

TÜRKİYE'NİN KARBONSUZLAŞMA YOL HARİTASI 2050'DE NET SIFIR

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

İPM

İSTANBUL POLİTİKALAR MERKEZİ
SABANCI ÜNİVERSİTESİ
STIFTUNG MERCATOR GİRİŞİMİ

**TÜRKİYE’NİN KARBONSUZLAŞMA
YOL HARİTASI:
2050’DE NET SIFIR**

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

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:

Ümit Şahin, Dr., İPM

Osman Bülent Tör, Doç. Dr., EPRA

Bora Kat, Dr., ODTÜ

Saeed Teimourzadeh, Dr., EPRA

Kemal Demirkol, GTE Carbon

Arif Künar, VENESCO

Ebru Voyvoda, Prof. Dr., ODTÜ

Eriş Yeldan, Prof. Dr., Kadir Has Üniversitesi

İÇİNDEKİLER

YÖNETİCİ ÖZETİ	4
1. GİRİŞ	12
2. KARBON BÜTÇESİ	14
2.1. Küresel Karbon Bütçesi	14
2.2. Karbon Bütçesi Hesapları	16
2.3. Ülkeler Arasında Karbon Bütçesi Paylaşımı	18
2.4. Türkiye'nin Küresel Karbon Bütçesindeki Payı	20
2.5. Net Sıfır Yol Haritasında Karbon Bütçesinin Önemi	22
3. TÜRKİYE'NİN KARBON EMİSYONLARI	24
4. SENARYOLAR-1: BAZ SENARYO	28
4.1. Baz Senaryo'nun Varsayımları	30
4.2. Karbondioksit Emisyonları	32
5. SENARYOLAR-2: NET SIFIR SENARYOSU	40
5.1. Net Sıfır Senaryosu'nun Varsayımları	40
5.2. Karbondioksit Emisyonları	40
6. ELEKTRİK SEKTÖRÜ	45
6.1. Elektrik Sektörü Modeli ve Varsayımlar	45
6.2. Baz Senaryoları	49
6.3. Net Sıfır Senaryoları	67
7. ULAŞIM SEKTÖRÜ	89
7.1. Varsayımlar	89
7.2. Senaryolar	91
8. BİNALAR	100
8.1. Varsayımlar	100
8.2. Elektrik Tüketimi (Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu)	101
8.3. Karbondioksit Emisyonları (Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu)	103
9. SANAYİ VE DİĞER ÜRETİCİ SEKTÖRLER	105
9.1. Makroekonomik Model	105
9.2. Varsayımlar	106
9.3. Karbondioksit Emisyonları	109
10. SONUÇ VE ÖNERİLER	110
KAYNAKLAR	121

YÖNETİCİ ÖZETİ

İklim değişikliğiyle mücadelenin önemli bir adımı olarak 2015 yılında kabul edilen Paris Anlaşması, küresel ortalama sıcaklık artışını 2 derecenin çok altında tutmayı ve 1,5 derecede tutmak için çabalamayı hedefleyen uluslararası bir iklim anlaşmasıdır. Paris Anlaşması'nın 4. maddesi küresel emisyonların en kısa zamanda tepe noktasına çıkarılarak azaltılmasını ve yüzyılın ikinci yarısında insan etkinlikleriyle salınan emisyonlarla yutaklar tarafından uzaklaştırılan emisyonlar arasında bir denge kurulmasını öngörür. Net Sıfır Emisyon kavramı bu denge noktasını ifade etmek için kullanılmaktadır. Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) 1,5 Derece Özel Raporu'na göre sıcaklık artışını 1,5 derecede sınırlamak hayati önem taşır ve bu hedefi gerçekleştirebilmek için küresel emisyonları 2030'da 2010 seviyesinin %45 altına indirmek ve 2050'de sıfırlamak gerekir. Glasgow'da yapılan BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (UNFCCC) 26. Taraflar Konferansı'nda (COP 26) kabul edilen kararda da (Glasgow İklim Paketi) bu hedefin altı çizilmiştir.

Türkiye, 21 Eylül 2021'de Birleşmiş Milletler Genel Kurulu'nda Cumhurbaşkanı Erdoğan'ın yaptığı açıklamayla Paris Anlaşması'na taraf olacağını ve 2053'te net sıfır emisyon hedefini kabul edeceğini ilan etmiş, Paris Anlaşması'nın Onaylanmasının Uygun Bulunduğuna Dair Kanun 6 Ekim 2021'de TBMM'de oybirliğiyle kabul edilmiştir. Öte yandan, Türkiye'nin 2015'te Paris Anlaşması yapılmadan hemen önce niyet beyanı olarak açıkladığı ve anlaşmaya taraf olmasının ardından resmileşen NDC'si net sıfır hedefine uyumlu değildir. Bu nedenle Türkiye'nin ilk iş olarak "2053'te Net Sıfır" hedefiyle uyumlu orta ve uzun vadeli bir yol haritası belirlemesi ve hedeflerini güncelleyerek yeni bir NDC hazırlaması gerekmektedir. Bu nedenle Türkiye ekonomisinin 2053'e kadar nasıl karbonsuzlaşacağına dair bilimsel çalışmalar da özel önem kazanmış durumdadır.

"Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası: 2050'de Net Sıfır" raporu, Sabancı Üniversitesi İstanbul Politikalar Merkezi tarafından 2020 yılında başlatılan bir araştırmanın sonuçlarını bir araya getirmektedir. Araştırmanın amacı, Türkiye'nin Paris Anlaşması'nı onaylaması ve 2050'de Net Sıfır hedefini kabul etmesi halinde ekonomisinin nasıl bir dönüşümden geçmesi gerektiğini ortaya koyacak bir yol haritası hazırlamaktır. Bu çalışma Türkiye'nin ekonomik faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarının 2050 yılına kadar nasıl bir seyir izleyeceğini ve net sıfır hedefine uygun olarak 2050'ye kadar emisyonlarını sıfırlamak ve NDC'sini güncellemek için izlemesi gereken olası patikayı ortaya koyan yayımlanmış ilk çalışmadır. Raporun yazımı bitmek üzereyken Türkiye'nin Paris Anlaşması'na taraf olması ve Net Sıfır hedefini açıklaması çalışmanın önemini daha da artırmaktadır. Türkiye'nin yeni Ulusal Katkı Beyanı'nın (NDC) belirlenmesinde ve 2050'lere kadar tamamlanması gereken ekonomik dönüşümün planlanmasında bu ve benzeri bilimsel çalışmaların yol gösterici olması gerekmektedir. Bu raporun amacı da Türkiye'nin yeni emisyon azaltım patikasına ilişkin bilimsel temellere dayalı bir iklim politikası tartışmasını başlatmak ve dönüşümün yol haritasını belirleyecek bilimsel çalışmalara katkıda bulunmaktır.

YÖNTEM

Araştırma, Türkiye'nin 2018 yılındaki ekonomik göstergelerini ve emisyonlarını baz almaktadır. Araştırmada elektrik sektörü, ulaşım sektörü, binalar ve sanayiden kaynaklanan enerji kaynaklı karbondioksit (CO₂) emisyonlarıyla sanayi proseslerinden kaynaklanan CO₂ emisyonları ele alınmıştır.

Araştırmada Türkiye'nin 2018-2050 arasındaki CO₂ emisyonları patikası iki senaryo altında karşılaştırılmaktadır.

- Baz Senaryo'da Türkiye ekonomisinin, enerji tüketiminin ve enerji kaynaklarının mevcut girdi altında ve dünyadaki gelişmelerin ışığında, ancak iklim değişikliğiyle mücadele amacıyla emisyonları azaltmak için herhangi bir politikanın izlenmediği durumda CO₂ emisyonlarının seyri verilmektedir. Baz Senaryo'da 2070'e kadar projeksiyon yapılmıştır.
- Net Sıfır Senaryosu'nda, 2050'de Net Sıfır Emisyon hedefi doğrultusunda emisyonları azaltmak için gerekli politikaların izlenmesi durumunda, Türkiye'nin mevcut ekonomik yapısı, nüfus artışı, ekonomik büyüme gibi makroekonomik varsayımları koruyarak 2050'ye kadar CO₂ emisyonlarının seyri verilmektedir.
- Elektrik modeli senaryosunda bir ek olarak nükleer enerjinin enerji kaynağı olarak sistemde olduğu ve olmadığı olasılıklar karşılaştırılmıştır.

Araştırmanın temelini oluşturan modelleme çalışması elektrik sektörü modeli, ulaşım modeli, binalar modeli ve makroekonomik modelin birlikte çalıştırılmasına dayanmaktadır. Baz Senaryo'da kullanılan temel girdi, elektrik sektörünün 2018-2030 dönemi için Baz Senaryo'ya uygun üretim patikasıdır. Elektrik sektörü için oluşturulan Baz Senaryo'daki tüketim projeksiyonları diğer sektörler için de girdi olarak kullanılmış, dolayısıyla tüm sektörler için kullanılan Baz Senaryo tüketim projeksiyonları, Elektrik Sektörü Baz Senaryosu ile uyumlu olarak oluşturulmuştur. 2050-2070 dönemi için ise Baz Senaryo tüketim projeksiyonları makroekonomik model tarafından oluşturularak diğer sektörlerle girdi sağlamıştır. Bu projeksiyonlardan yola çıkarak bu patikayı destekleyecek toplam/sektörel büyüme, toplam faktör verimliliği ve enerji verimliliği patikaları oluşturulmuştur. Bu varsayımlar altında oluşturulan Makroekonomik Baz Senaryo öncelikle elektrik sektörüne ve ayrıca ulaşım ve sanayi modellerine

verdiği girdiler nedeniyle diğer sektör modelleri ile de uyumlaştırılmıştır. Sonuç olarak 2030'a kadar oluşturulan patikada kullanılan parametrelerdeki trendler kullanılarak, aynı varsayım kümesi altında 2018-70 dönemi patikası yeniden yaratılmıştır.

Çalışmada ayrıca 1,5 derece hedefin ulaşmak için kalan küresel karbon bütçesinden adil paylaşım ve hakkaniyet ilkesine uygun olarak Türkiye'ye düşen pay da hesaplanarak Net Sıfır Senaryosu'ndaki kümülatif emisyonların Türkiye'nin karbon bütçesinin sınırları içinde kalması öngörülmüştür.

BAŞLICA SONUÇLAR

Karbon Bütçesi

Karbon bütçesi "siyasi olarak kabul edilen ısınma sınırının altında kalmak için iklim sisteminin fiziksel özelliklerine dayalı olarak 'izin verilen' maksimum kümülatif küresel emisyon miktarı" olarak tanımlanır. IPCC'nin 1,5 Derece Özel Raporu'na göre 2018'den itibaren ısınmayı %50 olasılıkla 1,5°C'nin altında tutmak için kalan karbon bütçesi 580 GtCO₂ olarak belirtilmiştir.

Türkiye'nin kişi başı emisyonları şu anda dünya ortalamasına yakın olsa da 1990 yılında dünya ortalamasının yarısı düzeyindedir. Bu nedenle Türkiye'nin kümülatif kişi başı salımı düşük kabul edilebilir. Türkiye'nin kümülatif CO₂ emisyonlarının toplamdaki payı da (%0,6) mevcut emisyonlarının toplamdaki payının yarısından biraz fazladır. Bu nedenle bu çalışmada Türkiye'ye ayrılan pay PEC kategorilerinde daha az tarihsel sorumluluğu ve daha fazla gelişme hakkı olduğu kabul edilen ülkelere uygun olan Kümülatif Kişi Başı Eşitlik (CPC) yaklaşımıyla belirlenmiştir.

Sonuç olarak Türkiye'nin 1,5°C için adil paylaşım ve hakkaniyet ilkesine uygun CO₂ bütçesi 2018'den itibaren 7,95 GtCO₂ ile küresel bütçenin %1,37'sini oluşturmaktadır. Türkiye'nin 2017 itibarıyla küresel CO₂ emisyonlarının %1,2'sini saldığı düşünüldüğünde, bu hesaplama yöntemine göre gelecekte kümülatif karbon emisyonları içindeki

payının yaklaşık %14 artacağı, dolayısıyla bu çalışmada Türkiye'nin gelişmiş ülkelerden ve dünya ortalamasından daha geç ve daha yavaş azaltım yapacağını varsayıldığı ortaya çıkmaktadır.

Baz Senaryo

Temel makroekonomik göstergelerle ilgili varsayımlara göre;

- 1| Türkiye'nin reel GSYİH büyüme hızı 2020-2030 dönemi için yıllık ortalama %3,7; 2030-2040 dönemi için yıllık ortalama %3,5; 2040-2050 dönemi için yıllık ortalama %3,0; 2050-2060 dönemi için yıllık ortalama %2,9; 2060-2070 dönemi için yıllık ortalama %2,7 olarak oluşturulmuştur.
- 2| Baz Senaryo'da yıllık ortalama %0,3'lük enerji verimliliği artışı (TEP/2018 Reel Üretim Değeri) varsayılmaktadır.
- 3| 2020-2030 arasında elektrik talebi yıllık artış oranı %4,2 olarak hesaplanırken, 2030-50 arasındaki elektrik talebi artışı yıllık ortalama %2,6 ve 2050-2070 dönemi için de %1,8 olarak tahmin edilmiştir.
- 4| Baz Senaryo'da 2018'de 300 TWh/yıl olan yıllık elektrik talebi tüm 2018-2070 dönemi için yılda ortalama %2,5 artışla 2030'da 461 TWh'ye, 2050'de 769 TWh'ye ve 2070'te 1.096 TWh'ye çıkmaktadır.
- 5| Baz Senaryo'nun patikası, sera gazı emisyon yoğunluğu gibi modelleme açısından kritik parametrelerin izlediği tarihsel değişimi de göz önünde bulundurmakta ve bu değişimi projeksiyonlara yansıtılmaktadır.

Sonuç olarak Baz Senaryo'da Türkiye'nin toplam CO₂ emisyonları 2050'de 2018 seviyesine göre %66 artarak yaklaşık 700 milyon tona, 2070'te ise %120 artarak 920 milyon tona çıkmaktadır. Toplam sera gazı emisyonları ise 2050'de 2018 seviyesine göre %70 artarak yaklaşık 890 milyon tona, 2070'te ise

%125 artarak 1.170 milyon tonun üzerine çıkmaktadır. Baz Senaryo'da kümülatif CO₂ emisyonları 2018-2050 arası 18 GtCO₂ ve 2018-2070 arası 34 GtCO₂ olmaktadır. (Şekil YÖ.1)

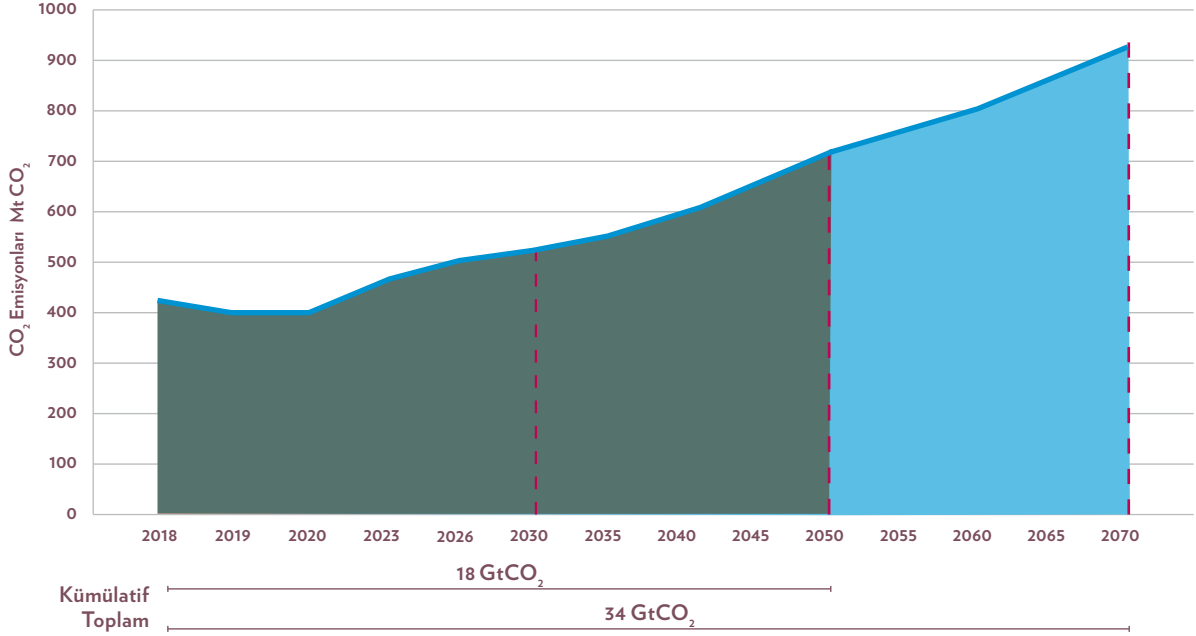
Baz Senaryo'da elektrik sektörünün ve sanayi proseslerinin payı yıllar içinde artmakta, ulaşım, binalar ve sanayide elektrik tüketiminin payı azalmaktadır.

Net Sıfır Senaryosu

Net Sıfır Senaryosu'nda, Baz Senaryo'da yer alan temel makroekonomik göstergelerle ilgili varsayımların yanı sıra emisyonların azaltılmasını sağlayan aşağıdaki sektörel varsayımlar eklenmiştir:

- 1| Elektrik sektöründe yenilenebilir enerjinin payını artıracak ve fosil yakıtların sistemdeki payını en kısa zamanda azaltacak müdahaleler olarak batarya ve pompalı barajlardan oluşan depolama ve uluslararası enterkoneksiyon kapasitesi artırılarak elektrik sisteminde şebeke esnekliği sağlanmaktadır. Yenilenebilir enerji potansiyeli özellikle rüzgâr ve güneş için en üst düzeyde ve mümkün olduğu kadar hızlı kullanılmaktadır. Böylece kömürün elektrik üretiminden 2035'te büyük ölçüde çıkarılmakta, doğal gaz ise 2050'de çok düşük kapasiteye indirilmekte, böylece elektrik sektörü 2050'ye kadar büyük ölçüde karbonsuzlaşmaktadır.
- 2| Ulaşım sektöründe bireysel ve toplu taşımada karayolundan demiryoluna geçiş, fosil yakıtlı ulaşım araçlarında verimlilik artışı, bireysel ulaşım, toplu ulaşım ve yük taşımada fosil yakıt kullanan araçlardan elektrikli araçlara ve diğer bir emisyonuz yakıt türü olan yeşil hidrojene geçiş emisyonları etkileyen başlıca varsayımlardır. Ayrıca emisyon neden olan ulaşım araçlarını kullanmamayı tercih etmek (otomobilden bisiklete geçmek vb.) seyahat davranış değişikliği olarak düşük oranlarda varsayımlara eklenmiştir.

Şekil YÖ.1. Baz senaryoda toplam CO₂ emisyonlarının 2018'den 2050'ye ve 2070'e kadar artışı (MtCO₂)



3 | Binalarda emisyonların azaltılması için konutlar ve ticari/kurumsal binalar için bina yenileme oranı, yeni bina yapım ve yıkım oranları kullanılarak emisyonların azaltılmasını sağlayacak müdahaleler eklenmektedir: Elektrikli aletlerde enerji performansı iyileşmesi, eski ve yeni binalarda ısınma için kömürden, sıvı yakıtlardan ve doğal gazdan elektrığe ve düşük oranlarda yeşil hidrojene geçiş, ısı pompası kullanımı ve ısı pompası performansında iyileşme, davranış değişikliği.

4 | Sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonların azaltılmasında yüksek enerji yoğunluklu sanayi sektörlerinde küresel talep projeksiyonlarına uygun bir şekilde talep değişimi, enerji verimliliği, elektrifikasyon, düşük enerji yoğunluklu sanayi sektörlerinde, tarımda ve hizmetler sektöründe doğrudan yenilenebilir enerji kullanımı, yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde

2040'tan sonra düşük oranlarda yeşil hidrojen ve karbon yakalama ve gömme teknolojilerinin (CCSU) kullanımı varsayımlara eklenmiştir. Sanayiden kaynaklanan proses emisyonları ise literatürde azaltım sağlayacak yeterli varsayım olmadığından makroekonomik modelde çok kısıtlı çalışılabilmektedir.

Sonuç olarak Türkiye'nin 2018'de azalmaya başlayan toplam CO₂ emisyonları Net Sıfır Senaryosu'na temel teşkil eden varsayımlar altında 2020'den sonra da azalmaya devam etmektedir. Tüm sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları 2030'da 2018 seviyesine oranla %37 azalarak 225 milyon tona, 2050'de ise %80 azalarak 74 milyon tona inmektedir. Sanayiden kaynaklanan proses emisyonları dahil edildiğinde tüm sektörlerden kaynaklanan CO₂ emisyonları 2030'da %32 azalarak 287 milyon tona, 2050'de ise %70'e yakın azalarak 132 milyon tona inmektedir. (Tablo YÖ.1 ve YÖ.2)

Tablo YÖ.1. Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda CO₂ emisyonlarının sektörlere göre dağılımı ve yıllara göre değişimi (2018-50) (MtCO₂)

SEKTÖRLER	BAZ SENARYO				NET SIFIR SENARYOSU			
	2018	2020	2030	2050	2018	2020	2030	2050
Fosil Yakıtlardan Elektrik Üretimi	149,0	133,9	184,0	281,9	149,0	133,9	72,7	15,0
Ulaşım	82,8	80,7	96,5	119,5	82,8	80,7	65,3	28,9
Binalar	50,9	59,3	69,3	73,8	50,9	58,0	27,5	0,0
Sanayi ve Diğer Üretici Sektörlerde Enerji	77,2	68,7	99,4	108,5	77,2	69,3	60,0	30,2
ENERJİ TÜKETİMİNDEN KAYNAKLANAN CO ₂ EMİSYONLARI	359,9	342,6	449,3	583,6	359,9	341,9	225,5	74,1
Proses Emisyonları	59,8	55,3	73,9	106,9	59,8	55,3	61,8	57,6
TOPLAM CO ₂ EMİSYONLARI	419,7	397,9	523,2	690,5	419,7	397,2	287,3	131,6

* Tabloda görülen Baz Senaryo'daki toplam emisyon değerleri ile Tablo 4.6'da görülen değerler arasındaki küçük farklar bu bölümde kullanılan modelde ticari binalardan kaynaklanan emisyonların Binalar başlığı altına alınmasından kaynaklanmaktadır. Baz Senaryo ile Net Sıfır Senaryosu'ndaki emisyonların karşılaştırılması bu tablodaki değerler üzerinden yapılmıştır.

Tablo 5.2. Net Sıfır Senaryosunda CO₂ emisyonlarının 2030 ve 2050'de 2018'de göre değişimi

SEKTÖRLER	2030-2018		2050-2018	
	CO ₂ Emisyonu (MtCO ₂)	%	CO ₂ Emisyonu (MtCO ₂)	%
Fosil Yakıtlardan Elektrik Üretimi	-76,3	-51,2	-134,0	-89,9
Ulaşım	-17,5	-21,1	-53,9	-65,1
Binalar	-23,4	-46,0	-50,9	-100,0
Sanayi ve Diğer Üretici Sektörlerde Enerji	-17,2	-22,3	-47,0	-60,9
ENERJİ TÜKETİMİNDEN KAYNAKLANAN CO ₂ EMİSYONLARI	-134,4	-37,3	-285,8	-79,4
Proses Emisyonları	2,0	3,3	-2,3	-3,8
TOPLAM CO ₂ EMİSYONLARI	-132,4	-31,5	-288,1	-68,6

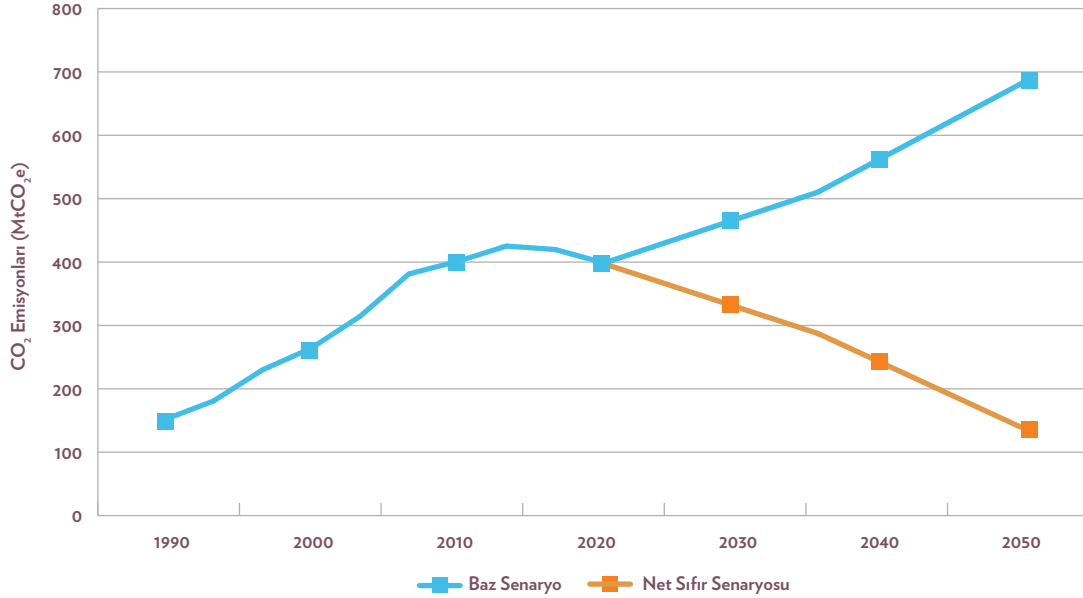
Böylece Türkiye'nin 1990'dan itibaren yaklaşık %130 artan emisyonları 2018 yılında tepe noktasına çıktıktan sonra azalmaya başlamakta ve 2050'de Baz Senaryo'da öngörüldüğü gibi 700 milyon tona çıkmak yerine Net Sıfır Senaryosu'nda 2018'e göre %70 azaltımla 130 milyon tona düşmekte ve 1990 seviyesinin %13 altına inmektedir.

2050'de kalan (artık) emisyon düzeyi sanayi prosesleri dahil edilmediğinde 2018 seviyesine göre

%80 azalarak 74 milyon tona düşmekte ve 1990 seviyesinin %43 altına inmektedir. (Şekil YÖ.2)

2050'de kalan toplam artık emisyonun en büyük kısmı sanayi proseslerinden, enerji tüketiminden kaynaklanan artık emisyonun en büyük kısmı ise sanayiden ve ulaşımdan kaynaklanmaktadır. Elektrik sektöründen sadece 15 milyon ton artık emisyon kalmakta, binalardan kaynaklanan emisyonlar ise sıfırlanmaktadır.

Şekil YÖ.2. Baz Senaryo'da ve Net Sıfır Senaryosu'nda bütün sektörlerin CO₂ emisyonlarının (proses emisyonları dahil) 1990'dan itibaren değişimi



Net Sıfır Senaryosu'nda 2018-2050 arasında enerji tüketiminden kaynaklanan kümülatif CO₂ emisyonları 7,4 GtCO₂ ile Türkiye'nin adil paylaşım ve hakkaniyet temelinde belirlenen karbon bütçesinin (7,95 GtCO₂) altında kalmaktadır. Ancak emisyon azaltımı için gerekli müdahale seçenekleri sınırlı kalan sanayi proses emisyonları dahil edildiğinde kümülatif emisyonlar 9,4 GtCO₂'ye çıkarak Türkiye'nin karbon bütçesini aşmaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye'nin mevcut Net Sıfır hedefine nasıl ulaşacağına ve güncellenmesi beklenen Ulusal Katkı Beyanı'nın içeriğine dair yayımlanmış ilk çalışma olan bu raporun sonuçlarına göre, Türkiye ekonomisinin fosil yakıtlar terk edilerek, yenilenebilir enerjiye geçilerek, enerji verimliliği ve ilgili sektörlerde elektrifikasyon yoluyla 30 yıl içinde büyük ölçüde karbonsuzlaştırılması ve 2050'lerin başında Net Sıfır hedefine yaklaşılması mümkündür. Bu

raporda kullanılan varsayınlarla mevcut ekonomik yapının temel nitelikleri korunmakta, ağırlıklı olarak enerji dönüşümü ve karbonsuz teknolojilere yapılacak yatırımlara dayanan politika değişikliklerinin sonuçları gösterilmektedir. Bunun için orta ve uzun vadede net ve ölçülebilir hedefler konmalıdır.

Bu çalışmanın sonucu olarak;

- 1 | Türkiye'nin 1990'dan itibaren yaklaşık %130 artan emisyonları 2018 yılında tepe noktasına çıktıktan sonra azalmaya başlamakta ve 2050'de Baz Senaryo'da öngörüldüğü gibi 700 milyon ton yerine Net Sıfır Senaryosu'nda 2018'e göre %70 azaltımla 130 milyon tona düşmekte ve 1990 seviyesinin %13 altına inmektedir. 2050'de kalan artık emisyon düzeyi sanayi prosesleri dahil edilmediğinde 2018 seviyesine göre %80 azalarak 74 milyon tona düşmekte ve 1990 seviyesinin %43 altına inmektedir.

- 2 | Tüm sektörlerde enerjiden kaynaklanan karbondioksit emisyonları 2030'da 2018 seviyesine göre %37, bütün karbondioksit emisyonları ise 2030'da 2018 seviyesine göre %32 azaltılabilir.
- 3 | Elektrik üretiminin en hızlı azaltım sağlanacak sektör olmasından hareketle elektrik sektöründen kaynaklanan emisyonların 2030'da yarıya indirilmesi hedeflenebilir.
- 4 | Enerji üretiminde kömürün 2035'te tamamen terk edilmesi hedeflenebilir.
- 5 | Elektrik üretiminde doğal gaz, şebeke esnekliğiyle ilgili daha iddialı çözümler üretmek yoluyla 2050'den önce tamamen terk edilebilir.
- 6 | Modern yenilenebilir enerji (rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyokütle) kurulu gücünün elektrik kurulu gücündeki payı 2030'da %50'ye çıkarılabilir.
- 7 | 2030'a kadar her yıl ortalama 3 GW güneş ve 2,5 GW rüzgâr enerjisi santrali yapılarak 2030'da her iki yenilenebilir enerji kurulu gücünün yaklaşık 35 GW'ye ulaştırılması hedeflenebilir.
- 8 | Elektrikli araçların toplam binek araçları arasındaki oranının 2030'da en az %20'ye, toplu taşımada ve yük taşımada kullanılan araçlar arasındaki oranının en az %10'a çıkarılması hedeflenebilir.
- 9 | Binalarda kömür kullanımının en kısa zamanda sonlandırılması, doğal gazdan elektriğe geçilmesi ve ısı pompalarının kullanımının hızlandırılması yoluyla 2030'da 2018 seviyesine göre %50 emisyon azaltımı hedeflenebilir.
- 10 | Sanayi ve diğer üretici sektörlerin enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonları 2018 seviyesine göre 2030'da %26, 2050'de %67 azaltılabilir, ancak sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların azaltılabilmesi ve tüm sanayi emisyonlarının daha hızlı düşürülme-

si için enerji verimliliği, elektrifikasyon, yeni teknolojiler, yeşil hidrojen ve CCSU konusunda araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada öngörülen varsayımların etkisiyle 2050'de tam olarak net sıfır hedefine ulaşılamamaktadır. Bunun nedenleri şöyle sıralanabilir:

- 1 | Diğer ülkelerde yapılan benzer çalışmalarda varsayımlara daha yüksek düzeylerde katılan Karbon Yakalama ve Gömme (CCSU) gibi negatif emisyon teknolojilerine enerji sektöründe hiç yer verilmemiş, yüksek enerji yoğunluklu sanayi sektörleri için de çok düşük oranlarda kullanılacağı varsayılmıştır.
- 2 | Yeni ve henüz yeterince gelişmemiş teknolojilere modelde fazla yer verilmemiştir. Örneğin sanayi, ısınma ve ulaşımda yeşil hidrojen kullanımı, ağır vasıtalarda elektrifikasyon gibi petrol kullanımının alternatifleri, havacılıkta alternatif yakıtlar, sanayide alternatif üretim teknikleri modele çok düşük oranlarda dahil edilmiştir. Bireysel ulaşımda elektrikli araç kullanımı da gelişmiş ülkelerdeki öngörülerden daha yavaş arttırılmıştır.
- 3 | Başta tüketimin azaltılması olmak üzere ekolojik yönde bireysel davranış değişiklikleri modele çok düşük oranlarda dahil edilmiştir. Motorlu taşıt kullanmamak, uzun mesafeli tatilleri azaltmak, uzun mesafeli yük taşımayı gerektirecek gıda tüketimini azaltmak, beslenme biçimini değiştirmek, elektrik tüketimini tamamen veya belli saatlerde kısıtlamak gibi emisyonları azaltabilecek yaşam biçimi değişikliklerine modelde ya hiç verilmemiş ya da seyahat davranış değişikliği başlığında görüldüğü gibi çok düşük oranlarda yer verilmiştir.
- 4 | Net Sıfır Senaryosu'nda, ulusal ekonomide bir karbon fiyatlaması olması durumunda ekonominin yaşayabileceği yapısal değişiklik modellenmemiş, Baz Senaryo altındaki üretim yapısı,

sektörel paylar vb. büyük ölçüde korunmuştur. Bu nedenle örneğin sera gazı emisyonlarında önemli etkiye sahip (çimento, demir-çelik vb. sektörler nedeni ile) inşaat sektörü küçültülmemiş, ancak uluslararası öngörülere uygun olarak büyümesi kısıtlanmıştır.

2050'de kalan toplam artık emisyonun en büyük kısmı sanayi proseslerinden, enerji tüketiminden kaynaklanan artık emisyonun en büyük kısmı ise sanayiden ve ulaşımdan kaynaklanmaktadır. Elektrik sektöründen sadece 15 milyon ton artık emisyon kalmakta, binalardan kaynaklanan emisyonlar ise sıfırlanmaktadır. Bu nedenle 2050'de emisyonların tam olarak Net Sıfır'a düşürülmesi için mevcut Net Sıfır Senaryosu'ndaki varsayımların üzerine aşağıdaki politikalar eklenebilir:

- 1 | Uluslararası dinamiklere paralel olarak uygulanabilecek bir karbon fiyatlandırma stratejisiyle ekonomide emisyon yoğunluğunu azaltarak, üretim yapısının yüksek katma değerli ve düşük emisyon yoğunluklu bir yönde dönüşmesini sağlanması,
- 2 | Ulaşım sektöründe karayolu yük taşımacılığında demiryoluna geçiş, ağır vasıtalarda daha fazla elektrifikasyon, enerji verimliliği önlemlerinin azami düzeyde uygulanması, bireysel ulaşımda tüm binek araçların 2050'ye kadar elektrikli hale getirilmesi ve petrol kullanımının sonlandırılacağı bir çıkış yılı belirlenmesinin yanı sıra toplu ulaşımda daha fazla demiryolu kullanımı, bireysel araç kullanımı yerine elektrikli toplu ulaşım, bisiklet vb. gibi karbonsuz yöntemlere geçiş ve uçak seyahatlerini azaltmak gibi bireysel davranış değişiklikleri;
- 3 | Sanayide enerji tüketimini ve proses emisyonlarını azaltacak yeni teknolojilerin geliştirilmesi, daha fazla yenilenebilir kaynak kullanımı ve elektrifikasyon, dögüsel ekonomi yaklaşımlarının, hammadde tüketiminde ve

rimliliğin, geri dönüşüm ve sıfır atık yöntemlerinin kullanılması;

- 4 | Sanayide yüksek enerji yoğunluklu sektörlerin ürünlerine (çimento, demir çelik gibi) talebi azaltacak alternatif malzemelerin kullanımı;
- 5 | Ulaşımda, sanayide ve binalarda yeşil hidrojen kullanımının daha hızlı artırılması;
- 6 | Şebekede esneklik ihtiyacı depolama ve entegrasyon dışında talep yönetimi gibi yöntemler de kullanarak doğal gaz santrallerinin emre amade tutulmasının önlenmesi ve doğal gazdan arta kalan emisyonların 2050'den önce sıfırlanması;
- 7 | Yüksek enerji yoğunluklu sanayilerde CCUS kullanımı ve 2050'ye doğru yeni geliştirilecek negatif emisyon teknolojilerinin devreye sokulması.

Bu çalışmanın en önemli kısıtlarından biri de bütün sera gazlarını kapsamaması ve ekonomi genelinde emisyon azaltımını öngörmemesidir. Sera gazları içinde CO₂ dışındaki en önemli paya sahip olan CH₄ ve N₂O emisyonlarının azaltılması için sadece fosil yakıt kullanımında ve sanayide alınacak önlemler yeterli değildir. Özellikle tarımdan kaynaklanan emisyonların azaltılması ve atıkların kontrolü için politikalar geliştirilmelidir. Türkiye'nin ekonomi genelinde sera gazı emisyonları azaltım hedefini belirlemek ve 2050'lerde net sıfır sera gazı emisyonu hedefini yakalayabilmek için CO₂ dışındaki sera gazlarının nasıl azaltılacağını da modelleyen çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu çalışmanın içerdiği azaltım patikasını da kapsayan senaryoların da farklı metodoloji ve varsayımlarla tekrar tekrar çalışılması, dönüşümün maliyet ve yan faydalarını belirleyen araştırmaların da yapılması ve çalışma sonuçlarının şeffaf biçimde kamuoyuyla paylaşılması önemlidir. Türkiye'nin iklim politikaları ancak bilimsel çalışmalara dayalı olarak ve müzakereci bir politika yapım süreciyle iyileştirilebilir.

1. GİRİŞ

İklim değişikliğiyle mücadelenin önemli bir adımı olarak 2015 yılında kabul edilen Paris Anlaşması, küresel ortalama sıcaklık artışını 2 derecenin çok altında tutmayı ve 1,5 derecede tutmak için çabalamayı hedefleyen uluslararası bir iklim anlaşmasıdır (BM, 2015). Bu hedef doğrultusunda, Paris Anlaşması'nın kabul edilmesinden hemen önceki dönemden bu yana, taraf ülkeler küresel ısınmaya yol açan sera gazlarını nasıl sınırlayacaklarına dair hedeflerini ve yol haritalarını içeren Ulusal Katkı Beyanları'nı (NDC) UNFCCC Sekreteryasına sunmaktadırlar. Ülkelerin 2030'a yönelik orta vadeli yol haritalarını 1,5 derece hedefi doğrultusunda güncellemeleri de uluslararası iklim politikalarının önceliklerinden biridir ve halen 130 taraf ülke NDC'lerini güncelleyerek Sekreterya'ya sunmuştur (CAT, 2022).

Paris Anlaşması'nın 4. maddesi küresel emisyonların en kısa zamanda tepe noktasına çıkarılarak azaltılmasını ve yüzyılın ikinci yarısında insan etkinlikleriyle salınan emisyonlarla yutaklar tarafından uzaklaştırılan emisyonlar arasında bir denge kurulmasını öngörür. Net Sıfır Emisyon kavramı bu denge noktasını ifade etmek için kullanılmaktadır. Paris Anlaşması'nın kabul edilmesinden sonra tarafların Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneline (IPCC) verdikleri görev sonucunda 2018 yılında IPCC'nin 1,5 Derece Özel Raporu yayımlanmıştır. Rapora göre sıcaklık artışını 1,5 derecede sınırlamak hayati önem taşır ve bu hedefi gerçekleştirebilmek için küresel emisyonları 2030'da 2010 seviyesinin %45 altına indirmek ve 2050'de sıfırlamak gerekir (IPCC, 2018). Bu yol haritası 2021'de yayımlanan IPCC'nin 6. Değerlendirme Raporu'nda (AR6) da doğrulanarak 1,5 derece hedefi için kalan küresel karbon bütçesi güncellenmiştir. AR6'da bugünkü küresel emisyon düzeyi sürdürüldüğü takdirde karbon bütçesinin

2030'ların başında tüketileceği ve 2030'larda küresel ortalama sıcaklıklardaki artışın 1,5 derece sınırını geçeceği ortaya konmuştur (IPCC, 2021). IPCC'nin kılavuzluğunda taraf ülkeler Paris Anlaşması'nın hedefinin küresel ortalama sıcaklık artışını 2 derecede değil 1,5 derecede sınırlama ve emisyonları 2050'de sıfırlama hedefine bağlılıklarını ve 2050'de Net Sıfır Emisyon hedefini kabul ettiklerini açıklamaya başlamışlardır. Glasgow'da yapılan BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (UNFCCC) 26. Taraflar Konferansı'nda (COP 26) kabul edilen kararda da (Glasgow İklim Paketi) hem 1,5 derece hedefinin hem de emisyonların 2030'da 2010 seviyesinin %45 altına inmesi gerektiğinin altı çizilmiştir (UNFCCC, 2021). Bugün aralarında ABD, Çin, AB, çok sayıda Avrupa ülkesi, Japonya ve Güney Kore'nin de olduğu küresel emisyonların %74,2'sinden sorumlu 76 ülke net sıfır emisyon hedeflerini ilan etmiş durumdadır (ClimateWatch, 2022).

Türkiye, 21 Eylül 2021'de Birleşmiş Milletler Genel Kurulu'nda Cumhurbaşkanı Erdoğan'ın yaptığı açıklamayla Paris Anlaşması'na taraf olacağını ve 2053'te net sıfır emisyon hedefini kabul edeceğini ilan etmiş, Paris Anlaşması'nın Onaylanmasının Uygun Bulunduğuna Dair Kanun 6 Ekim 2021'de TBMM'de oybirliğiyle kabul edilmiştir. Öte yandan, Türkiye'nin 2015'te Paris Anlaşması yapılmadan hemen önce niyet beyanı olarak açıkladığı ve anlaşmaya taraf olmasının ardından resmileşen NDC'si net sıfır hedefine uyumlu değildir (Republic of Turkey, 2015). Bu nedenle Türkiye'nin ilk iş olarak "2053'te Net Sıfır" hedefiyle uyumlu orta ve uzun vadeli bir yol haritası belirlemesi ve hedeflerini güncelleyerek yeni bir NDC hazırlaması gerekmektedir. Bu nedenle Türkiye ekonomisinin 2053'e kadar nasıl

karbonsuzlaşacağına dair bilimsel çalışmalar da özel önem kazanmış durumdadır.

“Türkiye’nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası: 2050’de Net Sıfır” raporu, Sabancı Üniversitesi İstanbul Politikalar Merkezi tarafından 2020 yılında başlatılan bir araştırmanın sonuçlarını bir araya getirmektedir. Araştırmanın amacı, Türkiye’nin Paris Anlaşması’nı onaylaması ve 2050’de Net Sıfır hedefini kabul etmesi halinde ekonominin nasıl bir dönüşümden geçmesi gerektiğini ortaya koyacak bir yol haritası hazırlamaktır. Bu çalışma Türkiye’nin ekonomik faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarının 2050 yılına kadar nasıl bir seyir izleyeceğini ve net sıfır hedefine uygun olarak 2050’ye kadar emisyonlarını sıfırlamak ve NDC’sini güncellemek için izlemesi gereken olası patikayı ortaya koyan yayımlanmış ilk çalışmadır. Çalışma mevcut makroekonomik varsayımlara ek olarak, enerji sektörü, ulaşım, binalar, sanayi ve diğer üretici sektörlerde emisyonları azaltmayı sağlayacak karbonsuz veya düşük karbonlu alternatif teknolojilerin kullanılmasının sistemde yaratacağı dönüşümü incelemektedir. Çalışmanın odağı gelişmekte olan ve sisteme dahil edilmesi mümkün olan mevcut karbonsuz teknolojilerdir. Dönüşümün ekonomik maliyeti ve faydaları ile uygulanması için gereken politika araçları (karbon fiyatı gibi) çalışmanın kapsamı dışındadır.

Raporun yazımı bitmek üzereyken Türkiye’nin Paris Anlaşması’na taraf olması ve Net Sıfır hedefini açıklaması çalışmanın önemini daha da artırmaktadır. Türkiye’nin yeni Ulusal Katkı Beyanı’nın (NDC) belirlenmesinde ve 2050’lere kadar tamamlanması gereken ekonomik dönüşümün planlanmasında bu ve benzeri bilimsel çalışmaların yol gösterici olması gerekmektedir. Bu raporun amacı da Türkiye’nin yeni emisyon azaltım patikasına ilişkin bilimsel temellere dayalı bir iklim politikası tartışmasını başlatmak ve

dönüşümün yol haritasını belirleyecek bilimsel çalışmalara katkıda bulunmaktadır.

Raporun ikinci bölümünde karbon bütçesi kavramı ve çalışmada Türkiye’ye adil bölüşüm ve hakkaniyet ilkesi dahilinde küresel bütçeden ayrılan pay ele alınmaktadır. Üçüncü bölümde Türkiye’nin sera gazı emisyonlarının tarihsel değişimi ve son durumu resmi sera gazı envanterlerinden yola çıkarak özetlenmektedir. Dördüncü ve beşinci bölümlerde çalışmada yer verilen senaryoların başlıca varsayımları ve sonuçları açıklanmaktadır. Altıncı bölümden dokuzuncu bölüme kadar çalışılan senaryoların varsayımları ve sonuçları her sektör için tek tek ele alınmaktadır. Onuncu bölümde ise sonuçlar özetlenmekte ve politika önerilerine yer verilmektedir.

2. KARBON BÜTÇESİ

Karbon bütçesi kavramı, yeryüzü bilimlerinin karbon döngüsü yaklaşımını anlaşılır ve denetlenebilir bir şekilde iklim politikalarında kullanmak ve sıcaklık artışını belli bir sınırın altında tutmak için küresel kümülatif emisyonlara konması gereken üst sınırı belirlemek amacıyla ortaya atılmıştır. Bu yaklaşım, karbon döngüsü (emisyonlar, yutaklar tarafından emilen ve atmosferde biriken miktar) ve geri besleme mekanizmaları dikkate alındığında kümülatif emisyonlarla sıcaklık artışının doğrusal bir şekilde bağıntılı olmasına dayanır. İlk kez 1989'da önerilen kavram, 2009'dan itibaren yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve IPCC'nin 5. Değerlendirme Raporu'ndan (2013-2014) sonra genel kabul görmüştür. Karbon bütçesi terimi bu amaçla kullanıldığında "siyasi olarak kabul edilen ısınma sınırının altında kalmak için iklim sisteminin fiziksel özelliklerine dayalı olarak 'izin verilen' maksimum kümülatif küresel emisyon miktarı," olarak tanımlanabilir (Lahn, 2020).

2.1. KÜRESEL KARBON BÜTÇESİ

Küresel karbon bütçesi çeşitli hesaplama yöntemleriyle ve gelişen karbon döngüsü modelleriyle sürekli değişmektedir. Ayrıca küresel sıcaklık artışını 2°C'de veya 1,5°C'de, ya da ikisinin arasında (ör. 1,7 °C'de) sınırlamak için hesaplanan karbon bütçeleri birbirinden farklıdır. Buna bir de olasılık hesaplarının eklenmesi gerekir. Karbon bütçesi, ısınmayı belli bir sıcaklık değerinin altında tutmak için salınabilecek en fazla kümülatif karbon emisyonunu verse de ısınmanın ne olasılıkla bu sınırın altında tutulmasını öngördüğünüze göre hesap değişir. Olasılık düzeyi ısınmayı sınırlamakla ilgili olduğu için, ne kadar yüksek alınırsa bütçe o kadar düşer. Örneğin ısınmayı %83, yani yüksek olasılıkla 1,5°C'nin altında tutmak için kabul edilecek karbon bütçesi, %50, yani orta olasılıkla 1,5°C'nin altında tutmak için kabul edilecek bütçeden

düşüktür. Ancak %50 olasılığa göre hesaplanan bütçenin alınması durumunda, emisyonlar kabul edilen karbon bütçesinin altında kalsa bile ısınmanın %50 olasılıkla 1,5°C'yi geçmesi riski göze alınmış olur. Ayrıca yıllar geçtikçe emisyonların devam etmesi nedeniyle kalan bütçe azalmaktadır. Bu nedenle karbon bütçesi yaklaşımını iklim değişikliğiyle mücadele için kullanırken hangisinin kullanılacağına karar verilmesi gereken en az 3 parametre bulunur: 1. Karbon bütçesi hesabı, 2. Küresel ısınmayı sınırlamak için seçilen sıcaklık artışı, 3. Olasılık düzeyi.

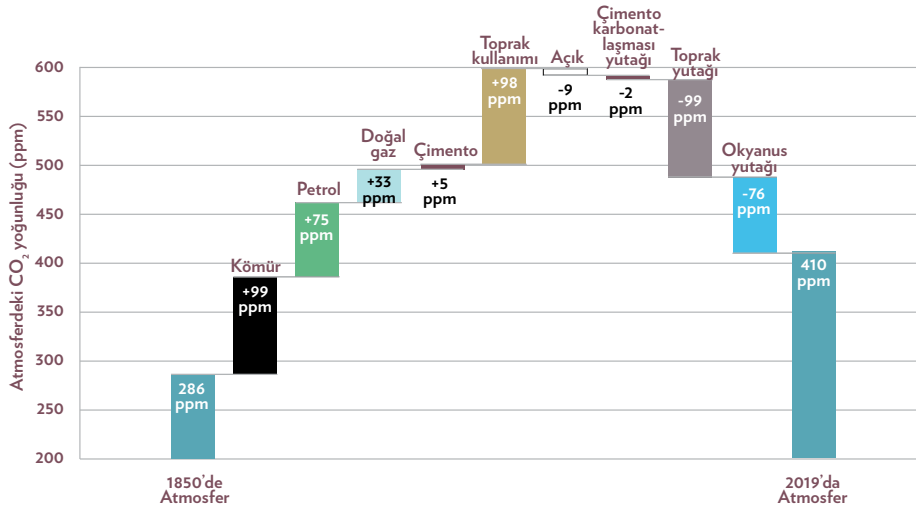
Bununla birlikte karbon bütçesi küreseldir, yani bütün dünyada insan faaliyetleri nedeniyle atmosfere salınan karbon miktarından yola çıkar. Paris Anlaşması'nda belirlenen 1,5°C hedefine ulaşmak için emisyonların 2050'de net sıfır düzeyine indirilmesi de aynı şekilde küresel bir hedefdir. Ancak Paris Anlaşması bu hedefe ulaşmak için her ülkenin emisyonlarını kendi belirlediği süre içinde ve kendi belirlediği hızda net sıfır seviyesine indirmesini öngörür. Bu da küresel karbon bütçesinin ülkeler arasında nasıl paylaşılacağını önemli hale getirir. Elbette bu paylaşım tarihsel sorumluluklar ve hakkaniyet ilkesi gereğince sadece nüfusla ve ekonomik büyüklükle orantılı bir paylaşım olmayacaktır. Karbon bütçesi kümülatif emisyonlarla ilgili olduğundan, iklim değişikliğine neden olan sera gazlarını daha erken dönemde salmaya başlayan sanayileşmiş ülkelerle, emisyonları genellikle 1990'dan sonra artan gelişmekte olan ve hızlı büyüyen ülkelerin ve emisyonları hâlâ çok düşük seyreden az gelişmiş ülkelerin gelecek yıllarda karbon bütçesinden alacakları paylar farklılık göstermelidir. Bu da BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesinin (UNFCCC) Ortak Fakat Farklılaştırılmış Sorumluluklar ve Göreceli Kabiliyetler (CBDR-RC) ilkesinde kabul edilen

gelişme ve salım haklarına dayanır. Ayrıca ülkenin sera gazı azaltımını gerçekleştirmek için gerekli ekonomik ve teknolojik kapasitesi, yani yapabilirliği önemlidir. Dolayısıyla karbon bütçesi yaklaşımını azaltım hedefleri için kullanırken yukarıda belirtilen parametrelerin yanı sıra, bir ülkenin küresel bütçeden alacağı payı belirlemek amacıyla ülkenin tarihsel sorumluluğunu, gelişme düzeyini ve yapabilirliğini göz önünde bulundurarak belli bir tarihten sonra kalan emisyon hakkına dair bir varsayımda bulunmak gerekir.

