

Küresel Enerji ve İklim Modeli

Dokümantasyon - 2024



International
Energy Agency

iea

ULUSLARARASI ENERJİ AJANSI

IEA tüm spektrumu inceliyor
Petrol, gaz ve kömür arzı ve talebi, yenilenebilir enerji teknolojileri, elektrik piyasaları, enerji verimliliği, enerjiye erişim, talep tarafı yönetimi ve çok daha fazlasını içeren enerji konuları. IEA, yaptığı çalışmalarla, bulunduğu coğrafyada enerjinin güvenilirliğini, satın alınabilirliğini ve sürdürülebilirliğini artıracak politikaları savunmaktadır
31 üye ülke, 13 birlik ülkeleri ve ötesinde.

Gözden geçirilmiş versiyon, Ekim 2024
Bilgi notu şu adreste bulunabilir:
www.iea.org/corrections

Bu yayın ve burada yer alan herhangi bir harita, herhangi bir bölgenin statüsüne veya egemenliğine, uluslararası sınırların ve hudutların sınırlandırılmasına ve herhangi bir bölgenin, şehrin veya alanın adına hâlel getirmez.

IEA üyesi ülkeler:

Avustralya
Avusturya
Belçika
Kanada
Çek Cumhuriyeti
Danimarka
Estonya
Finlandiya
Fransa
Almanya
Yunanistan
Macaristan
İrlanda
İtalya
Japonya
Kore
Litvanya
Lüksemburg
Meksika
Hollanda
Yeni Zelanda
Norveç
Polonya
Portekiz
Slovak Cumhuriyeti
İspanya
İsveç
İsviçre
Türkiye Cumhuriyeti
Birleşik Krallık
Amerika Birleşik Devletleri

Avrupa Komisyonu da IEA'nın çalışmalarına katılmaktadır

IEA birlik ülkeleri:

Arjantin
Brezilya
Çin
Mısır
Hindistan
Endonezya
Kenya
Fas
Senegal
Singapur
Güney Afrika
Tayland
Ukrayna

Bölüm 1: Model ve senaryolara genel bakış	5
1.1 GEC Model senaryoları	6
1.2 2024'te seçili gelişmeler	9
1.3 GEC Modeline genel bakış	12
Bölüm 2: Kesişen girdiler ve varsayımlar	17
2.1 Nüfus varsayımları	17
2.2 Makroekonomik varsayımlar	18
2.3 Fiyatlar	19
2.4 Politikalar	22
2.5 Tekno-ekonomik girdiler	23
Bölüm 3: Son kullanım sektörleri	25
3.1 Endüstri	25
3.2 Nakliye	31
3.3 Binalar	41
3.4 Saatlik elektrik talebi ve talep tarafı katılımı	44
Bölüm 4: Elektrik üretimi ve ısı üretimi	49
4.1 Elektrik üretimi	49
4.2 Değer ayarlı Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti	54
4.3 Elektrik iletim ve dağıtım şebekeleri	57
4.4 Saatlik modeller	61
4.5 Mini ve şebekeden bağımsız güç sistemleri	63
4.6 Yenilenebilir enerji ve birleşik ısı ve güç modülleri	63
4.7 Elektrik üretiminde hidrojen ve amonyak	65
4.8 Akü depolama	65
Bölüm 5: Diğer enerji dönüşümü	67
5.1 Petrol rafinasyonu ve ticareti	67
5.2 Kömürden sıvıya, Gazdan sıvıya, Kömürden gaza	68
5.3 Hidrojen üretimi ve tedariki	68
5.4 Biyoyakıt üretimi	71
Bölüm 6: Enerji tedariki	75
6.1 Yağ	75
6.2 Doğal gaz	79
6.3 Kömür	80
6.4 Biyoenerji	81

Bölüm 7: Kritik mineraller	85
7.1 Talep.....	86
7.2 Birincil ve ikincil arz projeksiyonları.....	86
Bölüm 8: Emisyonlar	89
8.1 CO ₂ emisyonları	89
8.2 Metan emisyonları	89
8.3 CO ₂ dışı diğer sera gazı emisyonları	90
8.4 Hava kirliliği	90
8.5 Küresel sıcaklık etkileri	90
Bölüm 9: Enerji ve CO ₂ ayrışması	91
Bölüm 10: Yatırım	93
10.1 Yakıt tedariki ve enerji sektörüne yatırım	93
10.2 Talep yönlü yatırımlar	95
10.3 Yatırımlar için finansman.....	96
Bölüm 11: Enerji erişimi	99
11.1 Modern enerji erişiminin tanımı.....	99
11.2 Modern enerjiye erişim için genel görünüm	100
Bölüm 12: İstihdam	101
12.1 İstihdamın tanımı ve kapsamı.....	101
12.2 Mevcut istihdamın tahmin edilmesi	103
12.3 İstihdam için görünüm	104
Bölüm 13: Temiz enerji ve enerji satın alınabilirliği için devlet harcamaları.....	105
13.1 Poliçe tanımlama ve toplama.....	105
13.2 Genel temiz enerji yatırımı üzerindeki etkinin değerlendirilmesi	107
Bölüm 14: Hanehalkı enerji harcamaları analizi.....	109
14.1 Tanımlar ve kapsam	109
14.2 Girdi verileri	109
14.3 Metodoloji.....	110
14.4 Sonuçlar.....	111
Ek A: Terminoloji	113
Tanımlar	113
Bölgesel ve ülke gruplandırmaları	121
Kısaltmalar.....	124
Ek B: Referanslar	129

Şekillerin listesi

Şekil 1.1▶	Küresel Enerji ve İklim Modeline genel bakış.....	13
Şekil 2.1▶	Perakende elektrik son kullanım fiyatlarının bileşenleri	21
Şekil 3.1▶	Talep modüllerinin genel yapısı.....	25
Şekil 3.2▶	Sanayide son kullanım alt sektörlerine göre başlıca teknoloji kategorileri	26
Şekil 3.3▶	Sanayi sektörü modeli iç modül yapısı ve temel veri akışları	27
Şekil 3.4▶	Ulaşım talebi modülünün yapısı.....	32
Şekil 3.5▶	Araç türüne göre hurdaya ayırma eğrisi ve kilometre düşüşünün gösterimi	34
Şekil 3.6▶	Binek-hafif hizmet araç maliyet modelinin rolü	35
Şekil 3.7▶	Karayolu taşımacılığı için bir verimlilik maliyet eğrisi çizimi	36
Şekil 3.8▶	Yakıt ikmali altyapı maliyet eğrisi (açıklayıcı)	37
Şekil 3.Y▶	Nakliye modeli metodolojisi.....	39
Şekil 3.10▶	Bina talep modülünün yapısı.....	41
Şekil 3.11▶	Binalarda son kullanım alt sektörüne göre başlıca teknoloji kategorileri	43
Şekil 3.12▶	Saatlik yük eğrisi değerlendirmesi için ısıya duyarlılık analizi	45
Şekil 3.13▶	yılı için yük eğrisi Avrupa Birliği'nde Şubat ayında hafta içi bir gün sektörlerine göre açıklayıcı 2014 ENTSO-E tarafından gözlemlenen ile karşılaştırmalı olarak iynyük eğrileri	46
Şekil 4.1▶	Güç üretim modülünün yapısı	49
Şekil 4.2▶	Dört talep segmentini gösteren yük-süre eğrisi	51
Şekil 4.3▶	Enerji üretim modülünde örnek liyakat sırası ve talep ile kesişimi	52
Şekil 4.4▶	Örnek elektrik talebi ve artık yük	53
Şekil 4.5▶	Elektrik talebi ve artık yük örneği.....	54
Şekil 4.6▶	Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyetinin ötesine geçerek değer ayarlı Seviyelendirilmiş Maliyetine geçişElektrik	55
Şekil 4.7▶	Kişi başına düşen GSYİH'ye göre birim elektrik talebi artışı başına elektrik şebekesi genişlemesi	58
Şekil 5.1▶	Rafinaj ve uluslararası ticaret modülünün şeması	67
Şekil 5.2▶	Ticari hidrojen tedarik modülünün şeması.....	69
Şekil 5.3▶	Sıvı biyoyakıt modelinin şeması	72
Şekil 6.1▶	Yağ besleme modülünün yapısı.....	77
Şekil 6.2▶	üretim yapan konvansiyonel petrol sahalarının üretimnin saha bazında evrimi Halihazırdaveri tabanından ve GEC Modelinden	79
Şekil 6.3▶	Biyokütle tedarik potansiyellerinin şeması.....	81
Şekil 14.1▶	Her bir GEC Modeli bölgesi düzeyinde uygulanan satın alınabilirlik analizi metodolojisine genel bakış	110
Şekil A.1▶	GEC Modeli bölgesel gruplandırmaları.....	122

Tabloların listesi

Tablo 1.1▶	GEC Model 2024 senaryolarının tanımları ve hedefleri	6
Tablo 2.1▶	Bölgelere göre nüfus varsayımları.....	17
Tablo 2.2▶	Bölgelere göre GSYİH ortalama büyüme varsayımları.....	18
Tablo 2.3▶	Senaryoya göre fosil yakıt fiyatları	19
Tablo 2.4▶	Senaryoya göre seçilmiş bölgelerde elektrik, sanayi ve enerji üretimi için CO ₂ fiyatları	20
Tablo 2.5▶	Senaryoya göre seçilmiş teknolojiler için sermaye maliyetleri.....	24

Tablo 6.1>	Kalan teknik olarak geri kazanılabilir fosil yakıt kaynakları, 2023.....	80
Tablo 7.1>	Kapsam dahilindeki kritik mineraller	85
Tablo 10.1>	Yakıt tedarik yatırımına dahil edilen alt sektörler ve varlıklar	94
Tablo 10.2>	Enerji sektörü yatırımlarına dahil edilen alt sektörler ve varlıklar	95
Tablo 10.3>	Nihai kullanım enerji yatırımlarına dahil edilen alt sektörler ve varlıklar	96
Tablo 12.1>	İlgili eğitim düzeyleri ve mesleklere göre istihdam tahminlerinin beceri düzeyleri.....	102

Kutuların listesi

Kutu 1.1>	Net Sıfır Emisyon enerji ve sürdürülebilir kalkınmaya entegre bir yaklaşım 2050'ye kadar Senaryosunda	9
Kutu 4.1>	Yenilenebilir enerji kaynaklarının uzun vadeli potansiyeli.....	64
Kutu 6.1>	GEC Modeli ile IEA <i>Orta Vadeli Petrol</i> Modeli arasındaki metodolojik farklılıklar <i>Pazar Raporu</i>	76
Kutu 6.2>	Petrol ve gaz sahalarındaki üretim düşüşünü hesaba katma metodolojisi.....	78

Model ve senaryolara genel bakış

1993 yılından bu yana IEA, sürekli gelişen detaylı, dünya lideri modelleme araçlarını kullanarak orta ve uzun vadeli enerji projeksiyonları sağlamaktadır. İlk olarak, enerji piyasalarının nasıl işlediğini taklit etmek için tasarlanmış büyük ölçekli bir simülasyon modeli olan Dünya Enerji Modeli (WEM) geliştirilmiştir. On yıl sonra, teknoloji açısından zengin bir aşağıdan yukarıya model olan Enerji Teknolojisi Perspektifleri (ETP) modeli, WEM'e paralel olarak kullanılmak üzere geliştirildi. 2021 yılında IEA, 2050 yılına kadar net sıfır CO₂ emisyonlu bir enerji sistemine nasıl geçileceğine dair dünyanın ilk kapsamlı çalışmasını geliştirmek için her iki modelin güçlü yönlerine dayanan yeni bir hibrit modelleme yaklaşımı benimsemiştir.

Geçtiğimiz üç yıl boyunca IEA, yeni bir entegre modelleme çerçevesi geliştirmek için çalıştı: IEA'nın Küresel Enerji ve İklim (GEC) Modeli. Bu model artık IEA'nın yayınlarında sektör sektör ve bölge bölge ayrıntılı uzun vadeli senaryolar üretmek için kullanılan başlıca araçtır.

GEC Modeli, WEM ve ETP modellerinin benzersiz modelleme yeteneklerini bir araya getirmektedir. Sonuç, enerji piyasalarında, teknoloji trendlerinde, politika stratejilerinde ve enerji sektörü genelinde iklim hedeflerine ulaşmak için kritik öneme sahip yatırımlarda benzersiz analitik kapasite setine olanak tanıyan büyük ölçekli, aşağıdan yukarıya kısmi optimizasyon modelleme çerçevesidir. IEA'nın GEC Modeli, dünya düzeyindeki sonuçlarla birleştirilebilen 27 bölgeyi kapsamakta ve aşağıdan yukarıya özel modelleme ile enerji sistemindeki tüm sektörleri kapsamaktadır:

- Sanayi, ulaştırma, binalar, tarım ve diğer enerji dışı kullanımları kapsayan **nihai enerji talebi**. Bu, enerji hizmeti ve malzeme talebinin ayrıntılı modellemesi ile yönlendirilmektedir.
- Elektrik üretimi ve ısı üretimi, rafineriler, biyoyakıt üretimi, hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtlar ve enerji ile ilgili diğer süreçlerin yanı sıra ilgili iletim ve dağıtım sistemleri, depolama ve ticaret dahil olmak üzere enerji **dönüşümü**.
- Fosil yakıtların araştırılması, çıkarılması ve ticareti ile yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcudiyeti dahil olmak üzere enerji **arzu**.

GEC Modeli, tüm küresel enerji sistemini kapsayan oldukça veri yoğun bir modeldir. Enerji arzı, dönüşümü ve talebinin yanı sıra enerji fiyatlarına ilişkin verilerin çoğu IEA'nın kendi enerji ve ekonomik istatistik veri tabanlarından elde edilmektedir (IEA, 2024a). Ayrıca, diğer kurumlarla yapılan işbirliğinden ve bu belgenin ilgili bölümlerinde belirtilen çok çeşitli dış kaynaklardan elde edilen verilerden de yararlanılmaktadır. GEC Modelinin IEA ve IEA dışındaki uzmanların görüşlerinden yararlanılmıştır ve IEA, uluslararası modelleme topluluğundaki meslektaşlarıyla yakın bir şekilde çalışmaya devam etmektedir.

GEC Modeli, enerji sisteminin aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli yönlerini analiz etmek üzere tasarlanmıştır:

- **Küresel ve bölgesel enerji beklentileri:** talepteki eğilimler, arz mevcudiyeti ve kısıtlamaları, uluslararası ticaret ve projeksiyon ufkunda sektör ve yakıt bazında enerji dengeleri dahil.
- **Enerji kullanımının çevresel etkileri:** yakıt yanması, endüstriyel süreçler ve alevlenmeden kaynaklanan CO₂ emisyonları; fosil yakıt operasyonlarından kaynaklanan metan (CH₄) emisyonları; nihai enerji talebi ve enerji dönüşümünden kaynaklanan CH₄ ve azot oksit (N₂O) emisyonları, yerel hava kirleticiler ve sıcaklık sonuçları dahil.
- **Politika eylemlerinin ve teknolojik değişikliklerin etkileri:** bir dizi politika eyleminin ve teknolojik gelişmenin enerji talebi, arzı, ticareti, yatırımları ve emisyonları üzerindeki etkisi dahil.
- **Enerji sektörüne yatırım:** öngörülen enerji talebini ve talep tarafı yatırım gereksinimlerini karşılamak için yakıt ve teknoloji tedarik zincirlerindeki yatırım gereksinimleri dahil.
- **Modern enerjiye erişim değerlendirmeleri:** elektriğe ve temiz pişirmeye erişimdeki eğilimlerin yanı sıra ilgili ek enerji talebi ve yatırımları ile sera gazı emisyonlarındaki değişiklikler dahil.
- **Enerji istihdamı:** her bir senaryoda enerji sektörünün gelişiminin istihdam üzerindeki etkisi de dahil üzere.

1.1 GEC Model senaryoları

IEA'nın orta ve uzun vadeli görünüm yayınları - Dünya Enerji Görünümü (WEO) ve Enerji Teknolojisi Perspektifleri (ETP) dahil - gelecekteki enerji eğilimlerini incelemek için GEC Modeline dayanan bir senaryo yaklaşımı kullanmaktadır. GEC Modeli, her biri enerji sisteminin zaman içinde nasıl gelişebileceğine dair farklı bir dizi temel varsayım üzerine inşa edilen birden fazla senaryoyu araştırmak için kullanılır. Okuyucular bunları karşılaştırarak çeşitli sonuçlara neyin yol açtığını ve yol boyunca ortaya çıkan fırsatları ve tuzakları değerlendirebilirler. Bu senaryolar tahmin değildir ve uzun vadeli geleceğin neler dair tek bir görüş içermez. Bunun yerine senaryolar, okuyucuların geleceğin farklı olası versiyonlarını ve bunları üreten kaldıraçları ve eylemleri karşılaştırmalarını ve küresel enerjinin geleceğine dair içgörü kazanmalarını sağlamayı amaçlamaktadır.

World Energy Outlook, Energy Technology Perspectives ve ilgili raporları, hepsi de en son enerji piyasası ve maliyet verilerini içerecek şekilde tamamen güncellenmiş olan üç senaryonun farklı yönlerini incelemektedir. Belirtilen Politikalar Senaryosu (STEPS) ve Açıklanan Taahhütler Senaryosu (APS), politikalar ve hedefler gibi bir başlangıç koşulunu tanımladıkları ve piyasa dinamiklerini ve teknolojik ilerlemeyi yansıtan enerji sistemlerinin model temsillerine dayanarak nereye götürdüklerini gördükleri için keşifseldir. 2050'ye kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosu (NZE Senaryosu) normatiftir, çünkü belirli sonuçlara ulaşmak için tasarlanmıştır - diğer sektörlerden dengeleme olmaksızın 2050'ye kadar enerji sektöründen net sıfır emisyon, 2100'deki sıcaklık artışını sınırlı aşım 1,5 °C'nin altında (en az %50 olasılıkla) tutmakla tutarlı bir emisyon yörüngesi, 2030'a kadar modern enerji hizmetlerine evrensel erişim ve hava kalitesinde önemli iyileştirmeler - ve bunlara ulaşmak için bir yol göstermektedir.

Tablo 1.1► GEC Model 2024 senaryolarının tanımları ve hedefleri

	Belirtilen Politikalar Senaryosu (STEPS)	Açıklanmış Bağışlar Senaryosu (APS)	2050'ye Kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosu (NZE Senaryosu)
Tanımlar	Ağustos 2024 sonu itibarıyla yürürlükte olan ve geliştirilmekte olan enerji ile ilgili politikaların sektör bazında ve ülke bazında değerlendirilmesine dayanan mevcut politika ayarlarını yansıtan bir senaryo. Senaryo ayrıca temiz enerji teknolojileri için halihazırda planlanan üretim kapasitelerini de dikkate almaktadır.	Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkıları (NDC'ler) ve uzun vadeli net sıfır hedeflerinin yanı sıra elektriğe erişim ve temiz pişirme hedefleri de dahil olmak üzere, Ağustos 2024 sonuna kadar dünyanın dört bir yanındaki hükümetler ve endüstriler tarafından verilen tüm iklim taahhütlerinin tam olarak ve zamanında yerine getirileceğini varsayan bir senaryo.	Küresel enerji sektörünün 2050 yılına kadar net sıfır CO ₂ emisyonuna ulaşması için bir yol belirleyen bir senaryo. Hedeflerine ulaşmak için enerji sektörü dışından gelen emisyon azaltımlarına dayanmamaktadır. Elektriğe evrensel erişim ve temiz pişirme 2030 yılına kadar sağlanır. Senaryo, 2024 yılında mevcut en son verilerle güncellenmiştir.
Hedefler	Enerji ve iklim politikasındaki son gelişmelerin potansiyel başarılarını (ve) değerlendirmek için bir ölçüt sağlamak. STEPS ve APS arasındaki farklar, ülkelerin ilan ettikleri karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşmaları için kapatılması gereken "uygulama açığını" vurgulamaktadır.	Mevcut taahhütlerin dünyayı küresel ısınmayı 1,5 °C ile sınırlama hedefine ne kadar yaklaştırdığını göstermek. APS ve NZE Senaryosu arasındaki farklar, 2015 yılında kabul edilen Paris Anlaşması'nın hedeflerine ulaşmak için kapatılması gereken "hırs açığını" vurgulamaktadır. Aynı zamanda mevcut hedefler ile evrensel enerji erişimine ulaşmak arasındaki uçurumu da göstermektedir.	Dünyanın 2050 yılına kadar enerji ile ilgili ve endüstriyel proses CO ₂ emisyonlarını net olarak sınırlaması ve diğer enerji ihtiyaçlarını karşılaması için ana sektörlerde çeşitli aktörler tarafından nelere ve ne zamana kadar ihtiyaç duyulduğunu göstermek. evrensel enerji erişimi gibi ilgili sürdürülebilir kalkınma hedefleri.

Senaryolar, küresel enerji sisteminin geleceğini belirlemede hükümet politikalarının önemini vurgulamaktadır: hükümetler tarafından alınan kararlar, sonuçlardaki farklılıkları açıklayan ana ayırt edici faktördür

senaryolarımız genelinde. Bununla birlikte, özellikle ekonomik ve demografik bağlam, teknoloji maliyetleri ve öğrenme, enerji fiyatları ve satın alınabilirliği, kurumsal sürdürülebilirlik taahhütleri ve sosyal ve davranışsal faktörler gibi diğer unsurları ve etkileri de dikkate alıyoruz. Bilinen teknolojilerin gelişen maliyetleri detaylı bir şekilde modellenirken, teknolojiye çığır açacak gelişmeleri (örneğin nükleer füzyon) öngörmeye çalışmıyoruz.

Nüfus, ekonomik büyüme, kaynaklar, teknoloji maliyetleri ve fosil yakıt fiyatlarına ilişkin temel verilerle birlikte temel politika varsayımlarının bir envanteri Bölüm 2'de mevcuttur.

1.1.1 Belirtilen Politikalar Senaryosu

STEPS, hükümetlerin ilan edilen tüm hedeflere ulaşacağını kesin olarak kabul etmeyerek gelecek için daha muhafazakar bir ölçüt sağlar. Bunun yerine, sadece mevcut politikaları ve önlemleri değil, aynı zamanda geliştirilmekte olanları da dikkate alarak, bu politikaların belirtilen hedeflerine ve enerji ile ilgili diğer hedeflere ulaşmak için uygulamaya konulan politikaların daha ayrıntılı, sektör bazında bir değerlendirmesini sağlar. STEPS, politika yapıcılarının ek bir yönlendirmesi olmadan enerji sisteminin nereye gidebileceğini araştırmaktadır. APS'ye benzer şekilde, belirli bir sonuca ulaşmak için tasarlanmamıştır.

STEPS'te değerlendirilen politikalar, Paris Anlaşması kapsamındaki NDC'ler ve çok daha fazlası dahil olmak üzere geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Uygulamada, bu senaryodaki aşağıdan yukarıya modelleme çabası, fiyatlandırma politikaları, verimlilik standartları ve planları, elektrifikasyon programları ve belirli altyapı projeleri dahil olmak üzere sektörel düzeyde kapsamlı ayrıntılar gerektirmektedir. Senaryo, Ağustos 2024 sonu itibarıyla kabul edilen ilgili politikalar ve uygulama tedbirlerinin yanı sıra, bunları yürürlüğe koymak için gereken özel tedbirler henüz tam olarak geliştirilmemiş olsa da, politika önerilerini de dikkate almaktadır.

Hükümet duyuruları, birkaç yıl içinde tam enerji erişimine ulaşma, fiyatlandırma rejimlerinde reform yapma ve son zamanlarda net sıfır emisyonu ulaşma gibi bazı geniş kapsamlı hedefleri içermektedir. STEPS'te ele alınan tüm politikalarda olduğu gibi, bu hedefler otomatik olarak senaryoya dahil edilmemiştir. Tam uygulama kesin olarak kabul edilemez, bu nedenle bunların gerçekleşme olasılıkları ve zamanlaması, ülkelerin ilgili düzenleyici, piyasa, altyapı ve finansal koşullarına ilişkin değerlendirmemize dayanmaktadır.

Politikaların zamanla sınırlı olduğu durumlarda, genellikle benzer yoğunluktaki önlemlerle değiştirileceği varsayılmaktadır. Aksine özel kanıtlar olmadığı sürece, gelecekteki politika eylemlerinin gelecekte güçleneceğini veya zayıflayacağını varsaymıyoruz.

STEPS, temiz enerji teknolojileri için üretim kapasitesi ve bu kapasitenin yürürlükte olan veya duyurulan politikaların ötesinde piyasa alımı üzerindeki etkileri de dahil olmak üzere endüstri faaliyetlerini dikkate almaktadır.

STEPS, toplamda, mevcut ülke taahhütlerinin önemli bir fark yaratmak için yeterli olduğunu göstermektedir. Ancak, STEPS projeksiyonları ile APS ve NZE Senaryosunun yörüngeleri arasında hala büyük bir uçurum bulunmaktadır.

1.1.2 Açıklanmış Bağışlar Senaryosu

2021'de tanıtılan APS, ilan edilen amaç ve hedeflerin 2050 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşmak için gereken emisyon azaltımlarını ne ölçüde sağlayabileceğini amaçlamaktadır. Hem 2030 hedefleri hem de daha uzun vadeli net sıfır veya karbon nötr taahhütleri için, bu duyuruların mevzuata veya güncellenmiş NDC'lere sabitlenip sabitlenmediğine bakılmaksızın, Ağustos 2024 sonu itibarıyla tüm yeni önemli ulusal duyuruları içerir. APS'de ülkeler ulusal hedeflerini tam olarak uygulamaktadır ve fosil yakıtlar ile hidrojen gibi düşük emisyonlu yakıtların ihracatçıları için görünüm, tüm hedeflerin tam olarak uygulanmasının küresel talep için ne anlama geldiğine göre şekillenmektedir. APS ayrıca elektriğe erişim ve temiz yemek pişirmeye yönelik tüm ülke hedeflerine zamanında ve tam olarak ulaşıldığını varsaymaktadır.

Bu taahhütlerin APS'de uygulanma şeklinin enerji sistemi üzerinde önemli etkileri vardır. Ekonomi genelinde sera gazı emisyonları için net sıfır taahhüdü, enerji sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarının mutlaka net sifıra ulaşması gerektiği anlamına gelmez. Örneğin, bir ülkenin net sıfır planları, enerji ile ilgili kalan emisyonların bir kısmının ormancılık veya arazi kullanımından kaynaklanan emisyonların absorbe edilmesiyle dengelenmesini öngörebilir. Net sıfır taahhütlerinin nasıl uygulanacağını tam olarak bilmek mümkün değildir, ancak APS'nin tasarımı, özellikle enerji sistemi yolunun ayrıntılarıyla ilgili olarak, bir dizi ulusal kuruluşun net sıfır taahhütlerini desteklemek için geliştirdiği yollar tarafından bilgilendirilmiştir. Henüz net sıfır taahhüdünde bulunmamış ülkeler için politikaların STEPS'teki ile aynı olduğu varsayılmıştır. Nüfus ve ekonomik büyüme dahil olmak üzere politika dışı varsayımlar STEPS'teki ile aynıdır.

1.1.3 2050'ye Kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosu

NZE Senaryosu, küresel enerji sektörünün 2050 yılına kadar net sıfır CO₂ emisyonuna ulaşması için bir yol gösteren normatif bir senaryodur ve gelişmiş ekonomiler net sıfır emisyonu diğerlerinden önce ulaşır. Bu senaryo aynı zamanda, özellikle 2030 yılına kadar evrensel enerji erişimi ve hava kalitesinde önemli iyileştirmeler olmak üzere, enerji ile ilgili temel Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini (SDG'ler) de karşılamaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) Altıncı Değerlendirme Raporu'nda değerlendirilen azaltımlarla uyumlu olarak, küresel sıcaklık artışının sınırlı bir aşım ile 1,5 °C (en az %50 olasılıkla) ile sınırlandırılmasıyla tutarlıdır.

Küresel olarak 2050 yılına kadar net sıfır CO₂ emisyonuna ulaşmak için birçok olası yol ve bu yollardan herhangi birini etkileyebilecek birçok belirsizlik vardır; bu nedenle NZE Senaryosu *bir yoldur* ve net sıfır emisyonu giden yol değildir.

2050'ye kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosu:

- Küresel enerji sektörünün 2050 yılına kadar net sıfır CO₂ emisyonuna ulaşması için geniş bir temiz enerji teknolojileri portföyü kullanarak, arazi kullanım önlemlerinden kaynaklanan dengelemeler olmadan ve maliyetler, teknoloji olgunluğu, piyasa koşulları, mevcut altyapı ve politika tercihlerine göre teknoloji dağıtımına ilişkin kararlar olarak bir yol tarif etmektedir.
- Enerji sektöründe 2050 yılına kadar net sıfır CO₂ emisyonuna ulaşmanın adil ve etkili bir küresel işbirliğine bağlı olduğunu kabul eder. 2050'ye kadar net sıfır emisyonu giden yol çok dardır. İstenen sonuçların elde edilmesi için tüm ülkelerin katkıda bulunması gerekecektir; gelişmiş ekonomiler, NZE Senaryosunda yükselen piyasa ve gelişmekte olan ekonomilere göre daha önde yer almakta ve net sıfır emisyonu daha erken ulaşmaktadır. Elektriğe ve temiz yemek pişirmeye küresel erişim, belirlenen SKH'ler doğrultusunda 2030 yılına kadar sağlanır. Petrol, gaz ve kömür sektörlerinden kaynaklanan metan emisyonlarındaki hızlı ve büyük düşüşler, yükselen piyasa ve gelişmekte olan ekonomilerde daha az ani CO₂ için biraz zaman kazanılmasına yardımcı olur. Küresel işbirliği, iddialı politikaların geliştirilmesini ve benimsenmesini kolaylaştırır, temiz teknoloji maliyetlerini düşürür ve kritik mineraller ve temiz enerji teknolojileri için çeşitli ve dirençli küresel tedarik zincirlerini ölçeklendirir. Yükselen piyasa ve gelişmekte olan ekonomilere yönelik gelişmiş mali destek, bu işbirliğinde kritik bir rol oynamaktadır.
- Tüm aktörlerin gerekli hızlı değişiklikleri öngörmesini sağlayan güçlü ve eşgüdümlü politikalar ve teşvikler yoluyla enerji güvenliğini korumayı ve enerji piyasasındaki dalgalanmayı ve karaya oturmuş varlıkları en aza indirmeyi amaçlayan düzenli bir geçişe öncelik verir. Senaryo, dağıtımın fizibilitesini sağlama çabalarının bir parçası olarak mineral tedariki ve temiz enerji teknolojileri için proje teslim sürelerinin ayrıntılı analizi ile desteklenmektedir.

Son yıllarda, enerji sektörü küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık dörtte üçünden sorumluydu. NZE Senaryosunda 2050 yılına kadar enerjiyle ilgili ve endüstriyel proses CO₂ emisyonlarında net sifıra ulaşmak enerji sektörünün ötesinde bir eyleme dayanmamaktadır, ancak iklim değişikliğinin sınırlandırılması böyle bir eylemi gerektirmektedir. Bu nedenle, Uluslararası Uygulamalı Sistem Analizi Enstitüsü (IIASA) ile işbirliği içinde çalışarak, NZE enerji sektörünün dönüşümü ile orantılı olacak arazi kullanımından kaynaklanan CO₂ emisyonlarındaki azalmaları da inceliyoruz.

Kutu 1.1 ► 2050'ye kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosunda enerji ve sürdürülebilir kalkınmaya entegre bir yaklaşım

2050'ye kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosu (NZE Senaryosu), Birleşmiş Milletler (BM) 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündeminin üç temel hedefini bir araya getirmektedir: 2030 yılına kadar modern enerji hizmetlerine evrensel erişim (SKH 7.1), hava kirliliğinin sağlık üzerindeki etkilerinin azaltılması (SKH 3.9) ve iklim değişikliğiyle mücadele eylemi (SKH 13).

İlk adım olarak, **2030 yılına kadar modern enerji hizmetlerine evrensel erişim** sağlamak için enerji sektörünün nasıl değişmesi gerektiğini değerlendirmek üzere GEC Modelini kullanıyoruz. Elektrik erişimini analiz etmek için, maliyet optimizasyonunu mevcut ve planlanan iletim hatlarını, nüfus yoğunluğunu, kaynak mevcudiyetini ve yakıt maliyetlerini dikkate alan yeni jeo-uzamsal analizle birleştiriyoruz. İkinci olarak, ortam ve evsel **hava kirliliğini** ve **iklim hedeflerini** dikkate alıyoruz.

NZE Senaryosunda kapsanan SKH'lere ulaşmak için gereken politikalar genellikle birbirini tamamlayıcı niteliktedir. Örneğin, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji, özellikle şehirlerde yerel hava kirliliğini önemli ölçüde azaltır. Temiz yemek pişirmeye erişim, iç mekan hava kirliliğini azaltır ve sera gazı emisyonlarında net bir azalma sağlar (biyokütlenin eksik yanmasından kaynaklanan emisyonları azaltmanın yanı sıra ormansızlaşmayı azaltarak). Bununla birlikte, değiş tokuşlar da mevcuttur. Örneğin, elektrikli araçlar trafikten kaynaklanan yerel hava kirliliğini azaltır, ancak enerji sektörünü karbonsuzlaştırmak için paralel bir çaba gösterilmezse genel CO₂ emisyonlarını artırabilir. Nihayetinde, potansiyel sinerji veya ödünleşimlerin dengesi, enerji dönüşümünü gerçekleştirmek için seçilen rotaya bağlıdır ve bu da senaryo oluşturmaya yönelik entegre, tüm sistem yaklaşımını gerekli kılmaktadır. NZE Senaryosunun vurgusu, özellikle enerji sektöründe yenilenebilir enerji kaynakları gibi kısa proje teslim sürelerine sahip teknolojiler üzerinedir, ancak iklim değişikliğinin uzun vadeli doğası göz önüne alındığında, gelecekte diğer teknoloji seçenekleri de devreye girecektir. Bir dekarbonizasyon seçeneği olarak biyokütlenin modern kullanımı da NZE Senaryosunda tek amaçlı bir iklim senaryosuna göre daha az önemlidir, çünkü biyokütle yanıcı bir yakıttır ve hava kirlitici emisyonları sınırlamak için yanma sonrası kontrol gerektirir, bu da onu belirli bölgelerdeki alternatiflerinden daha maliyetli hale getirir.

NZE Senaryosu ayrıca **SKH 6 (herkes için temiz su ve sanitasyon)** kapsamındaki hedeflere ulaşmanın enerji sektörü üzerindeki etkilerini ve politika yapıcılarının entegre ve tutarlı bir politika yaklaşımıyla birden fazla hedefe ulaşmak için ne yapmaları gerektiğini incelemektedir.

Modelin zaman ufkı, 2050 yılına kadar karbon nötrlüğüne ulaşmak için çeşitli ülkeler tarafından yapılan duyuruları ve yeni teknolojilerin (hidrojen ve yenilenebilir gazlar gibi) geniş ölçekte kullanılma potansiyelini modellememize yansıtmanızı sağlamak için 2050'dir. NZE Senaryosunda yer alan iklim hedefinin yorumlanması da hem devam eden sera gazı emisyonlarının hem de iklim bilimindeki gelişmelerin bir sonucu olarak zaman içinde değişmektedir (daha fazla ayrıntı için emisyonlarla ilgili 8. Bölüme bakınız).

1.2 2024'te seçili gelişmeler

Bu yıl gerçekleştirilen başlıca sektörel ve konuya özel model geliştirmeleri aşağıdakileri içermektedir:

Çapraz Kesim

Üretim ve ticaret

- Sanayi: Çelik, alüminyum ve amonyak için, talebin öngörülmesi için daha ayrıntılı bir metodoloji ve ticaret akışlarının yeni modellemesi geliştirilmiş ve GEC Modelindeki talep ve üretim projeksiyonlarıyla birleştirilmiştir. IEA'nın yeni Üretim ve Ticaret Modeline ilişkin tüm ayrıntılar, *Enerji Teknolojisi Perspektifleri* 2024'ün (IEA, 2024b) gelecek 2024 baskısında yer almaktadır.
- Taşımacılık: IEA senaryolarındaki enerji, malzeme ve temiz teknoloji ticareti projeksiyonları ile gemicilik faaliyetinin tam tutarlılığını sağlamak için gemicilik faaliyeti için yeni bir aşağıdan yukarıya model geliştirilmiştir. Daha fazlası için

Ticaret akışlarının farklı bileşenleri ile denizcilik faaliyetleri ve rotaları arasındaki kesişme hakkında bilgi için lütfen yakında yayınlanacak olan *ETP-24*'e bakınız.

Duyarlılık analizleri

- Görünümdeki belirsizlikleri keşfetmek için bir dizi duyarlılık ortaya konmuştur. Hassasiyet durumları seti, çıktıların STEPS sonuçlarından nasıl farklılaşabileceğini araştırmaktadır. Vakalar, STEPS'in temelini oluşturan geniş politika zeminini veya STEPS'te yansıtılan ekonomik ve demografik varsayımları değiştirmemektedir. Daha ziyade, dağıtım oranlarıyla ilgili bazı varsayımların değiştirilmesinin yakıt, sektör ve bölgeye göre enerji talebi görünümünü nasıl etkileyebileceğini değerlendirmektedirler.
- Her belirsizlik, etkilerin ölçülmesine ve enerji kaynağı, türü ve ilgili CO₂ emisyonlarına göre talep için makul bir sonuç aralığının daha iyi anlaşılmasını sağlamak için farklı etkilerin birleştirilmesine olanak tanıyan GEC Modeli çerçevesinde incelenmiştir. Bu duyarlılık analizlerini gerçekleştirirken, tüm yakıtlar için her bir belirsizliğin etkilerini dikkate alıyoruz. Analizler doğrudan etkilere odaklanmakta ve hizmet talebinin diğer alanlarında ortaya çıkan sinerjik veya dengeleyici etkiler hakkında varsayımlarda bulunmaktan kaçınılmaktadır.

Politikalar

- GEC Modelini bilgilendirmek için kullanılan politikalar, dünya çapında mevcut politikaların son durumu hakkında kapsamlı bilgi sağlayan ve Enerji Politikası Envanterinde analiz edilen Politikalar ve Önlemler Veritabanında (IEA, 2024c) artık tamamen çevrimiçi olarak mevcuttur.

Nihai enerji tüketimi

Endüstri

- Plastik ve kağıt ürünleri için farklı geri dönüşüm süreçlerinin temsili geliştirilmiştir. Örneğin, kimya endüstrisinde, rafine edilmiş metodoloji mevcut plastik atıklara ve plastik türüne ve geri dönüşüm süreçlerinin teknolojik hazırlığına dayalı geri dönüşüm potansiyeline daha derinlemesine bakmakta ve ayrıca kimyasal ve mekanik geri dönüşüm teknolojileri arasında ayırım yapmaktadır. Enerji tüketimi, emisyonlar ve bunların birincil üretim üzerindeki etkisinin bu şekilde ayrıntılı bir şekilde ortaya konması, geri dönüşüm ortamının daha incelikli bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır.
- Çelik, çimento ve alüminyum için seviyelendirilmiş üretim maliyeti modellemesi yeni parametreler ve süreç rotası seviyesinde daha fazla ayrıntı ile güncellenmiştir. Hafif sanayiler için ısıtma seçeneklerinin seçimine yönelik seviyelendirilmiş maliyet modellemesi güncellenmiştir.
- Hafif sanayiler için faaliyet tahminleri, temiz teknoloji üretimi ve kritik mineral madenciliğinden daha fazla aşağıdan yukarıya sinyal içerecek şekilde güncellenmiş ve enerji sistemi düzeyinde senaryoların tutarlılığı artırılmıştır.

Nakliye

- Karayolu modülü için, hafif hizmet tipi yolcu araçları, iki ve üç tekerlekli araçlar ve otobüslerin sahipliğini tahmin etmek için kullanılan metodoloji, bir eğri uydurma yaklaşımı dahil edilerek ve demiryolu faaliyet trendleri hesaba katılarak güncellenmiştir.
- Faaliyetlerin hafif hizmet binek araçlarından otobüslere kaydırılmasına ilişkin modelleme, bölgesel düzeyde yakıt fiyatı esnekliği tahminleri dahil edilerek geliştirilmiştir.
- Araç Üstü Yakıt Tüketim Ölçer (OBFCM) verileri kullanılarak "test döngüsü" ile "yol koşulları" arasındaki yakıt ekonomisi fark faktörlerinin güncellenmesi (Avrupa Komisyonu, 2024). Gerçek PHEV filo ölçümleri kullanılarak plug-in hibrit elektrikli araçların (PHEV'ler) kullanım faktörlerinin (UF, tam elektrikli modun toplam sürüş mesafesine oranı) güncellenmesi (ICCT, 2022).

- İddialı yakıt ekonomisi hedefleri olan bölgelerden araç ithal eden ülkelerde politikaların yakıt ekonomisi iyileştirmeleri üzerindeki etkisini değerlendiren ikinci el araç akışlarını hesaba katan bir yöntemin uygulanması.
- Gemicilik modelinin ayrıntı düzeyi önemli ölçüde artırılmıştır ve artık daha fazla gemi tipi ile yaş, boyut ve hız gibi ayrıntılı filo özelliklerini içermektedir. Bu, BM Otomatik Tanımlama Sistemi (AIS) ve Gemi Sicili veritabanları gibi yeni veri kaynaklarının entegrasyonu ve en son Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) yayınlarıyla uyum sayesinde mümkün olmuştur. Gemicilik modeli, mevcut gemilerin enerji verimliliği teknolojileri ve alternatif tahrik yöntemleri ile güçlendirilmesine izin verecek şekilde genişletilmiştir. Gemiler için bir toplam sahip olma maliyeti aracı geliştirilmiş ve yeni gemilerde ve yenilemelerde yakıt payları ve enerji verimliliği teknolojilerinin penetrasyonu hakkında bilgi vermek için gemicilik modeli ile birleştirilmiştir.

Binalar

- Alan ısıtma ve alan soğutma teknolojilerinin modellenmesi, ilgili yalıtım seviyelerine ve net sıfır standartlarına uygunluklarına bağlı olarak bina türüne göre farklılıkları yansıtacak şekilde geliştirilmiştir. Bu ilave ayrıntı düzeyi, modelin bina tipi başına farklı teknoloji seçenekleriyle hedeflenen politikaları yansıtmasına olanak tanır ve yalıtımın teknolojinin çalışması üzerindeki etkisini yakalar.
- Bina güçlendirme oranlarına ilişkin güncellenmiş modelleme varsayımları, ilgili enerji tasarrufları ve maliyetlerinin iyileştirilmiş değerlendirilmesiyle birlikte dahil edilmiştir.
- Veri merkezlerinden kaynaklanan enerji talebi, hızla gelişen bu alanda devam eden iyileştirmelerin bir parçası olarak artık modelde ayrı olarak yer almaktadır. Veri merkezlerinin elektrik tüketimi, Tüm Ekonomik Faaliyetlerin Uluslararası Standart Endüstriyel Sınıflandırması (ISIC) uyarınca hizmetler sektörü altında sınıflandırılmakta ve ayrıca soğutma, cihazlar ve yardımcı ekipman olarak ayrılmaktadır.

Saatlik elektrik talebi

- Saatlik elektrik talebi modelinin kapsadığı son kullanımların ayrıntı düzeyi artırılmıştır: alan ısıtma ve soğutma bina tipi ve teknolojisine göre bölünmüştür ve karayolu taşımacılığı şarj yeri ve şarj cihazı kapasitesine göre bölünmüştür. Model, ısı pompaları veya elektrikli araçlar için hızlı şarj cihazları gibi bazı teknolojiler için farklı yük modellerini barındırabilir.
- Bölgesel ısıtma için elektrik tüketimi, binalarda ve sanayide dağıtılmış ısının temel kullanımını ve dış ortam sıcaklığı ile ilgili yük değişimlerini yansıtan özel bir kategori olarak dahil edilmiştir.

Davranışsal değişim analizi

- APS'deki davranışsal değişikliklerin modellenmesi, NDC'lerdeki ve uzun vadeli stratejilerdeki davranışsal kaldıraçların nicelik düzeyini ve olanak sağlayan özelliklerin (planlanan kamu altyapısı veya amaçlanan politika desteği gibi) mevcut olup olmadığını yansıtacak şekilde geliştirilmiştir.

Elektrik üretimi

- Batarya depolama modeli, şebeke ölçeğindeki bataryalara ek olarak sayaç arkası uygulamaları içerecek şekilde genişletilmiştir.

Enerji tedariği

- Doğal gaz modelinin ticaret bölgeleri içindeki sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) akışları (yani bölge içi LNG ticareti) eklenmiştir.

Hidrojen

- Sıvı organik hidrojen taşıyıcı (LOHC), özellikle hidrojen ve toluen ile yapılan metilsikloheksan, hidrojen ticareti için bir nakliye seçeneği olarak eklenmiştir. Bu, LOHC'yi varış noktasında tekrar hidrojene dönüştürmek için dehidrasyon işlemini içerir.

Kritik mineraller

- GEC Modeline, madencilik ve rafinaj için ilan edilen proje boru hatlarına dayalı olarak altı odak kritik mineralin arzını tahmin etmek için yeni bir modül eklenmiştir. Birincil arz gereksinimleri, öngörülen ikincil arzın öngörülen toplam talepten çıkarılmasıyla değerlendirilmiştir.
- Mineral geri dönüşüm modeli, kritik minerallerin talep ve arzına yönelik daha geniş modele entegre edilmiştir. Enerji dışı sektörler için ikincil mineral arz projeksiyonları, sektördeki ikincil arz için tarihsel eğilimlere dayanmakta ve senaryoya göre toplama oranlarında ve verimlilik seviyelerinde kademeli bir iyileşme olduğu varsayılmaktadır. Temiz enerji uygulamaları için, kapsamlı bir literatür taramasına dayalı olarak, teknolojiye göre kullanım ömrünü (örneğin, güneş PV, rüzgar türbinleri ve EV'ler), uygulama ve mineral bazında toplama ve verim oranlarını değerlendiren, sektöre göre gelişmiş bir ayrıntı düzeyi vardır.

Ayrıştırma

- Ayrıştırma analitik çıktılarında biyometanol ve sentetik metanolün rolünün daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyacak şekilde nakliye (uluslararası ve yerel) için dikkate alınan yakıtların ayrıntı düzeyinin genişletilmesi.
- Konut sektörüne, farklı bina türlerini yansıtan alan ısıtma ve alan soğutma teknolojileri ile daha yüksek bir ayrıntı düzeyi eklenmiş ve ayrıştırma çıktılarındaki verimlilik kolunun daha rafine bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlanmıştır.

Hanehalkı enerji harcaması

- Hanehalkı enerji harcamalarını ve bu maliyetlerin hanehalkı harcanabilir gelirine oranını gelir dilimine göre değerlendirmek için yeni bir analiz geliştirilmiştir.

1.3 GEC Modeline genel bakış

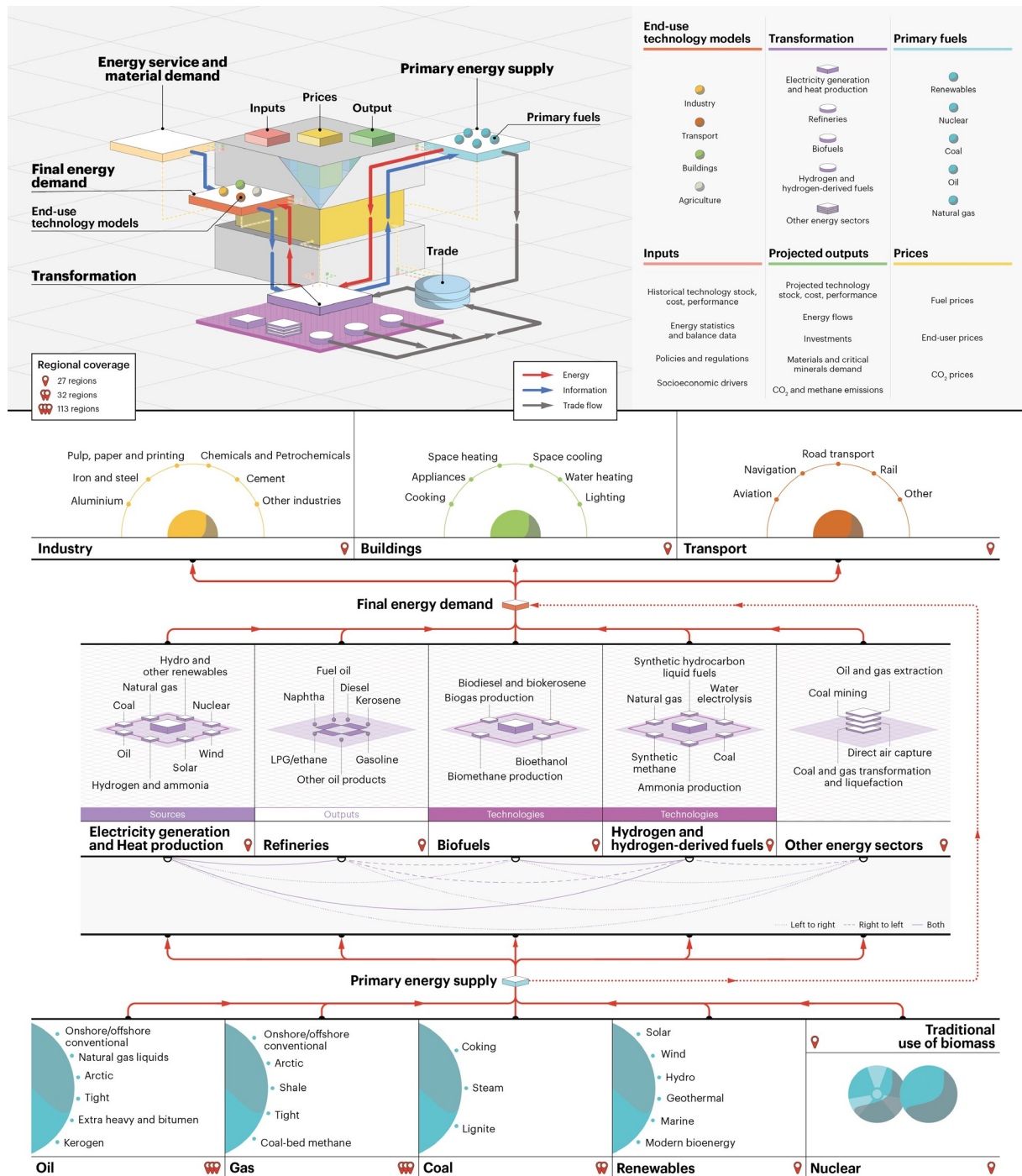
1.3.1 Modelleme metodolojisi

GEC Modeli enerji talebi, enerji dönüşümü ve enerji arzını kapsayan aşağıdan yukarıya bir kısmi optimizasyon modelidir (Şekil 1.1). Model, fiyat duyarlılıklarını entegre eden kısmi bir denge yaklaşımı kullanmaktadır. Son kullanıcı tarafından tüketilen nihai enerji olan enerji hizmeti talebini karşılamak için enerji tedarik zincirleri boyunca birincil enerjinin dönüşümünü gösterir. Modelin arz, dönüşüm ve talep modülleri dinamik olarak yumuşak bağlantılıdır: son kullanım sektörü modelindeki elektrik, hidrojen ve hidrojenle ilgili yakıtlar, biyoyakıtlar, petrol ürünleri, kömür ve doğal gaz tüketimi dönüşüm ve arz modüllerini harekete geçirir, bunlar da enerji fiyatlarını yinelemeli bir süreçte talep modülüne geri besler. Buna ek olarak, enerji sistemi CO₂, metan (CH₄) ve azot oksit (N₂O) emisyonları değerlendirilmektedir. Model ayrıca yatırımlar, kritik mineraller, istihdam, sıcaklık sonuçları, arazi kullanımı ve hava kirliliği gibi sistem sonuçlarını değerlendiren ek modüller de içermektedir.

Senaryoların ana dışsal itici güçleri ekonomik büyüme, demografik değişim ve teknolojik gelişmelerdir. Sanayideki çelik talebi veya her hanenin sahip olduğu cihaz sayısı gibi enerji hizmeti talebi etkenleri, geçmiş verilere ve sosyo-ekonomik etkenlere dayanarak ekonometrik olarak tahmin edilmektedir. Araç satış sayısının malzeme talebi üzerindeki etkisi gibi enerji hizmeti talebi sürücülerindeki etkileşimler de hesaba katılmaktadır.

Bu hizmet talebi mevcut ve yeni teknolojiler tarafından karşılanmaktadır. Tüm sektör modülleri (bu modüller hakkında daha fazla ayrıntı için sonraki bölümlere bakınız) projeksiyonlarını, ayrıntılı stok muhasebesi çerçeveleri aracılığıyla mevcut enerji altyapısı stokuna (örneğin, sanayideki üretim kapasitesi, binalardaki kat alanı, ulaşımdaki araç sayısı) dayandırmaktadır. Çeşitli senaryolarda hizmet talebinin nasıl karşılandığını değerlendirmek için, model çok çeşitli yakıt ve teknolojileri (mevcut ve ilave) içermektedir. Bu, farklı teknolojilerin ve süreçlerin mevcut enerji performansının ve enerji verimliliği iyileştirmeleri potansiyelinin dikkatli bir şekilde hesaplanmasını içerir.

Şekil 1.1► Küresel Enerji ve İklim Modeline genel bakış



IEA. CC BY 4.0.

Sektörel enerji ve emisyon dengeleri, nihai enerji nihai kullanımlarına - hizmet talebine - dayalı olarak, önce hizmet vermek için gereken nihai enerji talebini, ardından birincil enerjiyi gerekli yakıtlara dönüştürmek gereken dönüşümleri ve son olarak da birincil enerji ihtiyaçlarını belirleyerek hesaplanır. Bu, bazı unsurlar için kısmi optimizasyon modelini kullanan kısmi denge yaklaşımına dayanmaktadır ve bu enerji hizmet talebini karşılamak için yakıtların ve teknolojilerin payının belirlenmesinde özel maliyetler önemli bir rol oynamaktadır. Modelin farklı bölümlerinde logit ve Weibull fonksiyonları, teknolojilerin payını özel maliyetlerine göre belirlemek için kullanılmaktadır. Buna yatırım maliyetleri, işletme ve bakım maliyetleri, yakıt maliyetleri ve bazı durumlarda CO₂ emisyon maliyetleri dahildir. Hidrojen üretimi gibi belirli sektörlerde, özel olarak tasarlanmış ve bağlantılı optimizasyon modülleri kullanılmaktadır.

Model, toplumun istenen senaryo sonuçlarına ulaşması için ekonomik bir yol belirlemeyi amaçlarsa da, sonuçlar mutlaka en düşük maliyetli yolu yansıtmayabilir. Bunun nedeni, kısıtlanmamış bir en düşük maliyet yaklaşımının, piyasa aksaklıkları, siyasi veya bireysel tercihler, uygulanabilir artış oranları, sermaye kısıtlamaları ve kamuoyu kabulü gibi uygulamada dikkate alınması gereken tüm konuları hesaba katmada başarısız olabilmesidir. Bunun yerine analiz, teknik, ekonomik ve düzenleyici kısıtlamaları göz önünde bulundurarak maliyet minimizasyonu çerçevesinde bir yakıt ve teknoloji portföyünü takip etmektedir. Her sektöre göre uyarlanan ve kapsamlı uzman görüşlerini içeren bu yaklaşım, modelin farklı sektörlerin gerçeklerini mümkün olduğunca doğru bir şekilde yansıtmalarını sağlar. Ayrıca, yollarla ilgili gerçek risklere karşı bir koruma sağlar: bir teknoloji veya yakıt beklenen potansiyelini yerine getiremezse, genel enerji karışımındaki payı düşükse bir başkası tarafından daha kolay telafi edilebilir.

Modele dahil edilen tüm yakıtlar ve teknolojiler ya halihazırda ticari olarak mevcuttur ya da nispeten ileri bir geliştirme aşamasındadır ve bu nedenle en azından ölçekte beklenen performans ve maliyetler hakkında yeterli bilginin elde edilebileceği bir prototip boyutuna ulaşmıştır. Yeni temiz yakıtlar ve teknolojiler için maliyetlerin zaman içinde düşmesi beklenmektedir ve birçok durumda öğrenme eğrisi yaklaşımları ile bilgilendirilerek net sıfır geleceği ekonomik olarak uygulanabilir hale getirmeye yardımcı olmaktadır.

