

T.C
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI

ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE TAHMİN MODELLERİNİN MODERN YÖNTEMLER İLE
DEĞERLENDİRİLMESİ

Doktora Tezi

Fahrettin FİLİZ

Ankara-2023

T.C
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI

ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE TAHMİN MODELLERİNİN MODERN YÖNTEMLER İLE
DEĞERLENDİRİLMESİ

Doktora Tezi

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ

Ankara-2023

T.C
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI

ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE TAHMİN MODELLERİNİN MODERN YÖNTEMLER İLE
DEĞERLENDİRİLMESİ

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ

Tez Jürisi Üyeleri

Adı ve Soyadı

İmzası

- 1- Prof. Dr. Hasan ŞAHİN
- 2- Prof. Dr. Güven SAYILGAN
- 3- Prof. Dr. Güray KÜÇÜKKOÇAOĞLU
- 4- Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ
- 5- Doç. Dr. Özge SEZGİN ALP

Tez Savunması Tarihi: 04 Ocak 2023

TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ'NE

Bu belge ile, bu tezdeki bütün bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak toplanıp sunulduğunu beyan ederim. Bu kural ve ilkelerin gereği olarak, çalışmada bana ait olmayan tüm veri, düşünce ve sonuçları andığımı ve kaynağını gösterdiğimi ayrıca beyan ederim.

04/01/2023

Fahrettin FİLİZ



TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca beni yönlendiren ve sürekli destekleyen değerli hocam

Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ 'e, çalışmalarımda bana destek veren aileme

Teşekkürler...



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	III
TABLolar DİZİNİ	VII
KISALTMALAR	IX
GİRİŞ	1
BİRİNCİ BÖLÜM	2
1. TEMEL KAVRAMLAR.....	2
1.1 ELEKTRİK SEKTÖRÜNÜN GELİŞİMİ.....	2
1.2 TÜRKİYE ELEKTRİK SEKTÖRÜ.....	17
1.3 ULUSLARARASI İKLİM ANTLAŞMALARI VE TÜRKİYE.....	20
İKİNCİ BÖLÜM	27
2. ENERJİ ÜRETİM MODELLERİNİN İNCELENMESİ	27
2.1 LEAP MODELİ VE SENARYO YAKLAŞIMI.....	27
2.2. DERİN ÖĞRENME TAHMİN MODELLERİ.....	32
2.3. OPTİMAL ENERJİ ÜRETİM KARİŞİMİ	48
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	53
3. TÜRKİYE İÇİN UZUN DÖNEMLİ ELEKTRİK ÜRETİM SENARYO VE TAHMİN UYGULAMALARI.....	53
3.1. AMAÇLAR, VERİ, SINIRLILIKLAR VE YÖNTEM	53
3.1.1. Amaçlar.....	53
3.1.2. Veri	54
3.1.3. Sınırlılıklar	60
3.1.4. Yöntem ve Model	61
3.2. TÜRKİYE ELEKTRİK SEKTÖRÜNDE ÜRETİM SENARYOLARININ İNCELENMESİ	63
3.2.1. LEAP Modelleri için Senaryoların Oluşturulması.....	63
3.2.1.1 Olağan İş Senaryosu	63
3.2.1.2 Yenilenebilir Enerji Senaryosu.....	65
3.2.1.3 Yenilenebilir ve Nükleer Enerji Senaryosu.....	68
3.2.2. Elektrik Üretim Tahmin Modelleri ve Optimal Enerji Karışımı.....	71
3.2.2.1 Rüzgâr Enerjisi ile Elektrik Üretimi Tahmini.....	71

3.2.4.2 Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretimi Tahmini.....	78
3.2.2.3 Hidrolik ile Elektrik Üretimi Tahmini.....	84
3.2.2.4 Linyit ile Elektrik Üretimi Tahmini	90
3.2.2.5 Biyokütle ile Elektrik Üretimi Tahmini	95
3.2.2.6 Doğal gaz ile Elektrik Üretim Tahmini.....	100
3.2.2.7 Jeotermal ile Elektrik Üretim Tahmini.....	105
3.2.2.8 Kömür ile Elektrik Üretim Tahmini.....	110
3.2.2.9 Elektrik Arz Tahminlerin Optimal Karışımı ve Değerlendirilmesi	115
3.2.4. <i>Ampirik Uygulama Sonuçlarının Elektrik, İklim ve Ekonomi Bağlamında</i> <i>Değerlendirilmesi</i>	118
GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ	122
KAYNAKÇA.....	127
ÖZET	139
ABSTRACT	140



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

ŞEKİL 1. ENERJİ KAYNAKLARININ SINIFLANDIRILMASI	4
ŞEKİL 2. GLOBAL ÖLÇEKTE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE KÖMÜR KULLANIM ORANI.....	5
ŞEKİL 3. DÜNYA YÜZEY SICAKLIĞI DEĞİŞİMİ.....	13
ŞEKİL 4. TÜRKİYE’NİN 2015 YILINDAKİ ULUSAL KATKI NİYET MEKTUBU	23
ŞEKİL 5. YAPAY ZEKÂ, MAKİNA ÖĞRENMESİ, DERİN ÖĞRENME	34
ŞEKİL 6. DERİN ÖĞRENME SÜRECİNDEKİ TAHMİN AŞAMALARI	36
ŞEKİL 7. LSTM HÜCRESİNİN YAPISI	38
ŞEKİL 8. LSTM KATMANI.....	41
ŞEKİL 9. GRU HÜCRESİNİN YAPISI	42
ŞEKİL 10. GRU KATMANI	44
ŞEKİL 11. DERİN ÖĞRENME MODELLERİNİN KATMANLARI	46
ŞEKİL 12. DÜNYA’DA VE TÜRKİYE’DE ELEKTRİK ÜRETİM KARIŞIMI	50
ŞEKİL 13. TÜRKİYE ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN KULLANILAN BİRİNCİL ENERJİ KAYNAKLARININ KORELASYON MATRİSİ	55
ŞEKİL 14. TÜRKİYE 2023-2030 YILLARI ELEKTRİK TALEP PROJEKSİYONU	57
ŞEKİL 15. TÜRKİYE’DE ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN KULLANILAN BİRİNCİL ENERJİ KAYNAKLARININ HİSTOGRAM DİYAGRAMI.....	58
ŞEKİL 16. TÜRKİYE’DE ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN KULLANILAN BİRİNCİL ENERJİ KAYNAKLARININ KUTU GRAFİĞİ	59
ŞEKİL 17. SENARYO, TAHMİN VE OPTİMİZASYON METODOLOJİSİ.....	62
ŞEKİL 18. OLAĞAN İŞ SENARYOSUNA GÖRE TÜRKİYE’NİN 2023-2030 YILLARINA DAİR ELEKTRİK ÜRETİM KARIŞIM TAHMİNİ.....	64
ŞEKİL 19. OLAĞAN İŞ SENARYOSUNA GÖRE TÜRKİYE’NİN CO2 EMİSYON TAHMİNİ.....	65
ŞEKİL 20. YENİLENEBİLİR ENERJİ SENARYOSUNA GÖRE TÜRKİYE’NİN 2023-2030 YILLARINA DAİR ELEKTRİK ÜRETİM KARIŞIM TAHMİNİ.....	67
ŞEKİL 21. YENİLENEBİLİR ENERJİ SENARYOSUNA GÖRE TÜRKİYE’NİN CO2 EMİSYON TAHMİNİ	67
ŞEKİL 22. YENİLENEBİLİR VE NÜKLEER ENERJİ SENARYOSUNA GÖRE 2023-2030 YILLARINA DAİR ELEKTRİK ÜRETİM KARIŞIM TAHMİNİ.....	69
ŞEKİL 23. YENİLENEBİLİR VE NÜKLEER ENERJİ SENARYOSUNA GÖRE CO2 EMİSYON TAHMİNİ	69
ŞEKİL 24. SENARYO TEMELİ CO2 EMİSYON TAHMİNİ KİYASLAMASI	70
ŞEKİL 25. RÜZGÂR ENERJİSİ POTANSİYELİ ATLASI.....	72
ŞEKİL 26. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA RÜZGÂR ENERJİSİ İLE HAFTALIK ELEKTRİK ÜRETİMİ.....	72

ŞEKİL 27. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA RÜZGÂR ENERJİSİ İLE AYLIK ELEKTRİK ÜRETİMİ HİSTOGRAM DAĞILIMI VE KUTU GRAFİĞİ	74
ŞEKİL 28. RÜZGÂR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİNİN TEST SONUCU	75
ŞEKİL 29. RÜZGÂR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİNİN ÜRETİM TAHMİNİ	76
ŞEKİL 30. RÜZGÂR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİNİN TEST SONUCU	76
ŞEKİL 31. RÜZGÂR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİNİN ÜRETİM TAHMİNİ	77
ŞEKİL 32. GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ ATLASI	79
ŞEKİL 33. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA GÜNEŞ ENERJİSİ İLE HAFTALIK ELEKTRİK ÜRETİMİ	79
ŞEKİL 34. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA GÜNEŞ ENERJİSİ İLE AYLIK ELEKTRİK ÜRETİMİ HİSTOGRAM DAĞILIMI VE KUTU GRAFİĞİ	81
ŞEKİL 35. GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİNİN TEST SONUCU	82
ŞEKİL 36. GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİNİN TAHMİNİ	83
ŞEKİL 37. GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİNİN TEST SONUCU	83
ŞEKİL 38. GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİ ÜRETİM TAHMİNİ	84
ŞEKİL 39. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA HAFTALIK HİDROELEKTRİK ÜRETİMİ	86
ŞEKİL 40. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA AYLIK HİDROELEKTRİK ÜRETİMİ HİSTOGRAM DAĞILIMI VE KUTU GRAFİĞİ.....	87
ŞEKİL 41. HİDROELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİ TEST SONUCU	88
ŞEKİL 42. HİDROELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİNİN TAHMİNİ	89
ŞEKİL 43. HİDROELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİNİN TEST SONUCU	89
ŞEKİL 44. HİDROELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİNİN ÜRETİM TAHMİNİ.....	90
ŞEKİL 45. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA LİNYİT İLE HAFTALIK ELEKTRİK ÜRETİMİ.....	91
ŞEKİL 46. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA LİNYİT İLE AYLIK ELEKTRİK ÜRETİMİ HİSTOGRAM DAĞILIMI VE KUTU GRAFİĞİ.....	92
ŞEKİL 47. LİNYİT İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİ TEST SONUCU	93
ŞEKİL 48. LİNYİT İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİNİN TAHMİNİ	93
ŞEKİL 49. LİNYİT İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİNİN TEST SONUCU	94
ŞEKİL 50. LİNYİT İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİ ÜRETİM TAHMİNİ.....	94
ŞEKİL 51. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA BİYOKÜTLE İLE HAFTALIK ELEKTRİK ÜRETİMİ.....	96

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

Sayfa No

ŞEKİL 52. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA BİYOKÜTLE İLE AYLIK ELEKTRİK ÜRETİMİ HİSTOGRAM DAĞILIMI VE KUTU GRAFİĞİ.....	97
ŞEKİL 53. BİYOKÜTLE İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİ TEST SONUCU	98
ŞEKİL 54. BİYOKÜTLE İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİNİN TAHMİNİ.....	98
ŞEKİL 55. BİYOKÜTLE İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİNİN TEST SONUCU	99
ŞEKİL 56. BİYOKÜTLE İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİ ÜRETİM TAHMİNİ.....	99
ŞEKİL 57. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA DOĞAL GAZ İLE HAFTALIK ELEKTRİK ÜRETİMİ.....	101
ŞEKİL 58. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA DOĞAL GAZ İLE AYLIK ELEKTRİK ÜRETİMİ HİSTOGRAM DAĞILIMI VE KUTU GRAFİĞİ.....	102
ŞEKİL 59. DOĞAL GAZ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİ TEST SONUCU	103
ŞEKİL 60. DOĞAL GAZ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİNİN TAHMİNİ	103
ŞEKİL 61. DOĞAL GAZ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİNİN TEST SONUCU.....	104
ŞEKİL 62. DOĞAL GAZ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİ ÜRETİM TAHMİNİ	104
ŞEKİL 63. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA JEOTERMAL İLE HAFTALIK ELEKTRİK ÜRETİMİ.....	105
ŞEKİL 64. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA JEOTERMAL İLE AYLIK ELEKTRİK ÜRETİMİ HİSTOGRAM DAĞILIMI VE KUTU GRAFİĞİ.....	107
ŞEKİL 65. JEOTERMAL İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİ TEST SONUCU.....	108
ŞEKİL 66. JEOTERMAL İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİNİN TAHMİNİ	108
ŞEKİL 67. JEOTERMAL İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİNİN TEST SONUCU	109
ŞEKİL 68. JEOTERMAL İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİ ÜRETİM TAHMİNİ	109
ŞEKİL 69. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA KÖMÜR İLE HAFTALIK ELEKTRİK ÜRETİMİ.....	111
ŞEKİL 70. 2017 OCAK-2022 HAZİRAN AYLARI ARASINDA KÖMÜR İLE AYLIK ELEKTRİK ÜRETİMİ HİSTOGRAM DAĞILIMI VE KUTU GRAFİĞİ.....	112
ŞEKİL 71. KÖMÜR İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİ TEST SONUCU	113
ŞEKİL 72. KÖMÜR İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM MODELİNİN TAHMİNİ.....	113
ŞEKİL 73. KÖMÜR İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİNİN TEST SONUCU	114
ŞEKİL 74. KÖMÜR İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GRU MODELİ ÜRETİM TAHMİNİ.....	114
ŞEKİL 75. TÜRKİYE'NİN OPTİMUM ELEKTRİK ÜRETİM KARIŞIM TAHMİNİ SONUCUNDA HAFTALIK CO2 EMİSYON SALINIM TAHMİNİ	118
ŞEKİL 76. MÜHENDİSLİK, EKONOMİ VE SOSYAL BİLİMLER AÇISINDAN ÇALIŞMANIN DEĞERLENDİRİLMESİ	120



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

TABLO 1. OLAĞAN POLİTİKA SENARYOSUNA GÖRE ELEKTRİK ÜRETİMİNDEKİ BİRİNCİL ENERJİ KAYNAKLARININ GLOBAL PROJEKSİYONLARI.....	7
TABLO 2. SÜRDÜRÜLEBİLİR POLİTİKA SENARYOSUNA GÖRE ELEKTRİK ÜRETİMİNDEKİ BİRİNCİL ENERJİ KAYNAKLARININ GLOBAL PROJEKSİYONLARI.....	8
TABLO 3. OLAĞAN POLİTİKA SENARYOSUNA GÖRE GLOBAL ÖLÇEKTE ELEKTRİK ÜRETİM MİKTARLARI.....	9
TABLO 4. SÜRDÜRÜLEBİLİR POLİTİKA SENARYOSUNA GÖRE GLOBAL ÖLÇEKTE ELEKTRİK ÜRETİM MİKTARLARI.....	10
TABLO 5. OLAĞAN POLİTİKA SENARYOSUNA GÖRE GLOBAL ÖLÇEKTE CO ₂ EMİSYON SALINIM PROJEKSİYONLARI.....	11
TABLO 6. SÜRDÜRÜLEBİLİR POLİTİKA SENARYOSUNA GÖRE GLOBAL ÖLÇEKTE CO ₂ EMİSYON SALINIM PROJEKSİYONLARI.....	12
TABLO 7. OLAĞAN POLİTİKA SENARYOSUNA GÖRE ELEKTRİK ÜRETİMİNDEKİ BİRİNCİL ENERJİ KAYNAKLARININ AVRUPA BİRLİĞİ PROJEKSİYONLARI.....	14
TABLO 8. SÜRDÜRÜLEBİLİR POLİTİKA SENARYOSUNA GÖRE ELEKTRİK ÜRETİMİNDEKİ BİRİNCİL ENERJİ KAYNAKLARININ AVRUPA BİRLİĞİ PROJEKSİYONLARI.....	15
TABLO 9. OLAĞAN POLİTİKA SENARYOSUNA GÖRE AVRUPA BİRLİĞİ ÖLÇEĞİNDE CO ₂ EMİSYON SALINIM PROJEKSİYONLARI.....	15
TABLO 10. SÜRDÜRÜLEBİLİR POLİTİKA SENARYOSUNA GÖRE AVRUPA BİRLİĞİ ÖLÇEĞİNDE CO ₂ EMİSYON SALINIM PROJEKSİYONLARI.....	16
TABLO 11. 2021 VE 2020 YILLARINDAKİ TÜRKİYE’NİN TOPLAM KURULU GÜÇ VE TOPLAM ÜRETİM MİKTARI.....	18
TABLO 12. RÜZGÂR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM VE GRU MODELLERİNİN TAHMİN PERFORMANS DEĞERLERİ.....	77
TABLO 13. GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM VE GRU MODELLERİNİN TAHMİN PERFORMANS DEĞERLERİ.....	84
TABLO 14. HİDROELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM VE GRU MODELLERİNİN TAHMİN PERFORMANS DEĞERLERİ.....	90
TABLO 15. LİNYİT İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM VE GRU MODELLERİNİN TAHMİN PERFORMANS DEĞERLERİ.....	95
TABLO 16. BİYOKÜTLE İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM VE GRU MODELLERİNİN TAHMİN PERFORMANS DEĞERLERİ.....	100
TABLO 17. DOĞAL GAZ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM VE GRU MODELLERİNİN TAHMİN PERFORMANS DEĞERLERİ.....	104

TABLO 18. JEOTERMAL İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM VE GRU MODELLERİNİN
TAHMİN PERFORMANS DEĞERLERİ..... 109

TABLO 19. KÖMÜR İLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE LSTM VE GRU MODELLERİNİN
TAHMİN PERFORMANS DEĞERLERİ..... 115



KISALTMALAR

AB	Avrupa Birliği
BMİDÇS	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
CCPI	İklim Değişikliği Performans İndeksi
COP	Taraflar Konferansı (Conference of Parties)
CSP	Konsantre Termal Güneş Enerjisi Santralleri
ECF	Avrupa İklim Vakfı (European Climate Foundation)
EPIAŞ	Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi
EÜAŞ	Elektrik Üretim Anonim Şirketi
PV	Fotovoltaik
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
GRU	Kapı Özyinelemeli Geçitler (Gated Recurrent Unit)
GW	Gigawatt
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
INDC	Ulusal Katkı Niyet Beyanı
NDC	Ulusal Katkı Beyanı
IPCC	Hükûmetler Arası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
IPM	İstanbul Politikalar Merkezi
LEAP	Düşük Emisyon Analiz Platformu (Low Emissions Analysis Platform)
LSTM	Uzun-Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory)
REPA	Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası
RNN	Yinelemeli Sinir Ağı (Recurrent Neural Network)
TEAŞ	Türkiye Elektrik Anonim Şirketi
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TETAŞ	Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi
TWh	Terawatt Saat
Mt	Milyon Ton
MW	Megawatt
MWh	Megawatt saat

GİRİŞ

Dört milyar beş yüz milyon yıl yaşındaki dünyanın oluşumundan itibaren küresel iklimde önemli değişiklikler olmuştur. Güneş ışınlarının bir kısmı Dünya'nın üzerine düştükten sonra uzaya geri yansır. Atmosferdeki sera gazları, yeryüzünden yansıyan güneş ışınlarının bir kısmını tutarak yeryüzüne tekrar yansıtır. Sera gazları; insanlar, hayvanlar ve bitkilerin hayatını sürdürmesi için gerekli olan ısı düzeyinin korunmasını sağlar. Sanayi devriminden itibaren sera gazlarının atmosferde aşırı birikmesi sonucunda ortaya çıkan iklim değişikliği ve çevrenin bozulması dünya için varoluşsal bir tehdittir.

İnsan uygarlığı, Dünya'nın kendisini yenilemesinden daha hızlı bir şekilde Dünya kaynaklarını sömürmektedir. 2022 yılı için Dünya limit aşım günü 28 Temmuz olarak belirlenmiştir. İnsanlar, Dünya'nın bir yıl içinde kendini yenileyerek ürettiği kaynakları sadece yedi ay içinde tüketmektedir.

Sera gazlarının artışıdaki başlıca sebepler arasında fosil yakıtların kullanımı, ormansızlaştırma, ulaşım, endüstriyel tarım ve hayvancılık sayılabilir. Ormanların hızla yok edilmesi dünyanın karbon tutma potansiyelini düşürmektedir. Elektrik enerjisi üretimi için kullanılan fosil enerji kaynakları sera gazlarının üretiminde önemli paya sahiptir. Fosil yakıtlar yoğun oranda karbon içermektedir. İklim değişikliği sonucu oluşan olumsuz etkilerin önlenmesi için fosil yakıt kullanımı yerine yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yapılmalıdır. Fosil yakıt kullanımının azaltılması ve tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarına geçilmesi, bilimsel yöntemler ile çalışılmalı ve kararlı şekilde geçiş süreci uygulanmalıdır.

Sera gaz emisyonlarının azaltılması için düşük karbonlu elektrik üretim karışımlarının tercih edilmesi ve verimli enerji kaynak yönetiminin yapılması gerekir. Bu tez çalışmasında, iklim etkileri gözetilerek elektrik üretim karışımları için senaryolar oluşturulmuştur. Senaryolar, uluslararası bir model olan LEAP yaklaşımı çerçevesinde değerlendirilmiştir. Senaryo temelli çalışmanın dışında, derin öğrenme tahmin yaklaşımları oluşturulmuş ve optimizasyon modeli çalışılmıştır. Ekonomik kalkınma, çevresel etkiler ve sosyal boyutlar açısından elektrik üretim karışımı değerlendirilmiştir. Türkiye'nin minimum karbondioksit emisyonu üretecek elektrik üretim karışımına geçişin etkileri tartışılmıştır.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. Temel Kavramlar

1.1 Elektrik Sektörünün Gelişimi

1831 yılında Michael Faraday, değişen manyetik alanın elektrik akımına sebep olduğunu keşfetti. Manyetik alan dışarıdan uygulanan kinetik enerji ile değiştirildiğinde elektrik akımı meydana gelir. Kinetik enerji, fosil yakıtlardan elde edilen ısı enerjisinin türbinleri döndürmesi ile elde edilir. Rüzgâr ve hidrolik enerji kaynaklarından kinetik enerji elde edilmesi için rüzgârın hareketi ve suyun hareketinden faydalanır.

Enerji konusu; ekonomi, dış politika ve uluslararası ilişkiler alanlarında çalışılmaktadır. Ekonomik açıdan ticari ürün olarak değerlendirilen enerji, dış politika aracı olarak stratejik ürün olarak değerlendirilmekte ve uluslararası ilişkiler çerçevesinde ise müdahale aracı özelliği taşımaktadır. Ülkelerin ekonomik ve sosyal kalkınması büyük ölçüde enerji planlamasına bağlıdır. Enerjinin etkili kullanımı ve gelecek dönemler için planlanması ülkelerin ekonomik, politik ve uluslararası ilişkiler bağlamında üzerinde önemle durduğu konulardandır.

Enerji sistemleri mühendislik, ekonomi ve sosyal bilimler çerçevesinde incelenmektedir. Mühendislik alanında elektrik üretim ve tüketimin gerçek zamana yakın şekilde eşitlenmesi gerektiği önemlidir. Ekonomik çerçevede, elektrik üretim santrallerinin ve enerji şebekelerinin kısa ve orta vadede planlanmasında belirsizliklerin artışı belirtilmiştir. Sosyal bilimler açısından, insan davranışlarındaki belirsizliklere, ülkelerin siyasi ve ekonomik durumlarına paralel olarak elektrik üretim miktarı oldukça değişkendir (Pfenninger vd., 2014).

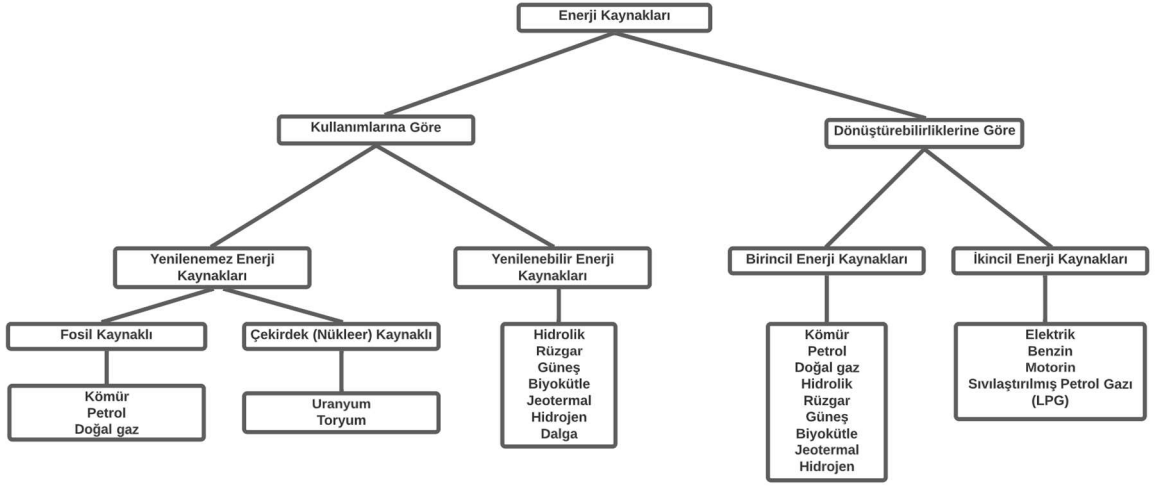
Enerji kaynaklarına sahip olma ülkelerin en önemli dış politika konusudur. Tarihte savaşların ve antlaşmaların ana sebepleri enerji kaynaklarının paylaşımı üzerine olmuştur. Bu duruma, Almanya ile Fransa arasındaki Alsas-Loren sorunu örnek verilebilir. Alsas-Loren zengin demir ve kömür yataklarına sahip olduğundan 1. ve 2. Dünya Savaşı'nda iki ülke arasında sürekli ele geçirilmeye çalışılan bir bölge olmuştur. Avrupa Birliği'nin temelleri yine enerji üzerine kurgulanmıştır. Belçika, Federal Almanya, Lüksemburg, Fransa, İtalya ve Hollanda 1951 yılında Avrupa Kömür ve Çelik Topluluğu'nu kurmuştur. Bu antlaşmadan sonra ekonomik,

gümrük ve nükleer enerji antlaşmaları yapılmış olup 1993 yılında Maastricht Antlaşması ile Avrupa Birliği kurulmuştur. Barışların ve savaşların arka planında enerjiye erişim konusu bulunmaktadır.

Enerji kaynakları kullanışlarına göre yenilenebilir ve yenilenemez kaynaklar olmak üzere ikiye ayrılır. Kömür, petrol ve doğal gaz fosil kaynaklı olup yenilenemez enerji kaynaklarındandır. Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, hidrolik enerji, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, hidrojen ve dalga enerjileridir.

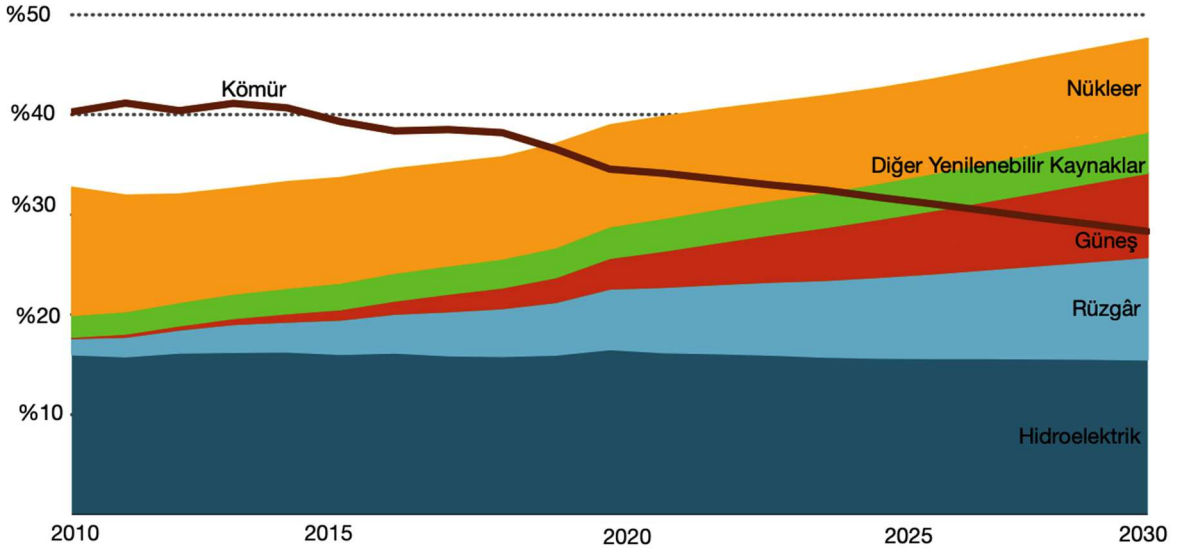
Enerji kaynakları dönüştürülebilirliklerine göre incelendiğinde birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak sınıflandırılmaktadır. Birincil enerji kaynakları, herhangi bir değişime uğramadan kullanılan enerji kaynaklarıdır. İkincil enerji kaynakları, birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesi ile elde edilirler. Elektrik, ikincil enerji kaynaklarındandır. Elektrik üretiminde birincil enerji kaynakları olan kömür, petrol, doğal gaz, nükleer, hidrojen, rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyokütle kullanılmaktadır. Şekil 1, enerji kaynaklarının kullanımlarına ve dönüştürülebilirliklerine göre sınıflandırılmalarını göstermektedir.

Global ölçekte enerji kaynaklarının dağılımı incelendiğinde; kömür, petrol ve doğal gaz kullanılarak üretilen elektrik miktarlarının oranları 2020 yılında sırası ile %8,1, %38,9, %16,7 ve %19,7 olduğu görülmektedir. 2030 yılında bu oranların, kömürde %6,7, petrolde %32, doğal gazda %17,9, elektrikte %25 olacağı öngörülmektedir. 2050 yılında ise kömürde %2, petrolde %1, doğal gazda %10 ve elektrikte %52,2 olacağı tahmin edilmektedir. Elektriğin, 2050 yılında en çok kullanılacak ikincil enerji kaynağı olacağı değerlendirilmektedir. Elektrik üretiminde kullanılan kaynakların dağılımının planlamasına ve projeksiyonuna erken aşamada başlamak, ülkelerin gelecek enerji yatırımlarının optimize edilmesine ve planlamasına imkân sağlar. Dünyanın 2020 yılında toplam elektrik talebinin 28 bin TWh olduğu ve bunun 2030 yılında 39 bin TWh, 2040 yılında 56 bin TWh, 2050 yılında ise 73 bin TWh olacağı öngörülmektedir (Liu, 2015).



Şekil 1. Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması.

Elektrik üretim karışımları gelişen teknolojiler, enerji güvenliği ve iklim değişikliği parametreleri ile şekillenmektedir. İlk kez 2019 yılında Dünya genelinde nükleer ve yenilenebilir enerji kullanılarak üretilen toplam elektrik miktarı, kömür kullanılarak üretilen elektrik miktarını geçmiştir. Bu yönelimin 2030'a kadar devam edeceği Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından World Energy Outlook 2020 çalışmasında öngörülmektedir. 2030 yılına kadar global olarak elektrik üretiminde nükleer ve hidrolik enerjinin aynı oranda kullanılmaya devam edeceği, rüzgâr ile güneş enerjisinin ise elektrik üretiminde kullanım oranının artacağı değerlendirilmektedir. IEA tarafından yapılan çalışma neticesinde, 2010 ile 2030 yılları arasındaki kömür, nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarının değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir. Kömür ile elektrik üretim oranının 2010 yılında %40 seviyesinde iken 2030 yılında %20 seviyesine gerileyeceği öngörülmektedir. Nükleer ve yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen toplam elektrik miktarının oranı, 2010 yılında %30 seviyesinde iken 2030 yılında %50 seviyesinde olacağı değerlendirilmiştir (Energy Agency, 2020).



Şekil 2. Global Ölçekte Elektrik Üretiminde Kömür Kullanım Oranı.

2040 yılına kadar elektrik üretiminde en fazla kullanılacak enerji kaynaklarının kömür ve doğal gaz olduğu görülmektedir. Rüzgâr ve güneş enerjisi kaynaklarının kullanımının hızla artmasına rağmen 2030 yılında elektrik üretiminde hala kömürün kullanılmaya devam edileceği belirtilmiştir (Penna, 2019). “Türkiye’nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası” çalışmasında, Türkiye’nin elektrik üretimi için kömürü kullanmayacağı yıl 2035 olarak belirtilmiştir (Şahin vd., 2021).

İklim krizine karsın 2030 ve 2050 yıllarındaki elektrik üretiminde kullanılan birincil enerji kaynakları karışımlarının hangi oranda olması gerektiği literatürde çalışılmaktadır. Sera gazları emisyonları üzerine yapılan çalışmalarda, gelecekteki olası durumları hakkında öngöründe bulunulması iklim probleminin çözümüne önemli katkılar sağlayacaktır. Gelecek ile ilgili öngöründe bulunmak için tahmin modelleri ve senaryolar oluşturmak iki önemli yaklaşımdır.

IEA tarafından yapılan çalışmada, global elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının kapasitelerindeki değişimler ve üretimleri 2030 ve 2040 yılları için senaryolar ile incelenmiştir. Senaryo bazlı analizler, uzun vadeli dönemde elektrik üretim karışımında neler olabileceği konusunda öngörüler vermektedir. IEA’nın 2020 yılında yaptığı çalışmada iki farklı senaryo oluşturulmuştur. Bunlar Olağan Politika ve Sürdürülebilir Politika Senaryolarıdır. Olağan Politika Senaryosu, açıklanan tüm politika niyetlerini ve hedeflerini yansıtmaktadır. Sürdürülebilir Politika Senaryosunda, temiz enerji yatırımlarındaki artış ve Paris Antlaşması ile sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşılması hedeflenmektedir (Energy Agency, 2020).

IEA tarafından 2020 yılında yapılan çalışma sonuçlarına göre, Olağan Politika Senaryosunda 2019, 2030 ve 2040 yıllarındaki birincil enerji kaynaklarının elektrik üretimlerinin kapasite değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Olağan Politika Senaryosuna göre 2030 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretim kapasitelerinin oranı %50 olacağı belirtilmektedir. 2030 yılında, güneş enerjisi ile elektrik üretim kapasitesinin oranının %20 olacağı değerlendirilmektedir. Güneş enerjisi ile elektrik üretiminin yenilenebilir enerji kaynakları arasında ilk sırada yer alacağı öngörülmektedir. Güneş enerjisini, %15 elektrik üretim kapasite oranı ile hidroelektrik, %13 elektrik üretim kapasite oranı ile rüzgâr enerji kaynakları izlemektedir. Kömür ve doğal gaz elektrik üretiminde en çok kullanılan fosil kaynaklardır. 2040 yılına kadarki projeksiyonda, kömür ve doğal gaz enerji kaynaklarının elektrik kapasiteleri düşüş eğilimindedir. Kömür için 2019 yılında elektrik üretim kapasite değeri 2.124 GW olduğu, 2030 yılında 2009 GW’a ve 2040 yılında 1.919 GW’a düşeceği öngörülmektedir. Doğal gaz için 2019 yılında elektrik üretim kapasite değeri, 1.788 GW olduğu, 2030 yılında 2.185 GW’a, 2040 yılında 2.571 GW’a ulaşacağı öngörülmüştür. Doğal gaz elektrik üretim kapasitesi oranları, 2019, 2030 ve 2040 yıllarında sırası ile %24, %21 ve %19 olacağı öngörülmüştür.

Olağan Politika Senaryosuna göre 2040 yılında elektrik üretimi için kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranları artış göstermektedir. 2030 yılında yenilenebilir enerji kapasite oranı toplam elektrik üretim kapasitesinin %50’sine ulaşacaktır. 2040 yılında bu oranın %58 olacağı öngörülmektedir. 2040 yılında, güneş enerjisinin 3.655 GW ile en yüksek kapasite değerine sahip olacağı öngörülmektedir. Güneş enerjisini, fosil kaynaklardan olan doğal gaz 2.571 GW kapasite değeri ile izlemektedir. Nükleer enerji kapasite oranlarında ciddi bir değişim olmamaktadır. Bu durum nükleer enerji santrallerine yatırımın sınırlı olacağını göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasite oranındaki artışlar, nükleer enerji kaynağının kapasite içindeki oranını düşürmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelecekte kömür ve doğal gaz kaynaklarının yerini almanın yanı sıra nükleer enerji kaynağının da yerini alacağı sonucu çıkmaktadır.

Tablo 1. Olağan Politika Senaryosuna Göre Elektrik Üretimindeki Birincil Enerji Kaynaklarının Global Projeksiyonları.

	Elektrik Kapasitesi (GW)			Oranlar		
	2019	2030	2040	2019	2030	2040
Toplam Kapasite	7.484	10.195	13.418	100	100	100
Kömür	2.124	2.009	1.919	28	20	14
Petrol	440	291	239	6	3	3
Doğal Gaz	1.788	2.185	2.571	24	21	19
Nükleer	415	440	479	6	4	4
Yenilenebilir	2.707	5.137	7.738	36	50	58
Hidroelektrik	1.306	1.549	1.771	17	15	13
Biyokütle	153	218	278	2	2	2
Rüzgâr	623	1.299	1.914	8	13	14
Jeotermal	15	29	47	0	0	0
Güneş	603	2019	3655	8	20	27

IEA tarafından değerlendirilen ikinci senaryo Sürdürülebilir Politika Senaryosudur. Tablo 2, Sürdürülebilir Politika Senaryosunda kaynak bazlı 2019, 2030 ve 2040 yıllarındaki öngörülen değişimlerini göstermektedir. Sürdürülebilir Politika Senaryosunda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasite oranları daha hızlı artış göstermektedir. 2030 yılında elektrik üretimi için kullanılacak yenilenebilir enerji kapasite oranı %60, 2040 yılında ise %71 olacağı öngörülmektedir. Güneş enerjisi kapasite oranı, 2030 yılında %27 ve 2040 yılında %36 olacağı öngörülmektedir. Güneş enerjisinin global olarak 2040 yılına kadar temel elektrik üretim kaynağı olacağı sonucu ortaya çıkmaktadır. 2019 yılında %28 olan kömür enerji kaynağının kapasite oranının, 2040 yılında %6'ya kadar düşeceği tahmin edilmektedir. Benzer şekilde, doğal gaz enerji kaynağındaki kapasite oranında da düşüş öngörülmektedir. Doğal gaz için 2019 yılında %24 olan kapasite oranının, 2040 yılında %13'e düşmesi beklenilmektedir.

Tablo 2. Sürdürülebilir Politika Senaryosuna Göre Elektrik Üretimindeki Birincil Enerji Kaynaklarının Global Projeksiyonları.

	Elektrik Kapasitesi (GW)			Oranlar		
	2019	2030	2040	2019	2030	2040
Toplam Kapasite	7.484	11.650	16550	100	100	100
Kömür	2.124	1.603	1.053	28	14	6
Petrol	440	276	229	6	2	1
Doğal Gaz	1.788	2.022	2.121	24	17	13
Nükleer	415	488	599	6	4	4
Yenilenebilir	2.707	7.037	11.764	36	60	71
Hidroelektrik	1.306	1.696	2.029	17	15	12
Biyokütle	153	266	423	2	2	3
Rüzgâr	623	1.846	3.058	8	16	18
Jeotermal	15	45	82	0	0	0
Güneş	603	3.125	5.891	8	27	36

Elektrik üretim kapasitelerindeki artışlar, ilgili enerji kaynağına yapılacak yeni yatırımlar ile gerçekleşecektir. Global olarak kapasite oranlarındaki değişime bakıldığında Olağan Politika Senaryosu ve Sürdürülebilir Politika Senaryosunda yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırımın artacağı, fosil kaynaklara yapılacak yatırımların azalacağı görülmektedir.

Elektrik kaynağının üretim kapasitesi, elektrik üretim miktarını belirler. Elektrik kapasiteleri saatlik olarak belirtilmektedir. Nükleer reaktörlerdeki reaksiyonlar sonucunda oluşan enerji, elektrik türbinlerini çevirmek için kullanılır. Nükleer santrallerdeki elektrik üretim kapasitesi de saatlik olarak belirlenmektedir. Saatlik elektrik üretim, ilgili kaynağın saatlik kapasitesini geçemez. Enerji kaynaklarının kapasite değerlerine paralel olarak Olağan Politika ve Sürdürülebilir Politika Senaryolarında yıllık elektrik üretim miktarları Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir. Üretilen elektrik miktarı, enerji kaynağın üretim kapasitesine göre değiştiği için elektrik üretim projeksiyonları elektrik üretim kapasiteleri ile benzerlik göstermektedir. Dünya genelinde Olağan Politika Senaryosuna göre 2019 yılında 26.942 TWh olan elektrik üretimi, 2030 yılında 32.818 TWh, 2040 yılında 40.094 TWh olacağı öngörülmektedir. 2019 yılına göre 2030 yılındaki elektrik üretiminin %21 artış göstereceği tahmin edilmektedir.

Tablo 3. Olağan Politika Senaryosuna Göre Global Ölçekte Elektrik Üretim Miktarları.

	Elektrik Üretimi (TWh)			Oranlar		
	2019	2030	2040	2019	2030	2040
Toplam Kapasite	26.942	32.818	40.094	100	100	100
Kömür	9.849	9.294	8.984	37	28	22
Petrol	785	560	463	3	2	1
Doğal Gaz	6.317	7.331	8.387	23	22	21
Nükleer	2.789	3.081	3.439	10	9	9
Yenilenebilir	7.167	12.522	18.791	27	38	47
Hidroelektrik	4.305	5.089	5.919	16	16	15
Biyokütle	667	1.055	1.410	2	3	4
Rüzgâr	1.423	3.361	5.441	5	10	14
Jeotermal	92	190	321	0	1	1
Güneş	665	2.764	5.478	2	8	14

Sürdürülebilir Politika Senaryosunda, yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretim miktarı daha yüksektir. Sürdürülebilir Politika Senaryosuna göre elektrik üretim miktarı değişimleri Tablo 4'te verilmiştir. Kömür kullanarak elektrik üretimi 2019 yılında %37 seviyesinde iken 2030 yılında %15 seviyesine düşeceği, 2040 yılında %5 seviyesine düşeceği öngörülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektrik üretimi 2019 yılında %27 seviyesinde iken, 2030 yılında %52 seviyesine, 2040 yılında %72 seviyesine ulaşmaktadır. Nükleer enerjinin üretim oranı ise 2019 %10 seviyesinde iken 2030 ve 2040 yıllarında %11 seviyesinde olacağı öngörülmektedir. Nükleer enerji kaynağı ile elektrik üretim miktarında artış olacağı tahmin edilmektedir.

Tablo 4. Sürdürülebilir Politika Senaryosuna Göre Global Ölçekte Elektrik Üretim Miktarları.

	Elektrik Üretimi (TWh)			Oranlar		
	2019	2030	2040	2019	2030	2040
Toplam Kapasite	26.942	31.465	38.774	100	100	100
Kömür	9.849	4.864	1.951	37	15	5
Petrol	785	326	187	3	1	0
Doğal Gaz	6.317	6.465	4.550	23	21	12
Nükleer	2.789	3.435	4.320	10	11	11
Yenilenebilir	7.167	16.345	27.737	27	52	72
Hidroelektrik	4.305	5.521	6.690	16	18	17
Biyokütle	667	1.282	2.155	2	4	6
Rüzgâr	1.423	4.770	8.680	5	15	22
Jeotermal	92	293	553	0	1	1
Güneş	665	4.315	8.799	2	14	23

Dünya sıcaklığının bitkiler, hayvanlar ve insanlar için yaşanabilir seviyede olması, Dünya'dan yansıyan Güneş ışınlarının bir kısmının atmosferden tekrar geri yansması ile sağlanmaktadır. Sera etkisi olarak da bilinen bu etkinin ana elementlerinden biri atmosferdeki karbondioksit molekülüdür. Sanayi çağındaki gelişmeler ile fosil kaynaklara bağımlılık artmıştır. Karbondioksit emisyonunun temel sebeplerinden biri fosil enerji kaynaklarının kullanılmasıdır. Elektrik üretimi sırasında fosil kaynaklarının yüksek oranda kullanılması, atmosferdeki karbondioksit emisyon miktarındaki artışlara neden olan başlıca sebeplerdendir.

Fosil yakıtların kullanımı sonucu ortaya çıkan sera gazlarının emisyonuna ilişkin herhangi bir kısıtlama olmadığı takdirde, 20 yıl içinde sera gazlarının salınımlarının %30 oranında artacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, fosil yakıtlı enerji santrallerinin bağımlılığının üstesinden gelmek ve fosil yakıtlardan kaynaklanan küresel iklim değişikliğini ve olumsuz çevresel etkileri azaltmak için yenilenebilir enerji politikalarına ilişkin küresel çabalar yürütülmektedir (Nam vd., 2020).

Özcan tarafından yapılan çalışmada, sera gazı emisyonlarını azaltmaya yardımcı olmak için alınması gereken önlemler şöyle sıralanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve teşvik edilmesi, nükleer santrallerin kurulması, fosil yakıtların kullanımının azaltılması, elektrik iletim ve dağıtım

kayıplarının en aza indirilmesi, ısıtma değerleri yüksek fosil yakıtların kullanılması, enerji geri kazanım sistemlerinin verimliliğinin artırılması, karbon yakalama ve depolama sistemlerinin uygulanması, enerji verimliliği önlemlerinin iyileştirilmesi, kamuoyunun bilinçlendirilmesi, yasal düzenlemelerin gözden geçirilmesi ve iyileştirilmesi, enerji talebinin yönetilmesi, fiyatlandırma ve teşvik mekanizmalarının geliştirilmesidir (Özcan, 2016).

Olağan Politika Senaryosunda, elektrik üretimi sonucunda ortaya çıkan karbondioksit emisyon miktarları Tablo 5'te verilmiştir. Olağan Politika Senaryosunda elektrik üretimi sonucunda oluşan karbondioksit emisyon değerleri 2019 yılı için 13.699 Mt iken, 2030 yılında 12.782 Mt, 2040 yılında 12.477 Mt olarak verilmiştir. Elektrik üretiminde artış olmasına rağmen karbondioksit emisyonunda azalmalar görülmektedir. Karbondioksit emisyonundaki azalmalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması ile açıklanabilir.

Tablo 5. Olağan Politika Senaryosuna Göre Global Ölçekte CO₂ Emisyon Salınım Projeksiyonları.

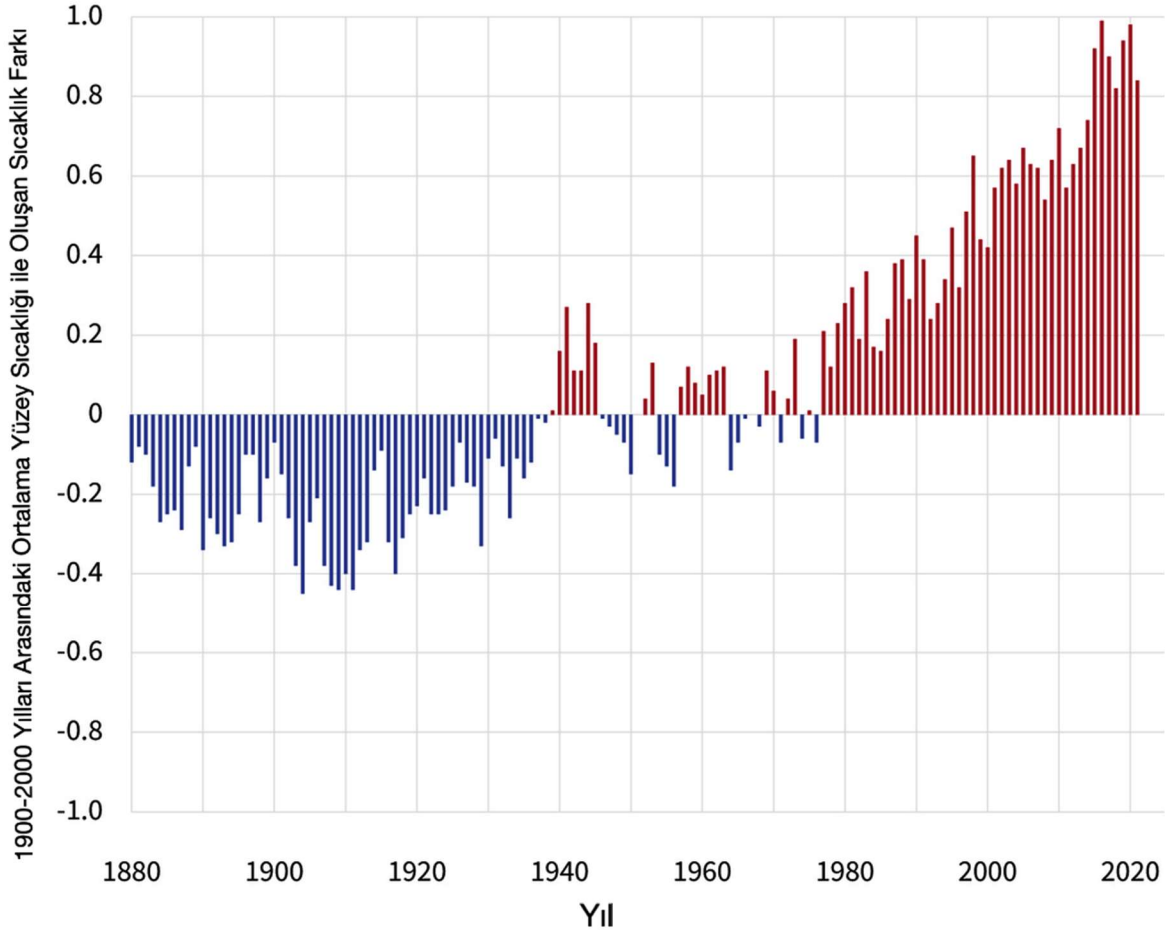
	CO ₂ Emisyonu (Mt)			Oranlar		
	2019	2030	2040	2019	2030	2040
Toplam CO ₂	13.699	12.782	12.477	100	100	100
Kömür	9.914	9.014	8.456	72	71	68
Petrol	648	449	275	5	4	3
Doğal Gaz	3.136	3.318	3.646	23	26	29

Sürdürülebilir Politika Senaryosunda, elektrik üretimi ile ortaya çıkan karbondioksit emisyon değerleri ve oranları Tablo 6'da verilmiştir. Sürdürülebilir politika senaryosu sonucunda ortaya çıkan karbondioksit emisyonları 2019 yılı için 13.699 Mt iken, 2030 yılında 7.786 Mt, 2040 yılında 3.185 Mtdur. Olağan Politika Senaryosuna kıyasla, Sürdürülebilir Politika Senaryosunda karbondioksit emisyonu dörtte bir oranına düşmektedir. Sürdürülebilir politika senaryosundaki karbondioksit emisyonunun azaltımının fazla olması yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasite ve üretim oranlarının fazla olması ile açıklanabilir.

Tablo 6. Sürdürülebilir Politika Senaryosuna Göre Global Ölçekte CO₂ Emisyon Salınım Projeksiyonları.

	CO ₂ Emisyonu (Mt)			Oranlar		
	2019	2030	2040	2019	2030	2040
Toplam CO ₂	13.699	7.786	3.185	100	100	100
Kömür	9.914	4.639	1.254	72	59	39
Petrol	648	293	187	5	4	6
Doğal Gaz	3.136	2.866	1.861	23	37	58

Dünya üzerindeki en yüksek ve en düşük sıcaklıklar arasındaki fark 50°C'den fazla olabilmektedir. Küresel bir ortalama sıcaklığı hesaplanması için, dünyanın dört bir yanındaki konumlarda alınan sıcaklık ölçümlerini kullanılmaktadır. Ortalama sıcaklık değeri küresel sıcaklık değişimi hakkında bilgi vermektedir. Okyanus ve kıtalar için 2022 yılı ortalama sıcaklık değeri 0.80°C olarak hesaplanmıştır. Bu değer 2000 yılı için 0.33°C, 1950 yılı için -0.15°C olarak belirlenmiştir (Climate at a Glance Global Time Series,2022). Yerkürenin 1900 ile 2000 yılları arasındaki ortalama yüzey sıcaklık değeri referans alınarak oluşturulan yüzey sıcaklığındaki değişim Şekil 3'te verilmiştir. Mavi çubuklar ortalamadan daha serin yılları gösterirken kırmızı çubuklar ortalamadan daha sıcak yılları göstermektedir. Ortalama sıcaklığın sürekli artış eğiliminde olduğu görülmektedir.



