

TÜRKİYE'NİN KARBONSUZLAŞMA YOL HARİTASI

DÖNÜŞÜMÜN TAKVİMİ VE COĞRAFYASI (2020-2050)

SAEED TEİMOURZADEH, OSMAN BÜLENT TÖR, BORA KAT, ÜMİT ŞAHİN, KEMAL DEMİRKOL, ARİF KÜNAR, EBRU VOYVODA, ERİNÇ YELDAN

İPM
İSTANBUL POLİTİKALAR MERKEZİ
SABANCI ÜNİVERSİTESİ
STIFTUNG MERCATOR GİRİŞİMİ

TÜRKİYE'NİN KARBONSUZLAŞMA YOL HARİTASI

DÖNÜŞÜMÜN TAKVİMİ VE COĞRAFYASI (2020-2050)

SAEED TEIMOURZADEH, OSMAN BÜLENT TÖR, BORA KAT,
ÜMİT ŞAHİN, KEMAL DEMİRKOL, ARİF KÜNAR,
EBRU VOYVODA, ERİNÇ YELDAN,

Kasım 2023

İstanbul Politikalar Merkezi Hakkında

İstanbul Politikalar Merkezi (İPM) demokratikleşmeden iklim değişikliğine, transatlantik ilişkilerden çatışma analizi ve çözümüne kadar, önemli siyasal ve sosyal konularda uzmanlığa sahip, çalışmalarını küresel düzeyde sürdüren bir politika araştırma kuruluşudur. İPM araştırma çalışmalarını üç ana başlık altında yürütmektedir: İstanbul Politikalar Merkezi-Sabancı Üniversitesi-Stiftung Mercator Girişimi, Demokratikleşme ve Kurumsal Reform, Çatışma Çözümü ve Arabuluculuk. İPM, 10 yılı aşkın süredir, karar alıcılara, kanaat önderlerine ve paydaşlara uzmanlık alanına giren konularda tarafsız analiz ve yenilikçi politika önerilerinde bulunmaktadır.

www.ipc.sabanciuniv.edu

İPM-Sabancı Üniversitesi-Stiftung Mercator Girişimi Hakkında

İstanbul Politikalar Merkezi–Sabancı Üniversitesi–Stiftung Mercator Girişimi, Türkiye-Almanya ve Türkiye-Avrupa arasındaki akademik, politik ve sosyal bağları güçlendirmeyi hedeflemektedir. Ortaklığın kuruluş amacı, küreselleşen dünyada bilgi sahibi olma ve 21. yüzyılın koşullarıyla yüzleşebilmek için fikir ve insan alışverişinin önkoşul olduğu inancından kaynaklanmaktadır.

Editör:

Ümit Şahin, Dr., İPM

Araştırmacı ve Yazarlar:

Saeed Teimourzadeh, Dr., EPRA

Osman Bülent Tör, Doç. Dr., EPRA

Bora Kat, Dr., ODTÜ

Ümit Şahin, Dr., İPM

Kemal Demirkol, GTE Carbon

Arif Künar, VENESCO

Ebru Voyvoda, Prof. Dr., ODTÜ

Erinç Yeldan, Prof. Dr., Kadir Has Üniversitesi

İÇİNDEKİLER

Şekiller Listesi 4

Tablolar Listesi 8

GİRİŞ

1. ELEKTRİK SEKTÖRÜ 12

1.1. ELEKTRİK SEKTÖRÜ MODELİ VE VARSAYIMLAR 12
1.2. PİYASA VE ŞEBEKE SİMÜLASYONLARI 13
1.3. BAZ SİSTEM 17
1.4. BAZ SENARYO 19
1.4.1. KURULU GÜÇ 23
1.4.2. KAYNAKLARA GÖRE ENERJİ ÜRETİMİ 39
1.4.3. YAL/YAT VE YENİLENEBİLİR KESİNTİ MİKTARI 46
1.4.4. ŞEBEKE YATIRIM GEREKSİNİMİ 54
1.4.5. KARBONDİOKSİT EMİSYONLARI 58
1.5. NET SIFIR SENARYOSU 65
1.5.1. KURULU GÜÇ 70
1.5.2. KÖMÜRLÜ TERMİK SANTRALLERİN DEVREDEN ÇIKMASI 71
1.5.3. KAYNAKLARA GÖRE ENERJİ ÜRETİMİ 91
1.5.4. YAL/YAT VE YENİLENEBİLİR KESİNTİ MİKTARI 99
1.5.5. ŞEBEKE YATIRIM GEREKSİNİMİ 108
1.5.6. KARBONDİOKSİT EMİSYONLARI 109

2. ULAŞIM SEKTÖRÜ 118

2.1. BAZ SENARYO 119
2.2. NET SIFIR SENARYOSU 121

3. BİNALAR 128

3.1. VARSAYIMLAR 128
3.1.1. BAZ SENARYO 128
3.1.2. NET SIFIR SENARYOSU 128
3.2. BİNALARDA ELEKTRİK TÜKETİMİ 129
3.3. KARBONDİOKSİT EMİSYONLARI 132

4. SANAYİ VE DİĞER ÜRETİCİ SEKTÖRLER 135

4.1. VARSAYIMLAR 136
4.2. KARBONDİOKSİT EMİSYONLARI 140

SONUÇ 148

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1	Önerilen metodolojinin genel akış şeması	13
Şekil 2	Piyasa simülasyonu modeli: Anahtar girdiler, varsayımlar ve çıktılar	14
Şekil 3	Piyasa simülasyonunda değer sıralaması konsepti	15
Şekil 4	Şebeke simülasyonunun girdi, çıktı ve temel varsayımları	15
Şekil 5	Şebeke simülasyonu modeli çıktılarına bir örnek (48 saat)	16
Şekil 6	TEİAŞ Yük Tevzi Merkezleri ve Uluslararası Enterkonneksiyonlar	17
Şekil 7	2020 yılında koridorlardaki 400 kV iletim hatları	18
Şekil 8	2030 yılı TEİAŞ yatırım planına göre koridorlardaki 400 kV iletim hatları	18
Şekil 9	Baz senaryoda depolamanın kurulu güç ve üretim kapasitesi olarak gelişimi	19
Şekil 10	Baz Senaryoda depolama sistemi kurulu gücünün bölgelere göre dağılımı ve gelişimi	20
Şekil 11	Baz senaryoda uluslararası enterkoneksiyon hatlarının saatlik Net Transfer Kapasitesinin (NTK) gelişimi	21
Şekil 12	Baz senaryoda ENTSO-E ve Gürcistan enterkonneksiyonlarının Net Transfer Kapasitesinin Gelişimi	22
Şekil 13	Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)	23
Şekil 14	Baz Senaryo: 2025 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı	24
Şekil 15	Baz Senaryo: 2030 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı	25
Şekil 16	Baz Senaryo: 2035 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı	26
Şekil 17	Baz Senaryo 2040 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı	27
Şekil 18	Baz Senaryo: 2045 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı	28
Şekil 19	Baz Senaryo: 2050 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı	29
Şekil 20	Baz Senaryoda TEİAŞ Yük Tevzi Merkezlerinde doğal gaz kurulu gücünün yıllara göre değişimi	31
Şekil 21	Baz Senaryoda TEİAŞ Yük Tevzi Merkezlerinde toplam kömür kurulu gücünün yıllara göre değişimi	32
Şekil 22	Baz Senaryoda TEİAŞ Yük Tevzi Merkezlerinde toplam yenilenebilir kurulu gücünün yıllara göre değişimi	32
Şekil 23	Baz Senaryo 2025 yılı yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçleri	33
Şekil 24	Baz Senaryo 2030 yılı yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçleri	34
Şekil 25	Baz Senaryo 2035 yılı yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçler	35
Şekil 26	Baz Senaryo 2040 yılı yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçler	36
Şekil 27	Baz Senaryo 2045 yılı yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçler	37
Şekil 28	Baz Senaryo 2050 yılı yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçleri	38
Şekil 29	Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin dağılımı (TWh)	39
Şekil 30	Baz Senaryo: 2025 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı	40
Şekil 31	Baz Senaryo: 2030 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı	41
Şekil 32	Baz Senaryo: 2035 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı	42
Şekil 33	Baz Senaryo: 2040 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı	43

Şekil 34 Baz Senaryo: 2045 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı 44
Şekil 35 Baz Senaryo: 2050 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı 45
Şekil 36 Baz Senaryo YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarları 46
Şekil 37 Baz Senaryo YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti oranları 47
Şekil 38 Baz Senaryo: 2025 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı 48
Şekil 39 Baz Senaryo: 2030 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı 49
Şekil 40 Baz Senaryo: 2035 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı 50
Şekil 41 Baz Senaryo: 2040 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı 51
Şekil 42 Baz Senaryo: 2045 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı 52
Şekil 43 Baz Senaryo: 2050 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı 53
Şekil 44 Baz Senaryo: TEİAŞ yük tevzi bölgelerindeki hatların toplam uzunluklarının gelişimi (km) 55
Şekil 45 Baz Senaryo: 2025 yılı koridorlarının 2020 yılına ilave yatırım gereksinimi 56
Şekil 46 Baz Senaryo: 2035 yılı koridorlarının 2030 TEİAŞ yatırım planına ilave yatırım gereksinimi 56
Şekil 47 Baz Senaryo: 2045 yılı koridorlarının 2035 yılı koridorlarına ilave yatırım gereksinimi 57
Şekil 48 Baz Senaryo: 2050 yılı koridorlarının 2045 yılı koridorlarına ilave yatırım gereksinimi 57
Şekil 49 Baz senaryoda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO_2 emisyonları ($MtCO_2$) 58
Şekil 50 Baz senaryoda 2025 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bölgelere dağılımı 59
Şekil 51 Baz senaryoda 2030 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bölgelere dağılımı 60
Şekil 52 Baz senaryoda 2035 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bölgelere dağılımı 61
Şekil 53 Baz senaryoda 2040 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bölgelere dağılımı 62
Şekil 54 Baz senaryoda 2045 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bölgelere dağılımı 63
Şekil 55 Baz senaryoda 2050 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bölgelere dağılımı 64
Şekil 56 Net Sıfır Senaryosunda depolama sistemlerinin kurulu güç ve üretim kapasitesinin gelişimi 66
Şekil 57 Net Sıfır Senaryosunda depolama sistemi kurulu gücünün bölgelere göre dağılımı ve gelişimi 66
Şekil 58 Net Sıfır Senaryosunda uluslararası enterkoneksiyon hatlarının saatlik Net Transfer Kapasitesinin (NTK) gelişimi 67
Şekil 59 Net Sıfır senaryosunda ENTSO-E ve Gürcistan enterkonneksiyonlarının Net Transfer Kapasitesinin Gelişimi 68
Şekil 60 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda depolama kapasitesinin kurulu gücünün karşılaştırılması 69
Şekil 61 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda Uluslararası Enterkoneksiyon Hatlarının saatlik Net Transfer Kapasitesi'nin (NTK) karşılaştırılması 69
Şekil 62 Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW) 70
Şekil 63 Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynakların kurulu güç olarak Baz Senaryoya göre değişimi 76
Şekil 64 Net Sıfır Senaryosunda 2025 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı 77
Şekil 65 Net Sıfır Senaryosunda 2030 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı 78
Şekil 66 Net Sıfır Senaryosunda 2035 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı 79
Şekil 67 Net Sıfır Senaryosunda 2040 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı 80
Şekil 68 Net Sıfır Senaryosunda 2045 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı 81

Şekil 69	Net Sıfır Senaryosunda 2050 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı	82
Şekil 70	Net Sıfır Senaryosunda TEİAŞ Yük Tevzi Merkezlerinde doğal gaz kurulu gücünün yıllara göre değişimi	83
Şekil 71	Net Sıfır Senaryosunda TEİAŞ Yük Tevzi Merkezlerinde toplam kömür kurulu gücünün yıllara göre değişimi	84
Şekil 72	Net Sıfır Senaryosunda TEİAŞ Yük Tevzi Merkezlerinde toplam yenilenebilir kurulu gücünün yıllara göre değişimi	84
Şekil 73	Net Sıfır Senaryosunda 2025 yılı yenilenebilir santrallerin konumu ve kurulu güçleri	85
Şekil 74	Net Sıfır Senaryosunda 2030 yılı yenilenebilir santrallerin konumu ve kurulu güçleri	86
Şekil 75	Net Sıfır Senaryosunda 2035 yılı yenilenebilir santrallerin konumu ve kurulu güçleri	87
Şekil 76	Net Sıfır Senaryosunda 2040 yılı yenilenebilir santrallerin konumu ve kurulu güçleri	88
Şekil 77	Net Sıfır Senaryosunda 2045 yılı yenilenebilir santrallerin konumu ve kurulu güçleri	89
Şekil 78	Net Sıfır Senaryosunda 2050 yılı yenilenebilir santrallerin konumu ve kurulu güçleri	90
Şekil 79	Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin gelişimi (TWh)	91
Şekil 80	Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynakların üretim seviyelerinin Baz Senaryoya göre değişimi (GWh)	92
Şekil 81	Net Sıfır Senaryosunda 2025 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı	93
Şekil 82	Net Sıfır Senaryosunda 2030 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı	94
Şekil 83	Net Sıfır Senaryosunda 2035 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı	95
Şekil 84	Net Sıfır Senaryosunda 2040 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı	96
Şekil 85	Net Sıfır Senaryosunda 2045 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı	97
Şekil 86	Net Sıfır Senaryosunda 2050 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı	98
Şekil 87	Net Sıfır Senaryosunda YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarları	99
Şekil 88	Net Sıfır Senaryosunda YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti oranları	100
Şekil 89	Net Sıfır Senaryosunda 2025 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı	101
Şekil 90	Net Sıfır Senaryosunda 2030 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı	102
Şekil 91	Net Sıfır Senaryosunda 2035 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı	103
Şekil 92	Net Sıfır Senaryosunda 2040 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı	104
Şekil 93	Net Sıfır Senaryosunda 2045 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı	105
Şekil 94	Net Sıfır Senaryosunda 2050 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı	106
Şekil 95	Net Sıfır Senaryosunda TEİAŞ yük tevzi bölgelerindeki hatların toplam uzunluklarının gelişimi (km)	107
Şekil 96	Net Sıfır Senaryosunda 2030 yılı koridorlarının 2030 TEİAŞ yatırım planına ilave yatırım gereksinimi	108
Şekil 97	Net Sıfır Senaryosunda 2040 yılı koridorlarının 2030 yılı koridorlarına ilave yatırım gereksinimi	108
Şekil 98	Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)	109
Şekil 99	Baz senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda karşılaştırmalı olarak elektrik sektörünün CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)	110
Şekil 100	Net Sıfır Senaryosunda 2025 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonların bölgelere dağılımı	111
Şekil 101	Net Sıfır Senaryosunda 2030 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonların bölgelere dağılımı	112

Şekil 102 Net Sıfır Senaryosunda 2035 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonların bölgelere dağılımı 113
Şekil 103 Net Sıfır Senaryosunda 2040 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonların bölgelere dağılımı 114
Şekil 104 Net Sıfır Senaryosunda 2045 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonların bölgelere dağılımı 115
Şekil 105 Net Sıfır Senaryosunda 2050 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonların bölgelere dağılımı 116
Şekil 106 Baz Senaryo - CO_2 emisyonları ($MtCO_2$) 120
Şekil 107 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda araçlara göre toplam enerji tüketimleri (1000 TEP) 122
Şekil 108 Ulaşım sektöründe Net Sıfır Senaryosundaki toplam enerji tüketimindekinin Baz Senaryoya göre değişimi 122
Şekil 109 Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre enerji tüketimindeki azalımın sektör kategorilerine dağılımı 123
Şekil 110 Ulaşım sektöründe elektrifikasyonun toplam elektrik tüketimine etkisi 124
Şekil 111 Net Sıfır Senaryosu - CO_2 emisyonları ($MtCO_2$) 125
Şekil 112 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosundaki toplam CO_2 emisyonlarının kıyaslanması 125
Şekil 113 Ulaşım sektöründe Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosundaki CO_2 emisyonlarının alt sektörlere göre kıyaslanması 126
Şekil 114 Elektrikli binek araç sayısındaki artışın ulaşım sektöründe toplam CO_2 emisyonuna etkisi 127
Şekil 115 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda binalarda elektrik tüketimi varsayımları (TWh) 130
Şekil 116 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda konutların elektrik tüketimi varsayımları (TWh) 131
Şekil 117 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda ticari binalarda elektrik tüketimi varsayımları 131
Şekil 118 Baz Senaryoya ve Net Sıfır Senaryosuna göre binalarda karbondioksit emisyonu varsayımları ($MtCO_2$) 132
Şekil 119 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda konutlardaki karbondioksit emisyonu varsayımları ($MtCO_2$) 133
Şekil 120 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda ticari binalardaki karbondioksit emisyonu varsayımları ($MtCO_2$) 134
Şekil 121 Yüksek Emisyonlu Sanayi (YES) sektörlerinde yıllar içinde varsayılan talep değişimi 136
Şekil 122 Tüm üretici sektörlerde (enerji hariç) yıllar içinde Baz Senaryo'da ortalama enerji verimliliğinde varsayılan artış oranı ve Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'ya göre ortalama enerji verimliliğinde varsayılan artış oranı 137
Şekil 123 Tüm üretici sektörlerde (enerji hariç) yıllar içinde elektriğin toplam enerji içindeki oranında varsayılan değişim (%) 138
Şekil 124 Net Sıfır Senaryosunda tüm üretici sektörlerde (YES ve enerji hariç) yıllar içinde doğrudan kullanılan yenilenebilir kaynakların toplam enerji içindeki oranında varsayılan değişim 139
Şekil 125 Baz Senaryoda üretici sektörlerde (enerji hariç) enerji talebinde artış (TEP) 140
Şekil 126 Baz Senaryoda üretici sektörlerde (enerji hariç) toplam enerji talebinde artış (TEP) 141
Şekil 127 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde (YES) sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların sektörlere göre dağılımı 142
Şekil 128 Üretici sektörlerin enerjiden kaynaklanan CO_2 emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma ($MtCO_2$) 145
Şekil 129 Tüm üretici sektörlerde (enerji hariç) enerjiden kaynaklanan toplam CO_2 emisyonlarına Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma 146

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1	TEİAŞ'ın projeksiyonları ve raporda kullanılan elektrik talep ve üretim projeksiyonları (TWh)	12
Tablo 2	Emisyon katsayıları	12
Tablo 3	2020 yılında bölgelerdeki 400 kV iletim hatları	17
Tablo 4	2030 yılı TEİAŞ yatırım planına göre bölgelerdeki 400 kV iletim hatları	19
Tablo 5	Baz senaryoda depolamanın kurulu güç ve üretim kapasitesi olarak gelişimi	19
Tablo 6	Baz senaryoda uluslararası enterkoneksiyon hatlarının saatlik Net Transfer Kapasitesinin (NTK) gelişimi	21
Tablo 7	Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)	23
Tablo 8	Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin dağılımı (GWh)	39
Tablo 9	Baz Senaryo YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarları	47
Tablo 10	Baz Senaryo YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti oranları	47
Tablo 11	Baz senaryoda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)	65
Tablo 12	Net Sıfır Senaryosunda depolamanın kurulu güç ve üretim kapasitesinin gelişimi	65
Tablo 13	Net Sıfır Senaryosunda uluslararası enterkoneksiyon hatlarının saatlik Net Transfer Kapasitesinin (NTK) gelişimi	67
Tablo 14	Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)	70
Tablo 15	Net Sıfır Senaryosundan taş kömürü santrallerin devreden çıkma sırası (yeşil: devrede, kırmızı: devrede değil)	71
Tablo 16	Net Sıfır Senaryosundan ithal kömürü santrallerin devreden çıkma sırası (yeşil: devrede, kırmızı: devrede değil)	72
Tablo 17	Net Sıfır Senaryosundan linyit santrallerin devreden çıkma sırası (yeşil: devrede, kırmızı: devrede değil)	73
Tablo 18	Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin gelişimi (GWh)	91
Tablo 19	Net Sıfır Senaryosunda YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarları	99
Tablo 20	Net Sıfır Senaryosunda YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti oranları	100
Tablo 21	Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)	109
Tablo 22	Ulaşım sektörünün modellenmesinde binek araçlarla ilgili kullanılan varsayımlar	118
Tablo 23	Ulaşım sektörünün modellenmesinde karayolundan raylı sisteme geçiş oranıyla ilgili kullanılan varsayımlar (%)	118
Tablo 24	Ulaşım sektörünün modellenmesinde karayolundan raylı sisteme geçiş oranıyla ilgili kullanılan varsayımlar (%)	119
Tablo 25	Baz Senaryo - Araçlara göre toplam enerji tüketimleri (1000 TEP)	119
Tablo 26	Baz Senaryo - CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)	120
Tablo 27	Net Sıfır Senaryosu - Araçlara göre enerji tüketimleri (1000 TEP)	121
Tablo 28	Ulaşım sektöründe elektrifikasyonun toplam elektrik tüketimine etkisi	123

Tablo 29 Net Sıfır Senaryosu - CO_2 emisyonları ($MtCO_2$) 124
Tablo 30 E-mobilite, e-dönüşüm ve seyahat davranış değişikliklerinin CO_2 emisyonlarına ve elektrik tüketimine etkileri 127
Tablo 31 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda binalarda elektrik tüketimi varsayımları (TWh) 129
Tablo 32 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda binalardan kaynaklanan elektrik tüketimi (TWh) 130
Tablo 33 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda konut ve ticari binalarda elektrik tüketimi varsayımları (TWh) 131
Tablo 34 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda binalarda karbondioksit emisyonu varsayımları ($MtCO_2$) 132
Tablo 35 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda konut ve ticari binalarda karbondioksit emisyonu varsayımları ($MtCO_2$) 133
Tablo 36 Üretici sektörlerin 2018 yılında toplam üretim ve ihracat içindeki payları, enerji yoğunluğu, enerji kullanımında yakıtların payı ve CO_2 emisyonları 135
Tablo 37 Yüksek Emisyonlu Sanayi (YES) sektörlerinde yıllar içinde varsayılan talep değişimi 136
Tablo 38 Tüm üretici sektörlerde (enerji hariç) yıllar içinde Baz Senaryo'da ortalama enerji verimliliğinde varsayılan artış oranı (2018 TL/TEP) ve Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'ya göre ortalama enerji verimliliğinde varsayılan artış oranı (2018 TL/TEP) 137
Tablo 39 Tüm üretici sektörlerde (enerji hariç) yıllar içinde elektriğin toplam enerji içindeki oranında varsayılan değişim (%) 138
Tablo 40 Net Sıfır Senaryosu'nda tüm üretici sektörlerde (YES ve Enerji hariç) yıllar içinde doğrudan kullanılan yenilenebilir kaynakların toplam enerji içindeki oranında varsayılan değişim (%) 139
Tablo 41 Baz Senaryoda üretici sektörlerde (enerji hariç) enerji talebinde artış (TEP) 140
Tablo 42 Baz Senaryoda sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlar ve sanayinin proses emisyonları ($MtCO_2$) 141
Tablo 43 Baz Senaryoda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde (YES) enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonların sektörlere göre dağılımı ($MtCO_2$) 142
Tablo 44 Baz Senaryoda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde (YES) sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların sektörlere göre dağılımı ($MtCO_2$) 143
Tablo 45 Net Sıfır Senaryosu'nda üretici sektörlerde (enerji hariç) enerji talebinde değişim (TEP) 143
Tablo 46 Üretici sektörlerin enerjiden kaynaklanan CO_2 emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma ($MtCO_2$) 144
Tablo 47 Net Sıfır Senaryosunda üretici sektörlerin (enerji hariç) enerji tüketiminden kaynaklanan CO_2 emisyonlarında azalma ($MtCO_2$) 146
Tablo 48 Net Sıfır Senaryosunda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde (YES) sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların sektörlere göre dağılımı ($MtCO_2$) 147

GİRİŞ

Türkiye, Paris Anlaşması çerçevesinde Nisan 2023'te Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne (UNFCCC) sunduğu Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı'nda (NDC) toplam sera gazı emisyonlarını 2030'a kadar referans senaryoya göre %41 azaltma ve 2038'de zirve noktasına çıkartıp sonra azaltma taahhüdünde bulunmuştur. Buna göre Türkiye'nin 2020'de 524 milyon ton olan sera gazı emisyonları %32 artışla 2030'da 693 milyon tona çıkacaktır.

Paris Anlaşması'na göre ulusal katkı beyanlarının beş yılda bir hedefler artırılarak yenilenmesi gerekmektedir. Buna göre Türkiye ikinci NDC'sini, hedef yılı 2035 olacak şekilde 2025 yılı sonunda Brezilya'da yapılacak olan COP30'dan önce sunmak zorundadır. Mevcut güncellenmiş NDC'de toplam sera gazı emisyonlarının 2035'ten sonra tepe noktasına çıkarılarak ardından azaltılmaya başlanacağı belirtildiğinden, Türkiye'nin bir sonraki NDC'de de referans senaryodaki artıştan azaltım hedefi belirlemeyi planladığı tahmin edilebilir.

Türkiye'nin sera gazı emisyonları 2021 yılında 1990'a göre %157 artarak 564 milyon tona yükselmiştir. 2023 yılında yayımlanan sera gazı envanterine göre Türkiye'nin karbondioksit (CO_2) emisyonları ise 1990 seviyesinin yaklaşık iki katına çıkarak 452 milyon tona ulaşmış durumdadır. Bu hızlı artışla Türkiye fosil yakıtlardan ve endüstriden kaynaklanan karbondioksit emisyonlarında 2021'de dünyada 195 ülke arasında 13. sıraya yükselmiştir. Türkiye 5,4 ton olan kişi başı CO_2 emisyonlarıyla da dünya ortalamasının üzerindedir ve kişi başı CO_2 emisyonu sıralamasında 64. sıradadır. Türkiye tarihsel sorumluluk açısından önemli olan kümülatif emisyonlar sıralamasında ise 26. sıradadır. Sera gazı emisyonlarının %80'i CO_2 olduğu için mevcut güncellenmiş NDC'de 2030 için öngörülen CO_2 emisyonlarının 555 milyon tona çıkması beklenebilir. Bu durumda Türkiye'nin TÜİK ana senaryosunda öngörülen 2030 nüfusu kullanılarak hesaplanan kişi başı CO_2 emisyonları 6 tona çıkacak ve 2030'da (şu anda 6,2 ton olsa da %55 azaltım hedefini başarması halinde düşecek olan) AB ortalamasını geçecektir. Bu nedenle Türkiye ikinci NDC'de mutlak emisyon azaltım hedefi belirlemelidir.

Bu gelişmelere bağlı olarak Türkiye'nin Paris Anlaşması'na uygun olarak ilan ettiği 2053'te net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda uzun vadeli karbonsuzlaşma yol haritası için yapılması gereken bilimsel çalışmaların önemi artmaktadır. Sabancı Üniversitesi İstanbul Politikalar Merkezi (İPM) öncülüğünde, 2019 yılında, henüz Paris Anlaşması'na taraf olmasından ve net sıfır hedefinin açıklanmasından önce başlatılan çalışmalar kapsamında, Türkiye'nin 2050'ye kadar nasıl karbonsuzlaşması gerektiği konusunda örnek bir yol haritası üzerinde bir dizi modelleme yapılmış ve raporlar yayımlanmıştır. Çalışmalar başladığında henüz 2053 net sıfır hedefi ilan edilmemiş olduğundan net sıfır için hedef yıl olarak 2050 seçilmiştir.

Üç aşamada gerçekleştirilen çalışmaların ilkinde 2021'de "Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası: 2050'de Net Sıfır" raporu yayımlanmış ve enerji, ulaşım, binalar, sanayi ve diğer üretici sektörlerde karbon emisyonlarının nasıl azaltılacağı baz senaryo ve gerçekçi varsayımlara dayalı net sıfır senaryosu çerçevesinde ortaya konmuştur. Bu rapordaki net sıfır senaryosuna göre Türkiye emisyonlarını 2030'a kadar 2018 seviyesine göre %32, 2050'ye kadar ise %68 azaltabilmekte, 2050 yılında üçte ikisi sanayi ve diğer üretici sektörlerden kaynaklanmak üzere yaklaşık 132 milyon ton artık emisyon kalmaktadır. Bu rapora

göre bütün kömürlü termik santraller 2035-2040 arasında kapatılmış olmakta ve elektik sektörü emisyonları 2030'a kadar %50, 2050'ye kadar %90 azaltılabilmektedir.

İkinci aşamada, 2022 yılı içerisinde, "Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası: Sektörel Fayda Maliyet Analizi (2020-2030)" çalışması yayımlanmıştır. Bu rapora göre net sıfır senaryosunda ortaya konan dönüşümün toplam yatırım, işletme, bakım ve yatırım maliyeti 2020-2030 arasında 171 milyar dolar, büyük kısmı yakıt kullanımdaki azalmadan kaynaklanan toplam faydası ise 70 milyar dolar olup net maliyet 101 milyar dolar, bir başka deyişle kabaca yılda 10 milyar dolar civarında olmaktadır.

2023 yılında tamamlanan ve sonuçları bu raporda sunulan üçüncü aşamada ise karbonsuzlaşmanın 5 yıllık aralıklarla nasıl bir seyir izleyeceği, elektrik sektöründeki dönüşümün takvimi, coğrafi dağılımı ve şebeke üzerindeki etkilerine öncelik verilmiştir. Bu raporda elektrik sektöründe mevcut kömürlü termik santrallerin ne zaman ve hangi sırayla devreden çıkarılarak elektrik sektöründe kömürden çıkışın tamamlanabileceği; devreye alınacak yeni doğal gaz ve yenilenebilir enerji santralleri ile bunlar için uygun depolama tesislerinin hangi bölgelerde, ne zaman ve hangi büyüklüklerde kurulmasının gerekeceği ve bu dönüşüm sırasında şebeke yatırım gereksinimleri dahil olmak üzere elektrik şebekesinin nasıl etkileneceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada, ulaşım, binalar, sanayi ve diğer üretici sektörlerde yürütülen değerlendirmeler de 5 yıllık aralıklarla gözden geçirilerek tamamlamıştır. Çalışma sonucunda, Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası'nın örnek net sıfır senaryosu, ayrıntılı takvim ve coğrafi haritalarla da ortaya konmuş durumdadır. Rapor elektrik sektörü sonuçlarıyla başlamakta, ardından ulaşım, binalar ve sanayi ile diğer üretici sektörler ele alınmaktadır.

1. ELEKTRİK SEKTÖRÜ

Bu bölümde Türkiye'de elektrik sektörünün 2050'de net sıfır hedefi doğrultusunda daha önce Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası: 2050'de Net Sıfır raporu (İPM, 2021) olarak yayımlanan emisyon azaltımı patikasında nasıl bir dönüşümden geçeceği incelenmiştir. Bu çalışmada 2021 yılında yayımlanan raporda 10 yıllık aralıklar için yapılan çalışma 5 yıllık aralıklara göre yapılarak geliştirilmiştir. Bu dönüşümde özellikle incelenen unsurlar;

1 | Mevcut kömürlü termik santrallerin ne zaman ve hangi sırayla devreden çıkarılarak elektrik sektöründe kömürden çıkışın tamamlanabileceği;

2 | Devreye alınacak yeni doğal gaz ve yenilenebilir enerji santralleriyle depolama tesislerinin hangi bölgelerde, ne zaman hangi büyüklüklerde kurulmasının gerekeceği ve

3 | Bu dönüşüm sırasında yatırım gereksinimleri dahil olmak üzere şebekenin nasıl etkileneceğidir.

Çalışmada kullanılan varsayımlar, metodoloji ve senaryolar bu bölümde kısaca ele alınmış olup ayrıntılar için sözü geçen rapora başvurulabilir.

1.1. ELEKTRİK SEKTÖRÜ MODELİ VE VARSAYIMLAR

Elektrik sektörü modeli için oluşturulan Baz Senaryoda toplam elektrik tüketimi 2030'a kadar TEİAŞ tarafından gerçekleştirilen güncel projeksiyonlardan yola çıkılarak öngörülmüş, 2030 sonrası için makroekonomik model sonuçları kullanılmıştır (Tablo 1). Çalışmada Baz Senaryoda 2030 yılında toplam üretim ihtiyacı 460 TWh varsayılmıştır. 2050 yılındaki elektrik talep projeksiyonu makroekonomik model kullanılarak 769 TWh hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan üretim kapasitesi genişleme modeli, TR-Power optimizasyon modelinin[1] geliştirilmiş bir versiyonudur. (Metodoloji için bkz. İPM 2021)

Fosil yakıt kaynakların TWh başına $MtCO_2$ olmak üzere CO_2 emisyonu katsayıları Tablo 2'de verilmiştir.

1 Kat, B. (2021). Renewable energy transition in the Turkish power sector: A technoeconomic analysis with a high-resolution power expansion model. TR-Power. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change Report Series, Report 346.

Tablo 1 TEİAŞ'ın projeksiyonları ve raporda kullanılan elektrik talep ve üretim projeksiyonları (TWh)

Yıl	TEİAŞ Talep Projeksiyonu (2021-2030)			TEİAŞ Üretim Projeksiyonu (2020-2024)			Karbonsuzlaşma Raporu Baz Senaryo			
	TEİAŞ Düşük Senaryo	TEİAŞ Baz Senaryo	TEİAŞ Yüksek Senaryo	TEİAŞ Düşük Senaryo	TEİAŞ Baz Senaryo	TEİAŞ Yüksek Senaryo	Baz yük	Elektrikli Araç Hanehalkı	Diğer Elektrifikasyon	Toplam
2029				441	467	497				
2030	359	396	454				440	4	16	460

Tablo 2 Emisyon katsayıları

	Taş Kömürü	İthal Taş Kömürü	Linyit	Doğal Gaz
Emisyon Katsayısı ($MtCO_2$/TWh)	1,02	0,95	1,19	0,39

Net Sıfır Senaryosunda diğer sektör modellerinden hesaplanan net verimlilik ve elektrifikasyon yükleri Baz Senaryodaki elektrik yüküne eklenmiştir. Diğer sektörlerde yapılan varsayımlardaki hata payları için, CO_2 emisyonlarında dominant sektör olan enerji sektörünün kritik girdisi olan yıllık elektrik yüküne, Net Sıfır hedef yılında toplam %10'luk bir ilave yük payı eklenmiştir.

Elektrik sektöründe üretimde yenilenebilir kaynakların payının artması şebekenin esnekliğine bağlıdır (Shura, 2018). Modelde göz önüne alınan şebeke esneklik çözümleri şöyledir (Ayrıntılar için İPM, 2021):

1 | Doğal gaz santralleri ve barajlar

2 | Depolama sistemleri

3 | Uluslararası enterkoneksiyon hatları

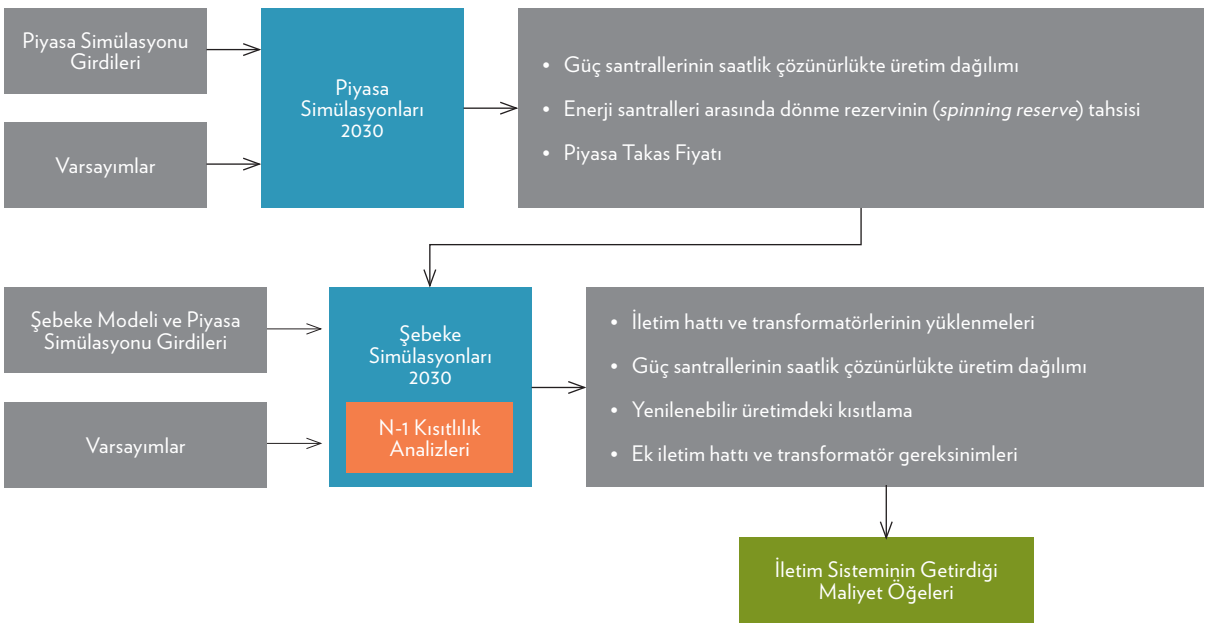
1.2. PİYASA VE ŞEBEKE SİMÜLASYONLARI

İletim sistemi tarafından uygulanan maliyet öğelerinin hesaplanması için önerilen metodolojinin ana hatları Şekil 1'de gösterilmektedir.

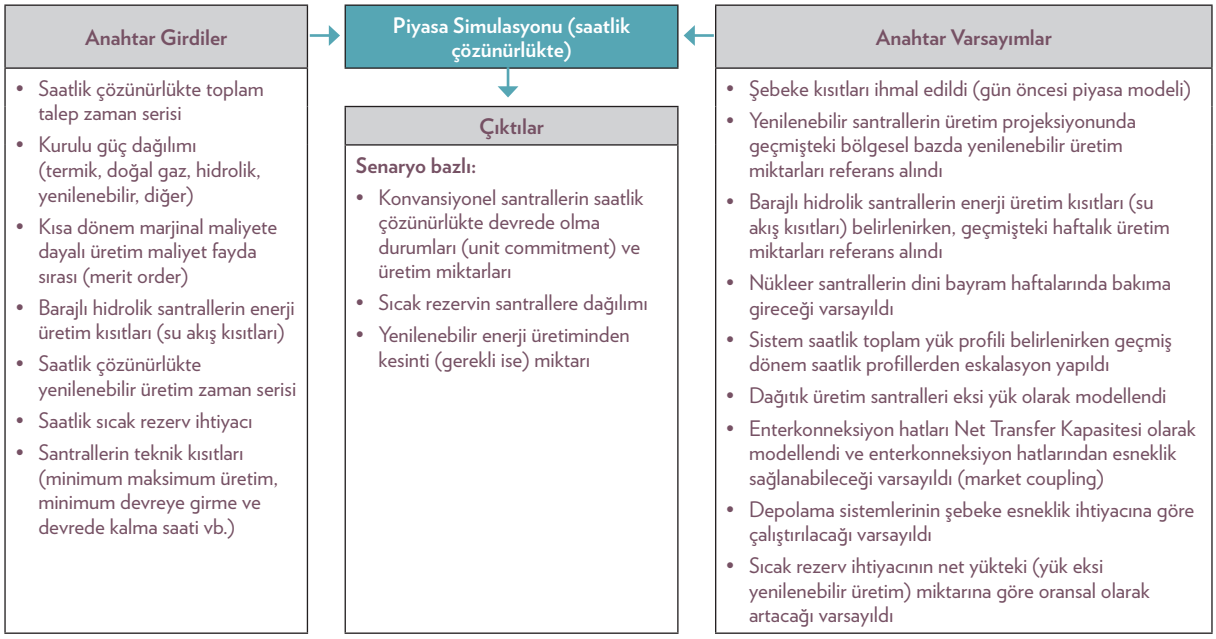
Şekil 1'e göre ilk olarak piyasa simülasyonları yapılmıştır. Şekil 2'de anahtar girdi, varsayım ve çıktıları verilen piyasa simülasyon motoru, aşağıdaki girdileri alarak gün öncesi elektrik piyasasını simüle eder:

- Sistemin saatlik çözünürlükte toplam yük profili
- Konvansiyonel güç santrallerinin (kömür, linyit, gaz, nükleer) üretim kapasitesi
- Farklı üretim teknolojilerinin değer sırası *(merit order)*

Şekil 1 Önerilen metodolojinin genel akış şeması



Şekil 2 Piyasa simülasyonu modeli: Anahtar girdiler, varsayımlar ve çıktılar



- Hidroelektrik santrallerin haftalık enerji kısıtlamaları
- Rüzgâr, güneş, nehir tipi hidro ve diğerlerinin üretim profilleri
- Sıcak rezerv *(spinning reserve)* gereksinimi
- Jeneratör kısıtlamaları (*Pmaks/min, ramp up/down* vb.)

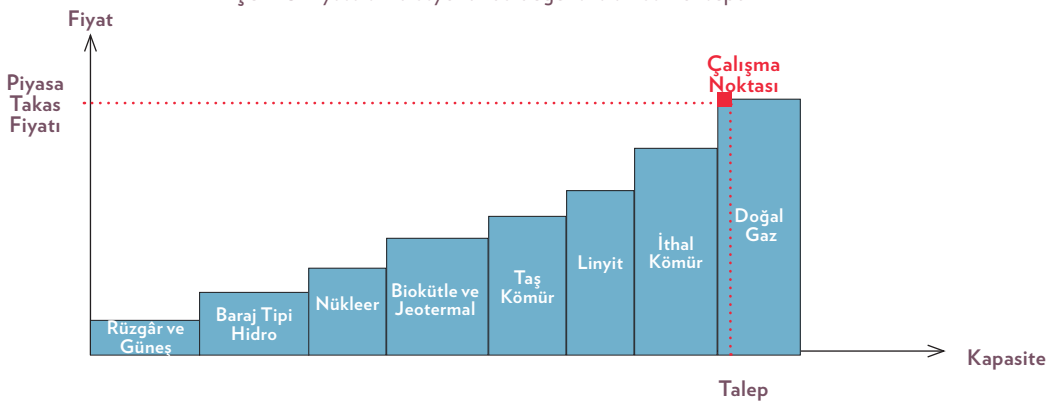
Değer sıralaması, artan fiyat sırasına (kısa vadeli marjinal üretim maliyetlerinin sırasını yansıtabilir) ve bazen de kirliliğe ve buna bağlı olarak üretilecek enerji miktarına dayalı olarak mevcut elektrik üretim teknolojilerini sıralamanın bir yoludur (Şekil 3). Piyasa simülasyonunda sıralama, marjinal maliyeti en düşük olanlar talebi karşılamak için ilk hizmete alınacak ve marjinal maliyeti en yüksek olanlar en son kullanılacak şekildedir. Üretimin bu şekilde dağıtılması (Ekonomik Güç Dağıtım) elektrik üretim maliyetini en aza indirir.

Şekil 3'te verilen girdi verilerini, amacın bir dizi, teknik kısıtlamaya tabi olan sistemin toplam işletme maliyetini en aza indirmek olduğu bir optimizasyon modeline yerleştirir. Burada ana kısıtlamalara örnek olarak, farklı enerji santrallerinin ramp gereksinimi, jeneratörlerin minimum çalışma ve durma süreleri, jeneratörlerin izin verilen çalışma aralıkları, bakım gereksinimleri, hidroelektrik santrallerin haftalık enerji kısıtlamaları verilebilir. Piyasa simülasyonunun çıktıları:

- Farklı üretim teknolojilerinin saatlik üretim dağılımları,
- Farklı jeneratörlerin güç üretimleri,
- Her bir saatteki marjinal jeneratör ve
- Her bir saatteki yenilenebilir kısıtlamasıdır.

Piyasa simülasyonlarında çeşitli varsayımlar yapılmıştır:

Şekil 3 Piyasa simülasyonunda değer sıralaması konsepti

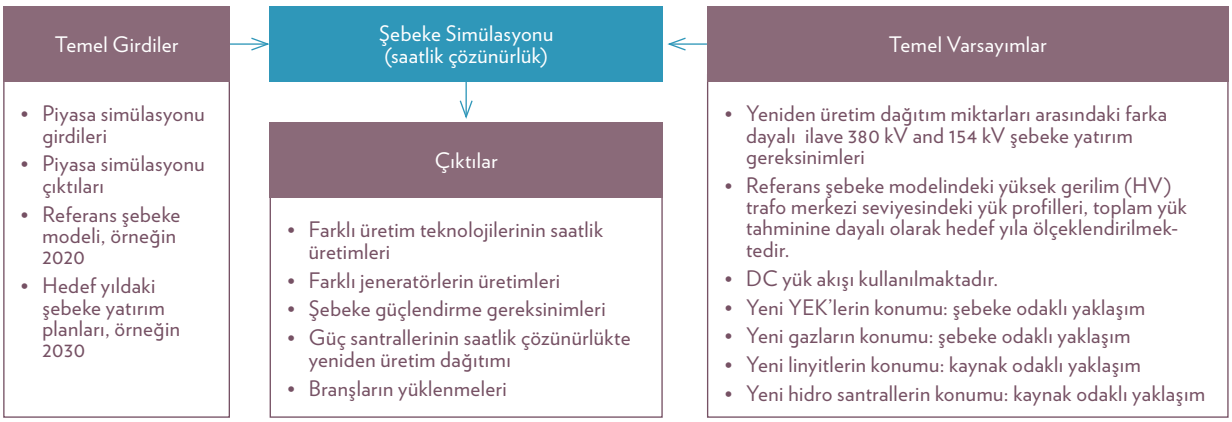


- Şebeke kısıtlamaları ihmal edilmiştir.
- Rüzgâr, güneş ve nehir tipi hidroelektrik güç santralleri negatif yük *(feed-in)* olarak modellenmiştir.
- Baraj tipi hidroelektrik santrallerin haftalık enerji kısıtlamalarında tarihsel kayıtlar dikkate alınmıştır.
- Nükleer enerji santrallerinde bakım minimum talep periyotlarında gerçekleşmektedir.
- Sistem talep profili, yüzde olarak ortalama yıllık artış oranına göre ölçeklendirilerek oluşturulmuştur.
- Dağıtık yenilenebilir kaynaklar yüksek gerilim trafo merkezlerinde toplanmıştır.
- Sıcak rezerv gereksinimi yenilenebilir üretimdeki artış göz önüne alınarak ayarlanmıştır.

Piyasa simülasyonu gerçekleştirildikten sonra, iletim şebekesinin farklı teknolojilerin elektrik üretimi üzerindeki etkisini araştırmak için ilgili çıktılar şebeke simülasyonuna eklenir. Şebeke simülasyonu için girdiler, çıktılar ve temel varsayımlar Şekil 4'te sunulmaktadır.

Modellerde, devreden çıkacak kömür santralleri belirlenirken eski ve ana yük merkezlerinden uzak

Şekil 4 Şebeke simülasyonunun girdi, çıktı ve temel varsayımları



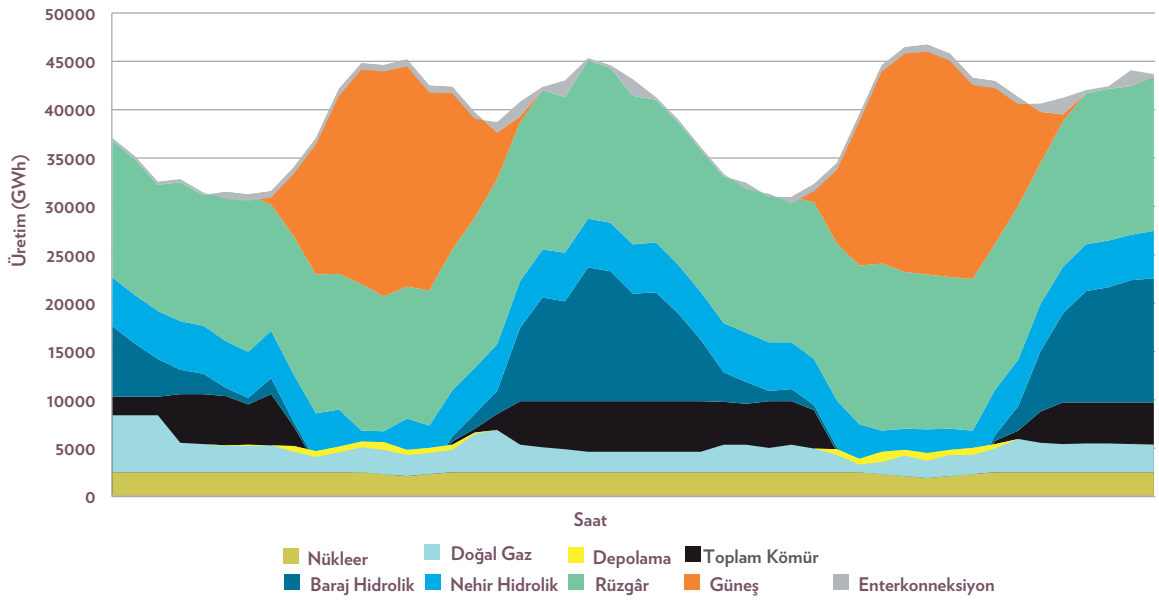
linyit santrallerine öncelik verilmiştir. Ayrıca, güç sistemine yeni eklenecek doğal gaz ve yenilenebilir enerji santrallerinin ana yük merkezlerine yakın konumlanacağı varsayılmıştır. Nitekim YEKA mekanizması ile yeni yenilenebilir santrallerin şebeke açısından uygun noktalara konumlanması amaçlanmaktadır.

Depolama sistemlerinin de yine aynı şekilde ana yük merkezlerine öncelik verilerek konumlanacağı ve şebekenin esneklik ihtiyacına göre merkezi bir şekilde kontrol edileceği varsayılmıştır. Bu merkezi kontrol için gerekli altyapı ve piyasa mekanizmaları çalışmanın kapsamı dışındadır.

Enterkoneksiyon hatlarının net transfer kapasitelerinin de piyasa birleştirmesi mekanizmaları sayesinde şebekenin esneklik ihtiyacına göre kullanılacağı varsayılmıştır. Bu piyasa mekanizmaları da çalışmanın kapsamı dışındadır.

Şebeke simülasyonları; piyasa simülasyonları ile elde edilen üretim dağılımını, şebeke kısıtlarını göz önüne alıp termik santrallere Yük Al/Yük At (YAL/YAT) talimatları vererek düzenleyerek şebekenin darboğaz sorunlarını çözen bir simülasyon motorudur. Bu simülasyonlar ile hedef yıldaki ilave yatırım gereksinimleri belirlenir. Şebeke simülasyonu motorunun çıktılarına bir örnek (üretimin dağılımı) Şekil 5'te paylaşılmıştır.

Şekil 5 Şebeke simülasyonu modeli çıktılarına bir örnek (48 saat)



1.3. BAZ SİSTEM

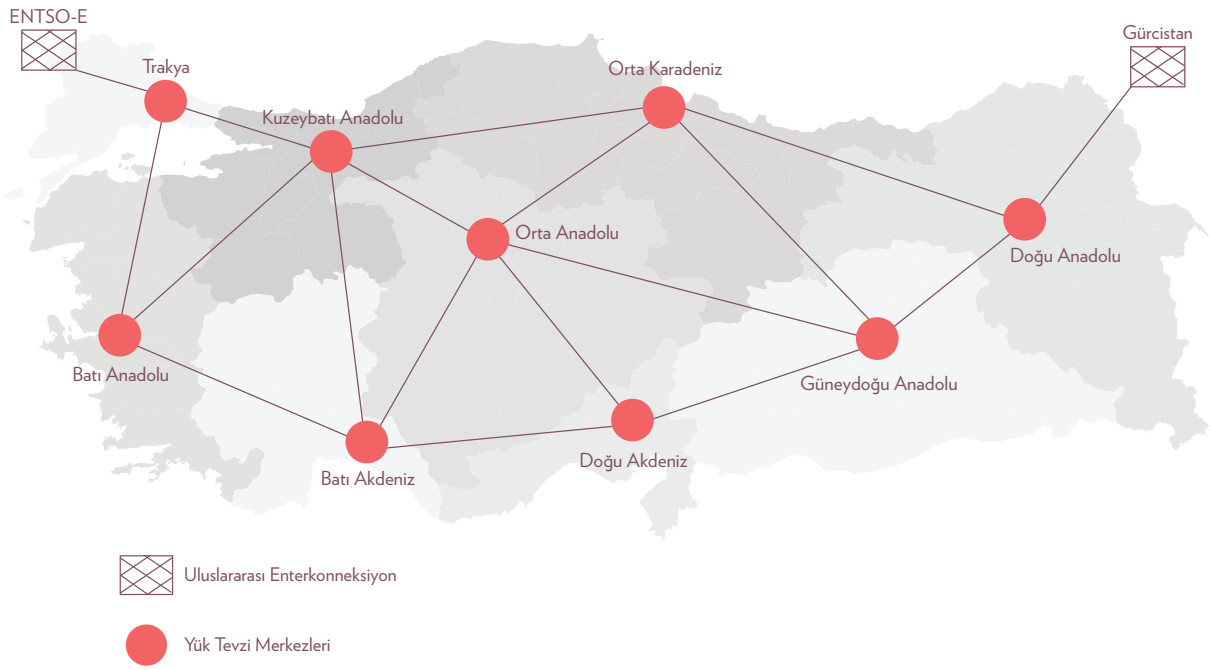
Elektrik sektörü için 2020 yılı şebeke modeli baz alınarak 2025 yılından başlanarak 2050 yılına kadar 5'er yıllık aralıklarla raporun ilerleyen bölümünde bahsedilen senaryolar için piyasa ve şebeke simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Şebeke simülasyonları, şebeke topolojisine bağlı olduğundan modelleme verileri ve analiz sonuçları hem ülke geneli toplamı hem de Şekil 6'da paylaşılan TEİAŞ Yük Tevzi Merkezleri için paylaşılacaktır.

2020 yılı şebeke modeli için TEİAŞ yük tevzi merkezlerindeki ve bu merkezleri birbirine bağlayan koridorlardaki 400 kV iletim sistemi hatlarına ilişkin bilgiler sırasıyla Tablo 3 ve Şekil 7'de paylaşılmıştır ve analizlerde 2025 yılı için gerekli iletim şebeke yatırımları bu model baz alınarak hesaplanmıştır. Öte yandan TEİAŞ'ın 2030 yılını hedef alan bir şebeke yatırım planı mevcuttur (Tablo 4 ve Şekil 8) ve 2030 yılından itibaren bu yatırım planı göz önüne alınarak gerekli yatırım gereksinimleri hesaplanmıştır.

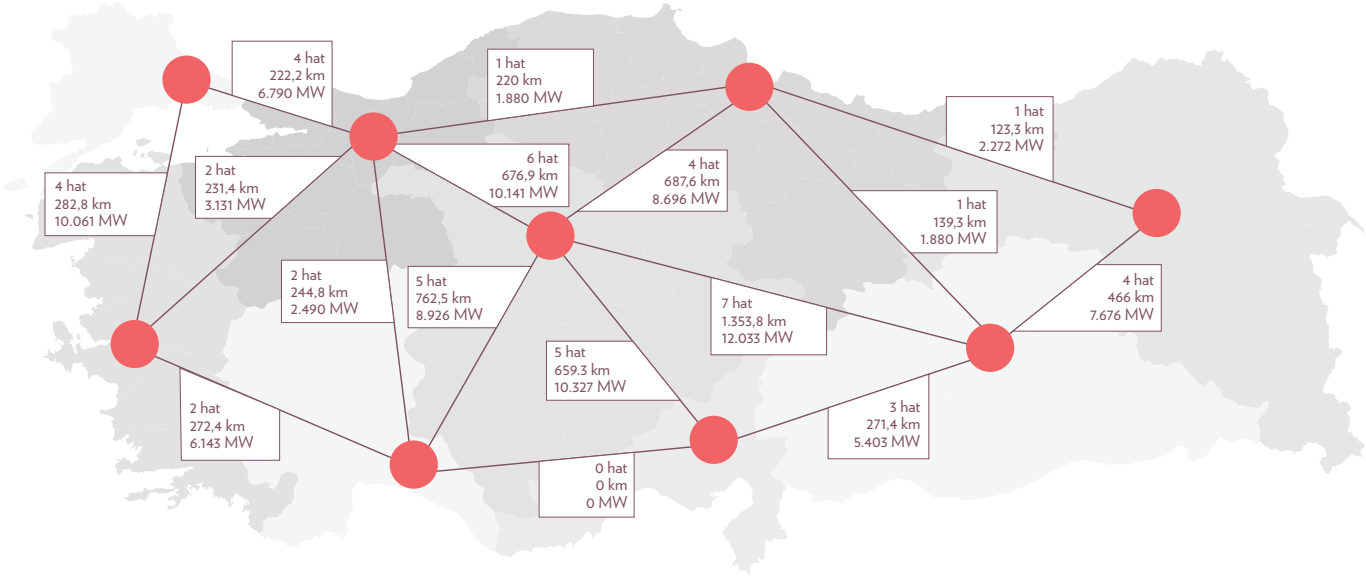
Tablo 3 2020 yılında bölgelerdeki 400 kV iletim hatları

Bölge Numarası	Bölge Adı	Kapasite (GW)	Hat Sayısı
1	Trakya	44,21	26
2	Batı Anadolu	61,95	33
3	Kuzeybatı Anadolu	70,14	44
4	Orta Karadeniz	34,85	18
5	Doğu Anadolu	28,28	14
6	Orta Anadolu	50,24	27
7	Batı Akdeniz	21,15	10
8	Doğu Akdeniz	30,15	16
9	Güneydoğu Anadolu	81,96	46

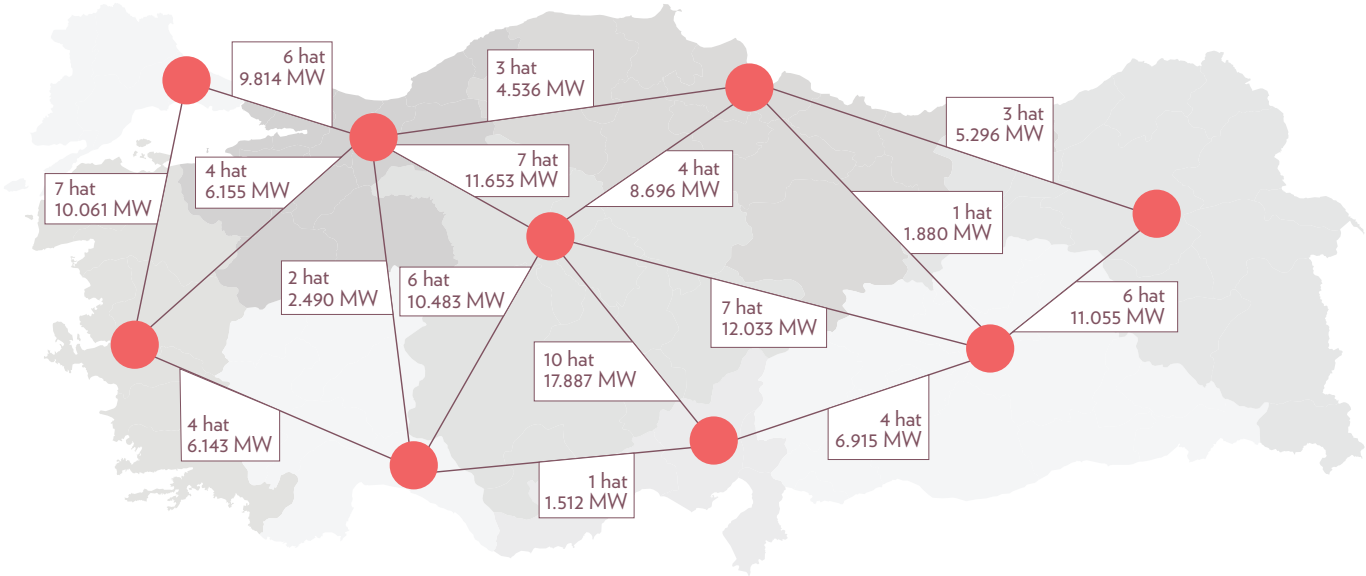
Şekil 6 TEİAŞ Yük Tevzi Merkezleri ve Uluslararası Enterkonneksiyonlar



Şekil 7 2020 yılında koridorlardaki 400 kV iletim hatları



Şekil 8 2030 yılı TEİAŞ yatırım planına göre koridorlardaki 400 kV iletim hatları



Tablo 4 2030 yılı TEİAŞ yatırım planına göre bölgelerdeki 400 kV iletim hatları

Bölge Numarası	Kapasite (GW)	Hat Sayısı
1	66,89	41
2	83,78	47
3	96,16	61
4	39,76	21
5	37,54	20
6	65,95	37
7	22,66	11
8	45,49	26
9	91,4	52

1.4. BAZ SENARYO

Baz Senaryo, Türkiye ekonomisinin ve ilgili sektörlerin, dünya ekonomisinin mevcut gidişatıyla uyumlu olarak, 1,5°C için Net Sıfır hedefine uygun eylemler izlenmemesi halinde 2050'ye kadar izleyeceği öngörülen patikadır.

Elektrik sektörü için 2025 yılından başlayarak 2050 yılına kadar 5'er yıllık aralıklarla baz senaryoda gerçekleşecek dönüşümün unsurları ele alınmıştır.

Bu senaryoda şebeke esnekliği için çeşitli varsayımlar yapılmıştır:

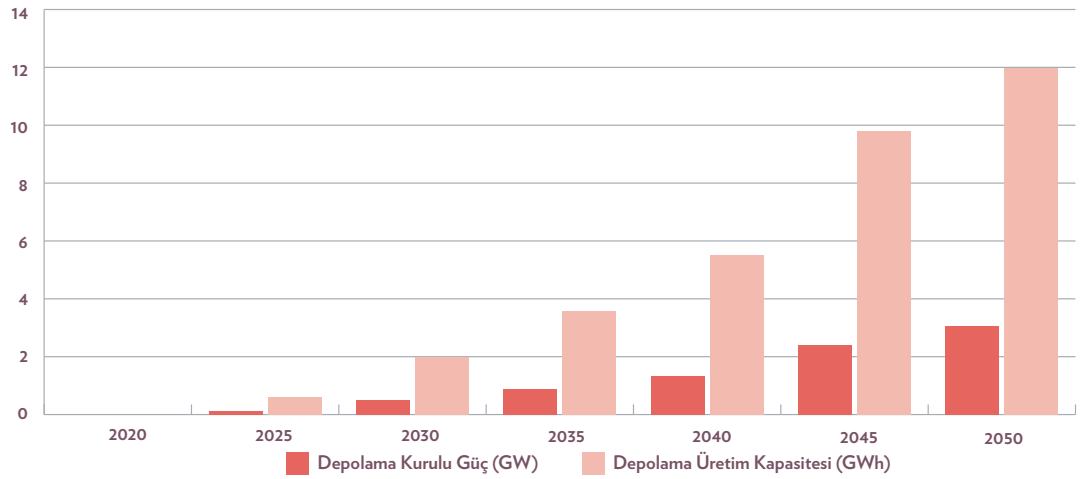
Depolama Sistemleri

Mevcut sistemde bulunmayan depolama sistemlerinin (pompajlı HES ve batarya depolama) 2025'ten itibaren küçük ölçekte devreye girmeye başlayacağı, 2030'a kadar yine 260 MW kadar küçük ölçekte kalacağı, ancak daha sonra artmaya başlayacağı ve 2050'de 3 GW'ye ulaşacağı öngörülmektedir. Depolama sistemlerinin kurulu güç ve üretim kapasitesi olarak gelişimi Tablo 5 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.