Arz ve talep arasındaki bu ana geri bildirim döngüsünün yanı sıra, dönüşüm ve tedarik modülleri arasında bağlantılar ve sentetik yakıt üretimi için doğrudan hava yakalama (DAC) yoluyla malzeme akışları veya biyogenik veya atmosferik CO₂ gibi başka bağlantılar da vardır. Birincil enerji ihtiyaçları ve kullanılabilirliği tedarik modülü ile etkileşim halindedir. Komple enerji dengeleri bölgesel düzeyde derlenir ve her bölgenin CO₂ emisyonları, CO₂ giderme teknolojilerinden kaynaklanan azalmalar dikkate alınarak türetilmiş CO₂ faktörleri kullanılarak hesaplanır.

GEC Modeli, simülasyon yazılımı Vensim'de (Ventana Systems Inc., 2024) uygulanmaktadır, ancak TIMES (IEA-ETSAP, 2024) dahil olmak üzere daha geniş bir yazılım araçları yelpazesinden yararlanmaktadır.

1.3.2 Veri girişleri

GEC Modeli, tüm küresel enerji sistemini kapsayan veri yoğun bir modeldir. Geçmiş enerji arzı, dönüşümü ve talebinin yanı sıra enerji fiyatlarına ilişkin verilerin çoğu IEA'nın kendi enerji ve ekonomik verilerinden elde edilmektedir. Özellikle enerji tüketen stokların tarihsel büyüklüğünü ve performansını belirlemek için, genellikle sektöre özgü çok çeşitli dış kaynaklardan elde edilen ek veriler de kullanılmaktadır.

Model her yıl mevcut en son verilere göre yeniden kalibre edilmektedir. Bu yılki projeksiyonlar için resmi temel yıl 2022'dir, çünkü bu, ülke bazında tam bir enerji dengesinin mevcut olduğu en son yıldır. Bununla birlikte, enerji üretimi ve talebi için 2023 ve 2024 tahminleri de dahil olmak üzere, mevcut olan her yerde daha yeni veriler kullandık. 2023'e ilişkin tahminler, IEA'nın 2023'te CO₂ Emisyonları raporuna dayanmaktadır; bu raporda veriler, IEA Enerji Veri Merkezi'ne gönderilen en son aylık veriler, ulusal idarelerin diğer istatistiki yayınları ve IEA Piyasa Raporu Serisinden kömür, petrol, doğal gaz, yenilenebilir enerji ve elektriği kapsayan en son piyasa verileri dahil olmak üzere bir dizi kaynaktan elde edilmiştir. Yatırım tahminleri, IEA Dünya Enerji Yatırımları 2024 raporuna dayalı olarak 2024 yılı verilerini içermektedir. Farklı sektör modellerinde kullanılan teknolojilerin yayılımı ve tekno-ekonomik performansına ilişkin veriler 2023 yılını ve 2024 yılına ilişkin tahminleri içermektedir, örneğin

Nüfus, ekonomik gelişmeler ve fiyatlar gibi makro etkenlerin yanı sıra fosil yakıt kaynakları ve teknoloji maliyetleri gibi tekno-ekonomik girdiler de dahil olmak üzere seçilmiş temel veri girdilerinin bir özeti için lütfen GEC Modeli temel girdi veri setine bakınız (IEA, 2024d).

1.3.3 Bölgesel kapsam ve zaman ufku

GEC Modeli, 2050 yılına kadar tüm küresel enerji sistemindeki enerji gelişmelerini kapsamaktadır ve bazı bölgeler için 2050'nin ötesine uzanma kapasitesine sahiptir. Simülasyonlar, enerji sektörü için saatlik modelleme ile yıllık bazda gerçekleştirilmektedir. Modelin mevcut versiyonu, 13'ü tek tek ülkeler olmak üzere dünyanın 27 bölgesi için sonuçlar sağlamaktadır. Modelin çeşitli tedarik bileşenleri daha fazla bölgesel ayrıma sahiptir: petrol ve gaz tedarik modeli 113 bölgeye ve kömür tedarik modeli 32 bölgeye sahiptir.

1.3.4 Yetenekler ve özellikler

IEA'nın GEC Modeli, enerji sistemi hakkında benzersiz bir kapsam ve ayrıntı sunmaktadır. Temel amacı, enerji arz ve talebinin yanı sıra enerji kullanımının çevresel etkilerini ve politika ve teknoloji gelişmelerinin enerji sistemi üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Model, uzun vadeli senaryo analizi yoluyla, aşağıdaki ana alanlarla ilgili olası geleceklerin analiz edilmesini sağlar:

- **Küresel ve bölgesel enerji eğilimleri:** Sektörlere ve yakıtlara göre enerji talebi, arz durumu ve kısıtları, uluslararası ticaret ve enerji dengelerinin değerlendirilmesi.
- **Enerji kullanımının çevresel etkisi:** Yakıt yanmasından kaynaklanan CO₂ emisyonları, enerji tüketimi projeksiyonlarından türetilmiştir. CO₂ proses emisyonları endüstriyel malzemelerin üretimine dayanmaktadır ve CH₄ ve N₂O emisyonları nihai enerji talebinin yanı sıra enerji dönüşümü için de değerlendirilmektedir. Petrol ve gaz faaliyetlerinden kaynaklanan metan, aşağıdan yukarıya tahminler ve doğrudan emisyon ölçümleri yoluyla değerlendirilmektedir (bkz. Metan İzleyici). Yerel hava kirleticileri de GEC Modeli ile IIASA'nın GAINS modeli arasında bağlantı kurularak tahmin edilmekte ve modellenen senaryoların sıcaklık sonuçları Sera Gazı Kaynaklı İklim Değişikliği Değerlendirme Modeli (MAGICC) kullanılarak değerlendirilmektedir.
- **Politika ve teknolojik gelişmeler:** politika eylemlerinin ve teknolojik gelişmelerin enerji talebi, arzı, ticareti, yatırımları ve emisyonları üzerindeki etkisi senaryolar arasında karşılaştırma yapılarak araştırılabilir.

Ayrıca, GEC Modeli, daha geniş enerji eğilimlerinin analizinin altında yatan ya da bu analizden doğan çok sayıda ayrıntılı özelliğe sahiptir. Bunlar şunları içerir:

- **Teknolojiler:** Diğer sektörlerin yanı sıra ağır sanayi, uzun mesafe taşımacılığı ve karbondioksit giderme teknolojilerindeki farklı uygulamalar için halen geliştirilmekte olanlar (prototip veya gösterim aşamasında) dahil olmak üzere 800'den fazla temiz enerji teknolojisinin ayrıntılı tekno-ekonomik karakterizasyonu.
- **İnsan merkezli geçişler:** Vatandaşlar için diğer sonuçların yanı sıra davranış değişiklikleri, enerji sektörü istihdamı, eşitlik sonuçları ve enerji satın alınabilirliğinin ayrıntılı modellemesi.
- **Kritik mineraller:** Enerji sektörünün dönüşümü için ihtiyaç duyulan kritik minerallere yönelik öngörülen talep ve arzın kapsamlı analizi.
- **Altyapı:** Elektrik sistemleri, fosil yakıtlar, hidrojenle ilgili yakıtların dağıtımı ve CO₂ taşıma seçenekleri dahil olmak üzere enerji altyapısı geliştirme ihtiyaçları ve stratejilerinin ayrıntılı modellemesi ve analizi.
- **Değişken yenilenebilir enerji potansiyeli:** Dünya genelindeki değişken yenilenebilir enerji potansiyellerinin ayrıntılı coğrafi analizi ve hidrojen üretimi için kullanılmasının etkisinin modellenmesi.

- **Modern enerji erişimi:** Tüm topluluklara enerji erişimi sağlamanın sonuçlarının ve fırsatlarının kapsamlı modellenmesi. Bu, elektriğe ve temiz pişirme tesislerine erişimi ve ek enerji talebinin, yatırımların ve ilgili sera gazı emisyonlarının değerlendirilmesini içerir.
- **Malzeme verimliliği:** Çelik, çimento, alüminyum, plastik ve gübre gibi malzemelerin kullanımını daha verimli hale getirmek için tedarik zincirleri boyunca stratejilerin granüler modellenmesi.
- **Yatırımlar:** Alt sektör ve teknoloji alanlarına göre genel enerji sektörü ve temiz enerji yatırımlarının ayrıntılı modellenmesi ve etkili finansman stratejileri üzerine kapsamlı analiz. Bu, öngörülen enerji talebini karşılamak için yakıt tedarik zincirlerindeki yatırım gereksinimlerini ve talep tarafı teknolojileri ve önlemlerini (örneğin enerji verimliliği, elektrifikasyon) içerir. Hükümet harcamaları da takip edilmektedir.
- **Ayrıştırma:** Senaryolar arasında ve zaman içinde farklı stratejilerin emisyonlara veya enerji tasarruflarına özel katkısını sistematik olarak analiz etmek için ayrıntılı matematiksel çerçeve.

1.3.5 Uluslararası enerji modelleme topluluğu ile bağlantılar

GEC Modelinin geliştirilmesinde IEA ve IEA dışındaki uzman değerlendirmelerinden yararlanılmakta ve IEA küresel modelleme topluluğundaki meslektaşlarıyla yakın işbirliği içinde çalışmaktadır. Örneğin, IEA Uluslararası Enerji Çalıştayına katılmakta ve düzenli olarak ev sahipliği yapmakta ve Entegre Değerlendirme Modelleme Konsorsiyumu ile düzenli olarak etkileşimde bulunmaktadır. 2021'deki ilk 2050'ye kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosu, Çin, Avrupa Birliği, Japonya, Birleşik Krallık, Amerika Devletleri ve IPCC dahil olmak üzere dünyanın dört bir yanından modelleme ekipleriyle yapılan tartışmalarla şekillendirilmiştir.

IEA ayrıca Teknoloji İşbirliği Programları (TCP) ağının bir parçası olarak dünyanın dört bir yanındaki araştırmacılar ve modelcilerle uzun yıllara dayanan bir çalışma geçmişine sahiptir. TCP'ler, dünyanın dört bir yanından hükümetlerin ve endüstrilerin çok çeşitli enerji teknolojileri ve ilgili konularda program ve projelere öncülük etmesini sağlayan bağımsız, uluslararası uzman gruplarının çalışmalarını desteklemektedir. 1977'de kurulan Enerji Teknolojisi Sistem Analizi Programı (ETSAP) TCP, en uzun süredir devam eden TCP'ler arasındadır. ETSAP TCP, TIMES modelleme platformu da dahil olmak üzere enerji sistemleri modelleme araçları aracılığıyla enerji ve çevre politikası kararlarının temelini oluşturan kanıt tabanını geliştirmede politika yapıcılarını desteklemekte ve yaklaşık 70 ülkeden yaklaşık 200 enerji modelleme ekibinden oluşan benzersiz bir ağı bir araya getirmektedir.

IEA'nın GEC Modeli aynı zamanda uluslararası kabul görmüş diğer modellerle de yakın etkileşim içindedir:

- IEA, farklı sera gazı bütçelerinin ortalama küresel sıcaklık artışı üzerindeki etkisine ilişkin analizini bilgilendirmek için ClimateResource tarafından geliştirilen ve IPCC tarafından kilit yayınlar için sıklıkla kullanılan **Sera Gazı Kaynaklı İklim Değişikliği Değerlendirme Modeli'ni (MAGICC)** kullanmaktadır.
- IEA modelleme sonuçları, IIASA tarafından geliştirilen ve sürdürülen **Sera Gazı - Hava Kirliliği Etkileşimleri ve Sinerjileri (GAINS)** modeli ile birleştirilmiştir. Bu, farklı IEA senaryolarının hava kirliliği üzerindeki etkisine ilişkin ayrıntılı analiz yapılmasına olanak sağlamaktadır.
- IEA sonuçları, IEA'nın biyoenerji kaynakları ve etkin kullanım stratejilerine ilişkin analizlerini tamamlamak üzere IIASA tarafından geliştirilen ve sürdürülen **Küresel Biyosfer Yönetim Modeli (GLOBIOM)** ile birleştirilmiştir.
- University College London tarafından geliştirilen Havacılık **Entegre Modeli (AIM)** havacılık sektörü modellememizin temelini oluşturmaktadır.
- IEA modelleme sonuçları, yatırım harcamalarındaki değişikliklerin küresel GSYİH üzerindeki etkilerini değerlendirmek için Uluslararası Para Fonu'nun (IMF) **Küresel Entegre Parasal ve Mali (GIMF)** modeliyle ilişkilendirilmiştir.
- Çeşitli kuruluşlar arasındaki işbirliği sonucunda geliştirilen CBS tabanlı bir optimizasyon aracı olan **Açık Kaynak Mekânsal Elektrifikasyon Aracı (OnSSET)**, IEA'nın enerji erişim modellemesini bilgilendirmek için kullanılmaktadır.

Kesişen girdiler ve varsayımlar

GEC Modeli, senaryoları tasarlamak ve hesaplamak için makro etkenleri, tekno-ekonomik girdileri ve politikaları girdi verileri olarak kullanır.

Ekonomik faaliyet ve nüfus, GEC Modeli senaryolarında enerji hizmetlerine yönelik talebin iki temel itici gücüdür. Aksi belirtilmedikçe, analiz için bir başlangıç noktası sağlamak ve sonuçların yorumlanmasını kolaylaştırmak amacıyla bunlar tüm senaryolarda sabit tutulmuştur. Enerji fiyatları bir diğer önemli girdidir.

Projeksiyonlar, nihai kullanımlarda, elektrik üretiminde ve diğer dönüşüm sektörlerinde kullanılan her bir yakıtın ortalama perakende fiyatlarını dikkate almaktadır. Bu son kullanım fiyatları, fosil yakıtların öngörülen uluslararası fiyatlarından ve sübvansiyon/vergi seviyelerinden türetilmiştir ve ülkelere göre değişiklik göstermektedir.

2.1 Nüfus varsayımları

Tablo 2.1► Bölgelere göre nüfus varsayımları

	Yıllık bileşik ortalama büyüme oranı (%)				Nüfus (milyon)				Kentleşme (nüfus payı, %)			
	2000-2023	2023-2030	2023-2035	2023-2050	2023	2030	2035	2050	2023	2030	2035	2050
Kuzey Amerika	0.9	0.6	0.5	0.4	509	529	542	566	83	84	86	89
Birleşik Devletler	0.7	0.5	0.5	0.4	338	350	358	373	83	85	86	89
C & S Amerika	1.0	0.7	0.6	0.5	532	559	574	601	82	83	85	88
Brezilya	0.9	0.5	0.4	0.2	216	224	228	231	88	89	90	92
Avrupa	0.3	0.0	0.0	-0.1	691	693	692	679	76	78	80	84
Avrupa Birliği	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	449	444	441	425	76	78	79	84
Afrika	2.5	2.3	2.2	2.0	1 458	1 708	1 897	2 482	45	48	51	59
Orta Doğu	2.1	1.4	1.3	1.1	269	297	315	364	73	75	76	81
Avrasya	0.4	0.3	0.2	0.2	240	244	247	255	65	67	68	73
Rusya	-0.1	-0.3	-0.3	-0.3	143	140	138	132	75	77	79	83
Asya Pasifik	1.0	0.5	0.5	0.3	4 319	4 489	4 584	4 734	51	55	57	64
Çin	0.5	-0.1	-0.2	-0.3	1 419	1 409	1 393	1 307	65	71	74	80
Hindistan	1.3	0.8	0.8	0.6	1 429	1 515	1 568	1 670	36	40	43	53
Japonya	-0.1	-0.6	-0.6	-0.6	124	119	116	105	92	93	93	95
Güneydoğu Asya	1.2	0.8	0.7	0.5	685	723	745	787	52	56	58	66
Dünya	1.2	0.9	0.8	0.7	8 018	8 518	8 851	9 680	57	60	62	68

Notlar: C & S Amerika= Orta ve Güney Amerika. Bölgesel grupların bileşimi için Ek'e bakınız.

Kaynaklar: IEA veri tabanları ve (UN DESA, 2022), (UN DESA, 2018), (Dünya Bankası, 2024), (OECD, 2024)'e dayalı analizler.

Her bir GEC Model bölgesi için nüfus artış oranları, 2022 tarihli Birleşmiş Milletler Nüfus Bölümü raporunda yer alan orta doğurganlık varyantı projeksiyonlarına dayanmaktadır (UN DESA, 2022). BM'nin bu yılki raporu yayınlandığında (Temmuz 2024) GEC modelleme döngüsü çoktan ilerlemiş olduğundan, en son zaman serileri sürücü girdileri olarak dahil edilememiştir. 2024 GEC modelleme döngüsünde nüfus 2023 yılında 8 milyarın biraz üzerindeyken 2050 yılında yaklaşık 9,7 milyara yükselmektedir. Nüfus artışı projeksiyon dönemi boyunca geçmiş trendlere paralel olarak yavaşlamaktadır: 2000-2023 döneminde yıllık %1,2'den 2023-2030 döneminde %0,9'a düşmüştür, bunun nedeni büyük ölçüde ortalama gelirler arttıkça küresel doğurganlık oranlarının düşmesidir.

2050'ye kadar küresel nüfustaki artışın yaklaşık beşte üçünün Afrika'da gerçekleşecek olması, Afrika kıtasının dünyanın Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine ulaşması açısından taşıdığı önemin altını çizmektedir. Yaklaşık dörtte biri

Çin'in nüfus artışının durması ve azalmaya başlamasıyla birlikte 2023 yılında dünyanın en kalabalık ülkesi haline gelecek olan Hindistan'ın tek başına büyümenin neredeyse %15'ini oluşturduğu Asya Pasifik bölgesinde daha fazla nüfus artışı yaşanacaktır.

Her bir GEC Model bölgesi için kırsal/kent ayrımına ilişkin tahminler (UN DESA, 2018)'den alınmıştır. Bu veri tabanı, projeksiyon ufkı boyunca yıllara göre ülkelere göre kentsel alanlarda ikamet eden nüfusun yüzdesini vermektedir. Bu veriler BM nüfus projeksiyonları ile birleştirilerek kırsal/kentsel bölünme tahmini hesaplanabilir. 2023 yılında dünya nüfusunun yaklaşık %57'kentsel alanlarda yaşayacağı tahmin edilmektedir. Bu oranın 2050 yılına kadar %68'e yükselmesi beklenmektedir.

2.2 Makroekonomik varsayımlar

Tablo 2.2► Bölgelere göre GSYİH ortalama büyüme varsayımları

	Yıllık bileşik ortalama büyüme oranı			
	2011-23	2023-35	2035-50	2023-50
Kuzey Amerika	2.2%	2.1%	1.9%	2.0%
Birleşik Devletler	2.3%	2.1%	1.9%	1.9%
Orta ve Güney Amerika	1.0%	2.5%	2.3%	2.4%
Brezilya	0.8%	2.1%	2.3%	2.2%
Avrupa	1.7%	1.8%	1.4%	1.5%
Avrupa Birliği	1.4%	1.5%	1.1%	1.2%
Afrika	3.0%	4.0%	4.0%	4.0%
Güney Afrika	1.0%	1.3%	2.7%	2.3%
Orta Doğu	2.1%	3.3%	3.1%	3.2%
Avrasya	1.9%	1.7%	1.4%	1.5%
Rusya	1.4%	1.0%	0.6%	0.7%
Asya Pasifik	4.7%	4.1%	3.0%	3.3%
Çin	6.2%	3.7%	2.4%	2.7%
Hindistan	5.9%	6.5%	4.3%	4.8%
Japonya	0.8%	0.7%	0.7%	0.7%
Güneydoğu Asya	4.2%	4.7%	3.4%	3.7%
Dünya	3.0%	3.1%	2.5%	2.7%

Not: Satın alma gücü paritesine göre 2023 yılı ABD doları ifade edilen GSYİH'ye göre hesaplanmıştır.

Kaynak: IEA analizi: IEA analizi (Oxford Economics, 2024a) ve (IMF, 2024)'e dayanmaktadır.

Kısa ve orta vadedeki ekonomik büyüme varsayımları IMF ve Oxford Economics'in en son değerlendirmeleriyle genel olarak tutarlıdır. Uzun vadede, her bir GEC Model bölgesindeki büyümenin yıllık uzun vadeli bir orana yakınsayacağı varsayılmaktadır. Bu demografik ve üretkenlik eğilimlerine, makroekonomik koşullara ve teknolojik değişimin hızına bağlıdır.

GEC Model 2024 senaryolarında, küresel ekonominin 2050 yılına kadar olan dönemde, ülkelere, bölgelere ve zamana göre büyük farklılıklar göstermekle birlikte, yılda ortalama %2,7 oranında büyüyeceği varsayılmaktadır (Tablo 2.2).

Enerji sistemindeki değişiklikleri yönlendiren politika ve düzenleyici mekanizmaların hızı, yapısı ve seçiminin, çeşitli ülkeler ve bölgeler arasında hem olumlu hem de olumsuz daha geniş ekonomik etkilere sahip olacağını kabul ediyoruz. Bununla birlikte, varsayılan ekonomik büyüme oranları senaryolar arasında sabit tutulmuştur, bu da farklı enerji ve iklim seçeneklerinin etkilerinin ortak bir zeminde karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır.

2.3 Fiyatlar

2.3.1 Uluslararası fosil yakıt fiyatları

Tablo 2.3► Senaryoya göre fosil yakıt fiyatları

USD (MER, 2023)	2023	ADIML AR			APS			NZE		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
IEA ham petrol (USD/varil)	82	79	77	75	72	63	58	42	30	25
Doğal gaz (USD/MBtu)										
Birleşik Devletler	2.7	3.9	4.1	4.2	3.2	3.0	2.9	2.1	2.0	2.0
Avrupa Birliği	12.1	6.5	7.6	7.7	6.0	5.2	5.2	4.4	4.1	4.0
Çin	11.5	7.2	8.2	8.3	6.9	6.2	6.2	5.0	4.8	4.8
Japonya	13.0	8.3	8.8	8.7	6.8	6.1	6.2	5.0	4.8	4.8
Buhar kömürü (USD/ton)										
Birleşik Devletler	57	51	42	40	42	31	27	28	23	23
Avrupa Birliği	129	68	69	64	64	51	48	57	43	39
Japonya	174	105	86	82	81	66	61	66	53	49
Kıyı Çin	150	101	88	82	78	67	61	64	54	49

Notlar: MBtu = milyon İngiliz termal birimi. IEA ham petrol fiyatı, IEA üyesi ülkeler arasında ağırlıklı ortalama ithalat fiyatıdır. Doğal gaz fiyatları brüt kalorifik değer bazında ifade edilen ağırlıklı ortalamalardır. ABD doğal gaz fiyatı, iç piyasada geçerli olan toptan satış fiyatını yansıtmaktadır. Avrupa Birliği ve Çin doğal gaz fiyatları boru hattı ve LNG ithalatının dengesini yansıtırken, Japonya doğal gaz fiyatı sadece LNG ithalatını . Kullanılan LNG fiyatları, yeniden gazlaştırma öncesi gümrük sınırındaki fiyatlardır. Buhar kömürü fiyatları kilogram başına 6 000 kilokaloriye ayarlanmış ağırlıklı ortalamalardır. ABD buhar kömürü fiyatı, maden ağız fiyatları artı nakliye ve taşıma maliyetlerini yansıtmaktadır. Kıyı Çin buhar kömürü fiyatı ithalat ve yurtiçi satış dengesini yansıtırken, Avrupa Birliği ve Japonya buhar kömürü fiyatları yalnızca ithalat içindir.

Kaynak: IEA GEC Model 2024.

GEC Modelindeki kömür, doğal gaz ve petrol için uluslararası fiyatlar, öngörülen talebi karşılamak üzere arzda yeterli yatırımı teşvik etmek için gereken fiyat seviyelerini yansıtmaktadır. Bunlar, tüm sektörlerdeki fosil yakıt talep ve arz projeksiyonlarının belirlenmesinde temel etkenlerden biridir ve yinelemeli modelleme yoluyla türetilir.

Arz modülleri, çeşitli arz seçeneklerinin maliyetleri ile kaynaklar ve üretim oranları üzerindeki kısıtlamaları dikkate alarak, belirli bir fiyat yörüngesi altında teşvik edilen kömür, doğal gaz ve petrol üretimini hesaplar. Fiyatlar küresel talebi karşılamak için yeterli üretimi teşvik edemeyecek kadar düşükse, fiyat seviyesi artırılır ve enerji talebi yeniden hesaplanır. Bu yinelemeli süreçten kaynaklanan yeni talep, öngörülen her yıl için talep ve arz arasında bir dengeye ulaşılan kadar tekrar arz modüllerine geri beslenir.

Fiyat yörüngeleri, uygulamada emtia piyasalarını karakterize eden dalgalanmaları ve fiyat döngülerini temsil etmeye çalışmamaktadır. Özellikle gerekli ve derin bir dönüşümden geçen sistemlerde dalgalanma potansiyeli her zaman mevcuttur.

Fosil yakıt fiyat patikaları senaryolar arasında farklılık göstermektedir (Tablo 2.3). Örneğin, Belirtilen Politikalar Senaryosunda (STEPS), fosil yakıtların kullanımını azaltmaya yönelik politikalar benimsenmesine rağmen, talep hala yüksektir. Bu durum, düşük enerji talebinin çeşitli kaynak türlerinin üretimi üzerindeki sınırlamaların daha az önemli olduğu ve arz maliyet eğrisinin üstündeki kaynaklardan fosil yakıt üretmeye daha az ihtiyaç duyulduğu anlamına geldiği Açıklanmış Taahhütler Senaryosu (APS) ve 2050'ye kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosuna (NZE Senaryosu) göre daha yüksek fiyatlara yol açmaktadır.

2.3.2 CO₂ fiyatları

Tablo 2.4► Senaryoya göre seçilmiş bölgelerde elektrik, sanayi ve enerji üretimi için CO₂ fiyatları

Ton CO ₂ başına ABD Doları (2023)	2030	2035	2040	2050
Belirtilen Politikalar Senaryosu				
Kanada	126	126	126	126
Şili ve Kolombiya	21	24	28	28
Çin	39	43	46	52
Avrupa Birliği	140	145	149	158
Kore	56	65	73	89
Açıklanmış Bağışlar Senaryosu				
Net sıfır emisyon taahhüdünde bulunan gelişmiş ekonomiler ¹	135	160	175	200
Net sıfır emisyon taahhüdünde yükselen piyasa ve gelişmekte olan ekonomiler ²	40	65	110	160
Diğer yükselen piyasa ve gelişmekte olan ekonomiler	-	6	17	47
2050'ye Kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosu				
Net sıfır emisyon taahhüdünde bulunan gelişmiş ekonomiler	140	180	205	250
Net sıfır emisyon taahhüdünde yükselen piyasa ve gelişmekte olan ekonomiler	90	125	160	200
Seçilmiş yükselen piyasa ve gelişmekte olan ekonomiler (net sıfır emisyon taahhüdü olmayan)	25	50	85	180
Diğer yükselen piyasa ve gelişmekte olan ekonomiler	15	25	35	55

Not: Değerler yuvarlanmıştır.

¹ Meksika hariç tüm OECD ülkelerini kapsamaktadır.

² Çin, Hindistan, Endonezya, Brezilya ve Güney Afrika'yı

kapsamaktadır. Kaynak: IEA GEC Model 2024.

CO₂ emisyonlarının fiyatlandırılması, farklı yakıtları kullanmanın göreceli maliyetlerini değiştirerek enerji talebini etkilediğinden, CO₂ fiyat varsayımları GEC Modelinin biridir. Günümüzde yaklaşık 50 ülke ve 40 alt ulusal yetki alanını kapsayan 75 doğrudan karbon fiyatlandırma aracı mevcuttur. Diğer birçoğunun da geliştirilmekte olan veya geliştirmeyi düşündükleri planları vardır. Tüm senaryolar, CO₂ fiyatlandırmasının yanı sıra kömürden çıkış planları, verimlilik standartları ve yenilenebilir enerji hedefleri gibi diğer politika önlemlerinin etkilerini de dikkate almaktadır. Bu politikalar karbon fiyatlandırması ile etkileşim halindedir; bu nedenle CO₂, diğer modelleme yaklaşımlarında sıklıkla olduğu gibi azaltımın marjinal maliyeti değildir.

STEPS, elektrik üretimi, sanayi, enerji üretim sektörleri ve havacılık, karayolu taşımacılığı ve binalar gibi son kullanım sektörlerini kapsayan ulusal ve ulusal altı düzeyde mevcut veya planlanan tüm karbon fiyatlandırma programlarını dikkate alır. APS'de, net sıfır emisyon taahhüdünde bulunan tüm bölgelerde daha yüksek CO₂ fiyatları uygulanmaktadır. Buna ek olarak, bazı gelişmekte olan ekonomilerin CO₂ emisyonlarını sınırlandırmak için planlar uygulamaya koyduğu varsayılmaktadır. Tüm bölgesel piyasaların denkleştirmelere erişimi vardır ve bunun da fiyatlarda bir yakınsamaya yol açması beklenmektedir. Sahra altı Afrika (Güney Afrika hariç) ve Diğer Asya bölgelerinde açık bir fiyatlandırma varsayılmamıştır. Bunun yerine, bu bölgeler APS'de karbonsuzlaştırmayı teşvik etmek için doğrudan politika müdahalelerine güvenmektedir. NZE Senaryosunda CO₂ fiyatları tüm bölgeleri kapsamakta ve tüm gelişmiş ekonomilerin yanı sıra Çin, Hindistan, Endonezya, Brezilya ve Güney Afrika dahil olmak üzere net sıfır emisyon taahhüdünde bulunan gelişmekte olan ekonomilerde hızla yükselmektedir. Kuzey Afrika, Orta Doğu, Rusya ve diğer Güneydoğu Asya gibi diğer gelişmekte olan ekonomilerde CO₂ fiyatları daha düşüktür, ancak yine de yükselmektedir. CO₂ fiyatları, enerji sistemlerini uyarlamak ve dönüştürmek için daha doğrudan politikalar izledikleri varsayılan diğer tüm yükselen piyasa ve gelişmekte olan ekonomilerde daha düşüktür (Tablo 2.4).

2.3.3 Son kullanıcı fiyatları

Yakıt son kullanım fiyatları

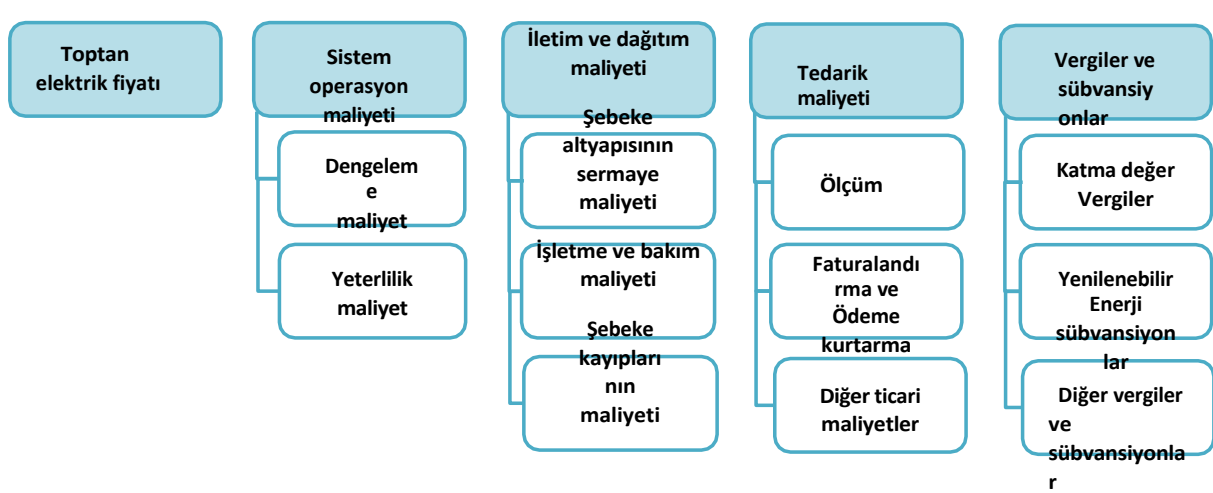
Her sektör ve GEC Model bölgesi için, nihai tüketimdeki ürün karışımı ve ülkeler arasındaki farklılıklar dikkate alınarak temsili bir fiyat (genellikle ağırlıklı bir ortalama) türetilir. Uluslararası fiyat varsayımları daha sonra projeksiyon dönemi boyunca kömür, petrol ve gaz için ortalama vergi öncesi fiyatları elde etmek için uygulanır. Uygulanabildiği yerlerde, tüketim vergileri, katma değer vergisi oranları, sübvansiyonlar ve CO₂ fiyatları tüm yakıtlar için ortalama vergi sonrası fiyatlara dahil edilmiştir. Her durumda, yakıtlar üzerindeki tüketim vergileri ve katma değer vergisi oranlarının projeksiyon dönemi boyunca değişmeyeceği varsayılmaktadır. Enerji ile ilgili tüketim sübvansiyonlarının, bölgeler ve senaryolar arasında değişen oranlarda olsa da, projeksiyon dönemi boyunca kademeli olarak azaltıldığı varsayılmaktadır. Tüketicileri korumaya yönelik hükümet eylemleri de dikkate alınmaktadır.

APS ve NZE Senaryosunda, petrol ürünlerine olan talebin azalması nedeniyle uluslararası petrol fiyatı STEPS'e kıyasla düşmektedir. Düşük benzin ve dizel fiyatlarının ulaştırma sektöründeki geri tepme etkisini önlemek için, son kullanıcı fiyatlarının en azından STEPS ile aynı seviyede tutulmasını sağlamak için gerekli olduğunda yakıt vergisinde artış şeklinde bir CO₂ vergisi uygulanmaktadır. Tüm fiyatlar ABD doları cinsinden ifade edilmiştir ve projeksiyon dönemi boyunca döviz kurlarında herhangi bir değişiklik olmadığı varsayılmıştır.

Elektrik son kullanım fiyatları

Model, elektrik son kullanım fiyatlarını toptan elektrik fiyatı, sistem işletim maliyeti, iletim ve dağıtım maliyetleri, tedarik maliyetleri ve vergi ve sübvansiyonların toplamı olarak hesaplamaktadır (Şekil 2.1).

Şekil 2.1 ▶ Perakende elektrik son kullanım fiyatlarının bileşenleri



IEA. CC BY 4.0.

Toptan elektrik fiyatlarının tek bir tanımı yoktur, ancak GEC Modelinde toptan fiyat, üreticilere çıktıları için ödenen ortalama fiyatı ifade eder. Her bölge için toptan elektrik fiyatları, belirli bir yılda faaliyet gösteren tüm santrallerin elektrik üretim ve depolama maliyetlerinin tamamını, yani sabit maliyetlerin yanı sıra değişken maliyetleri de karşıladığı varsayımı altında türetilir. Dolayısıyla toptan satış fiyatlarını etkileyen bölgeye özgü temel faktörler şunlardır:

- Elektrik üretim ve depolama tesislerinin ön sermaye yatırımı ve finansman maliyetleri.
- Elektrik üretim ve depolama tesislerinin işletme ve bakım maliyetleri.
- Kömür, doğal gaz, petrol ve diğer girdi yakıtlarının değişken yakıt maliyeti ve varsa üretim tesislerinin çıktılarının CO₂ maliyeti.

Sistem işletim maliyetleri harici çalışmalardan alınmış ve değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının varlığında bu çalışmaların sonuçlarına uygun olarak artırılmıştır. İletim ve dağıtım tarifeleri, düzenlenmiş bir varlık getiri oranı, varlık amortismanı ve işletme maliyetlerine dayalı olarak tahmin edilmektedir. Tedarik maliyetleri geçmiş verilerden tahmin edilmiş, vergi ve sübvansiyonlar da en son geçmiş verilerden alınmış ve her bir senaryo için ilgili varsayımlara uygun olarak görünüm dönemi boyunca sübvansiyon aşamalı olarak kaldırılmıştır.

Fosil yakıt sübvansiyonları

IEA, fosil yakıt tüketim sübvansiyonlarını (IEA, 2023) bir fiyat aralığı yaklaşımı kullanarak ölçmektedir. Bu, nihai son kullanıcı fiyatlarını, tam tedarik maliyetine karşılık gelen referans fiyatlarla veya uygun olduğunda, nakliye ve dağıtım maliyetlerine göre ayarlanmış uluslararası piyasa fiyatıyla karşılaştırır. Tahminler, son kullanıcılar tarafından tüketilen fosil yakıtlara verilen sübvansiyonları ve elektrik üretimindeki fosil yakıt girdilerine verilen sübvansiyonları kapsamaktadır.

Fiyat aralığı yaklaşımı, nihai fiyatları rekabetçi bir piyasada geçerli olan fiyatların altına düşüren tüm net etkisini yakalamak üzere tasarlanmıştır. Ancak, fiyat aralığı yaklaşımı kullanılarak üretilen tahminler, var olduğu bilinen tüm müdahale türlerini kapsamamaktadır. Bu nedenle, sübvansiyonların ekonomik verimlilik ve ticaret üzerindeki etkisini olduğundan az gösterme eğilimindedirler. Bu sınırlamalara rağmen, fiyat aralığı yaklaşımı tahmin etmek ve politika geliştirmeyi desteklemek amacıyla ülkeler arasında sübvansiyon seviyelerini karşılaştırmak için değerli bir araçtır (Koplow, 2009).

2.4 Politikalar

Senaryo analizinin temelinde, modellememizi besleyen enerji ve iklimle ilgili politikalar ve önlemler listesini güncellemek ve genişletmek için kapsamlı bir çaba gösterilmiştir. Hükümet politikalarına ilişkin varsayımlar bu analiz için kritik öneme sahiptir ve senaryolar arasındaki sonuç farklılıklarının ana nedenidir.

İki önemli IEA politika izleme çalışması senaryolara girdi sağlamaktadır:

- **Enerji Politikası Envanteri:** IEA'nın Enerji Politikası Envanteri, dünya çapında enerji politikasının mevcut durumu hakkında benzersiz bir veri tabanı sağlar. Bu izleyici, IEA'nın Politikalar ve Önlemler Veritabanındaki 50'den fazla ülke için en güncel politikaları envanterler. Karbon yakalama, kullanım ve depolama (CCUS), metan azaltımı, hidrojen ve kritik mineral politikaları hakkındaki bilgilerle birlikte IEA'nın Hükümet Enerji Harcamaları İzleyicisi'nden düzenli güncellemeleri bir araya getirerek düzenlemeleri, hükümet harcama programlarını ve ticaret politikalarını yakalar. Bu politika bilgileri hükümetlerden, ortak kuruluşlardan ve IEA analizlerinden toplanmıştır. Hükümetler politika bilgilerini periyodik olarak gözden geçirme fırsatına sahiptir.
- **SDG 7 veritabanı:** IEA, elektriğe ve temiz yemek pişirmeye (SKA 7.1) erişim konusunda yıllık ülke bazında veriler sağlayarak ve yenilenebilir enerji (SKA 7.2) ve enerji verimliliğine (SKA 7.3) ilişkin SKA hedeflerine yönelik resmi ilerlemeyi izlemek için ana veri kaynağı olarak enerjiye erişimdeki kalıcı açığı değerlendirmek ve analiz etmek için küresel çabaların ön saflarında yer almaktadır. IEA, IRENA, UNSD, Dünya Bankası ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ile birlikte SKA 7'ye ilişkin küresel ilerlemenin izlenmesi için atanan ortak saklama kuruluşlarından biridir.

Enflasyon Azaltma Yasası (Amerika Birleşik Devletleri), Fit for 55 (Avrupa Birliği), İklim Değişikliği Yasası (Avustralya) ve GX Yeşil Dönüşüm (Japonya) gibi yeni politikalar ve önlemler modelin hazırlanması sırasında küresel olarak dikkate alınmıştır. Seçilmiş ülke ve bölgelerde sektörlere göre temel politika hedefleri ve önlemlerinin bir özeti *World Energy Outlook-2024* Ek B'de bulunabilir.

Dikkate alınan politikalar senaryolar arasında eklemelidir: APS altında listelenen önlemler STEPS'tekileri tamamlar. Ek politika varsayımları NZE Senaryosuna dahil edilmiş ve küresel enerji sistemlerini bu sonuçlara yönlendirecek gösterge niteliğinde politika oluşturma ve karbonsuzlaştırma kilometre taşları olarak sunulmuştur.

Yayınlanan tablolar geniş kapsamlı politika çerçeveleri ile başlamakta, ardından sektörlere göre daha ayrıntılı politikalar gelmektedir: enerji, sanayi, binalar ve ulaştırma. Tablolar sadece son yayın döngüsünden bu yana yürürlüğe giren, uygulanan veya revize edilen politikaları listelemektedir. Bazı bölgesel politikalar, küresel ölçekte enerjinin şekillendirilmesinde önemli bir rol oynadıkları takdirde dahil edilmiştir (örneğin, çok büyük illerde veya eyaletlerde bölgesel karbon piyasaları ve standartları). Tablolar tüm politikaları ve önlemleri içermemektedir; daha ziyade, dünyanın dört bir yanındaki ülkelerdeki duyuruların ve planların kapsamlı bir incelemesinden elde edilen ve günümüzde küresel enerji talebini esas olarak şekillendiren politikaları vurgulamaktadır. IEA senaryolarında kısmen veya tamamen karşılanan endüstri öncülüğündeki girişimler ve üretim hedefleri Ek B'yi oluşturan son unsurdur.

2.5 Tekno-ekonomik girdiler

Çok çeşitli teknolojilerin dahil edilmesi GEC Modelinin temel bir özelliğidir. Modeldeki teknoloji yelpazesini ve bunların tekno-ekonomik varsayımlarını güncellemek için kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır.

GEC Modeli, bugün piyasada mevcut olan teknolojilerin genişliğini içermektedir. Buna ek olarak model, henüz piyasada bulunmayan yenilikçi teknolojileri ve bireysel teknoloji tasarımlarını, olgunluklarını ve beklenen piyasaya giriş zamanlarını karakterize ederek bütünleştirmektedir. Her sektör ve teknoloji alanı için yeni proje duyuruları ve önemli teknolojik gelişmeler düzenli olarak yayınlanan veri tabanlarında takip edilmektedir.

Modellenen senaryolar, benzer şekilde detaylı bir teknoloji izleme süreci ile bilgilendirilmektedir. Örneğin, proje planlama finansman durumu, projelerin STEPS'e mi yoksa APS'ye mi yansıtılacağı konusunda önemli bir . Teknoloji geliştirme ilerlemesi ve yeni teknolojilerin piyasalara sunulma süresi için senaryolar, temiz enerji inovasyonuna verilen destek ve uluslararası işbirliğinin derecesi karbonsuzlaştırma konusundaki kararlılıkla birlikte arttıkça farklı bir ilerleme hızı varsaymaktadır.

Aşağıdaki veri tabanları, farklı senaryoların tanımlanması için özellikle önemlidir:

- **Temiz yenilikçi teknolojiler takibi:**
 - **Temiz Teknoloji Rehberi:** net sıfır emisyon hedefine ulaşılmasına katkıda bulunan tüm enerji sistemindeki yaklaşık 600 ayrı teknoloji tasarımının ve bileşeninin Teknoloji Hazırlık Seviyesini (TRL) izleyen interaktif veri tabanı. Rehber her yıl güncellenmektedir.
 - **Temiz Enerji Gösteri Projeleri Veritabanı:** 2022'de başlatılan ve her yıl güncellenen bu **veri tabanı**, enerji sektöründeki 500'den fazla gösteri projesinin yeri, durumu, kapasitesi, zamanlaması ve finansmanı hakkında daha ayrıntılı izleme sağlar.
 - **Temiz Enerji İlerlemesinin İzlenmesi:** Temiz enerji geçişleri için kritik öneme sahip enerji sisteminin 50'den fazla bileşeni için piyasa yayılımının ve tekno-ekonomik performans ölçütlerinin ve bunların NZE Senaryosunun yörüngesi boyunca kısa vadeli 2030 kilometre taşlarına doğru ilerlemelerinin yıllık olarak izlenmesi.
- **Hidrojen Üretim Projeleri Veritabanı:** 2000 yılından bu yana enerji veya iklim değişikliğini azaltma amacıyla hidrojen üretmek için dünya çapında devreye alınan tüm projeleri kapsar.
- **Global EV Outlook:** dünya genelinde elektrikli mobilite alanındaki son politika ve pazar gelişmelerini tanımlayan ve tartışan yıllık yayın. Temiz Enerji Bakanlıkları Elektrikli Araçlar Girişimi (EVI) üyelerinin desteği ile geliştirilmiştir.

Teknoloji maliyetleri model için önemli bir girdidir. Yakıt pillerinde olduğu gibi aksi belirtilmedikçe, tüm maliyetler yalnızca ekipman maliyetini değil, tamamen kurulu/teslim edilmiş teknolojileri temsil etmektedir. Kurulan/teslim edilen maliyetler şunları içerir

ekipmanın kurulumu için mühendislik, tedarik ve inşaat maliyetleri. Bazı açıklayıcı örnekler aşağıdakileri içerir:

- **Demir bazlı çelik** üretim maliyetleri, teknoloji ve bölgesel farklılıkları göz önünde bulunduran ve geleneksel ve yenilikçi üretim rotaları arasında ayrım yapan bir çeşitlilik göstermektedir. Konvansiyonel rotalar, azaltılmamış yüksek fırın-bazık oksijen fırını (BF-BOF) ve doğrudan indirgenmiş demir-elektrik ark fırınıdır (DRI-EAF). Yenilikçi rotalar ise CCUS'lu BF-BOF'lar, CCUS'lu DRI-EAF ve %100 elektrolitik hidrojen bazlı DRI- EAF'dir.
- **Araç** maliyetleri, müşterilere sunulan elektrikli araçların nihai pazar fiyatlarından bağımsız olarak hareket eden toplam üretim maliyetindeki düşüşleri daha iyi yansıtmak için perakende satış fiyatlarını değil üretim maliyetlerini yansıtmaktadır. Küresel ortalama batarya paketi boyutu için 2023 yılındaki tarihsel değerler kullanılmıştır. Hibrit araçlarda, gelecekteki maliyet artışı bölgesel yakıt ekonomisi ve emisyon standartlarından kaynaklanmaktadır.
- **Elektrolizör** maliyetleri, invertörler de dahil olmak üzere kurulu elektrolizör teknolojilerinin (modellenen maliyetlerin daha düşük olduğu Çin hariç) öngörülen ağırlıklı ortalamasını yansıtmaktadır.
- **Yakıt hücresi** maliyetleri sadece yığın üretim maliyetlerine dayanmaktadır, kurulum/teslimat maliyetlerine değil. Sağlanan maliyetler, hafif hizmet araçlarına yönelik otomotiv yakıt hücresi yığınları içindir.
- **Kamu hizmeti ölçeğindeki sabit batarya** maliyetleri, dört saatlik bir süre için maksimum güç çıkışı sağlamak üzere derecelendirilmiş tüm batarya sistemlerinin ortalama kurulum maliyetlerini yansıtmaktadır.

Tablo 2.5► Senaryoya göre seçilmiş teknolojiler için sermaye maliyetleri

	Belirtilen Politikalar				Açıklanan Taahhütler			2050'ye kadar Net Sıfır Emisyon		
	2023	2030	2035	2050	2030	2035	2050	2030	2035	2050
Demir bazlı çelik üretiminin seviyelendirilmiş maliyeti (USD/t)										
Geleneksel										
Alt aralık	510	470	470	470	500	530	590	550	600	730
Üst aralık	630	560	560	560	690	730	770	750	770	850
Yenilikçi										
Alt aralık	n.a	650	660	650	680	700	650	730	670	680
Üst aralık	n.a	870	880	850	960	880	820	910	760	830
Araçlar (USD/araç)										
Hibrit arabalar	17 500	15 100	15 000	15 000	15 100	15 000	14 900	15 100	15 000	14 900
Akülü elektrikli arabalar	18 900	15 800	14 700	13 700	15 100	14 200	13 300	14 800	13 600	12 900
Piller ve hidrojen										
Hidrojen elektrolizörleri (USD/kW)										
Alt aralık	1 300	850	810	710	750	620	550	640	560	520
Üst aralık	2 160	1 320	1 180	1 010	1 050	940	820	960	860	780
Yakıt hücreleri										
(USD/kW)	90	65	55	45	55	45	35	50	40	30
Kamu hizmeti ölçeğinde sabit bataryalar										
(USD/kWh)	250	175	155	130	170	150	125	165	145	120

Notlar: t= ton; kW= kilowatt; kWh= kilowatt-saat. Tüm değerler ABD doları cinsindendir (2023).

Son kullanım sektörleri

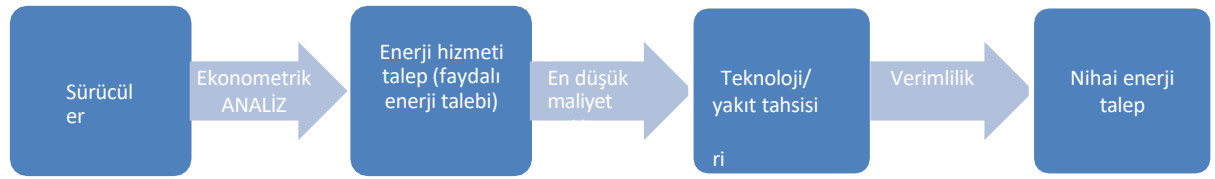
27 bölgenin tamamı önemli sektörel ve son kullanım detaylarıyla modellenmiştir. Özellikle:

- **Sanayi**, beş enerji yoğun ve sekiz enerji yoğun olmayan alt sektörden oluşmaktadır.
- **Binalar**, konut ve hizmet binaları olarak ayrılmış ve altı son kullanım ayrı ayrı modellenmiştir.
- **Ulaşım**, karayolu taşımacılığı için önemli ayrıntılarla birlikte dokuz moda ayrılmıştır.
- **Tarım** modellemesi, sektördeki yakıt ve enerji tüketen uygulamaların çeşitliliğini yansıtmaktadır.

Toplam nihai enerji talebi, her bir nihai talep sektöründeki enerji tüketiminin toplamıdır. Her bir alt sektörde veya son kullanımda en az yedi enerji türü gösterilmektedir: kömür, petrol, gaz, elektrik, ısı, hidrojen ve yenilenebilir enerji. Ana petrol ürünleri - sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), nafta, benzin, kerosen, dizel, ağır fuel oil (HFO) ve etan - her bir nihai sektör için ayrı ayrı modellenmiştir.

Sanayide çelik üretimi veya binalarda hane halkı büyüklüğü gibi talep tarafı etkenleri, geçmiş verilere ve sosyo-ekonomik etkenlere (GSYİH ve nüfus gibi) dayalı olarak ekonometrik olarak tahmin edilmektedir. Tüm nihai kullanım sektörü modülleri projeksiyonlarını mevcut enerji altyapısı stokuna dayandırmaktadır. Bu, ulaşımdaki araç sayısını, sanayideki üretim kapasitesini ve binalardaki taban alanını içerir. Yapı, politika veya teknolojiye beklenen değişiklikleri dikkate almak için, her bir özel enerji hizmetini karşılayabilecek çok çeşitli teknolojiler modele entegre edilmiştir. Son kullanıcı yakıt fiyatları ve teknoloji maliyetleri, teknolojilerin ve yakıtların dağılımının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır, ancak gerçek dünyadaki maliyet dışı etkiler de bir rol oynamaktadır. Tüm son kullanım teknolojilerinin verimlilik düzeyine göre her bir sektör ve alt sektör için nihai enerji talebi elde edilir (Şekil 3.1).

Şekil 3.1 ▶ Talep modüllerinin genel yapısı



IEA. CC BY 4.0.

3.1 Endüstri

Sanayi, en fazla enerji tüketen ve CO₂ yayan son kullanım sektörüdür. Toplam nihai enerji tüketiminin %39'unu ve CO₂ %45'ini (elektrik ve ısıdan kaynaklanan emisyonlar dahil) oluşturmaktadır. Endüstri modeli, küresel endüstri enerji talebinin %70'ini oluşturan beş enerji yoğun sektörü kapsamaktadır:

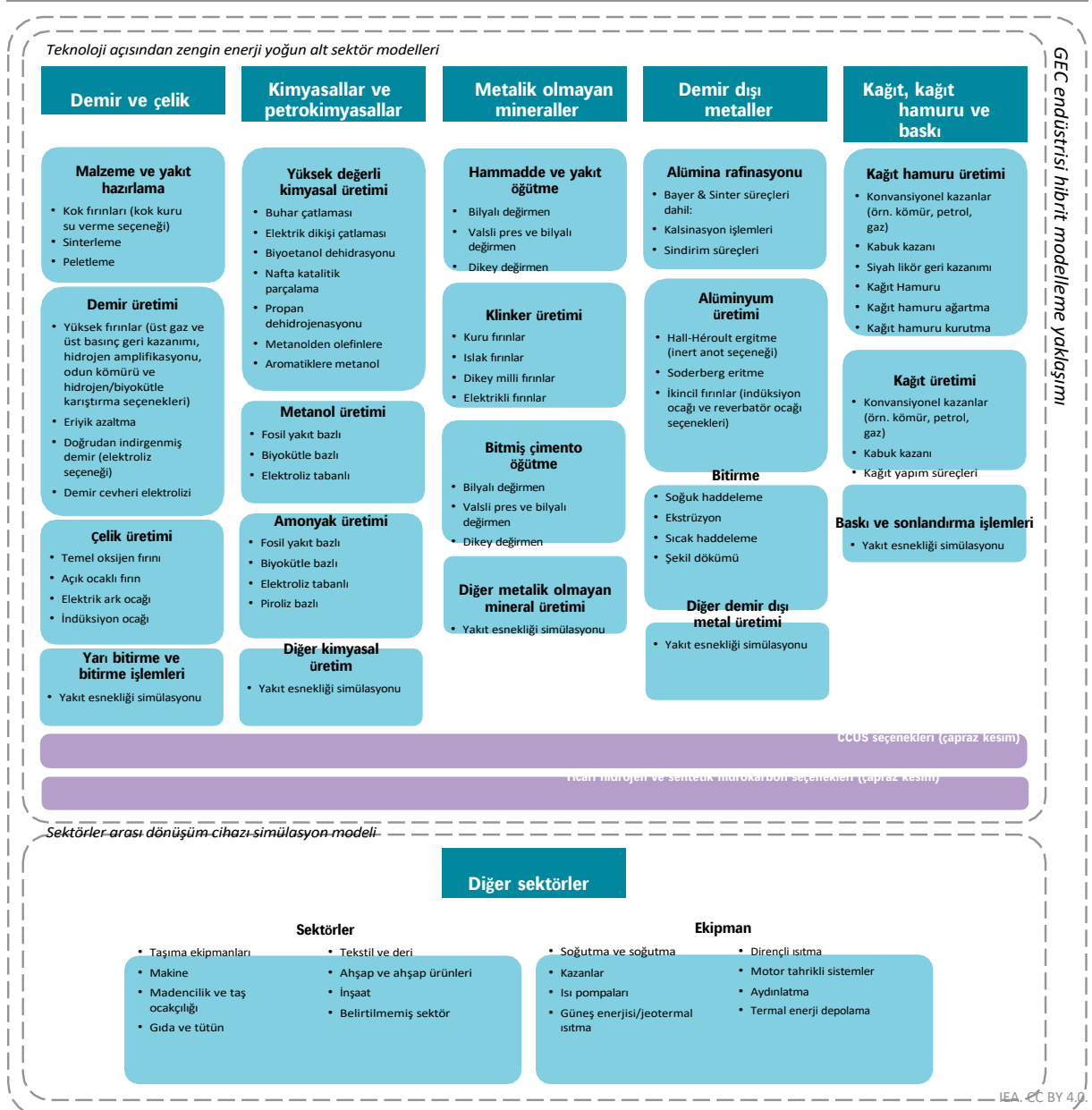
- Demir ve çelik üretiminin teknoloji açısından zengin modellemesi ile demir ve çelik
- Amonyak, metanol ve yüksek değerli kimyasal üretiminin teknoloji açısından zengin modellemesi ile kimyasallar
- metalik olmayan mineraller, çimento üretiminin teknoloji açısından zengin modellemesi
- alümina ve alüminyum üretiminin teknoloji açısından zengin modellemesi ile demir dışı metaller
- kağıt, kağıt hamuru ve baskı.

Ayrıca enerji yoğun olmayan sekiz sektörü de kapsamaktadır: inşaat; gıda ve tütün; makine; madencilik ve taş ocaklığı; ulaşım ekipmanları; ağaç ve ağaç ürünleri; ve başka yerde belirtilmeyen diğer sanayi.