Kaynak: (Climate Change: Global Temperature, 2022).

Şekil 3. Dünya Yüzey Sıcaklığı Değişimi.

Dünya genelindeki elektrik üretim karışımlarını ve sera gazları emisyonlarını inceledikten sonra Avrupa Birliği çerçevesinde bu değerler incelenmektedir. Türkiye'nin Avrupa Birliği ile yakın ticari ve ekonomik ilişkileri nedeniyle Avrupa Birliği çerçevesinde elektrik üretim ve emisyon senaryolarını 2030 ve 2040 yılları için incelemek faydalı olacaktır. Avrupa Birliği'ni enerji konuları çerçevesinde şekillenmiş bir topluluk olarak tanımlayabiliriz. Enerji, Avrupa Birliği'nin en eski ve önemli politika konularından biridir. Avrupa Birliği'nin kurulum aşaması 1951 tarihinde oluşturulan Avrupa Kömür ve Çelik Topluluğu ile başlamıştır (Demir, 2012). Avrupa Birliği 2050 yılında net sıfır emisyon hedeflerini Avrupa Yeşil Mutabakatı ile 2019 yılında duyurmuştur. Emisyon oranlarını azaltma hatta sıfırlama konusunda en iddialı kıta olmak isteyen Avrupa Birliği bu yolda çalışmalarını ilerletmektedir. Avrupa Birliği, enerji politikalarında dışa bağımlılığı azalmak ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam payını artırmak hedefindedir (Chye ve Han, 2018).

Avrupa Birliği, 2005 ile 2050 arasında sera gaz emisyonlarının yaklaşık yarı yarıya azaltmanın teknik olarak mümkün olacağını göstermektedir (Höglund-

Isaksson vd., 2012). Ekim 2014'te Avrupa Konseyi, 2005 yılına kıyasla 2020 ve 2030 yılları arasındaki dönem için karbondioksit emisyonlarının %43 azaltılmasını kabul etmiştir (Wierzbowski vd., 2016).

IEA tarafından yapılan çalışmada, Olağan Politika Senaryosuna göre Avrupa Birliği enerji kaynaklarının elektrik üretim kapasite değerleri Tablo 7'de verilmektedir. Genel olarak ilgili tablodan kömür ve petrole olan bağımlılığın 2040 yılına kadar %1 oranına gerileyeceği öngörülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasite oranlarını 2030 yılında %69 seviyesine çıkacağı değerlendirilmektedir. Güneş enerjisinin, global projeksiyonda olduğu gibi Avrupa içinde en önemli elektrik üretim kaynağı olacağı öngörülmektedir.

Tablo 7. Olağan Politika Senaryosuna Göre Elektrik Üretimindeki Birincil Enerji Kaynaklarının Avrupa Birliği Projeksiyonları.

	Elektrik Kapasitesi (GW)			Oranlar		
	2019	2030	2040	2019	2030	2040
Toplam Kapasite	960	1.160	1.309	100	100	100
Kömür	146	42	17	15	4	1
Petrol	40	18	11	4	2	1
Doğal Gaz	182	195	214	19	17	16
Nükleer	112	91	82	12	8	6
Yenilenebilir	479	800	921	50	69	70
Hidroelektrik	151	158	164	16	14	13
Biyokütle	40	218	50	4	4	4
Rüzgâr	168	1.299	341	17	25	26
Jeotermal	1	29	2	0	0	0
Güneş	117	2.019	346	8	20	27

Avrupa Birliği'nin Sürdürülebilir Politika Senaryosuna göre, elektrik üretim miktarları Tablo 8'de verilmiştir. Sürdürülebilir politika senaryosuna göre kömür ve petrolün elektrik üretiminde kullanılmasının tamamen sonlandırılmasının 2030 yılı itibariyle gerçekleşebileceği değerlendirilmektedir. Geliştirilen senaryolardan, Avrupa Birliği, fosil yakıtlardan kurtulma konusunda daha kararlı olduğu görülmektedir.

Tablo 8. Sürdürülebilir Politika Senaryosuna Göre Elektrik Üretimindeki Birincil Enerji Kaynaklarının Avrupa Birliği Projeksiyonları.

	Elektrik Kapasitesi (GW)			Oranlar		
	2019	2030	2040	2019	2030	2040
Toplam Kapasite	960	1.325	1.624	100	100	100
Kömür	146	28	9	15	2	1
Petrol	40	16	10	4	1	1
Doğal Gaz	182	196	153	19	15	10
Nükleer	112	99	95	12	7	6
Yenilenebilir	479	952	1.238	50	72	76
Hidroelektrik	151	162	169	16	12	10
Biyokütle	40	54	64	4	4	4
Rüzgâr	168	336	476	17	25	29
Jeotermal	1	1	3	0	0	0
Güneş	117	291	500	12	30	31

Olağan ve Sürdürülebilir Politika Senaryolarına göre elektrik üretimi ve karbondioksit emisyonunun Avrupa Birliği çerçevesindeki yıllara göre değişimi Tablo 9 ve Tablo 10'da verilmiştir. Olağan Politika Senaryosuna göre elektrik üretimi sonucunda ortaya çıkan emisyonunun değerleri, 2019 yılında 1.214 Mt olan Karbondioksit emisyonu, 2030 yılında 674 Mt, 2040 yılında 570 Mt olarak öngörülmektedir.

Tablo 9. Olağan Politika Senaryosuna Göre Avrupa Birliği Ölçeğinde CO₂ Emisyon Salınım Projeksiyonları.

	CO ₂ Emisyonu (Mt)			Oranlar		
	2019	2030	2040	2019	2030	2040
Toplam CO ₂	1.214	674	570	100	100	100
Kömür	780	292	210	64	43	37
Petrol	49	16	11	4	2	2
Doğal Gaz	385	365	350	32	54	61

Sürdürülebilir Politika Senaryosuna göre karbon emisyonu değerlerinin 2019 yılında 1.214 Mt iken, 2030 yılında 429 Mt, 2040 yılında 239 Mt olarak öngörülmektedir.

Tablo 10. Sürdürülebilir Politika Senaryosuna Göre Avrupa Birliği Ölçeğinde CO₂ Emisyon Salınım Projeksiyonları.

	CO ₂ Emisyonu (Mt)			Oranlar		
	2019	2030	2040	2019	2030	2040
Toplam CO ₂	1.214	429	239	100	100	100
Kömür	780	105	30	64	24	13
Petrol	23	14	5	4	3	2
Doğal Gaz	385	310	210	32	72	88

Global ve Avrupa Birliği çerçevesinde birincil enerji kaynaklarının elektrik üretim değerleri ve sera gazları emisyonları değerlendirilmiştir. Benzer senaryo analizlerin, Türkiye özelinde oluşturulması literatüre katkı sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında kullanılan yöntemlerden biri senaryolar oluşturulmasıdır. Senaryolardan faydalanarak, enerji üretim karışımı ve karbondioksit emisyonun salınımı 2030 yılına kadar haftalık tahmin edilmiştir.

İklim Eylemi İzleyicisi, hükümetin iklim eylemini izleyen ve küresel olarak kabul edilen Paris Antlaşması'nın "Isınmayı 2 °C'nin çok altında tutma ve ısınmayı 1,5 °C ile sınırlama çabalarını sürdürme" hedefine karşı ölçen bağımsız bir bilimsel analiz çalışmasıdır. Bu çalışmaya göre, Türkiye Paris Antlaşması hedeflerine ulaşma bakımından kritik açıdan yetersiz olarak değerlendirilmiştir. İklim Eylemi İzleyicisinin derecelendirme kategorileri, kritik açıdan yetersiz, yüksek yetersiz, yetersiz, neredeyse yeterli ve 1.5 hedefi ile uyumlu seklindedir. Kritik açıdan yetersiz notu Türkiye'nin iklim taahhüdünün 4°C'nin üzerindeki ısınmaya denk geldiğini göstermektedir.

İklim Değişikliği Performans İndeksi (CCPI), ulusal ve uluslararası iklim politikalarında şeffaflığı sağlamak için kullanılan bir araçtır. CCPI, küresel sera gazı emisyonlarının %92'sini oluşturan ülkelerin ve AB'nin iklim performansını karşılaştırmak için standartlaştırılmış bir çerçeve sunduğunu belirtmektedir. Sera gazı emisyonunun etkisi %40, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanım etkisi %20, enerji kullanımının etkisi %20 ve iklim politikalarını uygulama durumunun etkisi %20 olacak şekilde hesaplanarak iklim değişikliği performans indeksi oluşturulmuştur. CCPI hesaplamalarında ülkelerin 2030 hedeflerini kullanmaktadır. 2023 yılı indeks verilerine göre Danimarka, İsveç ve Şili indekste ilk üç sıradaki

ülkelerdir. Türkiye ise Çek Cumhuriyeti ve Belarus'un ardından 47. sırada yer almaktadır. Son üç sırada olan 61, 62 ve 63 sıralarında ise Kazakistan, Suudi Arabistan ve İran yer almaktadır (Burck vd., 2022).

1.2 Türkiye Elektrik Sektörü

Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) 1970 yılında kurulmuştur. Türkiye Elektrik Kurumu, 1994 yılında Türkiye Elektrik Anonim Şirketi (TEAŞ) ve Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi (TEDAŞ) olarak ikiye ayrılmıştır. TEAŞ, 2001 yılında üç farklı şirkete bölünmüştür. Üretimden sorumlu Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ), iletimden sorumlu Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) ve toptan ticaretten sorumlu Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi (TETAŞ) kurulmuştur. TETAŞ 2018 yılında EÜAŞ'a devredilmiştir.

Elektrik üretim kaynaklarının çeşitlendirilmesi, herhangi bir birincil enerji kaynağındaki arz sorununa karşı elektrik sistemini daha güvenilir hale getirmektedir. Tek bir enerji kaynağına bağımlı kalmamak enerji güvenliğinin önemli koşullarındandır. Türkiye, elektrik üretiminde kullandığı enerji kaynaklarının çeşitlendirmesinde ilerleme sağlamıştır. Enerji üretiminde dışa bağımlılığının azaltılması ve yerli enerji üretiminin artırılması ile arz güvenliği artırılmaktadır. Enerji ithal eden bir ülke olan Türkiye, üretimindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılması ile fosil yakıtların ithalatını da azaltabilir. Türkiye kömürde %60', petrolde %93 ve doğal gazda %99 oranında dışa bağımlıdır (International Energy Agency, 2021).

Türkiye'de, 2021 yılı Ocak ile Haziran ayında elektrik üretiminin, %30,55'i kömürden, %20,17'si doğal gazdan, %26,16'sı hidrolik enerjisinden, %10,34'ü rüzgârdan, %4,35'si güneşten, %3,47'si jeotermal enerjiden ve %2,73'ü biyokütle enerjisinden elde edilmiştir

Tablo 11'de 2021 ve 2022 yıllarındaki elektrik üretim oranları ve kurulu güç değerleri verilmiştir.

Tablo 11. 2021 Ve 2020 Yıllarında Türkiye'nin Kurulu Güç ve Üretim Miktarı.

KAYNAK TÜRÜ	TOPLAM KURULU GÜÇ* (MW)				TOPLAM ÜRETİM* (MWh)			
	2021 HAZİRAN (MW)	ORAN (%)	2022 HAZİRAN (MW)	ORAN (%)	2021 OCAK- HAZİRAN (MW)	ORAN (%)	2022 OCAK- HAZİRAN (MW)	ORAN (%)
HİDROLİK	31.430,65	32,02	31.558,40	31,09	33.034.100,25	20,74	42.380.277,60	26,16
RÜZGÂR	9.818,68	10,00	10.975,85	10,81	14.084.685,35	8,84	16.745.615,75	10,34
GÜNEŞ	7219,73	7,35	8.479,07	8,35	6.625.957,66	4,16	7.042.509,58	4,35
JEOTERMAL	1.650,17	1,68	1.686,34	1,66	5.486.702,50	3,44	5.623.596,71	3,47
BİYOKÜTLE	1.352,45	1,38	1.780,98	1,75	3.624.190,85	2,28	4.416.246,38	2,73
YENİLENEBİLİR	51.471,68	52,44	54.480,64	53,67	62.855.636,61	39,46	76.208.246,02	47,04
DOĞAL GAZ	26.108,50	26,60	25.675,88	25,29	46.928.817,51	29,46	32.679.091,14	20,17
LİNYİT	10.119,92	10,31	10.142,52	9,99	20.260.579,27	12,72	22.729.123,66	14,03
İTHAL KÖMÜR	8.986,85	9,16	9.713,80	9,57	26.247.674,52	16,48	25.197.557,51	15,55
TAŞ KÖMÜRÜ	810,77	0,83	840,77	0,83	1.591.592,46	1,00	1.563.397,84	0,97
ASFALTİT	405	0,41	405,00	0,40	1.254.442,08	0,79	876.960,48	0,54
FUEL OİL	251,93	0,26	251,93	0,25	135.686,97	0,09	362.901,13	0,22
NAFTA	4,74	0,00	4,74	0,00	0	0,00	0	0,00
LNG	1,95	0,00	1,95	0,00	0	0,00	0	0,00
MOTORİN	1,04	0,00	1,04	0,00	375,0425	0,00	2.384.717,99	1,47
TERMİK TOPLAM	46.690,70	47,56	47.037,62	46,33	96.419.167,85	60,54	85.793.749,74	52,96
TOPLAM	98.162,38	100,00	101.518,25	100,00	159.274.804,46	100,00	162.001.995,77	100,00

Elektrik sistemi, sadece üretim aşamasından oluşmamaktadır. Elektrik üretildikten sonra iletim ve dağıtım aşamaları sonucunda tüketim noktasına ulaşmaktadır. Elektriğin iletim ve dağıtım aşamalarındaki şebeke kayıpları iletim hatlarının uzunluğu, iletim ve dağıtımda kullanılan teknolojilerin modernize olup olmamasına bağlı olarak değişim göstermektedir. Elektriğin iletim ve dağıtım sırasındaki kayıplarının minimize edilmesi yeni bir enerji kaynağı keşfetmek kadar önemlidir. Elektrikte iletim ve dağıtım kayıplarını sıfırlamak teknik olarak mümkün değildir. Elektrik akımı sırasında direnç ile karşılaşmakta ve bu durum ısı ile kayıplara dönüşmektedir.

Beşikçi tarafından yapılan çalışmada elektrik iletim hatlarının modernizasyonun sürdürülebilir bir çevre için öneminden bahsetmiştir. Elektrik iletim hatlarının modernizasyonun yanında sürdürülebilir bir çevre için yenilenebilir enerjilerin tercih edilmesi, enerji tüketiminde verimliliğinin artırılması, üretim ve tüketim için bilimsel metotlar geliştirilerek üretim ve tüketim hesaplarının gerçeğe daha yakınsanmasının sağlanması gerekliliği vurgulanmıştır (Beşikçi, 2019).

Türkiye'nin enerji ve iklim politikasındaki temel zorlukları; artan enerji talebi karşın enerji arzını güvence altına almak, ithal enerji kaynaklarına bağımlılığı azaltmak ve karbondioksit emisyonunu azaltmaktır (Yousefi-Sahzabi vd., 2017).

SHURA enerji dönüşümü merkezi tarafından, "Türkiye Elektrik Sistemine Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Entegrasyonu" raporunda senaryo bazlı çalışma yapılmıştır. SHURA tarafından yapılan çalışmaya göre, Türkiye 2030'da elektrik üretiminin %60 ile %70'ini yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılayabilecektir. SHURA enerji dönüşümü, European Climate Foundation (ECF), Agora Energiewende ve Sabancı Üniversitesi İstanbul Politikalar Merkezi (IPM) tarafından kurulmuştur. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi amacını, bir enerji dönüşüm platformu olarak enerji sektörünün karbonsuzlaşmasına katkıda bulunmak olarak belirtmektedir (SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, 2022).

Kotcioğlu tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'nin ülkenin enerji bağımlılığını ve sera gazlarını azaltmak için yeterli yenilenebilir enerji potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Kotcioğlu, 2011).

Türkiye yenilenebilir enerji payını 2026 yılına kadar toplam üretimin %50'sine çıkarma potansiyeline sahiptir. Bu potansiyelin gerçekleşmesi ile beraber ithal fosil yakıtların üretimdeki payı düşecektir (Saygin vd., 2021). SHURA'nın 2021 yılında yaptığı "Türkiye'de Güç Sistemi Geçişinin Sosyoekonomik Etkisi" başlıklı çalışmasında, 2030 yılı SHURA senaryolarında enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranının en az %50 olacağı öngörülmektedir (Taranto vd., 2021).

Say ve Yücel yaptıkları çalışmalarında temel enerji politikası planlamasında, elektrik üretimi için linyit kullanımının azaltılması hidrolik enerji kullanılmasının artırılması, sera gazı emisyonun azaltılması için yenilenebilir enerjinin artırılması, enerji kayıplarının azaltılmasını vurgulamaktadır (Say ve Yücel, 2006).

SHURA analizine göre elektrik iletim ve dağıtımda şebeke kayıpları ortalama %8 olarak gerçekleşmektedir. Türkiye için bu oran %12'den fazla iken, Japonya, Almanya ve Güney Kore için bu oran %4 seviyelerindedir (SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi, 2020).

Türkiye İstatistik Kurumu verisine göre elektrik üretimi sonucu ortaya çıkan karbondioksit emisyon değeri, Türkiye'nin toplam ürettiği karbondioksit emisyon miktarının %32'sini oluşturmaktadır. Türkiye yenilenebilir enerji potansiyelini kullanabilir ve karbondioksit emisyon değerlerini ciddi miktarda azaltabilir. Elektrik üretim sektörü, elektrik karışımında fosil yakıtlara olan yüksek bağımlılık nedeniyle en fazla emisyon yoğun sektör olduğundan yenilenebilir enerji kaynaklarının karbondioksit emisyonlarının azaltılması ve karbondan arındırılmış enerji sistemine geçiş için kilit bir rol oynayabilir (Özcan, 2018).

Türkiye'nin elektrik üretimi ve karbondioksit emisyonu sürekli artış göstermektedir. Türkiye'nin enerji ve iklim politikasındaki temel zorluk, artan enerji talebi ile enerji arzını güvence altına almak, ithal enerji teknolojilerine bağımlılığı azaltmak ve karbondioksit emisyonunu azaltmaktır. Elektrik üretim sektörü, elektrik karışımında fosil yakıtlara olan yüksek bağımlılık nedeniyle emisyon artışının sebepleri arasındadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, karbondioksit emisyonunun azaltılmasında kilit bir rol oynayacaktır (Ari ve Yikmaz, 2019).

Dünya Bankası'nın Türkiye özelinde iklim ve kalkınma raporu Haziran 2022 tarihinde yayımlandı. Rapor, 2053 yılına dek net sıfır karbon emisyon hedefine ulaşmak için atılması gereken adımların neler olacağını belirtmektedir. Türkiye'nin konumu itibarıyla iklim değişikliği risklerine açık olduğu belirtilmiştir. Ukrayna'daki savaştan da söz edilen raporda, enerjisi büyük ölçüde fosil yakıtlara bağlı olan ülkemizde, son zamanlardaki enerji fiyatlarının yükselişinde savaşın etkisine değinilmektedir. Aynı zamanda enerji güvenliği ve erişilebilirliği için iklim adımlarının atılmasının altı çizilmektedir. Rapor, 2040 yılına kadar tüm kömür santrallerinin kapatılmasını önermektedir. Güneş ve rüzgâr enerji kaynaklarının enerji ihtiyacını karşılamadaki rolünden bahsedilmektedir. Ayrıca raporda, enerji şebekeleri ve enerji depolama konularına yatırımların yapılması gerekliliği belirtilmektedir (World Bank Group, 2022).

1.3 Uluslararası İklim Antlaşmaları ve Türkiye

Enerji üretimi ve tüketimi sonucunda oluşan çevresel etkiler ülke sınırları içerisinde düşünülecek bir konu değildir. Oluşan çevresel sorunlar tüm insanlığı etkilemektedir. Türkiye, ulusal ve uluslararası çerçevede iklim değişikliği

stratejilerine yön vermek üzere raporlar yayımlamaktadır. Bu raporlar, ulusal ve uluslararası taahhütler, eylem planlarını içermektedir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile Çevre, Şehircilik ve İklim Bakanlığı, 2010 yılından itibaren enerji verimliliği, yenilenebilir enerji ve iklim değişikliği konularını ele almak üzere eylem planları ve hedefler belirlemiştir. Bunlar; 2010 yılında yayınlanan Ulusal İklim Değişikliği Stratejisi, 2012 yılında yayımlanan Türkiye Ulusal İklim Değişikliği Eylem Planı, 2014 yılında yayımlanan Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı, 2015 yılında yayınlanan BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne Ulusal Olarak Belirlenen Katkı ve 2015 yılında yayımlanan ve 2017 yılında yenilenen Ulusal Enerji Stratejik Planıdır.

İklim politikalarının planlaması ve hayata geçirilmesi uluslararası çabalar gerektirmektedir. Ülkeler uluslararası taahhütler sunmakta ve organizasyonlar gerçekleştirmektedir. İnsan kaynaklı sera gazı birikimlerini ve iklim etkisini durdurmayı hedefleyen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) 1992 yılında imzaya açılmıştır. BMİDÇS'nin en üst karar alma organı olan Taraflar Konferansı (COP) her yıl toplanan taraf ülkelerin oybirliği ile alınır.

1997'de Kyoto'da gerçekleştirilen BMİDÇS 3. Taraflar Konferansı'nda Kyoto Protokolü kabul edilmiştir ve 2005 yılında yürürlüğe girmiştir. Kyoto Protokolü iklim değişikliği ve küresel ısınma konusundaki mücadele için uluslararası çerçeve sözleşmesidir. Türkiye 2005 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolü'ne 26 Ağustos 2009 tarihinde taraf olmuştur (Kyoto Protokolü, 2022).

Paris Antlaşması, 2015 yılında 21. Taraflar Toplantısı'nda imzaya açılan ve Sanayi Devrimi'nden itibaren ortalama yüzey sıcaklığındaki artışını 2 derecenin altında tutmayı, mümkünse 1,5 derecede sınırlandırmayı hedefleyen bir antlaşma çerçevesidir. Paris Antlaşması Kyoto Protokolü'nün yerine geçmiştir.

Dünya yüzeyindeki 2 derecelik artış yerkürede birçok olumsuzluklar oluşturacaktır. Bu artış sonucunda ortaya çıkabilecek değişimlerden bazıları şöyle sıralayabilir; Değişim, deniz besin zincirinin temeli olan mercan resiflerinin %99'unun kaybı anlamına gelir ve Batı Antarktika buz tabakasının geri döndürülemez bir şekilde kaybolmasına neden olur. Bunun sonunda deniz seviyesi 5 metre yükselir. Dünya'daki birçok kıyı kentin büyük bölümleri sular altında kalır.

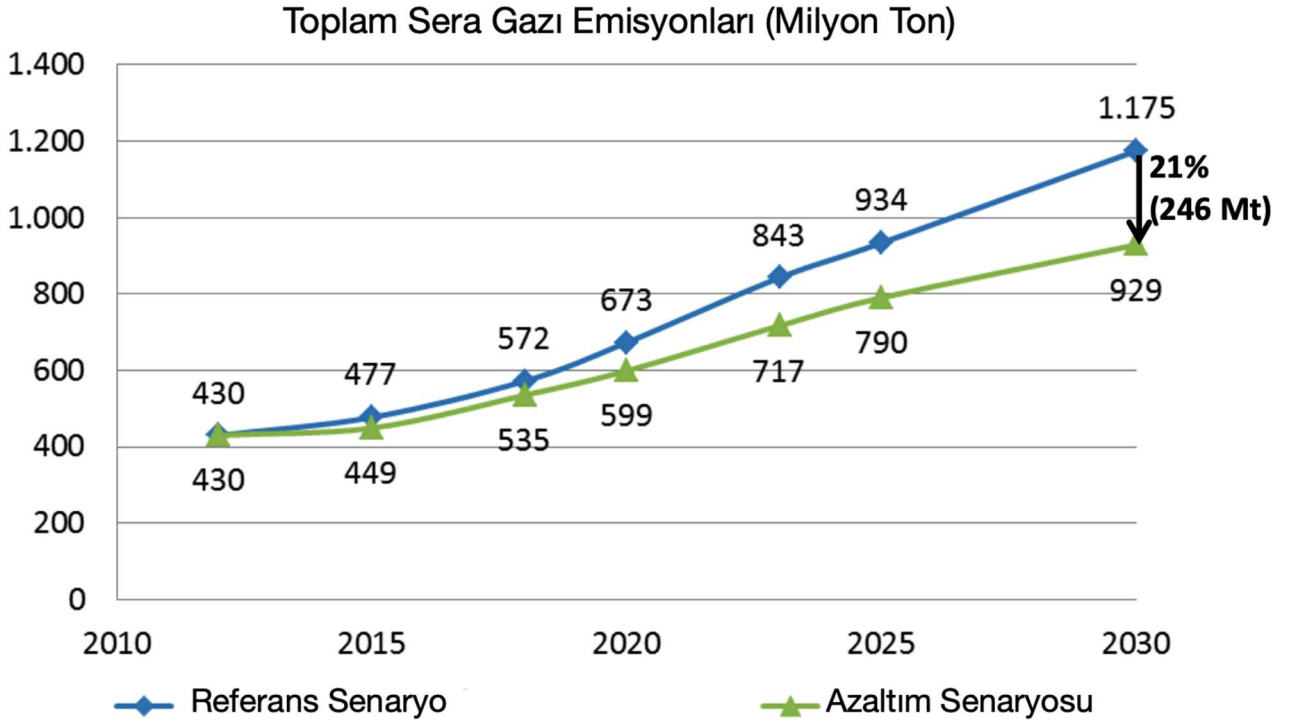
Hükûmetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporlarına göre, 1,5°C hedefine ulaşmak için, global ölçekte karbondioksit emisyonlarını 2030'a kadar 2019'a kıyasla %48 azaltması ve 2050'de net sıfıra ulaşması gerekiyor (IPCC, 2022).

Türkiye Paris Antlaşması'nı 2016 yılında imzalamış olmakla birlikte, antlaşma Türkiye Büyük Millet Meclisi'nde Ekim 2021'de onaylanmıştır. Paris Antlaşması, ülkelerin ulusal şartlarına uygun şekilde hazırladıkları ve Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) Sekretaryasına sundukları emisyon azaltım beyanlarını (Ulusal Katkı Beyanı) baz almakta ve ülkeleri her beş yılda bir kendi beyanlarını iyileştirmeye davet etmektedir. BMİDÇS kapsamında Paris Antlaşması'na taraf olan ülkeler, sunduğu Ulusal Katkı Beyanlarında (NDC) iklim krizine dair atacakları adım ve önlemleri beyan etmektedir. İklim hedeflerine ulaşılmasını için Ulusal Katkı Beyanları, her ülkenin belirlediği ulusal emisyonları azaltma çabalarını somutlaştıran bildirimlerdir. 'Amaçlı' kelimesi, Paris iklim konferansı öncesinde önerilen iklim eylemlerini iletme için kullanılmıştır. Bununla birlikte, Paris Antlaşması'nı uyarladıktan sonra, ülkelerin ulusal iklim planlarını resmileştirmeleri ve BMİDÇS'ne sunmaları gerekmektedir. Bu aşamadan sonra 'Amaçlı' kelimesi bırakılır ve resmi olarak Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkılar haline gelir.

Türkiye, 30 Eylül 2015'te BMİDÇS Sekretaryasına Ulusal Katkı Niyet Beyan'ını sunmuştur. INDC göre 2030 yılına kadar, sera gazı emisyonlarında %21 azaltma hedefini içermektedir. 2030 yılına kadar sera gazı emisyonu için Referans Senaryo ve Azaltım Senaryoları olmak üzere iki senaryo içermektedir (Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2019). Türkiye'nin 2015 yılında sunduğu Ulusal Katkı Niyet Beyan'ındaki referans senaryo ve azaltım senaryolarına ait öngörülen değişim Şekil 4'te verilmiştir. Türkiye'nin INDC hedefinin tam olarak uygulanması, ulusal sera gazı emisyonlarını 2030 yılında 246 Mt'a kadar azaltacaktır.

Türkiye, 2030 yılı itibarıyla baz senaryoda belirtilmiş olan 1.175 Mt karbondioksit eşdeğeri sera gazı emisyonunu %21 oranında azaltımla 929 Mt karbondioksit emisyonuna indirmeyi hedeflediğini beyan etmiştir. Bu sayede

küresel ölçekte 2 derece sıcaklık artışının altında kalma hedefini sağlamak için düşük karbonlu kalkınma yolunda önemli bir adım atılmış olacağı belirtilmektedir.



Kaynak:(Türkiye INDC, 2015).

Şekil 4. Türkiye'nin 2015 Yılı Ulusal Katkı Niyet Mektubu.

27. Taraflar Toplantısı 2022 Kasım ayında Mısır'da düzenlenmiştir. Türkiye burada yeni Ulusal Katkı Beyanını açıklamıştır. Bu beyana göre 2015 yılında belirtilen referans senaryoya göre %21 azaltım beyanını %41 olarak güncellemiştir. Türkiye'nin 2053 yılında net sıfır karbon emisyon hedefine ulaşması için 2030 yılı hedeflerini gerçekleştirilmesi önemlidir.

Avrupa Birliği, öngörülen emisyonlarını 2030'da 1990 düzeyine kıyasla %40 azaltmayı taahhüt ediyor. ABD ve Brezilya, benzer yaklaşıma sahip INDC'lerini sundular. İlki, 2025 yılı emisyonlarını 2005 seviyelerine göre %28, ikincisi ise 2030 yılı emisyonlarını 2005 seviyelerine göre %43 oranında azalacağını belirtti. Çin'in 2030 yılına kadar emisyon zirvesine ulaşması ve emisyon yoğunluğunu 2005 seviyelerine göre %65 oranında azaltması bekleniyor. AB ve Çin, INDC'lerinde yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının altını çiziyor (Ari ve Yikmaz, 2019).

Avrupa Birliği, iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik uluslararası çabaların ön saflarında yer almaktadır. Avrupa Birliği 2019 yılında Avrupa Yeşil Mutabakatı ile 2050 yılına kadar sera gaz emisyonlarını sıfırlamayı hedeflemektedir. Bu hedef,

ekonomik ve çevresel kalkınmayla beraber düşünülmektedir (AB Komisyonu, 2019).

Türkiye tarafından, iklim eylem planları ve strateji konusunda raporlar yayımlanmıştır. Türkiye Avrupa Yeşil Antlaşması'nın öngördüğü değişikliklere karşın atılacak adımları ve hedefleri içeren Yeşil Mutabakat Eylem Planı'nı yayımlanmıştır. Ticaret Bakanlığı 16 Temmuz 2021 tarihinde yayımlanan Yeşil Mutabakat Eylem Planı ile Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatına uyum kapsamında atılacak adımları belirtmiştir. Avrupa Yeşil Mutabakatı ile öngörülen yeni düzen Türkiye'nin Avrupa ile olan ticari ilişkilerini ve ekonomisini yakından ilgilendirmektedir. Türkiye Cumhuriyeti ticaret bakanlığı tarafından Avrupa Yeşil Mutabakatı eylem planı hazırlanmıştır. Eylem plan raporunda Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında yapılacak adımlar belirlenmiştir. İklim değişikliği ile mücadele kapsamında İklim Değişikliği ve Hava Yönetimi Koordinasyon Kurulu üyeleri 2021 yılının 4. çeyreğinde iklim mücadele raporunun hazırlanması, 2022 4. çeyreğinde 2050 iklim değişikliği stratejisinin hazırlanması ve Paris Antlaşmasının yönelik ülkenin durumunun değerlendirilmesi planlaması yapılmıştır (Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, 2021).

Avrupa Birliği, Türkiye'nin yenilenebilir enerji politikasının iyileştirilmesine ve bu sorunların aşılmasına önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Birincisi, AB ile iş birliğinin artırılması siyasi taahhütte ivme kazandıracaktır. AB, bugüne kadar Türkiye'nin yenilenebilir enerji politikasının şekillenmesinde etken olmuştur. AB'nin iç enerji piyasasını entegre etme çabaları ve yenilenebilir enerji destek programları Türkiye'nin enerji piyasaları üzerinde etkili olmuştur ve Türkiye de kendisini iç enerji piyasasına entegre etmek için benzer önlemler almaktadır. AB'nin teknoloji politikaları ve teknoloji yaratma fonları Türkiye'nin teknoloji ve inovasyon profilinin geliştirilmesine yardımcı olmuştur (Murat Sirin ve Ege, 2012).

Avrupa Birliğinin, Türkiye'nin enerji politikalarının şekillendirilmesinde doğrudan ve dolaylı etkisi bulunmaktadır. Avrupa Birliği üyelik süreci Türkiye'nin enerji politikasını; arz güvenliği, enerji piyasası, yenilenebilir enerji, enerji verimliliği, nükleer enerji alanlarında sistematik bir biçimde ve kökten değişikliklere neden olacak şekilde etkilemiştir (Cin, 2016).

Avrupa Yeşil Mutabakatı, Avrupa Birliği açısından sadece karbon sıfır stratejisi ile sınırlı değildir. Avrupa fosil yakıtların ithalatında Rusya'ya' ve diğer tedarikçi ülkelere bağımlıdır. Avrupa Yeşil Mutabakat ile enerji krizleri nedeniyle ekonomik ve siyasi açıdan önemli risklerle karşı kıtanın kırılganlığı azalacaktır (Kakışım, 2022). Avrupa Birliği, Avrupa Yeşil Mutabakatı ile 2050 yılına kadar tamamen karbondan arındırılmış bir ekonomiye geçiş hedefindedir. Mutabakat, ekonomi, tarım ve enerji alanlarındaki politika eylemleri içermektedir.

Avrupa Birliği, sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerine kıyasla 2050 yılına kadar %80-95 oranında azaltmak için uzun vadeli bir hedef belirlemiştir. Bu hedefe ulaşabilmek için atılması gereken adımları şöyle sıralanmıştır (Hamze, 2020).

- Enerji sisteminin karbondan arındırılması.
- Emisyon azaltma hedefi, mevcut politikaların devamından daha ucuzdur.
- Yenilenebilir enerjinin payının artırılması ve enerjinin daha verimli kullanılması.
- Erken altyapı yatırımları daha az maliyetlidir.
- Düşük karbonlu alternatiflerle derhal değiştirilmesi.

Avrupa Birliği, 2050 yılına kadar karbon nötr hale gelme sürecini tek başına ele almamaktadır. Sanayi üretimini, ekonomiyi ve istihdamı korumayı hedeflemektedir. Avrupa Birliği, 'iklim nötr' hedefi için adımlar atarken, Sınırdaki Karbon Düzenlemesi mekanizması ile Avrupa Birliği'ne yapılacak ihracat, karbon fiyatlandırması olmayan ülkeler için ekstra maddi yük oluşturacaktır (Ecer vd, 2021).

Türkiye ile Avrupa Birliği arasındaki ticaret hacmi 2020 yılı itibarıyla 143 milyar dolar olarak gerçekleşmiştir. AB, Türkiye'nin ihracatında ve ithalinde ilk sırada yer almaktadır (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021). Avrupa Birliği Yeşil Antlaşması'nda belirlenen uzun vadeli iklim politikası hedefleri doğrultusunda: Temmuz 2021'de Avrupa Komisyonu, Avrupa Birliği üyesi olmayan üreticilerin ithal malların üretimi sırasında ortaya çıkan doğrudan emisyonları için bir bedel ödemelerini sağlamak için bir Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) yasa teklifi sunmuştur. CBAM fiyatı, AB Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) kapsamında

hesaplanacaktır. CBAM başlangıçta çimento, gübre, demir ve çelik, alüminyum ve elektrik mallarının ithalatına uygulanacaktır. CBAM'ın tamamının 2026'da faaliyete geçmesi beklenmektedir.



İKİNCİ BÖLÜM

2. Enerji Üretim Modellerinin İncelenmesi

2.1 LEAP Modeli ve Senaryo Yaklaşımı

Ülkelerin ekonomik ve sosyal kalkınması büyük ölçüde enerji planlamasına bağlıdır. Enerji kaynakları sınırsız değildir, enerji kaynaklarının stratejik kullanılması yeni bir enerji kaynağını keşfetmek kadar değerlidir. Enerji üretim modelleri, enerji maliyetleri, emisyonlar ve yakıt çeşitliliği gibi performans parametrelerini optimize ederek en iyi enerji karışımını tasarlamaya yardımcı olur. Enerji kaynaklarının etkili kullanımı ve gelecek dönemler için planlanması ülkelerin ekonomik, politik ve uluslararası ilişkiler bağlamında üzerinde önemle durduğu konulardandır. Enerji senaryolarını oluşturmak ve değerlendirmek için modelleme araçlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler elektrik üretiminin ve tüketiminin modellenmesine ve tahmin edilmesine büyük önem vermektedir. Gelecekteki enerji kaynaklarının kullanımlarının nasıl değişebileceğini değerlendirmek için çeşitli modelleme araçlarının kullanımı artmaktadır. Elektrik üretimi ve tüketimindeki tahmin hataları, mali ve enerji güvenliği açısından son derece istenmeyen sonuçlar doğurur. Yetersiz elektrik üretim tahmini ülkelerin elektrik arz ve güvenliği konularında sorunlara sebebiyet verir. Kapasite fazlalığı tahminleri ise kaynakların verimsiz kullanılması sonucu olumsuz ekonomik etkilere sebep olur. Bu nedenle, yukarıda belirtilen maliyetli hatalardan kaçınmak için elektrik tüketiminin ve üretiminin yüksek derecede doğrulukla modellenmesi hayati önem taşımaktadır.

Enerji üretim karışımı, enerji sistemi analizinde kullanılan yöntemlerdendir. Hoffman ve Wood, enerji üretim karışımı yaklaşımının ABD'de 1950'lerden beri kullanıldığını öne sürmektedir. Bu yöntem hala çok popülerdir (Hoffman ve Wood, 1976). Analistler ve politika yapıcılar, uzun vadeli enerji planlaması için karar verme süreçlerini geliştirmek ve yardımcı olmak için enerji sistemi modellerinden yararlanmaktadırlar. Enerji sistem modelleri birçok ülkede enerji ve iklim politikasının geliştirilmesine yön vermektedir (Strachan vd., 2009).

Enerji sistem modelleri başlangıçta enerji güvenliği ve maliyetlerine daha fazla odaklanırken, iklim değişikliği politikası ve sera gazı emisyonları çalışmalarını

yönlendiren güçlü bir faktör olarak da kullanılmaya başlanmıştır (Meinshausen vd., 2009).

Uzun vadeli enerji üretim ve tüketim modellerinde senaryolar önemli yer tutmaktadır. Alternatif senaryolar arasındaki sonuçların yorumlanması uzun vadeli karar alınmasında nicel dayanaklar sağlar. Senaryo planlama, geleceğin belirsizliklerini yöneten, stratejik planlama sürecinin verimliliğini artıran önemli bir süreçtir. Belirsiz ortamları incelemenin en iyi yollarından biri gelecek senaryoları oluşturmaktır.

LEAP yazılım aracı 1980 yılından itibaren ABD, Boston'daki Stockholm Çevre Enstitüsü tarafından geliştirilen statik bir senaryo temelli enerji ekonomisi çevre modelidir. LEAP, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi raporlaması için kullanılan fiili standart araç haline gelmiştir. İklim değişikliği konusu çok uzun vadelerin (100 yıl veya daha fazla) anlaşılmasını gerektirdiğinden, modeller tasarlanırken normal 20-30 yılın ötesine bakmak genel kabul görmeye başlandı (Bhattacharyya ve Timilsina, 2010).

LEAP yaklaşımı, akademik amaçlar ve hükümetler tarafından 190 farklı ülkede aktif kullanılmaktadır. 2015 yılındaki INDC raporları geliştirmek için 32 farklı ülke tarafından kullanılmıştır (Mac vd., 2016). Ülkeler, belediyeler, ulusal, bölgesel ve küresel ölçekte uygulanan çalışmaların yürütülmesi için literatürde yaygın olarak LEAP yaklaşımını kullanmaktadır (Rogan vd., 2014).

Çin için yapılan çalışmada uzun vadeli enerji talep tahmini için LEAP yaklaşımı kullanılmıştır. Bu çalışmada 2030 yılı için enerji talebi tahmin edilmiştir. LEAP yazılım aracı ile modellemenin kısıtlı veri setinde kullanılabildiği belirtilmiştir (Rui vd., 2019) .

Enerji üretim ve talep projeksiyonu için LEAP yazılım aracından yararlanılmıştır. LEAP yazılım aracının esnek kullanıcı ara yüzünden ve minimum veri ile sonuçlar üretebildiğinden bahsedilmiştir. Yapılan çalışma kapsamında 2035 Pakistan için enerji talebi yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda 2035 yılında, enerji üretim karışımında petrolün en çok tüketilen enerji kaynağı olacağı belirtilmiştir. Doğal gaz, elektrik, kömür enerji kaynaklarının petrolden sonra gelen enerji kaynakları olacağı sonucuna ulaşılmıştır (Aziz Ur Rehman vd., 2017).

LEAP yaklaşımı, Etiyopya'daki enerji karışımındaki değişimleri araştırmak ve uzun vadeli enerji gereksinimlerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan süre aralığı 2018'den 2050'ye kadar 33 yıldır. Gelecekteki enerji üretim değişimlerini ortaya çıkarmak için farklı senaryolar oluşturmuştur. Geliştirilen senaryolar Olağan İş Senaryosu, Elektrifikasyon ve Kentleşmede Büyüme, Yüksek Ekonomik Büyüme ve Geliştirilmiş Enerji Verimliliği senaryosudur. Oluşturulan senaryoların sonuçları sera gazı emisyonlarını tahmin etmek için de kullanılmıştır (Gebremeskel vd., 2021).

Panama'daki enerji üretiminin mevcut durumu üzerine yaptıkları çalışmada elektrik üretim senaryoları oluşturmuş ve senaryolar LEAP yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Her senaryo için, elektrik üretim karışımının küresel ısınma potansiyelini ve kaynak çeşitliliğini nicel olarak tahmin edilmiştir (McPherson ve Karney, 2014).

Kore'de 2050 yılına kadar elektrik üretiminin enerji, çevresel ve ekonomik etkilerini LEAP yaklaşımı kullanarak analiz edilmiştir. Senaryolar arasında Olağan İş Senaryosu, Hükümet Politikası Senaryosu ve Sürdürülebilir Senaryolar bulunmaktadır. Nükleer ve kömürle çalışan elektrik üretim santralleri, 2050 yılında olağan iş senaryosunda ve hükümet senaryolarında üretilen elektriğin çoğunu oluşturacağı belirtilmiştir. Sürdürülebilir senaryoda ise yenilenebilir enerjinin 2050'de en fazla elektriği üreteceğini öngörülmüştür (Park vd., 2013).

Kolombiya 2050 yılı için tahmin çalışmaları, LEAP yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. Olağan iş senaryosu, enerji arz çeşitlendirmesine dayalı enerji güvenliği senaryosu, çevresel etkileri göz önünde bulunduran enerji çeşitlendirme senaryosu çalışılmıştır (Paez vd., 2017).

LEAP yaklaşım ile alternatif senaryoların üretim karışımları ve sera gazı emisyonlarını karşılaştırılmıştır. LEAP yaklaşımı, Tayvan için enerji politikasını incelenmek için kullanılmıştır. Olağan İş Senaryosu, Enerji Verimliliği İyileştirme Senaryosu ve Tayvan'ın mevcut üç nükleer santralinin zamanında kapatılmasını içeren senaryolar karşılaştırılmaktadır. Kullanılan LEAP yaklaşımının avantajı, enerji tahmin sistemleri oluşturabilmesi ve farklı uzun vadeli senaryolar için kullanabiliyor olmasıdır (Huang vd., 2011).

Hindistan eyaletlerinden Maharaştra için, Olağan İş Senaryosu, Enerji Tasarrufu Senaryosu ve Yenilenebilir Enerji Senaryosu olmak üzere üç farklı senaryo oluşturmuştur. Oluşturulan senaryolar enerji, çevresel etki temelinde analiz edilmiştir. 2030 yılında Olağan İş ve Enerji Tasarrufu için tahmini sera gazı değerleri, 2012 baz yılına göre %245,2 ve % 152,4 daha fazla iken ve Yenilenebilir Enerji senaryosunda %46,2 daha azdır (Kale ve Pohekar, 2014).

Afrika kıtası için LEAP yaklaşımı kullanılarak senaryolar oluşturulmuştur. Oluşturulan senaryolar; Olağan İş senaryosu, Yenilenebilir Teşvik Senaryosu, Üretim ve Tüketim Verimliliği senaryolarıdır. Enerji verimliliği senaryolarının, elektrik üretim kaynaklarının kullanılmasında sürdürülebilir bir yol sağladığı belirtilmiştir (Ouedraogo, 2017).

Türkiye için sera gazı emisyonu hakkında senaryolar oluşturulmuştur. Referans Senaryoya göre, 2040 yılına gelindiğinde, sera gazı emisyon salınımı %28 oranına düşecektir. Alternatif Senaryo göre sera gazı emisyon salınımı oranında %54 düşmektedir. Alternatif Senaryodaki daha büyük azalmalar, daha yüksek verimlilik kazanımlarını ve daha yüksek yenilenebilir ve nükleer enerji dağıtım seviyelerini yansıtmaktadır (Difiglio vd., 2020).

Ekvator enerji üretim sistemi değerlendirilerek, 2040 yılına kadar elektrik arz ve talep tahmini yapılmıştır. Bu amaçla, LEAP yaklaşımı kullanılarak üç potansiyel alternatif senaryo analiz edilmiştir. Bu senaryolar; Olağan İş Senaryosu, Enerji Üretimi Ana Planı Senaryosu ve Sürdürülebilir Enerji Üretim Sistemi Senaryosu olarak oluşturulmuştur. Bu çalışma ile amaçlananlar sırası ile şunlardır; petrol yakıtlarına dayalı mevcut sistemi sürdürülebilir bir sisteme dönüştürmek için elektrik arz ve talebi analiz etmek, Ekvator enerji üretim sisteminin gelecekteki yapısı için olası alternatifleri değerlendirmek ve 2040 yılına kadar güneş, rüzgâr, biyokütle ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji üretim miktarlarını hesaplamaktır (Rivera-González vd., 2019).

Ürdün'ün 2015-2025 dönemindeki enerji stratejisine bağlı olarak 2050 yılına kadar Ürdün için altı elektrik üretim karışımı için tahmin ve optimizasyon modeli sunulmaktadır. LEAP yazılımı aracı kullanılarak, ülkedeki gelecekteki elektrik talebini karşılamak için elektrik stratejik üretim planlamasında karar vericilere

yardımcı olmak amacıyla önerilen altı elektrik üretim karışımı senaryoları önerilmiştir. Ürdün'de 2050 yılına kadar 13.355 Megawatt-Yıllık elektrik üretim karışımının esas olarak geleneksel enerji santrallerinden %53 oranında üretileceğini belirtilmiştir. Güneş ve rüzgâr teknolojileri elektrik üretimde %28,3 nükleer enerji elektrik üretiminde %13,5 petrol elektrik üretiminde %3,18 ve kömür kaynaklı elektrik üretiminde %1,9 oranında olacağı öngörülmüştür (Gresat vd., 2018).

Pakistan'ın enerji talebi ve enerji üretimi LEAP yaklaşımı kullanarak senaryo bazlı analiz edilmiştir. Olağan İş Senaryosu, Yeşil Pakistan Senaryosu, Nükleer Senaryo ve Optimizasyon Senaryosu olmak üzere dört farklı senaryo oluşturulmuştur(Aized vd., 2018).

Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii kaynaklar bakanlığı tarafından enerji üretim modellemesi için LEAP yaklaşımı kullanılmıştır. Elektrik enerjisi piyasası ve arz güvenliği belgesi LEAP yazılım aracı ile çalışılmıştır. 2009 yılında hazırlanan belgeye göre kaynak kullanım hedefleri belirlenmiştir. Türkiye için 2023, 2030 ve 2035 projeksiyonları yapılmıştır. 2023 için hidrolik enerji elektrik üretiminde ilk sırada olduğu, hidrolik enerjisini rüzgâr ve doğal gaz enerjilerinin izleyeceği öngörülmüştür. 2030 yılı için hidrolik enerji yine ilk sırada iken, onu doğal gaz ve rüzgâr izleyeceği öngörülmüştür. 2035 yılı için hidroelektrik tekrar en önemli kaynak iken, onu rüzgâr ve nükleer enerjilerin izleyeceği öngörülmüştür(T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2013.)

Hükümet politikalarının elektrik sektöründeki emisyonları azaltma potansiyelini analiz etmek için LEAP yaklaşımı kullanılmıştır. Bu senaryolar Olağan İş Senaryosu ve Azaltma senaryosudur. Senaryolarda 2006 yılı temel yıl olarak alınmış ve 2030 yılı ise projeksiyon alınan yıl olmuştur. Modellenen dönem boyunca iki senaryonun sonuçları karşılaştırılmıştır. Olağan iş senaryosunda karbondioksit emisyonlarının önemli ölçüde artacağını, Azaltma senaryosunun elektrik bazlı karbondioksit emisyonunun yıllık %17,5'lik bir azaltma oranına karşılık geldiği gösterilmiştir (Özer vd., 2013) .

Türkiye için yapılan çalışmada, fosil yakıtlara yatırım yapmaya devam etmek yerine yenilenebilir enerjili geçişin emisyonlarını azaltacağı, ekonomi ve toplum için sosyal ve ekonomik yararlar sağlayacağı gösterilmiştir (Simas vd., 2022) .

2023 yılında Türkiye'nin elektrik tüketiminin 530.000 GWh civarında olacağı tahmin edilmektedir. Bu çalışmada, bu talebin karşılanmasının maliyet ve çevresel etkilerini analiz etmek için iki farklı senaryo oluşturulmuştur. Resmi Vizyon 2023 hedeflerinden türetilen Senaryo 1, bu talebin rüzgâr, güneş, jeotermal enerji ve hidroelektrikten sağlanmasını önermektedir. Senaryo 1'e dayalı olarak öngörülen toplam maliyetin 31.000 milyar dolar ve yıllık sera gazı emisyonlarının 1,05 milyon ton karbondioksit eşdeğeri olduğu tahmin edilmektedir. Senaryo 2'ye veya aksi kurguya göre, gerekli talep açığının yeni yenilenebilir enerji yatırımlarından sağlanamayacağı, ancak eşit olarak kömür ve doğal gazdan sağlanacağı varsayılmaktadır (Melikoglu, 2013).

Olağan İş Senaryosu ve Karbon-sıfır senaryosu Türkiye için oluşturulmuştur. Olağan iş senaryosunda iklim değişikliği için herhangi bir aksiyonun alınmadığı, olağan süreçlerin devam ettiği senaryodur. Karbon-sıfır senaryosu ise 2050 yılına kadar karbondioksit emisyonunu sıfırlamak için aksiyonların olacağı senaryodur. 2030 da elektrik üretimi soyunucunda 184 Mt Karbondioksit emisyonu, 2050'de 281 Mt Karbondioksit emisyonu olağan iş senaryosunda öngörülmektedir. Karbon sıfır senaryosunda ise 2030 yılında 72 Mt Karbondioksit emisyonu, 2050 yılında ise 15 Mt Karbondioksit emisyonu projeksiyonu yapılmaktadır (Şahin vd., 2021).