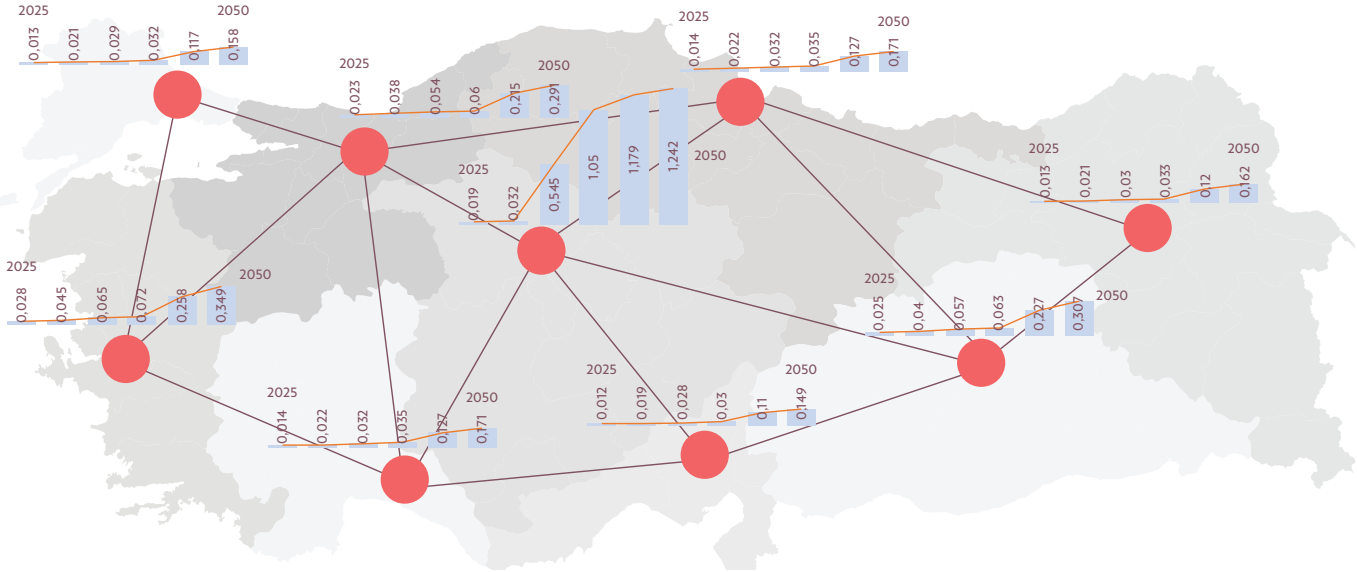
Tablo 5 Baz senaryoda depolamanın kurulu güç ve üretim kapasitesi olarak gelişimi

	Depolama Kurulu Güç (GW)	Depolama Üretim Kapasitesi (GWh)
2020	-	-
2025	0,1	0,63
2030	0,26	1,04
2035	0,91	3,65
2040	1,41	5,63
2045	2,48	9,91
2050	3	12

Şekil 9 Baz senaryoda depolamanın kurulu güç ve üretim kapasitesi olarak gelişimi



Şekil 10 Baz Senaryoda depolama sistemi kurulu gücünün bölgelere göre dağılımı ve gelişimi



Depolama sistemlerinin TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımları ve kurulu güçlerinin gelişimi Şekil 10'da sunulmuştur. Yenilenebilir enerji kurulu gücü, depolama sistemlerinin yük tevzi merkezleri arasındaki dağılımda önemli bir rol oynamıştır. Orta Anadolu yük tevzi bölgesinin yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olması ve devreye girmesi planlanan Gökçekaya pompaj depolamalı HES'in bu bölgede bulunması, depolama sistemlerinin bu bölgede daha fazla artış göstermesine neden olmuştur.

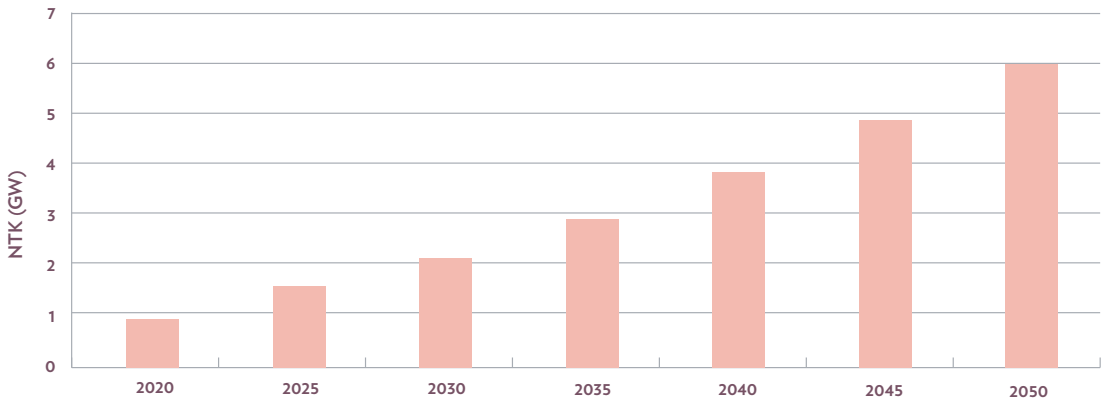
Net Transfer Kapasitesi (NTK)

Bir esneklik mekanizması olarak kullanılabilecek uluslararası enterkoneksiyon hatlarının (ENTSO-E ve Gürcistan) Net Transfer Kapasitesi'nin (NTK) 2020'de 0,96 GW iken 2030'da 2,18 GW'ye ve 2050'de 6,05 GW'ye yükselmesi öngörülmektedir (Tablo 6 ve Şekil 11). ENTSO-E ve Gürcistan enterkonneksiyonlarının Net Transfer Kapasitesinin gelişimi Şekil 12'de sunulmuştur.

Tablo 6. Baz senaryoda uluslararası enterkoneksiyon hatlarının saatlik Net Transfer Kapasitesinin (NTK) gelişimi

Yıl	Net Transfer Kapasitesi (GW)
2020	0,96
2025	1,63
2030	2,18
2035	2,97
2040	3,9
2045	4,94
2050	6,05

Şekil 11 Baz senaryoda uluslararası enterkoneksiyon hatlarının saatlik Net Transfer Kapasitesinin (NTK) gelişimi



Şekil 12 Baz senaryoda ENTSO-E ve Gürcistan enterkonneksiyonlarının Net Transfer Kapasitesinin Gelişimi



1.4.1. Kurulu Güç

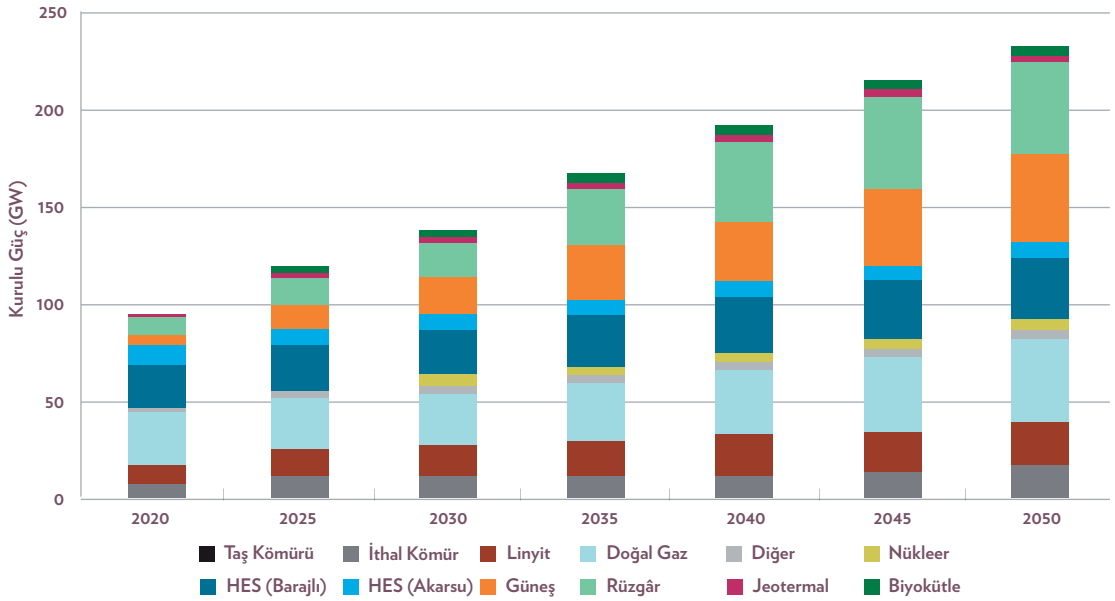
Baz Senaryoda, net sıfır hedefiyle ekstra bir politika izlenmeden, elektrik sektöründe kaynaklara göre öngörülen kurulu güç kapasitelerinin fosil yakıtlar (taş kömürü, ithal kömür, linyit, doğal gaz ve diğer fosil yakıt kaynakları), nükleer enerji, hidroelektrik santraller (barajlı ve akarsu tipi) ve modern yenilenebilir kaynaklar (güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle) için hedef yıllara göre değişimi Tablo 7 ve Şekil 13'te gösterilmiştir.

Baz Senaryoya göre elektrik sektöründe 2020'de yaklaşık 96 GW olan kurulu güç 2030'da 137 GW'ye ve 2050'de yaklaşık 2,4 kat artarak 232 GW'ye yükselmektedir. Baz Senaryoda yıllar içinde fosil yakıtların kurulu güç içindeki payı azalmakla birlikte 2050'ye kadar üçte bir seviyesinin üzerinde kalırken modern yenilenebilir kaynaklar artmakta ve kurulu güç içindeki payları 2020'de %19 iken 2030'da %31'e ve 2050'de %43'e çıkmaktadır.

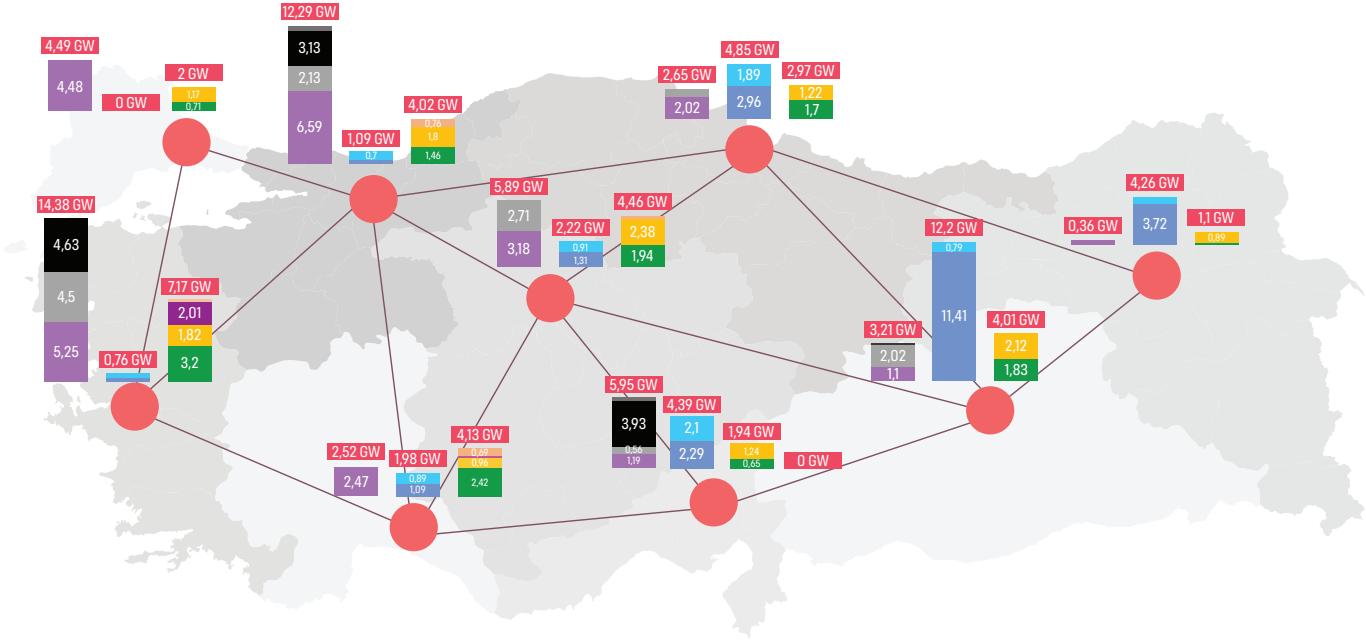
Tablo 7. Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Nükleer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biokütle	Toplam
2020	0,7	8,9	9,5	25,6	1,6		23	8,2	6,9	8,6	1,5	1,1	95,6
2025	0,8	11,7	12,8	26,6	2,8		23,5	8,2	13,6	14,1	2	2,2	118,5
2030	**0,9**	**11,7**	**14,9**	**27,1**	**3,6**	**4,8**	**23,5**	**8,2**	**18,9**	**18,2**	**2,4**	**3**	**137,3**
2035	1	11,5	17,1	29,8	4,1	4,8	25,5	8,2	28,1	28,9	3	4,5	166,5
2040	1	11,5	21,3	32,3	4,7	4,8	27,5	8,2	30,4	42,2	3	5	191,9
2045	1	12,9	21,2	37,3	4,9	4,8	29,5	8,2	38,8	48	2,8	4,9	214,4
2050	**1**	**16,7**	**21,2**	**43,2**	**5**	**4,8**	**31,5**	**8,2**	**44,6**	**48**	**2,8**	**4,8**	**231,8**

Şekil 13 Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)



Şekil 14 Baz Senaryo: 2025 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (GW) | Linyit (GW) | İthal Kömür (GW) | Taş Kömürü (GW)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (GW) | HES (Akarsu) (GW)

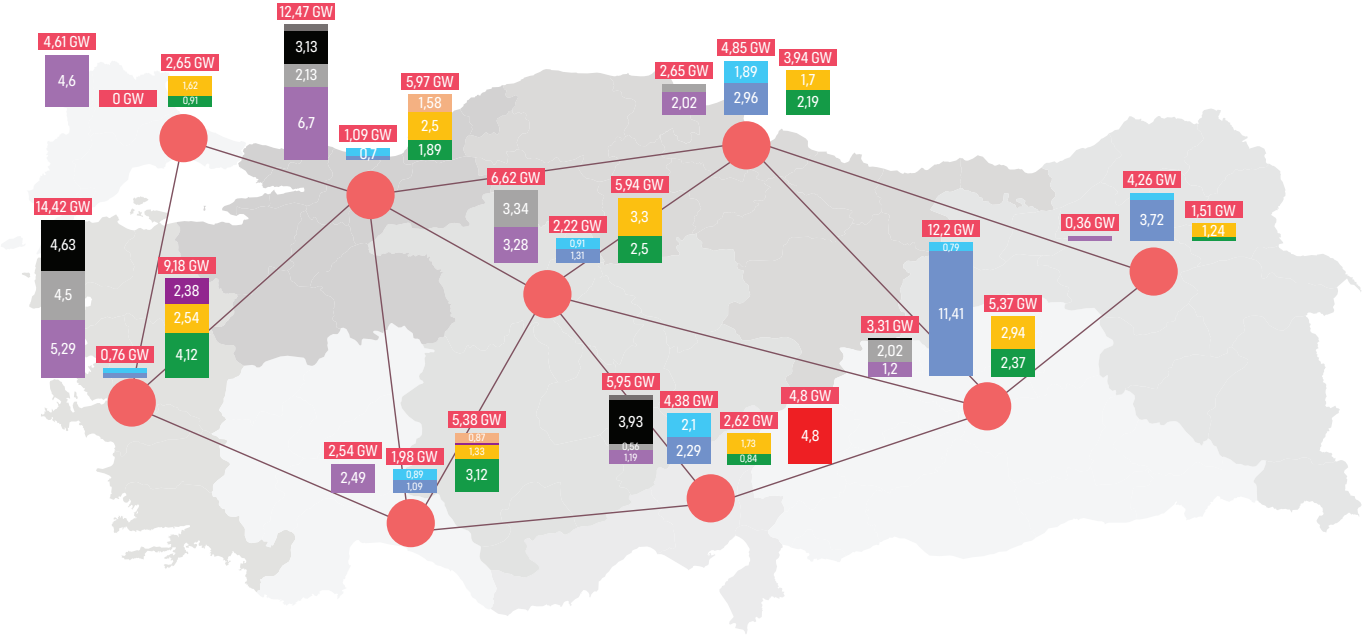
Rüzgar (GW) | Güneş (GW) | Jeotermal (GW) | Biyokütle (GW)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (GW)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 15 Baz Senaryo: 2030 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (GW) | Linyit (GW) | İthal Kömür (GW) | Taş Kömürü (GW)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (GW) | HES (Akarsu) (GW)

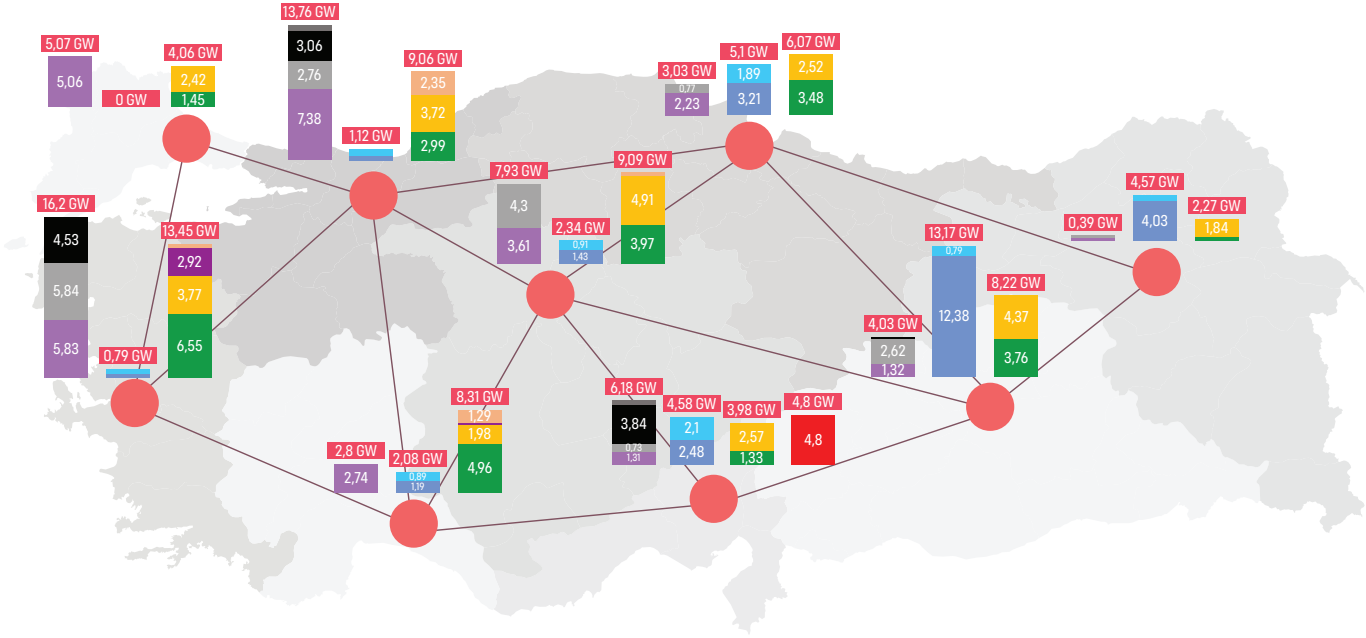
Rüzgar (GW) | Güneş (GW) | Jeotermal (GW) | Biyokütle (GW)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (GW)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 16 Baz Senaryo: 2035 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (GW) | Linyit (GW) | İthal Kömür (GW) | Taş Kömürü (GW)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (GW) | HES (Akarsu) (GW)

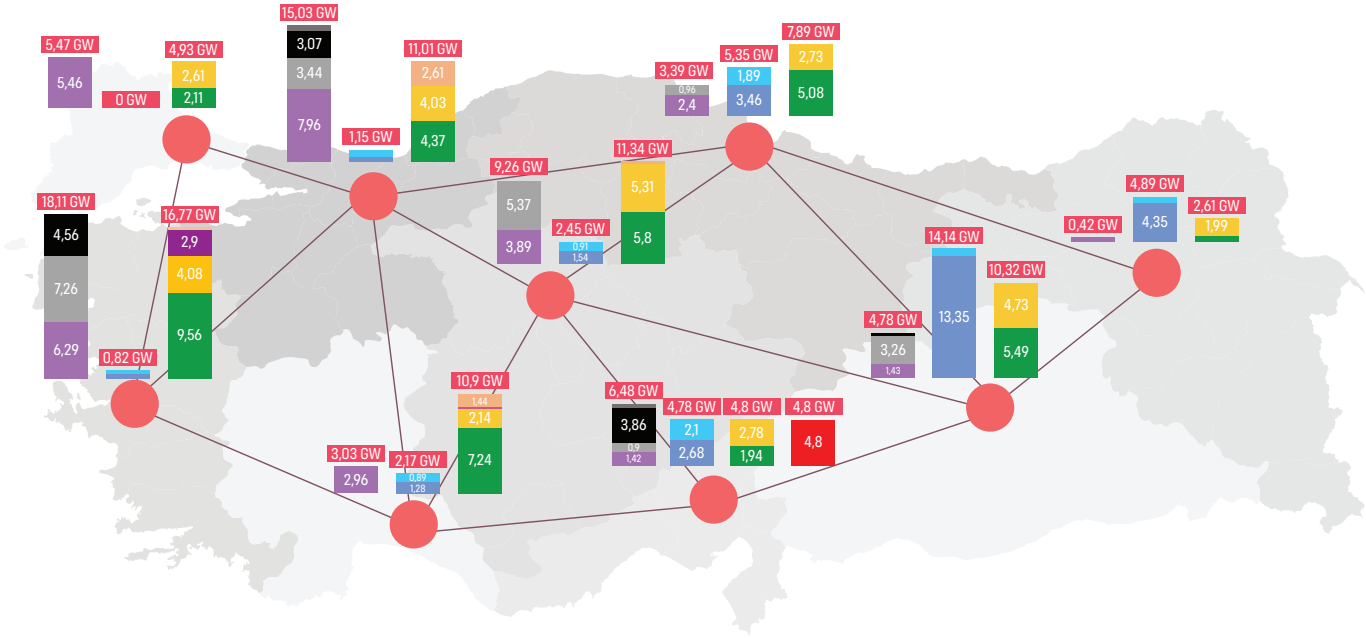
Rüzgar (GW) | Güneş (GW) | Jeotermal (GW) | Biyokütle (GW)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (GW)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 17 Baz Senaryo 2040 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (GW) | Linyit (GW) | İthal Kömür (GW) | Taş Kömürü (GW)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (GW) | HES (Akarsu) (GW)

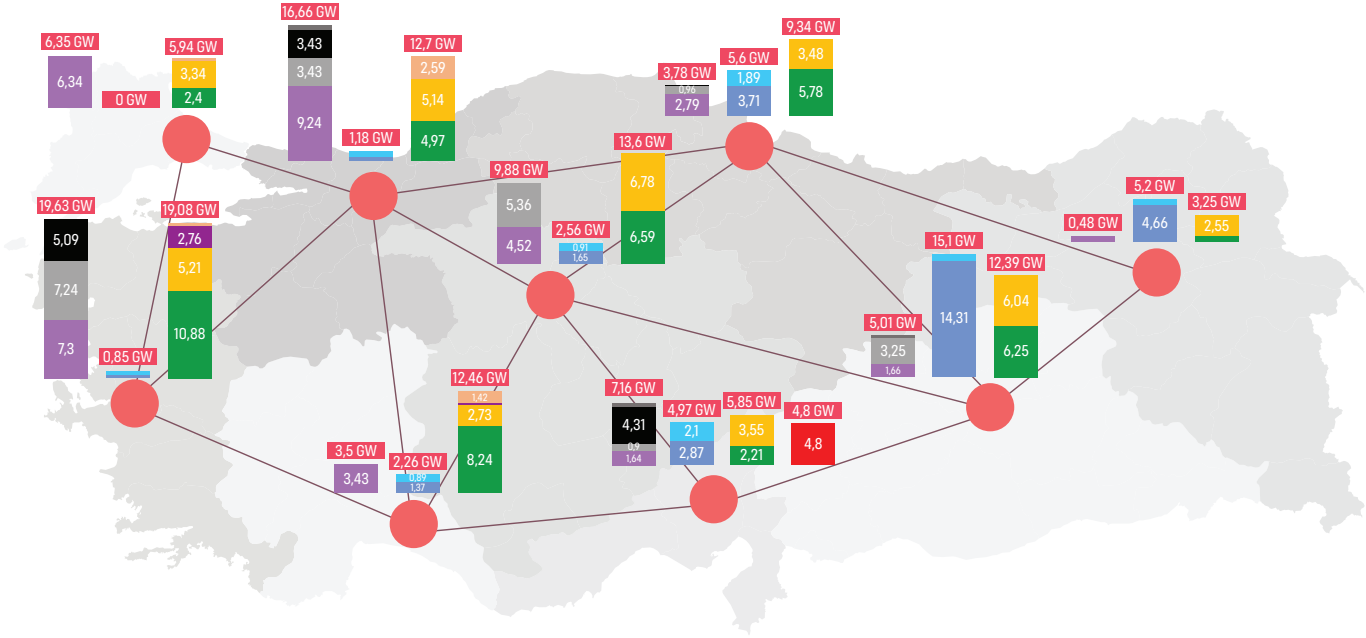
Rüzgar (GW) | Güneş (GW) | Jeotermal (GW) | Biyokütle (GW)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (GW)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 18 Baz Senaryo: 2045 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (GW) | Linyit (GW) | İthal Kömür (GW) | Taş Kömürü (GW)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (GW) | HES (Akarsu) (GW)

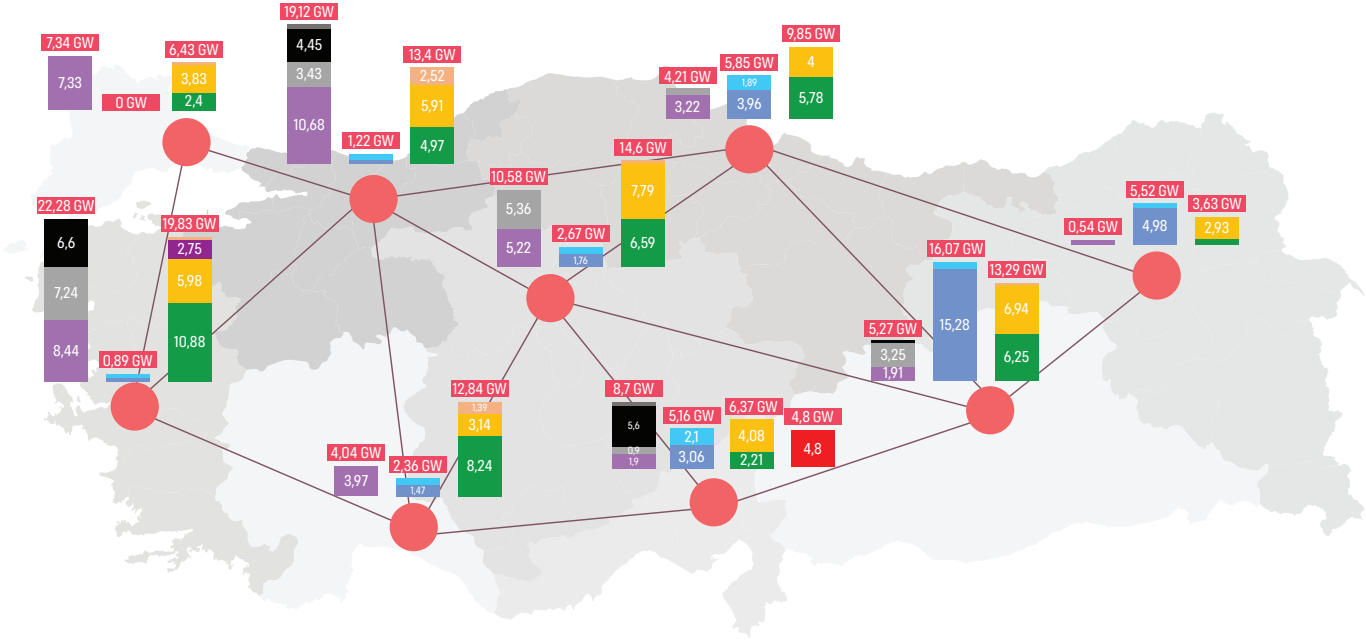
Rüzgar (GW) | Güneş (GW) | Jeotermal (GW) | Biyokütle (GW)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (GW)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 19 Baz Senaryo: 2050 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (GW) | Linyit (GW) | İthal Kömür (GW) | Taş Kömürü (GW)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (GW) | HES (Akarsu) (GW)

Rüzgar (GW) | Güneş (GW) | Jeotermal (GW) | Biyokütle (GW)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (GW)

4. Sütun / Nükleer Enerji

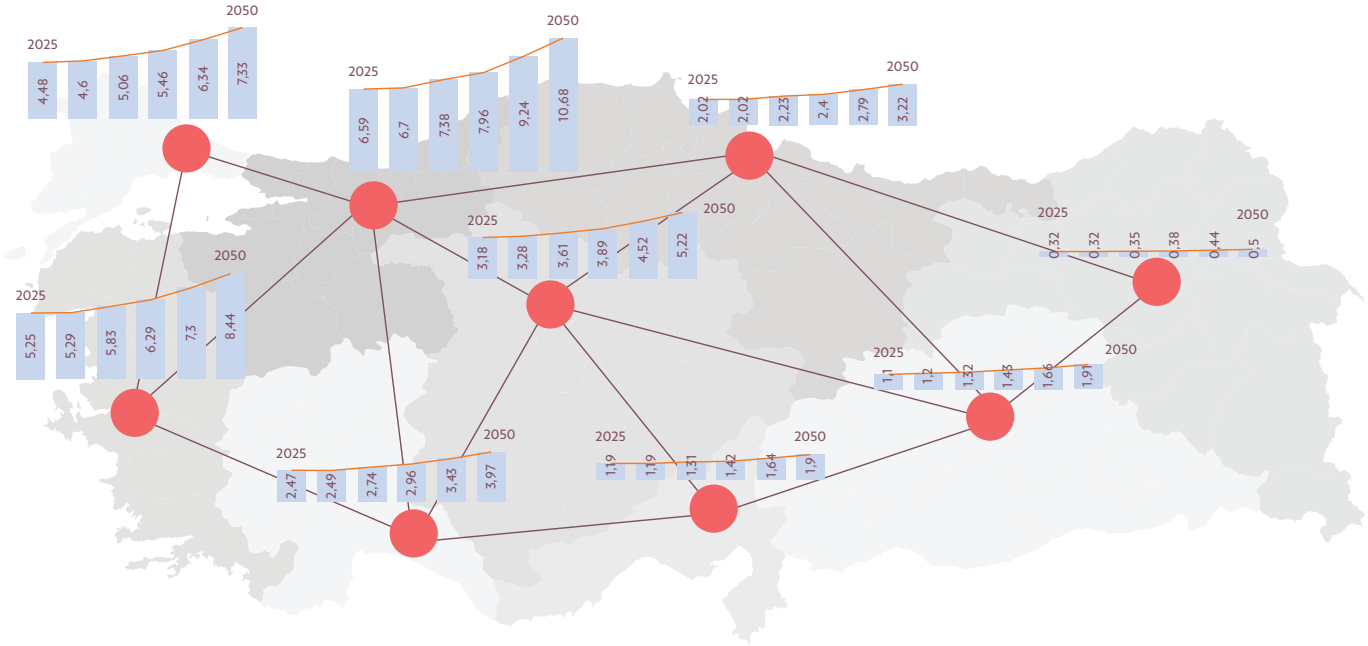
HES'lerin kurulu gücü ufak bir artış gösterirken 2020'de %33 olan kurulu güçteki payı yıllar içinde düşerek 2050'de %17 seviyesine gelmektedir. Nükleer enerji ise 2030'lara doğru sisteme katılmakta ve kurulu güçteki payı başlangıçta %3,5 iken 2050'de %2,1'e, 2070'te %1,6'ya inmektedir.

Üretim teknolojilerinin kurulu kapasitelerindeki değişimler için temel yaklaşım, doğal gaz ve yenilenebilir enerji kaynakları için şebeke odaklı yaklaşım, linyit ve hidroelektrik üniteleri için ise kaynak odaklı yaklaşımdır. Muhtelif yıllarda kurulu gücün TEİAŞ yük tevzi bölgelerine göre dağılımı ise Şekil 14 - Şekil 19 arasında verilmiştir.

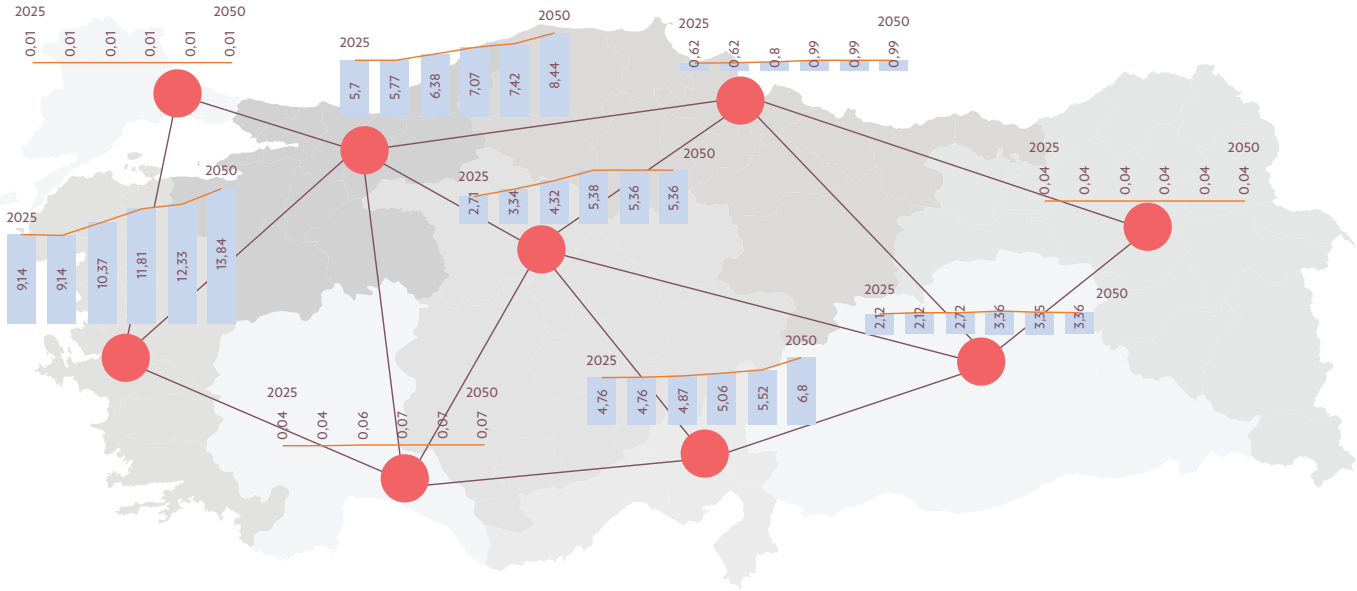
Baz Senaryoda yıllara göre doğal gaz, toplam kömür (taş kömürü, ithal kömür ve linyit) ve toplam yenilenebilir (rüzgâr, güneş, biyokütle ve jeotermal) kurulu güçlerindeki değişim sırasıyla Şekil 20, Şekil 21 ve Şekil 22'de gösterilmiştir.

Baz Senaryoda muhtelif yıllardaki yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçleri ise Şekil 23 - Şekil 28 arasında gösterilmiştir.

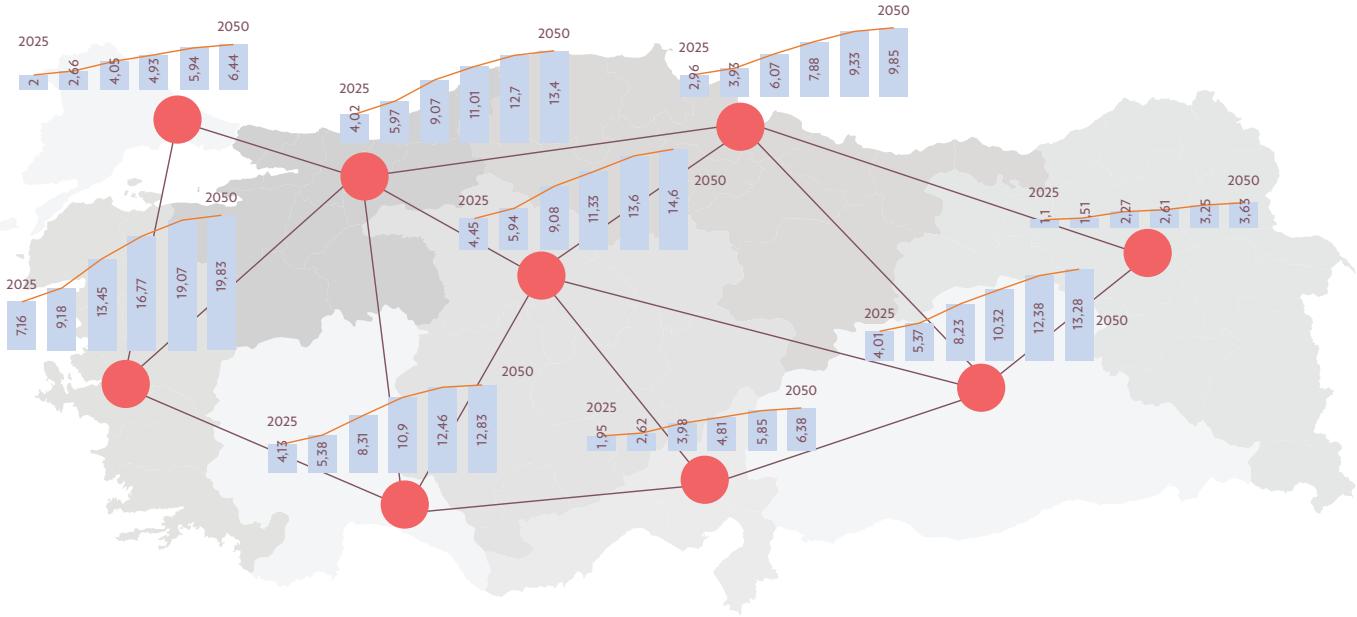
Şekil 20 Baz Senaryoda TEİAŞ Yük Tevzi Merkezlerinde doğal gaz kurulu gücünün yıllara göre değişimi



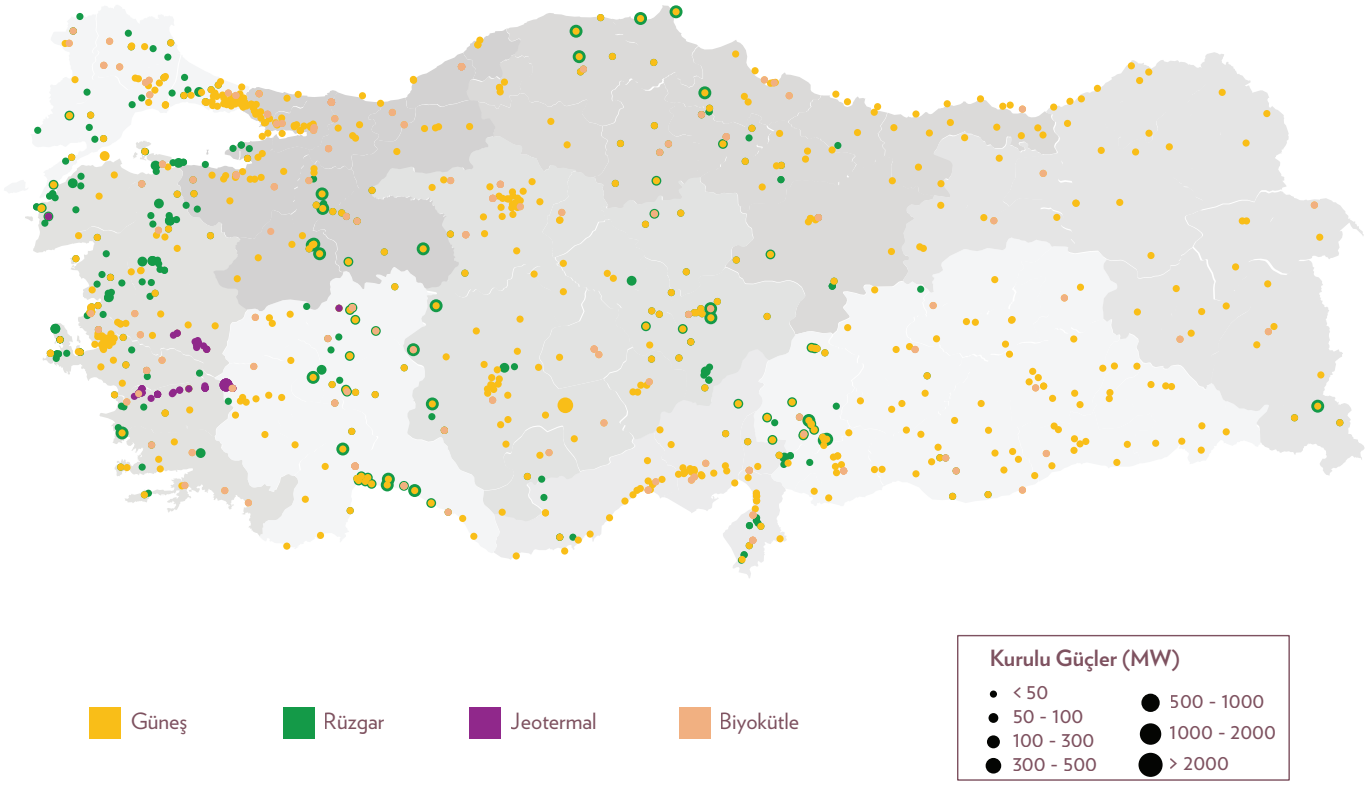
Şekil 21 Baz Senaryoda TEİAŞ Yük Tevzi Merkezlerinde toplam kömür kurulu gücünün yıllara göre değişimi



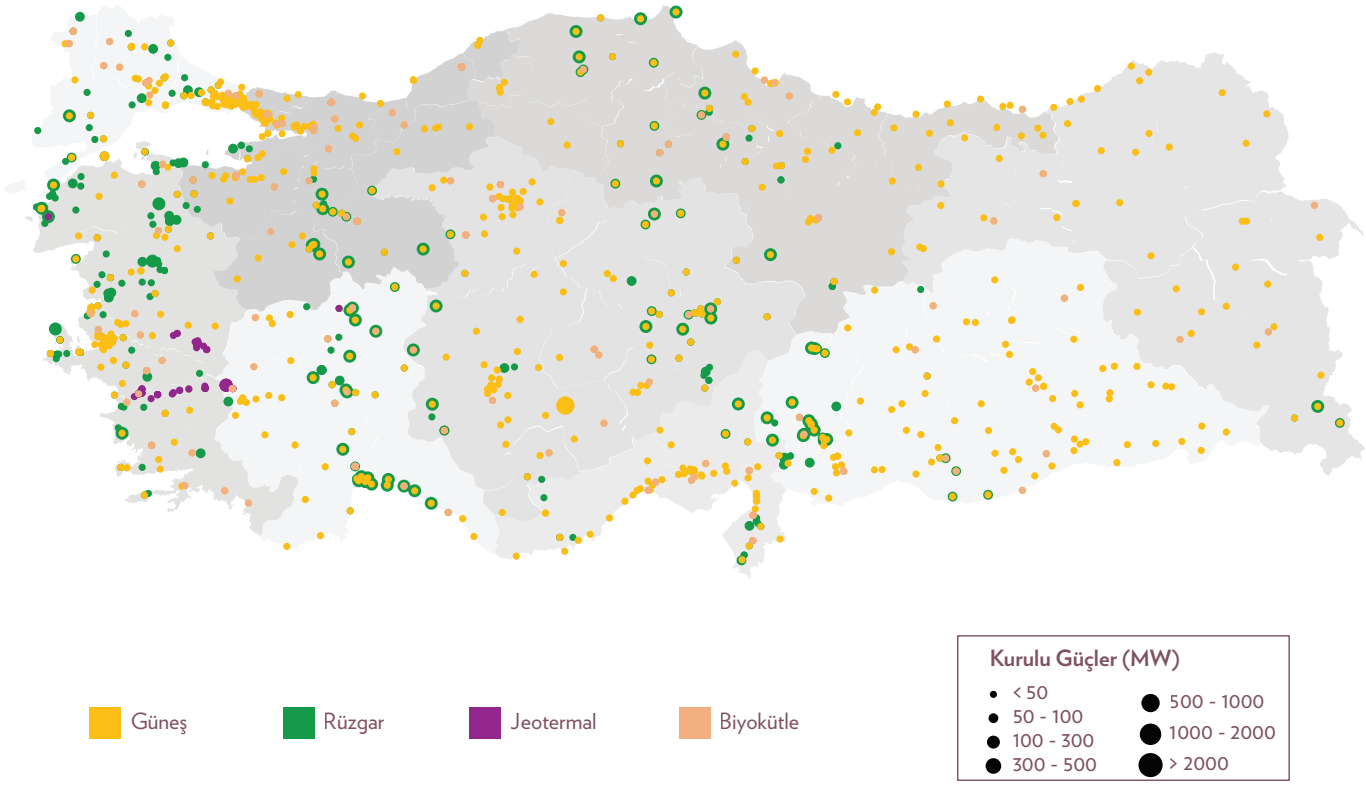
Şekil 22 Baz Senaryoda TEİAŞ Yük Tevzi Merkezlerinde toplam yenilenebilir kurulu gücünün yıllara göre değişimi



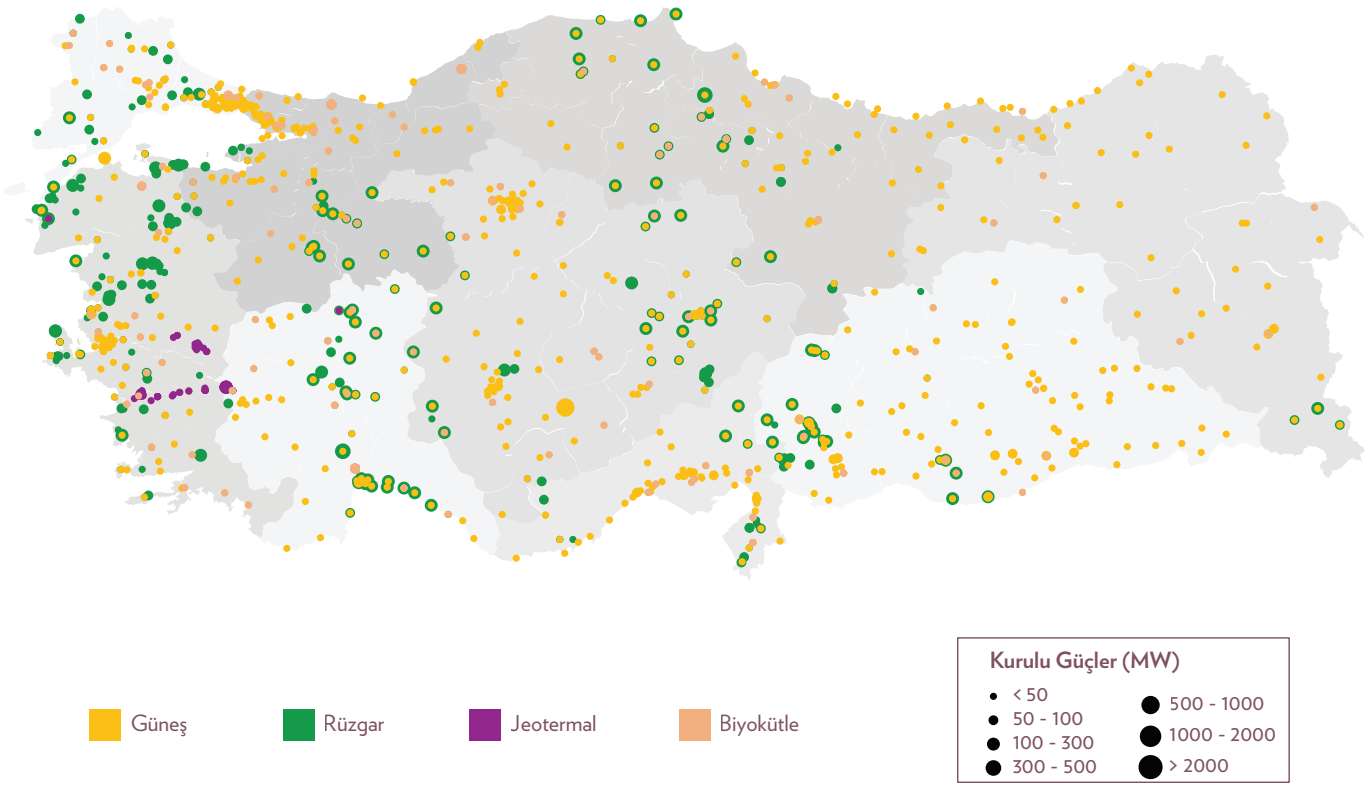
Şekil 23 Baz Senaryo 2025 yılı yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçleri



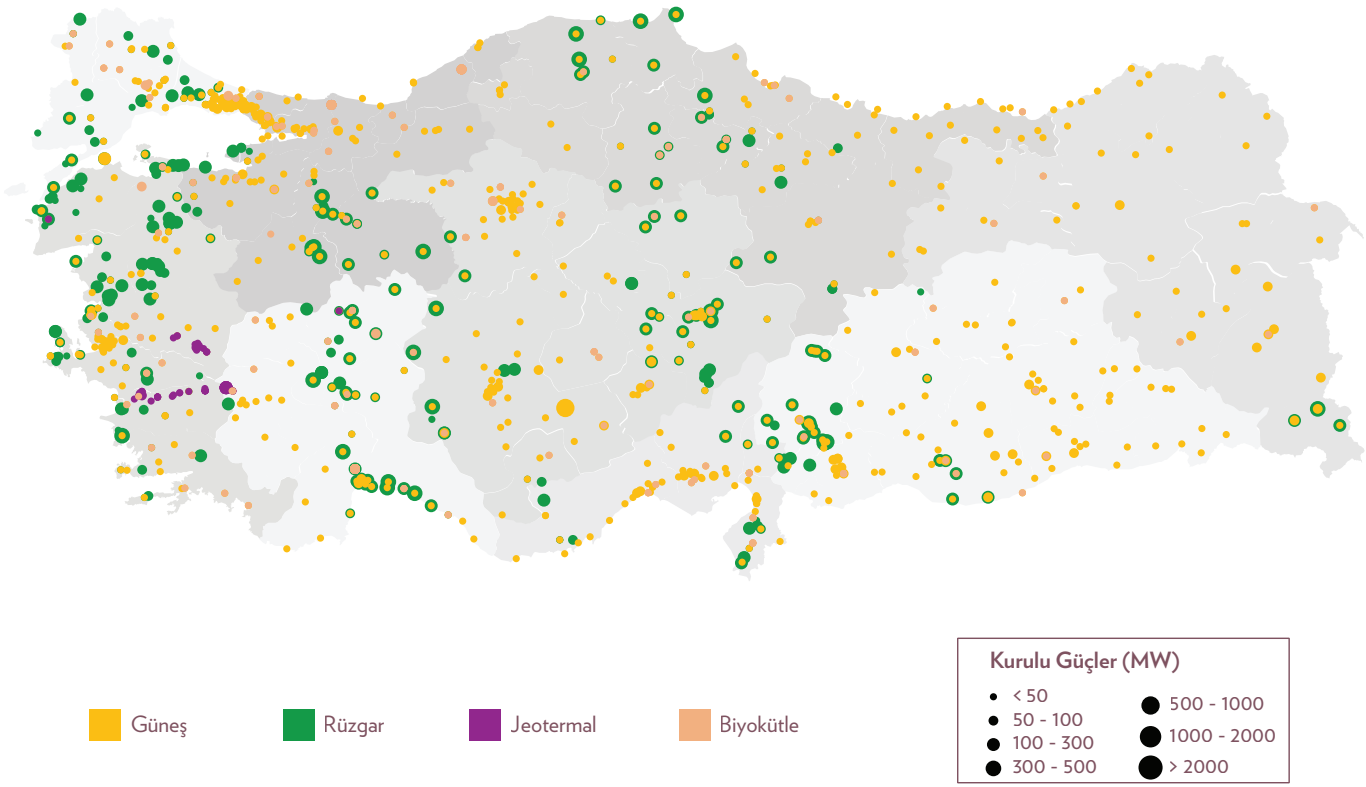
Şekil 24 Baz Senaryo 2030 yılı yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçleri



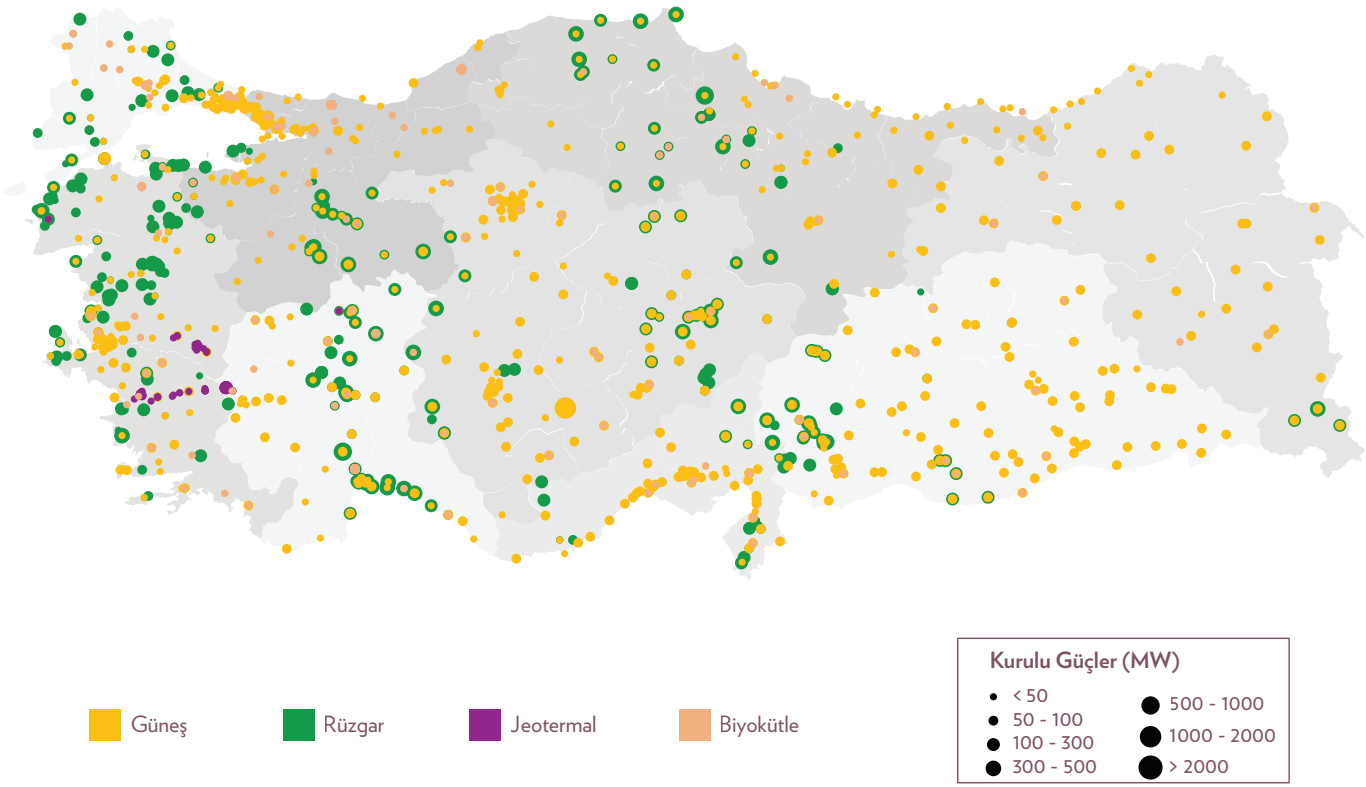
Şekil 25 Baz Senaryo 2035 yılı yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçler



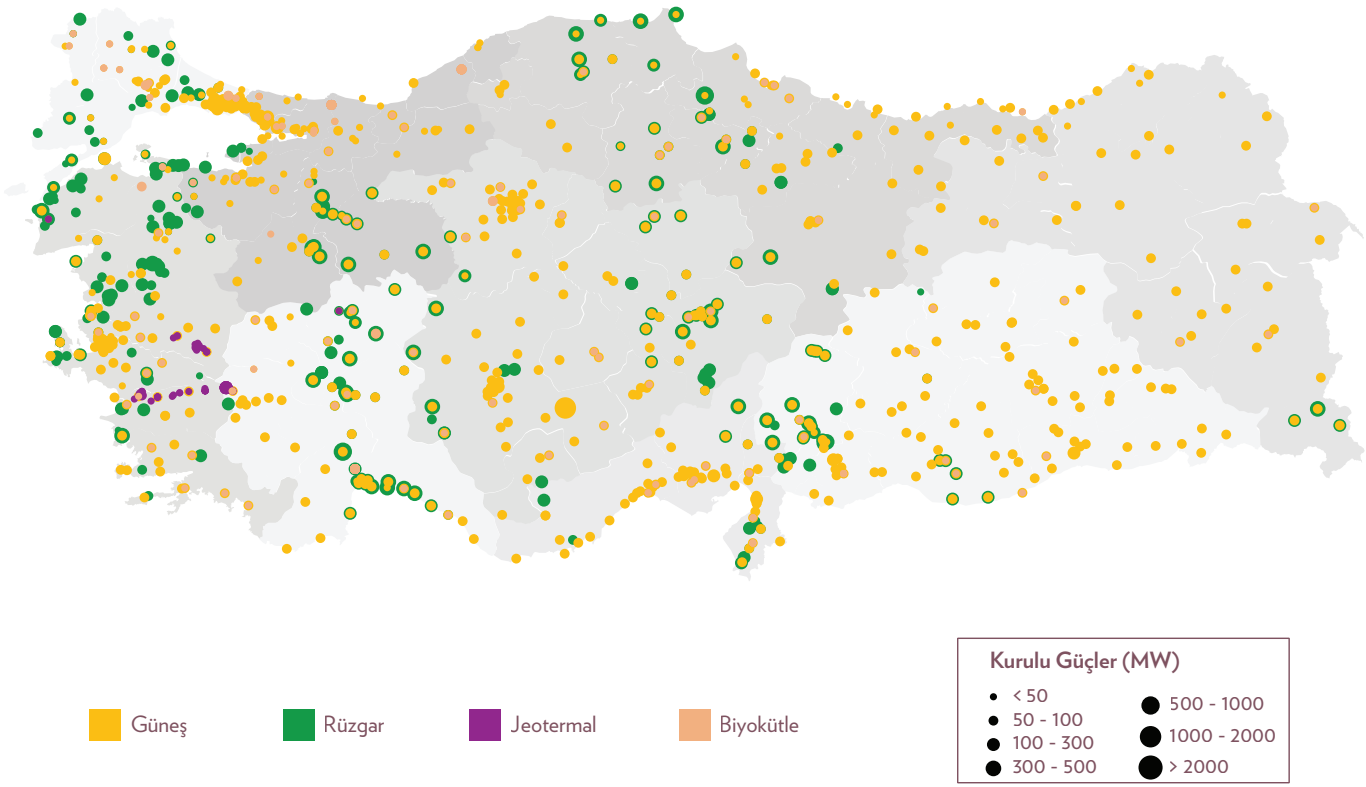
Şekil 26 Baz Senaryo 2040 yılı yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçler



Şekil 27 Baz Senaryo 2045 yılı yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçler



Şekil 28 Baz Senaryo 2050 yılı yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçleri



Her bir yıl için belirlenen kurulu güç ve şebeke modeli kullanılarak piyasa ve şebeke simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonların sonuçları kullanılarak hedef yıllarda üretimin kaynaklarına göre dağılımı, Yük Al/Yük At (YAL/YAT) talimat miktarları, yenilenebilir enerji üretimdeki kesinti miktarı ve şebeke yatırım gereksinimleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile yukarıda verilen emisyon katsayıları kullanılarak toplam karbondioksit emisyon miktarları hesaplanmıştır ve raporun devamında detaylandırılmıştır.

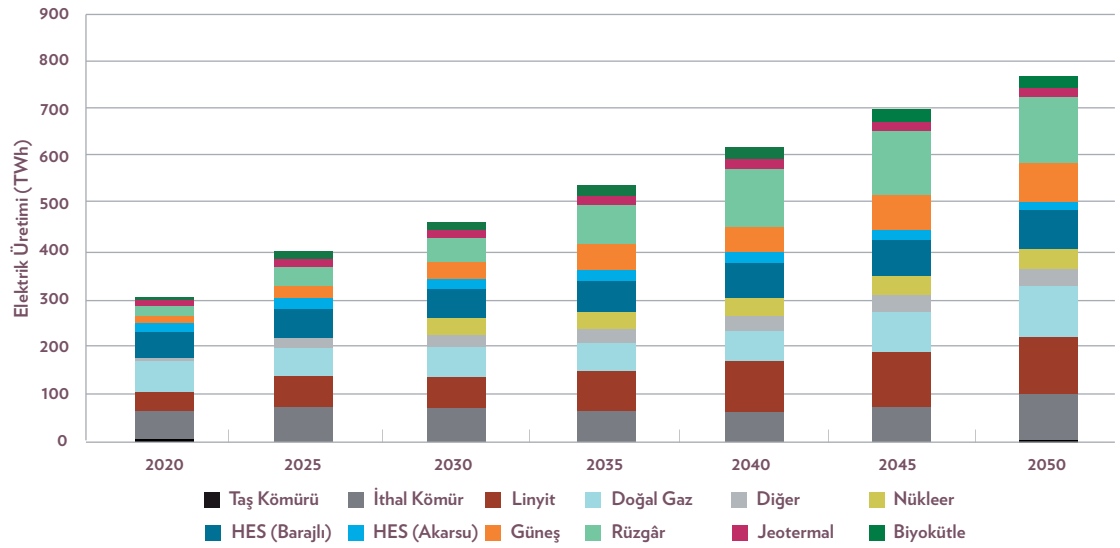
1.4.2. Kaynaklara Göre Enerji Üretimi

Baz senaryoda muhtelif yıllarda kaynaklara göre üretimin dağılımı Tablo 8 ve Şekil 29'da verilmiştir. Bu sonuçlar, yapılan piyasa simülasyonlarının sonuçlarını dikkate alarak, şebekedeki darboğazları giderme amacıyla YAL/YAT talimatlarının verildiği şebeke simülasyonlarının sonucudur. Dolayısıyla, şebeke kısıtlarının gözetildiği şebeke simülasyonlarındaki üretimin kaynaklara göre dağılımı, piyasa simülasyonlarına göre değişim göstermektedir.