Sanayi sektörü modeli, hem simülasyon hem de optimizasyon modellerinin güçlü yönlerini tek bir simülasyon çerçevesinde birleştirmekte olup, kısıtlamaları ve girdi parametreleri, diğer hususların yanı sıra, eski ETP TIMES optimizasyon çerçevesinin periyodik model çalışmaları tarafından bilgilendirilmektedir.

3.1.1 Endüstri modeli kapsamı ve yaklaşımı

Şekil 3.2► Sanayide son kullanım alt sektörlerine göre başlıca teknoloji kategorileri



GEC sanayi modelinin amaçları doğrultusunda, sanayi sektörü Uluslararası Standart Sanayi Sınıflandırması (ISIC) Bölüm 7, 8, 10-18, 20-32 ve 41-43 ile madencilik ve taş ocaklığı (madencilik ve yakıt çıkarma hariç), inşaat ve imalatı kapsayan Grup 099'u içermektedir. Bu kapsam, toplam nihai tüketimin tüm sanayi bileşenlerini kapsayan IEA Enerji Dengelerinin yapısını takip etmektedir. Kimyasal hammadde (enerji dışı kullanımın bir bileşeni) ve yüksek fırın ve kok fırını enerji kullanımı (hem dönüşüm hem de kendi kullanımı) da sanayi sınırlarına dahildir. Nihai endüstriyel enerji tüketimi, yerinde üretilenler de dahil olmak üzere endüstriyel süreçlerde kullanılan tüm elektriği içerir (örneğin, birleşik ısı ve güç üniteleri aracılığıyla). Bu nedenle, sahada elektrik üretmek için kullanılan yakıt, çifte sayımdan kaçınmak için bu raporlamanın dışında tutulur ve bu yakıt dönüşüm sektöründe muhasebeleştirilir. Petrokimya hammaddesinin yanı sıra, diğer

Enerji dışı kullanım GEC Modelinin sanayi sektörü sınırına dahil edilmemiş, bunun yerine aynı çerçevede ayrı bir kategori olarak modellenmiştir.

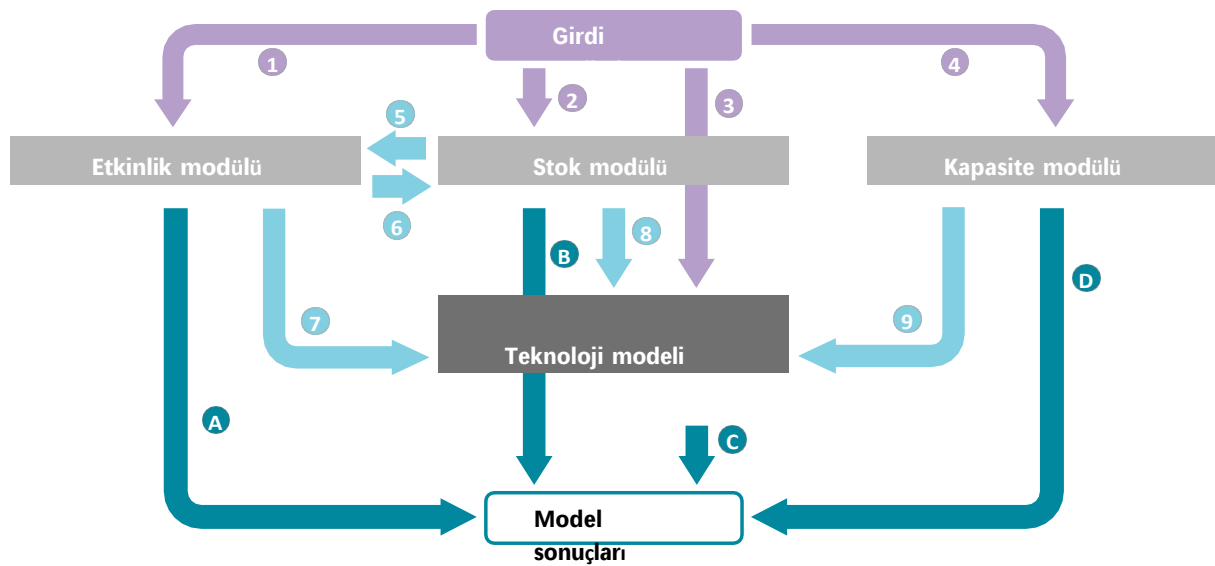
Sanayi sektörü hibrit bir yaklaşım kullanılarak modellenmiştir (Şekil 3.2). Eski ETP TIMES optimizasyon çerçevesinin periyodik model çalışmaları ile bilgilendirilen teknoloji açısından zengin simülasyon modelleri, beş enerji yoğun alt sektör bileşeni için kullanılmaktadır (demir ve çelik; kimyasallar ve petrokimyasallar içinde birincil kimyasallar; metalik olmayan mineraller içinde çimento; demir dışı metaller içinde alüminyum; kağıt, kağıt hamuru ve baskı). Geriye kalan enerji yoğun olmayan sanayi alt sektörleri (inşaat, madencilik ve taş ocakçılığı, ulaşım ekipmanları, makine, gıda ve tütün, ağaç ve ağaç ürünleri, tekstil ve deri ve başka yerde belirtilmeyen sanayi) çapraz kesen bir dönüşüm cihazı simülasyon yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Beş enerji yoğun alt sektörün (birincil kimyasalların yanı sıra kimyasallar, çimentonun yanı sıra metalik olmayan mineraller, alüminyumun yanı sıra demir dışı metaller, demir ve çelik sektöründeki alt işlem süreçleri ve kağıt, kağıt hamuru ve baskı sektörü) artık bileşenleri için, enerji yoğun olmayan alt sektörlerde olduğu gibi benzer bir çapraz kesim yaklaşımı uygulanmıştır.

Enerji yoğun beş alt sektör modeli, proses teknolojilerinin enerji performansını proses ünitesi düzeyinde etmektedir (örn. kömür yüksek fırını, nafta buhar krakeri). Kalan sanayi alt sektörleri için çapraz kesen simülasyon modeli, binlerce malzeme ve ürünün üretimi sırasında gerekli olan çeşitli enerji hizmetlerini sağlamak için kullanılan ana dönüştürme cihazlarının (örn. motorlar, ısıtma ekipmanları) stokunu karakterize etmektedir. GEC endüstri modelinin bu bileşenlerinin her biri için benimsenen yaklaşımlar hakkında daha fazla bilgi için aşağıdaki alt bölümlere bakınız.

3.1.2 Enerji yoğun alt sektörler

Beş enerji yoğun sanayi alt sektörünün her biri için modelleme çerçevesi bir dizi etkileşimli alt modülden ve bir çekirdek teknoloji modelinden oluşmaktadır (bkz. Şekil 3.3). Alt modüller bir faaliyet modeli, bir stok modeli ve bir kapasite modelinden oluşmaktadır.

Şekil 3.3> Sanayi sektörü modeli iç modül yapısı ve temel veri akışları



IEA. CC BY 4.0.

Notlar: Dahili endüstri modeli akışları: 1) Tarihi üretim, nüfus projeksiyonu, sanayi katma değer projeksiyonu; 2) Son kullanım talebi, ürün ömürleri, proses verimleri, geri dönüşüm ve yeniden kullanım oranları; 3) Enerji ve hammadde yoğunlukları, enerji fiyatları, CAPEX ve operasyonel harcamalar (OPEX), ömürler, teknoloji dağıtım kısıtlamaları, CO₂ emisyonları azaltma yörüngesi; 4) Tarihi ve planlanan kapasite, ömürler, yenilemeler; 5) Tüketim projeksiyonları; 6) Malzeme stoklarının doygunluğu, malzeme verimlilik faktörleri; 7) Ticaret dahil üretim projeksiyonları; 8) Hurda mevcudiyeti; ve 9) Artık kapasite. Model sonuçları: A) Malzeme üretimi; B) Malzeme stoklarının doygunluğu; C) Enerji tüketimi, CO₂ emisyonları, teknoloji payları, yatırımlar; ve D) Kurulu, eklenen ve emekliye ayrılan kapasite.

GEC sanayi modelinin her bir alt sektörü için faaliyet sürücüleri, belirli bir zamanda belirli bir senaryoda üretilen malzeme tonajlarıdır. Faaliyet modellemesi, tüm enerji yoğun sanayi alt sektörleri için benzer bir şekilde ele alınmaktadır. Malzeme talebi, malzeme verimliliği stratejilerinin modellenmesiyle birlikte bir faaliyet modeli ve bir stok modeli arasındaki etkileşim yoluyla öngörülmektedir. Faaliyet modeli, kişi başına talebi hesaplamak için malzeme tüketimine ilişkin ülke düzeyindeki geçmiş verileri kullanır, ardından nüfus projeksiyonlarını ve sanayi katma değer projeksiyonlarını (hem alt sektör hem de toplam sanayi katma değeri) kullanarak toplam talebi ileriye dönük olarak tahmin eder. Sektör katma değer projeksiyonları kişi başına talepteki değişim hakkında bilgi verir.

Talep projeksiyonlarına ilişkin faaliyet modelinin sonuçları, binalar, ulaşım ve tedarik modüllerinden gelen aşağıdan yukarıya malzeme talebi girdilerini ve malzeme stoklarının zımni birikimini hesaplamak için diğer nihai ürün payları ve ömürleri hakkında tamamlayıcı varsayımları kullanan stok modelini besler. Stok modelindeki stok doygunluğu da bir dizi yineleme yoluyla faaliyet modelindeki kişi başına malzeme talebi doygunluğunu bildirir.

Değer zincirleri genelinde malzeme verimliliği stratejileri de modellenmiştir. Bu modelleme çalışması temel olarak literatüre ve malzeme verimliliğine ilişkin önceki IEA yayınlarına dayanmaktadır (IEA, 2019). Dikkate alınan stratejiler şunlardır:

- **Tasarım aşaması:** hafifletme (aynı ürünü başına daha düşük bir ortalama kütle ile üretme), gelecekteki malzeme tasarrufu için tasarım (azaltmayı mümkün kılmak için modüler tasarım, geri dönüştürülebilirlik için tasarım)
- **İnşaat ve imalat:** artan verim (yarı imalat ve imalatla kayıpların azaltılması), azalan malzeme israfı (daha dikkatli inşaat uygulamaları ve malzeme kullanımı)
- **Kullanım:** daha uzun yaşam süreleri (binaların başka kullanımlar için yenilenmesi, belirli ürünler için bileşenlerin yeniden kullanılması), ürünlerin daha yoğun kullanımı (örneğin araç paylaşımı veya bir binanın günün daha büyük bir bölümünde kullanılması)
- **Kullanım ömrü sonu:** doğrudan malzemelerin yeniden kullanımı (tüketici sonrası malzemelerin - metaller söz konusu olduğunda yeniden eritilmeden - aynı veya başka uygulamalar için kullanılması), geri dönüşüm (daha fazla toplama, daha iyi ayıklama ve gelişmiş geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi).

Diğer nihai kullanım sektörlerinde ortaya çıkan stratejiler (örn. bina ömrünün uzatılması, araç hafifletme) aşağıdan yukarıya talep tahminleri yoluyla faaliyet modellemesine beslenirken, endüstri sınırı içindeki malzeme verimliliği stratejileri (örn. üretim verimliliği iyileştirmeleri, doğrudan yeniden kullanım ve geri dönüşüm) stok modeli içinde modellenir. Bu stratejiler malzeme talebinin azalmasına yol açar ve bu da bir malzeme verimliliği faktörü aracılığıyla faaliyet modeline aktarılır. Faaliyet modelinden elde edilen faaliyet tahminleri ve stok modelinden elde edilen hurda mevcudiyeti (yarı imalat, imalat ve tüketici sonrası hurda dahil) ana teknoloji modelini besler.

Model bölgeler arasında çelik, alüminyum ve amonyak için malzeme ticareti (nihai veya ara ürünler için) IEA'nın Üretim ve Ticaret (MaT) modeli aracılığıyla modellenmiştir. Bu model, 2050 yılına kadar farklı senaryolar altında genel üretim ve ticaret maliyetlerinin optimizasyonuna dayalı ticaret akışlarını öngörmektedir. MaT model metodolojisi hakkında daha fazla bilgi yakında yayınlanacak olan ETP-2024 raporunda yer almaktadır. Diğer malzemeler için ticaret, teknoloji modelinde endojen olarak modellenmez, bunun yerine faaliyet ve stok modellerinde geliştirilen faaliyet projeksiyonlarına yansıtılır. Açıklanan politikaların veya öngörülen enerji fiyat sinyallerinin aksi yönde kanıt sağladığı belirli durumlar dışında, malzeme üretimi ve tüketimindeki ticaret modellerinin mevcut eğilimleri takip edeceği öngörülmektedir. Bölgesel malzeme üretimi ve talebi, net ticaret modellerine ilişkin bu projeksiyonlarla tutarlıdır.

Kapasite modeli, tesis türüne göre tarihi ve planlanan tesis kapasitesi ilaveleri ve iyileştirmeleri hakkında veriler içerir. Yatırım döngüleriyle ilgili varsayımları kullanarak, tesis yenilemelerini ve emekliye ayırmaları hesaplar. Sonuçta ortaya çıkan kalan kapasite, ana teknoloji modelini bilgilendirir. Kapasite modeli ayrıca belirli bir zamanda tesislerin ortalama yaşına ilişkin projeksiyonlar sağlar ve yatırım gereksinimlerinin hesaplanmasına olanak tanır.

Her sektörün ana teknoloji modeli, ilgili üretim rotaları için gerekli proses teknolojilerinin ayrıntılı bir temsilinden oluşur. Her ülke veya bölge için enerji kullanımı ve teknoloji portföyleri, ilgili enerji kullanımı ve malzeme üretimi istatistikleri kullanılarak temel yılda karakterize edilir. Modelleme ufku boyunca, malzeme talebi (faaliyet modeli çıktıları tarafından belirlendiği gibi), payları ilan edilen projeler, politikalar ve destek programları, gerçek dünyadaki teknoloji ilerlemesi ve önceki ETP TIMES optimizasyon modeli tarafından bilgilendirilen teknolojiler ve yakıtlar tarafından karşılanır. Bu model, genel sistem maliyetini (hem enerji maliyetleri hem de yatırımlardan oluşan) en aza indirecek seçimler yapmak üzere ayarlanmış amaç fonksiyonu ile kısıtlı bir optimizasyon çerçevesi kullanmaktadır.

Teknoloji ve yakıt karışımındaki değişikliklerin yanı sıra verimlilik iyileştirmeleri, kısmen mevcut en iyi teknolojilerin penetrasyonu ve enerji performansına ilişkin dışsal varsayımlar, hammaddelerin mevcudiyetine ilişkin kısıtlamalar (stok modeli çıktılarına göre hurda mevcudiyeti gibi), mevcut teknolojilerin ve süreç yollarının tekno-ekonomik özellikleri ve yenilikçi teknolojilerin ticari ölçekte sergilenmesine ilişkin varsayılan ilerlemenin bir kombinasyonundan kaynaklanmaktadır. Sonuçlar, fiziksel sermayenin ne kadar hızlı devredileceği (kapasite modeli çıktılarına göre mevcut kapasitenin emekliye ayrılması dahil) ve çeşitli teknoloji seçenekleri ve yakıtların göreceli maliyetleri hakkındaki varsayımlara duyarlıdır. Belirli bir senaryo aynı zamanda modelin gereken bir CO₂ emisyon yörüngesine tabidir. Model çıktıları arasında enerji tüketimi, sıcaklık seviyesine göre ısı, yakıt yanması ve hem salınan hem de yakalanan CO₂ emisyonları, teknoloji payları, hammadde ve ara endüstriyel malzeme akışları ve yatırım gereksinimleri yer almaktadır.

Bazı endüstriyel sektörler, belirli amonyak, metanol veya demir bazlı çelik üretim süreçleri gibi endüstriyel tesis içinde "yerinde" hidrojen üretme ve kullanma özelliğine sahiptir. Bu hidrojen standart enerji dengelerinde raporlanmaz, ancak buhar reformu veya su elektrolizi yoluyla üretilip üretilmediğine bağlı olarak fosil yakıt veya elektrik olarak raporlanır. Küresel hidrojen muhasebesini oluşturmak için gerekli olan bu hidrojenin muhasebesi, özel bir hidrojen modülünde gerçekleştirilir. Bu modülün çıktıları, yerinde üretilen hidrojen miktarları (düşük emisyonlu veya değil), elektrolizör kapasitesi ve ilgili yatırım gereksinimleri, enerji girdisi ve ilgili CO₂ yanı sıra yakalanan ve depolanan emisyonlardır.

3.1.3 Enerji yoğun olmayan alt sektörler

Enerji yoğun olmayan alt sektörler için faaliyet modellemesi, enerji yoğun sektörlerden farklı bir yaklaşım izlemektedir. Bu alt sektörler, çoğu durumda net bir ortak ara ürün olmaksızın çok çeşitli nihai ürünler üretmektedir. Bu durum, çok çeşitli nihai ürünlere sahip olan ancak fiziksel olarak üretimin net bir şekilde öngörülebildiği ortak bir ara ürüne sahip olan enerji yoğun alt sektörlerle tezat oluşturmaktadır (örneğin demir çelik sektöründe ham çelik). Bu nedenle, makroekonomik göstergeler (örneğin endüstriyel katma değer) fiziksel üretim yerine enerji yoğun olmayan alt sektörler için faaliyet itici güçleri olarak kullanılmaktadır. Makroekonomik göstergeler ile endüstriyel enerji talebi arasındaki tarihsel ilişkiler ve diğer nihai kullanım modellerinden gelen talep sinyalleri (örneğin, ulaşım ekipmanları sektörü için ulaşım modelinden araç satışları; makine sektörü için yoğunlukla temiz teknoloji üretimi; madencilik sektörü için kritik mineral ve diğer cevher talebi) ve ilgili durumlarda malzeme verimliliği hususları (enerji yoğun alt sektör analizlerinin sonuçlarına dayalı olarak) kullanılarak, aşağıdaki kategorilerde enerji hizmeti talebi projeksiyonları yapılmıştır:

- Beş sıcaklık bandında (0-60 °C, 60-100 °C, 100-200 °C, 200-400 °C ve 400 °C üzeri) ısı verilir.
- Mekanik işler motorlar tarafından teslim edilecektir.
- Toplamda diğer enerji hizmetleri (soğutma, aydınlatma vb.)

Bu enerji hizmeti talepleri, enerji yoğun olmayan sanayi alt sektör modelleri için nihai faaliyet itici güçlerini oluşturmaktadır.

Her bir faaliyet talebi kategorisini karşılamak için farklı yakıtlar (fosil yakıtlar, güneş enerjisi, jeotermal, elektrikli ısıtma, ısı pompaları, hidrojen, biyoenerji) kullanan bir dizi farklı ısıtma teknolojisi, termal enerji depolama ve bir dizi motor seçeneği (motor tahrikli sistemin farklı verimlilikleri, motorun kendi verimlilikleri, değişken hızlı tahrik seçeneği) dahil olmak üzere dizi teknoloji karakterize edilmiştir. Bu teknolojilerin her biri tarafından karşılanan enerji hizmeti talebinin payları bir Weibull fonksiyonu kullanılarak modellenmiştir. Bu fonksiyon, her bir teknolojinin seviyelendirilmiş maliyeti (yakıt fiyatı gelişimi ve herhangi bir CO₂ fiyatının etkisi dahil), yakıt bulunabilirliği üzerindeki kısıtlamalar (örneğin biyoenerji kaynakları), teknolojinin hazır olması, potansiyel üzerindeki sınırlamalar (örneğin orta ve yüksek sıcaklık ısı bantlarında endüstriyel ısı pompası penetrasyonu) ve senaryonun herhangi bir CO₂ emisyonu kısıtlaması ile bilgilendirilir.

Enerji yoğun olmayan sektörlerde (ve enerji yoğun alt sektör modellerinde kapsanmayan enerji yoğun sektörlerin kalan kısımlarında) aşağıdan yukarıya teknoloji modellemesinin kapsamadığı çok yakıtlı süreçlerin veya işlemlerin kalan enerji hizmeti talebini karşılamak için kullanılan yakıtların (ve ilgili emisyonların) payları bir Weibull fonksiyonu kullanılarak yakıt bazında modellenmiştir. Bu fonksiyon, yakıt fiyatlarının (herhangi bir CO₂ fiyatının etkisi de dahil olmak üzere) gelişimi ile bilgilendirilir. Senaryo tarafından belirlenen CO₂ kısıtlamalarına da uyulur.

3.1.4 Sanayi sektörü yatırımları

Yatırım raporlamasının sınırları sermaye harcamalarını (CAPEX) ve mühendislik, tedarik ve inşaat maliyetlerini içerir. Malzeme verimliliği için yatırımlar, malzeme tasarrufu maliyetlerine dönüştürülen malzeme verimliliği stratejileri için CO₂ azaltma maliyetlerine ilişkin verilere dayanmaktadır. Sabit işletme ve bakım harcamaları (OPEX), modeldeki teknolojilerin ekonomik karakterizasyonu bağlamında dikkate rağmen, raporlanan yatırımlara dahil edilmemiştir. Enerji sistemi yatırımları, temel endüstriyel ekipmanlara yapılan CAPEX'i içermez, ancak bir teknolojinin enerji veya emisyon performansını kademeli olarak (örneğin mevcut en iyi teknolojilerin benimsenmesi yoluyla enerji verimliliği iyileştirmeleri) veya önemli ölçüde (örneğin elektrolizör ve karbon yakalama ekipmanı) ayarlamak için gereken ek yatırımı içerir. Temel endüstriyel ekipmanlara yapılan diğer yatırımlar da hesaba katılır, ancak enerji sistemi yatırımları sınırları içinde raporlanmaz.

3.1.5 Girdi verileri

Modele girdi verileri çok çeşitli kaynaklardan gelmektedir. Faaliyet modellemesinde kullanılan tarihsel üretim ve tüketim kaynakları arasında Dünya Çelik Birliği (worldsteel), Uluslararası Gübre Birliği, Birleşik Devletler Jeolojik Araştırmalar, Uluslararası Alüminyum Enstitüsü ve bir dizi özel kaynak bulunmaktadır. enerji yoğunluklarına ilişkin veriler çeşitli endüstri kaynaklarından (örneğin Küresel Beton ve Çimento Birliği tarafından denetlenen Getting the Numbers Right yayını), akademik literatürden ve endüstri bağlantılarından elde edilmiştir. CAPEX ve OPEX benzer şekilde endüstri ve akademik kaynakların bir kombinasyonundan gelmektedir.

Nüfus, ekonomik göstergeler (örneğin sanayinin katma değeri), yakıt maliyetleri - yani son kullanım enerji fiyatları ve CO₂ fiyatları ana GEC Modeli tarafından sağlanmaktadır (bkz. Bölüm 2). GEC modelleme çerçevesinden ve ilgili iş akışlarından elde edilen diğer önemli girdiler arasında hidrojen ve CCUS projeleri veritabanları ile Temiz Teknoloji Kılavuzu ve Gösteri Projeleri Veritabanının bir parçasını oluşturan teknoloji hazırlık değerlendirmeleri yer almaktadır. Tekno-ekonomik parametreler, hem yukarıda bahsedilen iş akışlarının bir bileşeni olarak hem de belirli sektör veya teknoloji alanlarında 'derinlemesine' analizler hazırlanırken (örneğin IEA'nın Demir ve Çelik Teknolojisi Yol Haritası, Amonyak Teknolojisi Yol Haritası, Petrokimyasalların Geleceği) periyodik olarak gözden geçirilmektedir.

3.2 Nakliye

GEC ulaştırma modeli, eski Dünya Enerji Modeli (WEM) ve Hareketlilik Modeli'nin (MoMo) güçlü yönlerini bir araya getirmekte ve karayolu taşımacılığı, havacılık, denizcilik ve demiryolu için özel sektörel modellerden oluşmaktadır.

3.2.1 Tarihsel veri tabanı

Taşımacılık modelleme çalışmalarının temel dayanaklarından biri, karayolu taşıt satışları, stokları, faaliyetleri ve operasyonlarına ilişkin kamuya açık verilere dayalı olarak her yıl güncellenen karayolu taşımacılığı veri tabanıdır. Karayolu veri tabanı ayrıca Elektrikli Araçlar Girişimi için veri ve analitik çalışmalardan da faydalanmaktadır (IEA, 2022a). Benzer tarihsel veri tabanları demiryolu, uluslararası deniz taşımacılığı ve ticari yolcu havacılığının modellenmesi için temel oluşturmaktadır.

Her bölge, her bir karayolu taşımacılığı modu için araç satışları, kilometre ve eski modele göre enerji yoğunluğunun yanı sıra genel araç stoku, yük faktörleri ve yakıt verimliliğini içeren bilgiler temelinde karakterize edilir.

Veritabanı, Faaliyet, Yapı ve Yoğunluğun Yakıt kullanımı tahminlerini belirlediği ASIF çerçevesine göre, göstergeler arasında iç tutarlılığı sağlamaya çalışarak, birbirleriyle bağlantılı çeşitli değişkenlere ilişkin geçmiş verilerin ilişkilendirilmesine olanak tanır:

$$F_i = A_i \cdot \left(\frac{F_i}{A_i} \right) = A_i \cdot S_i \cdot I_i = F$$

F	toplam Yakıt kullanımı
F_i	Belirli bir dizi özelliğe sahip araçlar tarafından kullanılan yakıt (i) (örn. hizmet, mod, araç ve güç aktarma organlarına göre segmentler)
A	araç Etkinliği (araç-kilometre [vkm] olarak ifade edilir)
$A_i / A = S_i$	Sektörel Yapı (aynı ayrıştırma düzeyi)
$F_i / A_i = I_i$	Enerji Yoğunluğu, yani vkm başına ortalama yakıt tüketimi (aynı ayrıştırma seviyesi)

İzlenen parametreler arasında araçların satışları/yeni tescilleri, ikinci el ithalatları, hayatta kalma yaşları, stokları, kilometreleri, araç faaliyetleri (araç-kilometreleri [vkm]), yükleri/doluluk oranları, yolcu ve yük faaliyetleri (yolcu-kilometreleri [pkm] ve ton-kilometreleri km)), yakıt ekonomileri ve enerji kullanımı (ülkelere göre enerji talebine ilişkin IEA verilerine dayalı olarak) yer almaktadır.

Aşağıdaki parametreler toplanır ve yıllık bazda yol enerji dengelerine göre kalibre edilir/doğrulanır:

- Satış/yeni araç tescil verileri kamuya açık veri kaynaklarından (örneğin Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği [ACEA], ABD Ulaştırma İstatistikleri Bürosu ve diğerleri) alınmıştır.
- Binek hafif hizmet araçları için yakıt ekonomisi verileri, tescilli bir veri tabanından alınan toplu verilere, artı bölgesel araç test döngüleri arasında Dünya Hafif Hizmet Test Döngüsüne dönüştürmelere (harici bir araştırma raporuna araştırma raporlarına dayalı olarak), artı bu test döngüsü ile gerçek dünyadaki belirli yakıt tüketimi arasındaki farka ilişkin tahminlere (yine harici dayalı olarak) dayanmaktadır.
- Otobüsler, kamyonlar ve iki/üç tekerlekli araçlar için yakıt ekonomisi verileri, yaklaşık 20 yıl boyunca çeşitli akademik, hükümet ve endüstri raporlarından veya teknik hesaplamalardan alınmıştır.
- Stoklar, farklı araç türlerinin filoda ne kadar süreyle tutulduğuna (yani hurdaya ayırma işlevlerine) ilişkin tahminlerimize dayanmaktadır ve güvenilir dış tahminler mevcut olduğunda (örneğin ABD ve Avrupa'da olduğu gibi), bunlar resmi verilerle kalibre edilmektedir (örneğin ACEA, ABD Ulaştırma Bürosu)

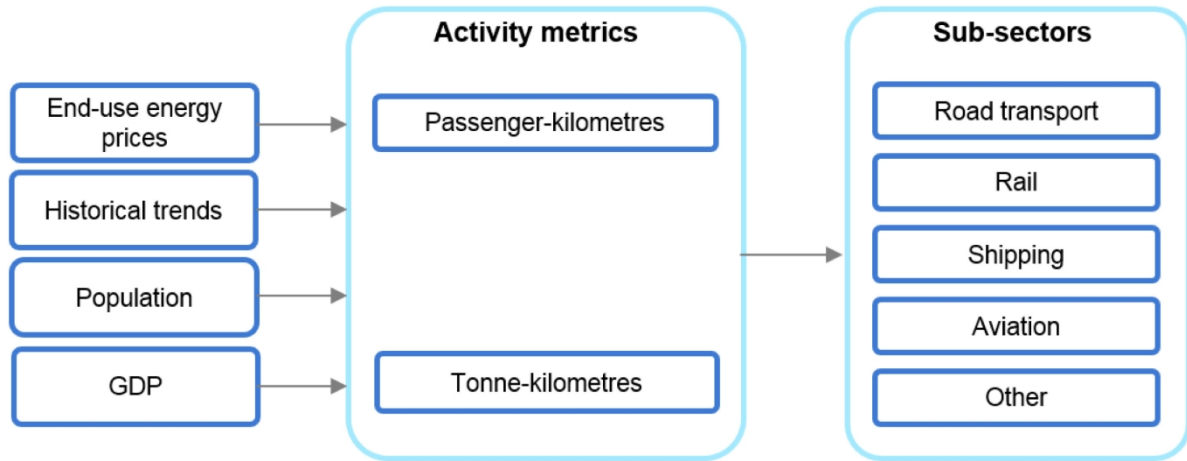
İstatistikler). Karayolu filosunun yaş dağılımına ilişkin akademik veya sektörel çalışmaların mevcut olduğu ülkelerde, hurdaya ayırma fonksiyonları bunlarla karşılaştırılır/kalibre edilir.

- Doluluk (araç başına ortalama kişi sayısı) ve Yük Faktörleri (araç başına ortalama yük ağırlığı) resmi istatistiklere örneğin Eurostat), akademik raporlara veya anketlere dayanmaktadır veya veri bulunmadığında analogi/regresyon tabanlı tahminlerle geliştirilmiştir.
- Ortalama kilometre (yani yıllık katedilen kilometre) tahminleri de benzer şekilde resmi verilerden ve literatürden alınmış veya bunlarla karşılaştırılmış/kalibre edilmiştir.
- Hurdaya ve kilometre daha sonra tüm araç kategorilerinde (örneğin iki/üç tekerlekli araçlar, otomobiller, otobüsler, hafif ticari araçlar, orta ve ağır kamyonlar) ve tüm yakıt/aktarma organı türlerinde (örneğin benzin, dizel, geleneksel hibrit, plug-in hibrit, batarya ve yakıt hücreli elektrik, vb) IEA enerji dengelerinde bildirilen karayolu benzin, dizel, elektrik, doğal gaz ve LPG tüketiminin ülke veya bölgesel zaman serileriyle eşleşecek şekilde ayarlanır.

3.2.2 Taşıma modülü

Ulaşım modülü, karayolu, havacılık, demiryolu ve deniz taşımacılığı modlarını kapsayan çeşitli alt modellerden oluşmaktadır (Şekil 3.4) ve tüm model bölgelerinde ayrıntılı bir aşağıdan yukarıya yaklaşımı içermektedir.

Şekil 3.4► Ulaşım talebi modülünün yapısı



IEA. CC BY 4.0.

Not: Diğer, boru hattı ve belirtilmemiş taşımacılığı içerir.

Her bir bölge için, yolcu-kilometre ve ton-kilometre gibi faaliyet seviyeleri, nüfus, GSYİH ve son kullanıcı fiyatlarının bir fonksiyonu olarak her bir ulaştırma modu için ekonometrik olarak tahmin edilmektedir. Taşımacılık faaliyeti, trenler ve iç deniz taşımacılığı hariç tüm modlar için tahmin edilen kilometre başına yakıt maliyeti esnekliği aracılığıyla fiyatla ilişkilendirilmiştir. Bu esneklik değişkeni, yakıt verimliliğinin artmasını takiben artan araç kullanımının "geri tepme" etkisini hesaba katmaktadır. Enerji yoğunluğu, enerji verimliliği ve yakıt fiyatlarındaki değişiklikler dikkate alınarak ulaştırma moduna göre tahmin edilmektedir.

Ayrıca, karayolu taşıtları ve gemilerin bileşimine ilişkin analizler, zaman içinde çelik ve alüminyum gibi malzemelere yönelik talep tahminleri üretmek için satış projeksiyonlarıyla birleştirilmektedir. Bu projeksiyonlar, IEA'nın malzeme talebi ve müteakip ağır sanayi faaliyetlerine ilişkin devam eden çalışmalarını bilgilendirmektedir.

Karayolu taşımacılığı

Karayolu taşımacılığı enerji talebi hafif yolcu araçları (PLDV'ler), hafif ticari araçlar (LCV'ler), otobüsler, orta kamyonlar, ağır kamyonlar ve iki ve üç tekerlekli araçlar arasında ayrıştırılmıştır. Model, karayolu taşımacılığının tüm alt sektörlerinde yakıt ikamesine ve alternatif güç aktarma organlarına izin vermektedir. Test ve yol yakıt verimliliği arasındaki fark, yani test döngüsü ile gerçek yaşam koşulları arasındaki fark da tahmin edilmekte ve öngörülmektedir.

Ulaştırmadaki enerji talebinin en büyük payı karayolu taşımacılığında petrol kullanımından kaynaklandığından, GEC Modeli toplam araç stokunun ve binek araç filosunun teknoloji detaylı alt modellerini içermektedir. Stok projeksiyon modeli, (Dargay, Gately ve Sommer, 2006)'da önerilen S-şekilli bir Gompertz fonksiyonuna dayanmaktadır. Bu model, gelire (GSYH varsayımlarından türetilmiştir) ve iki değişkene dayalı olarak araç sahipliğini vermektedir: doyumluk seviyesi (bir ülkenin/bölgenin maksimum araç sahipliği olduğu varsayılmaktadır) ve doyumluk seviyesine ulaşma hızı. Kullanılan denklem şöyledir:

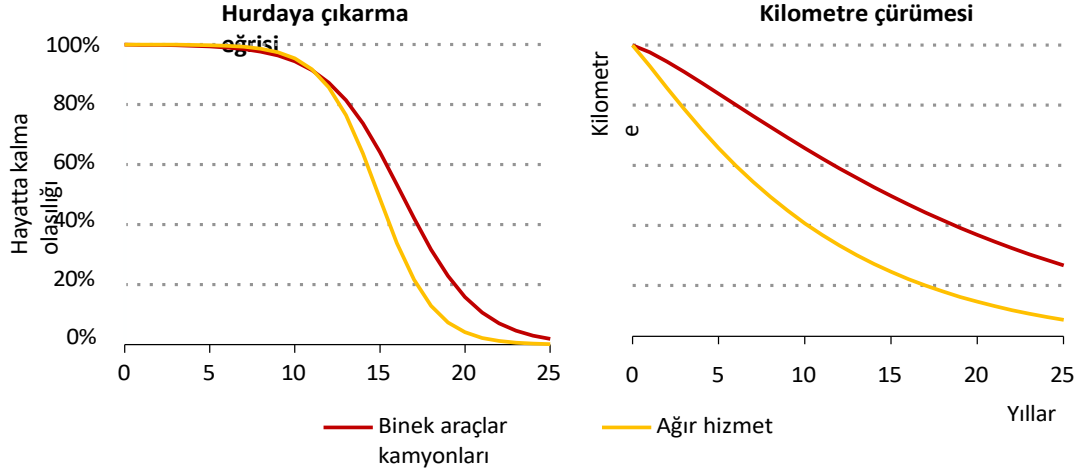
$$V_t = y e^{a e^{b G D P_t}}$$

Burada V araç sahipliği (1 000 kişi başına düşen araç sayısı olarak ifade edilir), y doyumluk seviyesi (1 kişi başına düşen araç sayısı olarak ifade), a ve b ise fonksiyonun şeklini (yani doyumluğa ulaşma hızını) tanımlayan negatif parametrelerdir. Bu üç parametre (y, a ve b), kişi başına düşen GSYİH ile araç sahipliği arasındaki tarihsel korelasyona dayanmakta ve buna ek olarak çeşitli parametreleri dikkate almaktadır

Nüfus yoğunluğu, kentleşme ve altyapı gelişimi gibi ülkeye/bölgeye özgü faktörler. Yukarıdaki denklem kullanılarak, binek otomobil ve iki ve üç tekerlekli araç sahipliğinde zaman içinde meydana gelen değişiklikler, eğri uydurma yaklaşımı ve mevcut ortalama küresel binek otomobil iki ve üç tekerlekli araç sahipliği dahil edilerek modellenmiştir. Otobüs sahipliği projeksiyonları, kişi başına düşen GSYİH ve toplu taşımanın toplam karayolu ve demiryolu yolcu faaliyetlerindeki payı ile korelasyona dayanan Gompertz eğrileri ile yüksek hızlı olmayan yolcu demiryolu ile rekabeti de dikkate almaktadır. Özel araç ve demiryolu faaliyetlerini halihazırda modelledikten sonra, otobüs faaliyet projeksiyonlarını türetebilir ve daha sonra yakıt fiyatı esnekliği dayalı olarak PLDV'lerden otobüslere ek faaliyet kaymasını dahil edebiliriz. Hem toplam araç stoku hem de binek araç stoku projeksiyonları daha sonra nüfus varsayımlarımıza dayalı türetilir. Öngörülen araç stokları ve bunlara karşılık gelen araç satışları daha sonra gerçek yıllık araç satışlarıyla kıyaslanır. Dolayısıyla ortaya çıkan araç stoku tahminleri, yalnızca Gompertz fonksiyonu kullanılarak elde edilecek olanlardan farklı olabilir.

Araç filosunun stok gelişimini iyileştirmek için, ortalama kullanım ömrünün ekonomik büyüme ile korelasyonuna dayalı olarak bölgelere göre özel hurdaya çıkarma eğrilerinin tahmin edildiği dinamik bir hurdaya çıkarma fonksiyonu geliştirilmiştir. Dinamik hurdaya ayırma fonksiyonu, araçların erken emekliye ayrılması gibi politika tedbirlerinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Şekil 3.6). Eski araçların daha az kullanıldığını göz önünde bulundurmak amacıyla, araç türüne göre kilometre eğrilerini belirlemek için kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu, her bir araç tipinin her bir model (satın alma yılı) için toplam karayolu faaliyetine nasıl katkıda bulunduğu dair daha ayrıntılı bir değerlendirme yapılmasını sağlar.

Şekil 3.5▶ Araç türüne göre hurdaya ayırma eğrisi ve kilometre düşüşünün gösterimi



IEA. CC BY 4.0.

Binek hafif hizmet araçlarının (PLDV) analizinde, maliyet rekabetçiliğinin bir sonucu olarak aktarma organları teknolojilerinin ve yakıtların seçimine rehberlik eden bir maliyet aracı kullanılmaktadır. Bu araç, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi yeni PLDV satışları üzerinden hareket etmekte ve her bir teknolojinin herhangi bir yılda satılan yeni PLDV'ler içindeki payını belirlemektedir.

Maliyet aracının amacı, maliyet rekabetçiliğini önemli bir kriter olarak kullanarak uzun vadeli teknoloji seçimlerinin analizine rehberlik etmektir. Araç, PLDV'de gelecekteki aktarma organı seçimlerini tahmin etmek için bir logit fonksiyonu kullanır.¹ PLDV pazarına tahsis edilen her bir PLDV tipi j 'nin payı şu şekilde verilir:

$$Share_{jj} = \frac{b_j P_{PLDV_{jj}}}{\sum_{jj} (b_j) P_{PLDV_{jj}}}$$

Nerede
?

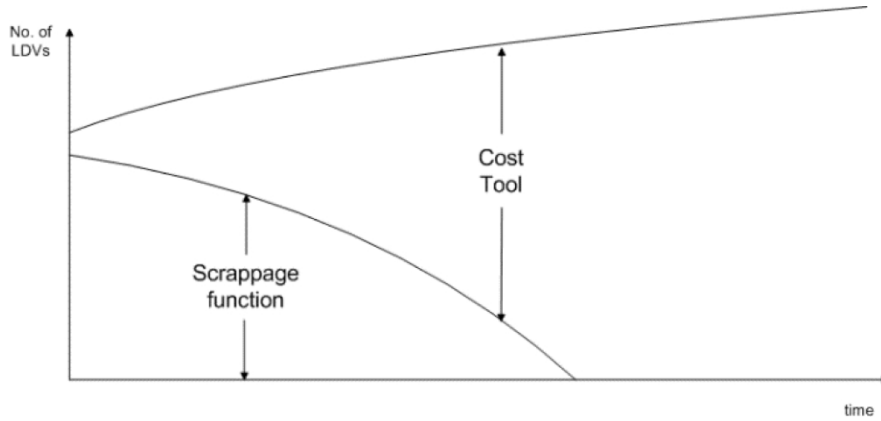
- $P_{PLDV_{jj}}$, yıllık yatırım, işletme ve bakım maliyetlerinin yanı sıra yakıt kullanımını da içeren bir aracın yıllık maliyetidir;
- r_p , bir PLDV'nin pazara girme oranını belirleyen maliyet üssüdür; ve
- b_j PLDV'nin baz yıldaki payı veya ağırlığıdır.

Maliyet aracındaki maliyet veritabanı, aşağıdaki teknoloji seçeneklerini içeren farklı aktarma organları ve yakıt seçeneklerinin mevcut ve gelecekteki teknoloji maliyetlerinin analizine dayanmaktadır:

- Konvansiyonel içten yanmalı motorlu (ICE) araçlar (kıvılcım ve sıkıştırma ateşlemeli)
- Hibrit araçlar (kıvılcım ve sıkıştırma ateşlemeli)
- Plug-in hibritler (kıvılcım ve sıkıştırma ateşlemeli)
- Farklı sürüş menzillerine sahip bataryalı elektrikli otomobiller
- Hidrojen yakıt hücreli araçlar.

¹ Başlangıçta popülasyonların ve otokatalitik kimyasal reaksiyonların büyümesini tanımlamak için geliştirilen logit fonksiyonları, enerji sisteminin farklı sektörlerindeki stok devrini analiz etmek için uygulanabilir. Burada, teknoloji seçeneklerinin maliyet rekabetçiliğini büyüme hızı bir gösterge olarak kullanılmaktadır.

Şekil 3.6► Binek-hafif hizmet araç maliyet modelinin rolü



IEA. CC BY 4.0.

Not: LDV'ler= hafif hizmet araçları.

Model, motor (örneğin motor sürtünmesinin azaltılması, marş motoru/alternatör veya şanzıman iyileştirmeleri) ve motor dışı önlemler (örneğin lastikler, aerodinamik, küçültme, hafifletme veya aydınlatma) için çok sayıda seçeneği ayırt ederek kişisel taşımacılıkta kısa ve uzun vadeli verimlilik iyileştirmelerinin maliyetlerini dikkate almaktadır. Ayrıca, bataryalar (nikel metal hidrit ve lityum iyon) ve yakıt hücreleri gibi kilit teknolojilerin maliyetleri için tahminler kullanır. Teknoloji maliyetlerindeki düşüşün hızı daha sonra teknolojiye özgü öğrenme hızlarındaki öğrenme eğrileri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Maliyet analizi, yakıt tüketimini azaltmaya yönelik teknoloji seçeneklerinin kapsamlı ve ayrıntılı bir incelemesine dayanmaktadır. Bu veri tabanı, seçilmiş hakemlerden oluşan bir panel tarafından incelenmiş ve maliyet aracını beslemiştir. Maliyet veritabanı sürekli olarak gözden geçirilmekte ve son araştırmalar dikkate alınmaktadır. Tüm araç tipleri için maliyet eğrileri varsayımları Ortak Araştırma Merkezi (JRC) (Krause, 2017), (Krause & Donati, 2018) tarafından yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Tüm GEC Model bölgeleri için maliyet eğrisi kapsamını genişletmek amacıyla bölgesel özellikler ve ekonomik faktörler dikkate alınmıştır.

En büyük 20 küresel otomobil üreticisi için öngörülen alternatif güç aktarma organları satışları (öncelikle hafif hizmet araçlarında elektrikli araçlara ve ağır hizmet sektörlerinde elektrikli ve yakıt hücresel elektrikli araçlara odaklanarak) her yıl düzenli olarak güncellenmektedir. Bu analiz, araç üreticilerinin yeni elektrikli otomobil modellerini piyasaya sürme taahhütlerinin, yakıt ekonomisi hedeflerini ve sıfır emisyonlu araç zorunluluklarını karşılamak için gerekli elektrikli araç (EV) sunumunun gerisinde kalıp kalmadığının değerlendirilmesine olanak tanır. Belirli bir yıl için ICE'yi aşamalı olarak kaldırma taahhüdünde bulunan araç üreticileri ve ulusal ve eyalet yetki alanları da bu analizin bir parçasıdır.

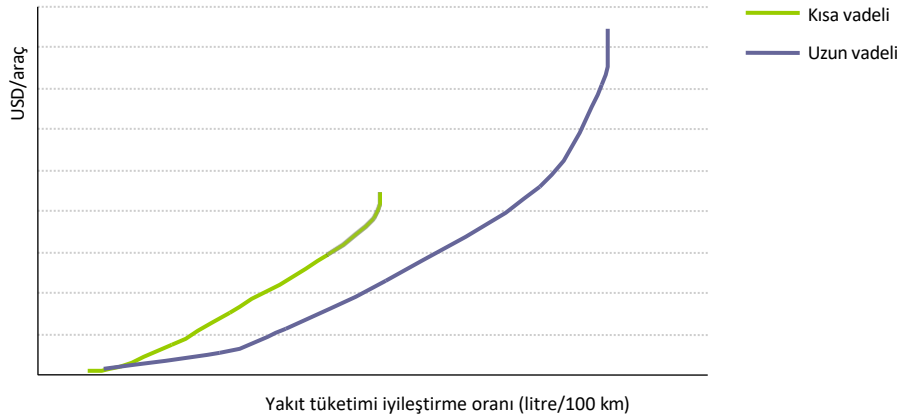
Batarya ve plug-in elektrikli araç batarya talebi projeksiyonları, batarya paketi kapasitesi ve (hücrenin katot) kimyasına ilişkin basit projeksiyonlarla eşleştirilmekte ve bu projeksiyonlar batarya maliyetleri ve kritik mineral gereksinimlerine ilişkin aşağıdan yukarıya analizlerle ilişkilendirilmektedir. Bu projeksiyonlar, IEA'nın kritik mineral talebini ve elektromobilitéye geçişin değer zinciri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için devam eden çalışmalarını bilgilendirmektedir.

Hidrojen yakıt hücresel elektrikli araç projeksiyonları, otomobil piyasasındaki son gelişmeleri, politika duyurularını ve IEA'nın *Küresel Hidrojen İncelemesi 2024*'ten (IEA, 2024e) elde edilen temel sonuçları dikkate almaktadır.

Karayolu yük taşıma araçları genel olarak LCV'ler (<3,5 t), orta kamyonlar (3,5 t ila 15 t) ve ağır kamyonlar (>15 t) olarak sınıflandırılabilir. Son iki kategori için GEC Modeli, bir yandan ortalama yakıt ekonomisi iyileştirmelerinin, diğer yandan da teknoloji seçimlerinin geliştirilmesine rehberlik edecek iki ayrıntılı alt modelden oluşmaktadır. Birincisi için model, enerji verimliliğine yönelik yatırım kararını, maliyetleri en aza indirmenin herhangi bir yatırım kararı için kilit bir kriter olduğu temelinde rasyonel ekonomik aktörlerin görüşünü alarak endojenleştirmektedir.

bu sektör. Model, JRC'nin verimlilik maliyet eğrilerini kullanarak yakıt verimliliği daha yüksek kamyon ve ağır vasıtalarla yapılacak bir yatırımın iskonto edilmemiş geri ödeme süresini hesaplamaktadır. Model daha sonra, hesaplanan geri ödeme süresinin filo operatörleri tarafından talep edilen varsayılan minimum geri ödeme süresinden (bölgeye bağlı olarak genellikle 1 ila 3 yıl arasında olduğu varsayılır) daha kısa olduğu yatırımlara izin verir. Model, literatür tarafından belirlenen verimlilik maliyet eğrisi üzerindeki bir sonraki verimlilik adımını uygulamaya çalıştığı için sorun yinelemeli bir şekilde çözülür, ancak verimlilik maliyet eğrisi üzerindeki münferit adımlar arasında verimlilik iyileştirme seviyelerini kullanabilir (Şekil 3.7).

Şekil 3.7► Karayolu taşımacılığı için bir verimlilik maliyet eğrisi çizimi



IEA. CC BY 4.0.

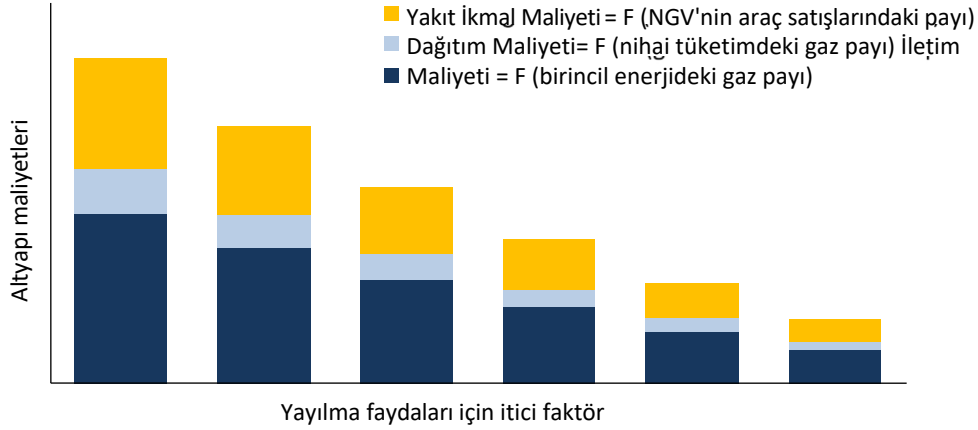
İkinci adım olarak model, geleneksel bir İYM aracın maliyet etkinliğini diğer rakip alternatif seçeneklere karşı simüle etmektedir. Simülasyon bir Weibull fonksiyonu kullanılarak yönlendirilir. Orta ve ağır hizmet kamyonları için alternatif güç aktarma organları GEC Modelinde uygulanmıştır: yakıt hücresi, batarya elektrik ve fişli hibrit elektrik.

Karayolu yük taşımacılığı modülü, incelenen ülkelerin coğrafi ve ekonomik özelliklerini dikkate alarak yük faaliyetlerini değerlendirmek için bölgesel analizden yararlanmaktadır. Bu geliştirilmiş modül, ekonomik göstergeleri ve yakıt fiyatlarının dinamiklerini hesaba katarak projeksiyonlar sunmaktadır. Hem yük faaliyetinin gelecekteki gidişatı hem de farklı kamyon boyutu kategorileri için gelişen doluluk faktörleri hakkında değerli bilgiler sağlar.

Son olarak, araç türüne göre yeni araçların ortalama yakıt tüketimi projeksiyonlarına dayanan karayolu taşımacılığı modeli, projeksiyon dönemi boyunca ortalama satış ve stok tüketim seviyelerini (yol ve test döngüsü) ve ortalama emisyon seviyelerini (kilometre başına CO₂ gramı olarak) hesaplar. Model, ikinci el piyasa eğilimlerini dikkate almakta ve iddialı yakıt ekonomisi hedefleri olan bölgelerden araç ithal eden ülkelerde politikaların yakıt ekonomisi iyileştirmeleri üzerindeki etkisini değerlendirmektedir. Ayrıca, diğer senaryolara göre artan yatırım maliyetlerini belirlemekte ve ulaşımda azaltımın optimal dağılımına rehberlik eden örtülü CO₂ fiyatlarını hesaplamaktadır.

Ulaşımda özel bir yakıt ikmal altyapısı gerektiren alternatif yakıtların kullanımı söz konusu olduğunda tavuk ve yumurta tipi durumların yarattığı sorunları değerlendirmek ve enerji sisteminin diğer sektörlerinde bu tür alternatif yakıtların kullanımının potansiyel yayılma etkilerini daha iyi yansıtmak için, GEC Modeli yakıt ikmal altyapısını kapsayan özel alt modellere sahiptir. Prensip olarak bu modüller, bu alternatif yakıtların iletimi ve dağıtımı için artan altyapı mevcudiyetinin maliyet ve faydalarını ölçmeyi amaçlamaktadır. Temelde, bu yayılma faydalarının ilişkisi Şekil 3.8'deki gibi gösterilebilir.

Şekil 3.8 ▶ Yakıt ikmali altyapı maliyet eğrisi (açıklayıcı)



IEA. CC BY 4.0.

Not: NGV = doğal gazlı araç.

Elektrikli araçlar söz konusu olduğunda, özellikle gelişmiş ekonomilerde, farklı son kullanım sektörlerinde (özellikle binalarda) halihazırda mevcut olan yaygın elektrik kullanımı sayesinde, sağlam bir iletim ve dağıtım şebekesinin mevcudiyeti daha az sorun teşkil etmektedir. Ancak, elektrikli şarj altyapısının mevcudiyeti bu durumda önemli kısıtlardan biridir ve bu nedenle yakıt ikmali maliyetlerindeki bir azalmanın karayolu taşımacılığında petrol ikamesi olasılığını nasıl etkileyebileceğini belirlemek önemlidir. Bu nedenle elektrikli araç alt modülü, elektrikli araçların toplam araç satışları içindeki payının artmasının yakıt ikmali maliyetlerini düşürme üzerindeki kademeli etkisini değerlendirmektedir. Elektrikli araçların toplam araç stokundaki birlikte yakıt ikmali düşüşü özetleyen ayrıntılı maliyet eğrileri hazırlanmıştır. Bu maliyet eğrileri, gelecekte elektrikli araç satışlarının payı arttıkça yakıt ikmali maliyetlerini sürekli olarak ayarlamak için modele dışsal bir girdi olarak sağlanmıştır.

Elektrikli araç tedarik ekipmanı (EVSE veya EV şarj cihazı) stoku da araç kategorisine göre öngörülmektedir. Hafif hizmet araçları için, kamuya açık şarj cihazlarının sayısı, ilgili olduğu yerlerde EVSE/EV'nin tarihsel eğilimlerinden başlayacak şekilde kalibre edilmiştir. Yavaş ve hızlı şarj cihazlarının payı da mevcut olduğu durumlarda geçmiş verilere göre kalibre edilmiştir. Özel ve kamusal şarj altyapısının yayılma hızı, müstakil evlerde yaşayan hanelerin payı, özel ve çok aileli konutlarda elektrikli araç şarj altyapısının mevcudiyeti ve kamuya açık şarj bağlantı noktalarının ve istasyonlarının mevcut tedariki ve seviyesi hakkındaki verilerle bilgilendirilmektedir.

Genel olarak, kamuya EVSE-EV oranı, elektrikli araç stok payı arttıkça, pazar olgunlaştıkça sistemin daha iyi optimize edildiğini yansıtmak için elektrikli araç başına gerekli kW kamusal şarj kapasitesi azalacak şekilde öngörülmektedir. Otobüsler ve kamyonlar için, fırsat veya kamuya açık şarj cihazları aracılığıyla karşılanan elektrik talebinin payı segmente göre öngörülmektedir. Gerekli kamusal şarj cihazı sayısı daha sonra farklı şarj kapasitelerine sahip şarj cihazlarının varsayılan karışımına dayalı olarak tahmin edilir.

Hidrojen yakıt tüketimi, talebi karşılamak için gereken hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının (HRS) sayısını tahmin etmek için kullanılır. İstasyon kapasiteleri zaman içinde gelişecek (büyüyecek) şekilde modellenmiştir ve hizmet verilen hedef araçlara göre farklı boyut sınırları belirlenmiştir. Örneğin, kamyonlar için HRS, hafif hizmet araç pazarına hizmet verecek istasyonlardan daha yüksek maksimum kapasitelere sahiptir. Elbette bazı istasyonlar çift basınçlı dağıtıma sahip olacak ve farklı araç pazarlarına hizmet verecektir. Bununla birlikte modelleme, kullanım oranlarını hedef araç kategorisine göre de farklılaştırmaktadır; otobüs ve kamyon filolarına yönelik istasyonların, hafif hizmet araçlarına yönelik olanlardan daha yüksek ortalama kullanım oranlarına sahip olması beklenmektedir. Dolayısıyla, FCEV'lere hizmet vermek için gereken HRS stoku şöyledir:

$$HRS_{Stock} = \frac{F_i}{C_i \times U_i}$$

Nerede?