Türkiye'nin 2012 yılında toplam sera elektrik üretim sonucu ürettiği karbondioksit oranı 116 Mtdur. Çalışmada, 2013-2017 donemi elektrik enerjisi üretimi kaynaklı karbondioksit emisyon değerleri hesaplanmıştır. Senaryo bazlı çalışmada senaryo sonuçlarında 2017 yılında elektrik üretim için toplam 178Mt ve 172Mt Karbondioksit emisyon tahmini yapılmıştır (Özcan ve Öztürk, 2015).

2.2. Derin Öğrenme Tahmin Modelleri

Mühendislik, ekonomi, yöneylem araştırması dahil olmak üzere çeşitli disiplinlerden yöntemler, enerji üretim modellerinde kullanılır (Hoffman ve Wood, 1976). Elektrik enerjisinin oluşumu özelinde, geleneksel elektrik üretim yöntemi olan kinetik enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesi, uranyumun fisyon tepkimesine girerek ortaya çıkan nükleer enerji ve güneş panellerindeki fotovoltaik hücrelerden elde edilen elektrik enerjisi mühendislik başlığı altında toplanabilir. Elektrik enerjisinin fiyatının belirlenmesi, elektrik enerjisinin sanayi üretimi üzerinde etkisi, elektriğin üretimi sırasında kullanılan birincil enerji kaynaklarının maliyetleri

ekonomi başlığı altında toplanabilir. Yöneylem araştırması başlığında ise, elektrik enerjisi üretim tahminleri ve üretim optimizasyonları konuları düşünülebilir.

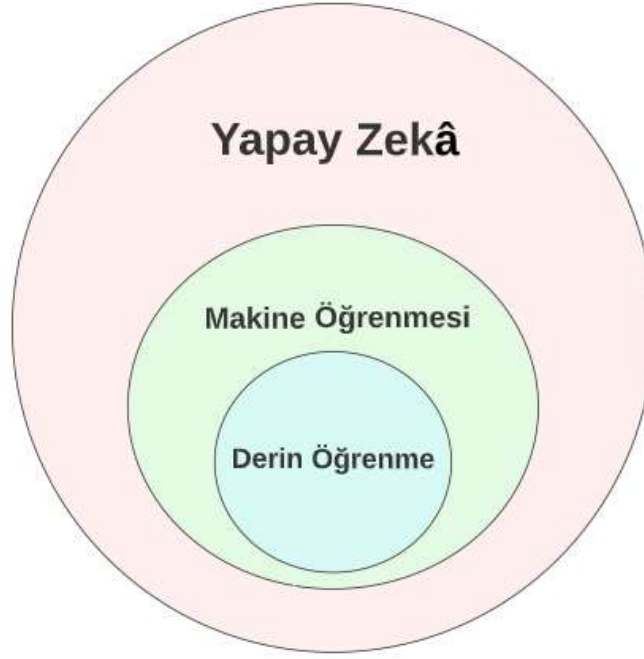
Enerji üretim modellerinin kullanım alanları arasında üretim analizi ve tahmini, talep ve arz arasındaki ilişkilerin modellenmesi ve uzun vadeli enerji planlanması sayılabilir. Günümüzde birçok model, enerji arz tarafına yoğunlaşmıştır. Enerji üretim modelleri, düşük karbonlu enerji sistemine geçişte stratejik karar vermeyi desteklemektir. (Fleiter vd., 2018).

Derin öğrenme yöntemleri, yapay zekâ çalışmalarının alt başlıklarından biridir. Stanford Üniversitesinde bilgisayar bilimleri profesörü olan John McCarthy, "yapay zekâ" terimini ileri sürmüş ve daha sonraki yıllarda bu konuda çalışmalar yapmıştır. John McCarthy tarafından 2004 tarihli "Yapay Zekâ Nedir?" çalışmasında yapay zekâyı bilgisayar programları yardımı ile akıllı makine yapmanın bilimi ve mühendisliği olarak tanımlamaktadır (Mccarthy, 2004). 1950 yılında yaptığı çalışmada, Alan Turing makinalar düşünebilir mi diye sorup, Turing Testini önermiştir. Genel anlamda, Turing testin sorgulayıcısı sorduğu sorularda aldığı cevaplar ile insan makina ayrımı yapabilme testidir.

Yapay zekâ günümüzde dar veya zayıf yapay zekâ (Weak AI) ve Güçlü yapay zekâ (Strong AI) olmak üzere iki başlıkta tartışılmaktadır. Güçlü yapay zekâ, makinenin insanlara eşit bir zekaya sahip olacağı teorik yapay zekâ biçimidir. Makinelerin problemleri çözme, öğrenme ve gelecek için plan yapma yeteneğine sahip, kendinin farkında bir bilince sahip olma durumunu anlatmaktadır. Dar veya Zayıf yapay zekâ, bugün bizi çevreleyen yapay zekâ araştırmaların, modellerin ve algoritmaların çok büyük bir çoğunluğunu içerir. Dar veya zayıf yapay zekâ tanımı, negatif bir terim yerine güçlü yapay zekâ kavramı ile kıyas için kullanılmaktadır. Otonom araçlarda, görüntü işlemlerinde, siber güvenlik ve tahmin çalışmalarında kullanılan modeller bu gruba girmektedir.

Derin öğrenme ve makine öğrenimi yapay zekanın alt alanlarıdır. Derin öğrenme ise makine öğreniminin bir alt alanıdır. Makine öğrenimi, probleme özel programlama yapılmadan, deneyimden otomatik olarak öğrenen ve uyum sağlayan bilgisayar sistemlerinin incelenmesini ifade eder. Derin öğrenme bir makine öğrenme tekniğidir. Derin öğrenme algoritmaları yapay sinir ağlarının yapısını

temel almaktadır. Şekil 5, yapay zekâ, makina öğrenmesi ve derin öğrenme başlıkları arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 5. Yapay Zekâ, Makina Öğrenmesi, Derin Öğrenme

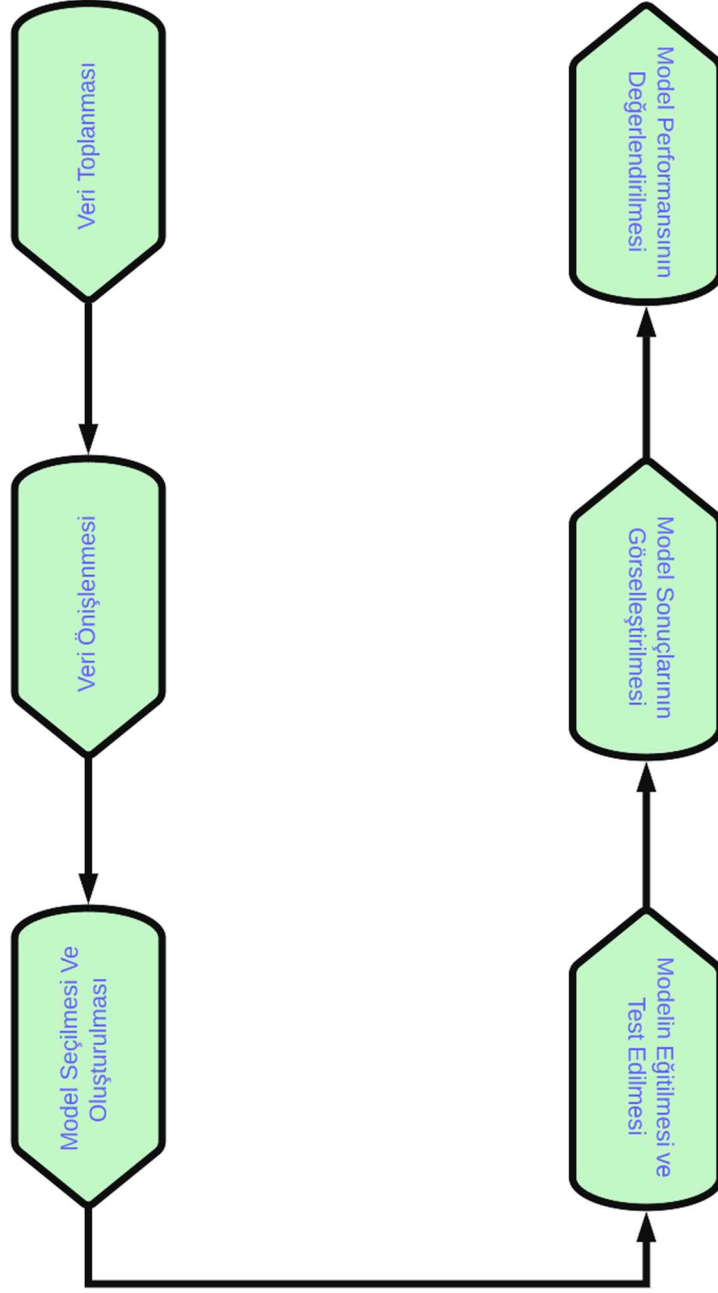
Derin öğrenme yöntemleri, birincil enerji kaynaklarının üretim tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Birincil enerji kaynaklarının üretim miktarları lineer olmayan birçok değişkenden etkilenebilmektedir. Örneğin rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi rüzgârın hızından ve yönünden direkt etkilenirken, güneş enerjisinden elektrik üretimi havadaki bulutların güneşten gelen ışınları engellenmesiyle etkilenir. Fosil yakıtların üretimi daha az çevresel olaylardan etkileniyor olmasına rağmen bu yakıtların kullanım miktarını yenilenebilir enerji kaynakları ile beraber düşünmek gerekir. Gelecekte güneş ve rüzgâr enerjisi ile elektrik üretim miktarının artacağı düşünüldüğünde, derin öğrenme yöntemleri ile daha fazla birincil enerji kaynaklarının üretim tahmini yapılacağı öngörülebilir.

Derin öğrenmenin temelinde yapay sinir ağları bulunmaktadır. Yapay sinir ağları beyin hücrelerinin çalışma şeklinin modellenmesine dayanmaktadır. Yapay sinir ağları, gerçekleşmiş örnekleri kullanarak olayları öğrenebilen, insan beyninin fonksiyonel özelliklerine benzer şekilde öğrenme, ilişkilendirme, sınıflandırma, genelleme, özellik belirleme, optimizasyon ve tahmin gibi konularda başarılı bir şekilde uygulanabilen bilgisayar sistemleridir. Yapay sinir ağları insan beyninin özelliklerini örnek alarak yeni bilgiler geliştirilen sistemlerdir. Yapay sinir ağlarındaki katman sayısının artırılması ile derin öğrenme modelleri oluşturulmaktadır. Derin

kavramı, yapay sinir ağındaki gizli katman sayısının birden fazla olması anlamında kullanılmaktadır.

Türkiye'nin elektrik sistemi üzerine yapılan çalışmada yapay sinir ağıları kullanılmıştır. Derin öğrenme yöntemlerinden Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM) modeli ile tek katmanlı yapay sinir ağlarının tahmin performansları kıyaslanmıştır. LSTM modelinin, tek katmanlı yapay sinir ağlarından daha başarılı tahmin performansı gösterdiği belirtilmiştir(Gökgöz ve Filiz, 2018).

Derin öğrenme sürecindeki çalışmalar farklı aşamalardan oluşmaktadır. Bu çalışmalardan ilki verinin toplanması aşamasıdır. Veri seti probleme göre değişim gösterir. Modelin çalışma amacının belirlenmesi verinin toplanması ve hazırlanması aşamasını etkiler. Toplanan veriler modelde kullanılmak için hazırlanmalıdır. Veri seti, hazırlama aşamasında matris operasyonları ile derin öğrenme modellerin kullanabileceği formata dönüştürülür. Hazırlanan verinin çalışacağı modeller oluşturulur. Modellerin başarıları veri setine göre değişim gösterdiği için farklı modellerin kullanılıp kıyaslanması önemlidir. Oluşturulan modellerin kendi içinde farklı parametreleri bulunmaktadır. Modellerin parametrelerinin değiştirilerek denenmesi tahmin başarılarını etkilemektedir. Modellerin hazırlanmasından sonra ilgili veri seti ile model eğitilir ve test edilir. Modelin sonuçları görselleştirilerek gerçek verilerdeki yönelim ile tahmin verilerinin yönelimi kıyaslanabilir. Oluşturulan farklı modellerin başarı sonuçlarının değerlendirilmesi son aşamayı oluşturmaktadır. Şekil 6, derin öğrenme sürecindeki aşamaları göstermektedir.



Şekil 6. Derin Öğrenme Sürecindeki Tahmin Aşamaları

Yapay sinir ağlarının problem çözmedeki başarısı, doğrusal olmayan bir model olmasına ve algoritmalar ile öğrenebilme özelliğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Yapay sinir ağlarının istatistiksel modellerden farklı olarak model çalıştırılması için varsayım sınırlılıkları bulunmamaktadır.

Derin öğrenme yöntemleri, lineer olmayan model girdileri ve çıktıları arasında ilişkilerin oluşturulmasında başarılıdır. Derin öğrenme yöntemlerini kullanmanın dezavantajı model sonuçlarının matematik denklemi ile açıklanamamasıdır. Modelin sonuçları daha çok test edilen veri ile gerçek veri arasındaki hataların formüle edilmesi ile bulunmaktadır. Derin öğrenme yöntemlerinde yüksek matematiksel hesaplama gerektiği için yazılım ve donanım kaynaklarına ihtiyaç duyabilmektedir. Derin öğrenme yöntemlerinin öğrenme süresi verinin büyüklüğüne ve kullanılan algoritmaya göre farklılık göstermektedir.

Derin öğrenme ağlarında birçok farklı algoritmalar kullanılmaktadır. Bu algoritmalar farklı problemlere çözümler getirmektedir. Verinin türüne göre derin öğrenme algoritmalarından uygun olanın seçilmesi önemlidir. Farklı algoritmaların ortaya çıkması problemlere göre çözümlerin farklılaşmasından kaynaklanmaktadır.

Evrişimsel Sinir Ağları (Convolutuonal Neural Network-CNN) algoritma yapısı gereği daha çok matris işlemlerinde kullanılmaktadır. Matris işlemlerinin uygulandığı temel alan görüntü işlemedir. Bilgisayar, görüntüleri matris olarak yorumlamaktadır. Matris üzerinde işlemlerin yapılmasında CNN algoritmaları tercih edilmektedir.

Tekrarlayan veya Yinelemeli sinir ağı (RNN), katmanlar arasında iletişimin yönü devamlı ileri olmayan tekrar önceki katmanlara geri bildirim yapılmasına izin veren ağlardır. RNN gizli işlem elemanları sadece önceki veya sonraki katmanlarla değil, kendisi ile veya aynı katmandaki diğer işlemci elemanlarla da ağırlıklı bağlantılara sahiptir. RNN algoritmaları daha çok zaman serileri, dil işleme ve borsa tahmini problemlerinde kullanılmaktadır. LSTM ve Kapı Özyinelemeli Geçitler (GRU), derin öğrenme yöntemleri altında sınıflandırılır. LSTM yönteminin özelliği, uzun ve kısa vadeli veri değişkenlerinin veri üzerindeki olumsuz etkilerini önler. Tahmin sonuçlarını ve tahmin yeteneğini olumlu yönde etkiler. GRU yöntemi, LSTM yöntemine kıyasla daha basit ve daha verimli bir yapıya sahiptir.

Yinelemeli sinir ağlarında, seri içerisindeki önceki değerlerin sonuca etkisi gittikçe düşmektedir. Bu sorunu çözmek için, modelin verileri daha uzun süre depolamasını ve daha doğru tahminler yapmasını sağlayan LSTM ve GRU yöntemi geliştirilmiştir. LSTM ve GRU yöntemleri, derin tekrarlayan sinir ağlarının geliştirilmiş yeni versiyonlarıdır. Derin öğrenme algoritmada, veri seti arasındaki uzun süreli ilişkilerin arasındaki ilişkileri unutabilir. Bu nedenle, LSTM ve GRU, yapılarında derin ve uzun süreli hafıza hücreleri uygulayarak bu sorunları çözmek için geliştirilmiştir

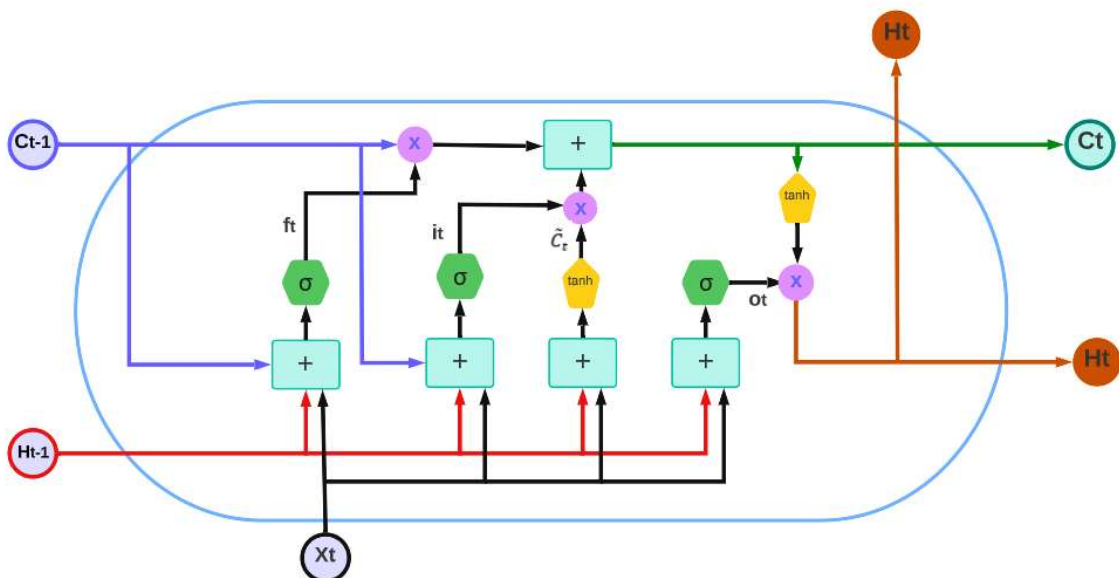
Otoregresif (AR), hareketli ortalama (MA) ve otoregresif hareketli ortalama (ARMA) yöntemleri doğrusal ve durağan olmayan serilerinde kullanımı uygun değildir. LSTM modeli ise doğrusal ve durağan olmayan veri seti üzerinde başarılı sonuçlar vermektedir (Preeti ve Bala, 2019).

İnsanlar düşüncelerini ve kararlarını her bilgi girişi ile sıfırlamaz. Önceden kazanılan bilgiler ile yeni elde edilen bilgiler beraber yeni kararları ve düşünceleri oluşturur. İnsanoğlu, öğrenilen yeni bilgi ile her şeyi unutup tekrar sıfırdan düşünmeye başlamamaktadır. Yinelen sinir ağları da bu felsefeyle benzer şekilde çalışır. Yinelemeli sinir ağları, içinde döngüler bulunan ve bilginin sürekli kullanılmasına izin veren ağlardır.

Derin öğreneme algoritmalarında kullanılan farklı parametreler problemlere göre optimize edilmelidir. Bu parametreler hiper parametre olarak tanımlanır. Algoritmalara göre hiper-parametreler değişmektedir. Derin katmandaki nöron sayısı, nöronda kullanılan aktivasyon fonksiyonu, katmalardaki nöron sayısı, seyreltme (drop out) ve işlenecek verinin modele girdi büyüklüğü (batch-size) derin öğrenme algoritmalarındaki bazı hiper-parametrelerdir.

LSTM mimarisi 1997 yılında Hochreiter ve Schmidhuber tarafından önerildi (Hochreiter ve Schmidhuber, 1997). GRU mimarisi, 2014 yılında Cho ve diğerleri tarafından önerildi(Cho vd., 2014). LSTM ve GRU mimarisi, veri setinden elde edilen bilgileri uzun süre saklayabilir. Zaman serisi veri işleme, tahmin ve sınıflandırma için kullanılırlar. Uzun vadeli bağımlılık problemlerine uyumludurlar. Veri seti üzerindeki bilgileri uzun süre hatırlayabilmektedirler (Manowska, 2020).

LSTM ve GRU da bulunan kapılar (Gates) hücreye giren ve çıkan bilgi akışını düzenler. Kapılar isteğe bağlı olarak bilgilerin geçmesine izin vermenin bir yoludur. Bir sigmoid sinir ağı tabakasından ve noktasal bir çarpma işleminden Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. LSTM Hücresinin Yapısı

LSTM hücresi, bir unutmaya kapısı, bir girdi kapısı ve bir çıktı kapısından oluşmaktadır. Kapılar, hücre girdilerini formüle edilerek kullanılmasını sağlar. Unutmaya kapısı, hangi bilginin tutulacağı veya unutulacağına karar verir. Bir önceki katmandan gelen bilgiler Sigmoid Fonksiyonundan geçer. 0' yakınsa o kadar unutulacak, 1'e yakınsa unutulmayacak anlamına gelmektedir. Unutmaya kapısının denklemi aşağıdaki gibi formüle edilmektedir.

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (1)$$

b_f hata değerini, W_f ağ içindeki ağırlık grafiği, σ sigma fonksiyonunu göstermektedir. f_t unutmaya kapısı, LSTM hücresine giren verinin unutulma durumunu ayarlayan kapıdır.

Girdi kapısı LSTM hücresinin durumunu (cell state) güncellemek için kullanılır. Girdi kapısı, taşınması gereken verileri alır ve diğer hücrelere taşır. Ağ üzerinde veri akışı hücre durumu değişimi yardımıyla sağlanır. Hücre durumu değişimi aşağıdaki gibi formüle edilir. Unutmaya kapsındaki gibi sigmoid fonksiyonu uygulanır.

C_t LSTM hücresinin iç durumunu (internal state) göstermektedir. LSTM hücresine gelen her bir girdi hücrenin iç durumunu değiştirmektedir. C_t hesaplanması aşağıdaki formüller ile hesaplanır.

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (2)$$

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t \quad (3)$$

Girdi kapısı aşağıdaki gibi formüle edilmiştir. b_i hata değeri, W_i ağırlık grafiği, σ sigma fonksiyonudur.

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (4)$$

Çıktı kapısı, bir sonraki katmana gönderilecek değere karar verir. Sigmoid fonksiyonundan geçer. Çıkış kapsı aşağıdaki gibi formüle edilmiştir. b_o hata değeri, W_o ağırlık grafiği, σ sigma fonksiyonudur.

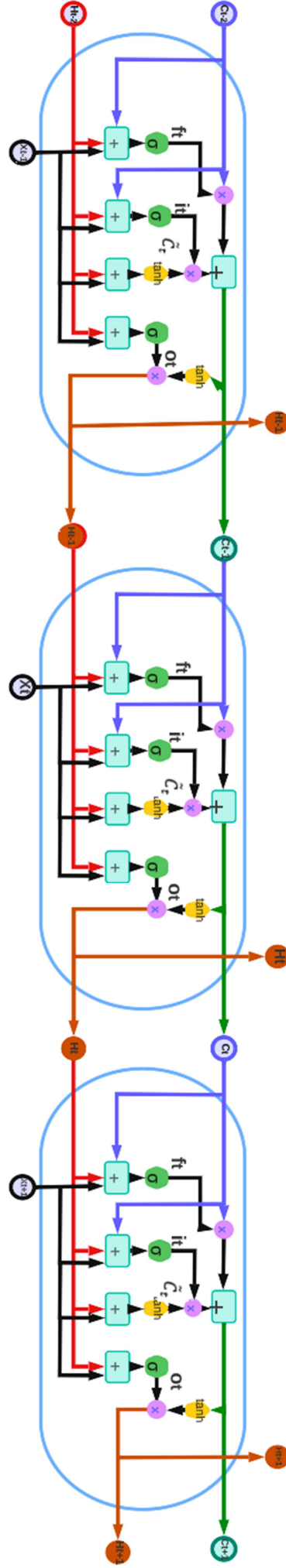
$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (5)$$

H_t hesaplanması aşağıdaki gibi formüle edilmiştir.

$$h_t = o_t * \tanh(C_t) \quad (6)$$

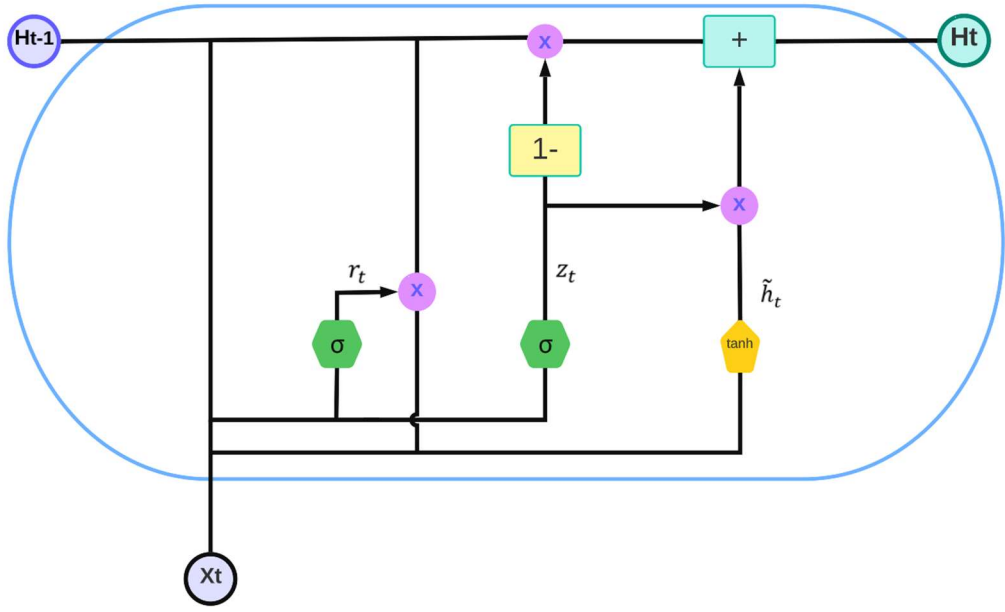
LSTM hücrelerinde oluşan LSTM katmanı, Şekil 8'de verilmiştir. LSTM katman sayısı ve katmandaki LSTM hücresi LSTM mimarisinde kullanılan parametrelerdendir. Bu parametreleri değiştirilerek LSTM modeli oluşturulur.





Şekil 8. LSTM Katmanı

GRU yöntemi, LSTM yöntemine alternatif bir hücre tasarımına sahiptir. GRU yöntemi güncelleme ve sıfırlama kapıları olarak adlandırılan iki kapıdan oluşur. Güncelleme kapısı, önceki adımlarından sonraki adımlarına hangi bilgilerin iletileceğini belirlerken, sıfırlama kapısı, hangi bilgilerin unutulacağını belirler. Güncelleme ve sıfırlama kapıları sırasıyla aşağıdaki formüllerde verilmiştir. GRU Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. GRU Hücresinin Yapısı

Güncelleme kapısı hangi bilgilerin atılacağına ve hangi yeni bilgilerin ekleneceğine karar veren kapıdır. Sıfırlama kapısı, ne kadar geçmiş bilginin unutulacağına karar vermek için kullanılan kapıdır. Güncelleme kapısı aşağıdaki gibi formüle edilmiştir. b_z hata değeri, W_z ağırlık grafiği, σ sigma fonksiyonudur.

$$z_t = \sigma(W_z \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_z) \quad (7)$$

Sıfırlama kapısı aşağıdaki gibi formüle edilmiştir. b_i hata değeri, W_i ağırlık grafiği, σ sigma fonksiyonudur. b_r hata değeri, W_r ağırlık grafiği, σ sigma fonksiyonudur.

$$r_t = \sigma(W_r \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_r) \quad (8)$$

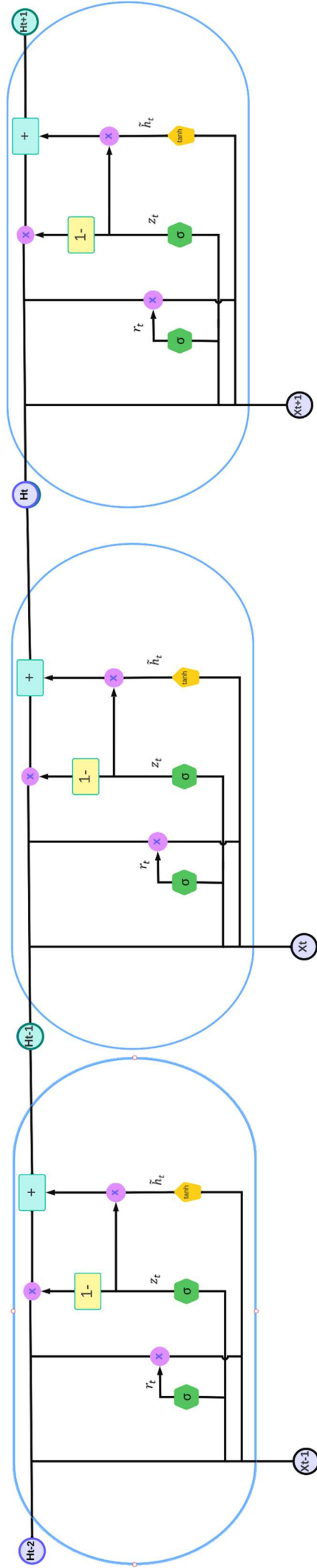
GRU hücresinin iç durumu aşağıdaki formüller ile hesaplanmaktadır. b_i hata değeri, W ağırlık grafiği, σ sigma fonksiyonudur.

$$\tilde{h}_t = \tanh(W \cdot [r_t * h_{t-1}, x_t]) \quad (9)$$

$$h_t = z_t * \tilde{h}_t + (1 - z_t) * h_{t-1} \quad (10)$$

GRU hücrelerinde oluşan GRU katmanı, Şekil 10'da verilmiştir. GRU katman sayısı ve katmandaki hücre sayısı mimaride kullanılan hiper parametrelerdendir. Bu parametreleri değiştirilerek GRU modeli oluşturulur. Ağ mimarisinde bulunan katman sayısı ve her katmandaki nöron sayısı yapay sinir ağının karmaşıklığını belirler. Katman sayısı ve katmanlardaki nöron sayısı arttıkça yapay sinir ağının işlem ve öğrenme yeteneği artar. Aynı zamanda, artan katman ve nöron sayısı ağın genelleme kabiliyeti düşebilmekte ve ağın ezberlemesine neden olabilmektedir. Katman sayısının ve nöron sayısının gereğinden az olması durumunda ise verilerdeki desenler yeteri kadar öğrenilemeyebilir (Bayır, 2006).





Şekil 10. GRU Katmanı

Derin öğrenme modellerinin performanslarını değerlendirmek için farklı performans ölçüm metrikleri kullanılmaktadır. Genel kabul görmüş metrikler; Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata (Mean Absolute Percentage Error - MAPE), Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (Root Mean Squared Error - RMSE), Hata Kareler Ortalaması (Mean Squared Error - MSE), Ortalama Yüzde Hata kareleri Kökü (Root Mean Square Percentage Error -RMSPE) olarak sıralanabilir.

MAPE, ölçekten bağımsız bir ölçü olduğundan bu çalışmada tahmin sonuçlarını değerlendirmek için kullanılmaktadır. MAPE hesaplanışı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır. A_t gerçek değeri, F_t ise tahmin edilen değeri göstermektedir.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (11)$$

Gerçek veri ile tahmin arasındaki farkın karesi alınması nedeniyle, RMSE metriği tahmin hatalarına karşı daha duyarlıdır. RMSE hesaplanışı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır. A_t gerçek değeri, F_t ise tahmin edilen değeri göstermektedir.

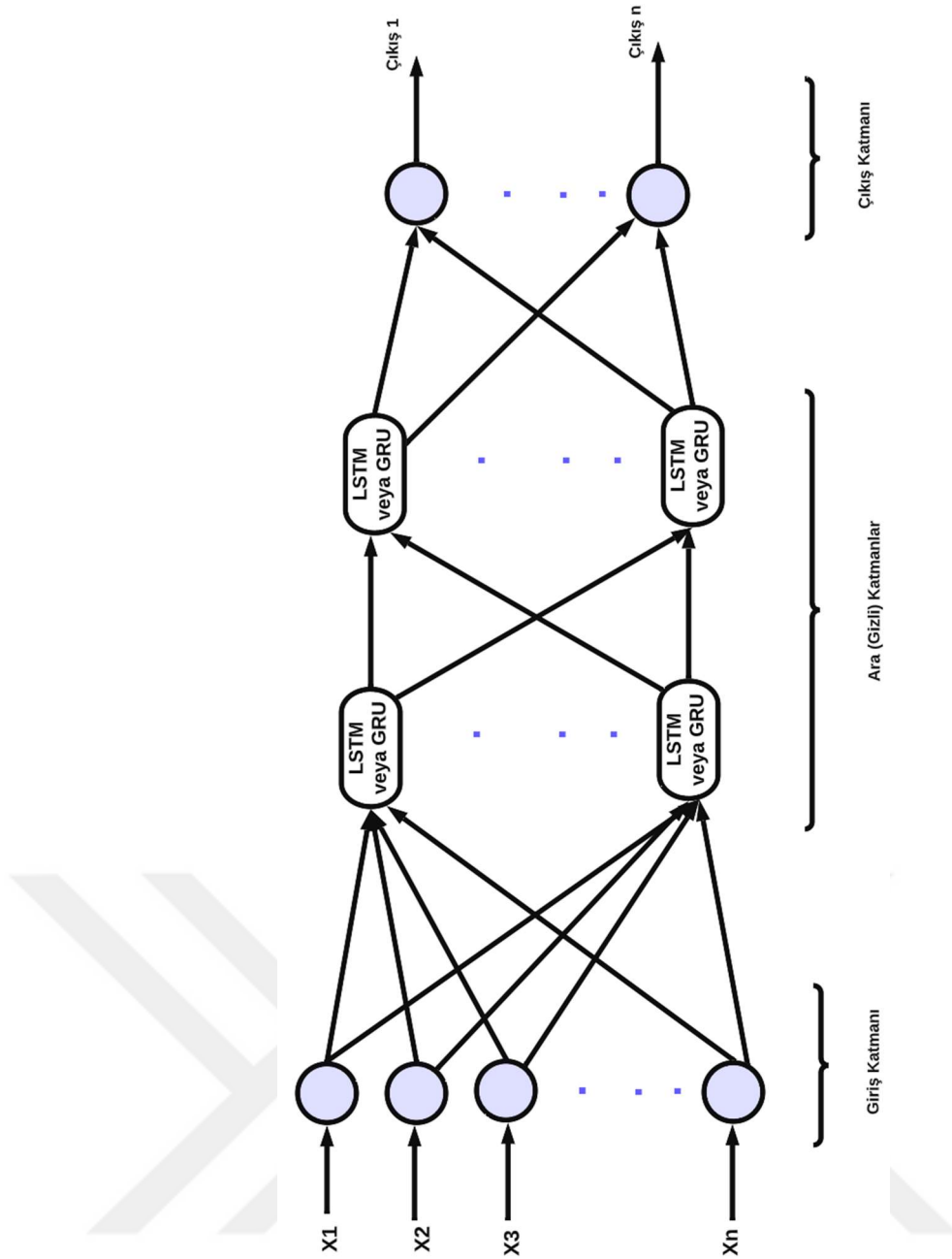
$$RMSE = \sqrt{\sum_{t=1}^n \frac{(A_t - F_t)^2}{n}} \quad (12)$$

RMSPE metriği, gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki yüzdesel farkı hesaplamaktadır. RMSE hesaplanışı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır. A_t gerçek değeri, F_t ise tahmin edilen değeri göstermektedir.

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(\frac{A_t - F_t}{A_t} \right)^2} \quad (13)$$

LSTM ve GRU hücreleri kullanılarak derin öğrenme modelleri oluşturulmaktadır. Oluşturulan modellerin, farklı veri setlerinde aynı başarıyı gösterme durumu yoktur. Veri seti ile modeli beraber düşünmek gerekmektedir. Probleme göre veri seti belirlenmektedir. Derin öğrenme modeli oluşturulurken,

problem, veri seti ve model yetkinliği beraber düşünölmelidir. Modelleri probleme Şekil 11, derin öğrenme modelinin katmanlarını göstermektedir.



Şekil 11. Derin Öğrenme Modellerinin Katmanları

Rüzgâr ve hidrolik enerji kaynaklarından elektrik üretimi miktarı tahmin çalışmasını derin öğrenme yöntemlerini ile yapılmıştır. Bu çalışmada 2019 ve 2020 yıllarındaki rüzgâr enerjisi ve hidrolik enerjisi ile saatlik elektrik üretim verisi kullanılmıştır. Bu veri seti üzerine kurgulanan modellerde LSTM modellerinin, regresyon modellerinden daha başarılı olduğu görölmektedir (Gökgöz ve Filiz, 2021).

Elektrik yükü tahmini, enerji üretimi ve tüketiminin karar verme sürecinde önemli bir role sahiptir. Elektrik yük zaman serilerinin davranışı doğrusal olmayan ve mevsimsel olduğundan, yapay sinir ağları verilerdeki doğrusal olmayan

davranışı öğrenmek ve tahmin etmek için en uygun modellerdendir (Kumar vd., 2018).

RNN iki varyantı olan LSTM ve GRU modelleri kullanılarak Almanya rüzgâr enerjisi ile elektrik üretim miktarı tahmin edilmiştir. LSTM varyantı olan GRU, daha az parametre içeren basitleştirilmiştir yapıya sahiptir. GRU ve LSTM modelleri, geçmiş zaman serisi veri setini bellekte tutabilmeleri bakımından standart yapay sinir ağlarına göre avantajlıdır (Farah vd., 2022).

Gökgöz ve Filiz, derin öğrenme yöntemlerini kullanarak Türkiye için rüzgar enerjisi ile elektrik üretimi tahmini yapmışlardır. Yapılan çalışmada derin öğrenme hiper parametreleri olan katman sayısı, nöron sayıları, seyreltme değerleri değiştirilerek modeller test edilmiştir. LSTM ve GRU modelleri, MAE değerlerine göre benzer performans göstermiştir(Gökgöz ve Filiz, 2020).

Etkili rüzgâr enerjisi tahmini, dünyanın sürdürülebilir kalkınmadaki uzun vadeli hedefini kolaylaştıracaktır. Rüzgâr enerji kaynağının bir dezavantajı, yüksek değişkenliğinde yatmaktadır. Yüksek değişkenlik nedeniyle, rüzgâr enerjisi ile elektrik üretim miktarı da değişkenlik göstermektedir. Kisvari ve diğerleri tarafından, GRU ve LSTM algoritması ile başarılı bir şekilde geliştirilmiştir. GRU metodunun, LSTM metodundan daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır (Kisvari vd., 2021).

Rüzgâr enerjisini ile elektrik üretim tahmini, doğrusal olmama ve doğanın kaotik özellikleri nedeniyle yanlış tahminlere açık bir süreçtir. Dalgalanmalar ve kontrol edilemeyen rüzgâr enerjisi, rüzgârdan sabit güç üretmeyi zorlaştırır. Bu nedenle, rüzgâr enerjisini tahmin etmek için verimli bir model sağlamak önemlidir. Rüzgâr sistemlerinin çıkış gücü ile rüzgâr hızı ve yönü arasındaki ilişki nedeniyle, derin öğrenme modelleri ve algoritmaları çoğunlukla rüzgâr hızı verilerine ve bilgilerine dayanarak geliştirilmiştir. Güneş enerjisini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan modellerin, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri yönetmesi gerektiğinden, bilgisayar teknolojisinin ilerlemesiyle birlikte, hedefleri olarak bu tür bir tahmine sahip birçok derin öğrenme modeli geliştirilmiştir (Forootan vd., 2022).

Güneş enerjisini ile elektrik üretim tahmini için derin sinir ağı oluşturmuştur. Derin öğrenme yönetiminin geleneksel regresyondan daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir (W. Lee vd., 2018).

Fotovoltaik (PV) enerji üretimi, güneş enerjisinden enerji elde etmek için kullanılan bir yöntemdir. Güneş enerjisindeki rastgele dalgalanmaların doğal özellikleri nedeniyle, şebekeye bağlı PV enerji santrali, dağıtılmış PV'ler ve bina bütünleşmiş PV'ler gibi PV gücünde değişkenlikler fazladır. Bu nedenle, günlük PV güç tahmini, şebeke yöneticisinin PV güç çıkışı verilerini önceden elde etmesini ve rastgele dalgalanmaların etkisini azaltmasını sağlamak için büyük önem taşımaktadır. Wang ve diğerleri yaptıkları çalışmada, LSTM metodu kullanılarak güneş enerjisi ile elektrik üretim tahmin modeli oluşturulmuştur (Wang vd., 2020).

2.3. Optimal Enerji Üretim Karışımı

Enerji karışımı, enerji kaynaklarındaki arz ve talepteki belirsizliklerden kaynaklanan riski en aza indiren bir enerji kaynağı kombinasyonudur. Genel enerji karışımı metodolojinde, bir planlama ufku üzerindeki gelecekteki belirsizliklerde enerji güvenliği, çevresel etkiler, ekonomik ve dış politika koşulları göz önüne alarak istenen performans kriterlerindeki farklılıkları en aza indirmektir.

Optimizasyon, bir sistemdeki kaynakların en verimli şekilde kullanılarak belirli amaçlara ulaşmasını sağlar. Optimizasyon, modelin oluşturulması ve modelin çözümlenmesi bileşenlerinden oluşmaktadır. Modelin oluşturulması sürecinde ilgili problemin karar değişkenlerinin, sınırlılıklarının ve amacının belirlenmesi gerekir.

Doğrusal programlama modelleri en yaygın olarak kullanılan optimizasyon modelleridir ve bilimsel, endüstriyel ve ekonomik problemlerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrusal programlama problemi üç bölümden oluşur: Amaç fonksiyonu maksimizasyon ya da minimizasyon amaçlı olabilir. Karar değişkenlerinin alacağı değerleri sınırlayan kısıtları içerir. Karar değişkenlerinin negatif olmama gerekliliğini belirleyen bir kısıt içerir.

Elektrik enerjisi ikincil enerji kaynakları grubuna girdiği için, üretiminde birincil enerji kaynakları kullanılmaktadır. Ülkelerdeki genel elektrik politikası, yerli kaynakların ve teknolojinin desteklediği en uygun enerji kaynaklarının kullanımı üzerinedir. Ülkeler özelinde yakıt karışımları farklılıklar gösterir. Örneğin Norveç

çoğunlukla hidroelektriğe önem verirken, Fransa geniş nükleer programına ve Polonya neredeyse tamamen kömüre bağımlıdır (Chalvatzis ve Hooper, 2009).

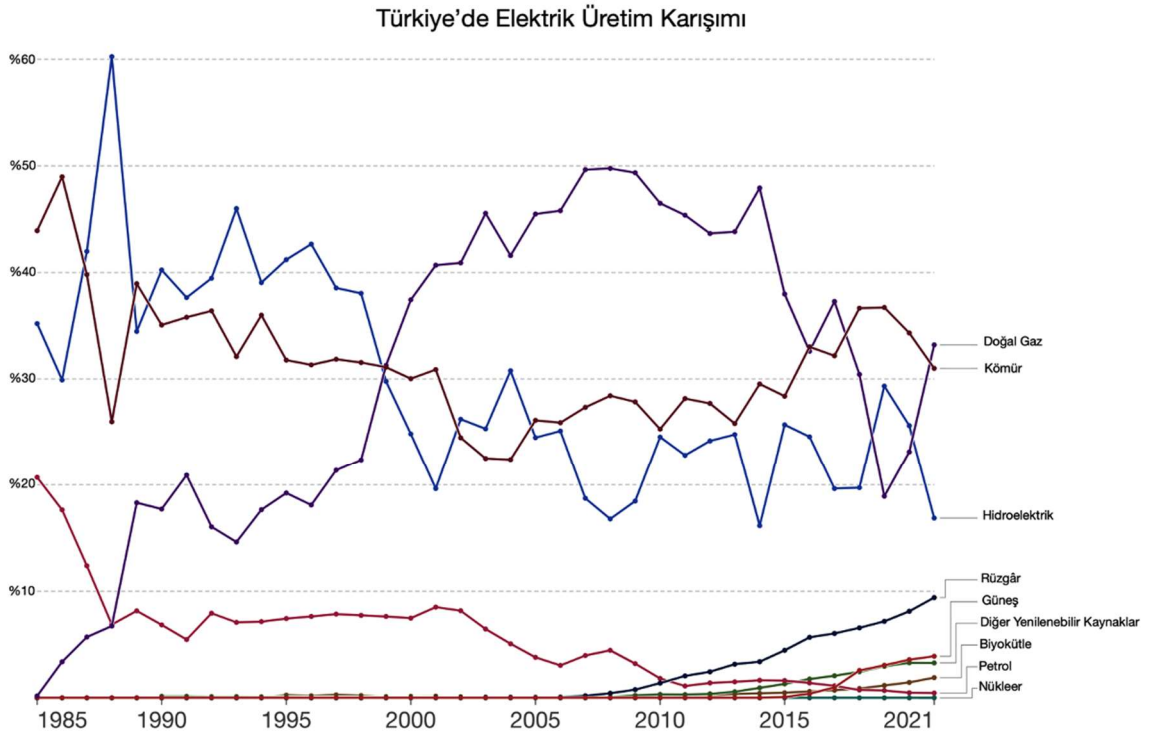
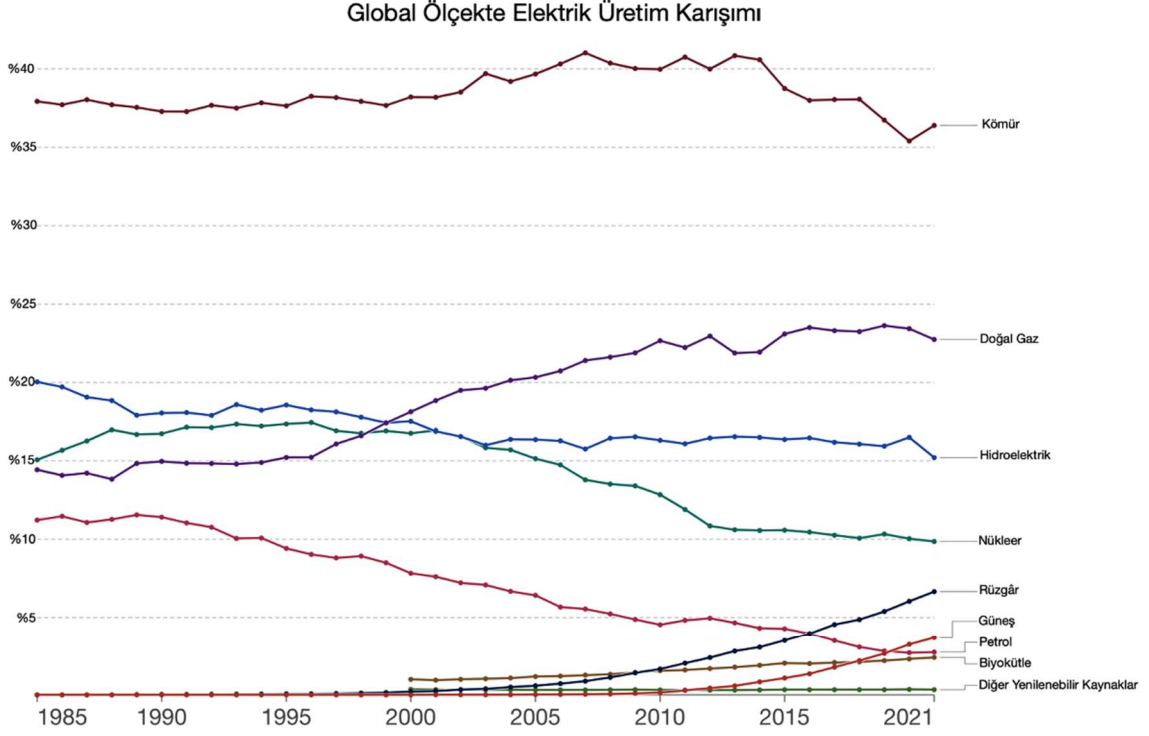
Enerji güvenliği açısından tek bir enerji kaynağına bağlı olmak ilgili enerji kaynağında çıkabilecek teknik ve politik sorunlarda ilgili kaynakta arz sorunlarına neden olacaktır. Bu nedenle enerji üretim karışımı ile enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi enerji güvenliği açısından elzemdir.

Enerji kaynaklarının fiyat değişimleri sonucu ekonomide olabilecek sorunlara karşı enerji karışımı ile çözümler bulunabilir. Enerji kaynaklarının fiyatlarındaki değişimler ülkelerin ekonomileri üzerinde direkt etkiye sahiptir. Türkiye gibi enerji kaynaklarında dışa bağımlılığı yüksek olan ülkeler, ithal edilen herhangi bir enerji kaynağındaki fiyat değişiminden doğrudan etkilenir. Enerji üretim karışımında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile ülkeler kendilerini enerji krizlerine karşı belli seviyede güvenceye alabilirler.

Enerji karışımında yenilenebilir enerjilerin kullanımının artırılması dünya iklim ve çevre krizine karşı atılacak önemli adımlardandır. Enerji karışımında kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranının artırılması teknik olarak mümkündür. Bu geçisin hızlandırılması bir anda olmayacağı için yenilenebilir enerji oranlarının artırılması ve bu çerçevede planların oluşturulması gerekir.

Dünyada ve Türkiye’de elektrik enerjisi için kullanılan enerji kaynaklarının Şekil 12’de verilmiştir. Elektrik enerjisi üretiminde kömürün kullanımının en yüksek orana sahip olduğu görülmektedir. Doğal gaz, 2000 yıllarında hidrolik güç kullanımını geçerek elektrik üretiminde ikinci en yüksek enerji kaynağı olmuştur. Kömür ve doğal gaz hala fosil yakıtlar olarak dünyadaki elektrik üretiminin yarısından fazlasını karşılamaktadır. Bu durum global ölçekte iklim krizlerinin en önemli sebeplerindendir. Rüzgâr ve güneş enerjilerinin elektrik üretiminde kullanılma oranlarında pozitif ivmeler görülmektedir. Bu artışlar ile 2030, 2050 ülkelerin karbon sıfır hedeflerine ulaşması için önemli adımlardır. Global olarak enerji karışımlarında yenilenebilir enerji oranlarının artış göstermesi ve fosil yakıtların oranlarında azalışların olması iklim krizlerinin çözülmesi adına ümit vermektedir.

Türkiye’de elektrik üretimi için kullanılan enerji kaynaklarının kullanım Şekil 12’de verilmiştir. 2000 yılından itibaren doğal gaz, elektrik üretiminde kullanılan önemli kaynaklardan olmuştur. Hidroelektrik kullanım oranı 1990 yılından önce %60 seviyesine ulaşırken, 2021 yılında bu oran %20 seviyesinin altına gerilemiştir.



Kaynak: (Global Energy Mix, 2022).

Şekil 12. Dünya’da ve Türkiye’de Elektrik Üretim Karışımı

Endonezya bölgesi için yapılan çalışmada; rüzgâr, güneş, jeotermal, kömür, biyokütle ve doğal gazdan oluşan çeşitli yakıt kaynakların karışımı değerlendirilmiştir. İlgili çalışma, 15 yıllık dönemi kapsamaktadır. Çalışma kapsamında enerji güvenliği ve sera gazları göz önünde bulundurularak enerji karışımları oluşturulmuştur (Thangavelu vd., 2015).

Türkiye'nin 2050 yılına kadar %100 yenilenebilir enerjiye geçişi, saatlik çözümlenmiş bir model kullanılarak analiz edilmiştir. Enerji geçişi için senaryolar oluşturulmuştur. Kilickaplan tarafından elde edilen sonuçlardan biri Paris Antlaşması'na göre 2050 yılına kadar kalan sürede Türkiye için %100 yenilenebilir enerjiye geçişin mümkün olduğudur (Kilickaplan vd., 2017).

Birleşik Arap Emirlikleri'nin 2030 yılındaki yenilenebilir enerji karışım; elektrik fiyatını minimumda tutarken sera gazı emisyonlarını azaltma hedefine ulaşmak için analiz edilmiştir (Said vd., 2018).