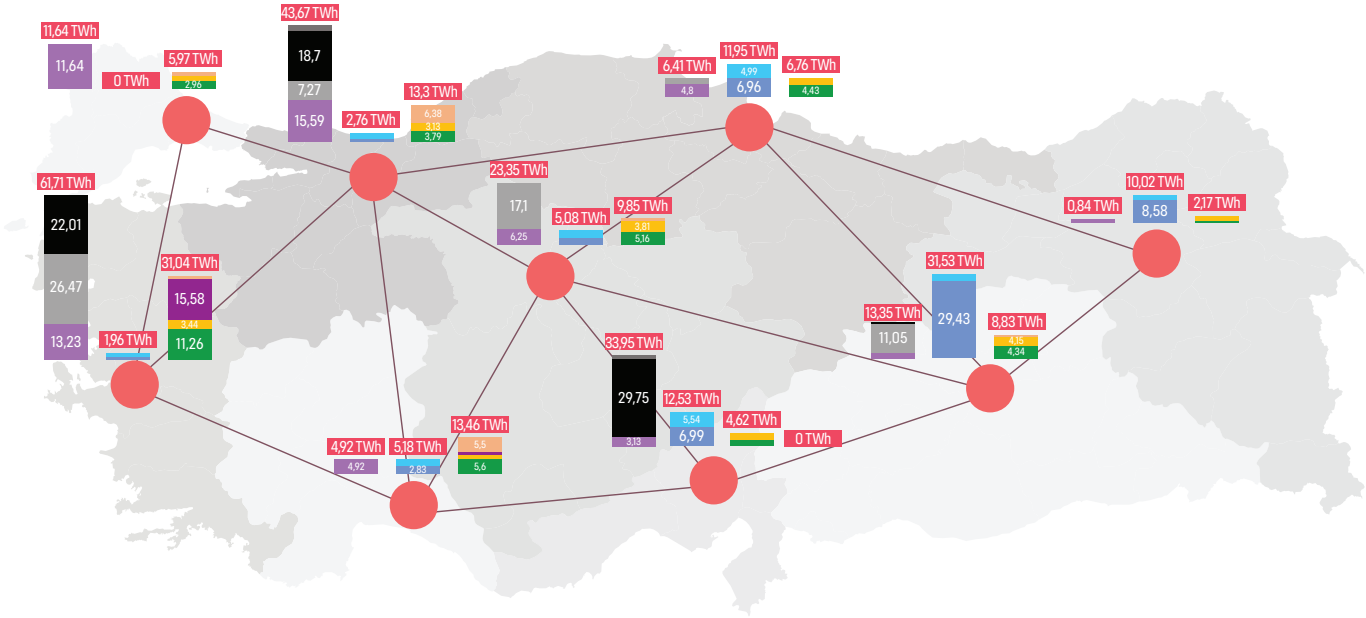
Tablo 8. Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin dağılımı (GWh)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Nükleer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biokütle	Toplam
2020	4.110	60.090	39.850	68.400	2.463	0	55.810	21.010	11.530	23.790	10.690	4.279	302.022
2025	3.530	70.630	63.510	62.180	20.600	0	59.330	21.680	24.700	39.930	16.090	15.290	397.470
2030	**3.550**	**68.960**	**65.560**	**58.290**	**26.240**	**37.920**	**61.400**	**20.500**	**34.330**	**51.540**	**17.620**	**14.690**	**460.600**
2035	3.480	63.810	80.630	58.160	30.390	37.470	66.480	21.680	50.960	81.810	21.530	22.700	539.100
2040	3.320	62.900	105.530	60.280	34.800	37.500	71.670	21.680	55.130	119.460	21.270	25.360	618.900
2045	3.700	72.800	112.620	84.010	35.880	37.510	76.720	21.680	70.330	135.850	20.270	25.310	696.680
2050	**3.980**	**96.920**	**121.070**	**106.820**	**36.690**	**37.540**	**81.770**	**21.680**	**80.790**	**135.790**	**20.390**	**25.040**	**768.480**

Şekil 29 Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin dağılımı (TWh)



Şekil 30 Baz Senaryo: 2025 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (TWh) | Linyit (TWh) | İthal Kömür (TWh) | Taş Kömürü (TWh)

Rüzgar (TWh) | Güneş (TWh) | Jeotermal (TWh) | Biyokütle (TWh)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

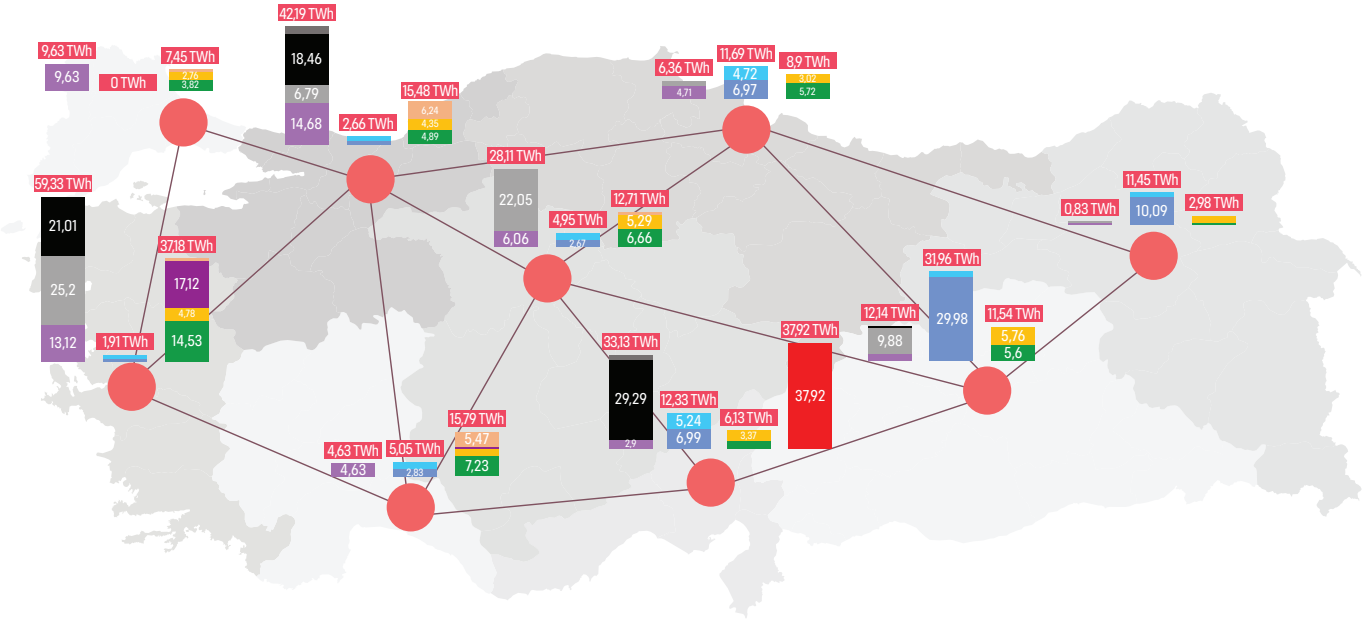
HES (Barajlı) (TWh) | HES (Akarsu) (TWh)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (TWh)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 31 Baz Senaryo: 2030 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (TWh) | Linyit (TWh) | İthal Kömür (TWh) | Taş Kömürü (TWh)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (TWh) | HES (Akarsu) (TWh)

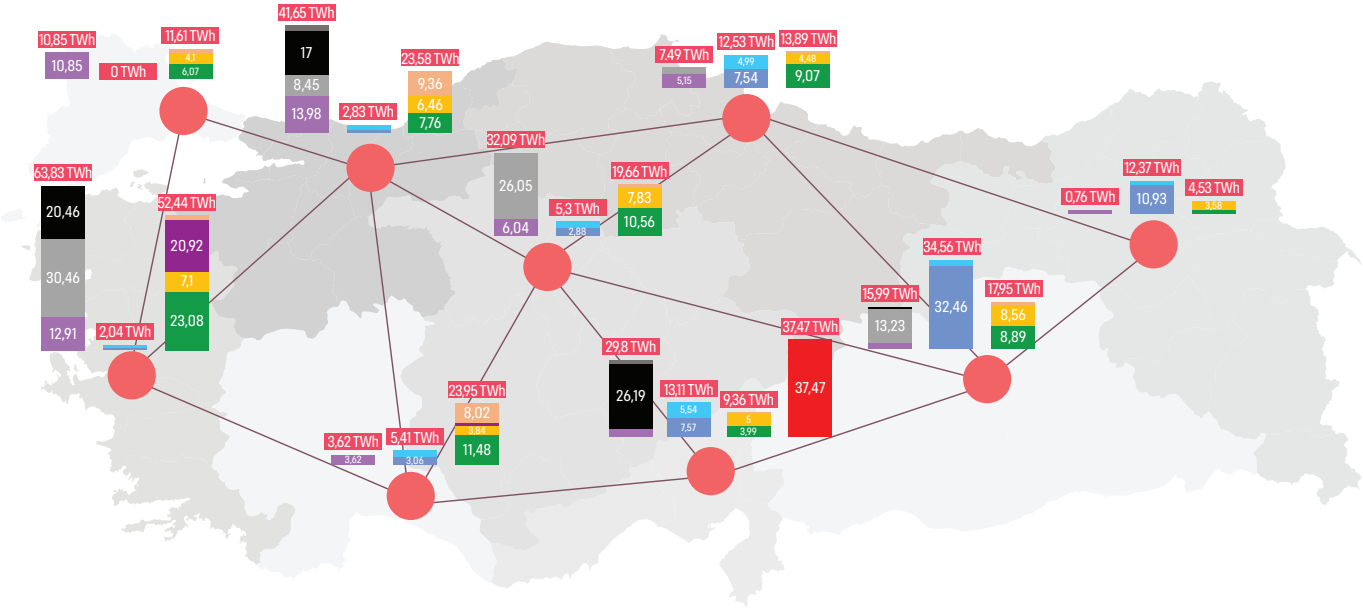
Rüzgar (TWh) | Güneş (TWh) | Jeotermal (TWh) | Biyokütle (TWh)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (TWh)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 32 Baz Senaryo: 2035 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (TWh) | Linyit (TWh) | İthal Kömür (TWh) | Taş Kömürü (TWh)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (TWh) | HES (Akarsu) (TWh)

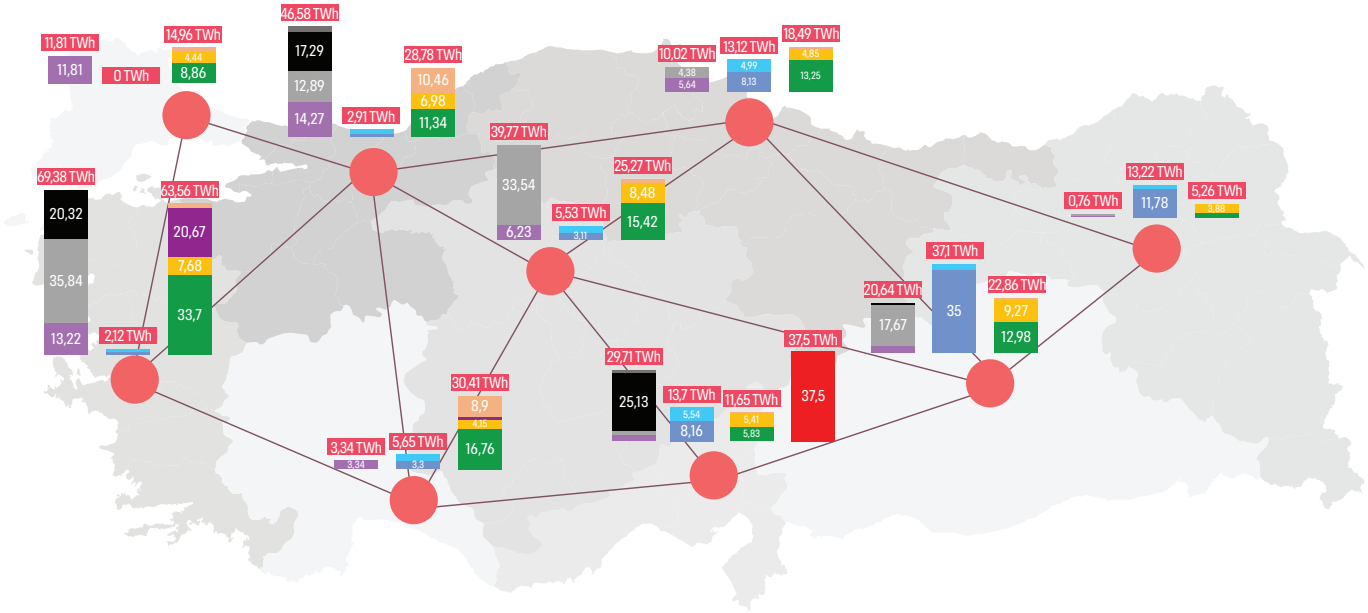
Rüzgar (TWh) | Güneş (TWh) | Jeotermal (TWh) | Biyokütle (TWh)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (TWh)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 33 Baz Senaryo: 2040 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (TWh) | Linyit (TWh) | İthal Kömür (TWh) | Taş Kömürü (TWh)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (TWh) | HES (Akarsu) (TWh)

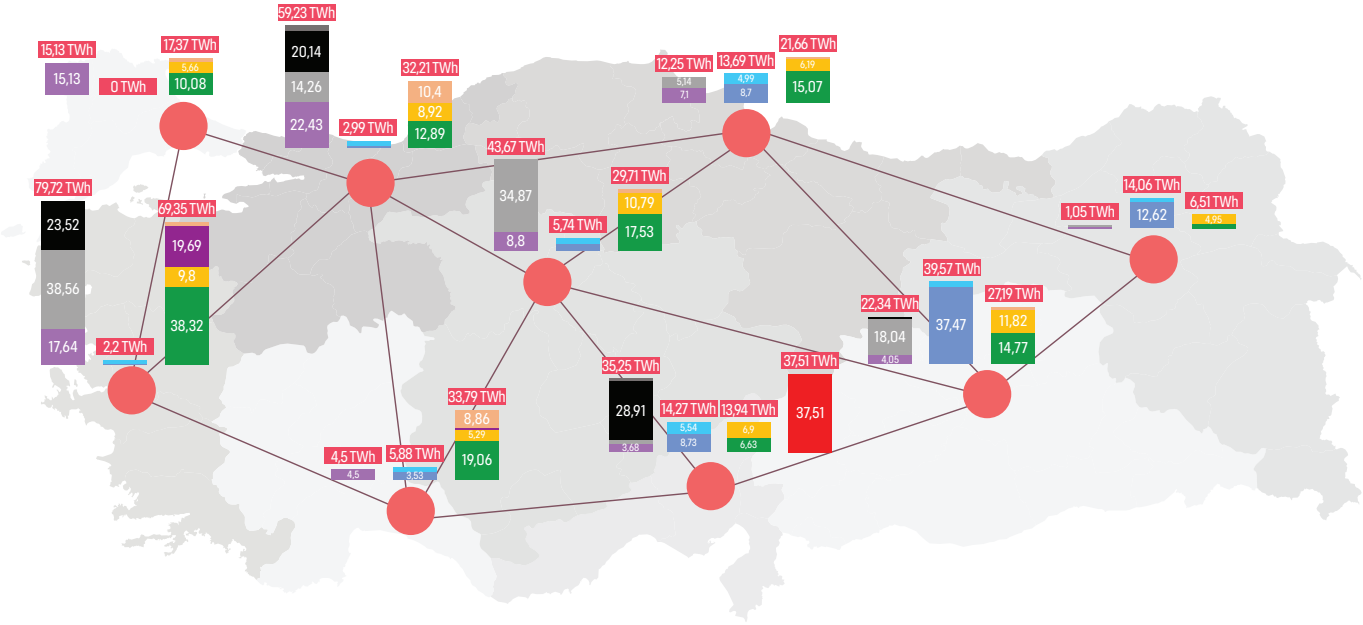
Rüzgar (TWh) | Güneş (TWh) | Jeotermal (TWh) | Biyokütle (TWh)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (TWh)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 34 Baz Senaryo: 2045 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (TWh) | Linyit (TWh) | İthal Kömür (TWh) | Taş Kömürü (TWh)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (TWh) | HES (Akarsu) (TWh)

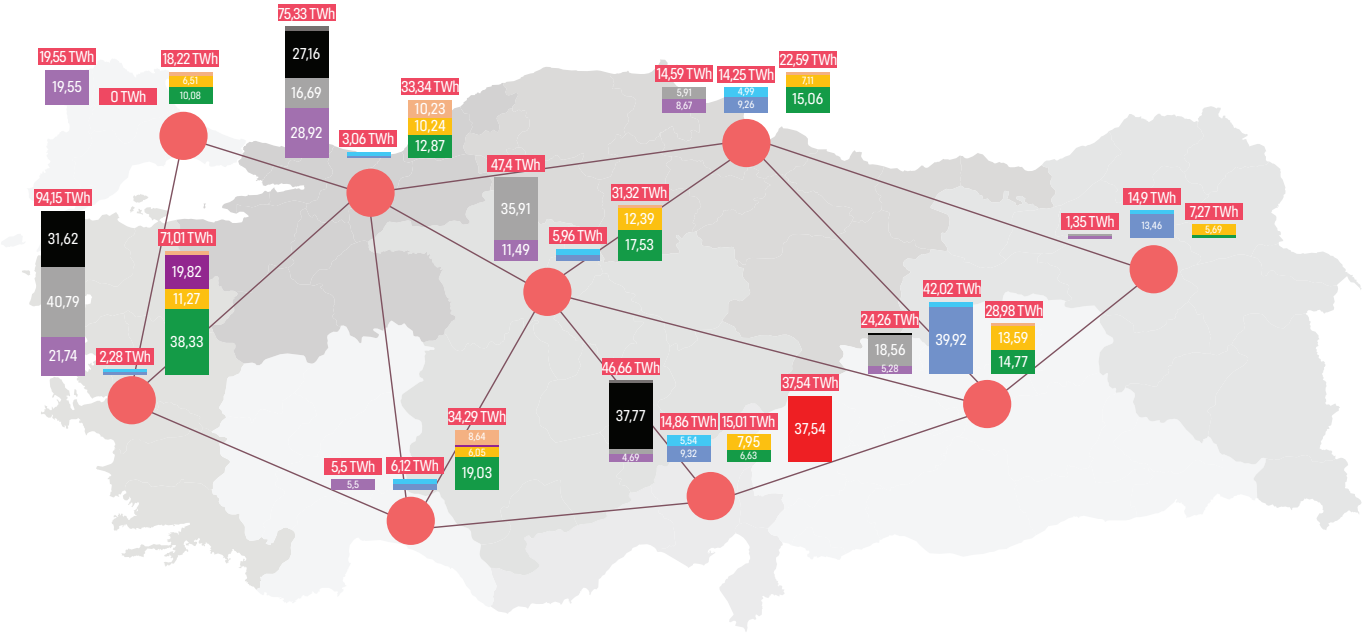
Rüzgar (TWh) | Güneş (TWh) | Jeotermal (TWh) | Biyokütle (TWh)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (TWh)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 35 Baz Senaryo: 2050 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (TWh) | Linyit (TWh) | İthal Kömür (TWh) | Taş Kömürü (TWh)

Rüzgar (TWh) | Güneş (TWh) | Jeotermal (TWh) | Biyokütle (TWh)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (TWh) | HES (Akarsu) (TWh)

Nükleer (TWh)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

4. Sütun / Nükleer Enerji

2020'de 302 TWh olan elektrik üretimi 1,5 kat artarak 2030'da 460,6 TWh'ye ve 2050'de 2,5 kat artarak 768.5 TWh'ye yükselmektedir. Fosil yakıtların 2020'de %57 düzeyinde olan üretimdeki payı ise 2050'de %43'e gerilemektedir. HES'lerin 2020'de %25 olan üretimdeki payı yıllar içinde azalarak 2050'de, %13,5 seviyesine gelmektedir. Modern yenilenebilir kaynakların üretimdeki payı ise kurulu güç artışına göre daha sınırlı kalmakta ve 2020'de %17 olan üretimdeki payı, 2025'te %24, 2030'da %26, 2035'te %33, 2040'ta %35,7 ve 2045'te %36 seviyesine kadar yükselirken, 2050'de bir miktar azalarak %34 seviyesine düşmüştür. 2030'da devreye giren Akkuyu Nükleer Santrali'nin üretimdeki payı ise 2030'da %8,2 seviyesinde başlayıp yıllar içinde azalarak 2050'de %5 seviyesine kadar düşmüştür.

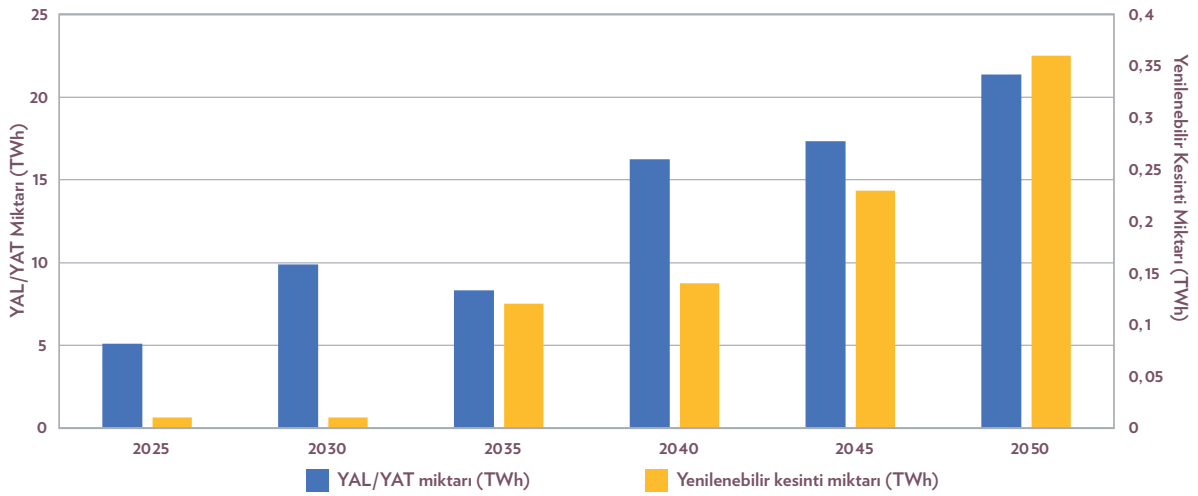
Baz senaryoda muhtelif yıllarda elektrik enerjisi üretiminin TEİAŞ bölgelerinde üretim teknolojisi bazlı dağılımları Şekil 30 - Şekil 35 arasında gösterilmiştir.

1.4.3. YAL/YAT ve Yenilenebilir Kesinti Miktarı

Piyasa simülasyonları şebeke topolojisi ve kısıtları göz önüne alınmadan minimum maliyetin hedeflendiği; şebeke simülasyonları ise piyasa simülasyonundaki üretimde, şebeke kısıtları göz önüne alınarak hızlı tepki verebilen santrallere gereksinime göre yük alma ve yük veya yük atma talimatlarının verildiği bir çalışmadır. Böylece enerji tüketimi ve üretimi arasındaki dengesizlikler giderilir ve enerji sisteminin güvenilir ve istikrarlı bir şekilde çalışması sağlanır. Ayrıca yenilenebilir enerji üretiminin fazla olup sistemi darboğaza soktuğu durumlarda yenilenebilir üretimi kısıtlanabilir. Bu durumlar sistemin daha stabil işletilmesi için talimatlar gerekli olsa da işletme maliyetini artıran faktörlerdir.

Baz Senaryoda muhtelif yıllarda toplam YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarı Şekil 36 ve Tablo 9'da gösterilmiştir.

Şekil 36 Baz Senaryo YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarları



Şebekedeki enerji tüketimi arttıkça YAL/YAT miktarı ve yenilenebilir üretim arttıkça yenilenebilir üretimdeki kesinti miktarı artmaktadır. YAL/YAT miktarının toplam tüketime oranı ve yenilenebilir üretimdeki kesintinin toplam yenilenebilir üretimine oranı Şekil 37 ve Tablo 10'da gösterilmiştir.

TEİAŞ bölgelerindeki toplam YAL/YAT ve yenilenebilir üretimdeki kesinti miktarları Şekil 38 – Şekil 43 arasında verilmiştir.

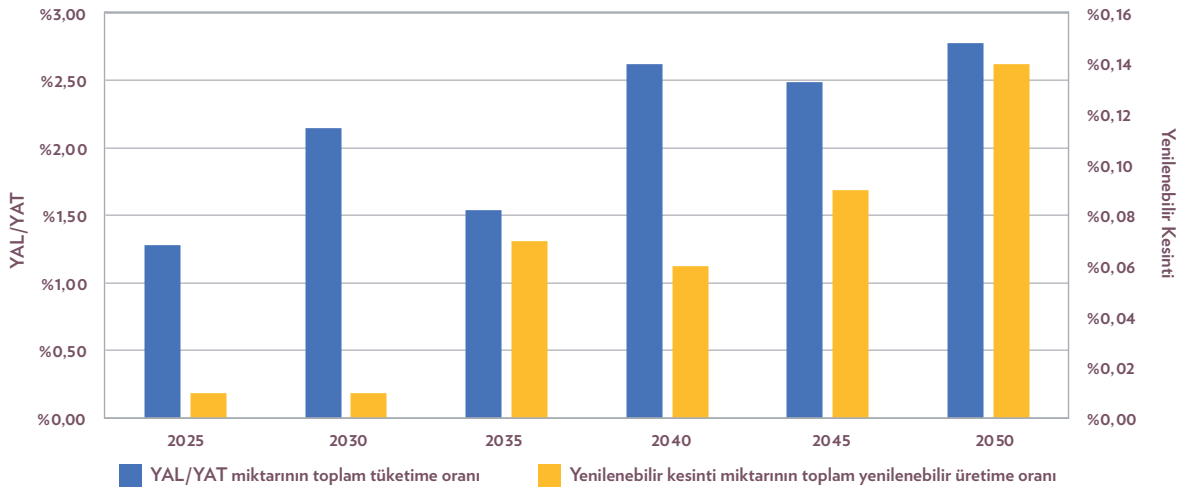
Tablo 9. Baz Senaryo YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarları

	YAL/YAT miktarı (TWh)	Yenilenebilir kesinti miktarı (TWh)
2025	5,08	0,01
2030	9,89	0,01
2035	8,32	0,12
2040	16,24	0,14
2045	17,34	0,23
2050	21,37	0,36

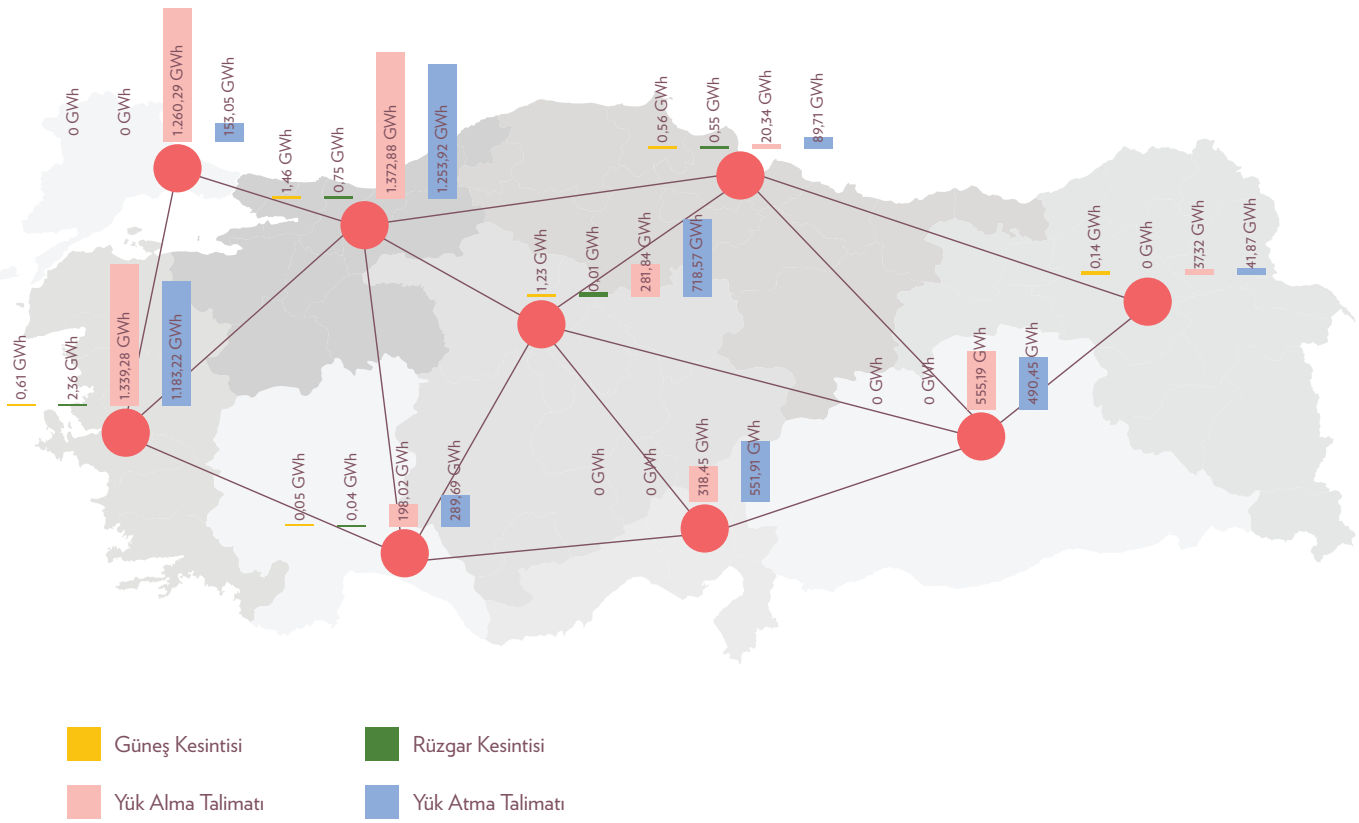
Tablo 10. Baz Senaryo YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti oranları

	YAL/YAT miktarının toplam tüketime oranı	Yenilenebilir kesinti miktarının toplam yenilenebilir üretime oranı
2025	%1,28	%0,01
2030	%2,15	%0,01
2035	%1,54	%0,07
2040	%2,62	%0,06
2045	%2,49	%0,09
2050	%2,78	%0,14

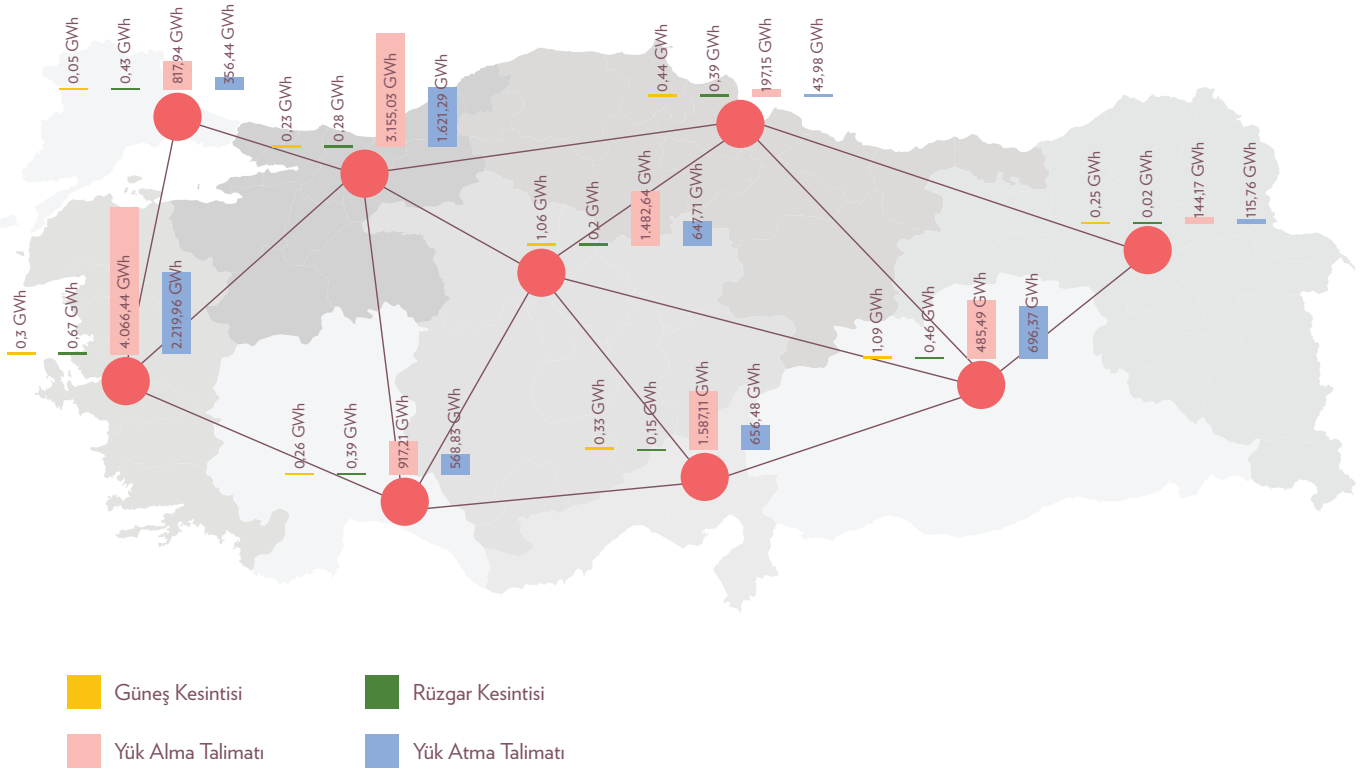
Şekil 37 Baz Senaryo YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti oranları



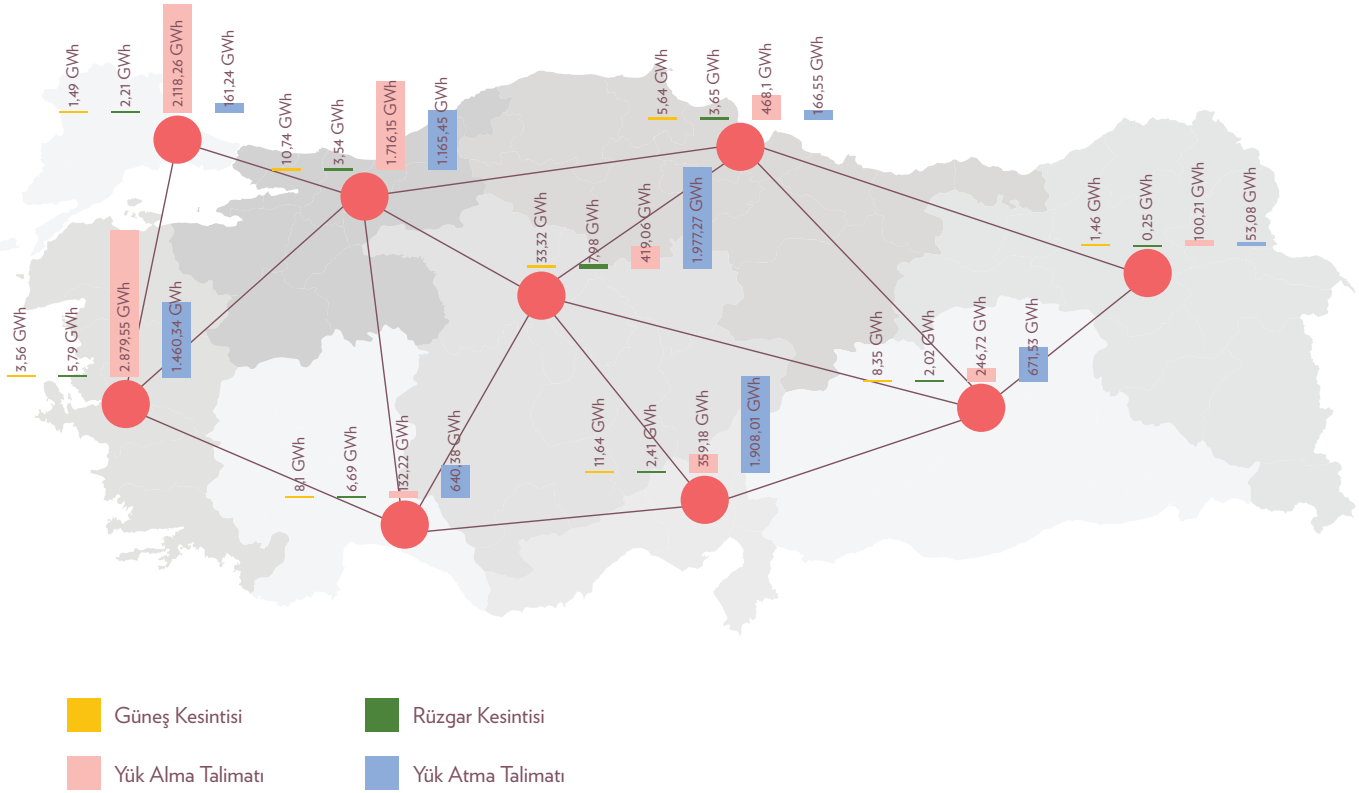
Şekil 38 Baz Senaryo: 2025 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı



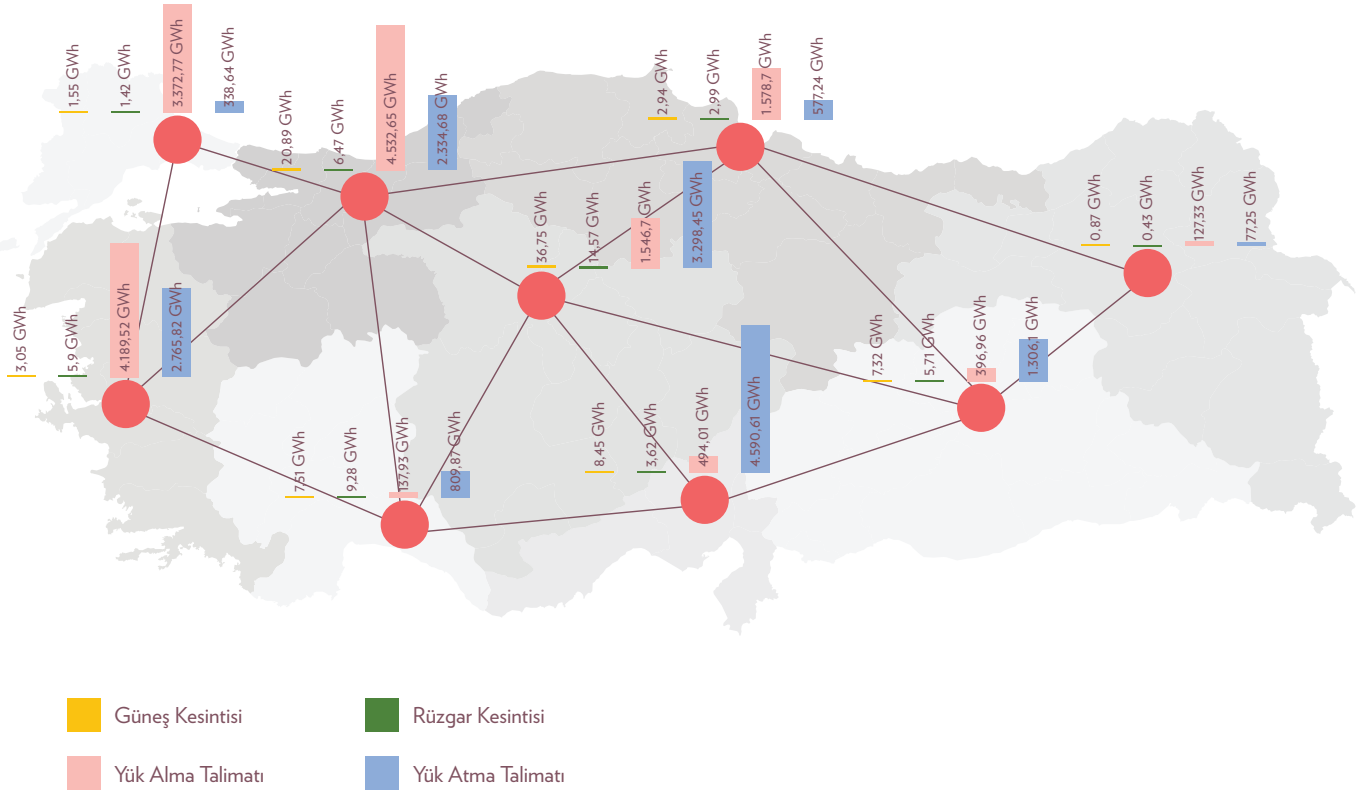
Şekil 39 Baz Senaryo: 2030 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı



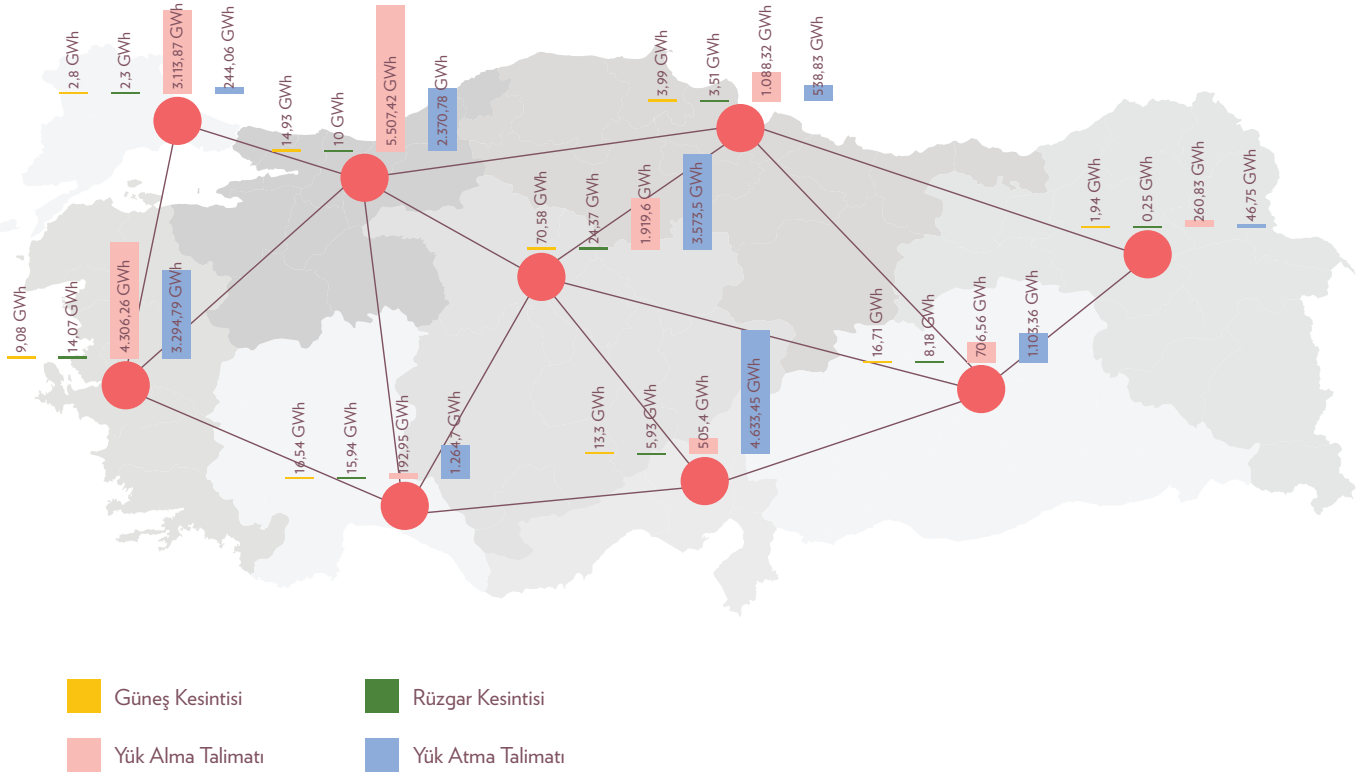
Şekil 40 Baz Senaryo: 2035 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı



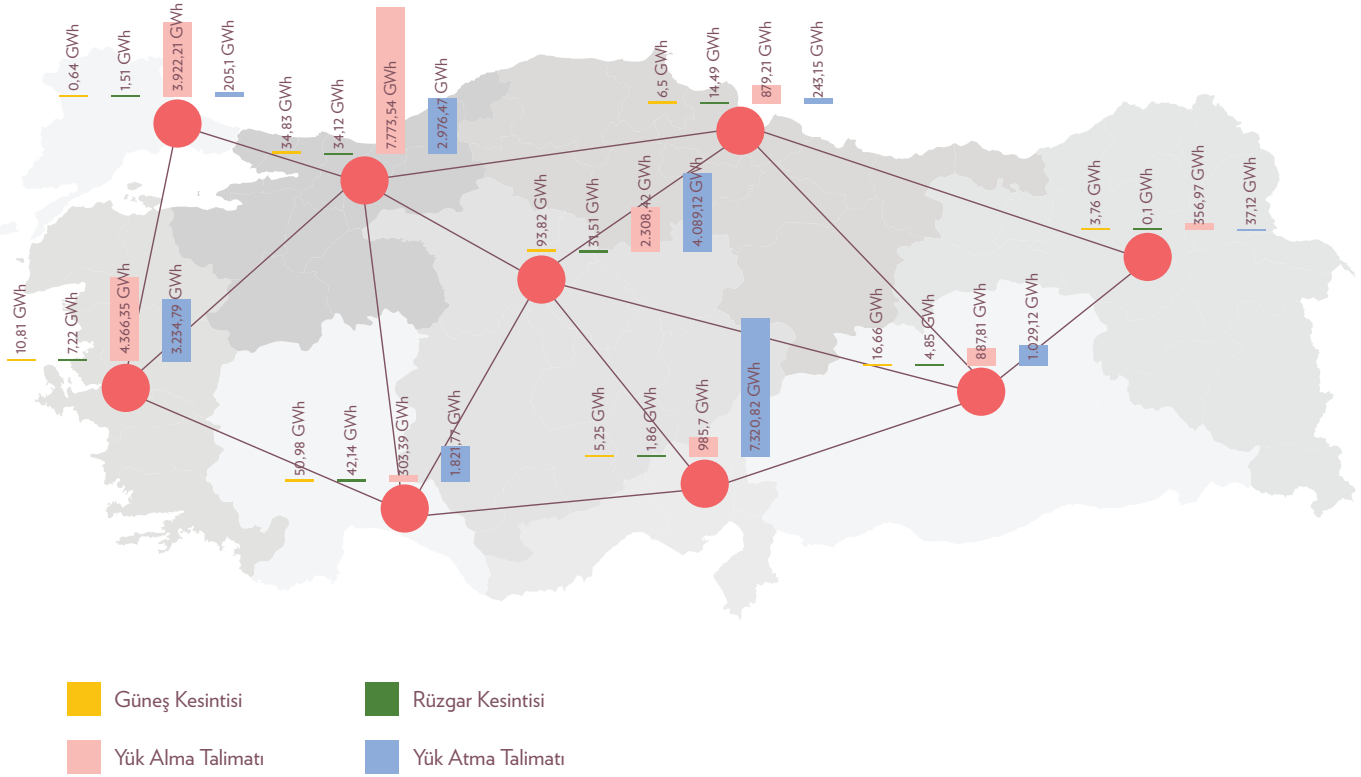
Şekil 41 Baz Senaryo: 2040 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı



Şekil 42 Baz Senaryo: 2045 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı



Şekil 43 Baz Senaryo: 2050 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı



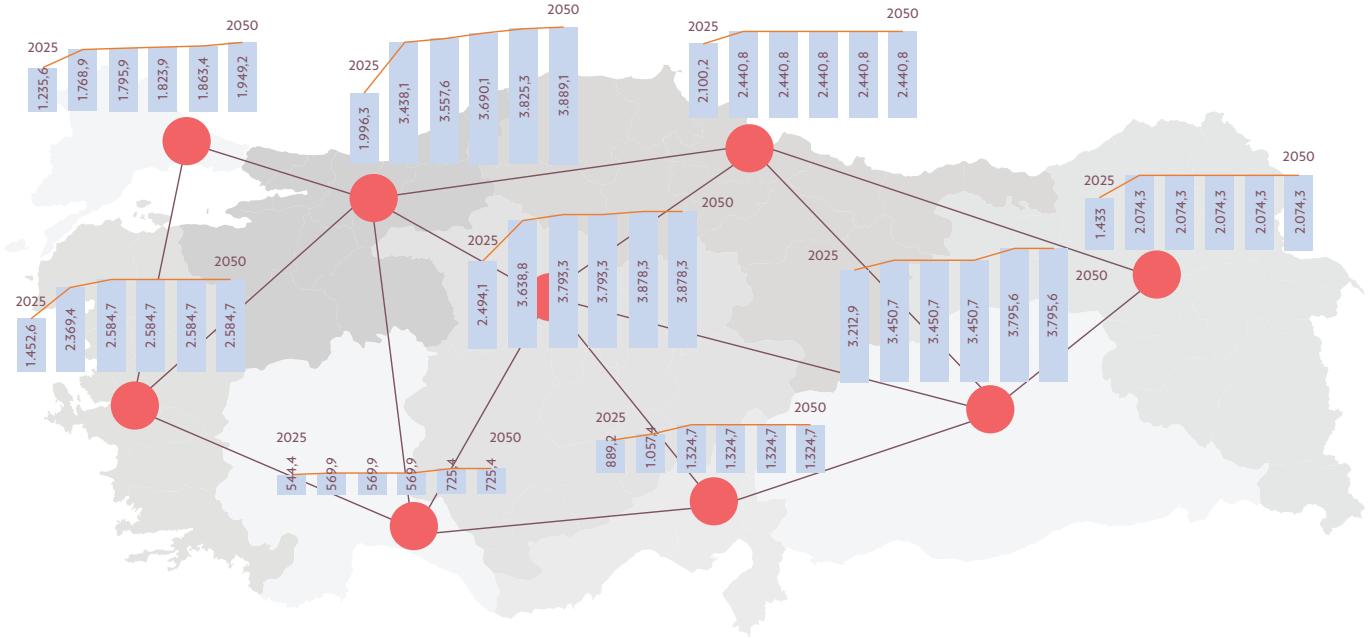
1.4.4. Şebeke Yatırım Gereksinimi

Yapılan şebeke simülasyonları ile hedef yıllardaki şebeke yatırım gereksinimleri belirlenmiştir. Bölüm 1.3'te de bahsedildiği üzere 2025 yılı şebeke yatırım gereksinimi belirlenirken 2020 yılı şebeke modeli, 2030 yılı sonrası yatırım gereksinimleri için ise 2030 yılı TEİAŞ şebeke yatırım modeli baz alınmıştır. Yapılan yatırımlarla birlikte TEİAŞ yük tevzi bölgelerindeki 400 kV iletim hatlarının toplam uzunluklarının yıllara göre gelişimi Şekil 44'te verilmiştir.

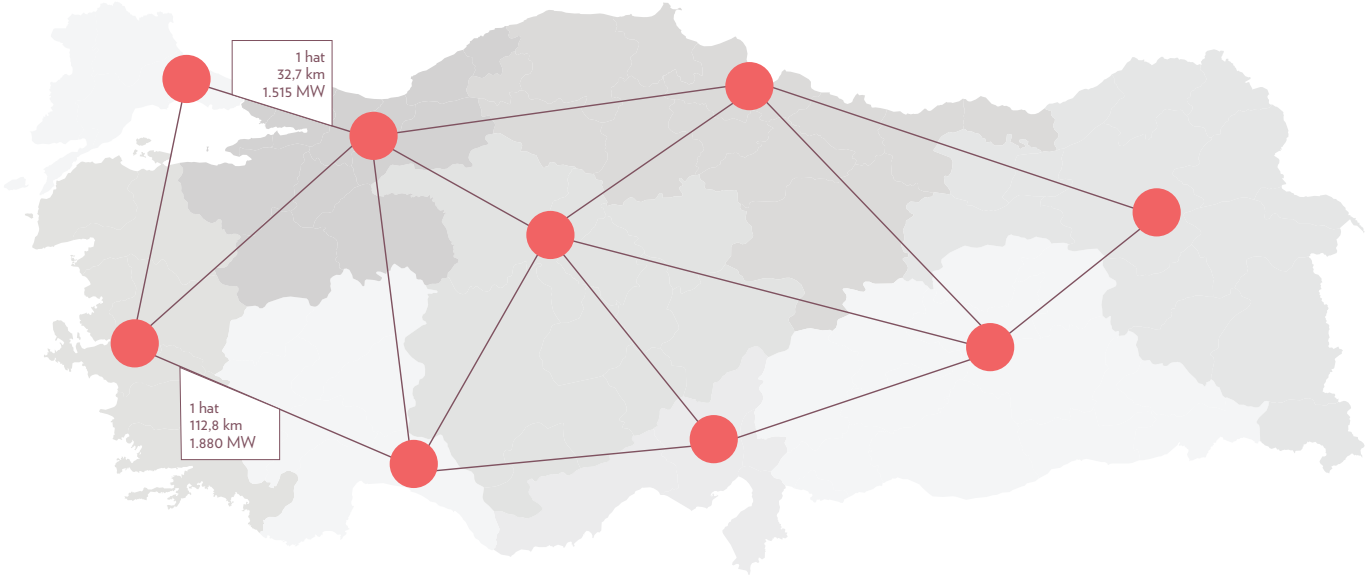
Baz Senaryoda 2025 yılında 2020 şebeke modeli baz alınarak koridorlara yapılması gereken yatırımlar Şekil 45'te verilmiştir.

2030 TEİAŞ şebeke yatırım planı baz alınarak 2035, 2045 ve 2050 şebekelerinin bir önceki 5 yıllık hedef yıl üzerine yapılması gereken ilave yatırım gereksinimleri Şekil 46, Şekil 47 ve Şekil 48'de verilmiştir. 2040 yılında koridorlara 2035 yılı koridorlarına ilave herhangi bir yatırım gereksinimi gerekmemektedir.

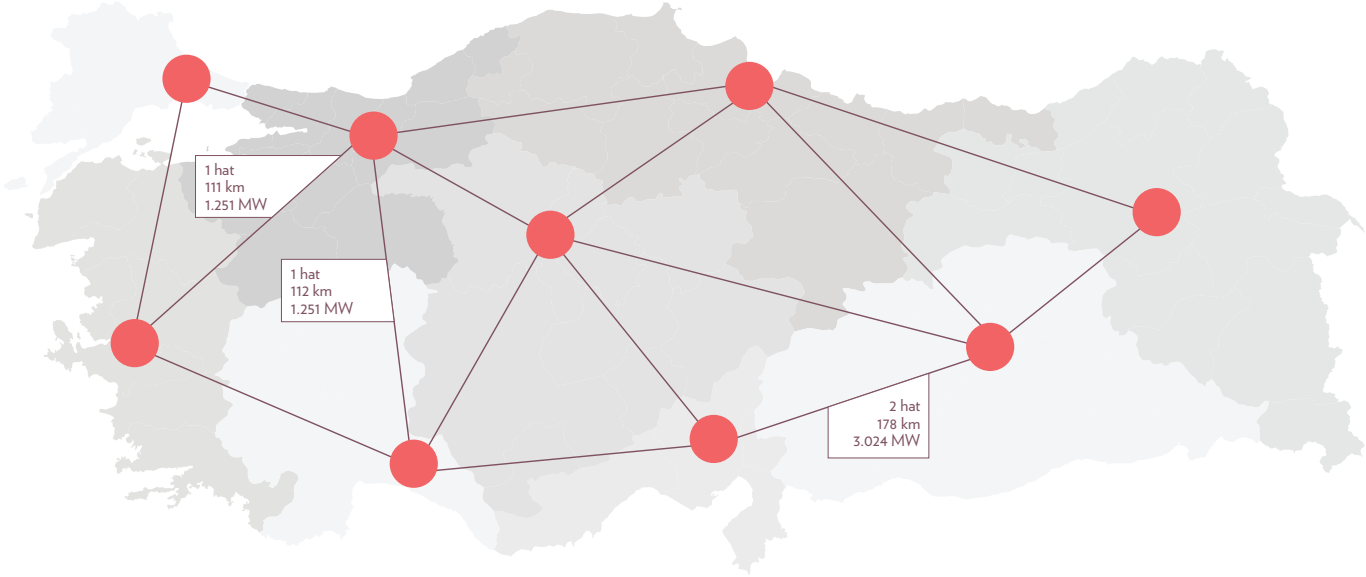
Şekil 44 Baz Senaryo: TEİAŞ yük tevzi bölgelerindeki hatların toplam uzunluklarının gelişimi (km)



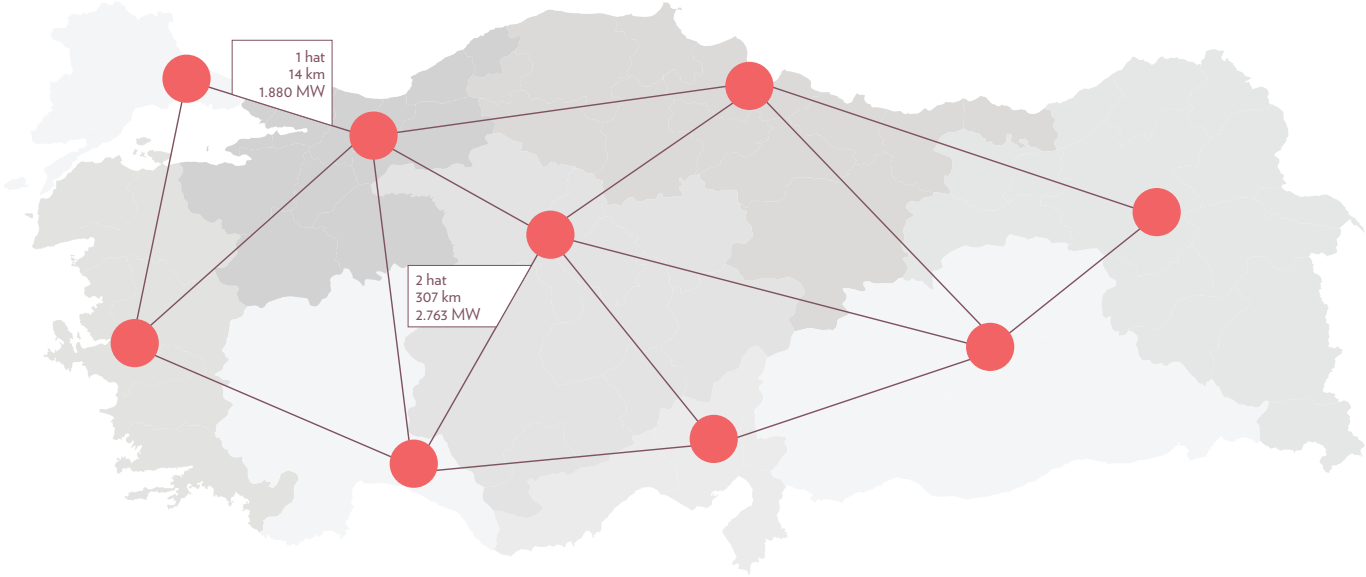
Şekil 45 Baz Senaryo: 2025 yılı koridorlarının 2020 yılına ilave yatırım gereksinimi



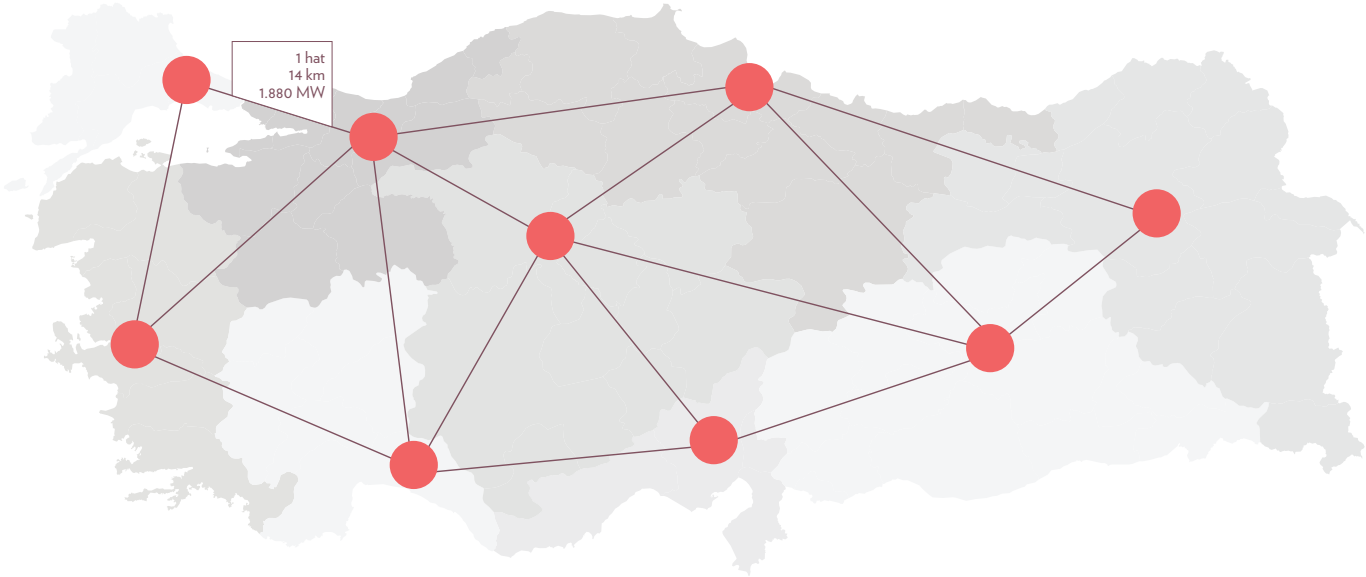
Şekil 46 Baz Senaryo: 2035 yılı koridorlarının 2030 TEİAŞ yatırım planına ilave yatırım gereksinimi



Şekil 47 Baz Senaryo: 2045 yılı koridorlarının 2035 yılı koridorlarına ilave yatırım gereksinimi



Şekil 48 Baz Senaryo: 2050 yılı koridorlarının 2045 yılı koridorlarına ilave yatırım gereksinimi



1.4.5. Karbondioksit Emisyonları

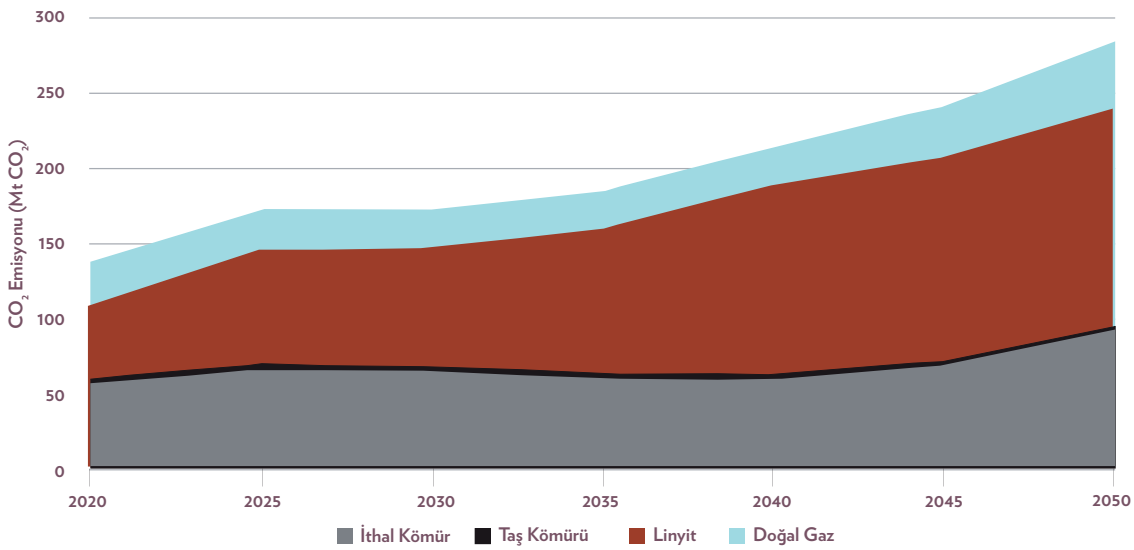
Baz Senaryoda fosil yakıtlardan elektrik üretimine bağlı CO_2 emisyonları Tablo 11 ve Şekil 49'da verilmiştir.