Karbon bütçesiyle ilgili dikkat edilmesi gereken bir nokta da sera gazı emisyonlarıyla karbondioksit (CO₂)_e misyonları arasındaki farktır. Kyoto Protokolü'nde tanımlanan 7 sera gazı arasında en büyük pay emisyonların dörtte üçünü oluşturan CO₂'ye aittir. İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan CO₂'nin büyük kısmı fosil yakıtların yakılmasından

kaynaklanır ve atmosferde kalma süresi çok uzun olduğu için konsantrasyonu düzenli bir şekilde artar. Kaynaklar ve yutaklar arasındaki dengeye bakıldığında, atmosferdeki CO₂ birikiminin büyük oranda fosil yakıtlardan kaynaklandığı görülür. (Şekil 2.1) Bu da gelecekteki karbondioksit birikimini ileriki yıllarda öngörülen fosil yakıt tüketimine bağlı emisyonlara dayalı olarak tahmin etmeyi kolaylaştırır. Ayrıca rezervlerde bulunan fosil yakıtların yakılmaları halinde açığa çıkacak CO₂ de bilindiğinden, kabul edilen bütçe içinde kalmak için fosil yakıt rezervlerinin en fazla ne kadarının kullanılabileceği de hesaplanabilmektedir. Ek olarak, iklim değişikliğiyle mücadelede fosil yakıt tüketiminin azaltılması hem teknoloji hem de maliyet açısından alternatifleri olan, en kolay ve en hızlı azaltım yöntemi olarak kabul edilir.

Şekil 2.1. Sanayi devriminden bu yana atmosferde biriken karbondioksitin kaynakları ve yutaklar (Kaynak: Global Carbon Project, 2020)



Metan (CH₄), nitröz oksit (N₂O) ve diğer sera gazlarının ise insan kaynaklı emisyonlar içindeki oranı daha düşüktür, atmosferdeki oranları CO₂'ye göre daha düzensiz bir şekilde artar ve bütçelerine dair belirsizlikler daha çoktur. Kaynakları da fosil yakıtlardan tarıma, atıklara ve sanayiye dek çeşitlilik gösterir. Dolayısıyla CO₂ dışındaki sera gazlarına dair azaltım stratejileri daha zor, daha belirsiz ve ikincil kabul edilmektedir. Bu nedenle karbon bütçeleri, özellikle IPCC raporlarında, bütün sera gazları için değil CO₂ emisyonları için hesaplanır. Ülkelerin CO₂ emisyonlarını diğer sera gazlarından daha doğru ve eksiksiz bildirmeleri de CO₂'ye dayalı karbon bütçesinin kullanımını daha kesin hale getirir. Öte yandan sadece CO₂'ye dayalı bir karbon bütçesinin diğer gazların yarattığı ve gelecekte giderek artacak olan ısıtma etkisini göz ardı ettiği ve CO₂ bütçesinin altında kalırsa da diğer sera gazları azaltılmazsa hedeflenen ısınma sınırının aşılabileceği unutulmamalıdır (IPCC, 2018). Ayrıca pozitif geri beslemeler nedeniyle (permafrostun erimesi gibi) insan faaliyetleri harici salınabilecek CO₂ ve CH₄ de bütçeyi düşürür (Rogelj et al., 2018).

2.2. KARBON BÜTÇESİ HESAPLARI

Yaygın olarak kabul edilen ilk karbon bütçesi hesabı IPCC'nin 5. Değerlendirme Raporu'nun (IPCC AR5) 2013-2014'te yayımlanan WG1, WG3 ve Sentez Raporu'nda yer almaktadır (IPCC, 2013; IPCC, 2014; IPCC AR5 SYR, 2014). Bu dönemde henüz Paris Anlaşması'ndaki 1,5°C hedefi kabul

edilmediği için değerlendirmelerin çoğu 2°C hedefi için yapılmış, AR5'te çok sayıda (846 adet) farklı senaryo analizi olsa da bunlardan yalnızca ikisi 1,5°C hedefini ele almıştır. Bu nedenle Tablo 2.1'de görülen bütçeler içinde kamuoyunda yaygın olarak gündeme gelen, %66 olasılıkla sıcaklık artışını 2°C'nin altında tutmak için gerekli bütçe olmuştur. Buna göre küresel sıcaklıkların sanayi öncesine göre 2°C artması için gereken kümülatif CO₂ emisyonu 2.900 GtCO₂, sanayi devriminin başlangıcı olarak kabul edilen 1850-1900 döneminden (orta nokta olarak 1875) 2010 sonuna kadar salınan CO₂ emisyonu ise 1.900 GtCO₂ olarak hesaplanmış, dolayısıyla sıcaklık artışını %66 olasılıkla 2°C'nin altında tutabilmek için 2011'den itibaren salınabilecek en fazla emisyon, ya da kalan CO₂ bütçesi 1.000 GtCO₂ olarak bulunmuştur.

Sonraki yıllarda çok sayıda araştırma kuruluşu farklı yöntemler ve varsayımlar kullanarak karbon bütçesi hesapları yapmış ve daha düşük veya daha yüksek karbon bütçeleri ortaya çıkmıştır. Ancak en önemli gelişme Paris Anlaşması ile küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi döneme göre 2°C'nin çok altında ve tercihen 1,5°C'de sınırlama hedefinin kabul edilmesi olmuştur. UNFCCC, Paris Anlaşması'nın kabul edilmesinin ardından IPCC'ye 1,5°C hedefiyle ilgili bir özel rapor yazma görevi vermiş ve 2018'de yayımlanan IPCC'nin 1,5°C Özel Raporu (IPCC SR15) iklim değişikliğinin 1,5°C ve 2°C ısınma durumundaki etkilerinin yanı sıra 1,5°C ve 2°C hedefi için kullanılacak karbon

Tablo 2.1. IPCC AR5'teki karbon bütçesi tablosu (basitleştirilmiş).
(Kaynak: IPCC AR5 Sentez Raporu, 2014)

İnsan kaynaklı net ısınma	<1,5°C			<2°C			<3°C		
	%66	%50	%33	%66	%50	%33	%66	%50	%33
Isınmayı sınırlama olasılığı									
1870'ten itibaren kümülatif CO ₂ emisyonları (GtCO ₂)	2.250	2.250	2.550	2.900	3.000	3.300	4.200	4.500	4.850
2011'den itibaren kümülatif CO ₂ emisyonları (GtCO ₂)	400	550	850	1.000	1.300	1.500	2.400	2.800	3.250
2011'de fosil yakıtların toplam karbon içeriği: 3670-7100 GtCO ₂ (rezervler), 31.300-50.050 GtCO ₂ (kaynaklar)									

bütçesi hesabını da güncellemiştir. SR15'te kullanılan 200 kadar senaryonun önemli bir bölümü IPCC AR5'teki senaryoların aksine 1,5°C hedefiyle uyumludur.

IPCC SR15'teki 1,5°C ve 2°C bütçeleri IPCC AR5'teki bütçelerden yüksektir. Bunda iki rapor arasındaki sürede özellikle model ve metodolojiye dair yaşanan değişiklikler ve kümülatif emisyonlar için seçilen başlangıç tarihlerindeki farklar rol oynamıştır. Ayrıca 1,5°C'ye kadar gerçekleşecek ilave ısınmaya temel olan dönem de güncellenerek 2006-2015 sıcaklık ortalaması kullanılmıştır. IPCC SR15'teki karbon bütçesi Tablo 2.2'de görüldüğü gibi sadece 1,5°C ve 2°C için değil aradaki diğer ilave ısınma düzeyleri için de verilmiştir. Raporda 1850-1900 döneminden 2010 sonuna kadar gerçekleşen kümülatif CO₂ emisyonu IPCC

AR5'tekinden 40 milyon ton fazla olacak şekilde, 1.940 GtCO₂ olarak alınmıştır. 2011'den 2017 sonuna kadar ilave emisyon 290 GtCO₂ olduğu için tarihsel kümülatif emisyon 2.220 GtCO₂ etmektedir. Buna göre 2018'den itibaren ısınmayı %66 olasılıkla 1,5°C'nin altında tutmak için kalan karbon bütçesi 420 GtCO₂, 2°C'nin altında tutmak için kalan bütçe ise 1.170 GtCO₂ olmaktadır. Yani 2°C bütçesi 7 yıllık farka rağmen 170 milyon GtCO₂ artmıştır. Ne var ki IPCC AR5'te ve IPCC SR15'te verilen %66 olasılıkla 1,5°C bütçeleri arasında önemli bir fark yoktur (400 ve 420 GtCO₂). Ayrıca IPCC SR15 bu bütçelerin hesaplanmasında permafrostun erimesi gibi pozitif geri besleme mekanizmalarının etkisinin hesaba katılmadığını belirtmekte ve bunun bütçeyi olasılıkla 100 GtCO₂ kadar azaltacağı tahminini yapmaktadır.

Tablo 2.2. IPCC SR1.5'teki karbon bütçesi tablosu (basitleştirilmiş).
(Kaynak: IPCC 1,5 Derece Özel Raporu, 2018)

2006-2015 düzeyine göre ilave ısınma (°C)	1850-1900 düzeyine göre yaklaşık ısınma (°C)	Kalan karbon bütçesi (İlave yeryüzü sistemi geri beslemeleri hariç) (1.1.2018'den itibaren GtCO ₂)		
		Isınmayı sınırlama olasılığı		
		%33	%50	%66
		290	160	80
0,3		530	350	380
0,4		770	530	380
0,5		840	580	420
0,53	~ 1,5°C	1.010	710	530
0,6		1.080	770	570
0,63		1.240	900	680
0,7		1.440	1.040	800
0,78		1.480	1.080	830
0,8		1.720	1.260	980
0,9		1.960	1.450	1.130
1		2.030	1.500	1.170
1,03	~ 2°C	2.200	1.630	1.280
1,1		2.270	1.690	1.320
1,13		2.440	1.820	1.430
1,2				

Tablo 2.3. IPCC AR6'daki karbon bütçesi tablosu (basitleştirilmiş).
(Kaynak: IPCC 6. Değerlendirme Raporu ÇG1, 2021)

1850-1900 ile 2010-2019 dönemleri arasındaki küresel ısınma (°C)		1850'den 2019'a kadar tarihsel kümülatif CO ₂ emisyonları (GtCO ₂)				
1,07 (0,8-1,3; <i>olası</i> aralık)		2.390 (±240; <i>olası</i> aralık)				

1850-1900 dönemine göre sıcaklık sınırına kadar yaklaşık küresel ısınma (°C)	2010-2019 dönemine göre sıcaklık sınırına kadar yaklaşık küresel ısınma (°C)	2020 başından itibaren kalan tahmini karbon bütçesi (GtCO ₂)				
		Küresel ısınmayı sınırlama olasılığı:				
		%17	%33	%50	%67	%83
1,5	0,43	900	650	500	400	300
1,7	0,63	1.450	1.050	850	700	550
2,0	0,93	2.300	1.700	1.350	1.150	900

Son olarak IPCC'nin 6. Değerlendirme Raporu'nun (IPCC AR6) 2021'de yayımlanan birinci cildinde (WG1, Fiziksel Bilim Temelleri) karbon bütçesi tekrar güncellenmiştir. Buna göre 1850-1900 döneminden 2019 sonuna kadar kümülatif CO₂ emisyonu 2.390 GtCO₂ olarak alınmıştır. Bunun 210 GtCO₂'si (yılda yaklaşık 42 GtCO₂) 2015'ten 2019 sonuna kadar salınmıştır. Sonuç olarak 2020 başından itibaren ısınmayı %66 olasılıkla 1,5°C'nin altında tutmak için kalan karbon bütçesi 400 GtCO₂, 2 derecenin altında tutmak için kalan bütçe ise 1.150 GtCO₂ olmaktadır. IPCC AR6, CO₂ dışındaki sera gazlarından ve pozitif geri beslemelerden kaynaklanacak emisyonlara ve ilave ısınmaya dair belirsizliklere de daha fazla vurgu yapmaktadır. Bu sayılar IPCC SR15 ve IPCC AR6'da verilen karbon bütçeleri arasında tam bir devamlılık olmadığını gösterse de ısınmayı %50 olasılıkla 1,5°C'nin altında tutmak için verilen bütçeler birbiriyle uyumludur. IPCC SR15 %50 olasılıkla 1,5°C bütçesini 2018'den itibaren 580 GtCO₂ olarak verirken IPCC AR6 bu bütçeyi 2020'den itibaren 500 GtCO₂ olarak vermektedir. (Tablo 2.3) Aradaki 80 GtCO₂ yaklaşık olarak iki yıllık küresel CO₂ emisyonuna denk gelmektedir. Bu nedenle 1,5°C için CO₂ küresel karbon bütçesi hesaplarında %50 olasılık için IPCC SR15 ile IPCC AR6'yı kullanmak arasında bir fark yoktur.

2.3. ÜLKELER ARASINDA KARBON BÜTÇESİ PAYLAŞIMI

Paris Anlaşması küresel bir hedef belirlese de ülkelerin emisyon azaltım yükümlülüklerini neye göre belirleyeceğine, emisyonların nasıl bir yol izleyerek azaltılacağına ilişkin net bir yöntem geliştirmemiştir. Dolayısıyla küresel karbon bütçesinin ülkeler arasında nasıl paylaşılacağına ilişkin resmi olmayan, ancak bilimsel araştırmalarda ortaya konan çeşitli yaklaşımlar vardır. Bu yaklaşımlar sadece maliyet etkin senaryolarla sınırlı olabildiği gibi (van Soest et al., 2021) farklı hakkaniyet ölçüleri getiren senaryolar ve paylaşım modelleri öneren araştırma grupları da bulunmaktadır (Fyson et al., 2020; Pan et al., 2017; van den Berg et al., 2019; Höhne and Wachsmuth, 2020).

Bu çalışmada Türkiye'nin küresel karbon bütçesinden alabileceği pay ile ilgili kullanılacak varsayımı geliştirmek için Climate Equity Reference Calculator ve Paris Equity Check tarafından geliştirilen yaklaşımlar incelenmiştir.

Climate Equity Reference Calculator (CERC), küresel sera gazı emisyonlarını hızla azaltmak için ülkeler arasında yapılması gereken yük paylaşımını göstermek amacıyla geliştirilmiş çevrimiçi bir araçtır. Hesap makinesi olarak adlandırılan

araç, her ülke için farklı sorumluluk ve yapabilirlik düzeylerinden oluşan kombinasyonların denenmesini sağlar. Hesaplama sadece CO₂ veya tüm sera gazları kullanılabilen, 1,5°C ve 2°C hedefleri seçilebilmektedir. Sorumluluk yükü için hangi tarihten itibaren kümülatif emisyonların hesaplanabileceği, yapabilirlik için gelişme eşiği, gelir artışıyla birlikte emisyon azaltımının ne hızda değişeceği (emisyon esnekliği), azaltım önlemlerinin maliyeti gibi kriterler için seçim yapılabilmektedir. Ancak CERC sadece 2030'a kadar azaltım patikasını vermektedir ve 2050'ye yönelik net sıfır hedefi için kullanmak için uyarlanması gerekmektedir (Kemp-Benedict et al., 2019).

Paris Equity Check (PEC) ise, küresel sera gazı emisyonlarından sorumlu başlıca ülkelerin karbon bütçelerini belirlemek için hakkaniyet temelli bir yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemde Paris Anlaşması'nın 1,5°C ve 2°C hedefleriyle uyumlu olarak emisyonların en kısa zamanda tepe noktaya çıkarılıp azaltılmaya başlanması öngörülmekte, maliyet etkin azaltım yöntemlerinin kullanılmasıyla 173 ülkenin olası karbon bütçesinin ve azaltım patikasının 2100'e kadar nasıl olması gerektiği değerlendirilmektedir. Öngörülen karbon bütçeleri sadece CO₂'yi değil bütün sera gazlarını kapsamaktadır.

PEC'in kullandığı metodolojinin bilimsel temelini oluşturan du Pont ve ark.'nın çalışmasında (du Pont et al., 2016), IPCC AR5'in ÇG3 Raporu'nda (IPCC, 2014) yer verilen yük paylaşımı kategorilerinden yola çıkan beş yaklaşım tanımlanmıştır. IPCC raporunda yük paylaşımı için üç hakkaniyet ilkesi olarak tanımlanan sorumluluk, yapabilirlik ve eşitlik ilkeleriyle bu ilkelerin kombinasyonları kullanılmaktadır. Sorumluluk ilkesine dayanan yük paylaşımı, ülkelerin kümülatif emisyonlardan kaynaklanan tarihsel sorumluluğunu; yapabilirlik ilkesine dayanan paylaşım ülkelerin ulusal geliri veya İnsani Kalkınma Endeksi'ndeki yeri üzerinden azaltım yöntemlerinin maliyetini ne

kadar karşılayabileceğini; eşitlik ilkesine dayanan paylaşım ise dünyadaki bütün insanların eşit emisyon hakkı olduğundan yola çıkarak ülkelerin kişi başı emisyonlarının en kısa zamanda birbirine yaklaştırılmasını esas almaktadır (du Pont et al., 2016; IPCC, 2014). IPCC raporunda ayrıca sorumluluk ve yapabilirlik ilkelerini kalkınma ihtiyacıyla birleştiren; sorumluluk ve eşitlik ilkelerini birleştirerek küresel karbon bütçesi temelinde kümülatif kişi başı emisyonların eşitlenmesini esas alan ve her üç ilkeyi kullanarak aşamalı bir yaklaşım geliştiren çalışmaların yer aldığı kategoriler de bulunmaktadır.

PEC, IPCC'nin bu yük paylaşımı kategorilerini kullanarak Tablo 2.4'teki beş paylaşım modelini geliştirmiştir. Bu listede sadece sorumluluk ilkesine dayalı bir paylaşım bulunmamaktadır. Mevcut beş kategoride getirilen yaklaşımların yük paylaşımına etkisi şöyle özetlenebilir:

- 1| Yüksek ulusal gelire sahip ülkelerin daha yüksek azaltım hedefi almalarını sağlayan *Yapabilirlik (CAP)* yaklaşımı gelişmekte olan ülkelere daha yüksek bütçe ayrılmasını sağlamaktadır. Ancak bu yaklaşımda halen kişi başı emisyonları düşük olsa da hızlı büyüyen ve dolayısıyla emisyonları hızlı artan ülkelere görece hızlı bir azaltım patikası tanımlanır.
- 2| IPCC'nin eşitlik ilkesinden yola çıkan *Kişi Başı Eşitlik (EPC)* yaklaşımı ülkelerin yıllık kişi başı emisyonlarını kısa sürede birbirine yaklaştırmayı hedefler. Bu yaklaşım özellikle kişi başı emisyonları ve tarihsel sorumluluğu düşük az gelişmiş ülkelerin yapabilirlik yaklaşımında olduğundan daha fazla azaltım yapmalarına neden olur ve kişi başı emisyonları birbirine yaklaşmakta olan gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin benzer bir azaltım seyrini izlemelerini sağlar.
- 3| Sorumluluk, yapabilirlik ve gelişme ihtiyacını birlikte kullanan *Sera Gazı Gelişme Hakkı*

Tablo 2.4. IPCC'nin yük paylaşımı kategorilerine dayalı paylaşım yaklaşımları
(Kaynak: Paris Equity Check)

Kodu	Paylaşım tipi	IPCC kategorisi	Paylaşımın özelliği
CAP	Yapabilirlik	Yapabilirlik	Yüksek kişi başı GSYH'ye sahip ülkelerin yüksek azaltım yapması
EPC	Kişi Başı Eşitlik	Hakkaniyet	Eşit yıllık kişi başı emisyonla doğru yakınsama
GDR	Sera Gazı Gelişme Hakkı	Sorumluluk-Yapabilirlik-İhtiyaç	Yüksek kişi başı GSYH ve yüksek tarihsel kişi başı emisyonla sahip ülkelerin yüksek azaltım yapması
CPC	Kümülatif Kişi Başı Eşitlik	Kümülatif Kişi Başı Eşitlik	Yüksek tarihsel kişi başı emisyonla sahip ülkelerin yüksek azaltım yapması
CER	Sabit Emisyon Oranı	Aşamalı Yaklaşımlar	Mevcut emisyon oranlarının korunması

(GDR) yaklaşımı, gelişmekte olan ve tarihsel olarak kişi başı emisyonları düşük olan ülkelerin karbon bütçesinden daha yüksek pay almasını sağlamakta, ancak az gelişmiş ülkelerin karbon bütçelerini düşük tutmaktadır.

- 4 | Eşitlik ilkesinden yola çıkan EPC'nin bir çeşitlenmesi olan *Kümülatif Kişi Başı Eşitlik (CPC)* yaklaşımı ise kişi başı emisyonları tarihsel olarak yüksek olan ülkelerin daha hızlı azaltım yapmasını öngörmektedir. Bu yaklaşımda az gelişmiş ülkeler kadar tarihsel kişi başı emisyonları yüksek olmayan gelişmekte olan ve hızlı büyüyen ülkeler de karbon bütçesinden daha fazla pay almaktadır. Ancak bu yaklaşımda gelişmiş ülkelerin de karbon bütçesinden aldıkları pay CAP yaklaşımına göre fazladır.
- 5 | IPCC raporundaki kategorilerde yer verilen aşamalı yaklaşımlardan yola çıkan *Sabit Emisyon Oranı (CER)* ise ülkelerin emisyonlardaki güncel payını sabit tutmayı esas alır. Bu durumda gelişmekte olan ve hızlı büyüyen ülkelere nispeten yüksek bir karbon bütçesi ayrılrsa da gelişmiş ülkeler eşitlik ilkesine aykırı bir şekilde yüksek pay almakta ve az gelişmiş ülkeler için adaletsiz bir durum ortaya çıkmaktadır.

2.4. TÜRKİYE'NİN KÜRESEL KARBON BÜTÇESİNDEKİ PAYI

Türkiye'nin PEC'in yük paylaşımı yaklaşımlarında 1,5°C ve 2°C hedefine uygun olarak her kategoride alacağı sera gazı bütçeleri Tablo 2.5'te gösterilmiştir. Ancak belirtilen mutlak bütçeler IPCC'nin küresel CO₂ bütçesini değil PEC'in kullandığı küresel sera gazı bütçesini temel almaktadır.

Bu çalışmada, küresel karbon bütçesinden Türkiye'ye ayrılacak pay bu tabloda yararlanılarak hesaplanmıştır. Türkiye'nin kişi başı emisyonları şu anda dünya ortalamasına yakın olsa da 1990 yılında dünya ortalamasının yarısı düzeyindedir. Bu nedenle Türkiye'nin kümülatif kişi başı emisyonları düşük kabul edilebilir. Türkiye'nin kümülatif emisyonlarının toplamdaki payı da mevcut emisyonlarının toplamdaki payının yarısından biraz fazladır. Ayrıca Türkiye OECD üyesi olarak UNFCCC'de Ek-1 listesinde olsa da Dünya Bankası tarafından orta gelir grubunda, gelişmekte olan ve hızlı büyüyen bir ülke sayılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada Türkiye'ye ayrılan pay PEC kategorilerinde daha az tarihsel sorumluluğu ve daha fazla gelişme hakkı olduğu kabul edilen ülkelere uygun olan Kümülatif Kişi Başı Eşitlik (CPC) yaklaşımıyla belirlenmiştir. Ancak küresel karbon bütçesi olarak PEC'in kullandığı sera gazı bütçesi yerine uluslararası müzakerelerde genel kabul

Tablo 2.5. Türkiye'nin Paris Equity Check'in yük paylaşımı yaklaşımlarında 1,5 ve 2 derece hedefine uygun olarak her kategoride alacağı sera gazı bütçeleri

Isınmayı sınırlama hedefi	Karbon Bütçesi	Yük Paylaşımı Tipleri	2010-2050	2010-2100	2018-2050	2018-2100
1,5°C hedefi	Küresel Sera Gazı Bütçesi (GtCO ₂ e)	Ortalama	1.134	1.156	740	762
		CAP	7,85	6,93		
	EPC	11,44	11,70			
	GDR	9,71	4,75			
	CPC	11,10	13,42			
	CER	10,75	10,96			
	Ortalama	10,17	9,55			
2°C hedefi	Küresel Sera Gazı Bütçesi (GtCO ₂ e)	Ortalama	1.523	1.749	1.129	1.355
		CAP	10	10,22		
	EPC	15,51	17,92			
	GDR	13,38	9,16			
	CPC	17,23	19,65			
	CER	14,44	16,59			
	Ortalama	14,11	14,71			

gören IPCC SR15'teki 1,5°C ve 2°C için CO₂ bütçeleri kullanılmıştır. Dolayısıyla temel alınan karbon bütçeleri 1,5°C hedefi için %50 olasılığa dayanan 580 GtCO₂, 2°C için %66 olasılığa dayanan 1.170 GtCO₂'dir.¹

Sonuç olarak PEC'in Türkiye'ye verdiği bütçe oranlarından CPC yaklaşımı altındaki oran sera gazı emisyonları içindeki CO₂ emisyonlarına ve IPCC SR15'in verdiği küresel bütçeye oranlanarak 2018'den başlayacak şekilde yeniden hesaplanmıştır (Tablo 2.6). Buna göre;

¹ Isınmayı %66 olasılıkla 1,5°C'nin altında tutmayı sağlayan bütçe çok düşük olduğu için (420 GtCO₂) 2050'de net sıfıra ulaşmayı amaçlayan modellerin çalışmasını ileri derecede zorlaştırmaktadır. %50 olasılıkla 1,5°C bütçesinin tercih edilmesinin temel nedeni budur. Öte yandan IPCC AR5'te ısınmayı %50 olasılıkla 1,5°C'nin altında tutan karbon bütçesi (580 GtCO₂), %66 olasılıkla 1,6°C'nin altında tutan bütçeye (570 GtCO₂) çok yakın ve IPCC AR6'da %83 olasılıkla ısınmayı 1,7°C'nin altında tutan bütçeden (550 GtCO₂) düşüktür (IPCC AR6'daki bütçe 2 yıl gecikmeyle başladığı için). Dolayısıyla %50 olasılığa göre 1,5°C bütçesi %50 ihtimalle ısınmanın 1,5°C'yi geçmesi riskini göze almak anlamına gelse de aynı bütçe ısınmayı çok büyük olasılıkla 1,6-1,7 derecenin altında tuttuğu için Paris Anlaşması'ndaki "küresel sıcaklık artışı 2 derecenin çok altında tutmak" hedefiyle ve IPCC AR6'da kullanılan Sürdürülebilirlik-Yeşil Yol Senaryosu (SSP1) ile uyumludur. 2°C ısınma ise kabul edilemez ölçüde yüksek olduğu için %66 olasılığa göre hesaplanan 2°C bütçesi kullanılmıştır.

- 1 | Türkiye'nin 1,5°C için CO₂ bütçesi 2018'den itibaren 7,95 GtCO₂ ile küresel bütçenin %1,37'sini;
- 2 | Türkiye'nin 2°C için CO₂ bütçesi 2018'den itibaren 15,16 GtCO₂ ile küresel bütçenin %1,3'ünü;
- 3 | Türkiye'nin 1,5°C için sera gazı bütçesi 2018'den itibaren 9 GtCO₂e ile küresel bütçenin %1,16'sını;

Tablo 2.6. Paris Equity Check'in CPC yaklaşımına göre Türkiye'nin 1,5 ve 2 derece hedefine uygun CO₂ ve sera gazı bütçeleri

Isınmayı sınırlama hedefi (ve olasılığı)	CO ₂ Bütçesi (GtCO ₂)	CO ₂ Bütçesinin Küresel Bütçeye Oranı (%)	Sera Gazı Bütçesi (GtCO ₂ e)	Sera Gazı Bütçesinin Küresel Bütçeye Oranı (%)
1,5 derece (%50 olasılık)	7,95	1,37	9,00	1,16
2 derece (%66 olasılık)	15,16	1,3	17,66	1,12

- 4 | Türkiye'nin 2°C için sera gazı bütçesi 2018'den itibaren 17,66 GtCO₂e ile küresel bütçenin %1,12'sini oluşturmaktadır.
- 5 | Bu bütçelerin 2018-50 arasındaki kümülatif emisyonlarda baz patikaya² göre sağladıkları azaltım oranı 1,5°C bütçesinde %57 ve 2°C bütçesinde %67'dir.

Türkiye'nin 2017 itibariyle küresel CO₂ emisyonlarının %1,2'sini saldığı düşünülüğünde, bu hesaplama yöntemine göre gelecekte kümülatif karbon emisyonları içindeki payının yaklaşık %14 artacağı, dolayısıyla bu çalışmada Türkiye'nin gelişmiş ülkelerden ve dünya ortalamasından daha geç ve daha yavaş azaltım yapacağına varsayıldığı ortaya çıkmaktadır. Türkiye'ye düşen karbon bütçesi payı farklı modelleme çalışmalarında farklı varsayımlardan yola çıkılarak daha farklı hesaplanabilir.

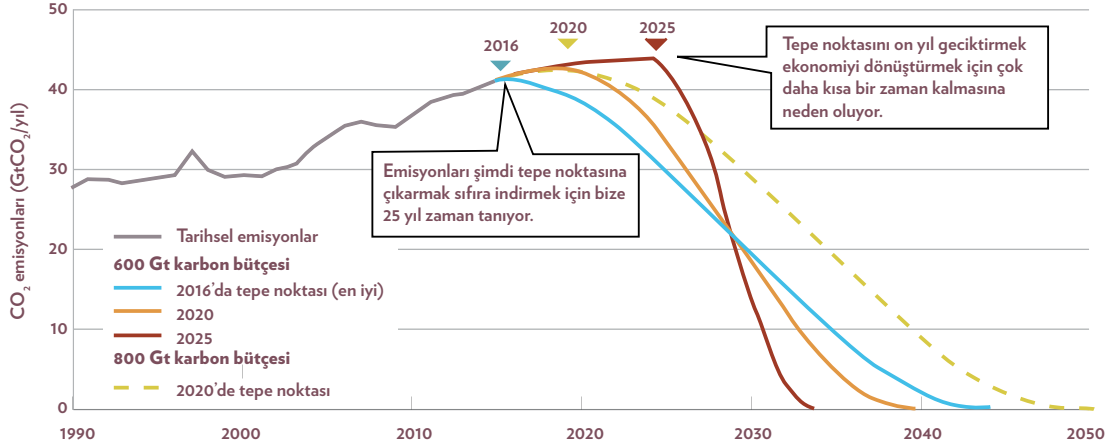
2.5. NET SIFIR YOL HARİTASINDA KARBON BÜTÇESİNİN ÖNEMİ

Paris Anlaşması'na ve son IPCC raporlarına göre ülkeler 1,5°C hedefine ulaşmak için emisyonlarını 2050 civarında net sıfır seviyesine indirmekle yükümlüdür. Bu amaçla emisyonlarındaki artışı en kısa zamanda durdurup tepe noktasına çıkarmaları ve azaltmaya başlamaları gerekmektedir. Azaltım ne kadar erken başlarsa 2050'ye kadar yıllık ortalama azaltım miktarı o kadar düşük olur. Belirli bir başlangıç tarihinden net sifıra ulaşılan

yıla (ör. 2050) kadar ülkenin her yıl yaptığı emisyonların toplamı ya da bir başka deyişle emisyon azaltım eğrisinin altında kalan alan ülkenin karbon bütçesini verir. Bu nedenle 2050'de net sifıra ulaşma hedefi için gerekli yol haritasını çalışırken önceden belirli bir karbon bütçesinin içinde kalma hedefini de varsaymak zorunlu değildir. Öte yandan azaltım ne kadar erken başlar ve ilk yıllardaki azaltım hızı ne kadar hızlı olursa o kadar az karbon bütçesi kullanılmış olur. (Şekil 2.2) (Figueres et al., 2017) Dolayısıyla ülkelerin izlediği azaltım patikası ile net sıfır tarihine kadar kullandıkları karbon bütçesi, küresel yük paylaşımı içinde hakkaniyet çerçevesinde belirlenen sınırların altında kalıp kalmadıklarını test etmek için de önemlidir. Bu nedenle azaltım modelini çalışmaya başlamadan önce net sıfır tarihi ve azaltımın başlayacağı yıla birlikte hakkaniyet temelinde yük paylaşımında ülkeye düşen karbon bütçesini de önceden saptamak belirlenen yol haritasının ülkenin tarihsel sorumluluğu ve gelişmişlik düzeyi açısından adil bir yol haritası olmasını sağlayacağı için önem taşır.

2 Bkz. Bölüm 4

Şekil 2.2. Verilen karbon bütçesinin içinde kalmak için küresel CO₂ emisyonlarının düşürülmeye başladığı yıla göre azaltım eğrisinin dikliğindeki değişim
(Kaynak: Stefan Rahmsorf, Global Carbon Project)



3. TÜRKİYE'NİN KARBON EMİSYONLARI

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne (UNFCCC) 2004 yılında taraf olan Türkiye, Ek-1 ülkesi olarak 2006'dan bu yana her yıl sera gazı envanterlerini hazırlayarak Sekretarya'ya teslim etmektedir. Her yıl 15 Nisan tarihinde yayımlanan envanterlerde, 1990'dan yayın yılından iki yıl öncesine kadar olan ulusal sera gazı emisyonları bildirilmekte, dolayısıyla 2021'de yayımlanan en son envanterde 1990-2019 arası emisyonlar yer almaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) koordinasyonunda İDHYKK içindeki Sera Gazı Emisyon Envanteri Çalışma Grubu'nun desteğiyle hazırlanan Sera Gazı Envanterleri için 2006 tarihli IPCC kılavuzu esas alınmaktadır. Türkiye'nin sera gazı envanterlerinin içeriği bu çalışmada kullanılan metodoloji için önemli olduğu için bu bölümde kısaca özetlenecektir (TÜİK, 2021).

Türkiye'nin sera gazı envanterinde enerji, sanayi prosesleri, tarım, atıklar ve toprak kullanımı (LULUCF) kategorilerinde Kyoto Protokolü'nde yer verilen 7 direkt sera gazı bildirilmektedir: Karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), nitroz oksit (N₂O) ve florlu gazlar (F-gazları), yani Hidroflorokarbonlar (HFCs), perflorokarbonlar (PFCs), kükürt hekzaflorid (SF₆) ve azot triflorit (NF₃).

Karbondioksit her yıl insan faaliyetleri sonucunda atmosfere salınan toplam sera gazlarının dörtte üçünü oluşturur. Ayrıca CO₂ atmosferde en uzun süre kalan sera gazı olduğu için daha fazla birikir ve yeryüzünü ısıtma potansiyeli en fazla olan sera gazıdır. IPCC'nin 6. Değerlendirme Raporu'na göre (2021) 1850'den bu yana toplam ısınimsal zorlamaya, yani yeryüzünün ısınmasına katkısı en fazla olan gaz CO₂'dir (IPCC; 2021). Ayrıca CO₂'nin en önemli kaynağı fosil yakıtlardır ve iklim değişikliğiyle mücadelede en kısa sürede ve en yüksek oranda katkıyı, elektrik sektörü, ulaşım, sanayi,

ısıtma vb. kullanım alanlarında fosil yakıtlardan uzaklaşarak karbonsuzlaşma yoluyla CO₂ emisyonlarının azaltmanın sağlayacağı kabul edilmektedir. Bu nedenle IPCC'nin ve diğer kurumların küresel ısınmayı 1,5 derecede sınırlamak için yaptıkları öngörülerde sera gazı bütçelerinde sadece CO₂ emisyonlarını ele alan karbon bütçeleri ağırlıklı yer tutmaktadır.

Bu raporda, hem yukarıdaki nedenlerle hem de CO₂ emisyonlarıyla ilgili veriler daha güvenilir, modellemeler ise daha yaygın ve kullanılabilir olduğu için sadece CO₂ emisyonları ele alınmıştır. Başta metan olmak üzere diğer sera gazlarının emisyonlarının nasıl ve ne zamana kadar sıfırlanacağı konusunda ayrı çalışmalar yapılması gerekmektedir.

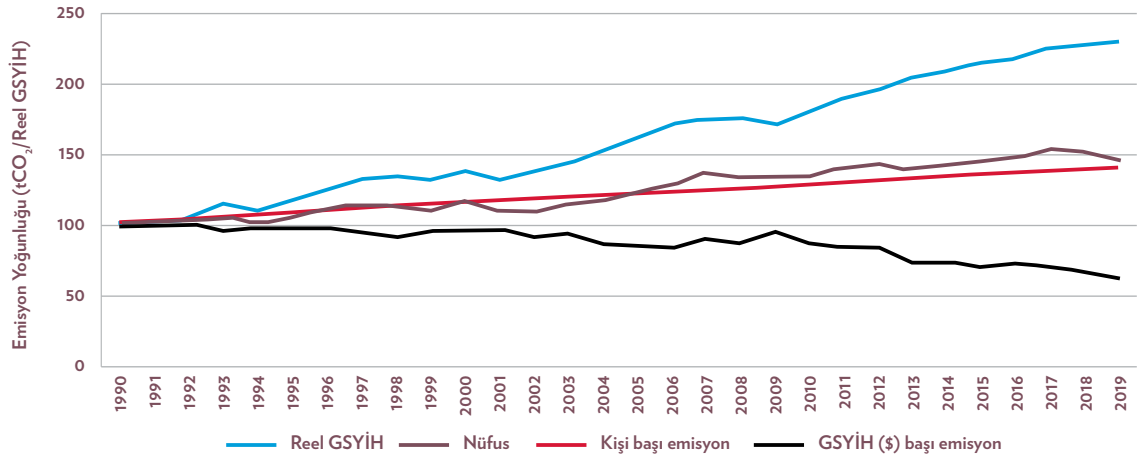
Türkiye'nin sera gazı envanterinde kullanılan anahtar kategori yönetime göre CO₂ emisyonlarının bildirildiği faaliyetler şunlardır: Enerji sektöründe katı, sıvı ve gaz yakıtların yakılması; İmalat sanayiinde ve inşaat sektöründe katı, sıvı ve gaz yakıtların ve diğer fosil yakıtların yakılması; İç hat uçuşları; Karayolu taşımacılığı; Diğer sektörlerde katı, sıvı ve gaz yakıtların yakılması; Çimento üretimi, Kireç üretimi, Diğer karbonat prosesleri; Demir çelik üretimi; Ormanlık alanlar ve kereste üretimi.

Türkiye'nin 1990-2019 arasındaki emisyonlarının bildirildiği en son Sera Gazı Envanterine (2021) göre toplam sera gazı emisyonları 2019'da 1990 seviyesine göre %130,5 artarak 506,1 MtCO₂e olmuştur. Envanter Raporu'nda da belirtildiği gibi sera gazları emisyonunda 1990'dan bu yana belirgin bir artış eğilimi olsa da, (en son 2008'de olduğu gibi) ekonomik daralma dönemlerinde kısa süreli ve geçici düşüşler gözlenmektedir. Son iki yılda da 2018'de toplam emisyonların 2017'ye göre %0,5 ve 2019'da 2018'e göre %3,1 azaldığı

görülmektedir. Envanter raporu bu azalmanın ekonomik daralma olmadığı halde görüldüğü ve başlıca nedeninin elektrik üretiminde katı yakıtların (kömür) payının azalması olduğu yorumunu yapmaktadır. Bu nedenle bu raporda da son iki yılda görülen (ve pandemi nedeniyle 2020'de hızlanarak sürmesi beklenen) azalmanın ekonomik daralmaya değil yapısal nedenlere bağlı olduğu düşünülerek Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonlarının 2017-2018'de tepe noktaya çıktığı kabul edilmiştir.

Envanter raporuna göre Türkiye'nin sera gazı emisyonlarının başlıca belirleyicisi nüfus ve GSYİH'dir. Sera gazı emisyonlarının izlendiği 1990-2019 arasında Türkiye'nin nüfusu %49,8, ekonomisi %245 büyümüştür. Kişi başı emisyonların 4 tondan 6,1 tona çıkması, ekonomik büyümenin sera gazı artışındaki etkisinin nüfus artışından daha önemli olduğunun bir diğer göstergesidir. Envanter raporunda yer verilen grafikte GSYİH ve nüfus ile emisyonların arasındaki ilişki 1990'dan itibaren görülmektedir. (Şekil 3.1.) Bu çalışmada kullanılan yöntemde de nüfus artışı ve ekonomik büyüme, enerji talebiyle birlikte emisyonları belirleyen en önemli değişkenler olarak kullanılmıştır.

Şekil 3.1. Türkiye'de emisyonlarla GSYİH ve nüfusun 1990'a göre normalize edilmiş gidişi (önceki yıla göre fark olarak)



Tablo 3.1. Türkiye'de sera gazı emisyonlarının 1990'dan itibaren artışı ve sektörel dağılımı (MtCO₂e)

Sektör	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019
Toplam (AKAKDO hariç)	219,6	248,0	299,0	337,3	399,1	473,3	498,9	525,0	522,5	506,1
Enerji	139,6	166,3	216,1	244,0	287,1	340,9	359,7	379,9	373,1	364,4
Sanayi Proses	22,8	25,3	26,2	33,6	48,2	57,3	61,4	64,0	65,9	56,4
Tarım	46,1	44,1	42,3	42,4	44,4	56,1	58,9	63,3	65,3	68,0
Atık	11,1	12,4	14,3	17,3	19,5	19,1	19,0	17,8	18,2	17,3
AKAKDO	-55,8	-57,4	-61,6	-74,7	-73,4	-97,3	-95,9	-99,9	-94,6	-84,0
1990'a göre (%)	-	12,9	36,2	53,6	81,8	115,6	127,2	139,1	138,0	130,5

Türkiye'de sera gazı emisyonlarında enerjinin payı %72 ile birinci sıradadır. Bunu %13,4 ile tarım ve %11,2 ile sanayi prosesleri izler. Atıkların payı ise %3,4'tür. 1990'dan 2019'a kadar enerji emisyonlarındaki (%161) ve sanayi proses emisyonlarındaki artış (%147), sera gazı emisyonlarının toplam artışından (%130,5) daha yüksektir. (Tablo 3.1.)

Türkiye'de salınan toplam sera gazları içinde CO₂'nin payı yaklaşık %79'dur. CO₂ salımlarındaki

artış da (%163,5) sera gazı salımlarındaki artıştan yüksektir. CO₂ emisyonları da 2017'de tepe noktasına çıkarak toplam sera gazlarında olduğundan daha hızlı azalmaya başlamıştır: Bir önceki yıla göre 2018'de %1,4 ve 2019'da %4,8. (Tablo 3.2) Envantere göre CO₂ emisyonlarının %87,4'ü enerjiden, %12,3'ü ise sanayi proseslerinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 3.2. Türkiye'de sera gazı emisyonlarının 1990'dan itibaren artışı ve gazlara göre dağılımı (MtCO₂e)

Sera Gazı	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019
Toplam	219,6	248,0	299,0	337,3	399,1	473,3	498,9	525,0	522,5	506,1
CO ₂	151,5	180,9	229,8	264,2	314,4	381,3	401,2	425,3	419,4	399,3
CH ₄	42,5	42,6	43,7	45,2	51,4	51,6	54,5	54,8	58,1	60,3
N ₂ O	25,0	23,9	24,8	26,3	29,8	35,4	37,7	39,2	39,3	40,3
HFCs			0,1	1,2	3,1	4,8	5,3	5,5	5,5	6,1
PFCs	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,2	0,1	0,1	0	0,1
SF ₆			0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

CO₂ emisyonları, toplam enerji sektör emisyonlarının %95,8'ini oluşturmaktadır. Bu raporda sadece CO₂ üzerinde çalışıldığı için enerji sektörü emisyonlarının neredeyse tamamı çalışmanın kapsamı içindedir. Envanterde enerji sektöründen kaynaklanan emisyonlar şu ana başlıklar altında listelenir: Fosil yakıtların yakılması (enerji üretim sanayii, imalat sanayii ve inşaat, ulaşım, diğer sektörler) %97,3 ve fosil yakıtlardan kaynaklanan kaçak emisyonlar %2,7. Listede bulunan CO₂ taşınması ve depolanmasının payı ihmal edilebilecek düzeydedir. Enerji sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları toplam CO₂ emisyonlarının %87,4'ünü oluşturur. Enerji üretim sanayii ise enerji sektöründeki sera gazı emisyonlarından %40,8 ile birinci sırada sorumludur.

Makroekonomik model kapsamında kullanılan sektörel hesaplar için GTAP (Global Trade Analysis Project) 9 veri tabanı kullanılmıştır. 68 sektörden oluşan bu veri tabanında yer alan enerji ve elektrik sektörleri; üç elektrik teknolojisi (fosil, yenilenebilir ve nükleer) ve beş alt enerji sektörü (ham petrol, kömür, gaz, rafineri işlemleri, enerji iletimi ve dağıtımı) başlığında gruplandırılmıştır. Ulaştırma için de ayrı bir sektör tanımlanmıştır. Elektrik üretimi, ulaştırma ve binalara yönelik emisyon hesapları raporun diğer bölümlerinde detaylı bir şekilde açıklanan sektör modelleri kapsamında hassas bir şekilde hesaplanmaktadır. Bu emisyonlar, emisyon envanterindeki enerji başlığı altında yer alan yakıt yanmasına bağlı “Çevrim ve enerji sektörü”, “Ulaştırma” ve “Diğer sektörler” başlıklarına karşılık gelmektedir. GTAP veri tabanında yer alan diğer ekonomik sektörler ise sekiz ana başlık (tarım, enerji-yoğun sanayi, hizmet, kağıt ürünleri, metalik olmayan mineraller, madencilik, demir-çelik, diğer) altında ele alınmıştır. Bu sektörlerden tarım dışındaki sektörlerle ait emisyon değerleri, envanterde iki başlığa karşılık gelmektedir: enerji kullanımından kaynaklı olanlar (“Enerji” başlığı altındaki “Diğer sektörler”) ve proses emisyonları (“Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı”).

Tarımda ise; enerji kullanımından kaynaklı emisyonlar dışındaki emisyonlar, envanterdeki “Tarım” başlığına karşılık gelmektedir. Hesaplamalı genel denge çerçevesinde modellenen makroekonomik modelde; her bir üretim sektörü, sektörün girdi-çıktı ilişkilerini yansıtan üretim fonksiyonları ile, tüketim de benzer şekilde tüketim fonksiyonları ile temsil edilmektedir. Bu yapı, enerji tüketiminden kaynaklı emisyonların ve proses emisyonlarının kolay bir şekilde hesaplanmasına imkan vermektedir.

4. SENARYOLAR-1: BAZ SENARYO

Türkiye'nin net sıfır hedefine uygun karbonsuzlaşma yol haritasını çizmek için yapılan bu çalışmada Baz Senaryo ile Net Sıfır Senaryosu birbiriyle karşılaştırılmıştır. Senaryolara dayalı modelleme, elektrik sektörü, ulaşım, binalar, sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan karbondioksit (CO₂) emisyonlarının ve proses emisyonlarının olası gidişatını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, öncelikle bu sektörlerdeki enerji tüketiminden ve sanayi proseslerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının 2050'ye ve ötesine (2070'e) kadar nasıl bir gidişat izleyeceği tahmin edilerek Baz Senaryo oluşturulmuştur. Ardından karbonsuzlaşma için gerekli eylemler, kullanılan sektörel modellere ve makroekonomik modele verilmiş, modeller 2050'ye kadar Net Sıfır Senaryosu için yenilenen varsayımlara göre iteratif olarak çalıştırılmıştır.

Elektrik sektörünün Baz Senaryosu oluşturulurken nükleer enerjiyle ilgili özel bir varsayım geliştirilmesi gerekmektedir. Bu tür model çalışmalarındaki senaryoların mevcut ve en olası durumlar üzerine kurulması gerekir. Nükleer enerji şu anda Türkiye'de elektrik üretiminde kullanılan kaynaklar arasında değildir. Ancak, Akkuyu'da Türkiye'nin toplam 4,8 GW kurulu güce sahip olacak ilk nükleer santrali 4 ünite olarak inşa halindedir ve tamamının 2030'a kadar açılması beklenmektedir. Öte yandan bütün dünyada nükleer santral yapım süreçleriyle ilgili maliyet, teknoloji ve diğer risklere bağlı belirsizlikler yüksek düzeydedir. Dolayısıyla henüz Türkiye'nin elektrik kaynakları arasında bulunmayan nükleer enerjinin, yol haritasında ele alınan süre içinde planlandığı şekilde sisteme dahil olup olmayacağı kesin olmadığı söylenebilir. Bu nedenle elektrik sektörü modelinde Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu nükleer enerjinin elektrik sisteminde olduğu ve olmadığı olasılıklara göre iki ayrı senaryo seti ile değerlendirilmiştir.

Dolayısıyla bu çalışmada senaryolar için kullandığımız başlıca varsayımlar şöyle özetlenebilir:

- 1 | Küresel sıcaklık artışının altında tutulması hedeflenen üst sınır: 1,5°C
- 2 | CO₂ emisyonlarının net sıfıra indirilmesi hedeflenen tarih: 2050 (IPCC, 2018).
- 3 | Elektrik sektörünün Baz Senaryosu'nda nükleer enerjinin varlığı: Akkuyu nükleer santralinin 4 ünitesinin 2027'den 2030'a kadar her yıl 1,2 GW'lık bir ünite olacak şekilde devreye girdiği ve girmediği durum

Bu varsayımlara göre aşağıdaki senaryolar oluşturulmuştur (Tablo 4.1):

- 1 | Baz Senaryo (BS): Türkiye ekonomisinin ve ilgili sektörlerin, dünya ekonomisinin mevcut gidişatıyla uyumlu olarak, 1,5°C için Net Sıfır hedefine uygun eylemler izlenmemesi halinde 2050'ye ve ötesine (2070'e) kadar izleyeceği patika.
 - 1.a. Nükleersiz Baz Senaryo (BS-NoN): Elektrik sektörü için izlenen Baz Senaryo'da elektrik sisteminde nükleer enerjinin olmadığı senaryo.
- 2 | Net Sıfır Senaryosu (NSS): 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 CO₂ emisyonlarının giderek azaltıldığı patika.
 - 2.a. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu (NSS-NoN): Elektrik sektörü için izlenen Net Sıfır Senaryosunda elektrik sisteminde nükleer enerjinin olmadığı senaryo.