Avusturalya için 2030 yılına kadar enerji karışımı değerlendirilmiştir. Yenilenebilir enerjinin payının 2030 yılına kadar yaklaşık %30 olacağı öngörülmüştür (Rosa ve Castro, 2020).

Kore'de 2030 yılına kadar elektrik üretimi için en uygun enerji karışım modellerini çalışılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, 2030 yılı için doğal gaz %26,9, kömür %21,1, nükleer %39,0 ve yenilenebilir enerji %13,0'ı olacağı hesaplanmıştır (Geem ve Kim, 2016).

Elektrik üretimi ile ilişkili karbondioksit emisyonlarında bir azalma, enerji üretimi için rüzgâr, jeotermal, hidrolik ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılmasıyla sağlanabilir. On yıl içinde yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak elektrik üretiminden kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının azaltma potansiyeli araştırılmıştır. Bu amaca ulaşmak için, 2001-2008 yılları arasında çalışan fosil yakıtlı enerji santrallerinden kaynaklanan karbondioksit emisyonları hesaplanmış ve daha sonra bu sonuçlar kullanılarak, her yakıt türü için ülkeye özgü emisyon faktörleri hesaplanmıştır (Ari ve Aydınalp Köksal, 2011).

Karbon sıfır hedefi için uzun vadeli bir enerji karışımı optimizasyon modeli önerilmektedir Japonya için yapılan vaka çalışmasında, optimum kapasite araştırılmıştır (Negishi, 2022).

Meksika için biyokütle, rüzgâr ve güneş enerjilerinin optimum karışımı çalışılmış ve yenilenebilir enerjinin maksimum olacağı karışım oluşturulmuştur. Mevcut bir enerji sisteminin talebini karşılayabilecek enerji kaynaklarının optimal kombinasyonu tanımlanmıştır (Vidal-Amaro vd., 2015).

Romanya'da, hidroelektrik santrallerinin yüksek varlığı nedeniyle, güneş ve rüzgâr enerjisinden kaynaklanan değişimler, oldukça kolay dengelenebilir. Fransa'da ise eğilim, nükleer payını 2025 yılı sonuna kadar %50'ye düşürmek ve eski nükleer ünitelerin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla değiştirilmesi yönündedir. Buna rağmen, Fransa'da enerji karışımı zayıftır ve nükleer birimler bazen gerekli enerjiyi dengelemek için kullanılmalıdır (Pavel vd., 2017).

Türkiye'nin elektrik üretim sistemi için enerji karışımı çalışılmıştır. Sürdürülebilir bir geleceğe götüren enerji karışımı için belirli bir reçete oluşturmak imkânsızdır; ancak, girdileri zaman içinde farklı senaryo analizleri yapmak için değiştirilebilen matematiksel programlamaya dayalı sistematik bir yaklaşım çalışılmıştır (Alkan, 2014).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. Türkiye İçin Uzun Dönemli Elektrik Üretim Senaryo ve Tahmin Uygulamaları

3.1. Amaçlar, Veri, Sınırlılıklar ve Yöntem

3.1.1. Amaçlar

Türkiye'deki elektrik üretimi sonucu ortaya çıkan karbondioksit emisyonlarının azaltma potansiyeli bu tezde çalışılmıştır. Uluslararası taahhütlere göre senaryolar oluşturulmuş ve LEAP yaklaşımı ile senaryolar değerlendirilmiştir. LEAP yaklaşımı dışında, 2030 yılına kadar elektrik üretimi derin öğrenme modelleri ile tahmin edilmiştir. Elektrik üretimi sonucu oluşacak karbondioksit emisyonunu minimumda tutacak amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Amaç fonksiyonunu gerçekleştirecek optimal enerji karışımı doğrusal programlama ile hesaplanmıştır.

Bu tez çalışmasının amaçlarını birkaç başlıkta belirtebiliriz. Bu çalışmanın amaçlarından ilki, Türkiye'nin INDC hedeflerine ulaşmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının katkılarını araştırmaktır. Türkiye, Aralık 2019 tarihli Avrupa Yeşil Mutabakat ve Aralık 2015 tarihli Paris Antlaşması gibi uluslararası iklim antlaşmalarından dolayı veya doğrudan etkilenmektedir. Paris Antlaşması ile iklim taahhütleri bulunmaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakatı ile de Avrupa ile ekonomik etkileşimi bulunmaktadır. Türkiye'nin 2030 yılına kadarki enerji üretim karışımlarını iklim etkilerini göz önünde bulundurarak tahmin etmeye çalışılmaktadır. Çalışmanın bulguları ve sonuçları, Türkiye'nin karbondioksit emisyonlarının izlenmesi ve raporlanması, BMİDÇS'ye sunulan raporlar için Türkiye'nin ulusal niyet mektubunun (NDC) güncellenmesi konusunda ışık tutabilecektir.

Çalışmanın ikinci amacı, 2023 ile 2030 yılları arasındaki Türkiye yenilenebilir enerji karışımını analiz etmektir. Türkiye'de uzun dönemli bir enerji sistem planlamasına nicel olarak katkıda bulunmaktır. Uzun vadeli tahmin modelleri çalıştırılarak gelecekteki elektrik üretim karışımları oluşturulmuştur. Gelecekteki olası karışımlar hakkında karar vericilere, politika yapıcılara sayısal sonuçlar sunulmaktadır.

3.1.2. Veri

Bu çalışmada kullanılan veri seti 2017 Ocak ile 2022 Haziran ayları arasındaki saatlik elektrik üretim miktarı ve elektrik talep miktarından oluşmaktadır. Saatlik elektrik üretim miktarları EPIAS şeffaflık platformundan alınmıştır. Elektrik üretim ve tüketim miktarları halka açıktır ve EPIAS tarafından gerçek zamana yakın olarak yayımlanmaktadır. EPIAS Şeffaflık platformundaki saatlik üretim verileri doğal gaz, akarsu, kömür, rüzgâr, güneş ve biyokütle gibi alt kırımlar ile verilmektedir. Tüm kaynaklar için aynı zaman aralığı olan 2017 Ocak ile 2022 Haziran ayları arası kullanılmıştır. Tahmin çalışmasında kullanılan haftalık veri seti [0,1] arasında ölçeklendirilmiştir.

Elektrik talep projeksiyon veri seti, Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporundan alınmıştır. Hazırlanan bu rapor, 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'nun 20'nci maddesinin 3'üncü fıkrasının a bendinde Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporu gelecek 20 yılı kapsar ve iki yılda bir Bakanlık tarafından hazırlanır hükmü çerçevesinde hazırlanmıştır.

İnsanoğlunun elektrik enerjisine olan bağımlılığı gittikçe artmaktadır. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Elektrik Talep Projeksiyonu Raporu, nüfus ve hane halkı gibi demografik kriterler, gayri safi yurt içi hasıla, sektörler katma değer gibi makroekonomik faktörler, uluslararası enerji fiyatları, enerji kaynaklarının potansiyeli, teknolojik gelişmeler, verimlilikteki değişimler, şebeke kayıpları ve elektrikli araçların yaygınlaşması göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Bu tez çalışmasında, hesaplanan elektrik üretim miktarı, bakanlık tarafından belirtilen rapordaki enerji talebinin karşılanması hedeflenmiştir.

Türkiye'de elektrik üretimi için kullanılan temel birincil enerji kaynakları doğal gaz, linyit, kömür, rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle ve hidroliktir. Kaynak bazlı elektrik üretim miktarları arasındaki ilişkileri incelemek için aylık üretim değerlerine göre korelasyon matrisi oluşturulmuştur. Korelasyon matrisinde değerler +1 ile -1 arasında değişmektedir. Enerji kaynakları arasındaki ilişkilerden -1'e yakın olan değerler "negatif korelasyon", +1'e yakın olan değerler "pozitif korelasyon" olarak değerlendirilir. Pozitif korelasyon, iki değişkenin beraber artması veya azalması anlamına gelir. Negatif korelasyon ise iki değişkenden birini arttığı durumda

değerinin azalmasıdır. Korelasyon matrisinde iki değişken arasındaki korelasyon değerinin sıfıra yakın olması negatif veya pozitif ilişkinin olmadığı anlamına gelmektedir.

Elektrik üretmek için kullanılan temel enerji kaynaklarının korelasyon matrisi Şekil 13'te verilmiştir. Enerji kaynakları kullanımları arasında negatif ya da pozitif ilişkilerin olduğu görülmektedir.



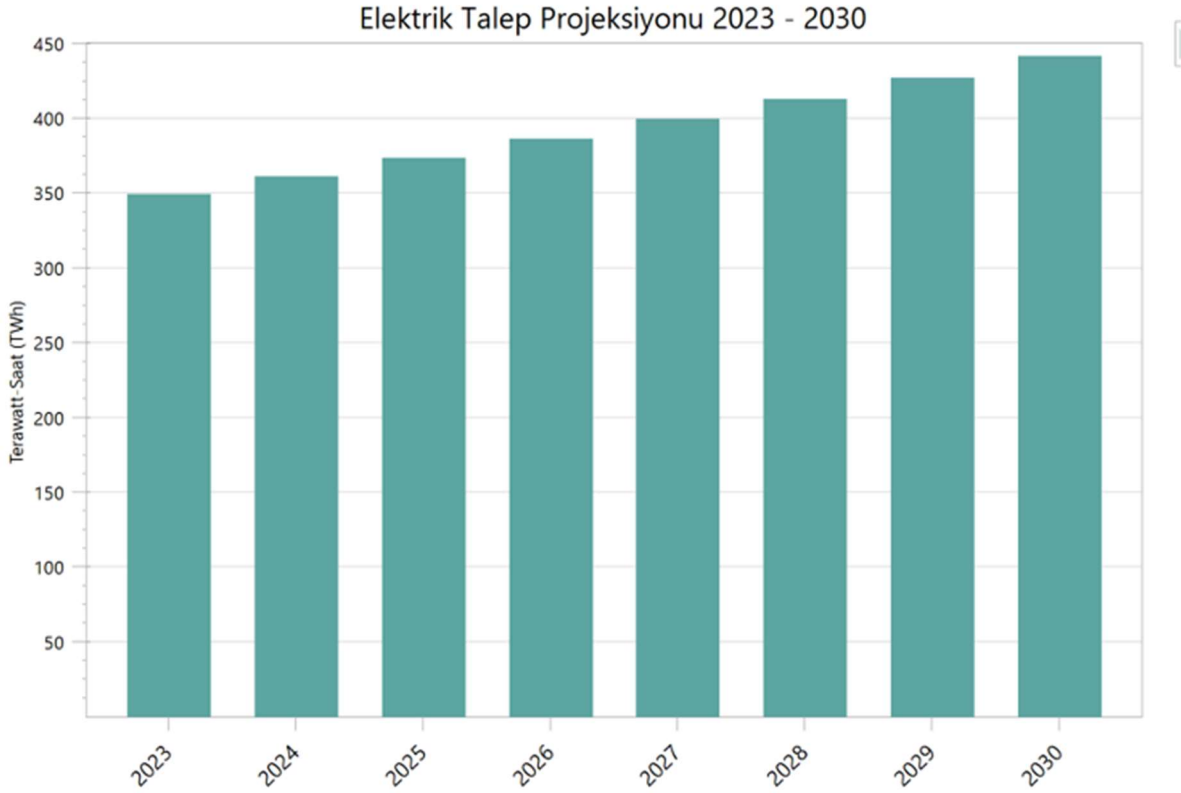
Şekil 13. Türkiye Elektrik Üretimi İçin Kullanılan Birincil Enerji Kaynaklarının Korelasyon Matrisi

Korelasyon matrisine göre negatif korelasyonlar; toplam elektrik üretimi ve hidroelektrik arasında, doğal gaz ve jeotermal arasında, doğal gaz ve biyokütle arasında, doğal gaz ve hidroelektrik arasında, linyit ve hidroelektrik arasında, rüzgâr ve hidroelektrik arasında, güneş ve kömür arasında görülmektedir. Doğal gaz ve hidroelektrik arasındaki korelasyon en yüksektir. Korelasyon matrisinden çıkan diğer bir sonuç toplam elektrik üretimi artarken, hidrolik ile elektrik üretiminde azalış olduğudur. Hidroelektrik ile elektrik üretiminin önemli yararlarından biri elektrik üretimi sırasında ani azalış veya artışları dakikalar içerisinde dengeleyebilecek özellikte olmasıdır.

Korelasyon matrisine göre pozitif korelasyonlar incelendiğinde, toplam elektrik üretiminin hidrolik enerjisi dışında diğer enerji kaynakları ile pozitif korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Doğal gaz ile linyit, rüzgâr, güneş ve kömür arasında; linyit ile rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle ve kömür arasında, rüzgâr ile güneş arasında; rüzgâr ile jeotermal, biyokütle ve kömür arasında; güneş ile jeotermal, biyokütle, hidroelektrik arasında; jeotermal ile biyokütle, hidroelektrik ve kömür arasında; biyokütle ile hidroelektrik ve kömür arasında pozitif korelasyonlar olduğu görülmüştür.

Elektrik üretiminde en fazla pozitif korelasyon, biyokütle ile güneş arasında bulunmaktadır. Elektrik üretiminde en fazla negatif korelasyon, hidroelektrik ile toplam elektrik üretimi arasındadır. Korelasyon değerlerinin sıfıra yakın olması iki değişken arasında doğrusal bağlantının olmadığını gösterir. Hidroelektrik ile rüzgâr, hidroelektrik ile güneş, hidroelektrik ile jeotermal, hidroelektrik ile biyokütle, biyokütle ile kömür arasındaki korelasyon değeri sıfıra yakındır. Hidroelektrik ile elektrik üretiminin diğer kaynakların birçoğu ile korelasyon değerinin sıfıra yakın olduğu görülmektedir.

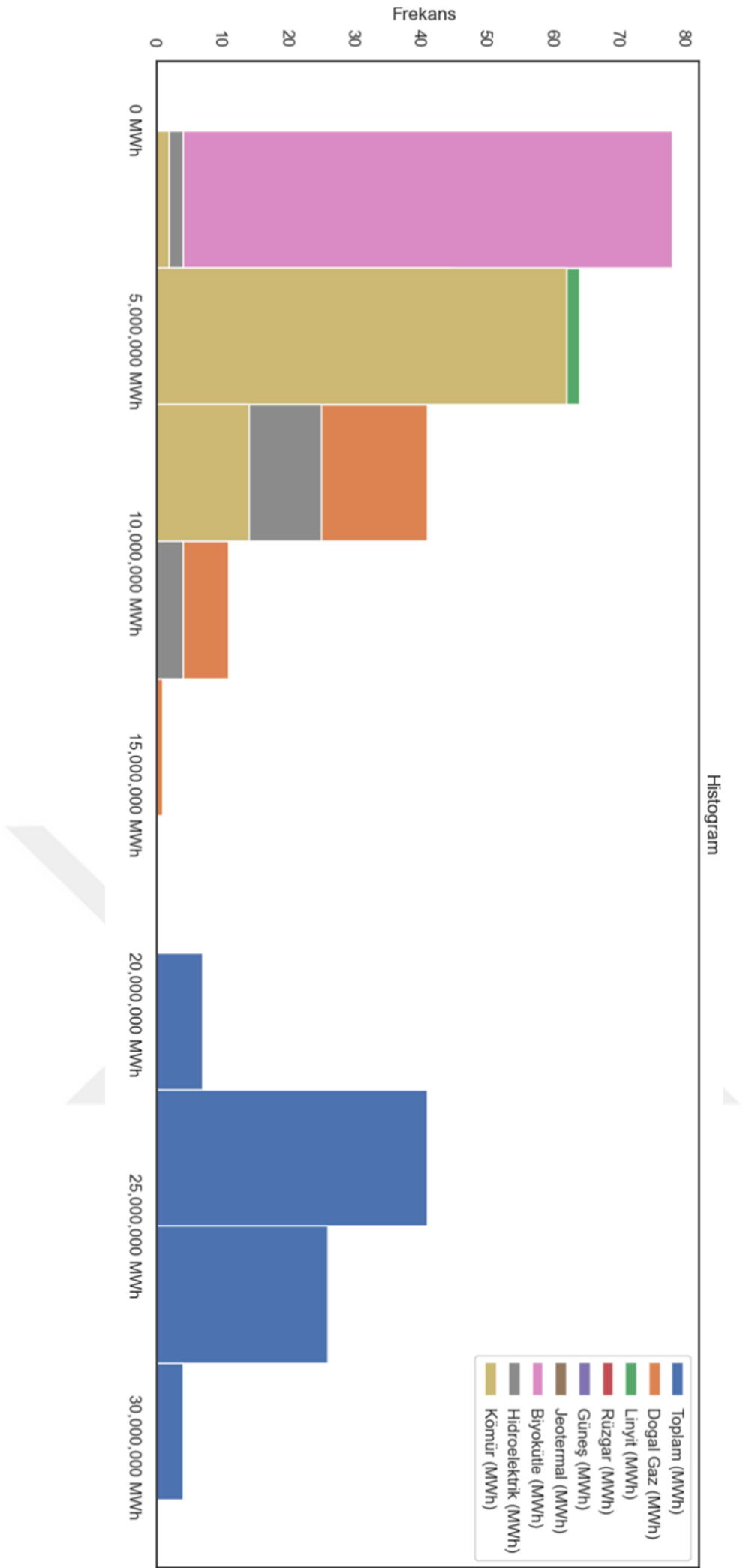
Oluşturulan senaryolarda ve derin öğrenme ile tahmin hesaplamalarındaki elektrik üretim miktarı, Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan elektrik talep miktarını karşılaması gerekmektedir. Bakanlık tarafından belirtilen elektrik talep projeksiyonu, elektrik tüketim davranışlarındaki değişimleri de içermektedir. Elektrik talep projeksiyonu tahmini de yapılabilir. Fakat bu tez çalışmasında Bakanlık tarafından belirtilen değerler kullanılmıştır. Şekil 14, 2023 ile 2030 yılları arasındaki elektrik taleplerinin yıllara göre değişimi göstermektedir. Yıllar ilerledikçe elektrik talebinde artış görülecektir. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı raporuna göre, 2023 yılında Türkiye'nin 350 TWh olan elektrik talebinin 2030 yılında 450TWh seviyesine ulaşacağı öngörülmektedir.



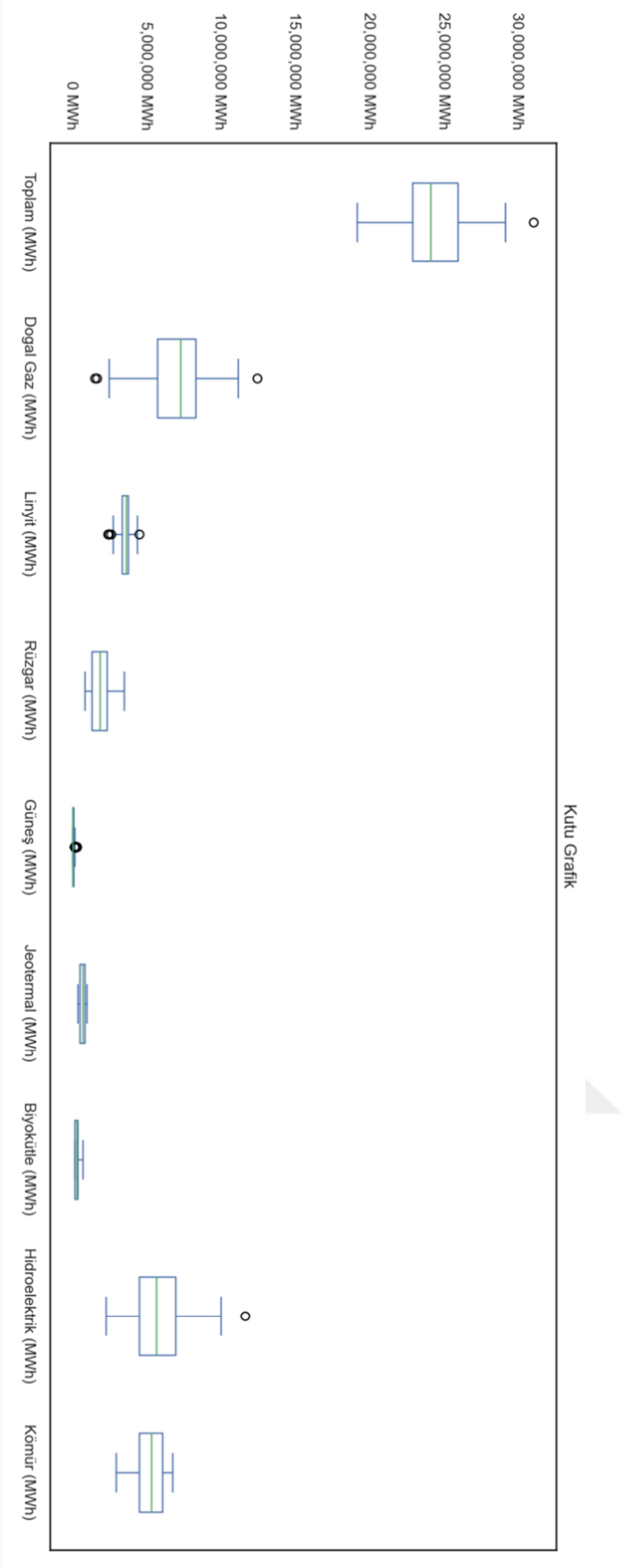
Şekil 14. Türkiye 2023-2030 Yılları Elektrik Talep Projeksiyonu

Optimizasyon çalışmasında, karbondioksit emisyonunu minimize edecek enerji karışımı hesaplanmaya çalışılmıştır. Elektrik üretiminde linyit kullanılarak üretilen elektrik MWh başına 1.274 ton karbondioksit emisyonu ortaya çıkarmaktadır. Bu değerler kömürde 0.868 ton, doğal gazda 0.371 tondur. Bu değerler enerji kaynağının kalitesine ve santral yapısına göre farklılık gösterebilmektedir. Karbondioksit emisyon değerleri Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının Türkiye elektrik üretimi emisyon faktörleri çalışmasından alınmıştır.

Elektrik üretimi için kullanılan kaynaklarının beraber gösterildiği histogram dağılımı Şekil 15'te verilmiştir. Histogram dağılımı ile birincil enerji kaynaklarının ve toplam elektrik üretimi miktarının beraber gösterimi amaçlanmıştır. Birincil enerji kaynakları ile elde edilen elektrik miktarındaki farklılıklar görselleştirilmiştir. Elektrik üretiminde birincil enerji kaynakları arasında doğal gaz, kömür ve hidroelektrik en fazla katkırı sağlamaktadır. Elektrik üretimi için kullanılan enerji kaynaklarının beraber gösterildiği kutu grafiği Şekil 16'da verilmiştir. Kutu grafiği incelendiğinde, doğal gaz, kömür ve hidroelektrik ile elektrik üretim veri setlerinin yayılımının daha büyük olduğu görülmektedir. Linyit, güneş, jeotermal ve biyokütle veri setlerinin dağılımı küçüktür. Hidroelektrik ve doğal gaz ile elektrik üretim miktarlarında aykırı değerlerin olduğu da görülmektedir



Şekil 15. Türkiye’de Elektrik Üretimi İçin Kullanılan Birincil Enerji Kaynaklarının Histogram Diyagramı



Şekil 16. Türkiye’de Elektrik Üretimi İçin Kullanılan Birincil Enerji Kaynaklarının Kutu Grafiği

3.1.3. Sınırlılıklar

Bu tez çalışmasında hesaplanan karbondioksit emisyonları, elektrik üretimi sonucu fosil kaynaklardan kaynaklanan emisyon değerleridir. Evlerdeki ısıtma sonucunda oluşacak emisyonlar, ulaşım sonucu oluşan emisyonlar ve sanayide üretilen karbondioksit emisyonları bu çalışmanın dışındadır. Elektrik üretimi için kullanılan fosil yakıtlar karbondioksit emisyonunun oluşumunda ciddi bir yekûn tutmaktadır.

Senaryo analizinde ve tahmin modellerinde kullanılan veri seti, EPIAŞ şeffaflık platformundan alınmıştır. EPIAŞ verilerindeki sınırlılıklar bu çalışmanın da veri sınırlılıklarındandır.

Senaryolar oluştururken Türkiye'nin uluslararası taahhütleri referans alınmıştır. Nükleer enerji senaryosu ülkenin nükleer enerjisi hedefleri göz önüne alınarak oluşturulmuştur.

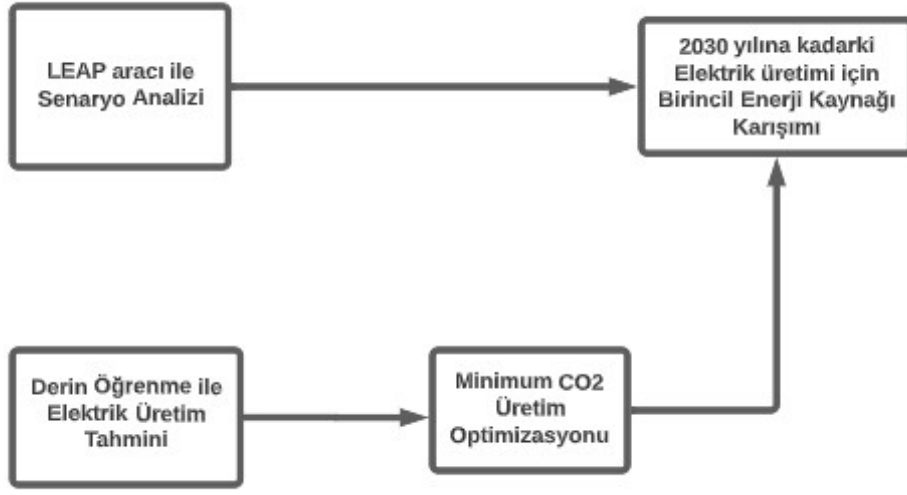
Akıllı şebekeler, 5G haberleşme, nesnelerin interneti, enerji bataryalarının gelişimi, güneş enerjisi panellerinin verimliliklerindeki artışlar gelecekteki enerji kaynaklarının karışımı oranlarını derinden etkileyecektir. Akıllı şebekeler sayesinde veriler daha fazla toplanarak daha optimize elektrik üretimi karışım senaryoları oluşturulabilir. 5G haberleşme ve nesnelerin interneti gibi teknolojik gelişmeler sonucunda daha hassas elektrik üretim karışımları belirlenebilir. Enerji bataryalarının gelişimi sayesinde yenilenebilir enerjide kazanılan ivme daha da artabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli dezavantajı doğa olaylarına doğrudan bağlı olmasıdır. Enerji bataryaları sayesinde doğa olaylarına olan bağımlılık azaltılarak daha fazla yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapılabilir. Güneş enerjisi panellerinin daha verimli ve daha ucuz olması, panellerin daha fazla yaygınlaşmasını sağlayacaktır. Bu teknolojik değişimler elektrik üretimi kaynaklarının kullanımında anlamlı hale gelmiştir ancak yukarıdaki teknolojik alanlarda oluşabilecek radikal bir değişim tez çalışmasında kullanılan senaryoları ve tahmin model sonuçlarını radikal seviyede etkileyebilir.

3.1.4. Yöntem ve Model

Bu tez çalışmasında, iki farklı yaklaşım ile Türkiye elektrik üretim karışım miktarları ve karbondioksit emisyon değerleri hesaplanmıştır. Yaklaşımların ilki, senaryo temelli yaklaşımdır. Senaryo temelli yaklaşımda Türkiye'nin uluslararası taahhütleri göz önüne alınarak üç senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolar sonucunda elektrik üretim karışımı ve karbondioksit emisyon değerleri hesaplanmıştır. İkinci yaklaşımda ise derin öğrenme yöntemleri kullanılarak 2030 yılına kadar haftalık kaynak bazlı elektrik üretim miktarının tahminleri yapılmıştır. Yapılan tahminler üzerinden doğrusal programlama ile optimizasyon çalışılmıştır. Optimizasyon sonucu üretilebilecek minimum karbondioksit değeri hesaplanmıştır.

İlk yöntem senaryo temelli yaklaşımdır. Bu yaklaşımda, Türkiye elektrik üretim karışımları için senaryolar 2030 yılına kadar oluşturulmuştur. Farklı elektrik üretim profillerinin hesaplamasını kolaylaştırmak amacıyla senaryo tabanlı bir bilgisayar aracı olan LEAP yaklaşımı kullanılmıştır. Senaryolar, ekonomik ve çevresel etki analizini mümkün kılmak için alternatif elektrik üretim sistemlerinin orta ila uzun vadeli olarak karşılaştırılmasını kolaylaştırmıştır.

İkinci kullanılan yöntem, tahmin ve optimizasyon çalışmasıdır. Tahmin aşamasında derin öğrenme tekniklerinden olan LSTM ve GRU modelleri oluşturulmuştur. LSTM ve GRU modellerinde veriler haftalık çalışılmış ve 2030 yılına kadar haftalık olarak elektrik üretim miktarının tahmini yapılmıştır. Tahmin çalışmasında kullanılan haftalık veri seti [0,1] arasında ölçeklendirilmiştir. Haftalık üretim tahminleri Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından belirtilen 2030 projeksiyondaki elektrik talebini karşılayacak ve minimum karbondioksit sağlayacak şekilde doğrusal programlama ile optimize edilmiştir. Senaryo, tahmin ve Şekil 17'de gösterilmektedir.



Şekil 17. Senaryo, Tahmin ve Optimizasyon Metodolojisi

Ekonomik, coğrafi ve siyasi olarak farklılaşmalar, elektrik üretim karışımlarında farklılıklar oluşturur. Bu farklılıklar ülkelere göre değiştiği gibi ülkenin içerisinde de zamanla değişim gösterir. Gelecekteki üretim miktarları, derin öğrenme algoritmaları ile tahmin edilip, amaç fonksiyonu ve sınırlılıklar çerçevesinde optimize edilmiştir.

Çalışma kapsamında oluşturulan senaryolar, tahminler ve optimizasyon hesaplamalarında elektrik üretim ve tüketimin dengelenmesi eşitliği temel kısıtlardandır. Her iki yöntemde de elde edilen elektrik üretim karışımlarında amaç karbondioksit emisyon değerinin minimize edilmesidir.

Bu tez çalışmasında LEAP yaklaşımı ile senaryo bazlı elektrik üretim karışımları hesaplanmıştır. Ayrıca derin öğrenme üretim modelleri ile elektrik üretim miktarları tahmin edilmiş ve karbondioksit salınımını minimize eden elektrik üretim karışımları hesaplanmıştır.

Mühendislik problemlerinde belirsizlikler düşük iken ekonomik ve sosyal problemlerde belirsizlikler artmaktadır. Artan belirsizlikler ve doğrusal olmayan değişkenler nedeniyle uzun vadeli projeksiyonlarda senaryo yaklaşımı veya derin öğrenme modeller tercih edilmelidir. Senaryolar ile uzun vadeli belirsizlikler belli sınırlar çerçevesinde değerlendirilebilir. Derin öğrenme modelleri birçok değişken arasındaki ilişkilerin lineer olmadığı, ilişkilerin formüle edilemediği durumlarda faydalı sonuçlar vermektedir.

3.2. Türkiye Elektrik Sektöründe Üretim Senaryolarının İncelenmesi

3.2.1. LEAP Modelleri için Senaryoların Oluşturulması

Enerji sektöründe, öngörülemeyen belirsizliklere karşı dayanıklı politikalar geliştirmek için senaryolar geliştirilmelidir. Önceden belirlenmiş bir statik yol yerine farklı senaryolar arasındaki sonuçların kıyaslanması, belirsizliklere karşı karar desteği sağlar. Doğru bir uzun vadeli enerji talebi tahmini, enerji planlaması ve politika yapımı için esastır.

Türkiye'de olduğu gibi özellikle gelişmekte olan ülkelerde enerji karar vericilerinin temel endişeleri, enerji güvenliği, karbondioksit emisyonu tehdidi, çevre kirliliği ve enerji arz problemidir. İklim değişikliğinin aşırı etkilerinin önlenmesiyle uyumlu enerji senaryoları, yenilenebilir enerji de dahil olmak üzere düşük karbonlu teknolojileri ile karakterize edilir.

Senaryo temelli elektrik üretim karışımı yönteminde, Türkiye'nin elektrik üretim sektöründeki karbondioksit emisyonlarını azaltma potansiyelini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimdeki payının artırıldığı ve nükleer enerjinin sisteme dahil edildiği senaryolar oluşturulmuştur.

- Çalışma kapsamında senaryoların baz yılı olarak 2017 belirlenmiştir
- 2030 yılına kadarki enerji karışımları çalışılmıştır.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının emisyon değerleri sıfır kabul edilmiştir.

3.2.1.1 Olağan İş Senaryosu

Olağan iş senaryosu, mevcut şartların devamı halinde olabilecek elektrik üretim karışımı ve karbon emisyonu değerlerini göstermektedir. Olağan iş senaryosunda, iklim ve çevre konusunda herhangi bir aksiyon alınmamıştır. Doğal gaz, kömür, hidroelektrik, rüzgâr, güneş, jeotermal, linyit ve biyokütle kapasitelerinde değişiklik yapılmamıştır. Mevcut kapasite oranları değiştirilmemiştir. Olağan iş senaryosu referans durumunu ortaya koymak için öncelikli olarak oluşturulmuştur.

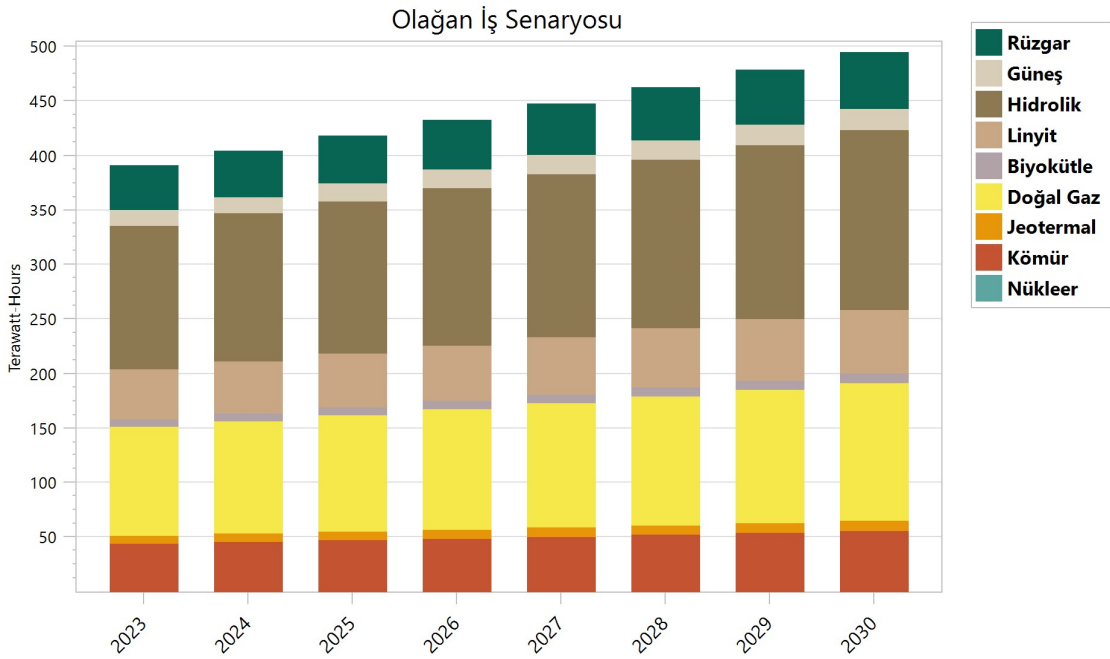
Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından belirtilen elektrik talebini karşılayacak elektrik üretimi karışımı Şekil 18'de verilmiştir. LEAP uygulaması yardımı ile oluşturulan bu elektrik üretim karışımına göre doğal gaz, kömür ve hidroelektrik en önemli enerji kaynaklarıdır. Elektrik üretimi, elektrik talebine paralel

olarak sürekli artış göstermiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en önemli kaynak rüzgâr enerjisidir.

Elektrik üretimi karışımı sonucunda üretilecek elektriğin bir kısmı iletim ve dağıtım aşamalarında kaybedilmektedir. Kayıp elektrik oranı ülkelerin elektrik iletim alt yapısına ve üretilen elektrik ile tüketilen yer arasındaki mesafeye göre değişmektedir.

Olağan iş senaryosuna için LEAP uygulama sonuçlarına göre doğal gaz kömür ve hidroelektrik ile elektrik enerjisi üretiminde en fazla kullanılan enerji kaynakları olmaya devam edecektir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından belirlenen enerji projeksiyonundaki enerji talebinin, olağan iş senaryosu ile karşılanması sonucunda oluşan enerji karışımı Şekil 18’de verilmiştir. Üretilen elektrik miktarının belirtilen talep miktarından fazla olmasının sebebi, elektriğin iletim ve dağıtım aşamalarındaki kayıplardır. 2023 yılında elektrik üretimi 400 TWh yaklaşırken bu değer 2030 yılında 500 TWh yaklaşmaktadır. Olağan iş senaryosunda doğal gaz, kömür ve hidroelektrik 2030 yılında da en önemli birincil enerji kaynakları olacaktır.

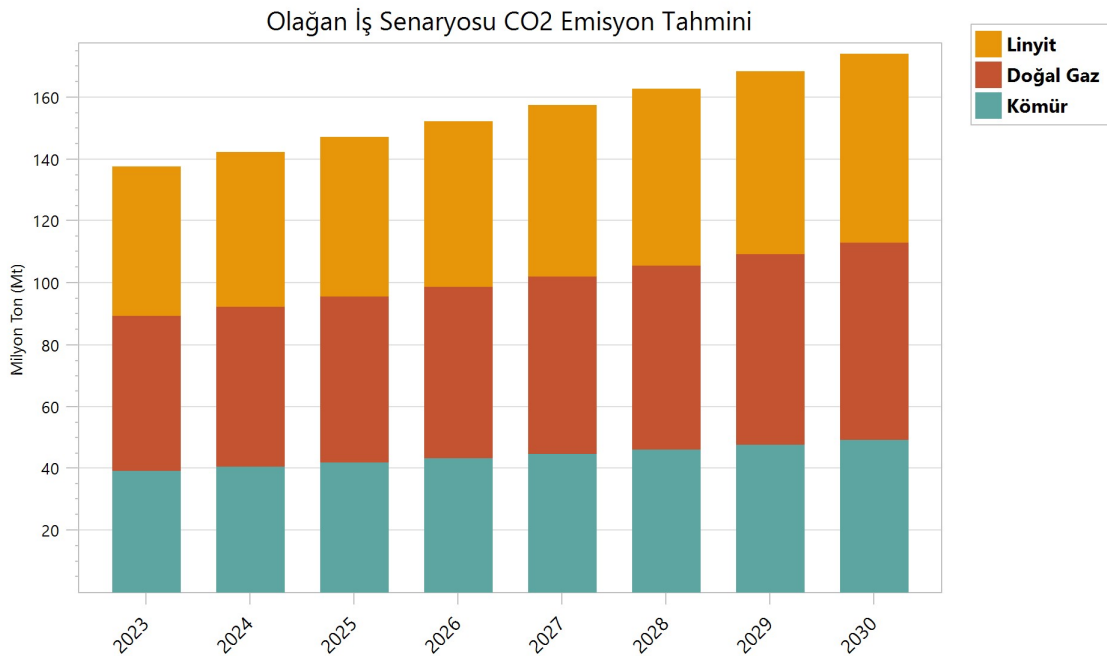


Şekil 18. Olağan İş Senaryosuna Göre Türkiye’nin 2023-2030 Yıllarına Dair

Elektrik Üretim Karışım Tahmini

Elektrik üretimi için kullanılan enerji karışımında rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyokütle karışımı fosil yakıtlara göre düşük miktardadır. Fosil enerji kaynakları sonucunda karbondioksit emisyonu oluşmaktadır. Olağan iş senaryosu için

kullanılan LEAP yaklaşımı ile üretilen karbondioksit emisyon değerler Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 19. Olağan İş Senaryosuna Göre Türkiye’nin CO2 Emisyon Tahmini

Fosil yakıtlarının kullanımının artması ile karbondioksit emisyonlarında artış olmaktadır. Senaryo sonuçlarına göre, 2023 yılında elektrik üretimi sonucunda ortaya çıkan karbondioksit değeri 140 Mt iken, 2030 yılında ortaya çıkan Karbondioksit değeri 170 Mt’a yaklaşmaktadır. 2023 ile 2030 yılları arasındaki toplam karbondioksit emisyon salınımının 1.225 Mt olacağı değerlendirilmektedir.

3.2.1.2 Yenilenebilir Enerji Senaryosu

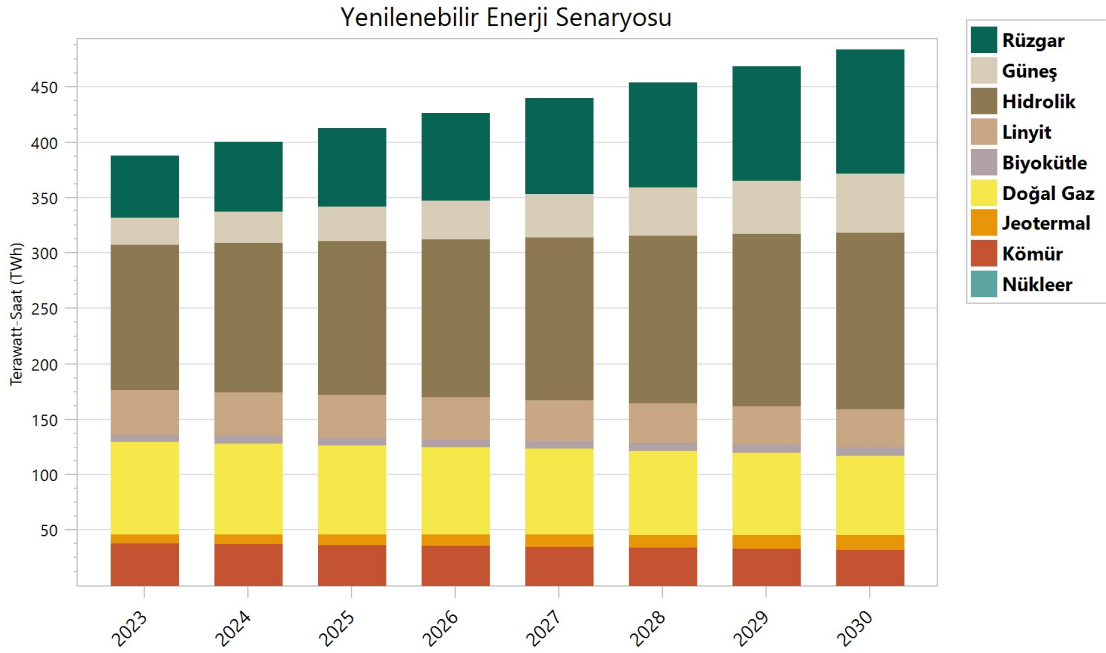
Fosil enerji kaynakları, karbondioksit emisyonları nedeniyle küresel ısınmaya neden olmakta ve çevre kirliliğini birçok yönden artırmaktadır. Ayrıca fosil enerji kaynakları sınırlıdır ve gelecekteki enerji ihtiyaçlarındaki artışı karşılayamayacaktır. Bu nedenle ülkeler, fosil enerji kaynakları yerine çevre dostu ve ebedi olan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçmeye başlamışlardır.

Türkiye, 2053 yılında karbon sıfıra ulaşacağını taahhüt etmiştir. Karbon sıfır hedefine ulaşabilmek için elektrik üretimi açısından en önemli adım fosil enerji kaynaklarından, yenilenebilir enerji kaynaklara geçiştir. Bu geçişin planlı ve kararlı bir şekilde yapılması elzemdir. Kömür ve doğal gaz gibi fosil kaynakların üretim kapasitelerinin azaltılıp hatta tamamen terk edilmesi ve bu kaynakların yerine yenilenebilir enerji kapasitelerinin artırılması gerekir.

Karbon sıfır hedefine ulaşabilmek için atılması gereken diğer bir adım ise elektrik üretim aşamasından sonra elektriğinin iletim ve dağıtım aşamalarındaki kayıpları azaltmaktır. Elektrik iletim ve dağıtım aşamalarında kayıpların azaltılması ile daha az kaynak tüketerek elektrik talebinin karşılanmasını sağlayacaktır. İletim ve dağıtım aşamalarında kayıpların azaltılması yeni bir enerji kaynağının devreye alınması gibi düşünülebilir.

Yenilenebilir enerji senaryosunda, yenilenebilir enerji kapasiteleri 2053 yılına kadar potansiyellerine ulaşılacak şekilde artırılmıştır. Ayrıca 2053 yılına kadar fosil enerji kaynaklarının üretim kapasiteler sıfırlanması amaçlanmaktadır. İletim ve dağıtımdaki kayıpların ise yüzde 6 ya düşürülmesi planlanmaktadır. Elektrik iletim kayıpları mevcut teknolojiye göre tamamen düşürülemez. Türkiye’de elektrik ve iletim kayıpları ortalama %12 seviyelerindedir. Dünya genelinde bu oran minimum %4 ile %6 seviyesinde değişmektedir.

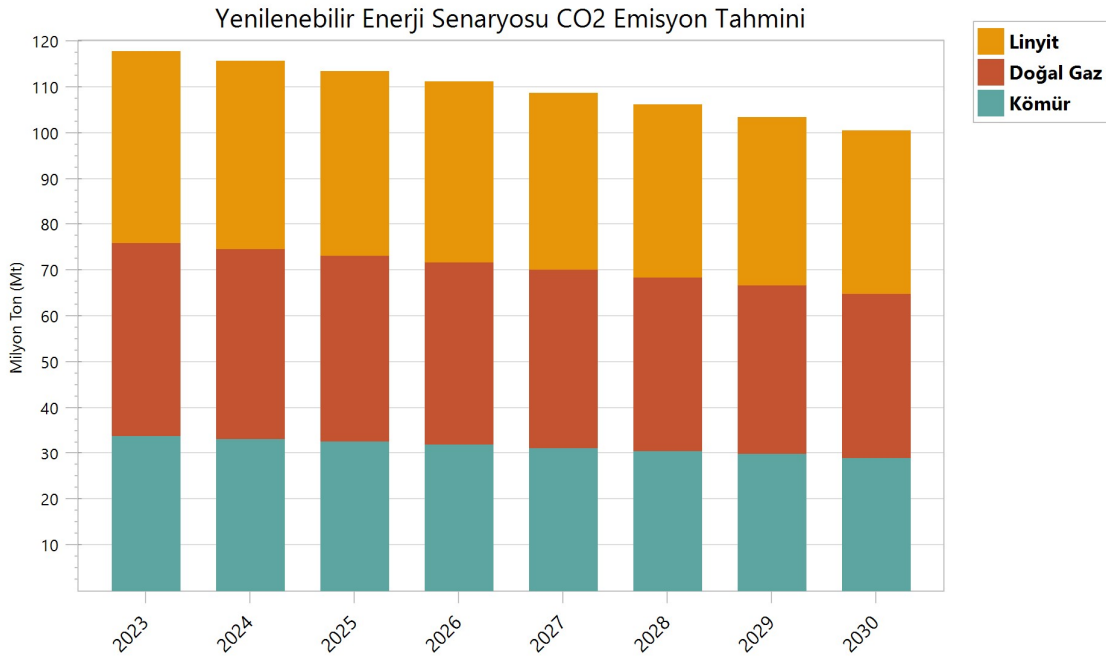
Yenilenebilir senaryoda amaç 2053 yılındaki karbon sıfır taahhüdü çerçevesinde, yenilenebilir enerji kaynaklarındaki potansiyellerin kullanılması, iletim ve dağıtım kayıplarının azaltılmasıdır. Yenilenebilir senaryo ile elektrik üretim karışımı tahminine göre en önemli enerji kaynakları sırası ile; hidroelektrik, rüzgâr ve güneş olmaktadır. 2053 hedefleri doğrultusunda fosil yakıtların kapasiteleri 2053 yılına doğru azaltılırken, yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasiteleri artırılmıştır. Şekil 20’de görüldüğü gibi rüzgâr ve güneş enerjilerinin üretimdeki payları artış göstermektedir.



Şekil 20. Yenilenebilir Enerji Senaryosuna Göre Türkiye'nin 2023-2030

Yıllarına Dair Elektrik Üretim Karışım Tahmini

Fosil kaynaklardan kömür, linyit ve doğal gaz kullanımı sonucu ortaya Şekil 21'de verilmiştir. 2023 yılında 120 Mt olan karbondioksit değeri 2030 yılında 110 Mtun altına düşmektedir.



Şekil 21. Yenilenebilir Enerji Senaryosuna Göre Türkiye'nin CO2 Emisyon Tahmini

Yenilenebilir enerji senaryosu çerçevesinde, artan yenilenebilir enerji kaynak kullanımı ile karbondioksit emisyon değerlerinde düşüş görülmektedir.

3.2.1.3 Yenilenebilir ve Nükleer Enerji Senaryosu

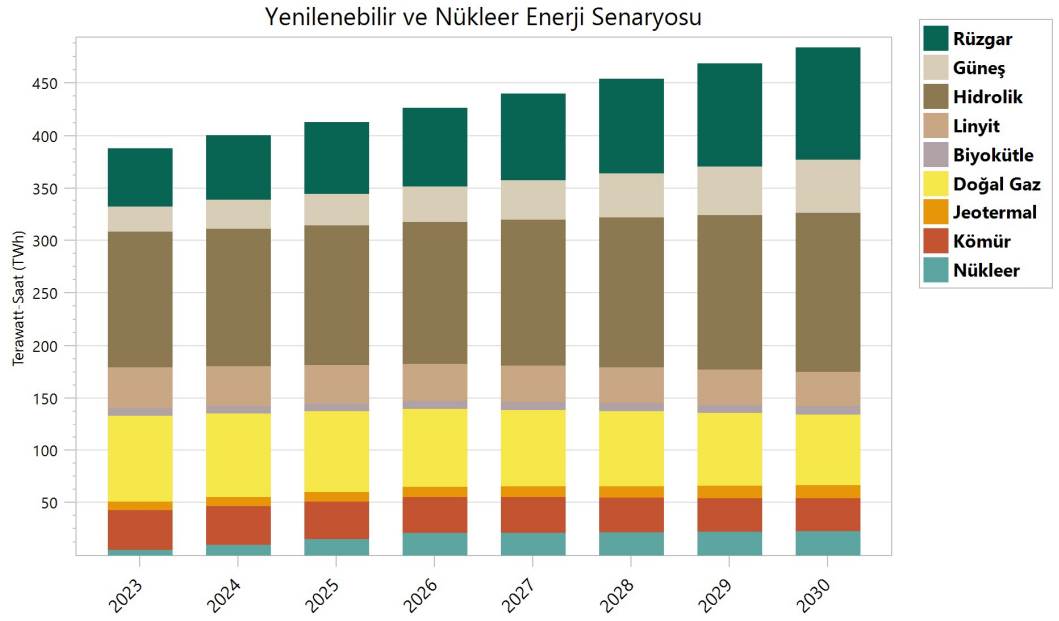
Türkiye'nin gelecek senaryolarından biri de nükleer enerjinin de aktif kullanılması senaryosudur. Bu senaryo, yenilenebilir enerji ve verimlilik senaryolarının devam ettiği senaryoya nükleer kapasitelerinin de eklendiği senaryoyu içermektedir.

Nükleer Enerji, santraldeki reaktörlerde uranyum çekirdeklerine meydana gelen dönüşüm ve bölünme ile oluşan fisyon sonucu ortaya çıkar. Nükleer enerji santrallerinde elektrik üretimi, suyu yüksek enerji ile buhara dönüştürerek türbinlerin dönmesini sağlar. Türbinlerin hareketi sonucunda mekanik enerji elektrik enerjisine dönüşür.