Baz Senaryoda elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonları yıllar geçtikçe artmakta ve 2020'de 135 $MtCO_2$ olan emisyonlar 2030'da 170 $MtCO_2$'ye, 2050'de 2020'nin iki katından fazla artarak 282 $MtCO_2$'ye çıkmaktadır.

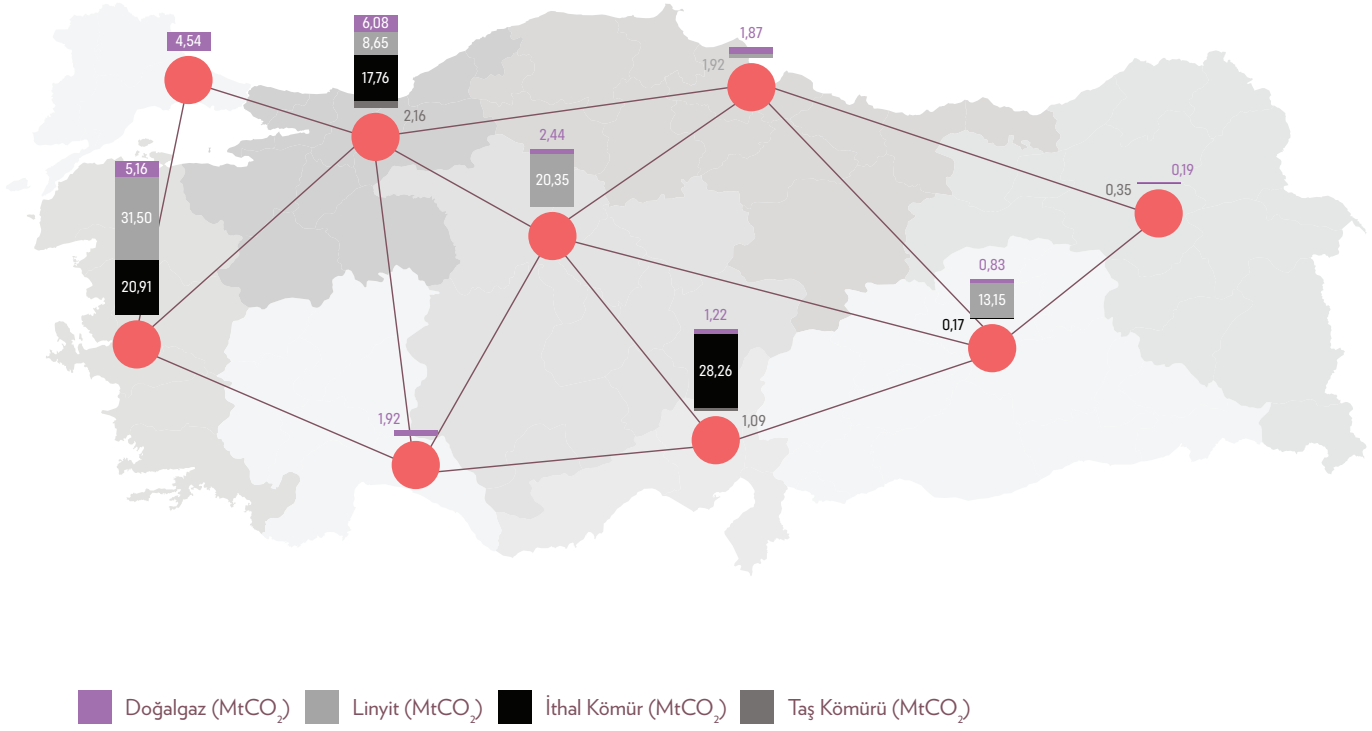
Elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının oluşumunda 2020 yılında %35 olan linyitin payı 2040'a kadar artarak %59 seviyesine kadar ulaşırken daha sonra kademeli olarak düşmekte ve 2050'de %51 seviyesine gelmektedir. Linyitin aksine 2020 yılında %42 olan ithal kömürün payı ise 2040 yılına kadar azalarak %28 seviyesine kadar inmekte, ancak 2040'tan sonra artarak 2050'de %33 seviyesine çıkmaktadır. Doğal gaz ise ithal kömüre benzer bir davranış izlemekte ve 2020 yılında %20 olan payı 2040'a kadar azalarak %11 seviyesine inmekte, ardından 2050'ye kadar artarak %15'e çıkmaktadır.

Baz Senaryoda elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının TEİAŞ yük tevzi bölgelerine göre üretim teknolojisi bazlı dağılımı ise Şekil 50 – Şekil 55 arasında verilmiştir. Termik santrallerin daha yoğun olduğu Batı Anadolu, Kuzey Batı Anadolu, İç Anadolu ve Doğu Akdeniz yük tevzi bölgelerinde CO_2 emisyonlarının diğer bölgelere oranla çok daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir.

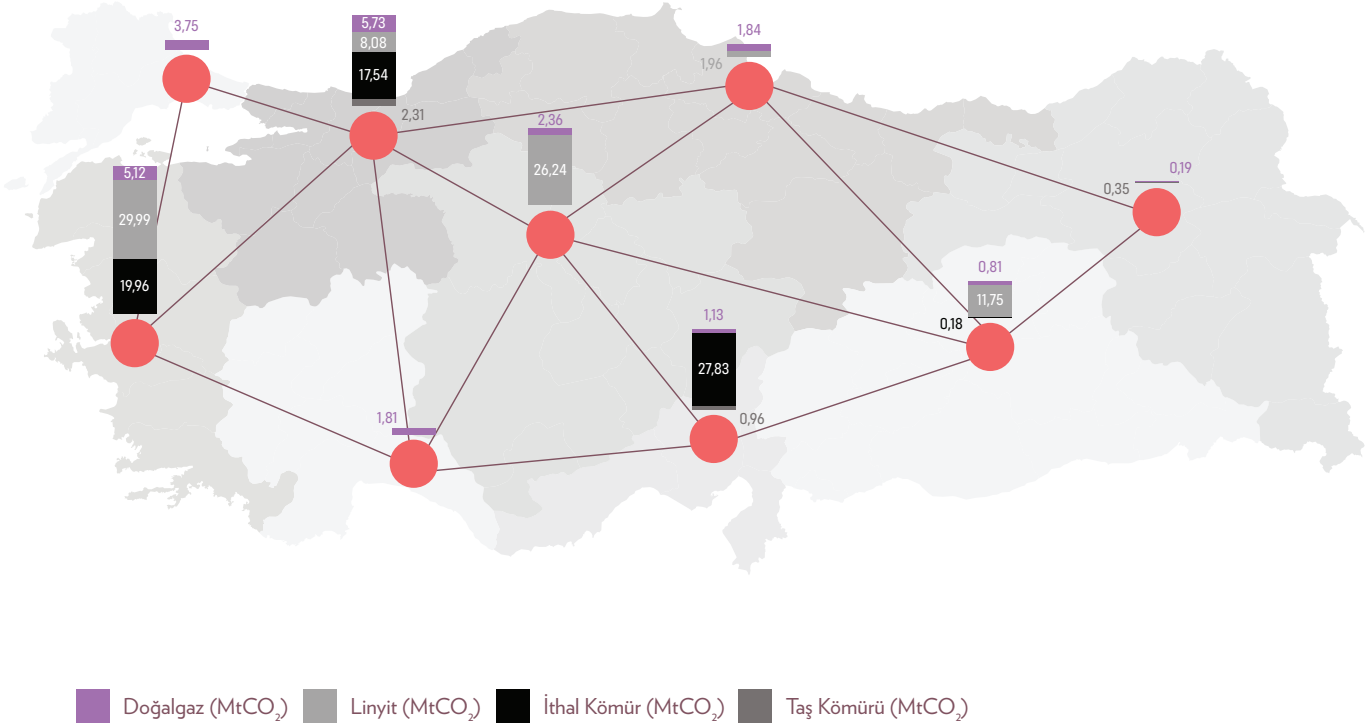
Şekil 49 Baz senaryoda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)



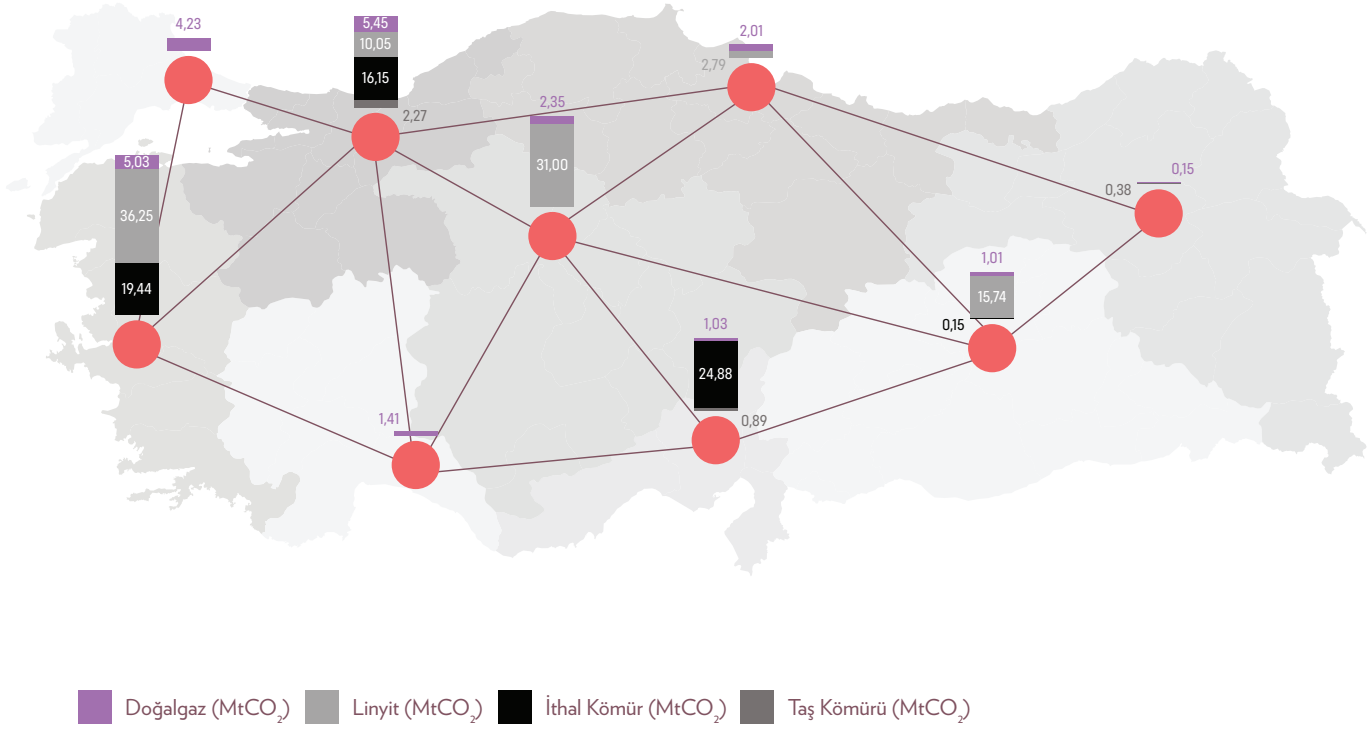
Şekil 50 Baz senaryoda 2025 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bölgelere dağılımı



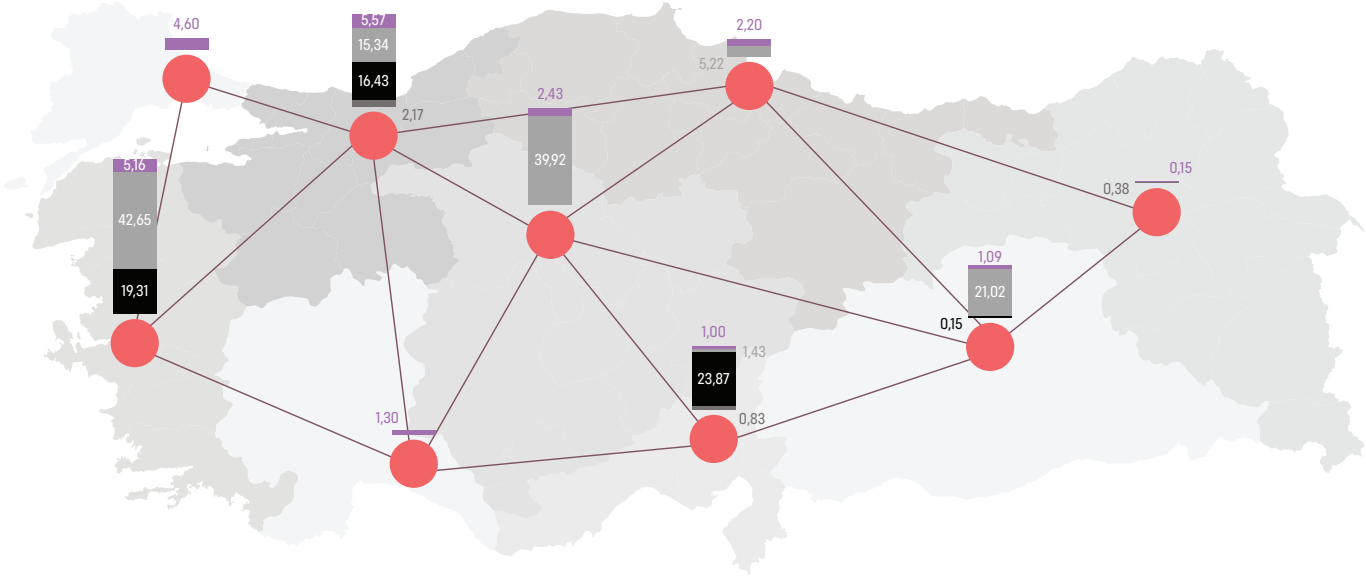
Şekil 51 Baz senaryoda 2030 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bölgelere dağılımı



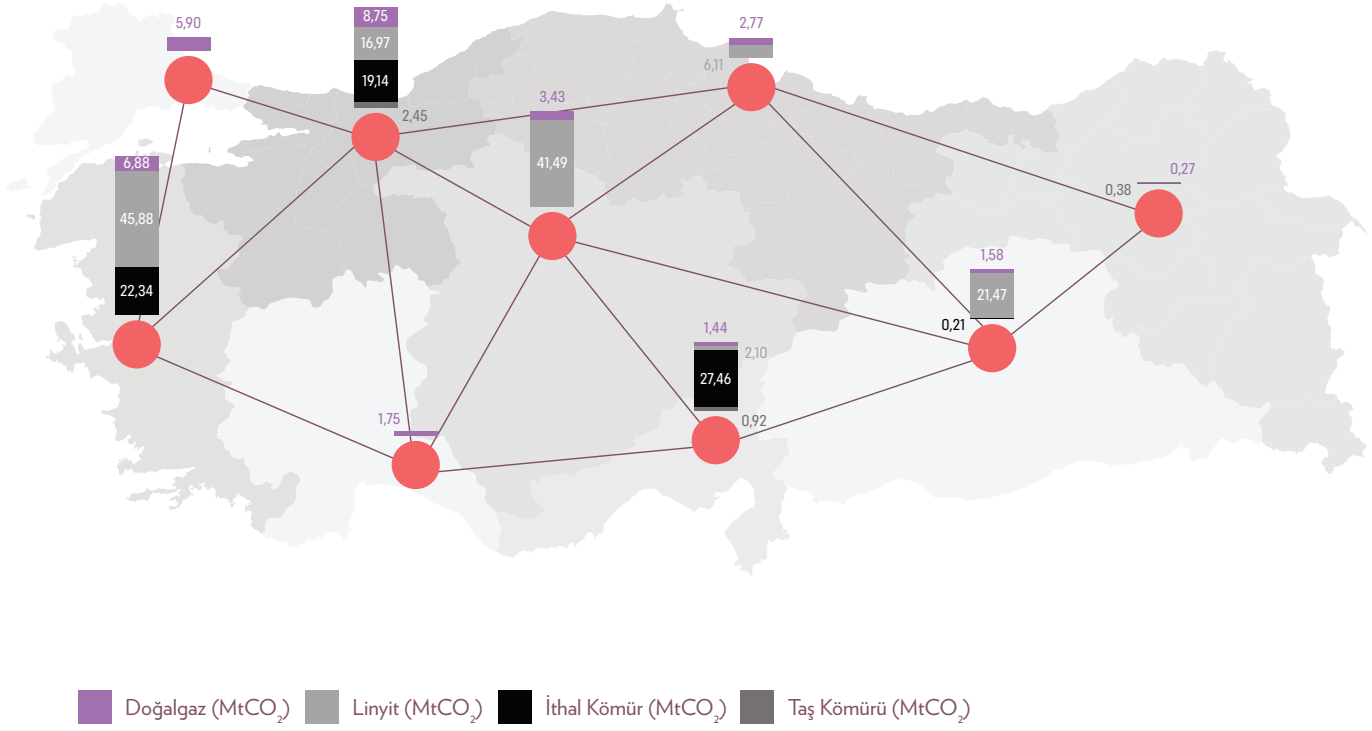
Şekil 52 Baz senaryoda 2035 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bölgelere dağılımı



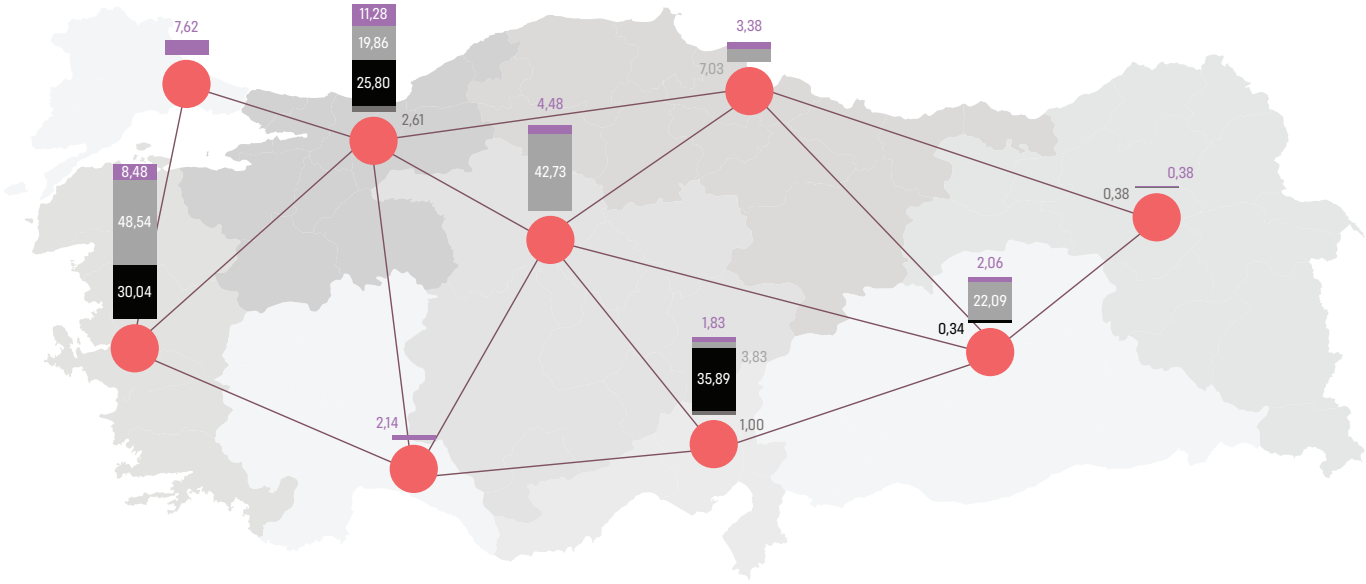
Şekil 53 Baz senaryoda 2040 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bölgelere dağılımı



Şekil 54 Baz senaryoda 2045 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bölgelere dağılımı



Şekil 55 Baz senaryoda 2050 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bölgelere dağılımı



Tablo 11. Baz senaryoda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)

	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Toplam
2020	4,2	57,1	47,4	26,7	135,4
2025	3,6	67,1	75,6	24,3	170,6
2030	**3,6**	**65,5**	**78,0**	**22,7**	**169,8**
2035	3,5	60,6	95,9	22,7	182,7
2040	3,4	59,8	125,6	23,5	212,3
2045	3,8	69,2	134,0	32,8	239,7
2050	**4,1**	**92,1**	**144,1**	**41,7**	**282**

1.5. NET SIFIR SENARYOSU

Net Sıfır Senaryosu, Türkiye ekonomisinin ve ilgili sektörlerin, Paris Anlaşması'nın 1,5°C hedefine uygun olarak ekonominin karbonsuzlaştırılması amacıyla uygulanacak iklim eylemlerinin etkisiyle ve dünya ekonomisinin mevcut gidişatıyla uyumlu olarak 2050'ye kadar izleyeceği ve CO_2 emisyonlarının giderek azaltıldığı patikadır.

Baz Senaryoda olduğu gibi Net Sıfır Senaryosunda da elektrik sektörü için 2025 yılından başlayarak 2050 yılına kadar 5'er yıllık aralıklarla simülasyonlar çalışılmıştır. Bu senaryoda şebeke esnekliği için Baz Senaryoya göre oldukça yüksek varsayımlar yapılmıştır. Buna göre:

Depolama Sistemleri

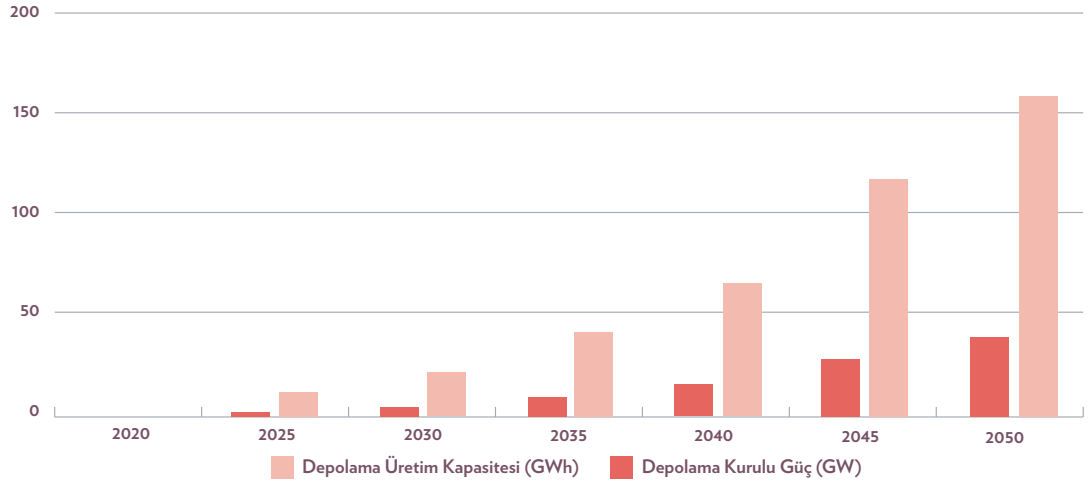
Mevcut sistemde bulunmayan depolama sistemlerinin (pompajlı HES ve batarya depolama) hızla devreye girmeye başlayarak 2030'a kadar 5,67 GW'a çıkacağı (Baz Senaryoda 0,26 GW), 2050'de ise Baz Senaryodaki varsayımın (3 GW) yaklaşık 13 katına denk gelecek şekilde yaklaşık 40 GW'a yükseleceği varsayılmaktadır. Depolama sistemlerinin kurulu güç ve üretim kapasitesi olarak gelişimi Şekil 56 ve Tablo 12'de gösterilmiştir.

Tablo 12. Net Sıfır Senaryosunda depolamanın kurulu güç ve üretim kapasitesinin gelişimi

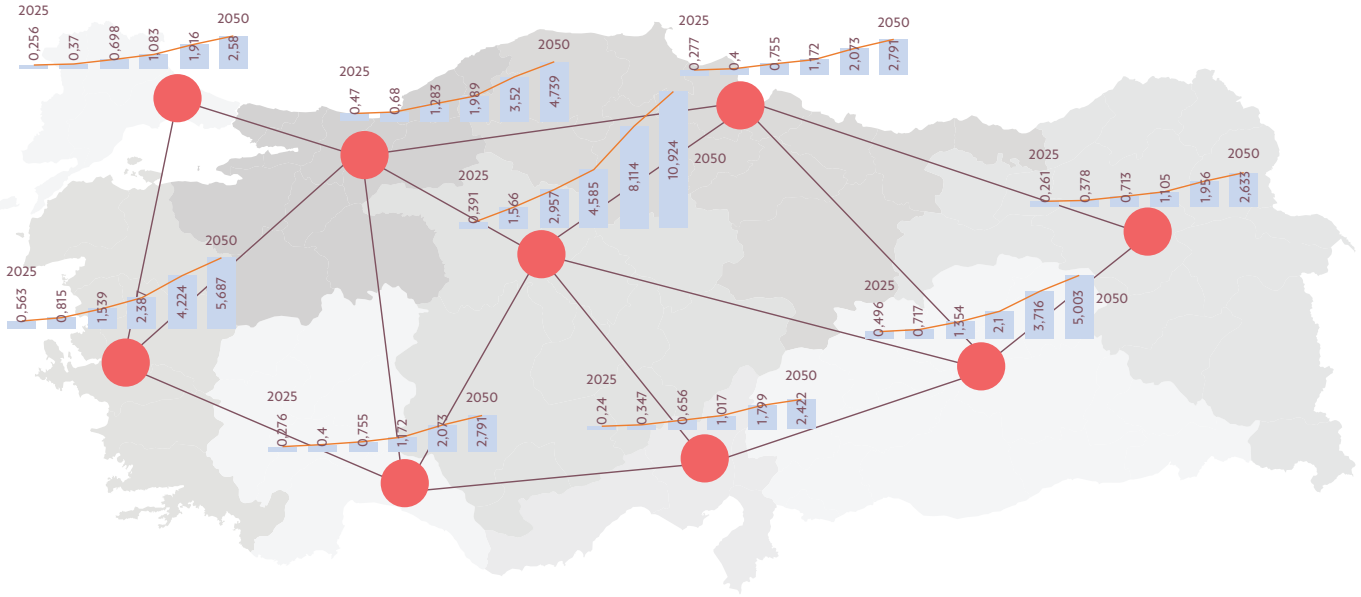
	Depolama Kurulu Güç (GW)	Depolama Üretim Kapasitesi (GWh)
2020	-	-
2025	3,23	12,92
2030	5,67	22,66
2035	10,71	42,83
2040	16,61	66,43
2045	29,39	117,56
2050	39,57	158,26

Depolama sistemlerinin TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımları ve kurulu güçlerinin gelişimi Şekil 57'de sunulmuştur. Yenilenebilir enerji kurulu gücü, depolama sistemlerinin yük tevzi merkezleri arasındaki dağılımda önemli bir rol oynamıştır. Orta Anadolu yük tevzi bölgesinin yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olması ve devreye girmesi planlanan Gökçekaya pompaj depolamalı HES'in bu bölgede bulunması, depolama sistemlerinin bu bölgede daha fazla artış göstermesine neden olmuştur.

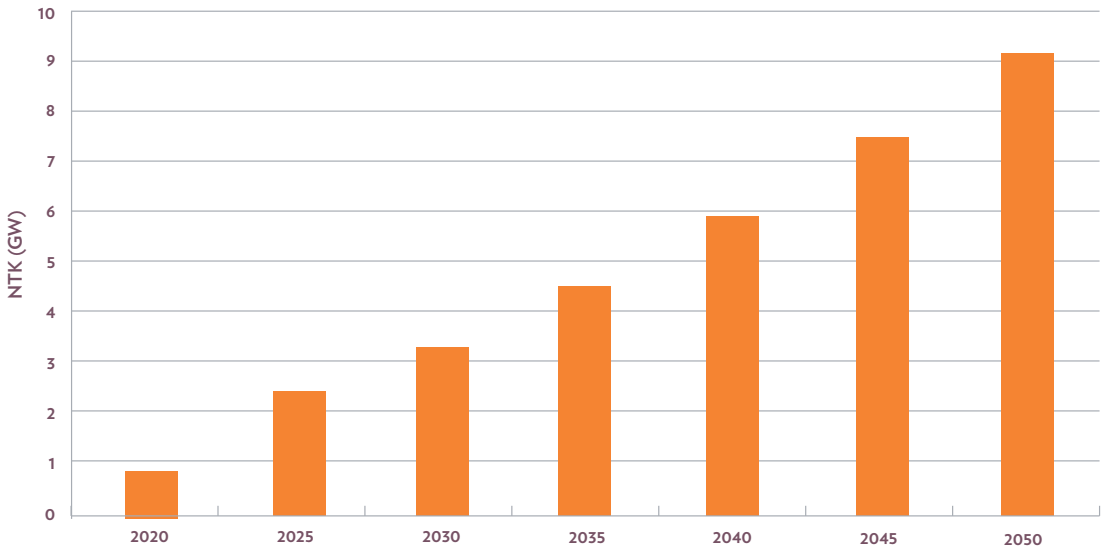
Şekil 56 Net Sıfır Senaryosunda depolama sistemlerinin kurulu güç ve üretim kapasitesinin gelişimi



Şekil 57 Net Sıfır Senaryosunda depolama sistemi kurulu gücünün bölgelere göre dağılımı ve gelişimi



Şekil 58 Net Sıfır Senaryosunda uluslararası enterkoneksiyon hatlarının saatlik Net Transfer Kapasitesinin (NTK) gelişimi



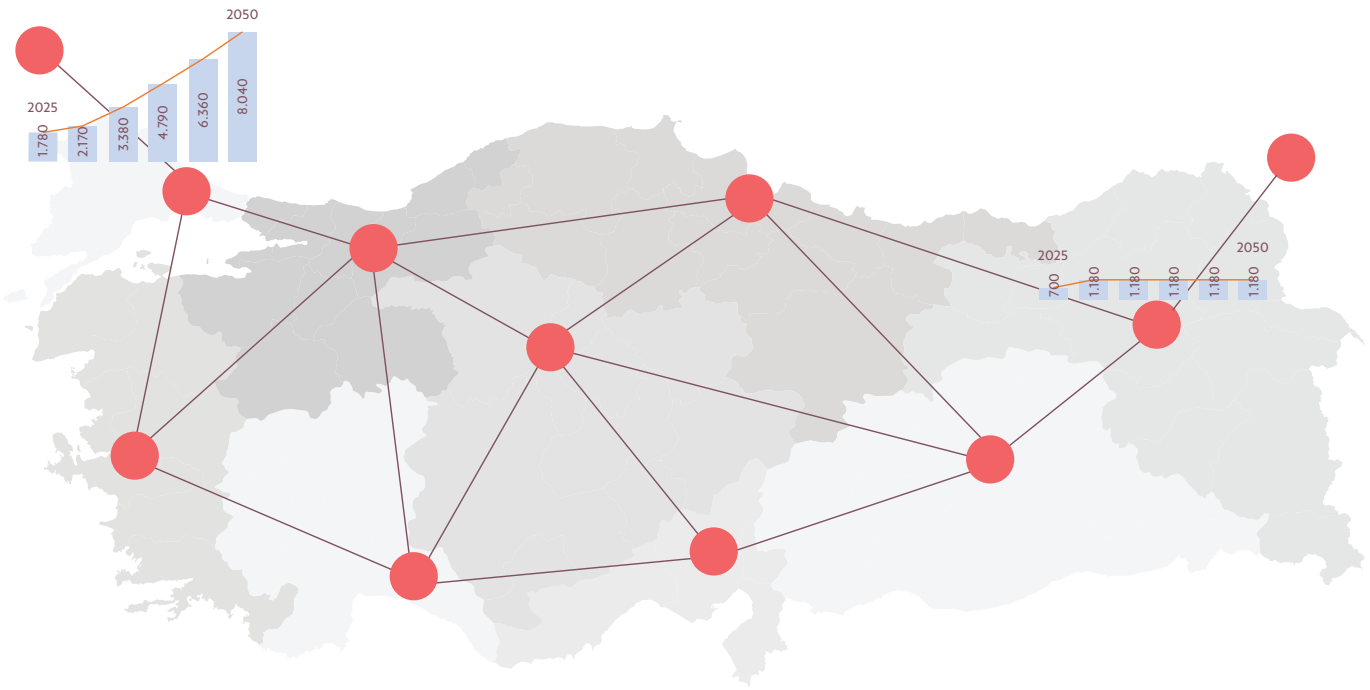
Net Transfer Kapasitesi (NTK)

Bir esneklik mekanizması olarak kullanılabilecek uluslararası enterkoneksiyon hatlarının (ENTSO-E ve Gürcistan) Net Transfer Kapasitesi'nin (NTK) 2020'de 0,96 GW iken 2030'da 3,35 GW'ye ve 2050'de 9,22 GW'ye yükseleceği öngörülmektedir (Şekil 58 ve Tablo 13). ENTSO-E ve Gürcistan enterkonneksiyonlarının Net Transfer Kapasitesinin gelişimi Şekil 59'da gösterilmiştir. Net Sıfır Senaryosunda öngörülen Net Transfer Kapasitesi Baz Senaryoda öngörülenin 1,5 katından biraz fazladır.

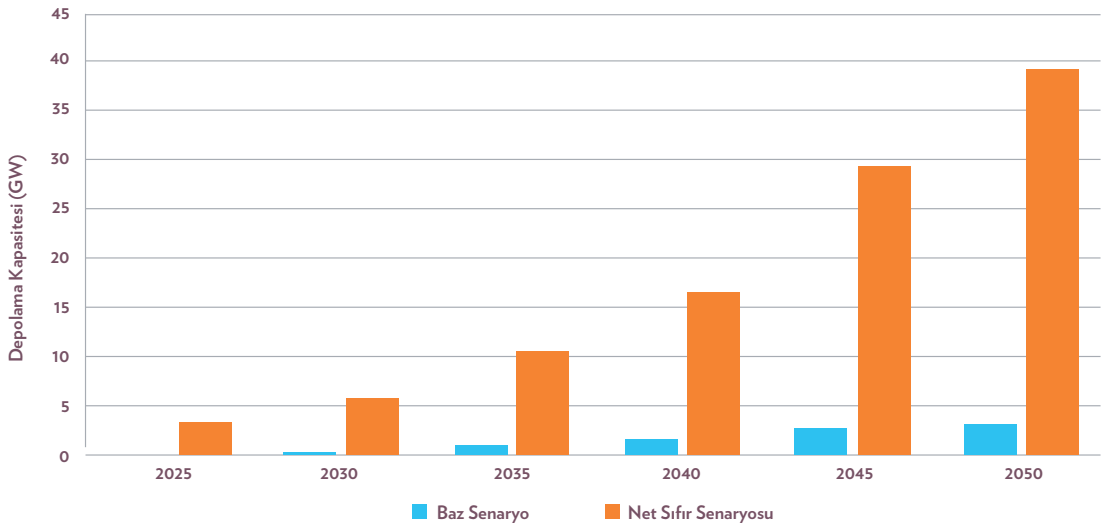
Tablo 13. Net Sıfır Senaryosunda uluslararası enterkoneksiyon hatlarının saatlik Net Transfer Kapasitesinin (NTK) gelişimi

Yıl	Net Transfer Kapasitesi (GW)
2020	0,96
2025	2,48
2030	3,35
2035	4,56
2040	5,97
2045	7,54
2050	9,22

Şekil 59 Net Sıfır senaryosunda ENTSO-E ve Gürcistan enterkonneksiyonlarının Net Transfer Kapasitesinin Gelişimi



Şekil 60 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda depolama kapasitesinin kurulu gücünün karşılaştırılması



Depolama kapasitesi ve enterkoneksiyon hatları için Net Sıfır Senaryosunda yapılan varsayımlar Şekil 60 ve Şekil 61'de Baz Senaryo ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 61 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda Uluslararası Enterkoneksiyon Hatlarının saatlik Net Transfer Kapasitesi'nin (NTK) karşılaştırılması



1.5.1. Kurulu Güç

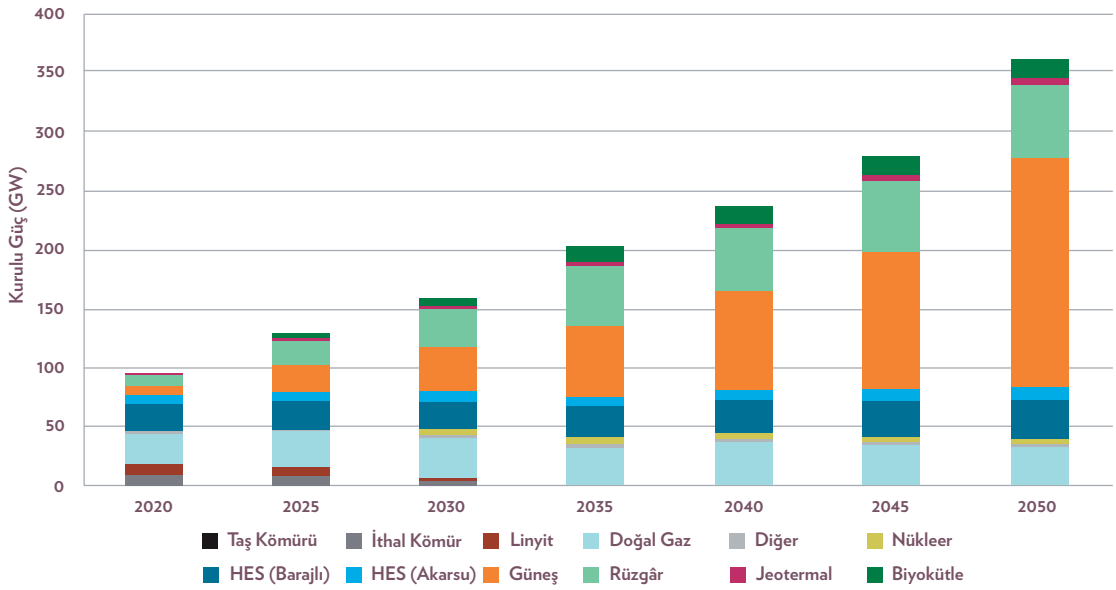
Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu güç kapasitelerinin öngörülen yıllara göre değişimi fosil yakıtlar (taş kömürü, ithal kömür, linyit, doğal gaz ve diğer fosil yakıt kaynakları), nükleer enerji, hidroelektrik santraller (barajlı ve akarsu tipi) ve modern yenilenebilir kaynaklar (güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle) için Tablo 14 ve Şekil 62'de gösterilmiştir.

Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre 2020'den hemen sonra önce rüzgâr, ardından güneş kurulu gücünde ve üretiminde artış olmakta ve 2040'tan sonra düşük miktarlarda olsa da konsantre güneş ve deniz üstü rüzgâr kapasiteleri eklenmektedir. Kömür ise hızla sistemden çıkmaktadır.

Tablo 14. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Nükleer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2020	0,6	8,9	9,5	25,6	1,6		23	8,2	6,8	8,6	1,5	1,1	95,6
2025	0,5	8	7,2	30,3	1,9		23,5	8,2	22	20,9	2,5	3,8	128,9
2030	**0,2**	**4**	**2,9**	**33,8**	**2,1**	**4,8**	**23,5**	**9,1**	**36,4**	**32,6**	**3,4**	**6,1**	**158,9**
2035		1,3		32,5	2,6	4,8	25,5	9,1	59,7	50,1	3,4	13	202,1
2040				36,9	2,6	4,8	27,5	9,1	83,5	52,9	3,4	15	235,6
2045				34	2,7	4,8	29,5	11,5	116,3	59,1	5,1	15,4	278,4
2050				**32,7**	**2,7**	**4,8**	**32**	**12**	**192,7**	**62,4**	**5,4**	**16,1**	**360,8**

Şekil 62 Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)



1.5.2. Kömürlü Termik Santrallerin Devreden Çıkması

Net Sıfır Senaryosunda fosil yakıt kaynaklarının kurulu güçleri Baz Senaryoya göre çok erken ve büyük ölçüde azalmaktadır. Linyit santrallerinin kurulu gücü ve üretimdeki payı 2030'a gelmeden oldukça azalmakta, 2030'da sadece 2,9 GW linyitle çalışan kömürlü termik santraller kalmakta, 2030'ların ilk yarısında taş kömürü ve linyitle çalışan bütün termik santraller kapanmaktadır. 2035'e gelindiğinde kömürlü termik santral olarak sadece ithal kömürle çalışan 1,3 GW kurulu güce sahip tek bir termik santral devreye bağlı kalmakta, bu da 2040'tan önce kapanmaktadır. Devreden çıkacak fosil yakıtlı santraller belirlenirken Devreden çıkacak fosil yakıtlı santraller belirlenirken yarattığı karbon emisyonu ve hava kirliliği[2], şebekedeki yeri, yaşı, yıllık kapasite faktörü gibi kriterler göz önüne alınmıştır. Bu kriterlere göre taş kömürü, ithal kömür ve linyit yakıtlı santrallerin devreden çıkma sıralaması Tablo 15, Tablo 16 ve Tablo 17'de verilmiştir.

2 Sağlık ve Çevre Birliği (HEAL-Health and Environment Alliance). (Ocak 2021). Türkiye kronik kömür kirliliği. Kömürün sağlık yükü ve kömür bağımlılığını sonlandırmak. https://www.env-health.org/wp-content/uploads/2021/02/Chronic-Coal-Pollution-Turkey-TR.pdf

Tablo 15. Net Sıfır Senaryosunda taş kömürü santrallerin devreden çıkma sırası (yeşil: devrede, kırmızı: devrede değil)

Ünite Adı	Kurulu Güç (MW)	2020	2025	2030	2035	2040
KARDEMIR TES GR-1	13					
KARDEMIR TES GR-2	15					
KARDEMIR TES GR-4	50					
YENI CATALAGZI TES GR-1	150					
YENI CATALAGZI TES GR-2	150					
ISDEMIR GR-3	63					
ISDEMIR GR-4	63					
ERDEMIR BT-1 (STG-1)	10					
ERDEMIR BT-3 (STG-3)	29					
ERDEMIR BT-6 (STG-6)	25					
ERDEMIR BT-7 (STG-7)	39					
ERDEMIR GR-1 (GTG-1)	39					
ERDEMIR GR-2 (GTG-2)	39					
ERDEMIR TRT-1	7					
ERDEMIR TRT-2	7					
ISDEMIR GR-1	30					
ISDEMIR GR-2	30					
ISDEMIR GR-5	63					
ISDEMIR TRT-3	9					
ISDEMIR TRT-4	14					
Toplam Kurulu Güç (MW)		**845**	**504**	**228**	**0**	**0**

Tablo 16. Net Sıfır Senaryosunda ithal kömürü santrallerin devreden çıkma sırası (yeşil: devrede, kırmızı: devrede değil)

Ünite Adı	Kurulu Güç (MW)	2020	2025	2030	2035	2040
HUNUTLU TES	1320					
ATLAS TES GR-1	600					
ATLAS TES GR-2	600					
SUGOZU ISKEN TES GR-1	605					
SUGOZU ISKEN TES GR-2	605					
ICDAS CELIK ENERJI GR-2	135					
ICDAS CELIK ENERJI GR-3	135					
CENAL TES GR-1	660					
CENAL TES GR-2	660					
ICDAS CELIK ENERJI GR-1	135					
IZDEMIR TES GR-1	350					
KIPAS KAGIT GR	25					
ZETES1 GR-1	160					
ZETES2 GR-3	615					
ZETES3 GR-4	700					
ZETES3 GR-5	700					
AKSA YALOVA BT-1	11					
AKSA YALOVA BT-2	11					
AKSA YALOVA BT-3	99					
AKSA YALOVA BT-4	25					
ALBAYRAK TES GR-1	40					
BEKIRLI TES GR-1	600					
BEKIRLI TES GR-2	600					
COLAKOGLU OP-2 GR-OP2	190					
GOKNUR GIDA GR	2					
KAHRAMANMARAS KAGIT GR-2	10					
ZETES2 GR-2	615					
Toplam Kurulu Güç (MW)		**8.886**	**8.005**	**4.000**	**1.320**	**0**

Tablo 17. Net Sıfır Senaryosunda linyit santrallerin devreden çıkma sırası (yeşil: devrede, kırmızı: devrede değil)

Ünite Adı	Kurulu Güç (MW)	2020	2025	2030	2035	2040
AFSIN ELBISTAN B TES GR-1	360					
AFSIN ELBISTAN B TES GR-2	360					
AFSIN ELBISTAN B TES GR-3	360					
AFSIN ELBISTAN B TES GR-4	360					
AKSA GOYNUK TES GR-1	135					
AKSA GOYNUK TES GR-2	135					
CAN-2 TES GR-1	330					
COBANYILDIZI (CUMRA) TES GR	37					
POLAT TES GR-1	51					
SOMA KOLIN TES GR-1	255					
SOMA KOLIN TES GR-2	255					
TUFANBEYLI TES GR-1	150					
TUFANBEYLI TES GR-2	150					
ALKIM AFYON GR-1	3					
ALKIM CAYIRHAN GR-1	3					
ALKIM KONYA BT	2					
AYNES GIDA GR-1	7					
BANDIRMA BORAKS GR-1	5					
BANDIRMA BORAKS GR-2	5					
CAN TES GR-1	160					
CAN TES GR-2	160					
CAYIRHAN TES GR-1	150					
CAYIRHAN TES GR-2	150					
CAYIRHAN TES GR-3	160					
CAYIRHAN TES GR-4	160					
CUMRA SEKER GR-1	20					
CUMRA SEKER GR-2	10					
CUMRA SEKER GR-3	7					
CUMRA SEKER GR-4	7					
ETI ALUMINYUM GR-1	13					

Tablo 17. Net Sıfır Senaryosunda linyit santrallerin devreden çıkma sırası (yeşil: devrede, kırmızı: devrede değil) (devam)

Ünite Adı	Kurulu Güç (MW)	2020	2025	2030	2035	2040
ETI SODA GR-1	12					
ETI SODA GR-2	12					
KANGAL TES GR-1	150					
KANGAL TES GR-2	150					
KANGAL TES GR-3	157					
KEMERKOY TES GR-1	210					
KEMERKOY TES GR-2	210					
KEMERKOY TES GR-3	210					
KUCUKER TERMIK GR-1	6					
MARMARA KAGIT GR-1	2					
ORHANELI TES GR-1	210					
SOMA-A GR-1	22					
SOMA-A GR-2	22					
SOMA-B GR-3	165					
SOMA-B GR-4	165					
SOMA-B GR-5	165					
SOMA-B GR-6	165					
SUSURLUK SEKER GR-1-2	12					
TUFANBEYLI TES GR-3	150					
YATAGAN TES GR-1	210					
YATAGAN TES GR-2	210					
YATAGAN TES GR-3	210					
YENIKOY TES GR-1	210					
YENIKOY TES GR-2	210					
SOMA-B GR-1	165					
SOMA-B GR-2	165					
SEYITOMER TES GR-1	150					
SEYITOMER TES GR-2	150					
SEYITOMER TES GR-3	150					
SEYITOMER TES GR-4	150					

Tablo 17. Net Sıfır Senaryosunda linyit santrallerin devreden çıkma sırası (yeşil: devrede, kırmızı: devrede değil) (devam)

Ünite Adı	Kurulu Güç (MW)	2020	2025	2030	2035	2040
ADA SEKER GR-1-2	10					
AFSIN ELBISTAN A TES GR-1	335					
AFSIN ELBISTAN A TES GR-2	340					
AFSIN ELBISTAN A TES GR-3	340					
AFSIN ELBISTAN A TES GR-4	340					
KUTAHYA SEKER GR-1-2	9					
MEDMAR SAGLIK GR-1	2					
CARSAMBA SEKER GR-1	6					
BOR SEKER GR-1	11					
ALPULLU SEKER GR-1	3					
ALPULLU SEKER GR-2-3	4					
AMASYA SEKER GR-1-2	10					
AFYON SEKER GR-1-2	13					
ELBISTAN SEKER GR-1-2	12					
KASTAMONU SEKER GR-1	9					
ILGIN SEKER GR-1	18					
KAYSERI SEKER GR-1	5					
KAYSERI SEKER GR-2	5					
KAYSERI SEKER GR-3	5					
PETLAS GR-1	7					
TUTES-A GR-3	65					
TUTES-B GR-4	150					
TUTES-GR-5 GR-5	150					
USAK SEKER GR-1	5					
YOZGAT SEKER GR-1	7					
YUNUS EMRE TES GR-1	145					
YUNUS EMRE TES GR-2	145					
Toplam Kurulu Güç (MW)		**9.512**	**7.206**	**2.938**	**0**	**0**

Doğal gaz santrallerinin kurulu gücü ise kömür santrallerinin kapanmasına bağlı esneklik ihtiyacı nedeniyle azalmamakta, hatta 2020'de 26 GW olan doğal gaz kurulu gücü 2030'da 34 GW'a, 2040'ta ise 37 GW'a çıkmakta, ancak 2040'tan sonra biraz azalarak 2050'de yaklaşık 33 GW'de kalmaktadır. Yine de Net Sıfır Senaryosunda 2050'deki doğal gaz kurulu gücü Baz Senaryoda beklenen 43 GW'ın çok altındadır.

Net Sıfır Senaryosunda yenilenebilir kaynaklar ise büyük bir hızla artmaktadır. Baz Senaryoda 2020'de 8,6 GW olan ve 2050'lere kadar 48 GW seviyesine kadar ulaşan rüzgâr kurulu gücü Net Sıfır Senaryosunda daha hızlı artış göstererek 2050'de 62 GW'yi geçmektedir. Güneş enerjisi kurulu gücü ise çok daha hızlı bir büyümeyle 2030'da 36 GW'ye, 2050'de 193 GW'ye ulaşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan jeotermal enerjinin kurulu gücünde daha sınırlı bir artış öngörülmekte, ancak 2020'de 1 GW olan biyokütle santrallerinin kurulu gücü 2030'da 6 GW'ye, 2050'de ise 16 GW'ye çıkmaktadır. HES'lerin kurulu gücünde ise modern yenilenebilir enerji santrallerine göre daha sınırlı bir artış görülmektedir (2030'a kadar %15, 2050'ye kadar %55).

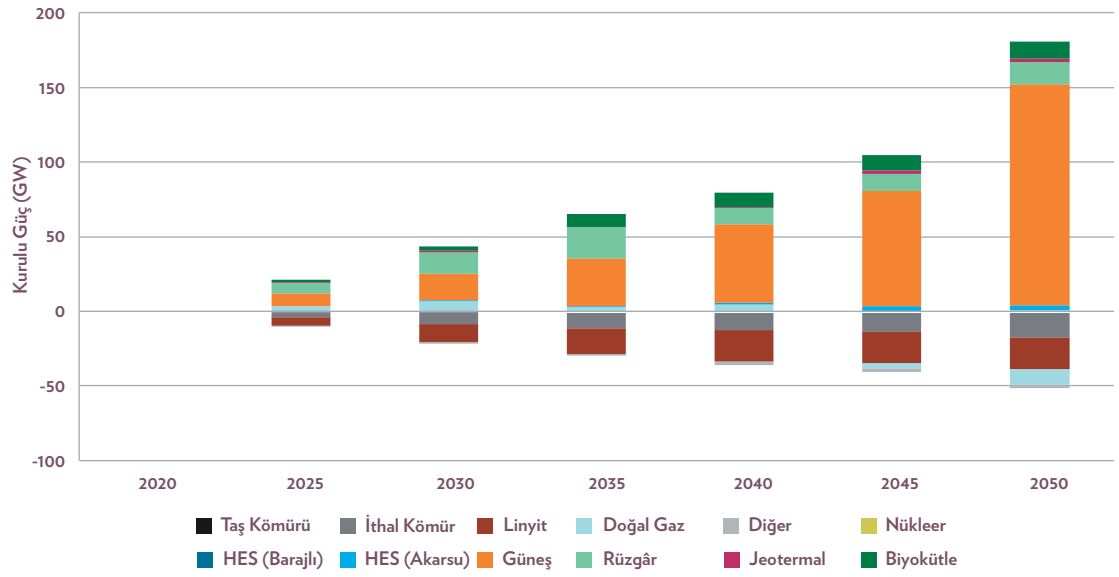
Net Sıfır Senaryosunda elektrik üretim kaynaklarının kurulu güç düzeylerinin Baz Senaryo ile farklılıkları Şekil 63'te gösterilmiştir.

Hedef yıllarda kurulu gücün TEİAŞ yük tevzi bölgelerine göre dağılımı Şekil 64 – Şekil 69 arasında paylaşılmıştır.

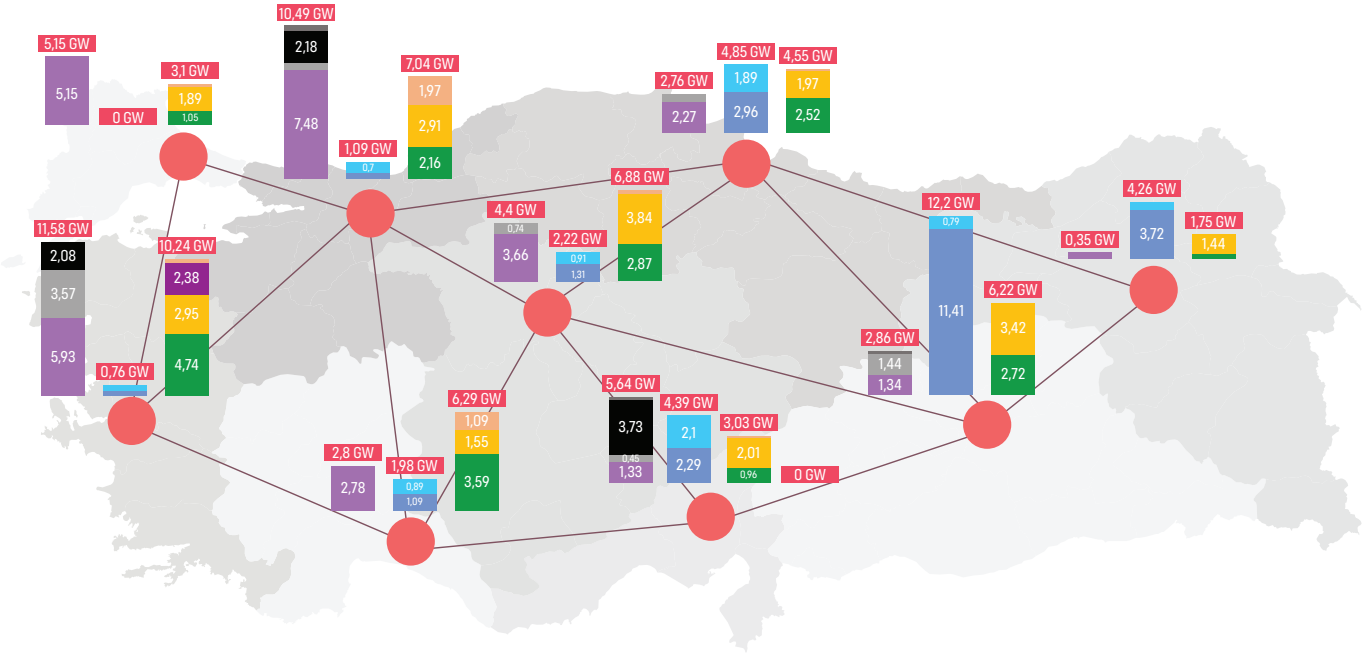
Net Sıfır Senaryosunda doğal gaz, toplam kömür (taş kömürü, ithal kömür ve linyit) ve toplam yenilenebilir (rüzgâr, güneş, biyokütle ve jeotermal) kurulu güçlerinin yıllara göre değişimi Şekil 70, Şekil 71 ve Şekil 72'de gösterilmiştir.

Net Sıfır Senaryosunda hedef yıllardaki yenilenebilir santrallerin konum ve kurulu güçleri Şekil 73 - Şekil 78 arasında gösterilmiştir.