Tablo 4.1. Çalışmada kullanılan senaryolar

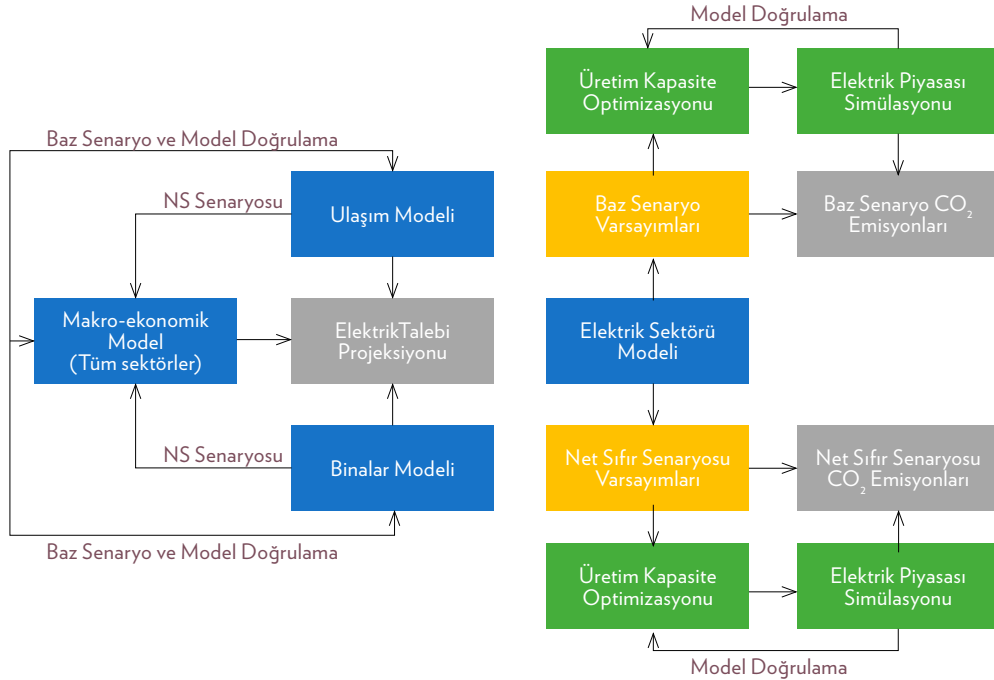
Senaryolar	Emisyon	Hedef	Zaman aralığı
Baz Senaryo (BS)	CO ₂	-	2018-2070
Nükleersiz Baz Senaryo (BS-NoN)	CO ₂	-	2018-2070
Net Sıfır Senaryosu (NSS)	CO ₂	1,5 °C	2018-2050
Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu (NSS-NoN)	CO ₂	1,5 °C	2018-2050

Çalışmada kullanılan her senaryoda, Tablo 4.2’de belirtilen sektörler bazında yıllık CO₂ emisyon değerleri (MtCO₂/yıl), kümülatif CO₂ emisyon değerleri (MtCO₂) ve sektörlerdeki elektrifikasyon ve verimlilik varsayımlarına bağlı sektörel elektrik tüketimleri (TWh/yıl) hesaplanmıştır. Sektörel elektrik tüketimleri elektrik sektörü modelinde girdi olarak kullanılmıştır. (Şekil 4.1)

Tablo 4.2. Çalışmaya dahil edilen sektörler

Sektörler
Elektrik
Ulaşım
Binalar
Sanayi
Hizmetler
Tarım

Şekil 4.1. Çalışmaya dahil edilen sektörlerde varsayımlar ve senaryolarla modellerin ilişkisi ve doğrulama yolları



Sektörel bazda kümülatif CO₂ emisyon değerleri, CO₂ emisyonlarında Türkiye için hesaplanan adil paylaşım CO₂ emisyon bütçesi (karbon bütçesi) ile (Bkz. Bölüm 2) kıyaslanmıştır.

4.1. BAZ SENARYO'NUN VARSAYIMLARI

Türkiye'nin 1,5°C için Net Sıfır Emisyon hedefini izlememesi halinde 2018'den 2050'ye ve ötesine (2070'e) kadar temel makroekonomik göstergelerde, elektrik talebinde ve enerji verimliliğinde yaşanacağı varsayılan gelişmeler ışığında CO₂ ve toplam sera gazı emisyonlarının izleyeceği patika Baz Senaryo'nun temelini oluşturur.

Baz Senaryo'da kullanılan temel girdi, elektrik sektörünün 2018-2030 dönemi için Baz Senaryo'ya uygun üretim patikasıdır. Elektrik sektörü için oluşturulan Baz Senaryo diğer sektörler için de girdi olarak kullanılmış, dolayısıyla tüm sektörler için kullanılan Baz Senaryo, Elektrik Sektörü Baz Senaryosu ile uyumlu olarak oluşturulmuştur. 2050-2070 dönemi için ise Baz Senaryo makroekonomik model tarafından oluşturularak diğer sektörlerle girdi sağlamıştır. Bu projeksiyonlardan yola çıkarak bu patikayı destekleyecek toplam/ sektörel büyüme, toplam faktör verimliliği ve enerji verimliliği patikaları oluşturulmuştur. Bu varsayımlar altında oluşturulan Makroekonomik Baz Senaryo öncelikle elektrik sektörüne ve ayrıca ulaşım ve sanayi modellerine verdiği girdiler nedeniyle diğer sektör modelleri ile de uyumlaştırılmıştır. Sonuç olarak 2030'a kadar oluşturulan patikada kullanılan parametrelerdeki trendler kullanılarak, aynı varsayım kümesi altında 2018-70 dönemi patikası yeniden yaratılmıştır.

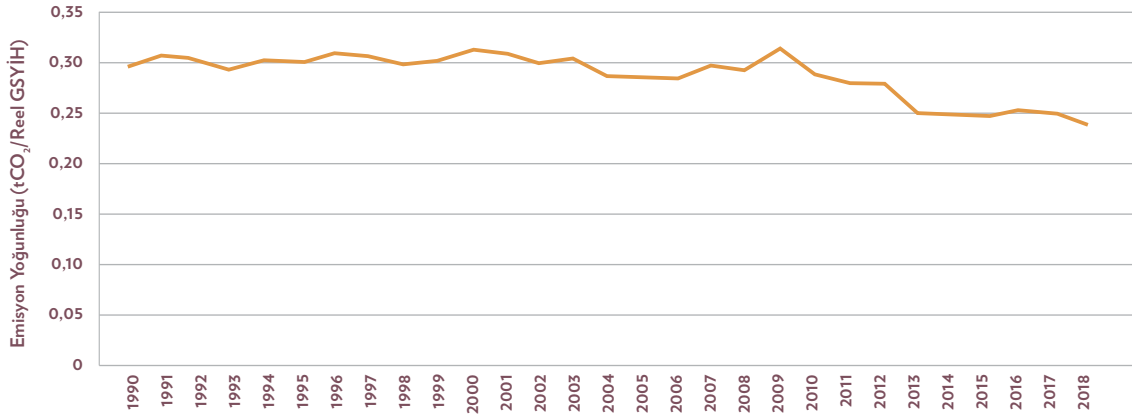
Baz Senaryo'yu oluşturan başlıca varsayımlar şöyle sıralanabilir:

- 1 | Temel makroekonomik göstergelerle ilgili varsayımlara göre Türkiye'nin reel GSYİH büyüme hızı;
 - 2020-2030 dönemi için yıllık ortalama %3,7;
 - 2030-2040 dönemi için yıllık ortalama %3,5;
 - 2040-2050 dönemi için yıllık ortalama %3,0;
 - 2050-2060 dönemi için yıllık ortalama %2,9;
 - 2060-2070 dönemi için yıllık ortalama %2,7
 olarak oluşturulmuştur.
- 2 | Baz Senaryo'da yıllık ortalama %0,3'lük enerji verimliliği artışı (TEP/2018 Reel Üretim Değeri) varsayılmaktadır.
- 3 | 2020-2030 arasında elektrik talebi yıllık artış oranı %4,2 olarak hesaplanırken 2030-50 arasındaki elektrik talebi artış hızı yıllık ortalama %2,6 ve 2050-2070 dönemi için de %1,8 olarak tahmin edilmiştir.
- 4 | Baz Senaryo'da 2018'de 300 TWh/yıl olan yıllık elektrik talebi tüm 2018-2070 dönemi için yılda ortalama %2,5 artışla 2030'da 461 TWh'ye, 2050'de 769 TWh'ye ve 2070'te 1.096 TWh'ye çıkmaktadır. Elektrik talebindeki artış hızı yıllar içinde azalmakta olup 2030'a kadar %3,9; 2030-3050 arasında %2,6 ve 2050'den sonra %1,8 olarak gerçekleşmektedir.

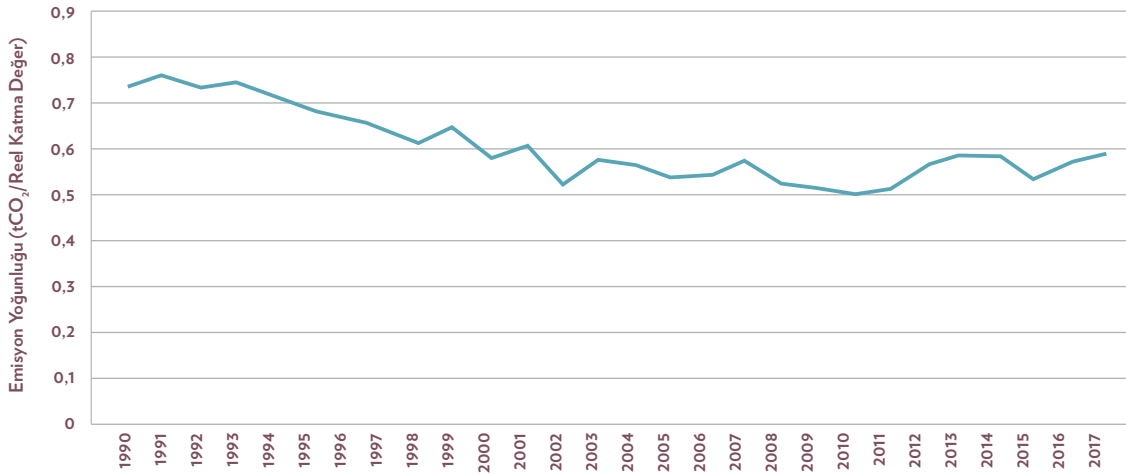
5 | Baz Senaryo'nun patikası, modelleme açısından kritik parametrelerin izlediği tarihsel değişimi de göz önünde bulundurmakta ve bu değişimi projeksiyonlara yansıtmaktadır. Örneğin Şekil 4.2'de GSYİH'nin emisyon yoğunluğundaki azalma eğilimi izlenmektedir. Benzer olarak Şekil 4.3'te, toplam tarımsal

üretimin sera gazı emisyon yoğunluğunda da azalma eğilimi olduğu görülmektedir. Bu ve benzeri tarihsel trendler baz patika oluşturmak üzere parametrize edilmiş ve 2018'den 2050'ye ve 2070'e kadar oluşturulan baz patikalara yansıtılmıştır.

Şekil 4.2. GSYİH'nin emisyon yoğunluğunda 1990-2018 arasında azalma eğilimi ($tCO_2/Reel\ GSYİH$)
(Kaynak, TÜİK)



Şekil 4.3. Tarım sektörünün emisyon yoğunluğunda 1990-2018 arasında azalma eğilimi ($tCO_2/Reel\ Katma\ Değer$)
(Kaynak, TÜİK)



Tablo 4.3. Baz Senaryo: Büyüme hızı, enerji verimliliği, elektrik talebi ve emisyonlar

Yıl	GSYİH Reel Büyüme Oranı (%)	Reel GSYİH (milyar TL, 2018 fiyatları ile)	Enerji Verimliliğinde Artış (%)	Elektrik Talebi Artışı (%)	Elektrik Talebi (TWh)	CO ₂ Emisyonları (MtCO ₂)	Sera Gazı Emisyonları (MtCO ₂ e)
2018	-	3.724,4	0,51	-	300,0	418,9	521,9
2019	0,92	3.758,7	0,30	1,30	303,9	400,1	508,8
2020	1,43	3.812,3	-	0,32	304,9	400,8	513,3
2023	4,05	4.267,9	0,20	3,96	353,1	461,7	583,1
2026	3,98	4.805,8	0,20	4,02	397,5	496,3	625,5
2030	3,82	5.579,9	0,36	3,88	460,6	514,4	654,4
2035	3,47	6.672,7	0,33	5,86	539,6	541,9	695,2
2040	3,09	7.824,6	0,32	4,12	619,5	585,6	751,4
2045	3,03	9.101,6	0,35	2,55	697,2	637,2	815,6
2050	2,95	10.543,5	0,38	1,37	769,1	696,6	888,5
2055	2,92	12.182,4	0,42	1,83	845,2	739,5	945,4
2060	2,81	14.011,7	0,40	1,38	918,2	782,6	1003,1
2065	2,69	16.030,7	0,42	1,84	1009,5	851,8	1088,1
2070	2,46	18.167,9	0,56	1,26	1095,9	920,5	1172,4

Tablo 4.3'te makroekonomik modelin ürettiği sonuçlar altında temel değişkenlerin baz dinamikleri 2018'den 2070'e kadar verilmektedir.

4.2. KARBONDİOKSİT EMİSYONLARI

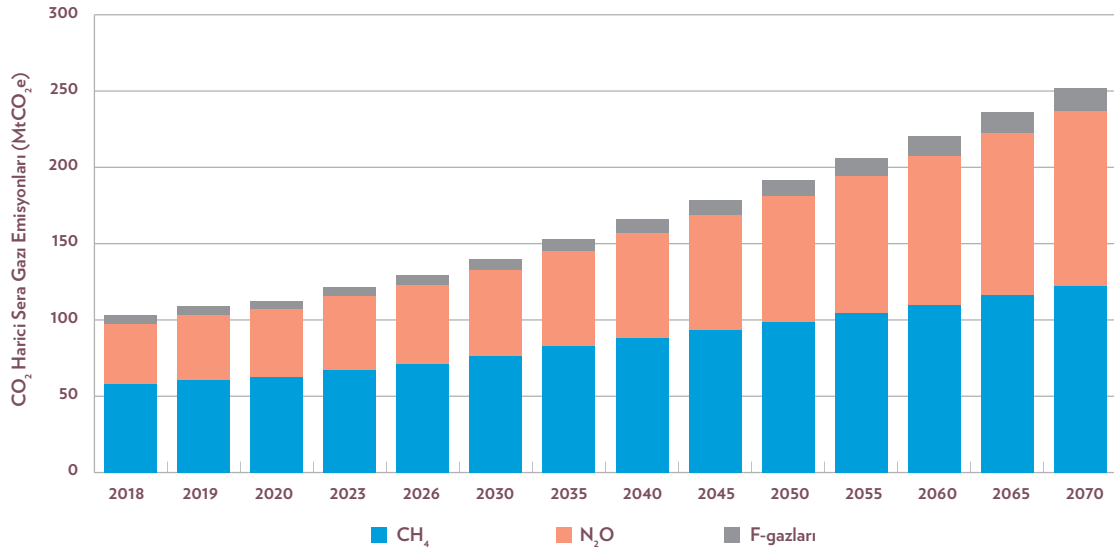
Baz Senaryo'da kullanılan varsayımlara bağlı olarak CO₂ ve diğer sera gazlarının 2018-2070 arasında nasıl arttığı ve sektörel dağılımı aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1 | Türkiye'nin Ulusal Sera Gazı Envanteri'nde bildirilen CO₂ dışındaki sera gazlarının, yani metan (CH₄), nitroz oksit (N₂O) ve F-gazlarının toplam emisyonu 2018'de 103 MtCO₂e iken 2030'da yaklaşık %35 artışla 140 MtCO₂e'ye ve 2050'de %86 artışla yaklaşık 192 MtCO₂e'ye yükselmekte, 2070'te ise 1,5 kata yakın artışla yaklaşık 252 MtCO₂e'ye çıkmaktadır. (Tablo ve Şekil 4.4)

Tablo 4.4. Baz Senaryoda CO₂ harici sera gazı emisyonları 2018-2070 (MtCO₂e)

Yıl	CH ₄	N ₂ O	F-gazları	Toplam CO ₂ Harici Sera Gazları
2018	58,1	39,3	5,7	103,0
2019	60,8	42,3	5,6	108,7
2020	62,7	44,2	5,6	112,5
2023	67,3	48,0	6,1	121,4
2026	71,1	51,4	6,7	129,2
2030	76,4	56,1	7,4	140,0
2035	82,7	62,2	8,3	153,2
2040	88,1	68,5	9,2	165,8
2045	93,3	75,0	10,1	178,4
2050	98,8	82,0	11,1	191,8
2055	104,4	89,5	12,1	205,9
2060	110,0	97,3	13,1	220,5
2065	116,2	105,9	14,2	236,3
2070	122,2	114,4	15,3	251,8

Şekil 4.4. Baz Senaryoda CO₂ harici sera gazı emisyonları 2018-2070 (MtCO₂e)



2 | Baz Senaryo'da toplam CO₂ emisyonlarının 2018-2070 arasındaki artışı ve sektörler göre dağılımı Tablo 4.5'te verilmiştir. Buna göre 2017'den sonra azalmaya başlayan toplam CO₂ emisyonları Baz Senaryo'ya temel teşkil eden varsayımlar altında 2020'den sonra artmaya başlamakta ve 2030'da 2018 seviyesine oran-

la %23'e yakın artarak yaklaşık 515 MtCO₂'ye, 2050'de ise %66 artışla 697 MtCO₂'ye çıkmaktadır. 2070'te ise toplam CO₂ emisyonları 2018 seviyesinin %120 üzerine çıkarak 920 MtCO₂'yi bulmaktadır. Toplam CO₂ emisyonlarındaki artış diğer sera gazlarındaki artışla birlikte Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Baz Senaryoda CO₂ emisyonlarının sektörler göre dağılımı ve yıllara göre değişimi (2018-70) (MtCO₂)

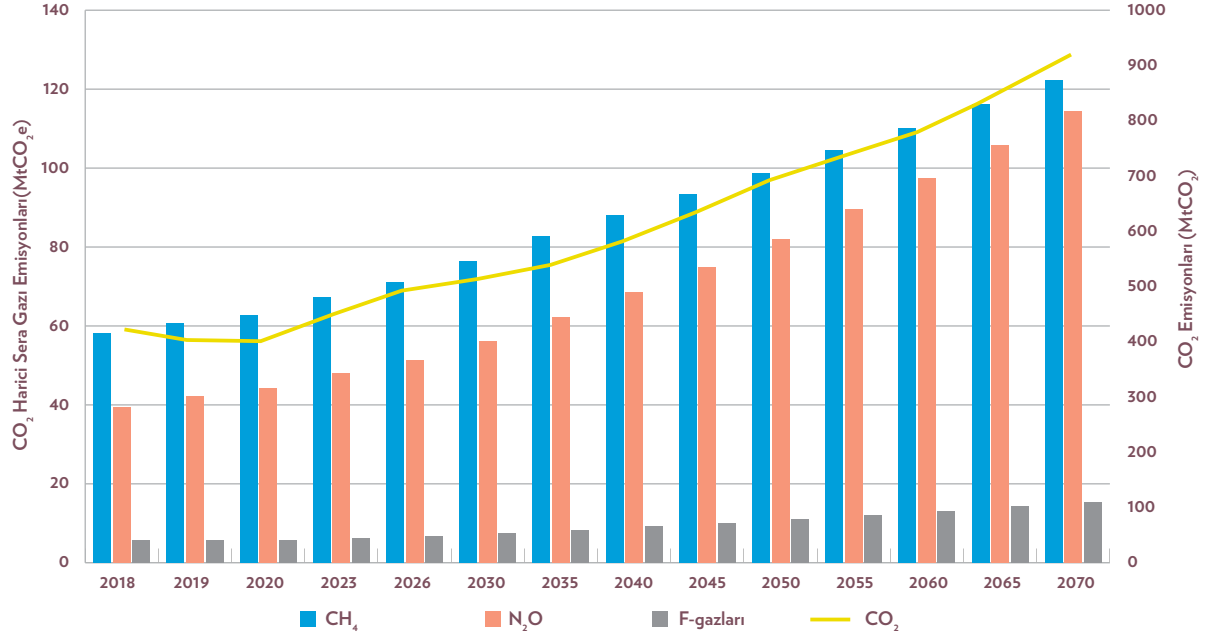
Yıl	Fosil Yakıtlardan Elektrik Üretimi	Diğer Enerji	Ulaşım	Konutlar*	Sanayi ve Diğer Üretici Sektörlerde Enerji	Sanayi Prosesleri	Toplam CO ₂
2018	149,0	3,0	82,8	37,2	87,0	59,8	418,9
2019	139,8	3,0	81,7	37,1	85,8	52,6	400,1
2020	133,9	3,0	80,7	42,8	85,2	55,3	400,8
2023	171,0	3,3	85,4	47,1	92,7	62,2	461,7
2026	189,1	3,6	90,2	47,8	98,4	67,2	496,3
2030	184,0	4,0	96,5	49,9	106,1	73,9	514,4
2035	189,0	4,4	102,3	51,4	112,9	82,0	541,9
2040	212,0	4,8	108,0	52,0	118,8	89,9	585,6
2045	243,2	5,3	113,7	52,6	124,2	98,1	637,2
2050	281,9	5,8	119,5	53,1	129,6	106,8	696,6
2055	306,2	6,3	122,4	53,9	134,6	116,2	739,5
2060	330,5	6,8	125,3	54,7	139,4	125,9	782,6
2065	379,3	7,4	128,2	55,1	145,6	136,2	851,8
2070	428,1	7,9	131,2	54,8	152,4	146,2	920,5

* Bu tabloda ticari/kurumsal binalarda enerji tüketimine bağlı emisyonlar TÜİK tablolarıyla uyumlu olmak üzere Sanayi ve Diğer Üretici Sektörlerde Enerji başlığı altındadır. Konutlar başlığı sadece hanehalklarının enerji tüketimine bağlı emisyonları kapsamaktadır. Modelde ise ticari/kurumsal binalar Binalar modeli başlığı altında çalışılmıştır.

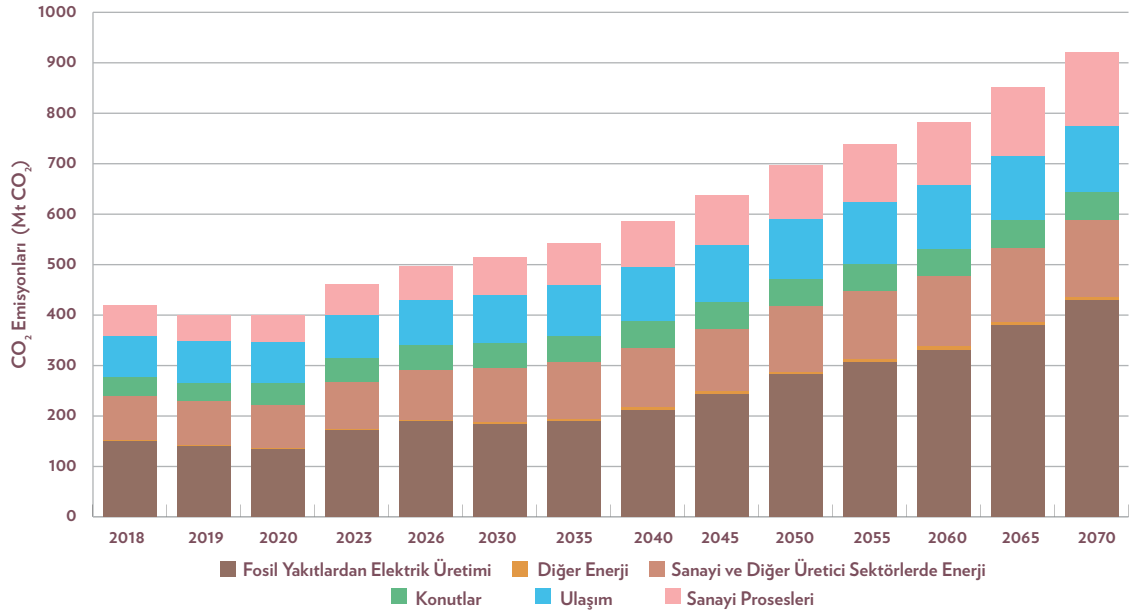
Baz Senaryo'da 2018'den 2070'e kadar CO₂ emisyonlarının sektörel dağılımı TÜİK'in Sera Gazı Emisyon Envanteri, 1990-2019'a dayanarak (TÜİK, 2021) baz yıl olan 2018 için kalibre edilmiş ve sektörel modellerin baz senaryoları çerçevesinde oluşturulmuştur. Dolayısıyla sektörel payların değişmesinde her sektörel modelin kendi içerisindeki varsayımları önemli rol oynamıştır. Tablo 4.5 ve Şekil 4.6'da verilen sektörel

dağılımda 2018'de %35,6 ile en yüksek orana sahip olan elektrik sektörünün payı yıllar içinde artarak 2050'de %40'ı geçmekte ve 2070'te %46,5 olmaktadır. CO₂ emisyonlarında en yüksek ikinci ve üçüncü paya sahip olan sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketimi ile ulaşımın payları ise yıllar içinde düşmektedir. CO₂ emisyonlarının sektörler arasındaki oransal dağılımı da Tablo 4.6 ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Şekil 4.5. Baz Senaryoda CO₂ ve diğer sera gazı emisyonları 2018-2070 (MtCO₂e)



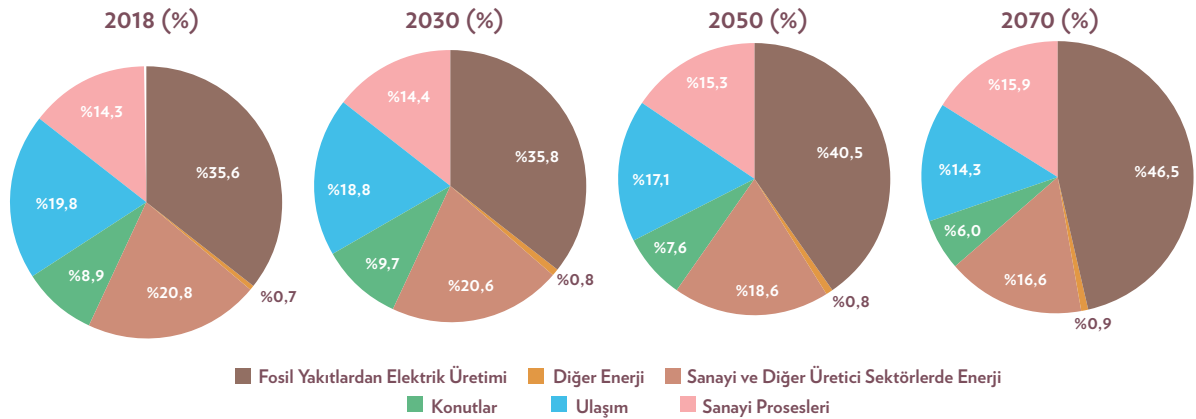
Şekil 4.6. Baz Senaryoda sektörlere göre CO₂ emisyonları 2018-2070 (MtCO₂)



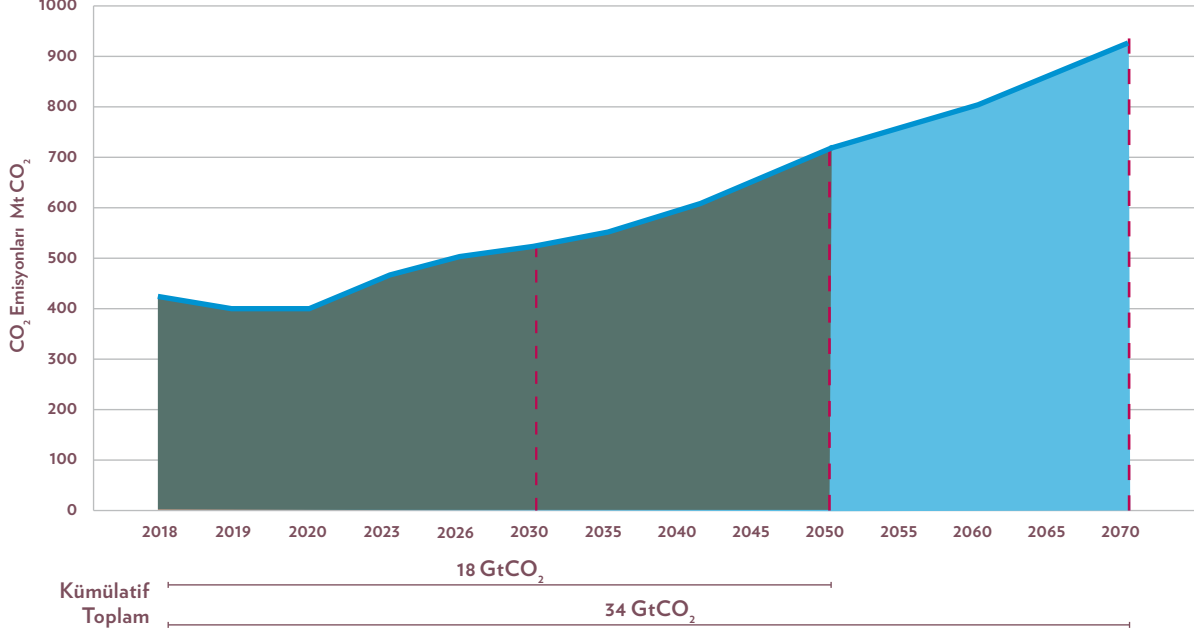
Tablo 4.6. Baz senaryoda CO₂ emisyonlarının sektörlere göre oransal dağılımı (%)

Yıl	Fosil Yakıtlardan Elektrik Üretimi	Diğer Enerji	Ulaşım	Konutlar	Sanayi ve Diğer Üretici Sektörlerde Enerji	Sanayi Prosesleri	Toplam CO ₂
2018	35,6	0,7	19,8	8,9	20,8	14,3	100,0
2019	34,9	0,8	20,4	9,3	21,5	13,1	100,0
2020	33,4	0,7	20,1	10,7	21,2	13,8	100,0
2023	37,0	0,7	18,5	10,2	20,1	13,5	100,0
2026	38,1	0,7	18,2	9,6	19,8	13,5	100,0
2030	35,8	0,8	18,8	9,7	20,6	14,4	100,0
2035	34,9	0,8	18,9	9,5	20,8	15,1	100,0
2040	36,2	0,8	18,4	8,9	20,3	15,4	100,0
2045	38,2	0,8	17,8	8,3	19,5	15,4	100,0
2050	40,5	0,8	17,1	7,6	18,6	15,3	100,0
2055	41,4	0,8	16,6	7,3	18,2	15,7	100,0
2060	42,2	0,9	16,0	7,0	17,8	16,1	100,0
2065	44,5	0,9	15,1	6,5	17,1	16,0	100,0
2070	46,5	0,9	14,3	6,0	16,6	15,9	100,0

Şekil 4.7. Baz senaryoda 2018, 2030, 2050 ve 2070'te CO₂ emisyonlarının sektörlere göre oransal dağılımı (%)



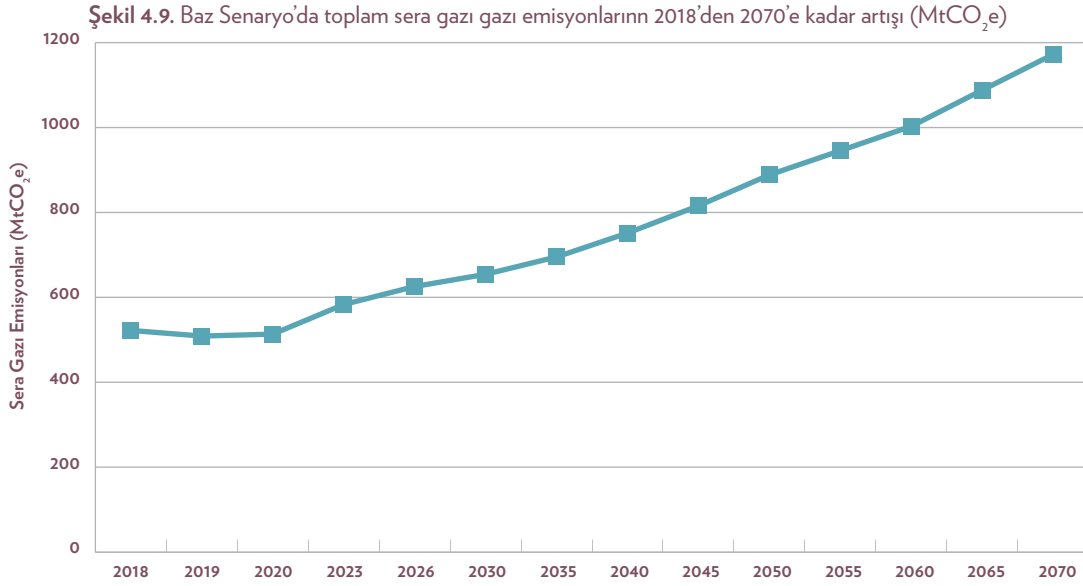
Şekil 4.8. Baz senaryoda toplam CO₂ emisyonlarının 2018'den 2050'ye ve 2070'e kadar artışı (MtCO₂)



3 | Baz Senaryo'da CO₂ emisyonlarının 2018-2070 arası değişimi ile 2050'ye ve 2070'e kadar gerçekleşen kümülatif emisyonlar (ya da Türkiye'nin kullandığı karbon bütçesi) Şekil 4.8'de verilmiştir. Buna göre kümülatif CO₂ emisyonları 2018-2050 arasında yaklaşık 18 GtCO₂, 2018-2070 arasında ise 34 GtCO₂ olmaktadır. (Şekil 4.8) Türkiye böylece CO₂ emisyonlarını Baz Senaryo'da olduğu gibi artırırsa sıcaklık artışını %50 olasılıkla 1,5 derecenin altında tutmak için kalan küresel büt-

çenin 2050'ye kadar %3,1'ini, 2070'e kadar ise %5,9'unu harcamış olacaktır.

4 | Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonlarına bakıldığında ise 2018'de 522 MtCO₂ olan sera gazı emisyonları 2030'da %25 artışla 654 MtCO₂'ye, 2050'de %70 artışla 888 MtCO₂'ye ve 2070'te %125 artışla 1,17 GtCO₂'ye, yükselmektedir. (Şekil 4.9)



5 | 5. Türkiye'nin 2050'ye kadar yaptığı CO₂ emisyonlarının sektörel dağılımına göre (Tablo 4.7) kümülatif emisyonların 6,8 GtCO₂'si (%38) elektrik sektörü, 3,6 GtCO₂'si (%20) sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketimi, 3,3 GtCO₂'si (%18) ulaşım, 2,6 GtCO₂'si (%15) sanayi prosesleri ve 1,6 GtCO₂'si (%9) binalar tarafından yapılmaktadır. 2070'e kadar yapılan kümülatif emisyonlarda bu dağılım elektrik sektörünün payı genişleyecek şekilde biraz değişmekte ve bu paylar elektrik 13,8 GtCO₂

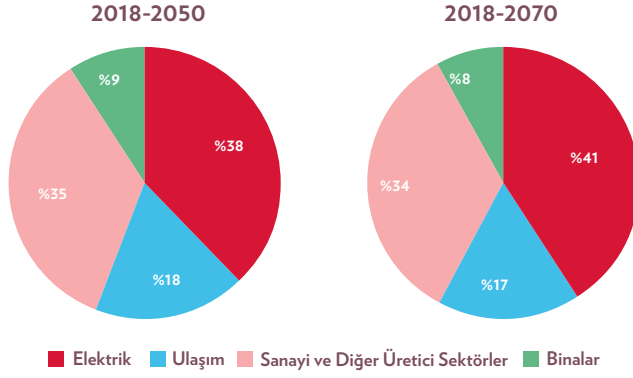
(%41), sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketimi 6,4 GtCO₂ (%19), ulaşım 5,8 GtCO₂ (%17), sanayi prosesleri 5,2 GtCO₂ (%15) ve binalar 2,7 Gt (%8) olarak dağılmaktadır. (Tablo 4.7 ve Şekil 4.10)

Böylece Türkiye bu çalışmada adil paylaşım ilkesi gereği Türkiye'ye ayrılan karbon bütçesinin (7,95 GtCO₂) 2050'ye kadar 2,3 katını, 2070'e kadar ise 4,3 katını salmış olmaktadır.

Tablo 4.7. Baz Senaryo'da Türkiye'nin 2050'ye ve 2070'e kadar kümülatif CO₂ emisyonunun (Gt) sektörlere göre dağılımı (%)

	Elektrik	Ulaşım	Binalar	Sanayi ve Diğer Üretici Sektörler	Toplam
2018-2050	6,8 (%38)	3,3 (%18)	1,6 (%9)	6,2 (%35)	18 (%100)
2018-2070	13,8 (%41)	5,8 (%17)	2,7 (%8)	11,6 (%34)	34 (%100)

Şekil 4.10. Baz Senaryo'da Türkiye'nin 2050'ye ve 2070'e kadar kümülatif CO2 emisyonunun sektörlere göre dağılımı (%)



5. SENARYOLAR-2: NET SIFIR SENARYOSU

Türkiye'nin küresel sıcaklık artışını 1,5 derecede sınırlama hedefine uygun olarak 2050'de net sıfır emisyona ulaşması için 2018'den 2050'ye kadar CO₂ emisyonlarının izleyebileceği patika Net Sıfır Senaryosu'nun temelini oluşturur.

5.1. NET SIFIR SENARYOSU'NUN VARSAYIMLARI

Net Sıfır Senaryosu'nda izlenen emisyon patikası elektrik sektörü, ulaşım, binalar, sanayi ve diğer üretici sektörler için öngörülen belli varsayımlara bağlı olarak oluşmuştur. Bu varsayımlar her sektörün ilgili bölümünde verilmiştir.

5.2. KARBONDİOKSİT EMİSYONLARI

Net Sıfır Senaryosu'nda kullanılan varsayımlara bağlı olarak toplam CO₂ emisyonlarının 2018-2050 arasındaki değişimi ve sektörlere göre dağılımı Tablo 5.1'de verilmiştir.

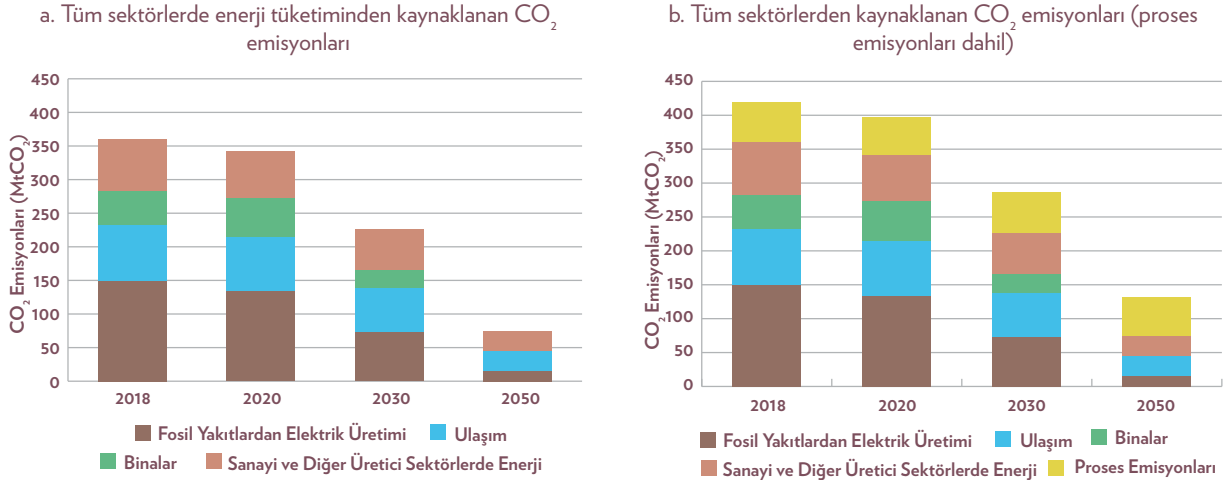
Buna göre 2017'den sonra azalmaya başlayan toplam CO₂ emisyonları Net Sıfır Senaryosu'na temel teşkil eden varsayımlar altında 2020'den sonra da azalmaya devam etmektedir. Tüm sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları 2030'da 2018 seviyesine oranla %37 azalarak 225 MtCO₂'ye, 2050'de ise %80 azalarak 74 MtCO₂'ye inmektedir. Sanayiden kaynaklanan proses emisyonları dahil edildiğinde tüm sektörlerden kaynaklanan CO₂ emisyonları 2030'da %32 azalarak 287 MtCO₂'ye, 2050'de ise %69 azalarak 132 MtCO₂'ye inmektedir.

Tablo 5.1. Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda CO₂ emisyonlarının sektörlere göre dağılımı ve yıllara göre değişimi (2018-50) (MtCO₂)

SEKTÖRLER	BAZ SENARYO				NET SIFIR SENARYOSU			
	2018	2020	2030	2050	2018	2020	2030	2050
Fosil Yakıtlardan Elektrik Üretimi	149,0	133,9	184,0	281,9	149,0	133,9	72,7	15,0
Ulaşım	82,8	80,7	96,5	119,5	82,8	80,7	65,3	28,9
Binalar	50,9	59,3	69,3	73,8	50,9	58,0	27,5	0,0
Sanayi ve Diğer Üretici Sektörlerde Enerji	77,2	68,7	99,4	108,5	77,2	69,3	60,0	30,2
ENERJİ TÜKETİMİNDEN KAYNAKLANAN CO ₂ EMİSYONLARI	359,9	342,6	449,3	583,6	359,9	341,9	225,5	74,1
Proses Emisyonları	59,8	55,3	73,9	106,9	59,8	55,3	61,8	57,6
TOPLAM CO ₂ EMİSYONLARI	419,7	397,9	523,2	690,5	419,7	397,2	287,3	131,6

* Tabloda görülen Baz Senaryo'daki toplam emisyon değerleri ile Tablo 4.6'da görülen değerler arasındaki küçük farklar bu bölümde kullanılan modelde ticari binalardan kaynaklanan emisyonların Binalar başlığı altına alınmasından kaynaklanmaktadır. Baz Senaryo ile Net Sıfır Senaryosu'ndaki emisyonların karşılaştırılması bu tablodaki değerler üzerinden yapılmıştır.

Şekil 5.1. Net Sıfır Senaryosu'nda CO₂ emisyonlarının sektörlere göre dağılımı ve yıllara göre değişimi (2018-50) (MtCO₂)



Sektörlere bakıldığında (Şekil 5.1.) en yüksek azalma binalardan kaynaklanan emisyonlardır. Binalardan kaynaklanan CO₂ emisyonları 2030'da 2018 seviyesine oranla %46 azalarak 28 MtCO₂'ye inmekte ve 2050'de sıfırlanmaktadır.

Elektrik sektöründe de tüm sektörlerin toplamından daha hızlı bir azalma görülmektedir. Elektrik sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları da 2030'da 2018 seviyesine oranla %51 azalarak 73 MtCO₂'ye, 2050'de ise %90 azalarak 15 MtCO₂'ye gerilemektedir.

Ulaşım sektöründe emisyonlar tüm sektörlerin toplamına yakın orandan azalmaktadır. Ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları 2030'da 2018 seviyesine oranla %21 azalarak yaklaşık 65 MtCO₂'ye ve 2050'de %65 azalarak 29 MtCO₂'ye inmektedir.

Sanayi ve diğer üretici sektörlerde (tarım ve hizmetler) enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlar kısa vadede tüm sektörlerin toplamına yakın, uzun vadede ise daha yavaş azaltılabilmek-

tedir. Sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerjiden kaynaklanan CO₂ emisyonları 2030'da 2018 seviyesine oranla %22 azaltarak 60 MtCO₂'ye, 2050'de ise %61 azalarak 30 MtCO₂'ye inmektedir.

Sanayiden kaynaklanan proses emisyonları ise literatürde azaltım sağlayacak yeterli varsayım olmadığından makroekonomik modelde çok kısıtlı olarak çalışılabilmektedir. Bu nedenle mevcut sınırlı emisyon azaltımı sağlayacak müdahale varsayımları altında proses emisyonlarında ciddi bir azalma görülmemekte, ancak artış sınırlandırılabilir. Böylece sanayi proseslerinden kaynaklanan CO₂ emisyonları 2030'da 2018 seviyesinin %3 üzerine çıkarak 62 MtCO₂ olmakta, 2050'de ise %4'e yakın azalarak 58 MtCO₂'ye inmektedir. Ancak bu değerler yine de Baz Senaryo'da görülen değerlerin 2030'da %16, 2050'de ise %46 altındadır.

Net Sıfır Senaryosu'nda toplam ve sektörlere göre CO₂ emisyonlarındaki değişiklikler mutlak değer ve oran olarak Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Net Sıfır Senaryosunda CO₂ emisyonlarının 2030 ve 2050'de 2018'de göre değişimi

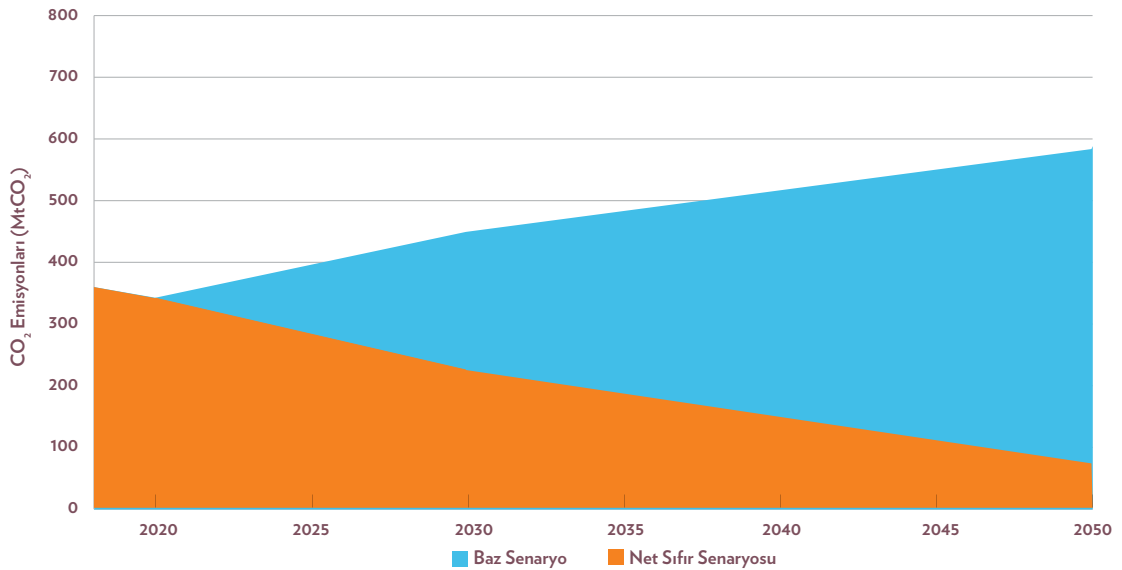
SEKTÖRLER	2030-2018		2050-2018	
	CO ₂ Emisyonu (MtCO ₂)	%	CO ₂ Emisyonu (MtCO ₂)	%
Fosil Yakıtlardan Elektrik Üretimi	-76,3	-51,2	-134,0	-89,9
Ulaşım	-17,5	-21,1	-53,9	-65,1
Binalar	-23,4	-46,0	-50,9	-100,0
Sanayi ve Diğer Üretici Sektörlerde Enerji	-17,2	-22,3	-47,0	-60,9
ENERJİ TÜKETİMİNDEN KAYNAKLANAN CO ₂ EMİSYONLARI	-134,4	-37,3	-285,8	-79,4
Proses Emisyonları	2,0	3,3	-2,3	-3,8
TOPLAM CO ₂ EMİSYONLARI	-132,4	-31,5	-288,1	-68,6

Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonlar hariç tutularak, sadece enerji tüketiminden kaynaklanan emis-

yonlar açısından karşılaştırıldığında 2050'de 2019 seviyesine göre %80 azaltım yapıldığı görülmektedir. (Tablo 5.3 ve Şekil 5.2)

Tablo 5.3. Net Sıfır Senaryosu'nda tüm sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının seyri (MtCO₂)

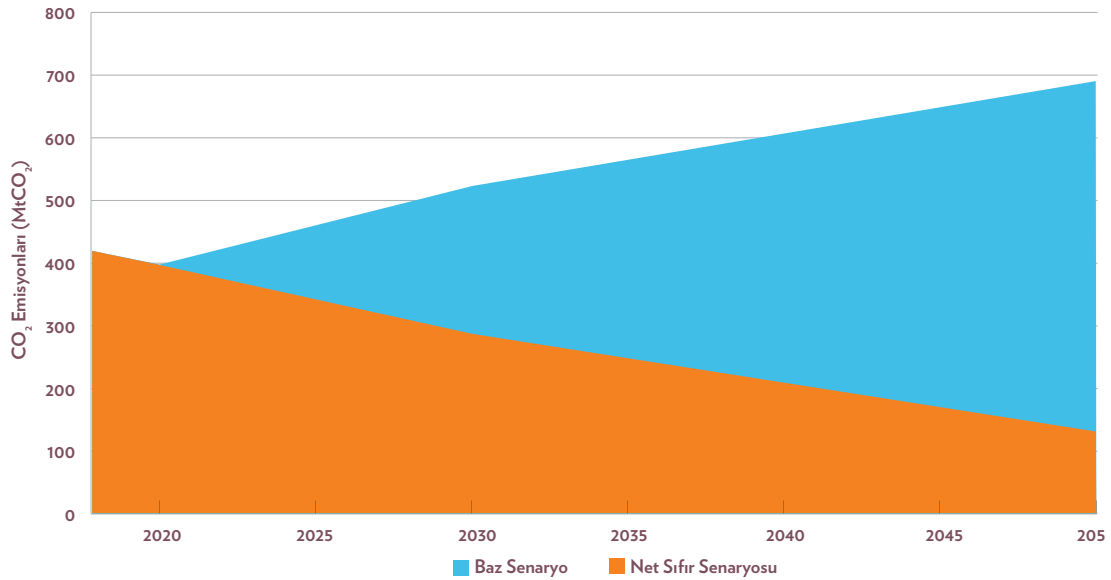
Senaryo	2018	2020	2030	2050
Baz Senaryo	359,9	342,6	449,3	583,6
Net Sıfır Senaryosu	359,9	341,9	225,5	74,1

Şekil 5.2 Net Sıfır Senaryosu'nda tüm sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının seyri (MtCO₂)

Tablo 5.4. Net Sıfır Senaryosu'nda tüm sektörlerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının (proses emisyonları dahil) seyri (MtCO₂)

Senaryo	2018	2020	2030	2050
Baz Senaryo	419,7	397,9	523,2	690,5
Net Sıfır Senaryosu	419,7	397,2	287,3	131,6

Şekil 5.3. Net Sıfır Senaryosu'nda tüm sektörlerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının (proses emisyonları dahil) seyri (MtCO₂)



Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonlar dahil edilerek, tüm CO₂ emisyonları açısından karşılaştırıldığında 2050'de 2019 seviyesine göre %70'e yakın azaltım yapıldığı görülmektedir. (Tablo 5.4 ve Şekil 5.3)

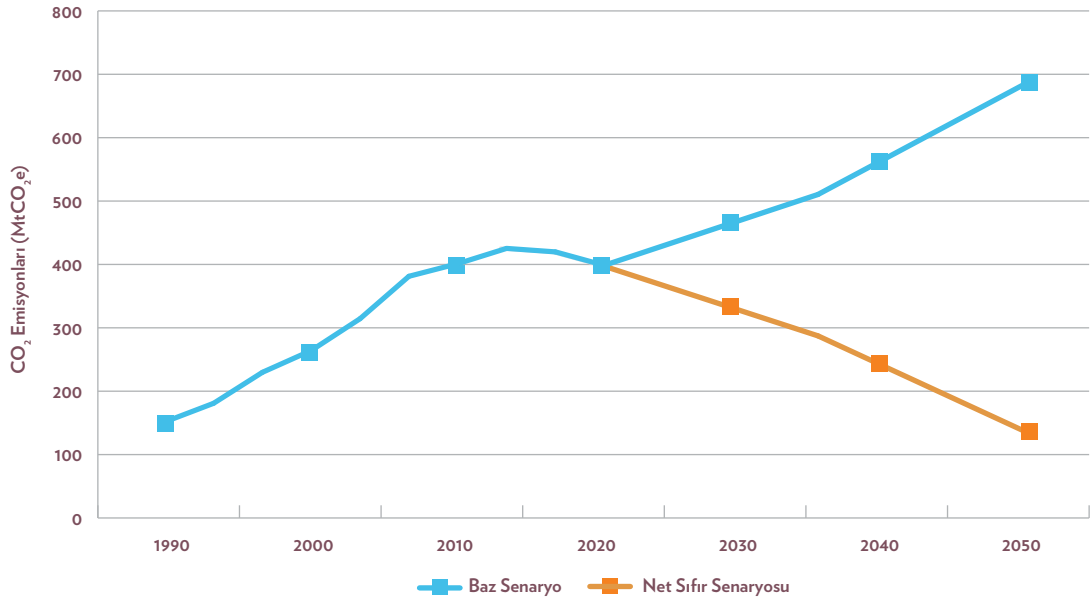
Tüm sektörlerden kaynaklanan bütün CO₂ emisyonlarının seyri Tablo 5.5 ve Şekil 5.4'te Baz Senaryo'da ve Net Sıfır Senaryosu'nda 1990'dan itibaren gösterilmiştir. Sonuç olarak Türkiye'nin 1990'dan itibaren yaklaşık %130 artan emisyonları 2018 yılında tepe noktasına çıktıktan sonra azalmaya başlamakta ve 2050'de Baz Senaryo'da öngörüldüğü gibi 700 milyon tona çıkmak yerine

Net Sıfır Senaryosu'nda 2018'e göre yaklaşık %70 azaltımla 130 milyon tona düşmekte ve 1990 seviyesinin %13 altına inmektedir. 2050'de kalan (artık) emisyon düzeyi sanayi prosesleri dahil edilmediğinde ise 2018 seviyesine göre %80 azalarak 74 milyon tona düşmekte ve 1990 seviyesinin %43 altına inmektedir.

