal	0	0	0	0	0	1963.3	1963.3
Biyogaz	0	0	0	0	0	365.8	365.8
Hidroelektrik	1108.3	1500	500	2500	1118.6	0	6726.9
Toplam	3500	4000	4500	5000	5500	6000	

Çizelge 6.25: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW)
(hedef: minimum %35), (cari açık faktörü eşit alınır).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
Güneş	0	0	1500	0	1881.4	1197.9	4579.3
Rüzgâr	1000	2483.2	2500	2500	2500	2500	13483.2
Jeotermal	0	0	0	0	0	1963.3	1963.3
Biyogaz	0	0	0	0	0	365.8	365.8
Hidroelektrik	2500	1516.8	500	2500	1118.6	0	8135.4
Toplam	3500	4000	4500	5000	5500	6000	

Sonuçlar göstermektedirki seçilen 5 yenilenebilir enerji kaynağının CO₂ salınımı ve istihdama katkıları mevcut kısıtlar ve şartlar altında sonuçları değiştirmezken, cari açığa katkı faktörü önemli bir rol oynamaktadır ve sonuçları etkilemektedir. Cari açık faktörünün yansıtmadığı senaryoda rüzgar enerjisi kurulu gücü yaklaşık 1.5GW daha az olacak şekilde portföy şekillenmiştir. Güneş enerjisi kurulu gücünde yaklaşık

700MW'lık bir artış olsada, cari açık faktörünün sistemi nasıl etkilediği açık bir şekilde görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan bir başka analiz ise, yenilenebilir enerjinin toplam tüketim içindeki payının %5'lik oranlarla değişmesiyle birlikte, kaynakların portföy içerisindeki kurulu güçlerinin nasıl değiştiğine ilişkin çalışmadır. Minimum %30 hedefiyle başlanarak %5 artışlar olacak şekilde minimum %50 oranına kadar model analize edilmiş ve sonuçlar Çizelge 6.26-27-28'de verilmiştir.

Çizelge 6.26: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW)
(hedef: minimum %30-%35-%40).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
Güneş	0	0	1500	0	1881.4	1197.9	3879.3
Rüzgâr	2391.7	2500	2500	2500	2500	2500	14891.7
Jeotermal	0	0	0	0	0	1963.3	1963.3
Biyogaz	0	0	0	0	0	365.8	365.8
Hidroelektrik	1108.3	1500	500	2500	1118.6	0	6726.9
Toplam	3500	4000	4500	5000	5500	6000	

Elde edilen sonuçlardan görülmektedir ki; minimum %30, %35 ve %40 değerleri için kurulu güç dağılımı değişmemektedir. Ancak Çizelge 6.27 ve 6.28'de görüldüğü üzere bu oran %40'den sonra arttıkça mevcut şebeke kısıtları altında bu oranları tutturmak için kapasite faktörü daha yüksek olan Jeotermal enerjiye doğru bir kayma meydana gelmektedir.

Çizelge 6.27: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW)
(hedef: minimum %45).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
Güneş	1000	0	1806.2	773.1	1881.4	1000	6460.7
Rüzgâr	2500	1549.5	193.8	2500	2500	2500	11743.3
Jeotermal	0	2450.4	2500	0	134.2	0	5084.7
Biyogaz	0	0	0	0	365.8	0	365.8
Hidroelektrik	0	0	0	1726.9	2500	2500	6726.9
Toplam	3500	4000	4500	5000	5500	6000	

Çizelge 6.28: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW)
(hedef: minimum %50).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
Güneş	0	0	1500	0	2079.3	1000	4579.3
Rüzgâr	0	0	0	1482.2	2500	2500	6482.2
Jeotermal	2500	1134.2	790.8	2500	920.7	2500	10345.7
Biyogaz	0	265.8	0	0	0	0	265.8
Hidroelektrik	1000	2500	2209.1	1017.7	0	0	6726.8
Toplam	3500	4000	4500	5000	5500	6000	

Analiz edilen bir diğer konu ise şebeke sınırının kurulu güç dağılımına etkisi olmuştur. Normal şartlar altında 3.5GW'dan başlayarak her sene 0.5GW artacak şekilde yenilenebilir enerjiler için bir şebeke sınırı (enerji nakil hattı ve trafo merkezi taşıma sınırı) koyduğumuz durumda çıkan sonuç Çizelge 6.17'de verilmişken, bu sınırın her sene eşit şekilde 4.5GW alınması durumunda çıkan sonuçlar Çizelge 6.29'da paylaşılmıştır.

Çizelge 6.29: Yıllık bazda hesaplanan kurulu güç değerleri (MW)
(hedef: minimum %35), (şebeke sınırı her sene 4500MW).

Kaynak/Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Toplam
Güneş	2500	579.3	1500	0	0	0	4579.3
Rüzgâr	2000	2500	1483.2	2500	2500	2500	13483.2
Jeotermal	0	419.5	1516.8	0	0	0	1936.3
Biyogaz	0	274.3	0	0	0	0	274.3
Hidroelektrik	0	726.9	0	2000	2000	2000	6726.9
Toplam	4500	4500	4500	4500	4500	4500	

Sonuçlar göstermektedirki şebeke sınırı farklı dağıldığında elde edilen kurulu güç ve üretim değerleride buna göre şekillenmektedir. Bu sebeple en önemli faktörlerden biri şebekenin izin verilen limitleridir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Türkiye için 2018-2023 yılları arasında yenilebilir enerji üretim portföyü öngörüsünün farklı bir yaklaşım ve method kullanılarak, Türkiye'nin mevcut durumu ve hedefleri çerçevesinde modellenmesi ve doğruluğu yüksek bir kestirim yapılması amaçlanmıştır.