Şekil 63 Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynakların kurulu güç olarak Baz Senaryoya göre değişimi



Şekil 64 Net Sıfır Senaryosunda 2025 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (GW) | Linyit (GW) | İthal Kömür (GW) | Taş Kömürü (GW)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (GW) | HES (Akarsu) (GW)

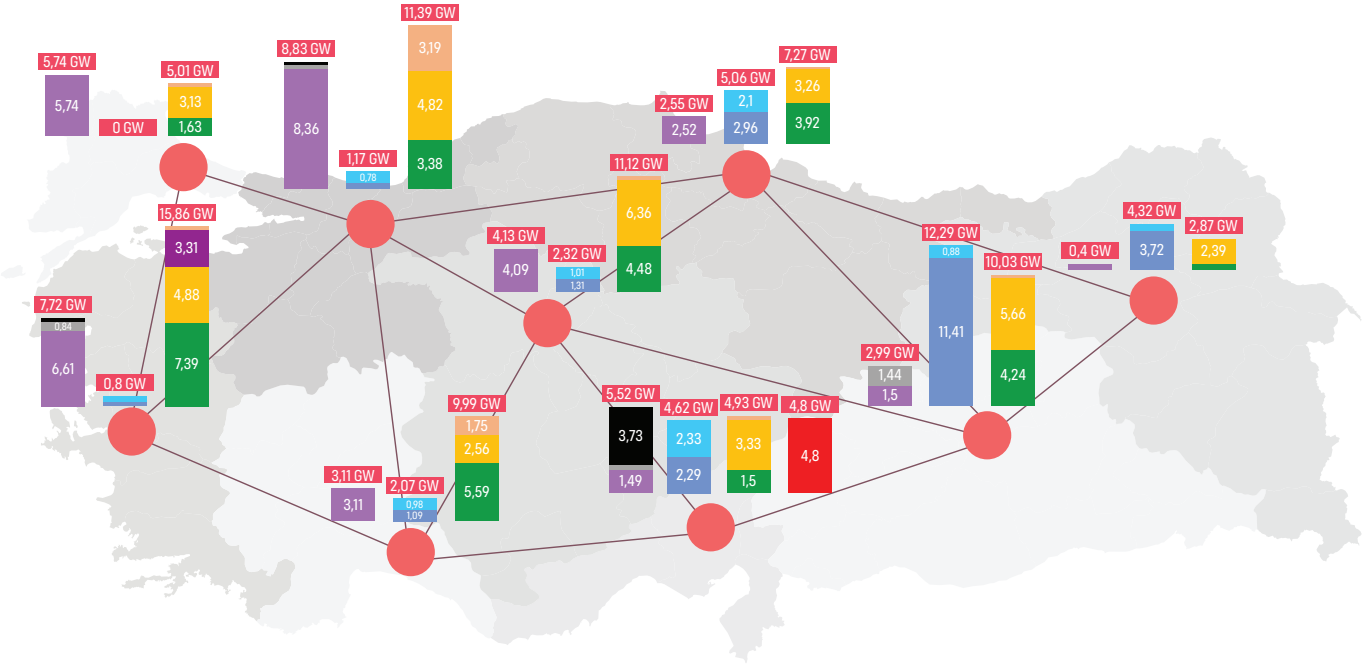
Rüzgar (GW) | Güneş (GW) | Jeotermal (GW) | Biyokütle (GW)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (GW)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 65 Net Sıfır Senaryosunda 2030 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (GW) | Linyit (GW) | İthal Kömür (GW) | Taş Kömürü (GW)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (GW) | HES (Akarsu) (GW)

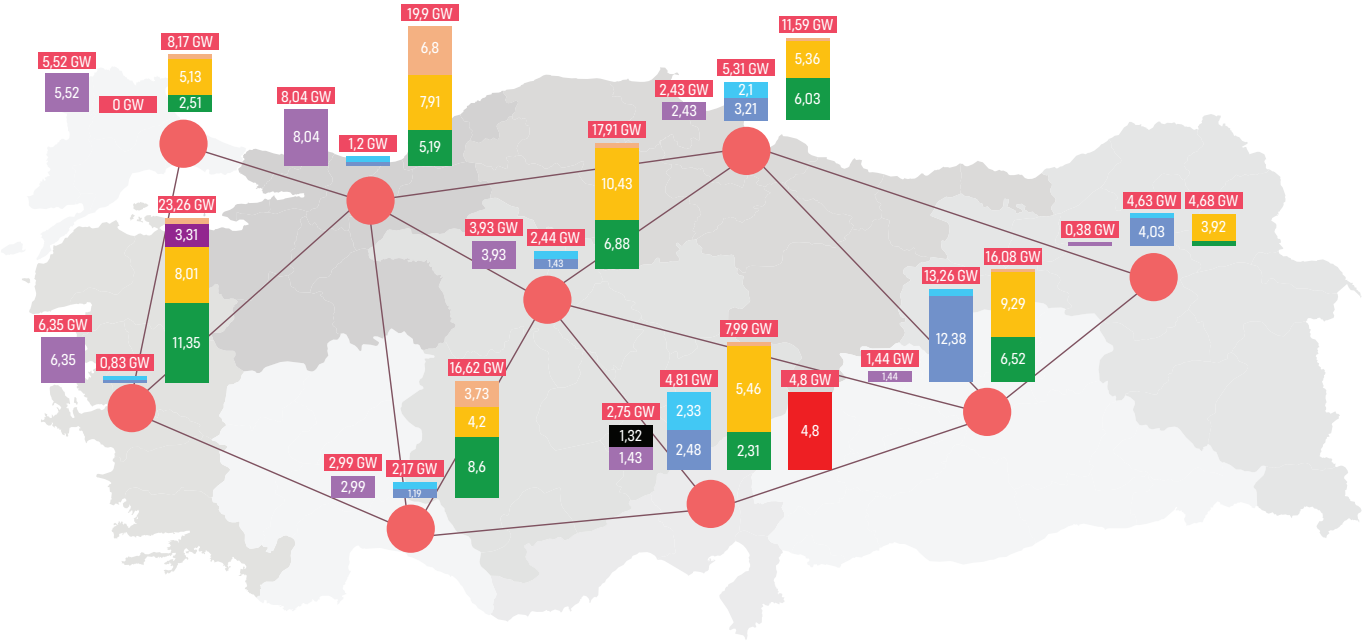
Rüzgar (GW) | Güneş (GW) | Jeotermal (GW) | Biyokütle (GW)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (GW)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 66 Net Sıfır Senaryosunda 2035 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (GW) | Linyit (GW) | İthal Kömür (GW) | Taş Kömürü (GW)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (GW) | HES (Akarsu) (GW)

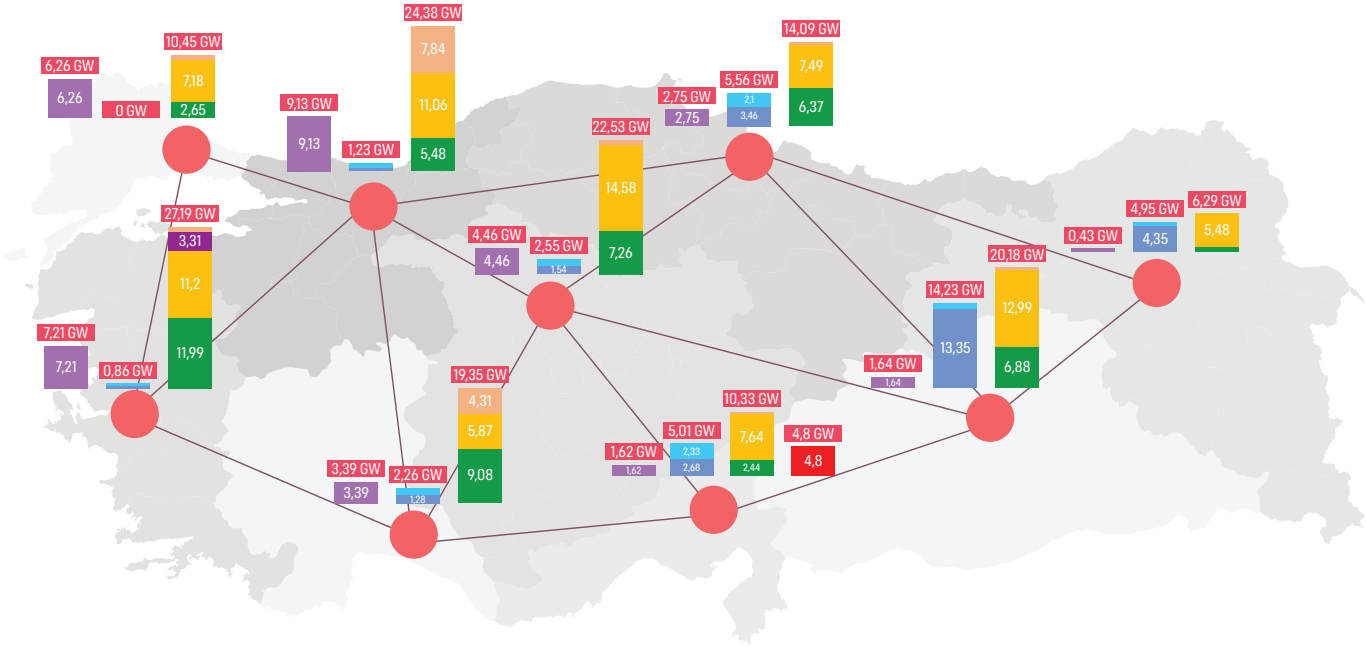
Rüzgar (GW) | Güneş (GW) | Jeotermal (GW) | Biyokütle (GW)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (GW)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 67 Net Sıfır Senaryosunda 2040 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (GW) | Linyit (GW) | İthal Kömür (GW) | Taş Kömürü (GW)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (GW) | HES (Akarsu) (GW)

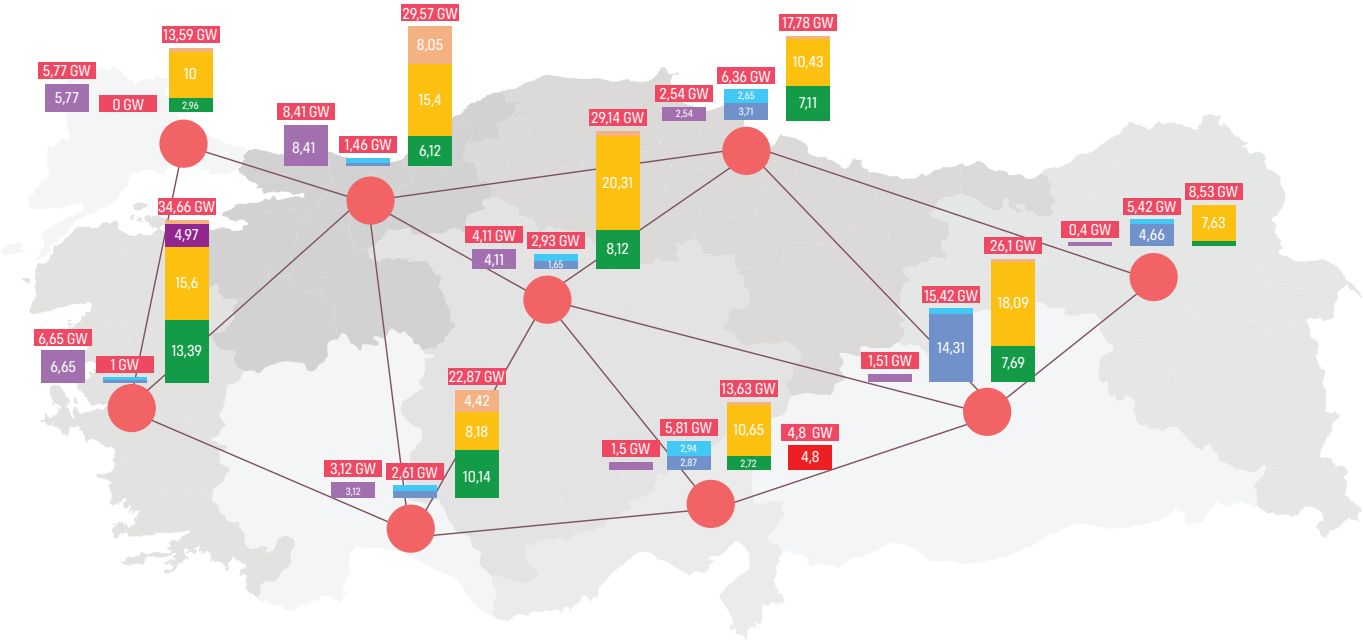
Rüzgar (GW) | Güneş (GW) | Jeotermal (GW) | Biyokütle (GW)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (GW)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 68 Net Sıfır Senaryosunda 2045 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (GW) | Linyit (GW) | İthal Kömür (GW) | Taş Kömürü (GW)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (GW) | HES (Akarsu) (GW)

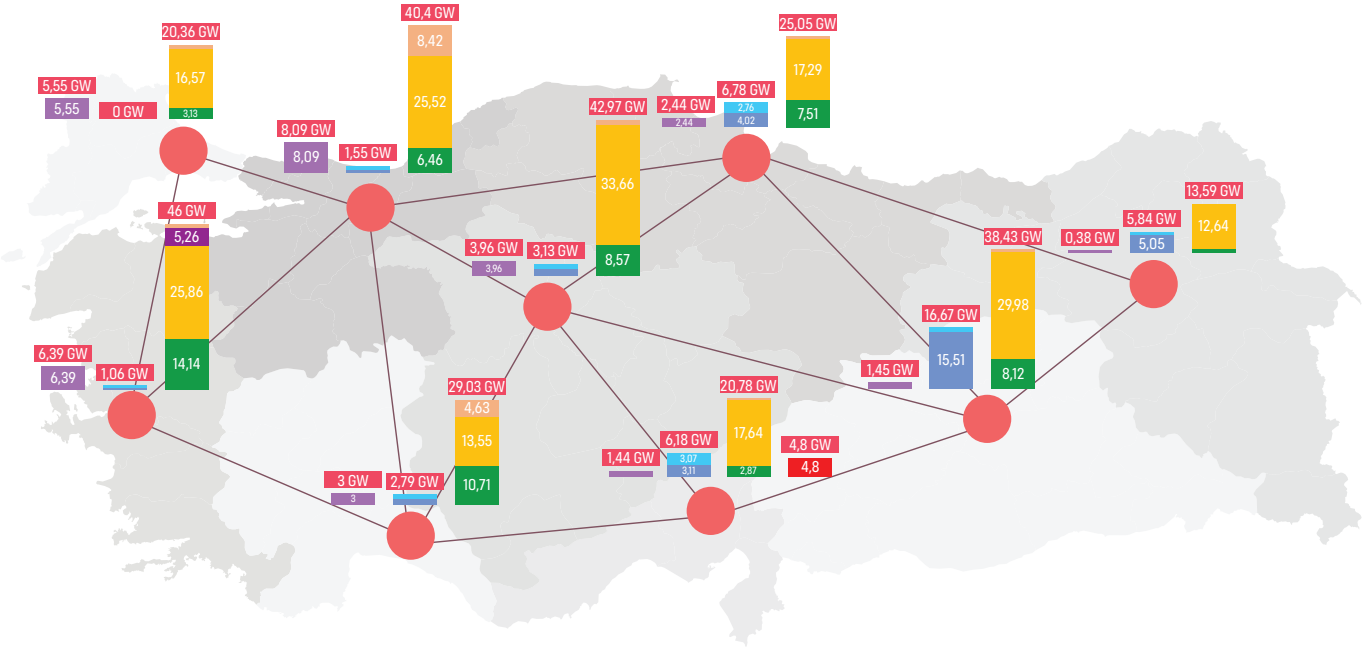
Rüzgar (GW) | Güneş (GW) | Jeotermal (GW) | Biyokütle (GW)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (GW)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 69 Net Sıfır Senaryosunda 2050 yılı kurulu gücünün TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (GW) | Linyit (GW) | İthal Kömür (GW) | Taş Kömürü (GW)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (GW) | HES (Akarsu) (GW)

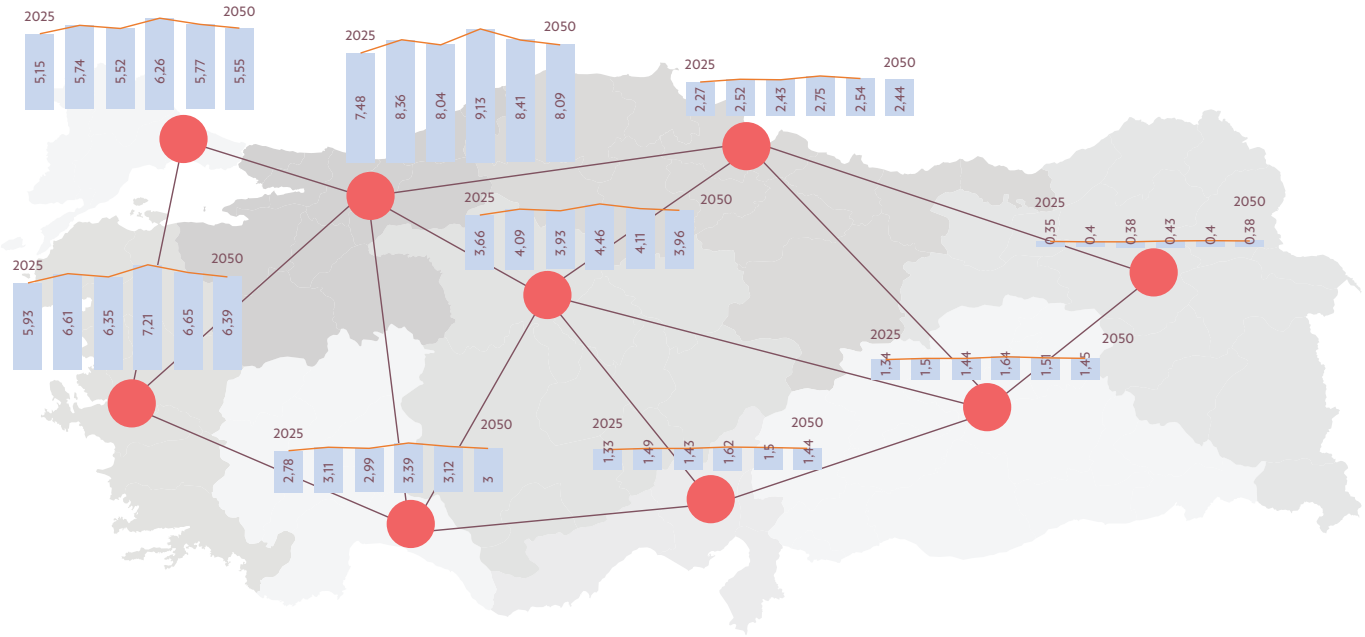
Rüzgar (GW) | Güneş (GW) | Jeotermal (GW) | Biyokütle (GW)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

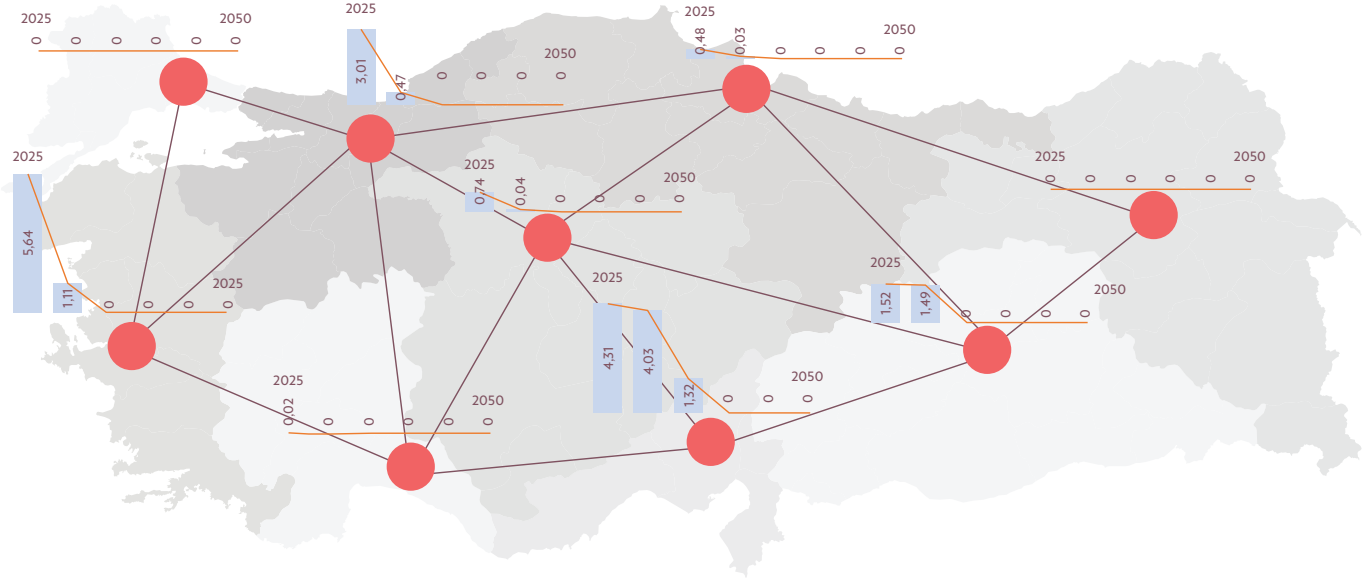
Nükleer (GW)

4. Sütun / Nükleer Enerji

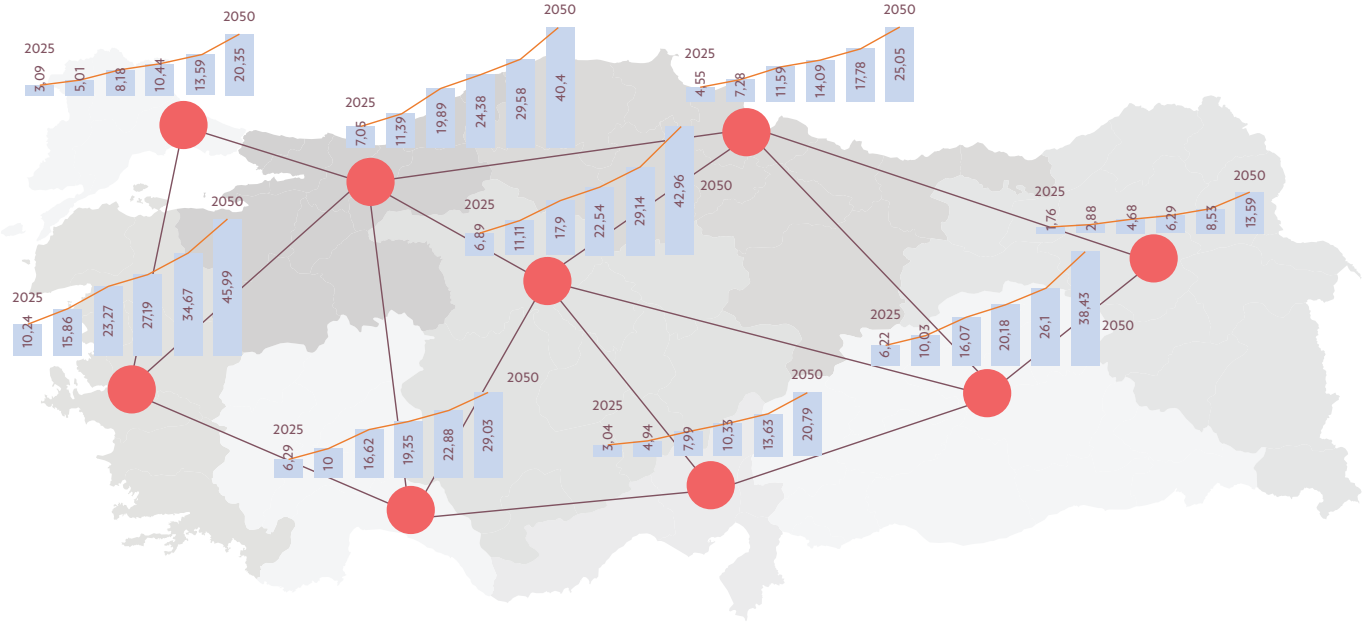
Şekil 70 Net Sıfır Senaryosunda TEİAŞ Yük Tevzi Merkezlerinde doğal gaz kurulu gücünün yıllara göre değişimi



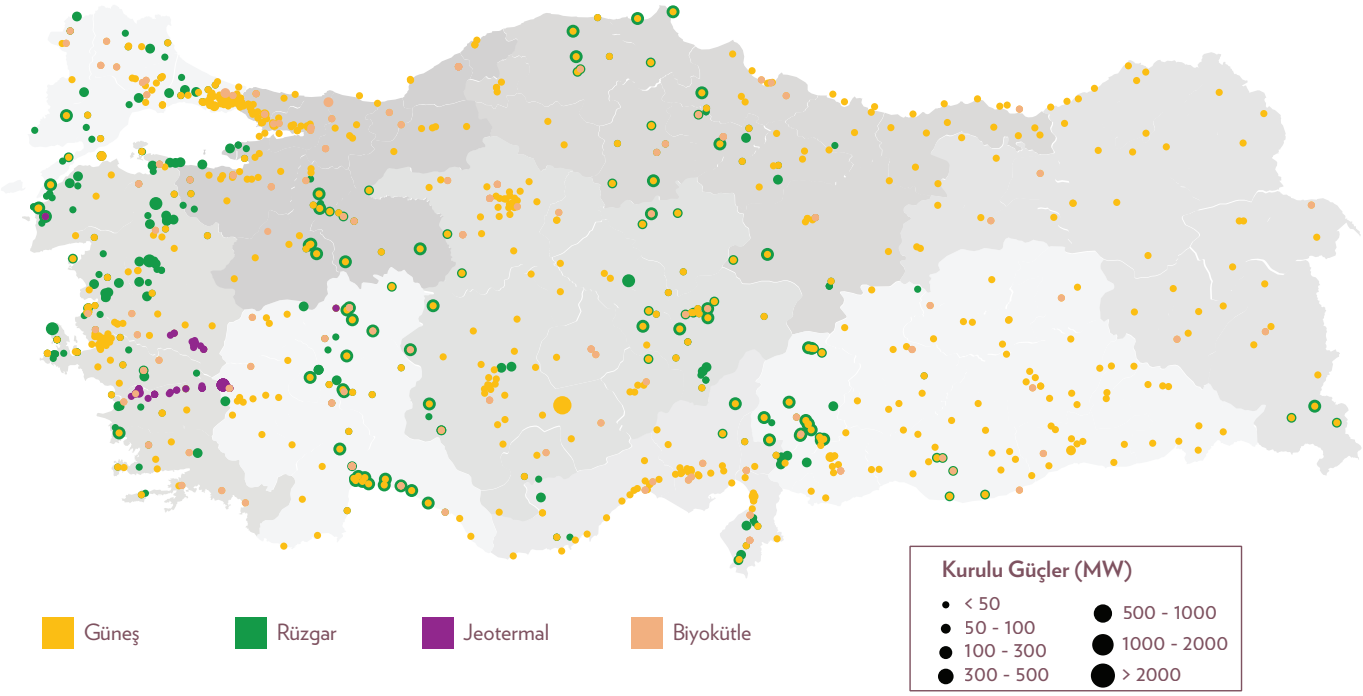
Şekil 71 Net Sıfır Senaryosunda TEİAŞ Yük Tevzi Merkezlerinde toplam kömür kurulu gücünün yıllara göre değişimi



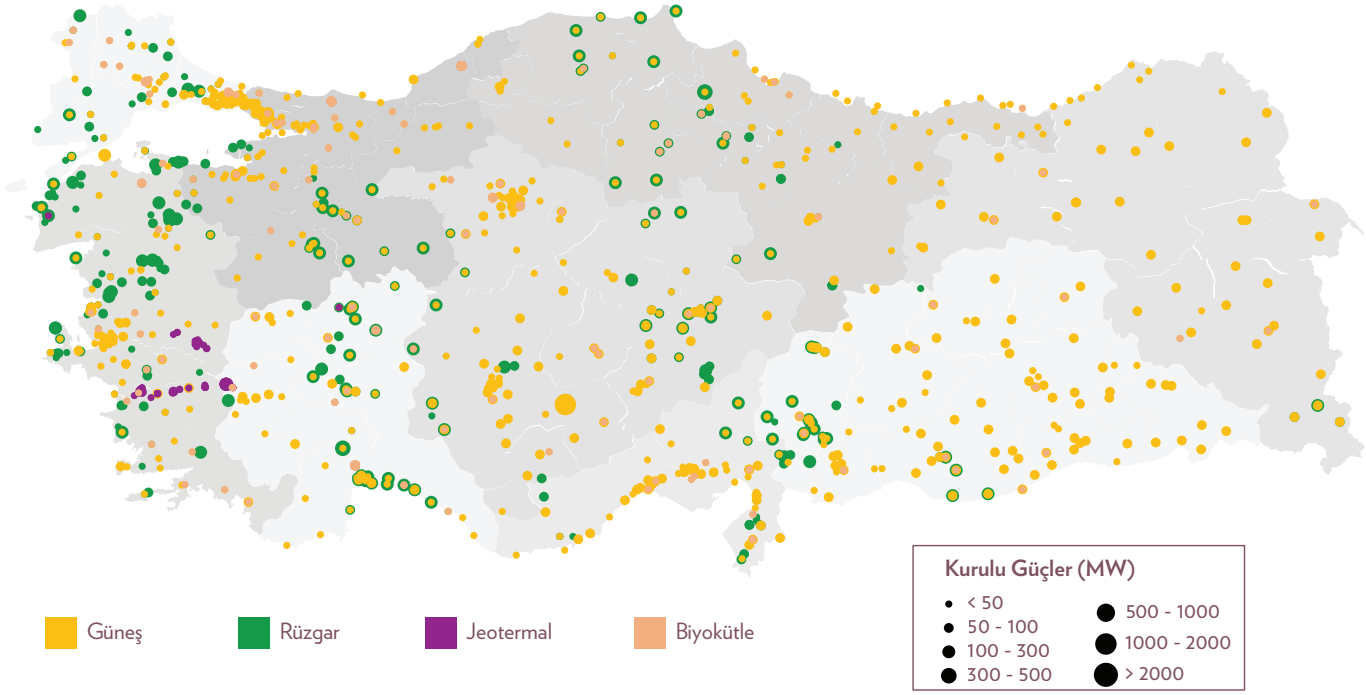
Şekil 72 Net Sıfır Senaryosunda TEİAŞ Yük Tevzi Merkezlerinde toplam yenilenebilir kurulu gücünün yıllara göre değişimi



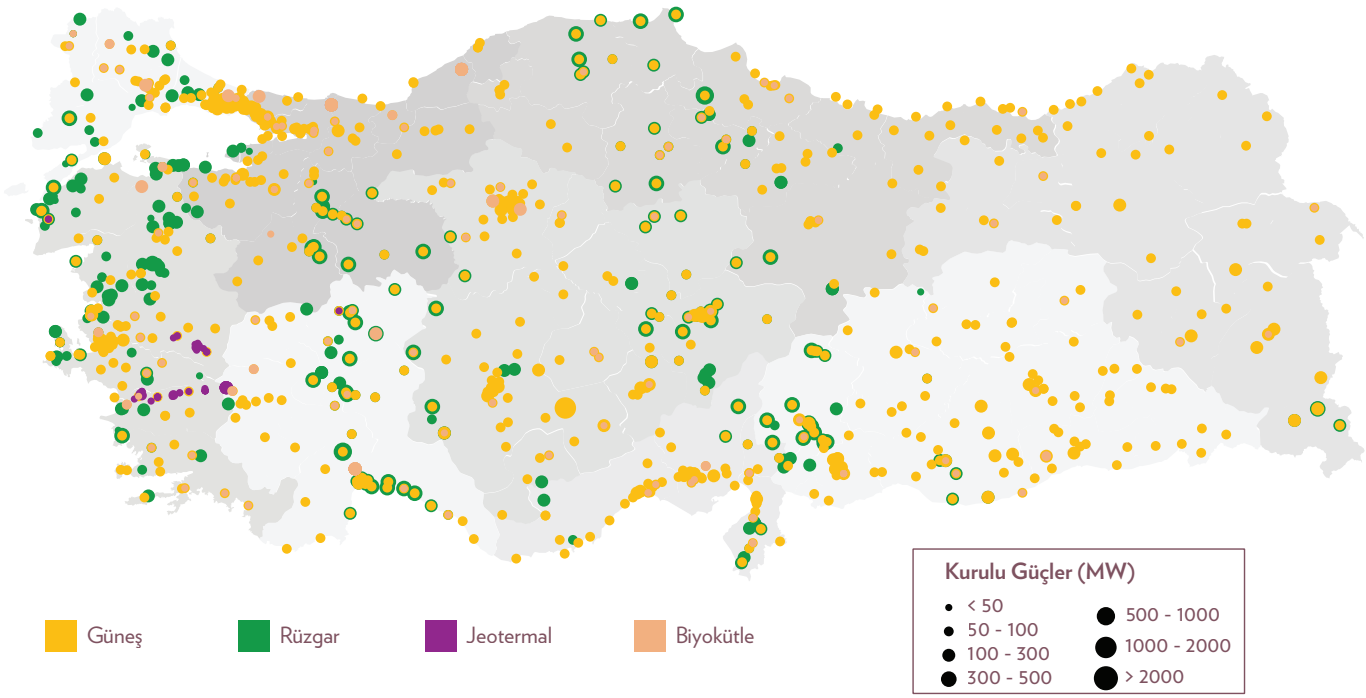
Şekil 73 Net Sıfır Senaryosunda 2025 yılı yenilenebilir santrallerin konumu ve kurulu güçleri



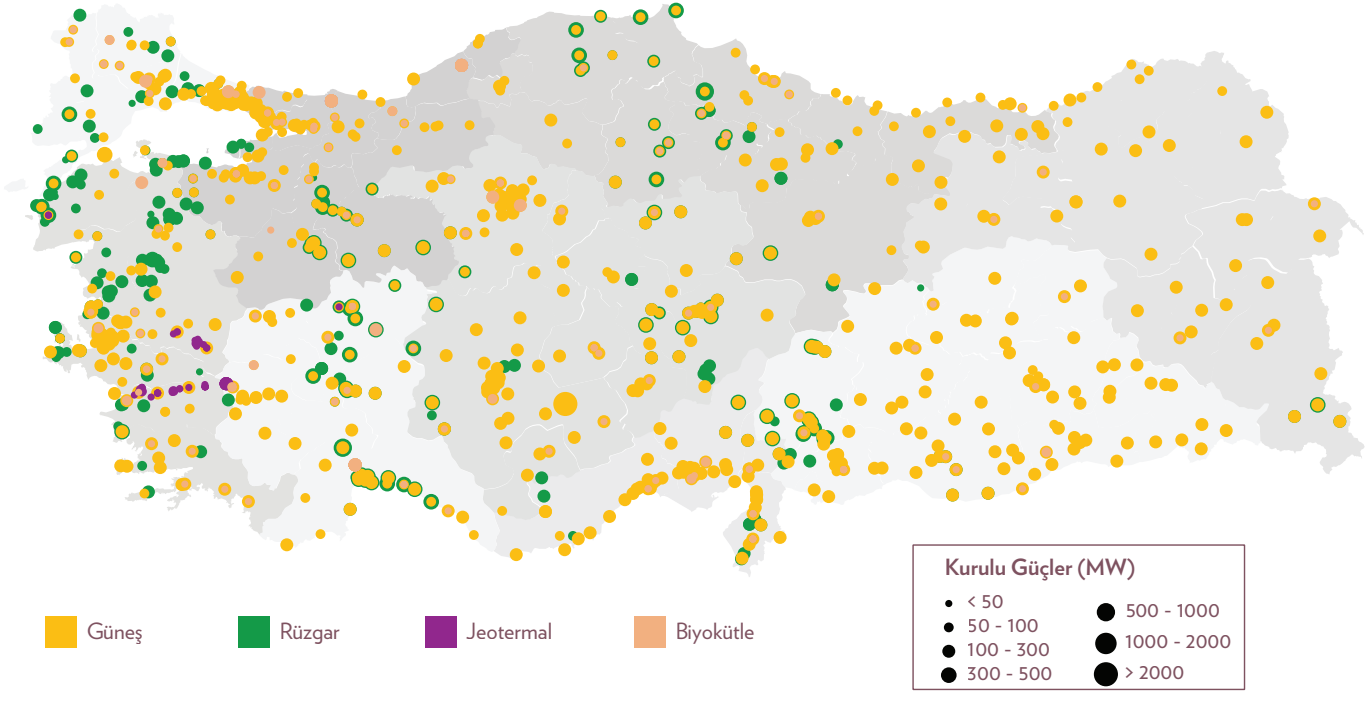
Şekil 74 Net Sıfır Senaryosunda 2030 yılı yenilenebilir santrallerin konumu ve kurulu güçleri



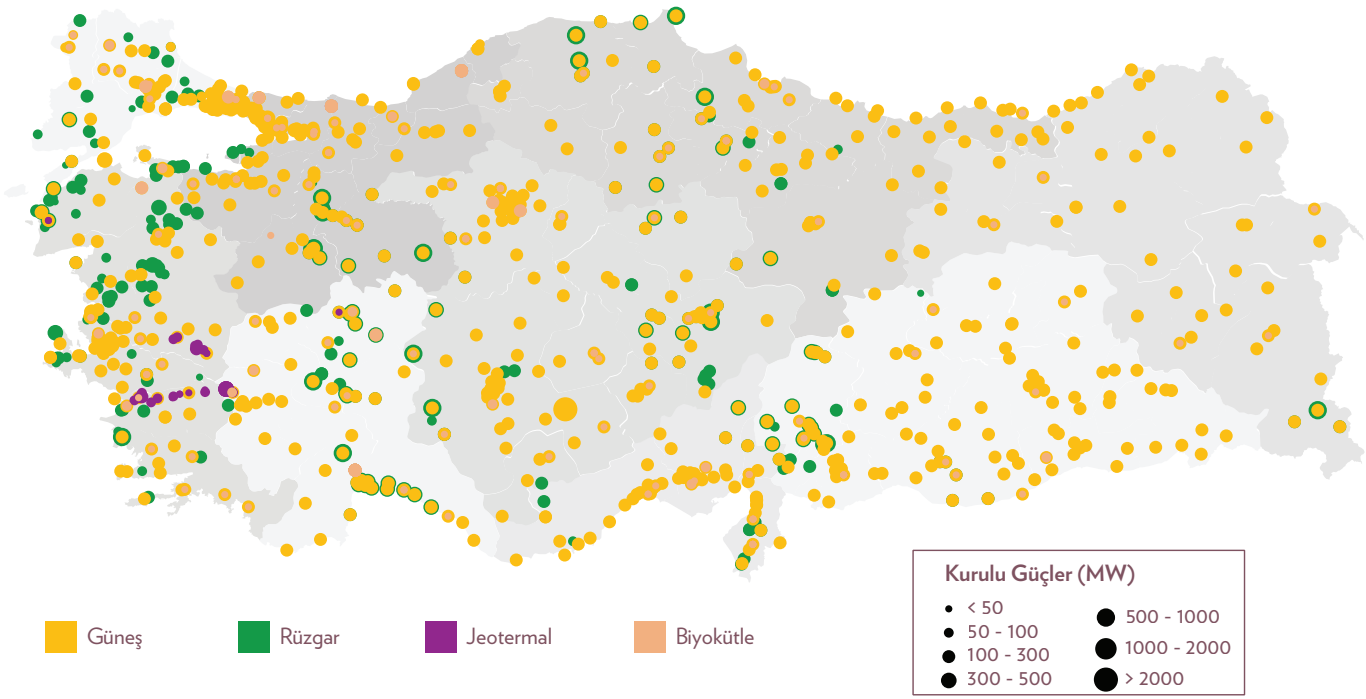
Şekil 75 Net Sıfır Senaryosunda 2035 yılı yenilenebilir santrallerin konumu ve kurulu güçleri



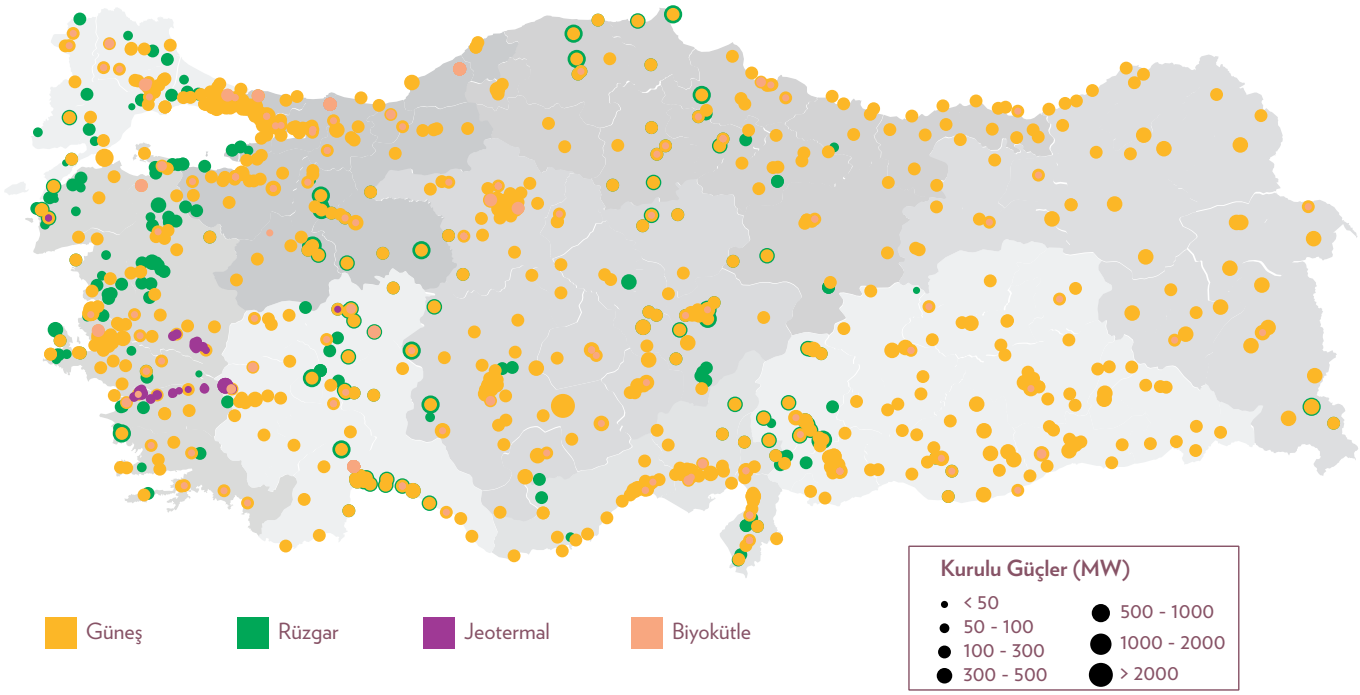
Şekil 76 Net Sıfır Senaryosunda 2040 yılı yenilenebilir santrallerin konumu ve kurulu güçleri



Şekil 77 Net Sıfır Senaryosunda 2045 yılı yenilenebilir santrallerin konumu ve kurulu güçleri



Şekil 78 Net Sıfır Senaryosunda 2050 yılı yenilenebilir santrallerin konumu ve kurulu güçleri



1.5.3. Kaynaklara Göre Enerji Üretimi

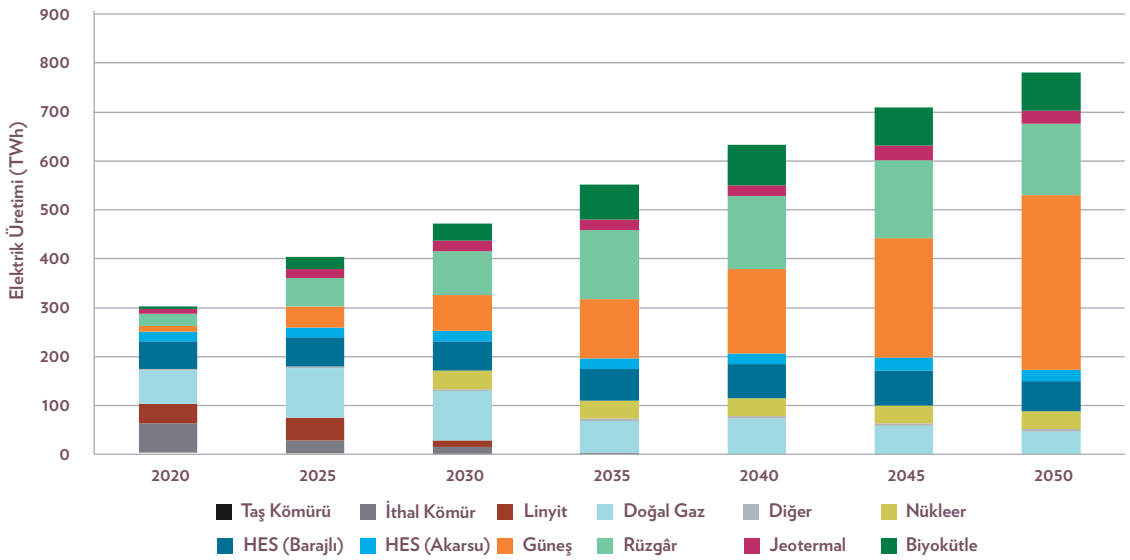
Net Sıfır Senaryosunda hedef yıllarda üretimin kaynaklara göre dağılımı Tablo 18 ve Şekil 79'da verilmiştir.

Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası: 2050'de Net Sıfır (İPM, 2021) raporu ile karşılaştırıldığında bu değerlerin farklı olmasının nedeni, bu çalışmada piyasa simülasyonlarına ek olarak şebeke simülasyonlarının da yapılmış olmasıdır. Şebeke kısıtları da göz önüne alındığı için, şebeke darboğazlarının giderilmesi için verilen YAL/YAT talimatları ve yenilenebilir enerji üretimindeki kesintiler doğalgaz üretim miktarında artışa yol açmıştır.

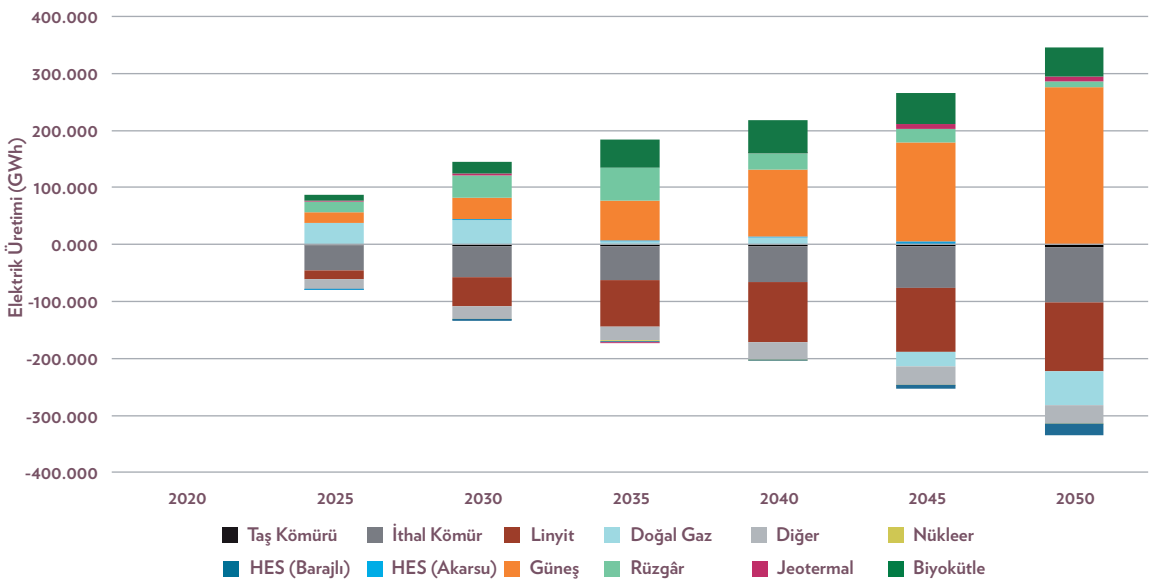
Tablo 18. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin gelişimi (GWh)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Nükleer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biokütle	Toplam
2020	4.110	60.090	39.850	68.400	2.463	0	55.810	21.010	11.530	23.790	10.690	4.279	302.022
2025	2.860	26.418	46.870	100.291	4.226	0	58.961	20.082	42.617	58.719	17.701	25.992	404.737
2030	**1.011**	**14.073**	**14.485**	**100.564**	**4.124**	**37.493**	**59.206**	**22.177**	**72.482**	**89.728**	**22.145**	**34.816**	**472.304**
2035	0	4.585	0	63.964	4.962	36.583	64.663	22.481	120.409	140.936	21.397	71.945	551.925
2040	0	0	0	73.166	4.957	37.263	69.029	22.274	172.863	149.194	21.279	82.098	632.123
2045	0	0	0	58.413	5.082	36.923	70.439	26.659	244.256	159.483	29.196	79.150	709.601
2050	**0**	**0**	**0**	**46.997**	**4.851**	**37.083**	**61.664**	**22.679**	**356.380**	**145.733**	**27.862**	**77.311**	**780.560**

Şekil 79 Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin gelişimi (TWh)



Şekil 80 Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynakların üretim seviyelerinin Baz Senaryoya göre değişimi (GWh)

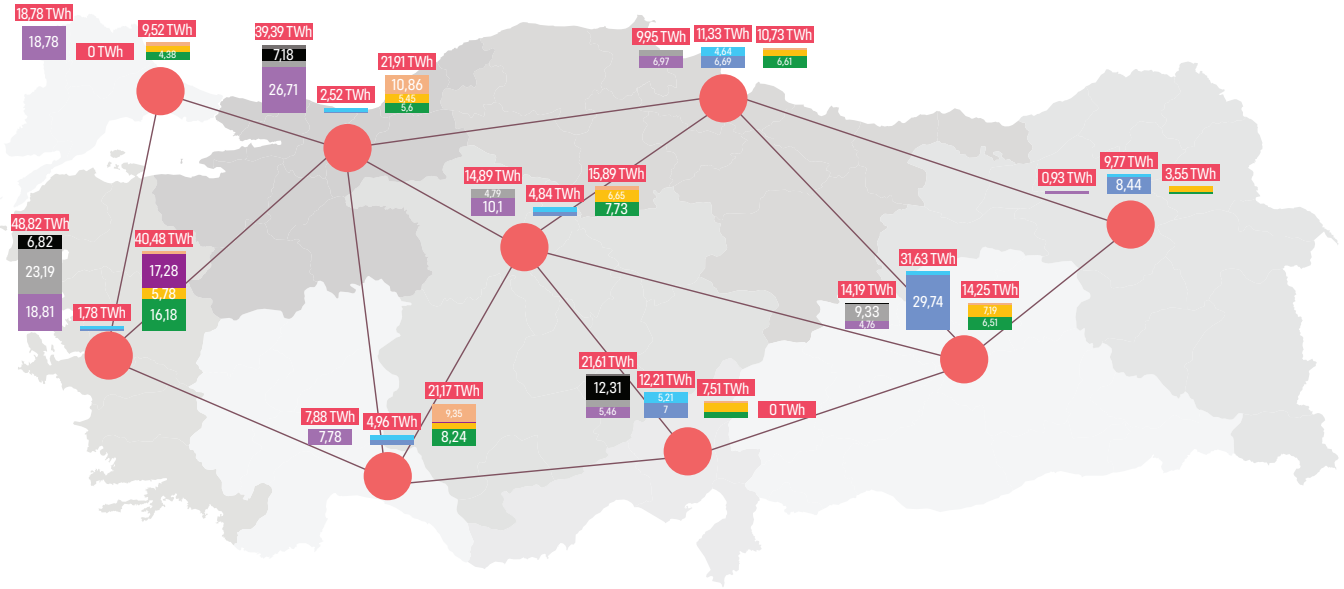


Net Sıfır Senaryosunda elektrik üretim teknolojilerinin üretim seviyelerinin Baz Senaryo ile farklılıkları Şekil 80'de gösterilmiştir.

Net Sıfır Senaryosunda termik santrallerin hızla devreden çıkması ile birlikte fosil yakıtların elektrik üretimindeki payı Baz Senaryoya göre çok daha erken ve büyük ölçüde azalırken modern yenilenebilir enerji kaynakları olan rüzgâr, güneş, biyokütle ve jeotermal santrallerinin kurulu güçlerindeki artış, modern yenilenebilirlerin üretimdeki payının baz senaryoya göre çok daha yüksek olmasına sebep olmuştur. Bu senaryoda üretimdeki payı 2020 yılında %17 olan modern yenilenebilirlerin payı gittikçe artarak 2050 yılında %80 düzeyine erişirken, fosil yakıt kaynaklarının üretimdeki payı hızla azalarak 2020 yılında %58'den 2050 yılına kadar %7'ye kadar düşmüştür. Her ne kadar hidroelektrik enerji üretim miktarı artış göstermiş olsa da kurulu güçlerindeki artış sınırlı olduğu için 2020'de %25,5 olan üretimdeki payları 2050'ye kadar %11'e düşmüştür. 2030'da %8 üretim payı düzeyinden elektrik sistemine giriş yapan nükleer santrallerin üretimdeki payı ise yıllar içinde azalarak 2050'de %5 seviyesine kadar düşmüştür.

Net Sıfır Senaryosunda hedef yıllardaki elektrik enerjisi üretiminin TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerinde üretim teknolojisine göre dağılımları Şekil 81 - Şekil 86 arasında gösterilmiştir.

Şekil 81 Net Sıfır Senaryosunda 2025 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (TWh) | Linyit (TWh) | İthal Kömür (TWh) | Taş Kömürü (TWh)

Rüzgar (TWh) | Güneş (TWh) | Jeotermal (TWh) | Biyokütle (TWh)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

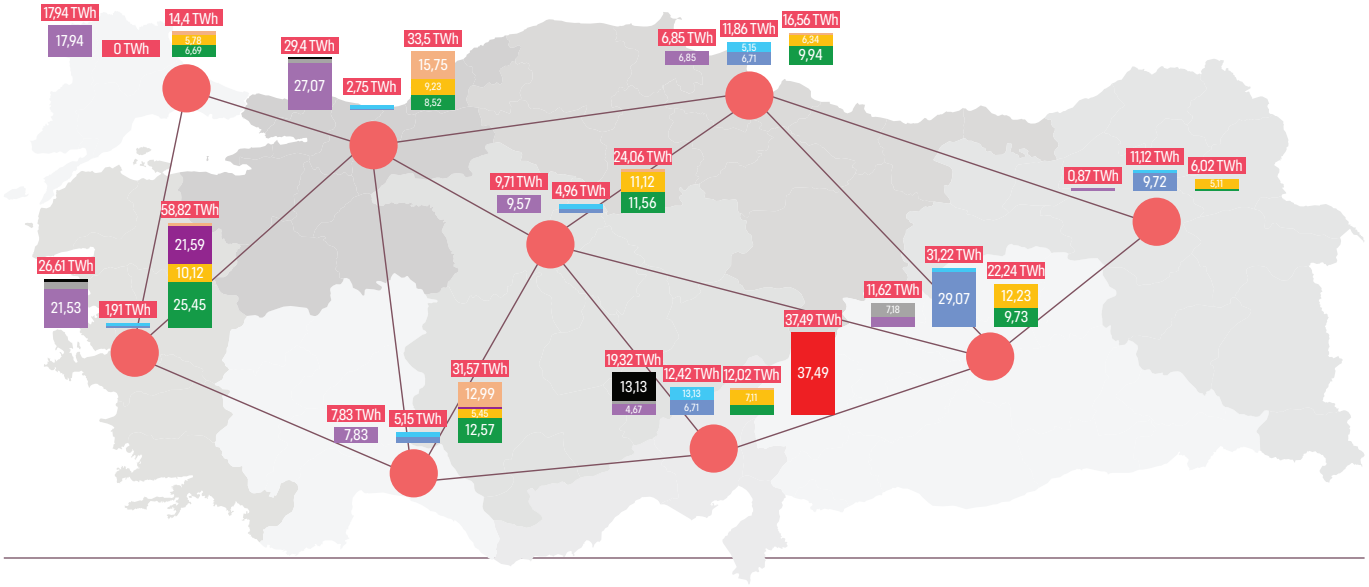
2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (TWh) | HES (Akarsu) (TWh)

Nükleer (TWh)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 82 Net Sıfır Senaryosunda 2030 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (TWh) | Linyit (TWh) | İthal Kömür (TWh) | Taş Kömürü (TWh)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (TWh) | HES (Akarsu) (TWh)

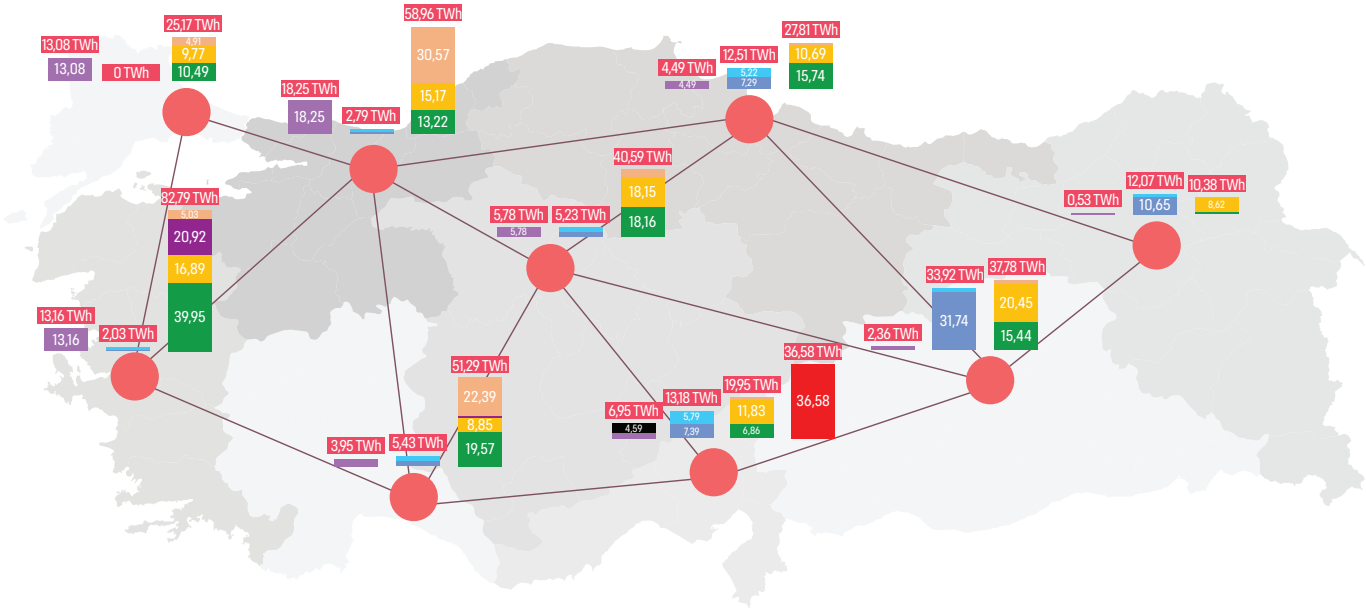
Rüzgar (TWh) | Güneş (TWh) | Jeotermal (TWh) | Biyokütle (TWh)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (TWh)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 83 Net Sıfır Senaryosunda 2035 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (TWh) | Linyit (TWh) | İthal Kömür (TWh) | Taş Kömürü (TWh)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (TWh) | HES (Akarsu) (TWh)

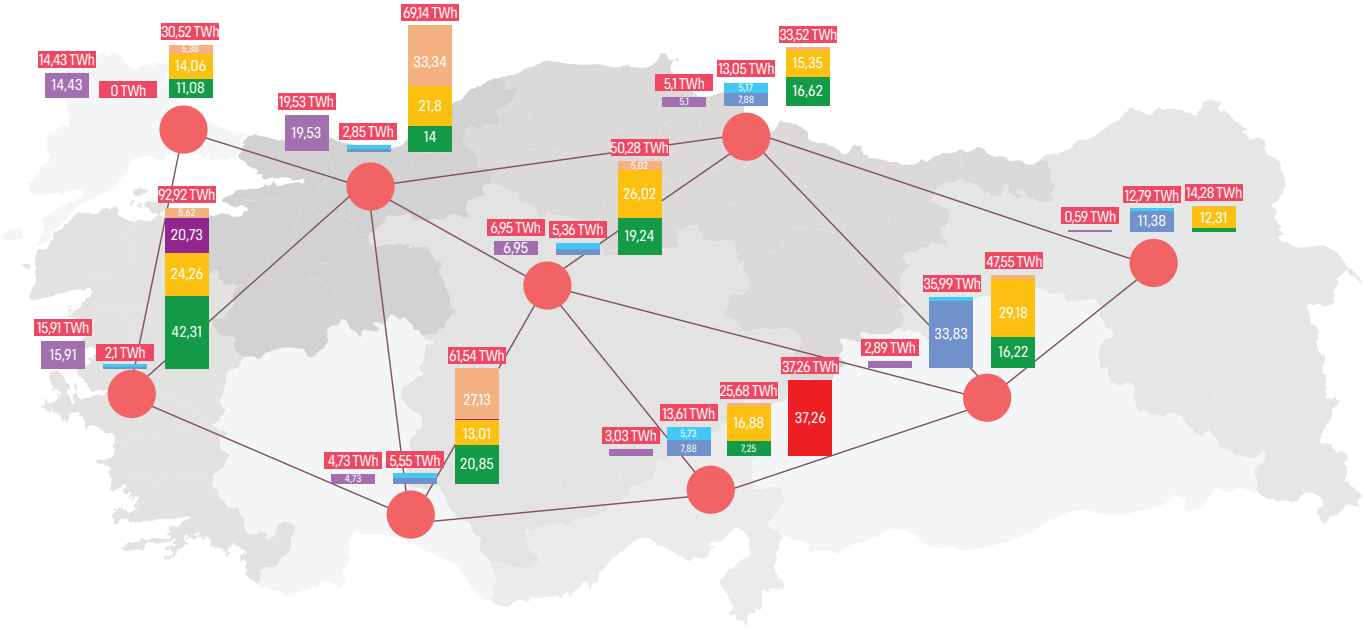
Rüzgar (TWh) | Güneş (TWh) | Jeotermal (TWh) | Biyokütle (TWh)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (TWh)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 84 Net Sıfır Senaryosunda 2040 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (TWh) | Linyit (TWh) | İthal Kömür (TWh) | Taş Kömürü (TWh)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (TWh) | HES (Akarsu) (TWh)

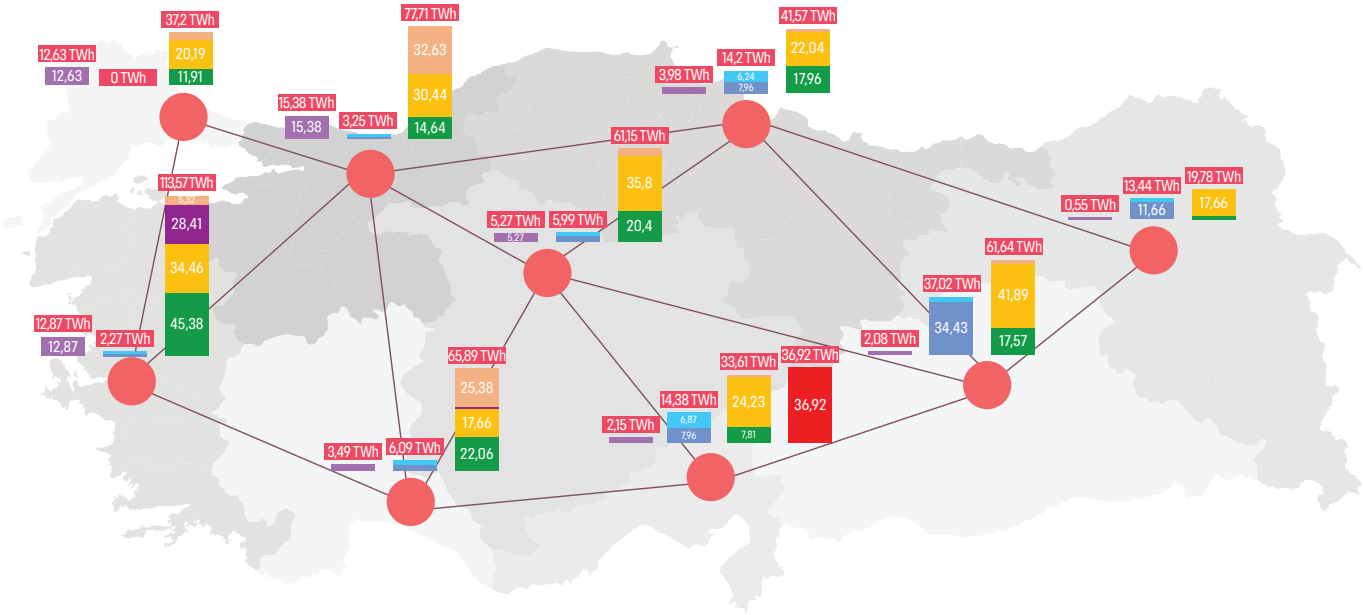
Rüzgar (TWh) | Güneş (TWh) | Jeotermal (TWh) | Biyokütle (TWh)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

Nükleer (TWh)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 85 Net Sıfır Senaryosunda 2045 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (TWh) | Linyit (TWh) | İthal Kömür (TWh) | Taş Kömürü (TWh)

Rüzgar (TWh) | Güneş (TWh) | Jeotermal (TWh) | Biyokütle (TWh)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

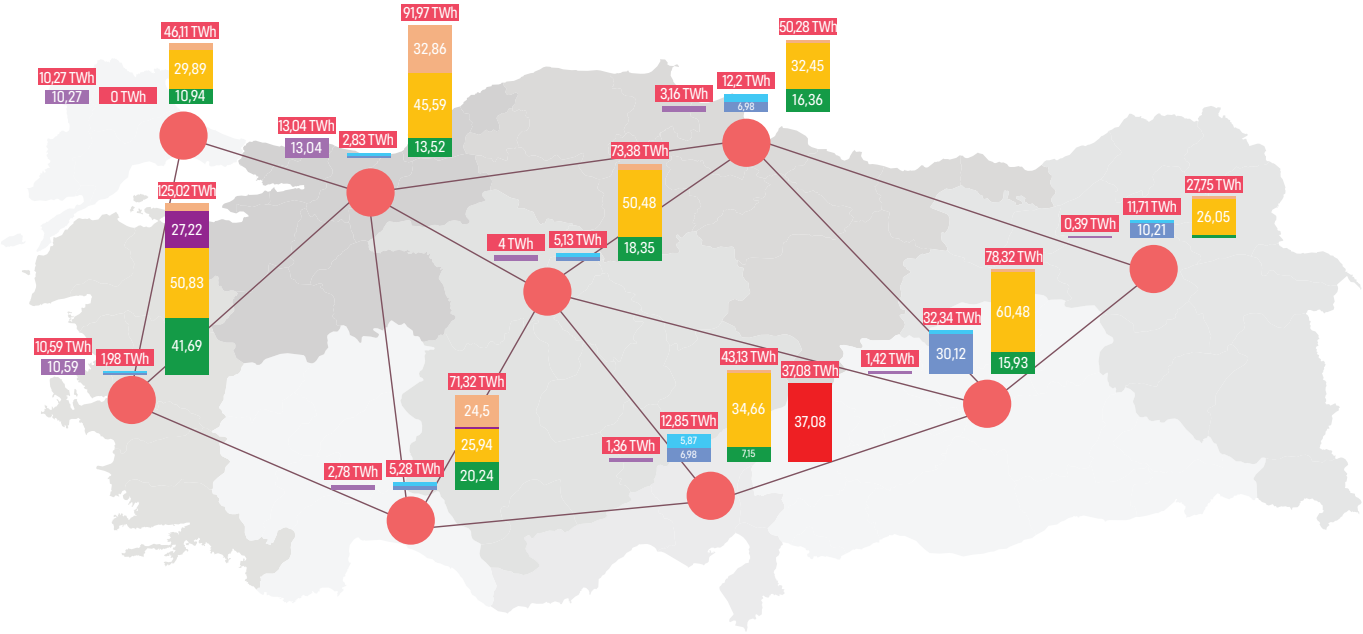
2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (TWh) | HES (Akarsu) (TWh)

Nükleer (TWh)

4. Sütun / Nükleer Enerji

Şekil 86 Net Sıfır Senaryosunda 2050 yılı üretiminin TEİAŞ bölgelerinde teknoloji bazlı dağılımı



1. Sütun / Fosil Yakıtlar

Doğalgaz (TWh) | Linyit (TWh) | İthal Kömür (TWh) | Taş Kömürü (TWh)

2. Sütun / Hidroelektrik Santralleri

HES (Barajlı) (TWh) | HES (Akarsu) (TWh)

Rüzgar (TWh) | Güneş (TWh) | Jeotermal (TWh) | Biyokütle (TWh)

3. Sütun / Yenilenebilir Enerji

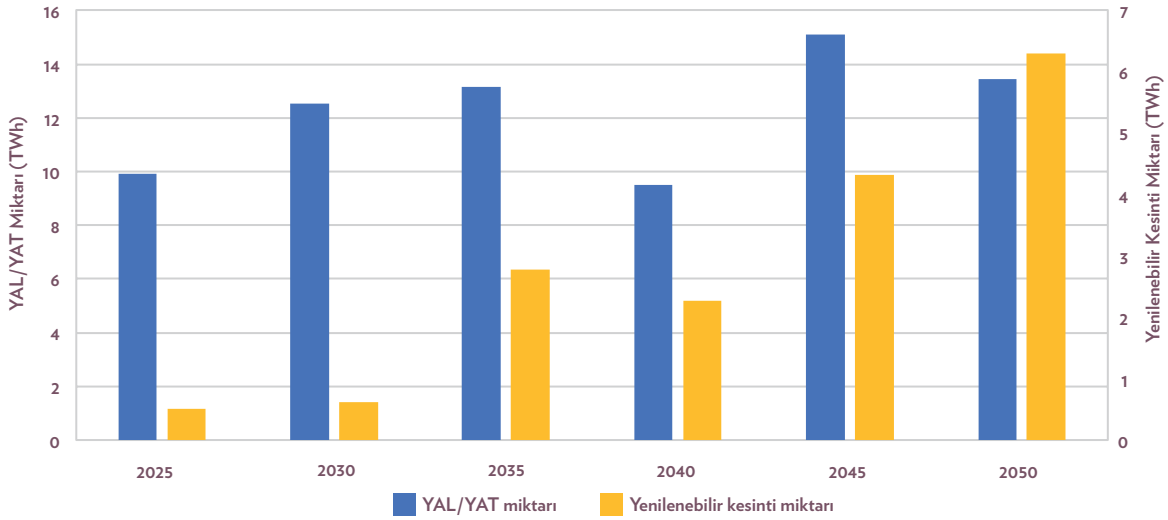
Nükleer (TWh)

4. Sütun / Nükleer Enerji

1.5.4. YAL/YAT ve Yenilenebilir Kesinti Miktarı

Net Sıfır Senaryosunda hedef yıllardaki toplam YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarları Şekil 87 ve Tablo 19'da; YAL/YAT miktarının toplam tüketime oranı ve yenilenebilir üretimdeki kesintinin toplam yenilenebilir üretimine oranı Şekil 88 ve Tablo 20'de gösterilmiştir. Konvansiyonel santrallerin hızla azalması ve yenilenebilir üretimdeki önemli artış, bu senaryoda genellikle daha yüksek YAL/YAT talimatı ve yenilenebilir üretimde kesinti gözlemlenmesine yol açmıştır. Ancak, YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarları depolama sistemlerinin kapasitesine ve şebeke yatırımlarına da bağlıdır. Depolama ve şebeke yatırımlarının yüksek penetrasyonu, 2035 yılına kıyasla 2040 yılında daha az YAL/YAT ve kesintiye yol açmaktadır.