Dünyadaki nükleer santral kurulu gücünün 2019 yılında 415 GW değerinden, 2040'ta 479 GW'a çıkması düşünülmektedir, nükleer kapasitede Avrupa Birliği'nde yaklaşık %27'lik bir düşüş öngörülmektedir. Avrupa Birliği'nde 2019 itibarıyla 112 GW olan nükleer kurulu gücün 2040'ta 82 GW'a inmesi beklenmektedir. 2040'a kadar Çin (86 GW) başta olmak üzere Asya-Pasifik ülkelerinde 102 GW'lık artış tahmin edilmektedir. Rusya'nın nükleer kapasitesini 2040 yılına kadar %16,7 (5 GW) artıracığı düşünülmektedir. ABD'de ise 31 GW'lık (%29,8) bir düşüşle 2040 yılında nükleer kapasitenin 73 GW olarak gerçekleşmesi beklenmektedir (Energy Agency, 2020).

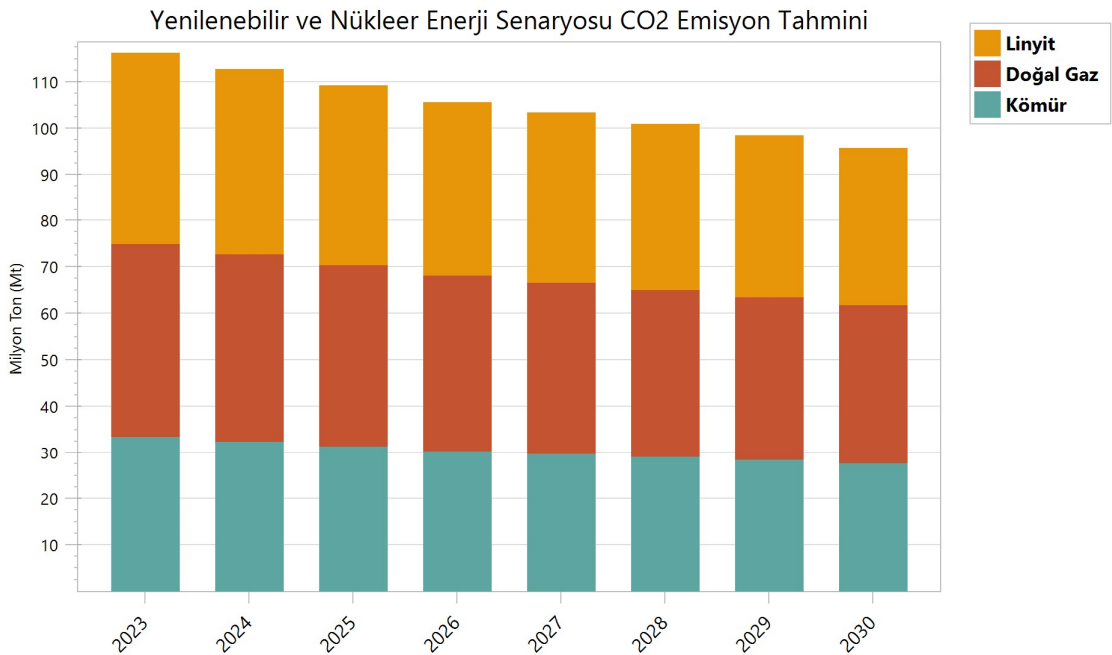
Bu senaryo yenilenebilir enerji senaryosundaki değişimlere ek olarak nükleer enerji kaynaklarında da değişimlerin çalışıldığı senaryodur. Nükleer enerji kaynaklarının 2023 yılında ilk reaktörün devreye gireceği ve 2024 yılında ikinci reaktörün devreye girmesi ile 2400 MW kapasiteye ulaşacağı, 2025 yılında üçüncü reaktörün devreye girdiği ve 2026 yılında son reaktörün devreye girmesi ile toplamda 4800 MW kapasiteye ulaşacağı öngörüsü üzerine senaryo geliştirilmiştir.

Senaryo sonucunda nükleer enerji ile elektrik üretiminin 2026 yılında kullanım oranının arttığı, daha sonra sabit 4800 MW kapasiteye ulaşacağı Şekil 22'de görülmektedir. Nükleer enerji kapasitesinin kullanılması ile fosil yakıtların kullanım oranlarında azalma görülmektedir.



Şekil 22. Yenilenebilir ve Nükleer Enerji Senaryosuna Göre 2023-2030 Yıllarına Dair Elektrik Üretim Karışım Tahmini

Nükleer enerji kaynağı senaryosunun sonucunda fosil kaynakların kullanımının azalması nedeniyle karbondioksit emisyon değerinde de düşüş görülmektedir. 2023 yılında 120 Mt'a yakın olan karbondioksit emisyonunu, 2030 yılında 100 Mt değerine gerilemektedir. Şekil 23, yenilenebilir ve nükleer senaryo sonucunda karbondioksit emisyon değişimini göstermektedir.

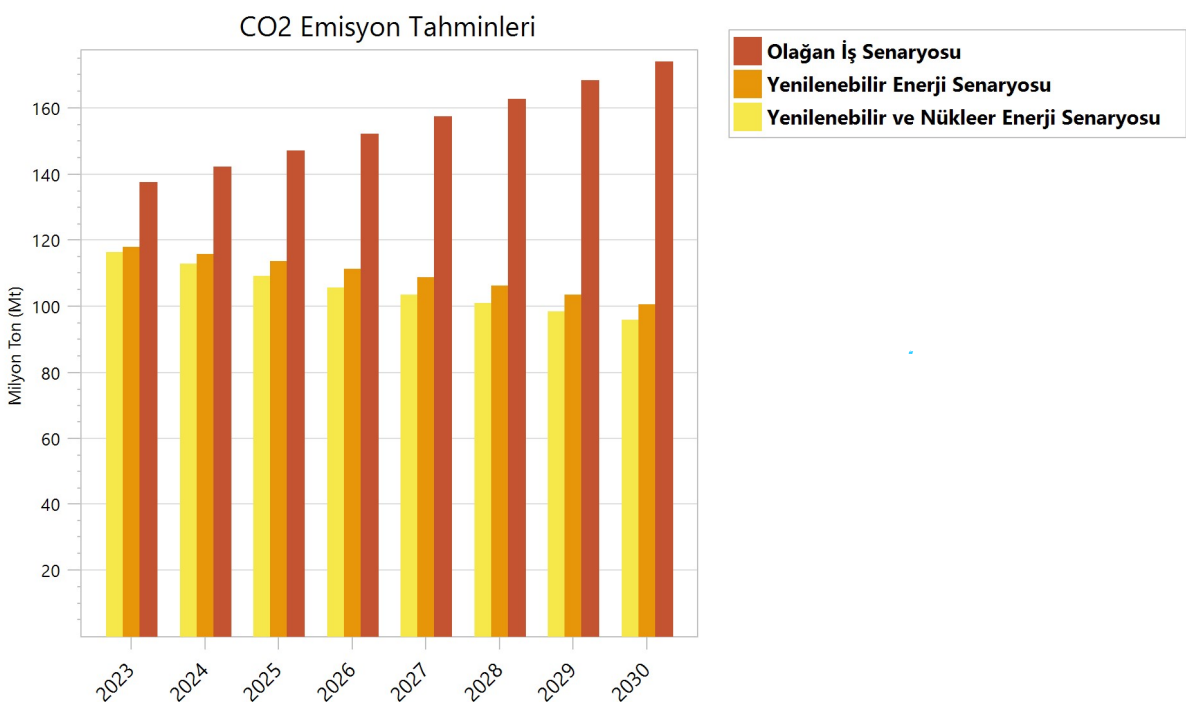


Şekil 23. Yenilenebilir ve Nükleer Enerji Senaryosuna Göre CO2 Emisyon Tahmini

Nükleer enerji kaynağının, elektrik üretiminde kullanılması karbondioksit emisyon salınımını düşürmektedir. Karbondioksit salınımındaki bu pozitif etkiye rağmen, nükleer enerji ile elektrik üretiminde nükleer enerji maliyeti, çevresel

güvenlik tehlikesi gibi riskleri içermektedir. Nükleer enerji, özellikle Fukuşima ve Çernobil nükleer felaketlerinden sonra, yüksek güvenlik gereksinimi nedeniyle son yıllarda cazip değildir. Yüksek teknoloji maliyetine rağmen, yüksek enerji-yakıt oranı ve emisyon olmaması gibi teknik değerler, nükleer enerjiyi fosil yakıtlara alternatif haline getirmektedir. Karbon azaltımına olan pozitif etkisine rağmen nükleer enerji sonucunda oluşan radyoaktif atıklar çevre için problem olmaya devam etmektedir.

Elektrik üretimi sonucu ortaya çıkan karbondioksit emisyon değerlerinin senaryo temelli kıyaslanması Şekil 24'te verilmiştir.



Şekil 24. Senaryo Temeli CO2 Emisyon Tahmini Kıyaslaması

Olağan iş senaryosuna göre 2030 yılında 170 milyon Ton karbondioksit emisyonu elektrik üretimi sonucu oluşacaktır. 2023 ile 2030 yılları arasında karbondioksit emisyon değeri artış gösterecektir. Yenilenebilir ve nükleer ile yenilenebilir senaryolarında ise emisyon değerinin azalış eğiliminde olacağı öngörülmektedir. Artışın durdurulması önemli bir adım olmasına rağmen, 2053 yılındaki karbon sıfır hedefi çerçevesinde bu azalış yeterli gözükmemektedir.

3.2.2. Elektrik Üretim Tahmin Modelleri ve Optimal Enerji Karışımı

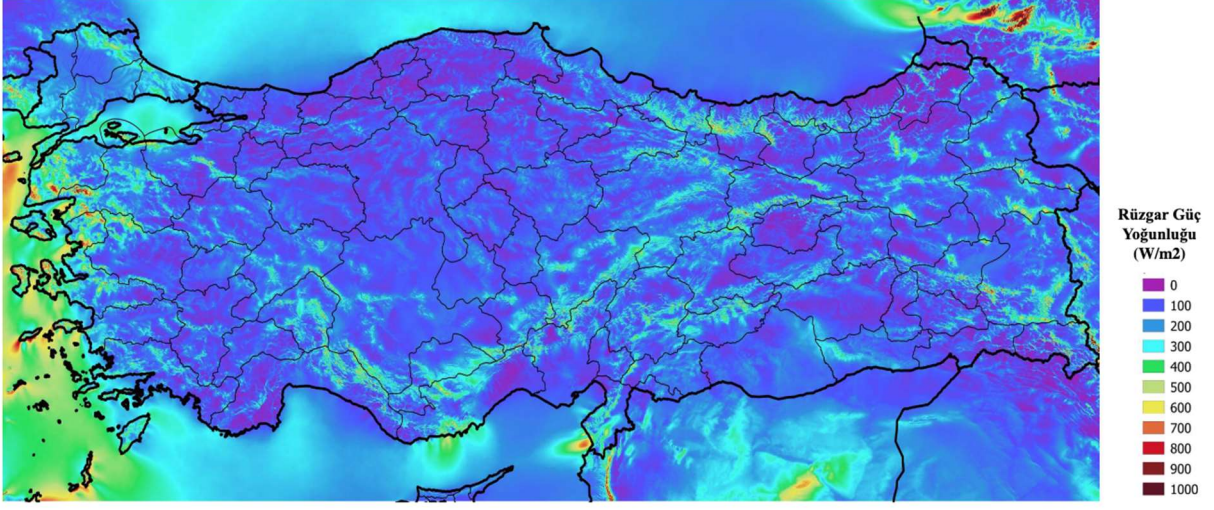
3.2.2.1 Rüzgâr Enerjisi ile Elektrik Üretimi Tahmini

Rüzgâr, yüksek basınç alanları ile düşük basınç alanları arasındaki basınç farklılığı sonucu oluşur. Rüzgârın hızı ve yönü zamana göre ve coğrafi durumlara ve mevsim şartlarına göre değişim gösterir. Bu değişimler rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimini doğrudan etkiler.

Rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine çevrilmesi için rüzgâr türbinlerin uygun yerlerde kurulumları yapılmalıdır. Rüzgâr türbinlerinin kurulumunda önemli noktalardan biri üretilebilecek elektrik miktarının, rüzgâr türbinlerinin kurulum maliyetini karşılamasıdır. Bu nedenle rüzgâr türbinlerinin kurulumu için yapılacak fizibilite çalışması önem arz etmektedir. Rüzgâr türbinlerinin kurulum noktaları yerleşim yerlerinden uzak olması nedeniyle ulaşım ve kurulum maliyetleri yüksek olabilmektedir. Bilimsel yöntemler kullanılarak rüzgâr yön ve hızların uzun süre analizi sonucunda kurulum yerlerinin tespit edilmesi gerekir. Bunun için bölgenin ihtiyaçları analiz edilmeli ve rüzgâr potansiyeli optimum şekilde kullanılmalıdır. Türkiye'nin resmi olarak raporlanan rüzgâr atlası Şekil 25'te verilmiştir. Rüzgâr atlasına göre rüzgâr güç yoğunluğu en yüksek olduğu yerler Ege kıyılarıdır. Çanakkale ile İzmir arasındaki alanda rüzgâr güç yoğunluğu 400 W/m² üstüne çıkmaktadır.

Deniz üstü rüzgâr enerji potansiyeli Ege ve Marmara denizlerinde yüksektir. Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (GWEC) tarafından yayımlanan Küresel Rüzgâr Raporuna göre Türkiye'nin 70 GW deniz üstü rüzgâr enerji potansiyeli bulunmaktadır(J. Lee ve Zhao, 2022)

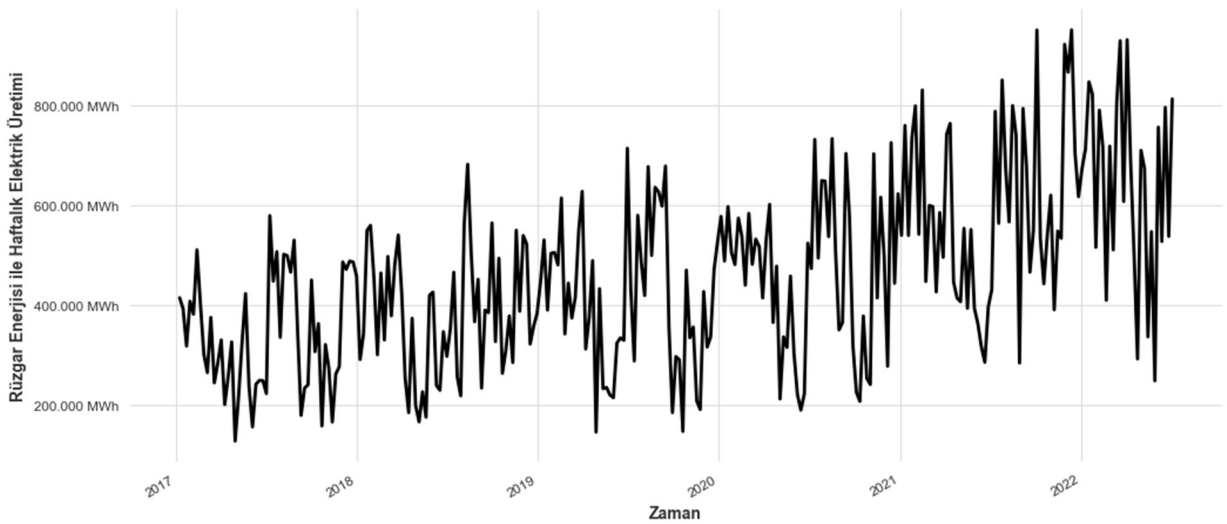
Rüzgâr türbinlerinin diğer bir avantajı ise elektrik üretimi için kullanılan alanlardır. Diğer bir önemli yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisi ile kıyaslandığında rüzgâr türbinlerinin kullandıkları arazi alanı oldukça küçüktür. 1MW elektrik üretmek için 1 adet rüzgâr türbininin kullanacağı alan yeterli iken, güneş enerjisi ile aynı elektriği üretebilmek için 20.000 m² alan gereklidir (Küçükosman Beliz, 2019).



Kaynak: (REPA,2022).

Şekil 25. Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası

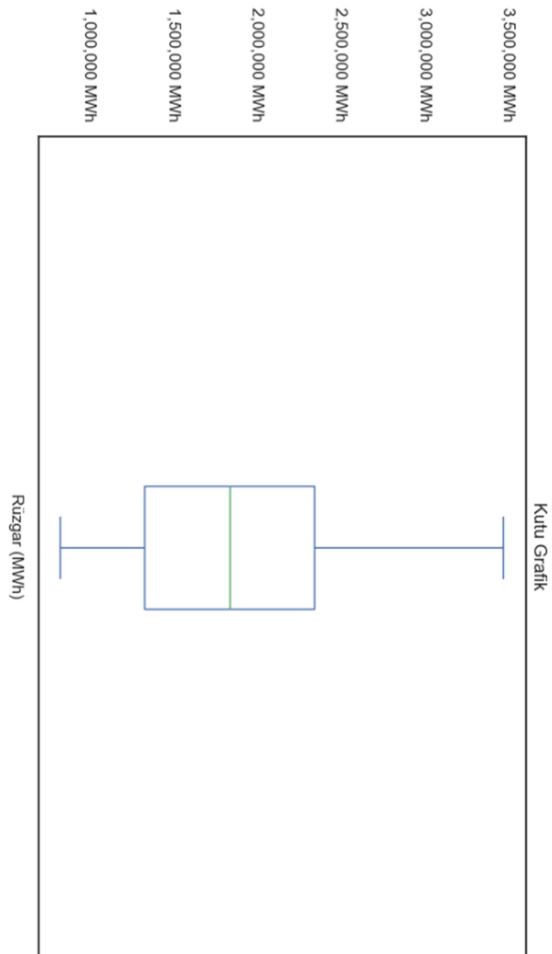
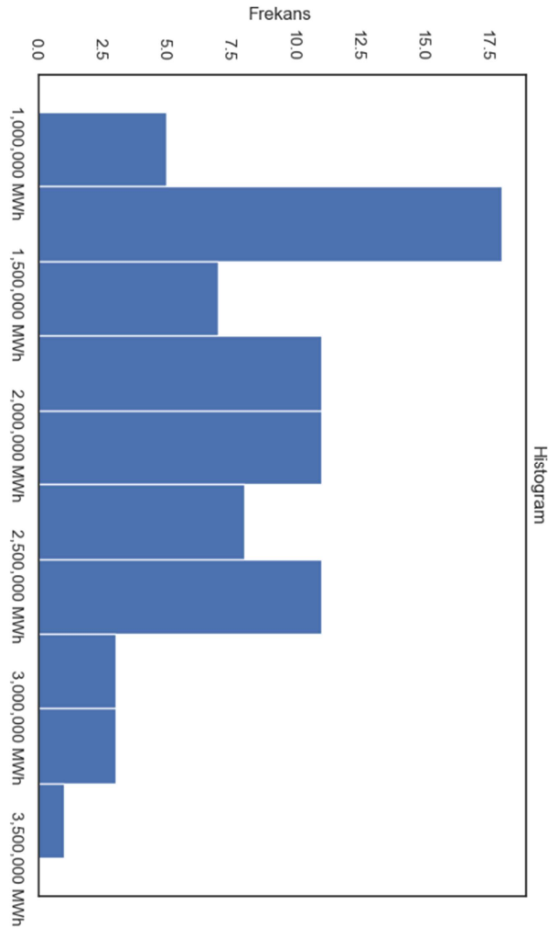
Rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi miktarı haftalık olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr enerjisi kullanılarak üretilen haftalık elektrik üretimi 2022 yılında 800.000 MWh üstüne çıkmaya başlamıştır. Rüzgâr enerjisi kaynağına özgü olarak meteorolojik olaylar ile direkt bağlantılı olduğu için elektrik üretim miktarındaki değişim yüksektir. Rüzgâr enerjisi ile üretilen, 2017 ocak ile 2022 haziran arasındaki haftalık elektrik üretim miktarları Şekil 26’da verilmiştir. Rüzgâr enerjisi kullanılarak üretilen elektrik miktarında artış eğilimi olduğu görülmektedir. 2021 yılından itibaren rüzgâr enerjisi ile haftalık elektrik üretimi 800.000 MWh değerlerini aşmaya başlamıştır. Minimum üretilen elektrik miktarı 200.000 MWh değerinden 400.000 MWh değerine çıkmıştır.



Şekil 26. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Rüzgâr Enerjisi ile Haftalık Elektrik Üretimi

Rüzgâr enerjisi ile aylık elektrik üretiminin 2017 ocak ayı ile 2022 haziran ayları arasındaki histogram dağılımı ve kutu grafiği Şekil 27’de verilmiştir. Histogram dağılımı ve kutu grafiklerinin aylık olarak verilmesinin nedeni haftalık değişimlerin etkisini azaltarak veri setinin analiz edilmesidir. Tahmin ve optimizasyon çalışmaları haftalık olarak değerlendirilmiştir. Aylık elektrik üretiminin 1.000.000 MWh ile 1.500.000 MWh arasında yoğunlaştığı gözlenmektedir. Kutu grafiği incelendiğinde medyan değerinin 1.500.000 MWh çevresinde olduğu görülmektedir. Aykırı değerlerinin olmadığı görülmektedir. Aykırı değerlerinin olmama sebebi rüzgâr enerjisi ile elektrik üretiminde optimal rüzgâr hız gerekliliğinin olmasıdır. Düşük rüzgâr hızlarında rüzgâr türbinleri dönmezken, yüksek rüzgâr hızlarında kontrol ünitesi rüzgâr türbinini kapatır. Kutu grafiğinden, rüzgâr enerjisi ile haftalık elektrik üretiminin sağa veya sola çarpık olmadığı simetrik olduğu görülmektedir.

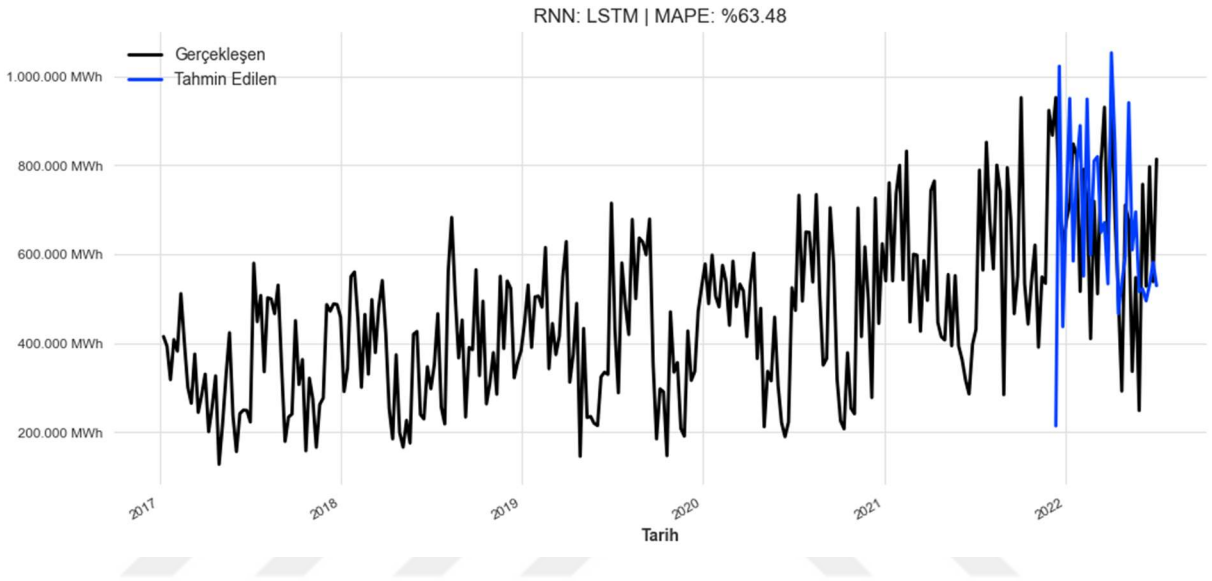




Şekil 27. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Rüzgâr Enerjisi ile Aylık Elektrik Üretimi Histogram Dağılımı Ve Kutu Grafiği

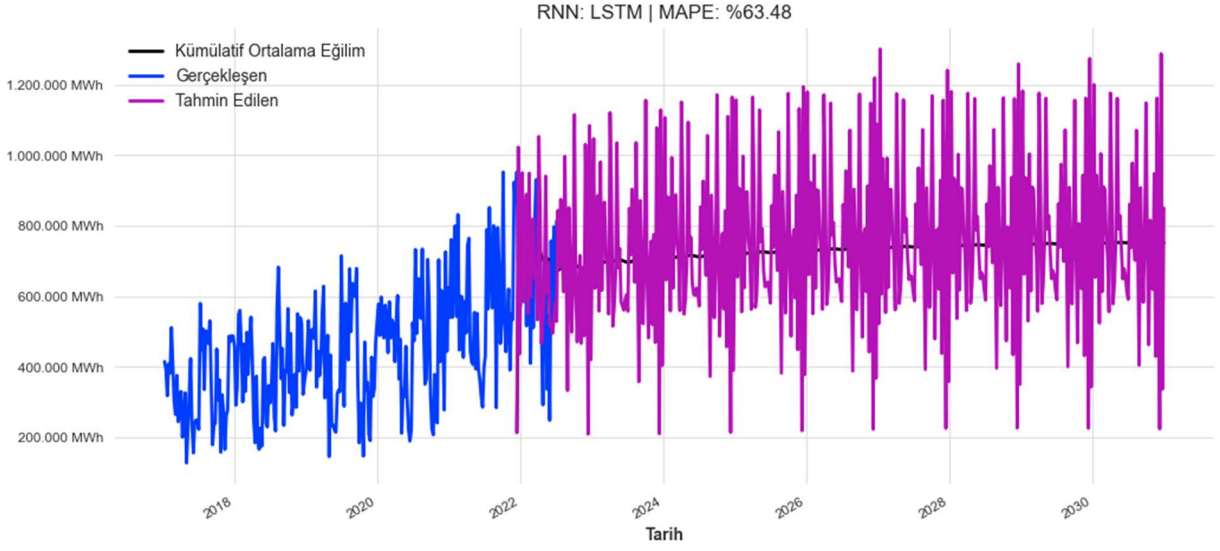
Rüzgâr enerjisi ile elektrik üretim miktarlarını içeren veri seti, derin öğrenme modelleri olan LSTM ve GRU modelleri kullanılarak eğitilmiştir. 2017 ocak ayı ile 2021 aralık ayı arasındaki haftalar LSTM ve GRU modellerinin eğitilmesi için kullanılmıştır. 2022 ocak ayı ile 2022 haziran ayı arasındaki haftalardaki elektrik üretim miktarları, eğitilen modellerin test edilmesi için kullanılmıştır.

Modellere özgü katman sayısı, nöron sayısı, seyreltme değerleri değiştirilerek en başarılı MAPE değerini veren model elde edilmiştir. LSTM modelinin sonucunda tahmin edilen elektrik üretim miktarı ve gerçek değerler Şekil 28’de verilmiştir. Eğitilen modellerin test sonuçları modelin performansı hakkında bilgi verir. LSTM modeli test sonucu MAPE değeri %63,48 olarak hesaplanmıştır. Test sonuçlarının değerlendirilmesinde MAPE değerinin düşük olması istenen bir durumdur.



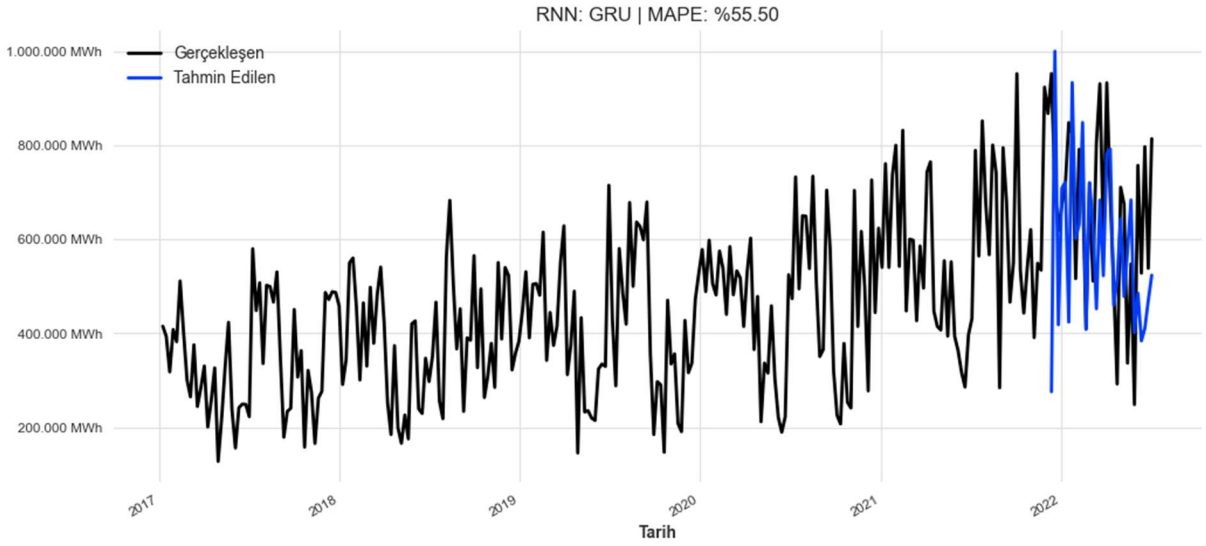
Şekil 28. Rüzgâr Enerjisi ile Elektrik Üretiminde LSTM Modelinin Test Sonucu

Hiper parametreleri optimize edilerek oluşturulan en başarılı LSTM modeli, 2030 yılına kadarki tüm haftalar için elektrik üretim tahmininde kullanılmıştır. Şekil 29, 2030 yılına kadarki tahmin sonuçlarını göstermektedir. Kümülatif ortalama eğilim ile rüzgâr enerjisinin yukarı eğilimde olduğu görülmektedir. 2017 yılında rüzgâr enerjisi ile 400.000 MWh olan haftalık elektrik üretimi, 2022 yılında 800.000 MWh haftalık üretime ulaşmıştır. Bu yönelimin devam etmesi durumunda 2030 yılında 1.200.000 MWh haftalık üretime ulaşılacağı öngörülebilir.



Şekil 29. Rüzgâr Enerjisi ile Elektrik Üretiminde LSTM Modelinin Üretim Tahmini

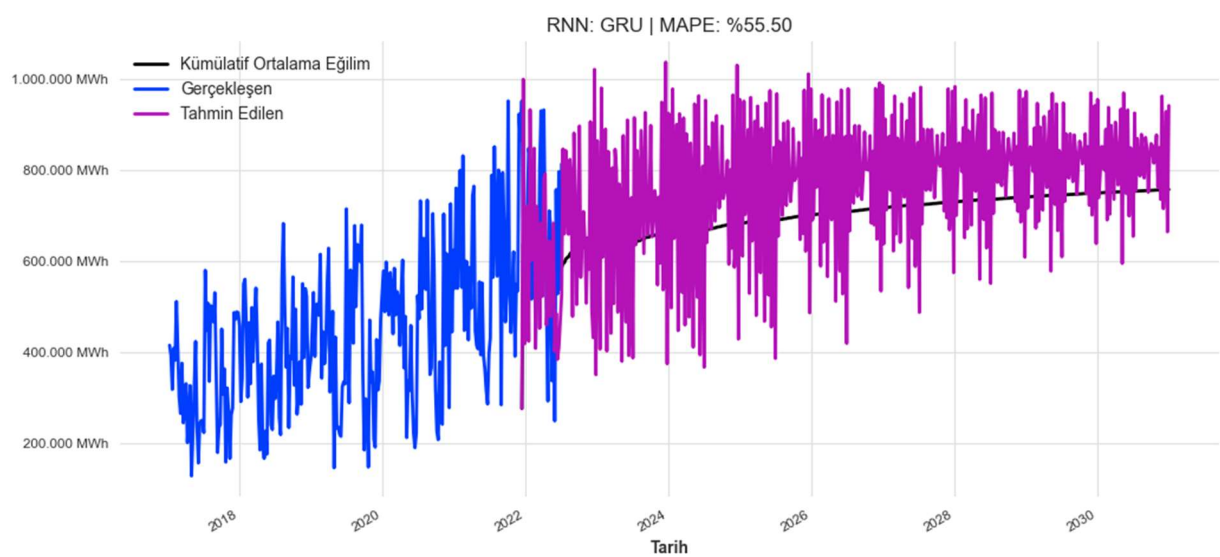
Rüzgâr enerjisi ile elektrik üretim miktarı, GRU modeli ile eğitilip test edildiğinde MAPE değeri %55,50 olarak hesaplanmıştır. Şekil 30, GRU modeli kullanılarak rüzgâr enerjisi ile elektrik test sonuçlarını göstermektedir. MAPE değerlerine göre GRU modelinin LSTM modeline kıyasla daha başarılı olduğu görülmüştür. GRU modelinin 2022 ocak ayı ile 2022 haziran ayı arası değişimleri daha iyi yakaladığı görülmektedir.



Şekil 30. Rüzgâr Enerjisi ile Elektrik Üretiminde GRU Modelinin Test Sonucu

Rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi tahmini için eğitilen GRU Modeli, 2030 yılına kadarki tüm haftaların elektrik üretim tahminleri için kullanılmıştır. Şekil 31, GRU modeli kullanılarak elde edilen 2030 tahmin sonuçlarını göstermektedir. Model, elektrik üretiminin haftalık 1.000.000 MWh seviyesine çıkacağını

göstermektedir. GRU modeli sonuçlarında da kümülatif ortalama eğilim, LSTM modelindeki sonuçlar ile benzer şekilde yukarı yönlüdür.



Şekil 31. Rüzgâr Enerjisi ile Elektrik Üretiminde GRU Modelinin Üretim Tahmini

Rüzgâr enerjisi ile elektrik üretim tahmini için oluşturulan LSTM ve GRU modellerinin MAPE, RMSPE ve RMSE değerleri Tablo 12’de verilmiştir. GRU modeli, MAPE RMSPE ve RMSE sonuçları itibariyle daha başarılıdır.

Tablo 12. Rüzgâr Enerjisi ile Elektrik Üretiminde LSTM ve GRU Modellerinin Tahmin Performans Değerleri.

	LSTM	GRU
MAPE	63.47	55.50
RMSPE	0.67	0.51
RMSE	0.30	0.27

GRU sonuçları daha başarılı olduğu için bu sonuçlar karbondioksit emisyonunu minimize edecek optimize probleminde tercih edilmiştir. 2030 yılına kadarki tüm haftalar için GRU modeli ile elde edilen haftalık rüzgâr enerjisi tahmin sonuçları hesaplanmıştır. Bu tahmin sonuçları karbondioksit emisyonu minimize edecek olan amaç fonksiyonu optimize probleminde, karar değişkeni olarak kullanılmıştır.

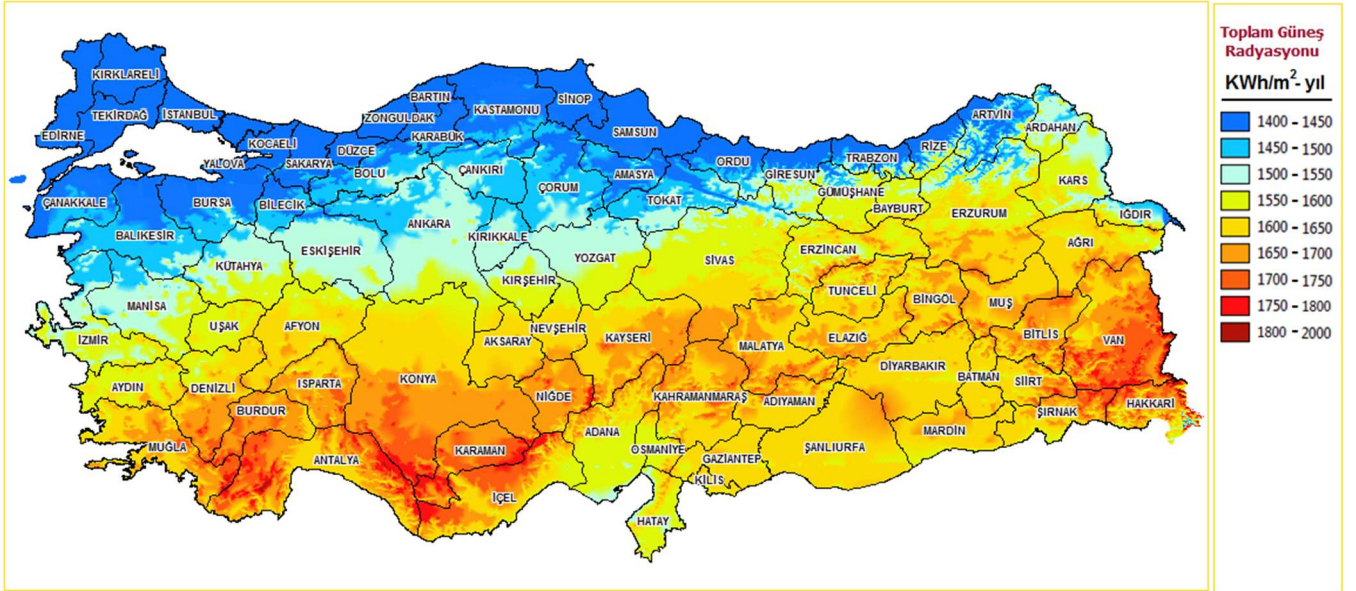
3.2.4.2 Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretimi Tahmini

Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi gibi kullanımı gittikçe artan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisinin kullanımının artması gelişen teknoloji ile enerji panellerin maliyetlerinin azalması ve daha verimli panellerin üretilmesi ile paralellik göstermektedir. Güneş enerjisi ile elektrik üretimi, mekanik enerjinin elektrik enerjisine çeviren Faraday kanunu prensibine dayanan elektrik üretim yöntemlerinden farklılık gösterir. Güneş enerjisinden elektrik elde edilirken, Fotovoltaik panellerden yardım alınır. 1836 yılında Alexander Edmond Becquerel yaptığı deneyler sırasında fotovoltaik etkiyi gözlemlemiştir. Fotovoltaik hücreler, güneşten gelen enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren enerji dönüşüm yapılarıdır.

Güneş enerjisinin önemli avantajlarından biri üretilen elektriğin, üretildiği yerde iletim hatlarına ihtiyacı duyulmadan kullanılabilmesidir. Elektriğin üretildiği yer ile tüketim yerinin yakın olması iletim ve dağıtım kayıplarını da azaltmaktadır. Güneş enerjisi ile elektrik üretiminin, iklimsel ve meteorolojik faktörlerden doğrudan etkilenmesi ise dezavantajdır.

Yirmi dört saat boyunca elektrik tüketilirken, Güneş'ten elektrik üretimi için günde yaklaşık 4-5 saat faydalanılmaktadır. Güneş ışınımının olmadığı durumlara karşı elektrik kullanımının aksamaması için üretilen elektrik enerjisinin depolanması gerekir. Enerjinin depolanması için kullanılan teknik alt yapıların gelişmesi ile güneş enerjisi ile elektrik üretim oranları artacaktır. Şekil 32, Türkiye'nin güneş enerji atlasını göstermektedir. Türkiye'nin güney kesimleri güneş enerjisi ile elektrik üretimine daha elverişlidir.

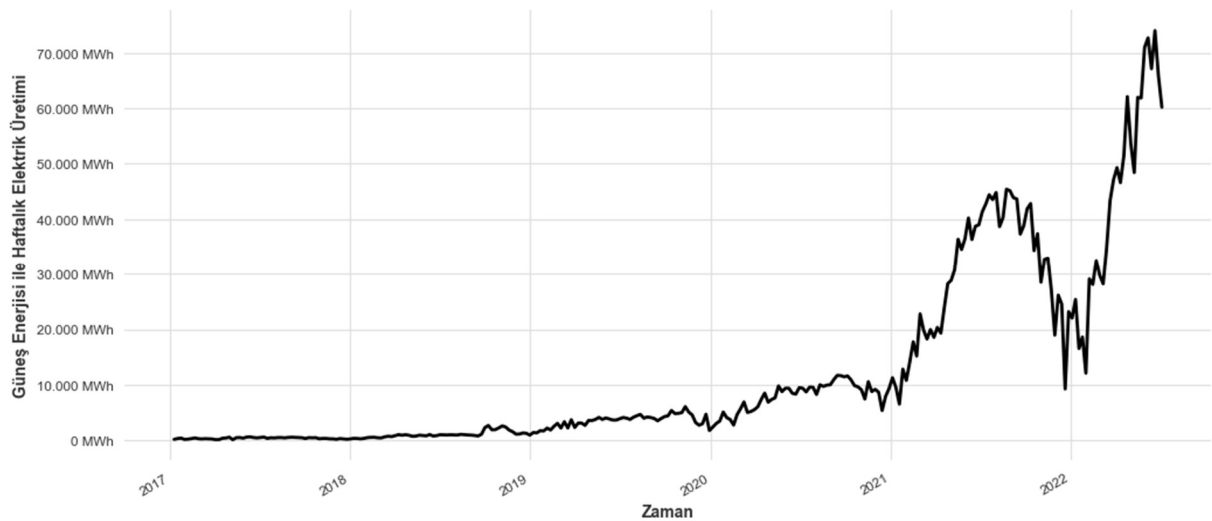
Teknolojinin yeri ve türü göz önüne alındığında, güneş enerjisi arazi kullanımında da sorun teşkil etmektedir. Bununla birlikte, olumsuz arazi etkilerini azaltmak için verimsiz ve düşük kaliteli alanlara güneş panelleri kurulabilir. Panelleri ticari veya konut binalarının üzerine inşa etme imkânı da vardır ve bu olasılık arazi kullanımı ile ilgili sorunları ortadan kaldırmaktadır. Diğer bir sorun ise kullanılan panellerin içeriğindeki kimyasal maddelerin çevre ve insan sağlığını tehdit edebilmesidir.



Kaynak: (GEPA,2022).

Şekil 32. Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası

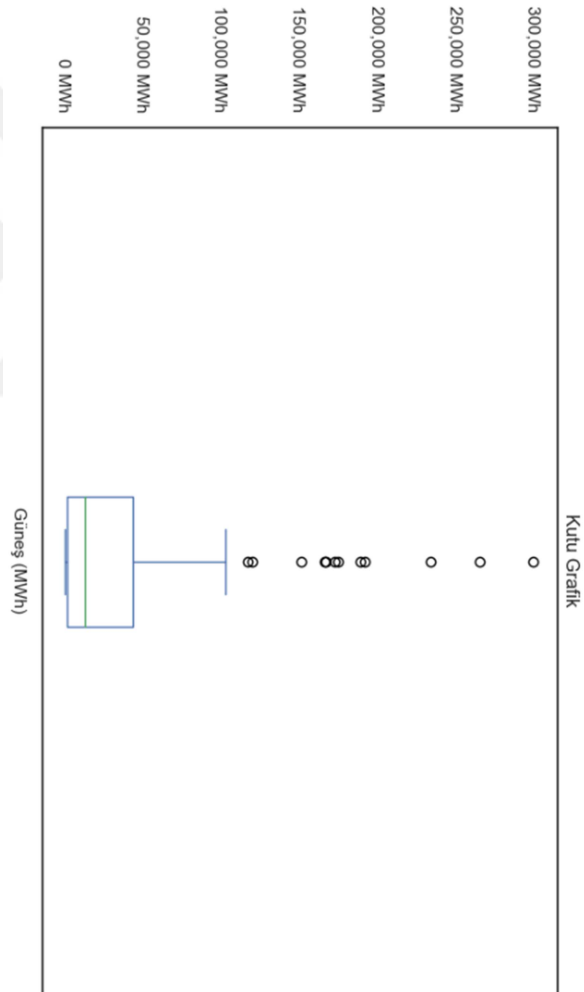
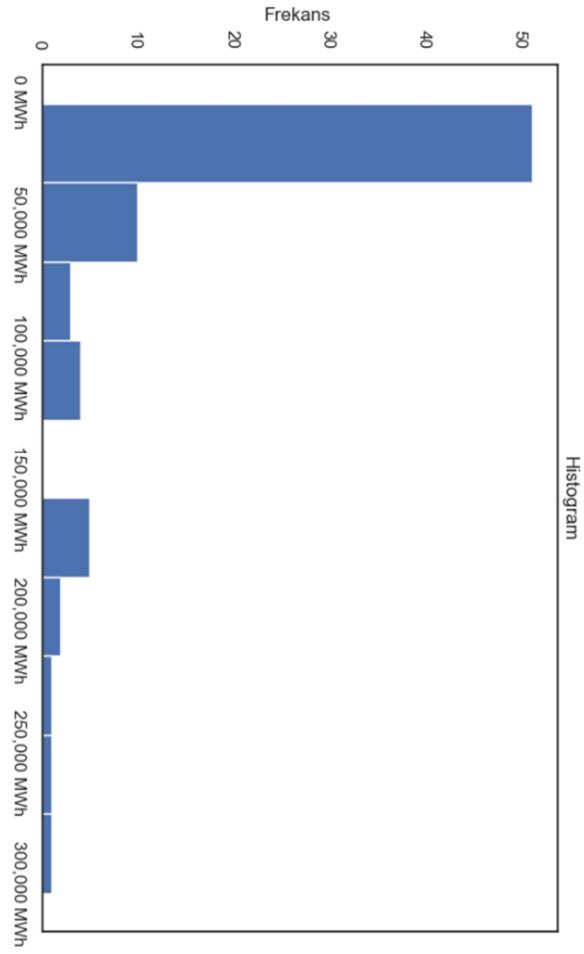
Türkiye'nin 2017 Ocak ayı ile 2022 Haziran ayı arasındaki güneş enerjisi ile haftalık elektrik üretimi Şekil 33'te gösterilmektedir. Güneş enerjisi kullanılarak elektrik üretimi son yıllarda ciddi şekilde artmıştır. Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en fazla kullanımı artan enerji kaynağıdır. 2020 yılında 10.000 MWh seviyelerinin altında olan üretim, 2022 yılında haftalık 70.000 MWh üretim ile yedi kat artış göstermiştir. Kış aylarında güneş enerjisi ile elektrik üretiminde düşüş ve 2022 yaz aylarındaki güneş enerjisi ile elektrik üretimindeki artış görülmektedir. Güneş enerjisi ile elektrik üretiminde belli bir olgunluğa ulaşıldığında kış aylarında üretimde azalışların olduğu yaz aylarında ise üretimde artış olduğu daha belirginleşecektir.



Şekil 33. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Güneş Enerjisi İle Haftalık Elektrik Üretimi

Güneş enerjisi ile elektrik üretimi, çevre koşullarından direkt etkilenmektedir. Gece ve gündüz ayrımı çevresel ve periyodik bir etkidir. Geceleri güneş enerjisi ile üretim yapılamamaktadır. Güneş enerjisi ile aylık elektrik üretiminin histogram dağılımı ve kutu grafiği, Şekil 34'te verilmiştir. 10.000 MWh altındaki haftalık üretim en fazla değere sahiptir. Gece güneş enerjisi ile elektrik üretiminin olmaması, histogram dağılımının sol tarafta toplanmasının sebebidir. Kutu grafiği incelendiğinde aykırı değerlerinin olduğu görülmektedir. Medyan değeri 50.000 MWh'dan düşük olduğu ve veri seti dağılımının sağa çarpık olduğu görülmektedir.





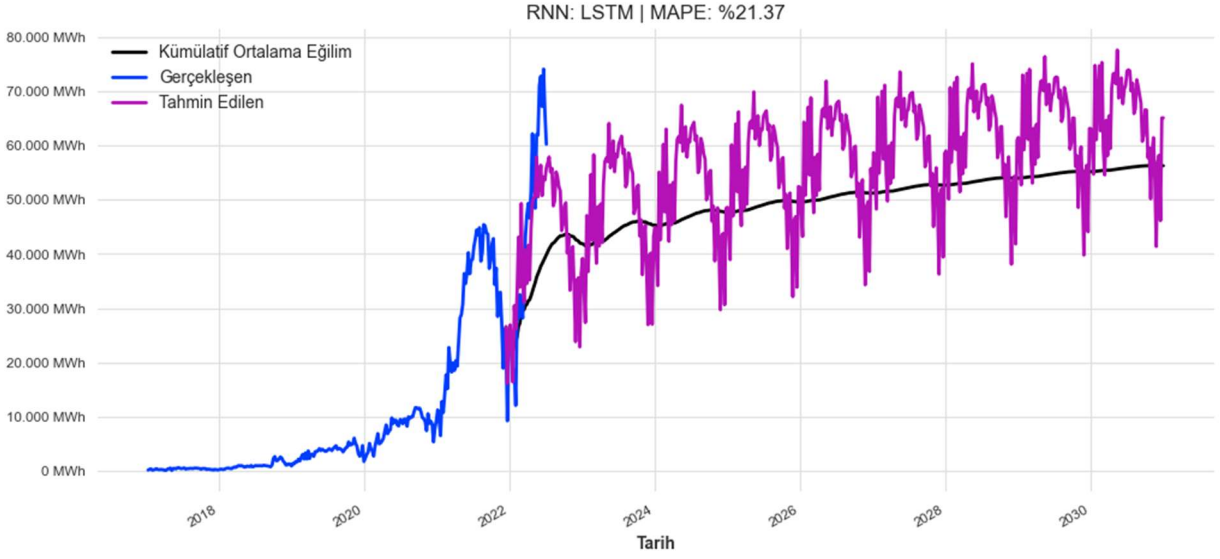
Şekil 34. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Güneş Enerjisi ile Aylık Elektrik Üretimi Histogram Dağılımı Ve Kutu Grafiği

Güneş enerjisi ile elektrik üretim için LSTM ve GRU modelleri oluşturulmuştur. 2017 Ocak ayı ile 2021 Aralık ayı arasında modeller eğitilmiş ve 2022 ocak ile 2022 haziran ayları arasında modeller test edilmiştir. Model sonuçları MAPE değerlerine göre kıyaslanmıştır. Şekil 35, LSTM modeli test sonuçlarını göstermektedir. MAPE değeri %21,37 olarak hesaplanmıştır. Modelin 2022 ocak ayı ile 2022 haziran ayı arasındaki gerçekte olan artış eğilimini yakalayabildiği görülmektedir.



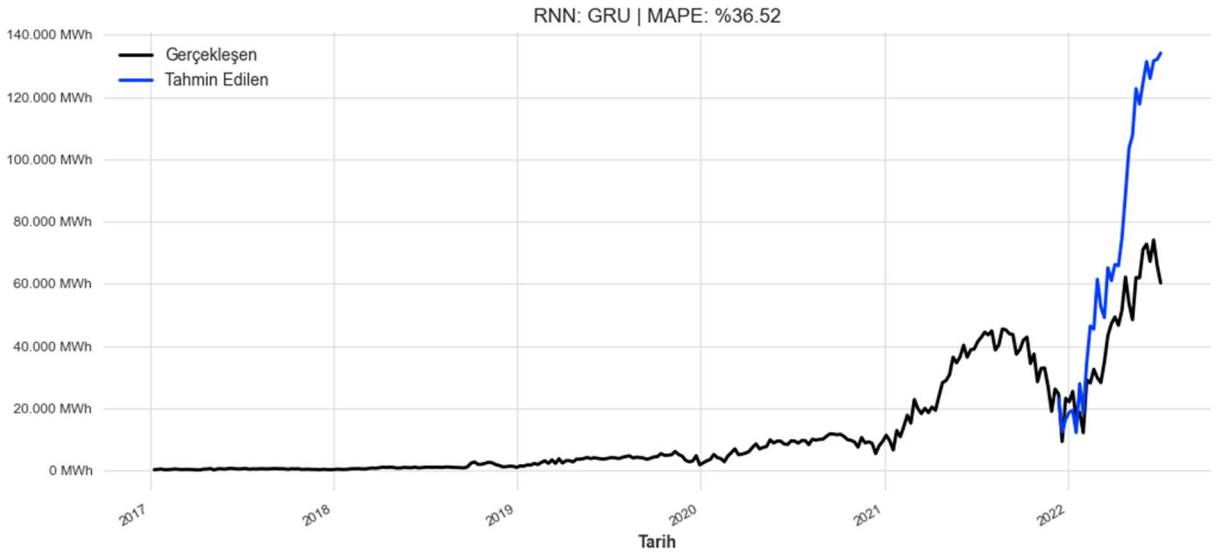
Şekil 35. Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretiminde LSTM Modelinin Test Sonucu

LSTM metodu ile eğitilen güneş enerjisi tahmin modeli, 2023 ve 2030 yılları arasındaki haftaların güneş enerjisi ile elektrik üretiminin tahminini yapmak için kullanılmıştır. Kümülatif ortalama eğilime bakıldığında yukarı doğru bir artış olduğu görülmektedir. Şekil 36, LSTM 2030 yılına kadar haftalık tahmin sonuçlarını göstermektedir. Fakat bu artış 2020 yılı ile 2022 yılları arasındaki artış gibi hızlı değildir. Güneş enerjisi tahmin modeli sonucunda, 2030 yılı için haftalık güneş enerjisi ile elektrik üretiminin 70.000 MWh ile 80.000 MWh arasında olacağı öngörülmektedir. Güneş enerjisi ile elektrik üretiminin mevsimsellik ve artan trend davranışı göstererek 2030 yılına kadar artacağı tahmin edilmektedir.