Önerilen model kapsamında elde edilen temel çıktılar değerlendirildiğinde, çok amaçlı doğrusal programlama methodunun gerçek hayatta karşılaştığımız durumların analizinde kısmi olarak başarılı bir yöntem olduğu ortaya konmuştur. Çok amaçlı modelleme problemleri kurulurken en önemli hususlar;

- Amaç fonksiyonlarının düzgün tanımlanması
- Kısıtların olabildiğince gerçekçi olması
- Sabit verilerin gerçek, toplanmış veri setlerinden oluşması
- Amaç fonksiyonlarının tekilleştirilmesi aşamasında kullanılan yöntemin kullanıcı önceliklerinden bağımsız olması

şeklinde sıralanabilir.

Bu enerji portföyü çalışmasında kullanılan yöntem doğrusal programlama olmuştur; fakat politikaların güncel olarak değiştiği ve gerek jeopolitik gerekse ekonomik değişkenliklerin görülebildiği Türkiye gibi ülkelerde doğrusal olmayan yaklaşımların, doğrusal yaklaşımlardan daha gerçekçi sonuçlar vereceği bir gerçektir.

Geleneksel enerji planlama modellerinde amaç en düşük maliyetli portföyü, teknik olarak istenilen kısıtlar çerçevesinde hesaplamaktır. Bu çalışmada ise teknik kısıtlar ve maliyet hedefine ilaveten, çevresel kaygılar, sosyal katkı ve ekonomik katkı faktörleri çalışmanın içerisine dâhil edilmiştir. Bu sayede yapılan modellemenin hem boyutu hem de belirsizliği azaltılmaya çalışılmıştır.

Genel olarak çalışmanın sonuçlarını maddeler halinde değerlendirdiğimizde ise, çıkarılan temel sonuçlar şu şekildedir;

- Şebeke planlaması yenilenebilir enerji kaynaklarının dağılımı ve tüketim içerisindeki yüzdesinin belirlenmesinde kritik bir öneme sahiptir. Bu yüzden gerek Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) gerekse Türkiye Elektrik İletim A.Ş.(TEİAŞ) detaylı ortak projeksiyon çalışmaları yapmalı ve bu çalışmaların sonucuna göre gereken politikalar oluşturulmalıdır.
- Rüzgâr enerjisi kurulu gücünün gerek TEİAŞ gerekse IEA raporlarında ETKB'nin hedeflerinden düşük kalması, üzerinde düşünülmesi gereken bir noktadır. Yapılan çalışmada görülmektedir ki mevcut hedeflerin tutturulabilmesi için sektöre ciddi bir dinamizm getirilmesi gerekmektedir. YEKA ihalesi ile bir nebze hareketlenen rüzgâr enerjisi sektöründe, politika belirleyicilerin ilave mekanizmalar ile gerek lisans verilmiş mevcut santrallerin yapımını denetlenmesi, gerekse yeni lisansları dağıtması ve bu lisansların en hızlı sürede yatırıma dönüştürülmesi için gerekli adımlar tesbit edilmeli ve uygulanmalıdır.
- Yenilenebilir enerjilerin tüketimdeki payının arttırılmasında tespit edilen önemli bir etken de mevcut santrallerin kapasite faktörlerinin yükseltilmesidir. Mevcut verilerden görülmektedir ki, kaynaklarımızı yeteri kadar verimli işletememekteyiz. Bu problemin tespiti ve çözümü için ETKB veya YEGM bünyesinde bir komite kurularak işletmedeki tesisler için bir inceleme başlatılabilir.
- Tarım ve hayvancılığın yaygın olarak yapıldığı bir ülke olmamıza rağmen, çalışılan bütün senaryolarda biogaz santrallerinin kurulu güç projeksiyonları oldukça düşük kalmaktadır. Gerek maliyet yüksekliği, gerek sosyal ve ekonomik farkındalığının kısıtlı kalması, gerekse verilen teşviklerin yeterli olmaması tercih edilen kaynak olmasını önlemektedir. Politika belirleyicinin biyogaz santralleri için özendirici teşvikler vermesi ve yeni mekanizmalar geliştirmesiyle bu kaynak tipinin hayatımıza girmesi beklenmektedir. Özellikle atıkların kullanılmaması halinde çevre zararları da dikkate alındığında Biogaz enerjisi, sosyal katkısı yüksek olacak bir enerji kaynağıdır.
- Benzer bir durum jeotermal santraller için de geçerlidir, her ne kadar ülkemizde jeotermal enerjinin kullanımı diğer birçok dünya ülkesine göre daha yüksek olsa da, elektrik üretiminde baz kaynak statüsünde olması ve yüksek kapasite faktörü ile çalışması, bu kaynaktan daha fazla faydalanmamız gerektiğinin bir

göstergesidir. Mevcut politika ve mekanizmalar yenilenerek, yatırımcıyı daha da cezbedecek yeni uygulamaların hayata geçirilmesiyle, ülkemizdeki birçok potansiyel jeotermal kaynağı faaliyete geçirilebilir.