- i araç kategorisini temsil eder
- F_i , i araç kategorisinin hidrojen yakıt talebini ($\text{kg}_{\text{H}_2/\text{yıl}}$) temsil eder
- C_i , öncelikli olarak i kategorisine hizmet veren HRS'nin ortalama nominal kapasitesini ($\text{kg}_{\text{H}_2/\text{yıl}}$) temsil eder
- U_i , öncelikli olarak i kategorisine hizmet veren HRS'nin ortalama kullanım oranını (%) temsil eder

Demiryolu

Demiryolu modülü, 130'dan fazla ülkede 5 farklı demiryolu türünü ve 4 yakıtı kapsayan tarihsel bir veri tabanına dayanmaktadır. Temel parametreler arasında enerji yoğunluğu, faaliyet, kilometre, stok, yük/doluluk faktörü ve hat uzunluğu ve kullanımı yer almaktadır. Demiryolu tipi ve yakıt başına tarihsel tren satış rakamlarını elde etmek için üç farklı hurdaya çıkarma eğrisi kullanılır.

Veri tabanında, raylı taşıt ve yolcu/yük faaliyetleri, ülke düzeyindeki enerji dengelerine şekilde dizel, elektrik ve kömür için kentsel (metro ve hafif raylı sistem) ve kentsel olmayan (geleneksel ve yüksek hızlı yolcu demiryolu ve yük demiryolu) olarak kalibre edilmiştir.

Demiryolu modellemesi, kentsel demiryolu altyapısı veri tabanları da dahil olmak üzere Uluslararası Toplu Taşımacılık Birliği ve Ulaştırma Geliştirme ve Politika Enstitüsü'nün kentsel demiryolu faaliyeti (metro ve hafif raylı sistem) veri tabanlarına dayanmaktadır. Ayrıca Uluslararası Demiryolu Birliği ve JRC'nin şehirlerarası (konvansiyonel), yüksek hızlı ve yük demiryolu faaliyeti, stok ve altyapı verilerine dayanmaktadır. Tür başına demiryolu faaliyeti, hükümet istatistikleri, Dünya Bankası, Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu ve Uluslararası Demiryolu Birliği'nden toplanan verilerle kalibre edilmiştir. Konvansiyonel yolcu ve yük demiryolunda elektrifikasyon ve hidrojen penetrasyon oranları, mevcut ve duyurulan demiryolu projeleri ve hedeflerinin yanı sıra senaryoya göre değişen düzenleyici, mali, yatırım ve iklim politikaları tarafından bilgilendirilmektedir.

Enerji yoğunluğu, doluluk/yük faktörü, kilometre ve hat kullanımı, GSYİH/kişi ve geçmiş performans dikkate alınarak öngörülmekte ve senaryoya göre değişmektedir. Yüksek hızlı olmayan demiryolu (YHT olmayan) için demiryolu tipi başına faaliyet projeksiyonları önceki demiryolu modülü ile kalibre edilirken, yüksek hızlı demiryolu (YHT) faaliyet projeksiyonları temel olarak planlanan hat inşaatları, kişi başına düşen GSYİH varsayımları ve tarihsel ray kullanım faktörleri ile bilgilendirilmektedir. Demiryolu modülündeki davranış değişikliğinin etkisi, senaryoya göre de değişmekle birlikte, YHT ve YHT dışı arasında farklılaştırılmıştır. YHT için, davranış değişikliğinden kaynaklanan faaliyet büyümesi, ülkelerin Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkıları (NDC'ler) tarafından bilgilendirilen havacılıktan demiryoluna geçişi dikkate almaktadır. YHT dışı için, davranış değişikliğine bağlı faaliyet büyümesi, tarihsel hat kullanımı ve kişi başına düşen demiryolu yolcu faaliyeti verilerinin yanı sıra demiryolunun NDC'lerdeki rolüne dayanmaktadır.

Havacılık

Havacılık filosu ve yolcu faaliyetleri, jet gazyağı için yerel ve uluslararası enerji talebine uyacak şekilde ülke/bölge düzeyinde kalibre edilmiştir. Havacılık modellemesi, açık kaynaklı Havacılık Entegre Modeli'ni (AIM) geliştiren ve sürdüren University College London'daki (UCL) araştırmacılarla işbirliğine dayanmaktadır. IEA modellemesinde korunan AIM'nin temel özellikleri şunlardır:

- Yinelemeli maliyet minimizasyonu çerçevesinde, stok modelleme ve tekno-ekonomik modelleme ile uçak ve havaalanı operasyonlarının ve uçak gövdesi-tahrik sistemlerinin ayrıntılı, menşe-varış modellemesine dayalı enerji yoğunluğu iyileştirmeleri için operasyonel ve teknik potansiyel.
- Güvenilir ve yüksek çözünürlüklü faaliyet projeksiyonları sağlayan IATA ve diğer yetkili çalışmalarla uyumlu bölgesel ve havalimanı çözünürlüklü uzun vadeli fiyat ve GSYİH talep esneklikleri.

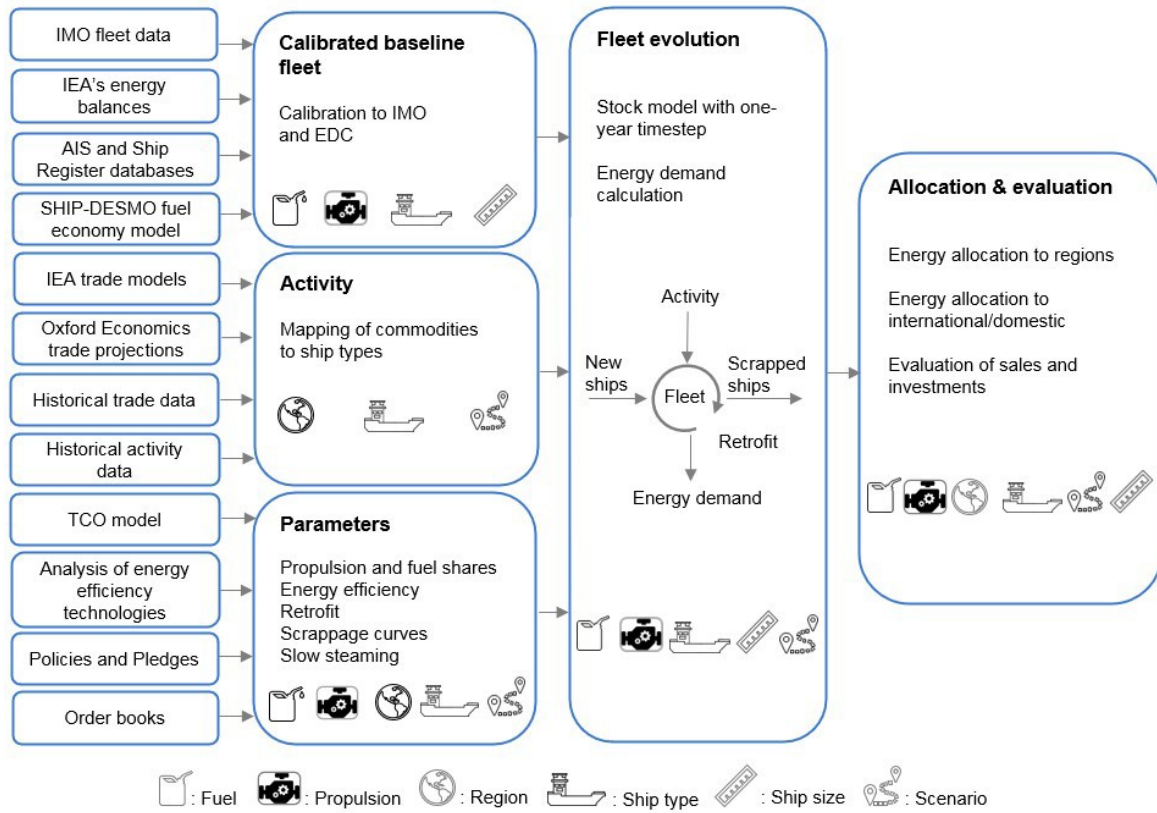
Projeksiyonlar, AIM kullanılarak yapılan ayrıntılı yinelemeli maliyet minimizasyon modellemesinin temel özelliklerini, diğer havacılık faaliyetlerinin (özel yolcu taşımacılığı gibi yolcu dışı faaliyetler) yakıt tüketimine ilişkin "yukarıdan aşağıya" projeksiyonlarla bütünleştirmektedir.

kargo). Daha fazla detaylandırma, IEA'nın enerji arzı ve yakıt dönüşüm modellemesinin tekno-ekonomik modellemesinin yanı sıra politika hedefleri ve talep tarafı yönetim stratejilerinin detaylandırılmasına dayanmaktadır.

Nakliye

Denizcilik enerji talebi için aşağıdan yukarıya modelin metodolojisi Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Faaliyet projeksiyonları, kalibre edilmiş bir temel filo ve senaryoya özgü parametreler, gemi tipi, tahrik ve yakıta göre küresel denizcilik filosunun gelişimini ve enerji talebini hesaplayan dinamik bir stok modeline girdilerdir. Bu enerji talebi daha sonra bölgeler arasında paylaşılır ve uluslararası ya da yerel denizcilik sektörlerine tahsis edilir.

Şekil 3.9 ▶ Nakliye modeli metodolojisi



IEA. CC BY 4.0.

Not: IMO: Uluslararası Denizcilik Örgütü, AIS: Otomatik Tanımlama sistemi, TCO: toplam sahip olma maliyeti.

Gemi tipi, boyutu ve yaşı dağılımları da dahil olmak üzere temel denizcilik filosunun özellikleri, BM büyük veri platformu aracılığıyla erişilen Gemi Sicilinden alınmıştır (Birleşmiş Milletler, 2024). Model açıkça şu gemi türlerini içermektedir: konteyner gemileri, dökme yük, petrol tankerleri, genel kargo, sıvılaştırılmış gaz tankerleri ve kimyasal tankerler. Bu gemi türleri 2018 yılında küresel denizcilik sera gazı emisyonlarının %75'ini oluştururken (IMO, 2021), filonun geri kalanı "diğer gemiler" olarak kategorize edilmiştir. Yine BM büyük veri platformu (Birleşmiş Milletler, 2024) aracılığıyla elde edilen Otomatik Tanımlama Sistemi (AIS) verileri, hız, kat edilen ortalama mesafe, denizde geçirilen günler, yük faktörleri dağılımlarını türetmek ve gemi tipi ve boyutuna göre uluslararası ve yurtiçi seferlerin paylarını türetmek için kullanılmaktadır. Mevcut stoktaki gemilerin enerji verimlilikleri (yoğunlukları) SHIP-DESMO modeli ile hesaplanmıştır (Danimarka Teknik Üniversitesi, 2016). Elde edilen enerji talebi daha sonra gemi türüne göre IMO enerji tüketimi verilerine (IMO, 2021) ve enerji talebinin uluslararası/yerel ayrımını da belirleyen IEA'nın 2024 Enerji Dengelerine uygun olacak şekilde kalibre edilir. IEA enerji dengelerinde,

Yurtiçi seyrüsefer enerji talebi, uluslararası seyrüsefer yapmayan tüm bayraklardaki gemilere teslim edilen yakıtları içerir. Buna okyanus, kıyı ve iç kesimlerde balıkçılık ve askeri tüketim için kullanılan yakıtlar dahil değildir. Uluslararası denizcilik yakıtları ise uluslararası seyrüsefer yapan tüm bayraklara ait gemilere teslim edilen yakıt miktarlarını kapsar ve balıkçı gemileri ile askeri güçleri hariç tutar. Yurtiçi/uluslararası ayrımı, geminin bayrağına veya milliyetine göre değil, kalkış limanı ve varış limanına göre belirlenir (IEA, 2024g).

Faaliyet projeksiyonları, çeşitli veri kaynaklarını kullanan yeni geliştirilmiş aşağıdan yukarıya bir araçtan türetilmiştir. Tarihsel gemicilik faaliyeti için Oxford Economics Trade Prism (Oxford Economics, 2024b) ticaret verileri kullanılmış ve veri ayrıntı düzeyini ve coğrafi kapsamı artırmak için CEPII BACI verileri (CEPII, 2010) ile birleştirilmiştir. Tarihsel veriler, uluslararası nakliye faaliyetlerine ilişkin UNCTAD verileriyle uyumludur (Birleşmiş Milletler, 2023). Faaliyet projeksiyonları için, enerji (petrol, gaz, kömür, hidrojen ve alternatif yakıtlar) için IEA dahili enerji ticareti projeksiyonları ve IEA'nın MaT modelinden temel malzemeler ve temiz enerji teknolojileri için ticaret akışları (daha fazla bilgi için yakında çıkacak ETP-24 yayınına (IEA, 2024b) bakınız) genel uluslararası nakliye faaliyetini birleştirmek için kullanılır, böylece senaryoya göre iç tutarlılık sağlanır. IEA ticaret modellemesinin kapsamı dışında kalan emtialar için (2025 projeksiyonlarında ticareti yapılan kütlelerin yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır) Oxford Economics tahminleri kullanılmıştır. Emtiaların ticaret akışları gemi tiplerine tahsis edilerek, açıkça modellenen tüm gemiler için faaliyet belirlenir. Diğer gemiler basitleştirilmiş bir yaklaşımla ele alınmaktadır: faaliyet ekonometrik ölçeklendirme yoluyla tahmin edilmektedir.

Modelin girdi parametreleri, toplam sahip olma maliyeti (TCO), mevcut enerji verimliliği teknolojilerinin ve bunların farklı gemi tipleri üzerindeki etkilerinin analizi, yeni gemiler için sipariş defterleri ve politika önlemleri ve taahhütleri dahil olmak üzere çeşitli kaynaklar tarafından bilgilendirilmektedir. TCO modeli, çeşitli gemi tipleri ve boyutları için en uygun maliyetli tahrik ve yakıt seçeneklerini belirler.

Dinamik bir stok modeli, küresel denizcilik filosunun yıllık gelişimini hesaplar; burada her bir gemi türü için gerekli stok, denizcilik faaliyeti, kat edilen ortalama mesafe ve boyut dağılımına dayalı olarak türetilir. Hurdaya ayırma eğrileri filonun yaş dağılımına göre gemi emekliliklerini belirler ve faaliyet projeksiyonlarının karşılanabilmesini sağlamak için yeni gemiler eklenir. Gemi tipi, gemi boyutu ve yaş kriterlerine göre belirlenen uygun gemiler ya çeşitli enerji verimliliği önlemleriyle iyileştirilir ya da alternatif tahrik sistemleriyle güçlendirilir. Model daha sonra enerji tüketim faktörlerine (boyut, hız, yük faktörü, kat edilen mesafe) ve gemi verimliliklerine dayalı olarak enerji talebini hesaplar. Açıkça modellenmemiş gemiler ("diğer") için enerji verimliliği ve yakıt payı girdileri, yakıt türüne göre enerji kullanımını hesaplamak için doğrudan uygulanır.

Gemi ve tahrik türüne göre küresel enerji talebi daha sonra bölgeler ve sektörler (uluslararası veya yerel) arasında paylaştırılır. Bölgesel dağılım, tarihsel ve tahmin edilen enerji talebine dayanmaktadır ve bu nedenle yakıt ikmalinin nerede gerçekleştiğini yansıtmaktadır.

Davranışsal değişim analizi

Taşımacılıkta davranış değişikliğine ilişkin çeşitli analizler :

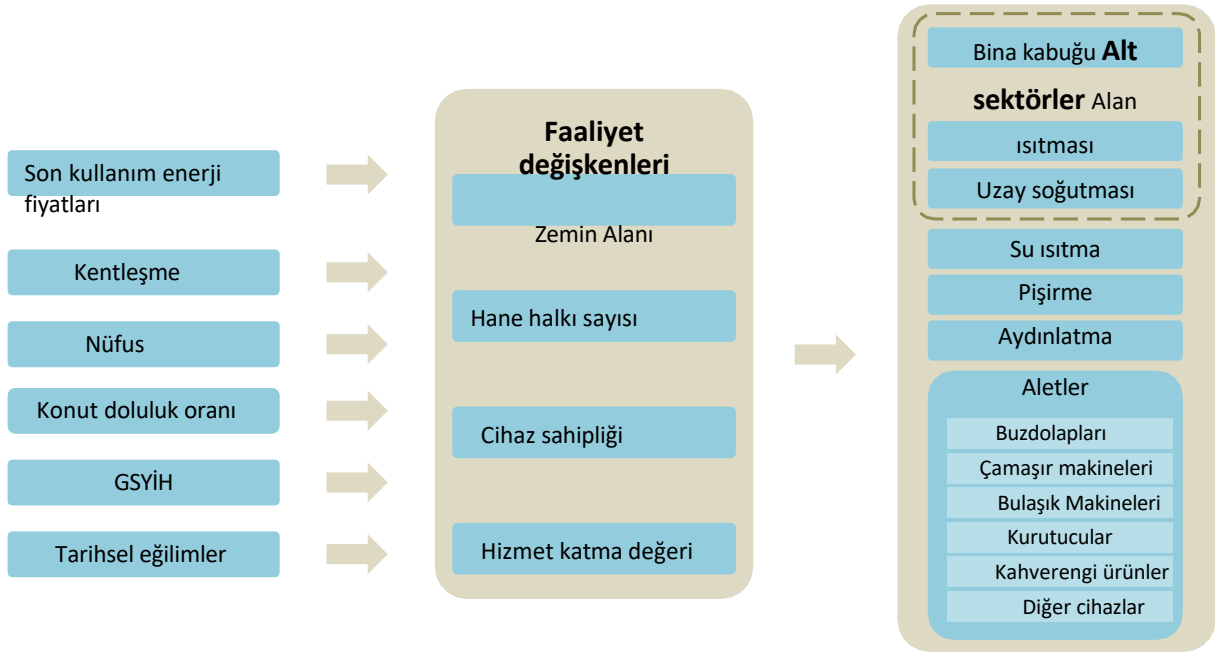
- Davranış değişikliğinin havacılık sektörü üzerindeki etkisine ilişkin ex-post analiz geliştirilmiştir. Geçmiş veriler (OAG, UCL'den AIM) kişi ve mesafe başına havacılık faaliyetlerini ayırtmak için kullanılmıştır. Davranış değişikliğinin petrol talebi üzerindeki etkisini değerlendirmek için doluluk faktörlerindeki değişiklikler varsayılmıştır.
- Hem ticari IHS Markit, Jato Dynamics, Marklines) hem de kurum içi (Global Fuel Economy Initiative, tarihsel yol veritabanı) veri setleri, spor amaçlı araçların (SUV) yükselişine ilişkin ülkelere göre derinlemesine analiz yapmak için kullanılmıştır. Tarihsel eğilimlerin analizine dayanarak, küresel ölçekte STEPS'te SUV'lerde ılımlı bir büyüme öngörülmektedir.
- Otomobil pazarı birden fazla kaynak (Marklines, EV Volumes, vb.) kullanılarak analiz edilmiş ve otomobil satışlarının gelecekteki gelişimi tahmin edilmiştir. Bir stok modeline dayalı olarak, hem yeni alımlar hem yenilemeler nedeniyle otomobil satış hacminde bir değişiklik tahmin edilmektedir. Gelecekteki eğilimi öngörmek için ekonometrik fonksiyonlar uygulanmıştır.

- Covid-19 salgını sırasında veriler, sağlık endişeleri nedeniyle toplu taşımadan özel araçlara doğru bir kayma olduğunu göstermiştir. Ipsos tarafından yapılan bir anket de dahil olmak üzere kamuya açık raporlar, bisikletler veya özel araçlarla karşılanan hareketlilik ihtiyaçlarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Varsayımlar, bisikletlerin erişilebilirliğine bağlı olarak GEC Model bölgesine göre farklılık göstermiş ve bu modal kaymanın petrol talebi üzerindeki etkisi tahmin edilmiştir.
- Evden çalışmanın etkisiyle ilgili olarak, kilit GEC Model bölgeleri için ulaşım moduna göre ortalama işe gidip gelme mesafesi üzerine bir literatür taraması yapılmıştır. Bu veriler tüm bölgeler için tahmin edilmiştir. İşgücünün evden çalışması için maksimum potansiyel varsayıldığında (yani 2030'a kadar %20), evden çalışmanın petrol talebi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

3.3 Binalar

GEC Modelinin binalar sektörü modülü konut ve hizmetler sektörlerine ayrılmıştır ve her ikisi de benzer yapılarla sahiptir (Şekil 3.10). Nüfus, GSYİH, iklim ve konut doluluk oranı; kat alanı, cihaz sahipliği, hane halkı sayısı (konut sektörü için) ve katma değeri (hizmet sektörü için) içeren faaliyet değişkenlerini bilgilendirmektedir.

Şekil 3.10 ► Bina talep modülünün yapısı



IEA. CC BY 4.0.

Konut ve hizmet sektörlerinde enerji talebi, binalarda alan ısıtma, su ısıtma, cihazlar, aydınlatma, pişirme ve alan soğutma olmak üzere altı standart son kullanıma ayrılmıştır. Aletler dört ana kategoriye : soğutma (buzdolapları ve dondurucular), temizlik (çamaşır makineleri, kurutma makineleri ve bulaşık makineleri), kahverengi eşyalar (televizyonlar ve bilgisayarlar); ve diğer aletler. Alan soğutması gazlı soğutucular, klimalar, bölgesel soğutma, güneş enerjili soğutma ve fanlardan oluşmaktadır. Her sektörde listelenen tüm son kullanımlar ayrı ayrı modellenmiş ve nihai enerji tüketimi her bir son kullanım için temel yıldan itibaren üç adımda tahmin edilmiştir.

İlk adım, faaliyet değişkenlerine dayalı olarak bir enerji hizmetine olan talebin, yani faydalı enerji talebinin hesaplanmasıdır. Bu adım için temel kavram şudur:

$$End\ use\ service\ demand = Activity\ variable \times intensity$$

Faaliyet değişkenleri, enerji hizmeti talebinin ana etkenlerini ifade eder (yukarıya bakınız). Yoğunluk, faaliyet değişkeninin (örneğin zemin alanı) birimi başına ihtiyaç duyulan enerji hizmeti (örneğin alan ısıtma) miktarını ifade eder. Faaliyet değişkenleri, geçmiş verilere dayalı olarak ve GSYİH, nüfus, kentleşme oranları ve modern enerjiye erişim oranları gibi sosyo-ekonomik etkenlerle ilişkilendirilerek ekonometrik olarak tahmin edilmektedir. Her bir son kullanım için, yoğunluk değişkeni tarihsel yoğunluk kullanılarak ve her bir projeksiyon yılı için ortalama son kullanıcı yakıt fiyatlarındaki (fiyat esnekliklerine dayalı) ve ortalama kişi başına gelirdeki (gelir esnekliklerine dayalı) zaman içindeki değişime göre ayarlanarak projekte edilir.

Alan ısıtma ve alan soğutma söz konusu olduğunda, yoğunluk projeksiyonları ayrıca sıcaklıktaki tarihsel değişimlere ve yeni inşaat veya yenileme standartlarıyla ilişkili bina enerji performansındaki iyileştirmelere göre ayarlanır.

Mekân ısıtma ve mekân soğutma için tarihsel enerji talebi ile tarihsel ısıtma ve soğutma derece-gün verileri, mekân ısıtma ve mekân soğutma enerji talebi projeksiyonlarını normalleştirmek için birleştirilerek enerji hizmeti talebi üzerindeki yıldan yıla dalgalanmanın etkileri ortadan kaldırılmıştır. İklim değişikliğinin mekan ısıtma ve mekan soğutma talebi üzerindeki etkisi, her bölgede ve her senaryonun sıcaklık yolu altında iklim değişikliği nedeniyle ısıtma ve soğutma derece-günlerinde beklenen değişikliğe dayalı olarak modelde de hesaba katılmaktadır. Bu projeksiyonlar, IPCC Çalışma Grubu I İnteraktif Atlası'nda yayınlanan ilgili projeksiyonlardan türetilen IEA analizine dayanmaktadır.

Isıtma ve alan soğutma hizmet talebi, binanın inşa edildiği tarihteki ortalama enerji verimliliği performansına dayalı olarak, binalar için inşa edildikten sonra hesaplanır. Modeldeki yeni binalar, bina enerji kodlarıyla uyumlu olmayan, uyumlu veya sıfır karbona hazır binalar olarak inşa edilmektedir. Bu seçim, bölge ve inşaat yılının yanı sıra binanın enerji hizmeti talebini de etkilemektedir. Modeldeki bir binanın enerji hizmeti talebi, güçlendirme çalışmalarından da etkilenebilir: mevcut bir bina, enerji performansını iyileştirmek için güçlendirilebilir, böylece bina mevcut yönetmeliğe uygun hale gelir veya sıfır karbona hazır hale gelir. Her bir yeni bina ve güçlendirme türünün paylarına ilişkin projeksiyonlar, her bir senaryonun altında yatan politika varsayımlarına bağlıdır. Bir binanın güçlendirilmesi, hem yeni inşaat ihtiyacını hem de inşaat malzemelerine olan talebi etkileyerek binanın ömrünü uzatır.

Bu nedenle, mekan ısıtma veya soğutma ekipmanı tarafından karşılanması gereken toplam enerji hizmet talebi, inşaat yılına göre belirlenen farklı bina sınıfları ve beş bina kategorisi (uyumlu olmayan, uyumlu, sıfır karbona hazır, uyumlu hale getirme, sıfır karbona hazır hale getirme) arasındaki hizmet talebinin toplamıdır. Bina zarflarının performansındaki iyileştirmeler (daha verimli yeni inşaatlar veya iyileştirmeler yoluyla) onları bir kategoriden diğerine kaydırır ve böylece ısıtma veya soğutma ekipmanı tarafından karşılanması gereken alan ısıtma ve alan soğutma için toplam enerji hizmeti talebini azaltır.

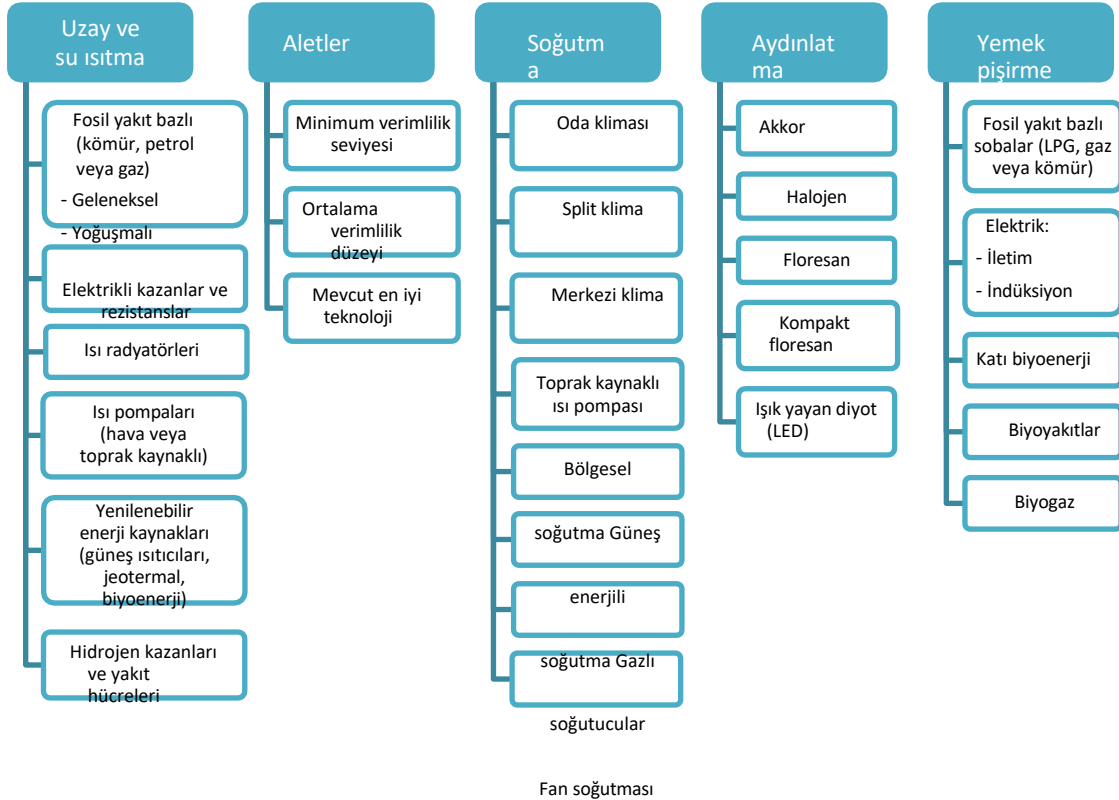
İkinci adım, son kullanım hizmet talebini karşılayacak teknolojilerin seçilmesidir. Her bir son kullanım için, Şekil 3.11'de . gösterildiği gibi, modelde mevcut olan ayrıntılı bir teknoloji seti bulunmaktadır. Teknoloji seçeneklerinin çoğu, değişen enerji verimliliği seviyelerini ve ilgili yatırım maliyetlerini temsil eden kademeler halinde modellenmiştir. Ayrıca, örneğin gaz kazanları yerine alan ısıtması için ısı pompalarının kullanılabileceği yakıt ve teknolojileri değiştirme imkanı da bulunmaktadır. Konut sektöründe, biyoenerjiye ilişkin ek ayrıntılar, ev enerji ihtiyaçlarını karşılamak için biyogaz çürütücülerinin tarihsel ve öngörülen kullanımının yanı sıra biyoetanol ve diğer sıvıların ocaklarda ve ev ısıtma ekipmanlarında kullanımının daha doğru bir şekilde modellenmesine olanak tanır.

Projeksiyon ufku boyunca, teknoloji seçimi teknolojilerin göreceli maliyetlerine, verimliliklerine ve dikkate alınan bölgedeki ilgili kısıtlamalara dayanmaktadır. Teknoloji payları, her bir teknolojinin yatırım maliyetleri, işletme ve bakım maliyetleri ve yakıt maliyetlerini içeren arz edilen hizmet talebi birimi başına maliyetlerini hesaba katan bir Weibull fonksiyonu ile tahsis edilir. Örneğin, alan ısıtması için bir ısı pompasına karşı bir gaz kazanının göreceli ekonomik rekabet gücü, binanın ısıtma için hizmet talebine bağlı olarak farklılık gösterir ve bu da yatırım maliyetlerinin işletme maliyetlerine göre önemini etkiler. Model rutini farklı maliyetleri tahsis eder

Model ufku boyunca her yıl ek hizmet talebini karşılamak için teknolojiler. Bu tahsisat, teknoloji mevcudiyeti, politikalar ve piyasa engelleri gibi gerçek dünya kısıtlamalarını yansıtan üst ve alt sınırlara tabidir.

Ekipman ve cihaz verimliliğini ve ilgili maliyetleri değerlendirmek ve güncellemek için, IEA Teknoloji İşbirliği Programları da dahil olmak üzere ulusal ve uluslararası düzeyde çok sayıda şirket, uzman ve araştırma kurumuyla düzenli olarak iletişime geçilmektedir. Değerlendirme aynı zamanda dünyanın farklı bölgelerinde kullanılmakta olan teknolojileri kataloglamak ve olası gelişimlerini değerlendirmek için ilk kapsamlı literatür taraması ile desteklenmiştir (Econoler, vd., 2011; Kannan, vd., 2007; Waide, 2011; LBNL, 2012; GBPN ve CEU, 2012).

Şekil 3.11 ► Binalarda son kullanım alt sektörüne göre başlıca teknoloji kategorileri



IEA. CC BY 4.0.

Üçüncü adım, mevcut ve yeni bina ekipmanlarının verimliliklerine dayalı olarak konut ve hizmet sektöründeki **toplam nihai enerji tüketiminin hesaplanmasıdır**. Verimlilik, bir birim hizmet talebini karşılamak için gereken enerji miktarını temsil eder ve dolayısıyla ekipman veya cihazların teknik performansını gösterir. Binalar sektöründeki nihai enerji tüketimi, toplam teknoloji stoku tarafından tüketilen alt sektörel enerjinin bir toplamıdır; bu da tarihsel (azalan) cihaz ve ekipman stokunu ve teknoloji tahsis rutini tarafından model ufku boyunca her yıl eklenen yeni teknolojileri içerir.

$$Finalenergyconsumption = \frac{1}{Efficiency} \times Enduseservicedemand$$

Davranış değişikliğinin etkisi bu noktada, bina sektöründeki davranış değişikliğinin genişliği ve derinliğine ilişkin senaryo varsayımlarını yansıtacak ayarlanan teknoloji başına enerji kullanımı ve enerji hizmeti talebi ile entegre edilmiştir.

Teknolojiye göre enerji talebi, kullanılan teknoloji birimlerinin sayısı, inşa edilen veya güçlendirilen binalar açısından model çıktıların tümü, yatırımları ve enerji harcamalarını hesaplamak için kullanılır. CO₂, diğer sera gazı emisyonları ve bina sektörüyle ilgili malzeme ihtiyaçları (çelik, çimento ve alüminyum) da hesaplanmaktadır.

Binalar modülü, elektriğin ve yemek pişirmek için alternatif yakıtların veya ocakların büyümesini hesaba katmak için enerji erişim modülüyle doğrudan bağlantılıdır (bkz. Bölüm 11).

Tuzdan Arındırma

Suyun tuzdan arındırılması için enerji tüketimi, binalar modelinin hizmet sektörü modülü içinde modellenmiştir. Tuzdan arındırma tesislerinin coğrafi dağılımına ilişkin veriler, teknoloji, besleme suyu, tesis boyutu ve harcama alanı bilgileri de dahil olmak üzere GWI DesalData'dan düzenli olarak güncellenmektedir. Farklı tuzdan arındırma teknolojilerinin yakıt dağılımı ve enerji yoğunluğuna dayalı olarak, tuzdan arındırma ihtiyaçları için enerji tüketimine ilişkin projeksiyonlar IEA senaryolarına dahil edilmiştir. Tuzdan arındırma sektörünün modellenmesi, senaryolara göre farklı küresel yüzey sıcaklıklarının yanı sıra değişen politika manzaralarını da dikkate almaktadır.

Veri merkezleri

Veri merkezlerindeki enerji kullanımı da bina modelinin hizmet sektörü modülünde modellenmiştir. Veri merkezlerinin elektrik tüketimi, Tüm Ekonomik Faaliyetlerin Uluslararası Standart Endüstriyel Sınıflandırmasını (ISIC) takiben hizmetler sektörü altında sınıflandırılır ve ayrıca soğutma, cihazlar ve yardımcı ekipman olarak ayrılır.

Davranış değişikliği

Binalar modülünde modellenen davranış değişiklikleri arasında daha düşük iç hava sıcaklığı ayarları, daha düşük klima kullanımı, hat kurutma kullanımı, aydınlatma ve cihazların verimli kullanımı, optimize edilmiş kazan ayarları ve soğuk yıkama yer almaktadır. Enerji tüketimi üzerindeki etkiyi değerlendirmek için bir literatür taraması yapılmıştır. Toplam etkiyi ve bina sektörü emisyonlarında ortaya çıkan azalmayı değerlendirmek için potansiyel tahmin edilmiştir.

Evden çalışmanın etkisi, önemli GEC Model bölgelerinde evden çalışmanın konut enerji tüketimini ne kadar artırdığına ilişkin bir literatür taramasına dayalı olarak analiz edilmiştir. Literatür taramasından elde edilen veriler tüm bölgelere uyarlanmış ve enerji talebi üzerindeki etkiler yakıt bazında tahmin edilmiştir. Evden çalışma için maksimum potansiyel, konut enerji tüketimi üzerindeki etkiyi bildirmek için ülke bazında değerlendirilmiştir.

3.4 Saatlik elektrik talebi ve talep tarafı katılımı

Elektrik talebinin saatlik, günlük ve mevsimsel anlaşılması, elektrik sistemi esneklik ihtiyaçlarının ve talep tarafı tepkisinin rolünün değerlendirilmesi de dahil olmak üzere elektrik sistemlerinin doğru modellenmesi için kritik öneme sahiptir.

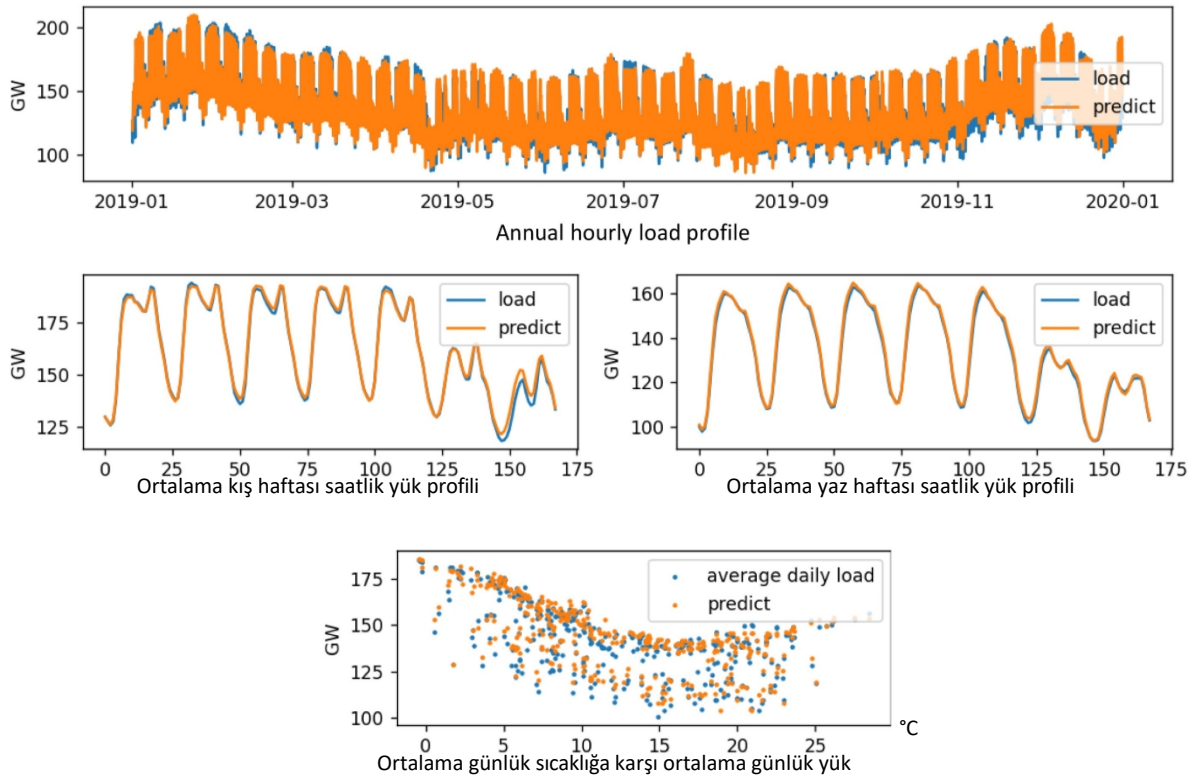
Saatlik elektrik talebinin modellenmesi son kullanım düzeyinde gerçekleştirilmektedir. Bu, modelin talep tarafı entegrasyon önlemlerinin tüm kapsamının etkisini yansıtmaya olanak tanır: elektrifikasyon ve enerji verimliliği son kullanımlar için yıllık talebi etkilerken, yük kaydırma ve atma dahil olmak üzere talep tarafı müdahalesi talebi zamansal olarak daha ayrıntılı bir düzeyde etkiler. Saatlik yükün modellenmesi, konut ve hizmetler (örn. alan ısıtma, su ısıtma), sanayi (örn. çelik, kimyasallar), ulaşım (örn. karayolu, demiryolu) ve tarım olmak üzere her bir sektördeki her bir son kullanım için saatlik yük profilinin değerlendirilmesini gerektirir. Yük eğrileri saatlik çözünürlükte tam bir yıl için değerlendirilmiştir.

Yük eğrisi parametreleri geçmiş verilerden türetilmiştir. Tarihsel saatlik talep (IEA, 2024g) ve ısıtma ve soğutma derece-gün zaman serileri (IEA, 2024h) üzerinde istatistiksel bir analiz yapılmıştır. Saatlik yükün takvim ve hava durumu değişkenlerine bağımlılığı regresyon parametrelerinden çıkarılmıştır. Hava durumu değişkenleri nüfusa göre ağırlıklandırılır ve soğutma ve ısıtma talebini etkinleştiren sıcaklık eşikleri, sıcaklık değişimlerine verilen yük tepkisine göre belirlenir. İstatistiksel analiz, olabildiğince çok sayıda geçmiş yıl üzerinde gerçekleştirilmiştir.

elektrik talebinde zaman içinde meydana gelen yapısal değişiklikler ve pandemi önleme tedbirleri gibi elektrik tüketim kalıplarındaki geçici değişiklikler göz önünde bulundurulmalıdır.

Average weekly profiles for heating, cooling and non-thermosensitive load are derived from this analysis, along With additional parameters such as the average demand per week of the year. This thermosensitivity analysis allows for the simulation of a region's electricity load curve with a very high level of confidence, considering the impact of variations in weather, most notably temperature.

Figure 3.12 ▶ Thermosensitivity analysis for hourly load curve assessment



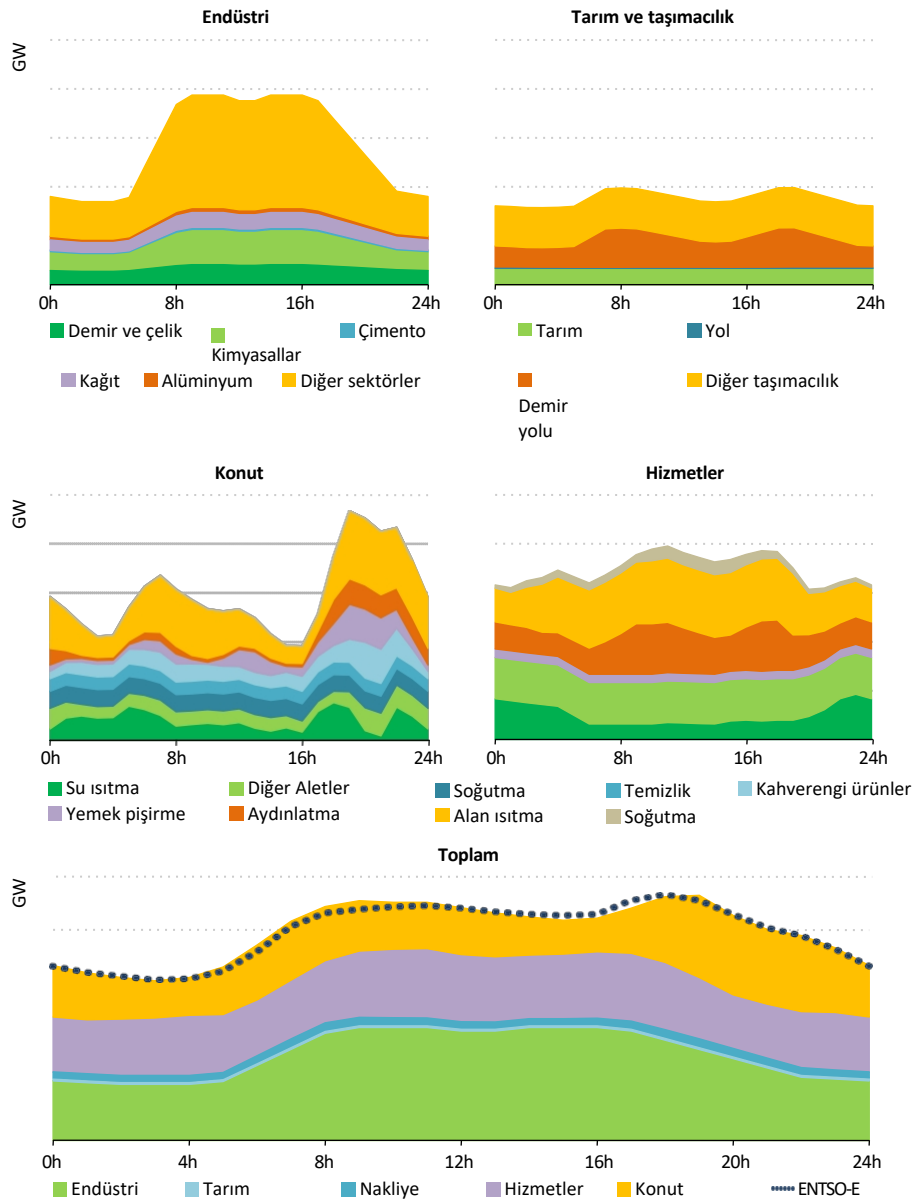
IEA. CC BY 4.0.

Bireysel saatlik yük eğrileri for each electricity end use are generated based on the thermosensitivity analysis, araştırması ve anket verileri wh ere available. Total space heating and cooling profiles are split between residential ve hizmetler son kullanımları are available. Total space heating and cooling profiles are split between residential bağılıdır. Load curves for other end uses are literatür tarafından bilgilendirilmiş ve bölgenin toplam ısıya duyarlı olmayan profiline uyacak şekilde ayarlanmıştır. Aydınlatma saatlik elektrik talebi, gün ışığı sürelerine ve güneşlenme seviyelerine göre öngörülmüştür. Son kullanım başına yük ayrıştırmasının bir örneği Şekil 3.13'te .gösterilmektedir

Nihayetinde, yük profilleri GEC Modelinde simüle edildiği gibi öngörülen yıldaki yıllık son kullanım talebine ölçeklendirilir. Saatlik yük profili, girdi olarak kullanılan tarihsel sıcaklık zaman serileri değiştirilerek farklı hava koşulları için oluşturulabilir. Bu, hava durumunun puant talep ve esneklik ihtiyaçları üzerindeki etkisinin birden fazla hava durumu yılı boyunca değerlendirilmesine olanak tanır.

Saatlik yük üretimi ya ülke düzeyinde ya da GEC bölgesi düzeyinde gerçekleştirilir. Saatlik yük modeli, diğerlerinin yanı sıra Çin, Hindistan, Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya da dahil olmak üzere 2023 yılında dünya elektrik tüketiminin %75'inden fazlasını kapsamaktadır.

Şekil 3.13 2014 yılı için ENTSO-E tarafından gözlemlenen yük eğrisi ile karşılaştırmalı olarak Avrupa Birliği'nde Şubat ayında hafta içi bir gün için sektörlere göre açıklayıcı yük eğrileri



IEA. CC BY 4.0.

Not: Avrupa Elektrik İletim Sistemi Operatörleri Ağı (ENTSO-E), Avrupa Birliği'ndeki tüm ülkeler için birleştirilmiş yük eğrisini temsil etmektedir.

Kaynaklar: ENTSO-E'ye (2024) dayalı IEA analizi.

Talep tarafı müdahalesinin rolünün ve potansiyelinin modellenmesi, her bir nihai kullanımda esnek olan talep payının değerlendirilmesini gerektirir. Bu pay üç esneklik faktörünün ürünüdür: kaydırılabilirlik, kontrol edilebilirlik ve kabul edilebilirlik (Olsen, 2013):

- **Değiştirilebilirlik:** Her bir son kullanımın tipik bir talebe yanıt stratejisi ile azaltılabilen, kaydırılabilen veya artırılabilen yük payı.
- **Kontrol edilebilirlik:** Yük atmalarını/vardiyalarını tetiklemek ve gerçekleştirmek için gerekli iletişim ve kontrollere sahip ekipmanla ilişkili her bir son kullanımın yük payı.

- **Kabul edilebilirlik:** Belirli bir son kullanım için, kullanıcının mali teşvikler karşılığında bir talep-yanıt olayında azaltılmış hizmet seviyesini kabul etmeye istekli olduğu ekipman veya hizmetlerle ilişkili yük payı.

Bu çerçeve, senaryoların çeşitli teknolojilerden ve farklı sosyal kabul edilebilirlik düzeylerinden gelen talep esnekliğini dikkate almasını sağlar.

Talep tarafı katılımı, toplam işletim sistemi maliyetlerini en aza indirmek için üretim varlıklarının, depolamanın, enterkonneksiyonların ve talep tarafı katılımının sevkياتını birlikte simüle eden saatlik bir elektrik modeline dahil edilmiştir (saatlik modelin açıklaması için bkz. bölüm 4.4). Talep-yanıt aktivasyonu esneklik potansiyelini (GW cinsinden), maksimum kaydırma veya kesinti süresini (saat cinsinden) ve esneklik aktivasyon maliyetini dikkate almaktadır. Ulaşım için, saatlik modelde yük yönetimi için fişe takılı olmayan veya tam şarjlı elektrikli araçların kullanılamamasını yansıtmak üzere ek kısıtlar geliştirilmiştir.

Elektrik üretimi ve ısı üretimi

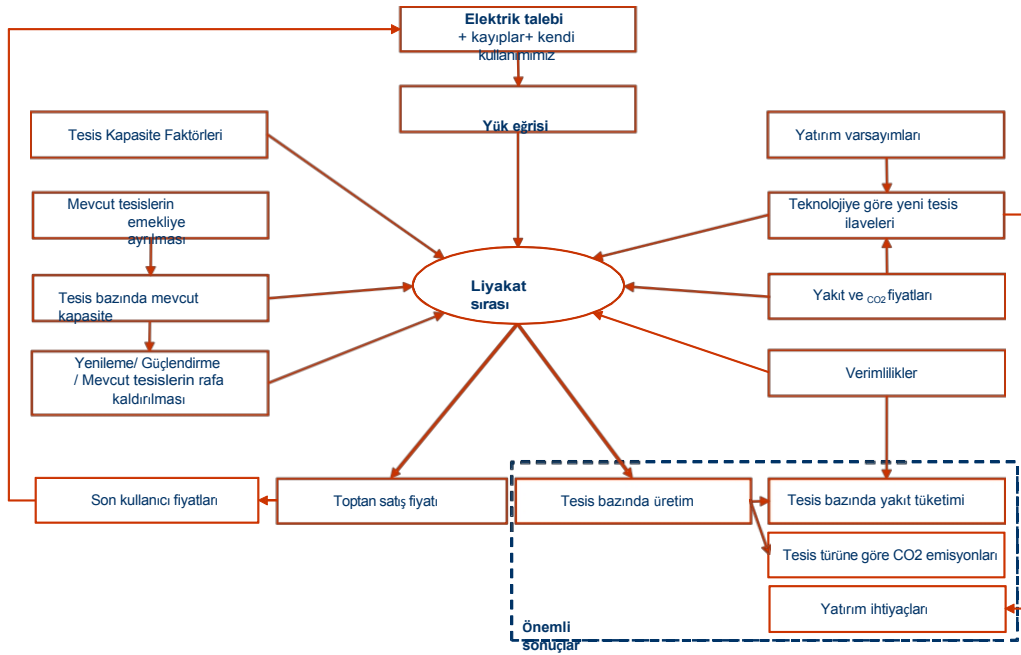
Tüm nihai kullanım sektörlerinde (Bölüm 3'te açıklanmıştır) ve diğer enerji dönüşüm sektörlerinde - özellikle elektroliz yoluyla üretilen hidrojen (Bölüm 5) - hesaplanan elektrik talebine dayanarak, elektrik üretim modülü aşağıdakileri hesaplar:

- Talep artışını karşılamak, emeklilikleri karşılamak ve arz güvenliğini sürdürmek için gereken yeni üretim kapasitesi miktarı.
- Teknolojiye göre inşa edilecek yeni tesislerin türü.
- Elektrik talebini karşılamak, iletim ve dağıtım kayıplarını ve kendi kullanımını karşılamak için her bir tesis türü tarafından üretilen elektrik miktarı.
- Elektrik üretim sektörünün yakıt tüketimi.
- Karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) teknolojilerinin kullanımından kaynaklanan azaltımlar da dahil olmak üzere fosil yakıtların ve yenilenemeyen atıkların yanmasından kaynaklanan CO₂ emisyonları.
- Yeni talebi karşılamak ve emekliye ayrılan şebeke varlıklarını değiştirmek için gereken iletim ve dağıtım şebekesi altyapısı.
- Toptan ve son kullanım elektrik fiyatları.
- Yeni üretim varlıkları ve şebeke altyapısı ile ilgili yatırımlar.

4.1 Elektrik üretimi

Enerji üretim modülünün yapısı Şekil 4.1'de özetlenmiştir. Modülün amacı, her bir bölgedeki yıllık talep hacmini karşılamaya yetecek kadar elektrik enerjisi üretilmesini ve her bir bölgede pik elektrik talebini karşılamaya yetecek kadar üretim kapasitesi bulunmasını sağlamak ve aynı zamanda öngörülemeyen kesintileri karşılamak için arz güvenliğini sağlamaktır.

Şekil 4.1► Güç üretim modülünün yapısı



IEA. CC BY 4.0.

Model, dünyadaki tüm enerji santrallerinin veri tabanına dayanan her bölgedeki mevcut kapasite ile başlamaktadır. Enerji santrallerinin teknik ömürlerinin mevcut fosil yakıtlı santraller ve nükleer santraller için 45 ila 60 yıl arasında değiştiği varsayılmaktadır (hükümet politikaları tarafından aksi belirtilmedikçe). Rüzgar ve güneş enerjisi tesislerinin ömürlerinin 25 yıl merkezli, 20 ila 30 yıl arasında değişen bir dağılıma sahip olduğu varsayılmaktadır; hidroelektrik projeleri 50 yıl; ve biyoenerji santralleri 25 yıl.

4.1.1 Kapasite ilaveleri

Model, bir önceki yıla kıyasla pik talepteki değişimi, yıl içinde üretim kapasitesinin emekliye ayrılmasını ve hükümet politikasının bir sonucu olarak inşa edilen yenilenebilir kapasitedeki herhangi bir artışı dikkate alarak her bölgede yıllık olarak kadar yeni üretim kapasitesine ihtiyaç duyulduğunu belirler. Kurulu üretim kapasitesi puant talebi bir arz güvenliği marjı kadar aşmalıdır; talepteki değişiklikler, emeklilikler ve yenilenebilir enerji ilavelerinden sonra bu marja uyulmazsa, model bölgeye yeni kapasite ekler. Bu hesaplamayı yaparken model, iletim ve dağıtım şebekelerindeki kayıpları ve üretim tesislerinin kendileri tarafından kullanılan elektriği dikkate alır.

Rüzgar ve güneş enerjisi gibi değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının çıktısının stokastik yapısı nedeniyle, bu teknolojilerin kurulu kapasitesinin yalnızca bir kısmının mevcut üretim marjına katkıda bulunduğu düşünülebilir. Bu durum, değişken yenilenebilir enerjiler için bir kapasite kredisi kullanılarak modellenmeye yansıtılmıştır. Bu kapasite kredisi, bir dizi elektrik piyasasındaki saatlik talep ve değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının saatlik üretimine ilişkin geçmiş verilerden tahmin edilmekte ve en yüksek talep anında güvenilir bir şekilde üretim yapması beklenebilecek kurulu kapasitelerinin oranını yansıtmaktadır.

Yeni santrallere ihtiyaç duyulduğunda, model farklı teknoloji seçenekleri arasındaki seçimini, uzun dönem marjinal maliyet (LRMC) olarak da adlandırılan seviyelendirilmiş elektrik maliyetine (LCOE) dayanan bölgesel değer ayarlı seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (VALCOE) temelinde yapar. Her bir teknolojinin LRMC'si, bir tesisin ömrü boyunca üretilen her bir birim elektriğin ortalama maliyetidir ve seviyelendirilmiş sermaye maliyetleri, sabit işletme ve bakım (O&M) maliyetleri ve değişken işletme maliyetlerinin toplamı olarak hesaplanır. Değişken işletme maliyetleri de yakıt maliyeti (ilgili olduğu durumlarda CO₂ fiyatı dahil) ve tesis verimliliğinden hesaplanır. Sermaye maliyetleri için bölgesel varsayımlarımız, Nükleer Enerji Ajansı (NEA) ve IEA'nın (2010) tahminleri ile birlikte sektör görüşleri ve proje maliyetlerine ilişkin kendi anketimizden alınmıştır. Ağırlıklı ortalama sermaye maliyetinin (reel olarak vergi öncesi), aksi belirtilmedikçe OECD' %9 ve OECD dışı ülkelerde %8 olduğu varsayılmaktadır, örneğin gelir destek politikaları, kara rüzgarı ve şebeke ölçekli güneş PV'si %4-7 (aşağıdaki finansman maliyetleri bölümüne bakınız) ve açık deniz rüzgarı bölgeye bağlı olarak %5-8'dir.

Herhangi bir tesis için hesaplanan LRMC kısmen kullanım oranlarına göre belirlenir. Model, talebin zaman içinde değişmesi nedeniyle santrallerin farklı kullanım oranlarına sahip olacağı ve farklı santral türlerinin farklı kullanım rekabetçi gerçeğini dikkate alır. (Örneğin, kömür ve nükleer yüksek kullanım oranlarında en rekabetçi olma eğilimindeyken, gaz ve petrol santralleri daha düşük kullanım oranlarında en rekabetçidir).