Tablo 5.5. Baz Senaryo'da ve Net Sıfır Senaryosu'nda bütün sektörlerin CO₂ emisyonlarının (proses emisyonları dahil) 1990'dan itibaren değişimi

YIL	Baz Senaryo	Net Sıfır Senaryosu
1990	151,5	151,5
1995	180,9	180,9
2000	229,8	229,8
2005	264,2	264,2
2010	314,4	314,4
2015	381,3	381,3
2016	401,2	401,2
2017	425,3	425,3
2018	419,8	419,7
2020	398,6	397,2
2030	510,4	287,3
2050	690,5	131,6

Şekil 5.4. Baz Senaryo'da ve Net Sıfır Senaryosu'nda bütün sektörlerin CO₂ emisyonlarının (proses emisyonları dahil) 1990'dan itibaren değişimi



6. ELEKTRİK SEKTÖRÜ

Elektrik sektörü Türkiye’de CO₂ emisyonlarının %35’inden sorumludur ve bütün dünyada en yüksek azaltım potansiyeline sahip sektör olarak kabul edilmektedir (UNEP, 2017). Enerji sektöründe fosil yakıtlardan elektrik üretimi en büyük paya sahiptir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması yoluyla elektrik sistemini karbonsuzlaştırmanın ulaşım sektörü, sanayi ve binalardan daha çabuk ve kolay olacağı bilinmektedir (IPCC, 2014). Bu bölümde Türkiye’de elektrik sektöründe kullanılan kaynakların kurulu güç ve elektrik üretimi kapasitesinin dağılımı ve elektrik üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının nasıl değişeceği Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu karşılaştırılarak incelenmiştir.

6.1.ELEKTRİK SEKTÖRÜ MODELİ VE VARSAYIMLAR

Elektrik sektöründen kaynaklanan emisyonların incelenmesi için çalıştırılan elektrik sektörü modelinde kullanılan temel varsayımlar şunlardır:

6.1.1. Elektrik talep ve üretim projeksiyonu:

Baz Senaryo’da toplam elektrik tüketimi 2030’a kadar TEİAŞ tarafından gerçekleştirilen güncel projeksiyonlardan yola çıkılarak öngörülmüş,

2030 sonrası için makroekonomik model sonuçları kullanılmıştır. (Tablo 6.1.a) Çalışmada Baz Senaryo’da 2030 yılında toplam üretim ihtiyacı 460 TWh varsayılmıştır. 2050 yılındaki elektrik talep projeksiyonu makroekonomik model kullanılarak 769 TWh hesaplanmıştır.

6.1.2. Üretim kapasite genişleme modeli:

Çalışmada kullanılan üretim kapasitesi genişleme modeli, TR-Power optimizasyon modelinin (Kat, 2021) geliştirilmiş bir versiyonudur. Bu kapsamda depolama teknolojilerinin entegre edildiği modele, sınır ötesi enterkoneksiyon hatları da dahil edilmiştir. Model, üretim kapasitesinin genişlemesini ve operasyonel planlamayı içeren büyük ölçekli bir doğrusal programlama metodolojisine dayalıdır. Modelin amacı, toplam güç sisteminin toplam indirgenmiş maliyetini minimize etmektir. Yıllık yatırım, işletme ve yakıt maliyetleri ile elektrik kesinti maliyetleri dikkate alınmaktadır. Teknik ve maliyet parametrelerinde literatürdeki çalışmalar referans alınmıştır (Aksoy, 2020). Makroekonomik modelden, ulaşım ve bina modellerinden gelen verilerle talep projeksiyonları netleştirilmektedir.

Tablo 6.1.a TEİAŞ’ın projeksiyonları ve raporda kullanılan elektrik talep ve üretim projeksiyonları (TWh)

Yıl	TEİAŞ Talep Projeksiyonu (2021-2030) ⁵			TEİAŞ Üretim Projeksiyonu (2020-2024) ⁶			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

3 <https://webapi.teias.gov.tr/file/cf3c6e89-944f-4d88-be82-0b8cae-89d6ae?download>

4 <https://webapi.teias.gov.tr/file/abeac87d-3abc-4532-9cf4-d6f3a9d-34c17?download>

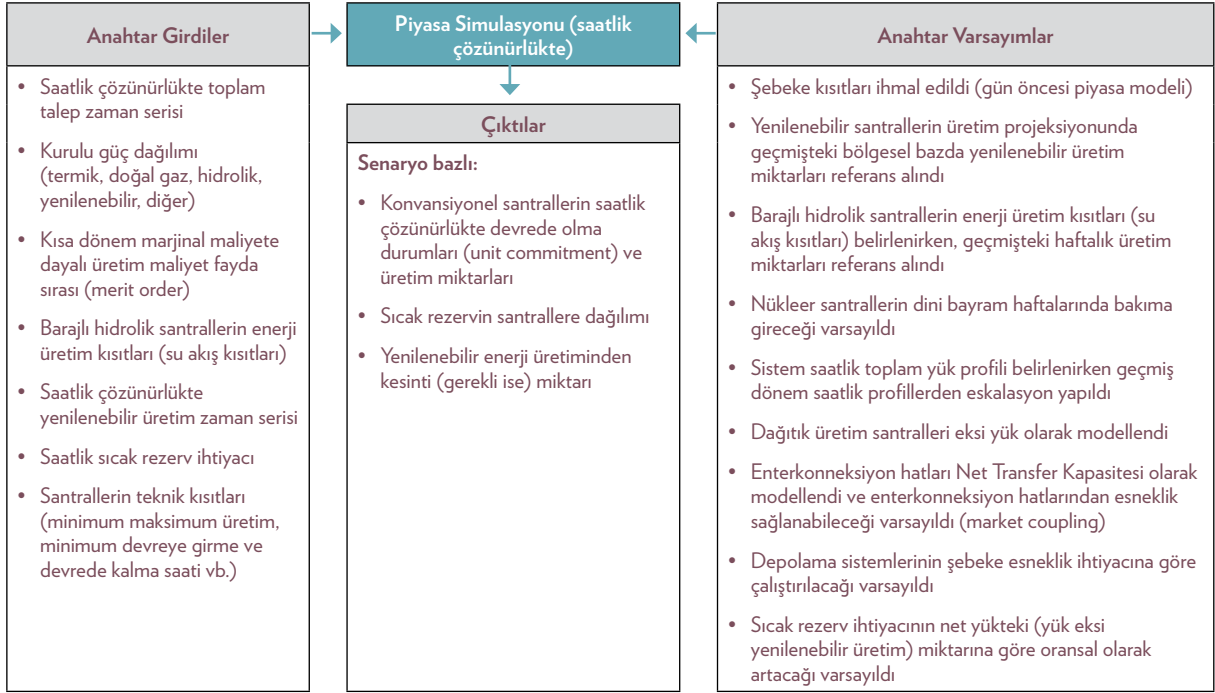
Üretim kapasite genişleme modelinin sonuçlarının rasyonelliği piyasa simülasyonu modelinde test edilmiştir. Piyasa simülasyonu modeli sonuçlarına göre üretim kapasite genişleme modelinde iteratif olarak gerekli düzeltmeler yapılmıştır.

6.1.3. Piyasa simülasyonu modeli:

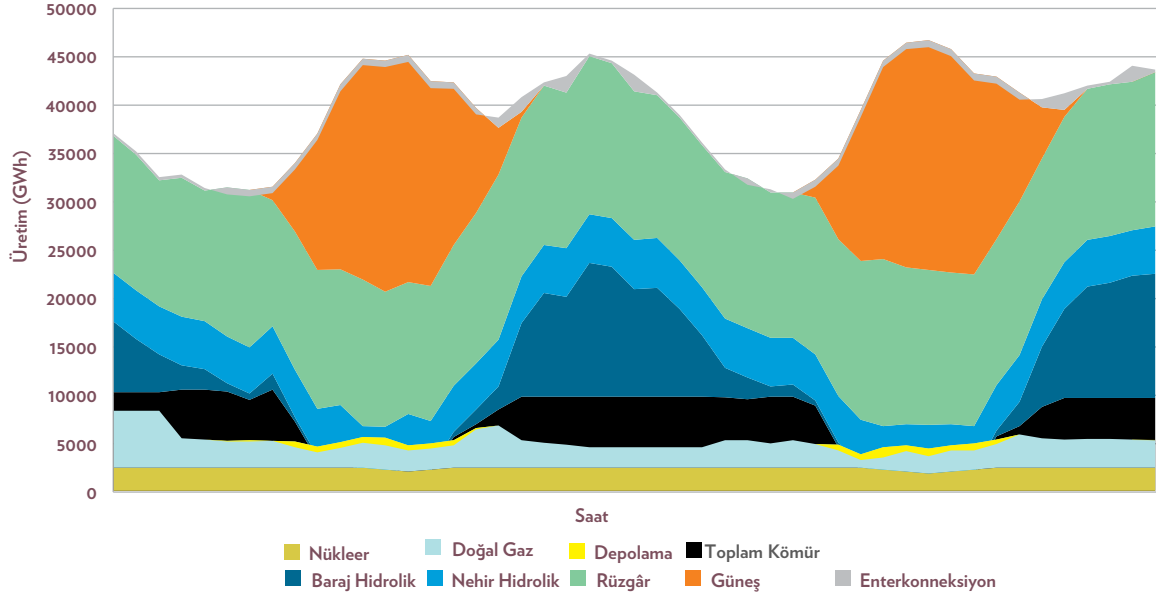
Üretim kapasite genişleme modelinin çıktıları göz önüne alınarak, enerji sisteminin arz-talep dengesi, Şekil 6.1.a'da gösterilen yöntem ile hedef yılı boyunca saatlik olarak minimum üretim maliyeti üzerinden karşılanır. Türkiye gün öncesi enerji ticareti piyasasıyla tutarlı kalmak adına

şebeke güvenliği ve güvenilirlik kısıtları piyasa simülasyonunda dikkate alınmamıştır. Piyasa simülasyonu modeli temel girdileri, varsayımları ve çıktıları Şekil 6.1.a'da, çıktılarına yönelik bir örnek ise Şekil 6.1.b'de gösterilmektedir. Piyasa simülasyonu modelinin detayları Shura Enerji Dönüşüm Merkezi tarafından 2018'de yayımlanan "Türkiye'nin Enerji Sisteminde Yenilenebilir Kaynakların Artan Payı: İletimde Genişleme ve Esneklik Seçenekleri" raporunda (Shura, 2018) ve modeli geliştiren uzmanların yayınladığı makalede yer almaktadır (Cebeci et al., 2019).

Şekil 6.1.a. Piyasa simülasyonu modeli: Anahtar girdiler, varsayımlar ve çıktılar



Şekil 6.1.b. Piyasa simülasyonu modeli çıktılarına bir örnek (48 saat)



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

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

6.1.4. Emisyon katsayıları:

Fosil yakıt kaynakların TWh başına MtCO₂ olmak üzere CO₂ emisyonu katsayıları Tablo 6.1.b'de verilmiştir.⁶

Tablo 6.1.b. Emisyon katsayıları

	Taş Kömürü	İthal Taş Kömürü	Linyit	Doğal Gaz
Emisyon Katsayısı (MtCO ₂ /TWh)	1,02	0,95	1,19	0,39

6.1.5. Verimlilik ve elektrifikasyonun elektrik talebine etkisi:

Net Sıfır Senaryosu'nda diğer sektör modellerinden hesaplanan net verimlilik ve elektrifikasyon yükleri Baz Senaryo'daki elektrik yüküne eklenmiştir. Diğer sektörlerde yapılan varsayımlardaki hata payları için, CO₂ emisyonlarında dominant sektör olan enerji sektörünün kritik girdisi olan yıllık elektrik yüküne, Net Sıfır hedef yılında toplam %10'luk bir ilave yük payı eklenmiştir.

6.1.6. Şebeke esneklik çözümleri:

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

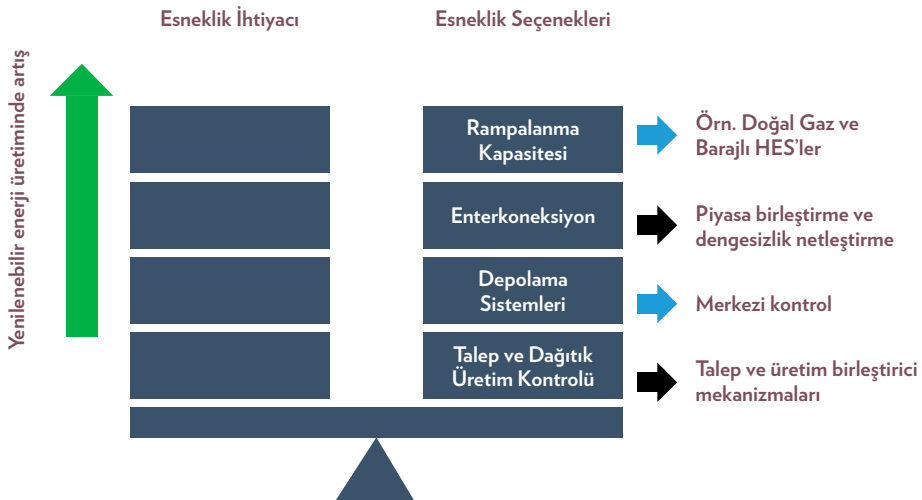
- 1| Doğal gaz santralleri ve barajlar: Düşük kapasite faktörlü çalışan ve dolayısıyla kapanma riski olan doğal gaz santralleri ile baraj-tipi hidroelektrik santraller.
- 2| Depolama sistemleri: Üretilen elektriğin şebeke talebinden fazla olan kısmının ya da şebekeye verilmeyen elektriğin, hazır ve emre amade

olarak depolanmasını sağlayan bataryalar ve pompajlı hidroelektrik santraller. Bu depolama sistemlerinin esneklik ihtiyacı kapasite optimizasyonundan hesaplanmaktadır (NREL, 2019).

- 3| Uluslararası enterkoneksiyon hatları: Uluslararası enterkoneksiyon hatları üzerinden piyasa birleştirme mekanizmaları ile sağlanacak esneklik. Elektrik şebeke bağlantısı yapılan ülkelerle piyasa birleştirmesi yapmak suretiyle, enterkoneksiyon hatlarının Net Transfer Kapasitelerinden (NTK) esneklik sağlanacağı varsayılmıştır. Uluslararası enterkoneksiyon üretim açığı olan saatlerde ithalat, üretim fazlası olan saatlerde ise ihracat yapılması yoluyla şebekeye esneklik sağlar. NTK'den esneklik ihtiyacı kapasite optimizasyonundan hesaplanmaktadır.

Ayrıca talep yönetimi de bir şebeke esneklik çözümü olarak değerlendirilebilir. Ancak talep yönetimine modelde yer verilmemiştir. Arz açığı ve şebekede iletim kısıtı olmadığı sürece bu esneklik çözümleri birbirinin alternatifi olarak değerlendirilebilir. (Şekil 6.1.c)

Şekil 6.1.c. Yenilenebilir enerjiye dayalı üretimin payının artmasıyla şebeke esnekliğine olan ihtiyacın artması



6.2. BAZ SENARYOLARI

Elektrik sektörü için 2018'den başlayarak 2070'e kadar devam eden iki Baz Senaryo çalışılmıştır. Baz Senaryo'da (BS) sisteme 2030'dan itibaren nükleer enerjinin katıldığı, Nükleersiz Baz Senaryo'da (BS-NoN) sistemde hiçbir zaman nükleer enerji olmadığı varsayımı yapılmıştır.

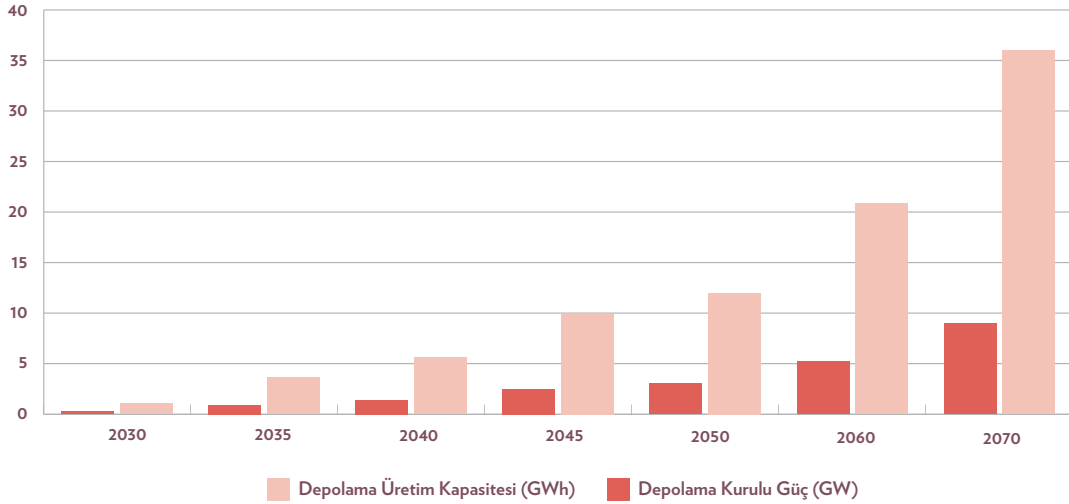
Her iki Baz Senaryo'da şebeke esnekliği için aynı varsayımlar kullanılmıştır. Buna göre:

- 1| Mevcut sistemde bulunmayan depolama sistemlerinin (pompajlı HES ve batarya depolama) 2023'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, 2070'te ise 9 GW'ye ulaşacağı öngörülmektedir. Depolamanın kurulu güç ve üretim kapasitesi olarak gelişimi Tablo ve Şekil 6.2'de gösterilmiştir.

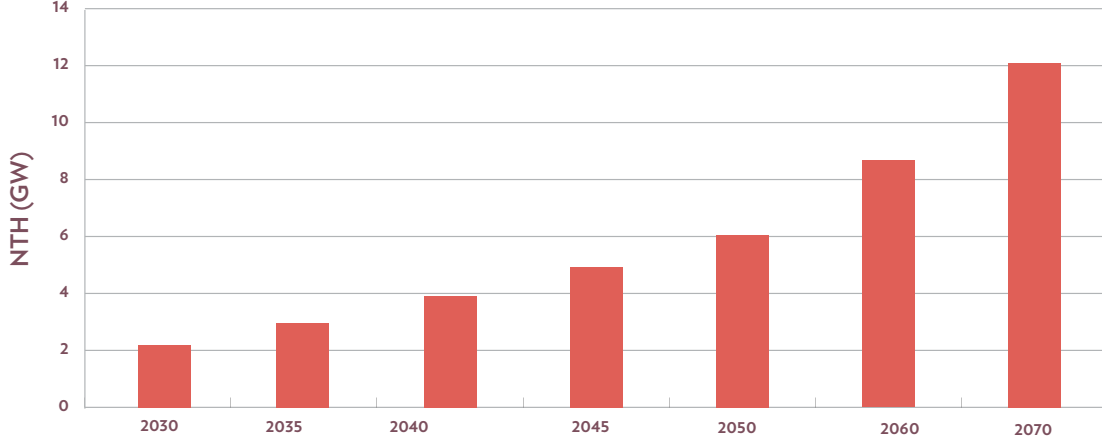
Tablo 6.2. Baz senaryoda depolamanın kurulu güç ve üretim kapasitesi olarak gelişimi

	Depolama Kurulu Güç (GW)	Depolama Üretim Kapasitesi (GWh)
2018	-	
2020	-	
2023	0,08	0,31
2026	0,16	0,63
2030	0,26	1,04
2035	0,91	3,65
2040	1,41	5,63
2045	2,48	9,91
2050	3,00	12,00
2060	5,22	20,87
2070	9,00	36,00

Şekil 6.2. Baz senaryoda depolamanın kurulu güç ve üretim kapasitesi olarak gelişimi



Şekil 6.3. Baz senaryoda uluslararası enterkoneksiyon hatlarının saatlik Net Transfer Hacmi'nin (NTH) gelişimi



Tablo 6.3. Baz senaryoda uluslararası enterkoneksiyon hatlarının saatlik Net Transfer Hacmi'nin (NTH) gelişimi

Yıl	Net Transfer Hacmi (GW)
2018	0,85
2020	0,96
2023	1,28
2026	1,63
2030	2,18
2035	2,97
2040	3,90
2045	4,94
2050	6,05
2060	8,67
2070	12,08

2 | Bir esneklik mekanizması olarak kullanılabilen uluslararası enterkoneksiyon hatlarının Net Transfer Kapasitesi'nin (NTK) 2018'de 1,9 GW iken 2030'da 8,4 GW'ye, 2050'de 26,2 GW'ye ve 2070'te 53,8' GW'ye yükselmesi öngörülmektedir. Buna göre 2018'de 0,9 GW olan maksimum saatlik Net Transfer Hacmi (NTH) 2030'da 2,2 GW'ye, 2050'de 6 GW'ye ve 2070'te 12 GW'ye yükselecektir. (Tablo ve Şekil 6.3)

6.2.1. Baz Senaryo (BS)

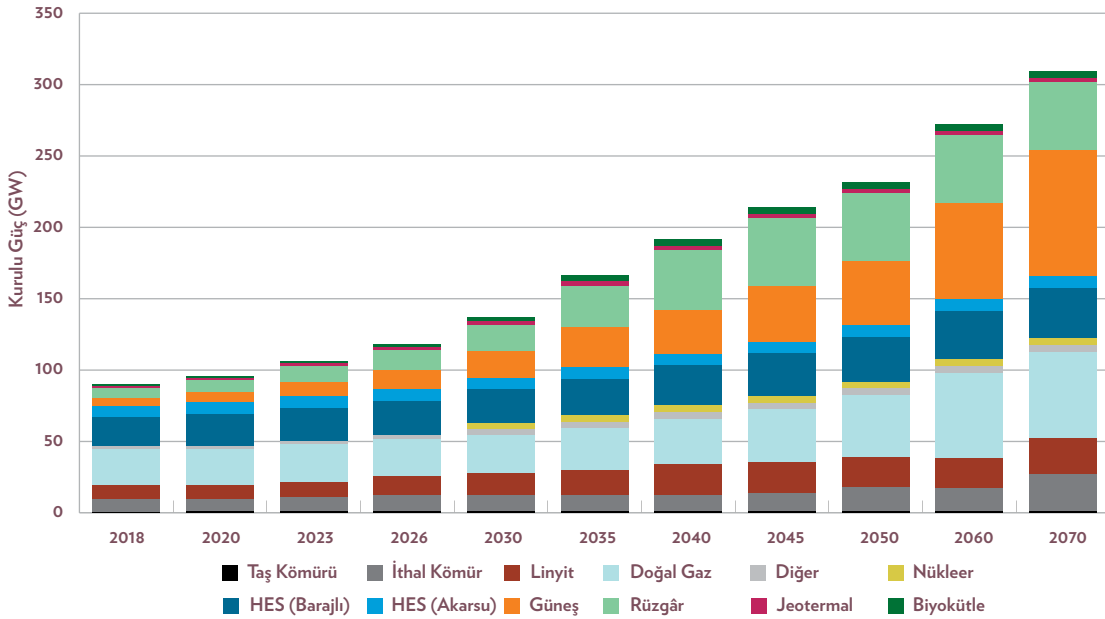
6.2.1.1. Kaynaklara Göre Enerji Üretimi

Baz Senaryo'da 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 ve Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Tablo ve Şekil 6.5'te aynı kaynakların üretim kapasitelerinin öngörülen yıllara göre değişimi verilmektedir.

Tablo 6.4. 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	Biyokütle	Toplam
2018	0,6	8,9	9,6	25,7	1,4		20,5	7,8	5,7	7,5	1,3	0,8	89,9
2020	0,7	8,9	9,5	25,6	1,6		23,0	8,2	6,9	8,6	1,5	1,1	95,6
2023	0,7	10,2	10,7	26,1	2,2		23,5	8,2	10,1	11,2	1,8	1,6	106,4
2026	0,8	11,7	12,8	26,6	2,8		23,5	8,2	13,6	14,1	2,0	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	3,0	137,3
2035	1,0	11,5	17,1	29,8	4,1	4,8	25,5	8,2	28,1	28,9	3,0	4,5	166,5
2040	1,0	11,5	21,3	32,2	4,7	4,8	27,5	8,2	30,4	42,2	3,0	5,0	191,9
2045	1,0	12,9	21,2	37,3	4,9	4,8	29,5	8,2	38,8	48,0	2,8	4,9	214,4
2050	1,0	16,7	21,2	43,2	5,0	4,8	31,5	8,2	44,6	48,0	2,8	4,8	231,8
2060	1,0	16,6	21,0	59,3	5,0	4,8	33,5	8,2	67,4	48,0	2,8	4,6	272,1
2070	1,0	26,3	25,0	60,0	5,0	4,8	35,5	8,2	88,1	48,0	2,7	4,4	308,9

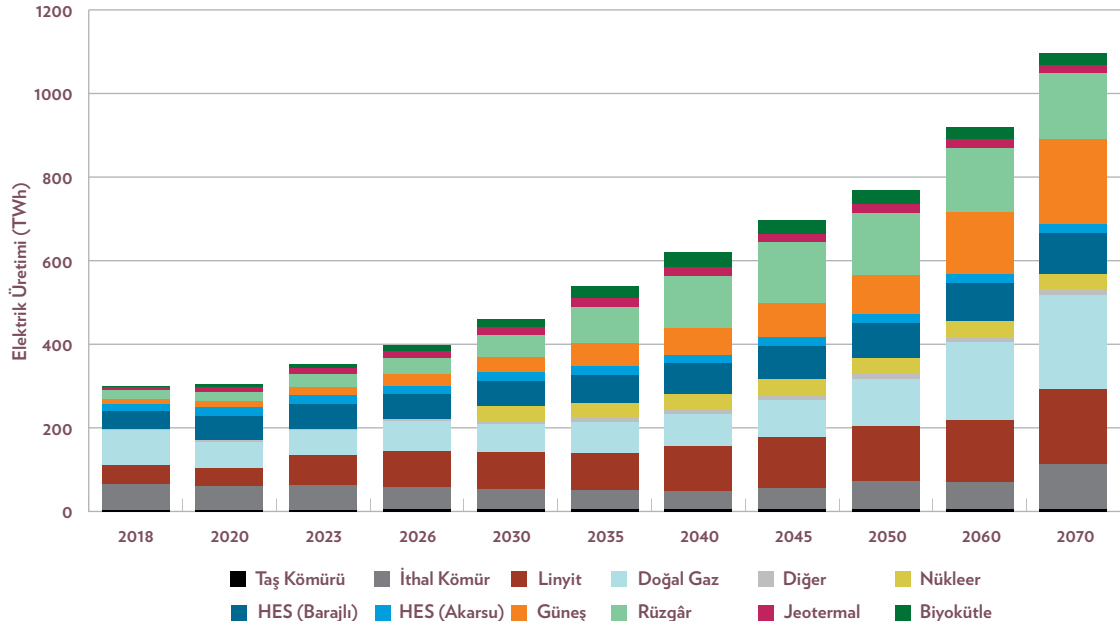
Şekil 6.4. Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)



Tablo 6.5. Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin gelişimi (GWh)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Nükleer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	2.848	62.962	44.782	83.373	2.790		42.475	18.800	10.731	20.796	7.432	3.011	300.000
2020	3.892	56.905	42.436	62.447	4.058		57.847	22.050	13.267	23.647	10.820	7.495	304.862
2023	4.326	57.806	72.504	58.724	4.748		59.711	19.913	19.562	31.578	12.961	11.295	353.129
2026	4.792	54.110	86.061	69.589	5.484		60.074	20.036	26.640	40.259	15.135	15.279	397.459
2030	5.342	48.390	86.294	67.136	6.452	37.843	60.419	20.164	37.615	52.128	18.078	20.697	460.557
2035	5.787	44.113	90.445	73.437	8.227	37.843	66.159	20.363	56.954	83.980	22.062	30.205	539.577
2040	5.912	42.414	107.554	77.015	10.412	37.843	72.242	20.597	62.824	125.921	22.256	34.467	619.456
2045	6.121	49.354	121.502	90.494	11.816	37.843	78.207	20.801	81.709	145.477	21.288	32.583	697.195
2050	6.201	66.010	132.007	111.024	12.732	37.843	84.288	21.005	95.536	148.222	21.522	32.691	769.080
2060	6.177	64.248	147.394	186.425	12.818	37.843	91.011	21.362	149.953	152.335	21.225	27.426	918.217
2070	6.404	107.624	178.436	223.768	13.182	37.843	98.216	21.751	202.996	157.658	20.821	27.161	1.095.858

Şekil 6.5. Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin gelişimi (TWh)



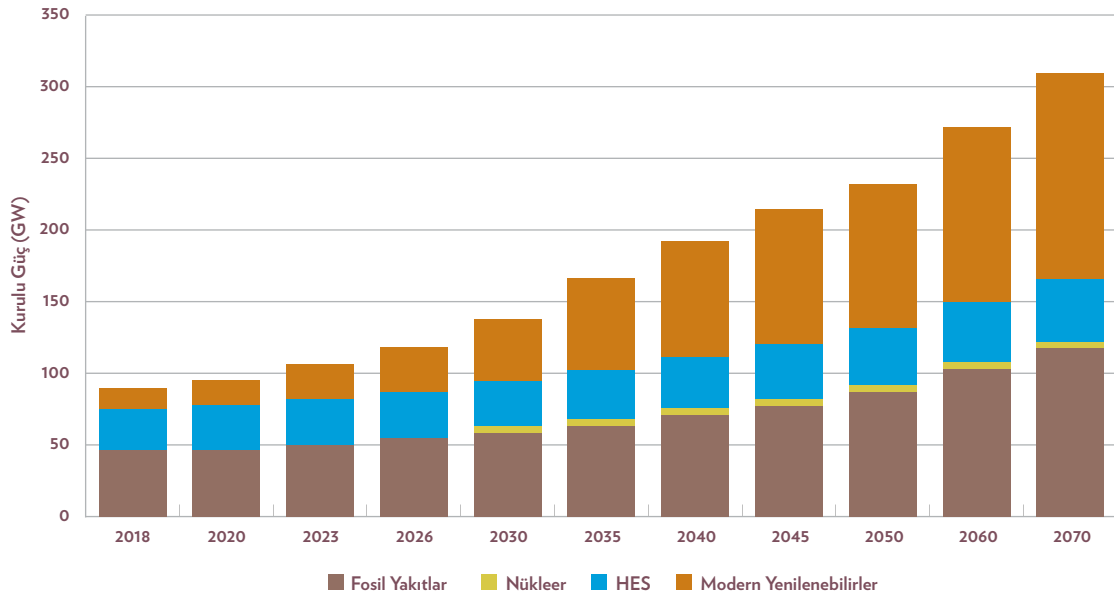
Baz Senaryo'da kurulu güç ve üretimin 2018-2070 arasında fosil yakıtlar, nükleer enerji, HES ve modern yenilenebilir kaynaklara göre toplulaş-

tırılmış dağılımı Tablo ve Şekil 6.6'da ve 6.7'de görülebilir.

Tablo 6.6. Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak kurulu gücün gelişimi (GW)

Yıl	Fosil Yakıtlar	Nükleer	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	46,3		28,3	15,3	89,9
2020	46,3		31,2	18,1	95,6
2023	50,0		31,7	24,7	106,4
2026	54,8		31,7	32,0	118,5
2030	58,2	4,8	31,7	42,6	137,3
2035	63,5	4,8	33,7	64,5	166,5
2040	70,7	4,8	35,7	80,7	191,9
2045	77,3	4,8	37,7	94,6	214,4
2050	87,1	4,8	39,7	100,2	231,8
2060	102,8	4,8	41,7	122,8	272,1
2070	117,3	4,8	43,7	143,1	308,9

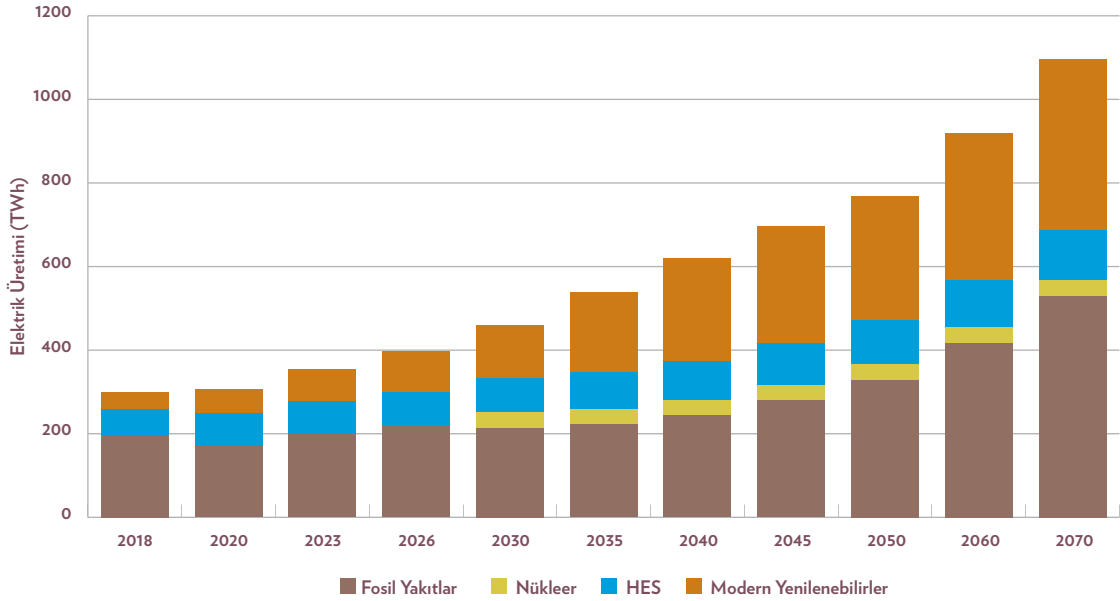
Şekil 6.6. Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak kurulu gücün gelişimi (GW)



Tablo 6.7. Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak üretimin gelişimi (GWh)

Yıl	Fosil Yakıtlar	Nükleer	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	196.755		61.275	41.970	300.000,0
2020	169.737		79.896	55.228	304.862,0
2023	198.109		79.624	75.396	353.128,9
2026	220.037		80.109	97.312	397.458,7
2030	213.613	37.843	80.583	128.517	460.557,0
2035	222.011	37.843	86.522	193.201	539.577,2
2040	243.307	37.843	92.839	245.467	619.456,3
2045	279.287	37.843	99.008	281.057	697.195,4
2050	327.974	37.843	105.292	297.971	769.079,9
2060	417.063	37.843	112.373	350.939	918.217,4
2070	529.413	37.843	119.967	408.635	1.095.857,9

Şekil 6.7. Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak üretimin gelişimi (TWh)



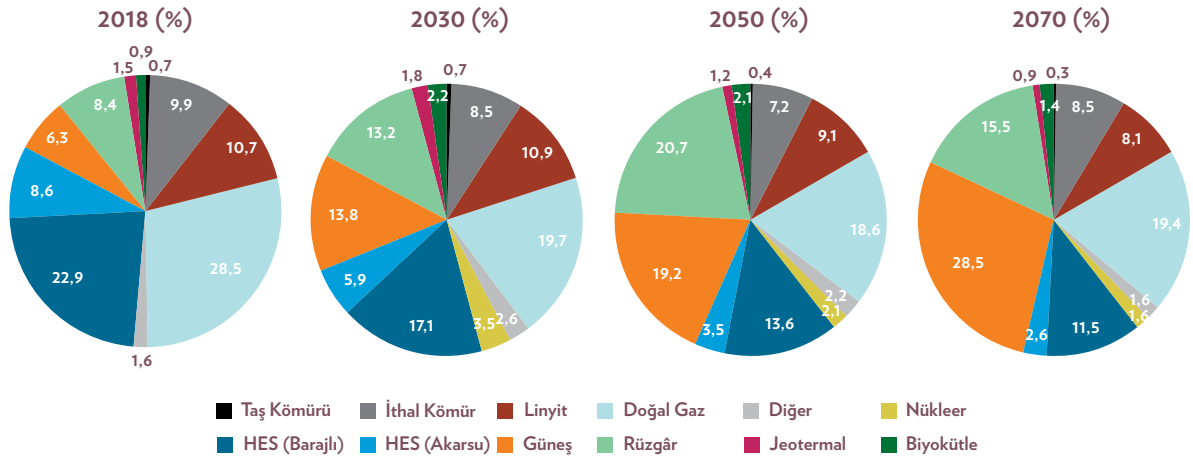
Baz Senaryo'da kurulu güç ve üretimin 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre ayrı ayrı ve

toplaştırılmış olarak oransal dağılımları Tablo ve Şekil 6.8, 6.9, 6.10 ve 6.11'de verilmiştir.

Tablo 6.8. Baz senaryoda kurulu gücün 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre ayrı ayrı oransal dağılımı (%)

	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Nükleer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	0,7	9,9	10,7	28,5	1,6	-	22,9	8,6	6,3	8,4	1,5	0,9	100,0
2030	0,7	8,5	10,9	19,7	2,6	3,5	17,1	5,9	13,8	13,2	1,8	2,2	100,0
2050	0,4	7,2	9,1	18,6	2,2	2,1	13,6	3,5	19,2	20,7	1,2	2,1	100,0
2070	0,3	8,5	8,1	19,4	1,6	1,6	11,5	2,6	28,5	15,5	0,9	1,4	100,0

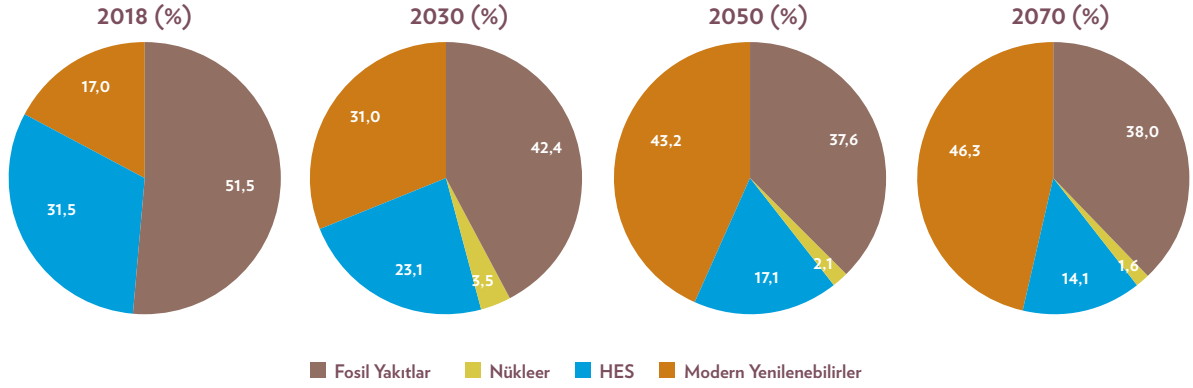
Şekil 6.8. Baz senaryoda kurulu gücün 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre ayrı ayrı oransal dağılımı (%)



Tablo 6.9. Baz senaryoda kurulu gücün 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak oransal dağılımı (%)

	Fosil Yakıtlar	Nükleer	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	51,5	-	31,5	17,0	100,0
2030	42,4	3,5	23,1	31,0	100,0
2050	37,6	2,1	17,1	43,2	100,0
2070	38,0	1,6	14,1	46,3	100,0

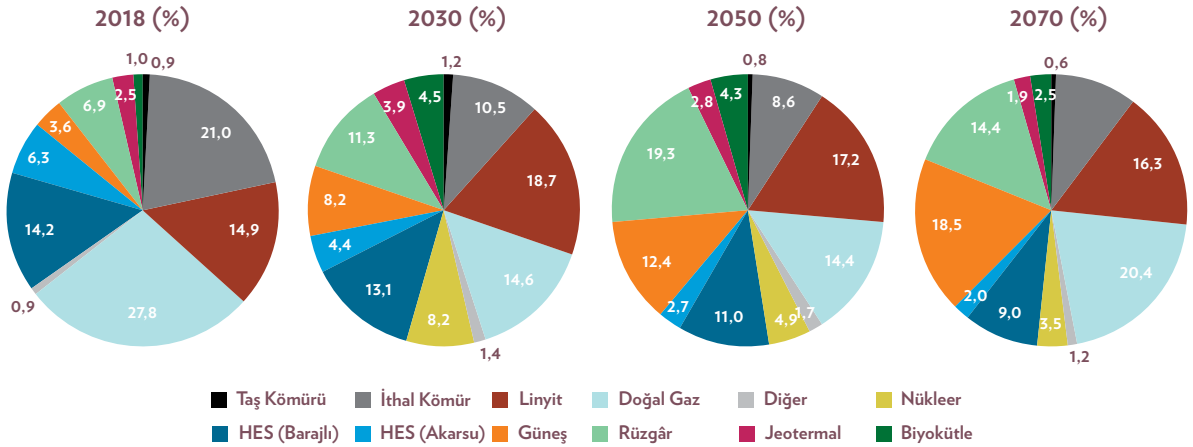
Şekil 6.9. Baz senaryoda kurulu gücün 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak oransal dağılımı (%)



Tablo 6.10. Baz senaryoda elektrik üretiminin 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre ayrı ayrı oransal dağılımı (%)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Nükleer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	0,9	21,0	14,9	27,8	0,9	-	14,2	6,3	3,6	6,9	2,5	1,0	100,0
2030	1,2	10,5	18,7	14,6	1,4	8,2	13,1	4,4	8,2	11,3	3,9	4,5	100,0
2050	0,8	8,6	17,2	14,4	1,7	4,9	11,0	2,7	12,4	19,3	2,8	4,3	100,0
2070	0,6	9,8	16,3	20,4	1,2	3,5	9,0	2,0	18,5	14,4	1,9	2,5	100,0

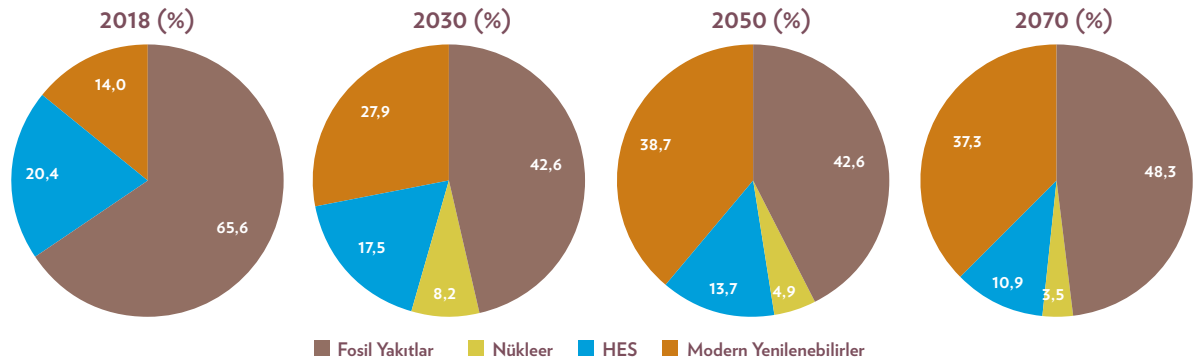
Şekil 6.10. Baz senaryoda elektrik üretiminin 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre ayrı ayrı oransal dağılımı (%)



Tablo 6.11. Baz senaryoda elektrik üretiminin 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak oransal dağılımı (%)

	Fosil Yakıtlar	Nükleer	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	65,6	-	20,4	14,0	100,0
2030	46,4	8,2	17,5	27,9	100,0
2050	42,6	4,9	13,7	38,7	100,0
2070	48,3	3,5	10,9	37,3	100,0

Şekil 6.11. Baz senaryoda elektrik üretiminin 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak oransal dağılımı (%)



Baz Senaryo'ya göre elektrik sektöründe 2018'de yaklaşık 90 GW olan kurulu güç 2030'da 137 GW'ye, 2050'de 2,5 kat artarak yaklaşık 232 GW'ye ve 2070'te 3,5 kattan fazla artarak 309 GW'ye yükselmektedir. 2018'de 300 TWh olan elektrik üretimi ise 2030'da 460,5 TWh'ye, 2050'de 2,5 kat artarak 770 TWh'ye, 2070'te ise 3,5 kattan fazla artarak yaklaşık 1.100 TWh'ye yükselmektedir.

Baz Senaryo'da yıllar içinde fosil yakıtların kurulu güç içindeki payı azalmakla birlikte 2050'ye kadar üçte bir seviyesinin üzerinde kalmaktadır. Fosil yakıtların 2018'de üçte iki düzeyinde olan üretimdeki payı ise 2050'de %42'ye gerilemekte, ancak 2050'den sonra tekrar artarak 2070'te %50'ye yaklaşmaktadır. Fosil yakıt santralleri arasındaki kömürlü termik santrallerin kurulu güçteki payı ise 2050'de hâlâ %16,7, elektrik üretimindeki payı ise %26,6'dır.

HES'lerin hem kurulu güç hem de üretimdeki payı yıllar içinde azalırken, modern yenilenebilir

kaynaklar artmakta ve kurulu güç içindeki payları 2018'de %17 iken 2030'da %31'e, 2050'de %43'e ve 2070'te %46'ya çıkmaktadır. Ancak modern yenilenebilir kaynakların üretim içindeki payı kurulu güce göre daha sınırlı kalmakta, 2018'de %14 olan payları 2030'da %28'e, 2050'de yaklaşık %39'a çıkmakta, ancak 2050'den sonra fosil yakıtların üretimdeki payında görülen artışa paralel bir şekilde azalarak 2070'te %37'ye inmektedir.

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. Nükleer enerjinin üretimdeki payı ise 2030'da %8,2 ile başlamakta, ancak 2050'de %5'e, 2070'te ise %3,5'a inmektedir. Baz Senaryo'da Akkuyu'da inşaat halinde bulunan 4,8 GW kurulu güce sahip nükleer enerji santralının 2030'lara doğru devreye gireceği ve 2070'e kadar sistemde kalacağı, ancak başka bir nükleer santral yapılmayacağı varsayılmıştır.

6.2.1.2. Karbondioksit emisyonları

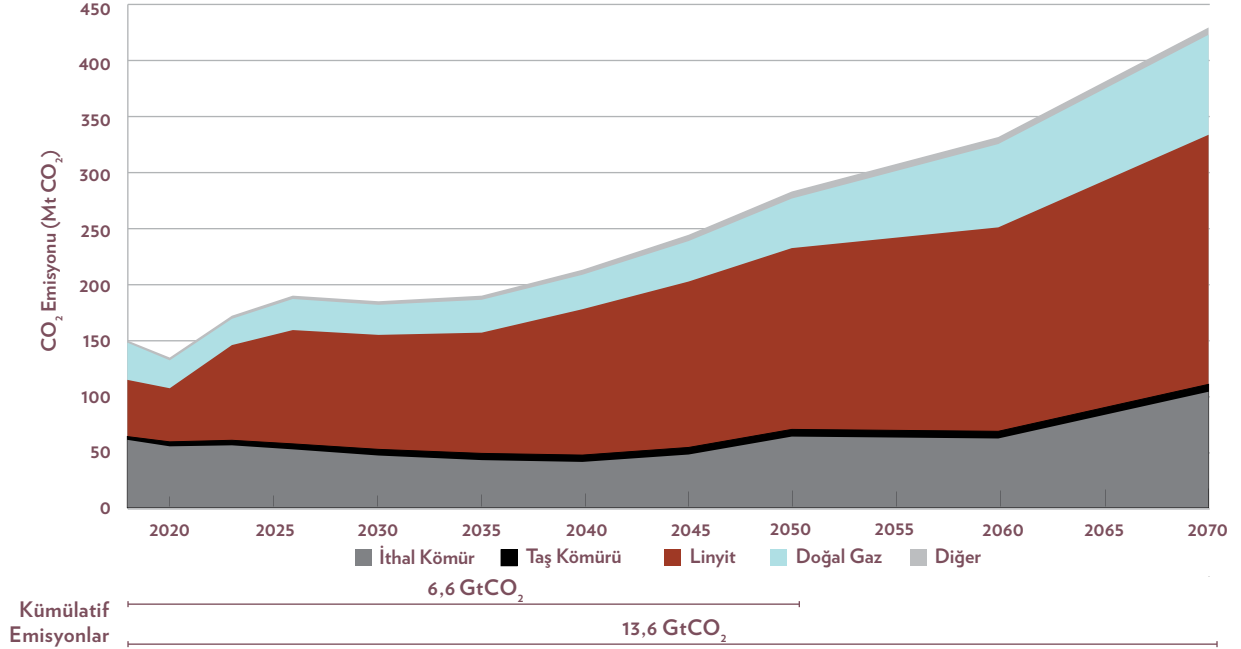
Baz Senaryo'da fosil yakıtlardan elektrik üretimine bağlı CO₂ emisyonları Tablo ve Şekil 6.12'de

verilmiştir. Toplam emisyonlar makroekonomik modelde görülen Baz Senaryo ile aynı değerlerdedir.

Tablo 6.12. Baz senaryoda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO₂ emisyonları (MtCO₂)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Toplam
2018	2,9	60,4	50,6	33,2	1,9	149,0
2020	4,0	54,6	47,8	24,9	2,5	133,9
2023	4,5	55,5	84,9	23,4	2,8	171,0
2026	4,9	51,9	101,5	27,7	3,0	189,1
2030	5,5	46,4	102,1	26,8	3,2	184,0
2035	6,0	42,3	107,7	29,3	3,7	189,0
2040	6,1	40,7	130,1	30,7	4,5	212,0
2045	6,3	47,3	148,0	36,1	5,6	243,2
2050	6,4	63,3	161,7	44,2	6,3	281,9
2060	6,4	61,6	181,9	74,3	6,3	330,5
2070	6,6	103,3	222,6	89,2	6,5	428,1

Şekil 6.12. Baz senaryoda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO₂ emisyonları (MtCO₂)



Baz Senaryo'da elektrik sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları 2020'den artmaya başlamakta ve 2018'de 149 MtCO₂ olan emisyonlar 2030'da 184 MtCO₂'ye, 2050'de %90'a yakın artarak 282 MtCO₂'ye ve 2070'te 1,9 kata yakın artarak 428 MtCO₂'ye çıkmaktadır.