- Elde edilen çalışma sonuçlarında görülmektedir ki Türkiye için gelecek dönemde güneş ve rüzgâr enerjisi en çok yatırım yapılacak alanlar olacaktır. Sonuçların bu şekilde çıkmasının temel sebeplerinden biride bu kaynakların cari açığa yaptıkları katkısıdır. Cari açığa yapılan bu katkının temelinde ETKB'nın çok yakın zamanda devreye soktuğu YEKA stratejisi ana faktör olmuştur. Bu stratejinin sürdürülerek daha küçük paketlerde ve sürdürülebilir olarak uygulanması için revize edilmiş alt mekanizmalar gerekmektedir.
- Belirlenen hedeflerin tutturulabilmesi için zaman planlaması oldukça önemlidir; farklı kaynakların farklı inşaat süreleri göz önünde bulundurularak, karar vericinin belirlenen projeksiyon çerçevesinde lisans tahsislerini doğru zamanlarda yapması ve santrallerin yatırıma dönüşünü sıkı biçimde takip etmesi gerekmektedir.

Çalışmanın daha gerçekçi olmak üzere geliştirilebilmesi için ileri aşamalarında doğrusal olmayan hedef programlama kurgulanarak, gerçek zamanlı öğrenme metodları ile zenginleştirilmelidir. Ayrıca, bu çalışmada kurgulanan amaç fonksiyonları ile birlikte kaynaklara ilişkin risk hesapları ve kaynakların birbiri ile olan etkileşiminin modele eklenmesi önerilir.

KAYNAKLAR

- Amponsah N.Y. ve diğ. (2014).** Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of life cycle considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11.
- Atlas M. (2008).** Çok Amaçlı Programlama Çözüm Tekniklerinin Sınıflandırılması. *Anadolu University Journal of Social Sciences*, 47-68.
- Awerbuch S. ve Yang S. (2007).** *Efficient electricity generating portfolios for Europe: maximising energy security and climate change mitigation*. European Investment Bank.
- Ballarin A. ve diğ. (2011).** Biomass energy production in agriculture: A weighted goal programming analysis. *Energy Policy* 39, 1123–1131.
- BCG-TÜSİAD. (2018).** *Sürdürülebilir Gelecek İçin Sürdürülebilir Enerji*. İstanbul: TÜSİAD.
- BP. (2017).** *BP Statistical Review of World Energy - June*. BP.
- Chen F. ve diğ. (2015).** A linearization and parameterization approach to tri-objective linear programming problems for power generation expansion planning. *Energy*, 240-250.
- Choobineh M. ve Mohagheghi S. (2016).** A multi-objective optimization framework for energy and asset management in an industrial Microgrid. *Journal of Cleaner Production* 139, 1326-1338.
- Dinkelbach W. (1967).** On Nonlinear Fractional Programing. *Management Science*.
- Eberle A. ve diğ. (2017).** *Systematic Review of Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Geothermal Electricity*. NREL.
- Edgar G. H. ve diğ. (2015).** Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *PNAS*, Supporting Information.
- EMO. (2018, Şubat).** *Enerji İstatistikleri*. Elektrik Mühendisleri Odası: http://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=88369 adresinden alındı

- EPDK. (2017).** *Elektrik Piyasası Sektör Raporu - Kasım 2017*. Ankara: Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı.
- EPİAŞ. (2018,Nisan).** *DPG Uzlaştırma Süreci*. EPİAŞ:
<https://www.epias.com.tr/uzlastirma/dgp-uzlastirma-sureci> adresinden alındı
- EPİAŞ. (2018,Nisan).** *Hissedarlarımız*.
<https://www.epias.com.tr/kurumsal/hissedarlarimiz>. adresinden alındı
- Ersoy A.E. (2017).** Türkiye'nin Hayvansal Gübre Kaynaklı Sera Gazı Emisyonları Durumu ve Biyogaz Enerjisi Potansiyeli.
- ETKB. (2014).** *Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı*. ANKARA.
- ETKB. (2017).** *"Milli Enerji Ve Maden Politikası" Tanıtım Programı* Paylaş:. Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı: <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Bakanlik-Haberleri/Milli-Enerji-Ve-Maden-Politikasi-Tanitim-Programi> adresinden alındı
- ETKB.(2018,Mart).** *Hidrolik*. ETKB: <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Hidrolik> adresinden alındı
- ETKB.(2018,Şubat).** *Jeotermal*. ETKB: <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Jeotermal> adresinden alındı
- ETKB. (2018, Şubat).** *Rüzgar*. ETKB: <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar> adresinden alındı
- EÜAŞ, E. Ü. (2017).** *Elektrik Üretimi Sektör Raporu*. Ankara: Araştırma Planlama ve Koordinasyon Daires Başkanlığı İstatistik ve Araştırma Müdürlüğü.
- European Commission. (2018, 02 25).** *Climate Action*. Eurpean Commission:
https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en adresinden alındı
- Francesco A. ve diğ. (2014).** Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1.
- Frankfurt School of Finance & Management GmbH. (2017).** *Global Trends In Renewable Energy Investment*. Frankfurt: Frankfurt School of Finance & Management GmbH.
- Guerrero-Lemus R., M.-D. J. (2012).** *Renewable Energies and CO2 Cost Analysis, Environmental Impacts and Technological Trends* . Springer.
- GÜNAM. (2018, Şubat).** *Solartech*. Günam: <http://gunam.metu.edu.tr/solar-tech/pv-technology/> adresinden alındı