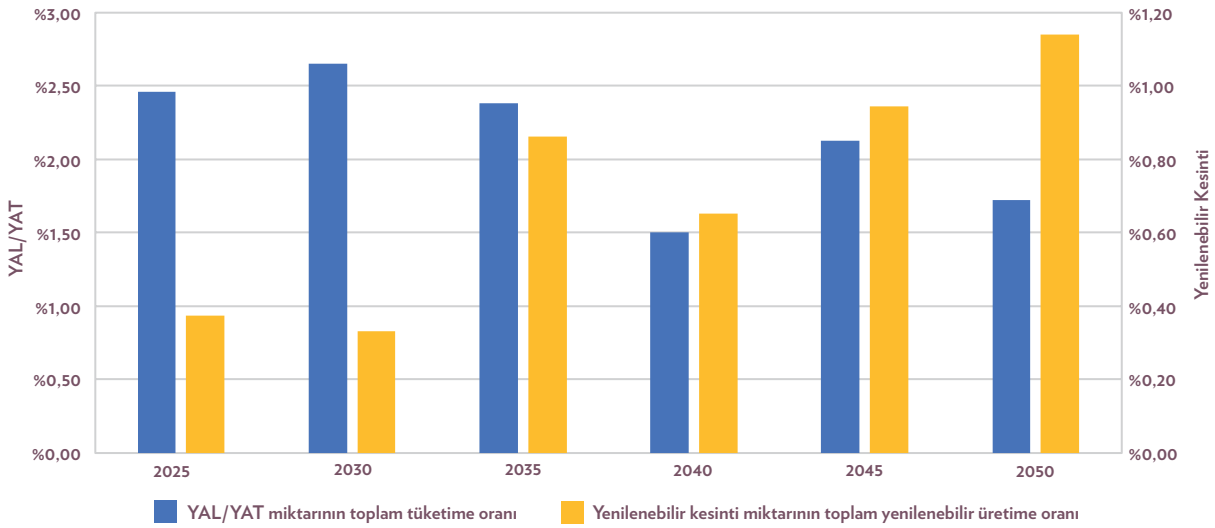
Şekil 87 Net Sıfır Senaryosunda YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarları



Tablo 19. Net Sıfır Senaryosunda YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarları

	YAL/YAT miktarı (TWh)	Yenilenebilir kesinti miktarı (TWh)
2025	9,92	0,50
2030	12,53	0,62
2035	13,15	2,77
2040	9,49	2,28
2045	15,12	4,31
2050	13,43	6,29

Şekil 88 Net Sıfır Senaryosunda YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti oranları

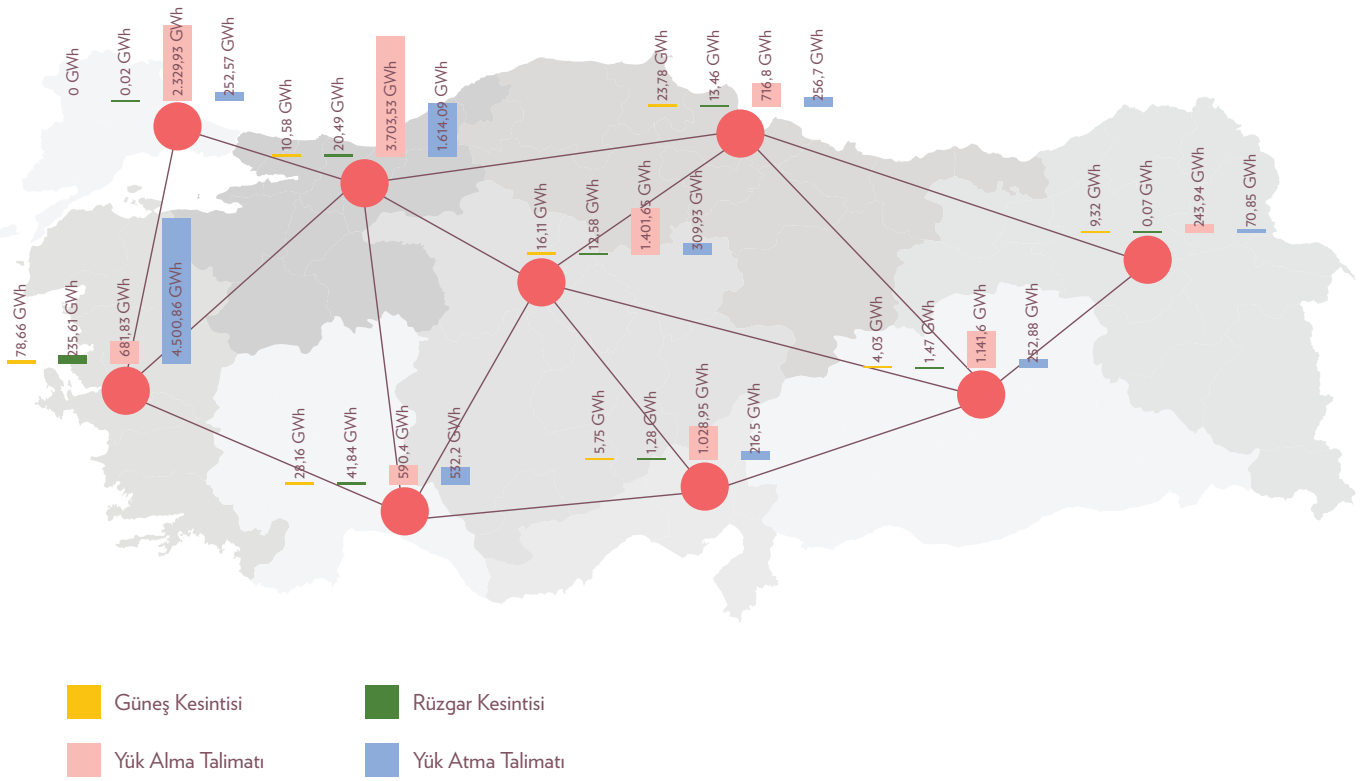


Tablo 20. Net Sıfır Senaryosunda YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti oranları

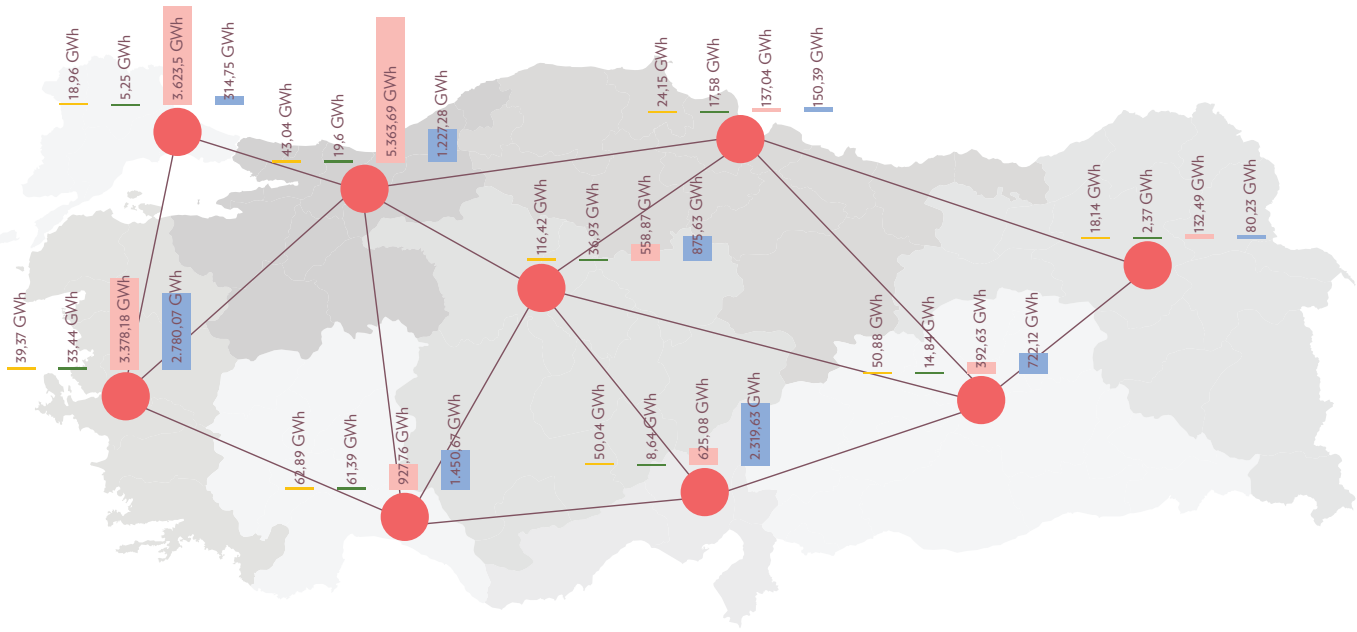
	YAL/YAT miktarının toplam tüketime oranı	Yenilenebilir kesinti miktarının toplam yenilenebilir üretime oranı
2025	%2,46	%0,38
2030	%2,65	%0,33
2035	%2,38	%0,86
2040	%1,50	%0,65
2045	%2,13	%0,94
2050	%1,72	%1,14

Hedef yıllarda TEİAŞ bölgelerinde toplam YAL/YAT ve yenilenebilir üretimdeki kesinti miktarları Şekil 89 –Şekil 94 arasında verilmiştir.

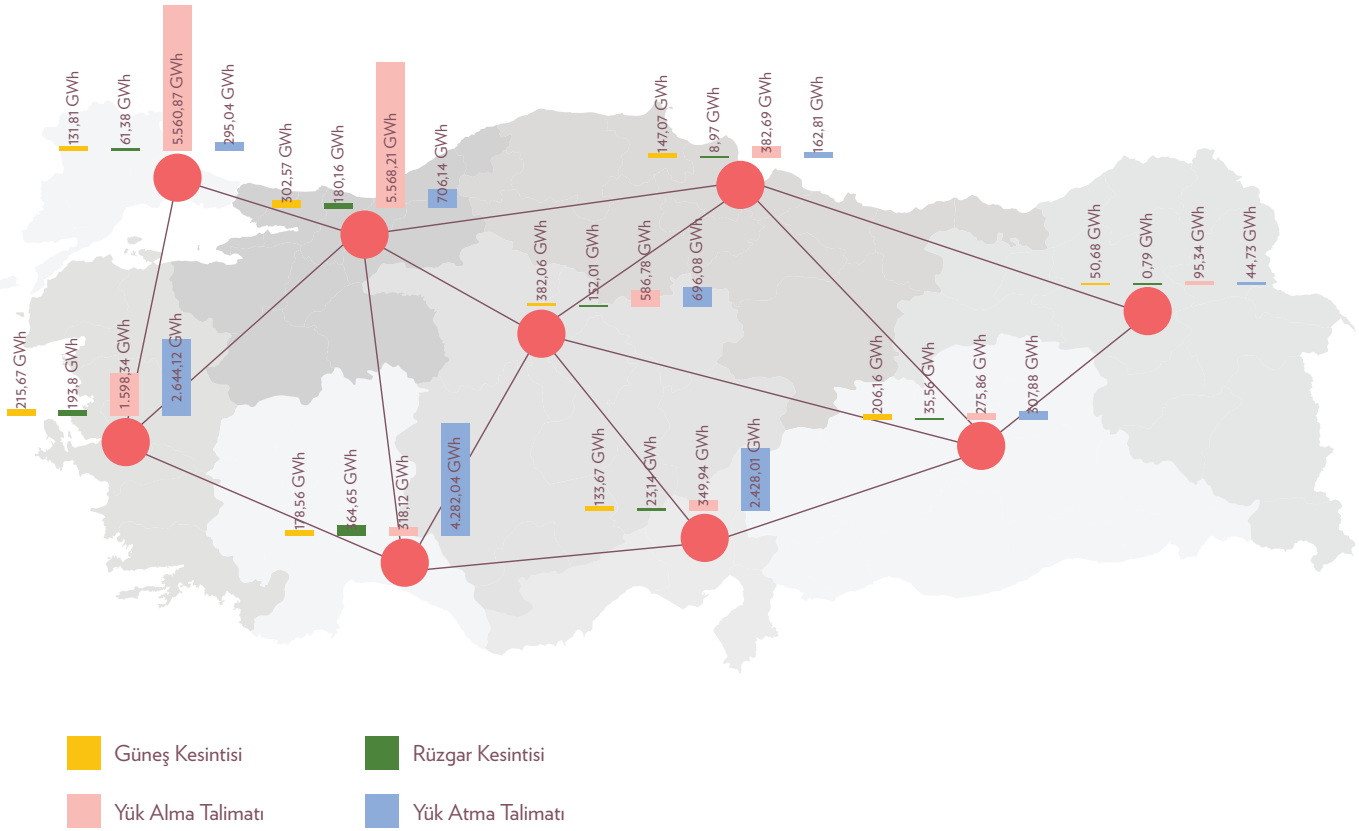
Şekil 89 Net Sıfır Senaryosunda 2025 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı



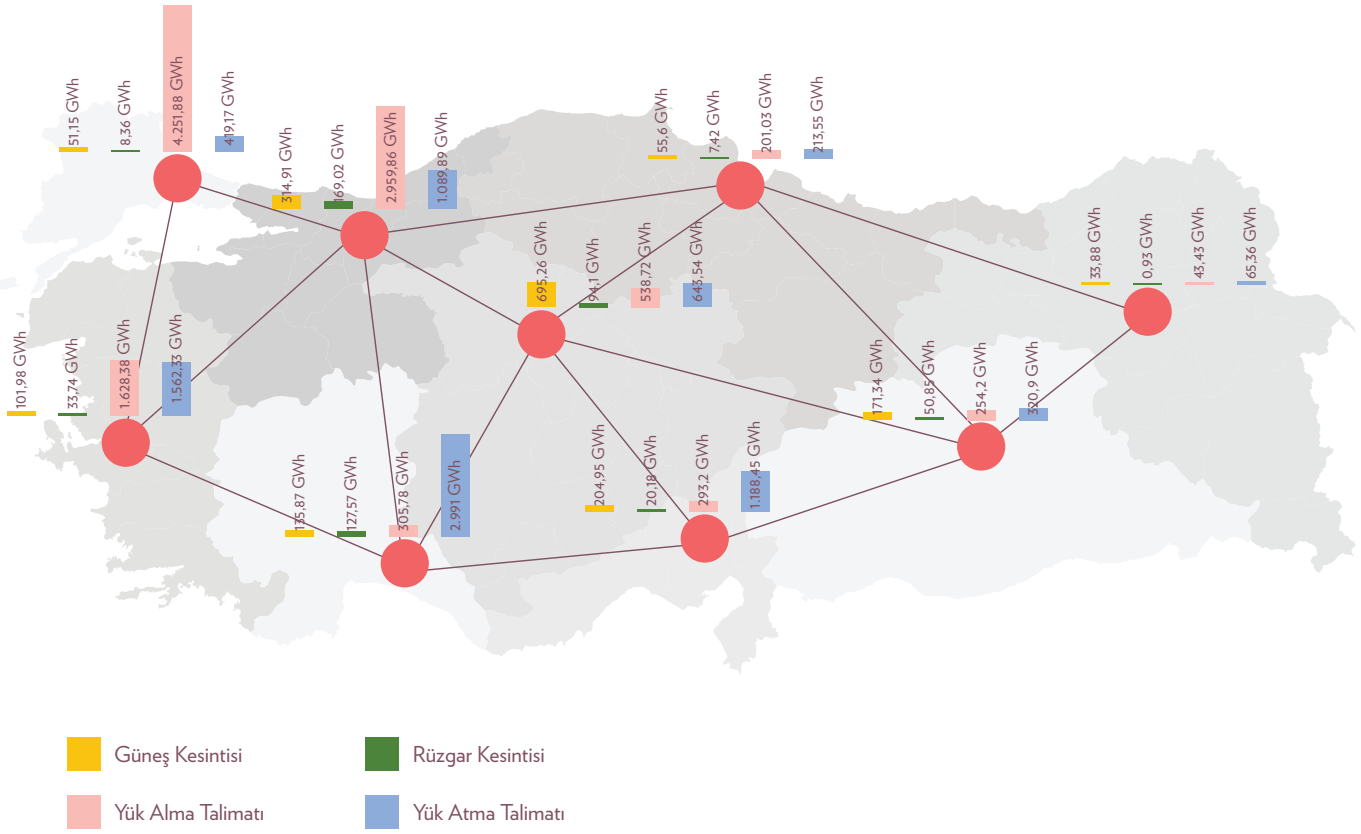
Şekil 90 Net Sıfır Senaryosunda 2030 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı



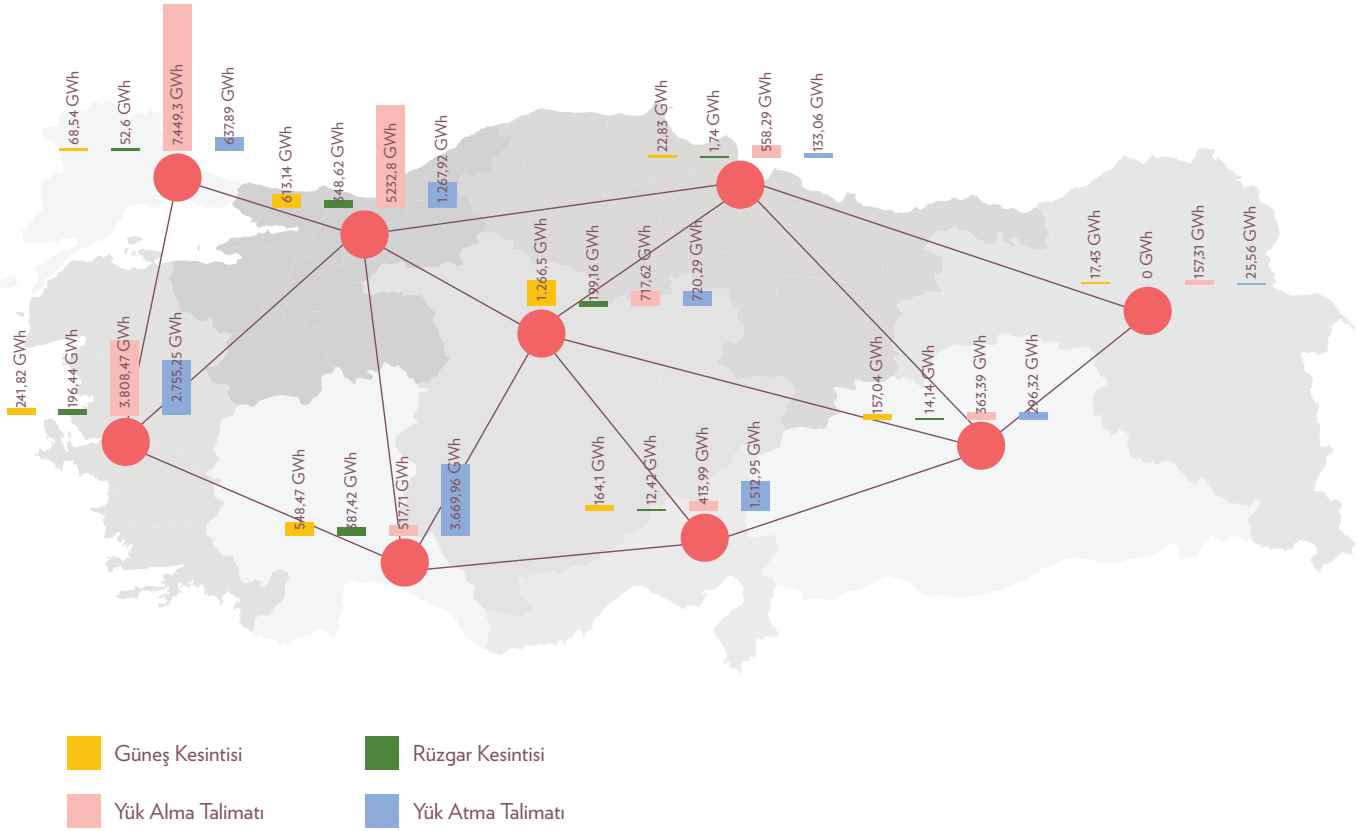
Şekil 91 Net Sıfır Senaryosunda 2035 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı



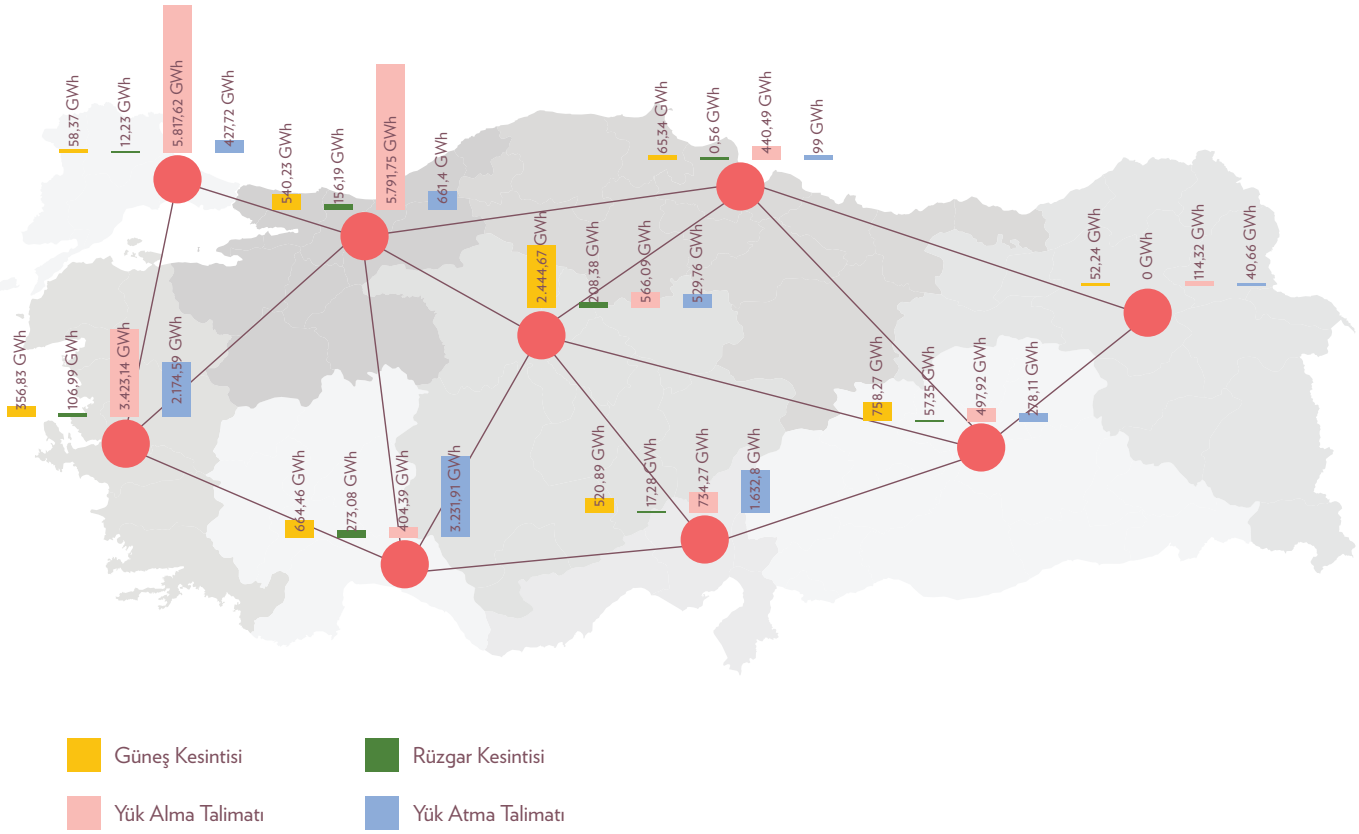
Şekil 92 Net Sıfır Senaryosunda 2040 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı



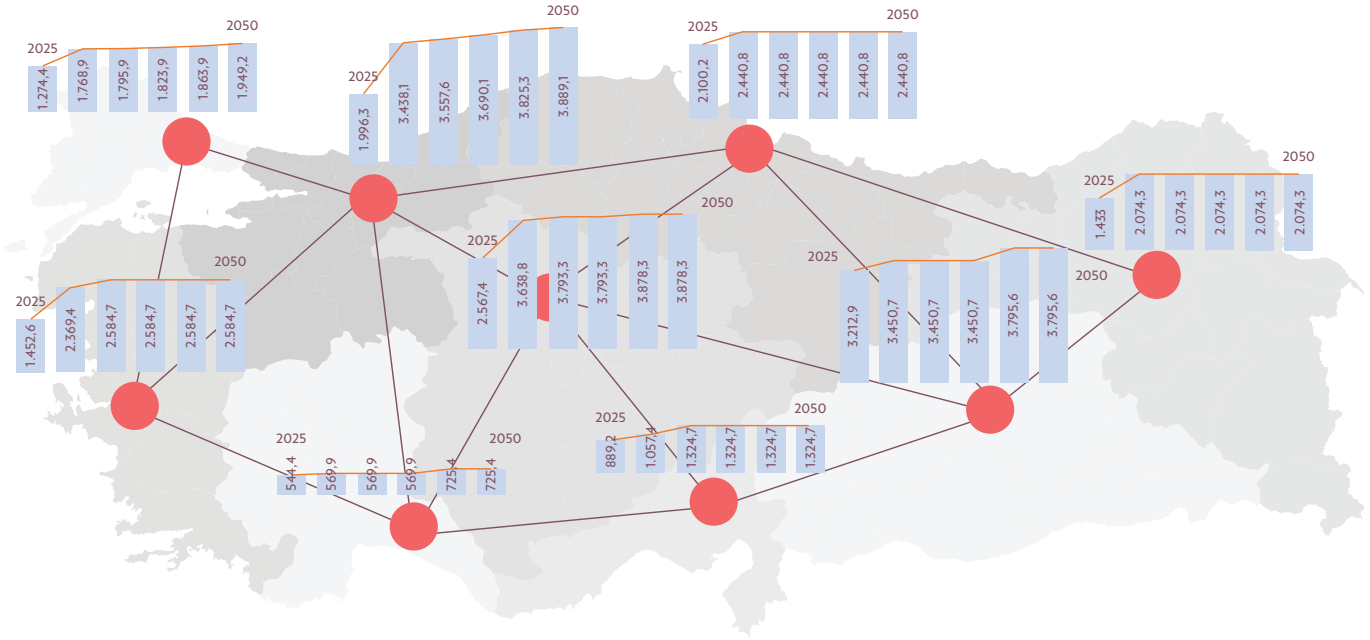
Şekil 93 Net Sıfır Senaryosunda 2045 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı



Şekil 94 Net Sıfır Senaryosunda 2050 yılı YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarlarının bölgeler bazlı dağılımı



Şekil 95 Net Sıfır Senaryosunda TEİAŞ yük tevzi bölgelerindeki hatların toplam uzunluklarının gelişimi (km)

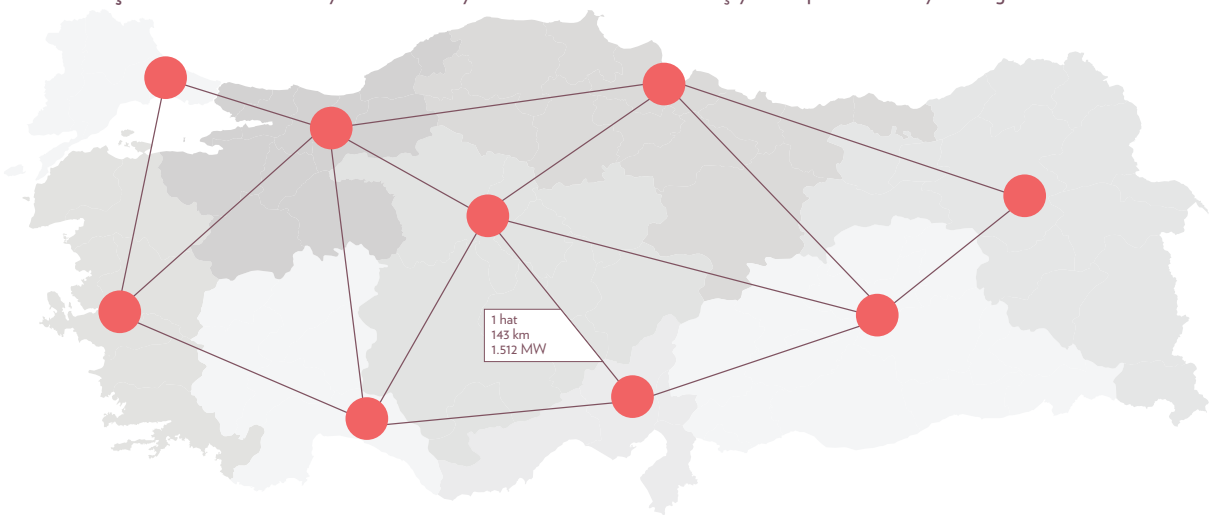


1.5.5. Şebeke Yatırım Gereksinimi

Şebeke yatırım gereksinimleri ile birlikte TEİAŞ yük tevzi bölgelerindeki 400 kV hatların toplam uzunluklarının (km) yıllara göre gelişimi Şekil 95'te verilmiştir.

Net Sıfır Senaryosunda 2025 yılında koridorlara 2020 şebeke modeli üzerinde ilave bir yatırım gereksinimi bulunmamaktadır. Öte yandan 2030 yılı Net Sıfır Senaryosunda, 2030 TEİAŞ şebeke yatırım planı üzerine ilave yatırım gereksinimi bulunmaktadır (Şekil 96). Bu yatırımla birlikte 2035 yılında koridorlarda ilave yatırım ihtiyacı bulunmamaktadır. 2040 yılında koridorlara yapılan ilave yatırımlar (Şekil 97), 2045 ve 2050 yılları koridorları için yeterli olmakta ve ilave bir yatırım ihtiyacı ortaya çıkmamaktadır.

Şekil 96 Net Sıfır Senaryosunda 2030 yılı koridorlarının 2030 TEİAŞ yatırım planına ilave yatırım gereksinimi



Şekil 97 Net Sıfır Senaryosunda 2040 yılı koridorlarının 2030 yılı koridorlarına ilave yatırım gereksinimi



Tablo 21. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)

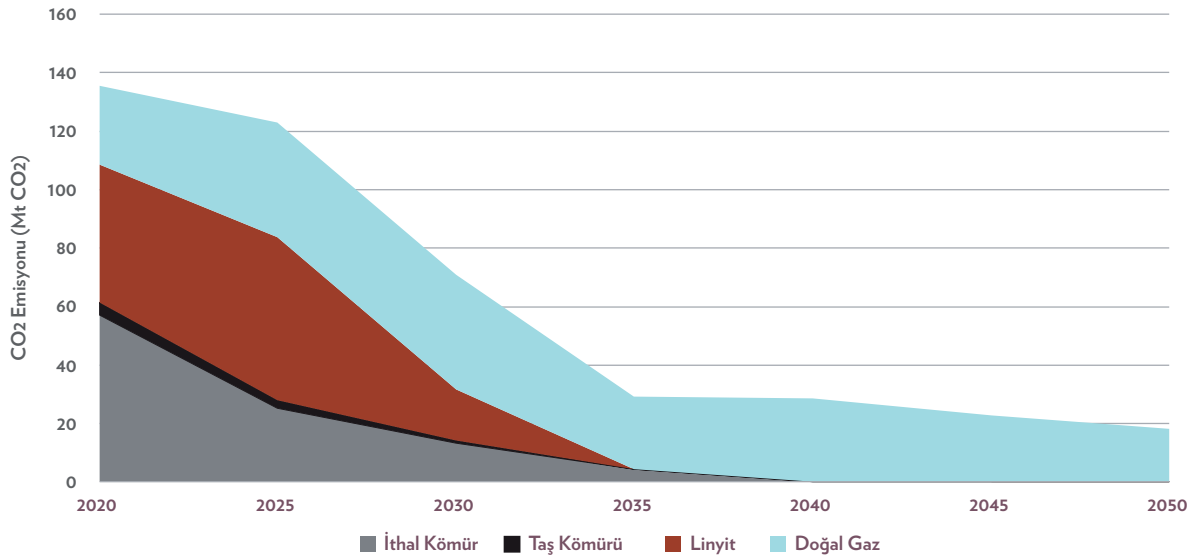
	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Toplam
2020	4,19	57,09	47,42	26,68	135,38
2025	2,92	25,10	55,78	39,11	122,90
2030	1,00	13,37	17,2	39,22	70,86
2035	0,00	4,36	0,00	24,95	29,30
2040	0,00	0,00	0,00	28,53	28,53
2045	0,00	0,00	0,00	22,78	22,78
2050	0,00	0,00	0,00	18,33	18,33

1.5.6. Karbondioksit Emisyonları

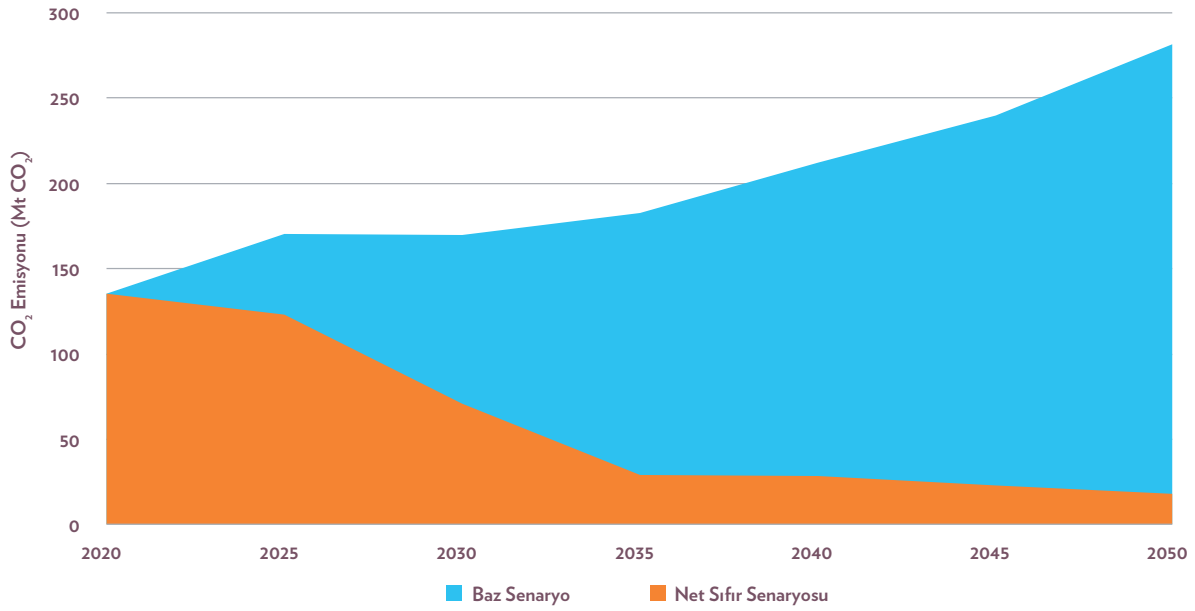
Net Sıfır Senaryosunda fosil yakıtlardan elektrik üretimine bağlı CO_2 emisyonları Tablo 21 ve Şekil 98'de verilmiştir.

Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonları 2020'den sonra azalmaya başlamaktadır. 2020'de 135 $MtCO_2$ olan emisyonlar 2030'da %48 azalarak 71 $MtCO_2$'ye, 2050'de ise %87 azalarak 18 $MtCO_2$'ye inmektedir. Linyit santrallerinin tamamının 2030'ların ilk yarısında, son kalan ithal kömür santralinin de 2030'ların ikinci yarısında kapanmasının ardından 2040'tan itibaren elektrik sektöründe kalan emisyonların tamamı doğal gazdan kaynaklanmaktadır.

Şekil 98 Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)



Şekil 99 Baz senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda karşılaştırmalı olarak elektrik sektörünün CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)



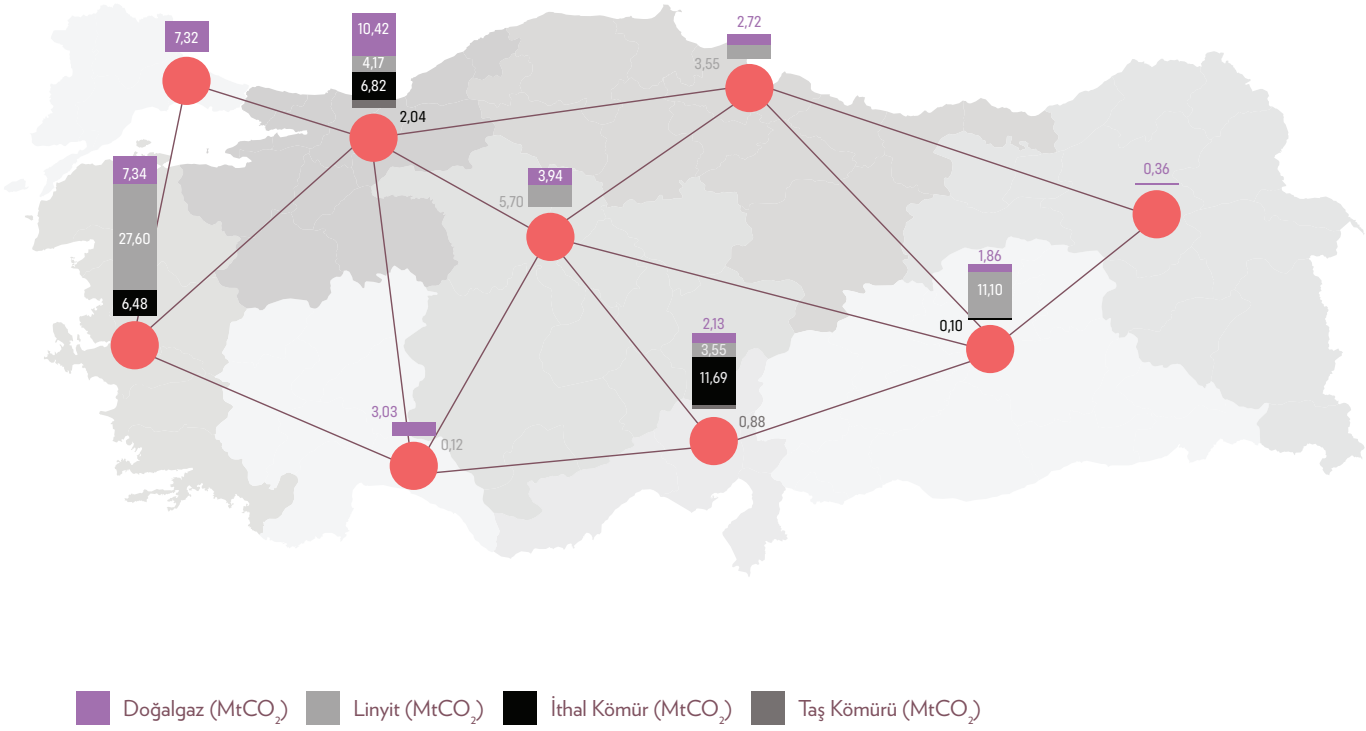
Elektrik sektöründen kaynaklanan emisyonların 2020'den 2050'ye kadar Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda izlediği seyir Şekil 99'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Buna göre Net Sıfır Senaryosunda emisyonlar Baz Senaryonun aksine 2020'de tepe noktasındadır.

Elektrik sektörünün karbondioksit emisyonları 2050'de sıfırlanamamakta ve 18 $MtCO_2$ artık emisyon kalmaktadır. Bu emisyon yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek oranlarda kullanılması nedeniyle artan şebeke esnekliği ihtiyacına bağlı olarak düşük kapasite faktörüyle çalıştırılacak şekilde sistemde emre amade tutulan doğal gaz santrallerinden kaynaklanmaktadır. Eğer şebekede artan esneklik ihtiyacı depolama ve enterkoneksiyon dışında talep yönetimi gibi yöntemler de kullanılarak tamamen sağlanabilirse, kalan doğal gaz santralleri de 2050'ye kadar kapatılabilir ve kalan artık emisyonları sıfırlamak mümkün olabilir.

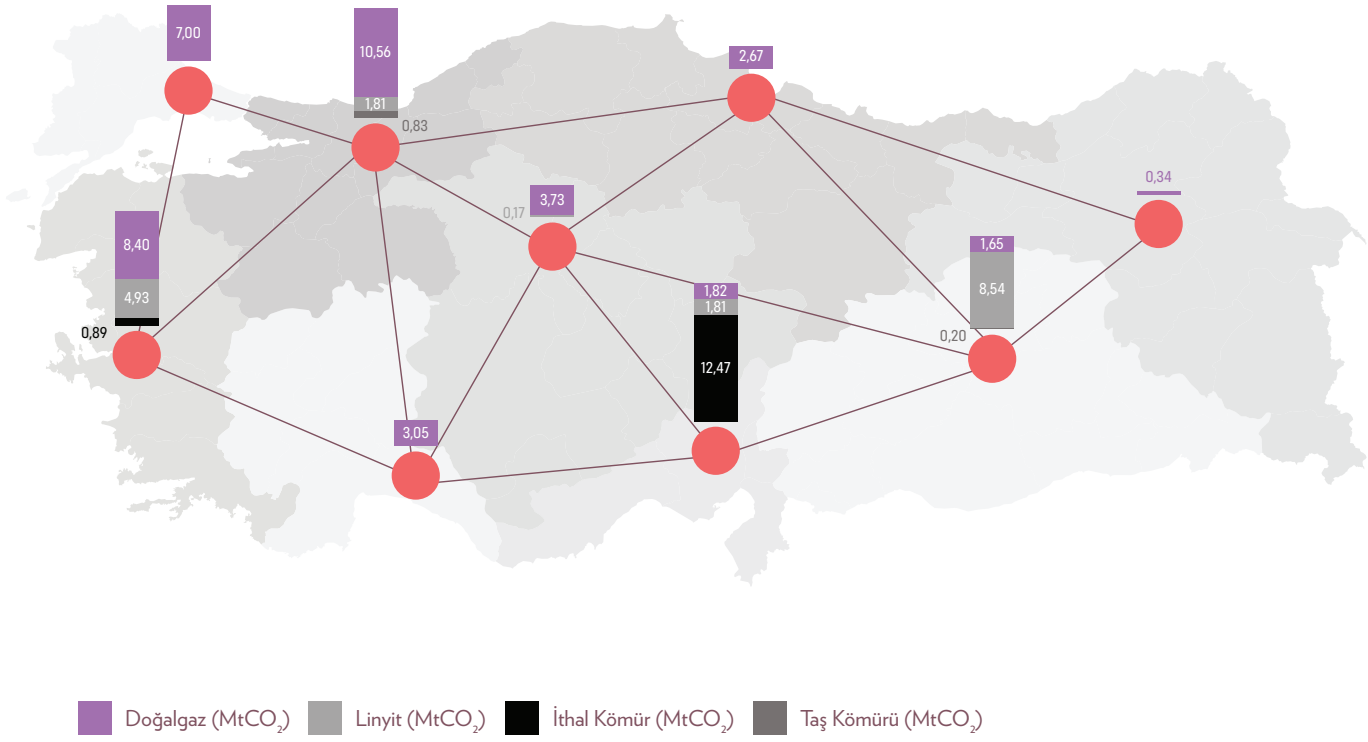
Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektörün kaynaklanan CO_2 emisyonların TEİAŞ yük tevzi bölgelerine üretim teknolojisi bazlı dağılımı ise Şekil 100 – Şekil 105 arasında verilmiştir. 2040'tan sonra sadece doğal gaz kaynaklı karbondioksit emisyonu olduğu ve bu santraller yoğun olarak Trakya, Batı Anadolu ve Kuzey Batı Anadolu yük tevzi bölgelerinde bulunduğu için, karbondioksit emisyonu bu bölgelerde yoğunlaşmıştır.

Bölüm 1.5.3'te belirtildiği gibi, bu çalışmada Net Sıfır Senaryosu'ndaki doğalgaz üretimleri, İPM 2021 çalışmasına kıyasla daha yüksektir. Bu nedenle, İPM 2021 çalışmasında 2050 yılı için hesaplanan 15 MtCO2 karbon emisyonu, bu çalışmada 18 MtCO2'e yükselmektedir. Önceki çalışmanın karbon emisyonu seviyelerine ulaşmak için depolama kapasitesi %10-15 artırılmalıdır.

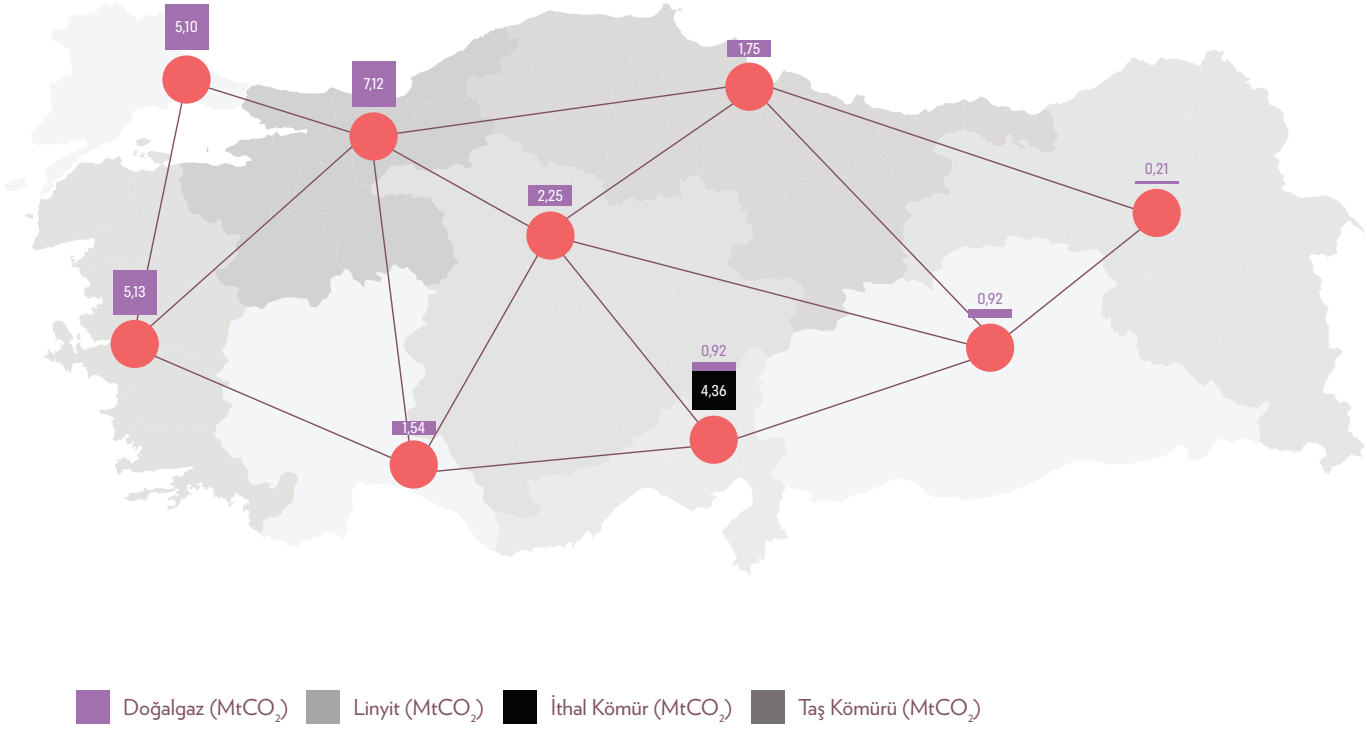
Şekil 100 Net Sıfır Senaryosunda 2025 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonların bölgelere dağılımı



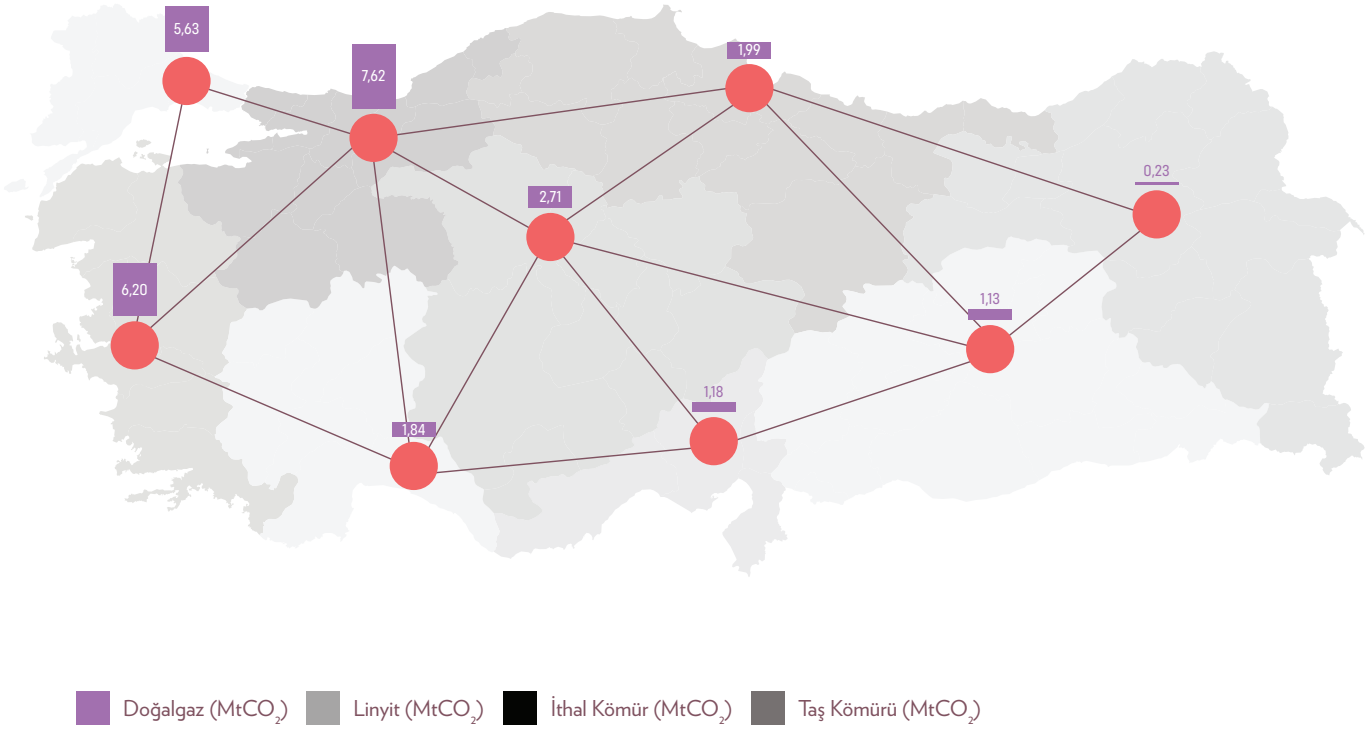
Şekil 101 Net Sıfır Senaryosunda 2030 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonların bölgelere dağılımı



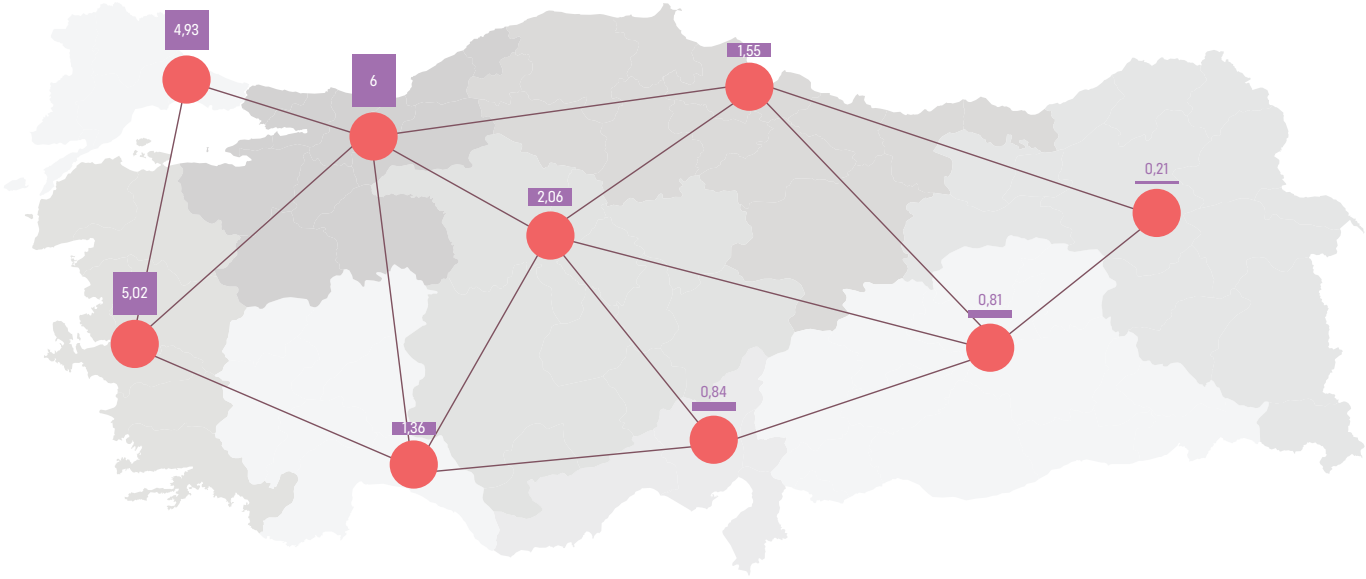
Şekil 102 Net Sıfır Senaryosunda 2035 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonların bölgelere dağılımı



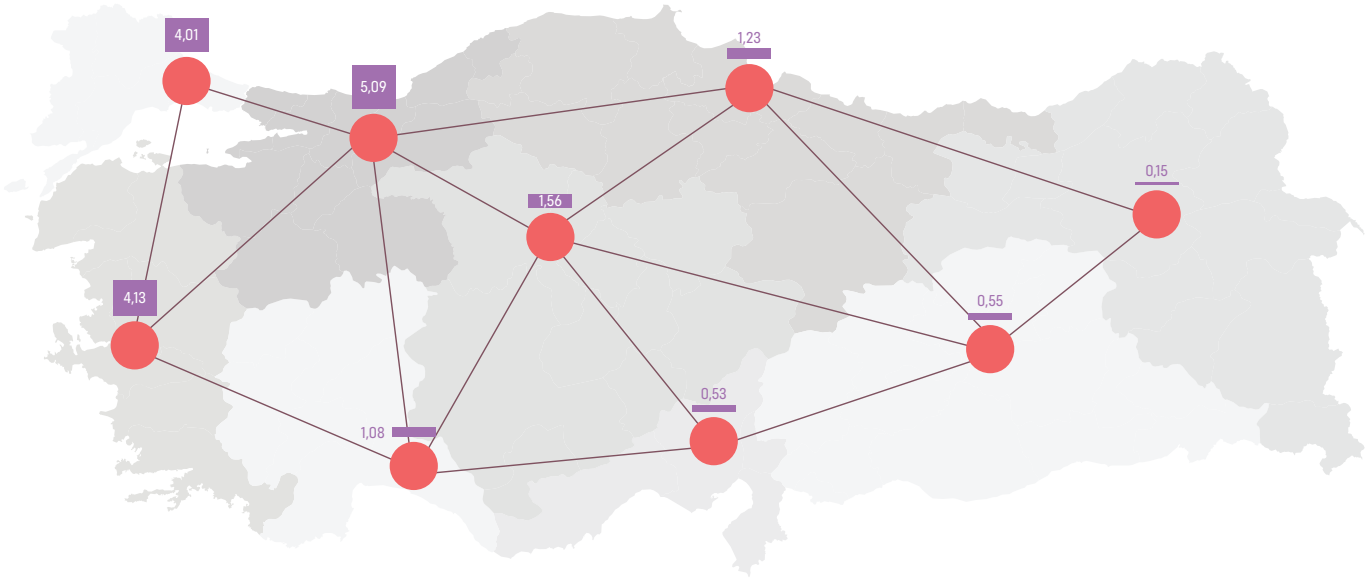
Şekil 103 Net Sıfır Senaryosunda 2040 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonların bölgelere dağılımı



Şekil 104 Net Sıfır Senaryosunda 2045 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO2 emisyonların bölgelere dağılımı



Şekil 105 Net Sıfır Senaryosunda 2050 yılında elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonların bölgelere dağılımı



Raporun bu bölümünde 2050'de Net Sıfır hedefi doğrultusunda elektrik sektöründeki emisyon azaltımı patikası, Baz ve Net Sıfır olmak üzere iki senaryo üzerinde 5 yıllık aralıklarla incelenmiştir. Çalışmada, öncelikle şebeke topoloji ve kısıtlarına (hat/trafo yüklenmeleri vb.) bakılmaksızın mevcut santrallerden düşük marjinal maliyete sahip santralin daha önce devreye gireceğini modelleyen piyasa simülasyonları çalıştırılmıştır. Ancak minimum marjinal maliyeti hedefleyen piyasa simülasyonları, şebekede darboğazların gözlenmesine yol açabilmektedir. Bu sebeple, Türkiye elektrik iletim şebekesi modellenmiş ve bu model üzerinden piyasa simülasyonu ile elde edilen üretim yeniden dağıtılarak şebeke darboğaz durumlarını çözen şebeke simülasyonları çalıştırılmıştır. 5 yıllık aralıklarla gerçekleştirilen şebeke simülasyonları ile üretimin kaynaklara göre dağılımı, şebeke yatırım ihtiyaçları, YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarları ve CO_2 emisyonları hesaplanmış ve sonuçların TEİAŞ yük tevzi bölgelerindeki dağılımları detaylı olarak sunulmuştur.

Net Sıfır Senaryosunda yüksek yenilenebilir üretim potansiyelinden dolayı gerçekleşen yenilenebilir enerji kesinti miktarının Baz Senaryoya göre artış göstermesi artan depolama kapasitesine rağmen kaçınılmaz olmuştur (2050 Baz Senaryoda 0,36; Net Sıfır Senaryosunda 6,29 TWh). Öte yandan, Net Sıfır Senaryosunda yüksek emisyon yapan fosil yakıtların devreden çıkması ile YAL/YAT talimatı verilebilecek santral azaldığından gözlemlenen YAL/YAT miktarları Baz Senaryoya göre daha düşüktür (2050'de Baz Senaryoda 21,37; Net Sıfır Senaryosunda 13,43 TWh).

Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya kıyasla şebeke yatırım ihtiyacı artmaktadır. 2050 yılında, TEİAŞ'ın 2030 yılı için belirlediği yatırım planına ilave Baz senaryoda 2596, Net Sıfır Senaryosunda 4054 km 400 kV havai hat yatırımına ihtiyaç duyulması beklenmektedir.

Elektrik sektöründe, Baz Senaryoda 2020 yılında 135,4 $MtCO_2$ olan CO_2 emisyonu, 2050'de 282 $MtCO_2$ seviyesine yükselirken; Net Sıfır Senaryosunda fosil yakıtlı santrallerin devreden çıkması ve yenilenebilir üretimin artması sebebi ile 18 $MtCO_2$'ye kadar düşmektedir.

2. ULAŞIM SEKTÖRÜ

Türkiye'de ulaşım sektörünün karbondioksit emisyonlarındaki payı yaklaşık %23'tür ve bunun da %90'dan fazlası karayolu taşımacılığı kaynaklıdır[3]. Ulaşım sektörünün enerji tüketimi TEP (Ton Eşdeğer Petrol) cinsinden modellenerek her tipte ulaşım aracı için (binek araçlar, toplu ulaşım, yük taşımacılığı, demiryolu, denizyolu ve havayolu) CO_2 emisyonları hem Baz Senaryo hem de Net Sıfır Senaryosu için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu bölümde, ulaşım sektörünün Baz Senaryo'daki ve Net Sıfır Senaryosu'ndaki temel varsayımları (Tablo 22, Tablo 23 ve Tablo 24) ve CO_2 emisyon sonuçları beşer yıllık aralıklarla özetlenerek, Net Sıfır Senaryosu'ndaki hedeflere ulaşmak için kritik olan çözümler detaylandırılmıştır.

3 Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası 2050'de Net Sıfır

Tablo 22 Ulaşım sektörünün modellenmesinde binek araçlarla ilgili kullanılan varsayımlar

	Baz Senaryo				Net Sıfır Senaryosu			
Yıl	Motorizasyon Oranı (binde)	E-Binek Araç Sayısı (Milyon)	E-Binek Araçların Toplam Binek Araçlar İçindeki Payı (%)	Seyahat davranış değişikliği (%)	Motorizasyon Oranı (binde)	E-Binek Araç Sayısı (Milyon)	E-Binek Araçların Toplam Binek Araçlar İçindeki Payı (%)	Seyahat davranış değişikliği (%)
2020	286	0,10	0,77	0	286	0,10	0,77	0
2025	313	1,0	5	0	313	2	10	0
2030	340	1,9	10	0	340	3,8	20	0
2035	357	3,85	15,75	0	357	7,7	31,5	1,25
2040	374	5,8	21,5	0	374	11,6	43	2,5
2045	391	7,75	27,25	0	391	15,5	54,5	3,75
2050	408	9,7	33	0	408	19,4	66	5

Tablo 23 Ulaşım sektörünün modellenmesinde karayolundan raylı sisteme geçiş oranıyla ilgili kullanılan varsayımlar (%)

	Baz Senaryo			Net Sıfır Senaryosu		
Yıl	Toplu Taşımada E-araçların Toplam Araçlara Oranı (%)	Yük Taşımada E-araçların Toplam Araçlara Oranı (%)	Yeşil Hidrojenli Ağır Vasıtaların Toplam Ağır Vasıtalara Oranı (%)	Toplu Taşımada E-araçların Toplam Araçlara Oranı (%)	Yük Taşımada E-araçların Toplam Araçlara Oranı (%)	Yeşil Hidrojenli Ağır Vasıtaların Toplam Ağır Vasıtalara Oranı (%)
2020	0	0	0	0	0	0
2025	2,5	2,5	0	5	5	0
2030	5	5	0	10	10	0
2035	6,25	6,25	0	12,5	12,5	1,25
2040	7,5	7,5	0	15	15	2,5
2045	8,75	8,75	0	17,5	17,5	3,75
2050	10	10	0	20	20	5

Tablo 24 Ulaşım sektörünün modellenmesinde karayolundan raylı sisteme geçiş oranıyla ilgili kullanılan varsayımlar (%)

	Net Sıfır Senaryosu		
Yıl	Karayolunda Bireysel Araçlardan Raylı Toplu Taşımaya Geçiş Oranı	Karayolu Toplu Taşıma Araçlarından Raylı Toplu Taşımaya Geçiş Oranı (%)	Karayolunda Yük Taşımadan Raylı Yük Taşımaya Geçiş Oranı (%)
2020	0	0	0
2025	2,5	5	5
2030	5	10	10
2035	7,5	20	20
2040	10	30	30
2045	12,5	40	40
2050	15	50	50

2.1. BAZ SENARYO

Baz Senaryo'da ulaşım sektörünün enerji tüketimi ve CO_2 emisyonlarının beşer yıllık aralıklarla hesaplanmasına göre ulaşım sektörünün 2018'de yaklaşık 28,5 milyon TEP olan enerji tüketimi 2030'da yaklaşık 38 milyon TEP'e, 2050'de ise iki katına, yani yaklaşık 58 milyon TEP'e çıkmaktadır. Tablo 25'te gösterildiği gibi, bu enerji tüketiminin yaklaşık üçte ikisi karayolu yük taşımacılığından kaynaklanmaktadır.