Sermaye maliyetleri, sabit işletme ve Bakım maliyetleri ve verimlilik üzerine yapılan spesifik sayısal varsayımlar GEC Model web sitesinde bulunabilir: <https://www.iea.org/reports/global-energy-climate-model/techno-economic-inputs>.

Seviyelendirilmiş maliyet modülü, aşağıdaki tesis türleri için LRMC'leri (veya LCOE'leri) hesaplar:

- CCUS'lu ve CCUS'suz kömür, petrol ve gaz buhar kazanları.
- CCUS'lu ve CCUS'suz kombine çevrim gaz türbini (CCGT).
- Açık çevrimli gaz türbini (OCGT).
- Entegre gazlaştırma kombine çevrimi (IGCC).
- Petrol ve gaz içten yanmalı.
- Yakıt hücreleri.
- CCUS'lu ve CCUS'suz biyoenerji.

- Jeotermal.
- Karada ve açık denizde rüzgar.
- Hidroelektrik (konvansiyonel).
- Güneş fotovoltaikleri.
- Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi.
- Denizci.
- Kamu hizmeti ölçeğinde batarya depolama.

Bölgesel LPMC'ler nükleer enerji için de hesaplanmaktadır, ancak nükleer enerji kapasitesinin eklenmesi hükümet politikalarına tabidir.

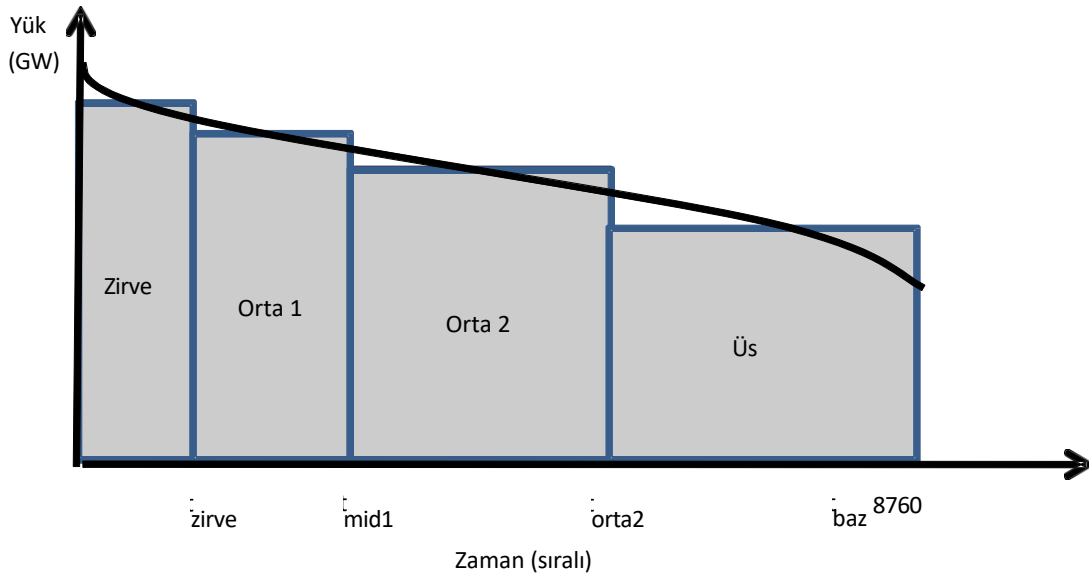
4.1.2 Üretim hacimleri

Model, her bölge için kurulu kapasiteye, elektrik üretiminin marjinal maliyetine ve elektrik talebi seviyesine bağlı olarak her bir santralden elde edilecek üretimi belirler. Talep dört segment olarak temsil edilmektedir:

- baz yük talebi, yılda 5 944 saatten daha uzun süreli talebi temsil eder
- düşük-orta yük talebi, yılda 3 128 ila 5 944 saat süreli talebi temsil eder
- yüksek-orta yük talebi, yılda 782 ila 3 128 saat süreli talebi temsil eder
- pik yük talebi, yılda 782 saatten daha kısa süreli talebi temsil eder.

Bu da talep için basitleştirilmiş dört segmentli bir yük-süre eğrisiyle sonuçlanır (Şekil 4.2). Bu talep, her bölgenin değişken yenilenebilir enerji kaynaklarından (rüzgâr ve güneş fotovoltaikleri (PV) gibi depolamasız, çıktısı hava durumuna bağlı teknolojiler) ve sevk edilebilir santrallerden (teknik arıza durumları dışında herhangi bir zamanda üretim yapabilen üretim teknolojileri) oluşan mevcut güç kapasitesi tarafından karşılanmalıdır. Değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının toptan satış fiyatları üzerindeki etkisini hesaba katmak için model, basitleştirilmiş yük-süre eğrisinin her bir segmentinde değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının olası katkısını hesaplar. Yenilenebilir enerji kaynaklarının katkısının liyakat sıralamasındaki her bir segmentten çıkarılması, sevk edilebilir jeneratörler tarafından karşılanması gereken bir artık yük-süre eğrisi bırakır.

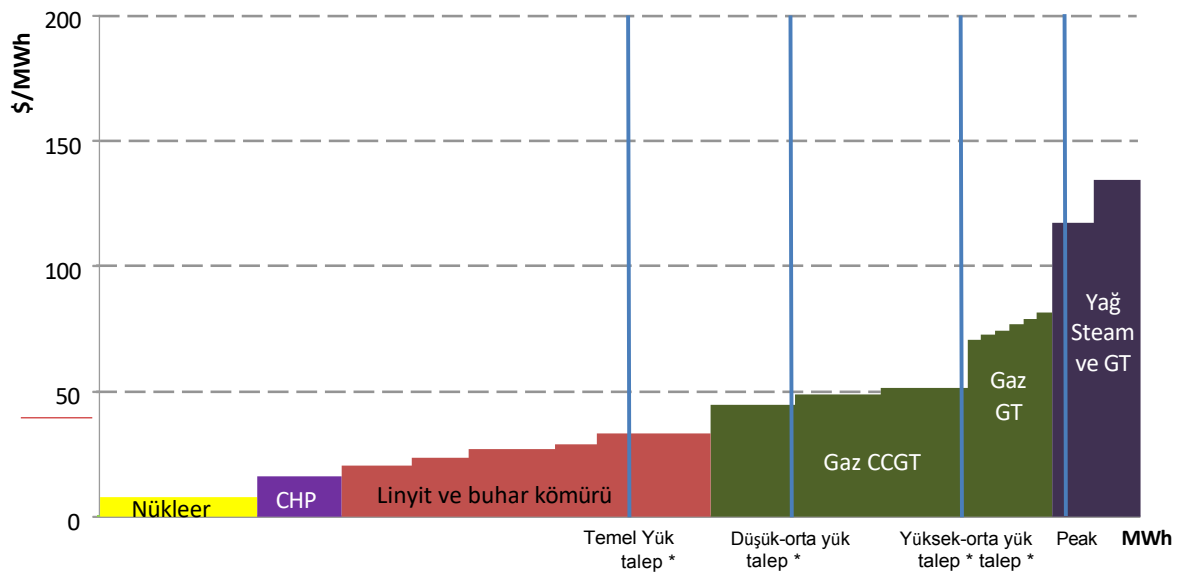
Şekil 4.2> Dört talep segmentini gösteren yük-süre eğrisi



IEA. CC BY 4.0.

Model, bazı birleşik ısı ve güç (CHP) tesisleri ve tuzdan arındırma tesisleri gibi çalışması gereken tesislerden gelen üretimi ve ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen üretimi her bir segmentteki talepten çıkarır. Değişken yenilenebilir kaynaklardan elde edilen üretim için, her bir talep segmentindeki üretim miktarı, üretim ve talep arasındaki tarihsel korelasyona dayalı olarak tahmin edilir. Her bir segmentteki talebin geri kalanı, sevk edilebilir santrallerden gelen üretimle karşılanmalıdır. Model, kurulu santrallerin liyakat sırasını (değişken üretim maliyetlerine göre sıralanmış kümülatif kurulu üretim kapasitesi) oluşturarak ve liyakat sıralamasında her bir segmentteki talep seviyesine karşılık gelen noktayı bularak sevk edilebilir üretim karışımını belirler. Sonuç olarak, Şekil 4.3'teki örnekte yer alan nükleer ve linyit yakan santraller gibi değişken üretim maliyetleri düşük olan santraller, baz yük talebi bile merit sıralamasındaki konumlarından daha yüksek olduğu için her yıl yüksek sayıda saat çalışma eğiliminde olacaktır. Öte yandan, petrol yakıtlı santraller gibi değişken maliyetleri yüksek olan bazı santraller sadece puant talep segmentinde çalışacaktır.

Şekil 4.3► Enerji üretim modülünde örnek liyakat sırası ve talep ile kesişimi



IEA. CC BY 4.0.

Notlar: CCGT= Kombine çevrim gaz türbini; CHP= kombine ısı ve güç; GT= gaz türbini. Buradaki talep, tuzdan arındırma ve bazı CHP tesisleri gibi "çalıştırılması zorunlu" tesislerin üretiminden ve yenilenebilir enerji kaynaklarının üretiminden arındırılmış talep anlamına gelmektedir.

4.1.3 Değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasite kredisi ve kapasite faktörünün hesaplanması

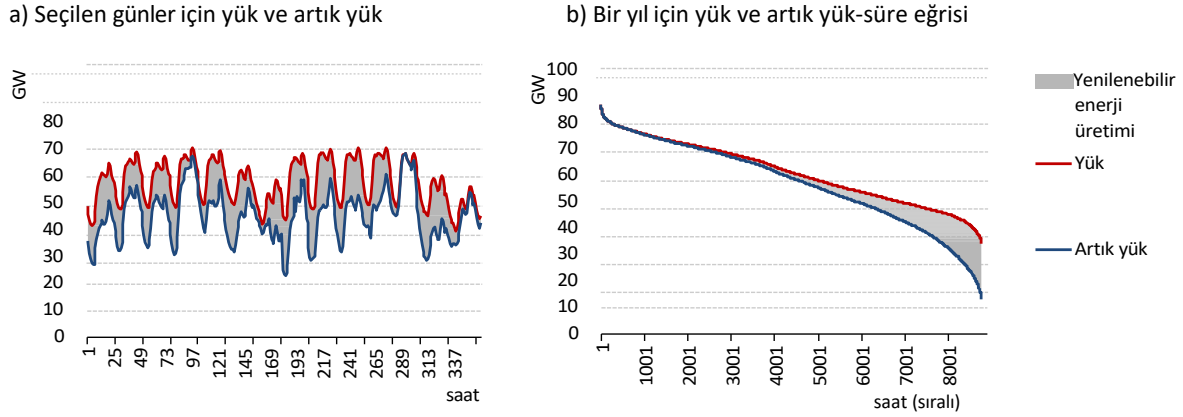
Rüzgar ve güneş enerjisi gibi hava koşullarına bağlı yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji üretimi zaman içinde değişiklik gösterir ve değişken yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji arzının özellikleri, kalan ve çoğunlukla sevk edilebilir enerji santrallerinin sevkıyatı ve kapasite ilavelerine ilişkin kararlar için dikkate alınmalıdır. Tüm değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş PV, depolamasız güneş enerjisi [CSP] ve karada ve denizde rüzgar) etkisi, her bir yük segmentindeki kapasite kredisi ve kapasite faktörü aracılığıyla dikkate alınır.

Değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasite kredisi, her bir segmentte talebin yüksek olduğu zamanda güvenilir bir şekilde üretim yapması beklenebilecek kurulu kapasitelerinin oranını yansıtır. Her bir yük segmentinde ne kadar değişken olmayan kapasiteye ihtiyaç duyulduğunu belirler. Kapasite faktörü, her bir yük segmentinde değişken yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen enerji miktarını verir ve her bir segmentte ne kadar değişken olmayan üretime ihtiyaç duyulduğunu belirler.

Hem kapasite kredisi hem de kapasite faktörü, saatlik yük profili ile meteorolojik verilerden elde edilen rüzgar ve güneş kaynağı zaman serileri arasındaki karşılaştırmaya dayalı olarak hesaplanır. Değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının etkilerini ölçmek için saatlik yük profili, saatlik artık yük ile karşılaştırılır.

değişken yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin hesaba katılması (Şekil 4.4). Artık yükü sıralayarak, yük segmenti başına ortalama ve maksimum talep seviyeleri belirlenebilir. Normal yük ile artık yükün yük seviyeleri arasındaki fark, değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimi ve kapasite ihtiyaçları üzerindeki etkisini verir.

Şekil 4.4► Örnek elektrik talebi ve artık yük



IEA. CC BY 4.0.

Yük segmenti başına değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının (varRE) kapasite faktörü, artık yükün s yük segmenti başına üretimine dayalı olarak hesaplanabilir:

$$Capacityfactor_s = \frac{Reduction\ Generation\ Needs_{non-var,s}}{Capacity_{varRE}} = \frac{Nesil\ varRE_{ler}}{Capacity_{varRE}}$$

Kapasite ilaveleri için pik yük segmenti . Kapasite kredisi, maksimum yük ile maksimum artık yük arasındaki farka göre tahmin edilir:

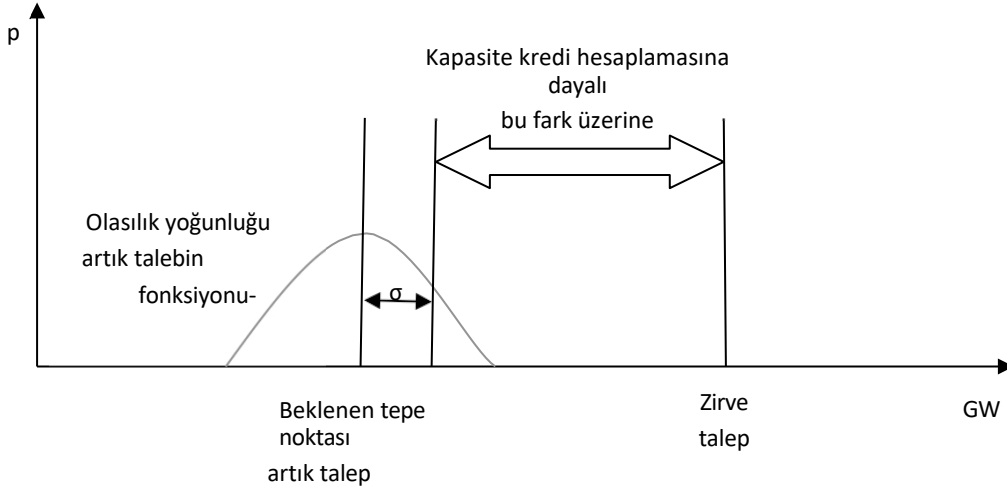
$$Capacitycredit_{peak} = \frac{Reduction\ Capacity\ Needs_{non-var}}{Capacity_{varRE}} = \frac{\max_t(Load(t)) - \max_t(Residual\ (Loadt))}{Capacity_{varRE}}$$

Kapasite kredisi hesaplaması için çeşitli yıllara ait meteorolojik veriler (rüzgar hızı ve güneş ışınlı) kullanılmıştır. Farklı yıllara ait meteorolojik verilerden elde edilen kapasite kredisi sonuçlarının bir araya getirilmesinde, birinci dereceden bir yaklaşım olarak yıllık puant artık talebin normal dağıldığı varsayılmış ve kapasite kredisi puant talep ile artık puant talebin bir standart sapma üzerindeki nokta arasındaki farka dayalı olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.5).

Meteorolojik veriler aşağıdaki reanaliz veri setlerinden elde edilmiştir:

- Dünya Rüzgar Atlası (Sander+ Partner GmbH): 10-metre yükseklikteki saatlik rüzgar hızlarının küresel veri seti, 1979- 2009.
- (NREL, 2010a) ve (NREL, 2011) tarafından türetilen batı ve doğu Amerika Birleşik Devletleri için rüzgar arzı zaman serileri.
- Avrupa'daki her büyük Bölge için Siemens AG (Heide vd., 2010) tarafından sağlanan Avrupa-27 için rüzgar ve güneş kaynağı zaman serileri. Orijinal meteorolojik rüzgar hızı Reanaliz verilerinden kaynaklanmaktadır (WEPROG, 2010).
- Amerika Birleşik Devletleri için uydu gözlemlerinden elde edilen saatlik güneş ışınlı verileri (NREL, 2010b).
- Güneş ışınlının güneş yüksekliğine dayalı tahmini (Aboumahboub ve ark., 2010).

Şekil 4.5► Elektrik talebi ve artık yük örneği



IEA. CC BY 4.0.

4.2 Değer ayarlı Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti

LCOE'ye katkıda bulunan başlıca unsurlar arasında gecelik sermaye maliyetleri; maksimum nominal kapasiteye göre yıl boyunca ortalama çıktıyı tanımlayan kapasite faktörü (tipik değerler verilmiştir); yakıt girdilerinin maliyeti; artı işletme ve Bakım yer almaktadır. Ekonomik ömür varsayımları güneş PV, kara ve açık deniz rüzgarı için 25 yıldır. Tüm teknolojiler için standart bir ağırlıklı ortalama sermaye maliyeti varsayılmıştır (ekonomik kalkınma aşamasına bağlı olarak reel anlamda %7-8).

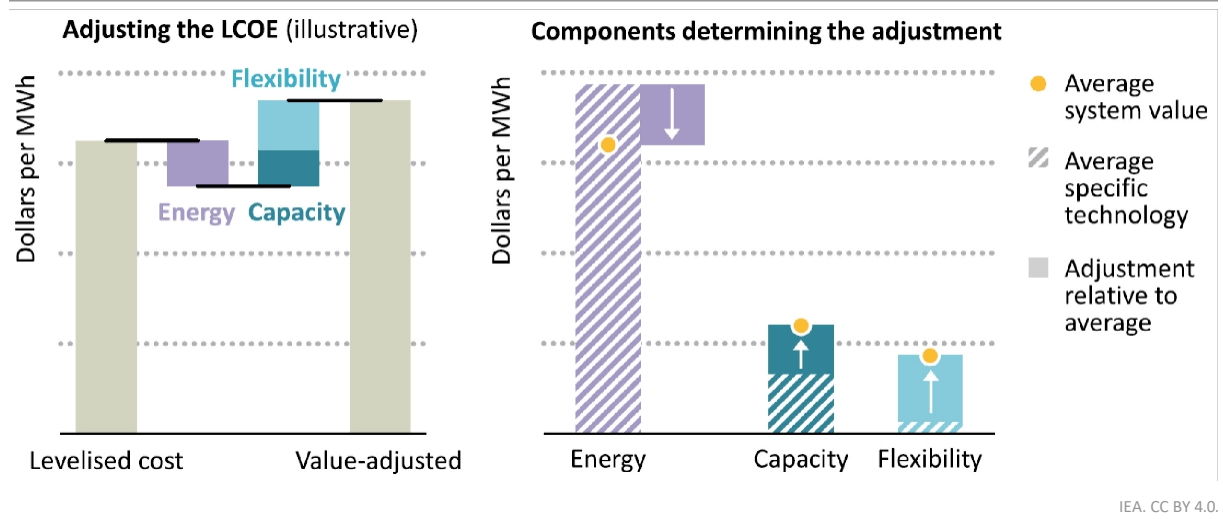
Değer ayarlı LCOE (VALCOE), GEC Model saatlik güç kaynağı modelinin yetenekleri üzerine inşa edilen, enerji üretim teknolojileri için bir rekabetçilik ölçütüdür. Yalnızca maliyetlerle ilgili bilgileri yakalayan ve teknolojilerin farklı değer önerilerini yansıtmayan LCOE'yi tamamlaması amaçlanmıştır. LCOE, tüm doğrudan teknoloji maliyetlerini anlaşılması kolay tek bir metriğe sıkıştırma avantajına sahip olsa da, yine de önemli eksiklikleri vardır: sistem için değer veya dolaylı maliyetlerin temsilinden yoksundur ve farklı şekilde çalışan teknolojileri karşılaştırmak için özellikle zayıftır (örneğin değişken yenilenebilir enerjiler ve sevk edilebilir teknolojiler). VALCOE, değişken yenilenebilir enerjiler ve sevk edilebilir termal teknolojiler arasında hem maliyet hem de değeri dikkate alan karşılaştırmalar yapılmasını sağlar.

VALCOE, teknolojiye göre ortalama LCOE (veya LRMC) temeli üzerine inşa edilir ve üç değer unsuru ekler: enerji, kapasite ve esneklik. Her bir teknoloji için tahmini değer unsurları sistem ortalamasıyla LCOE'ye yapılacak ayarlama (yukarı veya aşağı) hesaplanır. Ayarlamalar tüm teknolojilere uygulandıktan sonra, VALCOE rekabetçiliği değerlendirmek için bir temel oluşturur ve en düşük sayıya sahip olan teknoloji en rekabetçi teknolojidir (Şekil 4.6). VALCOE tüm sistemlerde, çünkü enerji, kapasite ve esneklik hizmetleri ayrı ayrı ücretlendirilmeseler de tüm sistemlerde sağlanır ve gereklidir. Bu şekilde politika yapımcıların ve planlamacıların bakış açısını benimsemektedir. VALCOE'ye dahil edilmeyen özel vergi hükümleri gibi sübvansiyonları ve diğer destek tedbirlerini de içerebilecek olan yalnızca mevcut gelir akışlarını dikkate alacak yatırımcıların bakış açısını temsil etmesi gerekmemektedir.

Değer ayarlamasının etkisi, işletim modellerine ve sisteme özgü koşullara bağlı olarak teknolojiye göre değişir. Sadece puant zamanlarda çalışan sevk edilebilir teknolojilerin megavat-saat (MWh) başına maliyetleri yüksektir, ancak aynı zamanda başına nispeten yüksek değere sahiptirler. Baz yük teknolojileri için değer, sistem ortalamasına yakın olma eğilimindedir ve bu nedenle küçük bir değer ayarlamasına sahiptirler. Değişken yenilenebilir enerji kaynakları için değer ayarlaması

esas olarak kaynak ve üretim profiline, elektrik talebinin şekli ile uyuma ve halihazırda sistemde bulunan değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının payına bağlıdır. VALCOE'da farklı operasyonel modeller hesaba katılarak sevk edilebilir teknolojiler arasındaki karşılaştırmalar iyileştirilebilir.

Şekil 4.6► Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyetinin ötesine geçerek değer ayarlı Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyetine geçiş



Not: LCOE = Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti.

VALCOE, LCOE ve enerji, kapasite ve esneklik değerinden oluşur. Hesaplanması aşağıdaki gibidir:

$$VALCOE_x = LCOE_x + \underbrace{\text{Energy value}_x}_{\text{Value adjustments}} + \underbrace{\text{Capacity value}_x}_{\text{Value adjustments}} + \underbrace{\text{Flexibility value}_x}_{\text{Value adjustments}}$$

Bir x teknolojisinin (veya üretim biriminin) enerji değeri $[E_x]$ için ayarlama, bireysel birim ile sistem ortalama birimi $[E]$ arasındaki farktır. $[E_x]$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Energyvalue_x = \frac{\$}{\sum_h^{8760} [MMWholesalePrice (\$) \times Output_{x,h} (MMM)]} \times \sum_h^{8760} Output_{x,h} (MMM)$$

Yılın her h saatinde her x teknolojisi için toptan elektrik fiyatları ve üretim hacimleri simüle edilmektedir. Toptan satış fiyatları yalnızca marjinal üretim maliyetine dayanmaktadır ve ABD piyasalarında mevcut olan işletme rezervleri talep eğrileri gibi herhangi bir kısıtlı fiyatlandırması veya diğer maliyet eklentilerini içermemektedir. Saatlik modeller Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa Birliği, Çin ve Hindistan için uygulanmaktadır. Diğer bölgeler için toptan satış fiyatları ve üretim hacimleri Bölüm 4.1.2'de sunulan yılın dört dilimi için simüle edilmiştir.

Bir üretim biriminin kapasite değeri $[C_x]$ için düzeltme aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Capacityvalue_x = \frac{\$}{(factor_x \times \frac{Capacitycredit_x \times Basiccapacityvalue (\$/kMM)}{hoursin year/1000})}$$

Kapasite kredisi, sistem yeterliliğine katkısı yansıtır ve sevk edilebilir ve yenilenebilir teknolojiler için farklılaştırılmıştır:

- sevk edilebilir enerji santralleri= (teknolojiye göre 1-plansız kesinti oranı)
- yenilenebilir enerji= saatlik modelleme ile bölgeye göre teknolojiye özgü değerlerin analizi.

Temel kapasite değeri, kapasite ödemesi için en yüksek "teklif" tarafından belirlenen kapasite piyasası simülasyonuna dayalı olarak belirlenir. Pozitif teklifler, toplam üretim maliyetleri (sermaye geri kazanımı dahil) ile mevcut gelir arasındaki boşluğu doldurmak için gereken ödemeyi yansıtır.

Kapasite faktörü teknolojiye göre farklılaşmaktadır:

- sevk edilebilir enerji santralleri= önceki yıl simüle edilmiş operasyonlar olarak modellenmiştir
- rüzgar ve güneş enerjisi = IRENA ve diğer kaynaklardan elde edilen en son performans verileriyle uyumlu, teknolojiye gelişmeler nedeniyle zaman içinde iyileşen
- hidroelektrik ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları= bölgelere göre en son performans verileri ve uzun vadeli bölgesel ortalamalarla uyumludur.

Bir üretim biriminin esneklik değeri $[F_x]$ aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Flexibilityvalue_x = \frac{\$}{kMM} \frac{Flexibilityvaluemultiplier_x \times Baseflexibilityvalue}{(factor_x \times hoursin\ year/1000)}$$

- Teknolojiye göre Esneklik değeri çarpanı mevcut piyasa verilerine dayanmaktadır ve zaman içinde sabit tutulmuştur. Esneklik değerini artırmak için enerji santrallerinin operasyonlarında hedeflenen değişiklikler temsil edilmemiştir.
- Temel esneklik değeri, Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki mevcut piyasa verilerine göre değişken yenilenebilir enerjilerin üretimdeki yıllık payının bir fonksiyonudur. Esneklik değerinin artan değişken yenilenebilir enerji (VRE) paylarıyla birlikte, puant santralin tam sabit sermaye geri kazanım maliyetlerine eşit bir maksimum değere kadar artacağı varsayılmaktadır.

Değer ayarlı Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyetinin avantajları ve sınırlamaları

VALCOE'nin tek başına LCOE'ye göre çeşitli avantajları vardır:

- Teknolojiye özgü bilgileri ve sisteme özgü özellikleri içeren daha sofistike bir rekabet gücü ölçütü sağlar.
- Her bir teknolojinin (enerji, kapasite/yetkinlik ve esneklik) sisteme sağladığı değere ilişkin bilgileri/tahminleri yansıtır.
- Farklı operasyonel özelliklere sahip teknolojiler (örneğin baz yükten puant yüke veya sevk edilebilir den değışkene) arasında sağlam bir rekabet gücü ölçütü sağlar.
- Rüzgâr ve güneş enerjisinin artan payları ile sağlam bir rekabet gücü ölçütü sağlar.

Ancak, şebeke entegrasyon maliyetleri ve piyasalarda açıkça fiyatlandırılmadığı sürece çevresel dışsallıklar dahil edilmemiştir. Elektrik güvenliğinin kritik bir unsuru olan yakıt çeşitliliği kaygıları da VALCOE'ye yansıtılmamaktadır.

VALCOE yaklaşımının başka yerlerde, uzun vadeli enerji analizi için kullanılan diğer yaklaşımlarda ve bazı gerçek dünya uygulamalarında bazı paralellikleri vardır. VALCOE en çok, LCOE'nin ötesinde sistem değerini değerlendirmek için kapsamlı bir teorik çerçeve sağlayan Sistem LCOE ile yakından ilişkilidir (Ueckerdt vd., 2013). VALCOE ve Sistem LCOE kapsam olarak benzerdir ve terimlerin yeniden düzenlenmesi hesaplamaların önemli bölümlerini uyumlu hale getirebilir. Optimizasyon modelleri, net bugünkü değer ve iç getiri oranları gibi standart karlılık ölçütleri aracılığıyla teknolojilerin maliyetini ve değerini dolaylı olarak temsil eder, ancak yan hizmetlerle ilgili olanlar gibi dahil edilen maliyetlerin kapsamı ile sınırlı olabilir. Diğer uzun vadeli enerji modelleme çerçeveleri, ABD Enerji Bilgi İdaresi tarafından kullanılan Ulusal Enerji Modelleme Sisteminde yer alan Seviyelendirilmiş Kaçınılan Elektrik Maliyeti gibi maliyet ve değer ölçütlerini kapasite genişletme kararlarına dahil etmiştir. Politika uygulamalarında, Meksika'daki 2017 temiz enerji ihale programlarında, muhtemel projeler için ortalama enerji değerleri simüle edilmiş ve en uygun maliyetli projeleri belirlemek amacıyla teklif fiyatlarını ayarlamak için kullanılmıştır. Dünya çapında temiz enerji geçişleri ilerledikçe, daha yüksek rüzgar ve güneş enerjisi payları ile deneyim

Büyük sistemlerde güneş kullanımı artacak ve VALCOE ve diğer rekabetçilik ölçütlerini iyileştirmek için fırsatlar sağlayacaktır.

Şebeke ölçeğinde güneş enerjisi için finansman maliyetleri

Solar PV'nin azalan maliyetleri etkileyicidir ve inovasyon, inşaat maliyetlerini 2010'dan 2019'a kadar %80 oranında düşürmüştür (IRENA, 2020). Maliyet düşüşleri, daha yüksek verimli paneller ve izleme ekipmanlarının daha fazla kullanılmasından kaynaklanan gelişmiş performans ile tamamlanmıştır. Ancak finansman maliyetleri, önemlerine rağmen çok az ilgi görmüştür. Ağırlıklı ortalama sermaye maliyeti (WACC), şebeke ölçeğindeki güneş enerjisi projelerinin LCOE'sinin yarısına kadarını oluşturabilir.

WEO-2020, finansal piyasalardan ve akademik literatürden elde edilen verilere, ihale sonuçlarının ve enerji satın alma anlaşmalarının (PPA) analizine dayanan ve dünya çapında uzmanlar ve uygulayıcılarla yapılan çok sayıda gizli görüşmeyle tamamlanan kapsamlı bir çalışmayla finansman maliyetine odaklanmıştır. Analiz, 2019 yılında gelir destekli yeni şebeke ölçekli güneş enerjisi projeleri için AOSM'lerin Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde %2,4-4,5 (reel olarak, vergi öncesi), Çin'de %3,4-3,6 ve Hindistan'da %5,0-6,6 olduğunu ortaya koymuştur. İş modellerinin analizi, temel gelir riski bileşenlerine - fiyat, hacim ve alıcı riski - ve bunların sermaye maliyeti üzerindeki etkilerine dayanmaktadır. Bu analiz, güneş enerjisi üretimi için ödenen fiyatların büyük ölçüde politika mekanizmaları tarafından belirlendiği modellere odaklanmaktadır. Büyük güneş enerjisi piyasalarında geçerli ortalama sermaye maliyetlerine ilişkin bu analizin bulguları, GEC Modelindeki projeksiyonları desteklemektedir. Tam ticari projeler (piyasaların dışında herhangi bir fiyat garantisi olmadan) bir karşılaştırma noktası olarak ele alınmış ve gösterge niteliğinde bir AOSM sağlanmıştır, ancak bugüne kadar bu model güneş PV için biraz teorik kalmıştır. Uzun vadede bu tür yatırımlar daha yaygın hale gelebilir.

4.3 Elektrik iletim ve dağıtım şebekeleri

Model, elektrik iletim ve dağıtım ağının genişletilmesi ve değiştirilmesi ile bölge başına ilgili yatırımları hesaplamaktadır. İletim şebekeleri büyük hacimlerde elektriği yüksek voltajla uzun mesafelere taşır. Çoğu büyük jeneratör ve bazı büyük ölçekli endüstriyel elektrik kullanıcıları doğrudan iletim şebekelerine bağlıdır. Dağıtım şebekeleri, iletim şebekesinden gelen yüksek voltajlı elektriği, hafif sanayi, ticari ve evsel son kullanıcılar tarafından kullanılmak üzere daha düşük voltajlara dönüştürür.

GEC Modelindeki elektrik şebekeleri çeşitli kategorilere ayrılmıştır: beş farklı voltaj aralığı, havai hat veya yeraltı kablosu ve alternatif akım (AC) veya doğru akım (DC) olarak temsil edilerek 20 olası hat veya kablo tipi oluşturulur. Bu sayede ekipman maliyetleri, malzeme ihtiyaçları ve bölgesel farklılıklar konusunda daha fazla ayrıntıya inilebilmektedir. Hat genişletme projeksiyonları hat ve kablo tipinde aynı ayrıntı düzeyini taşıdığından, bu bilgiler daha sonra modelde şebekelerin mevcut ve öngörülen yapısını anlamak için kullanılır. Bu nedenle, bölgeye ve hatta özgü maliyetler, söz konusu şebekeye yönelik yatırım ihtiyaçlarının bir model temsilini oluşturmak için hat ve kablo türüyle eşleştirilebilir. Buna ek olarak, hat ve kablo tipine ilişkin bu ayrıntılı görünüm, büyüyen elektrik şebekesi nedeniyle malzeme talebine ilişkin projeksiyonlar oluşturmak için özellikle kritik mineraller olmak üzere km başına malzeme kullanımı ile eşleştirilir.

Yeni elektrik şebekesi hat uzunluklarına duyulan ihtiyaç üç faktörden kaynaklanmaktadır: teknik ömürlerinin sonuna yaklaşan mevcut hatların değiştirilmesi, artan elektrik talebinin desteklenmesi ve enerji sektörüne ilave yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edilmesi.

Eskiye altyapı nedeniyle hat değişimi

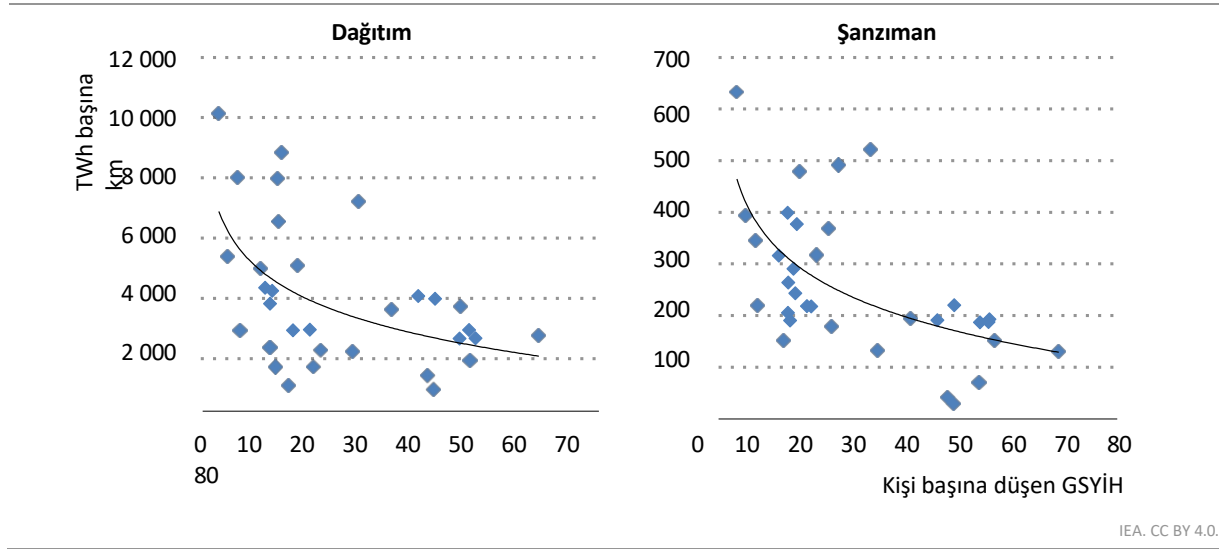
Hatlar ve kablolar için ortalama 40 yıllık bir kullanım ömrü varsayıldığında, model yıllık yenilemeleri buna göre hesaplamaktadır. Bu, şebekenin toplam boyutunu artırmaya da, milyonlarca kilometre (km) uzunluğundaki

Her yıl, yatırımlar ve malzeme talebinin yanı sıra proje planlaması açısından da hesaba katılması gereken yeni hatlar ve kablolar.

Elektrik talebindeki artışa bağlı olarak hat uzunluğunun artması

Elektrik talebindeki büyümeyle birlikte şebeke genişlemesi de artmaktadır. Bunu temsil etmek için, talep artışı birimi başına şebeke genişlemesi ile kişi başına düşen GSYİH arasında dinamik bir ilişki oluşturulmuştur. , her bölge için terawatt-saat (TWh) talep başına düşen km hat uzunluğu, bu küresel düzeydeki ilişkiyi temsil eden bir denklem üretmek için söz konusu bölge için kişi başına düşen GSYİH ile birlikte kullanılır. Şebeke büyüme oranları dağıtım ve iletim seviyesi arasında farklılık gösterdiğinden, bu ilişki her biri için yapılmış ve buna göre kullanılabilir iki alfa ve beta parametresi seti elde edilmiştir.

Şekil 4.7► Kişi başına düşen GSYİH'ye göre birim elektrik talebi artışı başına elektrik şebekesi genişlemesi



IEA. CC BY 4.0.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına bağlı hat uzunluğu artışı

Modelleme ufku boyunca öngörülen kapasite ilavelerinin önemli bir kısmı yenilenebilir enerji kaynaklarından gelmektedir. Bu teknolojilerin konumu genellikle mevcut talep merkezlerine yakın olmayabilen temel kaynağın konumundan (örneğin rüzgarın güçlü olduğu veya güneşlenmenin yüksek olduğu alanlar) büyük ölçüde etkilenmektedir. Buna ek olarak, bu teknolojilerden bazıları, özellikle güneş PV, şebeke altyapısının son kullanıcı tarafına bağlanmaktadır. Üretim kapasitesinin bu şekilde modüler olarak dağıtılması, dağıtım kapasitesi ihtiyaçlarının artmasına neden olabilir.

Büyük miktarlarda uzak veya değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının devreye girmesi, elektrik şebekelerinin tarihsel gelişiminde belirgin bir özellik olmadığından (uzak hidroelektriğin üretim karışımının büyük bir oranını temsil ettiği bölgeler hariç), daha fazla yenilenebilir enerjinin eklenmesinin şebeke eklemelerinin ortalama uzunluğunu artırması muhtemeldir.

Hat genişlemesi iki faktör tarafından yönlendirilmektedir: güneş ve rüzgar santrallerini şebekeye bağlayan iletim hatları ve içindeki güçlendirme gereksinimleri. Ortalama bağlantı hattı uzunluğu için bir faktör, geçmişteki şebeke ölçeğindeki güneş PV, karadaki rüzgar ve açık denizdeki rüzgar projelerini birbirine bağlayan ortalama hat uzunluğundan türetilmiştir. Bu yenilenebilir enerji teknolojilerinden gelen ek kapasite, ilgili hat uzantılarını elde etmek için tarihsel ilişki ile çarpılmıştır.

Şebeke güçlendirmeleri, yüksek yenilenebilir enerji gelişimine sahip ülkelerde yapılan bir çalışmaya dayanmaktadır. Yenilenebilir üretim payının bir eşik değerine kadar şebeke iyileştirmelerine gerek yoktur. Bir artış

Bu eşiğin ötesindeki pay, literatüre ve bölgeye ve senaryoya göre öngörülen yenilenebilir enerji paylarına dayalı olarak şebekeyi güçlendirmek için ek uzunluklara yol açmaktadır.

Yenilenebilir enerjiler için dağıtım şebekesi genişletmelerinin tahmini, teknik olarak karmaşık dağıtım şebekesi hakkında daha az veri veya çalışma mevcut olduğundan ve dağıtılmış üretimin kendi kullanımı, dağıtım şebekesi altyapısına olan ihtiyacın azalmasına neden olabileceğinden, iletim şebekesine göre daha fazla belirsizlik içermektedir. Bu nedenle, ek şebeke yatırımının yalnızca binalardaki güneş enerjisi gibi dağıtılmış üretimden üretilen elektriğin yerel talebi aşması ve sisteme geri beslenmesi durumunda gerekli olduğunu varsayıyoruz.

Elektrik talebi ve arzındaki büyümeye bağlı olarak trafo kapasitesinin artırılması

Trafo kapasitesi, her bir GEC bölgesindeki elektrik üretim kapasitesiyle ilişkili geçmiş verilere dayanmaktadır. Trafo kapasitesi artışının hesaplanmasında yeni güç kapasitesi dikkate alınırken, küçük ölçekli solar PV'nin tamamı, çıktının çoğunun yerel olarak kullanılacağı varsayıldığı için düşülmüştür. PV güneş enerjisinin diğer bir kısmı dağıtım şebekesine bağlanacak ve hesaba katılacaktır ve ilave batarya depolama kapasitesinin bir kısmı şebeke üzerinden güç akışını ve dolayısıyla trafo kapasitesi ihtiyacını azaltacağı için düşülmüştür.

Eskime nedeniyle trafo değişimi

Transformatörler için ortalama 40 yıllık bir kullanım ömrü varsayıldığında, yıllık değişimler buna göre hesaplanır. Bu, şebekedeki toplam kapasiteyi artırmaya da, her yıl yatırım ve malzeme talebi açısından hesaba katılması gereken trafo kapasitesi ekler.

Elektrik şebekesi yatırımı

Elektrik şebekeleri için yapılan yatırımlar, hat uzunluğunu artıran üç ana etkenle ilgili olanlardan oluşmaktadır: artan talep, yenilemeler ve yenilenebilir enerji kaynaklarındaki artış. Buna ek olarak, şebeke oluşturma gereksinimleri ve iletim seviyesinin güçlendirilmesi gibi hat uzunluğu dışındaki bileşenlere bağlı yatırımları da içerir. Toplam şebeke yatırımlarının çoğunluğunu oluşturan yatırımın hat uzunluğu bileşenleri için model bunu, her bir hat ve kablo tipi için birim maliyet ile çarpılan belirli bir itici güç nedeniyle km cinsinden şebeke genişlemesi olarak hesaplar.

Şebeke oluşturma gereksinimleri, projeksiyonlarda değişken yenilenebilir enerjilere geçişin kapsamıyla ilgili olarak elektrik şebekesi temsiline de dahil edilmiştir. Değişken yenilenebilir enerji kaynakları, şebekeye bir dönüştürücü aracılığıyla bağlandıkları için mekanik ataletten yoksundur. Atalet, enerji santrallerindeki jeneratörlerde bulunan büyük döner kütlelerden kaynaklanır ve özellikle arıza şebekenin dengede tutulması için gereklidir. Değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artmasıyla birlikte şebeke, Esnek AC İletim Sistemleri (FACTS) ailesinden şebeke oluşturma stabilizasyon teknolojilerine ihtiyaç duymaktadır. Bu yatırım için yapılan hesaplama, yüksek yenilenebilir enerji payına sahip ülkelerde gerçekleşen dağıtım ihtiyaçlarına dayanmaktadır. Yatırım, yenilenebilir enerji üretiminin asgari bir seviyenin üzerine çıkmasıyla yönlendirilir ve her bölgede değerlendirilen ihtiyaçlara göre artar. Minimum seviyenin altında, şebeke ek önlemler olmaksızın stabil kalır.

Elektrik şebekesi ekipman birim maliyetlerinin her biri, ilgili hat ve kablo türüne göre km başına maliyetleri detaylandıran yayınlardan toplanan proje ve ulusal düzey maliyetlerin ortalaması kullanılarak oluşturulmuştur. Bu maliyetler, bölgeye özgü maliyetlerin dengeli bir şekilde görülebilmesi için küresel olarak çeşitli bölgelerden alınan maliyetleri temsil etmektedir. Bu maliyetler daha sonra her bölge için km başına 20 farklı maliyet serisi oluşturacak şekilde bölge bazında daha da özelleştirilmiştir. Benzer şekilde, yenileme maliyetleri de hat ve bölgeye özeldir. Tüm türler ve bölgeler için yenileme maliyetleri yeni hatlara göre daha düşüktür çünkü izin, arazi ve sermaye maliyetlerinin çoğunun yeniden yapılması gerekmemektedir. Bununla birlikte, km başına maliyetleri büyük ölçüde etkileyebilecek iki faktör olan bölge başına malzeme kullanımı ve bölge başına işçilik maliyetleri arasında ayırım yapmak için bölgeye özel indirimler kullanılır. Tüm bu maliyetler ve ağ için itici güçler bir araya getirildiğinde

Model, 20 hat ve kablo türünün her biri için aşağıdaki denklemle genel ağ yatırımını hesaplar:

Annualtransmissioninvestmentbyregion=

$$\begin{aligned}
 & \left[\text{cost newlines}_{V,P,C} \right. \\
 & \left. \Delta \text{electricitydemand} * \left(\alpha * \ln(\text{GDPpercapita}) + \beta \right) * \text{grid composition}_{V,P,C} \right. \\
 & \left. + \left(\text{renewables additions}_R * \gamma_{(V,P,C)} \right) \right. \\
 & \left. + \Delta \text{share of variable renewables} * \psi * \text{total transmission}_{h(V,P,C)} \right. \\
 & \left. + \text{cost replacement}_{V,P,C} * \text{lines replacement}_{V,P,C} \right] \\
 & + \text{cost STATCOM} * \phi * \Delta \text{share of variable renewables installed} * \text{total power capacity}
 \end{aligned}$$

Annualdistributioninvestmentbyregion=

$$\begin{aligned}
 & \left[\text{cost newlines}_{V(P),C} * \left(\alpha * \ln(\text{GDPpercapita}) + \beta \right) * \text{grid composition}_{V,P,C} \right. \\
 & \left. + \left(\text{renewables additions}_R * \gamma_{V(P),C} \right) \right. \\
 & \left. + \text{cost replacement}_{V,P,C} * \text{lines replacement}_{V,P,C} \right]
 \end{aligned}$$

Nerede?

- V gerilim seviyesi bandıdır
- P konumdur (baş üstü, yer altı)
- C akımdır (AC veya DC)
- R yenilenebilir enerji teknolojisidir
- $\text{grid composition}_{V,P,C}$ şebekenin gerilim, konum ve akıma göre tarihsel paylarıdır
- α, β talep büyümesini kişi başına düşen GSYİH ile ilişkilendiren denklemdeki boyutsuz değişkenlerdir ve bölgelere göre tarihsel verilerden türetilmiştir
- γ gerilim, konum ve akıma göre GW başına km cinsinden ölçülen yeni yenilenebilir enerji kapasitesi ilavelerini bağlamak için gereken ilave hat uzunluklarıdır
- ψ değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek payları nedeniyle ek iletim şebekesi gereksinimlerinin boyutsuz faktörüdür, burada minimum bir eşiği aşar
- $\Delta \text{electricitydemand}$ bölgedeki elektrik talebindeki yıllık artıştır
- $\Delta \text{share of variable renewables}$ değişken yenilenebilir kaynakların toplam kurulu kapasite içindeki payının yıllık artışıdır
- $\text{lines replacement}_{(V,P,C)}$ 40 yıllık kullanım süresine ulaşanlar olarak tanımlanan km cinsinden değiştirilecek hatlardır
- cost STATCOM STATCOM cihazlarının (statik senkron kompansatörler) maliyetidir
- ϕ yenilenebilir enerji payının asgari bir eşiği aşması durumunda, değişken yenilenebilir enerji payının yüksek olması nedeniyle ilave şebeke oluşturma gereksinimlerinin boyutsuz faktörüdür. Hem Dağıtım Sistemi Operatörünün (DSO) hem de İletim Sistemi Operatörünün (TSO) mevcut yıllık harcamaları çeşitli bölgelerde incelemeye tabi tutulur ve bu rakamlar hesaplanan yatırım ile ilişkilendirilir. Bu Şebeke altyapısına yapılan yatırımın, elektrik üretimine yapılan yatırımların hesaplanmasında kullanılan yaklaşımın aksine, yatırımı zamana yayan bir harcama modeline bağlı olmadığını belirtmek önemlidir.

4.4 Saatlik modeller

Yüksek VRE paylarının entegrasyonundan kaynaklanan zorluğun ölçeğini ölçmek ve kesintiyi en aza indirmek için hangi önlemlerin kullanılabileceğini değerlendirmek için, *WEO-2016* için güç sistemlerinin operasyonları hakkında daha fazla bilgi sağlamak amacıyla saatlik bir model geliştirilmiştir. Model, GEC Modelinde oluşturulan yıllık projeksiyonlar üzerine inşa edilmiştir ve VRE'nin payı artmaya devam ettikçe ortaya çıkanlar gibi güç sistemlerinde ortaya çıkan sorunları keşfetmeyi mümkün kılmaktadır. Model daha sonra ana GEC Modelini farklı enerji santrallerinin operasyonları üzerindeki ek kısıtlamalar hakkında bilgi ile besler. Model, yılın tüm saatlerini temsil eden, yılın her günü için günün her saatinde elektrik talebini mümkün olan en düşük maliyetle karşılama hedefini belirleyen ve operasyonel kısıtlara saygı gösteren klasik bir saatlik sevk modelidir.¹ Mevcut ve yeni fosil yakıtlı enerji, nükleer santraller ve 16 farklı yenilenebilir enerji teknolojisi dahil olmak üzere, GEC Modelinde kayıtlı 106 enerji santrali türünün tamamı ve kurulu kapasiteleri saatlik modelde temsil edilmektedir. Her yıl mevcut olan enerji santrali filosu GEC Modelinde belirlenir ve geçerli politika çerçevesine bağlı olarak senaryoya göre farklılık gösterir. Bu santraller daha sonra saatlik modelde kullanıma sunulur ve talebi karşılamak için gereken ölçüde her bir santralin kısa dönem marjinal işletme maliyetleri (esas olarak GEC Modelinde öngörülen yakıt maliyetleri tarafından belirlenir) temelinde sevk (veya çalışmak üzere seçilir). Sevkiyat kısıtlamalar altında çalışır: güç sisteminin esnekliğini ve istikrarını sağlamak ve diğer ihtiyaçları (CHP gibi) karşılamak için minimum üretim seviyeleri vardır; yenilenebilir kaynakların (rüzgar ve güneş gibi) değişkenliği, değişken yenilenebilir kaynakların kullanılabilirliğini ve dolayısıyla herhangi bir zamanda maksimum çıktıyı belirler; ve önceki saatteki çıktı seviyesinden ve farklı enerji santrallerinin özelliklerinden türetilen rampa kısıtlamaları uygulanır. Saatlik sevkiyat modeli iletim ve dağıtım sistemini, şebeke darboğazlarını, sınır ötesi akışları veya şebeke üzerinden güç akışını temsil etmez. Bu nedenle, her bir GEC Model bölgesindeki (örneğin Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa Birliği, Çin ve Hindistan) dengeleme alanları arasında tam entegrasyon sağlayabilen sistemleri simüle eder.

Modelin temel girdileri arasında, her bölge için rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi için ayrıntılı toplam saatlik üretim profilleri yer almaktadır; bu profiller, ilgili bölgeye dağıtılmış yüzlerce bireysel rüzgar parkı ve güneş enerjisi tesisinin simüle edilmiş üretim profillerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur.² Bireysel tesisler, bir bölge içinde geniş bir dağılımı temsil edecek şekilde seçilmiştir ve modelin dengeleme alanlarının genişletilmesiyle elde edilen yumuşatma etkisini temsil etmesine olanak tanımaktadır. Talep tarafında ise model, her bir spesifik son kullanım (konut sektöründe aydınlatma veya su ısıtma gibi) için saatlik talep profilleri ve ana GEC Modelinden model ufkı boyunca spesifik son kullanıma göre elektrik talebinin yıllık gelişimi ile birlikte detaylı bir analiz kullanmaktadır (bkz. Bölüm 3.4).

Saatlik model, üç adımda şebeke, esnek üretim ve VRE'nin sistem dostu gelişimini hesaba katmaktadır: ilk olarak, talep tarafı müdahalesi ve depolama olmadan meydana gelecek değişken yenilenebilir enerji kesintisi miktarını değerlendirmektedir. İkinci olarak, her bir elektrik son kullanımı için her saatteki mevcut potansiyele dayalı olarak talep tarafı müdahale önlemlerini devreye alır. Üçüncü olarak, saatler ve şarj/deşarj dönemleri arasındaki fiyat farkına dayalı olarak depolamanın ekonomik operasyonlarını belirlemek için mevcut ve yeni depolama tesislerini kullanır. Böylece yenilenebilir enerji kaynaklarının artan payından kaynaklanan entegrasyon ihtiyaçlarının değerlendirilmesini sağlar.

Diğer önemli model çıktıları arasında, sıfır marjinal maliyetli jeneratörlerden (değişken yenilenebilir enerji kaynakları gibi) elde edilen üretimin talebi karşılamak için yeterli olduğu saatlerde sıfıra düşebilen saatlik piyasa fiyatı yer almaktadır. Model, piyasa her bir saatteki üretim çıktısıyla çarparak, bir santral türünün her bir saatteki çıktısı için elde ettiği gelirleri hesaplar ve VRE'nin değerini hesaplamak için bir temel oluşturur. Model ayrıca yakıt maliyetleri ve ilgili sera gazı ve kirlenici emisyonları da dahil olmak üzere her bir tesis türü için saatlik işletme bilgileri sağlar.

¹ Model saatlik bir ayrıntıda çalışmaktadır ve bu nedenle farklı cihazların (örneğin depolama teknolojilerinin) saat içi değerleri yakalanmamaktadır.

² Rüzgar ve güneş PV verileri Renewables.ninja'dan alınmıştır (<https://www.renewables.ninja/>) ve Ueckerdt ve diğerleri (2016).

Mevsimsel değişkenliğin ve uzun vadeli depolamanın modellenmesi

Değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının ve elektrikli ısıtma ve soğutma gibi sıcaklığa duyarlı nihai kullanımların artan paylarıyla karakterize edilen sistemlerde hava kaynaklı değişkenliğin güç sistemi operasyonları ve uzun vadeli esneklik ihtiyaçları üzerindeki etkisini değerlendirmek için *WEO-2023* için yeni bir saatlik sevkiyat modeli geliştirilmiştir. GEC Modelinin yıllık projeksiyonlarını temel alan bu model, güç sistemi esneklik ihtiyaçlarını saatler, günler ve haftalardan mevsimlere kadar değişen zaman ölçeklerinde ölçmek ve bu ihtiyaçların maliyet açısından en uygun şekilde nasıl karşılanabileceğini belirlemek için uygulanmıştır. Yılın her saatinde elektrik talebini mümkün olan en düşük maliyetle karşılama hedefini belirlerken operasyonel kısıtlara da saygı göstererek bir yıldaki tüm saatleri temsil eder. Model, enerji sistemi modellemesi için *PyPSA* açık kaynaklı Python ortamı kullanılarak Python'da oluşturulmuştur³ ve doğrusal optimizasyon kullanılarak çözülmüştür. Optimizasyon, enerji santrallerinin, enerji depolama teknolojilerinin, talep tarafı katılımın ve elektrolizörlerin belirli bir yıl için saatlik bir ayrıntıda toplam sistem maliyetini en aza indirecek (dolayısıyla sisteme faydalarını en üst düzeye çıkaracak) şekilde çalıştırılmasını sağlar.