- Guzel N. (2013).** A Proposal to the Solution of Multiobjective Linear Fractional Programming Problem. *Hindawi Publishing Corporation*.
- Hartmanna B. ve diğ. (2017).** Multi-criteria revision of the Hungarian Renewable Energy Utilization Action Plan – Review of the aspect of economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, 1187-1200.
- IEA. (2016).** World Energy Outlook Model-Assumed Cost.
- IEA. (2017).** *World Energy Outlook*. IEA.
- IEA.(2018).** *Electricity*. International Energy Agency:
<https://www.iea.org/geco/electricity/> adresinden alındı
- IEA. (2018).** *Renewables 2017 Analysis and Forecast to 2022*. International Energy Agency.
- IRENA. (2017).** *Turning to Renewables : Climate-Safe Energy Solutions*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2018).** *Renewable Power Generation Cost in 2017*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Karagöl E.T. ve diğ. (2017).** *Türkiye'nin Milli Enerji ve Maden Politikası*. İstanbul: SETA.
- Lacey S. (2017, Ağustos).** *Search Greentec Media*. Greentec Media:
<https://www.greentechmedia.com/articles/read/global-solar-capacity-set-to-surpass-global-nuclear-capacity#gs.efoi2pU> adresinden alındı
- Lazard. (2017).** *Levelized Cost of Energy*.
<https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-2017/> adresinden alındı
- Lazard. (2017).** *Levelized Cost of Energy Analysis-Version11.0*.
- Meindl B. ve Templ M. (2013).** Analysis of Commercial and Free and Open Source Solvers for the Cell Suppression Problem. *Transactions on Data Privacy* 6, 147-159.
- Mendozaa G.A. ve Prabhub R. (2000).** Multiple criteria decision making approaches to assessing forest sustainability using criteria and indicators: a case study. *Forest Ecology and Management* 131, 107-126.
- MTA. (2018, Şubat).** *Enerji Haritaları*. MTA:
<http://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/jeotermal-harita> adresinden alındı
- Multi-Objective Optimization Problems. (2017).** Uberlândia: SPRINGER BRIEFS IN MATHEMATICS.

- Nana Yaw Amponsah, M. T. (2014).** Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13.
- NREL. (2018).** *Energy Analysis*. <https://www.nrel.gov/analysis/tech-cap-factor.html> adresinden alındı
- Ordway D.M ve Kille L.W. (2015, Kasım 28).** *Lifecycle greenhouse gas emissions from solar and wind energy: A critical meta-survey*. Journalist's Resource: <https://journalistsresource.org/studies/environment/energy/lifecycle-greenhouse-gas-emissions-solar-wind-energy> adresinden alındı
- Peng J. ve diğ. (2012).** Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15.
- REN21. (2017).** *Renewables 2017 Global Status Report*. Paris.
- REN21. (2017).** *Renewables Global Futures Report*. Paris: REN21 Secretariat.
- Renner M. (2017).** *Rural renewable energy investments and their impact on employment*. United Kingdom: International Labour Organization.
- RİTİM Projesi. (2018, Mart).** *RİTİM*. Hakkında: <http://www.ritm.gov.tr/aboutUs/ritm.php> adresinden alındı
- Sandia National Laboratories. (2013).** *Comparison of Open-Source Linear*. New Mexico: Sandia National Laboratories.
- Şenol H. ve diğ. (2017).** 2016'da Türkiye'de Kanatlı Hayvanlardan Üretilebilecek Biyogaz ve Elektrik Enerji Potansiyeli. *BEU Journal of Science*.
- T.C. Dışişleri Bakanlığı. Paris Anlaşması.** <http://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa> adresinden alındı
- Taha H. (2000).** *Operations research an introduction, (6.Basımdan Çeviri: Yöneylem Araştırması)*. Literatür yayınları.
- TCMB. (2017).** <http://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TCMB+TR/TCMB+TR/Main+Menu/Para+Politikasi/Interaktif+Grafikler/Cari+islemler+dengesi> adresinden alındı
- TEİAŞ. (2017).** *Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu(2017-2021)*. TEİAŞ.
- TEİAŞ. (2018).** *Sektör Raporları*. TEİAŞ Web Sitesi: www.teias.gov.tr adresinden alındı