Elektrik sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarının oluşumunda linyitin payının arttığı, ithal kömürün payının ise azaldığı görülmektedir. 2018'de elektrik sektörü emisyonlarının %34'ü linyitten, %40'ı ithal kömürden kaynaklanırken, bu oranlar 2030'da %55 ve %25, 2050'de %57,5 ve %22,5, 2070'te ise %52 ve %24 olmaktadır. Doğal gazın emisyonlardaki payı da önce azalarak 2018'de %22'den 2030'da %14,5'e düşmekte, ancak daha sonra tekrar artarak 2050'de %15,5'e, 2070'te ise yaklaşık %21'e çıkmaktadır.

Baz Senaryo'da elektrik sektörünün kümülatif emisyonları 2018-2050 arasında toplam kümülatif emisyonların %38'ini teşkil ederek 6,8 GtCO₂'ye ve 2018-2070 arasında toplam kümülatif emisyon-

ların %41'ini teşkil ederek 13,8 GtCO₂'ye ulaşmaktadır. Böylece elektrik sektörü bu çalışmada adil paylaşım ilkesi gereği Türkiye'ye ayrılan karbon bütçesinin (7,95 GtCO₂) %85'ini 2050'ye kadar tek başına tüketmekte, 2070'e kadar ise toplam bütçenin 1,75 katını salmaktadır.

6.2.2. Nükleersiz Baz Senaryo (BS-NoN)

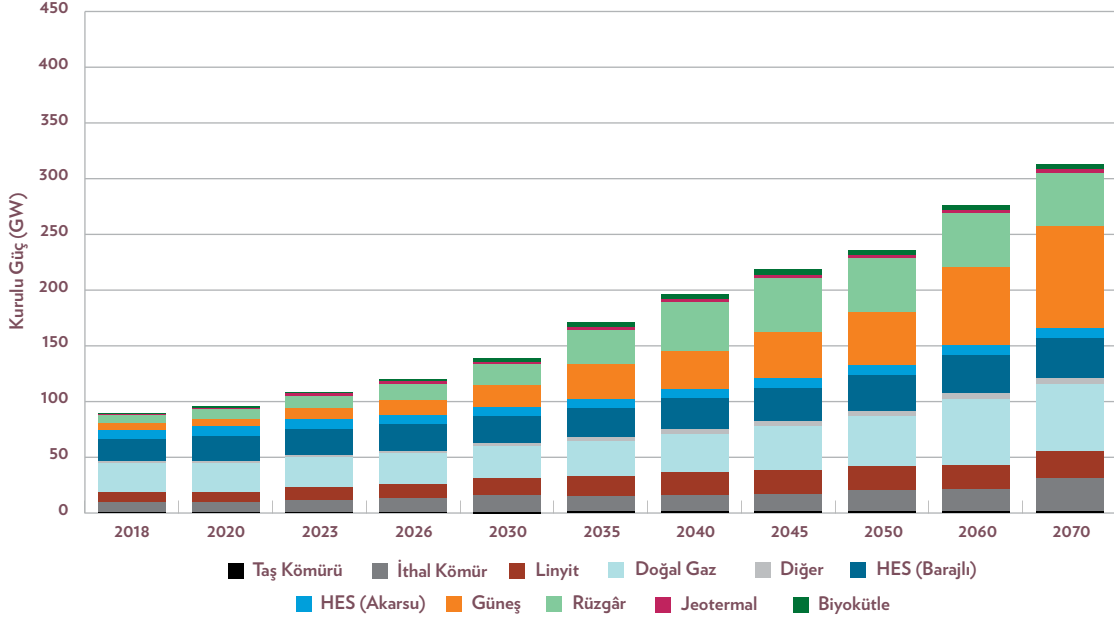
6.2.2.1. Kaynaklara Göre Enerji Üretimi

Modelleme açısından Baz Senaryo'dan tek farkı elektrik üretiminde nükleer enerjinin devreye girmediği varsayımı olan Nükleersiz Baz Senaryo'da elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün yıllara göre değişimi fosil yakıtlar (taş kömürü, ithal kömür, linyit, doğal gaz ve diğer kaynaklar), hidroelektrik (barajlı ve akarsu tipi) ve modern yenilenebilir kaynaklar (güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle) için Tablo ve Şekil 6.13'te gösterilmiştir. Tablo ve Şekil 6.14'te aynı kaynakların üretim kapasitelerinin yıllara göre değişimi verilmektedir.

Tablo 6.13. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	0,6	8,9	9,6	25,7	1,4	20,5	7,8	5,7	7,5	1,3	0,8	89,9
2020	0,7	8,9	9,5	25,6	1,6	23,0	8,2	6,9	8,6	1,5	1,1	95,6
2023	0,7	10,8	11,6	26,9	1,9	23,5	8,2	10,2	11,3	1,8	1,6	108,4
2026	0,8	12,3	13,1	27,3	2,5	23,5	8,2	13,8	14,2	2,0	2,2	119,9
2030	0,9	14,6	16,0	27,9	3,3	24,0	8,7	19,3	18,5	2,5	3,1	138,7
2035	1,0	14,3	17,8	30,8	3,9	26,0	8,7	31,3	29,7	3,0	4,6	171,1
2040	1,0	14,4	21,5	33,3	4,5	28,0	8,7	33,3	44,0	3,0	5,0	196,8
2045	1,0	16,0	21,5	38,8	4,7	30,0	8,7	42,0	48,0	2,9	4,9	218,4
2050	1,0	19,4	21,4	45,1	4,8	32,0	8,7	47,8	48,0	2,8	4,8	235,9
2060	1,0	20,5	21,2	60,0	4,8	34,0	8,7	70,4	48,0	2,8	4,6	275,8
2070	1,0	30,0	25,0	60,0	4,8	36,0	8,7	91,7	48,0	2,9	5,0	313,1

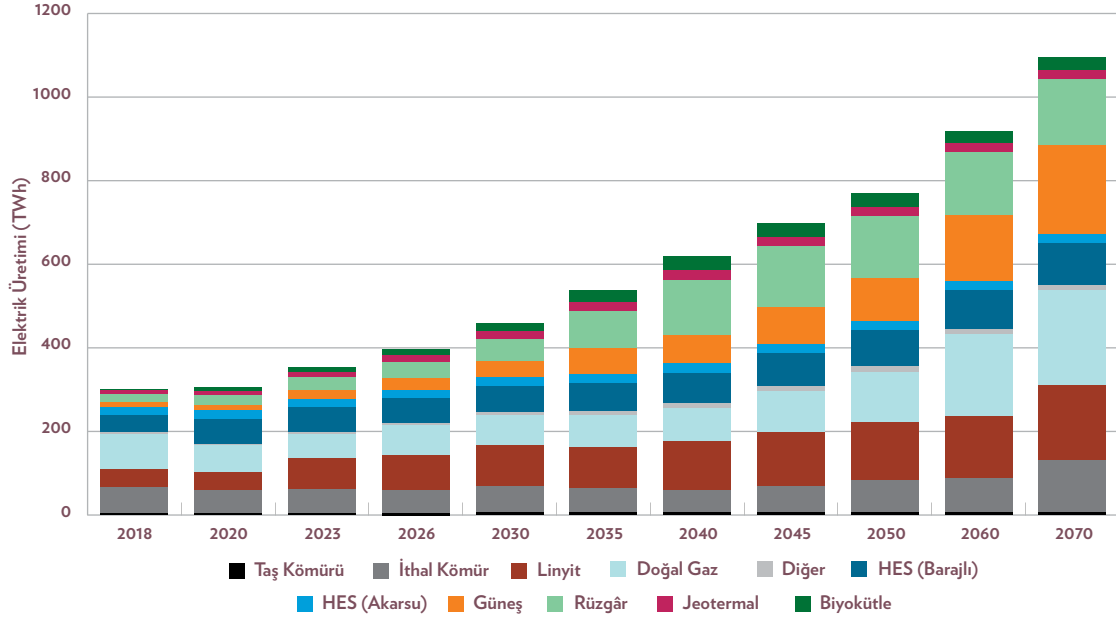
Şekil 6.13. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)



Tablo 6.14. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin gelişimi (GWh)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	2.848	62.962	44.782	83.373	2.790	42.475	18.800	10.731	20.796	7.432	3.011	300.000
2020	3.892	56.905	42.436	62.447	4.058	57.847	22.050	13.267	23.647	10.820	7.495	304.862
2023	4.319	56.273	76.145	56.469	4.763	59.695	19.904	19.666	31.649	12.948	11.298	353.129
2026	4.805	53.312	85.545	70.167	5.497	60.065	20.031	26.906	40.578	15.178	15.375	397.459
2030	5.472	62.625	99.004	72.123	6.603	61.722	21.601	38.259	53.288	18.448	21.410	460.557
2035	5.832	57.493	98.797	76.849	8.402	67.380	21.791	63.317	86.539	22.112	31.064	539.577
2040	5.914	54.629	116.053	79.870	10.524	73.470	22.041	68.835	131.146	22.444	34.530	619.456
2045	6.128	62.868	128.061	98.219	11.997	79.437	22.255	88.348	145.559	21.487	32.836	697.195
2050	6.208	78.503	137.064	121.248	12.732	85.528	22.474	102.499	148.275	21.714	32.834	769.079
2060	6.269	81.759	148.920	195.470	12.896	92.268	22.857	156.525	152.314	21.377	27.561	918.217
2070	6.404	125.461	178.212	227.242	13.165	99.468	23.253	211.307	157.526	22.839	30.979	1.095.857

Şekil 6.14. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin gelişimi (TWh)



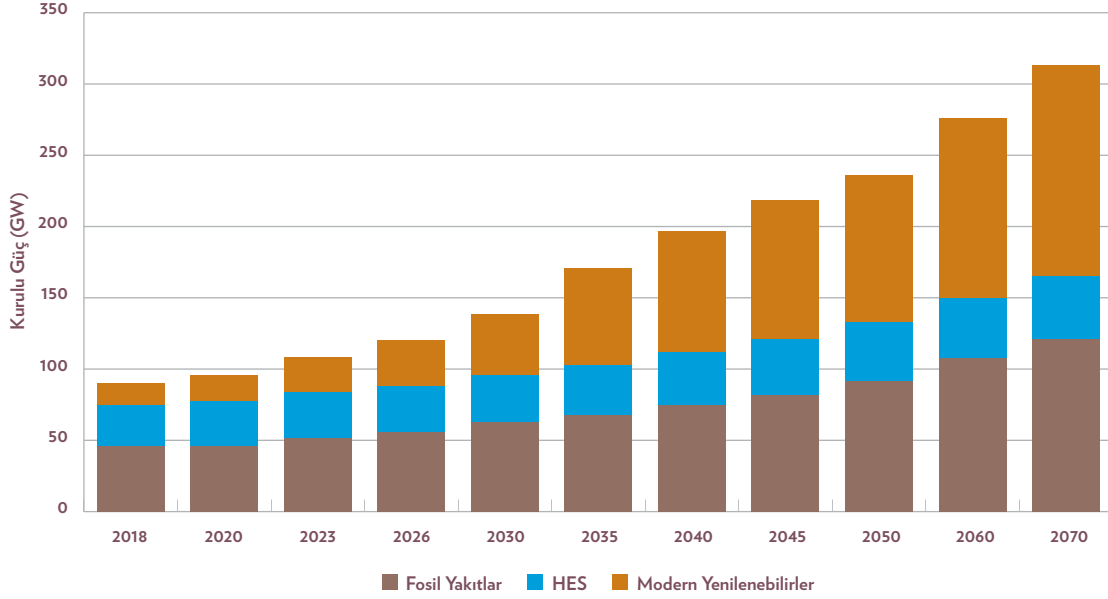
Nükleersiz Baz Senaryo'da kurulu güç ve üretimin 2018-2070 arasında fosil yakıtlar, nükleer enerji, HES ve modern yenilenebilir kaynaklara göre

toplulaştırılmış dağılımı Tablo ve Şekil 6.15 ve 6.16'da görülebilir.

Tablo 6.15. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak kurulu gücün gelişimi (GW)

Yıl	Fosil Yakıtlar	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	46,3	28,3	15,3	89,9
2020	46,3	31,2	18,1	95,6
2023	51,8	31,7	24,8	108,4
2026	56,0	31,7	32,3	119,9
2030	62,7	32,7	43,3	138,7
2035	67,8	34,7	68,6	171,1
2040	74,8	36,7	85,3	196,8
2045	81,9	38,7	97,8	218,4
2050	91,7	40,7	103,5	235,9
2060	107,4	42,7	125,7	275,8
2070	120,8	44,7	147,6	313,1

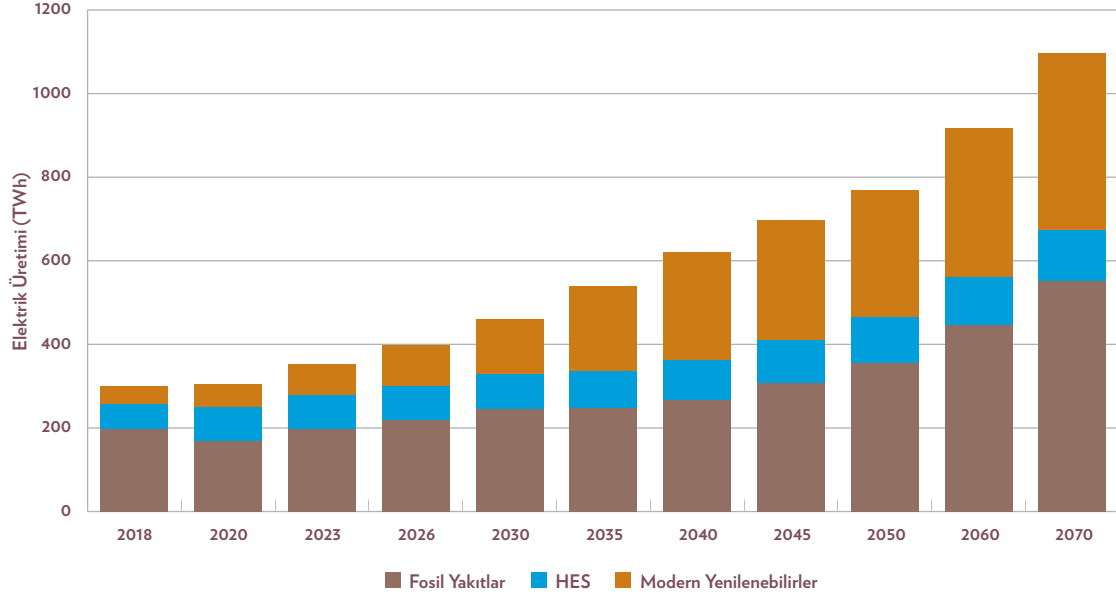
Şekil 6.15. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak kurulu gücün gelişimi (GW)



Tablo 6.16. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak üretimin gelişimi (GWh)

Yıl	Fosil Yakıtlar	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	196.755	61.275	41.970	300.000
2020	169.737	79.896	55.228	304.862
2023	197.969	79.598	75.562	353.129
2026	219.326	80.096	98.037	397.459
2030	245.828	83.323	131.406	460.557
2035	247.373	89.171	203.032	539.577
2040	266.991	95.511	256.954	619.456
2045	307.273	101.692	288.230	697.195
2050	355.755	108.003	305.322	769.079
2060	445.314	115.125	357.777	918.217
2070	550.485	122.721	422.651	1.095.857

Şekil 6.16. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik sektöründe kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak üretimin gelişimi (TWh)



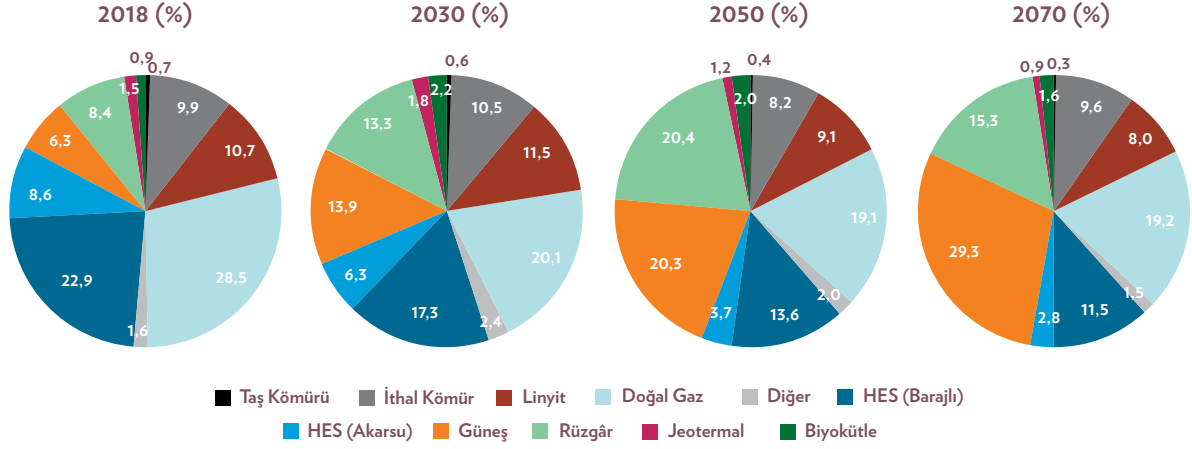
Nükleersiz Baz Senaryo'da kurulu güç ve üretimin 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre ayrı

ayrı ve toplulaştırılmış olarak oransal dağılımları Tablo ve Şekil 6.17, 6.18, 6.19 ve 6.20'de verilmiştir.

Tablo 6.17. Nükleersiz Baz senaryoda kurulu gücün 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre ayrı ayrı oransal dağılımı (%)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	0,7	9,9	10,7	28,5	1,6	22,9	8,6	6,3	8,4	1,5	0,9	100,0
2030	0,6	10,5	11,5	20,1	2,4	17,3	6,3	13,9	13,3	1,8	2,2	100,0
2050	0,4	8,2	9,1	19,1	2,0	13,6	3,7	20,3	20,4	1,2	2,0	100,0
2070	0,3	9,6	8,0	19,2	1,5	11,5	2,8	29,3	15,3	0,9	1,6	100,0

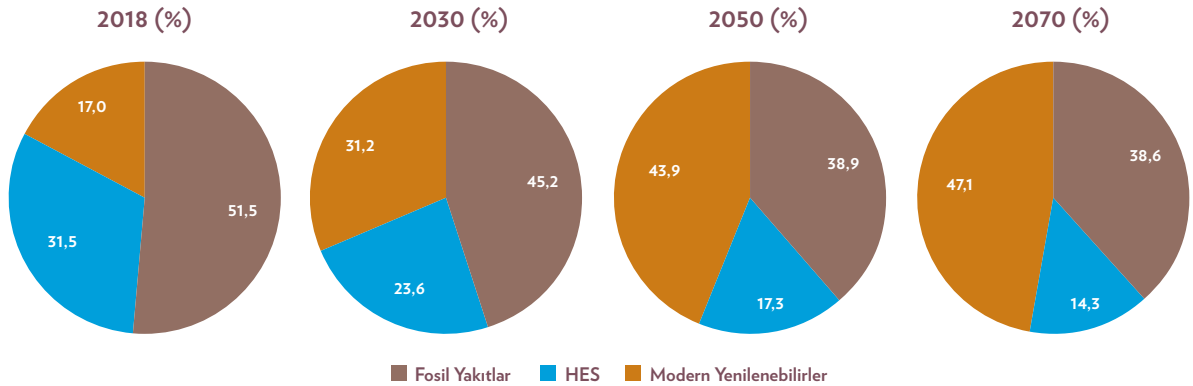
Şekil 6.17. Nükleersiz Baz senaryoda kurulu gücün 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre ayrı ayrı oransal dağılımı (%)



Tablo 6.18. Nükleersiz Baz senaryoda kurulu gücün 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak oransal dağılımı (%)

Yıl	Fosil Yakıtlar	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	51,5	31,5	17,0	100,0
2030	45,2	23,6	31,2	100,0
2050	38,9	17,3	43,9	100,0
2070	38,6	14,3	47,1	100,0

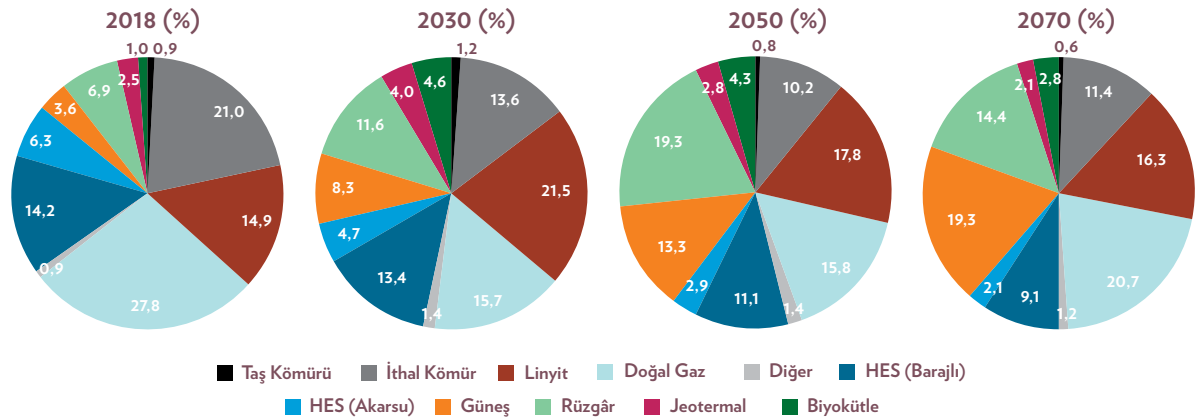
Şekil 6.18. Nükleersiz Baz senaryoda kurulu gücün 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak oransal dağılımı (%)



Tablo 6.19. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik üretiminin 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre ayrı ayrı oransal dağılımı (%)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	0,9	21,0	14,9	27,8	0,9	14,2	6,3	3,6	6,9	2,5	1,0	100,0
2030	1,2	13,6	21,5	15,7	1,4	13,4	4,7	8,3	11,6	4,0	4,6	100,0
2050	0,8	10,2	17,8	15,8	1,7	11,1	2,9	13,3	19,3	2,8	4,3	100,0
2070	0,6	11,4	16,3	20,7	1,2	9,1	2,1	19,3	14,4	2,1	2,8	100,0

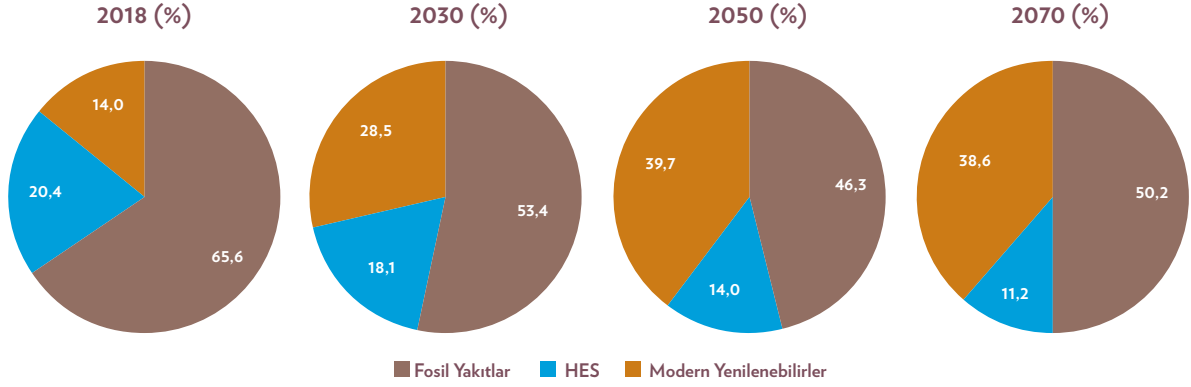
Şekil 6.19. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik üretiminin 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre ayrı ayrı oransal dağılımı (%)



Tablo 6.20. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik üretiminin 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak oransal dağılımı (%)

Yıl	Fosil Yakıtlar	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	65,6	20,4	14,0	100,0
2030	53,4	18,1	28,5	100,0
2050	46,3	14,0	39,7	100,0
2070	50,2	11,2	38,6	100,0

Şekil 6.20. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik üretiminin 2018, 2030, 2050 ve 2070'te kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak oransal dağılımı (%)



Nükleersiz Baz Senaryoda elektrik sektöründe kurulu güç Baz Senaryo'ya göre 2-4 GW daha yüksek seyretmekte, 2018'de 90 GW olan kurulu güç 2030'da 139 GW, 2050'de 236 GW ve 1070'te 313 GW olmaktadır. Fosil yakıtların kurulu güçteki payı 2050'de %1,3 ve 2070'te %0,6 artmaktadır. Elektrik üretimi ise değişmemekte, ancak

üretimde fosil yakıtların payı 2050'de %3,7 ve 2070'te %1,9 artmaktadır.

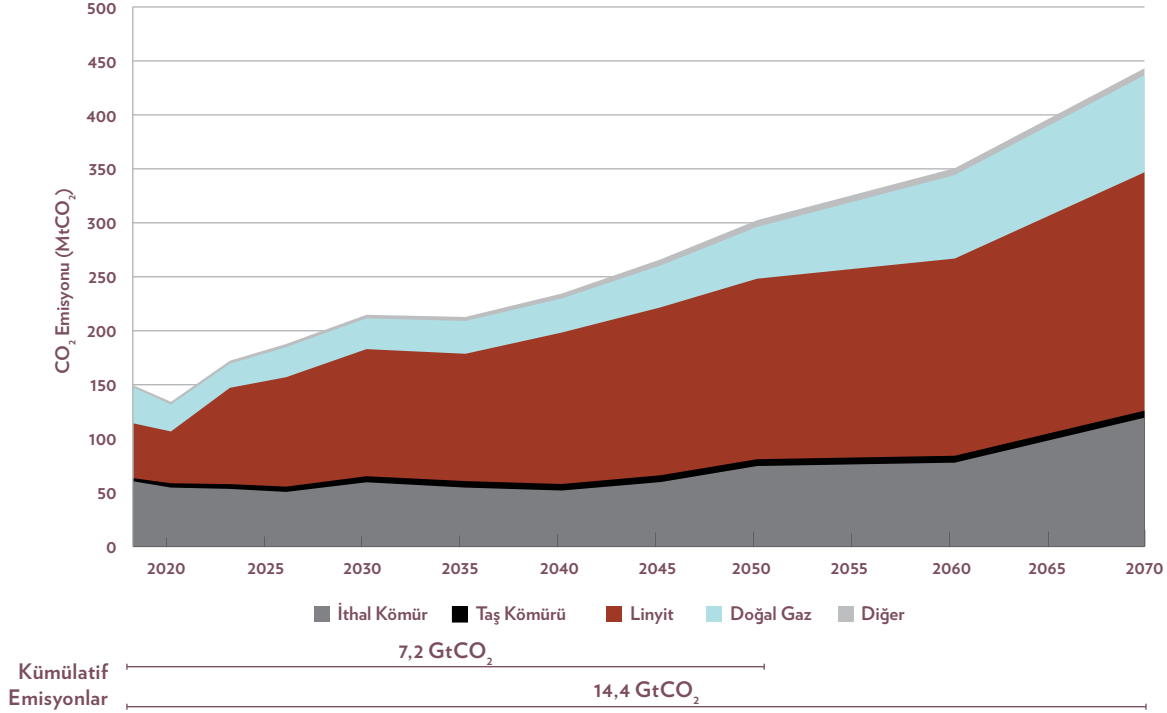
6.2.2.2. Karbondioksit emisyonları

Nükleersiz Baz Senaryo'da fosil yakıtlardan elektrik üretimine bağlı CO₂ emisyonları Tablo ve Şekil 21'de verilmiştir.

Tablo 6.21. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO₂ emisyonları (MtCO₂)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Toplam
2018	2,9	60,4	50,6	33,2	1,9	149,0
2020	4,0	54,6	47,8	24,9	2,5	133,9
2023	4,4	53,4	88,9	22,3	2,7	171,7
2026	4,9	50,6	101,0	27,7	3,0	187,2
2030	5,6	59,5	117,3	28,4	3,3	214,1
2035	6,0	54,6	117,5	30,3	3,7	212,0
2040	6,0	51,9	139,8	31,5	4,5	233,7
2045	6,3	59,7	155,0	38,7	5,6	265,3
2050	6,3	74,5	166,6	47,8	6,2	301,5
2060	6,4	77,6	182,0	77,1	6,3	349,3
2070	6,5	119,1	220,0	89,6	6,4	441,7

Şekil 6.21. Nükleersiz Baz senaryoda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO₂ emisyonları (MtCO₂)



Nükleersiz Baz Senaryo'da elektrik sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları Baz Senaryo'ya göre 2030'da 30 MtCO₂ daha yüksek gerçekleşmekte, ancak daha sonra nükleer enerjinin üretimdeki payının gerilemesine bağlı olarak fark 2050'de 19 MtCO₂'ye ve 2070'te 13 MtCO₂'ye düşmektedir. Elektrik sektörünün kümülatif emisyonu ise Nükleersiz Baz Senaryo'da Baz Senaryo'ya göre 2018-2050 arasında 0,4 GtCO₂ ve 2018-2070 arasında 0,6 GtCO₂ daha yüksektir.

6.3. NET SIFIR SENARYOLARI

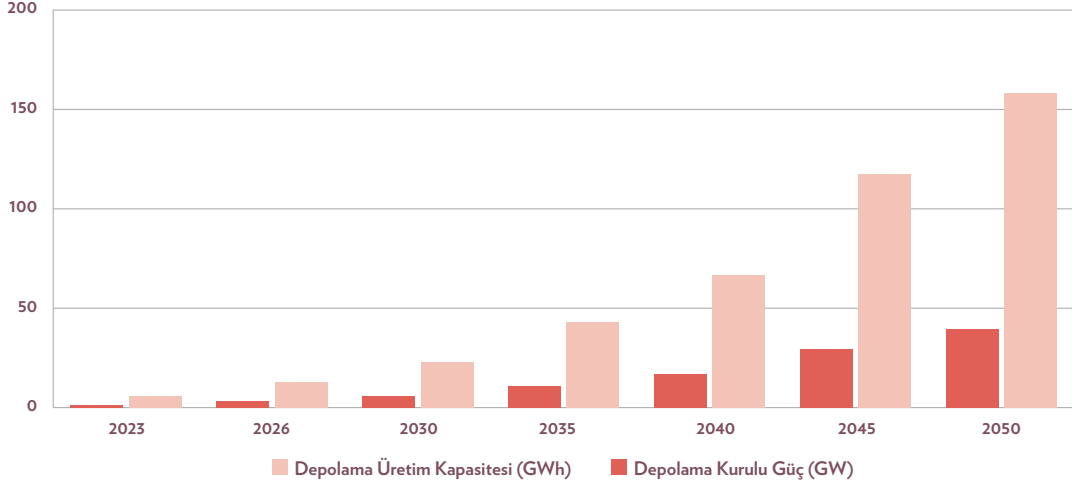
Elektrik sektörü için 2018'den başlayarak 2050'ye kadar devam eden iki Net Sıfır Senaryosu çalışılmıştır. Net Sıfır Senaryosu'nda (NSS) sisteme 2030'dan itibaren nükleer enerjinin katıldığı, Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu'nda (NSS-NoN)

ise sistemde hiçbir zaman nükleer enerji olmadığı varsayımı yapılmıştır.

Net Sıfır Senaryoları'nda şebeke esnekliği için Baz Senaryo'ya kıyasla oldukça yüksek varsayımlar kullanılmıştır. Buna göre:

- 1| Mevcut sistemde bulunmayan depolama sistemlerinin (pompajlı HES ve batarya depolama) 2023'ten itibaren devreye girmeye başlayacağı, 2030'a kadar 5,67 GW'ye çıkacağı (Baz Senaryo'da 0,26 GW), 2050'de ise Baz Senaryo'daki varsayımın (3 GW) 13 katına denk gelecek şekilde 39 GW'ye yükseleceği varsayılmaktadır. Depolamanın kurulu güç ve üretim kapasitesi olarak gelişimi Tablo ve Şekil 6.22'de gösterilmiştir.

Şekil 6.22. Net Sıfır Senaryosunda depolamanın kurulu güç ve üretim kapasitesi olarak gelişimi



Tablo 6.22. Net Sıfır Senaryosunda depolamanın kurulu güç ve üretim kapasitesi olarak gelişimi

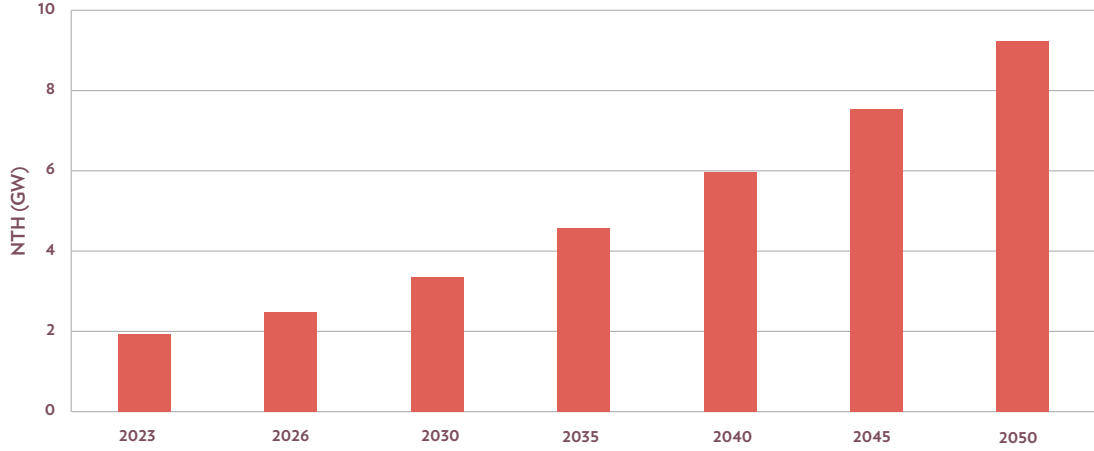
Yıl	Depolama Kurulu Güç (GW)	Depolama Üretim Kapasitesi (GWh)
2018	-	-
2020	-	-
2023	1,40	5,62
2026	3,23	12,92
2030	5,67	22,66
2035	10,71	42,83
2040	16,61	66,43
2045	29,39	117,56
2050	39,57	158,26

2 | Bir esneklik mekanizması olarak kullanılabilir olacak uluslararası enterkoneksiyon hatlarında 2018'de 0,9 GW olan maksimum saatlik Net Transfer Hacmi (NTH) 2030'da 3,35 GW'ye, 2050'de 9,22 GW'ye yükselecektir. (Tablo ve Şekil 6.23) Net Sıfır Senaryosu'nda öngörülen Net Transfer Kapasitesi Baz Senaryo'da öngörülenin 1,5 katından biraz fazladır.

Tablo 6.23. Net Sıfır Senaryosunda uluslararası enterkoneksiyon hatlarının saatlik Net Transfer Hacmi'nin (NTH) gelişimi

Yıl	Net Transfer Hacmi (NTH)
2018	0,85
2020	0,96
2023	1,93
2026	2,48
2030	3,35
2035	4,56
2040	5,97
2045	7,54
2050	9,22

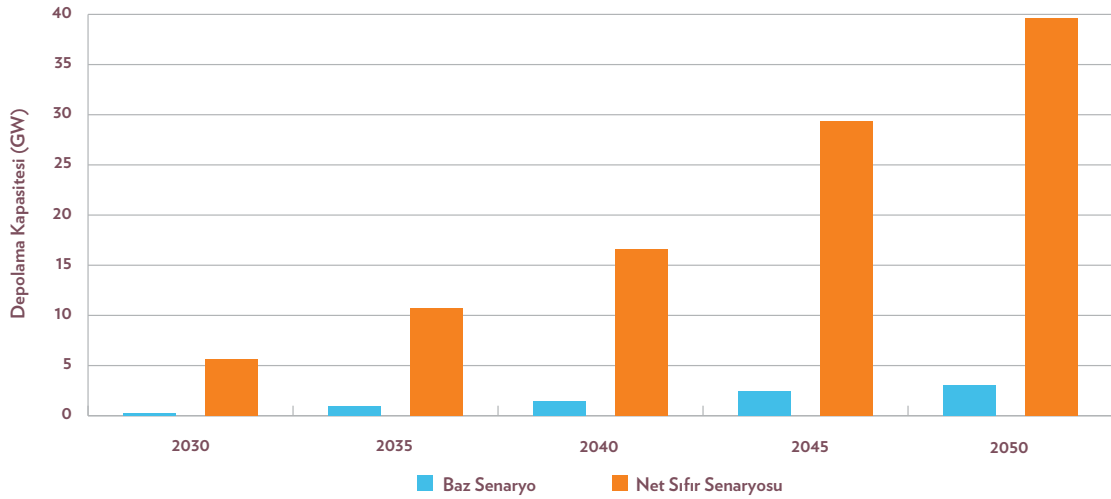
Şekil 6.23. Net Sıfır Senaryosunda uluslararası enterkoneksiyon hatlarının saatlik Net Transfer Hacmi'nin (NTH) gelişimi (GW)



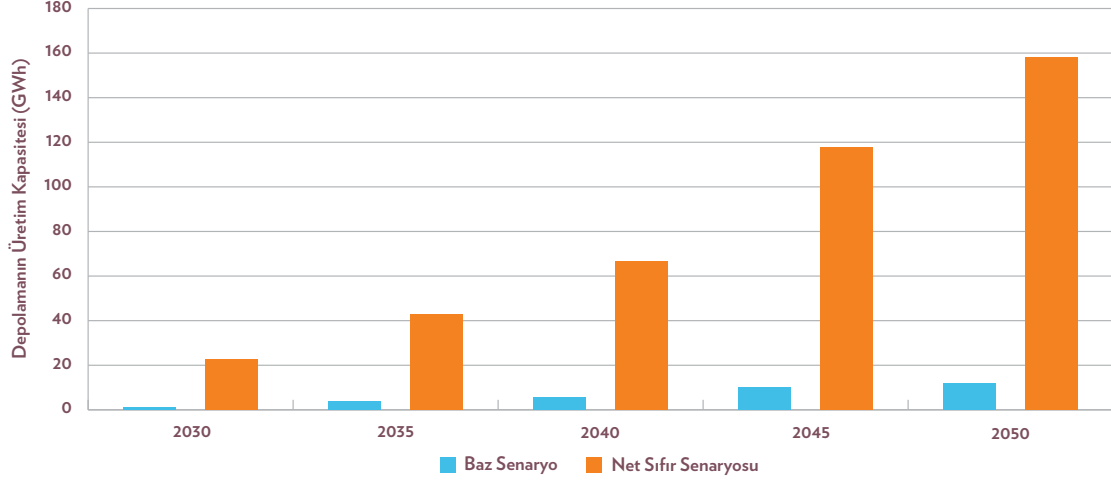
Depolama kapasitesi ve enterkoneksiyon hatları için Net Sıfır Senaryosu'nda yapılan varsayımlar

Şekil 6.24, 6.25 ve 6.26'da Baz Senaryo ile karşılaştırılmıştır.

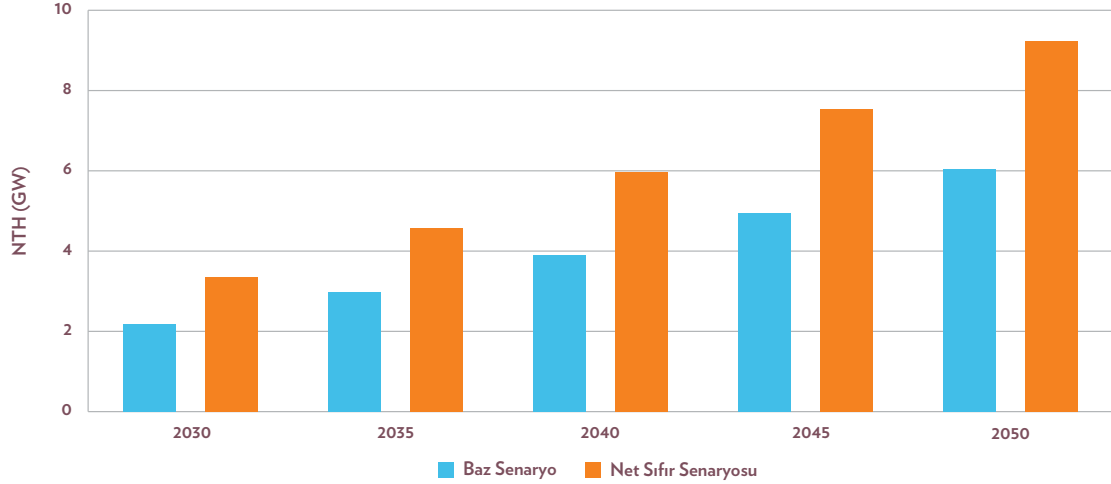
Şekil 6.24. Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda depolama kapasitesinin kurulu gücünün karşılaştırılması (GW)



Şekil 6.25. Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryoda Depolama Sisteminin üretim kapasitesinin karşılaştırılması (GWh)



Şekil 6.26. Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda Uluslararası Enterkoneksiyon Hatlarının saatlik Net Transfer Hacı'nın (NTH) karşılaştırılması (GW)



6.3.1. Net Sıfır Senaryosu

6.3.1.1. Kaynaklara Göre Enerji Üretimi

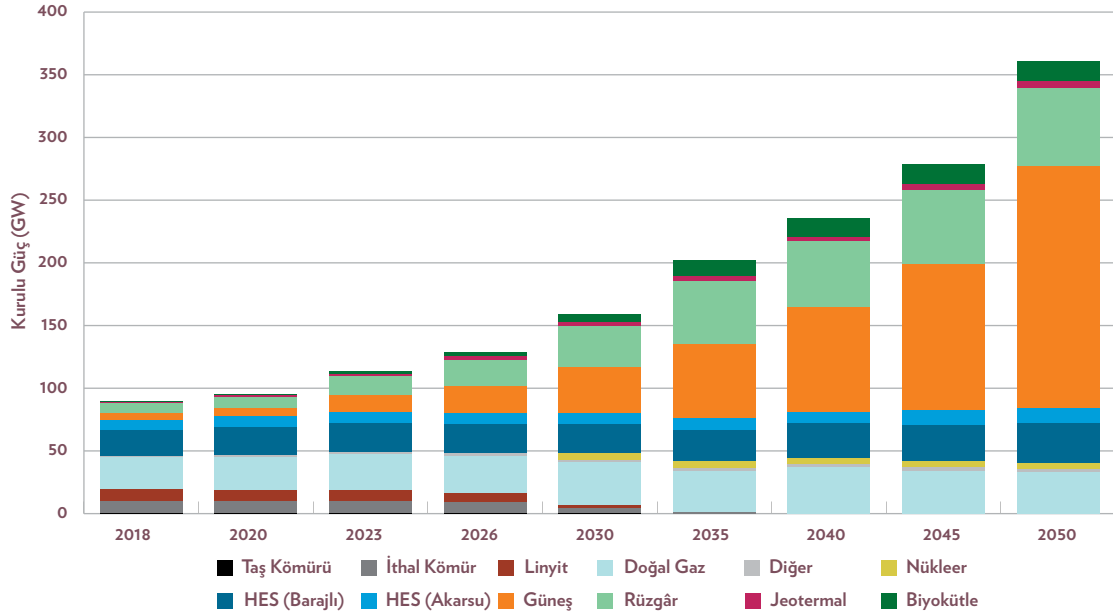
Net Sıfır Senaryosu'nda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu güç kapasitelerinin öngörülen yıllara göre değişimi fosil yakıtlar (taş kömürü, ithal kömür, linyit, doğal gaz ve diğer fosil

yakıt kaynakları), nükleer enerji, hidroelektrik santraller (barajlı ve akarsu tipi) ve modern yenilenebilir kaynaklar (güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle) için Tablo 6.24 ve Şekil 6.27'de gösterilmiştir. Tablo 6.25 ve Şekil 6.28'de aynı kaynakların üretim kapasitelerinin öngörülen yıllara göre değişimi verilmektedir.

Tablo 6.24. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)

	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Nükleer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	0,6	8,9	9,6	25,7	1,4		20,5	7,8	5,7	7,5	1,3	0,8	89,9
2020	0,6	8,9	9,5	25,6	1,6		23,0	8,2	6,9	8,6	1,5	1,1	95,6
2023	0,6	9,4	8,6	28,5	1,7		23,5	8,2	14,1	14,4	2,0	2,5	113,5
2026	0,5	8,0	7,2	30,3	1,9		23,5	8,2	22,0	20,9	2,5	3,8	128,9
2030	0,2	4,0	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	13,0	202,1
2040				36,9	2,6	4,8	27,5	9,1	83,5	52,9	3,4	15,0	235,6
2045				34,0	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	32,0	12,0	192,7	62,4	5,4	16,1	360,8

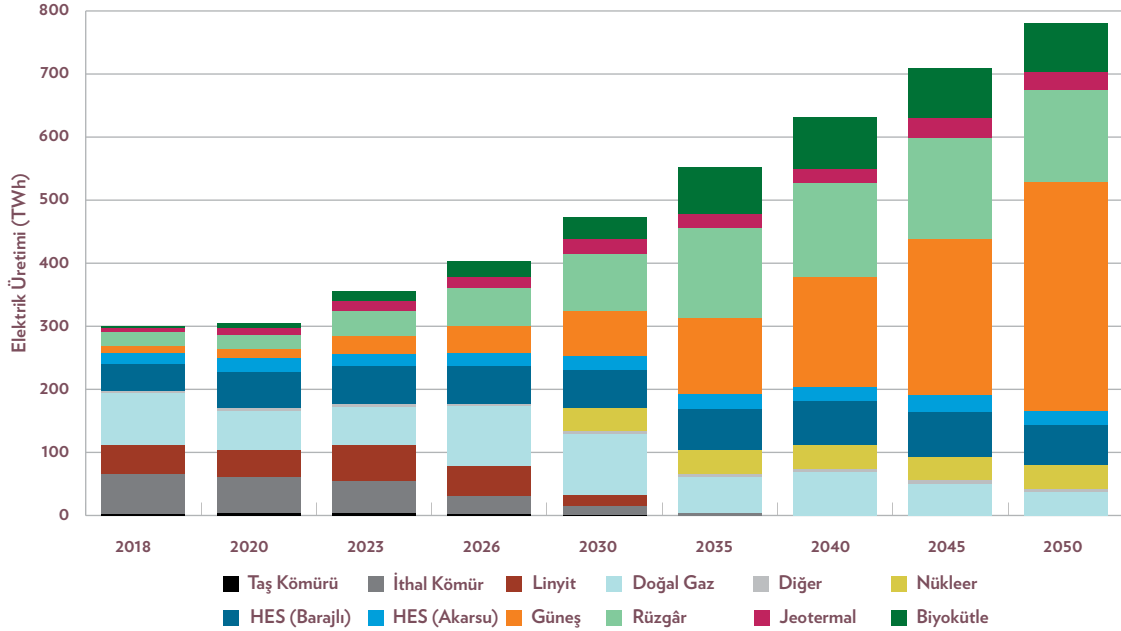
Şekil 6.27. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)



Tablo 6.25. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin gelişimi (GWh)

	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Nükleer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	2.848	62.962	44.782	83.373	2.790		42.475	18.800	10.731	20.796	7.432	3.011	300.000
2020	3.892	56.905	42.436	62.447	4.058		57.847	22.050	13.267	23.647	10.820	7.495	304.862
2023	3.184	52.092	57.030	59.880	4.187		59.723	19.949	27.331	40.609	14.789	17.024	355.799
2026	2.650	28.148	46.720	95.191	4.356		60.071	20.082	43.137	59.689	18.331	25.122	403.498
2030	1.001	14.223	16.415	97.124	4.094	37.843	59.216	22.177	72.632	89.778	22.675	35.086	472.265
2035		4.655		56.164	4.892	37.843	65.193	22.481	121.919	141.856	22.657	74.245	551.905
2040				68.776	4.907	37.843	69.419	22.274	174.013	149.464	21.759	83.598	632.053
2045				50.193	5.002	37.843	71.189	26.659	246.536	161.513	30.456	80.170	709.561
2050				37.638	4.361	37.843	62.804	22.679	362.349	146.063	28.912	77.981	780.629

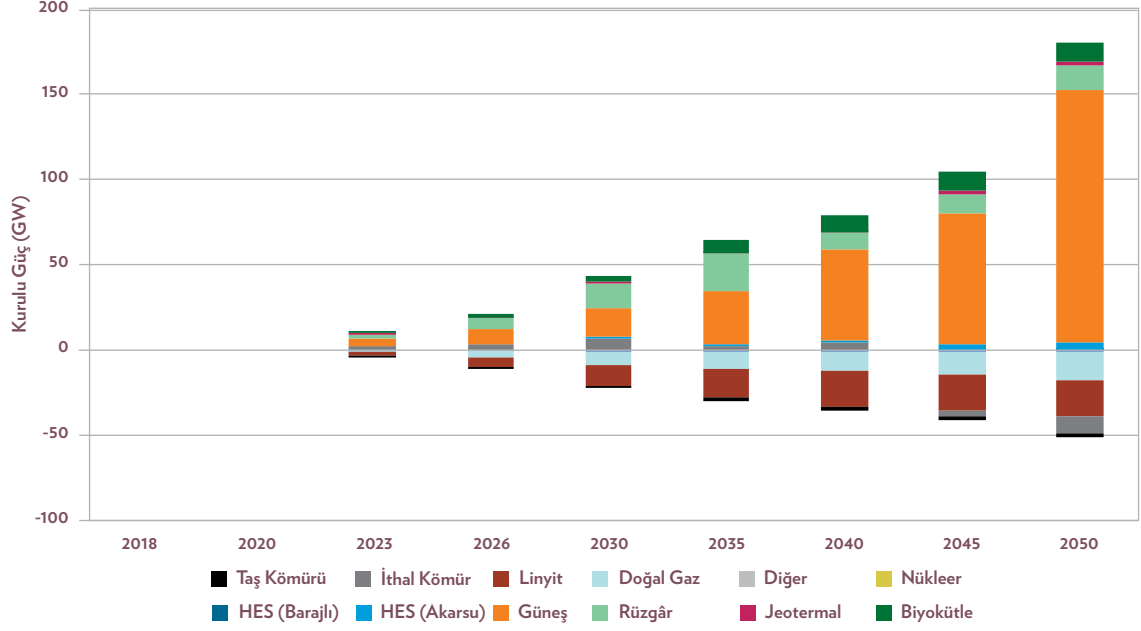
Şekil 6.28. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin gelişimi (TWh)



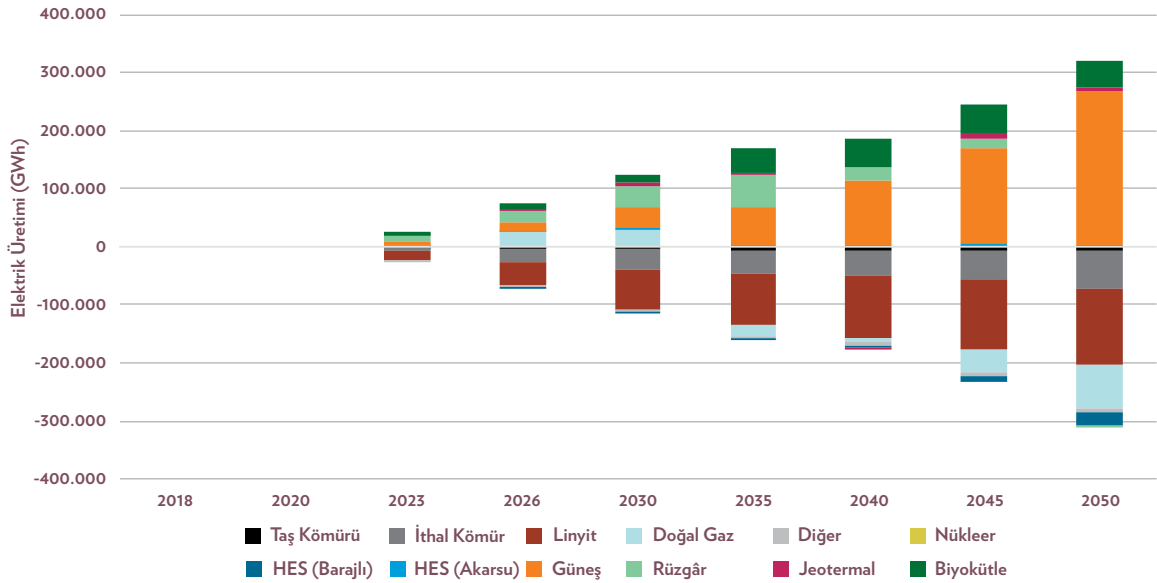
Net Sıfır Senaryosu'nda elektrik üretim kaynaklarının kurulu güç ve üretim düzeylerinin Baz

Senaryo'dan farkları Şekil 6.29 ve 6.30'da gösterilmiştir.