Rüzgar, güneş enerjisi ve nehir tipi hidroelektrik için üretim profillerinin yanı sıra rezervuar hidroelektrik için akış profilleri, rüzgar hızları, güneş ışıması, sıcaklık ve akış gibi hava durumu verilerini saatlik rüzgar gücü, güneş enerjisi, nehir tipi hidroelektrik, hidroelektrik rezervuar akışı ve ısıtma talebi profillerine dönüştüren işlevler sağlayan *Atlite* açık kaynaklı Python kütüphanesi kullanılarak oluşturulmuştur (Hoffman vd., 2021). Hava durumuna bağlı yenilenebilir enerji kaynaklarının ve sıcaklığa bağlı talebin yıllar arasındaki potansiyel değişkenliğini değerlendirmek ve aşırı olayları yakalamak için, 30 tarihsel hava durumu yılına⁴ (1987-2016)⁵ ait hava durumu verileri, 30 km çözünürlükte tüm dünyayı kapsayan Avrupa Orta Menzilli Hava Tahminleri Merkezi'nin ERA5 reanaliz veri setinden elde edilmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının hakim olduğu sistemlerde hava koşullarına bağlı değişkenliğin uzun vadeli etkisini modellemek için model, rezervuar ve pompaj depolamalı hidroelektriğin yanı sıra sıcaklığa duyarlı talep ve talep tarafı katılımı (bkz. Bölüm 3.4), hidrojen elektrolizörleri ve hidrojen depolamanın ayrıntılı bir temsiliyi içermektedir. Hidro rezervuar ve pompaj depolamalı sevkiyat, rezervuardaki su seviyeleri ve her hidroelektrik santrali için akışlara ve hidrolojik havzalara dayalı olarak türetilen doğal girişler ile kısıtlanmaktadır. Elektrik ve hidrojen sistemleri arasındaki olası etkileşimi modellemek için model, şebekeye bağlı elektrolizörlerin, hidrojen depolamanın ve hidrojen kullanan termik santrallerin çalışmasını optimize ederken, özel yenilenebilir enerji kaynaklarına bağlı şebeke dışı elektrolizörlerden hidrojen üretimini ve hidrojenin diğer kullanımları için talep profillerini dikkate alır. İletim sistemindeki kısıtların etkisini yansıtmak için, modellenen GEC bölgeleri (Avrupa, Hindistan ve Endonezya), birbirleri arasında elektrik alışverişi yapabilen birkaç düğüme ayrılmıştır ve alışverişler, her bir düğüm arasındaki iletim sisteminin toplam kapasitesi ile sınırlandırılmıştır.

Esneklik ihtiyaçlarının değerlendirilmesi

Esneklik, bir güç sisteminin ilgili tüm zaman ölçeklerinde arz ve talebin değişkenliğini ve belirsizliğini güvenilir ve uygun maliyetli bir şekilde yönetme yeteneği olarak tanımlanabilir. Esneklik ihtiyaçları, belirli bir zaman ölçeğinde kalan yükü düzeltmek için gereken dengeleme çabası olarak görülebilir (bu daha sonra baz yük kapasitesiyle karşılanabilir). Zaman ölçeğine bağlı olarak sistemin belirli esneklik ihtiyaçlarını hesaba katmak için *WEO-2024*'te kısa vadeli ve mevsimsel esneklik ihtiyaçları arasında ayırım yapmaktayız. Kısa vadeli esneklik ihtiyaçları, en yüksek yukarı yönlü rampalara sahip ilk 100 saatteki artık yükün ortalama saatlik rampası (belirli bir saat ile bir önceki saat arasındaki artık yük farkı) olarak hesaplanır ve yıl için ortalama saatlik elektrik talebine bölünür (bu durumda elektrik talebi batarya şarjını, pompaj depolamalı pompalamayı veya net ihracatı içermez). Mevsimsel esneklik ihtiyaçları, artık yükün haftalık ve yıllık ortalaması arasındaki farkın yıllık elektrik talebine bölünmesiyle hesaplanarak değerlendirilir.

³ <https://pypsa.org/>

⁴ Bir hava yılı, saatlik yüklerin ve yenilenebilir enerji çıktılarının eğrilerini oluşturmak için geçmiş kayıtlardan derlenen sıcaklık, güneş radyasyonu, rüzgar hızı ve yağış gibi bir dizi hava parametresidir.

⁵ <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>

Kısa vadeli esneklik ihtiyaçları aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Ramp(t) = ResidualLoad(t) - ResidualLoad(t-1h)$$

$$FlexibilityNeeds_{year, short-term} = \frac{\sum_{t \in \{t_1, t_2, \dots, t_{100}\} \text{ with } Ramp(t) \geq Ramp(t_{i+1})} P(t)}{100 \cdot AnnualElectricityDemand_{year}} \cdot 8760$$

Mevsimsel esneklik ihtiyaçları aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$FlexibilityNeeds_{(year, season)} = \frac{\sum_{t \in year} |ResidualLoadMonthlyAvg(t) - ResidualLoadAnnualAvg(t)|}{AnnualElectricityDemand_{year}}$$

4.5 Mini ve şebekeden bağımsız güç sistemleri

2014'teki *Afrika Enerji Görünümü*'nden bu yana, elektriğe erişenlerle ilgili mini ve şebeke dışı sistemlerin temsili geliştirilmiş ve GEC Modeline daha iyi entegre edilmiştir. Şebekeye bağlı güç sistemlerine yaklaşımla uyumlu olarak, ilave elektrik talebini karşılamak için model, mini ve şebeke dışı sistemler için mevcut teknolojiler arasında, çeşitli belirleyici faktörleri dikkate almak için ayrıntılı coğrafi modelleme kullanarak bölgesel uzun vadeli marjinal maliyetlerine göre seçim yapmaktadır. *Afrika Enerji Görünümü 2019* için IEA, güncel teknoloji maliyetlerini, talep projeksiyonlarını ve KTH Kraliyet Teknoloji Enstitüsü tarafından geliştirilen Açık Kaynak Mekânsal Elektrifikasyon Aracı'nın (OnSSET)⁽⁶⁾ en son sürümünü kullanarak Sahra altı Afrika'daki 44 ülkeyi ayrıntılı olarak kapsayacak şekilde analizini geliştirmiştir. Teknolojiler, nehir sistemleri, biyokütle hammaddeleri (örneğin ormanlar ve tarımsal artıklar), rüzgar ve güneş gücü gibi yenilenebilir enerji kaynakları da dahil olmak üzere her bölgedeki mevcut kaynaklarla sınırlandırılmıştır. Şebekeye erişimi olanlar için tipik olarak benzin veya dizel yakıtlı yedek güç üretimi de modelde temsil edilmekte ve öngörülen kullanımı şebeke güç kaynağının kalitesine bağlıdır.

4.6 Yenilenebilir enerji ve birleşik ısı ve güç modülleri

Yenilenebilir elektrik üretimi ve CHP için projeksiyonlar ayrı alt modüllerde türetilmiştir.

4.6.1 Kombine ısı ve güç ve dağıtılmış üretim

CHP seçeneği fosil yakıt ve biyoenerji bazlı enerji santralleri için değerlendirilmektedir. CHP alt modülü, talep modüllerinde ekonometrik olarak tahmin edilen ısı talebi projeksiyonları ile birlikte sanayi ve binalardaki ısı üretim potansiyelini kullanır.

4.6.2 Yenilenebilir enerji

Yenilenebilir elektrik üretimi projeksiyonları yenilenebilir alt modülünde türetilmiştir. Yenilenebilir enerjilerin yayılımı, GEC Model bölgelerinin her birinde her bir teknoloji (biyoenerji, hidroelektrik, güneş PV, CSP, jeotermal elektrik, rüzgar ve deniz) için belirlenen politika hedeflerine, teknoloji rekabetçiliğine ve kaynak potansiyeline dayalı olarak modellenmiştir.⁷ Politika hedefleri genellikle belirli teknolojiler içindir, örneğin 130'dan fazla ülkede 2020 itibarıyla güneş PV ve kullanımını genişletmek için destek politikaları uygulanmaktadır. Diğer politikalar yenilenebilir enerjinin toplam katkısını, yenilenebilir enerjinin toplam elektrik üretimindeki payını veya düşük emisyonlu

⁶ Açık Kaynak Mekânsal Elektrifikasyon Aracı hakkında daha fazla bilgi için bkz. www.onsset.org. En son OnSSET metodoloji güncellemesi için bakınız Korkovelos, A. ve diğerleri (2019).

⁷ Bu teknolojilerin bir dizi alt türü aşağıdaki gibi ayrı ayrı modellenmiştir. Biyokütle: küçük CHP, orta CHP, sadece elektrik santralleri, biyogaz yakıtlı, atıktan enerji yakıtlı ve birlikte yakıtlı. Hidro: büyük (≥10MW) ve küçük (<10MW). Rüzgar: karada ve açık denizde. Güneş PV: büyük ölçekli ve binalar. Jeotermal: sadece elektrik ve CHP. Deniz: gelgit ve dalga teknolojileri.

yenilenebilir enerji kaynakları dahil üretim payı. Politikaların yenilenebilir enerjileri içeren geniş bir hedef belirlediği durumlarda, teknoloji rekabetçiliği ve kaynak potansiyelleri göreceli katkıları yönlendirmektedir. Teknoloji rekabetçiliği VALCOE'ye dayanmaktadır (bkz. Bölüm 4.2) ve yenilenebilir enerji teknolojileri ile daha geniş bir teknoloji kümesi arasındaki karşılaştırmalar için eşit derecede geçerlidir. Kaynak potansiyeli, her bir yenilenebilir enerji teknolojisi için bölgesel bazda değerlendirilir (bkz. Kutu 4.1). Politika hedeflerine ulaşmanın ötesinde, teknoloji rekabetçiliği ve kaynak potansiyelleri yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması için kritik hususlardır. İdari olanlar da dahil olmak üzere piyasa kısıtlamaları ve uygulanabildiği yerlerde şebeke kısıtlamaları gibi teknik engeller dikkate alınır ve teknolojiler olgunlaştıkça yakın vadede en önemlileridir.

Yeni inşa edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik üretimi, geçmiş operasyonların ve gelişen teknoloji tasarımlarının değerlendirilmesine dayalı olarak hesaplanmaktadır. Örneğin, rüzgar türbini tasarımları son on yılda gelişerek çeşitli rüzgar koşulları altında daha yüksek performans elde etmiştir. Yeni yenilenebilir enerji projeleri için varsayılan kapasite faktörleri teknolojiye ve bölgeye özgüdür. Yenilenebilir bir teknolojiden elde edilen toplam elektrik üretimi, belirli bir yıl içinde faaliyette olan tüm projelerin toplamı.

Yenilenebilir enerjiler için gecelik yatırım ihtiyaçları, yenilenebilir enerjilerin yaygınlaşması ve gelişen teknoloji maliyetlerine göre hesaplanmaktadır. Modellememiz, tüm senaryolarda, yenilenebilir enerjiler (ve henüz olgunlaşmamış diğer teknolojiler) için öngörülen sermaye maliyetleri için bir yaparak öğrenme süreci içermektedir. Belirli teknolojiler için on yıllık öğrenme oranları varsayılmıştır. Teknoloji maliyetlerinin genel gelişimi genellikle LCOE ile ifade edilir. Teknolojinin öğrenilmesi yaklaşımın ayrılmaz bir parçası olmakla birlikte, GEC Modeli teknolojidaki atılımları öngörmeye çalışmaz.

Kutu 4.1 ► Yenilenebilir enerji kaynaklarının uzun vadeli potansiyeli

Yenilenebilir enerjilerin gelecekteki yayılımını türetmek için başlangıç noktası, her yenilenebilir enerji türü ve her bölge için uzun vadeli gerçekleştirilebilir potansiyellerin değerlendirilmesidir. Değerlendirme, mevcut literatürün gözden geçirilmesine ve mevcut verilerin iyileştirilmesine dayanmaktadır. Aşağıdaki adımları içerir:

- Her bölge için *teorik* potansiyeller türetilmiştir. Mevcut bilimsel bilgilere dayanarak belirli bir enerjiden üretilebilecek enerjinin teorik üst sınırını belirlemek için genel fiziksel parametreler dikkate alınır.
- *Teknik* potansiyel, dönüşüm teknolojilerinin verimliliği ve rüzgar türbinleri kurmak için mevcut arazi alanı gibi sınır koşullarının gözlemlenmesinden elde edilebilir. Çoğu kaynak için teknik potansiyel değişen bir faktördür. Artan Ar-Ge ile dönüşüm teknolojileri geliştirilebilir ve teknik potansiyel artırılabilir.

Uzun vadeli gerçekleştirilebilir potansiyel, toplam teknik potansiyelin uzun vadede gerçekleştirilebilecek kısmıdır. Bunu tahmin etmek için teknik fizibilite, sosyal kabul, planlama gereklilikleri ve endüstriyel büyüme gibi genel kısıtlamalar dikkate alınır.

Açık deniz rüzgar teknik potansiyeli

Imperial College London ile işbirliği içinde, *WEO-2019* için dünya çapında açık deniz rüzgârının teknik potansiyelini değerlendirmek üzere ayrıntılı bir jeo-uzamsal analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışma, kırk yıllık tarihi küresel hava durumu verileri sağlayan "ERA-5" reanalizini kullanan ilk çalışmalar arasında yer aldı. "Renewables.ninja" rüzgar hızlarını istenen hub yüksekliğine ekstrapole eder ve türbin modelleri için üreticilerin güç eğrilerini kullanarak bunları çıktıya dönüştürür. Sonuçlar IEA web sitesinde bulunabilir.

Veri

Yüksek çözünürlüklü uydu verilerinin ve bilgi işlem kazanımlarının mevcudiyeti, son yıllarda rüzgar kaynağı değerlendirmelerinin ayrıntı düzeyini ve doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Gelişmekte olan rüzgar türbini tasarımları da

Potansiyel değerlendirmelerin güncellenmesi, çünkü bunlar iyi kurulmuş alanlardaki performansı artırır ve daha düşük kaliteli kaynakları enerji üretimi için daha uygun hale getirir.

İstisnalar

Ticari olarak mevcut açık deniz rüzgar türbinleri şu anda 6 m/s'den daha yüksek rüzgar hızları için tasarlanmıştır. Bazı şirketler daha düşük rüzgar hızları için türbin tasarımları da araştırmaktadır.

Uluslararası Doğa Koruma Birliği'nin (IUCN) deniz koruma alanları sınıflandırmasını takiben, Ia, Ib, II ve III olarak kategorize edilenler çalışma dışında bırakılmıştır (IUCN, 2008). Bununla birlikte, her proje düzeyinde diğer çevresel hususlar da dikkate alınmalı ve kamu yetkilileri tarafından zorunlu kılındığı üzere tam bir çevresel etki değerlendirmesi yapılmalıdır. Mevcut denizaltı kabloları (1 km içinde), ana nakliye şeritleri (20 km), deprem fay hatları (20 km) ve mevcut açık deniz petrol ve gaz tesisleri ve balıkçılık gibi rakip kullanımlar için tampon bölgeler de hariç tutulmuştur.

Türbin tasarımları

Küresel teknik potansiyeli değerlendirmek için, düşük-orta, orta ve yüksek rüzgar hızlarına karşılık gelen metrekare başına 250, 300 ve 350 watt (W/m^2) spesifik güce sahip sınıfının en iyisi türbinler seçilmiştir. Bu türbinlerin güç eğrileri, kapasite ve üretim açısından açık deniz rüzgarının teknik potansiyelini elde etmek için analiz için seçilen her 5 km'ye 5 km'lik hücrenin küresel kapasite faktörleriyle birlikte kullanılmıştır. Henüz veri bulunmayan 20 MW'a kadar nominal kapasiteye sahip yeni nesil türbinler için yeni güç eğrileri sentezlenmiştir (Saint-Drenan, 2020).

Buna ek olarak analiz, açık deniz rüzgar çiftliği tasarımları, kıydan uzaklık ve su derinliği, açık deniz rüzgar maliyeti gelişmeleri ve teknik potansiyel gibi diğer hususları da dikkate almaktadır.

4.7 Elektrik üretiminde hidrojen ve amonyak

Düşük emisyonlu hidrojen ve amonyak, birlikte yakma veya tesislerin tamamen dönüştürülmesi yoluyla doğal gaz kömür yakıtlı elektrik üretimine düşük emisyonlu bir alternatif sağlayabilen yakıtlardır. GEC Modelinde, gaz yakıtlı tesislerde hidrojen ve kömür yakıtlı tesislerde amonyak harmanlama seviyeleri, politika ve emisyon hedefleri doğrultusunda belirlenir. Senaryoların bir parçası olarak, hidrojen ve/veya amonyak harmanlama payları zaman içinde artmakta, bu da hem mevcut tesislerin daha yüksek oranda hidrojen ve/veya amonyakla birlikte ateşleme yapacak şekilde güçlendirilmesi kabiliyetindeki gelişmeleri hem de daha yüksek oranda hidrojen veya amonyak harmanlamak üzere tasarlanmış yeni tasarımların veya tamamen hidrojen veya amonyakla çalışmak üzere tasarlanmış tesislerin benimsenmesini temsil etmektedir.

GEC Modelinde artan hidrojen ve amonyak harmanlama seviyeleri, mevcut doğal gaz ve kömür yakıtlı enerji santrallerinin daha kapsamlı bir şekilde yenilenmesi ihtiyacı nedeniyle ek sermaye harcamalarına neden olmaktadır.

Hidrojen ve amonyak için elektrik sektörü talebi, hidrojen üretimi için genel talebi bilgilendirmek üzere hidrojen tedarik modülü tarafından kullanılır.

4.8 Akü depolama

GEC Modelindeki batarya depolama, özellikle gelişen elektrik talebi modelleri ve değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının artan payları nedeniyle esneklik ihtiyaçları arttığında, önemli bir güç sistemi esnekliği kaynağı sağlar. Model hem şebeke ölçeğinde hem de sayaç arkasında batarya depolamayı içermektedir. Şebeke ölçeğindeki batarya depolama sistemleri doğrudan şebekeye bağlıdır. Sayaç arkası batarya depolama, konut, ticari ve endüstriyel son kullanıcı konumlarına kurulan dağıtım seviyesindeki uygulamaları ifade eder. Binalara ve çatı üstü güneş enerjisi sistemlerine, elektrik sayacının arkasına ve binaların elektrik şebekesine kendi bağlantılarına bağlanırlar.

Saatlik modelde, şebeke ölçeğindeki bataryalar için şarj ve deşarj modelleri fiyat arbitrajı fırsatlarına göre optimize edilir (yani fiyatlar düşükken şarj etme ve fiyatlar yüksekken deşarj etme). Kamu hizmeti ölçeğindeki batarya depolama hacimlerinin süresi bir ila sekiz saat arasında değişmektedir (dolu bir maksimum çıkışta tamamen boşalması için gereken saat sayısına atıfta bulunmaktadır). Bataryalar yalnızca 24 saatlik bir süre içinde deşarj için alınan fiyat ile şarj için ödenen fiyat arasındaki fark, ön sermaye maliyetleri, bataryanın kullanım ömrü boyunca beklenen döngü sayısı ve gidiş-dönüş verimliliği gibi faktörlere göre belirlenen belirli bir eşikten büyük olduğunda çalışır. Diğer elektrik sektörü teknolojileri gibi, şebeke ölçeğindeki batarya yatırım kararları da VALCOE'ye dayanmaktadır ve bataryaların sürelerine bağlı olarak farklı seviyelerde kapasite kredisine sahip oldukları varsayılmaktadır - bu da sistem yeterliliğine ve esnekliğine katkıda bulunmaktadır. Şebeke ölçeğinde batarya depolama tek başına olabileceği gibi rüzgar ve güneş enerjisi gibi enerji santralleriyle doğrudan eşleştirilebilir.

Sayaç arkası yatırımlar büyük ölçüde elektrik tüketicilerine sağladıkları tasarruf potansiyelinden kaynaklanmaktadır. Tüketiciler en büyük faydayı, sayaç arkası bataryayı çatıdaki güneş enerjisi ile birleştirdiklerinde ve dinamik kullanım zamanı fiyatlandırması olan bölgelerde elde etme eğilimindedir. Şebeke beslemesi yasaklanmaz veya kısıtlanmazsa ve fazla güneş PV üretiminin geri satışı tam perakende fiyatlarla ücretlendirilirse, tüketiciler güneş PV ve sayaç arkası pillere yatırım yapmaya ve bunlardan en iyi şekilde yararlanmaya daha fazla teşvik edilecektir. Güçlü teşvikler şebekedeki toplam pik talebi de azaltabilir. Şebekeye bağımlılığı azaltırken, sayaç arkası bataryalar tüketicilere şebeke bağlantısını küçültme potansiyeli de sunabilir ve böylece başka bir aylık ücreti en aza indirebilir.

Modelde, sayaç arkası bataryaların yaygınlaştırılması, ülke veya bölge düzeyindeki ortalama bağlanma oranlarına (çatıdaki güneş enerjisinin sayaç arkası batarya depolama kapasitesine oranı) dayalı olarak çatıdaki güneş enerjisinin yaygınlaştırılma oranıyla ilişkilendirilmektedir. Bu bağlanma oranları, ülkeye ve bölgeye özgü düzenleyici ortamlar ve tarife yapıları, perakende elektrik fiyatlarının gelişimi, sayaç arkası depolama için sübvansiyonlar ve sayaç arkası batarya depolama sistemlerinin beklenen maliyeti dikkate alınarak tahmin edilmekte ve ileriye dönük olarak yansıtılmaktadır.

Batarya depolama sermaye maliyetlerinin zaman içinde düşeceği öngörülmektedir. Teknoloji maliyetlerindeki azalmanın derecesi, mevcut literatürden elde edilen öğrenme oranlarına göre hesaplanmakta, batarya paketine ve invertörler gibi yardımcı bileşenlere ve diğer genel maliyetlere uygulanmaktadır.⁸ Batarya paketleri için öngörülen maliyetler, sadece bataryaların enerji sektörüne yerleştirilmesinden değil, aynı zamanda elektrikli araçlarda kullanılan en büyük hacimlerle birlikte tüm sektörlerdeki batarya talebinden . Batarya depolama sistemlerinin diğer bileşenleri için maliyet düşüşü, batarya enerji depolama sistemlerinin kümülatif kapasite ilavelerine dayalı olarak tahmin edilmektedir.

⁸ Schmidt ve diğerleri (2017) ve Tsiropoulos ve diğerlerine (2018) dayanmaktadır.

Diğer enerji dönüşümü

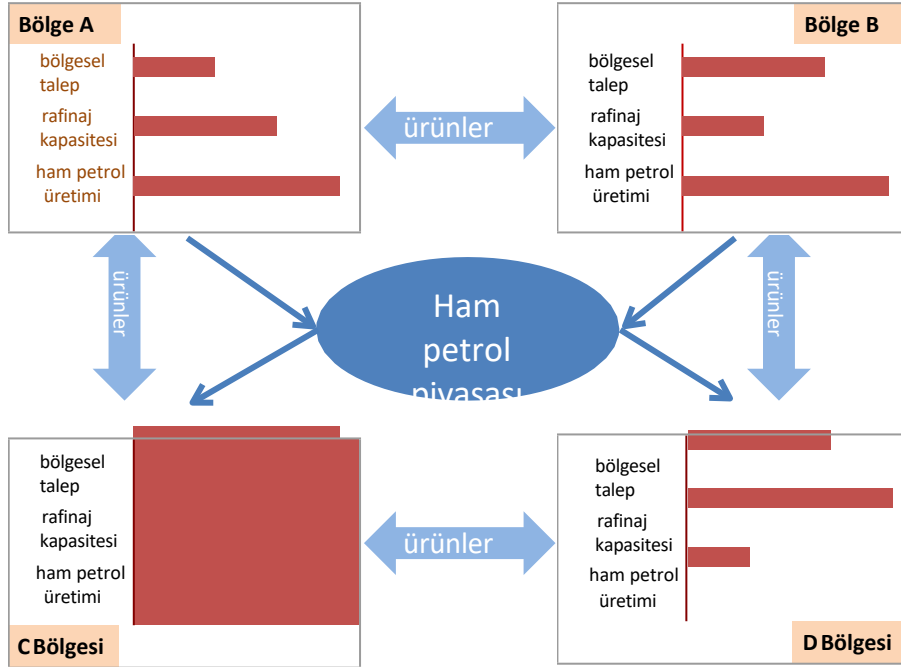
5.1 Petrol rafinasyonu ve ticareti

Rafineri ve ticaret modülü petrol arz ve talebini birbirine bağlar. Bu bir simülasyon modelidir ve 134 ayrı ülke için kapasite gelişimi ve kullanımı modellenmiş, geri kalan ülkeler ise 11 bölgede gruplandırılmıştır. Bu modül, her ikisini de daha iyi bağlamak için arz ve talep alanlarına uzanan çeşitli yardımcıları sahiptir:

- Hafif petrol ürünlerinin yanı sıra kondensat arzını belirlemek için doğal gaz sıvıları modülü.
- Sentetik ham petrol çıktısını ve bitüm için seyreltici gereksinimlerini modellemek için ekstra ağır petrol ve bitüm modülü.
- Karayolu taşımacılığı ve havacılık hariç tüm sektörler için petrol talebinin farklı ürün kategorilerine ayrılması. Sonucunu GEC Model'in ulaştırma talep modeli tarafından sağlanmaktadır.

Rafinaj sektörü faaliyetlerine ilişkin tahminler temel olarak rafinaj kapasitesi ve kullanım oranlarına dayanmaktadır. Rafinaj kapasitesi ham damıtma üniteleri ve kondensat ayrıştırıcılarından oluşmaktadır. Rafinaj kapasitesi IEA'nın 2022 verilerine dayanmaktadır. Halihazırda duyurulmuş olan kapasite artırımı projeleri, yalnızca devam etmesi muhtemel projeleri belirlemek için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bunlardan bazıları, daha gerçekçi bir zaman çizelgesine izin vermek için ilan edilen başlangıç tarihlerinden ertelenmiştir. Model ayrıca duyurulmuş olan rafineri kapanışlarını da dikkate almaktadır. 2028'in ötesinde, aşağıda belirtilen bölgelerin her biri için ham petrol mevcudiyeti ve ürün talebi beklentilerine dayalı olarak yeni kapasite genişlemesi öngörülmektedir. Risk altındaki kapasite, rafineri kapasitesi ile rafineri çalışmaları arasındaki fark olarak tanımlanır ve bu farka %14'lük bir duruş süresi payı dahildir. Kamuoyuna açıklananların ötesinde öngörülen duruşlar da risk altındaki kapasite olarak sayılmaktadır.

Şekil 5.1 ► Rafinaj ve uluslararası ticaret modülünün şeması



IEA. CC BY 4.0.

Kullanım oranları iç talep, ürün verimi ve rafineri konfigürasyonu (örneğin karmaşıklık) tarafından belirlenir. Petrol ithal eden bölgeler arasında, uluslararası ham petrol arzı için öncelikli çağrı, talebin arttığı bölgelere verilir: sağlam iç talep, model tarafından açıkça hesaplanmayan veya kullanılmayan rafineri marjları için etkili bir vekildir.

Petrol arz ve talep projeksiyonları GEC Modelinin fosil yakıt arzı ve nihai enerji tüketimi modülleri tarafından sağlanmaktadır. Rafineriler petrol ürünü talebinin %100'ünü karşılamamaktadır. Bu analizin amaçları doğrultusunda, biyoyakıtlar, LPG, doğal gaz sıvılarından (NGL'ler) etan ve hafif nafta, kömürden sıvıya (CTL) ve gazdan sıvıya (GTL) sentetik sıvılar ve katkı maddeleri çıkarıldıktan sonra rafinerilere yapılan net çağrışı gösteriyoruz.

Rafinaj modelinin arz tarafındaki isimlendirmesi petrol arz modelinden biraz farklıdır. Modelde kullanılan "ham petrol" terimi, işleme amaçları için geleneksel tipte kaliteye sahip tüm ham petroleri tanımlamaktadır. Buna arz modelindeki konvansiyonel ham petrol, seyreltilmemiş veya yükseltilmemiş bazı ekstra ağır petroler, sıkı petrol ve bitüm yükseltme işlemlerinden elde edilen sentetik ham petrol dahildir. Seyreltilmiş bitüm ve kondensat, alım ve ticaret modelleme amaçları için ayrı akışlar olarak temsil edilir.

Verim, üretim ve ticaret şu ürün kategorileri için tanımlanmıştır: etan, LPG, nafta, benzin, kerosen, dizel, ağır fuel oil ve diğer ürünler (petrol koku, rafineri gazı, asfalt, solventler, balmumu vb. dahil). Ham petrol ticaret pozisyonu ve rafine ürün ticaret dengeleri, GEC Modelinin 27 ayrı ülke veya bölgeden oluşan talep modeli ayrıntı düzeyini takip etmektedir (Şekil 5.1).

5.2 Kömürden sıvıya, Gazdan sıvıya, Kömürden gaza

Kömürden sıvıya (CTL), Gazdan sıvıya GTL ve Kömürden gaza (CTG) teknolojileri kömür ve doğal gazı kimyasal olarak diğer sıvı ve gaz hidrokarbonlara dönüştürür. Örneğin Fischer-Tropsch süreci, kömür ve doğal gazı bir dizi kimyasal reaksiyon yoluyla sentetik yakıtlara dönüştürür. Bu amaçla, bu sürecin önemli bir ilk adımı kömür ve doğal gazı sentetik (sentez gazı olarak da adlandırılır) dönüştürmektir. Sentetik gaz, kömürün gazlaştırılması ve metanın kuru reformasyonu ile elde edilen bir karbon monoksit ve hidrojen karışımıdır. Sentetik gaz aynı zamanda Sabatier reaksiyonu yoluyla metan üretmek için de kullanılabilir ve bu nedenle kömürü gaza dönüştürmenin bir yoludur.

Büyük kömür veya doğal gaz kaynaklarına sahip ülkeler (örneğin Çin) enerji güvenliklerini ve egemenliklerini güçlendirmek için genellikle CTL, GTL ve/veya CTG'ye başvurmaktadır. Ancak bu teknolojiler sermaye yoğun olduğundan, nihai ürünlerin rekabetçi olabilmesi için düşük maliyetli kömür veya doğal gaz şarttır. Bu nedenle, mevcut ve planlanan az sayıda proje bir avuç ülkede yoğunlaşmaktadır. GEC Modelinde, projeksiyonlar projelerin durumu ile tutarlıdır (örn. yapım aşamasında veya planlanmış) ve her yıl proje bazında güncellenir. Enerji ile ilgili CO₂ emisyonları hesaba katılır ve teknolojiler karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) ile donatılabilir.

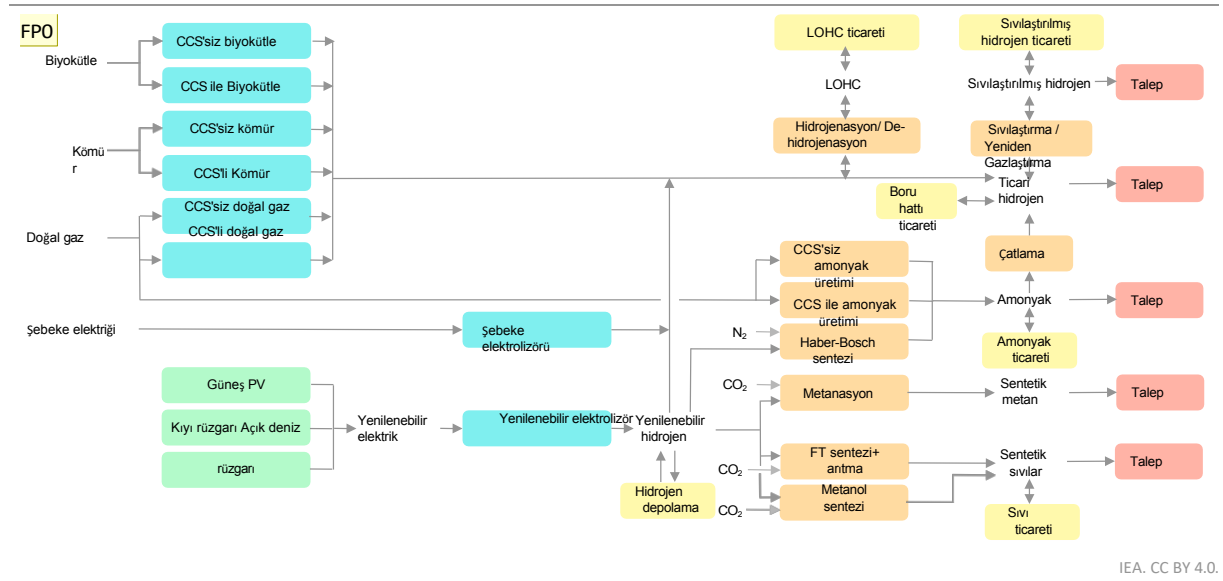
5.3 Hidrojen üretimi ve tedariki

Günümüz enerji sisteminde hidrojen, özellikle saflaştırılmış hidrojen gazı olarak kullanıldığı tüm durumlarda, ağırlıklı olarak bir yakıttan ziyade bir hammadde olarak kullanılmaktadır. Bu mevcut uygulamalar çoğunlukla refinaj ve kimya sektörlerindedir ve GEC Modelinin sanayi ve refinaj modüllerinin bir parçasıdır. Bu mevcut uygulamalar için hidrojenin çoğu günümüzde doğal gazın buhar metan reformasyonu veya CCUS olmadan kömür gazlaştırma yoluyla yerinde üretilirken, senaryolarda bu hidrojenin artan bir payı, elektroliz ve CCUS ile donatılmış fosil yakıtların dönüştürülmesi dahil olmak üzere çok düşük CO₂ yoğunluklarına sahip teknolojiler kullanılarak zaman içinde üretilmektedir. Bu yerinde hidrojen üretimi, GEC Modelinin sanayi ve arıtma modüllerinde modellenmiştir.

GEC Modelinin hidrojen üretim ve tedarik modülü, ticari hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtların üretimini kapsamaktadır. Günümüzde bu ticari hidrojen üretimi, kimyasallar ve refinaj sektörlerinde yerinde hidrojen üretimini tamamlamaktadır. Senaryolarda, düşük CO₂ teknolojilerden üretilen ticari hidrojenin kullanımı, bugün çok düşük seviyelerden ulaşım, enerji üretimi, binalar ve endüstriyel ısı dahil olmak üzere yeni uygulamalara doğru genişlemekte ve bu sektörlerdeki CO₂ emisyonu azaltımlarına, hız kesmeyen fosil yakıt kullanımının yerini alarak katkıda bulunmaktadır. Bu düşük emisyonlu tedarik, elektrik üretimi ve ısı ve soğutma tedarikinin yanı sıra gelecekteki enerji dönüşüm sektörünün önemli bir parçası haline gelecektir.

Ticari hidrojen tedarik modülü, ETSAP TCP tarafından geliştirilen ve daha da iyileştirilen, teknoloji açısından zengin bir modelleme platformu olan TIMES adlı bir maliyet optimizasyon modelleme çerçevesi kullanılmaktadır. Hidrojen modülü, hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtlar (amonyak, sentetik metan ve dizel, kerosen ve metanol gibi sentetik sıvı hidrokarbon yakıtlar) üretmek için çeşitli teknoloji seçeneklerini mevcut kapasiteler, dönüşüm verimlilikleri, yakıt maliyetleri, işletme ve bakım maliyetleri, CO₂ emisyonlarının yanı sıra fosil yakıt bazlı teknolojiler için CO₂ yakalama oranları ve yeni kapasite eklemeleri için sermaye maliyetleri açısından göstermektedir. Elektrolizör sermaye maliyetleri, farklı elektrolizör teknolojilerinin olası dağıtım paylarının ağırlıklı ortalamasını temsil etmekte olup, gelecekteki maliyet düşüşleri bileşen bazında öğrenme eğrileri elde edilmektedir. Tüm teknolojiler için sermaye maliyetleri, toplam kurulum maliyetlerinin yüksek bir payını temsil edebilen tüm tesis dengesi ve mühendislik, tedarik ve inşaat (EPC) maliyetlerini de içerir.

Şekil 5.2► Ticari hidrojen tedarik modülünün şeması



IEA. CC BY 4.0.

Notlar: w/o CCS= karbon yakalama ve depolama olmadan; w/ CCS= karbon yakalama ve depolama ile.

Hidrojen tedarik modülü, son kullanım sektörlerinden, elektrik ve ısı üretim sektöründen, rafinerilerden ve biyoyakıt üretiminden gelen ticari hidrojen ve hidrojen bazlı yakıt taleplerine dayanarak, bu talepleri karşılamak için en düşük maliyetli bir teknoloji karışımı belirler. Bu taleplerin ve teknolojilerin teknik ve ekonomik özelliklerinin yanı sıra modül, ilan edilen hidrojen üretim veya ticaret projelerini (örneğin IEA'nın Hidrojen Projesi Veritabanı kullanılarak) ve CO₂ fiyatları veya hidrojen dağıtım hedefleri gibi politika kısıtlamalarını da dikkate alır.

Model analizinin odak noktası düşük emisyonlu hidrojen üretimidir, yani atmosferik CO₂ konsantrasyonlarında artışa katkıda bulunmayacak şekilde üretilen hidrojen. Fosil yakıt bazlı hidrojen üretimiyle ilişkili emisyonların atmosfere ulaşması kalıcı olarak engellenir ve doğal gaz tedarik zinciri çok düşük seviyelerde metan emisyonu ile sonuçlanmalıdır veya sudan üretilen hidrojene elektrik girdisi yenilenebilir veya nükleer kaynaklardan sağlanmalıdır. Düşük emisyonlu hidrojen üretmek için, bazıları olgun teknolojiler olan ve bazıları da gelişimin erken aşamalarında olan çeşitli tamamlayıcı yollar bulunmaktadır. GEC Modelindeki iki baskın yol ticari ölçekte halihazırda gösterilmiştir:

- CCUS ile fosil yakıtlar. CCUS ile fosil yakıtlardan düşük emisyonlu hidrojen üretmeye yönelik tipik teknoloji, SMR prosesi tarafından üretilen CO₂'nin büyük çoğunluğunu yakalayan bir CO₂ yakalama ünitesi ile donatılmış doğal gazın buhar metan reformasyonudur (SMR). Hidrojen verimi, karbon monoksit ve sudan CO₂ ve ek hidrojen üretmek için su gazı kaydırma (WGS) reaksiyonu ile geliştirilebilir.

Ototermal reform ve kısmi oksidasyon dahil olmak üzere SMR sürecine yapılan uyarlamalar %95'in üzerinde yakalama oranlarına ulaşılmasını sağlayabilir. GEC Modelindeki diğer teknolojilerde olduğu gibi, maliyet ve performans iyileştirmelerinin daha yüksek dağıtım seviyelerinden kaynaklanacağı varsayılmaktadır. GEC Modeli, yakalanan CO₂'nin güvenli bir şekilde taşınmasını ve kalıcı jeolojik depolanmasını hesaba katmaktadır.

- Çok düşük CO₂ yoğunluğu ile elektrik kullanarak suyun elektrolizi. Elektrolizörler suyu hidrojen ve oksijene ayırmak için kullanılan köklü bir teknolojidir. Günümüzde mevcut süreçleri iyileştirebilecek çeşitli teknolojiler geliştirilmektedir ve bunlar arasında alkali elektrolizörlerin varyasyonları, polimer elektrolit membran (PEM) elektrolizörler ve katı oksit elektrolizör hücreleri (SOEC) bulunmaktadır. GEC Modelindeki elektrolizör sermaye maliyetleri, bileşen bazında öğrenme eğrisi yaklaşımları kullanılarak yakalanan ve artan dağıtım ile birlikte gelişen bu teknolojilerin olası dağıtım paylarının ağırlıklı bir ortalamasını temsil etmeyi amaçlamaktadır ve ayrıca toplam kurulum maliyetlerinin yüksek bir payını temsil edebilecek tüm tesis dengesi ve EPC maliyetlerini de içermektedir. Modül, hidrojen üretimi için şebeke elektriğinin kullanılmasına izin verir, ancak bu, her bölgedeki şebeke elektriği karışımına bağlı olarak, mutlaka düşük emisyonlu bir elektrik kaynağı olmayabilir. Güneş PV, kara ve deniz rüzgarından elde edilen özel yenilenebilir elektrik üretimi, hidrojen üretimi için düşük emisyonlu bir elektrik kaynağı olarak modellenmiştir. İlgili yenilenebilir elektrik üretim teknolojileri, maliyet verileri, kapasite faktörleri ve kaynak potansiyelleri ile karakterize edilmektedir. Son ikisi, model bölgeler için kapasite faktörü aralıklarına göre yenilenebilir potansiyeli karakterize eden jeo-uzamsal analizler kullanılarak türetilmiştir.

Hidrojen üretimi için güneş PV ve rüzgarın değişkenliğini yansıtmak amacıyla hidrojen modülü bir yılı dört tipik güne böler ve bunlar da yine üç saatlik sekiz zaman dilimine ayrılır. Bu çözünürlük değişkenliği tam olarak yansıtmak için hala çok kaba olduğundan, daha ayrıntılı zaman çözünürlüğüne (24 tipik zaman dilimi ile 30 tipik dönem) Forschungszentrum Jülich'teki Jülich Sistem Analizi'nin ETHOS model paketi kullanılmıştır. ETHOS model paketi, her bir konum ve saatlik güneş PV, kara ve açık deniz rüzgar kapasite faktörleri için, güneş PV, rüzgar ve elektrolizörler için maliyet-optimal kapasitelerin yanı sıra hidrojen depolama, batarya depolama veya kesinti gibi esneklik seçeneklerine olan ihtiyacı belirler. Tek bir yıl için yapılan bu saatlik analiz, Haber-Bosch veya Fischer-Tropsch sentez süreçleri için minimum yük kısıtlamaları gibi sonraki sentez süreçlerinin operasyonel kısıtlamalarını dikkate alabilir. Modelin bir bölgedeki raster noktalarından oluşan bir şebeke için uygulanması ve güneş PV ve rüzgardan elektrik üretimi için mevcut olmayan dışlama bölgelerinin dikkate alınması, hidrojen üretimi için bölgesel tedarik maliyet eğrilerinin elde edilmesini sağlar. Bu eğriler, GEC Modelinde güneş PV ve rüzgardan hidrojen üretimi için bölgesel potansiyelleri bildirmek için kullanılır.

Sentetik , dizel, metanol, amonyak ve sentetik metan gibi sentetik sıvı yakıtlar da dahil olmak üzere düşük emisyonlu hidrojen bazlı yakıtların üretimi, GEC Modeli senaryolarında enerji dönüşümünün önemli bir ek bileşeni haline gelmektedir. Gaz halindeki hidrojene kıyasla hidrojen bazlı sıvı yakıtların taşınmasının görece kolay olması, talebin uygun maliyetli olduğu durumlarda ithalat yoluyla karşılanabileceği ve bazı durumlarda gaz halindeki hidrojene olan talebin gaz halindeki hidrojen yerine hidrojen bazlı yakıtların ithal edilmesiyle karşılanabileceği anlamına gelmektedir. Amonyak söz konusu olduğunda, bazı durumlarda gaz halindeki hidrojeni yeniden üretmek için teslimat noktasında "kırılabilir". GEC Modeli, hidrojen modülünün maliyet optimizasyonu yaklaşımında dikkate alınan dönüştürme süreçleri ve taşıma seçenekleri için enerji ihtiyaçları ve maliyetleri ile boru hatları yoluyla gaz hidrojen ve gemiler yoluyla sıvı hidrojen, amonyak, sıvı organik hidrojen taşıyıcıları (LOHC) ve sentetik sıvı hidrokarbon yakıtlarının ticaretini modellemek için bu dinamikleri ve seçenekleri dikkate almaktadır.

Karbon içeren hidrojen bazlı yakıtlar için, karbon girdisi, yan ürünler de dahil olmak üzere tedarik zinciri boyunca, denkleştirme olmaksızın çok düşük CO₂ yoğunluğuyla uyumlu kaynaklardan gelmelidir. GEC Modelinde, doğrudan hava yakalama (DAC) ve biyoenerji dönüşüm tesislerinde yakalanan biyojenik karbon, karbon kaynakları olarak kabul edilmektedir.

Hidrojen tedarik modülü, GEC Modelinin diğer birkaç modülüyle arayüz oluşturur. Bunlardan en dikkat çeken, hem hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtların tüketicisi olan hem de hidrojen üretim ihtiyaçlarını en düşük maliyetle karşılamak için (doğal gazın yanı sıra) elektrik sağlayan elektrik üretim modülüdür. Hidrojen modülünün özel yenilenebilir elektrik üretimine ilişkin sonuçlar elektrik üretim modülüne entegre edilir ve bu arayüzdeki geri bildirimler yinelemeli olarak gerçekleştirilir. Her bir sektörde hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtlara olan talep, her bir sektörel modülde belirlenir ve ilgili durumlarda genel talebe dayalı olarak hidrojen tedarik maliyetlerini güncellemek için yinelemeler yapılır. Hidrojen altyapısı ihtiyaçlarını ve ilgili yatırım gereksinimlerini anlamak için, hidrojen modülünden uluslararası hidrojen ticareti için altyapı ihtiyaçlarını, özellikle boru hatları (yeni veya yeniden düzenlenmiş doğal gaz boru hatları) ve depolama için bölgelerdeki yerel altyapı ihtiyaçlarını analiz ederek tamamlayan bir altyapı aracı geliştirilmiştir.

5.4 Biyoyakıt üretimi

Biyoenjeri, katı (biyokütle), sıvı (biyoyakıtlar) ve gaz (biyogaz ve biyometan) olmak üzere tüm formlarıyla önemli bir yenilenebilir enerji seçeneğidir. Biyoenjeri tedarik modülü birincil biyoenjeri kullanılabilirliğini belirler (bkz. Bölüm 6.4). Sıvı ve gaz kullanımları için biyoenjeri, sıvı biyoyakıtlar ile biyogaz ve biyometan tedarik modüllerinde nihai kullanımdan önce dönüştürülür.

Sıvı biyoyakıt tedarik modülü, WEM ve ETP modelleri için önceki modelleme çalışmalarına dayanmaktadır ve hem biyoenjeri tedarik modülü hem de biyogaz ve biyometan tedarik modülü ile uyumlu olan çeşitli biyokütle hammaddelerinden ulaşım, sanayi, binalar ve tarım gibi son kullanım sektörlerindeki talebi karşılamak için gereken sıvı biyoyakıt dönüşüm teknolojilerinin dağıtımını değerlendirmek için tasarlanmıştır. Modül, dönüşüm kayıplarını, enerji girdi gereksinimlerini ve yatırım harcamalarını hesaplar ve CCUS ile ilişkili sıvı biyoyakıt üretim miktarını değerlendirir.

Biyogaz ve biyometan tedarik modülü, tüm GEC Model bölgeleri için biyogaz ve biyometanın sürdürülebilir teknik potansiyelini maliyetlerini değerlendirmek üzere tasarlanmıştır. Bu analiz, mevcut teknolojilerle işlenebilen, tarım arazileri için gıda ile rekabet etmeyen ve diğer olumsuz sürdürülebilirlik etkileri (örneğin biyoçeşitliliğin azaltılması) olmayan hammaddeleri içermektedir. Enerji bitkileri gibi biyogaz üretmek için özel olarak yetiştirilen hammaddeler de hariç tutulmuştur. Modül, biyogaz ve biyometanın uluslararası ticaretini kapsamamaktadır.

5.4.1 Sıvı biyoyakıt tedarik modülü

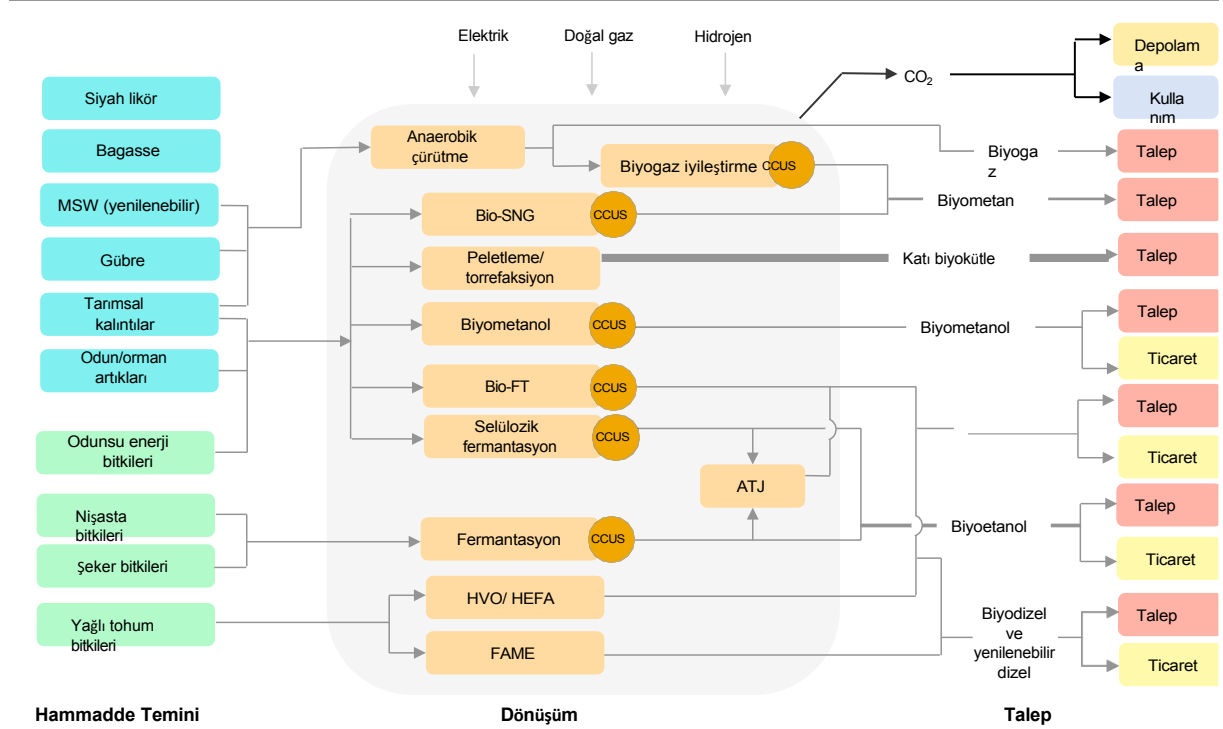
Günümüzde sıvı biyoyakıtlar çoğunlukla gıda bazlı enerji mahsullerini geleneksel biyoyakıtlara dönüştüren ticari olarak mevcut teknolojiler kullanılarak üretilmektedir. Bu teknolojiler arasında nişasta ve şekerden etanol üretimi, yağ asidi metil esteri (FAME) biyodizel ve hidro-işlenmiş bitkisel yağ (HVO) yenilenebilir dizel yer almaktadır. Modellenen senaryolarda, sıvı biyoyakıtların artan bir payı gelişmiş dönüşüm teknolojilerinden (biyokütle gazlaştırma ve Fischer-Tropsch sentezi veya selülozik etanol üretimi gibi) ve atık ve kalıntı yağlar, ormancılık kalıntıları, mahsul kalıntıları ve tarıma elverişli olmayan, marjinal arazilerde yetiştirilen gıda dışı enerji bitkileri gibi gelişmiş hammaddelerden üretilmektedir. Gelişmiş hammaddeler gıda ve yem ile rekabet etmez ve toprak sağlığı, su kaynakları ve biyoçeşitlilik üzerindeki olumsuz çevresel etkileri en aza indirir.

Sıvı biyoyakıt tedarik modülü, ETSAP TCP tarafından geliştirilen ve daha da iyileştirilen, teknoloji açısından zengin bir modelleme platformu olan TIMES adlı bir maliyet optimizasyon modelleme çerçevesi kullanmaktadır. Sıvı biyoyakıt modülü, mevcut kapasiteler, dönüşüm verimlilikleri, yakıt ve hammadde maliyetleri, işletme ve bakım maliyetleri, CO₂ emisyonlarının yanı sıra CO₂ yakalama oranları ve yeni kapasite ilaveleri için sermaye maliyetleri açısından karbon yakalamalı ve yakalamasız sıvı biyoyakıt (etanol, biyodizel ve yenilenebilir dizel, biyojet kerosen ve biyometanol) üretmek için çeşitli teknoloji seçeneklerini göstermektedir. Sıvı biyoyakıt sermaye maliyetleri, endüstri ve akademiden elde edilen en son verileri temsil etmekte ve gelecekteki maliyet düşüşleri öğrenme eğrileri kullanılarak değerlendirilmektedir. Ormancılık kalıntıları, mahsul kalıntıları ve gıda dışı enerji bitkileri gibi çeşitli biyokütle hammaddeleri modele dahil edilmiştir. Bu biyokütle hammaddeleri biyoenjeri tedarik modülü ve biyogaz ve biyometan tedarik modülü ile uyumludur. Biyokütle

Sıvı biyoyakıtlar modülü ayrıca her bir GEC Model bölgesi arasında etanol, biyodizel ve yenilenebilir dizel, biyojet kerosen ve biyometanol için sıvı biyoyakıt ticaretini modeller (bkz. Bölüm 6.4).

Son kullanım sektörlerinden gelen sıvı biyoyakıt talebine dayalı olarak, sıvı biyoyakıt tedarik modülü bu talepleri karşılamak için en düşük maliyetli bir teknoloji karışımı belirler. Bu taleplerin ve teknolojilerin teknik ve ekonomik özelliklerinin yanı sıra modül, IEA'nın *Yenilenebilir Enerji Piyasası* raporları tarafından değerlendirilen ilan edilmiş biyoyakıt üretim ve ticaret projelerinin yanı sıra CO₂ fiyatları, biyoyakıt sübvansiyonları veya gelişmiş biyoyakıt üretimi hedefleri gibi politika kısıtlamalarını da dikkate alır.

Şekil 5.3 Sıvı biyoyakıt modelinin şeması



IEA. CC BY 4.0.

Notlar: ATJ = alkolden jete; CCUS = karbon yakalama, kullanma ve depolama; FAME = yağ asidi metil esteri; FT = Fischer- Tropsch; HEFA= hidroşlenmiş esterler ve yağ asitleri; HVO= hidroşlenmiş bitkisel yağ; MSW= belediye katı atığı; SNG = sentetik doğal gaz. Biyo-hidrojen üretimi ticari hidrojen modülüne dahildir (bkz. Bölüm 5.3).

Sıvı biyoyakıt modülü, her bir sıvı biyoyakıt ürünü için aşağıdaki dönüşüm yollarını içerir:

- **Etanol**, nişasta (örneğin mısır) veya şeker (örneğin şeker kamışı) bitkilerinin kullanıldığı geleneksel fermantasyon süreçlerinden veya selülozik hammaddelerin (örneğin mısır sapı) kullanıldığı gelişmiş bir fermantasyon sürecinden üretilir; burada hammadde, fermantasyondan önce hammaddeyi parçalamak ve şekerleri serbest bırakmak için bir işlemle geçirilmelidir.
- **Biyodizel ve yenilenebilir dizel**. Geleneksel biyodizel FAME dönüşüm sürecinden üretilirken, gelişmiş yenilenebilir dizel HVO sürecinin yanı sıra biyokütle gazlaştırma ve ardından Fischer-Tropsch sentezinin termokimyasal sürecinden üretilmektedir.
- **Biyojet** gazyağı, HVO prosesinden (hidroproses edilmiş esterler ve yağ asitleri veya HEFA olarak da bilinir), termokimyasal olarak biyokütle gazlaştırma ve Fischer-Tropsch sentezinden veya alkolden jete (ATJ) yolu kullanılarak geleneksel ve gelişmiş etanolden üretilir.
- **Biyometanol**, biyokütlenin gazlaştırılması ve metanol sentezi yolundan termokimyasal olarak üretilir.

Ayrıca, kullanım veya depolama için karbon yakalama ile çeşitli sıvı biyoyakıt üretim yolları kullanılabilir. Bunlar arasında geleneksel ve gelişmiş etanol yolları, biyokütle gazlaştırma ve Fischer-Tropsch sentezinden elde edilen yenilenebilir dizel ve biyojet gazyağı ve biyokütle gazlaştırma ve metanol sentezinden biyometanol yer almaktadır. Yakalanan CO₂ ya depolanarak karbon giderimi olarak adlandırılır ya da hidrojen modülünde sentetik hidrokarbon yakıtların üretimi için kullanılır.

5.4.2 Biyogaz ve biyometan tedarik modülü

Biyogaz ve biyometan arz potansiyeli, altı kategoride gruplandırılan çok çeşitli hammaddeler dikkate alınarak değerlendirilmiştir: mahsul kalıntıları, hayvan gübresi, kentsel katı atıklar, orman ürünü kalıntıları, atık su ve endüstriyel atıklar.

Hammadde tedarik potansiyelleri, büyük ölçüde Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) veri tabanından ve buğday, mısır, pirinç, diğer iri taneli tahıllar, şeker pancarı, şeker kamışı, soya fasulyesi ve diğer yağlı tohumlar, sığırlar için OECD-FAO çalışmasından (OECD/FAO, 2018) elde edilen geniş bir veri yelpazesine dayanmaktadır. Domuz, kümes hayvanları ve koyun, tomruk kesim kalıntıları, ağaç işleme kalıntıları ve tahıllardan etanol üretiminin bir yan ürünü olan damıtılmış kuru tahıllar ve gıda ve yeşil , kağıt ve karton ve odun gibi farklı organik kentsel katı atık kategorileri için bir Dünya Bankası çalışmasından (Dünya Bankası, 2018). Atık su sadece belediye atık suyunu içermektedir ve daha önce World Energy Outlook ekibi tarafından geliştirilen su modülünden elde edilen çıktı verilerine dayanmaktadır.