- TJD. (2018, Şubat).** *Türkiye'de Jeotermal.* Türkiye Jeotermal Derneği:
<http://www.jeotermaldernegi.org.tr/sayfalar-Turkiye-39-de-Jeotermal>
adresinden alındı
- TUREB. (2016).** *Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği Rüzgar Enerjisi ve Etkileşim Raporu.*
İstanbul: Deloitte.
- Weisser D. (2006).** A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from
electric supply technologies. *Energy*, 11.
- Xidonas P. ve diğ. (2015).** Environmental corporate responsibility for investments
evaluation: an alternative multi-objective programming model. *Springer
Science+Business Media New York 2015.*
- YEGM. (2018, Şubat).** *Biyogaz.* YEGM:
<http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/biyogaz.aspx> adresinden alındı
- YEGM. (2018, Şubat).** *Türkiyede Jeotermal Enerji.* YEGM:
http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/turkiyede_jeo.aspx adresinden alındı
- YEGM. (2018).** *Yenilenebilir Enerji.* <http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir.aspx>
adresinden alındı
- YEGM-GEPA. (2018, Şubat).** *GEPA.* YEGM:
<http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx> adresinden alındı
- YEGM-REPA. (2018, Şubat).** *REPA.* YEGM:
http://www.eie.gov.tr/YEKrepa/REPA-duyuru_01.html adresinden alındı
- Zakariazadeh A. ve diğ. (2014).** Economic-environmental energy and reserve
scheduling of smart distribution systems: A multiobjective mathematical
programming approach. *Energy Conversion and Management* 78, 151–164.
- Zografidou E. ve diğ. (2017).** A financial approach to renewable energy production
in Greece using goal programming. *Renewable Energy* 108, 37-51.


```

#colnames(Generated_Specific_Yield) <- c("Specific Yield")
#rownames(Generated_Specific_Yield) <- c("Solar", "Wind", "Biogas", "Geothermal", "Hydro")
M12<-Generated_Specific_Yield
#M13# (OK)
NVP<-
matrix(c(3.79,5.11,22.28,19.50,7.90,3.57,4.83,22.06,19.31,7.82,3.36,4.56,21.84,19.11,7.75,3.17,4.32,21.63,18.93,7.67,2.99,4.1
0,21.41,18.74,7.59,2.82,3.88,21.20,18.55,7.52),nrow=5,ncol=6)
#colnames(NVP) <- c("2018", "2019", "2020","2021","2022","2023")
#rownames(NVP) <- c("Solar", "Wind", "Biogas","Geothermal","Hydro")
M13<-NVP
#M14# (OK)
#Generated_Social_and_Tech<-data.frame( a=c(8,20,3,2,34), b=c(8,20,3,2,34), c=c(8,20,3,2,34), d=c(8,20,3,2,34),
e=c(8,20,3,2,34), f=c(8,20,3,2,34))
Generated_Economical<-
matrix(c(0.126,0.126,0,0,0,0.126,0.126,0,0,0,0.126,0.126,0,0,0,0.126,0.126,0,0,0,0.126,0.126,0,0,0),nrow=5,
ncol=6)
#colnames(Generated_Social_and_Tech) <- c("2018", "2019", "2020","2021","2022","2023")
#rownames(Generated_Social_and_Tech) <- c("Solar", "Wind", "Biogas","Geothermal","Hydro")
M14<-Generated_Economical

# (3) *** VARIABLE DATA SET *** #
#V1# (OK)
Exp_Installed_Capacity<-matrix(c(rep(1,30)),nrow=5,ncol=6)
#colnames(Exp_Installed_Capacity) <- c("2018", "2019", "2020","2021","2022","2023")
#rownames(Exp_Installed_Capacity) <- c("Solar", "Wind", "Biogas","Geothermal","Hydro")
V1<-Exp_Installed_Capacity

# (4) *** CALCULATED DATA SET *** #
#C1# (OK)
#Exp_Generated_Energy<-data.frame(a=c(1,2,3,4,5), b=c(1,2,3,4,5), c=c(1,2,3,4,5), d=c(1,2,3,4,5), e=c(1,2,3,4,5),
f=c(1,2,3,4,5))
Exp_Generated_Energy<-matrix(c(rep(1,30)),nrow=5,ncol=6)
#colnames(Exp_Generated_Energy) <- c("2018", "2019", "2020","2021","2022","2023")
#rownames(Exp_Generated_Energy) <- c("Solar", "Wind", "Biogas","Geothermal","Hydro")
#C1<-data.matrix(Exp_Generated_Energy)
C1<-V1*M8*M9
#C2# (OK)
#Exp_Generated_CO2<-data.frame(a=c(1,2,3,4,5), b=c(1,2,3,4,5), c=c(1,2,3,4,5), d=c(1,2,3,4,5), e=c(1,2,3,4,5), f=c(1,2,3,4,5))
#Exp_Generated_CO2<-matrix(c(1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5),nrow=5,ncol=6)
#colnames(Exp_Generated_CO2) <- c("2018", "2019", "2020","2021","2022","2023")
#rownames(Exp_Generated_CO2) <- c("Solar", "Wind", "Biogas","Geothermal","Hydro")
#C2<-data.matrix(Exp_Generated_CO2)
C2<-V1*M10
#C3# (OK)
#Exp_Generated_Employment<-data.frame(a=c(1,2,3,4,5), b=c(1,2,3,4,5), c=c(1,2,3,4,5), d=c(1,2,3,4,5), e=c(1,2,3,4,5),
f=c(1,2,3,4,5))
#Exp_Generated_Employment<-matrix(c(1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5),nrow=5,ncol=6)
#colnames(Exp_Generated_Employment) <- c("2018", "2019", "2020","2021","2022","2023")
#rownames(Exp_Generated_Employment) <- c("Solar", "Wind", "Biogas","Geothermal","Hydro")
#C3<-data.matrix(Exp_Generated_Employment)
C3<-V1*M11
#C4# (OK)
#Exp_Generated_Social_and_Tech<-data.frame(a=c(1,2,3,4,5), b=c(1,2,3,4,5), c=c(1,2,3,4,5), d=c(1,2,3,4,5), e=c(1,2,3,4,5),
f=c(1,2,3,4,5))
#Exp_Generated_Social_and_Tech<-matrix(c(1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5),nrow=5,ncol=6)
#colnames(Exp_Generated_Social_and_Tech) <- c("2018", "2019", "2020","2021","2022","2023")
#rownames(Exp_Generated_Social_and_Tech) <- c("Solar", "Wind", "Biogas","Geothermal","Hydro")
#C4<-data.matrix(Exp_Generated_Social_and_Tech)
C4<-V1*M14

# (5) *** CONSTRAINTS *** #
#Constraint-1 (OK) :2023'te toplam elektrik tüketimin en az %30'u yenilenebilir enerji kaynaklarından olsun. (2023 Elektrik
tüketim hedefi 424 TWh)
cons1<- ((C1[1,1]+C1[1,2]+C1[1,3]+C1[1,4]+C1[1,5]+C1[1,6]))+
((C1[2,1]+C1[2,2]+C1[2,3]+C1[2,4]+C1[2,5]+C1[2,6]))+
((C1[3,1]+C1[3,2]+C1[3,3]+C1[3,4]+C1[3,5]+C1[3,6]))+
((C1[4,1]+C1[4,2]+C1[4,3]+C1[4,4]+C1[4,5]+C1[4,6]))+
((C1[5,1]+C1[5,2]+C1[5,3]+C1[5,4]+C1[5,5]+C1[5,6]))
dir1<-c(">=")
per=0.35
rhs1<-((424000000)*per)-
((M6[1,1]*M12[1,1])+(M6[2,1]*M12[2,1])+(M6[3,1]*M12[3,1])+(M6[4,1]*M12[4,1])+(M6[5,1]*M12[5,1]))
#Constraint-2 (OK) :2023'te toplam güneş hedefi 5000MW olsun
cons2<-V1[1,1]+V1[1,2]+V1[1,3]+V1[1,4]+V1[1,5]+V1[1,6]
dir2<-c(">=")
rhs2<-8000-M6[1,1]