Şekil 6.29. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynakların kurulu güç olarak Baz Senaryoya göre değişimi (GW)



Şekil 6.30. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynakların üretim düzeyinin Baz Senaryoya göre değişimi (GWh)



Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'ya göre 2020'den hemen sonra önce rüzgâr, ardından güneş kurulu gücünde ve üretiminde artış olmakta ve 2040'tan sonra düşük miktarlarda olsa konsantre güneş ve deniz üstü rüzgâr kapasiteleri eklenmektedir. Fosil yakıtlar ise hızla sistemden çıkmaktadır.

Net Sıfır Senaryosu'nda fosil yakıt kaynaklarının elektrik üretimindeki payı Baz Senaryo'ya 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 santral 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 güç kalmakta, bunlar da 2040'tan önce kapanmaktadır.

Doğal gaz santrallerinin kurulu gücü ise kömür santrallerinin kapanmasına bağlı esneklik ihtiyacı nedeniyle azalmamakta, hatta 2018'de 30 GW'a yakın 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 Senaryosu'nda 2050'deki doğal gaz kurulu gücü Baz Senaryo'da beklenen 43 GW'ın çok altındadır. Öte yandan doğal gaz kurulu gücü azalmasa da doğal gazdan elektrik üretimi 2030'a kadar önce artmakta (2018'de 83 TWh'den 2030'da 97 TWh'ye), ancak 2030'dan sonra dalgalı bir şekilde de olsa azalarak 2050'de 38 TWh'ye inmektedir. Bu da doğal gaz santrallerinin, kapatılmasalar da yenilenebilir enerjinin kapasiteye büyük miktarlarda eklenmesi nedeniyle artan esneklik ihtiyacı nedeniyle düşük kapasite faktörüyle çalıştırılması gerekeceği anlamına gelmektedir.

Net Sıfır Senaryosu'nda yenilenebilir kaynaklar ise büyük bir hızla artmaktadır. Baz Senaryo'da

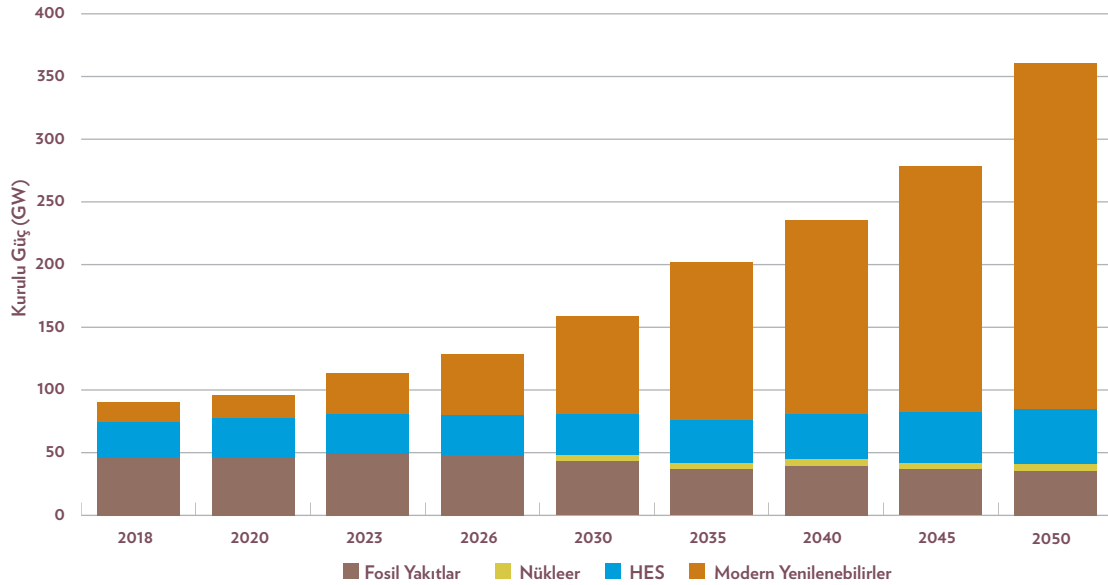
2018'de 7,5 GW olan ve 2040'lara kadar hızla artan rüzgâr kurulu gücünün daha sonra 2070'e kadar Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli olarak verilen 48 GW'de sabit kalacağı varsayılmıştır. Rüzgâr santrallerinin kurulu gücü Net Sıfır Senaryosu'nda ise artmaya devam etmekte ve 2050'de 62 GW'yi geçmektedir. Rüzgârdan elektrik üretimi ise 2018'de 20 TWh'den 2030'da 90 TWh'ye ve 2050'de 146 TWh'ye çıkmaktadır. Güneş santrallerinin kurulu gücünün ise daha iddialı bir şekilde artması, 2018'de 6 GW'nin altında olan güneş kurulu gücünün 2030'da 36,5 GW'ye, 2050'de ise 193 GW'ye varması öngörülmektedir. Güneşten üretilen enerji miktarı da 2018'de 10 TWh'nin biraz üzerindeyken 2030'da 72,5 TWh'ye, 2050'de ise 362 TWh'ye ulaşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan jeotermal enerjinin kurulu gücünde ve üretim kapasitesinde daha sınırlı bir artış öngörülmekte, ancak 2018'de 1 GW'nin altında 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).

Fosil yakıt ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güçlerinde ve üretimlerindeki değişiklik toplulaştırılmış olarak Tablo 6.26 ve Şekil 6.31 ile Tablo 6.27 ve Şekil 6.32'de görülmektedir. Enerji kaynaklarının kurulu güç ve üretim olarak Net Sıfır Senaryosu'ndaki oranları da ayrı ayrı ve toplulaştırılmış olarak Tablo 6.28, 6.29, 6.30 ve 6.31 ile Şekil 6.33, 6.34, 6.35 ve 6.36'da görülmektedir.

Tablo 6.26. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe toplulaştırılmış olarak kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)

	Fosil Yakıtlar	Nükleer	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	46,3		28,3	15,3	89,9
2020	46,3		31,2	18,1	95,6
2023	48,8		31,7	33,1	113,5
2026	47,9		31,7	49,3	128,9
2030	43,0	4,8	32,6	78,5	158,9
2035	36,5	4,8	34,6	126,2	202,1
2040	39,5	4,8	36,6	154,7	235,6
2045	36,6	4,8	41,0	195,9	278,4
2050	35,5	4,8	44,0	276,6	360,8

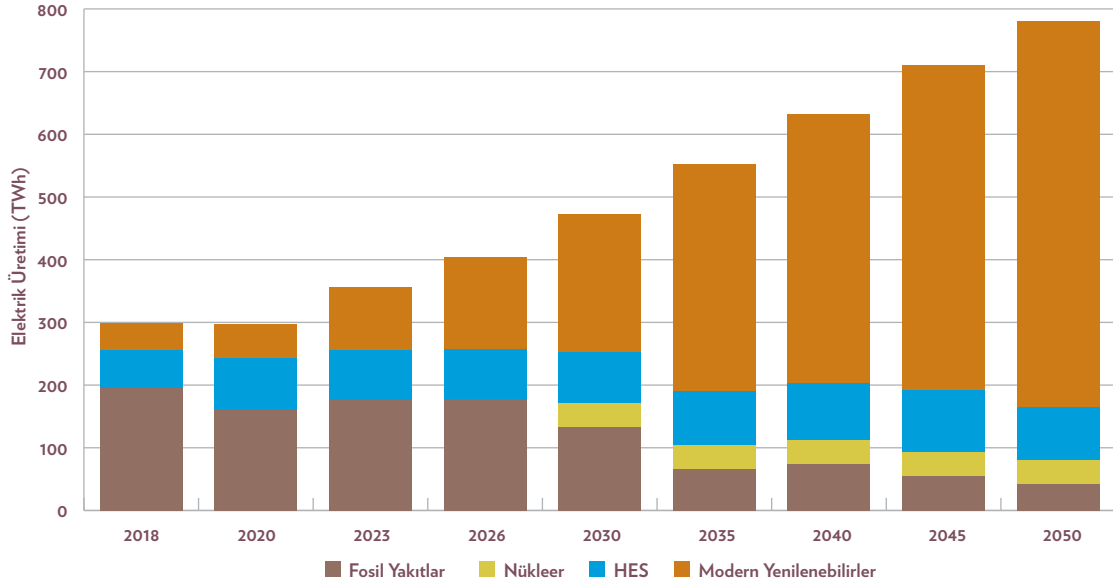
Şekil 6.31. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe toplulaştırılmış olarak kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)



Tablo 6.27. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe toplulaştırılmış olarak kaynaklara göre üretimin gelişimi (GWh)

	Fosil Yakıtlar	Nükleer	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	194.983		61.275	41.970	298.228
2020	162.382		79.896	55.228	297.507
2023	176.374		79.672	99.753	355.799
2026	177.066		80.153	146.279	403.498
2030	132.857	37.843	81.393	220.171	472.265
2035	65.710	37.843	87.674	360.677	551.905
2040	73.683	37.843	91.693	428.834	632.053
2045	55.195	37.843	97.847	518.675	709.561
2050	41.999	37.843	85.483	615.304	780.629

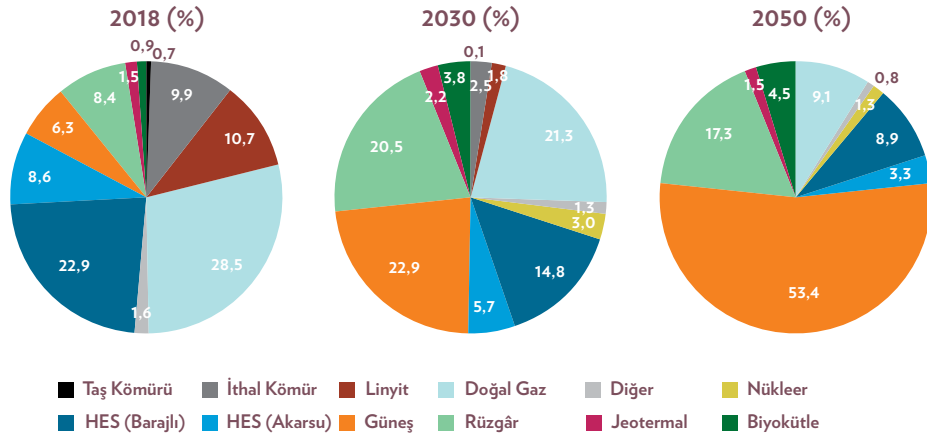
Şekil 6.32. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe toplulaştırılmış olarak kaynaklara göre üretimin gelişimi (TWh)



Tablo 6.28. Net Sıfır Senaryosunda kurulu gücün 2018, 2030 ve 2050'de kaynaklara göre ayrı ayrı oransal dağılımı (%)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Nükleer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	0,7	9,9	10,7	28,5	1,6	0,0	22,9	8,6	6,3	8,4	1,5	0,9	100,0
2030	0,1	2,5	1,8	21,3	1,3	3,0	14,8	5,7	22,9	20,5	2,2	3,8	100,0
2050	0,0	0,0	0,0	9,1	0,8	1,3	8,9	3,3	53,4	17,3	1,5	4,5	100,0

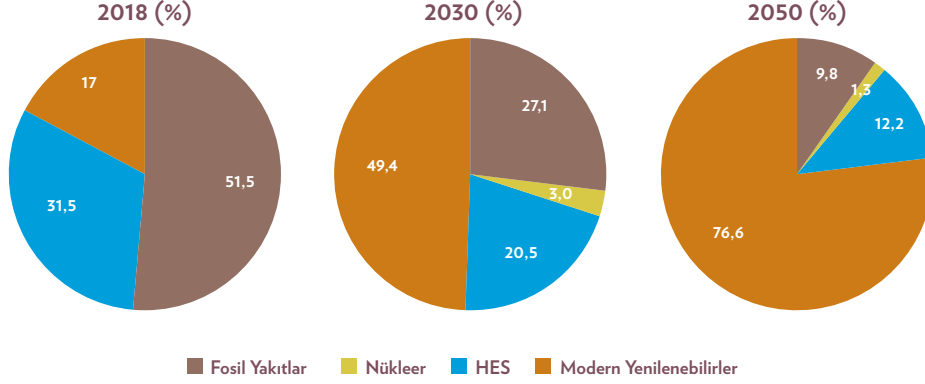
Şekil 6.33. Net Sıfır Senaryosunda kurulu gücün 2018, 2030 ve 2050'de kaynaklara göre ayrı ayrı oransal dağılımı (%)



Tablo 6.29. Net Sıfır Senaryosu'nda elektrik üretiminin 2018, 2030 ve 2050'de kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak oransal dağılımı (%)

Yıl	Fosil Yakıtlar	Nükleer	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	51,5	0,0	31,5	17,0	100,0
2030	27,1	3,0	20,5	49,4	100,0
2050	9,8	1,3	12,2	76,6	100,0

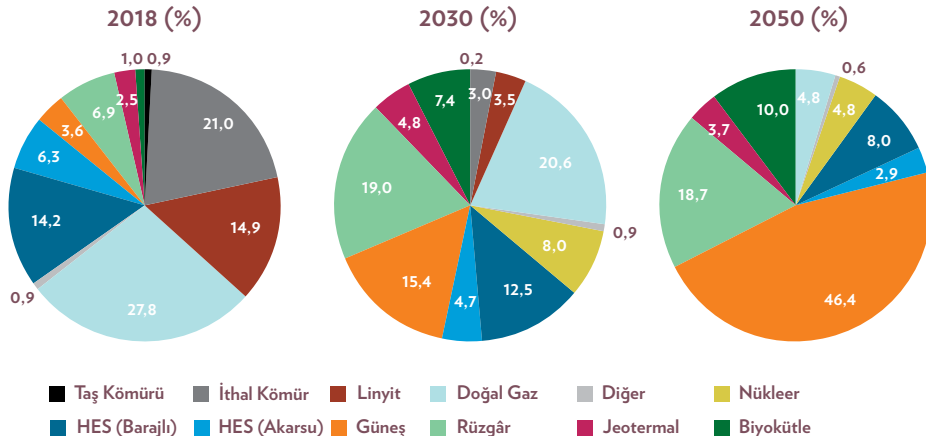
Şekil 6.34. Net Sıfır Senaryosunda kurulu gücün 2018, 2030 ve 2050'de kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak oransal dağılımı (%)



Tablo 6.30. Net Sıfır Senaryosunda elektrik üretiminin 2018, 2030 ve 2050'de kaynaklara göre ayrı ayrı oransal dağılımı (%)

Yıl	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Nükleer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	0,9	21,0	14,9	27,8	0,9	0,0	14,2	6,3	3,6	6,9	2,5	1,0	100,0
2030	0,2	3,0	3,5	20,6	0,9	8,0	12,5	4,7	15,4	19,0	4,8	7,4	100,0
2050	0,0	0,0	0,0	4,8	0,6	4,8	8,0	2,9	46,4	18,7	3,7	10,0	100,0

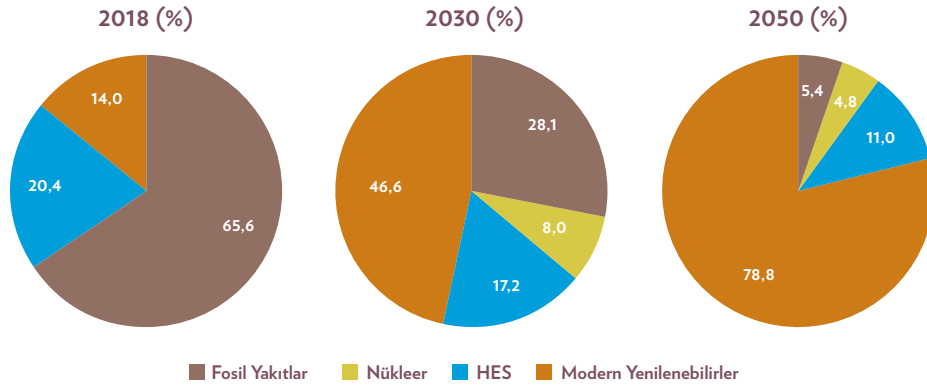
Şekil 6.35. Net Sıfır Senaryosunda elektrik üretiminin 2018, 2030 ve 2050'de kaynaklara göre ayrı ayrı oransal dağılımı (%)



Tablo 6.31. Net Sıfır Senaryosunda elektrik üretiminin 2018, 2030 ve 2050'de kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak oransal dağılımı (%)

Yıl	Fosil Yakıtlar	Nükleer	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam (Kontrol)
2018	65,6	0,0	20,4	14,0	100,0
2030	28,1	8,0	17,2	46,6	100,0
2050	5,4	4,8	11,0	78,8	100,0

Şekil 6.36. Net Sıfır Senaryosunda elektrik üretiminin 2018, 2030 ve 2050'de kaynaklara göre toplulaştırılmış olarak oransal dağılımı (%)



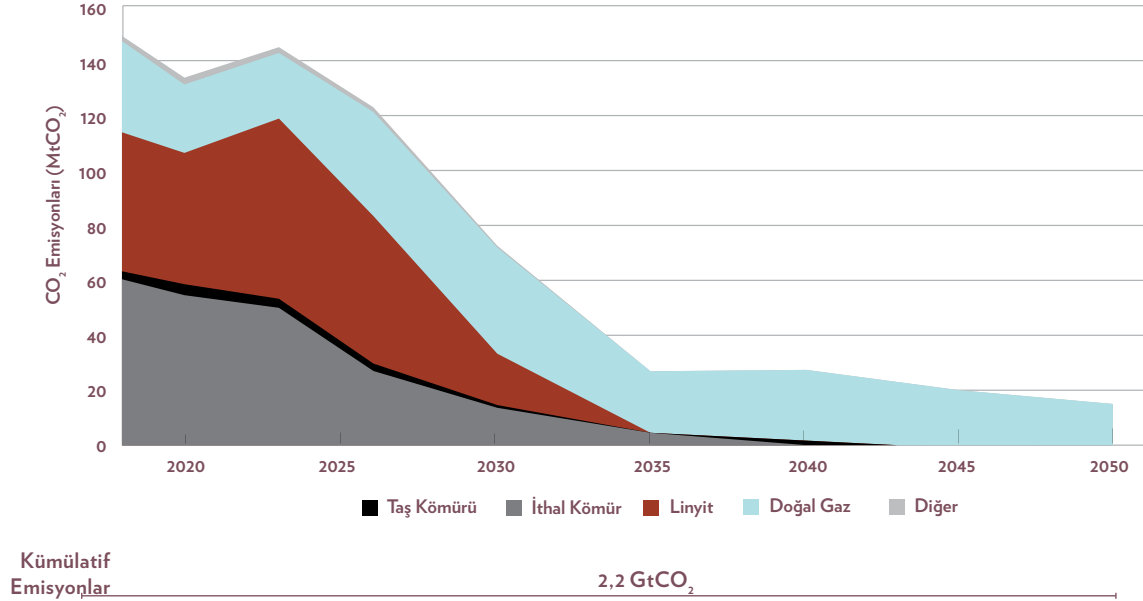
Net Sıfır Senaryosu'nda yenilenebilir kaynakların kurulu güçteki payı 2018'de %17 ile sınırlıyken 2030'da yaklaşık %50'ye, 2050'de ise %77'ye çıkmaktadır. Fosil yakıtların kurulu güçteki payı ise 2018'de %50'nin üzerindeyken 2030'da %27'ye, 2050'de ise tamamı doğal gaz olmak üzere %10'a düşmektedir. HES'lerin kurulu güçteki payı ise %35,5'ten %12'ye gerilemektedir. Elektrik üretiminde ise yenilenebilir kaynakların 2018'de %14 olan payı 2030'da %50'ye, 2050'de ise %80'e yaklaşmaktadır. Üretim içindeki oranı kurulu güçteki kadar düşmeyen HES'lerin üretimdeki payı, 2018'de %20 iken 2030'da %17, 2050'de %11 olmaktadır. Fosil yakıtların üretimdeki payı ise hızla gerilemekte, 2018'de elektriğin %65'i fosil yakıtlardan üretilirken bu oran 2030'da %28'e, 2050'de ise %5'e gerilemektedir.

6.3.1.2. Karbondioksit emisyonları

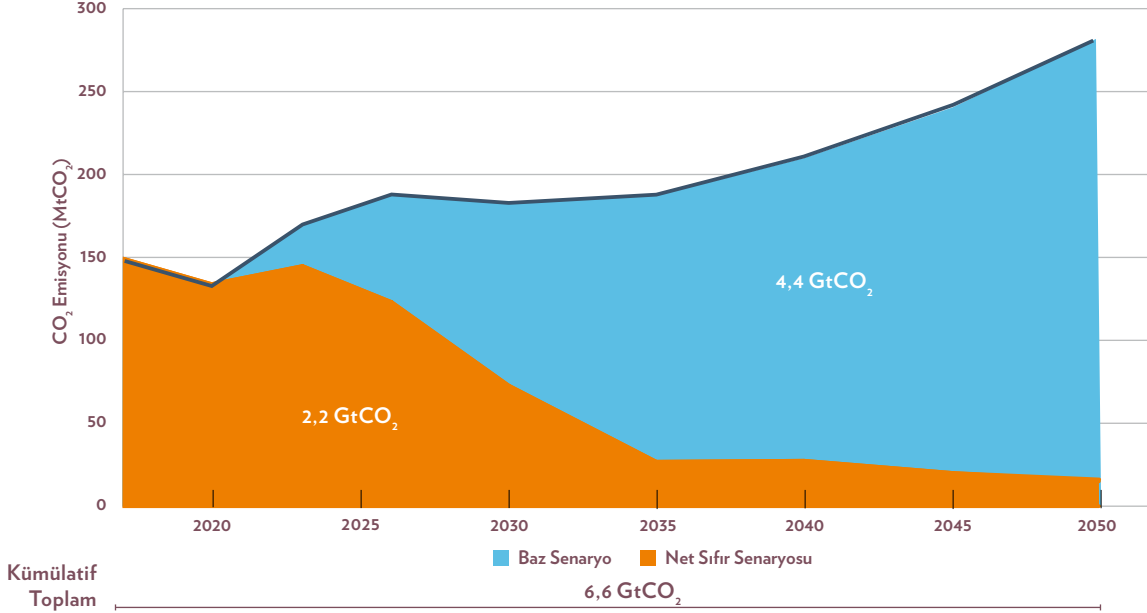
Net Sıfır Senaryosu'nda elektrik sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları 2023'ten sonra azalmaya başlamaktadır. 2018'de 149 MtCO₂ olan emisyonlar 2030'da %51 azalarak 73 MtCO₂'ye, 2050'de ise %90 azalarak 15 MtCO₂'ye inmektedir. 2030'da ise elektrik sektöründen kaynaklanan emisyonların %53'ü halen çoğunluğu linyit olmak üzere kömür kaynaklıdır, ancak linyit santrallerinin tamamının 2030'ların ilk yarısında, son kalan ithal kömür santrallerinin de 2030'ların ikinci yarısında kapanmasının ardından 2040'tan itibaren elektrik sektöründe kalan emisyonların tamamı doğal gazdan kaynaklanmaktadır. Doğal gaz santrallerinden kaynaklanan emisyonlar da 2050'de 2018 seviyesinin yarısından azdır. (Tablo 6.32 ve Şekil 6.37)

Tablo 6.32. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO₂ emisyonları (MtCO₂)

	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Toplam
2018	2,9	60,4	50,6	33,2	1,9	149,0
2020	4,0	54,6	47,8	24,9	2,5	133,9
2023	3,3	50,0	65,6	23,9	2,1	144,8
2026	2,7	27,0	53,7	37,9	1,7	123,1
2030	1,0	13,6	18,7	38,7	0,6	72,7
2035	-	4,5	-	22,4	-	26,8
2040	-	-	-	27,4	-	27,4
2045	-	-	-	20,0	-	20,0
2050	-	-	-	15,0	-	15,0

Şekil 6.37. Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO₂ emisyonları (MtCO₂)

Şekil 6.38. Baz senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda karşılaştırmalı olarak elektrik sektörünün CO₂ emisyonları (MtCO₂)



Elektrik sektöründen kaynaklanan emisyonların 2018'den 2050'ye kadar Baz Senaryo'da ve Net Sıfır Senaryosu'nda izlediği seyir Şekil 6.38'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Buna göre Net Sıfır Senaryosu'nda emisyonlar Baz Senaryo'nun aksine 2018'de tepe noktasındadır. Elektrik sektörünün kümülatif emisyonları ise 2,2 GtCO₂'de sınırlı kalarak Baz Senaryo'nun elektrik sektörü kümülatif emisyonlarının (6,8 GtCO₂) üçte ikisi kadar azalarak 4,6 GtCO₂ düşük kalmaktadır. Net Sıfır Senaryosu'nda elektrik sektörünün kümülatif emisyonları Türkiye'nin adil paylaşım ilkesine uygun olarak bu çalışmada kabul edilen karbon bütçesinin (7,95 GtCO₂) 2050'ye kadar yaklaşık %28'ini kullanmaktadır.

Elektrik sektörünün karbondioksit emisyonları 2050'de sınırlanamamakta ve 15 MtCO₂ artırı emisyon kalmaktadır. Bu emisyon yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek oranlarda kullanılması nedeniyle artan şebeke esnekliği ihtiyacı nedeniyle düşük kapasite faktörüyle çalıştırılacak şekilde

sistemde emre amade tutulan doğal gaz santrallerinden gelmektedir. 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 tamamen kapatılabilir ve kalan artırı emisyonları sıfırlamak mümkün olabilir.

6.3.2. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu

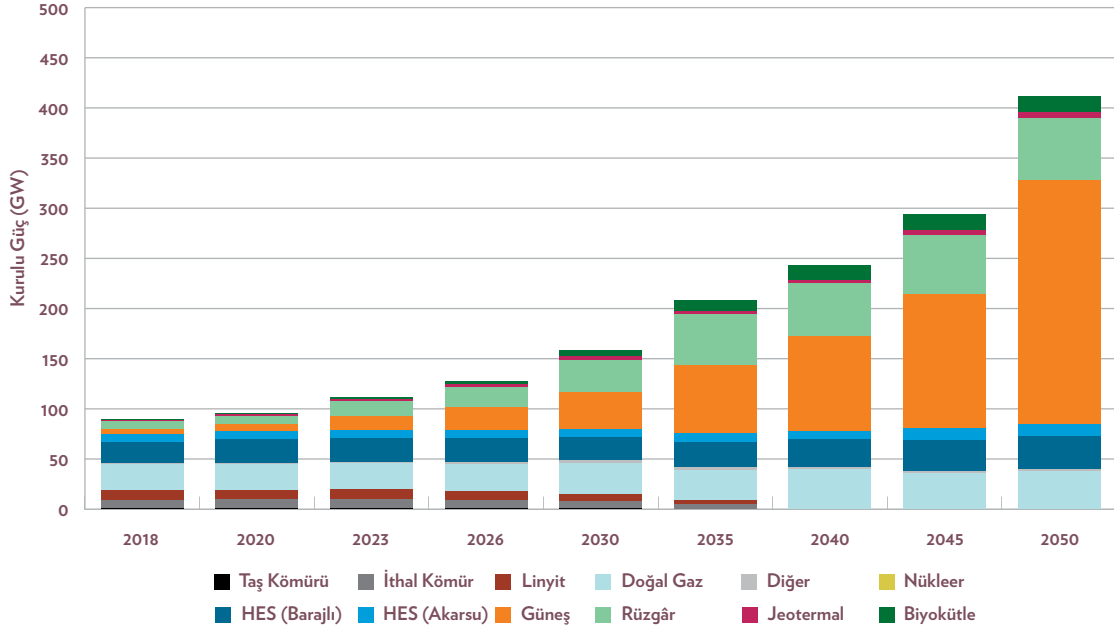
6.3.1.1. Kaynaklara Göre Enerji Üretimi

Net Sıfır Senaryosu'nda 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 6.33 ve Şekil 6.39'da gösterilmiştir. Tablo 6.34 ve Şekil 6.40'ta aynı kaynakların üretim kapasitelerinin öngörülen yıllara göre değişimi verilmektedir.

Tablo 6.33. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)

	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	0,6	8,9	9,6	25,7	1,4	20,5	7,8	5,7	7,5	1,3	0,8	89,9
2020	0,7	8,9	9,5	25,6	1,6	23,0	8,2	6,9	8,6	1,5	1,1	95,6
2023	0,6	9,8	9,1	26,0	1,6	23,5	8,2	14,1	14,4	2,0	2,5	111,8
2026	0,5	8,9	8,2	27,8	1,8	23,5	8,2	22,0	20,9	2,5	3,8	128,1
2030	0,4	7,6	6,7	31,3	2,1	23,5	8,2	36,4	32,6	3,4	6,1	158,3
2035	-	4,9	3,8	30,0	2,8	25,5	8,2	68,6	50,1	3,4	10,7	208,3
2040	-	-	-	39,5	2,6	27,5	8,2	94,1	52,9	3,4	15,0	243,2
2045	-	-	-	35,6	2,7	30,0	12,0	133,7	59,1	5,1	15,4	293,6
2050	-	-	-	37,4	2,7	32,0	12,0	243,4	62,4	5,4	16,1	411,4

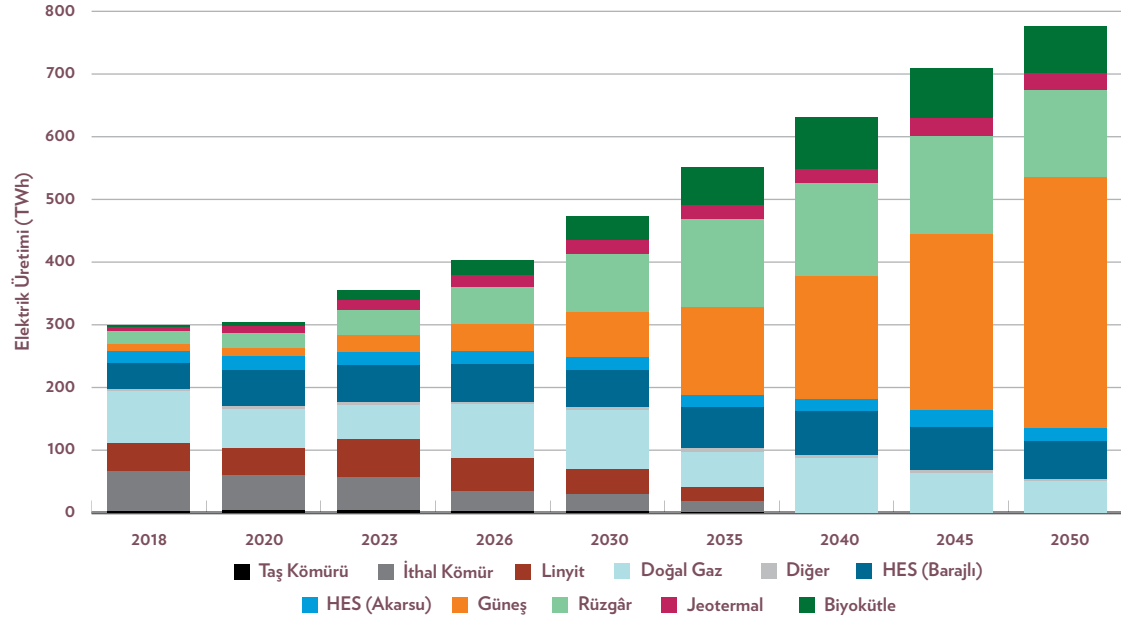
Şekil 6.39. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)



Tablo 6.34. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin gelişimi (GWh)

	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	HES (Barajlı)	HES (Akarsu)	Güneş	Rüzgâr	Jeotermal	Biyokütle	Toplam
2018	2.848	62.962	44.782	83.373	2.790	42.475	18.800	10.731	20.796	7.432	3.011	300.000
2020	3.892	56.905	42.436	62.447	4.058	57.847	22.050	13.267	23.647	10.820	7.495	304.862
2023	3.368	53.808	60.271	54.858	3.939	59.727	19.951	27.331	40.633	14.824	17.088	355.799
2026	2.995	31.479	52.287	86.201	4.236	60.067	20.081	43.138	59.651	18.297	25.069	403.499
2030	2.387	27.397	39.602	93.797	4.812	59.678	20.110	72.705	91.423	23.455	36.900	472.264
2035	1.343	17.231	22.045	56.964	5.946	64.762	20.131	139.794	140.185	22.175	61.331	551.905
2040				87.326	4.901	69.101	19.973	195.889	148.903	21.665	84.320	632.079
2045				62.725	4.953	69.799	26.533	280.426	155.580	29.718	79.807	709.541
2050				50.186	4.042	59.246	21.722	400.127	138.858	27.094	74.694	775.969

Şekil 6.40. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe kaynaklara göre üretimin gelişimi (TWh)



Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu'nun Net Sıfır Senaryosu'ndan en önemli farkı kömürün elektrik üretiminden tamamen çekilmesinin birkaç yıl gecikmesidir. Net Sıfır Senaryosu'nda linyit santralleri 2030'ların ilk yarısında, ithal kömür santralleri 2035'ten biraz sonra ama 2040'tan önce tamamen devreden çıkarken, Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu'nda 2035'te 3,8 GW linyit santrali ve 4,9 GW ithal kömür santrali devrede kalmakta, hem linyit hem de ithal kömür santralleri 2035'ten sonra ama 2040'tan önce devreden çıkmaktadır. Doğal gaz santrallerinin payı ise daha az değişmekte, 2050'de kalan doğal gaz kurulu gücü 4,7 GW, doğal gazdan elektrik üretimi 12,5 TWh artmaktadır. Dolayısıyla nükleer santralin olmadığı durumda elektrik sisteminde kömür santrallerini kapatmayı geciktirmemek için doğal

gaz dahil diğer enerji kaynaklarını payını biraz daha artırmak gerekebilir.

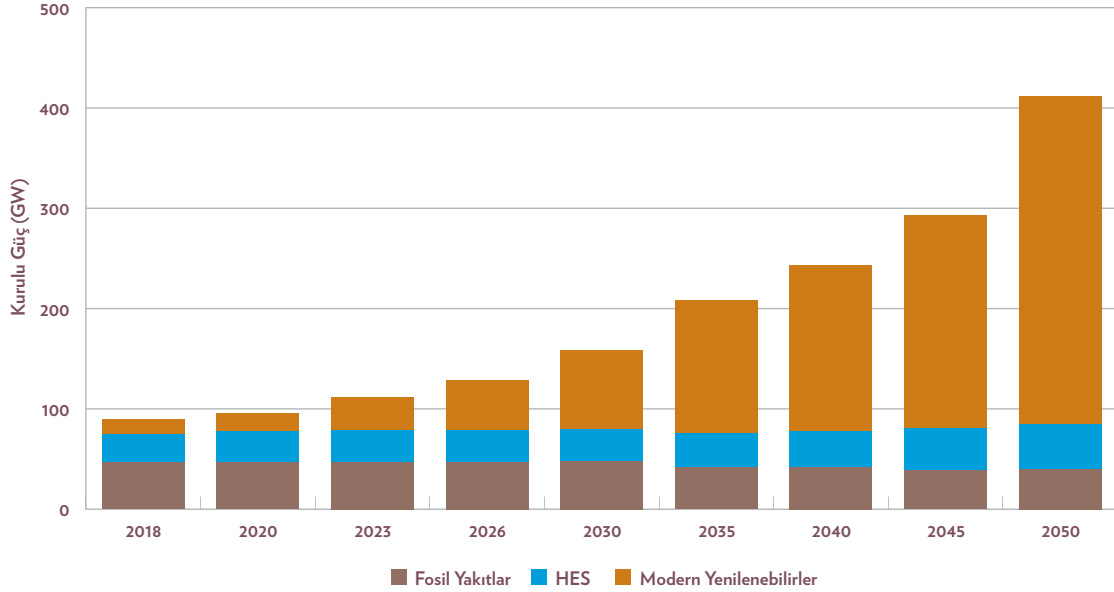
Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu'nda yenilenebilir enerji kaynakları arasında ise sadece güneşin payı değişmektedir. Net Sıfır Senaryosu'nda 2050'de 193 GW olan güneş kurulu gücü varken, nükleer santrallerin olmadığı durumda güneş kurulu gücü 234 GW, yani %20 daha fazla olmaktadır. Güneşten elektrik üretimi ise 400 TWh ile %10 daha fazla gerçekleşmektedir.

Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu'nda fosil yakıt ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güçlerinde ve üretimlerindeki değişiklik toplulaştırılmış olarak Tablo 6.35 ve Şekil 6.41 ile Tablo 6.36 ve Şekil 6.42'de görülmektedir.

Tablo 6.35. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe toplulaştırılmış olarak kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)

	Fosil Yakıtlar	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	46,3	28,3	15,3	89,9
2020	46,3	31,2	18,1	95,6
2023	47,1	31,7	33,1	111,8
2026	47,2	31,7	49,3	128,1
2030	48,1	31,7	78,5	158,3
2035	41,8	33,7	132,9	208,3
2040	42,2	35,7	165,3	243,2
2045	38,3	42,0	213,3	293,6
2050	40,1	44,0	327,3	411,4

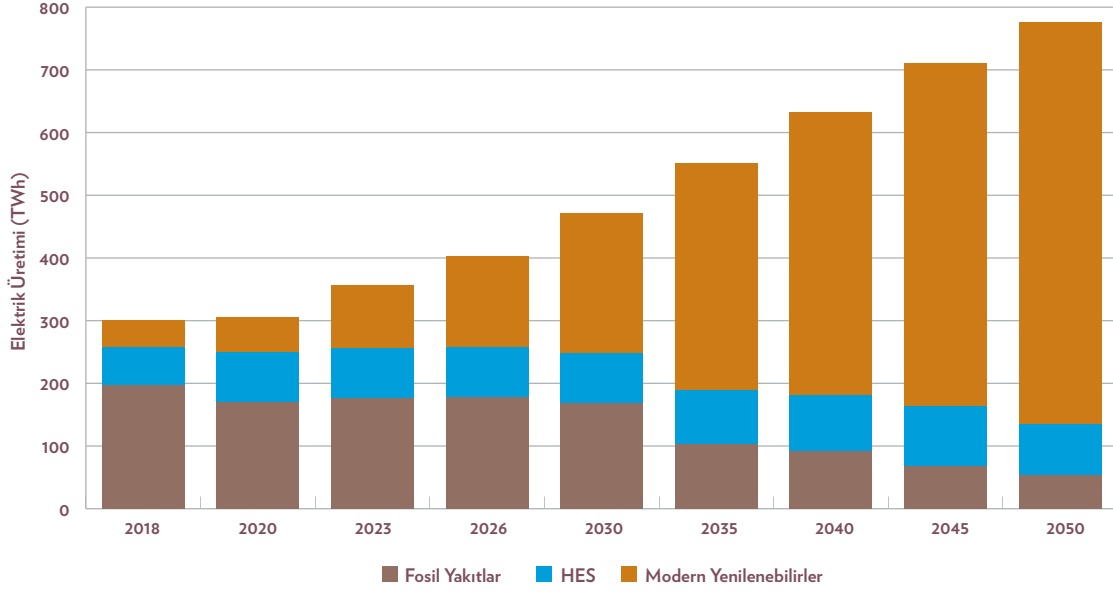
Şekil 6.41. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe toplulaştırılmış olarak kaynaklara göre kurulu gücün gelişimi (GW)



Tablo 6.36. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe toplulaştırılmış olarak kaynaklara göre üretimin gelişimi (GWh)

	Fosil Yakıtlar	HES	Modern Yenilenebilirler	Toplam
2018	196.755	61.275	41.970	300.000
2020	169.737	79.896	55.228	304.862
2023	176.245	79.678	99.877	355.799
2026	177.198	80.147	146.154	403.499
2030	167.994	79.788	224.483	472.264
2035	103.528	84.893	363.484	551.905
2040	92.227	89.074	450.778	632.079
2045	67.678	96.332	545.531	709.541
2050	54.228	80.968	640.773	775.969

Şekil 6.42. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektöründe toplulaştırılmış olarak kaynaklara göre üretimin gelişimi (TWh)



Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu'nda elektrik sektörünün toplam kurulu gücünün 2050'de Net Sıfır Senaryosu'na göre 411 GW ile %14 daha fazla olduğu görülmektedir. Bu fark güneş enerjisi santrallerinin kurulu gücünün daha yüksek olmasından gelmekte, nükleer santrallerin olmadığı durumda modern yenilenebilir enerji santrallerinin kurulu gücü 327 GW'ye ulaşmakta, yani %18 daha fazla olmaktadır. 2050'de kalan doğal gaz kurulu gücü de 40 GW, yani %13 daha fazladır. HES'lerin ve güneş dışındaki modern yenilenebilir enerji santrallerinin kurulu gücünde bir fark yoktur.

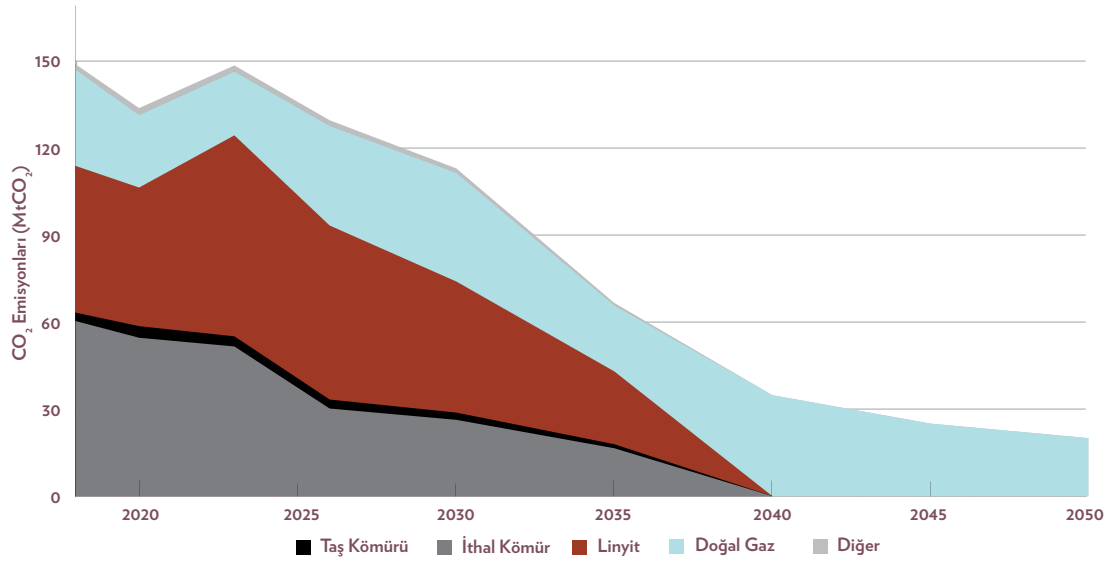
6.3.1.2. Karbondioksit emisyonları

Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu'nda elektrik sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları 2023'ten sonra azalmaya başlamaktadır. 2018'de 149 MtCO₂ olan emisyonlar 2030'da %24 azalarak 113 MtCO₂'ye, 2050'de ise %87 azalarak 20 MtCO₂'ye inmektedir. 2030'da elektrik sektöründen kaynaklanan emisyonların %65'i halen çoğunluğu linyit olmak üzere kömür kaynaklıdır, ancak linyit ve ithal kömür santrallerinin 2035'ten sonra kapanmasının ardından 2040'tan itibaren elektrik sektöründe kalan emisyonların tamamı doğal gazdan kaynaklanmaktadır. Doğal gaz santrallerinden kaynaklanan emisyonlar da 2050'de 2018 seviyesinin %40'ı kadardır. (Tablo 6.37 ve Şekil 6.43)

Tablo 6.37. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO₂ emisyonları (MtCO₂)

	Taş Kömürü	İthal Kömür	Linyit	Doğal Gaz	Diğer	Toplam
2018	2,9	60,4	50,6	33,2	1,9	149,0
2020	4,0	54,6	47,8	24,9	2,5	133,9
2023	3,5	51,6	69,3	21,9	2,2	148,5
2026	3,1	30,2	60,0	34,3	2,0	129,6
2030	2,5	26,3	45,2	37,4	1,6	112,8
2035	1,4	16,5	25,1	22,7	0,9	66,6
2040	-	-	-	34,8	-	34,8
2045	-	-	-	25,0	-	25,0
2050	-	-	-	20,0	-	20,0

Şekil 6.43. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosunda elektrik sektörünün fosil yakıt kaynaklarına göre CO₂ emisyonları (MtCO₂)



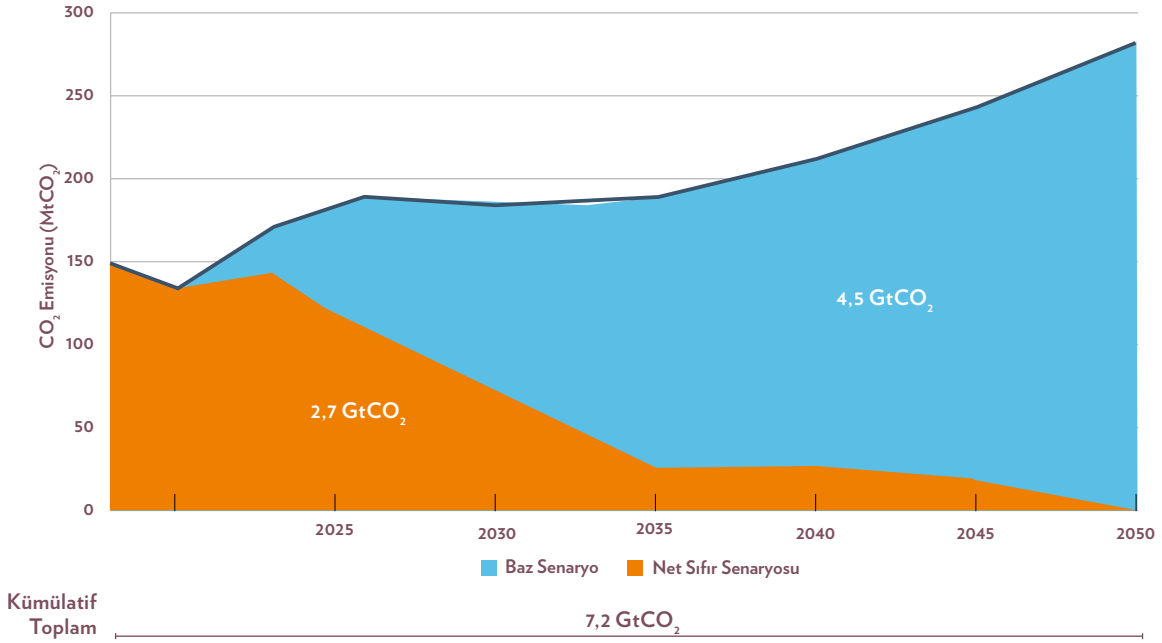
Kümülatif
Emisyonlar

2,7 GtCO₂

Elektrik sektöründen kaynaklanan emisyonların 2018'den 2050'ye kadar Nükleersiz Baz Senaryo'da ve Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu'nda izlediği seyir Şekil 6.44'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Buna göre Net Sıfır Senaryosu'nda emisyonlar Baz Senaryo'nun aksine 2018'de tepe noktasındadır. Elektrik sektörünün kümülatif emisyonları 2,7 GtCO₂'de sınırlı kalarak Nükleersiz Baz Senaryo'nun kümülatif emisyonlarının (7,2 GtCO₂)

yaklaşık üçte ikisi kadar azalmakta ve 4,5 GtCO₂ düşük kalmaktadır. Ancak Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu'nda elektrik sektörünün kümülatif emisyonları Net Sıfır Senaryosu'ndan 0,5 GtCO₂ daha fazladır. Nükleersiz Net Sıfır Senaryosu'nda elektrik sektörünün kümülatif emisyonları Türkiye'nin adil paylaşım ilkesine uygun olarak bu çalışmada kabul edilen karbon bütçesinin (7,95 GtCO₂) 2050'ye kadar yaklaşık %34'ünü kullanmaktadır.

Şekil 6.44. Nükleersiz Baz Senaryoda ve Nükleersiz Net Sıfır Senaryosunda karşılaştırmalı olarak elektrik sektörünün CO₂ emisyonları (MtCO₂)



7. ULAŞIM SEKTÖRÜ

Türkiye’de ulaşım sektörü, enerji kaynaklı karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %23’ünden sorumludur ve bunun da %93,4’ü karayolu taşımacılığı kaynaklıdır. Ulaşım sektöründen kaynaklanan emisyonlar 1990’dan 2018’e kadar %213, fosil yakıtlara bağlı emisyonlar içindeki payı da %3 artmıştır (TÜİK, 2021).

7.1. VARSAYIMLAR

Ulaşım sektörü emisyonları karayolu ulaşımı (otomobiller, hafif ve ağır yük taşıma, otobüsler, motosikletler vb.), demiryolları, yurt içi uçuşlar, yurt içi deniz ulaşımı ve boru hatlarından kaynaklanır ve tamamı fosil yakıtların yakılmasına bağlıdır. Bu nedenle ulaşım emisyonları modellenirken nüfus ve refah artışına bağlı olarak motorizasyon oranının nasıl değişeceği en önemli varsayımlardan biridir. Ayrıca bireysel ve toplu taşımada karayolundan demiryoluna geçiş ve bütün fosil yakıtlı ulaşım araçlarında verimlilik artışı için kullanılacak varsayımlar mevcut ulaşım yapısı içindeki değişimi modellemek için gereklidir.

Öte yandan ulaşım sektörü emisyonlarını etkileyecek en önemli enerji dönüşümü fosil yakıt kullanımından elektriğe ve diğer bir emisyonsuz yakıt türü olan yeşil hidrojene geçiştir. Bu nedenle bireysel ve toplu ulaşımında, yük taşımacılığında ve trenlerde fosil yakıtlardan elektrikli araçlara geçiş oranı emisyonları önemli ölçüde belirler. Emisyona neden olan ulaşım araçlarını kullanmamayı tercih etmek (otomobilden bisiklete geçmek veya uzun mesafe seyahatleri azaltmak vb.) ise seyahat davranış değişikliği olarak varsayımlara eklenmiştir.