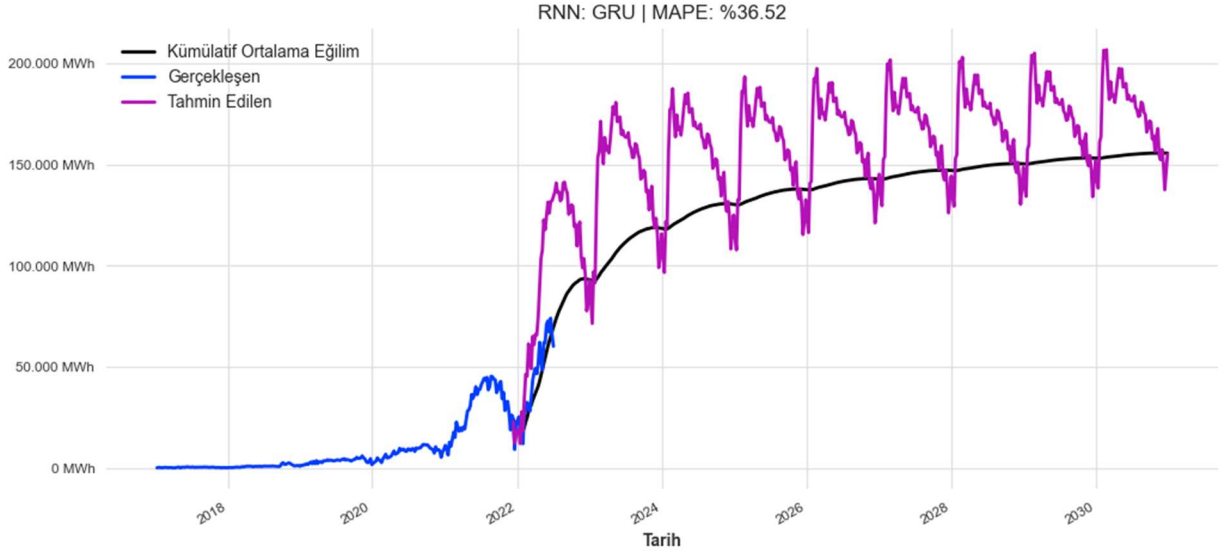
Şekil 36. Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretiminde LSTM Modelinin Tahmini

GRU metodu kullanarak güneş enerjisi ile haftalık elektrik üretim modeli oluşturulmuştur. 2022 ocak ile 2022 haziran ayları verileri ile GRU Modeli test edilmiş ve MAPE değeri olarak %36,52 bulunmuştur. Şekil 37, GRU test sonuçlarını göstermektedir. LSTM modelindeki gibi GRU Modeli de yukarı artış eğilimini yakalamıştır. GRU modeli, 2020 ocak ve 2022 haziran ayları arasındaki testlerinde, gerçek sonuçlardan daha fazla elektrik üretimi olacağı tahmininde bulunmuştur.



Şekil 37. Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretiminde GRU Modelinin Test Sonucu

2030 yılına kadar GRU modeli ile haftalık elektrik üretimi tahmin sonuçları Şekil 38’de verilmiştir. GRU model sonuçlarına göre haftalık üretimin 200.000 MWh seviyelerine çıkacağı ve LSTM model sonuçlarına kıyasla daha fazla haftalık elektrik üretimi yapılacağı öngörülmektedir. LSTM modelinde olduğu gibi, kümülatif ortalama eğilim artış yönündedir.



Şekil 38. Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretiminde GRU Modeli Üretim Tahmini

Güneş enerjisi ile elektrik üretimi için oluşturulan LSTM ve GRU modellerinin MAPE, RMSPE ve RMSE sonuçları Tablo 13'te verilmiştir. LSTM modeli MAPE, RMSPE ve RMSE'ye göre daha başarılı sonuçlar vermiştir.

Tablo 13. Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretiminde LSTM ve GRU Modellerinin Tahmin Performans Değerleri.

	LSTM	GRU
MAPE	21.37	36.51
RMSPE	0.35	0.67
RMSE	0.23	0.81

Güneş enerjisi ile elektrik üretim tahmininde daha başarılı olan LSTM modeli optimal enerji hesaplanması için kullanılmıştır. 2030 yılına kadarki haftalar için LSTM modeli ile elde edilen haftalık güneş enerjisi tahmin sonuçları, optimizasyon probleminde, karar değişkeni olarak kullanılmıştır.

3.2.2.3 Hidrolik ile Elektrik Üretimi Tahmini

Suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden faydalanılması çok eski tarihlere dayanmaktadır. Buhar makinesinin icadına kadar su ve rüzgâr hareket enerjisi en fazla kullanılan enerji çeşidiydi. Güneş ve rüzgâr enerjilerine kıyasla hidrolik enerjisi meteorolojik uyarılardan daha az etkilenmektedir.

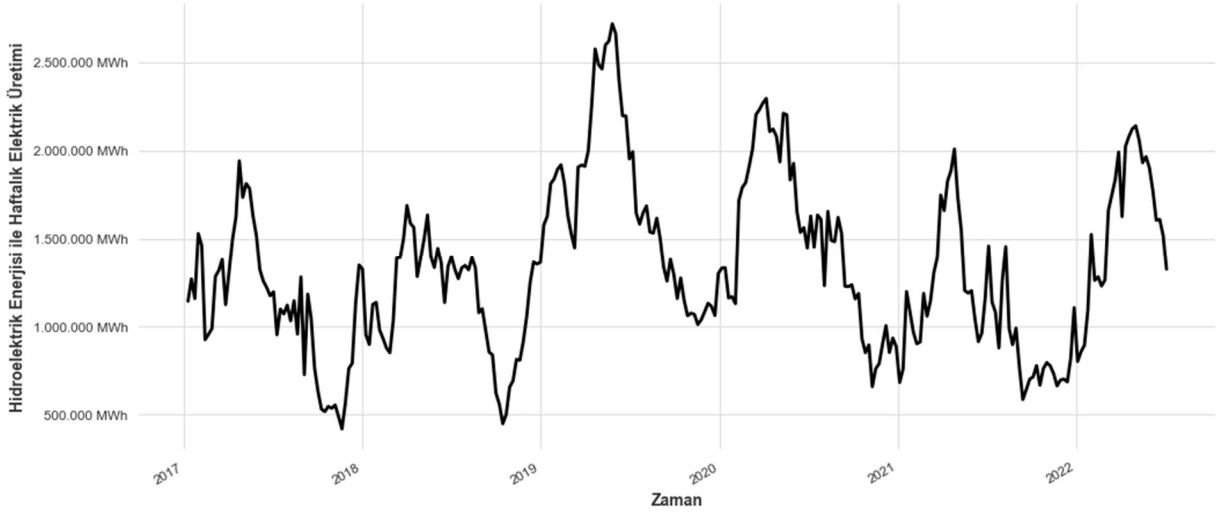
Hidroelektrik santrallerinin güneş, rüzgâr ve fosil enerji kaynaklarına karşı avantajı diğer santrallere kıyasla daha hızlı devreye girmesi veya devreden

çıkabilmesidir. Bir hidroelektrik santralinin ani talep değişimi sonrasında devreye girmesi birkaç dakikaya gereksinim duyarken bu süre termik santrallerde birkaç saati almaktadır.

Hidrolik enerjisinin avantajlarına rağmen, dezavantajları da bulunmaktadır. Hidroelektrik santralleri yapıldıkları bölgenin ekolojisini değiştirmektedir. Hidroelektrik santralinin rezervuarı yeterince derin değilse, suyu tutmak için geniş bir alan gereklidir. Su seviyesinin normalde olması gerekenden daha aşağıda veya yukarıda olacak şekilde değişimi bitkilerin gelişimine olumsuz etkide bulunabilir. Bir hidroelektrik rezervuarının yarattığı problemlerden bazıları; ormanın, canlı türlerinin ve üretken arazilerin tahrip olmasına yol açabilmesidir.

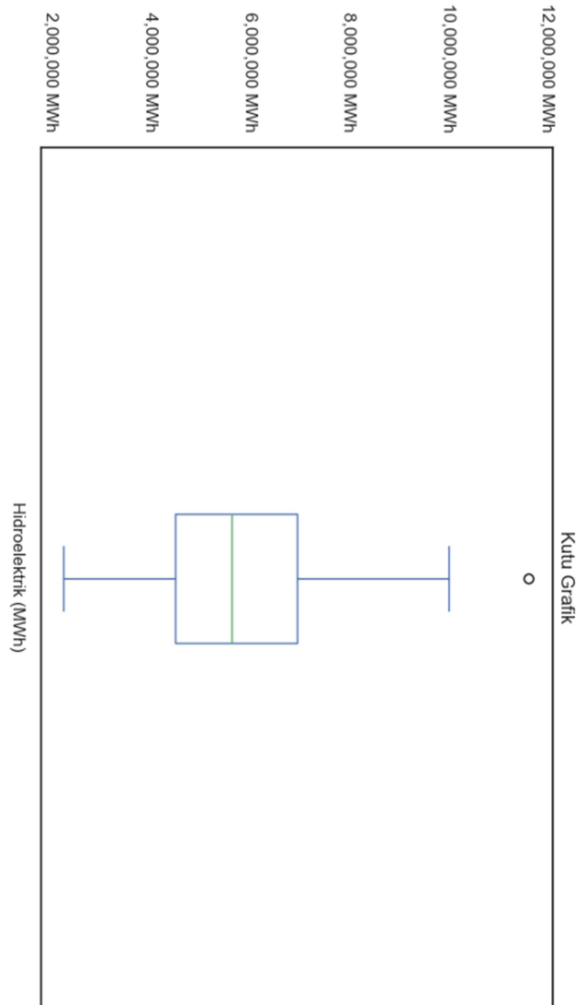
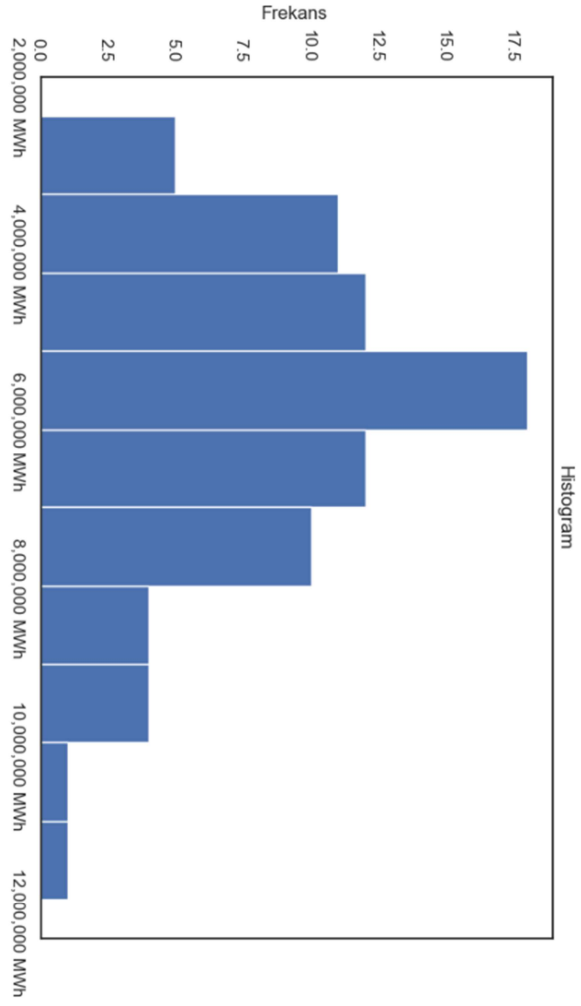
Türkiye’de, hidrolik enerjisi ile diğer yenilenebilir enerji çeşitlerine kıyasla daha fazla elektrik üretilmektedir. Bu durum hidroelektrik santrallerine yapılan yatırımların çok önceden başlaması ve hidroelektrik santrallerinde kullanılan teknolojilerin belli bir olgunluğa ulaşması ile açıklanabilir. Şekil 39, 2017 Ocak ayı ile 2022 Haziran ayları arasındaki haftalık elektrik üretimini göstermektedir. Uzun senelerdir aktif olarak devrede olduğu için yıllar itibarıyla gösterdiği periyodik davranış belirgin olarak görülmektedir. Baraj sularındaki veya akarsuların debilerindeki değişim, hidroelektrik üretim kapasitesini değiştirmektedir. Kar sularının erimesi ile bahar aylarında hidrolik enerjisi ile elektrik üretimde artışların olduğu söylenebilir. Talep tarafındaki artış da hidroelektrik üretiminde artışa neden olacaktır.

Termik santrallere göre yüksek sermaye maliyetlerine rağmen, daha uzun ömürlü olması ve üretim için suya bağlı olması, hidrolik enerjiyi ekonomik bir enerji kaynağı haline getirmektedir. Ancak su kıtlığına neden olan iklim değişikliği dünyanın hidroelektrik potansiyelini etkileyebilmektedir.



Şekil 39. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Haftalık Hidroelektrik Üretimi

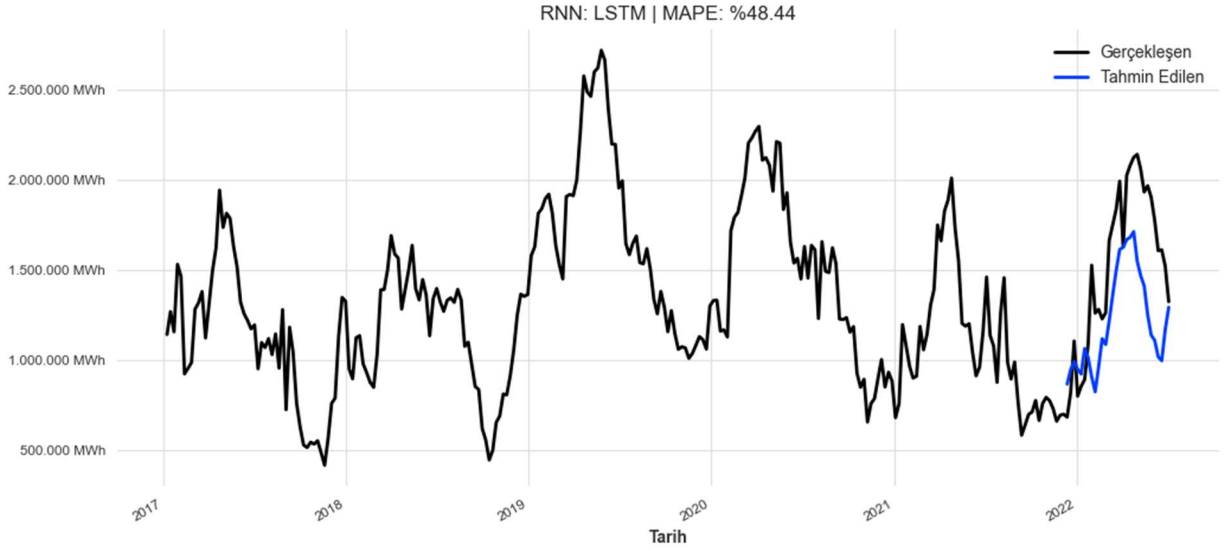
Uzun süredir aktif olarak kullanılan hidrolik enerjisinin, haftalık elektrik üretimi histogram dağılımı ve kutu grafiği Şekil 40'ta verilmiştir. Histogram dağılımın diğer yenilenebilir enerji çeşitleri ile kıyaslandığında daha simetrik olduğu görülmektedir. Kutu grafiği incelendiğinde aykırı değere sahip olmasına rağmen güneş enerjisi ile elektrik üretimi kadar fazla aykırı değerlere sahip olmadığı söylenebilir. Veri setlerinin dağılımı açısından ise sağa veya sola çarpık olmadığı simetrik olduğu söylenebilir.



Şekil 40. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Aylık Hidroelektrik Üretimi

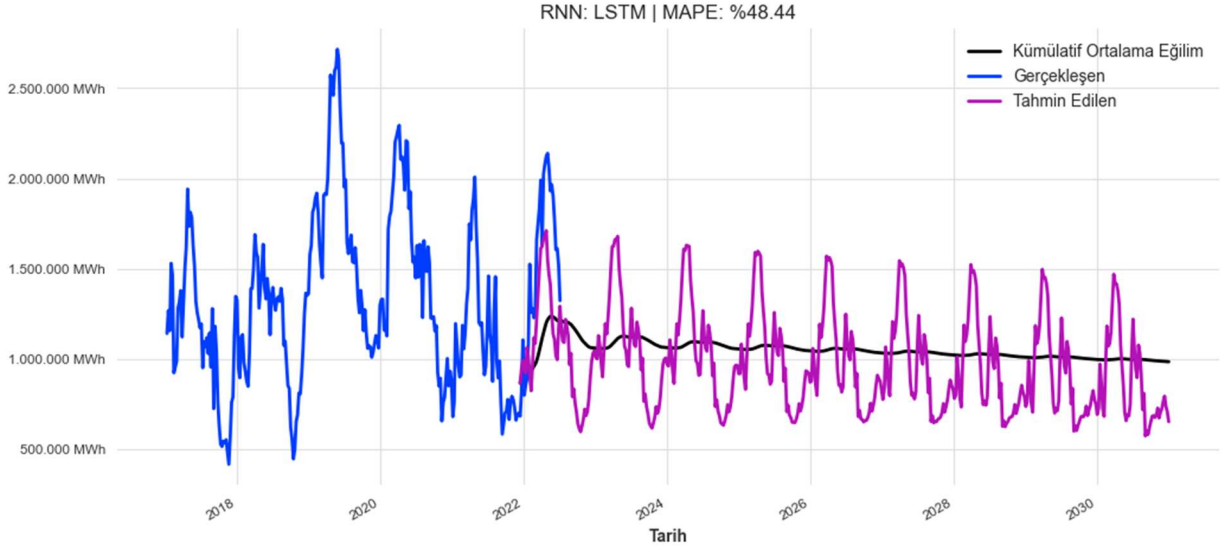
Histogram Dağılımı ve Kutu Grafiği

LSTM ve GRU metotları hidrolik enerjisi ile elektrik üretim tahmini için kullanılmıştır. 2017 ocak ayı ile 2021 aralık ayı arasındaki veri seti ile modeller eğitilmiştir. 2022 ocak ile 2022 haziran ayları arasındaki veri seti ile modeller test edilmiştir. Şekil 41, LSTM modeli ile hidrolik enerjisi haftalık tahmin sonucunu göstermektedir. LSTM modeli ile MAPE değeri %48,44 hesaplanmıştır. LSTM modelinin, hidrolik enerjisi ile elektrik tahmin modelinin artış ve azalış eğrileri yakaladığı görülmektedir.



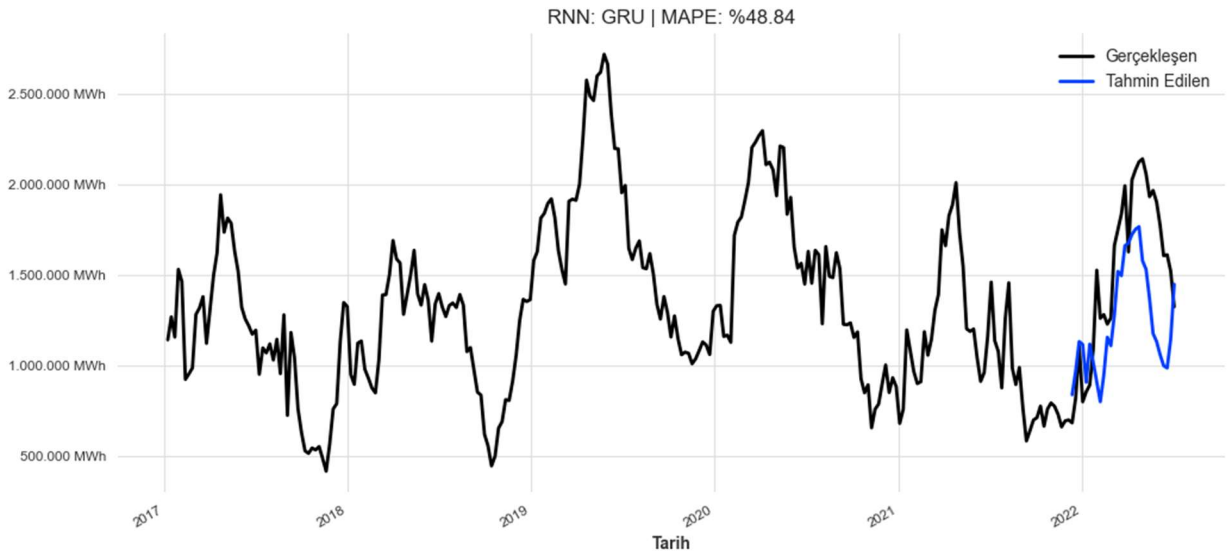
Şekil 41. Hidroelektrik Üretiminde LSTM Modeli Test Sonucu

LSTM metodu ile oluşturulan tahmin modeli, 2030 yılına kadarki elektrik üretiminin tahmini için kullanılmış ve sonuçlar Şekil 42’de verilmiştir. Hidroelektrik ile elektrik üretiminde aşağı doğru bir eğilimin olduğu görülmektedir. Hidrolik enerjisi ile üretilen elektrik miktarının haftalık 1.000.000 MWh gibi yüksek değerde olması, elektrik üretiminin azalması durumunda ciddi problemler ortaya çıkaracaktır. Hidrolik enerjisine yüksek oranda olan bağımlılık, üretiminin kapasitesinin azalması durumunda yerine kullanılabilecek enerji kaynağının bulunmasını da zorlaştıracaktır.



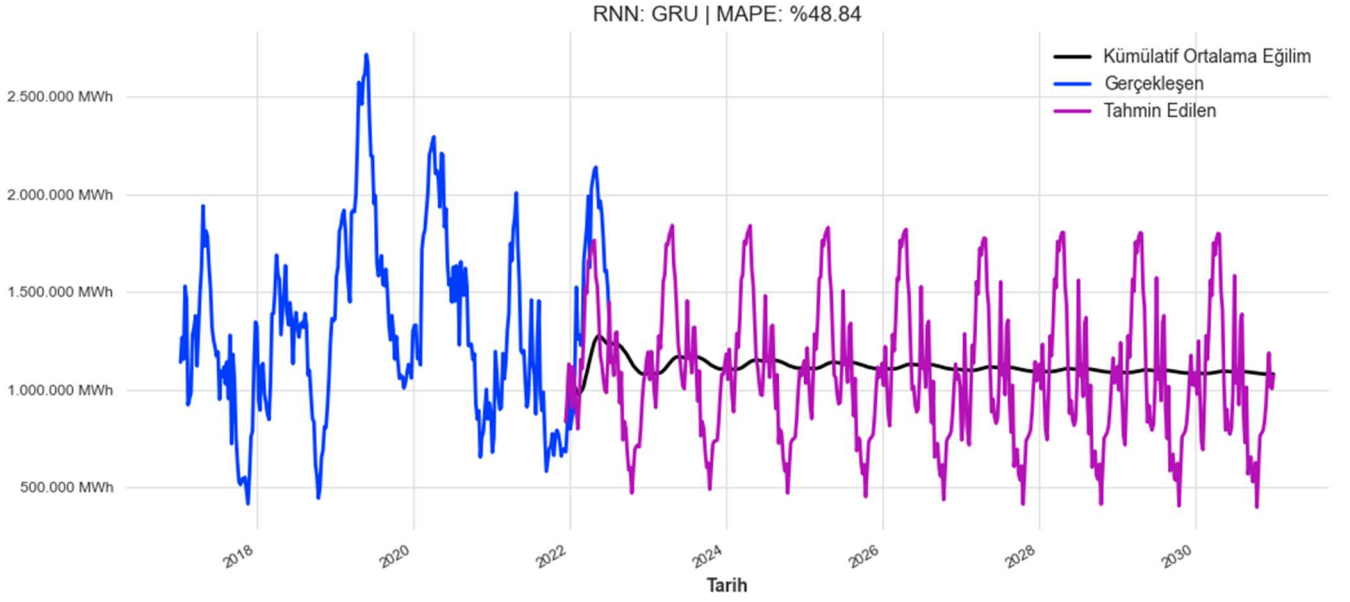
Şekil 42. Hidroelektrik Üretiminde LSTM Modelinin Tahmini

GRU metodu kullanılarak oluşturulan modelin tahmin sonuçları Şekil 43'te verilmiştir. MAPE değeri LSTM modeli ile benzer görünmektedir. LSTM modeli gibi GRU modeli de artış ve azalış eğrilerini yakalamıştır.



Şekil 43. Hidroelektrik Üretiminde GRU Modelinin Test Sonucu

GRU metodu kullanılarak oluşturulan tahmin modelinin sonuçlarına göre kümülatif ortalamanın aşağıya doğru eğilimde olduğu görülmektedir. Şekil 44, 2030 yılına kadarki tahmin sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 44. Hidroelektrik Üretiminde GRU Modelinin Üretim Tahmini

Hidrolik enerjisi için oluşturulan LSTM ve GRU modellerinin MAPE performansları birbirine çok yakındır. Tablo 14, LSTM ve GRU modellerinin MAPE, RMSPE ve RMSE sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 14. Hidroelektrik Üretiminde LSTM ve GRU Modellerinin Tahmin Performans Değerleri.

	LSTM	GRU
MAPE	48,44	48,83
RMSPE	0.35	0.38
RMSE	0.18	0.18

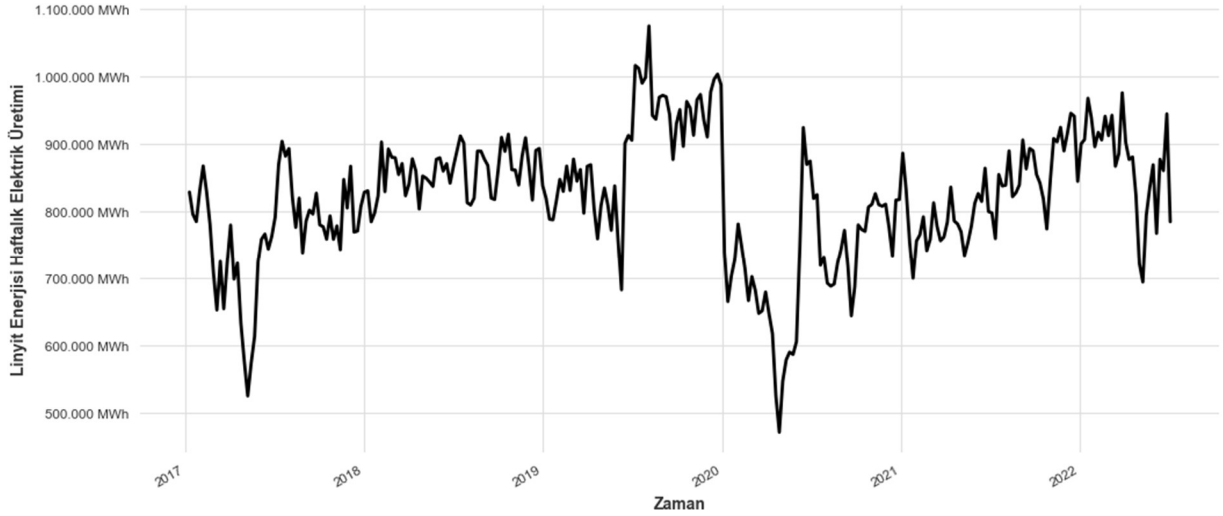
Hidrolik enerjisi ile elektrik üretim tahmininde başarılı olan LSTM modeli optimal enerji hesaplaması için kullanılmıştır. 2030 yılına kadarki haftalar için LSTM modeli ile elde edilen haftalık hidrolik enerjisi tahmin sonuçları, Karbondioksit emisyonunu minimize edecek olan amaç fonksiyonu optimize probleminde, karar değişkeni olarak kullanılmıştır.

3.2.2.4 Linyit ile Elektrik Üretimi Tahmini

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2020 yılında yayımladığı Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri raporuna göre linyit ile elektrik üretiminin, taşkömürü, ithal kömür ve doğal gazla göre çevreye karşı olumsuz etkileri daha fazladır. Elektrik üretimde emisyon faktörü linyit için 1,274

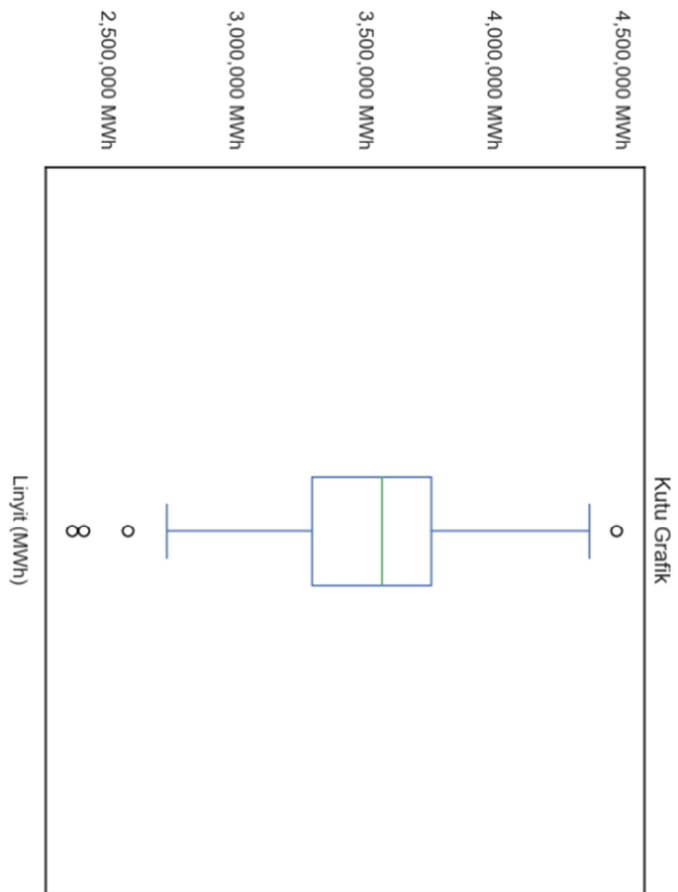
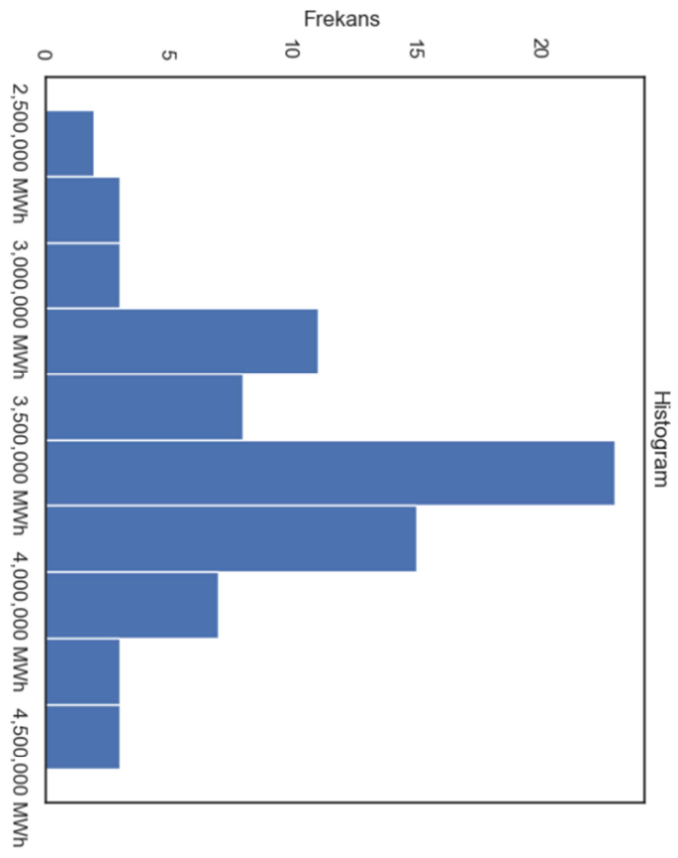
tCO₂/MWh, ithal kömür için 0.868 tCO₂/MWh, doğal gaz için 0.371 tCO₂/MWh'dir (T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).

Linyit ile elektrik üretimi haftalık 800.000 MWh çevresinde değişmektedir. Genel olarak linyit ile elektrik üretimi miktarında değişim az olmaktadır. Elektrik üretimi miktarında en fazla değişim 2019 ile 2021 yılları arasında görülmüştür. Şekil 45, 2017 Ocak ayı ile 2022 Haziran ayı arasında linyit kullanılarak üretilen haftalık elektrik miktarını göstermektedir.



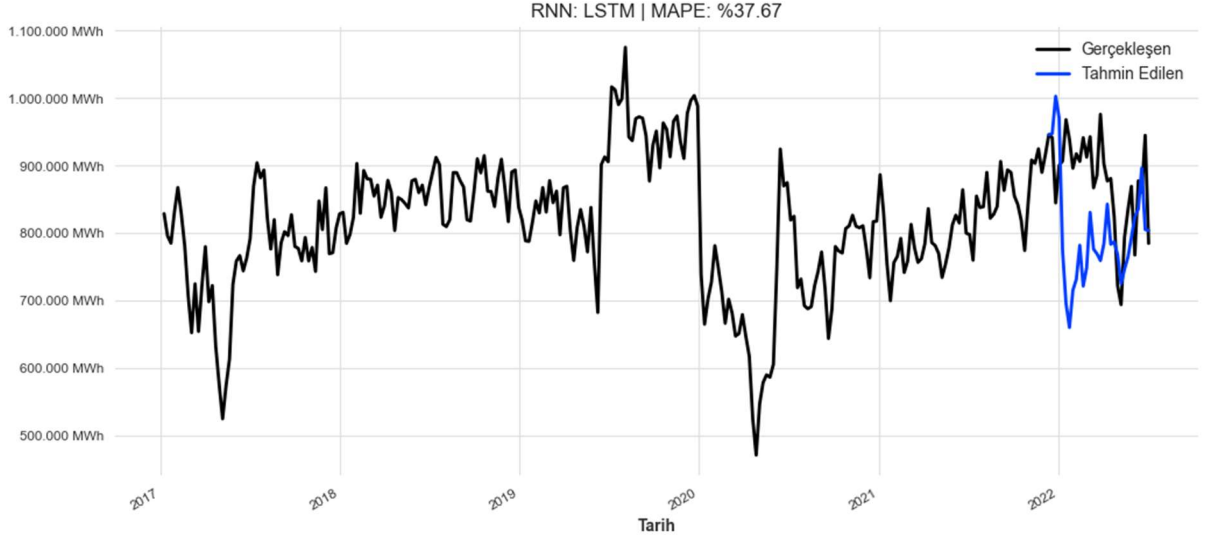
Şekil 45. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Linyit ile Haftalık Elektrik Üretimi

Linyit kullanılarak elde edilen elektrik miktarının histogram dağılımı incelendiğinde dağılımın simetrik olduğu görülmektedir. Şekil 46, linyit histogram dağılımını göstermektedir. Kutu grafiğinde veri setlerinin dağılımı incelendiğinde sola çarpık olduğu görülmektedir. Kutu grafiğinde, linyit ile elektrik üretiminde aykırı üretim değerlerine sahip olduğu görülmektedir.



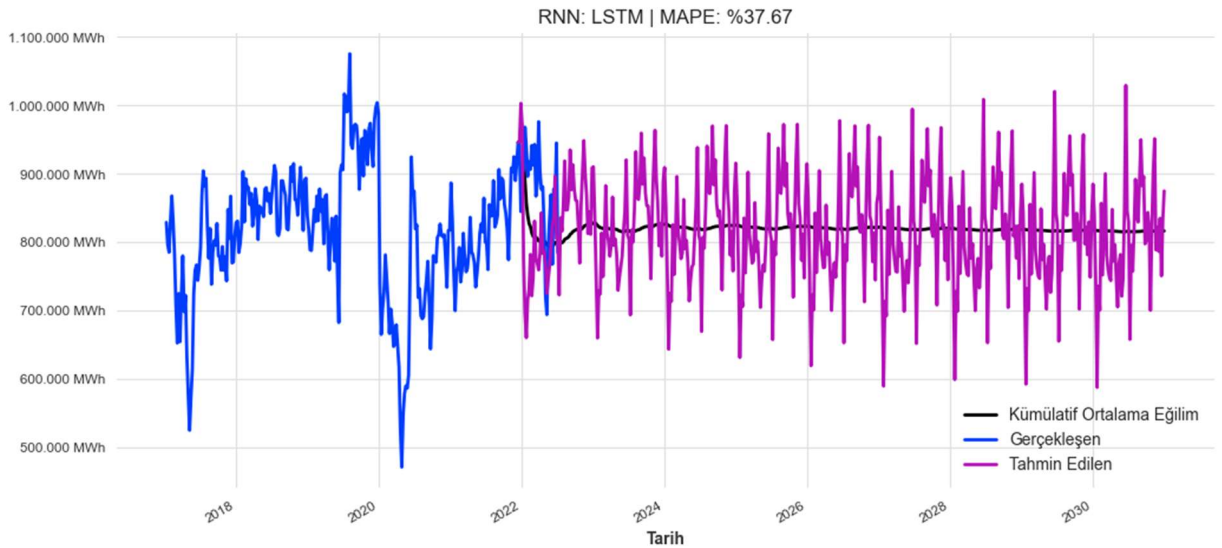
Şekil 46. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Linyit ile Aylık Elektrik Üretimi Histogram Dağılımı ve Kutu Grafiği

LSTM ve GRU metotları linyit ile elektrik üretimi veri setleri için kullanılmış olup LSTM ve GRU modelleri oluşturulmuştur. 2017 ocak ile 2021 aralık ayları arasındaki veri seti ile modeller eğitilmiştir. 2022 ocak ile 2022 haziran ayları arasındaki veri seti ile modeller test edilmiş ve MAPE değerleri hesaplanmıştır. Şekil 47, LSTM modelinin test sonuçlarını göstermektedir. LSTM modelinin test edilmesi sonucunda hesaplanan MAPE değeri %37,67'dir.



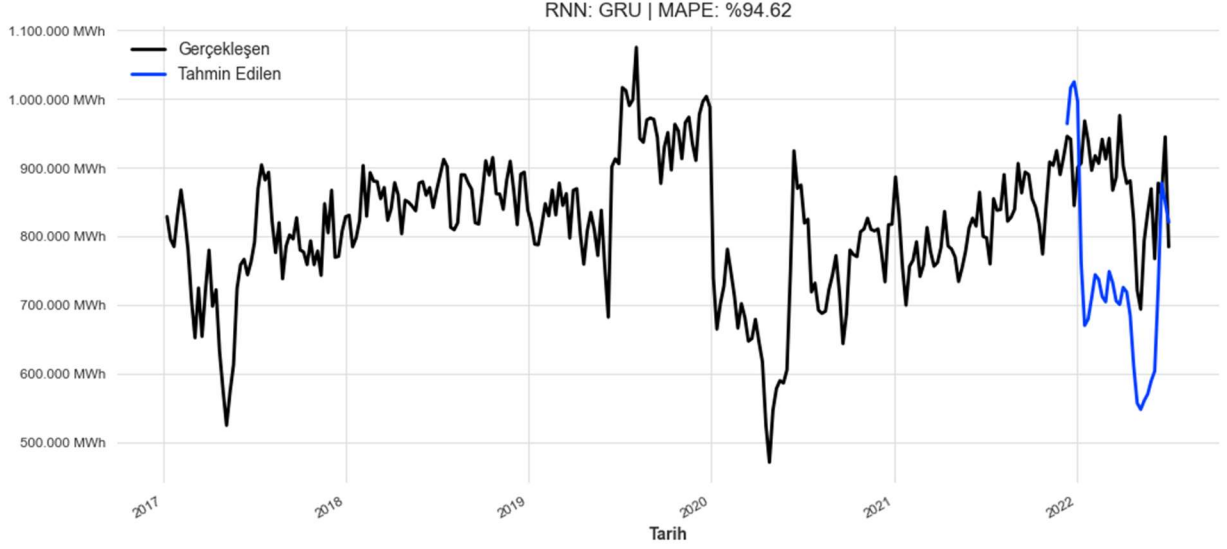
Şekil 47. Linyit ile Elektrik Üretiminde LSTM Modeli Test Sonucu

LSTM metodu kullanılarak elde edilen elektrik üretim tahmin modeli, 2030 yılına kadarki haftalık elektrik üretim değerleri için kullanılmıştır. Linyit kullanımında kümülatif ortalama eğilimin ve tahmin edilen değerlerin yatay seyrettiği görülmektedir. Şekil 48, kümülatif ortalama eğilimini, gerçekleşen ve tahmin edilen elektrik miktarını göstermektedir.



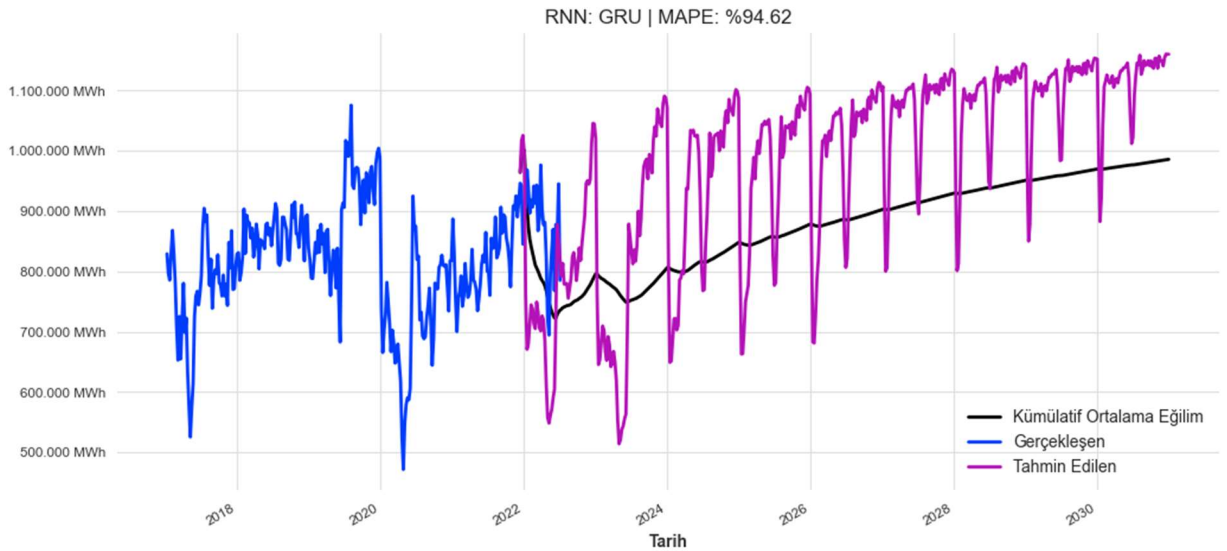
Şekil 48. Linyit ile Elektrik Üretiminde LSTM Modelinin Tahmini

GRU metodu kullanılarak elde edilen tahmin sonuçları, Şekil 49'da verilmiştir. MAPE değeri %94,62 olarak hesaplanmıştır. GRU modeli, LSTM modeline göre başarısız bir performans sergilemiştir.



Şekil 49. Linyit ile Elektrik Üretiminde GRU Modelinin Test Sonucu

GRU modeline göre haftalık linyit ile elektrik üretimi sonuçları Şekil 50'de verilmiştir. GRU modelinin sonuçlarına göre linyit kullanımı 2030 yılına kadar artış eğiliminde olacak ve haftalık 1.000.000 MWh'lik üretimi geçecektir.



Şekil 50. Linyit ile Elektrik Üretiminde GRU Modeli Üretim Tahmini

Linyit için oluşturulan LSTM ve GRU modellerinin MAPE performansları arasındaki fark fazladır. LSTM modeline göre MAPE değeri %37,67 iken GRU modeline göre %94,61 olarak hesaplanmıştır. Tablo 15, LSTM GRU modellerinin MAPE, RMSPE ve RMSE sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 15. Linyit ile Elektrik Üretiminde LSTM ve GRU Modellerinin Tahmin Performans Değerleri.

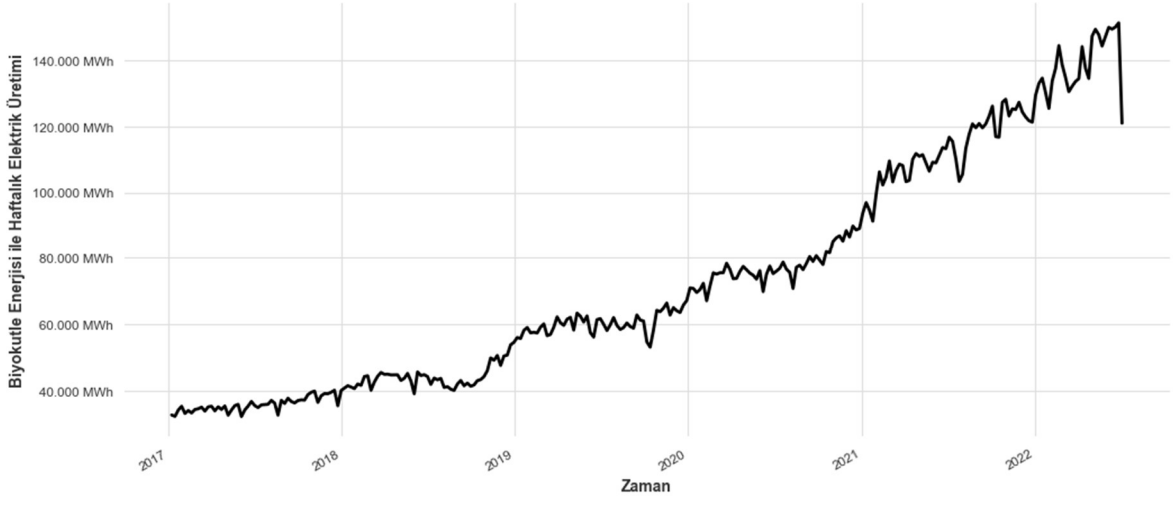
	LSTM	GRU
MAPE	37.67	94.61
RMSPE	0.29	0.46
RMSE	0.21	0.30

Linyit ile elektrik üretimi tahmininde başarılı olan LSTM modeli optimal enerji hesaplanması için kullanılmıştır. 2030 yılına kadarki haftalar için LSTM modeli ile elde edilen haftalık linyit ile elektrik üretim tahmin sonuçları, Karbondioksit emisyonunu minimize edecek olan amaç fonksiyonu optimize probleminde, karar değişkeni olarak kullanılmıştır.

3.2.2.5 Biyokütle ile Elektrik Üretimi Tahmini

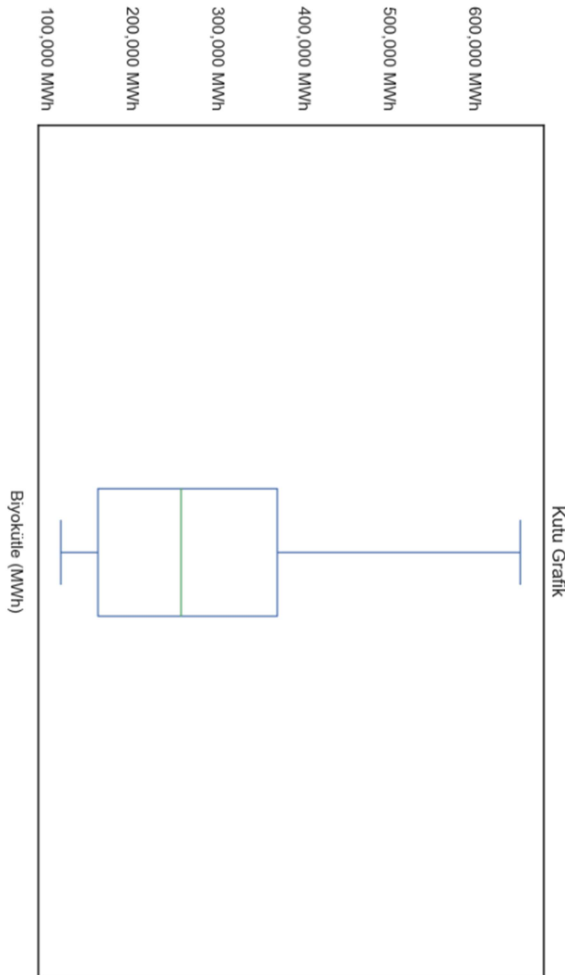
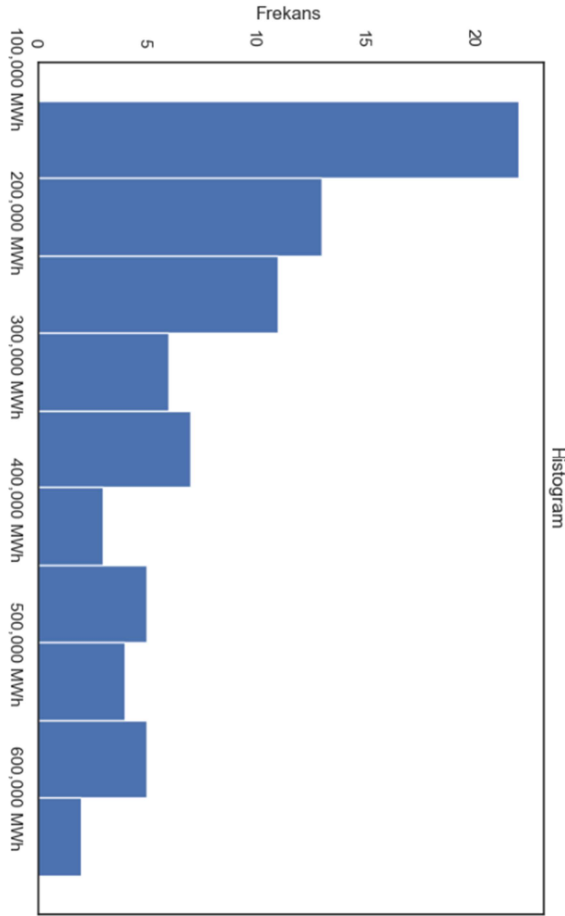
Biyokütle ile enerji üretiminde kullanılan kaynaklar bitkisel kaynaklar, hayvansal atıklar, şehir ve endüstri atıklarıdır. Biyokütle enerjisi ile elektrik üretimi yanma sonucu meydana geldiği için üretim sırasında az da olsa karbondioksit emisyonu gerçekleşir. Biyokütle enerjisinin önemli avantajları, tek bir kaynağa bağlı olmaması ve üretildiği anda kullanılmasının gerekli olmaması ve atık bertaraf problemini çözebilecek bir yöntem olmasıdır. Biyokütle enerjisi, enerji bağımlılığı yüksek olan ve yüksek miktarda atık üreten ülkelerde aktif olarak kullanılabilecek bir enerji kaynağıdır.