```

```

#Constraint-3 (OK) :2023'te toplam rüzgar hedefi 20000MW olsun
cons3<-V1[2,1]+V1[2,2]+V1[2,3]+V1[2,4]+V1[2,5]+V1[2,6]
dir3<-c(">=")
rhs3<-20000-M6[2,1]
#Constraint-4 (OK) :2023'te toplam jeotermal hedefi 3000MW olsun
cons4<-V1[3,1]+V1[3,2]+V1[3,3]+V1[3,4]+V1[3,5]+V1[3,6]
dir4<-c(">=")
rhs4<-3000-M6[3,1]
#Constraint-5 (OK) :2023'te toplam biyogaz hedefi 1000MW olsun
cons5<-V1[4,1]+V1[4,2]+V1[4,3]+V1[4,4]+V1[4,5]+V1[4,6]
dir5<-c(">=")
rhs5<-1000-M6[4,1]
#Constraint-6 (OK) :2023'te toplam hidroelektrik hedefi 34000MW olsun
cons6<-V1[5,1]+V1[5,2]+V1[5,3]+V1[5,4]+V1[5,5]+V1[5,6]
dir6<-c(">=")
rhs6<-34000-M6[5,1]
#Constraint-7 (OK) :Pozitif olma sınırı
cons7.1<-V1[1,1]
.
.
.
#Constraint-8 :Sebeke altyapi sınırı
cons8.1<-V1[1,1]+V1[2,1]+V1[3,1]+V1[4,1]+V1[5,1]
.
dir8.1<-c("<")
.
rhs8.1<-3500
.
# #Constraint-9 :2018'de güneş enerjisi kapasitesi toplam kapasitenin en az %5'inden fazla olsun.
cons9.1<-V1[1,1]
.
.
.
# #Constraint-10 :2020'da en az 1000MW solar YEKA kapasite ve max 500MW lisanssız devreye girecek
#
cons10<-V1[1,3]
dir10<-c(">=")
rhs10<-1500
#
# #Constraint-11 :2021'da en az 1000MW rüzgar YEKA kapasite devreye girecek
#
cons11<-V1[2,4]
dir11<-c(">=")
rhs11<-1000

# (6) *** GUZEL & DINKELBACH ALGORITHM *** #
# *** SOLPM (Single Objective Linear Programing Model) *** #

#Obj1 <- function(){
Total_Cost<-(V1*M13)
f1<-Total_Cost
f1.obj<-c(f1[1,1],f1[1,2],f1[1,3],f1[1,4],f1[1,5],f1[1,6],
f1[2,1],f1[2,2],f1[2,3],f1[2,4],f1[2,5],f1[2,6],
f1[3,1],f1[3,2],f1[3,3],f1[3,4],f1[3,5],f1[3,6],
f1[4,1],f1[4,2],f1[4,3],f1[4,4],f1[4,5],f1[4,6],
f1[5,1],f1[5,2],f1[5,3],f1[5,4],f1[5,5],f1[5,6])
f1<-sum(f1.obj)
#}

# Amaç Fonk-2(f2) (Min): Toplam CO2 Üretim Miktarı
#Obj2 <- function(){
sum_co2<-C2
f2<-sum_co2
f2.obj<-c(f2[1,1],f2[1,2],f2[1,3],f2[1,4],f2[1,5],f2[1,6],
f2[2,1],f2[2,2],f2[2,3],f2[2,4],f2[2,5],f2[2,6],
f2[3,1],f2[3,2],f2[3,3],f2[3,4],f2[3,5],f2[3,6],
f2[4,1],f2[4,2],f2[4,3],f2[4,4],f2[4,5],f2[4,6],
f2[5,1],f2[5,2],f2[5,3],f2[5,4],f2[5,5],f2[5,6])
f2 <- sum(f2.obj)
#}

# Amaç Fonk-3(f3) (Max): Toplam İstihdam
#Obj3 <- function(){
sum_employment<-C3
f3 <-sum_employment