Bu çalışmada ulaşım sektörünün modellenmesinde Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu için aşağıdaki varsayımlar kullanılmıştır:

- 1| Motorizasyon oranı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın sektörler için emisyon azaltım potansiyelini değerlendirdiği çalışmadan bütün senaryolar için aynı alınmıştır. Buna göre 2018’de 1000 kişi başına 272 olan motorizasyon oranının 2020’de 286’ya, 2030’da 340’a, 2050’de 408’e çıkacağı varsayılmaktadır (ÇŞB, 2019). Çalışmada motorizasyon oranının toplu ulaşımın gelişmesine ve seyahat davranış değişikliklerine bağlı olarak 2070’te 400’e düşeceği varsayılmıştır.
- 2| Verimlilik artışına konvansiyonel araçlardan kaynaklanan emisyonların azalmasını sağlayan bir gelişme olarak modelde yer verilmiştir. Karayolu ve denizyolu taşımacılığında fosil yakıt kullanan konvansiyonel araçlar için Net Sıfır Senaryosu’nda Baz Senaryo’ya ek olarak yıllık %2,5 verimlilik artışı varsayılmıştır. Hava yolu taşımacılığı için ek bir verimlilik artışı öngörülmemiştir (ICCT, 2012).
- 3| Bireysel araç kullanımında payı 2018’de neredeyse sıfır olan elektrikli araç sayısının toplam binek araçlarına oranının Baz Senaryo’da 2030’da %10’a, 2050’de %33’e ve 2070’te %66’ya çıkacağı, Net Sıfır Senaryosunda ise bu oranların 2030’da %20 ve 2050’de %66 ile Baz Senaryo’nun iki katı civarında seyredeceği varsayılmıştır. (Tablo 7.1)
- 4| Baz Senaryo’ya katılmayan, motorlu taşıtların kullanımından vazgeçme gibi seyahat davranış değişiklikleri Net Sıfır Senaryo’da 2050’de %5 olarak varsayılmıştır.
- 5| Karayoluyla toplu ulaşımında ve karayolu yük taşımacılığında elektrikli araçların toplam araç sayısına oranının Baz Senaryo’da 2030’da %5, 2050’de %10 ve 2070’te %20 olacağı ve bu

Tablo 7.1. Ulaşım sektörünün modellenmesinde binek araçlarla ilgili kullanılan varsayımlar

Yıl	Baz Senaryo				Net Sıfır Senaryosu			
	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 (%)
2030	340	1,9	10	0	340	3,8	20	0
2050	408	9,7	33	0	408	19,4	66	5
2070	400	21,3	66	0	-	-	-	-

Tablo 7.2. Ulaşım sektörünün modellenmesinde toplu taşıma ve yük taşımacılığında elektrik ve yeşil hidrojen kullanan araçların toplam araç sayısına oranıyla ilgili kullanılan varsayımlar (%)

Yıl	Baz Senaryo			Net Sıfır Senaryosu		
	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
2030	5	5	0	10	10	0
2050	10	10	0	20	20	5
2070	20	20	0	-	-	-

oranların Net Sıfır Senaryosunda iki katına çıkarak 2030'da %10 ve 2050'de %20 olarak gerçekleşeceği, böylece ağır vasıtalarda da elektrikli araçlara geçişin hızlanacağı varsayılmıştır. Karayolu taşımacılığında kullanılan ağır vasıtalarda ek bir emisyon azaltım yöntemi olarak karbon salımı olmayan yeşil hidrojen kullanımının da Baz Senaryo'da hiç yokken Net Sıfır Senaryosu'nda 2030'dan sonra devreye girmeye başlayacağı ve 2050'de yeşil hidrojen kullanan ağır vasıtaların toplam ağır vasıtalara oranının %5'e çıkacağı varsayılmıştır. (Tablo 7.2)

- 6 | Demiryolu ulaşımında 2018'de yaklaşık %35 olan elektrikli raylı taşımacılığın oranının tüm raylı sistemlerde 2030'da %75'e ve 2050'de %100'e çıkacağı varsayılmıştır (UAB, 2018).

Emisyonları azaltmak için önemli bir bireysel ulaşım biçimi değişikliği olarak karayolunda bireysel motorlu araç kullanımından ve karayolu toplu taşıma araçlarından raylı toplu taşıma araçlarına geçiş ile karayolu yük taşımacılığında demiryolu ile yük taşımacılığa geçiş oranlarına dair varsayımlara da Net Sıfır Senaryosu'nda yer verilmiştir. Buna göre bireysel araç kullanımından raylı toplu taşıma araçlarına geçiş oranlarının 2030'da %5 ve 2050'de %15 olduğu, karayolu toplu taşıma araçlarının kullanımından raylı toplu taşıma araçlarına geçiş oranlarının ise 2030'da %10 ve 2050'de %50 olduğu varsayılmıştır (Zimmer and Schmed, 2008). (Tablo 7.3)

Tablo 7.3. Ulaşım sektörünün modellenmesinde karayolundan raylı sisteme geçiş oranıyla ilgili kullanılan varsayımlar (%)

Yıl	Net Sıfır Senaryosu		
	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
2030	5	10	10
2050	15	50	50

7.2. SENARYOLAR

Ulaşım sektörünün modellenmesi için karayolunda bireysel binek araçlarda, toplu ulaşım ve yük taşıma için kullanılan ağır vasıtalarda, ayrıca demiryolu, denizyolu ve havayolu taşımacılığı araçlarında enerji tüketimi her senaryo için Ton Eşdeğer Petrol (TEP) olarak hesaplanmıştır. Daha sonra Tablo 7.4'te her ulaşım aracı için verilen katsayılar kullanılarak fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan CO₂ emisyonları bulunmuştur. Katsayılar verimlilik artışı nedeniyle yıllar içinde giderek azalmaktadır.

7.2.1. Baz Senaryo (BS):

7.2.1.1. Ulaşımında elektrik tüketimi:

Baz Senaryo'da bütün ulaşım türlerinde enerji tüketimi Tablo 7.5'te ve Şekil 7.1'de 1000 TEP olarak verilmiştir. Buna göre ulaşım sektörünün 2018'de yaklaşık 28,5 milyon TEP olan enerji tüketimi 2030'da yaklaşık 38 milyon TEP'e, 2050'de iki katına çıkarak yaklaşık 58 milyon TEP'e ve 2070'te üç kat artışla 84,5 milyon TEP'e çıkmaktadır. Ulaşım sektöründe enerji tüketiminin üçte ikisi karayolu yük taşımacılığından kaynaklanmaktadır.

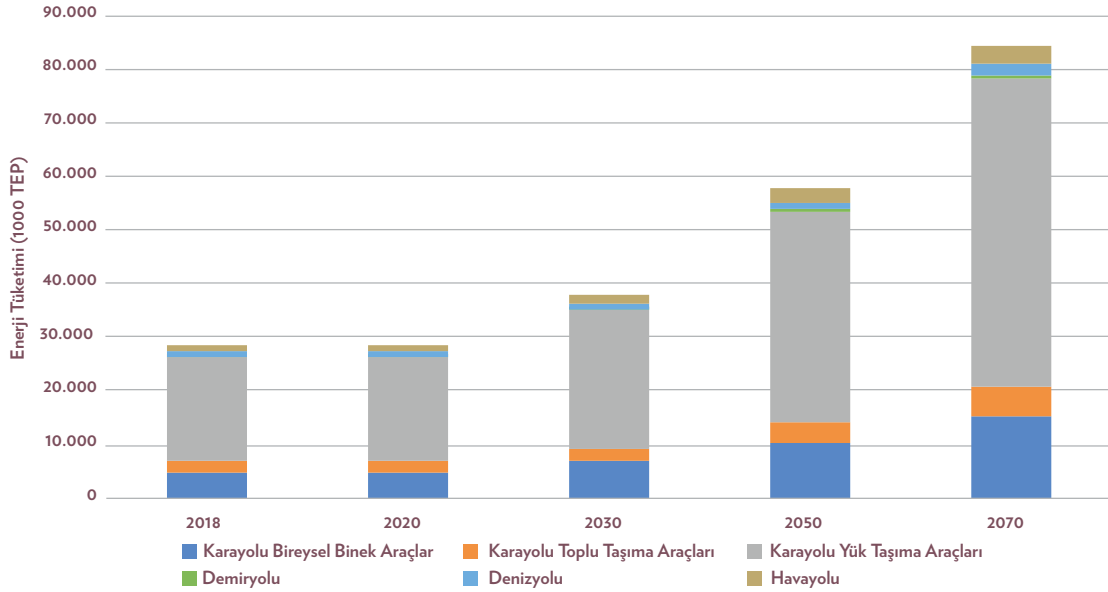
Tablo 7.4. Ulaşım araçlarında enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonunu hesaplamak için katsayılar (tCO₂/TEP)

Yıl	Karayolu Bireysel Binek Araçlar	Karayolu Toplu Taşıma Araçları	Karayolu Yük Taşıma Araçları	Demiryolu	Denizyolu	Havayolu
2018	3,15	2,89	2,89	1,81	2,08	2,93
2020	3,08	2,80	2,80	1,75	2,02	2,85
2030	2,95	2,67	2,67	1,67	1,93	2,71
2050	2,82	2,34	2,34	1,50	1,72	2,43
2070	2,90	2,06	2,06	1,37	1,58	2,23

Tablo 7.5. Baz senaryoda ulaşım sektöründe araçlara göre toplam enerji tüketiminde 2018-2070 arasında artış (1000 TEP)

Yıl	Karayolu Bireysel Binek Araçlar	Karayolu Toplu Taşıma Araçları	Karayolu Yük Taşıma Araçları	Demiryolu	Denizyolu	Havayolu	Toplam
2018	5.040	1.931	19.315	216	703	1.247	28.452
2020	5.055	1.937	19.366	217	705	1.250	28.530
2030	6.763	2.575	25.745	288	937	1.662	37.970
2050	10.381	3.911	39.110	437	1.423	2.525	57.787
2070	15.303	5.710	57.102	639	2.078	3.687	84.518

Şekil 7.1. Baz senaryoda ulaşım sektöründe araçlara göre toplam enerji tüketiminde 2018-2070 arasında artış (1000 TEP)



7.2.1.2. Karbondioksit emisyonları:

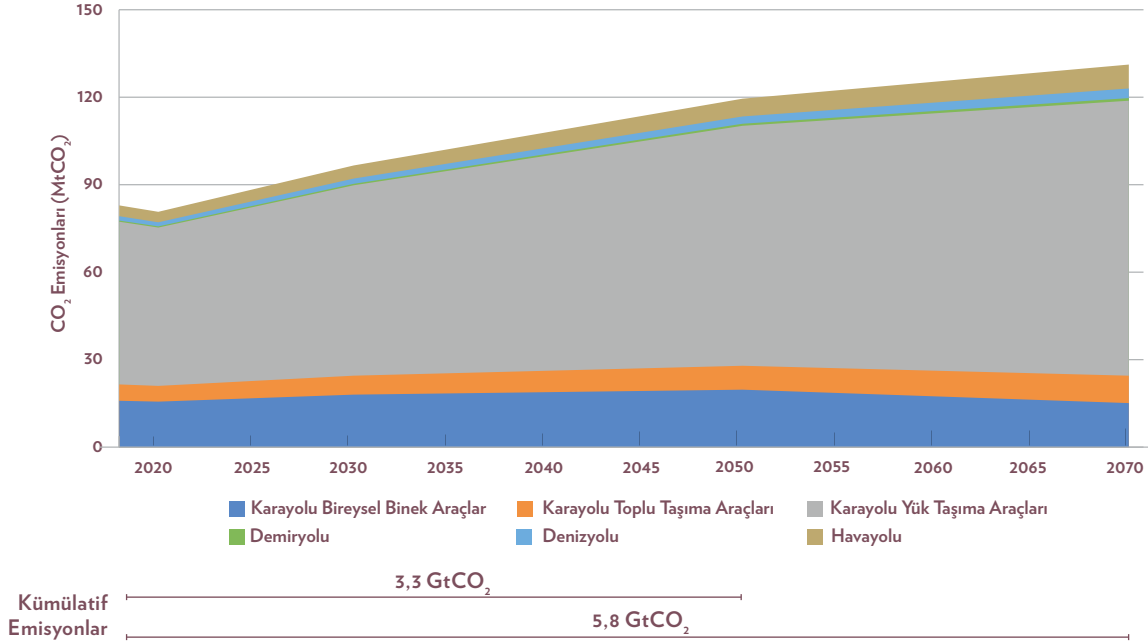
Baz Senaryo'da ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarının artışı da Tablo 7.6 ve Şekil 7.2'de gösterilmiştir. Buna göre 2018'de 83 MtCO₂ olan ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları 2030'da %17 artarak 97 MtCO₂'ye, 2050'de %44 artarak 120 MtCO₂'ye ve 2070'te %58 artarak 131 MtCO₂'ye çıkmaktadır.

Ulaşım sektöründe CO₂ emisyonlarının en büyük kısmı karayolu yük taşımacılığında kaynaklanmakta ve artarak toplam emisyonlar içinde 2030'a kadar %67 olan oranı 2050'de %69'a ve 2070'te %71'e çıkmaktadır. Havayolu taşımacılığının payı da zamanla artmakta, 2030'a kadar %5'in altında olan payı 2050'de %5'i, 2070'te %6'yı geçmektedir.

Tablo 7.6. Baz senaryoda ulaşım sektöründe araçlara göre CO₂ emisyonlarında 2018-2070 arasında artış (MtCO₂)

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
2030	18,0	6,5	65,3	0,5	1,8	4,5	96,5
2050	19,7	8,2	82,3	0,7	2,5	6,1	119,5
2070	15,1	9,4	94,3	0,9	3,3	8,2	131,2

Şekil 7.2. Baz senaryoda ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarının 2018-1070 arasında artışı ve kümülatif emisyon düzeyi



Baz Senaryo'da 2050'ye kadar ulaşım sektöründen kaynaklanan kümülatif CO₂ emisyonu 2050'de 3,3 GtCO₂, 2070'te ise 5,8 GtCO₂ olarak gerçekleşmektedir.

Baz Senaryo'da ulaşım sektörünün kümülatif emisyonları 2018-2050 arasında toplam kümülatif emisyonların %18'ini teşkil ederek 3,3 GtCO₂'ye ve 2018-2070 arasında toplam kümülatif emisyonların %17'sini teşkil ederek 5,8 GtCO₂'ye ulaşmaktadır. Böylece sadece ulaşım sektörü bu çalışmada adil paylaşım ilkesi gereği Türkiye'ye ayrılan karbon bütçesinin (7,95 GtCO₂) %42'sini 2050'ye, %73'ünü 2070'e kadar tüketmektedir.

7.2.2. Net Sıfır Senaryosu:

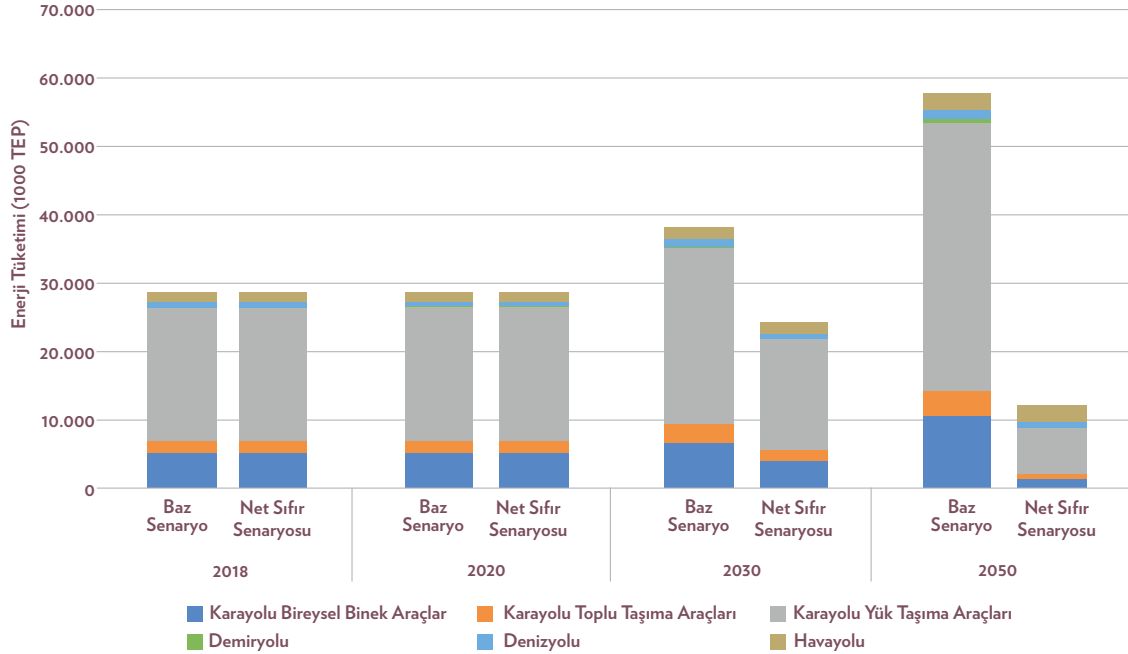
7.2.2.1. Ulaşımında elektrik tüketimi:

Yukarıda belirtilen varsayımlar altında elektrikli araç sayısındaki artış, raylı toplu taşımaya ve demiryolu yük taşımacılığına yönelik, karayolu yük taşımacılığında düşük oranda yeşil hidrojenli araç kullanımı ve yine düşük oranda seyahat davranış değişikliğinin etkisiyle Net Sıfır Senaryosu altında bütün ulaşım türlerinde enerji tüketimi Tablo 7.7'de (ve Baz Senaryo ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7.4'te) TEP birimiyle verilmiştir. Buna göre ulaşım sektörünün 2018'de yaklaşık 28,5 milyon TEP olan enerji tüketimi 2030'da %15 azalarak 24 milyon TEP'e ve 2050'de %57 azalarak 12 milyon TEP'e düşmektedir.

Tablo 7.7. Net Sıfır Senaryosunda ulaşım sektöründe araçlara göre ve toplam enerji tüketiminin 2018-2070 arasındaki değişimi (1000 TEP)

Yıl	Karayolu Bireysel Binek Araçlar	Karayolu Toplu Taşıma Araçları	Karayolu Yük Taşıma Araçları	Demiryolu	Denizyolu	Havayolu	Toplam
2018	5.040	1.931	19.315	216	703	1.247	28.452
2020	5.055	1.937	19.366	217	705	1.250	28.530
2030	3.993	1.619	16.189	72	727	1.662	24.262
2050	1.334	661	6.954	0	666	2.525	12.139

Şekil 7.3. Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryo ile karşılaştırmalı olarak ulaşım sektöründe araçlara göre ve toplam enerji tüketiminin 2018-2070 arasındaki değişimi (1000 TEP)



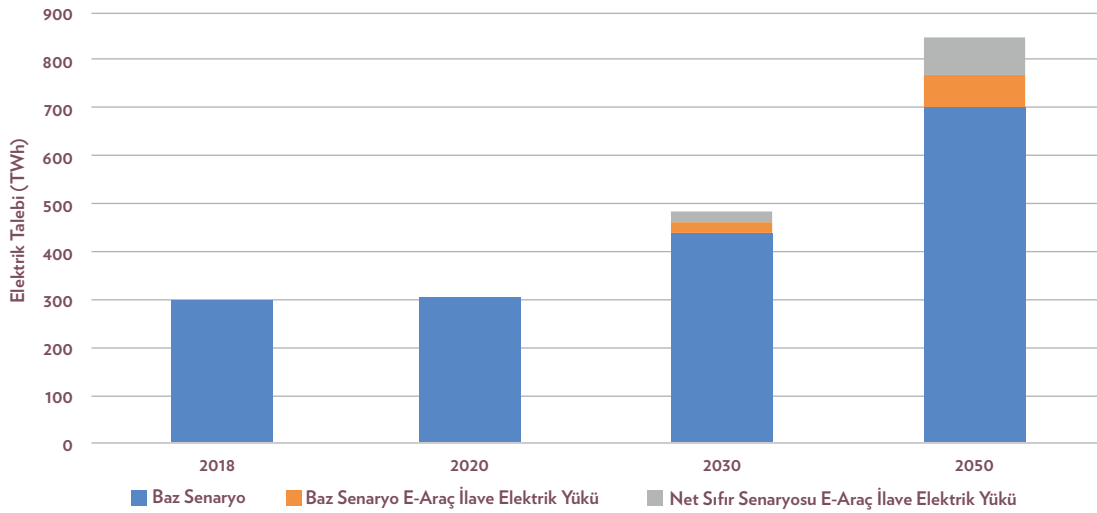
Ulaşım sektöründe emisyonları azaltmak için elektrikli araçların devreye girmesi, elektrik talebini artırarak elektrik sektörü üzerinde ilave yük oluşturmaktadır. Baz Senaryo'daki elektrik talebine Baz Senaryo altında ve daha da fazla olarak

Net Sıfır Senaryosu'nda sisteme dahil olacağı varsayılan elektrikli araç sayılarının yaratacağı ilave elektrik talebi Tablo 7.8 ve Şekil 7.5'te gösterilmiştir.

Tablo 7.8. Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda sisteme katılacağı varsayılan elektrikli araçların yaratacağı ilave elektrik yükü nedeniyle elektrik talebinde gerçekleşen artış (TWh)

Yıl	Baz Senaryoda Elektrik Talebi	Baz Senaryoda E-Araçların İlave Elektrik Yükü	Net Sıfır Senaryosunda E-Araçların İlave Elektrik Yükü	Net Sıfır Senaryosunda Elektrik Talebi
2018	300	0	0	300
2020	305	0	0	305
2030	440	20	26	486
2050	700	69	77	847

Şekil 7.4. Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda sisteme katılacağı varsayılan elektrikli araçların yaratacağı ilave elektrik yükü nedeniyle elektrik talebinde gerçekleşen artış (TWh)



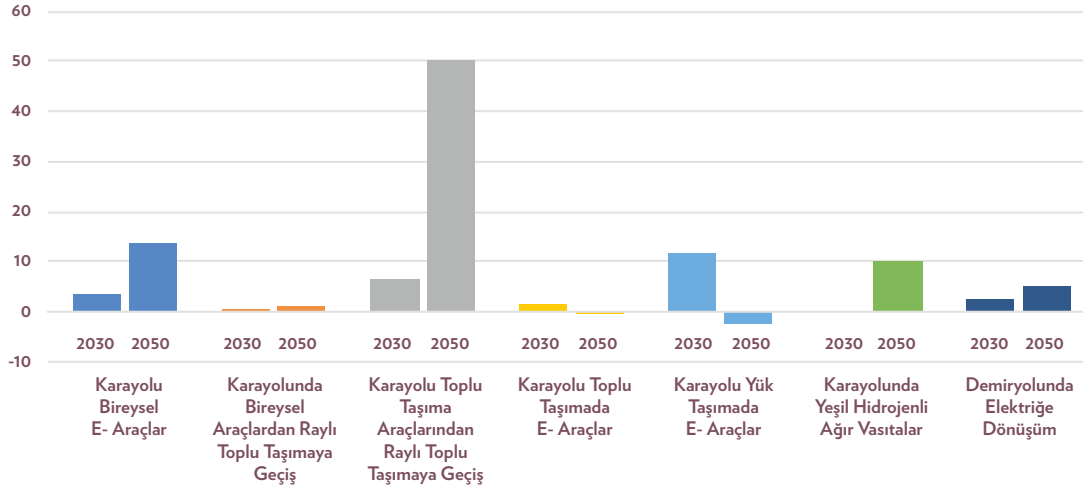
Ulaşım sektöründe elektrifikasyondan kaynaklanan ilave elektrik yüklerinin hangi dönüşümlerden geldiği Tablo 7.9 ve Şekil 7.6'da gösterilmektedir. İlave elektrik yüklerinin 2030'da en fazla karayolunda yük taşımacılığında kullanılan

araçlarda elektrikli araç sayısının artmasından, 2050'ye kadar en fazla ise karayolunda toplu taşımadan raylı toplu taşımaya ve bireysel elektrikli araçların artışından kaynaklandığı görülmektedir.

Tablo 7.9. Net Sıfır Senaryosunda ulaşım sektöründe elektrifikasyondan kaynaklanan ilave elektrik yüklerinin dönüşüm tiplerine göre dağılımı (TWh)

Yıl	Karayolu Bireysel E-Araçlar	Karayolunda Bireysel Araçlardan Raylı Toplu Taşımacıya Geçiş	Karayolu Toplu Taşıma Araçlarından Raylı Toplu Taşımacıya Geçiş	Karayolu Toplu Taşımacıda E-Araçlar	Karayolu Yük Taşımacıda E-Araçlar	Karayolunda Yeşil Hidrojenli Ağır Vasıtalar	Demiryolunda Elektrik Dönüşüm	Toplam İlave Elektrik Yükü
2030	3	1	7	1	12	0	3	26
2050	14	1	50	0	-2	10	5	77

Şekil 7.5. Net Sıfır Senaryosunda ulaşım sektöründe elektrifikasyondan kaynaklanan ilave elektrik yüklerinin dönüşüm tiplerine göre dağılımı (TWh)



7.2.2.2. Karbondioksit emisyonları:

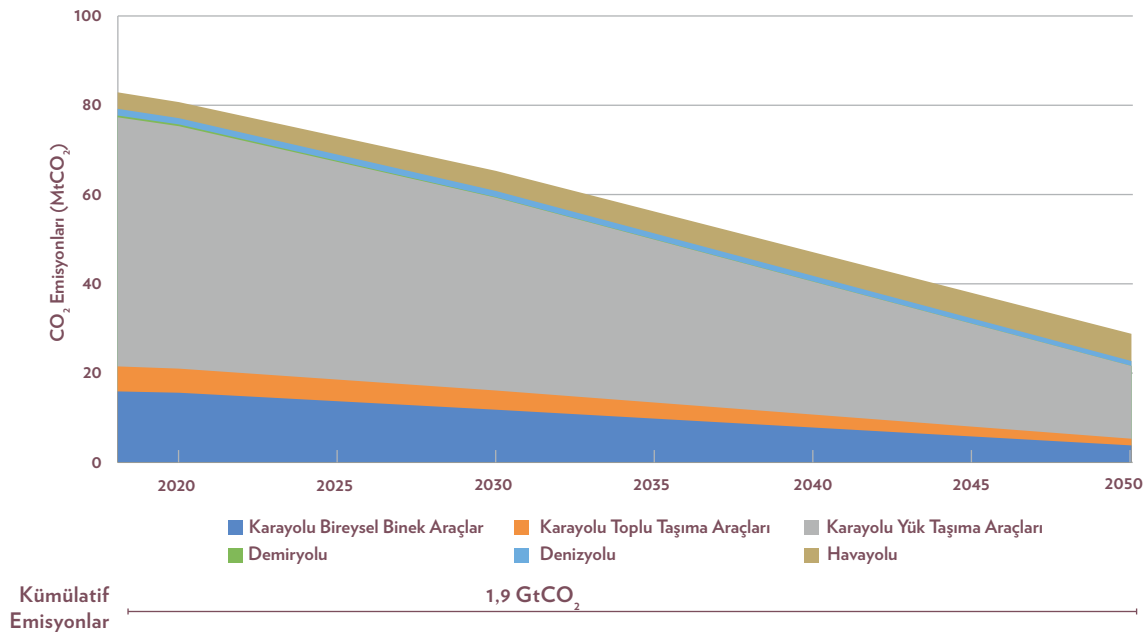
Net Sıfır Senaryosu'nda azalan enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları Tablo 7.10 ve Şekil 7.7'de (ve Baz Senaryo ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7.8'de) gösterilmiştir. Buna göre 2018'de 83 MtCO₂ olan ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları 2030'da 2018 seviyesine göre %21 azalarak 65 MtCO₂'ye ve 2050'de %65 azalarak 29 MtCO₂'ye düşmektedir. Ulaşım sektöründe CO₂ emisyonlarının en büyük kısmı

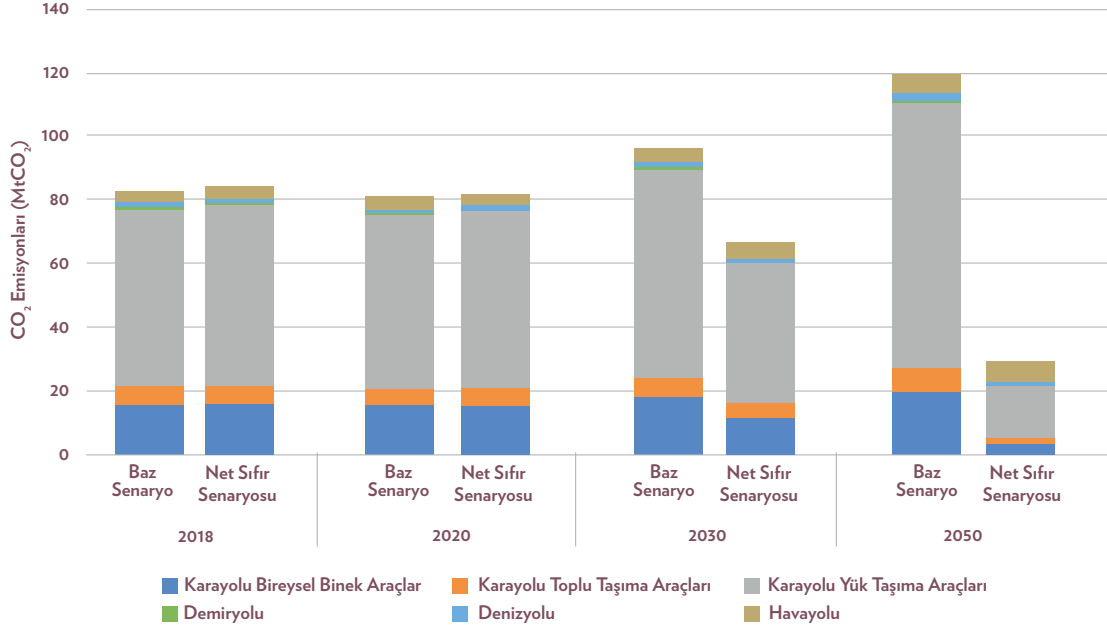
karayolu yük taşımacılığında kaynaklanmakta, ancak 2018'de %67'nin üzerinde olan payı 2030'da %66'ya, 2050'de %56'ya düşmektedir. Buna karşılık havayolu taşımacılığının 2018'de %4,5 olan ulaşım emisyonlarındaki payı 2030'da %7'ye ve oranı hızla artarak 2050'de %21'e çıkmaktadır. Karayolunda bireysel taşımacılığın ulaşım emisyonlarındaki payı ise 2018'de %19 iken 2030'da %18'e ve 2050'de elektrikli araçların artışına bağlı olarak %13'e düşmektedir.

Tablo 7.10. Net Sıfır Senaryosunda ulaşım sektöründe araçlara göre CO₂ emisyonlarının 2018-2050 arası değişimi (MtCO₂)

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
2030	11,8	4,3	43,2	0,1	1,4	4,5	65,3
2050	3,8	1,5	16,3	0,0	1,1	6,1	28,9

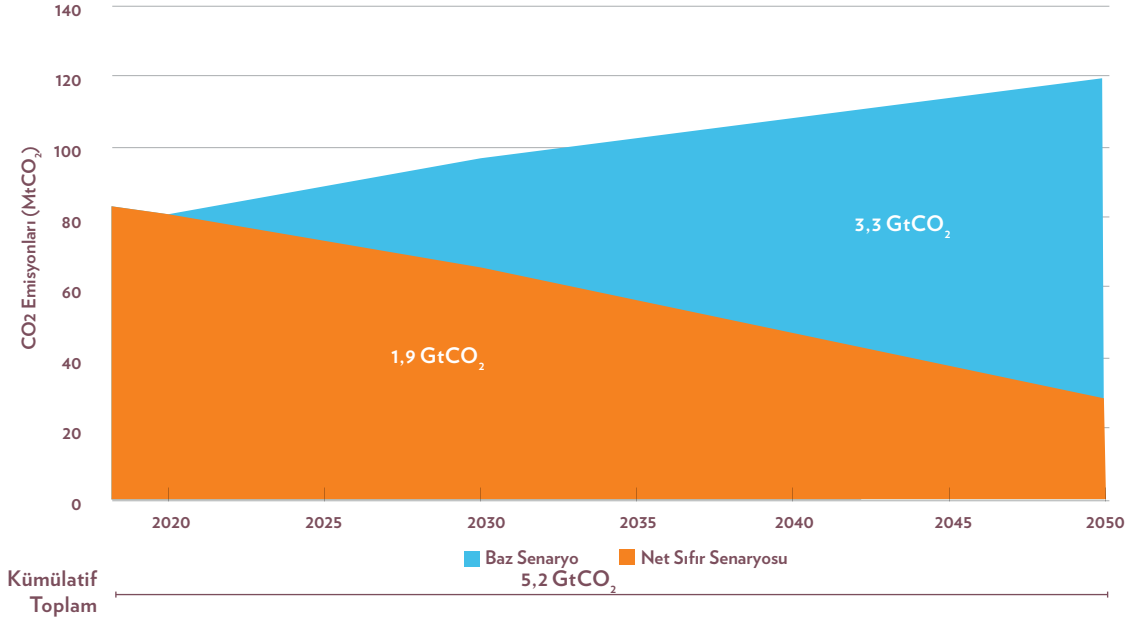
Şekil 7.6. Net Sıfır Senaryosunda ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarının 2018-2050 arasındaki seyri ve kümülatif emisyon düzeyi



Şekil 7.7. Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryo ile karşılaştırmalı olarak ulaşım sektöründe araçlara göre CO₂ emisyonlarının 2018-2050 arası değişimi (MtCO₂)

Ulaşım sektöründen kaynaklanan emisyonların 2018'den 2050'ye kadar Baz Senaryo'da ve Net Sıfır Senaryosu'nda izlediği seyir Şekil 7.9'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Buna göre Net Sıfır Senaryosu'nda emisyonlar Baz Senaryo'nun aksine 2018'de tepe noktasındadır. Ulaşım sektörünün kümülatif emisyonları ise 1,9 GtCO₂'de sınırlı kalarak Baz Senaryo'nun kümülatif emisyonlarından (3,3 GtCO₂) %43 azalmakta, 1,4 GtCO₂ düşük kalmaktadır. Net Sıfır Senaryosu'nda ulaşım sektörünün kümülatif emisyonları Türkiye'nin adil paylaşım ilkesine uygun olarak bu çalışmada kabul edilen karbon bütçesinin (7,95 GtCO₂) 2050'ye kadar yaklaşık %24'ünü kullanmaktadır.

Şekil 7.8. Baz senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda karşılaştırmalı olarak ulaşım sektörünün CO₂ emisyonları (MtCO₂)



8. BİNALAR

Türkiye’de binalar, enerji kaynaklı karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık %12’sinden sorumludur ve bunun da %73,5’i konutlardan, %26,5’i ticari ve kurumsal binalardan kaynaklanır. Binalardan kaynaklanan emisyonlar 1990’dan 2018’e kadar %92 artmış, fosil yakıtlara bağlı emisyonlar içindeki payı ise %6 azalmıştır.

8.1. VARSAYIMLAR

8.1.1. 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’da 2050’den sonraki değerler için son on yıllık verilere göre ekstrapolasyon yapılmıştır. 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 CO₂ emisyonu hesabında kullanılan emisyon faktörleri için ise Türkiye’nin Ulusal Sera Gazı Envanteri’nden yararlanılmıştır (TÜİK, 2021). Binaların CO₂ emisyonları bina türüne göre (konutlar ve ticari/kurumsal binalar) ve kullanılan yakıt türüne göre hesaplanmıştır (ETKB, 2020).

8.1.2. 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 azaltılmak 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, elektrik 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

Sonuç olarak 2050'ye kadar bina türü (konutlar ve ticari/kurumsal binalar) ve yakıt bazında yıl bazında CO₂ emisyonları hesaplanmıştır.

Modelde kullanılan bina performans ve yenilenme oranlarına dair varsayımlar Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu için Tablo 8.1'de gösterilmiştir:

Tablo 8.1. Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda 2050'ye kadar yıllık olarak binalarda yıkım ve yenilenme oranlarına dair varsayımlar (%)

Varsayımlar	Baz Senaryo	Net Sıfır Senaryosu
Konut Yıkım Oranı (yıl)	0,20	3,77
Ticari/Kurumsal Bina Yıkım Oranı (yıl)	0,06	0,56
Yenileme Oranı (yıl)	0,49	1,69

Modelde kullanılan yakıt dönüşümü ve elektriğe geçiş oranlarına dair varsayımlar Tablo 8.2'de gösterilmiştir. Baz Senaryo'da bu müdahale seçeneklerinin kullanılmadığı varsayıldığı için, tabloda Net Sıfır Senaryosu'nda 2030 ve 2050 için öngörülen geçiş oranları verilmiştir:

Tablo 8.2. Net Sıfır Senaryosunda yakıt dönüşümü ve elektriğe geçiş oranlarına dair varsayımlar (%)

Varsayımlar	2030	2050
Isı Pompası COP	4,7	5,1
Doğal Gazdan Hidrojene Geçiş Oranı	0,5	4,3
Kömürden Doğal Gaza Geçiş Oranı	2	0
Doğal Gazdan Elektriğe Geçiş Oranı	46	100
Kömürden Elektriğe Geçiş Oranı	100	100

8.2. ELEKTRİK TÜKETİMİ (BAZ SENARYO VE NET SIFIR SENARYOSU)

Net Sıfır Senaryosu'nda, binalarda, bina türlerine ve yakıt türlerine göre nihai elektrik tüketimi (TWh) Baz Senaryo'yla karşılaştırmalı olarak Tablo 8.3'te verilmiştir.

Konutlarda ısınma amaçlı elektrik tüketimi her iki senaryoda da 2018 seviyesine göre artmaktadır, ancak Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'ya göre 2030'da 2,2 kat, 2050'de 2,6 kat daha fazladır. Konutlarda fosil yakıt tüketimi ise Baz Senaryo'da da 2050'de 2018'e göre %50'nin üzerinde azal-

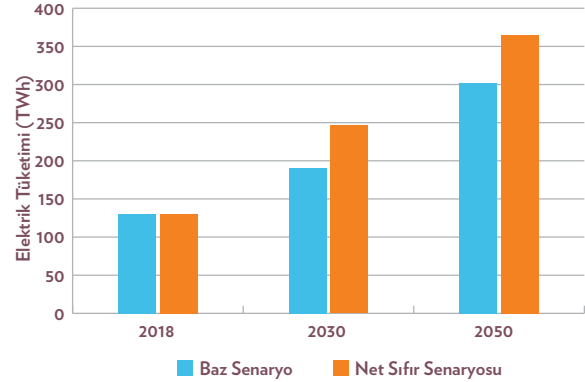
Tablo 8.3. Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda binalarda elektrik tüketimi varsayımları (TWh)

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

maktadır, 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 gaz geçiş nedeniyle iki katına çıkmakta, Net Sıfır Senaryosu'nda ise elektrifikasyon nedeniyle 2030'da %13 azalmakta, 2050'de ise sıfırlanmaktadır. Net Sıfır Senaryosu'nda tüm binalarda sıvı yakıt ve biyokütle tüketimi de 2030'da sıfırlanmaktadır.

Net Sıfır Senaryosu'nda tüm binalarda, elektrik tüketimi Baz Senaryoyla karşılaştırmalı olarak Şekil 8.1'de verilmiştir.

Grafikte Net Sıfır Senaryosu'nda binalarda ısınma ve yemek pişirme gibi nihai tüketim noktalarında fosil yakıtlardan elektrığe geçiş nedeniyle Baz Senaryo'ya göre elektrik tüketiminde artış olduğu görülmektedir. Binalarda elektrifikasyonun toplam elektrik talebinde neden olacağı artış Tablo 8.4 ve 8.5'te verilmiştir.

Şekil 8.1. Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda 2018, 2030 ve 2050'de binalardan kaynaklanan elektrik tüketimi (TWh)**Tablo 8.4.** Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda 2018, 2030 ve 2050'de binalardan kaynaklanan elektrik tüketimi (TWh)

Yıl	Baz Senaryo	Net Sıfır Senaryosu
2018	130,0	130,0
2030	190,4	246,2
2050	301,9	364,9

Tablo 8.5. Binalarda elektrifikasyon nedeniyle Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre 2030 ve 2050'de elektrik talebinde artış.

	2030		2050	
	Elektrik Talebi (TWh)	BS'ye göre Değişim (%)	Elektrik Talebi (TWh)	BS'ye göre Değişim (%)
Baz Senaryo	231,7	-	334,5	-
Net Sıfır Senaryosu	291,6	+26	395,3	+18

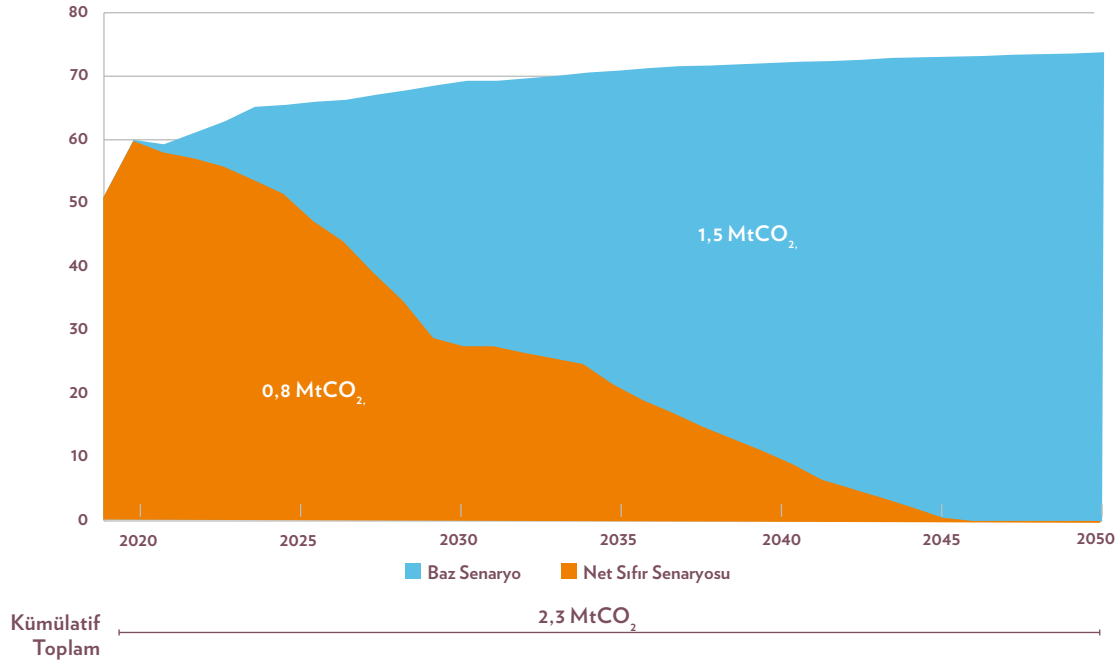
8.3. KARBONDİOKSİT EMİSYONLARI (BAZ SENARYO VE NET SIFIR SENARYOSU)

Net Sıfır Senaryosu'nda binalarda, bina türlerine ve yakıt türlerine göre nihai elektrik tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları Baz Senaryoya karşılaştırmalı olarak Tablo 8.6 ve Şekil 8.2'de verilmiştir.

Tablo 8.6. Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda 2018, 2030, 2040 ve 2050'de binalardan kaynaklanan CO₂ emisyonları (MtCO₂).

Yıl	Baz Senaryo	Net Sıfır Senaryosu
2018	50,9	50,9
2030	69,3	27,5
2040	72,3	8,9
2050	73,8	0,0

Şekil 8.2. Baz senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda karşılaştırmalı olarak binalardan kaynaklanan CO₂ emisyonları (MtCO₂)



Binalardan kaynaklanan toplam emisyonlar 2030'da 2018 seviyesine göre %46 azalarak 27,5 tona inmekte ve 2046'da sıfırlanmaktadır. Net Sıfır Senaryosu'nda bu azaltımı sağlayan en önemli müdahale, 2030 yılından itibaren konutlarda ve ticari/kurumsal binalarda ısınma amaçlı kömür ve sıvı yakıt kullanımının sonlandırılması ve kısmen doğal gazla, 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'ye eşdeğer yeşil hidrojen kullanıldığı varsayılmıştır.



9. SANAYİ VE DİĞER ÜRETİCİ SEKTÖRLER

Türkiye’de sanayiden kaynaklanan emisyonlar ile tarım ve hizmetler gibi üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan karbondioksit emisyonları ve sanayideki proses emisyonları, toplam emisyonların yaklaşık %35’ini oluşturmaktadır.

9.1. MAKROEKONOMİK MODEL

Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu için kullanılan makroekonomik modelde toplam GSYİH’yi üreten ekonomik faaliyetler 17 sektörde toplulaştırılmış ve bunlar da modelde kullanılmak üzere 5 başlık altında toplanmıştır. (Tablo 9.1)

Tablo 9.1. Toplam GSYİH’yi üreten 5 başlık altında ve 17 sektörde toplulaştırılmış ekonomik faaliyetler

Başlıca Sektörler	Sektör Kodu	Sektörler	GTAP 2014 Sektör Kodu	NACE REV. 2 Sektör Kodu
Yüksek Enerji Yoğunluklu Sanayi (YES)	eint	Enerji Yoğun Üretici Sektörler: Kimyasal, kauçuk, plastik ürünler; Metal ürünler, Metaller	33, 36, 37	20-22, 24.4-24.4, 25
	nmm	Metal Harici Madenler: Çimento, alçı, kireç, taş, beton	34	23
	irst	Demir-Çelik: temel üretim ve döküm işleri	35	24.1-24.3
Düşük Enerji Yoğunluklu Sanayi (DES)	othr	Diğer Üretici Sektörler: Gıda, tekstil, giyim, motorlu taşıtlar, elektronik, diğer ulaşım araçları	19-30, 38-42,	C 10-12
	tran	Ulaşım	59-61	49-51
	ppp	Kağıt ürünleri, yayıncılık	31	17-18
	otmn	Diğer Madencilik: Metal cevherler, uranyum, kıymetli taşlar, diğer madenler ve taşocakları	18	07-08
Tarım (TAR)	agri	Tarım ve Hayvancılık, Ormançılık, Balıkçılık	1-14	A 1-3
Hizmetler (HİZ)	serv	Hizmet Sektörü	56-58, 62-68	35.2, 35.3, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 52, 53, 55, 56, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U
Enerji (ENE)	oil	Petrol: Ham petrol ve doğal gaz çıkarma	16	06.1
	gas	Gaz: Ham petrol ve doğal gaz çıkarma, gaz dağıtımı	17, 55	06.2
	coal	Kömür: taş kömürü, linyit ve turba madenciliği ve aglomerasyonu	15	05
	roil	Petrol ve kömür ürünleri	32	19
	NucE	Nükleer Elektrik	44	35,11
	RnwE	Yenilenebilir Elektrik	47, 48, 50, 52, 54	
	FosE	Fosil Yakıt Kaynaklı Elektrik	45, 46, 49, 51, 53	
	TnD	İletim ve Dağıtım	43	35.12-35.14

Tablo 1'de görüldüğü şekilde 5 başlık altında toplanan üretici sektörlerin 2018 yılındaki toplam üretim ve ihracat içindeki payları ile enerji yoğunluğu ve CO₂ emisyonları Tablo 2'de gösterilmiştir.

9.2. VARSAYIMLAR

Üretici sektörlerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının Baz Senaryo'da 2018'den 2070'e ve Net Sıfır Senaryosu'nda 2018'den 2050'ye kadar nasıl bir seyir izleyeceği, makroekonomik modelde aşağıda görüldüğü gibi talebin 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.

9.2.1. Talep artışı:

Türkiye'de yüksek emisyonlu sanayide talebin Uluslararası Enerji Ajansı'nın küresel talep projeksiyonlarına uygun bir şekilde değişeceği varsayımıyla (IEA, 2021),

- 1 | Çimento gibi metal harici madenler sektöründe küresel talebin önce artacağı ancak daha sonra azalarak 2050'de 2020 düzeyinde olacağı ve 2070'e kadar daha da azalacağı;
- 2 | Demir çelik sektöründe küresel talebin artarak 2050'de 2020 düzeyinin %12 üzerinde gerçek-

Tablo 9.2. 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 CO₂ emisyonları** Sadece enerji sektörünün kendi enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları

Tablo 9.3. Yüksek Emisyonlu Sanayi (YES) sektörlerinde yıllar içinde varsayılan talep değişimi

YES Sektörleri	Baz Senaryo					Net Sıfır Senaryosu			
	2020	2030	2040	2050	2070	2020	2030	2040	2050
Metaller Harici Madenler: Çimento, vb	1,00	1,29	1,56	1,84	2,51	1,00	1,12	1,08	1,00
Demir-Çelik	1,00	1,34	1,64	1,94	2,60	1,00	1,18	1,15	1,12
Enerji Yoğun Üretici Sektörler	1,00	1,34	1,66	1,99	2,74	1,00	1,32	1,30	1,30

leşeceği, 2070'e kadar ise 2020 düzeyine gerileyeceği;

- 3 | Kimya gibi diğer enerji yoğun sektörlerde küresel talebin 2050'de 2020 düzeyinin %30 üzerinde gerçekleşeceği, 2070'e kadar ise 2020 düzeyine gerileyeceği varsayılmıştır. (Tablo 9.3)

9.2.2. Enerji (ve proses) verimliliği:

Yüksek emisyonlu sanayi sektörlerinde enerji verimliliğindeki artışın Net Sıfır Senaryosu'na katkısının 2020-2030 arasında daha yüksek olduğu ve bu katkının izleyen on yıllarda daha düşük bir tempoda gerçekleşeceği varsayılmıştır (IEA, 2021). 2030'dan sonraki dönemde yeni teknolojilerin devreye girmesi ile enerji verimliliği

politikalarından yararlanmayı sağlayan politikalar 2020-2030 arasında daha hızlı bir şekilde uygulamaya konabilecektir. Enerji verimliliğindeki artışın katkısının diğer sektörlerde de YES'de olduğu gibi 2020-2030 arasında daha güçlü olacağı varsayılmıştır. Düşük emisyonlu sanayi sektörlerinde 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 9.4, Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu altında üretici sektörlerde enerji verimliliği artış oranı üzerine varsayımları (Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'ya göre) vermektedir.

Tablo 9.4. Tüm üretici sektörlerde (Enerji hariç) yıllar içinde Baz Senaryoda ortalama enerji verimliliğinde varsayılan artış oranı (2018 TL/TEP) ve Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre ortalama enerji verimliliğinde varsayılan artış oranı (2018 TL/TEP)

Sektörler	Baz Senaryo				Net Sıfır Senaryosu		
	2030	2040	2050	2070	2030	2040	2050
YES	0,62	0,60	0,00	0,93	1,73	1,53	1,02
DES	0,34	1,06	1,36	2,00	3,37	1,50	1,01
TAR	0,24	0,34	0,26	0,56	4,22	1,05	1,17
HİZ	0,00	0,00	0,12	0,74	3,93	1,05	1,17

Tablo 9.5. Tüm üretici sektörlerde (Enerji hariç) yıllar içinde elektriğin toplam enerji içindeki oranında varsayılan değişim (%)

Sektörler	Baz Senaryo					Net Sıfır Senaryosu			
	2018	2030	2040	2050	2070	2018	2030	2040	2050
YES	23,2	23,3	24,7	25,9	27,1	23,2	24,0	26,0	26,0
DES	47,2	49,3	50,9	52,5	55,5	47,2	50,0	60,0	73,0
TAR	20,2	20,5	21,2	21,8	21,2	20,2	25,0	30,0	40,0
HİZ	55,9	57,7	59,4	61,1	63,9	55,9	60,0	60,0	73,0

9.2.3. Elektrifikasyon:

Tüm sektörlerde toplam enerji tüketiminde elektriğin payı Uluslararası Enerji Ajansı'nın Net Sıfır Raporu'ndan yola çıkılarak Tablo 9.5'te görüldüğü gibi varsayılmıştır (IRENA, 2018; IEA, 2021). Buna göre yüksek emisyonlu sanayilerde elektrifikasyon oranındaki artışın düşük, düşük emisyonu sanayilerde ve tarımda ise daha yüksek düzeyde olacağı varsayılmaktadır. Hizmet sektöründe elektrifikasyonun 2050'den sonra daha fazla artacağı varsayılmıştır. 2018'deki elektrifikasyon oranı enerji denge tablolarından elde edilmiştir (ETKB, 2020).