Biyogaz anaerobik çürütme ile üretilmektedir. Beş merkezi biyogaz üretim tesisi teknolojisi modellenmiştir: çöp gazı geri kazanım sistemi, belediye atık su arıtma tesisindeki çürütücü ve üç merkezi birlikte çürütme tesisi (küçük, orta ve büyük ölçekli). Buna ek olarak, gelişmekte olan ekonomilerin kırsal alanlarında kırsal ve merkezi biyogaz üretimini hesaba katmak için GEC Modelinin konut sektöründe iki tür ev ölçeğinde çürütücü modellenmiştir.

Biyometan için iki üretim yolu dikkate alınmaktadır: anaerobik ve termal gazlaştırma ile üretilen biyogazın iyileştirilmesi ve lignoselülozik biyokütlenin metanlaştırılması.

Her bir teknoloji için, üretim maliyetlerini değerlendirmek üzere verimlilik, kullanım ömrü, gecelik sermaye maliyeti veya işletme maliyetleri gibi teknik ve ekonomik parametreler toplanır.

Arz potansiyelinin değerlendirilmesi ve farklı biyogaz ve biyometan proseslerinin ekonomik değerlendirmesinin kombinasyonu, biyogaz ve biyometan arz maliyet eğrilerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Belirli bir yıl için bu, her bölge, hammadde ve teknoloji için biyometan potansiyelinin ve ilgili seviyelendirilmiş üretim maliyetinin bir araya getirilmesinden oluşur. Arz eğrileri tarafından sağlanan bilgiler daha sonra biyogaz ve biyometanın iki ana kullanımının maliyet rekabetçiliğini değerlendirmek için kullanılır: elektrik ve ısı üretimi ve gaz şebekesine enjeksiyon. Arz eğrileri, karbon fiyatlandırmasının biyogaz ve biyometan gelişimi üzerindeki gelecekteki rolünü anlamak için sera gazı emisyonları potansiyel tasarruflarını ve ilgili azaltma maliyetini hesaplamak kullanılır.

6.1 Yağ

Bu modülün amacı, her bir ülkedeki petrol üretim seviyesini aşağıdan yukarıya bir yaklaşımla¹ tahmin etmektir:

- Ülkelere göre üretimin tarihsel zaman serisi.
- Standart üretim profilleri ve saha ve ülke seviyelerindeki düşüş oranları tahminleri, ilk olarak *WEO-2008*'de yapılan ve o zamandan beri güncellenen detaylı saha bazında analizlerden elde edilmiştir.
- IEA Petrol Piyasası Raporu ekibi tarafından konvansiyonel ve konvansiyonel olmayan rezervler de dahil olmak üzere hem Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü (OPEC) hem de OPEC üyesi olmayan ülkelerde kısa vadede onaylanan, planlanan ve duyurulan upstream projelerinin kapsamlı bir araştırması yapılmıştır; bu, 2030'a kadar olan projeksiyon dönemi boyunca üretimi türetmek için kullanılmıştır (GEC Modeli ile *Orta Vadeli Petrol Piyasası Raporu* arasındaki metodoloji farklılıklarının bir özeti Kutu 6.1'de açıklanmıştır).
- Gelecekteki nakit akışlarının net bugünkü değeri kriterini kullanarak yeni rezervlerin geliştirilmesinde sektörün karar tarzını mümkün olduğunca taklit etmeyi amaçlayan bir metodoloji (Şekil 6.1).
- Potansiyel projelerin ekonomik analizinde kullanılan iskonto oranı, bulma ve geliştirme maliyetleri ve kaldırma maliyetleri de dahil olmak üzere sektörle tartışılan ve sektör tarafından onaylanan bir dizi ekonomik varsayım.
- Mali rejimlere ilişkin kapsamlı bir araştırma, her bir hükümetin projelerden elde edilen nakit akışlarından aldığı payın tahminine dönüşmektedir.
- Petrol ve doğal gaz sahalarına yatırımın çekiciliğini temsil etmek için çeşitli finansal risklerin (örneğin jeopolitik, hukukun üstünlüğü, düzenleyici gözetim) kapsamlı bir değerlendirmesi.
- Kalan teknik olarak geri kazanılabilir kaynakların değerleri (Tablo 6.1) Birleşik Devletler Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS), BGR ve diğer kaynaklardan alınan bilgilere dayanarak hesaplanmıştır.

Aşağıdaki paragraflarda USGS verilerinin GEC Modelinde nasıl kullanıldığı açıklanmaktadır. USGS, dünya çapındaki konvansiyonel petrol ve gaz kaynaklarının kapsamlı bir incelemesi olan Dünya Petrol Değerlendirmesini yayınlamaktadır. USGS bu çalışmada kaynakları üç bölüme ayırmaktadır:

- Bilinen rezervuarlarda hem kümülatif üretimi hem de rezervleri içeren bilinen petrol.
- Keşfedilmemiş petrol, petrol jeolojisi bilgisine dayalı olarak havza bazında daha ne kadar petrol bulunabileceğine dair bir tahmindir.
- Rezerv artışı, bilinen rezervlerin üzerine bilinen rezervuarlardan ne kadar petrol üretilebileceğine dair bir tahmin. Adından da anlaşılacağı üzere bu, bilinen rezervuarlardaki rezerv tahminlerinin (kümülatif üretim dahil) rezervuar ve teknoloji bilgisi geliştikçe zamanla büyüme eğiliminde olduğu gözlemine dayanmaktadır. 2000 yılı değerlendirmesi için, keşiften sonraki zamanın bir fonksiyonu olarak rezerv büyümesi ABD sahalarındaki gözlemlerden kalibre edilmiş ve bu kalibrasyon dünya çapında rezerv büyüme potansiyelinin bir tahminini elde etmek için bilinen dünya rezervlerine uygulanmıştır.

2000 yılındaki değerlendirmeden bu yana USGS düzenli olarak çeşitli havzalardaki keşfedilmemiş petrole ilişkin güncellemeler yayınlamıştır ve bunlar GEC Modelinde dikkate alınmıştır. 2012 yılında USGS, dünya çapında keşfedilmemiş petrolün güncellenmiş bir özetini ve dünyadaki büyük sahalarla odaklanan yeni bir saha bazlı yöntemle dayalı olarak rezerv artışına ilişkin revize edilmiş bir tahmin yayınlamıştır. Daha önce, USGS tarafından rezerv oluşturulurken kullanılan bilinen petrol tahminleri

¹ Bu bağlamda "aşağıdan yukarıya", "saha bazında analize dayalı" anlamına gelmektedir.

büyüme tahminleri kamuya açıklanmamıştır. Ancak 2015 tarihli bir rapor, küresel düzeyde bir araya getirilmiş olsa da varsayımlarını sunmaktadır (USGS, 2015). USGS'nin ABD dışındaki kümülatif üretim ve rezerv tahmini 2 060 milyar varil olup, IEA'nın eşdeğer tahmini olan 2 050 milyar ile yakın bir uyum içindedir. Konvansiyonel petrol için, USGS'nin 2012 yılında yayınladığı keşfedilmemiş petrol ve rezerv artışı tahminleri, GEC Modelinde kullanılan değerlerin temelini oluşturmaktadır. Kalan teknik olarak geri kazanılabilir kaynaklara ilişkin GEC Modeli tahminleri USGS keşfedilmemiş, USGS rezerv büyümesi ve IEA bilinen tahminlerini birleştirmektedir. Aynı USGS yayınlarına dayanan benzer analizler, toplam konvansiyonel sıvı hidrokarbon kaynaklarının ve konvansiyonel gaz kaynaklarının değerlendirilmesine olanak tanıyan IEA NGL'ler ve doğal gaz kaynakları veri tabanını beslemektedir.

Kutu 6.1 ► GEC Modeli ile IEA Orta Vadeli Petrol Piyasası Raporu arasındaki metodolojik farklılıklar

IEA her yıl *Orta Vadeli Petrol Piyasası Raporu'nda* (MTOMR) önümüzdeki 5 yıl için, GEC Modeli'nde ise önümüzdeki yirmi beş yıl için petrol arz ve talep projeksiyonları yayınlamaktadır. Bu iki projeksiyon seti, zaman içinde gelişen farklı metodolojiler kullanmaktadır, bu nedenle karşılaştırmalar her zaman kolay olmayabilir. Bu kutuda temel farklılıklar özetlenmektedir.

MTOMR ile GEC Modeli arasındaki en önemli fark petrol fiyatı varsayımıdır. MTOMR, petrol fiyatının yayınlandığı tarihte vadeli piyasa eğrisini takip ettiğini varsayar. Bu daha sonra talep projeksiyonları için kullanılır ve OPEC'in OPEC dışı arz ve talebin saha saha projeksiyonları arasındaki boşluğu doldurmasıyla arzın da bunu takip ettiği varsayılır. Buna karşılık, GEC Modeli arz ve talebi dengeye getiren denge fiyatını belirler. (Bu denge, politika etkilerini ve uzun vadeli eğilimleri gizleyecek yatırım/fiyat döngüleri oluşturmaktan kaçınmak için yıl bazında değil, bir trend olarak gerçekleştirilir).

GEC Modeli, 2030'a kadar olan projeksiyon dönemi boyunca ülke bazında üretimi yönlendirmek için MTOMR'nin altında yatan saha bazında analize dayanmaktadır. Ülke bazında metodoloji OPEC ülkelerini de kapsayacak şekilde genişletilmiştir, böylece OPEC salınımlı üretici olarak ele alınmamaktadır, ancak olası OPEC politikalarını temsil ettiği düşünülen kısıtlamalar GEC Modeli petrol arz modülüne dahil edilmiştir.

Sonuçlar, konvansiyonel ve konvansiyonel olmayan petrol gruplandırmaları da dahil olmak , iki raporda genellikle biraz farklı sunulmaktadır. GEC Modeli tüm Kanada petrol kumlarını ve Venezüella Orinoco üretimini konvansiyonel olmayan petrol olarak kabul ederken, MTOMR genellikle sadece yükseltilmiş bitüm veya ekstra ağır petrolü konvansiyonel olmayan olarak kabul etmektedir.

Petrol talebinin analizi ve projeksiyonunda GEC Modeli ve MTOMR arasında metodolojik farklılıklar bulunmaktadır. GEC Modeli tüm enerji kaynaklarının arz ve talep projeksiyonlarıyla ilgilendiğinden ve gelecekte bir dünya enerji dengesi öngördüğünden, tüm talep bileşenlerini içermektedir. GEC Modeli istatistiksel farklılıkları ve rafineri dönüşüm kayıplarını tarihsel talep değerlerine dahil edip bunları geleceğe yansıtırken, MTOMR'nin talep tanımı bu iki kategoriyi tarihsel değerlerine ve projeksiyonlarına dahil etmemektedir.

GEC Modeli ayrıca biyoyakıtları tarihsel petrol talebinden ayırmakta ve petrol talebi ile biyoyakıt talebini ayrı ayrı öngörmektedir. MTOMR biyoyakıtları tarihsel petrol talebinden ayırmaz ve petrol talebi biyoyakıtların bir karışımı ile öngörülür. Sonuç olarak, MTOMR projeksiyonlarından elde edilen bir varil petrol, biyoyakıtların büyümesi öngörülüyorsa, GEC Modelindeki bir varilden daha düşük enerji içeriğine sahiptir. Bu nedenle GEC Modeli ve OMR sonuçlarının doğrudan karşılaştırılması ancak MTOMR petrol talebi değerlerinden biyoyakıtlar çıkarıldığında mümkündür.

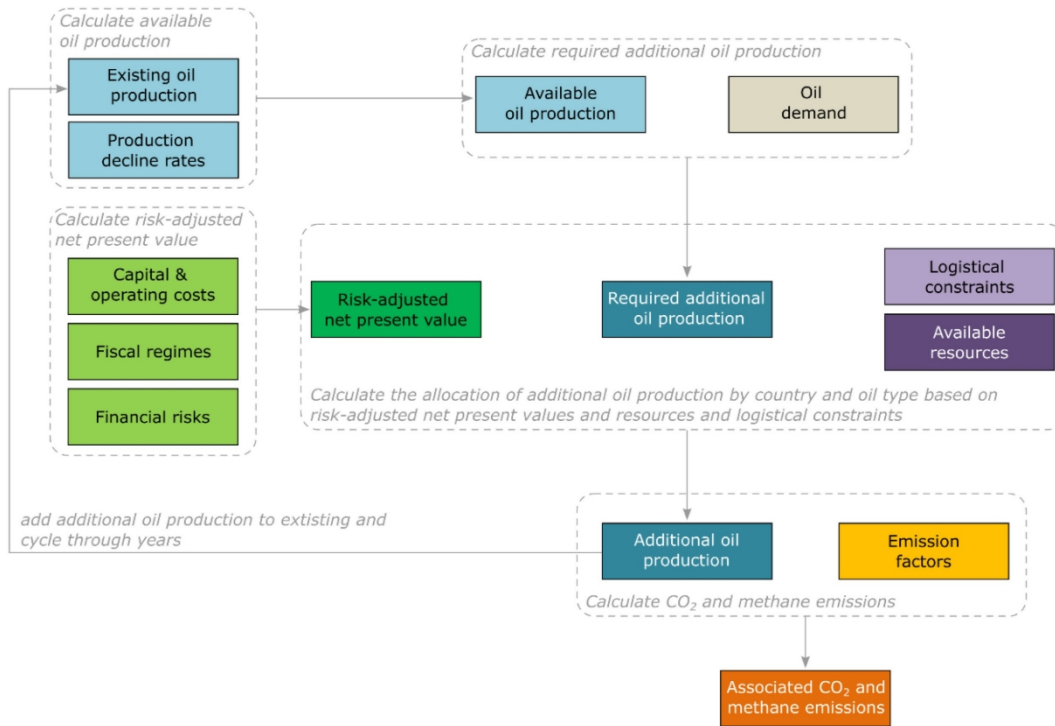
Rafinajdaki farklılıklar esas olarak kurulu kapasitenin yorumlanmasıyla ilgilidir. GEC Modeli, %30 kullanım oranının altında çalışan Çin çaydanlık ve daha küçük rafinerilerin atıl kapasitelerinin çoğunu dikkate almamaktadır. Ayrıca, rafineri sahibi bunun geçici bir ekonomik kapanma olduğunu açıklamış olsa bile, naftalinli kapasiteyi tamamen göz ardı etmektedir. GEC Modeli ve MTOMR, aynı zaman dilimi içinde kesin kapasite ilavelerine ilişkin projeksiyonlarında da farklılık gösterebilir.

Her ülkenin öngörülen petrol üretim profili altı bileşenden oluşmaktadır. Konvansiyonel ham petrol sahaları da su derinliğine göre (karada, sığ [su derinliği 450 metreden az], derin su [450 ila 1 500 arasında] ve ultra derin su [1 500 metreden fazla]) ayırt edilmektedir. Konvansiyonel olmayan petrol için, ekstra ağır petrol ve bitüm de madencilik veya yerinde teknolojilerle ve sıkı petrol de oyun verimliliği ile ayırt edilir.

- Tahmini 2021 sonu itibarıyla halihazırda üretim yapan sahalardan elde edilen üretim: her bir ülkede öngörülen düşüş oranları Kutu 6.1'de özetlenen analizden elde edilmiştir.
- Onaylanmış, planlanmış ve duyurulmuş geliştirmelerle keşfedilen sahalardan üretim.
- Keşfedilmiş ve geliştirilmeyi bekleyen sahalardan üretim.
- Henüz keşfedilmemiş sahalardan üretim.
- Doğal gaz sıvıları üretimi.
- Geleneksel olmayan petrol üretimi.

Petrol üretimindeki eğilimler aşağıdan yukarıya bir metodoloji kullanılarak modellenmekte ve dünya çapında nihai olarak teknik olarak geri kazanılabilir kaynaklara ilişkin veri tabanımızdan kapsamlı bir şekilde yararlanılmaktadır. Metodoloji, proje düzeyinde rezerv geliştirmenin karlılığını analiz ederek petrol endüstrisindeki yatırım kararlarını taklit etmeyi amaçlamaktadır (Şekil 6.1).

Şekil 6.1 ► Yağ besleme modülünün yapısı



IEA. CC BY 4.0.

GEC Model petrol arzı modülünde, her bir ülke veya ülke grubundaki üretim, yatırım yapılan varlık türüne göre ayrı ayrı türetilir: mevcut sahalar, yeni sahalar ve konvansiyonel olmayan projeler. Standart üretim profilleri, mevcut sahalar ve projeksiyon dönemi boyunca üretime alınan yeni sahalar (ülke ve saha türüne göre) için üretim eğilimini türetmek için uygulanır.

Her bir proje türünün karlılığı, farklı proje türlerinin sermaye ve işletme maliyetleri ile maliyetini temsil eden iskonto oranı hakkındaki varsayımlara dayanmaktadır. Her bir proje türünün nakit akışlarının net bugünkü değeri standart bir üretim profilinden elde edilir. Projeler net bugünkü değerlerine göre önceliklendirilir.

değeri ve potansiyel olarak en kârlı projeler geliştirilir. Projelerin ne kadar hızlı geliştirilebileceğine ve belirli bir ülkede üretimin ne kadar hızlı büyüyebileceğine ilişkin kısıtlamalar da uygulanır. Bunlar geçmiş verilerden ve sektör girdilerinden elde edilir. Kısıtlamalar gevşetilmeden talep karşılanamadığında, bu durum petrol fiyatlarının artırılması gerektiğine işaret eder.

6.1.1 ABD sıkı petrol modeli

WEO-2016 için geliştirilen GEC Modelinin bir parçası olan sıkı petrol modülü, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki sıkı petrol üretiminin fiyat ve kaynak mevcudiyetindeki değişikliklere duyarlılığını araştırmaktadır. Modül, 23 şeyi oyununda, her oyunun farklı alanlarında açılan ve tamamlanan kuyuların tahmini nihai geri kazanımını (EUR), ilk üretimini, düşüş oranını ve sondaj maliyetlerini dikkate alarak gelecekteki olası üretimi öngörmektedir. Mevcut üretim, mevcut en son üretim bilgilerine ve bu kuyuların tamamlandığı zamana dayalı olarak kuyuların düşüş parametreleri tahmin edilerek modellenmiştir.

Fiyat dinamikleri, yeni kuyular açmak için mevcut olan sondaj kulesi sayısını etkilemektedir; fiyatlardaki artışlar ile çalışan sondaj kulesi sayısındaki artışlar arasında bir gecikme söz konusudur (ampirik olarak gözlemlendiği gibi). Teknoloji hem yeni kuyuların açılma ve tamamlanma hızını (sondaj kulesi başına düşen kuyu sayısı) hem de her bir kuyudan elde edilen üretim miktarını (EUR/kuyu) artırır. Tersine, belirli bir oyundaki belirli bir alanın EUR/kuyusunun, o alan zaman içinde tükendikçe azaldığı varsayılır.

Sondaj makineleri, mevcut faaliyetlere ve açılan yeni kuyuların beklenen maliyet etkinliğine dayalı olarak oyunlara dağıtılır. Operatörlerin yalnızca en verimli bölgelerde sondaj yapmayı hedefledikleri, ancak bazı kuyuların kaçınılmaz olarak daha düşük EUR/kuyu veya daha yüksek düşüş oranlarına sahip bölgelerde yer aldığı varsayılmaktadır. Sondaj kulesi sayısı, sondaj kulesi başına düşen kuyu sayısı ve kuyu başına düşen üretimin çarpımı, Ocak 2020'den itibaren her ay her bir oyunda devreye giren yeni üretimi vermektedir. Bu modülden elde edilen sonuçlar, uygulanan senaryoların her için doğrudan GEC Modeline beslenmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki kaya gazı üretimi için de benzer bir model geliştirilmiştir.

Kutu 6.2► Petrol ve gaz sahalarındaki üretim düşüşünü hesaba katma metodolojisi

World Energy Outlook daha önce birçok kez, çok sayıda sahanın gerçek üretim verilerinin zaman serilerine dayanarak petrol sahalarındaki düşüş oranlarının analizlerini sunmuştur. Bu çalışmanın sonucu, saha türüne, coğrafi konuma ve düşüş aşamasına göre gözlemlenen düşüş oranları için bir değerin yanı sıra gözlemlenen düşüş oranları ile doğal düşüş oranları (yani üretim sahalarının daha fazla yatırım yapılmaması durumunda gözlemlenecek düşüş oranı) arasındaki fark için bir tahmindir.

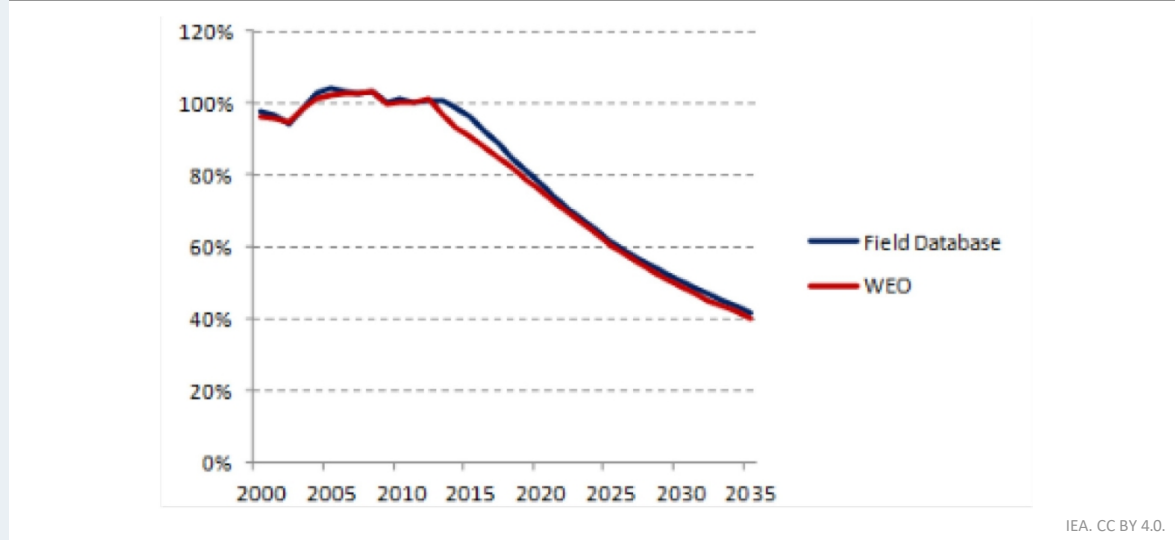
Prencip olarak bu, kullanılan saha arasında düşüşte olan tüm sahaların gelecekteki üretimini tahmin etmek için gerekli unsurları sağlar. Metodoloji aşağıdaki gibidir:

- Veri tabanındaki her bir saha için bir tür belirleyin (örneğin süper dev, dev, kara, açık deniz, derin su) ve mevcut düşüş aşamasını belirleyin.
- WEO-2013'te verilen ilgili düşüş oranına göre her bir saha için gelecekteki üretimi tahmin edin, saha faz değiştirdikçe düşüş oranlarını güncelleyin.

Ancak bu, halihazırda üretim yapan tüm sahalardan dünya üretiminin projeksiyonuna izin vermez, çünkü şu anda yükselişte olan sahalardan (yani gelecekteki en yüksek yıllarını ve en yüksek üretimlerini bilmek gerekir) ve veritabanında olmayan azalan sahalardan da üretimin projeksiyonu gerekir. Bu, dünyadaki tüm saha için gelecekteki olası üretimin bir temsilini içeren tescilli bir ticari veritabanı kullanılarak yapılır. Bu daha eksiksiz veri setine dayanan GEC Modeli petrol arz modülü, doğal düşüş oranlarının (her kaynak türü için) ülke bazında parametrelendirilmesini ve projeksiyon dönemi boyunca her ülkede geliştirilen kaynaklar için bir üretim profili kullanmaktadır (yani, belirli bir yılda geliştirilen kaynaklar daha sonra üretimde bir artış sağlar, ardından zirve ve düşüş gelir). Şekil 6.2'de gösterildiği gibi, bu parametrelendirme

uzun vadeli için tescilli veri tabanının sonuçlarıyla iyi bir eşleşme sağlar (iki veri tabanı biraz farklı temel üretimlere sahip olduğundan, düşüşün daha net bir şekilde karşılaştırılmasına izin vermek için her ikisi de normalleştirilmiştir); kısa vadede, IEA saha bazında analiz (MTOMR'den gelen), beklenen saha bakımını ve hava kesintilerini hesaba kattığı için ticari veri tabanından daha muhafazakardır.

Şekil 6.2► Saha bazında veri tabanından ve GEC Modelinden halihazırda üretim yapan konvansiyonel petrol sahalarının üretiminin evrimi



Kaynaklar: Rystad Energy, IEA analizleri ve veri tabanları.

6.2 Doğal gaz

Doğal gaz üretim ve ticaret projeksiyonları, aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya yaklaşımları içeren hibrit bir GEC Modeli gaz arz modülünden türetilmiştir. Modül, yukarıda açıklanan petrol arz modülüne benzer girdilere, mantığa ve işlevselliğe sahiptir. Ancak, küresel olarak serbestçe ticareti yapıldığı varsayılan petrolün aksine, gazın öncelikle bölgesel olarak ticaretinin yapıldığı ve bölgeler arası ticaretin mevcut veya planlanan boru hatları, LNG tesisleri ve uzun vadeli sözleşmelerle kısıtlandığı varsayılmaktadır. İlk olarak yukarıdan aşağıya modülü 20 bölge için çalıştırılır (bkz. Ek 1) ve bu bölgeler için yerli üretim, kalan teknik olarak geri kazanılabilir kaynaklar (Tablo 6.1), tükenme oranları, üretim maliyetleri, vergiler, fiyatlar bölgedeki çeşitli riskler dahil olmak üzere çeşitli faktörlere modellenir. Yerli üretimin talepten çıkarılması, her bir ithalatçı bölgesel blok için toplam olarak, gaz ithalat gereksinimlerini verir. Her bir net gaz ihracatçısı bölgesel blok için toplam üretim, yurtiçi talep seviyesi ve o bölgenin ihraç edilebilir üretimi üzerindeki çağrı (net ithalatçı bölgelerin ithalat ihtiyaçları ve tedarik maliyetleri tarafından belirlenir) tarafından belirlenir. Önce uzun vadeli sözleşmeler (mevcut veya gelecek için varsayılan) sunulur, ardından ihracatçı bölgeler mevcut ve gelecek için varsayılan LNG ve boru hattı kapasiteleri dahilinde marjinal üretim maliyetleri artı taşıma maliyetleri temelinde rekabet eder. Bu da bölgeler arası gaz ticaretini sağlar. İhracatçı bölgelerin fiyatlandırma politikalarının (mevcut veya gelecek için varsayılan) etkileri de dikkate alınabilir. Öngörülen bölge içi ticaret, sıvılaştırma ve yeniden gazlaştırma kapasitelerinin mevcudiyeti göz önünde bulundurularak bölgesel gaz talebindeki değişikliklerden kaynaklanmaktadır.

Aşağıdan yukarıya modülünde, her bir bölgedeki üretim, petrol arz modülüne benzer bir mantıkla, ancak "talep" yukarıdan aşağıya modülünden elde edilen ilgili bölgesel üretim tarafından sağlanarak, kalan teknik olarak geri kazanılabilir kaynaklara, tükenme oranlarına ve göreceli arz maliyetlerine göre ayrı ayrı ülkelere tahsis edilir.

6.3 Kömür

Kömür modülü, kaynaklar yaklaşımının (Tablo 6.1) ve uluslararası kömür fiyatına dayalı olarak yerel ve uluslararası piyasaların değerlendirilmesinin bir birleşimidir. Üretim, ithalat ve ihracat, ülke bazında kömür talebi projeksiyonlarına ve geçmiş verilere dayanmaktadır. Dört pazar dikkate alınmıştır: koklaşabilir kömür, buhar kömürü, linyit ve turba. Esas olarak koklaşabilir kömür ve buhar kömüründen oluşan dünya kömür ticareti, iki pazar için ayrı ayrı modellenmekte ve yıllık bazda dengelenmektedir.

Tablo 6.1► Kalan teknik olarak geri kazanılabilir fosil yakıt kaynakları, 2023

Yağ (milyar varil)	Kanıtlanm ış rezervler	Kaynaklar	Konvansiyonel ham petrol	Sıkı petr ol	NGL'ler	EHOB	Kerojen petrol
Kuzey Amerika	222	2 440	232	212	200	796	1 000
Orta ve Güney Amerika	305	851	250	57	49	493	3
Avrupa	14	110	55	19	28	3	6
Afrika	125	448	309	54	83	2	-
Orta Doğu	902	1 114	870	29	171	14	30
Avrasya	146	946	232	85	59	552	18
Asya Pasifik	51	272	117	72	64	3	16
Dünya	1 765	6 181	2 064	528	654	1 862	1 073

Doğal gaz (trilyon)	Kanıtlanmış rezervler	Kaynaklar	Konvansiyonel gaz	Sıkı gaz	Kaya gazı	Kömür yatağı metanı
Kuzey Amerika	19	146	50	10	80	7
Orta ve Güney Amerika	9	84	28	15	41	-
Avrupa	5	46	18	5	18	5
Afrika	19	100	50	10	40	0
Orta Doğu	83	120	100	9	11	-
Avrasya	69	167	129	11	10	17
Asya Pasifik	21	137	43	21	53	20
Dünya	225	800	418	80	252	49

Kömür (milyar ton)	Kanıtlanmış rezervler	Kaynaklar	Koklaşabili r kömür	Buhar kömürü	Linyit
Kuzey Amerika	257	8 387	1 031	5 838	1 519
Orta ve Güney Amerika	14	60	3	32	25
Avrupa	137	980	163	415	402
Afrika	15	343	44	298	-
Orta Doğu	1	41	36	5	-
Avrasya	191	2 015	388	995	632
Asya Pasifik	460	8 950	1 721	5 815	1 413
Dünya	1 074	20 776	3 387	13 398	3 991

Notlar: NGL'ler = doğal gaz sıvıları; EHOB = ekstra ağır petrol ve bitüm. Kömür kaynaklarının türlerine göre dağılımı IEA tahminidir. Dünya kömür kaynaklarına Antarktika dahil değildir.

Kaynaklar: (BGR, 2023), Enerji Enstitüsü, (2024), (CEDIGAZ, 2024), (OGJ, 2023), (EIA, 2023), (USGS, 2012a), (USGS, 2012b), IEA veritabanları ve analiz.

6.4 Biyoenerji

Biyoenerji, katı (biyokütle), sıvı (biyoyakıtlar) ve gaz (biyogaz ve biyometan) olmak üzere tüm formlarıyla önemli bir yenilenebilir enerji seçeneğidir. Biyoenerji, GEC Modelinin tüm senaryolarında yenilenebilir enerjiye dayalı elektrik, ısı ve ulaşım yakıtlarının önemli bir bölümünü sağlar ve - biyometan olarak - gaz şebekesinin karbondan arındırılmasına da katkıda bulunabilir. Birçok bölge veya ülke, gelecekte enerji ve ulaştırma sektörlerinde biyoenerjiye olan talebi daha da artıracak politikalara sahiptir veya bunları düşünmektedir.

Biyoenerji arz modülü, GEC Model bölgelerinin enerji üretimi için biyoenerji, biyoyakıt ve biyogaz taleplerini yerli kaynaklarla karşılama kabiliyetlerini değerlendirmek için tasarlanmıştır. Bunu yapamadıkları durumlarda, modül aynı zamanda sıvı uluslararası ticaretini de simüle etmektedir. Biyoenerjinin mevcudiyeti, gıda ve yem ile rekabet içinde olmayan yenilenebilir biyokütle hammadde kaynakları ile sınırlıdır. Biyoenerji arzı, sıvı ve gaz kullanımlar için nihai kullanımdan önce dönüştürülmek üzere sıvı biyoyakıtlar ile biyogaz ve biyometan arz modüllerine beslenen birincil biyoenerji mevcudiyetini belirler (bkz. Bölüm 5.4).

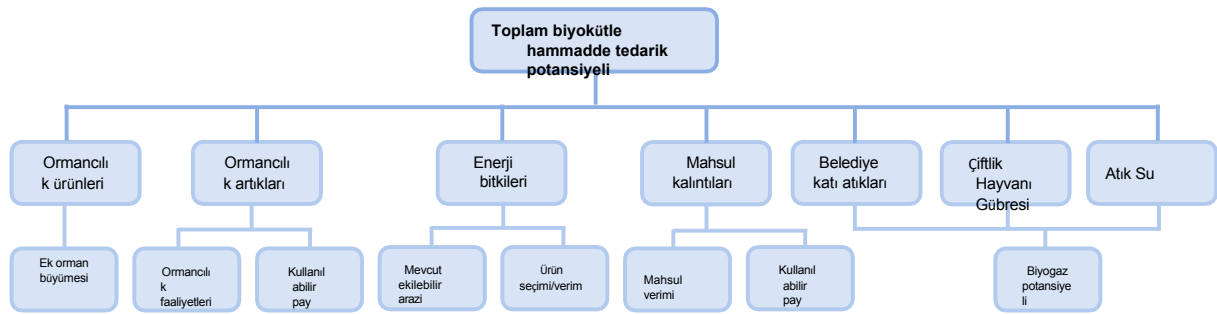
6.4.1 Biyoenerji tedarik modülü

Bölgelere göre biyokütle arz potansiyelleri

Hammadde tedarik potansiyelleri, büyük ölçüde FAO'nun veri tabanından, akademik literatürden ve FAO ile IIASA'nın ortak projesi olan Küresel Tarımsal Ekolojik Bölgeler (GAEZ) sisteminden kaynaklanan arazi, mahsul ve gıda talebiyle ilgili çok çeşitli veriler üzerine inşa edilmiştir.

Biyoenerji arz modülünde bölgelere göre toplam arz potansiyelleri, dört hammadde kategorisi için potansiyel arzın toplamıdır: orman ürünleri, ormancılık kalıntıları, tarımsal kalıntılar ve enerji bitkileri (Şekil 6.3). Mevcut faaliyet seviyelerinden başlayarak, genellikle dağınık olan bu hammaddelerin toplanması ve dağıtımının artırılması, maksimum potansiyel arz seviyelerine ulaşılmadan önce önemli hazırlık süreleri gerektirir. Ormancılık ve tarımsal kalıntıların potansiyel arzı, ısı üretmek için endüstriyel ve konut kullanımının yanı sıra geleneksel biyoenerji kullanımlarına olan talep nedeniyle azalmaktadır.

Şekil 6.3> Biyokütle tedarik potansiyellerinin şeması



IEA. CC BY 4.0.

Not: Belediye katı atıklarının sadece organik kısmı biyokütle arzına dahil edilmiştir.

Ormancılık ürünleri, yalnızca enerji veya ulaşım biyoyakıtları üretmek amacıyla ağaç hasadı ve tamamlayıcı kesim gibi ormancılık faaliyetlerini içerir. Ormancılık ürünlerinin maksimum potansiyel mevcudiyeti, her bölgede diğer ormancılık talepleri sonra toplam orman alanında her yıl beklenen büyüme ile sınırlıdır, böylece doğrudan ormansızlaşmadan kaçınılır.

Ormancılık artıkları, birincil motivasyonun biyoenerji üretmek dışında bir şey olduğu ormancılık faaliyetlerinden üretilen malzemeler veya ikincil ürünlerdir. Bunlar arasında ormancılık artıkları, kereste endüstrisinden arta kalan ağaç kabukları, endüstriyel yan ürünler, atık ahşap ve ahşap işleme sonrasında arta kalan talaş yer almaktadır. Biyoenerji

Maksimum potansiyel kullanılabilirlik, ilgili faaliyetlerin seviyesi ve artık malzemelerin kullanılabilir payı ile sınırlıdır.

Mahsul kalıntıları, mısır sapı, saman ve şeker kamışının işlenmesinden elde edilen küspe gibi mahsullerin hasadından sonra kalan malzemelerdir. Bölgelere göre hasat verileri şu ürünleri içermektedir: arpa, mısır, yulaf, pirinç, sorgum, buğday, diğer tahıllar, kolza tohumu, soya fasulyesi, ayçiçeği tohumu ve şeker kamışı. Maksimum potansiyel kullanılabilirlik, hasat edilen ürün miktarı ve kalıntıların geri kazanılabilir payı ile sınırlıdır. Toprak erozyonunu azaltmaya ve topraktaki su ve sıcaklığı korumaya yardımcı olarak toprak besin maddelerini yenilemek ve gelecek hasatlar için verimi korumak için kalıntıların bir kısmının tarlalarda kalması önemlidir. Bu kalıntıların sürdürülebilir bir şekilde enerji üretimi için kullanılabilir hale getirilebilecek yüzdesi bölgeye ve ürüne özgüdür ve halen aktif olarak araştırılmaktadır.

Modellenen diğer atık ve kalıntı kaynakları hayvan gübresi, kentsel katı atıkların (MSW) organik kısmı ve biyogaz üretimi için atık sudur. Çiftlik hayvanı gübresi sığır, kümes hayvanı, domuz ve koyunları içermektedir. Bitkisel kalıntılara benzer şekilde, bu hammadde potansiyelleri, büyük ölçüde FAO veri tabanından ve domuzlar, kümes hayvanları ve koyunlar için OECD-FAO çalışmasından (OECD-FAO, 2018) kaynaklanan geniş bir veri yelpazesine dayanmaktadır. MSW'nin organik kısmı gıda ve yeşil atıkları, kağıt ve kartonu ve odunu içerir ve bir Dünya Bankası çalışmasından hesaplanmıştır (Dünya Bankası, 2018). Atık su sadece belediye atık suyunu içerir ve daha önce World Energy Outlook ekibi tarafından geliştirilen su modülünden elde edilen çıktı verilerine dayanır. Bu biyokütle potansiyelleri modele biyogaz potansiyeli olarak dahil edilmiştir.

Enerji bitkileri, etanol için gıda şekeri ve nişasta hammaddesi (örneğin mısır, şeker kamışı ve şeker pancarı), biyo-bazlı dizeller için bitkisel yağ hammaddesi (örneğin kolza tohumu, soya fasulyesi ve palmye yağı) ve gelişmiş biyoyakıtlar için lignoselülozik malzeme (örneğin sustalı ot, kavak ve miscanthus) dahil olmak üzere özellikle enerji amaçlı yetiştirilen ürünlerdir. Maksimum potansiyel kullanılabilirlik, gıda ile ilgili arazi talebi, ürün seçimi ve zaman içinde artan verim dikkate alındıktan sonra mevcut ekilebilir arazi tarafından belirlenir.

Enerji bitkilerinden elde edilebilecek potansiyel arz (milyon ton) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$P_{t,r} = \sum_{l,EE,c} (x_{t,r,l,EE,c} \times y_{t,r,l,EE,c} \times s_{t,r,c})$$

Burada, belirli bir t yılı ve r bölgesi için,

- $P_{t,r}$ enerji bitkilerinden elde edilen potansiyel biyokütle hammadde arzıdır;
- $x_{t,r,l,EE,c}$ l tipi, g sınıfı ve c ürününe göre mevcut arazidir;
- $y_{t,r,l,EE,c}$ ürün verimidir; ve
- $s_{t,r,c}$ her bir ürün için kullanılabilir arazinin payıdır.

Mevcut arazi, üç arazi kalitesi derecesine (birinci sınıf, iyi ve marjinal) ve üç arazi türüne (ekili, korumasız otlak ve korumasız orman arazisi) ayrılmıştır. Düşük kaliteli araziler daha düşük mahsul verimi sağlamaktadır. Bu değerlendirmede, korunmasız orman arazisinin ekili araziye dönüştürülmesine izin verilmemektedir ve bu nedenle biyoenerji amaçları için kullanılamaz. Mahsul verimleri, bir bölgedeki ortalama yetiştirme koşullarını yansıtabilecek şekilde bölgelere göre tanımlanmıştır ve 2035 yılına kadar orta düzeyde iyileşmeye devam edeceği varsayılmıştır. Mahsul seçimi, biyoenerji için halihazırda tercih edilen mahsullerden, hammaddenin değişen ekonomisinden (artan verim ve fosil yakıt alternatifine kıyasla göreceli çekicilik yoluyla) ve politika gelişiminden etkilenmektedir. Örneğin, gelişmiş biyoyakıtlara yönelik politika hedefleri lignoselülozik enerji mahsullerine olan talebi artıracak ve geleneksel hammaddeye ayrılan arazi payını azaltacaktır.

Talebi karşılamak için arz

Biyokütle hammaddesine yönelik talep, enerji, sanayi, binalar ve ulaştırma sektörlerine yönelik talep projeksiyonlarına dayanmaktadır. Talebi karşılamak için yurtiçi arzlara öncelik verilir; geri kalan kısım, modellenmiş biyoenerji ticaret akışları, yani sıvı biyoyakıtlar için uluslararası pazarlar aracılığıyla karşılanır. Model, IEA'nın *Yenilenebilir Enerji Piyasası* raporları tarafından değerlendirilen mevcut ticaret akışlarını karşılayacak şekilde kalibre edilmiştir.

Yurtiçi tedarik

Biyokütle hammaddeleri, hammadde fiyatları ve hammaddelerin enerji içerikleri de dahil olmak üzere dönüştürme maliyetleri temelinde talebi karşılamak için rekabet etmektedir. Çeşitli biyokütle hammadde türleri hem enerji üretimi hem de sıvı biyoyakıt ve biyogaz üretimi için kullanılabilir. Bunlar arasında orman ürünleri, ormancılık kalıntıları ve tarımsal kalıntılar yer almaktadır. Bu durumda, her iki kullanım için net bugünkü değerler, GEC Modeli ve IEA'nın *Mobilite Modelinden* elde edilen teknoloji maliyet verilerine dayanarak karşılaştırılmış ve sıralanmıştır. Sıralamaya göre, mevcut biyokütle hammadde kaynakları tahsis edilir. Sıvı biyoyakıtların yurtiçi arzı rafinaj kapasitesi ile sınırlıdır. Yakın vadede bu kapasite, mevcut rafineriler ve inşaatı devam eden ya da planlanan rafinerilerle sınırlıdır.

Küresel ticaret

Model, karşılanmamış talep ile mevcut arzı, nakliye maliyetleri de dahil olmak üzere en düşük maliyet temelinde eşleştirmek için küresel bir ticaret matrisi kullanır. Bölgeler arasındaki nakliye maliyetleri hem karadan hem de denizden ortalama maliyetleri içermektedir. Dört ürünün ticareti yapılmaktadır: etanol, biyodizel, biyojet gazyağı ve biyometanol. Bu sıvı biyoyakıtlar, artıklardan ve diğer hammaddelerden yapılabilen yüksek yoğunluklu tek tip ürünlerdir ve tek tiplikleri ve yoğunlukları, diğer biyoenerji kaynaklarına kıyasla uzun mesafelerde taşıma ve nakliye daha kolay ve daha ucuz hale getirir. Biyokütle hammaddesinin sıvı biyoyakıtlara dönüştürülmesi ihracatçı bölgede gerçekleşir, bu nedenle dönüştürme maliyetleri ihracatçı bölgedeki teknoloji maliyetlerine göre hesaplanır. İthalatçı bölgeler tedarikçileri en düşük maliyetli mevcut tedariklere (nakliye maliyetleri dahil) göre seçer. İhracat yapan bölgeler, en yüksek fiyatı ödemeye istekli ithalatçı bölgelere tedarik sağlar.

İşbirliği

IEA biyoenerji talep ve arz sonuçları, IEA'nın biyoenerji arzı ve etkin kullanım stratejileri, özellikle de biyokütle hammadde arzı, arazi kullanımı ve tarım, ormancılık ve diğer arazi kullanımı (AFOLU) sektörlerinden kaynaklanan emisyonlar hakkındaki analizlerini tamamlamak için IIASA tarafından geliştirilen ve sürdürülen Küresel Biyosfer Yönetim Modeli (GLOBIOM) ile birleştirilmiştir.

Kritik mineraller

Kapsam

GEC Modeline 2022 modelleme döngüsü sırasında kalıcı bir modül olarak eklenen kritik mineraller modeli, aşağıdaki temiz enerji teknolojileri için mineral gereksinimlerini değerlendirmektedir:

- güneş PV (şebeke ölçeğinde ve dağıtılmış)
- rüzgar (karada ve açık denizde)
- yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (parabolik oluklar ve merkezi kule)
- hidroelektrik
- jeotermal
- enerji için biyoenerji
- nükleer güç
- elektrik şebekeleri (iletim, dağıtım ve transformatör)
- elektrikli araçlar (bataryalı elektrikli ve plug-in hibrit elektrikli araçlar)
- batarya depolama (şebeke ölçeğinde ve konutlarda)
- hidrojen (elektrolizörler ve yakıt hücreleri).

Tüm bu enerji teknolojileri, mineral içeren cevherlerin işlenmesiyle üretilen metal ve alaşımlara ihtiyaç duymaktadır. Cevherler - çıkarılan ham, ekonomik olarak uygun kayalar - ilgili mineralleri serbest bırakmak ve konsantre etmek için zenginleştirilir. Bu mineraller, ilgili metalleri veya alaşımları çıkarmak için daha fazla işlenir. İşlenmiş metaller ve alaşımlar daha sonra son kullanım uygulamalarında kullanılır. Bu analiz madencilikten işleme operasyonlarına kadar tüm mineral ve metal değer zincirini kapsamakla birlikte, basitlik adına temsili bir terim olarak "mineralleri" kullanıyoruz.

Özellikle temiz enerji teknolojilerindeki mineral kullanımına odaklanıyoruz, çünkü bu teknolojiler genellikle fosil yakıt muadillerinden çok daha fazla mineral gerektirmektedir. Modelimiz, operasyonel gerekliliklere (örneğin nükleer santrallerdeki uranyum tüketimi) değil, bir tesis inşa etmek (veya ekipman yapmak) için gerekenlere odaklanmaktadır.

Modelimiz, Tablo 7.1'de listelenen temiz enerji teknolojilerinde kullanılan çok çeşitli mineralleri dikkate almaktadır. Bunlar arasında krom, bakır, başlıca pil metalleri (lityum, nikel, kobalt, manganez ve grafit), molibden, platin grubu metaller, çinko, nadir toprak elementleri, silikon, gümüş ve diğerleri bulunmaktadır.

Tablo 7.1 Kapsam dahilindeki kritik mineraller

Odak mineralleri	Diğer mineraller			
• Kobalt • Bakır • Lityum • Nikel • Miknatıs nadir toprak elementleri (Neodim, Disprosiyum, Praseodim, Terbiyum) • Grafit	• Arsenik • Bor • Kadmiyum • Krom • Galyum • Germanyum	• Hafniyum • İndiyum • İridyum • Kurşun • Magnezyum • Manganez • Molibden	• Niyobyum • Platin • Selenyum • Silikon • Gümüş • Tantal • Tellür	• Kalay • Titanyum • Tungsten • Vanadyum • Çinko

Çelik ve alüminyum birçok temiz enerji teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak biz bunları bu analizin kapsamı dışında tuttuk. Çeliğin önemli güvenlik etkileri yoktur ve temiz enerji teknolojileri

çelik talebinin büyümesinde kritik minerallere kıyasla daha az önemli bir itici güçtür. Alüminyum talebi sadece elektrik şebekeleri için değerlendirilmiştir çünkü bakırın görünümü şebeke hatlarında alüminyum kullanımıyla doğal olarak bağlantılıdır ancak toplam talep projeksiyonlarına dahil edilmemiştir.

2023 yılında IEA, web sitesinde interaktif Kritik Mineraller Veri Gezini'ni yayınlamıştır. Bu çevrimiçi araç, 3 ana IEA senaryosunda ve 12 teknolojiye özgü durumda temiz enerji geçişleri için gerekli 37 mineral için küresel talep tahminleri sunmaktadır. 2024 yılından ve IEA'nın Küresel Kritik Mineral Görünümü'nün yayınlanmasından bu yana, Veri Gezini altı odak mineral için arz projeksiyonlarını da kapsamaktadır.

7.1 Talep

Temiz enerji teknolojilerinin her biri için, dört ana değişken kullanarak genel maden talebini tahmin ediyoruz:

- farklı senaryolar altında temiz enerji yayılım eğilimleri
- teknolojiye özgü vakalara dayalı olarak her bir teknoloji alanı içindeki alt teknoloji payları
- Her bir alt teknolojinin mineral yoğunluğu
- mineral yoğunluğu iyileştirmeleri.

STEPS, APS ve NZE Senaryosu kapsamındaki temiz enerji dağıtım eğilimleri, 2024 modelleme döngüsündeki projeksiyonlardan alınmıştır.

Her bir teknoloji alanındaki alt teknoloji payları (örneğin güneş PV modül tipleri veya elektrikli araç batarya kimyaları) 2024 GEC Modelleme Döngüsünden alınmış, *Global EV Outlook 2024* ve diğer kaynaklarla tamamlanmıştır.

Maden yoğunluğu varsayımları, kapsamlı literatür taraması ve IEA Teknoloji İşbirliği Programları da dahil olmak üzere uzman ve endüstri istişareleri yoluyla geliştirilmiştir.

Mineral yoğunluğundaki iyileşmelerin hızı senaryoya göre değişmektedir; STEPS'te zaman içinde genellikle minimum iyileşme görülürken, APS ve NZE Senaryosunda mütevazı bir iyileşme (uzun vadede yaklaşık %10) varsayılmaktadır. Ölçek ekonomilerinden veya teknoloji gelişiminden özellikle faydalanabilecek alanlarda (örneğin güneş silikon ve gümüş kullanımı, yakıt hücrelerinde platin yüklemesi, rüzgar türbinlerinde nadir toprak elementlerinin kullanımı), altta yatan faktörlerin incelenmesine dayalı olarak belirli iyileştirme oranları uygulanmıştır.

Altı temel enerji geçiş minerali için birincil arz gereksinimleri, öngörülen toplam talepten öngörülen ikincil arzın (aşağıdaki metodoloji) çıkarılmasıyla değerlendirilmiştir. Madenden çıkarılan malzemelere yönelik birincil arz gereksinimleri için, rafine etme süreçleri sırasında belirli bir düzeyde kayıp oranı varsayılmıştır.

7.2 Birincil ve ikincil arz projeksiyonları

7.2.1 Birincil arz projeksiyonları

Enerji dönüşümünün kilit mineralleri için arz projeksiyonları, ülkelere göre faaliyette olan ve duyurulan madencilik ve rafinaj projelerinin boru hattı verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Bu projeksiyonlar, finansman, izin ve fizibilite çalışmalarının durumu gibi çeşitli faktörlere dayalı olarak faaliyete geçme olasılıklarına göre kategorize edilen bir baz ve bir yüksek üretim durumu olarak ikiye ayrılmıştır.

S&P Global Market Intelligence, Wood Mackenzie, Benchmark Mineral Intelligence ve Project Blue gibi çeşitli profesyonel bilgi kaynaklarından madencilik ve rafinaj projelerine ilişkin verilerin kullanıldığını kabul ediyoruz.

7.2.2 İkincil arz projeksiyonları

İkincil arz hem üretim hurdalarını hem de kullanım ömrünü tamamlamış hammaddeleri içermektedir. Geri dönüşüm iki parametre ile tahmin edilir: ortalama geri dönüşüm oranı ve her bir son kullanım sektörünün kullanım ömrü. Geri dönüşüm oranı

kullanım ömrü sonu toplama oranı (geri dönüşüm için toplanan belirli bir ürünün miktarı) ve verim oranının (bir geri dönüşüm sürecinin gerçekten geri kazanabileceği malzeme miktarı) birleşimidir. Verim oranının, mevcut geri dönüşüm yöntemleri kullanılarak her bir mineralin çıkarılmasına yönelik teknik sınırlamalara göre değiştiği varsayılmaktadır. Yeniden kullanım oranları, geri dönüşüm için toplama oranından çok daha düşüktür, çünkü ikinci ömürlü pillerin kullanımı (şebeke uygulamalarında) birçok teknik ve düzenleyici engelle karşı karşıyadır.

Enerji dışı sektörler için, ikincil mineral arzı projeksiyonları, sektördeki ikincil arz için tarihsel eğilimlere dayanmakta ve senaryoya göre toplama oranlarında ve verimlilik seviyelerinde kademeli bir iyileşme varsayılmaktadır. Temiz enerji uygulamaları için, teknolojiye göre kullanım ömrünü (örneğin, güneş PV, rüzgar türbinleri ve EV'ler), uygulama ve mineral bazında toplama ve verim oranlarını değerlendiren ve kapsamlı literatür incelemesine dayanan, sektör bazında gelişmiş bir ayrıntı düzeyi vardır. Toplama oranları zaman içinde gelişmekte ve senaryoya göre değişmekte olup, en iddialı oranlara NZE Senaryosu yolunda ilerleyen bir dünyada ulaşılmaktadır.

Lityum-iyon batarya geri dönüşümü, bu bugün ve 2050 yılları arasında enerji geçiş minerallerine yönelik talep artışında oynadığı merkezi rol nedeniyle temiz enerji teknolojisi uygulamaları arasında en yüksek ayrıntı düzeyiyle modellenmiştir. Batarya geri dönüşümü, farklı modlar (otomobil, otobüs, iki ve üç tekerlekli araçlar ve yük taşımacılığı) için elektrikli araç hurdada çıkarma eğrilerine ve toplama oranları, kimyasallar, geri dönüşüm teknolojisi payları ve senaryoya göre işlem verim oranları ile birlikte batarya depolama değişimlerine dayalı olarak modellenmiştir. Elektrikli araç akülerinin ikinci uygulamalarda yeniden kullanımı da hesaba katılmaktadır. Son olarak, lityum-iyon batarya üretim hurdası ek bir ikincil tedarik kaynağı olarak modellenmiştir.

8.1 CO₂ emisyonları

Enerjiyle ilgili CO₂ emisyonları küresel sera gazı emisyonlarının aslan payını oluşturduğundan, GEC Modelinin önemli çıktılarından biri de yakıt yanmasından ve endüstriyel süreçlerden kaynaklanan bölgesel CO₂ emisyonlarıdır. Yakıt yanması ve endüstriyel süreçlerden kaynaklanan karbondioksit emisyonları, yakıtlardan kaynaklanan kaçak emisyonları, alevlenmeyi veya taşıma ve depolamadan kaynaklanan CO₂'yi içermez. Aksi belirtilmedikçe, GEC Modelinden bildirilen CO₂ emisyonları fosil yakıtların ve yenilenemeyen atıkların yanmasını, endüstriyel proses CO₂ emisyonlarını ve kaynaklanan kaçak emisyonları ifade eder. GEC Modeli CO₂ emisyonları muhasebesi, havadan CO₂ yakalayarak (doğrudan hava yakalama [DAC] yoluyla) veya yeraltı rezervuarlarında kalıcı depolama için biyogenik kaynaklardan (karbon, yakalama ve depolama [BECCS] ile biyoenerji) karbondioksitin atmosferden uzaklaştırılmasını da dikkate alır.

Her bir GEC Model bölgesi, sektörü ve yakıtı için, yakıtın yanmasından kaynaklanan CO₂ emisyonları, enerji talebinin zımni bir CO₂ içerik faktörü ile çarpılmasıyla hesaplanır. Kömür, petrol ve gaz için ima edilen CO₂ içerik faktörleri, ürün karışımı ve verimliliği yansıtacak şekilde sektörler ve bölgeler arasında farklılık göstermektedir. Bunlar, tüm GEC Model bölgeleri için IEA enerji ile ilgili sektörel yaklaşım CO₂ verilerinden son 3 yılın ortalaması olarak hesaplanmıştır ve projeksiyon dönemi boyunca sabit kalacağı varsayılmıştır.

Çeşitli endüstriyel kaynaklardan kaynaklanan prosesle ilgili CO₂ emisyonları GEC Model bölgesine göre tahmin edilmektedir. Tahmin için bir Kademe 1 veya Kademe 2 yöntemi kullanılmıştır, bu da genel olarak emisyonların endüstriyel malzemelerin üretimine ve 2006 Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) Ulusal Sera Gazı Envanterleri Kılavuzuna dayalı bir emisyon faktörüne göre edildiği anlamına gelmektedir. Şimdiye kadar analiz, endüstriyel proses emisyonlarının en önemli kaynakları ile sınırlı kalmıştır:

- Mineral endüstrisi: klinker, kireç, kireçtaşı kullanımı, seramik, cam
- Metal endüstrisi: birincil alüminyum, demir ve çelik
- Kimya endüstrisi: amonyak, metanol, etilen, soda külü
- Enerji dışı ürünler: yağlayıcılar ve parafin
- Dönüşüm: kömürden sıvıya, kömürden gaza ve gazdan sıvıya, hidrojen üretimi, biyoyakıt üretimi (CO₂'nin uzaklaştırılmasını sağlayabilir).