Baz Senaryo'da ulaşım sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarının artışı Tablo 26'da beşer yıllık aralarla gösterilmiştir. CO_2 emisyonları 2018'de 83 $MtCO_2$ olup, 2030'da %17 artarak 97 $MtCO_2$'ye, 2050'de ise %44 artarak 120 $MtCO_2$'ye çıkmaktadır. Ulaşım sektöründeki CO_2 emisyonlarında en büyük payı karayolu yük taşımacılığı almaktadır (2030'da %67, 2050'de %69).

Tablo 25 Baz Senaryo - Araçlara göre toplam enerji tüketimleri (1000 TEP)

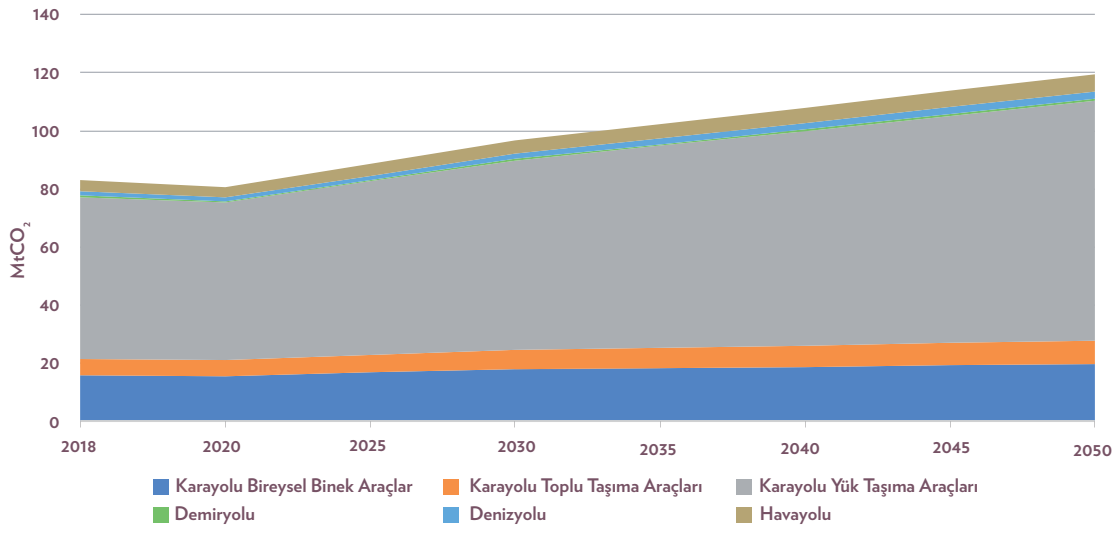
Yıl	Karayolu Bireysel Binek Araçlar	Karayolu Toplu Taşıma Araçları	Karayolu Yük Taşıma Araçları	Demiryolu	Denizyolu	Havayolu	Toplam
2020	5.055	1.937	19.366	217	705	1.250	28.530
2025	5.909	2.256	22.556	253	821	1.456	33.250
2030	6.763	2.575	25.745	288	937	1.662	37.970
2035	7.668	2.909	29.086	325	1.059	1.878	42.924
2040	8.572	3.243	32.428	363	1.180	2.094	47.879
2045	9.477	3.577	35.769	400	1.302	2.309	52.833
2050	10.381	3.911	39.110	437	1.423	2.525	57.787

Tablo 26 Baz Senaryo -CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)

	Karayolu Bireysel Binek Araçlar	Karayolu Toplu Taşıma Araçları	Karayolu Yük Taşıma Araçları	Demiryolu	Denizyolu	Havayolu	Toplam
2018	15,9	5,6	55,8	0,4	1,5	3,7	82,8
2020	15,6	5,4	54,3	0,4	1,4	3,6	80,7
2025	16,8	5,95	59,8	0,45	1,6	4,05	88,6
2030	18	6,5	65,3	0,5	1,8	4,5	96,5
2035	18,43	6,93	69,55	0,55	1,98	4,9	102,25
2040	18,85	7,35	73,8	0,6	2,15	5,3	108
2045	19,28	7,78	78,05	0,65	2,33	5,7	113,75
2050	19,7	8,2	82,3	0,7	2,5	6,1	119,5

Baz Senaryo'da elektrikli ağır vasıtaların toplam ağır vasıtalara oranı 2030'da %5, 2050'de ise %10 varsayılmıştır. Bu varsayım altında Baz Senaryo'da karayolu yük taşımacılığından kaynaklı CO_2 emisyonları dramatik bir şekilde artmaya devam etmektedir (Şekil 106). 2018 yılında bireysel araç kullanımında neredeyse sıfır paya sahip olan elektrikli binek araçların Baz Senaryo'daki toplam binek araçlarına oranının 2030'da %10'a (1,9 milyon elektrikli binek araç), 2050'de ise %33'e (9,7 milyon elektrikli binek araç) çıkacağı varsayılmıştır. Bu varsayım altında 2050 yılına kadar binek araçların CO_2 emisyonlarında bir artış olmakla birlikte, karayolu yük taşımacılığındaki kadar dramatik değildir. Bu sonuçlar, net sıfır hedefleri için ulaşımda elektrifikasyona (e-mobilite) geçişin çok daha yüksek oranlarda gerçekleşmesi gerektiğini göstermektedir.

Şekil 106 Baz Senaryo - CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)



2.2. Net Sıfır Senaryosu

Enerji dönüşümünde fosil yakıt kullanımından elektriğe ve diğer bir emisyonsuz yakıt türü olan yeşil hidrojene geçiş esastır. Bireysel araç kullanımında payı 2020'de neredeyse sıfır olan ve Baz Senaryo'da 2030'da %10, 2050'de %33 varsayılan elektrikli araç sayısının toplam binek araçlarına oranının, Net Sıfır Senaryosu'nda 2030'da %20 (3,8 milyon elektrikli binek araç) ve 2050'de %66 (19,4 milyon elektrikli binek araç) ile Baz Senaryo'nun iki katı seyredeceği varsayılmıştır. Baz Senaryo'da 2030'da %5, 2050'de ise %10 varsayılan elektrikli ağır vasıtaların toplam ağır vasıtalara oranının ise Net Sıfır Senaryosu'nda 2030'da %10, 2050'de ise %20 şeklinde yine iki katı seyredeceği varsayılmıştır.

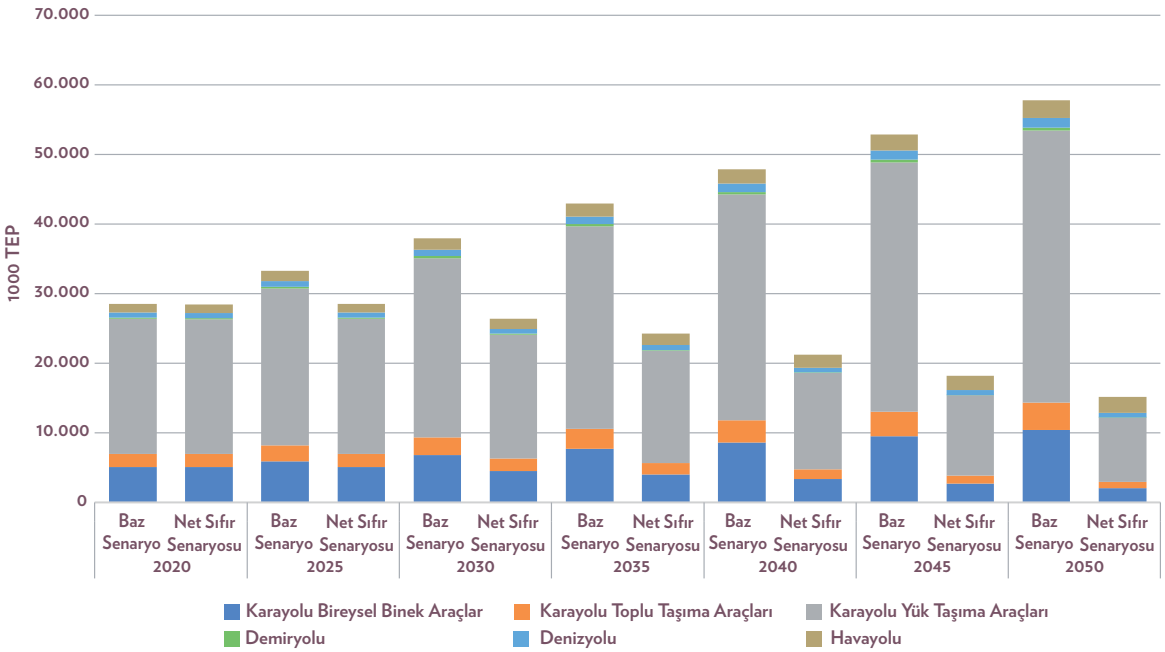
Karayolu binek araç ve ağır vasıta taşımacılığındaki bu e-mobiliteye geçişe ilave olarak, Net Sıfır Senaryosu'nda seyahat davranışı değişikliği (otomobilden bisiklete geçmek veya uzun mesafe seyahatleri azaltmak vb.) ve elektrikli raylı taşımaya dönüşüm (e-dönüşüm) varsayımları da yapılmıştır. Ayrıca, Net Sıfır Senaryosu'nda karayolu taşımacılığında hidrojenle çalışan ağır vasıta araç oranının 2030'da sıfır, 2050'de ise %5 olacağı varsayılmıştır.

Bu temel varsayımlar altında Net Sıfır Senaryosu'nda ulaşım sektörünün araçlara göre enerji tüketimleri beşer yıllık aralıklarla Tablo 27'de verilmiştir. 2018'de yaklaşık 28,5 milyon TEP olan enerji tüketimi 2030'da yaklaşık 26,4 milyon TEP'e, 2050'de ise 15,2 milyon TEP'e düşmektedir. Baz Senaryo'da olduğu gibi bu enerji tüketiminde en yüksek payı karayolu yük taşımacılığı almaktadır.

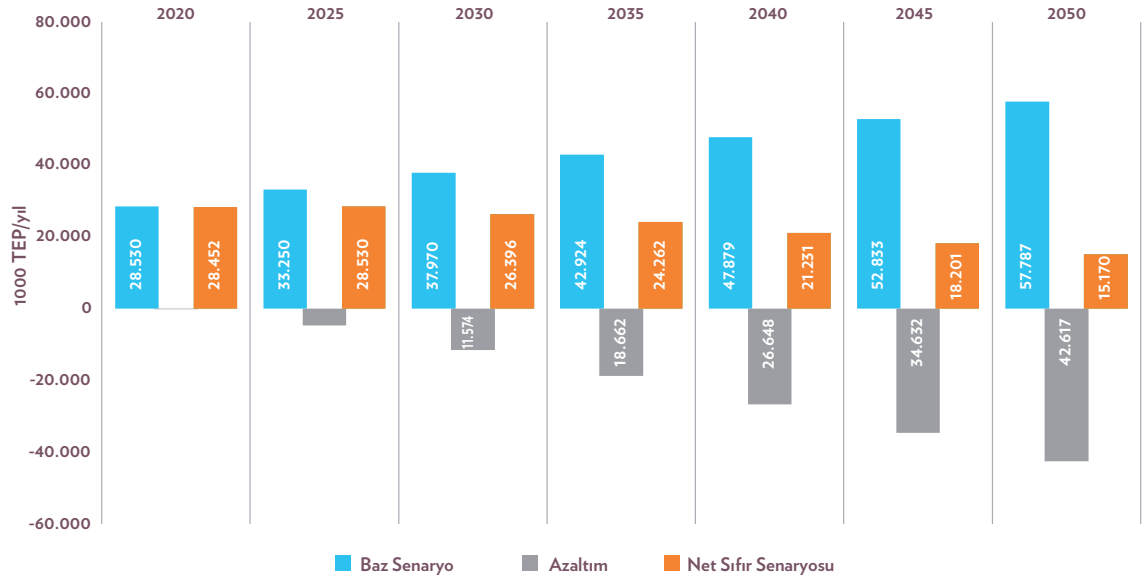
Tablo 27 Net Sıfır Senaryosu - Araçlara göre enerji tüketimleri (1000 TEP)

Yıl	Karayolu Bireysel Binek Araçlar	Karayolu Toplu Taşıma Araçları	Karayolu Yük Taşıma Araçları	Demiryolu	Denizyolu	Havayolu	Toplam
2020	5.040	1.931	19.315	216	703	1.247	28.452
2025	5.055	1.937	19.366	217	705	1.250	28.530
2030	4.524	1.778	17.778	145	716	1.456	26.396
2035	3.993	1.619	16.189	72	727	1.662	24.262
2040	3.328	1.380	13.880	54	712	1.878	21.231
2045	2.664	1.140	11.572	36	697	2.094	18.201
2050	1.999	901	9.263	18	681	2.309	15.170

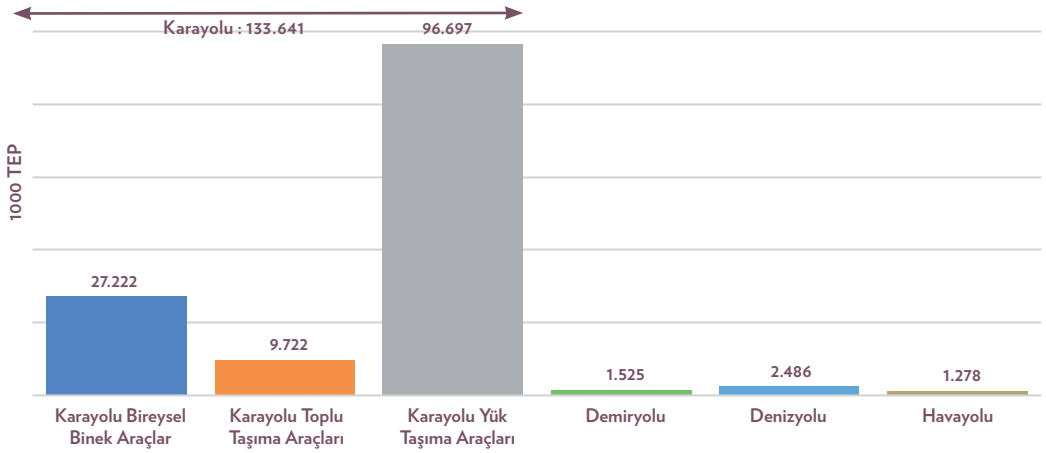
Şekil 107 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda araçlara göre toplam enerji tüketimleri (1000 TEP)



Şekil 108 Ulaşım sektöründe Net Sıfır Senaryosundaki toplam enerji tüketimindekinin Baz Senaryoya göre değişimi



Şekil 109 Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre enerji tüketimindeki azaltımın sektör kategorilerine dağılımı



Ulaşım sektöründe Net Sıfır Senaryosu'nda beşer yıllık aralıklarla araçlara göre enerji tüketimlerinin Baz Senaryo ile karşılaştırılması Şekil 107'de verilmiştir.

Ulaşım sektöründe Net Sıfır Senaryosu'ndaki toplam enerji tüketimindekinin Baz Senaryo'ya göre değişimi Şekil 108'de gösterilmiştir. Net Sıfır Senaryosu'ndaki enerji tüketiminin Baz Senaryo'ya göre %73 azaldığı görülmektedir.

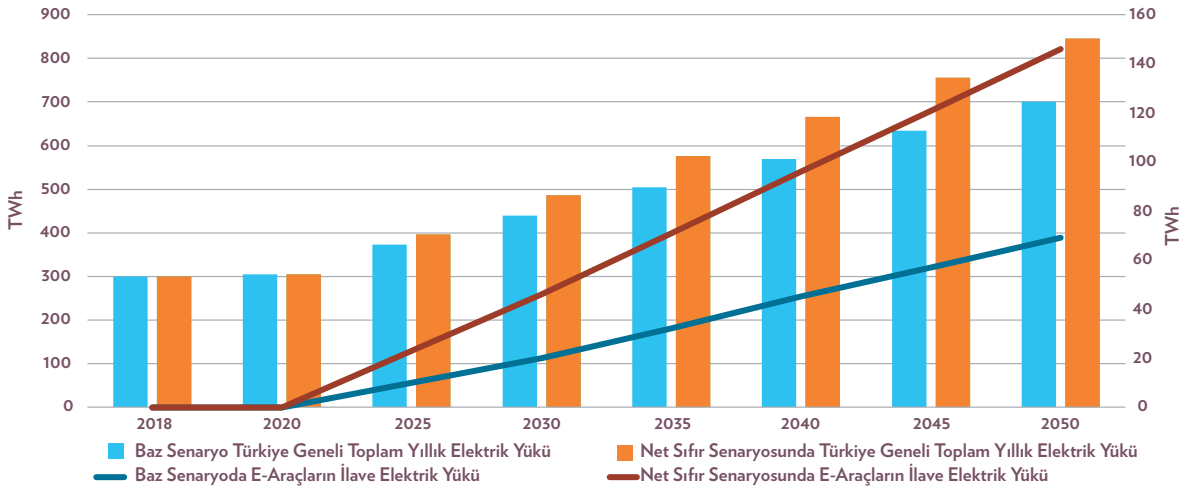
Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'ya göre kümülatif enerji tüketimindeki azaltımın sektör kategorilerine dağılımı Şekil 109'da verilmiştir.

Karayolu ulaşım ve taşımacılıktaki elektrifikasyon elektrik tüketiminde bir artışa neden olacaktır. Ulaşım sektöründe elektrifikasyonun toplam elektrik tüketimine beşer yıllık aralıklarla olan etkisi Tablo 28 ve Şekil 110'da gösterilmiştir. Baz Senaryo'da elektrikli araçlardan kaynaklanan

Tablo 28 Ulaşım sektöründe elektrifikasyonun toplam elektrik tüketimine etkisi

Yıl	Baz Senaryo Türkiye Geneli Toplam Yıllık Elektrik Yükü (TWh)	Baz Senaryoda E-Araçların İlave Elektrik Yükü (TWh)	Net Sıfır Senaryosunda E-Araçların İlave Elektrik Yükü (TWh)	Net Sıfır Senaryosunda Toplam Genel Elektrik Yükü (TWh)
2018	300	-	-	300
2020	305	-	-	305
2025	373	10	23	396
2030	440	20	46	486
2035	505	32	71	576
2040	570	45	96	666
2045	635	57	121	756
2050	700	69	146	846

Şekil 110 Ulaşım sektöründe elektrifikasyonun toplam elektrik tüketimine etkisi



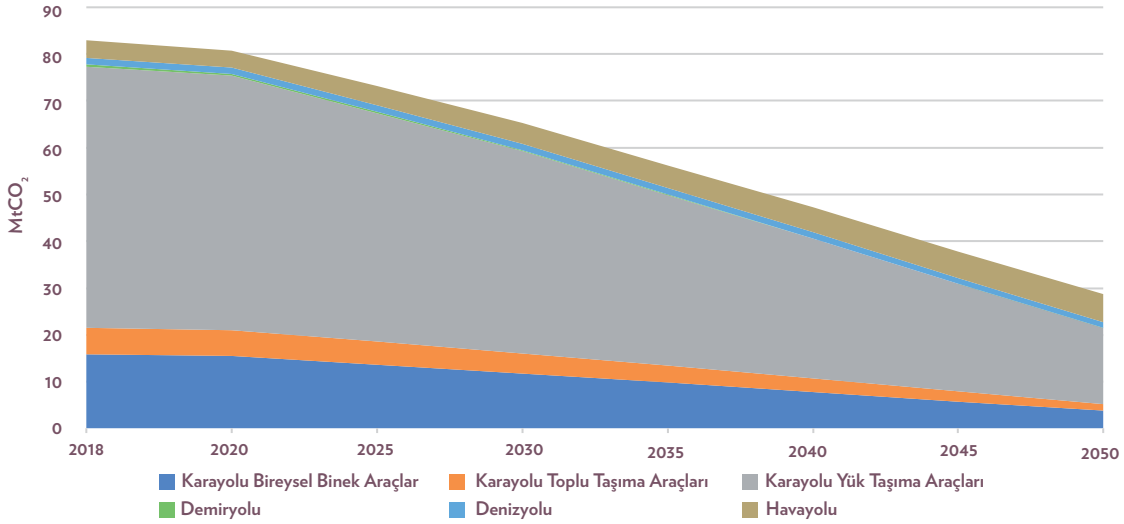
elektrik yükü 2030 ve 2050 yıllarında toplam yükün sırasıyla %4'ü ve %9'u iken bu oranlar Net Sıfır Senaryosu'nda sırasıyla %9 ve %17'ye yükselmektedir.

Yukarıda açıklanan varsayımlar (e-mobilite, e-dönüşüm ve seyahat davranış değişiklikleri) ile Net Sıfır Senaryosu'nda ulaşım sektöründeki CO_2 emisyonları incelendiğinde (Tablo 29), 2018'de 83 $MtCO_2$ olan ulaşım sektöründen kaynaklı CO_2 emisyonlarının Net Sıfır Senaryosu'nda 2030'da %21 azalarak 65,3 $MtCO_2$'ye, 2050'de ise %65 azalarak yaklaşık 29 $MtCO_2$'ye düştüğü gözlemlenmektedir. Ulaşım sektöründeki CO_2 emisyonlarında en büyük payı Net Sıfır Senaryosu'nda da karayolu yük taşımacılığı almaktadır.

Tablo 29 Net Sıfır Senaryosu - CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)

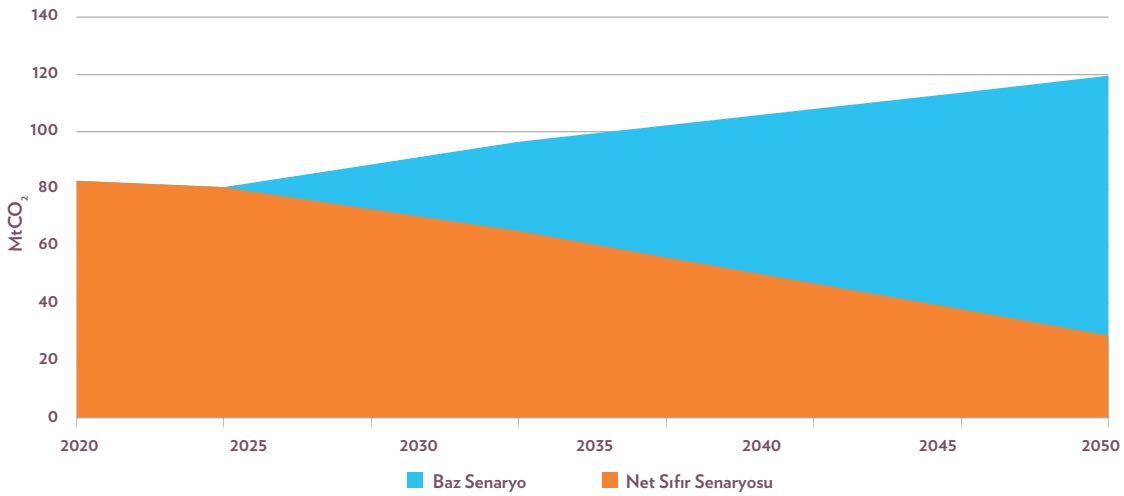
Yıl	Karayolu Bireysel Binek Araçlar	Karayolu Toplu Taşıma Araçları	Karayolu Yük Taşıma Araçları	Demiryolu	Denizyolu	Havayolu	Toplam
2018	15,9	5,6	55,8	0,4	1,5	3,7	82,8
2020	15,6	5,4	54,3	0,4	1,4	3,6	80,7
2025	13,7	4,9	48,8	0,3	1,4	4,1	73
2030	11,8	4,3	43,2	0,1	1,4	4,5	65,3
2035	9,8	3,6	36,5	0,1	1,3	4,9	56,2
2040	7,8	2,9	29,8	0,1	1,3	5,3	47,1
2045	5,8	2,2	23	0	1,2	5,7	38
2050	3,8	1,5	16,3	0	1,1	6,1	28,9

Şekil 111 Net Sıfır Senaryosu - CO_2 emisyonları ($MtCO_2$)

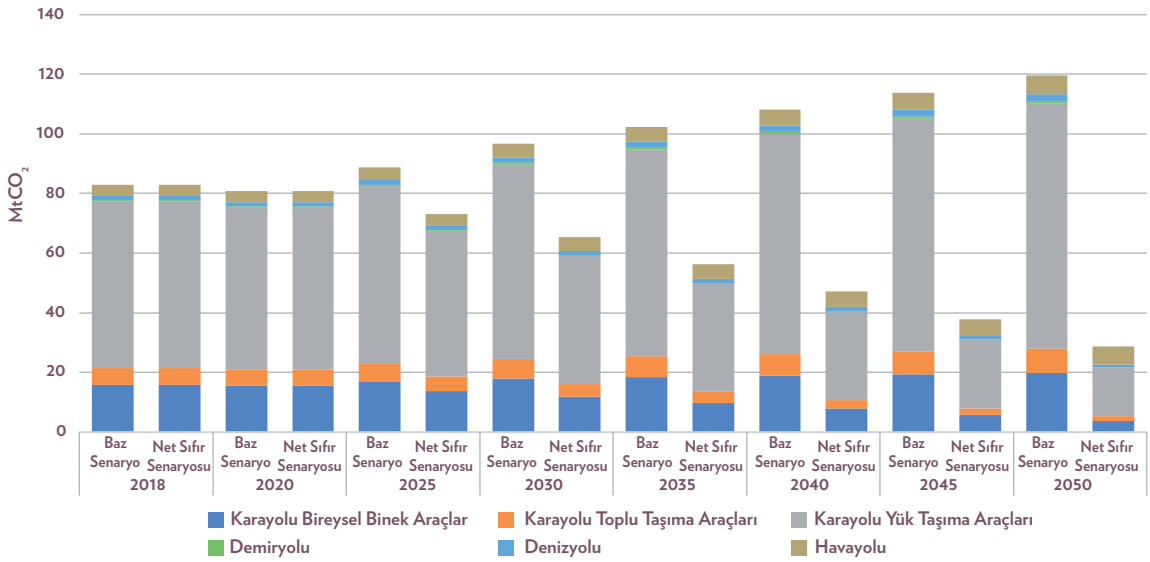


Net Sıfır Senaryosu'nda karayolu binek araç ve taşımacılık sektörlerindeki emisyon miktarındaki azalış araçlara göre Şekil 111'de ve Baz Senaryo ile karşılaştırmalı olarak Şekil 112'de verilmiştir. Net Sıfır Senaryosu'nda 2050 yılındaki CO_2 emisyonları 2020 yılına göre %65 azalmıştır. Her iki senaryodaki CO_2 emisyonları kıyaslandığında Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'ya göre 2050 yılı CO_2 emisyonlarının %75 azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 113'te her iki senaryoda gerçekleşen CO_2 emisyonlarının ulaşım sektörünün alt sektörlerine göre karşılaştırılması verilmiştir.

Şekil 112 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosundaki toplam CO_2 emisyonlarının kıyaslanması

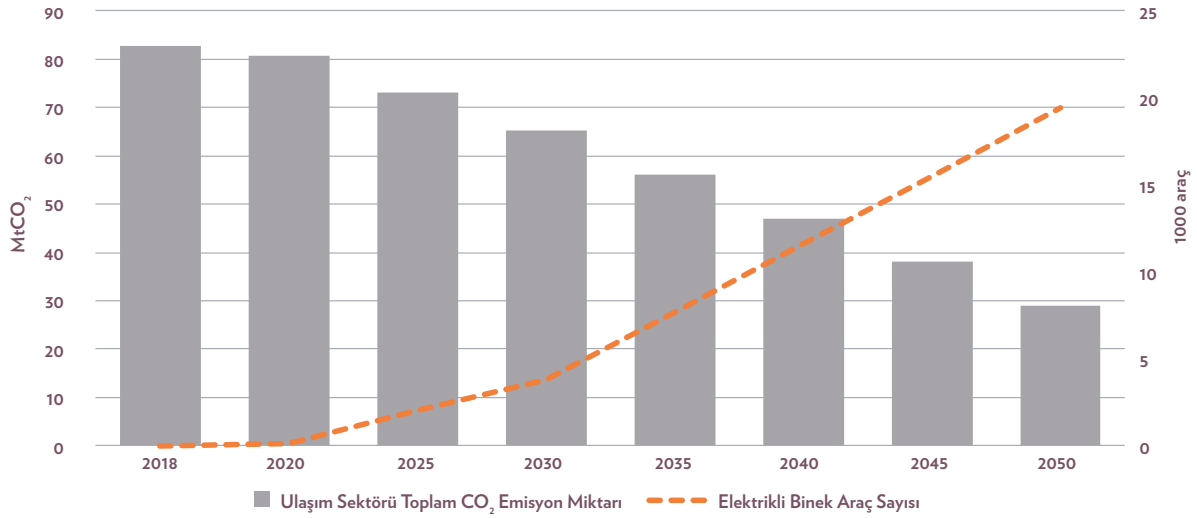


Şekil 113 Ulaşım sektöründe Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosundaki CO_2 emisyonlarının alt sektörlere göre kıyaslanması



Net Sıfır Senaryosu'nda yapılan varsayımların ve CO_2 emisyonlarının özeti Tablo 30'da verilmiştir. Baz Senaryoda ulaşım sektörü için 2030'da 97 $MtCO_2$ ve 2050'de 120 $MtCO_2$ hesaplanan yıllık emisyon miktarları, Net Sıfır Senaryosu'nda belirtilen e-mobilite, e-dönüşüm ve seyahat davranış değişiklikleri sonrası sırasıyla 65 $MtCO_2$ ve 29 $MtCO_2$ miktarına düşmektedir. Bu çözümler sonrası elektrik şebekesine 2030'da 46 TWh, 2050'de ise 146 TWh ilave elektrik yükü gelmesi beklenmektedir. Net Sıfır Senaryosu'nda yapılan elektrifikasyonun CO_2 emisyonunda azalmaya önemli ölçüde katkı sağladığı gözlemlenmiştir ve elektrikli binek araç sayısındaki artışın CO_2 emisyonuna etkisi Şekil 114'te gösterilmiştir.

Şekil 114 Elektrikli binek araç sayısındaki artışın ulaşım sektöründe toplam CO_2 emisyonuna etkisi



Tablo 30 E-mobilite, e-dönüşüm ve seyahat davranış değişikliklerinin CO_2 emisyonlarına ve elektrik tüketimine etkileri

Yıl	Ulaşım Sektörü Toplam CO_2 Emisyon Miktarı ($MtCO_2$)	Elektrikli Binek Araç Sayısı	Seyahat davranış değişikliği (%)	Toplu Taşımada E-araçların Toplam Araçlara Oranı (%)	Yük Taşımada E-araçların Toplam Araçlara Oranı (%)	Yeşil Hidrojenli Ağır Vasıtaların Toplam Ağır Vasıtalara Oranı (%)	Karayolunda Bireysel Araçlardan Raylı Toplu Taşımaya Geçiş Oranı	Karayolu Toplu Taşıma Araçlarından Raylı Toplu Taşımaya Geçiş Oranı (%)	Karayolunda Yük Taşımadan Raylı Yük Taşımaya Geçiş Oranı (%)	Toplam İlave Elektrik Yükü (TWh)
2018	82,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020	80,7	0,1	0	0	0	0	0	0	0	-
2025	73	2	0	5	5	0	3	5	5	23
2030	65,3	3,8	0	10	10	0	5	10	10	46
2035	56,2	7,7	1	13	13	1	8	20	20	71
2040	47,1	11,6	3	15	15	3	10	30	30	96
2045	38	15,5	4	18	18	4	13	40	40	121
2050	28,9	19,4	5	20	20	5	15	50	50	146

3. BİNALAR

"Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası - 2050'de Net Sıfır" başlıklı raporun 8. Bölümü, Türkiye'de binalardan kaynaklanan emisyonların baz patika ve çalışılan Net Sıfır Senaryosu altında değerlendirmesini sunmaktadır. Türkiye'de binalar, enerji kaynaklı karbondioksit (CO_2) emisyonlarının yaklaşık %12'sinden sorumludur ve bunun da %73,5'i konutlardan, %26,5'i ticari ve kurumsal binalardan kaynaklanır (2018 yılı verisi).

3.1. VARSAYIMLAR

3.1.1. Baz Senaryo:

Türkiye'de binalardan kaynaklanan emisyonlar, Baz Senaryo'da Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Bina Sektörü Enerji Verimliliği Teknoloji Atlası (ÇŞB, 2021) kullanılarak 2050'ye kadar projeksiyonu yapılan toplam birincil enerji tüketimi üzerinden hesaplanmıştır. Baz Senaryo'nun başlangıç yılları olan 2018 ve 2019 için bina türüne göre elektrik tüketimi kırılımı TÜİK verileri ve enerji denge tabloları kullanılarak bulunmuştur. Yakıt bazında nihai enerji tüketiminin hesaplanmasında da enerji denge tabloları kullanılmıştır (TÜİK, 2021; ETKB, 2020). Nihai tüketim, elektrik sektörü üretim modeli baz alınarak yıl bazında birincil enerji faktörü hesaplanarak elde edilmiştir. Binalarda enerji tüketiminden CO_2 emisyonu hesabında kullanılan emisyon faktörleri için ise Türkiye'nin Ulusal Sera Gazı Envanteri'nden yararlanılmıştır (TÜİK, 2021). Binaların CO_2 emisyonları bina türüne göre (konutlar ve ticari/ kurumsal binalar) ve kullanılan yakıt türüne göre hesaplanmıştır (ETKB, 2020).

3.1.2. Net Sıfır Senaryosu:

Net Sıfır Senaryosu'nda binalardaki enerji tüketiminin hesaplanmasında binalar, "mevcut" ve "yeni" binalar olarak iki gruba ayrılmıştır. Konutlar ve ticari/kurumsal binalar için bina yenileme oranı, yeni bina yapım ve yıkım oranları kullanılarak yıl bazında mevcut binaların, eski binaların ve yeni binaların oranları hesaplanmıştır. Elektrik, doğal gaz ve LPG, kömür, sıvı yakıtlar, biyokütle ve yenilenebilir kaynakların kullanımı hesaplanmıştır.

Yeni binalar ve yenilenen binalar için mevcut binalara göre enerji tüketim performansları literatüre dayalı varsayımlar kullanılarak bulunmuştur. Elektrikli ev ve ofis aletleri için literatüre dayalı varsayımlar kullanılarak yıl bazında enerji performansında iyileşme oranı bulunmuştur. Mevcut ve yeni binaların enerji tüketimleri ve toplam tüketimleri yıl bazında hesaplanmıştır.

Sera gazı emisyonlarını azaltmak için yapılabilecek müdahale seçenekleri kullanılarak, emisyon bütçesine göre projeksiyonlar yapılmıştır. Bu amaçla kullanılan değişkenler şöyledir:

1 | Elektrik aletlerde enerji performansı iyileşmesi

2 | Bina yıkım, bina yenileme ve yeni bina yapım oranı

3 | Eski binalarda elektriğe geçiş (ısınma amaçlı)

4 | Yeni binalarda elektrik kullanım oranı

5 | Davranış değişikliği

Bina performansına dahil olmayan tüketimler ve ısınma ihtiyacı için kullanılacak kaynaklar da (elektrik, kömür, sıvı ve gaz yakıtlar, biyokütle vb.) yıl bazında hesaplanmıştır. Aydınlatma, yemek pişirme, elektrikli aletler ve ısınma için gereken enerji tüketimleri ile bina performansında ve elektrikli aletlerde yapılması öngörülen iyileştirmeler sonrası nihai enerji tüketimleri hesaplanmıştır

(Shura, 2020). Varsayımların teyidi için Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2050'de Net Sıfır Raporu kullanılmıştır (IEA, 2021). Binalar için ayrılan emisyon bütçesine ulaşabilmek için belirlenen müdahale seçeneklerini modele yansıtmayı sağlayan aşağıda değişkenler kullanılmıştır:

1 | Isı pompası performans katsayısı (COP)

2 | Isı pompası kullanım oranı

3 | Kömürden hidrojene geçiş oranı

4 | Doğal gazdan hidrojene geçiş oranı

5 | Kömürden elektriğe geçiş oranı

6 | Doğal gazdan elektriğe geçiş oranı

7 | Sıvı fosil yakıtlardan elektriğe geçiş oranı.

3.2. BİNALARDA ELEKTRİK TÜKETİMİ (BAZ SENARYO VE NET SIFIR SENARYOSU):

Bu raporda binalar için Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryoları altında temel bulgular, beşer yıllık aralıklarla özetlenmektedir. Bir özet olarak Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoyla karşılaştırmalı olarak, binalarda elektrik tüketimi varsayımları (TWh) Tablo 31'de;bina türlerine ve yakıt türlerine göre nihai elektrik tüketimi (TWh) Tablo 33'te; toplam elektrik tüketimi ise Tablo 32 ve Şekil 115'te verilmiştir.

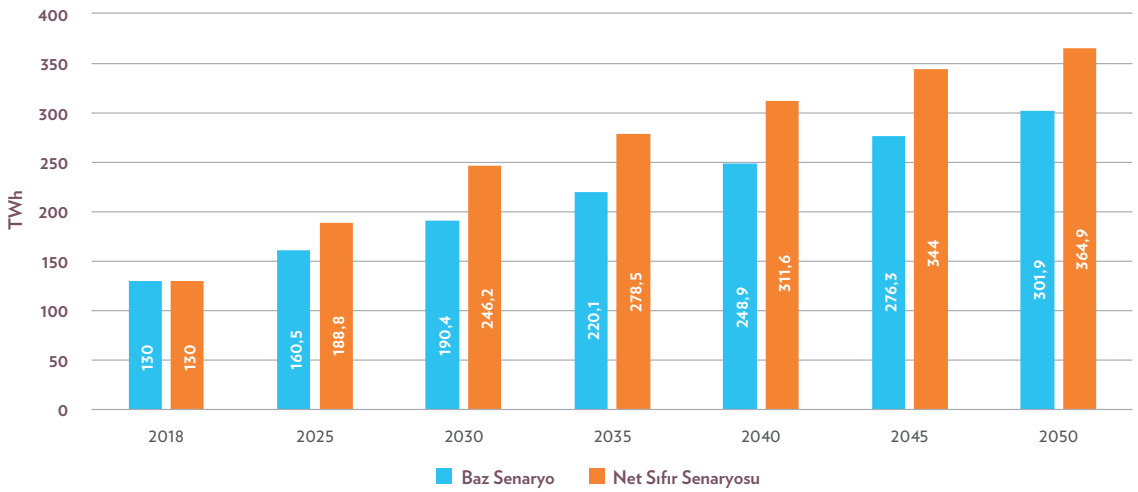
Tablo 31 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda binalarda elektrik tüketimi varsayımları (TWh)

Varsayımlar	Güncel	Baz Senaryo			Net Sıfır Senaryosu	
	2018	2030	2050	2070	2030	2050
Konutlarda Isınma Amaçlı Elektrik Tüketimi	20,4	27,4	38,0	47,1	61,4	98,4
Elektrikli Ev Aletlerinin Elektrik Tüketimi	34,1	58,5	98,3	126,1	71,5	113,1
Ticari/Kurumsal Binalarda Isınma Amaçlı Elektrik Tüketimi	24,1	32,5	51,5	65,5	31,7	30,4
Elektrikli Ofis Aletlerinin Elektrik Tüketimi	51,4	72,0	114,2	145,2	81,6	122,9
Konutlarda Doğal Gaz ve LPG Tüketimi	121,4	207,6	240,2	260,1	106,0	0
Ticari/Kurumsal Binalarda Doğal Gaz ve LPG Tüketimi	38,3	75,9	87,8	95,1	30,2	0
Konutlarda Kömür Tüketimi	34,9	24,2	16,2	10,8	0	0
Ticari/Kurumsal Binalarda Kömür Tüketimi	10,4	6,2	4,1	2,7	0	0
Konutlarda Sıvı Yakıt Tüketimi	2,6	2,3	2,1	1,9	0	0
Ticari/Kurumsal Binalarda Sıvı Yakıt Tüketimi	9,3	10,4	9,6	8,8	0	0
Konutlarda Biyokütle Tüketimi	18,1	40,3	47,4	52,9	0	0

Tablo 32 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda binalardan kaynaklanan elektrik tüketimi (TWh)

	Baz Senaryo: Binalarda Elektrik Tüketimi (TWh)	Net Sıfır Senaryosu: Binalarda Elektrik Tüketimi (TWh)
2018	130	130
2025	160,5	188,8
2030	190,4	246,2
2035	220,1	278,5
2040	248,9	311,6
2045	276,3	344
2050	301,9	364,9

Şekil 115 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda binalarda elektrik tüketimi varsayımları (TWh)



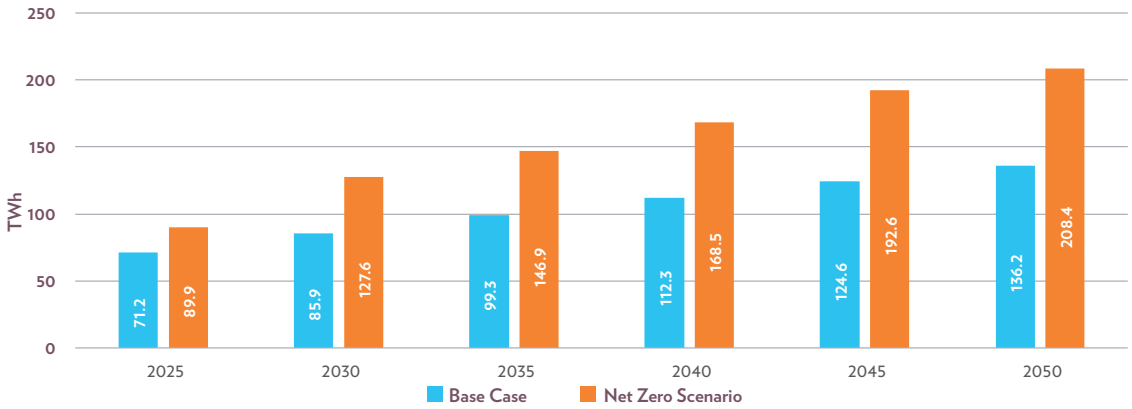
Konutlarda ısınma amaçlı elektrik tüketimi her iki senaryoda da 2018 seviyesine göre artmaktadır, ancak Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'ya göre 2050'de 2,6 kat daha fazladır. Konutlarda fosil yakıt tüketimi ise Baz Senaryo'da da 2050'de 2018'e göre %50'nin üzerinde azalmaktadır, ancak Net Sıfır Senaryosu'nda 2030'dan itibaren konutlarda kömür tüketimi sıfırlanmaktadır. Konutlarda ve ticari/kurumsal binalarda doğal gaz ve LPG tüketimi ise Baz Senaryo'da kömürden doğal gaza geçiş nedeniyle iki katına çıkmakta, Net Sıfır Senaryosu'nda ise elektrifikasyon nedeniyle 2050'de sıfırlanmaktadır. Net Sıfır Senaryosu'nda tüm binalarda sıvı yakıt ve biyokütle tüketimi de 2030'da sıfırlanmaktadır.

Bu çalışmada binaların toplam elektrik tüketimi; konutların elektrik tüketimi ve ticari/kurumsal binaların elektrik tüketimi olarak iki başlıkta incelenir. 2050 yılında Net Sıfır Senaryosu'nda konutların elektrik tüketimi Baz Senaryo'ya göre %52 artarken (Şekil 116) ticari/kurumsal binalarda aynı yılda Net Sıfır Senaryosu Baz Senaryo'ya göre %7 azalmaktadır.(Şekil 117)

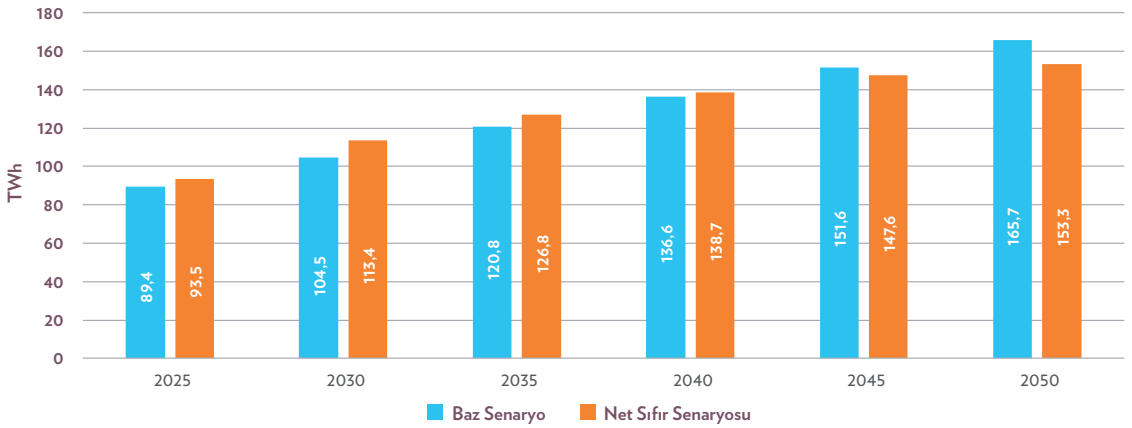
Tablo 33 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda konut ve ticari binalarda elektrik tüketimi varsayımları (TWh)

	Baz Senaryo: Konutlarda Elektrik Tüketimleri (TWh)	Net Sıfır Senaryosu: Konutlarda Elektrik Tüketimleri (TWh)	Baz Senaryo: Ticarethanelerde Elektrik Tüketimleri (TWh)	Net Sıfır Senaryosu: Ticarethanelerde Elektrik Tüketimleri (TWh)
2025	71,2	89,9	89,4	93,5
2030	85,9	127,6	104,5	113,4
2035	99,3	146,9	120,8	126,8
2040	112,3	168,5	136,6	138,7
2045	124,6	192,6	151,6	147,6
2050	136,2	208,4	165,7	153,3

Şekil 116 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda konutların elektrik tüketimi varsayımları (TWh)



Şekil 117 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda ticari binalarda elektrik tüketimi varsayımları



3.3. KARBONDİOKSİT EMİSYONLARI (BAZ SENARYO VE NET SIFIR SENARYOSU)

Bir önceki bölümde verilen elektrik tüketimleri ile Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryolarında 2050'ye kadar beşer yıllık aralıklarla bina türü (konutlar ve ticari/kurumsal binalar) ve yakıt bazında CO_2 emisyonları hesaplanmıştır. Net Sıfır Senaryosunda binalarda elektrik tüketiminden kaynaklanan toplam CO_2 emisyonları Baz Senaryoyla karşılaştırmalı olarakTablo 34 ve Şekil 118'de verilmiştir.

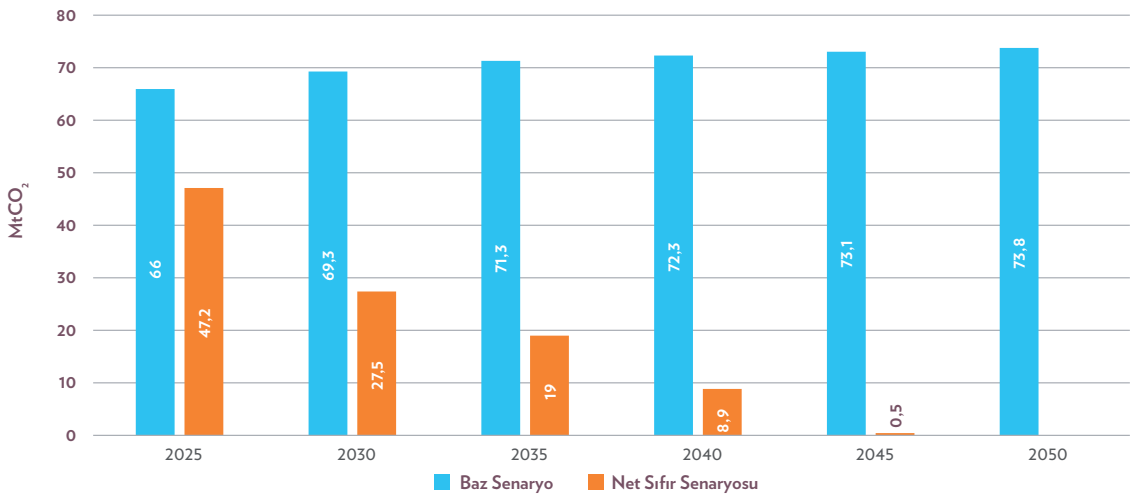
Her iki senaryoda gerçekleşen CO_2 emisyonlarının, bina türlerine göre dağılımı Tablo 35'te verilmiştir. Konutlarda ve ticari binalarda elektrik tüketiminden kaynaklı CO_2 emisyonlarının Şekil 119 ve Şekil 120'de senaryolara göre kıyaslanmıştır.

Binalardan kaynaklanan toplam emisyonlar 2030'da 2018 seviyesine göre %46 azalarak 27,5 milyon tona inmekte ve 2046'da sıfırlanmaktadır. Net Sıfır Senaryosu'nda bu azaltımı sağlayan en

Tablo 34 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda binalarda karbondioksit emisyonu varsayımları ($MtCO_2$)

	Baz Senaryo: Binalarda CO_2 Emisyonları ($MtCO_2$)	Net Sıfır Senaryosu: Binalarda CO_2 Emisyonları $MtCO_2$
2025	66	47,2
2030	69,3	27,5
2035	71,3	19
2040	72,3	8,9
2045	73,1	0,5
2050	73,8	0,0

Şekil 118 Baz Senaryoya ve Net Sıfır Senaryosuna göre binalarda karbondioksit emisyonu varsayımları ($MtCO_2$)



önemli müdahale, 2030 yılından itibaren konutlarda ve ticari/kurumsal binalarda ısınma amaçlı kömür ve sıvı yakıt kullanımının sonlandırılması ve kısmen doğal gaza, büyük ölçüde elektrikle ısınmaya geçilmesidir.

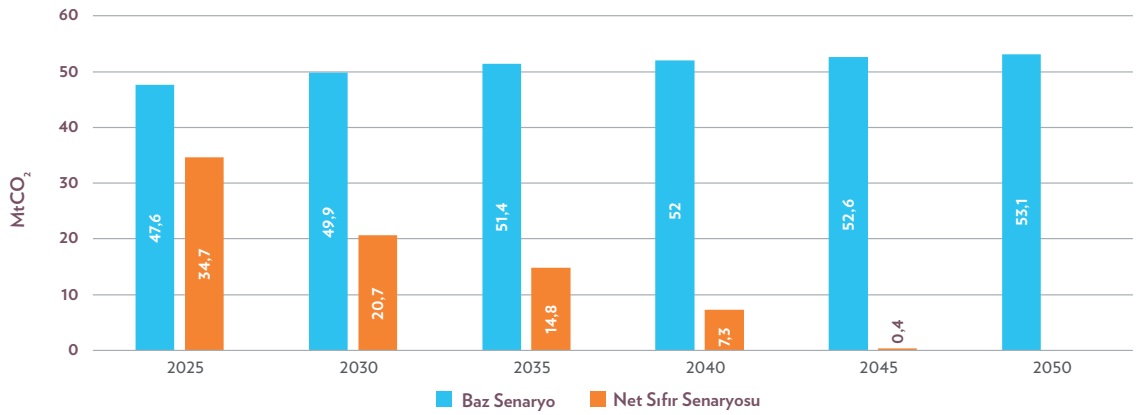
Binalarda fosil yakıtlar yerine büyük ölçüde elektrik kullanılmakta, ayrıca 2035'ten sonra sisteme küçük ölçekte yeşil hidrojen katılmaya başlandığı ve özellikle 2045'ten sonra artarak binalarda ısınma vb. için 2050'de 10 TWh'e eşdeğer yeşil hidrojen kullanıldığı varsayılmıştır.

Özellikle son dönemde 2022 yılında başlatılan, Dünya Bankası destekli "Kamu Binalarında Enerji Verimliliği (KABEV)" uygulaması, belediyelerin illerindeki "Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı (SECAP)" çalışmalarında 2030 yılında, 2019 yılına göre %40 emisyon azaltım taahhütleri, 2023 yılında 5000 m² üzeri binalarda başlatılan "sıfıra yakın bina" yapma zorunluluğu, ısı pompasına geçiş çalışmaları, bölgesel ısıtmaya geçiş ile ilgili kamu projeleri vb. olumlu gelişmeler en azından binalar için 2050 yılında net sıfır hedefine ihtimalini artırmaktadır.

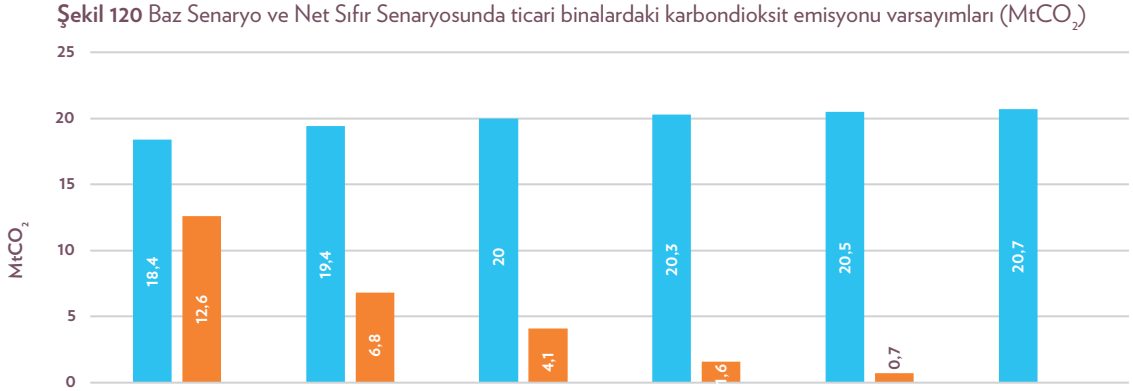
Tablo 35 Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda konut ve ticari binalarda karbondioksit emisyonu varsayımları ($MtCO_2$)

	Baz Senaryo: Konutlarda CO_2 Emisyonları ($MtCO_2$)	Net Sıfır Senaryosu: Konutlarda CO_2 Emisyonları ($MtCO_2$)	Baz Senaryo: Ticarethanelerde CO_2 Emisyonları ($MtCO_2$)	Net Sıfır Senaryosu: Ticarethanelerde CO_2 Emisyonları ($MtCO_2$)
2025	47,6	34,7	18,4	12,6
2030	49,9	20,7	19,4	6,8
2035	51,4	14,8	20	4,1
2040	52	7,3	20,3	1,6
2045	52,6	0,4	20,5	0,7
2050	53,1	0,0	20,7	0

Şekil 119 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda konutlardaki karbondioksit emisyonu varsayımları ($MtCO_2$)



Şekil 120 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda ticari binalardaki karbondioksit emisyonu varsayımları ($MtCO_2$)



4. SANAYİ VE DİĞER ÜRETİCİ SEKTÖRLER

"Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası - 2050'de Net Sıfır" başlıklı raporun 9. Bölümü, Türkiye'de üretici sektörlerde enerji tüketimi ve sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonları Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosuna göre değerlendirmektedir. Raporda vurgulandığı üzere, Türkiye'de sanayiden kaynaklanan emisyonlar ile tarım ve hizmetler gibi üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan karbondioksit emisyonları ve sanayideki proses emisyonları, toplam karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %35'ini oluşturmaktadır (2018 yılı verisi).

Raporda, Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu için kullanılan makroekonomik modele ilişkin varsayımlar ve makroekonomik modelin içerdiği 17 sektörün 5 başlık altında toplulaştırılmasına dair detaylar da sunulmuştur. Tablo 36, Türkiye ekonomisinde üretici sektörlerin toplam üretim ve ihracat payları ile enerji yoğunluğu ve enerji kullanımında farklı yakıt türlerinin payı ve karbondioksit emisyonlarını özet olarak sunmaktadır.

Bu raporda üretici sektörler için Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryoları altında temel bulgular, beşer yıllık aralıklarla özetlenmektedir. Net Sıfır Senaryosundaki hedeflere ulaşmak için kritik olan çözümler ayrıca detaylandırılmıştır.

Tablo 36 Üretici sektörlerin 2018 yılında toplam üretim ve ihracat içindeki payları, enerji yoğunluğu, enerji kullanımında yakıtların payı ve CO2 emisyonları

Başlıca Sektörler		Üretimdeki Payı (%)	İhracattaki Payı (%)	Enerji Yoğunluğu: Enerji (TEP)/Üretim (2018 TL)	Sektörün Enerji Tüketiminde (TEP) Yakıtların Payı (%)						Üretici Sektörlerin CO_2 Emisyonları (Mt)		
					Kömür	Petrol	Doğal Gaz	Elektrik	Diğer	Toplam	Enerji Tüketiminden Kaynaklanan	Endüstriyel Proseslerden Kaynaklanan	Toplam
Yüksek Enerji Yoğunluklu Sanayi (YES)	Metaller Harici Madenler: Çimento, vb.	2,2	2,5	57,5	26,7	35,7	17,7	11,6	8,4	100,0	30,0	43,9	73,9
	Demir-Çelik	3,2	7,3	35,3	54,5	0,1	14,5	27,1	3,8	100,0	4,2	12,8	17,0
	Enerji Yoğun Üretici Sektörler	8,7	15,7	7,8	10,8	0,3	49,6	32,0	7,3	100,0	11,2	1,8	13,0
Düşük Enerji Yoğunluklu Sanayi (DES)		24,9	56,9	5,1	11,7	1,3	27,5	36,8	22,7	100,0	18,1	1,4	19,5
Tarım (TAR)*		10,2	7,7	5,6		65,1	3,8	17,4	13,7	100,0	9,4	0	9,4
Hizmetler (HİZ)*		47,7	7,8	3,7	7,1	6,5	29,7	52,8	4,0	100,0	9,2	0	9,2
Enerji (ENE)**		3,1	2,0	-	-	-	-	-	-	-	8,0	0	8,0
Toplam		100,0	100,0								90,2	59,8	150,0

* Sadece enerji tüketimi ve enerjiden kaynaklanan CO_2 emisyonları** Sadece enerji sektörünün kendi enerji tüketiminden kaynaklanan CO_2 emisyonlar

4.1. VARSAYIMLAR

Üretici sektörlerden kaynaklanan CO_2 emisyonlarının Baz Senaryo'da ve Net Sıfır Senaryosu'nda 2018'den itibaren nasıl bir seyir izleyeceği, makroekonomik modeldeki talep dinamikleri varsayımlarının yanı sıra, emisyonlarda azalmaya neden olan enerji verimliliği, elektrifikasyon, yenilenebilir enerji (rüzgâr, güneş, biyokütle ve jeotermal), yeşil hidrojen ve karbon yakalama ve gömme teknolojilerinin (CCSU) yıllara göre sisteme giriş varsayımlarına göre belirlenmiştir.

Talep değişimi

Türkiye ekonomisi için Tablo 36'da verilen yüksek emisyonlu sektörlerde (YES) talebin Uluslararası Enerji Ajansı'nın küresel talep projeksiyonlarına uygun bir şekilde değişeceği varsayımı kullanılmıştır (IEA, 2021). Buna göre,

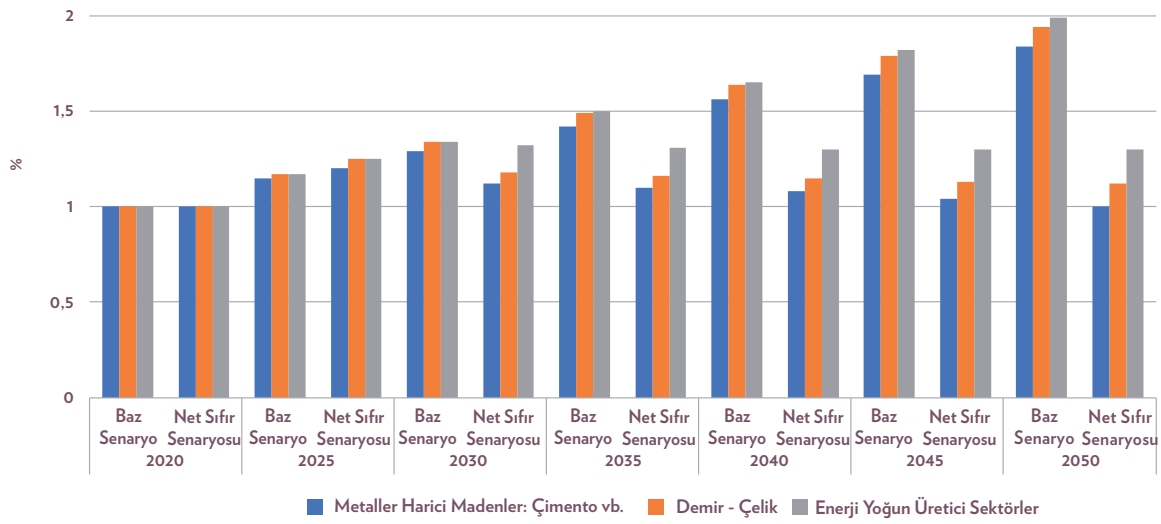
- Çimento gibi metal harici madenler sektöründe küresel talebin önce artacağı ancak daha sonra azalarak 2050'de 2020 düzeyinde olacağı;
- Demir çelik sektöründe küresel talebin artarak 2050'de 2020 düzeyinin %12 üzerinde gerçekleşeceği;

Kimya sektörü gibi diğer enerji yoğun sektörlerde küresel talebin 2050'de 2020 düzeyinin %30 üzerinde gerçekleşeceği varsayılmıştır (bakınız Tablo 37 ve Şekil 121).

Tablo 37 Yüksek Emisyonlu Sanayi (YES) sektörlerinde yıllar içinde varsayılan talep değişimi

	Baz Senaryo							Net Sıfır Senaryosu						
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Metaller Harici Madenler: Çimento vb.	1	1,15	1,29	1,42	1,56	1,69	1,84	1	1,2	1,12	1,1	1,08	1,04	1
Demir - Çelik	1	1,17	1,34	1,49	1,64	1,79	1,94	1	1,25	1,18	1,16	1,15	1,13	1,12
Enerji Yoğun Üretici Sektörler	1	1,17	1,34	1,5	1,65	1,82	1,99	1	1,25	1,32	1,31	1,3	1,3	1,3

Şekil 121 Yüksek Emisyonlu Sanayi (YES) sektörlerinde yıllar içinde varsayılan talep değişimi



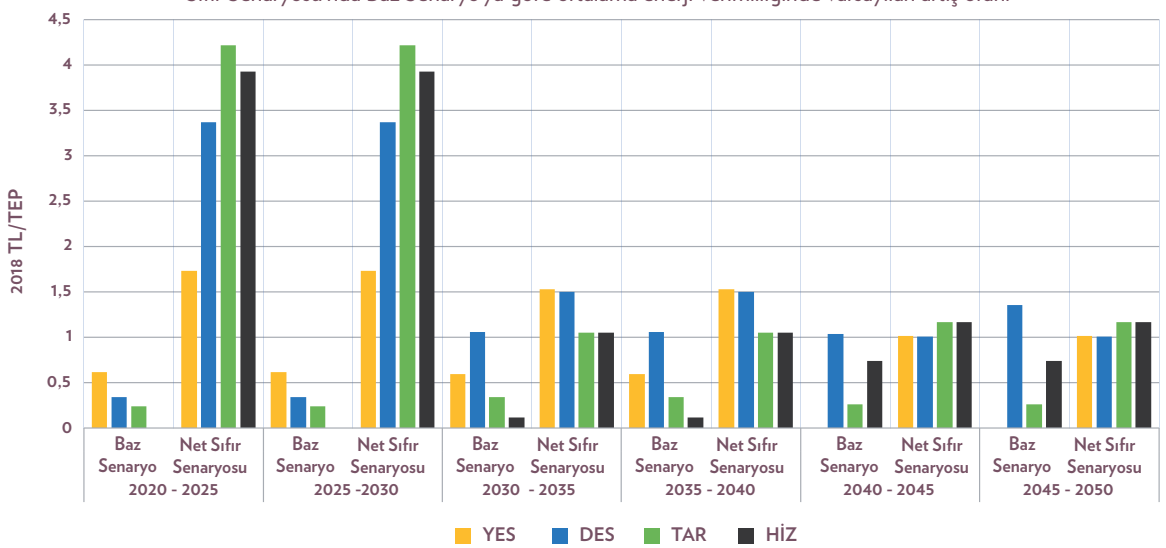
Enerji (ve proses) verimliliği

Yüksek emisyonlu sanayi sektörlerinde enerji verimliliğindeki artışın Net Sıfır Senaryosu'na katkısının 2020-2030 dönemi için görece daha yüksek olacağı ve bu katkının izleyen dönemde daha düşük bir tempoda gerçekleşeceği varsayılmıştır (IEA, 2021). Enerji verimliliğindeki artışın katkısının diğer sektörlerde de YES'de olduğu gibi 2020-2030 arasında daha yüksek olacağı varsayılmıştır. Düşük emisyonlu sanayi sektörlerinde (DES) 2020-2030 arasında (Baz Senaryo'ya göre) yıllık ortalama %3,4, 2030-2040 arasında yıllık ortalama %1,5 ve 2040-2050 arasında yıllık ortalama %1 civarında bir enerji verimliliği artış oranı varsayılmıştır (IRENA, 2018; Material Economics, 2019; IEA, 2021). Tablo 38ve Şekil 122'de, beşer yıllık aralıklarla, Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu altında üretici sektörlerde enerji verimliliği artış oranı üzerine varsayımları (Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'ya göre) özetlenmiştir.