Biyokütle enerjisi ile elektrik üretimi, güneş enerjisi ile elektrik üretimindeki gibi son yıllarda hızlı artış göstermiştir. 2020 yılında haftalık 60.000 MWh olan üretim, 2022 yılında 2 katından fazla bir artış ile 140.000 MWh seviyesine ulaşmıştır. Şekil 51, biyokütle enerjisi ile haftalık elektrik üretimini göstermektedir.



Şekil 51. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Biyokütle ile Haftalık Elektrik Üretimi

Biyokütle ile haftalık elektrik üretiminin histogram dağılımı, güneş enerjisi ile elektrik üretiminin histogram dağılımı ile benzerlik göstermektedir. Şekil 52, biyokütle histogram dağılımı ve kutu grafiğini göstermektedir. Kutu grafiği incelendiğinde, medyan değerinin 200.000 MWh ile 300.000 MWh arasında olduğu görülmektedir. Veri setleri dağılımlarına göre, sağa veya sola çarpık olmadığı söylenebilir. Kutu grafiğine göre aykırı değerlere rastlanmamıştır.



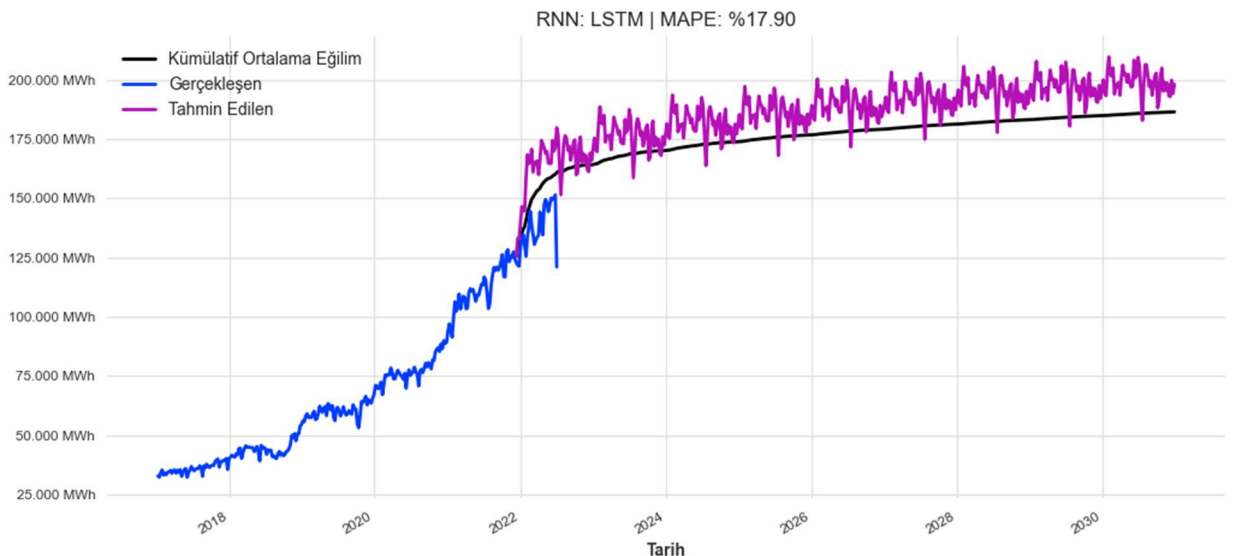
Şekil 52. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Biyokütle ile Aylık Elektrik Üretimi Histogram Dağılımı ve Kutu Grafiği

LSTM ve GRU modelleri biyokütle ile haftalık elektrik üretimi zaman serileri üzerinde çalışılmıştır. Diğer enerji kaynaklarına kıyasla, MAPE değerleri en başarılı modeller elde edilmiştir. Modeller 2017 ocak ile 2021 aralık ayları ile eğitilmiştir. 2022 ocak ile 2022 haziran ayları ile de modeller test edilmiştir. LSTM modeli sonucu MAPE değeri %17,90 olarak hesaplanmıştır. Şekil 53, LSTM modelinin test sonuçlarını göstermektedir. LSTM modelinin sonuçlarına göre tahmin sonuçları gerçek değerlerden daha fazla hesaplanmıştır.



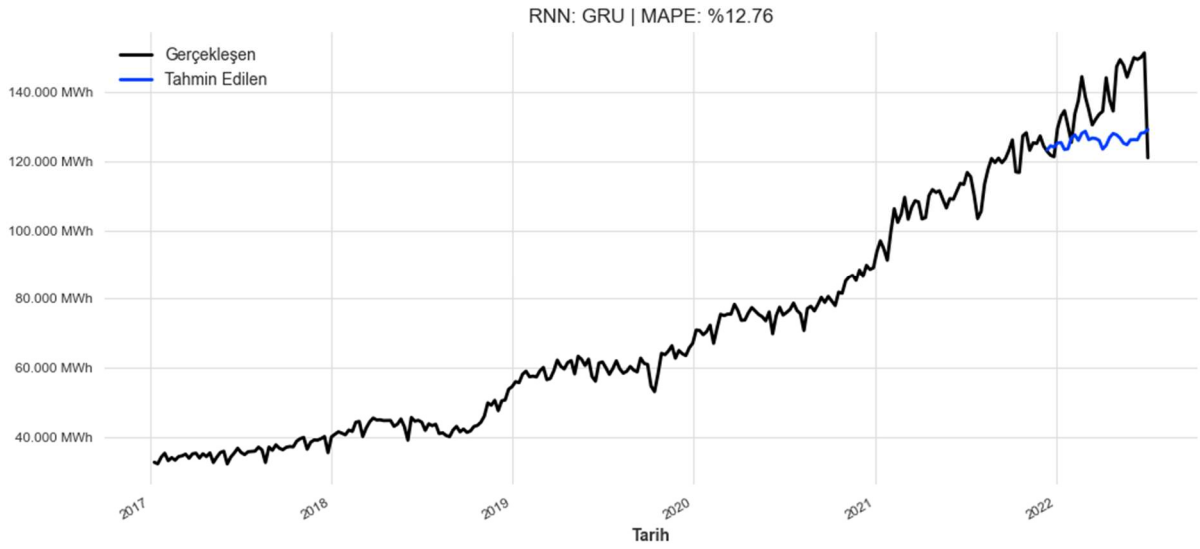
Şekil 53. Biyokütle ile Elektrik Üretiminde LSTM Modeli Test Sonucu

LSTM modeli kullanılarak 2030 yılına kadar biyokütle ile üretilen haftalık elektrik üretimi hesaplanmıştır. Şekil 54, tahmin sonuçlarını göstermektedir. Kümülatif ortalama eğilimine göre 2030 yılına kadar artış görülmektedir. 2022 yılında haftalık 150.000 MWh üretiminin 2030 yılında 200.000 MWh seyrinde olacağı tahmin edilmiştir.



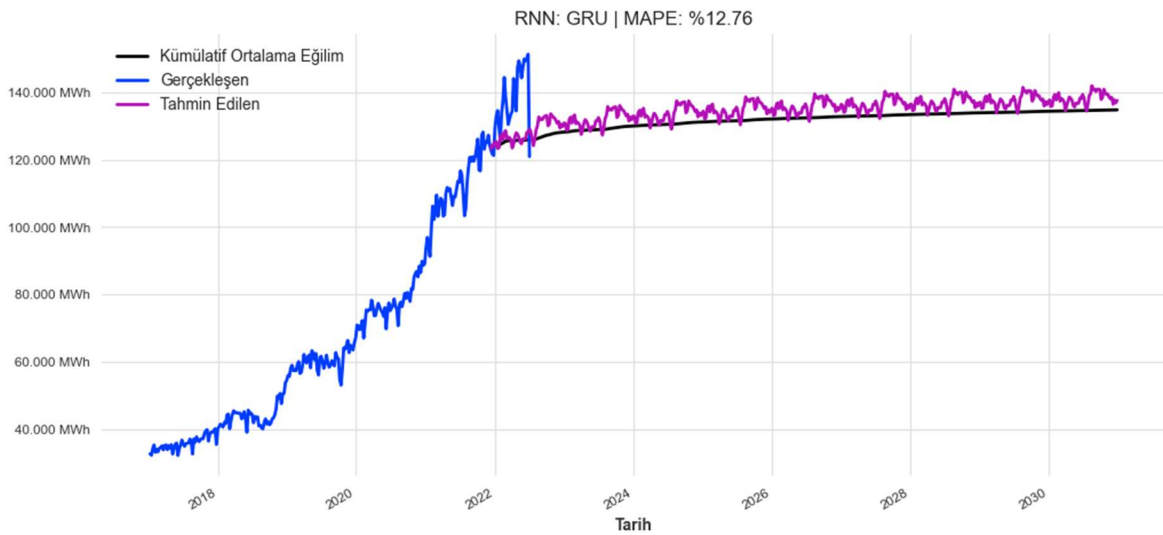
Şekil 54. Biyokütle ile Elektrik Üretiminde LSTM Modelinin Tahmini

GRU metodu kullanılarak oluşturulan modelin MAPE değeri %12,76 olarak hesaplanmıştır. MAPE değerlerine göre, GRU modeli LSTM modeline göre daha başarılıdır. Şekil 55, GRU modelinin tahmin sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 55. Biyokütle ile Elektrik Üretiminde GRU Modelinin Test Sonucu

GRU modeli kullanılarak 2030 yılına kadar biyokütle enerji kaynağı ile üretilen haftalık elektrik miktarı Şekil 56'da verilmiştir. 2020 ile 2022 yılları arasındaki artış ivmesinin devam etmeyeceği fakat kümülatif ortalama eğiliminin yukarı yönlü olduğu görülmektedir.



Şekil 56. Biyokütle ile Elektrik Üretiminde GRU Modeli Üretim Tahmini

Biyokütle enerjisi ile elektrik üretimi tahmini için oluşturulan LSTM ve GRU modellerinin MAPE, RMSPE ve RMSE sonuçları Tablo 16'da verilmiştir. GRU modeli, MAPE değerine göre daha başarılıdır.

Tablo 16. Biyokütle ile Elektrik Üretiminde LSTM ve GRU Modellerinin Tahmin Performans Değerleri.

	LSTM	GRU
MAPE	17.89	12.75
RMSPE	0.25	0.12
RMSE	0.27	0.14

Biyokütle ile elektrik üretimi tahmininde başarılı olan GRU modeli optimal enerji hesaplanması için kullanılmıştır. 2030 yılına kadarki haftalar için GRU modeli ile elde edilen haftalık biyokütle enerjisi tahmin sonuçları, optimize probleminde, karar değişkeni olarak kullanılmıştır.

3.2.2.6 Doğal gaz ile Elektrik Üretim Tahmini

Doğal gaz kullanan santrallerde, türbinlerin hareketleri doğal gaz yanması ile gerçekleşir. Doğal gaz ile elektrik üretimi yüksek verimli olduğu ve tam yanma gerçekleştiği için termik santrallere göre çevreye daha düşük miktarda karbondioksit gazı salınır. Diğer fosil yakıtlara kıyasla daha verimli olması ve daha az karbondioksit emisyonu üretmesi doğal gaz ile elektrik üretimini cazip hâle getirmiştir.

Doğal gaz kullanılarak elektrik üretiminin dezavantajlarından biri diğer enerji kaynaklarına kıyasla daha pahalı hale gelmiş olmasıdır. Doğal gaz fiyatlarındaki değişimler, üretilen elektriğin maliyetini önemli ölçüde değiştirmektedir. Doğal gaz maliyetlerindeki artışlar, elektrik üretim karışımı içerisindeki kullanım oranını azaltmaktadır.

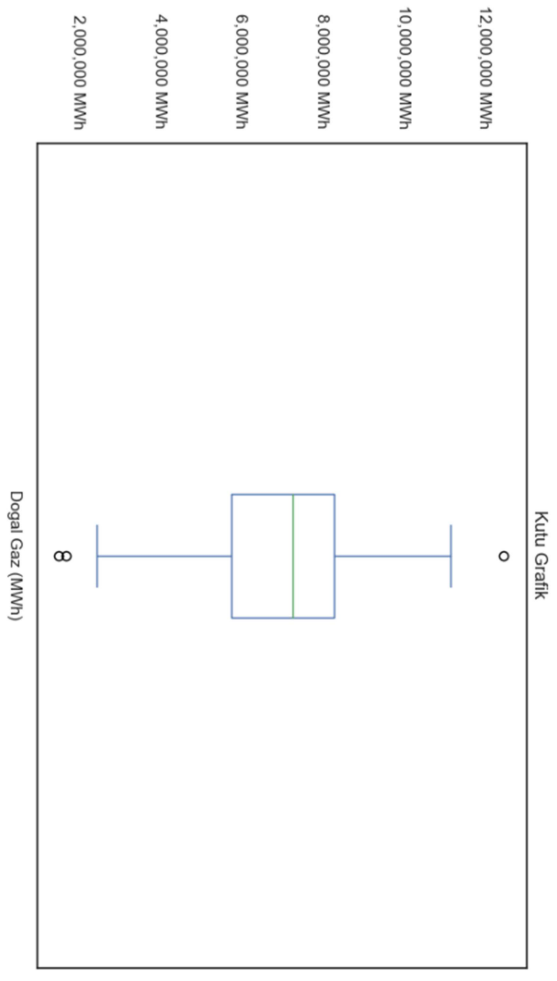
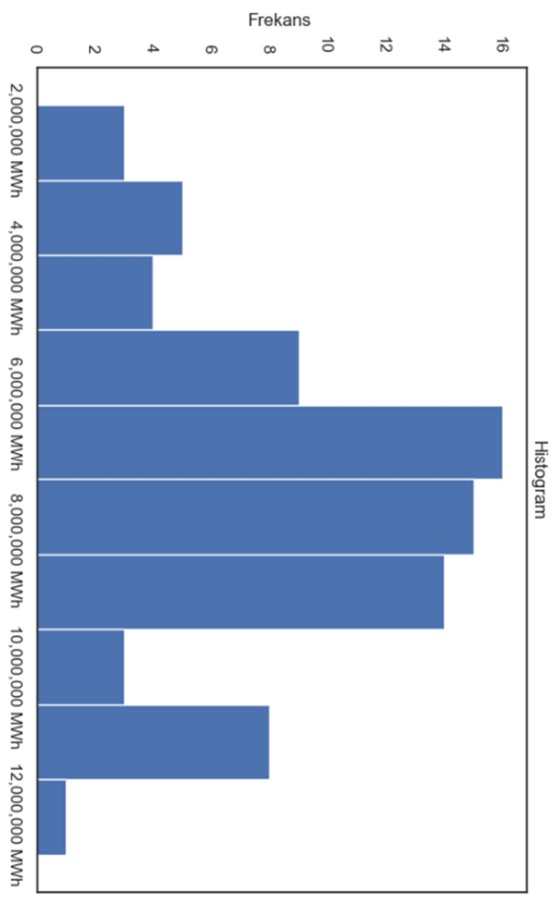
Doğal gaz enerjisi ile elektrik üretimi haftalık 3.000.000 MWh gibi yüksek değerlerdedir. Şekil 57, 2017 Ocak ile 2022 Haziran ayları arasında haftalık elektrik üretimi değişimini göstermektedir. Doğal gaz ile elektrik üretiminin en düşük ile en yüksek üretimleri arasında 2.500.000 MWh gibi ciddi değişimler olduğu görülmektedir.



Şekil 57. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Doğal Gaz ile Haftalık Elektrik Üretimi

Doğal gaz enerjisi ile üretilen aylık elektrik üretiminin histogram dağılımı ve kutu grafiği Şekil 58’de gösterilmektedir. Kutu grafiğine göre medyan değeri 6.000.000 MWh ile 8.000.000 MWh arasında değişmektedir. Veri setleri dağılımı incelendiğinde ise sola çarpık olduğu görülmektedir. Minimum ve maksimum noktalarında aykırı değere sahip olduğu görülmektedir.





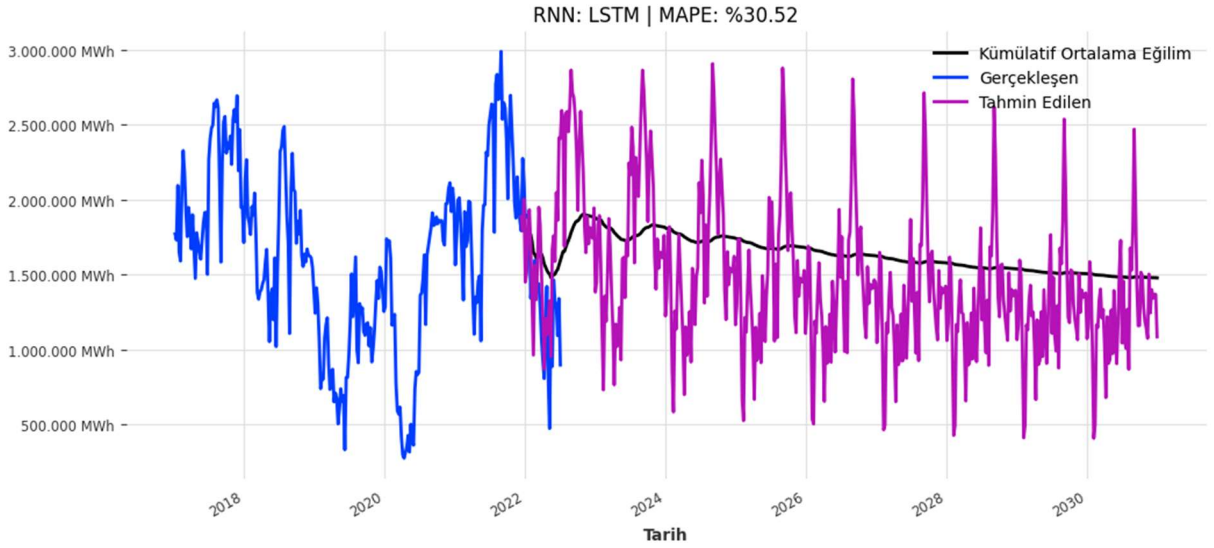
Şekil 58. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Doğal Gaz ile Aylık Elektrik Üretimi Histogram Dağılımı Ve Kutu Grafiği

LSTM modeli kullanarak elde edilen model sonucunda %30,52 MAPE değeri elde edilmiştir. Şekil 59, LSTM modelinin test sonuçlarını göstermektedir.



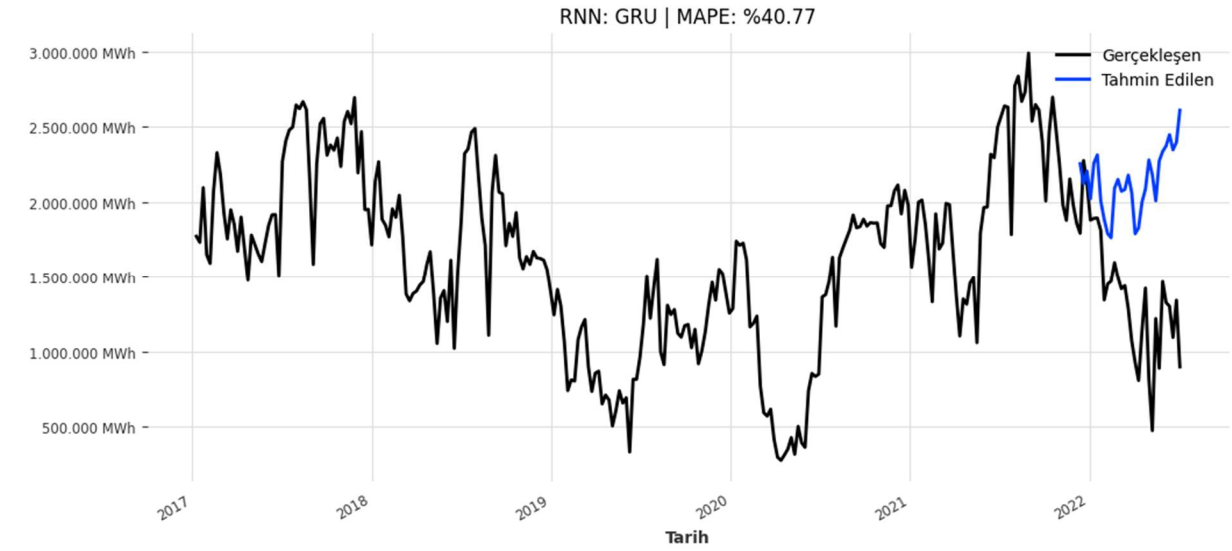
Şekil 59. Doğal Gaz ile Elektrik Üretiminde LSTM Modeli Test Sonucu

LSTM modeli kullanarak 2030 yılına kadar haftalık değişim Şekil 60'ta gösterilmektedir. Kümülatif ortalama eğiliminin aşağı doğru olduğu görülmektedir. Tahmin edilen haftalık elektrik üretiminin 2.500.000 MWh olduğu görülmektedir.



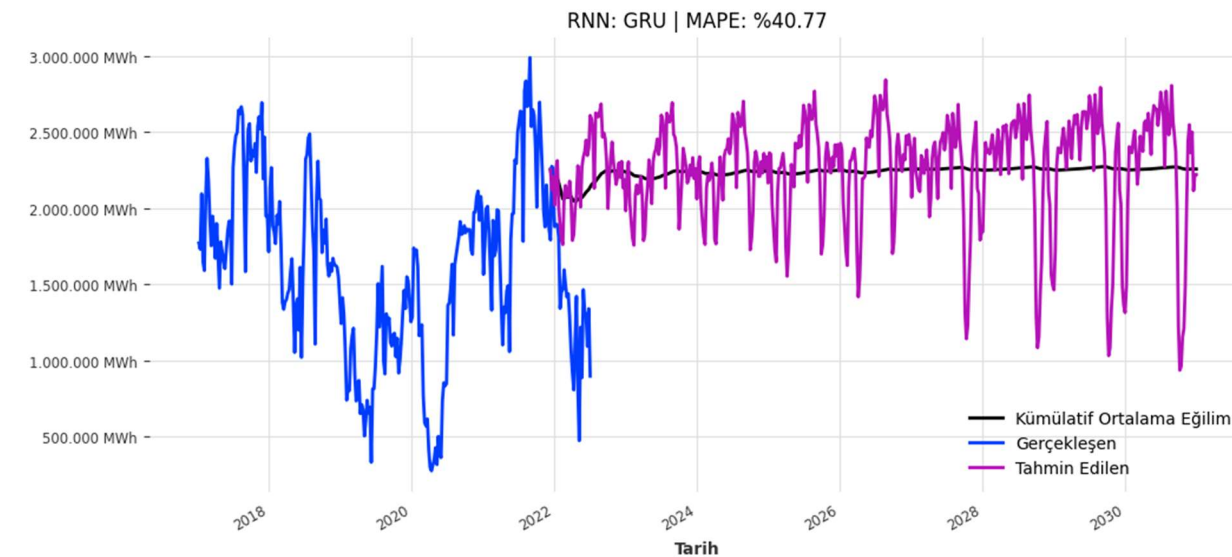
Şekil 60. Doğal Gaz ile Elektrik Üretiminde LSTM Modelinin Tahmini

GRU modeli kullanılarak oluşturulan modelin MAPE değeri %40,77 olarak hesaplanmıştır. MAPE değerlerine göre, GRU modeli LSTM modelinden daha başarısızdır. Şekil 61, GRU modelinin tahmin sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 61. Doğal Gaz ile Elektrik Üretiminde GRU Modelinin Test Sonucu

GRU modeli kullanılarak 2030 yılına kadar tahmin edilen haftalık elektrik miktarı Şekil 62’de verilmiştir. Kümülatif ortalama eğiliminin yatay seyrettiği görülmektedir.



Şekil 62. Doğal Gaz ile Elektrik Üretiminde GRU Modeli Üretim Tahmini

Doğal gaz ile elektrik üretimi tahmini için oluşturulan LSTM ve GRU modellerinin MAPE, RMSPE ve RMSE sonuçları Tablo 16’de verilmiştir. GRU modeli MAPE değerine göre daha başarılıdır.

Tablo 17. Doğal Gaz ile Elektrik Üretiminde LSTM ve GRU Modellerinin Tahmin Performans Değerleri.

	LSTM	GRU
MAPE	30.51	40.77
RMSPE	1.01	1.93
RMSE	0.19	0.32

Doğal gaz ile elektrik üretimi tahmininde başarılı olan LSTM modeli optimal enerji hesaplanması için kullanılmıştır. 2030 yılına kadarki tüm haftalar için LSTM modeli ile elde edilen haftalık doğal gaz enerjisi tahmin sonuçları, Karbondioksit emisyonunu minimize edecek olan amaç fonksiyonu optimize probleminde, karar değişkeni olarak kullanılmıştır.

3.2.2.7 Jeotermal ile Elektrik Üretim Tahmini

Jeotermal enerji santrallerinden elektrik enerjisi, yerin derinliklerindeki birikmiş olan ısının, yeryüzüne çıkartılarak ile işlenmesi ile elde edilir. Jeotermal enerji, diğer yenilenebilir kaynaklar gibi yüksek sermaye maliyetinin dezavantajına sahip olsa da onlardan farklı olarak hava koşullarına bağlı değildir. Jeotermal sahalar, özellikle doğrudan kullanım için dünyanın her yerinde mevcuttur. Elektrik üretiminde rekabetçi olmak için, bir jeotermal enerji kaynağının sıcaklığı belli bir seviyenin üzerinde olması gerekir. Maliyet seviyesi, kaynak sıcaklığı ve basıncından, Dünya yüzeyinden rezervuar derinliğinden, teknoloji türünden ve sondaj pazarından etkilenir. Jeotermal enerji santrallerinin dezavantajlarından biri sondajla çıkarılıp ısı kullanılarak jeotermal kaynak, içindeki kimyasal maddeler nedeniyle çevre için problemlere neden olabilmektedir.

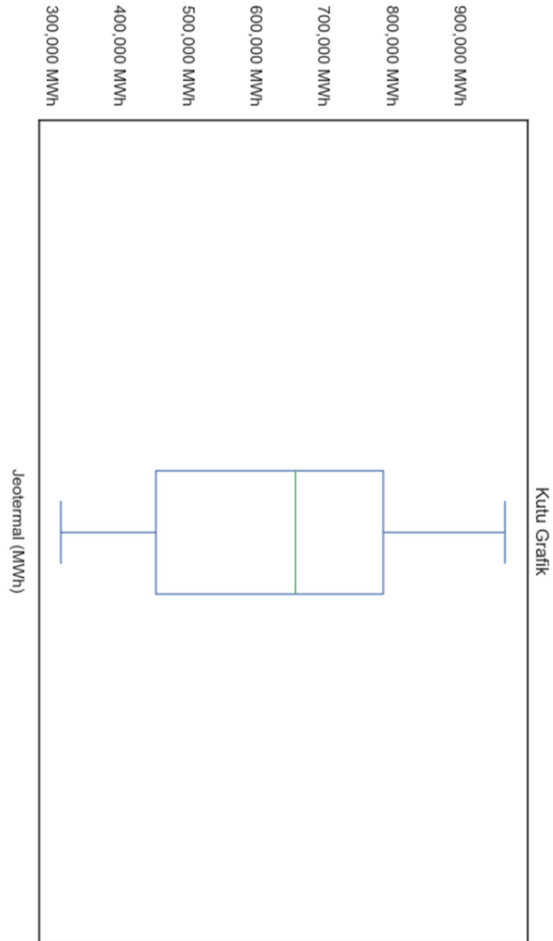
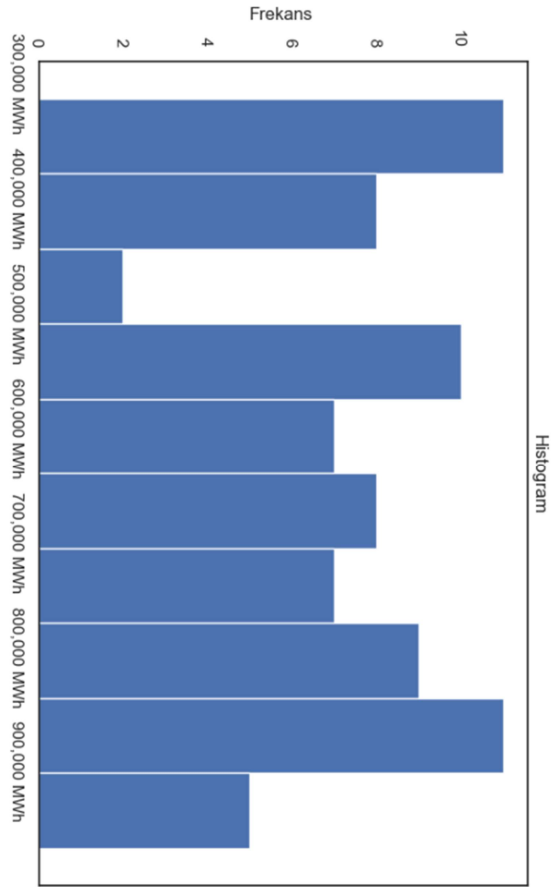
2017 yılında haftalık 100.000 MWh olan elektrik üretimi, periyodik olarak artmaktadır. 2022 yılında 220.000 MWh değerine ulaşmıştır. Şekil 63, jeotermal enerjisi ile haftalık elektrik üretim miktarını göstermektedir. Jeotermal ile elektrik üretim miktarı, mevsimsel ve artan trend davranışı sergilemektedir.



Şekil 63. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Jeotermal ile Haftalık Elektrik Üretimi

Şekil 64, jeotermal enerjisi ile üretilen haftalık elektrik üretimi miktarının histogram dağılımını ve kutu grafiğini göstermektedir. Kutu grafiği incelendiğinde, aykırı değerlere sahip olmadığı görülmektedir. Veri setleri dağılımına göre sola çarpık olduğu görülmektedir.





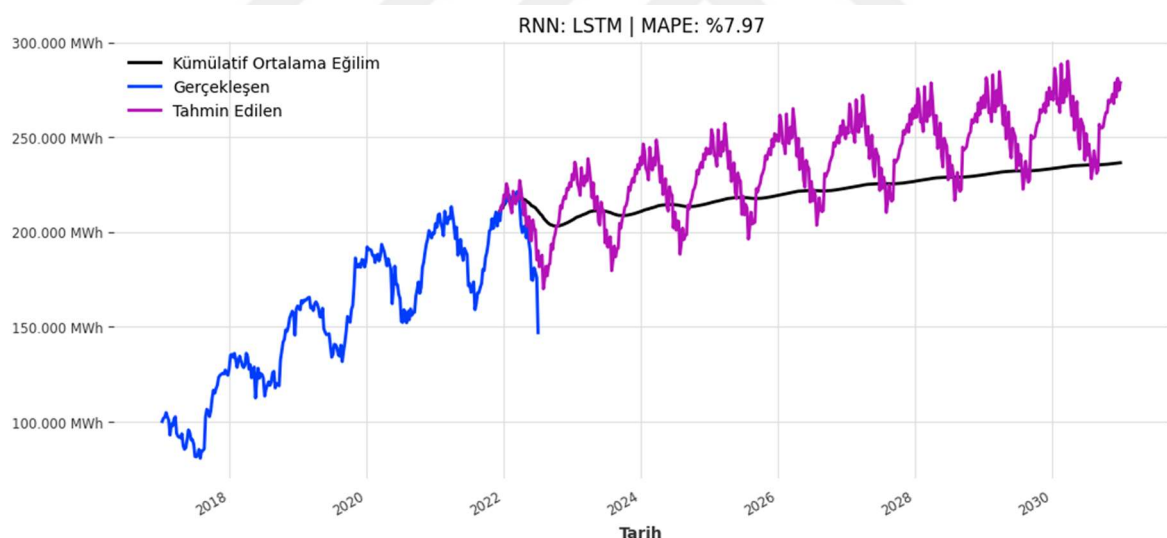
Şekil 64. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Jeotermal ile Aylık Elektrik Üretimi Histogram Dağılımı Ve Kutu Grafiği

LSTM ve GRU metotları jeotermal ile elektrik üretimi tahmini için çalışılmıştır. Veri setindeki periyodik hareketlerin tahmin performansını olumlu etkilediği söylenebilir. LSTM için MAPE değeri %7,97 hesaplanmıştır. Şekil 65, LSTM metodu ile oluşturulan tahmin modelinin sonuçlarını göstermektedir. LSTM modeli test aşamasında azalış eğilimini yakalamıştır.



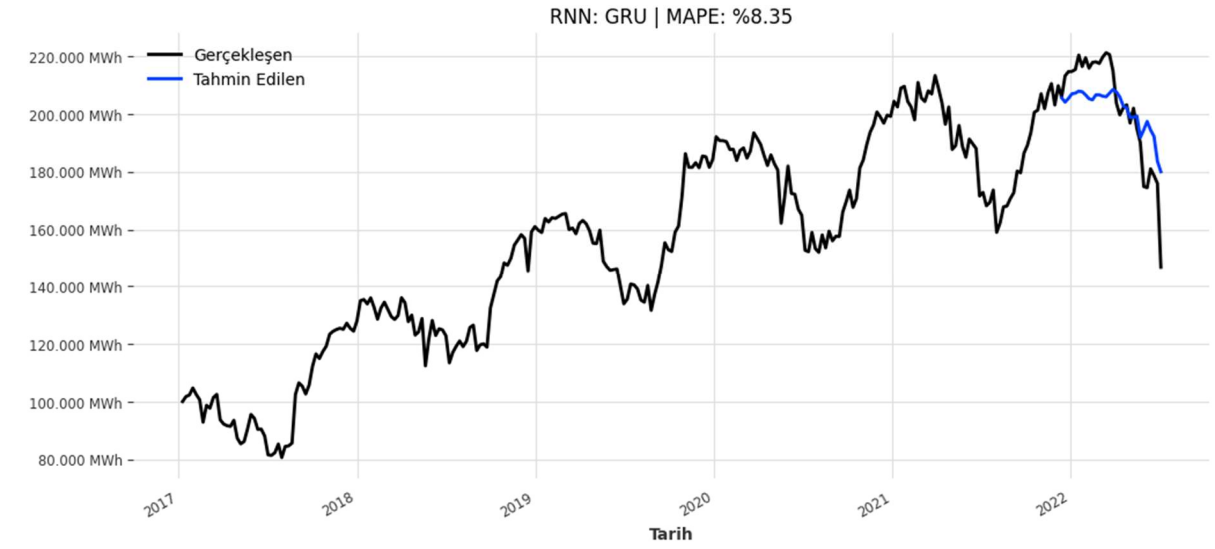
Şekil 65. Jeotermal ile Elektrik Üretiminde LSTM Modeli Test Sonucu

LSTM metodu ile oluşturulan tahmin modeli, 2030 yılına kadarki elektrik üretim tahmini için kullanılmış ve sonuçlar Şekil 66'da verilmiştir. Jeotermal ile elektrik üretiminde artışın periyodik olarak devam edeceği tahmin edilmektedir.



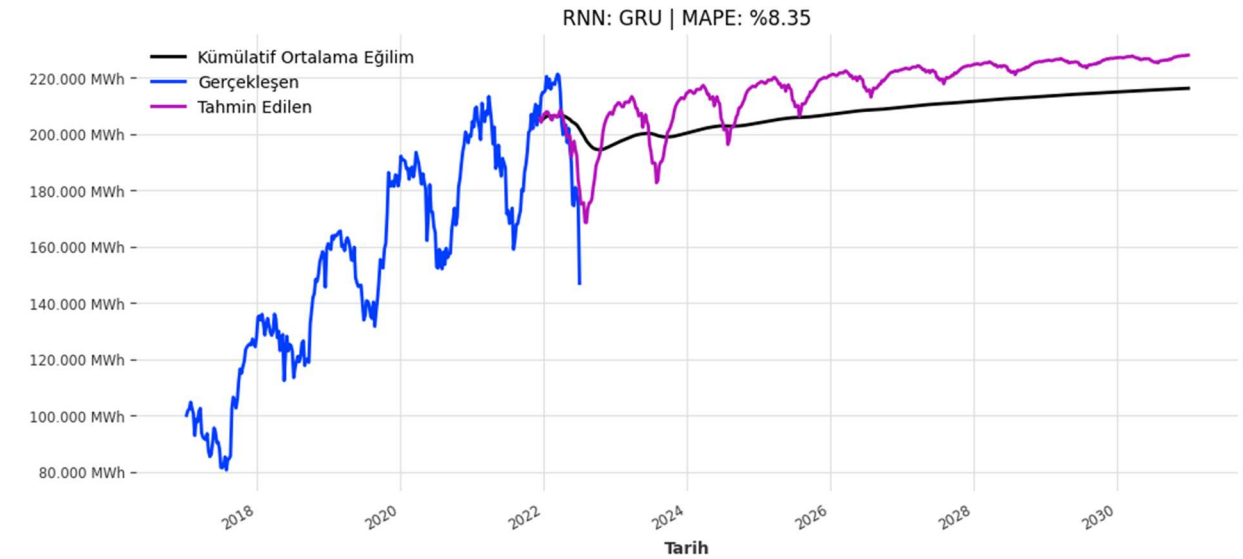
Şekil 66. Jeotermal ile Elektrik Üretiminde LSTM Modelinin Tahmini

GRU metodu kullanılarak oluşturulan modelin tahmin sonuçları Şekil 67'de verilmiştir. MAPE değeri LSTM modeli ile benzer gözükmemektedir. LSTM modeli gibi GRU modeli de azalış eğrilerini yakalamıştır.



Şekil 67. Jeotermal ile Elektrik Üretiminde GRU Modelinin Test Sonucu

GRU metodu kullanılarak oluşturulan tahmin modelinin sonuçlarına göre kümülatif ortalamanın yukarı yönlü olduğu görülmektedir. Şekil 68, 2030 yılına kadarki tahmin sonuçları göstermektedir.



Şekil 68. Jeotermal ile Elektrik Üretiminde GRU Modeli Üretim Tahmini

Jeotermal enerjisi için oluşturulan LSTM ve GRU modellerinin MAPE performansları birbirine çok yakındır. Tablo 18, LSTM ve GRU modellerinin MAPE, RMSPE ve RMSE sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 18. Jeotermal ile Elektrik Üretiminde LSTM ve GRU Modellerinin Tahmin Performans Değerleri.

	LSTM	GRU
MAPE	7.96	8.34
RMSPE	0.16	0.12
RMSE	0.10	0.09

Jeotermal enerjisi ile elektrik üretim tahmininde başarılı olan LSTM modeli optimal enerji hesaplaması için kullanılmıştır. 2030 yılına kadarki tüm haftalar için LSTM modeli ile elde edilen haftalık jeotermal enerjisi tahmin sonuçları, Karbondioksit emisyonunu minimize edecek olan amaç fonksiyonu optimize probleminde, karar değişkeni olarak kullanılmıştır.

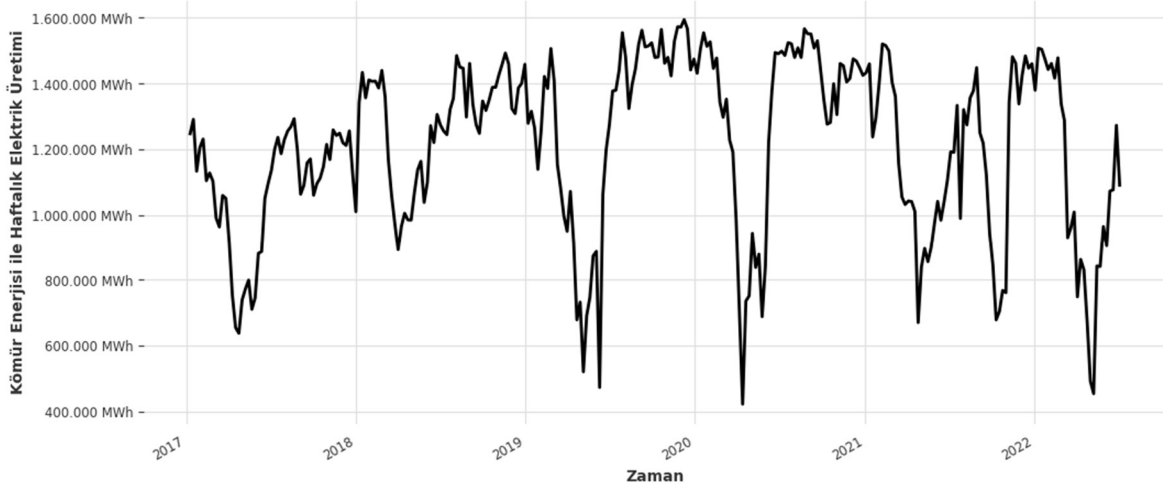
3.2.2.8 Kömür ile Elektrik Üretim Tahmini

Kömürden elektrik enerjisi üretimi kömürün yakılması sonucunda elde edilen ısı enerjisi ile su buharı türbini döndürülür ve Faraday kanunlarına göre değişen manyetik alan sonucu elektrik akımı oluşur.

Kömür ile elektrik üretimi iklim olaylarından etkilenmemesine rağmen iklimi olumsuz etkilemektedir. Küresel ısınma ve hava kirliliği göz önüne alındığında kömür elektrik üretimi kapsamında en fazla çevreyi kirleten enerji kaynağıdır. Kömür ocaklarında meydana gelebilecek kazalar nedeniyle insanlar hayatlarını kaybedebilmektedir. Kömür, kaynağına erişiminden elektrik enerjisine dönüşmesine kadar geçen sürede insan sağlığını hatta insan hayatını tehlikeye sokmaktadır.

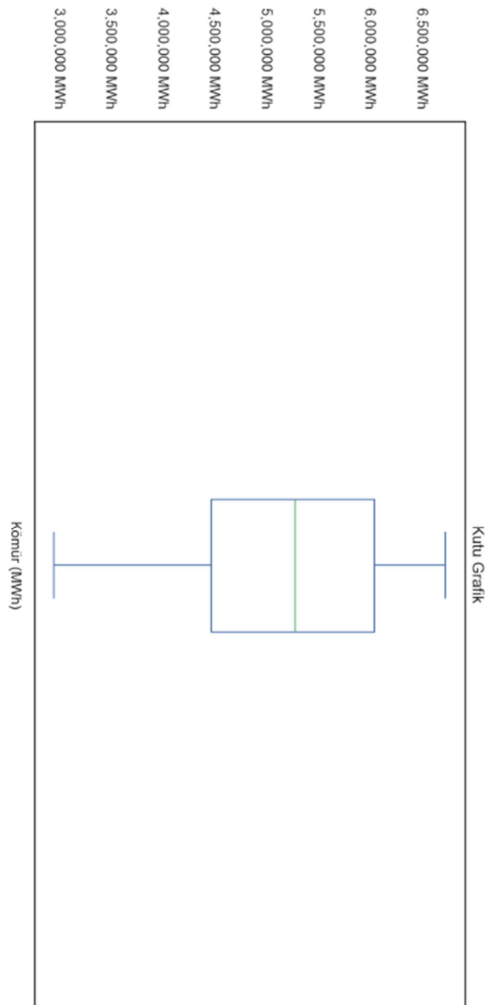
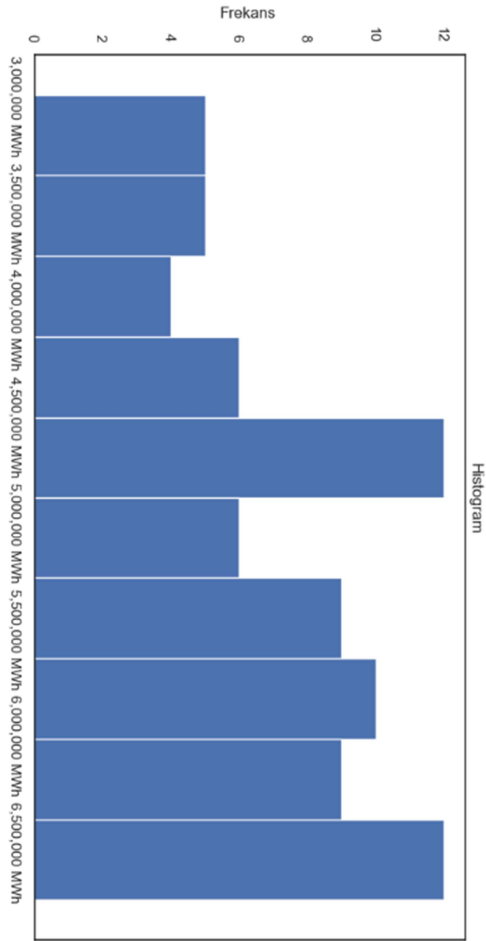
Kömür içinde uranyum elementi bulunabildiğinden, bu küllerden radyasyon yayılmaktadır. Termik santral küllerinden oluşan radon gazı polonyuma ve aktif kurşuna dönüşebilmektedir ve çevreye radyoaktif madde yaymaktadır (Küçükosman Beliz, 2019).

Kömür ile elektrik üretimi en düşük ve en yüksek haftalık üretimleri arasında 1.000.000 MWh fark oluşabilmektedir. Şekil 69, kömür enerjisi ile haftalık elektrik üretimi değişimini göstermektedir. Kömür ile elektrik üretiminde olağan durumun korunduğu görülmektedir. Kömür ile elektrik üretim miktarında ciddi azalış veya artışların olmadığı görülmektedir.



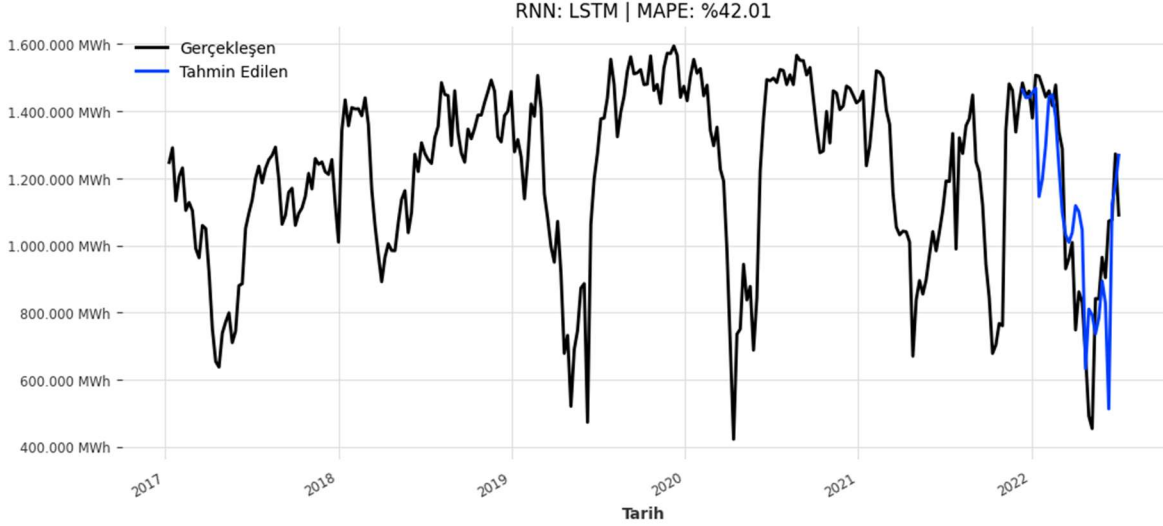
Şekil 69. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Kömür ile Haftalık Elektrik Üretimi

Kömür ile elektrik üretim miktarının aylık toplam değerlerinin histogram dağılımı ve kutu grafiği Şekil 70’te verilmiştir. Histogram dağılımı incelendiğinde üretim miktarının dağılımlarda homojen olduğu söylenebilir. Kutu grafiği incelendiğinde, aykırı değerlere sahip olmadığı görülmektedir. Veri setinin dağılımı incelendiğinde, sağa veya sola çarpık olmadığı söylenebilir. Kömür ile elektrik üretiminin uzun sürelerdir yapılması verinin dağılımında homojenliğe sebebiyet vermiştir.



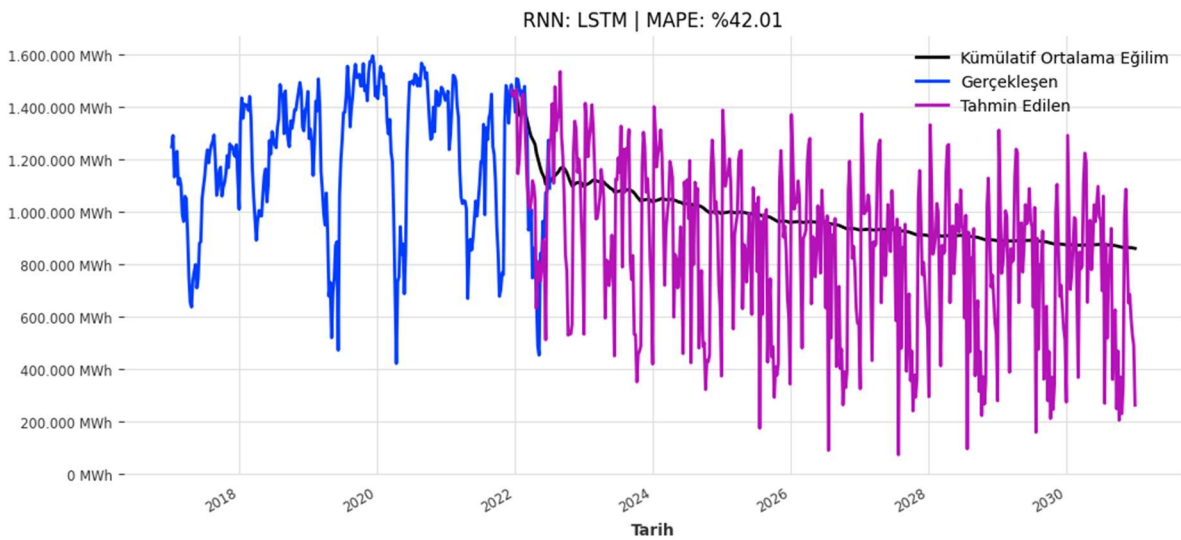
Şekil 70. 2017 Ocak-2022 Haziran Ayları Arasında Kömür ile Aylık Elektrik Üretimi Histogram Dağılımı ve Kutu Grafiği

LSTM ve GRU modelleri kömür ile elektrik üretim için oluşturulmuştur. Parametreleri optimize edilerek oluşturulan LSTM modeli sonucu elde edilen MAPE %42,01 olarak hesaplanmıştır. LSTM modelinin gerçekleşen üretim miktarı değişimini yakaladığı görülmektedir. Gerçekleşen ve tahmin edilen elektrik üretim miktarı, Şekil 71’de belirtilmiştir.



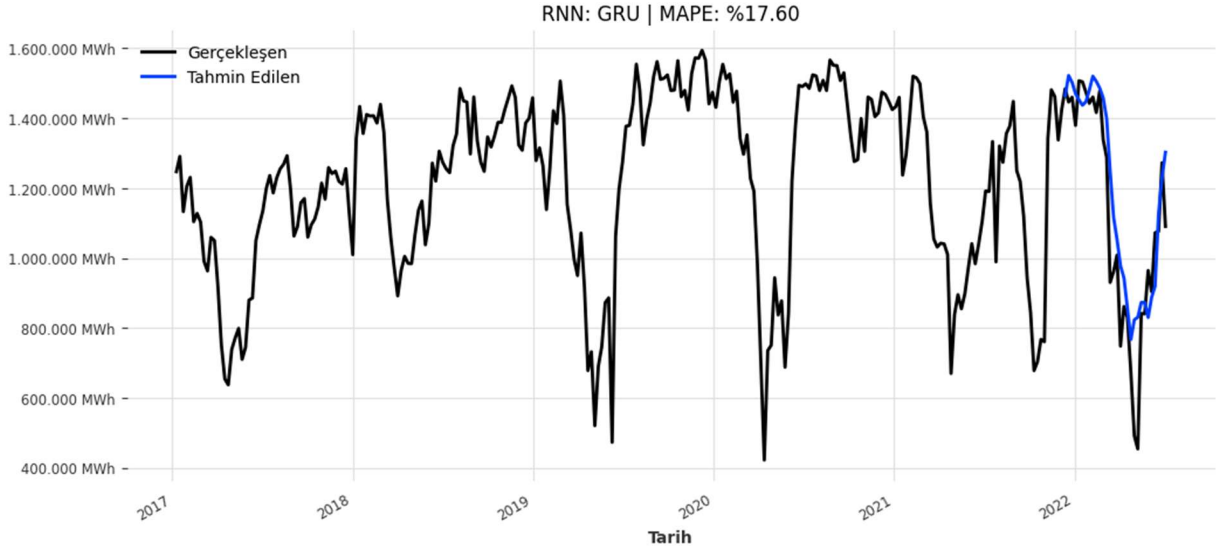
Şekil 71. Kömür ile Elektrik Üretiminde LSTM Modeli Test Sonucu

LSTM modeli 2030 yılına kadarki haftalık elektrik üretim miktarının tahmininde kullanılmıştır. Kömür ile elektrik üretimin azalacağı tahmin edilmektedir. Bu azalışın olması karbondioksit emisyonunun azaltılması için önemlidir. Şekil 72 ilgili değişimi göstermektedir.