```

```

f3.obj<-c(f3[1,1],f3[1,2],f3[1,3],f3[1,4],f3[1,5],f3[1,6],
f3[2,1],f3[2,2],f3[2,3],f3[2,4],f3[2,5],f3[2,6],
f3[3,1],f3[3,2],f3[3,3],f3[3,4],f3[3,5],f3[3,6],
f3[4,1],f3[4,2],f3[4,3],f3[4,4],f3[4,5],f3[4,6],
f3[5,1],f3[5,2],f3[5,3],f3[5,4],f3[5,5],f3[5,6])
f3 <- sum(f3.obj)
#}

# Amaç Fonk-4(f4) (Max): Toplam Sosyal ve Teknolojik Fayda
#Obj4 <- function(){
sum_benefit<-C4
f4 <-sum_benefit
f4.obj<-c(f4[1,1],f4[1,2],f4[1,3],f4[1,4],f4[1,5],f4[1,6],
f4[2,1],f4[2,2],f4[2,3],f4[2,4],f4[2,5],f4[2,6],
f4[3,1],f4[3,2],f4[3,3],f4[3,4],f4[3,5],f4[3,6],
f4[4,1],f4[4,2],f4[4,3],f4[4,4],f4[4,5],f4[4,6],
f4[5,1],f4[5,2],f4[5,3],f4[5,4],f4[5,5],f4[5,6])
f4 <- sum(f4.obj)
#}

### q1'in global maksimum noktasının bulunmasıI ### (örnek)
#q1.func <- function(){
#q1<-(f4/f1)
for(u in 1:2){
q1=(f4.obj/f1.obj)
q1=1
count1 <- 0
if(u<2){
ratio=0
}
if(u>1){
ratio=(sum(V1.1*M8*M9)+sum(M6*M12)-(420000000*per))/(420000000*per)
}
if(u<2){
maks.q1=f4.obj-(q1*f1.obj*(1+ratio))
maks.q1.sol<-sum(maks.q1)
while(maks.q1.sol<0){
types<- c(rep("C",30))
solution1<-Rglpk_solve_LP(obj=maks.q1,mat=f_con,dir=f_dir,rhs=f_rhs,types=types,max=TRUE)
Vsol<-matrix((solution1$solution))
V1.1<-matrix(rep(0,30),nrow=5,ncol=6)
for(i in 1:5){
for(j in 1:6){
t1=(i-1)*6+j
V1.1[i,j]=Vsol[t1,1]
}
}
}
V1.1
q1=(q1-0.0001)
count1=count1+1
maks.q1=f4.obj-(q1*f1.obj*(1+ratio))
maks.q1.sol<-sum(maks.q1)
}
}
if(u>1){
maks.q1=f4.obj-(q1*f1.obj*(1+ratio))
maks.q1.sol<-sum(maks.q1)
while(maks.q1.sol<0){
types<- c(rep("C",30))
solution1<-Rglpk_solve_LP(obj=maks.q1,mat=f_con,dir=f_dir,rhs=f_rhs,types=types,max=TRUE)
Vsol<-matrix((solution1$solution))
V1.1<-matrix(rep(0,30),nrow=5,ncol=6)
for(i in 1:5){
for(j in 1:6){
t1=(i-1)*6+j
V1.1[i,j]=Vsol[t1,1]
}
}
}
V1.1
q1=(q1-0.0001)
count1=count1+1
maks.q1=f4.obj-(q1*f1.obj*(1+ratio))
maks.q1.sol<-sum(maks.q1)
}
}

# (7) *** FINAL SOLUTION *** #
#fin.sol <- function(){

```

```

fin.obj=2*(f3.obj+f4.obj)-(q1+q2)*f1.obj-(q3+q4)*f2.obj
types<- c(rep("C",30))
solution.fin<-Rglpk_solve_LP(obj=fin.obj,mat=f_con,dir=f_dir,rhs=f_rhs,types=types,max=TRUE)
#print(Rglpk_solve_LP)
Vsol<-matrix((solution.fin$solution))
V1.fin<-matrix(rep(0,30),nrow=5,ncol=6)
for(i in 1:5){
  for(j in 1:6){
    t1=(i-1)*6+j
    V1.fin[i,j]=Vsol[t1,1]
  }
}
V
1.fin
#}
C1.fin<-V1.fin*M8*M9
uretim <- ((C1.fin[1,1]+C1.fin[1,2]+C1.fin[1,3]+C1.fin[1,4]+C1.fin[1,5]+C1.fin[1,6]))+
((C1.fin[2,1]+C1.fin[2,2]+C1.fin[2,3]+C1.fin[2,4]+C1.fin[2,5]+C1.fin[2,6]))+
((C1.fin[3,1]+C1.fin[3,2]+C1.fin[3,3]+C1.fin[3,4]+C1.fin[3,5]+C1.fin[3,6]))+
((C1.fin[4,1]+C1.fin[4,2]+C1.fin[4,3]+C1.fin[4,4]+C1.fin[4,5]+C1.fin[4,6]))+
((C1.fin[5,1]+C1.fin[5,2]+C1.fin[5,3]+C1.fin[5,4]+C1.fin[5,5]+C1.fin[5,6]))+
((M6[1,1]*M12[1,1])+(M6[2,1]*M12[2,1])+(M6[3,1]*M12[3,1])+(M6[4,1]*M12[4,1])+(M6[5,1]*M12[5,1]))
hedef<-((424000000)*per)
fark=hedef-uretim
fark