Tablo 38 Tüm üretici sektörlerde (enerji hariç) yıllar içinde Baz Senaryo'da ortalama enerji verimliliğinde varsayılan artış oranı (2018 TL/TEP) ve Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'ya göre ortalama enerji verimliliğinde varsayılan artış oranı (2018 TL/TEP)

	Baz Senaryo						Net Sıfır Senaryosu					
	2020 - 2025	2025 - 2030	2030 - 2035	2035 - 2040	2040 - 2045	2045 - 2050	2020 - 2025	2025 - 2030	2030 - 2035	2035 - 2040	2040 - 2045	2045 - 2050
YES	0,62	0,62	0,6	0,6	0	0	1,73	1,73	1,53	1,53	1,02	1,02
DES	0,34	0,34	1,06	1,06	1,04	1,36	3,37	3,37	1,5	1,5	1,01	1,01
TAR	0,24	0,24	0,34	0,34	0,26	0,26	4,22	4,22	1,05	1,05	1,17	1,17
HIZ	0	0	0,12	0,12	0,74	0,74	3,93	3,93	1,05	1,05	1,17	1,17

Şekil 122 Tüm üretici sektörlerde (enerji hariç) yıllar içinde Baz Senaryo'da ortalama enerji verimliliğinde varsayılan artış oranı ve Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'ya göre ortalama enerji verimliliğinde varsayılan artış oranı



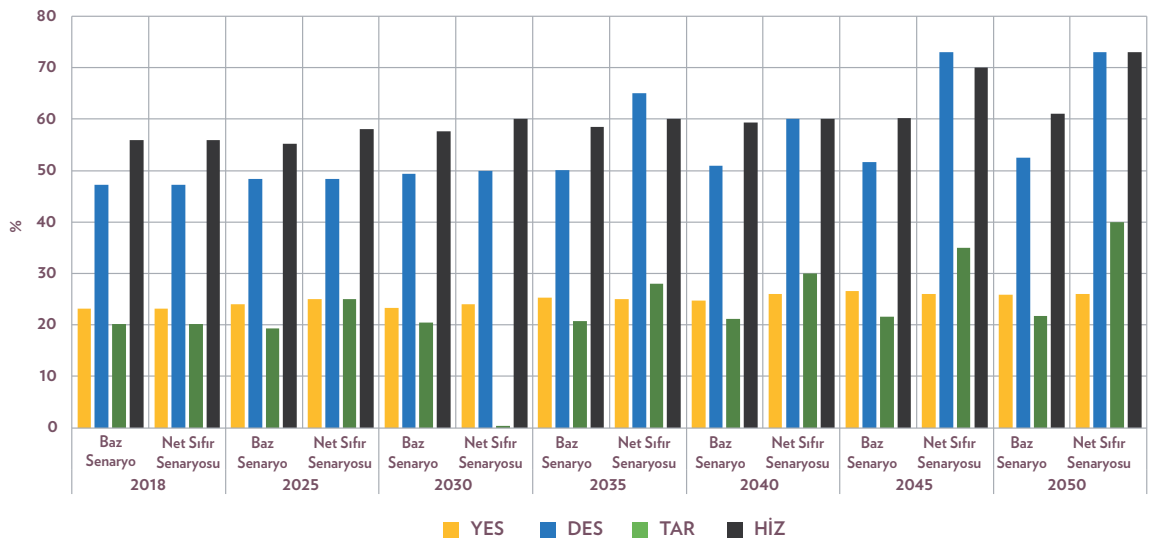
Elektrifikasyon

Tüm sektörlerde toplam enerji tüketiminde elektriğin payı uluslararası raporlar ile uyumlu varsayımlara dayanmaktadır (IRENA, 2018; IEA, 2021). Tablo 39 ve Şekil 123'te, farklı sektörler için elektriğin toplam enerji kullanımı içindeki payı 2018-2050 dönemi için özetlenmektedir (2018'deki paylar enerji denge tablolarından elde edilmiştir, ETKB, 2020). Tablodan da takip edilebileceği gibi YES için elektrifikasyon oranındaki artışın düşük, DES ve tarımda ise daha yüksek düzeyde gerçekleşeceği varsayılmaktadır.

Tablo 39 Tüm üretici sektörlerde (enerji hariç) yıllar içinde elektriğin toplam enerji içindeki oranında varsayılan değişim (%)

	Baz Senaryo							Net Sıfır Senaryosu						
	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
YES	23,2	24	23,3	25,3	24,7	26,6	25,9	23,2	25	24	25	26	26	26
DES	47,2	48,4	49,3	50,1	50,9	51,7	52,5	47,2	48,4	50	65	60	73	73
TAR	20,2	19,3	20,5	20,8	21,2	21,6	21,8	20,2	25	0,3	28	30	35	40
HIZ	55,9	55,2	57,7	58,5	59,4	60,2	61,1	55,9	58	60	60	60	70	73

Şekil 123 Tüm üretici sektörlerde (enerji hariç) yıllar içinde elektriğin toplam enerji içindeki oranında varsayılan değişim (%)



Yenilenebilir enerji kullanımı

Sanayi ve diğer üretici sektörlerde doğrudan kullanılan (sektörün tükettiği elektriğin içindeki yenilenebilir kaynaklar hariç) yenilenebilir enerjinin toplam enerji tüketimindeki payında artış varsayımları Tablo 40 ve Şekil 124'te verilmiştir. Buradaki varsayımlar, yine uluslararası literatürden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir (IRENA, 2018; Saygin vd., 2011; Saygin vd., 2014). 2018 yılı için yenilenebilir kaynakların payları enerji denge tablolarından elde edilmiştir (ETKB, 2020). Güncel olarak ilgili sektörlerde doğrudan yenilenebilir kaynak kullanımı ihmal edilebilir düzeyde olduğu için sıfır kabul edilmiş ve Baz Senaryo'da bir değişiklik olmayacağı varsayılmıştır.

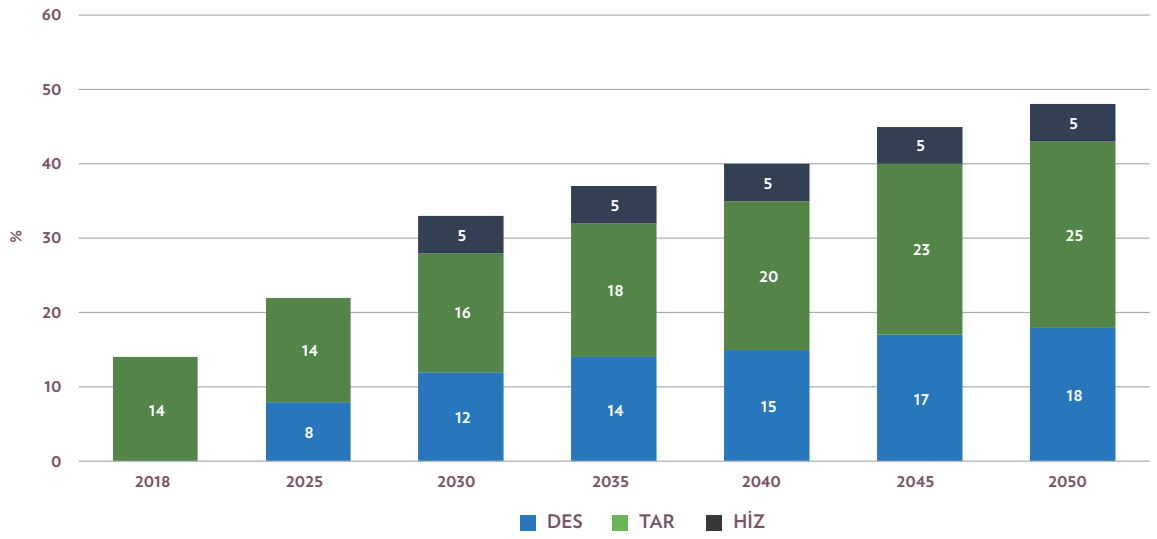
Yeşil Hidrojen ve Karbon Yakalama ve Gömme (CCUS)

Çalışmada yeşil hidrojen teknolojileriyle ilgili olarak oldukça muhafazakar varsayımlar kullanılmış, yeşil hidrojenin yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde anlamlı oranda kullanımının Türkiye'de yakın dönemde mümkün olmayacağı, ancak 2040'lardan sonra başlayarak kullanımın başlayacağı ve bu sektörlerin toplam enerji tüketimindeki payının 2050'de ancak %5'e ulaşacağı varsayılmıştır.

Tablo 40 Net Sıfır Senaryosu'nda tüm üretici sektörlerde (YES ve Enerji hariç) yıllar içinde doğrudan kullanılan yenilenebilir kaynakların toplam enerji içindeki oranında varsayılan değişim (%)

	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
DES	0	8	12	14	15	17	18
TAR	14	14	16	18	20	23	25
HIZ	0	0	5	5	5	5	5

Şekil 124 Net Sıfır Senaryosunda tüm üretici sektörlerde (YES ve enerji hariç) yıllar içinde doğrudan kullanılan yenilenebilir kaynakların toplam enerji içindeki oranında varsayılan değişim



Karbon Yakalama ve Gömme Teknolojilerinin (CCUS) yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde kullanımının da yine 2040'lara doğru başlayabileceği ve bu teknolojilerin sektörel toplam emisyonlarının 2040'ta %5'ine, 2050'de %10'una varan düzeylerde azalmaya yol açabileceği varsayılmıştır. Diğer üretici sektörlerde yeşil hidrojen ve CCUS teknolojilerinin 2020-2050 döneminde kullanılmayacağı varsayılmıştır.

4.2. KARBONDİOKSİT EMİSYONLARI

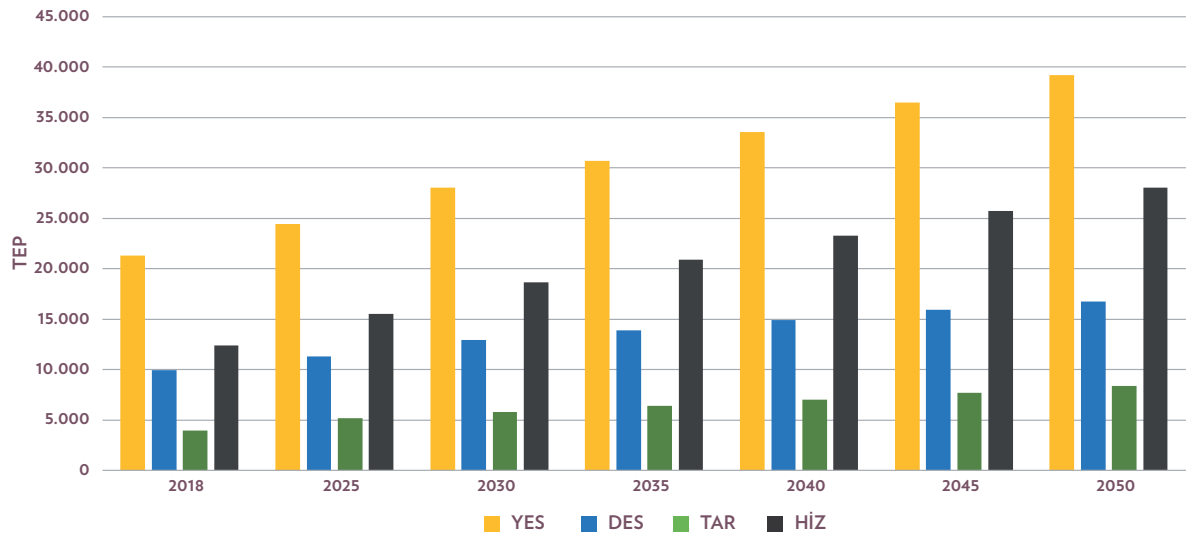
Baz Senaryo

Baz Senaryo'da üretici sektörlerde enerji talebinin izleyeceği patikaTablo 41 ve Şekil 125'te detaylı olarak sunulmuştur. Baz Senaryo altında ekonomide üretici sektörler için enerji talebi 2050'ye kadar 2 kata yakın artmaktadır (Şekil 126). Hizmetler ve tarım sektöründeki artış daha yüksek olmakla birlikte, yüksek enerji yoğunluklu sektörlerdeki enerji talep artışı emisyonları daha fazla etkilemektedir.

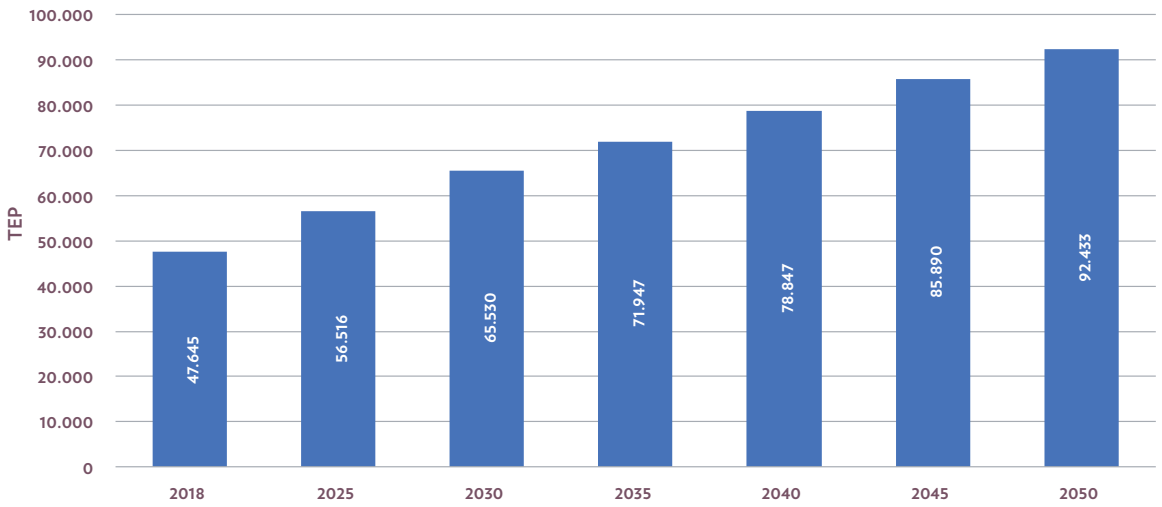
Tablo 41 Baz Senaryoda üretici sektörlerde (enerji hariç) enerji talebinde artış (TEP)

	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
YES	21.301	24.478	28.070	30.713	33.563	36.482	39.219
DES	9.986	11.333	12.970	13.883	14.921	15.936	16.747
TAR	3.953	5.162	5.795	6.405	7.040	7.703	8.390
HIZ	12.405	15.544	18.696	20.946	23.323	25.770	28.077
Toplam	47.645	56.516	65.530	71.947	78.847	85.890	92.433

Şekil 125 Baz Senaryoda üretici sektörlerde (enerji hariç) enerji talebinde artış (TEP)



Şekil 126 Baz Senaryoda üretici sektörlerde (enerji hariç) toplam enerji talebinde artış (TEP)



Baz Senaryo'da üretici sektörlerin emisyonlarındaki artış, sektörlere göre beş yıllık aralıklarla Tablo 42'de sunulmaktadır. Buna göre YES ve DES, tarım ve hizmetler sektörlerinde enerji tüketiminden kaynaklanan CO_2 emisyonları 2030'da 2018 seviyesine göre %17 ve 2050'de %42,5 oranında artmakta, ancak sanayi proseslerindeki artışın çok daha yüksek olması nedeniyle (2030'da %23, 2050'de %78), proses emisyonları dahil sanayi ve diğer üretici sektörlerin toplam emisyonlarındaki artış daha belirgin olmaktadır. Sanayide enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlarda en büyük pay sanayi proses emisyonlarının da sorumlusu olan YES olmakla birlikte bu sektörlerin payı yıllar içinde yaklaşık %50 civarında seyretmektedir. Sanayi proses emisyonlarının toplam emisyonlar içindeki payı ise zaman içerisinde artmaktadır: 2018'de %40, 2030'da %41,1, 2040'da %57 ve 2050'de %54,7.

Tablo 42 Baz Senaryoda sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlar ve sanayinin proses emisyonları ($MtCO_2$)

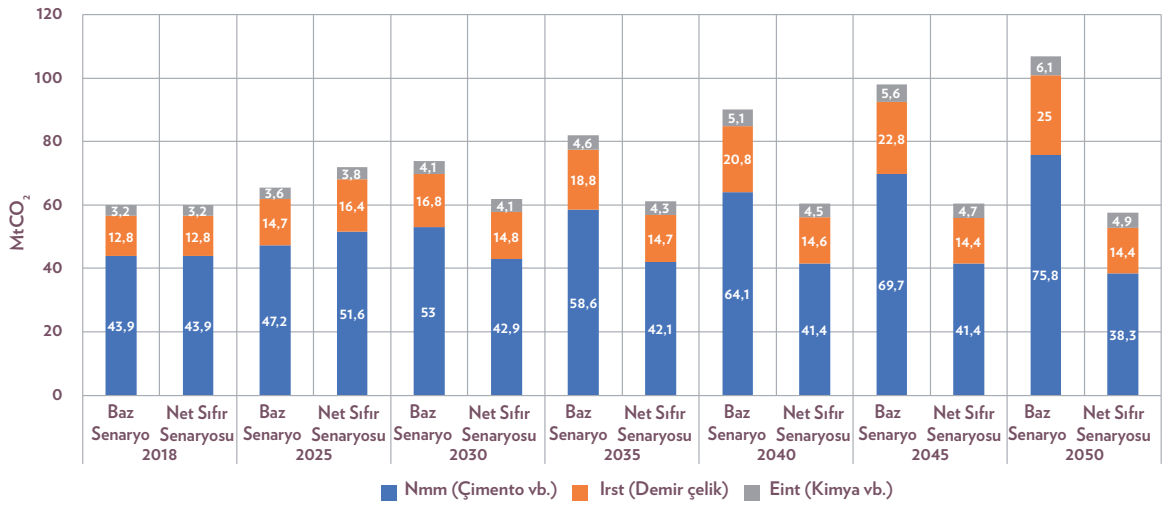
	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
YES	45,5	49	53,6	56,5	59,1	61,3	62,9
DES	26,6	25,5	28,4	30,6	32,5	34,4	36,4
TAR	9,4	11,8	12,8	13,7	14,5	15,2	16
HIZ	9,2	10,1	11,3	12,1	12,7	13,3	13,8
Enerji Tüketiminden Kaynaklanan Toplam Emisyonlar	90,7	96,5	106,1	112,9	118,8	124,2	129,2
Sanayi Proseslerinden Kaynaklanan Emisyonlar	59,8	65,5	73,9	82	89,9	98,1	106,9
Sanayi ve Diğer Üretici Sektörlerin Toplam Emisyonları	149,8	162	180	194,9	208,7	222,3	236,1

Baz Senaryo'da yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonların çoğunluğundan 2018'de emisyonlardaki payı %66 olan çimento gibi nmm kodlu sektörler sorumludur. Bu sektörün payı 2050 yılına kadar hafif bir düşüş göstermekte ve 2050 yılında %63,8 olmaktadır (Tablo 43'te beşer yıllık detayda YES için enerji tüketiminden kaynaklı emisyonların sektörel dağılımı sunulmuştur). Sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların da yüzde 73'ü çimento sektöründen kaynaklanmaktadır (2018 yılı için). Çimento sektörünün sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonlardaki payı dönem boyunca %70'lerin üzerinde seyretmeye devam etmektedir (Tablo 44). Ayrıca Net Sıfır Senaryosu'nda ve Baz Senaryoda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların sektörlere dağılımları Şekil 127'de kıyaslanmıştır.

Tablo 43 Baz Senaryoda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde (YES) enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonların sektörlere göre dağılımı ($MtCO_2$)

	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Nmm (Çimento vb.)	30,1	32,6	35,4	36,8	38,2	39,3	40,1
Irst (Demir çelik)	4,2	4,5	5	5,4	5,7	6	6,2
Eint (Kimya vb.)	11,2	12	13,3	14,3	15,2	16	16,7
YES (Toplam)	45,5	49	53,6	56,5	59,1	61,3	62,9

Şekil 127 Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosunda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde (YES) sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların sektörlere göre dağılımı



Tablo 44 Baz Senaryoda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde (YES) sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların sektörlere göre dağılımı ($MtCO_2$)

	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Nmm (Çimento vb.)	43,9	47,2	53	58,6	64,1	69,7	75,8
Irst (Demir çelik)	12,8	14,7	16,8	18,8	20,8	22,8	25
Eint (Kimya vb.)	3,2	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1
YES (Toplam)	59,8	65,5	73,9	82	89,9	98,1	106,8

Net Sıfır Senaryosu

Enerjiden kaynaklanan CO_2 emisyonları

Net Sıfır Senaryosu'nda kullanılan varsayımlar altında yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde 2050'ye kadar enerji talebi azalmakta (2018'e göre 2030'da %0,06'lık artışa karşılık 2040 yılında 2018 yılına eşit enerji talebi, 2050'de 2018'e göre %30 azalma), düşük enerji yoğunluklu sektörlerde ve tarımda ise artış görülmektedir (Tablo 45).

Sanayi ve diğer üretici sektörlerinde enerji tüketiminden kaynaklanan CO_2 emisyonlarındaki değişim Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'yla karşılaştırmalı olarak 2018-2050 arasında beşer yıllık aralarla Tablo 46 ve Şekil 128'de sunulmuştur. Buna göre:

- Yüksek Emisyonlu Sanayi sektörlerinde CO_2 emisyonu azaltımı özellikle 2030'dan sonra hızlanmaktadır. 2030 yılında 2018'e göre %4,5 daha düşük olan toplam emisyonlar, 2040 yılında 2018'e göre %36 ve 2050'de yine 2018 seviyesine göre %62,2 daha düşüktür.
- Düşük Emisyonlu Sanayi sektörlerinde de emisyon azaltımı da özellikle 2030'dan sonra hızlanmakta ve 2018 seviyesine göre 2040'da %56,1, 2050'de ise %73,3 azalmaktadır.

Tarım sektöründe enerjiden kaynaklanan CO_2 emisyonlarının azaltımı 2020'den sonra başlamakta ve 2050'de emisyonlar yaklaşık %63 oranında azalmaktadır. Hizmetler sektöründe 2050 yılı emisyonları 2018 yılı seviyesinin yaklaşık %74 altındadır.

Tablo 45 Net Sıfır Senaryosu'nda üretici sektörlerde (enerji hariç) enerji talebinde değişim (TEP)

	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
YES	21.301	22.601	21.314	19.921	18.616	17.855	14.718
DES	9.986	9.642	9.908	10.540	10.840	11.062	12.005
TAR	3.954	3.769	3.604	3.575	3.911	4.026	4.124
HIZ	12.406	11.051	10.043	10.477	10.824	10.612	11.312
Toplam	47.647	47.065	44.870	44.513	44.191	43.557	42.160

Tablo 46 Üretici sektörlerin enerjiden kaynaklanan CO_2 emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma ($MtCO_2$)

a. Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörler

	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Baz Senaryo	45,5	49	53,6	56,5	59,1	61,3	62,9
Net Sıfır Senaryosu	45,5	45,8	43,4	32,5	28,9	22	17,2

b. Düşük Enerji Yoğunluklu Sektörler

	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Baz Senaryo	26,6	25,5	28,4	30,6	32,5	34,4	36,4
Net Sıfır Senaryosu	26,6	15,7	15,9	14,4	11,7	7,1	7,1

c. Tarım

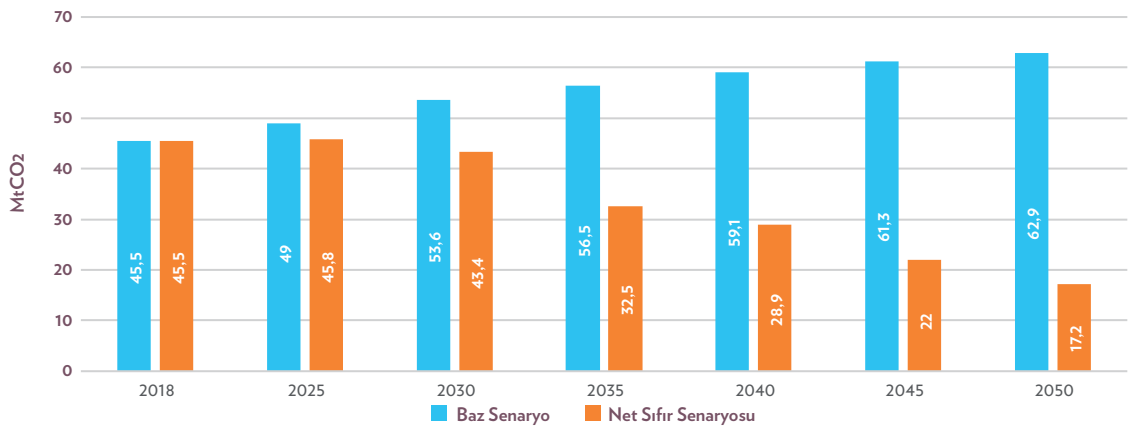
	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Baz Senaryo	9,4	11,8	12,8	13,7	14,5	15,2	16
Net Sıfır Senaryosu	9,4	6,5	5,9	5,2	5,1	4,3	3,5

d. Hizmetler

	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Baz Senaryo	9,2	10,1	11,3	12,1	12,7	13,3	13,8
Net Sıfır Senaryosu	9,2	6,9	5	5,1	3,9	2,9	2,4

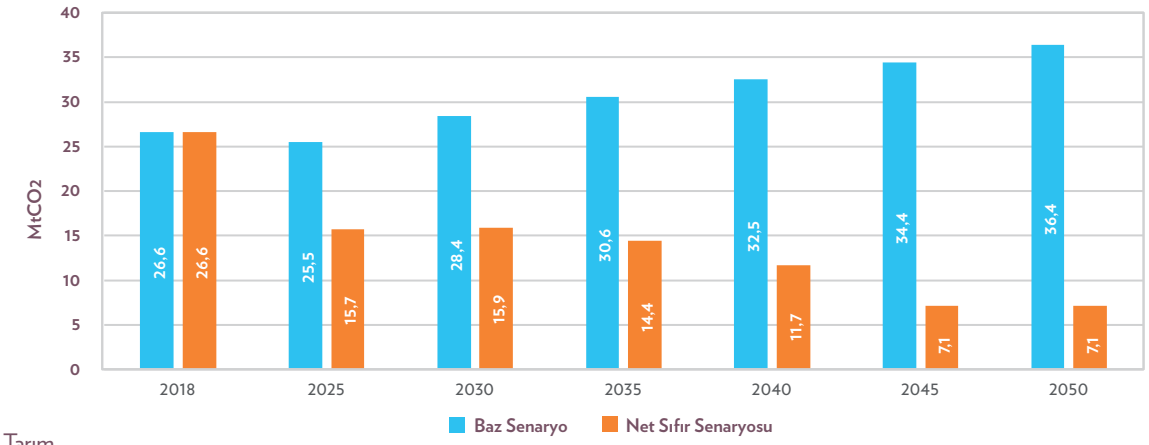
Şekil 128 Üretici sektörlerin enerjiden kaynaklanan CO_2 emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma ($MtCO_2$)

a. Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörler

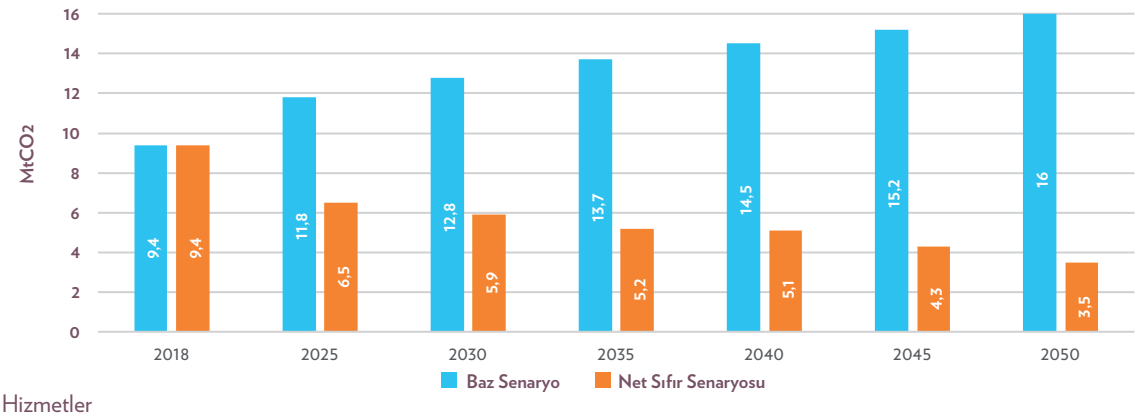


Şekil 128 Üretici sektörlerin enerjiden kaynaklanan CO_2 emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma ($MtCO_2$)

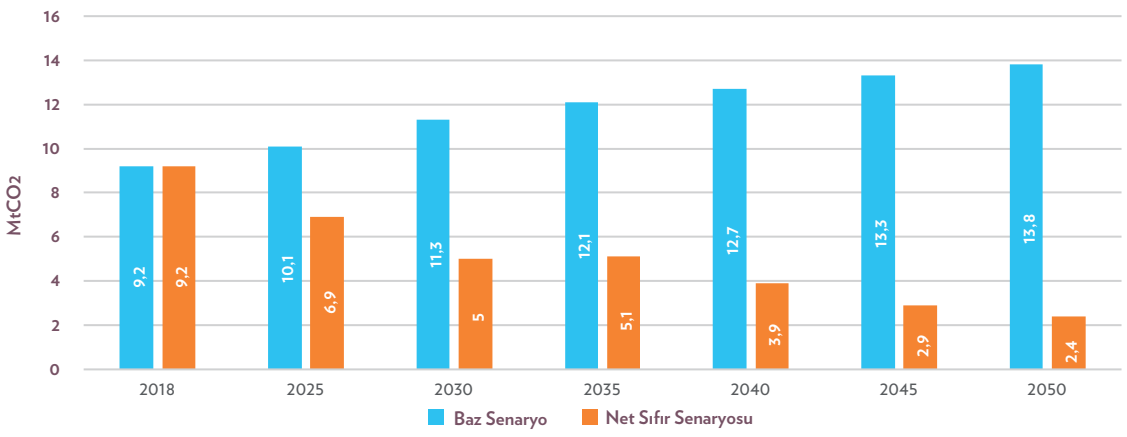
b. Düşük Enerji Yoğunluklu Sektörler



c. Tarım



d. Hizmetler

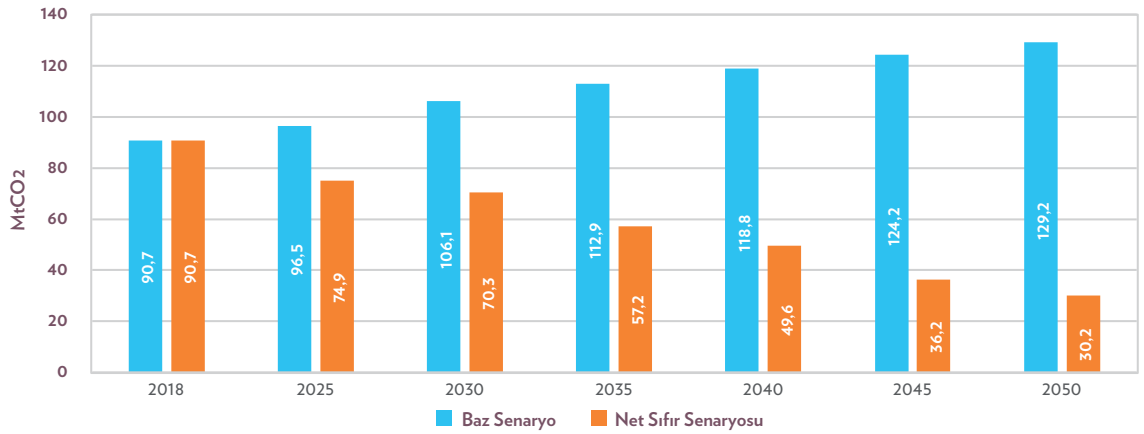


Net Sıfır Senaryosu'nda sanayi ve diğer üretici sektörlerin enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonları topluca Tablo 47'de verilmiştir. Toplam emisyonlar 2018 seviyesine göre 2030'da %22,5, 2040'ta %45,3 ve 2050'de %66,7 oranında azalmaktadır. 2050'de kalan 30 $MtCO_2$ emisyonun %57'si yüksek, %23,5'u ise düşük enerji yoğunluklu sanayi sektörlerinden kaynaklanmaktadır. 2050 yılında Baz Senaryo'daki karbondioksit emisyonu Net Sıfır Senaryosu'ndaki karbondioksit emisyonunun 4 katından fazladır (Şekil 129).

Tablo 47 Net Sıfır Senaryosunda üretici sektörlerin (enerji hariç) enerji tüketiminden kaynaklanan CO_2 emisyonlarında azalma ($MtCO_2$)

	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
YES	45,5	45,8	43,4	32,5	28,9	22	17,2
DES	26,6	15,7	15,9	14,4	11,7	7,1	7,1
TAR	9,4	6,5	5,9	5,2	5,1	4,3	3,5
HIZ	9,2	6,9	5	5,1	3,9	2,9	2,4
Toplam	90,7	74,9	70,3	57,2	49,6	36,2	30,2

Şekil 129 Tüm üretici sektörlerde (enerji hariç) enerjiden kaynaklanan toplam CO_2 emisyonlarına Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma



Sanayi Proseslerinden Kaynaklanan CO_2 Emisyonları

Yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde, sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların azaltılmasına neden olacak en önemli bileşenlerden biri, enerjiden kaynaklanan emisyonlarda olduğu gibi Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu arasındaki talep artış farkıdır. Türkiye'de yüksek enerji yoğunluklu sanayi sektörlerinde, talebin Uluslararası Enerji Ajansı'nın küresel talep projeksiyonlarına uygun bir şekilde değişeceği varsayımıyla oluşturulan Tablo 37'deki talep değişimi, çimento, demir-çelik ve benzeri sektörlerde sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonları zaman içerisinde azaltmaktadır. Buna göre talep değişimi, 2018 yılına göre, 2030'da %12, 2040'ta %29,3 ve 2050'de %43,4 daha düşük proses emisyonlarına neden olabilecektir (Tablo 48)[4].

Tablo 48 Net Sıfır Senaryosunda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde (YES) sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların sektörlere göre dağılımı ($MtCO_2$)

	2018	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Nmm (Çimento vb.)	43,9	51,6	42,9	42,1	41,4	41,4	38,3
Irst (Demir çelik)	12,8	16,4	14,8	14,7	14,6	14,4	14,4
Eint (Kimya vb.)	3,2	3,8	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9
YES (Toplam)	59,8	71,8	61,8	61,1	60,4	60,5	57,6

4 Taler değişim etkisine ek olarak çimento sektörü için Avrupa Çimento Birliği (European Cement Association) klinker emisyonlarının azaltılması ile ilgili varsayımları da 2030-sonrası dönem için kullanılmıştır.

SONUÇ

Bu raporda Türkiye'nin 2053'te net sıfır ulusal hedefine uygun olarak oluşturulan örnek Net Sıfır Senaryosunda, ülke ekonomisinde gerçekleşecek karbonsuzlaşmanın, elektrik, ulaşım, binalar, sanayi ve diğer üretici sektörlerde 5 yıllık aralıklarla nasıl bir seyir izleyeceği, elektrik sektöründeki dönüşümün takvimi, coğrafi dağılımı ve şebeke üzerindeki etkileri sunulmuştur. Raporda ulusal sera gazı emisyonlarının yaklaşık %80'ini teşkil eden karbondioksit (CO_2) emisyonları çalışılmış, diğer sera gazları el e alınmamıştır. Raporda elektrik sektöründe mevcut kömürlü termik santrallerin ne zaman ve hangi sırayla devreden çıkarılarak elektrik sektöründe kömürden çıkışın tamamlanabileceği; devreye alınacak yeni doğal gaz ve yenilenebilir enerji santralleri ile bunlar için uygun depolama tesislerinin hangi bölgelerde, ne zaman ve hangi büyüklüklerde kurulmasının gerekeceği ve bu dönüşüm sırasında şebeke yatırım gereksinimleri dahil olmak üzere elektrik şebekesinin nasıl etkileneceği gösterilmiştir.

Elektrik sektörü

Elektrik şebekesi için yapılan piyasa ve şebeke simülasyonlarında 2020 yılı şebeke modeli baz alınarak ve 2025 yılından başlanarak 2050 yılına kadar 5'er yıllık aralıklarla Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu çalışılmış, sonuç olarak 2050 yılına kadar her iki senaryoda kaynaklara göre elektrik kurulu gücü ve enerji üretiminin değişimi hem ulusal düzeyde hem de 9 TEİAŞ yük tevzi bölgesine göre bölgesel düzeyde gösterilmiştir. Elektrik sektörü için ayrıca her iki senaryoda yenilenebilir enerjinin yüksek miktarlarda devreye girmesiyle artan Yük Al ve Yük At (YAL/YAT) talimatları ve yenilenebilir kesinti miktarları modellenmiş, buna göre Net Sıfır Senaryosu için elektrik şebekesinde yapılması gereken ek yatırımlar belirlenmiştir. Türkiye'nin 2025 yılında sunacağı ikinci Ulusal Katkı Beyanı (NDC) için hedef yıl olan 2035 yılı da göz önünde tutularak elektrik sektörü için elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir:

Türkiye'nin 2053'te net sıfır hedefine hizmet edebilecek Net Sıfır Senaryosunda yenilenebilir enerji kurulu gücü hızla artmaktadır. Bu dönüşümün gerçekleşmesi için gerekli sistem esnekliğini sağlamak için, mevcut sistemde bulunmayan depolama sistemleri (pompajlı HES ve batarya depolama) hızla devreye girmeye başlayarak 2030'a kadar 5,7 GW'ye, 2035'e kadar 10,7 GW'ye, 2050'ye kadar ise Baz Senaryodaki varsayımın (3 GW) 13 katına denk gelecek şekilde yaklaşık 40 GW'ye yükselmektedir. Yenilenebilir enerji santrallerinin nerelerde kurulduğu, depolama sistemlerinin yük tevzi merkezleri arasındaki dağılımını önemli ölçüde belirlemekte, örneğin Orta Anadolu bölgesinin yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olması ve devreye girmesi planlanan Gökçekaya pompaj depolamalı HES'in bu bölgede bulunması, depolama sistemlerinin Orta Anadolu'da daha fazla artış göstermesine neden olmaktadır. Bir esneklik mekanizması olarak kullanılabilecek uluslararası enterkoneksiyon hatlarının (ENTSO-E ve Gürcistan) Net Transfer Kapasitesi'nin de 2020'de 0,96 GW iken 2030'da 3,35 GW'ye ve 2050'de 9,22 GW'ye yükseleceği öngörülmektedir. Net Sıfır Senaryosunda öngörülen Net Transfer Kapasitesi Baz Senaryoda öngörülenin 1,5 katından biraz fazladır.

Net Sıfır Senaryosunda 2020'den hemen sonra, önce rüzgâr, ardından güneş kurulu gücünde ve üretiminde hızlı bir artış olmakta ve 2040'tan sonra düşük miktarlarda da olsa konsantre güneş ve deniz üstü rüzgâr kapasiteleri sisteme eklenmektedir. Net Sıfır Senaryosunda kara ve deniz üstü rüzgâr kurulu gücü 2030'da 32 GW'yi, 2035'te 50 GW'yi ve 2050'de 62 GW'yi geçmektedir.

Güneş enerjisi kurulu gücü ise çok daha hızlı bir büyümeyle 2030'da 36 GW'ye, 2035'te 60 GW'ye ve 2050'de 193 GW'ye ulaşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan jeotermal enerjinin kurulu gücünde daha sınırlı bir artış öngörülmekte (2020'de 1,5 GW, 2035'te 3,5 GW, 2050'de 5,5 GW), 2020'de 1 GW olan biyokütle santrallerinin kurulu gücü ise 2030'da 6 GW'ye, 2050'de ise 16 GW'ye çıkmaktadır. HES'lerin kurulu gücünde ise modern yenilenebilir enerji santrallerine göre daha sınırlı bir artış görülmektedir (2020'de 31 GW iken, 2035'e kadar 34,5 GW ve 2050'ye kadar 44 GW).

Yenilenebilir enerjinin TEİAŞ Yük Tevzi Bölgelerine göre dağılımında, elektrik üretim sistemine yeni eklenecek yenilenebilir enerji santrallerinin ana yük merkezlerine yakın konumlanacağı varsayılmıştır. Nitekim YEKA mekanizması ile de yeni yenilenebilir santrallerin şebeke açısından uygun noktalara konumlanması amaçlanmaktadır. Depolama sistemlerinin de yine aynı şekilde ana yük merkezlerine öncelik verilerek konumlanacağı ve şebekenin esneklik ihtiyacına göre merkezi bir şekilde kontrol edileceği varsayılmıştır. Buna göre en yüksek modern yenilenebilir enerji (rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyokütle) kurulu gücü Batı Anadolu'da gelişmekte (2025'te 10 GW, 2035'te 23 GW ve 2050'de 46 GW), ardından Kuzeybatı Anadolu ve Orta Anadolu gelmektedir (2025'te iki bölge de 7 GW, 2035'te sırasıyla 20 GW ve 18 GW, 2050'de 40 GW ve 43 GW). Yenilenebilir kurulu gücünün en az geliştiği bölge Doğu Anadolu'dur. Güneş enerjisi özelinde bakıldığına Orta Anadolu ve Güneydoğu Anadolu'da kurulumlar hızla artmakta ve 2035'te her iki bölge de 10 GW'ye, 2050'de sırasıyla 34 GW'ye ve 30 GW'ye çıkmaktadır. Rüzgâr enerjisi kurulu güçleri ise Batı Anadolu ve Batı Akdeniz'de yoğunlaşmaktadır (2035'te sırasıyla 11 GW ve 9 GW, 2050'de 14 GW ve 11 GW). Jeotermal enerji tamamen Batı Anadolu'da toplanırken, biyokütle kurulu gücü Kuzeybatı Anadolu ve Batı Akdeniz'de yoğunlaşmaktadır. Yenilenebilir enerjiyle birlikte kurulması gereken depolama sistemlerinin kurulu gücü de en fazla sırasıyla Orta Anadolu, Güneydoğu Anadolu, Batı Anadolu ve Kuzeybatı Anadolu'da yoğunlaşmaktadır.

Net Sıfır Senaryosunda modern yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimdeki payı 2020 yılında %17 iken gittikçe artarak 2030'da %46'ya, 2035'te %64'e ve 2050 yılında neredeyse %80 düzeyine erişmekte; fosil yakıt kaynaklarının üretimdeki payı ise hızla azalarak 2020 yılında %58'den, 2030'da %29'a, 2035'te %13'e ve 2050 yılına kadar %7'ye kadar düşmektedir. Her ne kadar hidroelektrik enerji üretimi de artış göstermekteyse de kurulu güçlerindeki artış sınırlı olduğu için üretimdeki payları 2020'de %25'ten 2030'da %17'ye, 2035'te %16'ya ve 2050'de %11'e kadar düşmektedir. Net Sıfır Senaryosunda halen Akkuyu'da kurulmakta olan 4,8 GW kurulu güce sahip tek bir nükleer santral bulunmakta, başka bir nükleer santral yapılmayacağı varsayılmakta, 2030'da %8 düzeyinden elektrik sistemine giriş yapan nükleer enerjinin üretimdeki payı yıllar içinde azalarak 2030'da %6,5'e, 2050'de ise %5'e düşmektedir. Elektrik üretiminin bölgelere göre dağılımında modern yenilenebilir kaynaklardan üretim 2025'te en çok Batı Anadolu'da yoğunlaşmış olup bunu Kuzeybatı Anadolu, Batı Akdeniz, Orta Anadolu ve Güneydoğu Anadolu izlerken, payı sonraki yıllarda giderek artan Güneydoğu Anadolu 2050'de üçüncü sıraya yükselmektedir.

Net Sıfır Senaryosu'nda taş kömürü ve linyitle çalışan bütün termik santraller 2030'ların ilk yarısında devreden çıkmakta, 2035-2040 arasında 1,3 GW kurulu güce sahip ithal kömürle çalışan tek bir santral açık kalmakta ve kömürlü termik santrallerin tamamı 2040'tan önce kapanmaktadır. Devreden çıkacak fosil yakıtlı santraller belirlenirken yarattığı karbon emisyonu ve hava kirliliği, kurulu güçleri, şebekedeki yeri, yaşı, yıllık kapasite faktörü gibi kriterler göz önüne

alınmıştır. Kömürlü termik santrallerin devreden çıkma sıralamasına bakıldığında 2020'de 845 MW olan taş kömürü santrallerinin toplam kurulu gücünün 2030'da 228 MW'a düştüğü ve 2035'e kadar tamamının kapandığı görülmektedir. Linyit santrallerinin 2020'de 9,5 GW olan kurulu gücü, 2030'da 3 GW'a düşmekte ve 2035'e kadar tamamı kapanmaktadır. 2030-2035 arasında devrede kalan linyit santralleri Afşin Elbistan B, Aksa Göynük, Çan 2, Çobanyıldızı Çumra, Polat Kütahya, Soma Kolin ve Tufanbeyli'dir. İthal kömür santrallerinin 2020'de yaklaşık 9 GW olan kurulu gücü ise 2030'da 4 GW'a, 2035'te ise 1,3 GW'ye düşmekte, 2040'a kadar tamamı kapanmaktadır. 2030-2035 arasında açık kalan ithal kömürlü termik santraller Atlas İskenderun, Sugözü İsken, İçdaş Çelik Çanakkale 1 ve 2 ile Hunutlu Adana'dır. 2035-2040 arasında açık kalan tek kömürlü termik santral 2022'de devreye alınan Hunutlu termik santralidir.

Konvansiyonel santrallerin hızla azalması ve yenilenebilir üretimdeki önemli artış, Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre genellikle daha yüksek Yük Al/Yük At (YAL/YAT) talimatına ve yenilenebilir üretimde kesintiye yol açmaktadır. Ancak, YAL/YAT ve yenilenebilir kesinti miktarları depolama sistemlerinin kapasitesine ve şebeke yatırımlarına da bağlıdır. Depolama ve şebeke yatırımlarının yüksek penetrasyonu, 2035 yılına kıyasla 2040 yılında daha az YAL/YAT ve kesintiye yol açmaktadır. Şebeke yatırımı gereksinimine bakıldığında Net Sıfır Senaryosunda 2025 yılında koridorlara 2020 şebeke modeli üzerinde ilave bir yatırım gereksinimi bulunmamaktadır. Öte yandan 2030 yılında, 2030 TEİAŞ şebeke yatırım planı üzerine ilave yatırım gereksinimi bulunmaktadır. Bu yatırımla birlikte 2035 yılında koridorlarda ilave yatırım ihtiyacı bulunmamaktadır. 2040 yılında koridorlara yapılan ilave yatırımlar da 2045 ve 2050 yılları koridorları için yeterli olmakta ve ilave bir yatırım ihtiyacı ortaya çıkmamaktadır. Sonuç olarak TEİAŞ'ın 2030 yılı için belirlediği yatırım planına ilave olarak Baz Senaryoda 2.596 km, Net Sıfır Senaryosunda ise 4.054 km 400 kV havai hat yatırımına ihtiyaç duyulması beklenmektedir.

Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonları 2020'den sonra azalmaya başlamaktadır. 2020'de 135 $MtCO_2$ olan emisyonlar 2030'da %48 azalarak 71 $MtCO_2$'ye, 2035'te %78 azalarak 29 $MtCO_2$'ye ve 2050'de %87 azalarak 18 $MtCO_2$'ye inmektedir. Linyit santrallerinin tamamının 2030'ların ilk yarısında, son kalan ithal kömür santralinin de 2030'ların ikinci yarısında kapanmasının ardından 2040'tan itibaren elektrik sektöründe kalan emisyonların tamamı doğal gazdan kaynaklanmaktadır.

Görüldüğü gibi elektrik sektörünün karbondioksit emisyonları 2050'de sıfırlanamamakta ve 18 $MtCO_2$ artık emisyon kalmaktadır. Bu emisyon yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek oranlarda kullanılması nedeniyle artan şebeke esnekliği ihtiyacına bağlı olarak düşük kapasite faktörüyle çalıştırılacak şekilde sistemde emre amade tutulan doğal gaz santrallerinden kaynaklanmaktadır. Eğer şebekede artan esneklik ihtiyacı depolama ve enterkoneksiyon dışında talep yönetimi gibi yöntemler de kullanılarak tamamen sağlanabilirse, kalan doğal gaz santralleri de 2050'ye kadar kapatılabilir ve artık emisyonları sıfırlamak mümkün olabilir. Net Sıfır Senaryosunda 2040'tan sonra sadece doğal gaz kaynaklı olacak şekilde kalan karbondioksit emisyonu, bu santraller yoğun olarak Trakya, Batı Anadolu ve Kuzey Batı Anadolu yük tevzi bölgelerinde bulunduğu için, bu bölgelerde yoğunlaşmıştır.

Diğer sektörler

Bu raporda ulaşım, binalar, sanayi ve diğer üretici sektörlerdeki karbonsuzlaşma yol haritası 5 yılda bir olacak şekilde aynı varsayımlarla yeniden modellenmiş olup genel bulgular ilk raporda (İPM, 2021) gösterilenlerle aynıdır. Bu sektörlere ilişkin

sonuçlarda öne çıkan bazı noktalar şöyle özetlenebilir:

Ulaşım sektöründe fosil yakıt kullanımından elektriğe ve diğer bir emisyonsuz yakıt türü olan yeşil hidrojene geçiş esastır. Bireysel araç kullanımında payı 2020'de neredeyse sıfır olan elektrikli araç sayısının toplam binek araçlarına oranının, Net Sıfır Senaryosunda 2030'da %20 (3,8 milyon elektrikli binek araç) ve 2050'de %66 (19,4 milyon elektrikli binek araç) ile Baz Senaryonun iki katı fazla olacağı varsayılmıştır. Elektrikli ağır vasıtaların toplam ağır vasıtalara oranının ise 2030'da %10, 2050'de ise %20 olacağı varsayılmıştır. Ayrıca Net Sıfır Senaryosunda %5 oranında seyahat davranışı değişikliği (otomobilden bisiklete geçmek veya uzun mesafe seyahatleri azaltmak vb.); yolcu ve yük taşımacılığında %50 oranında karayolundan elektrikli raylı taşımaya ve %15 oranında karayolu bireysel motorlu araçlardan raylı toplu taşımaya geçiş olacağı varsayılmıştır. Ayrıca, Net Sıfır Senaryosunda karayolu taşımacılığında hidrojenle çalışan ağır vasıta oranının 2050'ye kadar %5'e yükseleceği varsayılmıştır.

Ulaşım sektöründe Net Sıfır Senaryosu'nda 2018'de yaklaşık 28,5 milyon TEP olan enerji tüketimi 2030'da yaklaşık 26,4 milyon TEP'e, 2050'de ise 15,2 milyon TEP'e düşmektedir. Bu enerji tüketiminde en yüksek payı karayolu yük taşımacılığı almaktadır. Net Sıfır Senaryosunda enerji tüketiminin Baz Senaryoya göre %73 azaldığı görülmektedir. Ancak karayolu ulaşımındaki elektrifikasyon elektrik tüketiminde bir artışa neden olmakta ve elektrikli araçlardan kaynaklanan elektrik yükü 2030 ve 2050 yıllarında sırasıyla 46 TWh ve 146 TWh ile %9 ve %17 yükselmektedir. Net Sıfır Senaryosunda 2018'de 83 $MtCO_2$ olan ulaşım sektöründen kaynaklı CO_2 emisyonları 2030'da %21 azalarak 65 $MtCO_2$'ye, 2035'te %32 azalarak 56 $MtCO_2$'ye ve 2050'de ise %65 azalarak yaklaşık 29 $MtCO_2$'ye düşmektedir. 2050'de ulaşım sektöründe deniz ve havayolu taşımacılığından 7,2 $MtCO_2$ ve yüksek oranda elektrikli otomobillere geçiş nedeniyle de karayolundaki bireysel binek araçlardan 3,8 $MtCO_2$ artık emisyon kalmaktadır. Dolayısıyla 2050 yılında kalan 29 $MtCO_2$ artık emisyonun %56'sı karayolu yük taşımacılığından kaynaklanmaktadır. Karayolu yük taşımacılığından daha yüksek oranda raylı taşımacılığa geçilmesi veya karayolunda çalışan ağır vasıtalarda daha yüksek oranda elektrifikasyon ve/veya yeşil hidrojen kullanımı halinde ulaşım sektöründeki artık emisyonun yarısından fazlası ortadan kaldırılabilir.

Binalarda sera gazı emisyonlarını azaltmak için yapılabilecek müdahale seçenekleri elektrik aletlerde enerji performansı iyileşmesi, binaların daha düşük karbonlu olarak yenilenmesi ve yeni binalarda ısınma için elektrik (ısı pompası) kullanımı, eski binalarda ısınma amaçlı elektrik kullanımına (ısı pompasına) geçiş ve davranış değişikliği (enerji tasarrufu) olarak varsayılmıştır. Konutlarda ısınma amaçlı elektrik tüketimi Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'ya göre 2050'de 2,6 kat daha fazladır ve 2030'dan itibaren konutlarda kömür tüketimi sıfırlanmaktadır. Net Sıfır Senaryosunda konutlarda ve ticari/kurumsal binalarda doğal gaz ve LPG tüketimi de elektrifikasyon nedeniyle 2050'de sıfırlanmaktadır. Net Sıfır Senaryosunda tüm binalarda sıvı yakıt ve biyokütle tüketimi de 2030'da sıfırlanmaktadır.

2050 yılında Net Sıfır Senaryosunda konutların elektrik tüketimi Baz Senaryoya göre %52 artarken, ticari/kurumsal binalarda Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre %7 azalmaktadır. Binalardan kaynaklanan toplam emisyonlar 2030'da 2018 seviyesine göre %46 azalarak 27,5 $MtCO_2$'ye, 2035'te ise 19 $MtCO_2$'ye inmekte ve 2046'dan itibaren sıfırlanmaktadır. Bu azaltımı sağlayan en önemli müdahale, 2030 yılından itibaren konutlarda ve ticari/kurumsal binalarda ısınma amaçlı kömür ve sıvı yakıt kullanımının sonlandırılması ve önce kısmen doğal gaza ve önce

büyük ölçüde, daha sonra da tamamen elektrikle ısınmaya geçilmesidir. Binalarda fosil yakıtlar yerine büyük ölçüde elektrik kullanılmaktaysa da 2035'ten sonra sisteme küçük ölçekte yeşil hidrojen katılmaya başlandığı ve bunun özellikle 2045'ten sonra artarak binalarda ısınma vb. için 2050'de 10 TWh'e eşdeğer yeşil hidrojen kullanıldığı varsayılmaktadır. Özellikle son dönemde "sıfıra yakın bina" yapma zorunluluğu, ısı pompasına geçiş çalışmaları ve bölgesel ısıtmaya geçiş ile ilgili kamu projeleri gibi olumlu gelişmeler binalar için 2050 yılında net sıfır hedefine ulaşma ihtimalini artırmaktadır.

Sanayi ve diğer üretici sektörlerden kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının nasıl bir seyir izleyeceği, makroekonomik modeldeki talep dinamikleri varsayımlarının yanı sıra, emisyonlarda azalmaya neden olan enerji verimliliği, elektrifikasyon, modern yenilenebilir enerji (rüzgâr, güneş, biyokütle ve jeotermal), yeşil hidrojen ve karbon yakalama ve gömme teknolojilerinin (CCSU) yıllara göre sisteme giriş varsayımlarına göre belirlenmiştir. Sanayiden kaynaklanan emisyonlarda, özellikle yüksek enerji yoğunluklu sektörler için, talep değişiminin payı önemlidir. Çalışmamızda yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde talebin Uluslararası Enerji Ajansı'nın küresel talep projeksiyonlarına uygun bir şekilde değişeceği varsayımı kullanılmış ve çimento gibi metal harici madenler sektöründe küresel talebin önce artacağı ancak daha sonra azalarak 2050'de 2020 düzeyinde olacağı; demir çelik ve kimya sektörü gibi diğer enerji yoğun sektörlerde küresel talebin artarak demir çelikte 2050'de 2020 düzeyinin %12 ve kimyada %30 üzerinde gerçekleşeceği varsayılmıştır. Sanayide enerji verimliliğindeki artışın Net Sıfır Senaryosuna katkısının 2020-2030 dönemi için görece daha yüksek olacağı ve bu katkının izleyen dönemde daha düşük bir tempoda gerçekleşeceği varsayılmıştır. Elektrifikasyondaki artışın ise yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde düşük, düşük enerji yoğunluklu sektörlerde ve tarımda ise daha yüksek düzeyde gerçekleşeceği varsayılmaktadır. Sanayi ve diğer üretici sektörlerde doğrudan kullanılan (sektörün tükettiği elektriğin içindeki yenilenebilir kaynaklar hariç) yenilenebilir enerjinin toplam enerji tüketimindeki payındaki artışın da düşük enerji yoğunluklu sektörler ve tarımda daha yüksek olacağı kabul edilmiştir. Çalışmada yeşil hidrojen teknolojileriyle ilgili olarak oldukça muhafazakâr varsayımlar kullanılmış, yeşil hidrojenin yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde anlamlı oranda kullanılmasının Türkiye'de ancak 2040'lardan sonra başlayacağı ve bu sektörlerin toplam enerji tüketimindeki payının 2050'de ancak %5'e ulaşacağı varsayılmıştır. Karbon Yakalama ve Gömme Teknolojilerinin (CCUS) yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde kullanımının da yine 2040'lara doğru başlayabileceği ve bu teknolojilerin bu sektörlerdeki toplam emisyonların 2040'ta %5'ine, 2050'de %10'una varan düzeylerde azaltım sağlayabileceği varsayılmıştır. Diğer üretici sektörlerde yeşil hidrojen ve CCUS teknolojilerinin 2020-2050 döneminde kullanılmayacağı varsayılmıştır.

Net Sıfır Senaryosu'nda kullanılan varsayımlar altında yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde 2050'ye kadar enerji talebi azalmakta, düşük enerji yoğunluklu sektörlerde ve tarımda ise artmaktadır. Sanayi ve diğer üretici sektörlerinde enerji tüketiminden kaynaklanan CO_2 emisyonlarındaki değişime bakıldığında, yüksek enerji yoğunluklu sektörlerden kaynaklanan emisyonunun özellikle 2030'dan sonra azaldığı görülmektedir. 2030 yılında 2018'e göre %5 daha düşük olan toplam emisyonlar, 2035'te %29, 2040'ta %36 ve 2050'de %62 daha düşüktür. Düşük enerji yoğunluklu sektörlerdeki emisyon azaltımı da özellikle 2030'dan sonra hızlanmakta ve 2018'e göre 2030'da %40, 2035'te %46, 2050'de ise %73 azalmaktadır. Tarım sektöründe enerjiden kaynaklanan emisyonlar 2018'e göre 2030'da %37, 2035'te %45, 2050'de ise %63 azalmaktadır. Hizmetler sektöründe ise emisyonlar 2018'e göre

2030 ve 2035'te %46, 2050'de %74 azalmaktadır. Net Sıfır Senaryosu'nda sanayi ve diğer üretici sektörlerin enerji tüketiminden kaynaklanan toplam emisyonlar 2018'e göre 2030'da %23, 2035'te %37 ve 2050'de %67 azalmaktadır. 2050'de sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji kullanımından kaynaklanan 30 $MtCO_2$ artık emisyonun %57'si yüksek, %23,5'u ise düşük enerji yoğunluklu sanayi sektörlerinden kaynaklanmaktadır. 2050 yılında Baz Senaryodaki karbondioksit emisyonu Net Sıfır Senaryosundakinin dört katından fazladır. Sanayide kalan artık emisyonun da ortadan kaldırılması için özellikle demir çelik gibi yüksek enerji yoğunluklu sanayi sektörlerinde daha fazla ve daha erken enerji verimliliği, elektrifikasyon ve yeşil hidrojen kullanımı gibi yatırımlar gerekecektir. Diğer üretici sektörlerde de daha fazla elektrifikasyon artık emisyonların sıfırlanmasını sağlayabilir.

Çalışmamızda sanayiden kaynaklanan proses emisyonlarının azaltımı en zor alan olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde, Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların azaltılmasına neden olacak en önemli bileşenlerden birinin talep artış farkı olacağı varsayılmıştır. Türkiye'de yüksek enerji yoğunluklu sanayi sektörlerinde, talebin Uluslararası Enerji Ajansı'nın küresel talep projeksiyonlarına uygun bir şekilde değişeceği varsayıldığında, çimento, demir çelik ve benzeri sektörlerde sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonlar zaman içerisinde azalmaktadır. Buna göre talep değişimi, 2018 yılına göre, 2030'da %12, 2040'ta %29 ve 2050'de %43 daha düşük proses emisyonlarına neden olabilecektir. Ancak bu durumda bile ancak proses emisyonlarındaki artış durdurulmakta ve 2050'de 2030 düzeyiyle neredeyse aynı olacak şekilde 58 $MtCO_2$ artık emisyon kalmaktadır. Ne var ki önümüzdeki yıllarda bu sektörlerde talep artışının yüksek seyretmesi halinde proses emisyonlarının Baz Senaryodaki gibi 106 milyon $MtCO_2$'yi geçmesi de mümkündür. Sanayide proses emisyonlarından kaynaklanan emisyonların giderilmesi için alternatif teknolojilerin ve malzeme kullanımının gündeme alınması gerekecektir.

İPM
İSTANBUL POLİTİKALAR MERKEZİ
SABANCI ÜNİVERSİTESİ
STIFTUNG MERCATOR GİRİŞİMİ

İstanbul Politikalar Merkezi
Bankalar Caddesi No: 2 Minerva Han 34420
Karaköy, İstanbul Türkiye
+90 212 292 49 39
+90 212 292 49 57
@ ipc@sabanciuniv.edu
w ipc.sabanciuniv.edu

ISBN: 978-625-7329-66-8