9.2.4. Yenilenebilir enerji kullanımı:

Yüksek emisyonlu sektörler ve fosil yakıt vb. enerji kaynakları üretimi hariç, tüm diğer üretici sektörlerde doğrudan (sektörün tükettiği elektriğin içindeki yenilenebilir kaynaklar hariç) yenilenebilir enerjinin toplam enerji tüketimindeki payında artış varsayımları Tablo 9.6'da verilmiştir (IRENA, 2018; Saygin et al., 2011; Saygin et al., 2014). 2018'de tarımdaki yenilenebilir kaynakların oranı enerji denge tablolarından elde edilmiştir. Güncel olarak ilgili sektörlerde doğrudan yenilenebilir kaynak kullanımı ihmal edilebilir düzeyde olduğu için sıfır kabul edilmiş ve Baz Senaryo'da da aynı şekilde kalacağı varsayılmıştır.

Tablo 9.6. Net Sıfır Senaryosunda tüm üretici sektörlerde (YES ve Enerji hariç) yıllar içinde doğrudan kullanılan yenilenebilir kaynakların toplam enerji içindeki oranında varsayılan değişim (%)

Sektörler	Net Sıfır Senaryosu			
	2018	2030	2040	2050
DES	-	12,0	15,0	18,0
TAR	14,0	16,0	20,0	25,0
HİZ	-	5,0	5,0	5,0

9.2.5. Yeşil Hidrojen ve Karbon Yakalama ve Gömme (CCUS):

Yeşil hidrojenin yüksek emisyonlu sanayi sektörlerinde kullanımının hemen mümkün olmayacağı, ancak 2040'lardan sonra başlayarak bu sektörlerin toplam enerji tüketimindeki payının 2050'de %5'e ve 2070'te %8'e ulaşacağı varsayılmıştır.

Karbon Yakalama ve Gömme Teknolojilerinin (CCUS) yüksek emisyonlu sanayi sektörlerinde kullanımının yine 2040'lara doğru başlayacağı ve payının bu sektörlerin toplam enerji tüketiminin 2040'ta %5'ine, 2050'de %10'una ve 2070'te %15'ine tekabül edeceği varsayılmıştır.

Diğer üretici sektörlerde yeşil hidrojen ve CCUS teknolojilerinin kullanımı varsayılmamıştır.

9.3. KARBONDİOKSİT EMİSYONLARI

9.3.1. Baz Senaryo:

Baz Senaryo'da üretici sektörlerde enerji talebi 2050'ye kadar 2 kata yakın artmaktadır. (Tablo 9.7) Hizmetler ve tarım sektöründeki artış daha yüksek olmakla birlikte, yüksek enerji yoğunluklu sektörlerdeki enerji talep artışı emisyonları daha fazla etkilemektedir.

Tablo 9.7. Baz Senaryoda üretici sektörlerde (Enerji hariç) enerji talebinde artış (TEP)

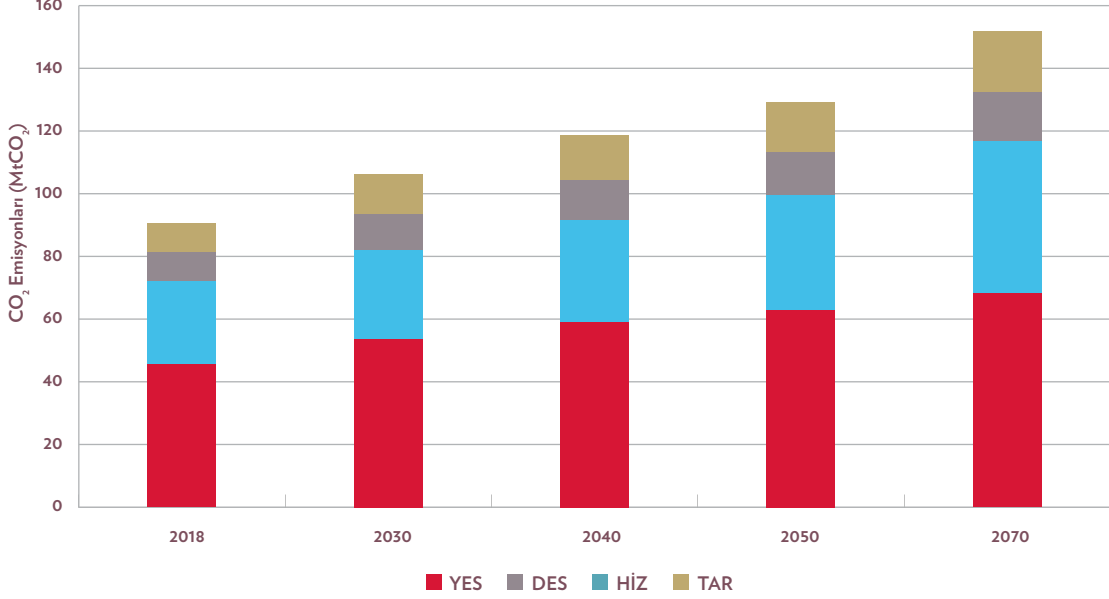
Sektörler	2018	2030	2040	2050	2070
YES	21.301,0	28.069,7	33.562,9	39.219,3	48.648,6
DES	9.986,0	12.969,7	14.921,1	16.747,2	18.388,7
TAR	3.953,8	5.795,1	7.039,5	8.389,8	11.376,6
HİZ	12.405,8	18.695,7	23.323,0	28.077,1	36.079,5
Toplam	47.646,6	65.530,2	78.846,5	92.433,4	114.493,5

Baz Senaryo'da üretici sektörlerin emisyonlarındaki artış, sektörlerimize göre on yıllık aralıklarla Tablo 9.8 ve Şekil 9.1'de verilmiştir. Sanayide, tarımda ve hizmetler sektöründe enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları 2030'da 2018 seviyesine göre %17, 2050'de %42,5 ve 2070'te %67,5 artmakta, ancak sanayi proseslerindeki artışın çok daha yüksek olması nedeniyle (2030'da %23, 2050'de %78 ve 2070'te %144), proses emisyonları dahil sanayi ve diğer üretici sektörlerin toplam emisyonlarındaki artış daha belirgin olmaktadır: 2030'da %20, 2050'de %58 ve 2070'te %99. 2018'de proses emisyonları üretici sektörlerin toplam emisyonlarının %40'ını oluştururken, bu oran 2050'de %45'e, 2070'te ise %49'a çıkmaktadır. (Şekil 9.2) Sanayide enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlarda en büyük pay sanayi proses emisyonlarının da sorumlusu olan yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde olmakla birlikte bu sektörlerin payı yıllar içinde hafifçe azalmaktadır: 2018'de %50, 2050'de %48,5 ve 2070'te %45.

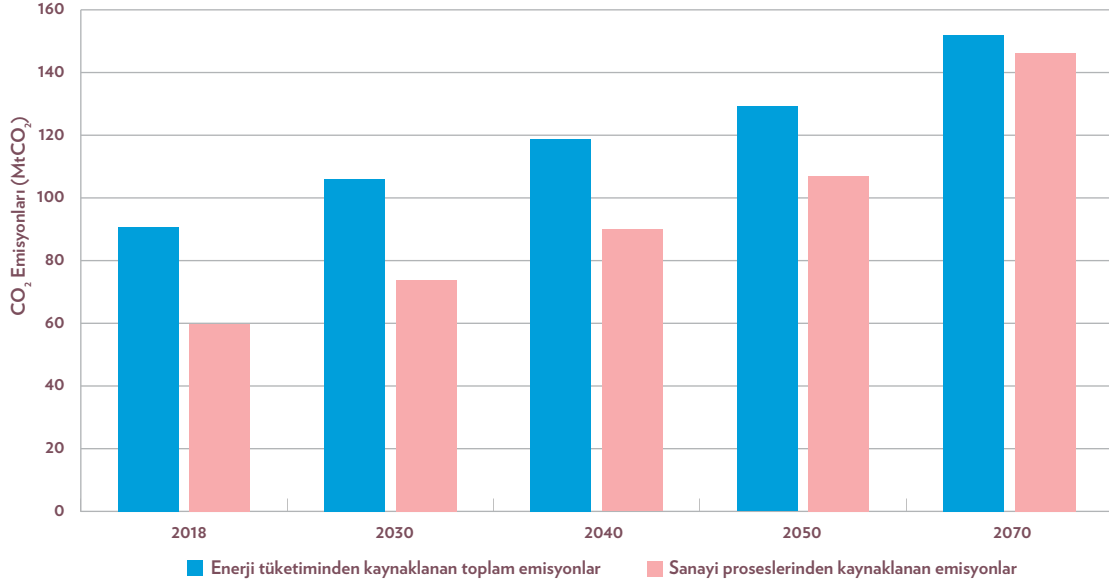
Tablo 9.8. Baz Senaryoda sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlar ve sanayinin proses emisyonları (MtCO₂)

Sektörler	2018	2030	2040	2050	2070
YES	45,5	53,6	59,1	62,9	68,2
DES	26,6	28,4	32,5	36,4	48,6
HİZ	9,2	11,3	12,7	13,8	15,6
TAR	9,4	12,8	14,5	16,0	19,5
Enerji Tüketiminden Kaynaklanan Toplam Emisyonlar	90,7	106,1	118,8	129,2	151,9
Sanayi Proseslerinden Kaynaklanan Emisyonlar	59,8	73,9	89,9	106,9	146,2
Sanayi ve Diğer Üretici Sektörlerin Toplam Emisyonları	149,8	180,0	208,7	236,1	298,1

Şekil 9.1. Baz Senaryoda sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlar (MtCO₂)



Şekil 9.2. Baz Senaryoda sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketiminden ve sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonlar (MtCO₂)



Baz Senaryo'da yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonların çoğunluğundan 2018'de emisyonlardaki payı %66 olan çimento gibi nmm kodlu sektörler sorumludur. (Tablo 9.9)

Tablo 9.9. Baz Senaryoda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde (YES) enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonların sektörlere göre dağılımı (MtCO₂)

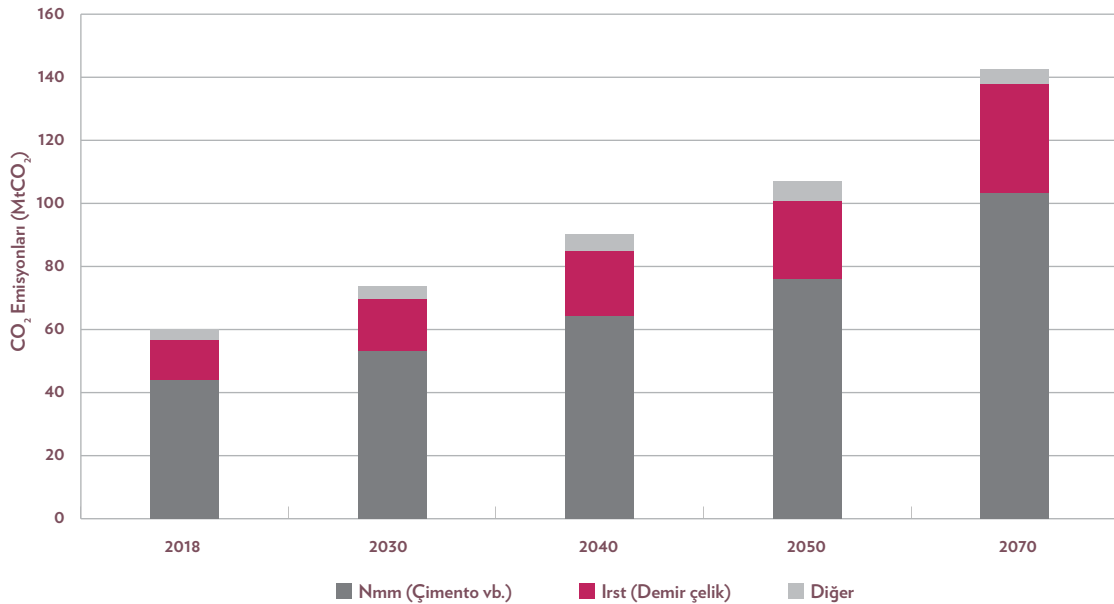
Sektör kodu	2018	2030	2040	2050	2070
Nmm (Çimento vb.)	30,1	35,4	38,2	40,0	41,7
Irst (Demir çelik)	4,2	5,0	5,7	6,2	7,1
Eint (Kimya vb.)	11,2	13,3	15,2	16,7	19,3
YES Toplam	45,5	53,6	59,1	62,9	68,2

Sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların ise 2018'de yüzde 73'ü çimento sektöründen kaynaklanmaktadır. Demir çelik sektöründe ise sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların payı enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonların payından daha yüksektir (%10'a karşılık %21) ve artmaktadır. (Tablo 9.10 ve Şekil 9.3).

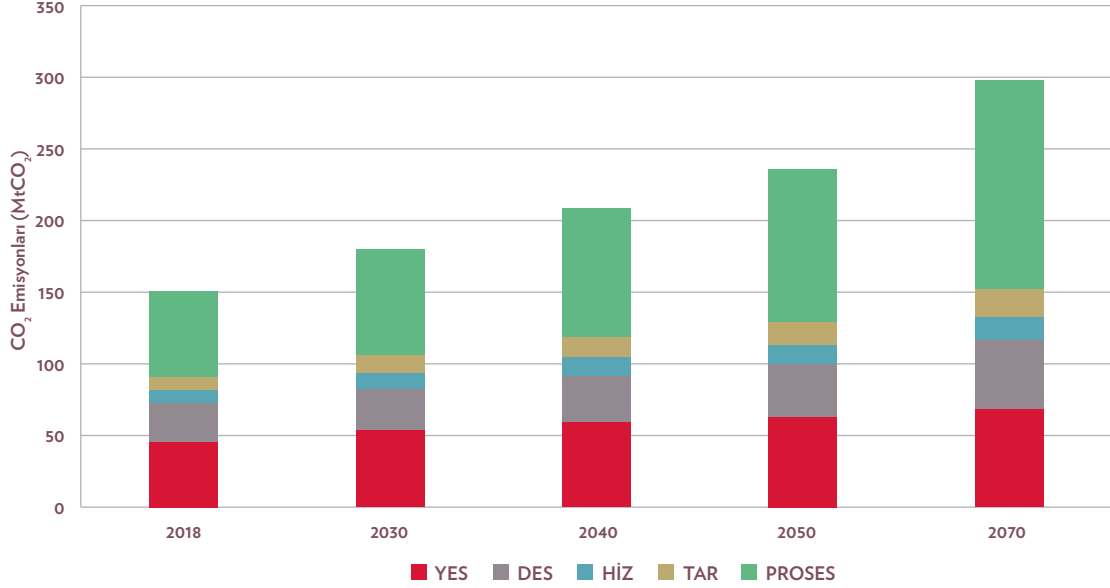
Tablo 9.10. Baz Senaryoda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde (YES) sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların sektörlere göre dağılımı (MtCO₂)

Sektör kodu	2018	2030	2040	2050	2070
Nmm (Çimento vb.)	43,9	53,0	64,1	75,8	103,3
Irst (Demir çelik)	12,8	16,8	20,8	25,0	34,5
Eint (Kimya vb.)	3,2	4,1	5,1	6,1	4,7
Toplam	59,8	73,9	89,9	106,8	146,2

Şekil 9.3. Baz Senaryoda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde (YES) sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların sektörlere göre dağılımı (MtCO₂)



Şekil 9.4. Baz Senaryoda sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketiminden ve proseslerden kaynaklanan toplam emisyonlar (MtCO₂)



Baz Senaryo'da üretici sektörlerde enerji tüketiminden ve sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların artışı Şekil 9.4'te bir arada gösterilmiştir.

9.3.2. Net Sıfır Senaryosu:

9.3.2.1. Enerjiden kaynaklanan CO₂ emisyonları:

Net Sıfır Senaryosu'nda kullanılan varsayımlar altında yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde enerji talebi azalmakta (2050'de 2018'e göre %30 azalma), düşük enerji yoğunluklu sektörlerde ve tarımda ise artış görülmekte, ancak Baz Senaryo'da görülen azalmanın altında kalmaktadır. (Tablo 9.11) Elektrik talebi ise tarım hariç bütün sektörlerde azalmaktadır. (Tablo 9.12)

Sanayi ve diğer üretici sektörlerinde enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarındaki değişim Net Sıfır Senaryosu'nda Baz Senaryo'yla karşılaştırmalı olarak 2018-2050 arasında her on

Tablo 9.11. Net Sıfır Senaryosunda üretici sektörlerde (Enerji hariç) enerji talebinde değişim (TEP)

Sektörler	2018	2030	2040	2050
YES	21.301,0	21.314,9	18.616,3	14.718,7
DES	9.986,0	9.908,3	10.839,5	12.005,0
TAR	3.953,8	3.603,8	3.911,0	4.124,4
HİZ	12.405,8	10.043,2	10.824,1	11.312,2
Toplam	47.646,6	44.870,1	44.190,9	42.160,4

Tablo 9.12. Net Sıfır Senaryosunda üretici sektörlerde (Enerji hariç) elektrik talebinde değişim (TWh)

Sektörler	2030	2050
YES	-22,1	-77,6
DES	-13,0	-9,7
TAR	1,1	3,6
HİZ	-41,9	-93,1
Toplam	-75,9	-176,7

Tablo 9.13. Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerin enerjiden kaynaklanan CO₂ emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma (MtCO₂)

Senaryo	2018	2030	2040	2050
Baz Senaryo	45,5	53,6	59,1	62,9
Net Sıfır Senaryosu	45,5	40,0	30,4	20,5

yılda bir sektörlere göre aşağıdaki tablo ve grafiklerde verilmiştir:

- 1 | Yüksek Emisyonlu Sanayi sektörlerinde emisyon azaltımı özellikle 2030'dan sonra hızlanmakta ve 2050'de emisyonlar 2018 seviyesine göre %50'den fazla azalmaktadır. (Tablo 9.13 ve Şekil 9.5)
- 2 | Düşük Emisyonlu Sanayi sektörlerinde emisyon azaltımı da özellikle 2030'dan sonra hızlanmakta ve 2050'de emisyonlar yaklaşık %75 azalmaktadır. (Tablo 9.14, Şekil 9.6)

Tablo 9.14. Düşük Enerji Yoğunluklu Sektörlerin enerjiden kaynaklanan CO₂ emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma (MtCO₂)

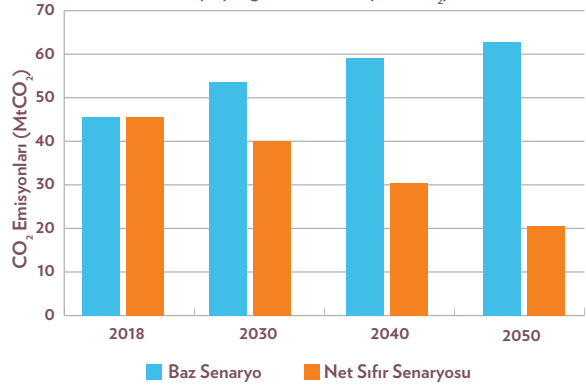
Senaryo	2018	2030	2040	2050
Baz Senaryo	26,6	28,4	32,5	36,4
Net Sıfır Senaryosu	26,6	15,9	11,7	7,1

- 3 | Tarım sektöründe enerjiden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının azaltımı 2020'den sonra başlamakta ve 2050'de emisyonlar yaklaşık %65 azalmaktadır. (Tablo 9.15, Şekil 9.7)

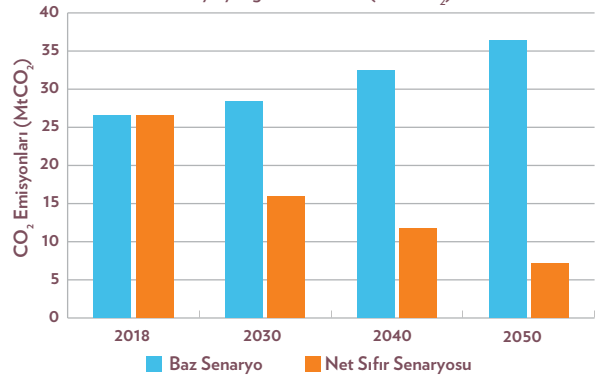
Tablo 9.15. Tarım sektöründe enerjiden kaynaklanan CO₂ emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma (MtCO₂)

Senaryo	2018	2030	2040	2050
Baz Senaryo	9,4	12,8	14,5	16,0
Net Sıfır Senaryosu	9,4	5,9	5,1	3,5

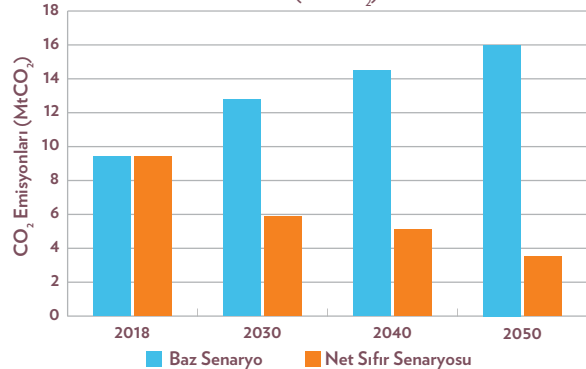
Şekil 9.5. Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerin enerjiden kaynaklanan CO₂ emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma (MtCO₂)



Şekil 9.6. Düşük Enerji Yoğunluklu Sektörlerin enerjiden kaynaklanan CO₂ emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma (MtCO₂)



Şekil 9.7. Tarım sektöründe enerjiden kaynaklanan CO₂ emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma (MtCO₂)



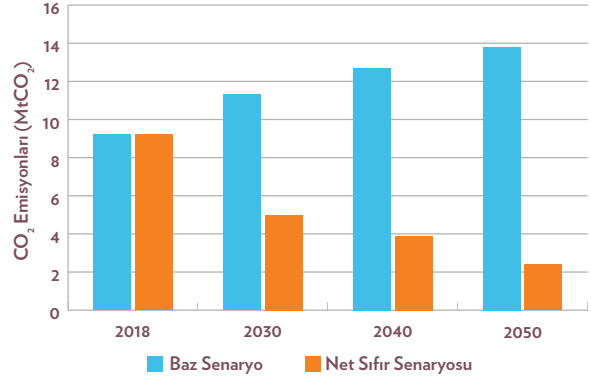
Tablo 9.16. Hizmet sektöründe enerjiden kaynaklanan CO₂ emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma (MtCO₂)

Senaryo	2018	2030	2040	2050
Baz Senaryo	9,2	11,3	12,7	13,8
Net Sıfır Senaryosu	9,2	5,0	3,9	2,4

4 | Hizmet sektöründe de emisyon azaltımı 2020'den sonra başlamakta ve 2050'de emisyonlar yaklaşık %75 azalmaktadır. (Tablo 9.16, Şekil 9.8)

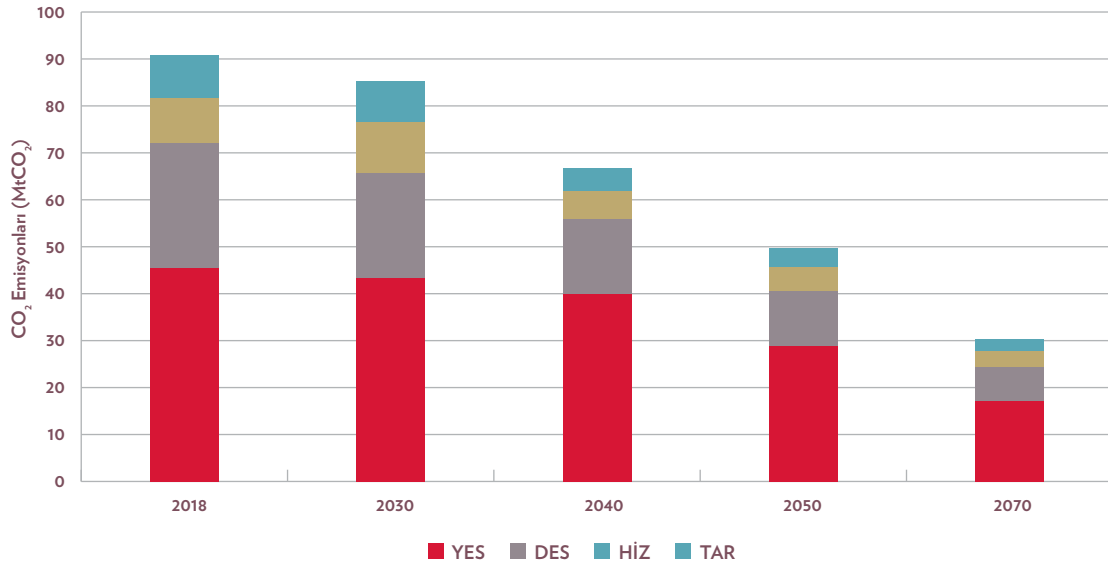
Net Sıfır Senaryosu'nda üretici sektörlerin enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonları topluca Tablo 9.18 ve Şekil 9.9'da verilmiştir. Toplam emisyonlar 2018 seviyesine göre 2030'da %26, 2050'de %67 azalmaktadır. 2050'de kalan 30 MtCO₂ emisyonun %57'si yüksek, %23,5'u ise düşük enerji yoğunluklu sanayi sektörlerinden kaynaklanmaktadır, dolayısıyla sanayiden kaynaklanan

Şekil 9.8. Hizmet sektöründe enerjiden kaynaklanan CO₂ emisyonlarında Net Sıfır Senaryosunda Baz Senaryoya göre azalma (MtCO₂)

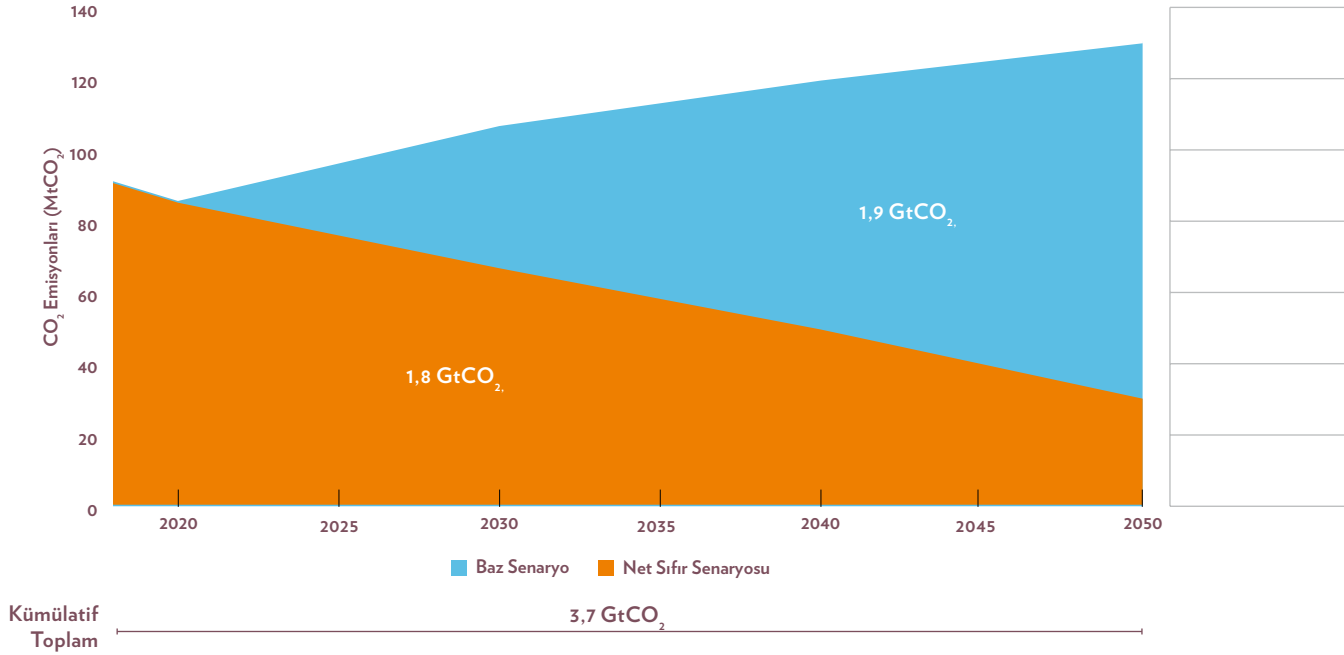


enerji emisyonlarının payı tüm üretici sektörleri içinde %80'i geçmektedir. Toplam emisyonlardaki azalma Baz Senaryo ile karşılaştırmalı olarak Tablo 9.19 ve Şekil 9.10'da görülmektedir.

Şekil 9.9. Net Sıfır Senaryosunda üretici sektörlerin (Enerji hariç) ve toplam enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarında azalma (MtCO₂)



Şekil 9.10. Baz Senaryoda ve Net Sıfır Senaryosunda karşılaştırmalı olarak sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerjiden kaynaklanan CO₂ emisyonları (MtCO₂)



Tablo 9.18. Net Sıfır Senaryosunda üretici sektörlerin (Enerji hariç) enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarında azalma (MtCO₂)

Sektörler	2018	2020	2030	2040	2050
YES	45,5	43,4	40,0	28,9	17,2
DES	26,6	22,2	15,9	11,7	7,1
TAR	9,4	10,9	5,9	5,1	3,5
HİZ	9,2	8,7	5,0	3,9	2,4
Toplam	90,7	85,2	66,8	49,6	30,2

Sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının 2018'den 2050'ye kadar Baz Senaryo'da ve Net Sıfır Senaryosu'nda izlediği seyir Tablo 9.19 ve Şekil 9.10'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Buna göre Net Sıfır Senaryosu'nda emisyonlar Baz Senaryo'nun aksine 2018'de tepe noktasındadır.

Sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan kümülatif emisyonlar ise 1,8 GtCO₂'de sınırlı kalarak Baz Senaryo'nun kümülatif emisyonlarından (3,7 GtCO₂) %51 azalmakta, 1,9 GtCO₂ düşük kalmaktadır. Net Sıfır Senaryosu'nda sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan kümülatif emisyonlar Türkiye'nin adil paylaşım ilkesine uygun olarak bu çalışmada kabul edilen karbon bütçesinin (7,95 GtCO₂) 2050'ye kadar yaklaşık %23'ünü kullanmaktadır.

Tablo 9.19. Net Sıfır Senaryosunda üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan toplam emisyonların azalması (MtCO₂)

Senaryolar	2018	2020	2030	2040	2050
Baz Senaryo	90,7	85,2	106,1	118,8	129,2
Net Sıfır Senaryosu	90,7	85,2	66,8	49,6	30,2

Net Sıfır Senaryosu'nda sanayi ve diğer üretici sektörlerde enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlardaki azalmanın hangi değişikliklerden (talep, enerji verimliliği, elektrifikasyon, yenilenebilir kaynaklar ve yeşil hidrojen/CCSU) kaynaklandığı Tablo 9.20 ve Şekil 9.11'de verilmiştir. Başlangıçta enerji verimliliğinin payı %70 ile en yüksek seviyede iken, 2050'de %50'nin altına düşmekte ve yüksek enerji yoğunluklu sanayi sektörlerinde talep azalmasının ve elektrifikasyonun payı artarak 2050'de toplamda %40'ın üzerine çıkmaktadır. Emisyonlardaki payı daha az olan tarım ve düşük enerji yoğunluklu sanayi sektörleri için daha önemli olan doğrudan yenilenebilir kaynakların kullanımının payı ise 2030'da %15 iken 2050'de %10'a düşmektedir. Yeşil hidrojen ve CCSU'nun payı ise 2040'tan sonra başlamakta, ancak 2050'de %3,5 ile sınırlı kalmaktadır.

9.3.2.2. Sanayi Proseslerinden Kaynaklanan CO₂ Emisyonları:

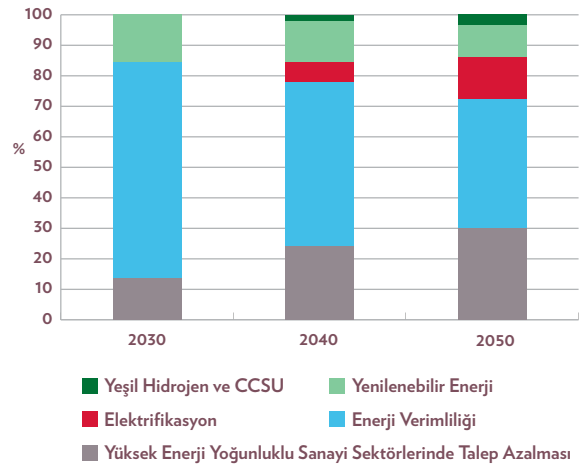
Yüksek enerji yoğunluklu sektörlerde, sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların azaltılmasına neden olacak da en önemli bileşenlerden biri, enerjiden kaynaklanan emisyonlarda olduğu gibi Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosu arasındaki talep artış farkıdır. Türkiye'de yüksek enerji yoğunluklu sanayi sektörlerinde, talebin Uluslararası Enerji Ajansı'nın küresel talep projeksiyonlarına uygun bir şekilde değişeceği varsayımıyla oluşturulan Tablo 9.3'teki talep değişimi, çimento, demir-çelik ve benzeri sektörlerde endüstriyel proseslerden kaynaklanan emisyonları 2030'da %12, 2040'ta %29,3 ve 2050'de %43,4 daha düşük proses emisyonlarına neden olacağı öngörülmektedir.

Proses emisyonları konusunda çimento sektörü üzerine ayrıntılı çalışmalar mevcuttur (Ref.) Bu çalışmalarda sektörün proses emisyonlarının azaltılması için önerilen yöntemler ve politikalar arasında yapılarda daha az çimento kullanımı, alternatif (klinker içermeyen) çimento kullanımı ve sektörde klinkeri ikame edecek malzemelerin kullanımı önerilmektedir.

Tablo 9.20. Net Sıfır Senaryosu'nda azaltım yollarının emisyonlardaki azalmaya etkisi (%)

Azaltım yolları	2030	2040	2050
Yüksek Enerji Yoğunluklu Sanayi Sektörlerinde Talep Azalması	13,6	24,0	29,9
Enerji Verimliliği	70,8	54,0	42,3
Elektrifikasyon	0,0	6,5	13,8
Yenilenebilir Enerji	15,7	13,2	10,7
Yeşil Hidrojen ve CCSU	0,0	2,2	3,4
Toplam	100,0	100,0	100,0

Şekil 9.11. Net Sıfır Senaryosu'nda azaltım yollarının emisyonlardaki azalmaya etkisi



Avrupa Çimento Birliği (European Cement Association) klinker emisyonlarının azaltılması ile ilgili öngörüsünde yeni karbonsuz hammadde ve alternatif çimento kullanımı ile ilgili tahminler sunmaktadır. Buna göre, 2017'de 667 kg/ton olan çimento emisyon yoğunluğunun 2050'de 227 kg/tona düşme potansiyelinin yaklaşık %7'si bu iki kalemden oluşmaktadır.⁵

⁵ <https://lowcarboneconomy.cembureau.eu/carbon-neutrality/our-2050-roadmap-the-5c-approach-clinker/>

Proses emisyonlarına talep değişiminin yaptığı etkiye endüstriyel proseslerden kaynaklı emisyonları etkileyebilecek bu potansiyel oran uygulandığında Net Sıfır Senaryosu'nda 2030'da %6, 2040'ta %5 ve 2050'de %4'e yakın ek bir azaltım öngörülebilir. Bu öngörüler altında Baz Senaryo ve Net Sıfır Senaryosundaki proses emisyonları karşılaştırılabilir. (Tablo 9.17)

Tablo 9.17. Net Sıfır Senaryosunda Yüksek Enerji Yoğunluklu Sektörlerde (YES) sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların sektörlere göre dağılımı (MtCO₂)

Sektör kodu	2018	2030	2040	2050
Nmm (Çimento vb.)	43,9	42,9	41,4	38,3
İrst (Demir çelik)	12,8	14,8	14,6	14,4
Eint (Kimya vb.)	3,2	4,1	4,5	4,9
Toplam	59,8	61,8	60,4	57,6

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye'nin mevcut Net Sıfır hedefine nasıl ulaşacağına ve güncellenmesi beklenen Ulusal Katkı Beyanı'nın içeriğine dair yayımlanmış ilk çalışma olan bu raporun sonuçlarına göre, Türkiye ekonomisinin fosil yakıtlar terk edilerek, yenilenebilir enerjiye geçilerek, enerji verimliliği ve ilgili sektörlerde elektrifikasyon yoluyla 30 yıl içinde büyük ölçüde karbonsuzlaştırılması ve 2050'lerin başında Net Sıfır hedefine yaklaşılması mümkündür. Bu raporda kullanılan varsayımlarda mevcut ekonomik yapının temel nitelikleri korunmakta, ağırlıklı olarak enerji dönüşümü ve karbonsuz teknolojilere yapılacak yatırımlara dayanan politika değişikliklerinin sonuçları gösterilmektedir. Bunun için orta ve uzun vadede net ve ölçülebilir hedefler konmalıdır.

Bu çalışmanın sonucu olarak ;

- 1| Türkiye'nin 1990'dan itibaren yaklaşık %130 artan emisyonları 2018 yılında tepe noktasına çıktıktan sonra azalmaya başlamakta ve 2050'de Baz Senaryo'da öngörüldüğü gibi 700 milyon ton yerine Net Sıfır Senaryosu'nda 2018'e göre %70 azaltımla 130 milyon tona düşmekte ve 1990 seviyesinin %13 altına inmektedir. 2050'de kalan artık emisyon düzeyi sanayi prosesleri dahil edilmediğinde 2018 seviyesine göre %80 azalarak 74 milyon tona düşmekte ve 1990 seviyesinin %43 altına inmektedir.
- 2| Tüm sektörlerde enerjiden kaynaklanan karbondioksit emisyonları 2030'da 2018 seviyesine göre %37, bütün karbondioksit emisyonları ise 2030'da 2018 seviyesine göre %32 azaltılabilir.
- 3| Elektrik üretiminin en hızlı azaltım sağlanacak sektör olmasından hareketle elektrik sek-

töründen kaynaklanan emisyonların 2030'da yarıya indirilmesi hedeflenebilir.

- 4| Enerji üretiminde kömürün 2035'te tamamen terk edilmesi hedeflenebilir.
- 5| Elektrik üretiminde doğal gaz, şebeke esnekliğiyle ilgili daha iddialı çözümler üretmek yoluyla 2050'den önce tamamen terk edilebilir.
- 6| Modern yenilenebilir enerji (rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyokütle) kurulu gücünün elektrik kurulu gücündeki payı 2030'da %50'ye çıkarılabilir.
- 7| 2030'a kadar her yıl ortalama 3 GW güneş ve 2,5 GW rüzgâr enerjisi santrali yapılarak 2030'da her iki yenilenebilir enerji kurulu gücünün yaklaşık 35 GW'ye ulaştırılması hedeflenebilir.
- 8| Elektrikli araçların toplam binek araçları arasındaki oranının 2030'da en az %20'ye, toplu taşımada ve yük taşımada kullanılan araçlar arasındaki oranının en az %10'a çıkarılması hedeflenebilir.
- 9| Binalarda kömür kullanımının en kısa zamanda sonlandırılması, doğal gazdan elektriğe geçilmesi ve ısı pompalarının kullanımının hızlandırılması yoluyla 2030'da 2018 seviyesine göre %50 emisyon azaltımı hedeflenebilir.
- 10| Sanayi ve diğer üretici sektörlerin enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonları 2018 seviyesine göre 2030'da %26, 2050'de %67 azaltılabilir, ancak sanayi proseslerinden kaynaklanan emisyonların azaltılabilmesi ve tüm sanayi emisyonlarının daha hızlı düşürülmesi için enerji verimliliği, elektrifikasyon, yeni teknolojiler, yeşil hidrojen ve CCSU

konusunda araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada öngörülen varsayımların etkisiyle 2050'de tam olarak net sıfır hedefine ulaşılamamaktadır. Bunun nedenleri şöyle sıralanabilir:

- 1| Diğer ülkelerde yapılan benzer çalışmalarda varsayımlara daha yüksek düzeylerde katılan Karbon Yakalama ve Gömme (CCSU) gibi negatif emisyon teknolojilerine enerji sektöründe hiç yer verilmemiş, yüksek enerji yoğunluklu sanayi sektörleri için de çok düşük oranlarda kullanılacağı varsayılmıştır.
- 2| Yeni ve henüz yeterince gelişmemiş teknolojilere modelde fazla yer verilmemiştir. Örneğin sanayi, ısınma ve ulaşımda yeşil hidrojen kullanımı, ağır vasıtalarda elektrifikasyon gibi petrol kullanımının alternatifleri, havacılıkta alternatif yakıtlar, sanayide alternatif üretim teknikleri modele çok düşük oranlarda dahil edilmiştir. Bireysel ulaşımda elektrikli araç kullanımı da gelişmiş ülkelerdeki öngörülerden daha yavaş artırılmıştır.
- 3| Başta tüketimin azaltılması olmak üzere ekolojik yönde bireysel davranış değişiklikleri modele çok düşük oranlarda dahil edilmiştir. Motorlu taşıt kullanmamak, uzun mesafeli tatilleri azaltmak, uzun mesafeli yük taşımaya gerektirecek gıda tüketimini azaltmak, beslenme biçimini değiştirmek, elektrik tüketimini tamamen veya belli saatlerde kısıtlamak gibi emisyonları azaltabilecek yaşam biçimi değişikliklerine modelde ya hiç verilmemiş ya da seyahat davranış değişikliği başlığında görüldüğü gibi çok düşük oranlarda yer verilmiştir.
- 4| Net Sıfır Senaryosu'nda, ulusal ekonomide bir karbon fiyatlaması olması durumunda ekonominin yaşayabileceği yapısal değişiklik modellenmemiş, Baz Senaryo altındaki üretim yapısı, sektörel paylar vb. büyük ölçüde korunmuştur. Bu nedenle örneğin sera gazı emisyonlarında

önemli etkiye sahip (çimento, demir-çelik vb. sektörler nedeni ile) inşaat sektörü küçültülmemiş, ancak uluslararası öngörülere uygun olarak büyümesi kısıtlanmıştır.

2050'de kalan toplam artı emisyonun en büyük kısmı sanayi proseslerinden, enerji tüketiminden kaynaklanan artı emisyonun en büyük kısmı ise sanayiden ve ulaşımdan kaynaklanmaktadır. Elektrik sektöründen sadece 15 milyon ton artı emisyon kalmakta, binalardan kaynaklanan emisyonlar ise sıfırlanmaktadır. Bu nedenle 2050'de emisyonların tam olarak net sıfıra düşürülmesi için mevcut Net Sıfır Senaryosu'ndaki varsayımların üzerine aşağıdaki politikalar eklenebilir:

- 1| Ulaşım sektöründe karayolu yük taşımacılığından demiryoluna geçiş, ağır vasıtalarda daha fazla elektrifikasyon, enerji verimliliği önlemlerinin azami düzeyde uygulanması, bireysel ulaşımda tüm binek araçların 2050'ye kadar elektrikli hale getirilmesi ve petrol kullanımının sonlandırılacağı bir çıkış yılı belirlenmesinin yanı sıra toplu ulaşımda daha fazla demiryolu kullanımı, bireysel araç kullanımı yerine elektrikli toplu ulaşım, bisiklet vb. gibi karbonsuz yöntemlere geçiş ve uçak seyahatlerini azaltmak gibi bireysel davranış değişiklikleri;
- 2| Sanayide enerji tüketimini ve proses emisyonlarını azaltacak yeni teknolojilerin geliştirilmesi, daha fazla yenilenebilir kaynak kullanımı ve elektrifikasyon, dögüsel ekonomi yaklaşımlarının, hammadde tüketiminde verimliliğin, geri dönüşüm ve sıfır atık yöntemlerinin kullanılması;
- 3| Sanayide yüksek enerji yoğunluklu sektörlerin ürünlerine (çimento, demir çelik gibi) talebi azaltacak alternatif malzemelerin kullanımı;
- 4| Ulaşımda, sanayide ve binalarda yeşil hidrojen kullanımının daha hızlı artırılması;

- 5 | Yüksek enerji yoğunluklu sanayilerde CCUS kullanımı;
- 6 | Şebekede esneklik ihtiyacı depolama ve entegrasyon dışında talep yönetimi gibi yöntemler de kullanarak doğal gaz santrallerinin emre amade tutulmasının önlenmesi ve doğal gazdan arta kalan emisyonların 2050'den önce sıfırlanması;
- 7 | 2050'ye doğru yeni geliştirilecek negatif emisyon teknolojilerinin devreye sokulması.

Bu çalışmanın en önemli kısıtlarından biri de bütün sera gazlarını kapsamaması ve ekonomi genelinde emisyon azaltımını öngörmemesidir. Sera gazları içinde CO₂ dışındaki en önemli paya sahip olan CH₄ ve N₂O emisyonlarının azaltılması için sadece fosil yakıt kullanımında ve sanayide alınacak önlemler yeterli değildir. Özellikle tarımdan kaynaklanan emisyonların azaltılması ve atıkların kontrolü için politikalar geliştirilmelidir. Türkiye'nin ekonomi genelinde sera gazı emisyonları azaltım hedefini belirlemek ve 2050'lerde net sıfır sera gazı emisyonu hedefini yakalayabilmek için CO₂ dışındaki sera gazlarının nasıl azaltılacağını da modelleyen çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu çalışmanın içerdiği azaltım patikasını da kapsayan senaryoların da farklı metodoloji ve varsayımlarla tekrar tekrar çalışılması, dönüşümün maliyet ve yan faydalarını belirleyen araştırmaların da yapılması ve çalışma sonuçlarının şeffaf biçimde kamuoyuyla paylaşılması önemlidir. Türkiye'nin iklim politikaları ancak bilimsel çalışmalara dayalı olarak ve müzakereci bir politika yapım süreciyle iyileştirilebilir.



KAYNAKLAR

Aksoy, H., Korkmaz, O., Yiğit, V., Bavbek, K. G., Koyuncuoğlu Toma, E., & Rogner, M. (2020). Optimum electricity generation capacity mix for Turkey towards 2030. SHURA Energy Transition Center, İstanbul.

BM (2015) Paris Agreement. United Nations. https://unfccc.int/sites/default/files/english-paris_agreement.pdf

CAT (2022) Climate Target Update Tracker. <https://climateactiontracker.org/climate-target-update-tracker/>

Cebeci, M., Tor, O., Oprea, S. and Bara, A. (2019). Consecutive Market and Network Simulations to Optimize Investment and Operational Decisions Under Different RES Penetration Scenarios. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 10(4), pp.2152-2162.

ClimateWatch. (2022) Net Zero Tracker. <https://www.climatewatchdata.org/net-zero-tracker?showEUCountries=true>

ÇŞB. (2019). Düşük Karbonlu Kalkınma için Çözümsel Tabanlı Strateji ve Eylem Geliştirilmesi Teknik Destek Projesi: Faaliyet 3.1 UİDEP faaliyetlerinin ve seçilen sektörlerle ilgili diğer planların emisyon azaltım potansiyelinin değerlendirilmesi. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.

ÇŞB. (2021). Bina Sektörü Enerji Verimliliği Teknoloji Atlası. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.

ETKB. (2020). Denge Tabloları. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-denge-tablolari>

Figueres, C., Schellnhuber, H., Whiteman, G., Rockström, J., Hobley, A. and Rahmstorf, S. (2017). Three years to safeguard our climate. Nature, 546(7660), pp.593-595.

Fyson, C., Baur, S., Gidden, M. and Schleussner, C. (2020). Fair-share carbon dioxide removal increases major emitter responsibility. Nature Climate Change, 10(9), pp.836-841.

Höhne, N., Wachsmuth J. (2020). Fair contributions versus fastest possible reductions. New Climate Institute.

ICCT. (2012). Global Transportation Energy and Climate Roadmap. The International Council on Clean Transportation, Washington DC.

IEA. (2021). Net Zero by 2050. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

IPCC (2013). Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; et al. (eds.). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC (2014). Edenhofer, O.; Pichs-Madruga, R.; Sokona, Y.; Farahani, E.; et al. (eds.). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (PDF). Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC (2018) Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global

greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].

IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

IPCC AR5 SYR (2014). The Core Writing Team; Pachauri, R. K.; Meyer, L. A. (eds.). Climate Change 2014: Synthesis Report (PDF). Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC.

IRENA. (2018). Global Energy Transformation: A roadmap to 2050, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Kat, B. (2021). Renewable energy transition in the Turkish power sector: A techno-economic 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

Kemp-Benedict, E., Holz, C., Baer, P., Athanaisou, T., Kartha, S. (2019). The Climate Equity Reference Calculator. Berkeley and Somerville: Climate Equity Reference Project (EcoEquity and Stockholm Environment Institute), [Online]. <https://calculator.climateequityreference.org>

Lahn, B. (2020). A history of the global carbon budget. WIREs Climate Change, 11(3).

Material Economics. (2019). Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry.

NREL. (2019). NREL Grid-Scale Battery Storage. Retrieved July 2, 2021, <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/74426.pdf>

Pan, X., Elzen, M., Höhne, N., Teng, F. and Wang, L. (2017). Exploring fair and ambitious mitigation contributions under the Paris Agreement goals. Environmental Science & Policy, 74, pp.49-56.

Republic of Turkey. (2015). Intended Nationally Determined Contribution. https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Turkey%20First/The_INDC_of_TURKEY_v.15.19.30.pdf

Robiou du Pont, Y., Jeffery, M., Gütschow, J., Rogelj, J., Christoff, P. and Meinshausen, M. (2016). Equitable mitigation to achieve the Paris Agreement goals. Nature Climate Change, 7(1), pp.38-43.

Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G., Krey, V., Kriegler, E., Riahi, K., van Vuuren, D., Doelman, J., Drouet, L., Edmonds, J., Fricko, O., Harmsen, M., Havlík, P., Humpenöder, F., Stehfest, E. and Tavoni, M. (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. Nature Climate Change, 8(4), pp.325-332.

Saygin, D., Worrell, E., Patel, M.K. et al. (2011). Benchmarking the energy use of energy-intensive industry in industrialized and in developing countries, Energy 36, pp. 6661-6673.

Saygin, D., Gielen, D.J., Draeck, M. et al. (2014). Assessment of the technical and economic potentials of biomass use for the production of steam,

chemicals and polymers, Renewable and Sustainable Energy Reviews 40, pp. 1153-1167.

Shura (2018). Türkiye'nin Enerji Sisteminde Yenilenebilir Kaynakların Artan Payı: İletimde Genişleme ve Esneklik Seçenekleri. Shura Enerji Dönüşümü Merkezi, İstanbul. <https://www.shura.org.tr/turkiyenin-enerji-sisteminde-yenilenebilir-kaynaklarin-artan-payi-iletimde-genisleme-ve-esneklik-secenekleri/>

Shura. (2020). Türkiye Elektrik Sistemi için En Ekonomik Katkı: Enerji Verimliliği ve Yeni İş Modelleri. Shura Enerji Dönüşümü Merkezi, İstanbul. <https://shura.org.tr/turkiye-elektrik-sistemi-icin-en-ekonomik-katki-enerji-verimliliği-ve-yeni-is-modelleri/>

TÜİK. (2021). Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990-2019: National Inventory Report for submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Turkish Statistical Institute.

UAB. (2018). Ulaşan ve Erişen Türkiye. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Ankara.

UNEP. (2017). The Emissions Gap Report 2017. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi

UNFCCC. (2021).. Glasgow Climate Pact. United Nations Climate Change. <https://unfccc.int/documents/310475>

van Soest, H., den Elzen, M. and van Vuuren, D. (2021). Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement. Nature Communications, 12(1).

Zimmer, W., Schmied, M. (2008). Potentials for a modal shift from road to rail and ship - A methodological approach. ETC/ACC Technical Paper 2008/18, The European Topic Centre on Air and Climate Change

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