```


EK B: Türkiye Enerji Denge Tablosu

Çizelge B.1: 2016 yılı ulusal enerji denge tablosu

2016 YILI ULUSAL ENERJİ DENGE TABLOSU (15.11.2017)																
(Bin Ton Eşdeğer Petrol)																
ENERJİ ARZ DAĞILIMI	Taş Kömürü	Linyit	Asfaltit	Kok	Türetilmiş Gazlar ¹	Kömür Katranı	Ham Petrol	Petrol Ürünleri ²	Doğalgaz ³	Biyoenerji ve Atıklar	Hidrolik	Rüzgar	Elektrik	Jeo.İsı ve Diğer Isı	Güneş	TOPLAM
Yerli Üretim (+)	722	14,013	725				2,702		303	2,843	5,782	1,334		6,034	917	35,374
İthalat (+)	23,178			381			26,205	24,568	38,240				544			113,117
İhracat (-)	36	0		3		117		6,411	557				125			7,250
İhrakiye (-)								4,478								4,478
Stok Değişimi (+/-)	-267	-457	52	150		16	-198	-183	352							-534
ENERJİ ÜRÜNLERİ ARZI	23,597	13,556	778	527	0	-101	28,709	13,495	38,338	2,843	5,782	1,334	420	6,034	917	136,229
-İstatistiksel Fark (+/-)-	104	145	0	-64	1	0	0	-3	57	0	0	0	2	0	0	
ÇEVİRİM VE ENERJİ SEKTÖRÜ	-14,834	-10,414	-661	2,734	436	121	-28,709	27,270	-16,407	-362	-5,782	-1,334	19,313	-2,934	-90	-31,653
Elektrik Üretimi	-10,429	-10,138	-661		-830			-611	-14,841	-330	-5,782	-1,334	23,599	-4,143	-90	-25,591
Isı Üretimi	-204	-213			-47			-212	-796	-32				1,504		0
Kok Fırınları	-4,029			2,734	763	121										-411
Yüksek Fırınlar					1,420											1,420
Petrol Rafinerileri							-28,556	30,703	-538				-153	-295		1,160
İç Tüketim ve Kayıp	-171	-64			-870		-153	-2,610	-231				-4,133			-8,231
TOPLAM NİHAİ ENERJİ TÜKETİMİ	8,763	3,141	116	3,261	436	21	0	40,765	21,932	2,480	0	0	19,733	3,100	827	104,576
SEKTÖRLER TOPLAMI	8,659	2,996	116	3,325	436	21	0	40,768	21,875	2,480	0	0	19,731	3,099	827	104,332
SANAYİ TÜKETİMİ	4,108	1,584	60	3,306	436	21	0	4,408	8,674	0	0	0	9,171	1,209	288	33,264
Madencilik Faaliyetleri(07,08,09)	0	31						282	91				195			599
Gıda,İçecek,Tütün Ürünleri İmalatı(10,11,12)	153	344		43				89	1,024				629	337		2,620
Tekstil, Deri Ürünleri İmalatı(13,14,15)	108	594						9	905				1,539	68		3,223
Tekstil Ürünleri İmalatı(13)	84	548						8	809				1,265			2,715
Giyim Eşyalarının İmalatı(14)	24	46						0	74				232			375
Deri ve İlgili Ürünlerinin İmalatı(15)	0	0							22				42			65

Çizelge B.1: 2016 yılı ulusal enerji denge tablosu (devamı)

Ağaç ve Ürünleri İmalatı(16)	7	12						12	165				126	34		355
Kağıt ve Ürünlerinin İmalatı(17,18)	32	77						27	226				356	199		917
Kimya,PetroKimya Ürünlerinin İmalatı(20,21,22)	278	131		1				8	1,895				1,342	307		3,963
Metalik Olmayan Mineral Ürünleri İmalatı(23)	2,675	354	60	13	3			3,765	1,544				1,643	52		10,108
Ana Metal Sanayi(24,25)	847	29		3,249	433	21		22	1,629				2,238	182		8,650
Makine,Elektrik,Elektronik Ürünleri İmalatı(26,27,28)		6						4	52				191	10		263
Ulaşım Araçları İmalatı(29,30)		2						35	148				235	5		425
Mobilya ve Diğer İmalatlar(31,32)									23				10			33
İnşaat(41,42,43)		1						138	452				254			845
Diğer Sanayi	8	1						17	520				414	17	288	1,264
ULAŞTIRMA	0	0	0	0	0	0	0	26,269	327	116	0	0	42	0	0	26,755
Demiryolları								109					19			128
Denizyolları								48								48
Havayolları								1,430								1,430
Boru Hatları									260				24			284
Karayolları								24,682	67	116						24,866
DİĞER SEKTÖRLER	4,551	1,412	56	19	0	0	0	3,748	12,228	2,363	0	0	10,518	1,890	539	37,325
Konut	1,018	1,076	56					252	9,587	2,363			4,407	352	539	19,649
Ticaret ve Hizmetler	3,533	337		19				690	2,556				5,531	958		13,625
Tarım ve Hayvancılık								2,806	85				580	580		4,051
ENERJİ DIŞI TÜKETİM	0	0	0	0	0	0	0	6,343	646	0	0	0	0	0	0	6,989
Petro Kimya Feedstock								2,093								2,093
ENERJİ TÜKETİMİNE ESAS ARZ	23,597	13,556	778	527	0	-101	28,709	7,152	37,693	2,843	5,782	1,334	420	6,034	917	129,240

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Berker Bayazit

Doğum Tarihi ve Yeri: 27.04.1991

E-posta : berkerbayazit@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Müh. Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017 Ağustos ayından beri Çalık Enerji'de Güneş Enerjisi Proje Mühendisi
- 2014-2017 yılları arasında Eko Yenilenebilir Enerjiler şirketin rüzgar ve güneş enerjisi alanında proje mühendisi ve proje yöneticisi.
- 2011-2013 yılları arasında İTÜ Güneş Arabası Ekibi Proje Yürütücülüğü.