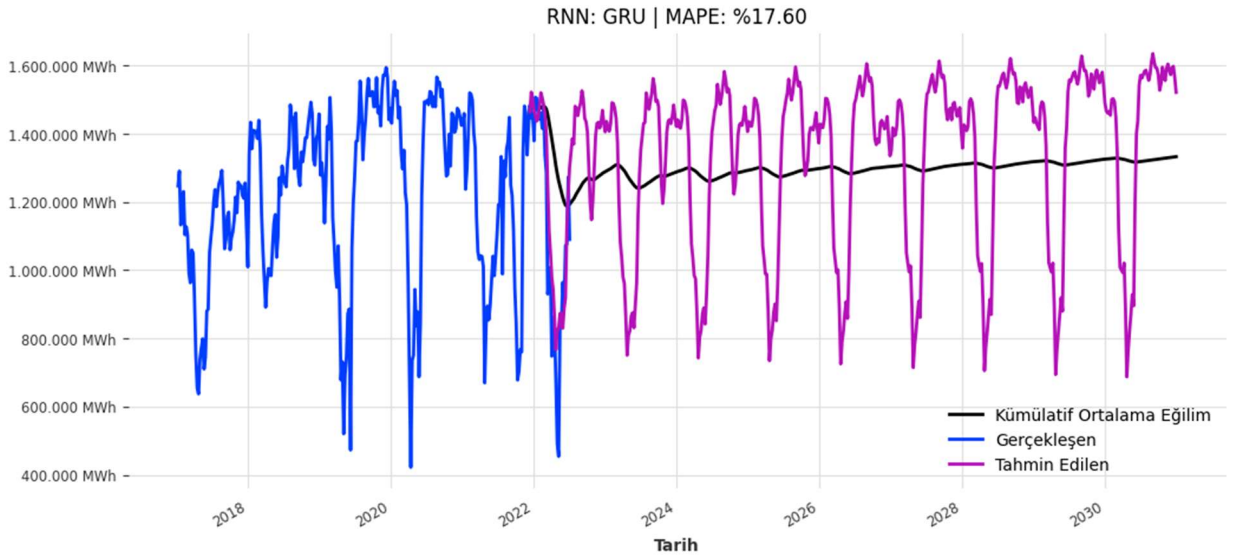
Şekil 72. Kömür ile Elektrik Üretiminde LSTM Modelinin Tahmini

GRU modeli ile tahmin hesaplamaları hesaplar yapılmıştır ve modelin tahmin sonuçları gerçek değişimleri yakaladığı görülmüştür. Şekil 73’te GRU modelinin test sonucu tahmin ve gerçekleşen değerleri gösterilmektedir.



Şekil 73. Kömür ile Elektrik Üretiminde GRU Modelinin Test Sonucu

Şekil 74, GRU modeli kullanılarak oluşturulan tahmin sonuçlarını göstermektedir. Kömür ile elektrik kullanımında yukarı yönlü hafif artış görülmektedir. 2023 haftalık 1.400.000 MWh'a yakın üretim 2030 yılında 1.600.000 MWh değerine yaklaşmaktadır.



Şekil 74. Kömür ile Elektrik Üretiminde GRU Modeli Üretim Tahmini

MAPE ve RMSE değerlerine kıyasla GRU modeli daha başarılı olmuştur. RMSPE değerine göre LSTM daha başarılı sonuçlar üretmiştir. Tablo 19, MAPE RMSE ve RMSPE değerlerini göstermektedir.

Tablo 19. Kömür ile Elektrik Üretiminde LSTM ve GRU Modellerinin Tahmin Performans Değerleri.

	LSTM	GRU
MAPE	42.00	17.60
RMSPE	2.13	2.33
RMSE	0.16	0.12

Kömür ile elektrik üretimi tahmininde başarılı olan LSTM modeli optimal enerji hesaplanması için kullanılmıştır.2030 yılına kadarki tüm haftalar için LSTM modeli ile elde edilen haftalık kömür enerjisi ile elektrik üretim tahmin sonuçları, optimize probleminde karar değişkeni olarak kullanılmıştır.

3.2.2.9 Elektrik Arz Tahminlerin Optimal Karışımı ve Değerlendirilmesi

Rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, hidrolik, linyit, biyokütle, doğal gaz, jeotermal ve kömür ile elektrik üretim tahmin sonuçları derin öğrenme algoritmaları olan LSTM ve GRU ile yapılmıştır. Veri setlerine göre modeller farklı başarı sonuçları göstermiştir.

Güneş enerjisi, hidrolik, linyit, doğal gaz ve jeotermal ile elektrik üretim tahmin modellerinde LSTM modellilerinin MAPE sonuçları GRU modelinden daha başarılıdır. Biyokütle, kömür ve rüzgâr enerjisi ile elektrik üretim tahmin modellerinde ise GRU modelleri MAPE sonuçları başarılıdır.

Türkiye'nin ulusal ve uluslararası karbondioksit emisyonu hedeflerine ulaşması için taahhütlerini göz önüne alarak karbondioksit emisyonunu minimize edecek amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Amaç fonksiyonunda fosil kaynaklı enerji kaynakları olan kömür, linyit ve doğal gaz için karbondioksit emisyon değerleri kullanılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi için tüketilmesi sonucunda oluşan karbondioksit emisyonları sıfır kabul edilmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimi sırasında, güneş enerjisi panellerinin üretimi, rüzgâr enerjisi türbinlerin bakım onarımı ve üretimi sırasındaki emisyon üretimleri, hidrolik enerji kaynağında su bitkilerinin ürettiği organik maddelerin ayrışması sonucu, biyokütlenin yanması sonucu ortaya çıkan karbon emisyonları oluşmaktadır. Bu değerler fosil yakıtlar ile kıyaslandığında çok azdır.

Aynı zamanda bu değerlerinin ölçülmesinde bir standart olmadığı için bu değerleri bu tez çalışmasında sıfır olarak kabul edilmiştir.

2020 yılında linyit için karbondioksit emisyonu 1,274 ton/MWh, kömür için karbondioksit emisyonu 0,868 ton/MWh, doğal gaz için karbondioksit emisyonu 0,371 ton/MWh kabul edilmiştir. Bu değerler enerji kaynağının kalitesine ve santral yapısına göre farklılık gösterebilmektedir. Kullanılan karbondioksit emisyon değerleri, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Türkiye Elektrik Üretimi Emisyon Faktörleri çalışmasından alınmıştır.

Karbondioksit emisyonunu minimize edecek enerji üretimi karışımı hesaplanmaya çalışılmıştır. Amaç fonksiyonu aşağıdaki formül ile verilmiştir.

$$C = 1,274X_4 + 0,371X_6 + 0,868X_8 \quad (14)$$

Amaç fonksiyonunu minimize etmek için kullanılan karar değişkenleri aşağıdaki gibidir:

X_1 = Rüzgâr enerjisi ile haftalık elektrik üretimi miktarı

X_2 = Güneş enerjisi ile haftalık elektrik üretimi miktarı

X_3 = Hidrolik enerjisi ile haftalık elektrik üretimi miktarı

X_4 = Linyit ile haftalık elektrik üretimi miktarı

X_5 = Biyokütle ile haftalık elektrik üretimi miktarı

X_6 = Doğal gaz ile haftalık elektrik üretimi miktarı

X_7 = Jeotermal ile haftalık elektrik üretimi miktarı

X_8 = Kömür ile haftalık elektrik üretimi miktarı

X_9 =Haftalık elektrik tüketimi miktarı

Optimal elektrik üretimi için kısıtlar ise genel itibariyle derin öğrenme sonucu tahmin edilen haftalık elektrik üretimi miktarının %20 fazlası ile %20 azı arasındaki karar değişkenlerinin kalmasıdır. Denklem 15 ile Denklem 22 arası, bu koşulları belirtmektedir. Diğer bir kısıt ise üretilecek elektrik miktarının, T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından projeksiyon edilen elektrik talebini karşılayabiliyor olmasıdır. Bu koşul Denklem 23 ile gösterilmektedir. Pozitiflik koşulu ile istenen,

elektrik üretim ve tüketim değerlerinin sıfırdan büyük olmasıdır. Bu koşul Denklem 24 ile gösterilmektedir.

Derin öğrenme sonucu rüzgâr enerjisi elektrik üretimi tahmini = DRET

Derin öğrenme sonucu güneş enerjisi elektrik üretimi tahmini = DGET

Derin öğrenme sonucu hidrolik enerjisi elektrik üretimi tahmini = DHET

Derin öğrenme sonucu linyit ile elektrik üretimi tahmini = DLET

Derin öğrenme sonucu biyokütle ile elektrik üretimi tahmini = DBET

Derin öğrenme sonucu doğal gaz ile elektrik üretimi tahmini = DDET

Derin öğrenme sonucu jeotermal ile elektrik üretimi tahmini = DJET

Derin öğrenme sonucu kömür ile elektrik üretimi tahmini = DKET

$$DRET * \frac{120}{100} > X_1 > DRET * \frac{80}{100} \quad (15)$$

$$DGET * \frac{120}{100} > X_2 > DGET * \frac{80}{100} \quad (16)$$

$$DHET * \frac{120}{100} > X_3 > DHET * \frac{80}{100} \quad (17)$$

$$DLET * \frac{120}{100} > X_4 > DLET * \frac{80}{100} \quad (18)$$

$$DBET * \frac{120}{100} > X_5 > DBET * \frac{80}{100} \quad (19)$$

$$DDET * \frac{120}{100} > X_6 > DDET * \frac{80}{100} \quad (20)$$

$$DJET * \frac{120}{100} > X_7 > DJET * \frac{80}{100} \quad (21)$$

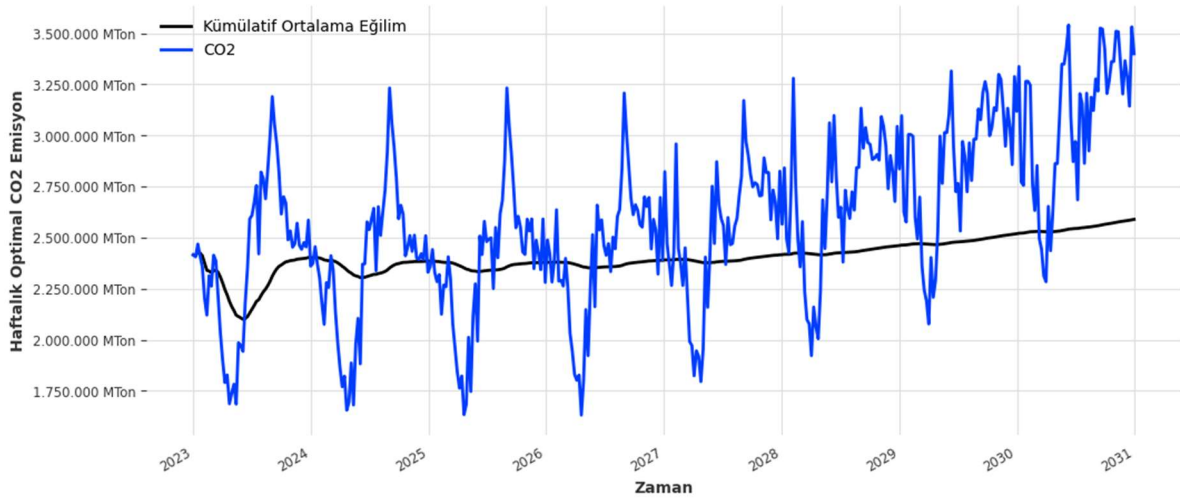
$$DKET * \frac{120}{100} > X_8 > DKET * \frac{80}{100} \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^8 x_j > x_9 \quad (23)$$

$$x_j > 0 \quad (24)$$

Elektrik enerjisinin üretimi ile tüketiminin aynı zaman diliminde dengelenmesi zorunluluktur. Bu dengelenme aynı zamanda elektrik akımının frekansını belirlemektedir. Elektrik frekansı, üretilen alternatif akımının 1 saniye içinde yaptığı sinüzoidal hareketin sayısıdır. Türkiye’de bu değer 50 Hz’dir.

Karbondioksit emisyonunu minimize edecek amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Optimizasyon hesaplamasında, doğrusal programlama yöntemi kullanılmıştır. Her hafta için en düşük karbondioksit emisyonunu sağlayacak Şekil 75, optimizasyon sonucu ortaya çıkan haftalık minimum karbondioksit emisyon değerlerini göstermektedir.



Şekil 75. Türkiye’nin Optimum Elektrik Üretim Karışım Tahmini Sonucunda Haftalık CO2 Emisyon Salınım Tahmini

3.2.4. Ampirik Uygulama Sonuçlarının Elektrik, İklim ve Ekonomi Bağlamında Değerlendirilmesi

Bu tez çalışması; mühendislik, ekonomi ve sosyal bilimler çerçevesinde değerlendirilebilir. Mühendislik bakış açısı ile, elektrik üretim miktarı gerçek zamanlı yük dengelemesi için önemlidir. Üretilen elektriğin gerçek zamanlı olarak talebi karşılanması gerekmektedir. Bu dengeleme için anlık elektrik üretim miktarlarının karşımı daha az maliyetli üretimin gerçekleşmesine yardımcı olacaktır.

Enerji güvenliği konusu mühendislik, ekonomi ve sosyal bilimleri kapsamaktadır. Türkiye’de elektrik üretimi büyük ölçüde ithal fosil yakıtlara dayanmaktadır. Bu tür yakıtların ithalatı, ulusal hazine için büyük bir mali yüküdür. Enerjide dışa bağımlılığının azaltılması ve elektrik üretimi için kaynak çeşitlendirmesinin yapılması gerekir. Türkiye’nin doğal gazda %98, petrolde ise

%91 oranında dışa bağımlı olması önemli bir enerji güvenlik riski oluşturmaktadır. Enerji arz güvenliği ülkelerin temel sorunlarından biridir. Elektrik üretim karışımlarının yenilenebilir enerji kaynakları ile çeşitlendirilip optimize edilmesi enerji güvenliğinin sağlanması için temel çözümlerdendir.

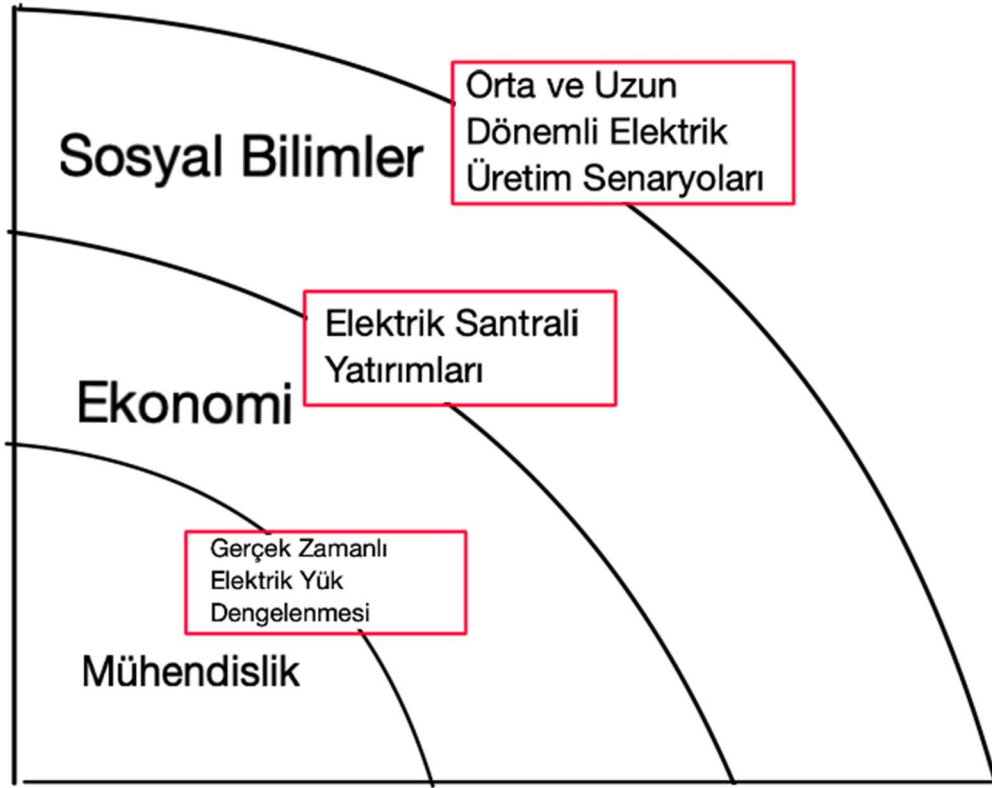
Ekonomi alanında, elektrik üretiminde kullanılan santrallerin çeşitlendirilmesi ile üretim karışımları daha verimli planlanabilir. Enerji üretim karışımının etkili kullanımı enerji kaynakları fiyatlarında oluşabilecek ani yükselişleri engellemeye yardımcı olur. Enerji fiyatlarındaki ani fiyat değişimleri ülkenin ekonomik kırılganlığını artırır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması, fosil yakıtların fiyatlarında ve arzında oluşabilecek sorunlara karşı ekonomik ve toplumsal riskleri azaltabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması, elektrik fiyatları üzerinde olumlu etki yapacaktır. Elektrik fiyatlarının düşmesi, sanayi sektörünün ekonomik rekabet gücünün artıracaktır. Artan rekabet gücü, ihracat artışını üzerinde olumlu etki yapacaktır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılan teknoloji ve araçların yerli kaynaklarla üretilmesi, ekonomiyi olumlu etkileyecektir. Yenilenebilir enerjiye geçiş süreci doğrudan veya dolaylı olarak istihdam yaratacaktır. Rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi kurulum, bakım ve işletmesinin yeni iş alanları oluşturacaktır. Türkiye, ekipman ticaretinde bölgesel lider olma fırsatına sahiptir. Güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi kurulum yerlerinin çeşitlendirilmesi, iletim ve dağıtım şebeke yatırım maliyetlerini azaltarak sermaye tasarrufu sağlar. Enerji sektöründe gerçekleştirilecek olan bu yenilikler aynı zamanda sanayi, ulaştırma, inşaat ve tarım sektörüne de etki edecektir.

İklim değişikliği ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda yapılacak nicel çalışmalar ülkelerin atacağı adımlarda karar desteği sağlar. Bu nicel çalışmalar ile iklim değişikliği ve yenilenebilir enerji konusunda ülkeler daha hazırlıklı olurlar. Uluslararası antlaşmalara uyum sağlayarak yenilenebilir enerji konusunda kararlı ve bilimsel adımlar atılabilir. Uluslararası mali teşviklerden faydalanma şansı artabilir.

Sosyal bilimler açısından, orta ve uzun dönemli elektrik üretim senaryoları oluşturulurken insan davranışındaki değişimler ile beraber olacaktır. Elektrikli arabaların, teknoloji kullanımının arttığı senaryolar, iklim bilincinin önem kazandığı

senaryolarda elektrik üretim karışımlarının planlanması değişim gösterecektir. Mühendislik, ekonomi ve sosyal bilimler çerçevesinde çalışmanın genel etkileri Şekil 76'da gösterilmektedir.



Şekil 76. Mühendislik, Ekonomi ve Sosyal Bilimler Açısından Çalışmanın Değerlendirilmesi

Türkiye iklim değişikliği açısından orta-yüksek riskli ülkeler arasında yer almaktadır. İklim değişikliğinin etkileri Türkiye'de ani hava olayları, sel baskınları, sıcaklık artışları ile hissedilmektedir. Hava ve iklim kaynaklı aşırı olay ve afetlerden kaynaklanan sosyal ve ekonomik kayıplar iklim değişkenlikleri ile artmaktadır.

Türkiye'nin Yeşil Mutabakat sürecine hazırlıklı olmaması halinde ekonomi kötü etkilenecektir. Karbon ticaretine hazırlık kısa vadeli çalışmalar ile uzun vadeli planlama ve hedefler ile başarıya ulaşılabilir. Karbon fiyatlamasına hazırlıklı bir Türkiye'nin geçmesi AB pazarında rekabet gücünü artıracaktır.

Bu tez çalışmasındaki senaryo analizlerinin sonuçlarına göre, Olağan İş Senaryosunda elektrik üretimi sonucunda oluşan karbondioksit salınımı yıllık 160Mt ulaşacağı öngörülmektedir. Bu senaryoya göre 2030 yılında, haftalık ortalama karbondioksit salınımı 3Mt olacağı öngörülmektedir.

Bu tez çalışmasındaki derin öğrenme yöntemlerinin sonuçları analiz edildiğinde; karbondioksit emisyon salınımını minimize edecek optimum elektrik üretim karışımında bile karbondioksit emisyon salınımının artacağı görülmektedir.

Elektrik üretimi sonucunda oluşan haftalık karbondioksit salınımı 2.2Mt'dan 3.5Mt'a çıkacağı öngörülmektedir. Bu değerin optimum olduğu düşünüldüğünde, pratikte daha fazla karbondioksit salınımı olma ihtimali yüksektir.

İklim değışikliğı problemine karşı alınacak önlemlerin ertelenmesi geri dönüşümü olmayacak risklere sebep olacaktır. İklim değışikliğı problemine karşı atılacak adımlardan biri karbon emisyonlarının fiyatlandırılmasıdır. Türkiye'nin karbon emisyonlarını fiyatlandırma konusunda atılacak adımların geciktirilmesi çevresel risklerin yanında ekonomik riskler de taşımaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması ile 2023 yılından itibaren Türkiye'nin Avrupa Birliğı'ne yaptığı ihracat emisyon verilerini raporlaması istenmektedir. Sınırdaki karbon düzenlemenin 2026 yılından itibaren ise hesaplanan emisyon karşılığında bir karbon maliyeti ile karşılaşması beklenmektedir. Türkiye ekonomisinde önemli yer tutan Avrupa Birliğı ile yapılan ihracata ek maliyetler getirecektir.



GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Türkiye'nin uzun vadeli net sıfır karbon salınım hedefinin bilimsel çerçevede çalışılması daha verimli planlama yapılmasını ve aksiyonların alınmasını sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında, Türkiye elektrik üretim karışımı iki farklı açıdan değerlendirilmiştir. İlk yöntem, Türkiye'nin iklim konusunda verdiği uluslararası taahhütler çerçevesinde senaryoların oluşturulması ve LEAP yaklaşımı ile senaryoların çalışılmasıdır. İkinci yöntem iki adımdan oluşmaktadır. Birinci adımda, birincil enerji kaynaklarından üretilen elektriğin 2030 yılına kadar derin öğrenme yöntemleri ile haftalık tahmin edilmiştir. İkinci adım, tahmin sonuçlarının doğrusal programlama ile haftalık minimum karbondioksit emisyonunu sağlayacak şekilde optimize edilmesidir. Her iki yöntemdeki ortak amaç Türkiye'nin 2030 yılına kadar elektrik üretim karışımlarının nicel olarak öngörülmesidir.

Türkiye'nin yer verilen 2053 hedefinde ulaşacağı senaryolar doğrultusunda, öncelikle karbondioksit salınım için 2030 hedeflerini planlamak gerekir. Türkiye gelişmekte olan bir ülkedir ve elektrik sisteminin iyileştirilmesi ve modernize edilmesi Türkiye'nin kalkınması için gerekli koşuldur.

Enerji, içerisinde güvenlik, projeksiyonlar, ekonomi, diplomasi, sürdürülebilirlik, iklim, çevre gibi konuları barındırmaktadır. Temiz ve sürdürülebilir gelecek yaratmak için temel dört adım vardır. İlk adım, enerji üretim yöntemlerinde yenilenebilir payın artırılmasıdır. İkinci adım, enerjinin verimli kullanılmasıdır. Üçüncü adım, akıllı şebeke ile eski moda elektrik hatlarının yenilenmesidir. Dördüncü ve son adım, bu karmaşık arz-talep ağını en bilimsel ve çağdaş yöntemlerle planlamaktır.

Ülkeler, artan enerji taleplerini karşılamak ve kirliliği azaltmak için planlamalar ve taahhütlerde bulunmaktadır. 2030 ve 2053 hedeflerini içeren stratejilerin ve politikaların hazırlanması için hedeflerin nicel çalışmaları temel olarak belirlenmesi gerekir. 2053 yılında karbon nötr olma yolundaki ana hedefe ulaşmak için ara hedefler 2030 yılına kadar alınacak yoldan geçmektedir. Uzun vadeli planlı ve kararlı adımlar ile insan oğlu yarattığı iklim problemine çözüm bulabilir. Karbon sıfır hedeflerine ulaşabilmek için kararlılık ortaya konulması da şarttır.

Türkiye'nin yıllık sera gazı emisyonu ağırlıklı olarak fosil yakıtların kullanıldığı enerji üretimlerinden kaynaklanmaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında karbon nötr bir çevre için öncelikli olarak fosil yakıt kullanılan enerji santralleri yerine yenilenebilir enerji üretimine geçiş sağlanmalıdır.

Kömür, insan sağlığına zarar veren hava kirliliğinin ve iklim değişikliğine neden olan sera gazlarının ana sorumlularından biri olmasına rağmen küresel elektrik üretiminde kullanılmaya devam etmektedir. İklim değişikliği insan sağlığını dolaylı ve doğrudan etkilemektedir. Dolaylı etkileri içerisinde, iklim değişikliği sonucunda yiyecek ve içeceklerde görülen olumsuz değişimler, fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan zehirli gazların etkisi olarak özetlenebilir. Doğrudan etkileri içerisinde ani sıcak ve soğuk hava dalgaları, seller, orman yangınları, kasırga gibi doğal afetlerin günden güne artış göstermesi yer alır.

Yenilenebilir enerji alanında yapılacak Ar-Ge çalışmaları ile daha verimli santraller yapılabilir. Akıllı şebekeler, akıllı sayaçlar ile elektrik üretimi konusundaki tahmin faaliyetleri daha başarılı sonuçlar verecektir. Üretililecek enerjinin gerçek zamanlı olarak optimal bir karışımda olması için yazılım alt

yapılarını geliştirilmesi önemlidir. Yeşil hidrojen teknolojik gelişmeler ve Ar-Ge faaliyetler, karbon sıfır hedeflerine ulaşmada hızlandırıcı etkiye sebep olur.

Türkiye, artan fosil yakıt talebini karşılayacak kadar yerli doğal gaz ve petrol rezervine sahip değildir. Türkiye'nin enerji ithalatına bağımlılığı, dış ticaret açığına büyük bir yük getirmektedir. Özellikle petrol ve gaza olan bu bağımlılık, enerji arz güvenliğine ilişkin politika endişelerinin zeminini oluşturmaktadır. Enerji arz güvenliği, “enerji kaynaklarının uygun fiyata kesintisiz olarak bulunması” olarak tanımlanmaktadır

Enerji arz güvenliğini sağlamak için talep ve arz arasındaki boşluk azaltılmalıdır; enerji verimliliği göstergeleri iyileştirilmelidir, optimal enerji karışımı elde edilmelidir ve enerji fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı kırılganlık azaltılmalıdır

Enerji güvenliği güvenilir enerji arzının sağlanmasını ifade etmektedir. Başarılı bir genel strateji şu amaçları hedefleyecektir; enerji talebi ve arzı verimliliğini ve korumasını artırmak, optimum enerji karışımını elde etmek, enerji arz kaynaklarını çeşitlendirmek, enerji altyapısı gelişimine yatırım yapmak, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçmek, araştırma ve geliştirme yoluyla yenilik ve rekabeti teşvik etmek, enerji fiyat dalgalanmalarına karşı kırılganlığı azaltmak, iyi enerji sektörü yönetişimi sağlamak.

Avrupa Yeşil Mutabakatı Türkiye için ekonomik olarak yük getirir gibi görünürken alınacak önemler ve gelişmeler ile bunun fırsata çevrilmesi durumu da vardır. Kararlılıkla ve nicel yöntemler ile saptanmış hedefler ile karbon emisyonları azaltılıp, ülke ekonomisi yenilenebilir enerji üzerine kurulabilir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması hedefleri ulusal ekonomide üretim ve istihdamın artışı sağlar. Yenilenebilir enerji için gerekli ekipmanların üretilmesi, bunların bakım onarımı istihdam artışı sağlayarak ülke ekonomisine

katkı sağlayacaktır. Kendi kendine yeterliliğe ulaşmak ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için uygun teşvikler kullanılarak yenilebilir enerji kullanımı teşvik edilmelidir.

İklim değişikliğinin belirgin etkilerinden birinin de kuraklık olduğu unutulmamalıdır. Türkiye'de kuraklık olması durumunda hidroelektrik üretiminde büyük bir düşüş kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle, Türkiye'de hidroelektrik haricindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranının artırılması gerekmektedir.

Türkiye, enerjide dışa bağımlılığı ve dış ticaret açığını azaltmak için yerli kömür tüketimini artırmayı planlıyor. Ancak artan tüketim, Türkiye'nin zaten hızlı olan sera gazı emisyon artışını daha da tetikleyecektir. Kömür kullanımı yerine yenilenebilir enerji projelerine geçiş yapılmalıdır. Kömür madenlerindeki kazalar sonucu oluşabilecek risklerde kömür ile elektrik üretimin diğer bir problemidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanımı işçilerin sağlıkları için daha uygundur. Doğru bir enerji geçişi, çevrenin ve halk sağlığının korunmasına katkıda bulunur ve vatandaşın yaşam kalitesini iyileştirmeye fayda sağlayan devlet için ekonomik tasarruflar üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir.

Elektrik üretimi için optimal karışımların gerçek zamanlı hesaplanması için gerçek zamanlı veri akışına ihtiyaç vardır. Elektrik üretimi için kullanılan enerji karışımı bilimsel ve nesnel teknikler ile analiz edilmedi. Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, elektrik talebinin en az emisyonla karşılanması için ülkenin elektrik üretiminde yenilenebilir kaynaklarının kullanımını maksimize etmeye odaklanması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi tarafından belirlenen küresel emisyon hedeflerine ulaşmak için uluslararası çabalara katılmak ülkelerin dünyaya karşı sorumludur. Bu sorumluluğu

gerçekleştirmedeki aktif ve kararlı tutumlar Türkiye'nin uluslararası imajı üzerinde olumlu etkileri olacaktır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi hızlandırmak için Ar-Ge çalışmalarına ağırlık verilmelidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılan teknolojilerin gelişimi enerji fiyatlarındaki dalgalanmaları ve mali yükü azaltacaktır. Enerjide azalan fiyatlar ülkenin üretim kapasitesini artıracak ve enerjide, sanayide, tarımda, dışa bağımlılığı azalacaktır.

Yenilenebilir ve fosil enerji kaynaklarının farklı üretim kombinasyonları sonucunda enerji karışımları oluşturulur. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi geleneksel fosil enerjiler daha düşük ekonomik maliyete sahip olmalarına rağmen çevre kirliliğine etkileri büyük olmaktadır. Optimal bir enerji karışımı, kaynak kullanımını etkin bir şekilde iyileştirecek ve çevre kirliliğini azaltacaktır.

Enerji kaynaklarını çeşitlendirerek tek bir enerji kaynağına bağılı kalmaması ülkenin enerji güvenliği için önem arz etmektedir. Enerji kaynaklarının herhangi birinde çıkabilecek arz sorununu diğer enerji kaynaklarını kullanarak çözebilecek farklı senaryoların hazır tutulması gerekmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları ve çevresel etkiler konularında daha fazla araştırma ve yayına ihtiyaç vardır. Gelecekteki araştırmalar için olası senaryolar ve tahmin modelleri çalışılmıştır. Bu alışma, önümüzdeki yıllarda Türkiye'deki yenilenebilir enerji yatırımlarının ve çevresel etkilerinin analizi için temel olarak kullanılabilir.

İklim değışikliğine karşı mücadelenin hala uzun bir yolu vardır. Bu tez, tek evimiz olan Dünya gezegenimizi koruma mücadelesine bilimsel destek sağlama niyetiyle tamamlanmıştır.

KAYNAKÇA

- Aized, T., Shahid, M., Bhatti, A. A., Saleem, M., & Anandarajah, G. (2018). Energy security and renewable energy policy analysis of Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 84(March 2017), 155–169. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.254>
- Alkan, A. (2014). *Optimization Of Energy Mix Considering Sustainability Characteristics And Its Application To Turkey*.
- Ari, I., & Aydinalp Koksal, M. (2011). Carbon dioxide emission from the Turkish electricity sector and its mitigation options. *Energy Policy*, 39(10), 6120–6135. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2011.07.012>
- Ari, I., & Yikmaz, R. F. (2019a). The role of renewable energy in achieving Turkey's INDC. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 244–251. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.02.004>
- Ari, I., & Yikmaz, R. F. (2019b). The role of renewable energy in achieving Turkey's INDC. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 244–251. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.02.004>
- Aziz Ur Rehman, S., Cai, Y., Fazal, R., das Walasai, G., & Hussain Mirjat, N. (2017). An Integrated Modeling Approach for Forecasting Long-Term Energy Demand in Pakistan. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en10111868>
- Bayır, F. (2006). *Yapay Sinir Ağları ve Tahmin Modellemesi Üzerine Bir Uygulama*. T.C. İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Bhattacharyya, S. C., & Timilsina, G. R. (2010). A review of energy system models . *International Journal of Energy Sector Management*, 4(4), 494–518. <https://doi.org/10.1108/17506221011092742>
- Burck, J., Uhlich, T., Bals, C., Höhne, N., & Nascimento, L. (2022). 2023 RESULTS Monitoring Climate Mitigation Efforts of 59 Countries plus the

EU-covering 92% of the Global Greenhouse Gas Emissions.

www.germanwatch.org

Chalvatzis, K. J., & Hooper, E. (2009). Energy security vs. climate change:

Theoretical framework development and experience in selected EU electricity markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2703–2709. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.07.013>

Cho, K., van Merriënboer, B., Bahdanau, D., & Bengio, Y. (2014). *On the Properties of Neural Machine Translation: Encoder-Decoder Approaches.*

Chye, B., & Han, Z. (2018). *Avrupa Birliğinde Enerji Bağımlılığı ve Uluslararası Enerji Piyasası.* 75383.

Cin, M. (2016). *Avrupa Birliği Üyelik Sürecinin Türkiye'nin Enerji Politikalarına Etkisi.*

Climate Change: Global Temperature. (n.d.). Retrieved December 25, 2022, from <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>

de Rosa, L., & Castro, R. (2020). Forecasting and assessment of the 2030 australian electricity mix paths towards energy transition. *Energy*, 205, 118020. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.118020>

Demir, E. (2012). *ELİFDemir.* İstanbul Üniversitesi.

Difiglio, C., Güray, Ş. B., & Merdan, E. (2020). *Turkey Energy Outlook 2020.*

Doğancan Beşikçi. (2019). *Planning Of The Renewable Energy Roadmap By Energy System Analysis And Modeling In Burdur Analysis.*

Ecer, K., & Güner, O. (n.d.). *Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Türkiye Ekonomisinin Uyum Politikaları.* Retrieved September 28, 2022, from <https://orcid.org/0000-0003-1619-579X>.

Energy Agency, I. (2020). *World Energy Outlook 2020.* www.iea.org/weo

- Farah, S., David A, W., Humaira, N., Aneela, Z., & Steffen, E. (2022). Short-term multi-hour ahead country-wide wind power prediction for Germany using gated recurrent unit deep learning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112700. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112700>
- Fleiter, T., Rehfeldt, M., Herbst, A., Elstrand, R., Klingler, A. L., Manz, P., & Eidelloth, S. (2018). A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The Forecast Model. *Energy Strategy Reviews*, 22, 237–254. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2018.09.005>
- Forootan, M. M., Larki, I., Zahedi, R., & Ahmadi, A. (2022). *Machine Learning and Deep Learning in Energy Systems: A Review*. <https://doi.org/10.3390/su14084832>
- Gebremeskel, D. H., Ahlgren, E. O., & Beyene, G. B. (2021). Long-term evolution of energy and electricity demand forecasting: The case of Ethiopia. *Energy Strategy Reviews*, 36, 100671. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2021.100671>
- Geem, Z. W., & Kim, J.-H. (2016). *Optimal Energy Mix with Renewable Portfolio Standards in Korea*. <https://doi.org/10.3390/su8050423>
- Gökgöz, F., & Filiz, F. (2018). Electricity price forecasting: A comparative analysis with shallow-ann and dnn. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 421–425.
- Gökgöz, F., & Filiz, F. (2020). Wind Power Forecasting via Deep Learning Methods. In *Green Energy and Infrastructure* (pp. 157–169).
- Gökgöz, F., & Filiz, F. (2021). Comparing the Renewable Energy Technologies via Forecasting Approaches. In *Applied Operations Research and Financial*

- Modelling in Energy* (pp. 153–171). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-84981-8_8
- Gresat, A., Sukchai, S., & Thanarak, P. (2018). Electricity Generation Mix Scenarios Simulation and Optimization in Jordan up to 2050 Using LEAP Software. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, 13(2).
- Hamze, A. (2020). *Energy and Uncertainties: Stochastic Modeling and Optimization of Multi-sources Energy Systems* [University of Technology of Troyes]. <http://losi.utt.fr>
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, 1735–1780.
- Hoffman, K. C., & Wood, D. O. (1976). *Energy System Modeling And Forecasting*. www.annualreviews.org
- Höglund-Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., Rafaj, P., Schöpp, W., & Klimont, Z. (2012). EU low carbon roadmap 2050: Potentials and costs for mitigation of non-CO₂ greenhouse gas emissions. *Energy Strategy Reviews*, 1(2), 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2012.05.004>
- Huang, Y., Bor, Y. J., & Peng, C. Y. (2011). The long-term forecast of Taiwan's energy supply and demand: LEAP model application. *Energy Policy*, 39(11), 6790–6803. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2010.10.023>
- International Energy Agency. (2021). *Turkey 2021 - Energy Policy Review*. www.iea.org/t&c/
- IPCC. (2022). *Mitigation of Climate Change Climate Change 2022*. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/uncertainty-guidance-note.pdf>.

- Kakışım, C. (2022). Avrupa Yeşil Mutabakatı: Yeşil Teori Perspektifinden Bir Analiz. *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 6(1).
<https://doi.org/10.30692/sisad.1064799>
- Kale, R. v., & Pohekar, S. D. (2014). Electricity demand and supply scenarios for Maharashtra (India) for 2030: An application of long range energy alternatives planning. *Energy Policy*, 72, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2014.05.007>
- Kilickaplan, A., Bogdanov, D., Peker, O., Caldera, U., Aghahosseini, A., & Breyer, C. (2017). An energy transition pathway for Turkey to achieve 100% renewable energy powered electricity, desalination and non-energetic industrial gas demand sectors by 2050. *Solar Energy*, 158, 218–235. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2017.09.030>
- Kisvari, A., Lin, Z., & Liu, X. (2021). Wind power forecasting – A data-driven method along with gated recurrent neural network. *Renewable Energy*, 163, 1895–1909. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.10.119>
- Kotciolu, I. (2011). Clean and sustainable energy policies in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 5111–5119.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.045>
- KÜÇÜKOSMAN BELİZ. (2019). *Elektrik Üretim Yöntemlerinin Göreceli Karşılaştırması: No Free Lunch*. <http://berument.bilkent.edu.tr/BEN>
- Kumar, S., Hussain, L., Banarjee, S., Reza, M., Tech, B., & Students, Y. (2018). Energy Load Forecasting using Deep Learning Approach-LSTM and GRU in Spark Cluster. In *2018 Fifth International Conference on Emerging Applications of Information Technology (EAIT)*.
<https://doi.org/10.1109/EAIT.2018.8470406>

- Kyoto Protokolü - İklim Değişikliği Başkanlığı*. (2022). <https://iklim.gov.tr/kyoto-protokolu-i-35>
- Lee, J., & Zhao, F. (n.d.). *Global Wind Report*.
- Lee, W., Kim, K., Park, J., Kim, J., & Kim, Y. (2018). Forecasting Solar Power Using Long-Short Term Memory and Convolutional Neural Networks. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883330>
- Liu, Z. (2015). Supply and Demand of Global Energy and Electricity. *Global Energy Interconnection*, 101–182. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804405-6.00004-X>
- Mac, U. T., Rogan, F., & Gallachóir, B. Ó. (2016). *Develop a LEAP GHG Ireland Analytical Tool for 2050*. www.epa.ie
- Manowska, A. (2020). Using the LSTM Network to Forecast the Demand for Electricity in Poland. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app10238455>
- Mccarthy, J. (2004). *What Is Artificial Intelligence?* <http://www-formal.stanford.edu/jmc/>
- McPherson, M., & Karney, B. (2014). Long-term scenario alternatives and their implications: LEAP model application of Panama's electricity sector. *Energy Policy*, 68, 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.028>
- Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S. C. B., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D. J., & Allen, M. R. (2009). LETTERS Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. *Nature*, 458. <https://doi.org/10.1038/nature08017>
- Melikoglu, M. (2013). Vision 2023: Feasibility analysis of Turkey's renewable energy projection. *Renewable Energy*, 50(2013), 570–575. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.032>

- Murat Sirin, S., & Ege, A. (2012). Overcoming problems in Turkey's renewable energy policy: How can EU contribute? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4917–4926. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.03.067>
- Nam, K. J., Hwangbo, S., & Yoo, C. K. (2020). A deep learning-based forecasting model for renewable energy scenarios to guide sustainable energy policy: A case study of Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 122, 109725. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109725>
- Negishi, S. (2022). *A Study of Long-term Energy-mix Optimization Model: A Case Study in Japan*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2207.07969>
- Ouedraogo, N. S. (2017). Modeling sustainable long-term electricity supply-demand in Africa. *Applied Energy*, 190, 1047–1067. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.12.162>
- Ozcan, M. (2016). Estimation of Turkey's GHG emissions from electricity generation by fuel types. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 832–840. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.09.018>
- Ozcan, M. (2018). The role of renewables in increasing Turkey's self-sufficiency in electrical energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2629–2639. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.111>
- Özcan, M., & Öztürk, S. (2015). *Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Üretimi Kaynaklı Sera Gazı Emisyonunda Beklenen Değişimler ve Karbon Vergisi Uygulaması*.
- Özer, B., Görgün, E., & Incecik, S. (2013). The scenario analysis on CO2 emission mitigation potential in the Turkish electricity sector: 2006–2030. *Energy*, 49(1), 395–403. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2012.10.059>
- Paez, A. F., Maldonado, Y. M., Castro, A. O., Hernandez, N., Conde, E., Pacheco, L., Gonzalez, W., & Sotelo, O. (2017). Future Scenarios and

- Trends of Energy Demand in Colombia using Long-range Energy Alternative Planning. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7(5), 178–190.
<https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/5390>
- Park, N. B., Yun, S. J., & Jeon, E. C. (2013). An analysis of long-term scenarios for the transition to renewable energy in the Korean electricity sector. *Energy Policy*, 52, 288–296. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2012.09.021>
- Pavel, G. L., Budu, A. R., & Moraru, D. E. (2017). Optimization of Energy Mix - Nuclear Power and Renewable Energy for Low Emissions Energy Source a Benefit for Generations to Come. *Energy Procedia*, 112, 412–417. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.1092>
- Penna, A. N. (2019). A History of Energy Flows. In *A History of Energy Flows*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429492389>
- Pfenninger, S., Hawkes, A., & Keirstead, J. (2014). Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.003>
- Preeti, S., & Bala, R. (2019). *Financial and Non-Stationary Time Series Forecasting using LSTM Recurrent Neural Network for Short and Long Horizon; Financial and Non-Stationary Time Series Forecasting using LSTM Recurrent Neural Network for Short and Long Horizon*. <https://figshare.com/articles/Mackey-Glass>
- Rivera-González, L., Bolonio, D., Mazadiego, L. F., & Valencia-Chapi, R. (2019). Long-Term Electricity Supply and Demand Forecast (2018-2040): A LEAP Model Application towards a Sustainable Power Generation System in Ecuador. <https://doi.org/10.3390/su11195316>

- Rogan, F., Cahill, C. J., Daly, H. E., Dineen, D., Deane, J. P., Heaps, C., Welsch, M., Howells, M., Bazilian, M., & Gallachóir, B. P. Ó. (2014). LEAPs and Bounds-an Energy Demand and Constraint Optimised Model of the Irish Energy System. *Energy Efficiency*, 441–466. <https://doi.org/10.1007/s12053-013-9231-9>
- Rui, C., Rao, Z.-H., & Liao, S.-M. (2019). Hybrid LEAP modeling method for long-term energy demand forecasting of regions with limited statistical data. *Journal of Central South University*, 26(8), 2136–2148. <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4161-0>
- Şahin, Ü., Bülent Tör, O., Kat, B., Teimourzadeh, S., Demirkol, K., Künar, A., Voyvoda, E., & Yeldan, E. (2021). *Turkey's Decarbonization Pathway Net Zero in 2050*. www.ipc.sabanciuniv.edu
- Said, Z., Alshehhi, A. A., & Mehmood, A. (2018). Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030. *Renewable Energy*, 118, 779–789. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.11.075>
- Say, N. P., & Yücel, M. (2006). Energy consumption and CO2 emissions in Turkey: Empirical analysis and future projection based on an economic growth. *Energy Policy*, 34(18), 3870–3876. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2005.08.024>
- Saygin, D., Tör, O. B., Cebeci, M. E., Teimourzadeh, S., & Godron, P. (2021). Increasing Turkey's power system flexibility for grid integration of 50% renewable energy share. *Energy Strategy Reviews*, 34, 100625. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2021.100625>
- SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi. (2020). *Türkiye Elektrik Sistemi için En Ekonomik Katkı: Enerji Verimliliği ve Yeni İş Modelleri*. www.shura.org.tr

- SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi. (2022). *Türkiye Elektrik Sistemine Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Entegrasyonu*. www.shura.org.tr
- Simas, M., Wiebe, S. K., & Sodersten, J. C. (2022). *Türkiye’de İklim Değişikliği ve Yeşil Ekonomi Politikalarının Sosyal ve İstihdam Etkileri Yeşil İşler Değerlendirme Modelinin Türkiye’ye Uygulanması*.
- Taranto, Y., Mathis Rogner, Erinc Yeldan, Sevil Acar, & Bora Kat. (2021). *Socioeconomic impact of the power system transition in Turkey*. www.shura.org.tr.
- T.C Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (n.d.). *Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Belgesinin Turkey 3.0 Uygulaması*. Retrieved December 12, 2022, from https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/Enerji_Modellemesi/128647-6-leap_stratejibelgesi.pdf
- T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). *Türkiye Elektrik Üretimi Ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri Bilgi Formu*.
- Thangavelu, S. R., Khambadkone, A. M., & Karimi, I. A. (2015). Long-term optimal energy mix planning towards high energy security and low GHG emission. *Applied Energy*, 154, 959–969. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.05.087>
- Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2019). *TÜRKİYE’NİN YEDİNCİ ULUSAL BİLDİRİMİ*.
- Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı. (2021). *Yeşil Mutabakat Eylem Planı*.
- Vidal-Amaro, J. J., Østergaard, P. A., & Sheinbaum-Pardo, C. (2015). Optimal energy mix for transitioning from fossil fuels to renewable energy sources – The case of the Mexican electricity system. *Applied Energy*, 150, 80–96. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.03.133>

Wang, F., Xuan, Z., Zhen, Z., Li, K., Wang, T., & Shi, M. (2020). A day-ahead PV power forecasting method based on LSTM-RNN model and time correlation modification under partial daily pattern prediction framework. *Energy Conversion and Management*, 212, 112766. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112766>

World Bank Group. (2022). *Country Climate and Development Report: Türkiye*.

Yousefi-Sahzabi, A., Unlu-Yucesoy, E., Sasaki, K., Yuosefi, H., Widiatmojo, A., & Sugai, Y. (2017). Turkish challenges for low-carbon society: Current status, government policies and social acceptance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(March 2016), 596–608. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.090>

Elektronik Kaynaklar:

Climate at a Glance Global Time Series. Erişim Adresi (15 Aralık 2022) https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/land_ocean/1/12/1880-2022

Climate Change: Global Temperature. Erişim Adresi (15 Aralık 2022): <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>

GEPA: Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası. Erişim Adresi (15 Aralık 2022): <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>

Global Energy Mix. Erişim Adresi (15 Aralık 2022): <https://ourworldindata.org/electricity-mix>

REPA: Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli. Erişim Adresi (15 Aralık 2022): <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/bolgeler/TURKIYE-GENELI.pdf>

Türkiye INDC. Erisim Adresi (15 Aralık 2022)

https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/The_INDC_of_TURKEY_v.15.19.30.pdf

Kyoto Protokolü. Erişim Adresi (15 Aralık 2022): <https://iklim.gov.tr/kyoto-protokolu-i-35>



ÖZET

Filiz, Fahrettin, Enerji Verimliliği ve Tahmin Modellerinin Modern Yöntemler ile Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Danışman: Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ, s.154

İklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı atılacak adımlardan biri fosil yakıt kaynaklı CO₂ emisyon salınımı azaltmaktır. CO₂ emisyonu önemli sebepleri arasında ulaşım, sanayi ve elektrik üretimi bulunmaktadır. Bu çalışmada elektrik üretimi sonucu oluşan CO₂ emisyonunu minimize edecek enerji karışımı nicel olarak öngörülmüştür. Çalışma kapsamında iki farklı yöntem kullanılmıştır. Senaryo analizi yöntemi ile Olağan İş Senaryosu, Yenilenebilir Enerji Senaryosu ve Yenilenebilir Nükleer Enerji Senaryosu oluşturulmuştur. Senaryoların sonuçları enerji karışımı ve CO₂ emisyonu çerçevesinde değerlendirilmiştir. Diğer bir yöntem ise derin öğrenme yöntemi ile birincil enerji kaynaklarının elektrik üretim miktarlarının tahmin edilmesidir. Elektrik üretim tahmin sonuçları kullanılarak CO₂ emisyonunu minimize edecek amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonunu gerçekleştiren optimal enerji karışım sonucunda gerçekleşen CO₂ emisyon miktarları 2030 yılına kadar haftalık hesaplanmıştır. Bu değerlere göre CO₂ emisyon miktarında artışın devam edeceği öngörülmektedir.

Anahtar kelimeler: Optimum Enerji Karışımı, Senaryo Analizi, Derin Öğrenme Yöntemi, Optimizasyon, İklim ve CO₂ Emisyonu

ABSTRACT

Filiz, Fahrettin, Evaluation of Energy Efficiency and Forecasting Models with Modern Methods, Ph.D. Thesis, Advisor: Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ, s.154

CO₂ emissions reduction is one of the steps to be taken against the negative effects of climate change. The important causes of CO₂ emissions are transportation, industry, and electricity generation. In this study, the energy mix that will minimize the CO₂ emission resulting from electricity generation is quantitatively predicted. Two different methods are used in the study. In scenario analysis method, Business as Usual Scenario, Renewable Energy Scenario and Renewable Nuclear Energy Scenario are created. The results of the scenarios are evaluated in terms of energy mix and CO₂ emissions. Another method is estimating the electricity production amounts of primary energy sources with the deep learning method. The objective function to minimize the CO₂ emission is created. The amount of CO₂ emissions realized because of the optimal energy mixture that fulfills the objective function has been calculated weekly until 2030. According to these values, it is predicted that the increase in the amount of CO₂ emissions will continue.

Keywords: Optimum Energy Mix, Scenario Analysis, Deep Learning Method, Optimization, Climate and CO₂ Emission