GEC Modeli ayrıca karbon yakalama, kullanma ve depolamayı (CCUS) da hesaba katmaktadır. CCUS teknolojileri elektrik ve ısı, sanayi ve dönüşüm sektörlerinde kullanılabilir. Modelde, yakalanan CO₂ emisyonları yeraltı jeolojik oluşumlarında, karada veya denizde depolanabilir veya özellikle sentetik yakıtların üretiminde hammadde olarak kullanılabilir.

Mevcut politika ayarları (STEPS için), açıklanan taahhütler (APS için) ve sıcaklık artışının 1,5 °C ile sınırlandırılmasıyla tutarlı senaryolar (NZE için) ile uyumlu arazi kullanımı, arazi kullanım değişikliği ve ormancılıktan (LULUCF) kaynaklanan CO₂ emisyonları ve IEA senaryolarındaki biyoenerji talebi IIASA tarafından GLOBIOM modeli kullanılarak değerlendirilmiştir (IIASA, 2022).

8.2 Metan emisyonları

GEC Modeli çerçevesindeki Küresel Metan İzleyici, fosil yakıtların (kömür, petrol ve doğal gaz) tedarikinden veya kullanımından ve biyoenerji (katı biyoenerji, sıvı ve biyogazlar kullanımından) kaynaklanan metan emisyonları için IEA tahminlerini üretmek için kullanılır. Metan emisyonlarının ana bölümleri için metodoloji aşağıdaki gibidir:

- **Upstream ve downstream petrol ve gaz** - Küresel petrol ve gaz faaliyetlerinden kaynaklanan metan emisyonlarını tahmin etme yaklaşımımız, ülke bazında üretim ve tüketim verilerine uygulanan ülkeye özgü ve üretim türüne özgü emisyon yoğunlukları oluşturmaya dayanmaktadır.
- **Kömür madeni metanı** - Kömür madeni metanı (CMM) emisyonlarına ilişkin tahminler, üç büyük kömür üreticisi ülke için madene özgü emisyon yoğunluklarından türetilmiştir. Bu şekilde oluşturulan maden düzeyindeki CMM tahminleri daha sonra bir araya getirilmekte ve uydu tabanlı ölçümlerden alınan ülke düzeyindeki tahminlerle karşılaştırılarak doğrulanmaktadır. Bu verilere dayanarak, kömür kalitesi (örneğin her bir maden tarafından üretilen kömürün kül içeriği veya sabit karbon içeriği), maden derinliği ve düzenleyici gözetim, güvenilir doğrudan tahminlerin bulunmadığı diğer ülkelerdeki madenler için CMM emisyon yoğunluklarını tahmin etmek için temel faktörler olarak kullanılmaktadır.

Yakıt yanmasından kaynaklanan emisyonlar (son kullanım) - Sabit ve mobil uygulamalarda yakıtların (biyoenerji dahil) kullanımından kaynaklanan metan emisyonları için tahminler IEA Enerjiden Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarından . alınmıştır. Yakıt yanmasından kaynaklanan CO₂ dışı tahmin edilmesi amacıyla 2006 IPCC Ulusal Sera Gazı Envanterleri Kılavuzundaki Kademe 1 metodolojisi benimsenmiştir. Enerji tedariki veya kullanımından kaynaklanan metan emisyonları tahminlerini geliştirmek için kullanılan metodoloji hakkında daha fazla bilgi için lütfen Küresel Metan İzleyici Dokümantasyonuna bakınız.

8.3 CO₂ dışı diğer sera gazı emisyonları

IEA senaryolarında hem CO₂ hem de CO₂ olmayan enerji ile ilgili sera gazı (GHG) emisyonlarının çoğu IEA'nın GEC Modeli kullanılarak modellenmiştir. Siyah karbon gibi diğer iklim kirleticilerinin önemli kaynaklarının yanı sıra biyojenik metan gibi IEA senaryolarıyla uyumlu arazi kullanımı ve tarımla ilgili sera gazları, IIASA tarafından GAINS modeli (IIASA, 2023) ve GLOBIOM modeli kullanılarak modellenmiştir.

Ağırlıklı olarak endüstriyel uygulamalarda kullanılan F-gazları gibi geri kalan tüm sera gazı emisyon türleri ve kaynakları için projeksiyonlar, IPCC 1,5 °C Küresel Isınma Özel Raporu'nun bir parçası olarak yayınlanan senaryo veri tabanı kullanılarak tamamlanmıştır (IPCC, 2018).

8.4 Hava kirliliği

GEC Modeli enerji senaryolarından kaynaklanan başlıca hava kirleticilerinin emisyonları IIASA ile birlikte çalışarak tahmin edilmiştir. IIASA GAINS modeli kullanılarak aşağıdaki yerel hava kirleticileri için tahminler yapılmıştır: sülfür dioksit (SO₂)¹, nitrojen oksitler (NO_x), siyah karbon ve PM_{2.5}. Daha fazla bilgi WEO *Enerji ve Hava Kirliliği* Özel Raporunda² ve yaklaşım, sonuçlar ve sağlık etkileri ile kirlilik kontrol maliyetleri hakkındaki bilgileri özetleyen önceki ayrıntılı raporda bulunabilir.

8.5 Küresel sıcaklık etkileri

GEC Model senaryolarında *sera gazı* ve aerosol emisyonlarından kaynaklanacak ortalama küresel yüzey sıcaklığı artışı, *Sera Gazı Kaynaklı İklim Değişikliği Değerlendirme Modeli* ("MAGICC")³ kullanılarak ve küresel bilim topluluğu tarafından kullanılan diğer araçlardan yararlanılarak Climate Resource Pty Ltd ile yakın işbirliği içinde gerçekleştirilmiştir. MAGICC iklim modelleri, IPCC tarafından yazılan değerlendirme raporlarında kapsamlı bir şekilde kullanılmıştır. Bu analizde kullanılan versiyon olan MAGICC7, IPCC'nin Altıncı Değerlendirme Raporu'nda (IPCC, 2021) kullanılmış ve burada Bölümler Arası Kutu 7.1'de açıklanmıştır.

¹ İnce partikül madde, çapı 2,5 mikrometre ve daha küçük olan partikül maddedir; solunum sistemine daha büyük partiküllerden daha fazla nüfuz ettikleri için PM_{2.5} veya solunabilir partiküller olarak da bilinir.

² <https://www.iea.org/reports/energy-and-air-pollution>

³ WEO-2021'de Climate Resource kaynaklı bilgiler Climate Resource Pty Ltd tarafından MAGICC7 kullanılarak sağlanmıştır. Ne Climate Resource ne de herhangi bir yetkilisi, çalışanı, yüklenicisi veya iştiraki, sağlanan iklim verilerinin doğruluğu, eksiksizliği veya güvenilirliği hakkında herhangi bir garanti veya taahhütte bulunmaz ve kullanımından kaynaklanan herhangi bir sorumluluk tamamen okuyucunun sorumluluğundadır.

Enerji ve CO₂ ayrışması

GEC Modeli, iki senaryo arasındaki veya zaman içinde bir senaryodaki enerji ve CO₂ emisyonlarındaki farkı ölçmek için kullanılan bir modül - ayrıştırma modülü içerir. Ayrıştırma analizi, analiz edilen senaryolar için nihai sonuçlar kullanılarak GEC Modelindeki tüm son kullanım sektörlerine (sanayi, ulaştırma, binalar ve tarım) ve dönüşüm sektörlerine (elektrik üretimi ve ısı üretimi, rafineriler, biyoyakıtlar, hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtlar, diğer enerji sektörleri) ex-post olarak uygulanır.

Senaryolar veya zaman içindeki noktalar arasındaki fark, enerji sistemindeki enerji tüketimini ve emisyonları azaltmaya yönelik önemli hafifletme önlemlerini temsil eden çeşitli "kaldıraçlara" paylaştırılmıştır. Bunlar şunları içerir:

- **Faaliyet:** ekonomik faaliyetten kaynaklanan enerji veya emisyon farkı ve hizmet talebindeki değişim, örneğin endüstriyel katma değer, kat edilen kilometre veya kullanılan zemin alanındaki artış.
- **Kaçınılan talep - kaynak verimliliği:** kaynak kullanımındaki verimlilik iyileştirmelerinden kaynaklanan enerji veya emisyon farkı, örneğin daha az çelik veya çimento talebine yol açan bina ömürlerinin uzatılması.
- **Kaçınılan talep - davranış:** davranışsal değişimler nedeniyle kaçınılan talepten enerji veya emisyon farkı. Daha fazla ayrıntı için lütfen Enerji talebi Bölümündeki (Bölüm 3) davranış değişikliği bölümlerine bakınız.
- **İklim etkisi:** İklim değişikliğinin sıcaklık değişiklikleri üzerindeki etkilerinden kaynaklanan bina sektöründeki enerji veya emisyon farkı. Değişen enerji kullanımını belirlemek için IPCC senaryosu sıcaklık projeksiyonları kullanılır.
- **Enerji verimliliği:** kullanılan teknolojilerin teknik verimlilik iyileştirmelerinden kaynaklanan enerji veya emisyon farkı. Örnekler arasında binaların yalıtımının iyileştirilmesi, daha yüksek verimlilik standartlarına sahip cihazların yaygınlaştırılması, yakıt ekonomisinin iyileştirilmesi veya daha verimli motorlar sayılabilir.
- **Yakıt değişimleri:** İçten yanmalı motorlardan elektrikli araçlara geçiş veya gaz kazanlarından ısı pompalarına geçiş gibi daha yüksek verimliliğe sahip olabilecek farklı teknolojilerin kullanılması da dahil olmak üzere, kullanılan yakıtın değiştirilmesinden kaynaklanan enerji veya emisyon farkı. Bu etki belirli yakıtlara göre daha da ayrıştırılır:
 - **Elektrifikasyon:** elektrikli araçların kullanımı veya verimlilik kazanımları dahil olmak üzere sanayide doğrudan elektrifikasyon gibi elektrik için değişikliklerin değerlendirilmesi. Emisyonlar için bu, doğrudan ayrıştırma (elektrik ve ısı sektöründen kaynaklanan emisyonlar hariç) veya dolaylı ayrıştırma (elektrik ve ısı sektöründen kaynaklanan emisyonlar dahil) şeklinde yapılabilir.
 - **Biyoenjerji:** örneğin elektrik üretiminde veya binalarda, ulaşımda veya sanayide yakıt olarak biyoenjerjiye yönelik değişikliklerin değerlendirilmesi.
 - **Diğer yenilenebilir kaynaklar:** diğer yenilenebilir kaynaklara yönelik değişikliklerin değerlendirilmesi, örneğin enerji üretimi için güneş PV ve rüzgar kullanımı veya binalarda güneş ısı kullanımı.
 - **Hidrojen:** örneğin ulaşım sektöründe veya enerji yoğun endüstrilerde hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtların kullanımına yönelik değişikliklerin değerlendirilmesi. Elektrolitik hidrojen bazlı çelik veya amonyak üretimi gibi yerinde hidrojen kullanımı da bu kola dahildir.
 - **Diğer yakıt değişimleri:** fosil yakıtlar veya nükleer arasında geçişler diğer yakıtlar için değişikliklerin değerlendirilmesi.
- **CCUS:** Karbon yakalama kullanımı ve depolamanın uygulanmasından kaynaklanan enerji veya emisyon farkı.

Ayrıştırma modülü ayrıca, modellenen her bir teknoloji veya stratejinin Teknoloji Hazırlık Seviyesini (TRL) kullanarak emisyon ve enerji değişikliklerini teknoloji olgunluk kategorisine göre paylaşırma yeteneğine sahiptir. TRL değerlendirmesi ETP Temiz Enerji Teknolojisi Kılavuzuna dayanmaktadır ve belirli bir yılda kullanılmakta olan teknolojileri mevcut TRL durumlarına göre dört kademede sınıflandırmaktadır: olgun, pazara giriş aşamasında

demonstrasyon veya hala bir prototip. TRL ayrımı, yakıt değişimi veya enerji verimliliği gibi kaldıraçların katkısını farklı teknolojik olgunluklara tahsis etmeyi ve böylece senaryolar arasındaki veya bir senaryo içinde zaman içindeki boşluğu kapatmak için inovasyonda daha fazla ilerlemeye ihtiyaç duyulan yerleri vurgulamayı mümkün kılar. Yalnızca davranışsal önlemlerden elde edilen tasarruflar bir TRL'ye tahsis edilmemiştir, çünkü bunlar temel olarak kullanılan teknolojiler tarafından değil, son kullanıcıların davranışlarındaki değişimler tarafından yönlendirilmektedir.

Ayrıştırma modülü, belirli bir yıl için referans ve karşılaştırma noktası (başka bir senaryo veya bir önceki yıl) arasındaki farkı temel kaldıraçlara göre ayırmak için Logaritmik Ortalama Bölünme Endeksi (LMDI) yaklaşımına bağlıdır (Ang, 2004). Bu yaklaşım, farklı etkileri ayıran ve değerlendirilen kaldıraçları birbirinden ayıran Kaya denklemine dayanmaktadır. Kaya denklemi sektöre göre değişebilir ancak CO₂ emisyonları için örnek olarak her bir teknoloji (t) için faaliyet (A) ve enerji (E) ile aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$CO_{2,t} = A_t^* \cdot E_t^* \cdot \frac{CO_2}{A \cdot E}$$

Bu denklemde çarpanlar faaliyeti (A), yapısal değişiklikleri (S), enerji yoğunluğunu (I) ve CO₂ yoğunluğunu (C) temsil etmektedir. Bu çarpanlar, değerlendirilen yukarıda belirtilen tüm kilit kaldıraçları hesaplamak için işlenebilir ve daha da ayrıştırılabilir.

Bir referans (ref) ve bir karşılaştırma noktası (comp) arasındaki farka LMDI fonksiyonunun uygulanması, bu senaryolar arasındaki emisyonlar için aşağıdaki farka açar:

$$CO_{2(t,comp)} - CO_{2(t,ref)} = \omega_t \left[\ln \left(\frac{A_{comp}}{A_{ref}} \right) + \ln \left(\frac{S_{comp}}{S_{ref}} \right) + \ln \left(\frac{I_{comp}}{I_{ref}} \right) + \ln \left(\frac{C_{comp}}{C_{ref}} \right) \right],$$

ile

$$\omega_t = \frac{CO_{2(t,comp)} - CO_{2(t,ref)}}{CO_{2(t,comp)} - \ln CO_{2(t,ref)}}$$

Bu formüller, CO₂ yoğunluğu terimi olmaksızın, enerji ayrıştırması için benzer şekilde tanımlanır. Senaryolar arasında bir ayrıştırma için, karşılaştırma ve referans olmak üzere iki senaryo karşılaştırılan noktalardır, örneğin NZE Senaryosu ve STEPS. Bir senaryonun zaman içinde ayrıştırılması için, karşılaştırma ve referans noktaları aynı GEC Model senaryosunu kullanır, ancak her bir yıl adımı için kaldıraçları hesaplamak üzere aralarında sadece 1 yıllık bir gecikme vardır (örneğin, "t" deki değerleri referans olarak "t-1" deki değerlerle karşılaştırmak). Bir hedef yıldaki etkilerin hesaplanması için, temel yıldan sonraki dönem için yıllık etkiler biriktirilir.

Ayrıştırma modülü, yüksek teknolojik çözünürlüğü dikkate alarak, yani modellenen her bölge için son kullanım teknolojisi ve yakıt bazında etkileri hesaplar. Bu çerçeve, elektrik üretiminden kaynaklanan emisyonları yansıtan dolaylı veya doğrudan ayrıştırma veya örneğin elektrifikasyon gibi yakıt değişiminden kaynaklanan enerji verimliliği iyileştirmeleri gibi etkiler arasındaki bağlantıların hesaplanmasını mümkün kılmaktadır. Sektörel, bölgesel veya küresel düzeydeki sonuçlar, ilgili katkıların toplanmasıyla elde edilir.

10.1 Yakıt tedariki ve enerji sektörüne yatırım

Yatırım, yakıt üretimi ve elektrik üretim kapasitesinin yanı sıra altyapıya yönelik devam eden sermaye harcamaları olarak ölçülmektedir. Senaryolara göre yatırım gereksinimleri tahminleri GEC Modeli enerji arz ve talep modüllerinden elde edilmiştir.

Elektrik üretimi ve yakıt tedariki için yatırım gereksinimlerinin hesaplanması, her bölge için aşağıdaki adımları içermiştir:

- Üretim, taşıma ve (uygun olan yerlerde) dönüştürme için yeni kapasite ihtiyaçları, öngörülen talep eğilimleri, gelecekte gerekli arz, mevcut arz altyapısının tahmini emeklilik oranları ve petrol ve gaz üretimindeki düşüş oranları temelinde hesaplanmıştır.
- Tedarik zincirindeki her bir bileşen için birim sermaye maliyeti tahminleri derlenmiştir. Daha sonra bu maliyetler, teknoloji kaynaklı maliyet azaltma potansiyelinin ayrıntılı bir analizine ve ülkeye özgü faktörlere dayalı olarak öngörülen değişim oranları kullanılarak projeksiyon döneminin her yılı için ayarlanmıştır.
- Artan kapasite ihtiyaçları birim maliyetlerle çarpılarak, varlıklar inşa edilmiş ve bir gecede faaliyete geçmiş gibi ihtiyaç duyulan yatırım miktarı elde edilmiştir.
- Son olarak, teknoloji ve ülkeye/bölgeye özgü harcama profilleri kullanılarak, günlük yatırım ihtiyaçları her bir varlık için tahmin edilen inşaat teslim sürelerine eşit olarak dağıtılmıştır ve biz bunu "yatırım harcaması" olarak adlandırıyoruz.

İçinde bulunduğumuz on yıldaki yatırım tahminleri, halihazırda kararlaştırılmış projeleri ve devam etmekte olan harcamaları dikkate almaktadır. Sermaye harcamalarına dayalı bu yaklaşım tedarik alanları arasında farklılık gösterebilir. Elektrik üretimi gibi bazı sektörler için yatırım, yeni bir tesisin inşasına başlandığı veya mevcut bir tesisin iyileştirildiği yıldan faaliyete geçtiği yıla kadar yayılır. Yukarı akış petrol ve gaz ve sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) projeleri gibi diğer kaynaklar için yatırım, tipik olarak yeni bir kaynaktan üretim artarken veya mevcut bir varlıktan elde edilen çıktıyı korumak için yapılan sermaye harcama profillerini yansıtır.

GEC Modelini kullanan görünümün amaçları doğrultusunda, yatırım yalnızca sermaye harcaması olarak tanımlanır. Genellikle işletme, bakım veya finansman maliyetlerini karşılamaya yönelik harcamalar olarak sınıflandırılan harcamaları içermez.

10.1.1 Kısa vadeli petrol ve doğal gaz upstream yatırımı

Upstream yatırım tahminleri aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya yaklaşımlarının bir kombinasyonuna dayanmaktadır. Birincisi, sektörün mevcut fiyatlara ve yeni kapasite ihtiyacına yanıt olarak ne kadar yatırım yapmayı planladığını belirlemek ve bunun sonucunda üretim kapasitesine yapılacak ilavelerin bir değerlendirmesini yapmak amacıyla gelecekte petrol ve gaz endüstrisi yatırım planlarının ve beklentilerinin ayrıntılı bir analizini içerir.

Bu analiz, önde gelen 80'den fazla upstream petrol ve gaz şirketinin (ulusal ve uluslararası şirketler ile salt arama ve üretim şirketleri) sermaye harcama programlarının 2000'den 2023'e kadar olan fiili sermaye harcamalarını ve mevcut olduğunda gelecekteki harcama planlarını veya tahminlerini kapsayan bir araştırmaya dayanmaktadır. Şirketler, üretim ve rezervleriyle ölçülen büyüklüklerine göre seçilmiştir, ancak coğrafi yayılım ve veri mevcudiyeti de bir rol oynamıştır. Ankete katılan şirketler dünya petrol ve gaz üretiminin dörtte üçünden fazlasını gerçekleştirmektedir. Toplam endüstri yatırımı, her yıl için dünya petrol ve gaz üretimindeki paylarına göre şirketlerin harcamaları yukarı doğru ayarlanarak hesaplanmıştır. Veriler

Şirketlerin yıllık ve mali raporlarından, kurumsal sunumlarından, basın raporlarından, ticari yayınlardan ve sektördeki doğrudan temaslardan elde edilmiştir.

Tablo 10.1► Yakıt tedarik yatırımına dahil edilen alt sektörler ve varlıklar

Alt sektör	Varlıklar
Petrol ve gaz	• Yukarı akış petrol • Yukarı akış gaz • Orta akım petrol (boru hatları) • Orta akım gaz (boru hatları ve LNG) • Rafineri (yeşil alan) • Arıtma (yükseltme ve bakım) • Flaring • Yukarı akım elektrifikasyonu • Metan azaltımları
Kömür arzı	• Kömür madenciliği • Kömür taşımacılığı
Düşük emisyonlu yakıtlar	• Biyogazlar • Sıvı biyoyakıtlar • Hidrojen ve hidrojen bazlı yakıt üretimi • Hidrojen altyapısı

Not: LNG= sıvılaştırılmış doğal gaz.

10.1.2 Yakıt tedarikine uzun vadeli yatırım

Uzun vadeli petrol, gaz, kömür ve düşük emisyonlu yakıt yatırım gereksinimlerine ilişkin projeksiyonlar ilgili arz tarafı modüllerinde oluşturulur. Yatırım seviyesi, belirli bir ülke, bölge ve yılda öngörülen talep seviyesini karşılayacak şekilde belirlenir. Metodoloji, zaman içinde alınan yeni üretim kapasitesi, yaratılan nakit akışı ve gerekli yatırımlar arasında doğrudan bir bağlantı kurar. Yeni kapasitenin maliyeti bir dizi değişkenden tahmin edilmektedir: rezervlerin büyüklüğü, tükenme derecesi, kaynağın konum türü, kullanılan teknoloji, teknoloji öğrenimi ve maliyet değişiklikleri için temel varsayımlar (petrol ve gaz arz tarafı modüllerinde petrol fiyatlarının bir fonksiyonu olan). Elektrolizden düşük karbonlu hidrojen üretimi, fosil yakıtlar (karbon yakalama, kullanma ve depolama [CCUS] ile donatılmış) ve altyapı dahil olmak üzere hidrojen bazlı tedarik ile ilgili yatırımlar için daha ayrıntılı bir projeksiyon yapılmıştır.

10.1.3 Enerji sektörü yatırımı

Artan elektrik talebini karşılamak, karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşmak ve eskimiş üretim varlıklarını ve şebeke altyapısını değiştirmek veya yenilemek için görünüm dönemi boyunca enerji sektöründe büyük yatırımlara ihtiyaç duyulacaktır. Üretim varlıklarına yapılan gecelik yatırımlar, her bir üretim teknolojisi için sermaye maliyetinin (USD/kW), modellenen her bir bölge/ülke için ilgili kapasite ilaveleri veya değiştirme/yenileme ile çarpılmasıyla yapılan basit bir hesaplamadır. Yatırım harcamaları daha sonra inşaatın başlangıcında veya finansal kapanışta başlayan ve bir varlık faaliyete geçtiğinde sona eren harcama profillerine dayalı olarak zamana yayılır.

Elektrik üretim sektöründe varsayılan sermaye maliyetleri, mevcut en son ülke verilerinin gözden geçirilmesine ve projeksiyon dönemi boyunca bunların gelişimine ilişkin varsayımlara dayanmaktadır. Bunlar tüm teknolojiler için gecelik maliyetleri temsil etmektedir. Yenilenebilir kaynaklar ve CCUS tesisleri ile donatılmış santraller için öngörülen yatırım maliyetleri

farklı senaryolardaki çeşitli dağıtım seviyelerinden kaynaklanmaktadır. Bölgelere göre tüm teknolojiler için gösterge niteliğindeki gecelik maliyetler ve diğer ilgili yatırım varsayımları GEC Modeli temel girdi verileri sayfasında bulunabilir.

Verilerin mevcut olduğu ülkeler için, büyük şirketlerin iletim ve dağıtım için yaptıkları yıllık harcamalar, hem kapasite artırımlarını hem de yenilemeleri kapsayacak şekilde doğrudan hesaplamalara dahil edilmiştir.

Tablo 10.2► Enerji sektörü yatırımlarına dahil edilen alt sektörler ve varlıklar

Alt sektör	Varlıklar
Fosil yakıt bazlı enerji üretimi	- Kömür yakıtlı enerji - CCUS ile kömür yakıtlı enerji - Gaz yakıtlı güç - CCUS ile gaz yakıtlı güç - Petrol yakıtlı güç - Yenilenemeyen atıklar
Nükleer enerji üretimi	- Nükleer enerji santralleri (greenfield) - Uzun vadeli operasyonlar için yenileme ve iyileştirmeler
Yenilenebilir enerji üretimi	- Biyoenerji - Hidroelektrik - Rüzgar (karada ve açık denizde) - Jeotermal - Solar PV (şebeke ölçeğinde; konut, ticari ve diğer dağıtılmış) - Güneş enerjisi - Denizcilik - Büyük ölçekli ısı pompaları
Elektrik şebekeleri	- Şanzıman - Dağıtım - Kamuya açık elektrikli araç şarj cihazları
Akü depolama	Kamu hizmeti ölçeği ve binalar

Notlar: CCUS= karbon yakalama, kullanma ve depolama; PV= fotovoltaiik; EV = elektrikli araç.

10.2 Talep yönlü yatırımlar

Talep tarafı yatırımları tipik olarak enerji verimli son kullanım ekipmanı satın almak veya alternatif yakıtı geçmek için gereken ek harcama olarak hesaplanır. Devam eden harcamaların, varlıkların faaliyete geçmesiyle aynı yıl içinde gerçekleştiği varsayılır. Verimlilik için, bu tipik olarak varlığın tüm sermaye değerini içermez, daha ziyade bir temel çizgiden daha verimli olan ekipmanı tedarik etmek için yatırılan tutarı (vergiler ve nakliye maliyetleri dahil) içerir. Yatırım maliyeti, doğrudan kurulumla ilgili olan işçilik maliyetlerini içerirken, maliyet tahminine dahil edilen idari prosedürler, yasal koruma ve sınır izinlerinden kaynaklanan ek maliyetler de ortaya çıkabilir. Başka bir deyişle, bu hesaplama ya projeksiyon dönemi boyunca tüketicilerin daha yüksek enerji verimliliği için ödemesi gereken ek ya da varlığın temiz enerji bileşeninin tahmini değerini yansıtmaya eğilimindedir (örneğin, elektrikli araçlara yapılan yatırım sadece batarya paketinin sermaye maliyetine dayalı olarak tahmin edilir).

GEC Model bölgelerinde ve her bir son kullanım sektörü (sanayi, ulaştırma ve binalar) için, daha yüksek verimlilik seviyelerine geçmek için gereken yatırım analiz edilmiştir. Analiz, sanayideki alt sektörler, ulaşım modları ve binalardaki son kullanımlar gerekli olan yatırım maliyeti, stok cirosu ve ekonomik getiriye dayanmaktadır. Örneğin, karayolu taşımacılığı sektöründe, verimlilik iyileştirmelerinin ve alternatif yakıtlı araçlara geçişin maliyetleri, her bir seçeneğin maliyetini belirlemek için modele girdi olarak kullanılmıştır.

rekabet edebilirlik. Bu analizin sonucuna göre yatırım ihtiyaçları, her yıl satılan araç sayısı ile her bir aracın temiz enerji kısmının maliyeti çarpılarak belirlenir.

Enerji verimliliğine ek olarak, son kullanım yatırımları arasında yenilenebilir enerjilerin doğrudan kullanımı, elektrikli araçlar, binalarda/sanayide elektrifikasyon, hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtların kullanımı ve sanayide CCUS yer almaktadır.

Talep modeli çıktıları, her bölge ve son kullanım sektörü için ek yıllık sermaye ihtiyaçlarını içerir. Enerji tasarrufunun tüketicilerin faturaları üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Sektörel son kullanıcı fiyatları (vergiler dahil), politikaların zaman içinde tüketiciler üzerindeki genel etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır. Sonuçlar ayrıca ana ithalatçı ülkeler üzerindeki etkiyi de .

Tablo 10.3► Nihai kullanım enerji yatırımlarına dahil edilen alt sektörler ve varlıklar

Sektör	Alt sektör
Binalar	- Enerji verimliliği (bina zarfları ve dahil) - Elektrifikasyon - Son kullanım için yenilenebilir enerji kaynakları - Hidrojen bazlı kullanım
Endüstri	- Enerji verimliliği - Elektrifikasyon - Son kullanım için yenilenebilir enerji kaynakları - CCUS - Hidrojen bazlı kullanım - Fosil yakıt bazlı sanayi tesisleri
Nakliye	- Karayolu ve demiryolu taşımacılığında enerji verimliliği - Karayolu ve demiryolu taşımacılığı ile uluslararası deniz taşımacılığının elektrifikasyonu - Hidrojen ve hidrojen bazlı karayolu taşımacılığı ve nakliye

10.3 Yatırımlar için finansman

10.3.1 Finansman kaynakları

Yükselen ve Gelişen Temiz Enerji Geçişlerinin Finansmanı Ekonomilerde raporunda 2021 yılında yapılan analize dayanarak, 2024 yılında yatırımlarla ilgili finansman kaynaklarının güncellenmiş bir değerlendirmesi .

Finansman kaynakları beş geniş parametre üzerinden tanımlanmaktadır:

- **muhasabe uygulaması:** bilanço içi finansman ve bilanço dışı finansman arasında ayrım yapıyoruz. Çoğu teknoloji için, bilanço dışı finansman proje finansmanına karşılık gelirken, bilanço içi finansman kurumsal finansmana karşılık gelmektedir. Ancak, bu metodolojiyi belirli son kullanım teknolojileri için uyarladık. Örneğin, binalarda bilanço dışı finansman güçlendirme, bilanço içi finansman ise inşaata karşılık gelmektedir.
- **finansman kaynakları:** Bunlar fonların nihai tedarikçileridir ve ticari, kamu ve Kalkınma Finansmanı Kurumları (DFI) finansmanı arasında bölünmüştür. "Ticari finansman", ticari bankalar ve finans alınan borçların yanı sıra özel işletmeler ve hane halkları tarafından yapılan öz sermaye yatırımlarını (nakit ve tasarruflar dahil) içerir. Ayrıca, devlete ait bankalar, devlet varlık fonları ve emeklilik fonları gibi kamu finans kuruluşlarından sağlanan bir miktar finansmanı da içermektedir.

Özellikle güçlü sanayi politikalarına sahip gelişmekte olan ekonomilerde kredilendirme. "Kamu finansmanı" özel şirketlerdeki ve kamu iktisadi teşebbüslerindeki kamu hisselerini, devlet sübvansiyonlarını ve vergi teşviklerini ve ihracat kredi kuruluşları gibi bazı devlete ait finans kuruluşlarının yanı sıra merkez bankalarından sağlanan finansmanı içerir. Finansman ayrıca açık bir kalkınma görevi olan DFI'lardan da gelmektedir. DFI'lar yerel (Brezilya'daki BNDES ve Endonezya'daki PTSMI örneğinde gibi) veya uluslararası olabilir ve ikincisi iki taraflı (Agence Française de Développement, Almanya'nın KfW'si ve Japonya Uluslararası İşbirliği Ajansı gibi) veya çok taraflı (Dünya Bankası, Asya Kalkınma Bankası veya Afrika Kalkınma Bankası gibi) olabilir.

- **yatırım kaynakları:** Yatırım kaynakları, genellikle varlık sahibi oldukları veya olacakları için yatırım kararını veren kuruluşlardır. Finansman kaynakları ise bu yatırım için finanssağlayan kuruluşlardır. Üç tür kuruluş arasında ayırım yapıyoruz: kamu (devlete ait şirketler veya devlete ait varlıklar dahil), şirketler ve hanehalkları. Örneğin, çatı üstü güneş enerjisine yatırım yapan bir hane halkı bunu kendi tasarruflarıyla, bir finans kuruluşundan borç alarak veya bir kamu sübvansiyonuyla finanse edebilir. Her durumda yatırımın kaynağı hane halkıdır, ancak borçlanma için finansman kaynağı "ticari finansman" ve sübvansiyonlar için "kamu finansmanı" dır.
- **sermaye yapısı:** Sermaye yapısı, bir şirketin kendisini finanse etmek için kullandığı borç ve özkaynakların belirli bir kombinasyonudur. Belirli bir sektör/coğrafya için ölçülen borç ve öz sermaye payları, hem proje finansmanı işlemlerinin hem de kurumsal bilançonun sermaye yapısını dikkate alır.
- **sağlayıcının kaynağı:** Yurtiçi finansman ve uluslararası finansman arasında ayırım yapıyoruz.

Tahmin yaklaşımı hakkında daha fazla ayrıntı için lütfen *Dünya Enerji Yatırımı 2024* Metodoloji Ekine .bakınız

10.3.2 Finansman maliyeti

GEC Modeli, tedarik, enerji ve nihai kullanım sektörlerindeki bölgeler arasında sermaye maliyetine ilişkin farklılaştırılmış varsayımlar içermektedir. Örneğin, bazı ülkeler APS'deki petrol ve gaz faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonları en aza indirmeye çalıştıkça, bu durum diğer üreticilere göre üretim maliyetlerini artırmakta ve çoğu durumda ek finansman maliyetleri de içermektedir (STEPS'te varsayılanlara kıyasla). Bölüm 4'te açıklandığı üzere, GEC Modeli ülkeleri/bölgeleri genelinde güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi için finansman maliyetlerindeki düşüşü yansıtmak üzere ayrıntılı bir analiz yapılmıştır. Enerji verimliliğine yönelik yatırım kararları, tüketicilerin (konutlar ve araçlar için), gayrimenkul sektöründeki işletmelerin (ticari binalar için) ve GEC Model bölgelerindeki farklı sanayi sektörlerinden şirketlerin karşılaştığı geçerli borç ve öz sermaye finansman maliyetlerine ilişkin tahminleri yansıtmaktadır. Finansman maliyetleri, ağırlıklı ortalama sermaye maliyeti (WACC) kullanılarak hesaplanan vergi öncesi terimlerle ifade edilmektedir:

$$MMACC_{real} = \frac{1 + (C_e \times w_e + C_d \times w_d)}{1 + inflation} - 1$$

Nerede
?

C_e	Özkaynak maliyeti
C_d	Borç maliyeti
w_i	Sermaye yapısında borç veya özkaynak payı

Petrol ve gaz endüstrisinde olduğu gibi, fiyatların ve dayanak sözleşmelerin büyük ölçüde uluslararası para birimleri (örneğin ABD doları) cinsinden olduğu sektörler için maliyet bileşenleri, ülke ve sektörel ayarlanmış olgun piyasa risksiz oranları kullanılarak tahmin edilmiştir. Enerji ve son kullanım gibi fiyatların ve temel sözleşmelerin yerel para birimleri cinsinden olduğu sektörler için maliyet bileşenleri, ülke ve sektör risklerine göre ayarlanmış yerel piyasa risksiz faiz oranları kullanılarak tahmin edilmiştir. Nominal veriler Fischer Denklemi kullanılarak reel terimlere dönüştürülmüştür. Farklı enerji sektörleri için AOSM bileşenlerinin tahmin , finansal piyasalardan ve akademik literatürden elde edilen verileri yansıtmaktadır,

piyasa uzmanları ve uygulayıcılarla yapılan görüşmelerle tamamlanmıştır. Buna ek olarak, enerji sektörü görünümü için farklılaştırılmış AOSM'ler, ihale sonuçlarının ve enerji satın alma anlaşması (PPA) fiyatlandırmasının analizini içermektedir.

$$CO_{2,t} = A_t \cdot \frac{E_t}{A_t} \cdot \frac{CO_2}{E_t} \cdot \frac{CO_{2,t,comp} - CO_{2,t,ref}}{CO_{2,t,comp} - CO_{2,t,ref}} \cdot \ln \left(\frac{A_{comp}}{A_{ref}} \right) + \ln \left(\frac{S_{comp}}{S_{ref}} \right) + \ln \left(\frac{I_{comp}}{I_{ref}} \right) + \ln \left(\frac{C_{comp}}{C_{ref}} \right) ,$$

$$= \frac{CO_{2,t,comp} - CO_{2,t,ref}}{\ln CO_{2,t,comp} - \ln CO_{2,t,ref}}$$

11.1 Modern enerji erişiminin tanımı

Modern enerji erişiminin uluslararası kabul görmüş ve benimsenmiş tek bir tanımı yoktur. Yine de tanımlar arasında önemli ortak noktalar bulunmaktadır:

- Hane halkının asgari düzeyde elektriğe erişimi
- Hanelerin daha güvenli ve sürdürülebilir (yani sağlık ve çevre üzerinde mümkün olan en az zararlı etkiye sahip) pişirme ve ısıtma yakıtlarına ve ocaklarına erişimi
- Tarım, tekstil ve diğer endüstriler için mekanik güç gibi üretken ekonomik faaliyetleri mümkün kılan modern enerjiye erişim
- Sağlık tesisleri, okullar ve sokak aydınlatması için elektrik kamu hizmetleri için modern enerjiye erişim.

Tüm bu unsurlar ekonomik ve sosyal kalkınma için hayati öneme sahiptir ve bazen toplu olarak "arz kalitesi" olarak adlandırılan teknik kullanılabilirlik, yeterlilik, güvenilirlik, uygunluk, güvenlik ve satın alınabilirlik gibi bir dizi ilgili konu da aynı şekilde önemlidir.

GEC Modelinden elde edilen veriler ve projeksiyonlar enerji erişiminin iki unsuruna odaklanmaktadır: hanelerin asgari düzeyde elektriğe ve temiz pişirme tesislerine . IEA enerji erişimini "*bir hanenin hem temiz pişirme tesislerine hem de başlangıçta temel bir enerji hizmetleri paketini sağlamaya yetecek ve hizmet seviyesi zaman içinde artabilecek elektriğe güvenilir ve uygun fiyatlı erişime sahip olması*" olarak tanımlamaktadır. Bu enerji erişimi tanımı, SKH 7.1 hedefine yönelik ilerlemeyi ölçmek için bir ölçüt ve IEA'nın ileriye dönük analizleri için bir metrik görevi görmektedir.

Elektriğe erişim, bir hanenin başlangıçta temel bir enerji hizmetleri paketine (en azından birkaç ampul, telefon şarjı, bir radyo ve potansiyel olarak bir vantilatör veya televizyon) güç sağlamak için yeterli elektriğe erişmesini gerektirir; bu da verimlilik seviyelerine bağlı olarak hane başına yılda yaklaşık 50-75 kWh aralığına eşdeğerdir ve hizmet seviyesi zaman içinde artabilir. Projeksiyonlarımızda, "temel paket" ve "genişletilmiş paket" orta vadede elektrifikasyon planlarını genişletme ihtiyacına da izin vermektedir. Temel paket, günde dört saat boyunca dört ampul, günde üç saat boyunca bir vantilatör ve günde iki saat boyunca bir televizyon içermektedir; bu da hane başına yılda yaklaşık 500 kWh'ye denk gelmektedir. Bu, 50 Wp ve üzeri Güneş Enerjili Ev Sistemleri (SHS) veya küçük bir fosil jeneratör ile sağlanabilir. Genişletilmiş paket, bir buzdolabı, dört saat aydınlatma, dört saat TV ve altı saat vantilatör anlamına gelir; bu da hane başına yılda yaklaşık 1 250 kWh'ye eşittir ve bir fosil jeneratör veya 100 Wp'den daha büyük bir SHS tarafından sağlanabilir. Bu hizmet seviyesi tanımı gerçek verilerin ölçümüne uygulanamaz çünkü gerekli veri seviyesi çok sayıda vakada mevcut değildir. Sonuç olarak, tarihi elektrik erişim veritabanlarımız, bir elektrik şebekesine bağlantısı olan veya yukarıda belirtilen asgari enerji hizmetleri paketini sunmak için yeterli kapasiteye sahip yenilenebilir bir off- veya mini-şebeke bağlantısına sahip olanların daha basit, ikili bir ölçüsüne odaklanmaktadır. Örneğin, şebekeden bağımsız güneş enerjisi söz konusu olduğunda, erişim oranlarına yalnızca 10 Wp'nin üzerinde kapasiteye sahip SHS'ler dahil edilmektedir. Daha fazla tanım için IEA "Geliştirilmiş Elektrik Erişim İstatistikleri Kılavuzu"na bakınız.

Temiz pişirme tesislerine erişim, doğal gaz, LPG, elektrik ve biyogaz dahil olmak üzere modern yakıtlara ve teknolojilere veya yemek pişirmek için geleneksel üç taşlı ateşlere göre önemli ölçüde daha düşük emisyonlara ve daha yüksek verimliliğe sahip ISO Kademesi ≥ 3 olan geliştirilmiş biyokütle ocaklarına (ICS) erişim (ve birincil kullanımı) anlamına gelir. Şu anda birçok ICS modeli, özellikle gerçek dünyadaki pişirme koşullarında bu düşük emisyon hedefine ulaşamamaktadır. Bu nedenle, temiz pişirme erişimi tarihi veritabanımız, yemek pişirmek için öncelikle biyokütle (yakacak odun, odun kömürü, ağaç yaprakları, mahsul artıkları ve hayvan gübresi gibi), kömür veya gazyağı yakıtlara dayanan haneleri ifade etmektedir. Projeksiyonlarımız için, yalnızca önemli iyileştirmeler sağlayan en gelişmiş biyokütle ocakları

enerji erişimine katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Geçmiş veriler için ana kaynaklar WHO Hanehalkı Enerji Veritabanı ve IEA Enerji Dengeleridir.

11.2 Modern enerjiye erişim için genel görünüm

SDG 7.1 hedefine ulaşmak için bir yol sağlayan IEA NZE Senaryosunda elektriğe ve temiz pişirmeye evrensel erişimin her ikisi de 2030 yılına kadar elde edilir. APS'de, resmi ulusal temiz pişirme ve elektriğe erişim hedeflerine tam olarak ve zamanında ulaşılarak, NZE Senaryosundaki SKH 7.1 hedefleri ve STEPS'teki mevcut uygulama çabaları ile mevcut hedeflerin karşılaştırılması sağlanmıştır.

Elektriğe erişim için görünüm

IEA'nın elektriğe erişim veritabanı¹ çok sayıda ülkede elektriğe mevcut erişim oranları hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Önümüzdeki on yıllarda elektriğe erişim için bir görünüm sağlamak amacıyla, ülkelere göre erişim oranlarının gelişimini tahmin etmek için bir model geliştirilmiştir. Projeksiyonlar, farklı ülkelerin tarihsel oranlarını, anlamlılık düzeylerini test etmek için birçok değişkene göre gerileten ekonometrik bir panel modeline dayanmaktadır. İstatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilen ve dolayısıyla denklemlere dahil edilen değişkenler kişi başına düşen gelir, demografik büyüme, kentleşme, yakıt fiyatları, sübvansiyon düzeyi, teknolojik gelişmeler, enerji tüketimi, enerji erişim programları ve politikalarıdır.

Elektriğe daha uygun erişim yollarını belirlemek için IEA, elektriksiz nüfuslara bağlantı sağlayan en düşük maliyetli yolu belirlemek için ülke bazında mevcut en son coğrafi verileri kullanır. Kamuya açık OnSSET modelini kullanan bu değerlendirme, her yerleşim yeri için en düşük maliyetli çözümleri seçmek amacıyla şebekeye olan mesafeleri, beklenen talebi, nüfus yoğunluğunu ve mevcut kaynakları dikkate almaktadır. Daha sonra, şebeke ve şebeke dışı sistemlerin erişim sağlayabileceği potansiyel hız; sanayi, tarım veya ulaşım gibi diğer sektörleri eş zamanlı olarak elektrikleştirme potansiyeli; güvenilirliği, esnekliği ve arz kalitesini en üst düzeye çıkarmak için en uygun çözüm ve farklı yatırımcılar ve satıcılar için yatırımın çekiciliği gibi diğer önemli göstergeleri de hesaba katar.

Elektrik erişimindeki yatırım gereksinimleri, teknoloji ve en son teknoloji maliyetine göre erişim kazanan nüfus temelinde modellenmiştir. Yatırımlar, elektrik üretim birimleri (şebeke, mini-şebekeler ve bağımsız sistemler için), iletim (şebekeler için) ve dağıtım (şebekeler ve mini-şebekeler için) hatları olarak ilk erişimi elde eden nüfus için tedarik altyapıları maliyetini içermektedir.

Temiz pişirme erişimi için görünüm

Temel temiz pişirme erişim verilerimiz, katı yakıtlara bağımlılığa ilişkin WHO Hanehalkı Enerji Veritabanı tahminlerine dayanmaktadır.² Önümüzdeki on yıllarda geleneksel biyokütle, kömür ve gazyağı kullanımına güvenen insan sayısına ilişkin bir görünüm sağlamak için, farklı varsayımlar altında bölgesel bir model geliştirilmiştir. Farklı ülkelerin biyokütleyle bağımlılık oranları, tarihsel bir zaman serisinden tahmin edilen ekonometrik bir panel modeli kullanılarak öngörülmüştür. İstatistiksel olarak anlamlı bulunan ve dolayısıyla denklemlere dahil edilen değişkenler kişi başına düşen gelir, demografik büyüme, kentleşme düzeyi, alternatif modern yakıtların ve pişirme ekipmanlarının fiyat düzeyi, alternatif modern yakıt ve teknolojilere verilen sübvansiyonlar, teknolojik ilerlemeler ve temiz pişirme programları ve politikalarıdır. Enerji erişim analizi ve metodolojisi hakkında daha fazla ayrıntı için özel web sitesine bakınız: <https://www.iea.org/topics/energy-access>. Temiz pişirmeye erişim için yatırım gereksinimleri, teknoloji ve en son teknoloji maliyetleri ile erişim kazanan nüfus temelinde modellenmiştir. Yatırımlar, ocaklar ve biyodiziciler gibi son kullanım ekipmanlarının yanı sıra LPG (birincil depolama üniteleri, yeniden doldurma ve ikincil depolama, tüpler .) ve elektrik (elektrikli pişirmeye güç sağlamak için ek üretim ve hatlar) için altyapıları içermektedir.

¹ <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-electricity>

² Daha fazla bilgi için bkz. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/who-household-energy-db>

İstihdam

IEA, 2020 yılında bir enerji istihdam modülü eklemiş ve 2022 yılında GEC Model çerçevesi ile Vensim'e daha kapsamlı bir entegrasyon ve aktarımı tamamlamıştır. İstihdam modellemesi artık farklı IEA senaryoları altında her bir GEC Model bölgesi için 42 enerji alt sektörünü kapsamaktadır. Model şu anda analiz etmektedir:

- Şu anda kaynak tedarikinde (kömür, petrol, gaz, biyoenerji, nükleer yakıt tedariki, kritik mineraller ve hidrojen dahil), enerji sektöründe (üretim, iletim, dağıtım ve depolama) ve başlıca son kullanım sektörlerinde (araç üretimi ve binalar ve sanayi için enerji verimliliği) istihdam edilen kişi sayısı; ve
- Yeni altyapı yatırımlarının kaydırılması, enerji emtialarının üretimi ve enerji varlıklarının işletilmesinin doğrudan bir sonucu olarak bu sektörlerdeki iş kayıplarının ve kazançlarının sayısı.

12.1 İstihdamın tanımı ve kapsamı

İstihdam literatürü tipik olarak iş yaratma etkilerini aşağıdaki şemaya göre sınıflandırır:

- **Doğrudan:** Nihai bir proje veya ürün sunmak için yaratılan işler.
- **Dolaylı:** Nihai bir proje veya ürüne girdi sağlamak için oluşturulan tedarik zinciri işleri.
- **Uyarılmış:** Projelerden kazanılan ve ekonominin diğer bölümlerinde harcanan ücretlerle yaratılan işler, böylece ek işler yaratılır.

İstihdam analizimiz tüm doğrudan işleri ve temel enerji üreten veya enerji kullanan teknolojileri üreten tedarikçilerden gelen dolaylı işleri içermektedir. Diğer dolaylı işler ve uyarılmış işler dahil edilmemiştir. İstihdam literatüründe, dolaylı işler bazen başka bir iş için temel bir kolaylaştırıcı olan ekipman satın alınmasıyla "desteklenen" işleri içerir. Örneğin, otomobil üretimi, teslimat ve taksi şoförlüğü işleri için önemli bir kolaylaştırıcıdır. Bu "desteklenen" işler analizimize dahil edilmemiştir. Bu, enerji yatırımının yeni projeler sunmak için yarattığı işler veya mevcut enerji tesislerini işletmek için gereken işler etrafında net bir sınır belirler.

İşler, tutarlı hesaplama için tam zamanlı istihdama (TZE) normalleştirilmiştir. Bir TZE iş, bir kişinin düzenlenmiş normlarda bir yıl boyunca çalışmasını temsil eder (örneğin, tatiller hariç yılda 52 boyunca haftada 40 saat). Örneğin, altı aylık iki ayrı iş bir TZE iş olarak sayılır. Haftalık çalışılan saatler için veri mevcut olduğunda, yarı zamanlı çalışanları ilgili oranla hesaplıyoruz. Aksi takdirde, yarı zamanlı istihdam 0,5 TZE olarak varsayılır.

İstihdam rakamları, enerji politikası etkisinin kapsamını daha iyi yansıtmayı umuduyla, kayıt dışı çalışanların sayısına ilişkin en iyi tahminimizi içermektedir. Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) kılavuz ilkelerine uygun olarak kayıt dışı istihdam, mevcut yasal veya düzenleyici çerçeveler tarafından kayıt altına alınmayan, düzenlenmeyen veya korunmayan tüm ücretli işleri kapsamaktadır (ILO, 2003). Bu, kendi hesabına çalışanları ve kayıt dışı sektör işletmelerinde istihdam edilen işçileri; katkıda bulunan aile işçilerini; kayıt dışı işlerde çalışanları; kayıt dışı üretici kooperatiflerinin üyelerini; ve sadece kendi hane halkının nihai kullanımı için mal üretimi yapan kendi hesabına çalışanları kapsamaktadır. Tahminler ILO verilerine ve bölge ve sektör bazında kayıt dışılık oranlarına ilişkin literatür taramasına dayanmaktadır.

Değer zinciri adımlarına göre kategorizasyon

İstihdam sadece enerji sektörlerine göre değil, aynı zamanda Uluslararası Standart Sanayi Sınıflandırması (ISIC) revizyon 4 (UN DESA, 2008) tarafından tanımlanan değer zinciri adımlarına veya ekonomik sektörlerle göre de kategorize edilmiştir ve aşağıdaki beş grupta önemli sayıda çalışan bulunmaktadır:

- **Hammaddeler:** Biyoenerji üretimi için tarım (kod A) ve kömür, petrol ve gaz üretimi için madencilik ve taş ocaklığı (kod B)

- **Üretim:** ISIC kodu C
- **İnşaat:** ISIC kodu F
- **Profesyoneller ve kamu hizmetleri:** Elektrik, gaz, buhar ve iklimlendirme tedariki (kod D) ve Mesleki, bilimsel ve teknik faaliyetler (kod M)
- **Toptan satış ve taşımacılık:** Toptan ve perakende ticaret (kod G) artı Ulaştırma ve depolama (kod H)

Mümkün olan her yerde, yukarıdaki tüm sektörlerdeki işlerin kapsamlı bir haritasını sunuyoruz.

Varlık yaşam evresine göre kategorizasyon

İstihdam ayrıca, işin yeni bir proje inşa etmekle mi yoksa mevcut enerji altyapısını işletmek ve sürdürmekle mi ilişkili olduğuna göre kategorize edilmiştir. Bu ayrım IEA enerji dengelerine ve ilgili verilere dayanmaktadır. Örneğin, kapasite ilaveleri ile kurulu toplam güç kapasitesi arasındaki oran, yeni projelerde çalışan enerji sektörü çalışanları ile mevcut enerji santralleri arasındaki ayrımı bildirmektedir. "İşletme ve bakım" (O&M) ifadesi, bir enerji projesinin düzgün çalışmasını desteklemek için gereken tüm devam eden işlerin bir göstergesi olarak mevcut enerji altyapısında veya varlıklarında çalışanlara atıfta bulunmak için kullanılır.

Beceri seviyesine göre kategorizasyon

İstihdam ayrıca ILO tarafından belirlenen Uluslararası Standart Meslek Sınıflandırması 2008 (ISCO-08) ile uyumlu olarak beceri düzeyine göre kategorize edilmektedir (ILO, 2023a). Beceri düzeyi ILO tarafından "bir meslekte yerine getirilmesi gereken görev ve işlerin karmaşıklığı ve çeşitliliğinin bir fonksiyonu" olarak tanımlanmaktadır:

- Gerçekleştirilen işin niteliği.
- Uluslararası Standart Eğitim Sınıflandırması (ISCED-97) tarafından tanımlandığı üzere, yetkin performans için gereken örgün eğitim düzeyi (UNESCO, 2006).
- Yetkin performans için gereken iş deneyimi ve/veya iş başında eğitim miktarı.

Tablo 12.1 ► İlgili eğitim düzeyleri ve mesleklere göre istihdam tahminlerinin beceri düzeyleri

Beceri seviyesi	ILOSTAT beceri seviyesi	İlişkili ISCED-97 seviyeleri	İlişkili ISCO-08 meslekleri
"Yüksek"	3-4	ISCED Seviye 5b: Ortaöğretimin tamamlanmasının ardından bir yükseköğretim kurumunda 1-3 yıllık eğitim. ISCED Seviye 5a veya üstü: Bir yüksek eğitim kurumunda birinci derece veya daha yüksek bir yeterlilikle sonuçlanan 3-6 yıllık eğitim; mesleğe giriş için resmi yeterlilikler gerekebilir.	1. Yöneticiler 2. Profesyoneller 3. Teknisyenler ve yardımcı profesyoneller
"Orta"	2	ISCED Seviye 2: Ortaöğretimin ilk aşamasının tamamlanması. ISCED Seviye 3: Mesleki eğitim ve/veya iş başında eğitimin önemli bir bileşenini içerebilen ortaöğretimin ikinci aşamasının tamamlanması. ISCED Seviye 4: Ortaöğretimin tamamlanmasından sonra üstlenilen mesleğe özgü eğitimin tamamlanması.	4. Büro destek çalışanları 5. Servis ve satış çalışanları 6. Nitelikli tarım, ormancılık ve balıkçılık çalışanları 7. Zanaatkarlar ve ilgili esnaf çalışanları 8. Tesis ve makine operatörleri ve montajcılar
"Düşük"	1	ISCED Seviye 1: Olası işbaşı eğitimiyle birlikte ilköğretimin veya temel eğitimin ilk aşamasının tamamlanması gerekebilir.	9. Elemental meslekler

Tablo, her beceri seviyesinde tipik olarak gözlemlenen meslekleri ve eğitim seviyelerini göstermektedir. Birçok durumda, örgün eğitim beceri düzeyini tahmin etmek için ideal bir yöntem değildir ve bu nedenle atanan ISCED-97 düzeyi, söz konusu beceri düzeyindeki çalışanların yetkin performans için gerekli bilgi ve becerileri genellikle nasıl elde ettiklerinin bir göstergesidir. Uygun derecede iş deneyimi ve/veya iş başında eğitimin belirtilen örgün eğitim seviyesinin yerine geçmesi her zaman mümkündür.

12.2 Mevcut istihdamın tahmin edilmesi

Modelimiz, küresel istihdamı tahmin etmek için IEA enerji yatırım harcamaları verilerini, enerji üretimi ve tüketimi, kapasitesi ve elektrik üretimi ile teknoloji stokları ve satışlarına ilişkin temel olarak kullanılmaktadır. Bu veri noktaları, baz yıldaki toplam istihdamı tahmin etmek için her bir enerji alt sektörüne göre uyarlanmış istihdam çarpanları ile çarpılır.

Çarpanlar, kapsamlı bir literatür taraması ve mevcut olduğu durumlarda her bir alt sektör ve bölge için ücret verileri kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca enerji alt sektörleriyle ilgili dış kaynaklı istihdam verilerine göre kalibre edilmiştir. Çarpanlar ve istihdam tahminleri, IEA'nın Enerji İş Konseyi bünyesindeki şirketler, emsal hakemler, akademisyenler, endüstri grupları ve IMF ve ILO gibi uluslararası kuruluşlarla test edilmiştir.

İş çarpanlarının tahmin edilmesi

Modelde yatırıma (yatırım yapılan milyon ABD doları başına iş) ve hacimsel verilere (örneğin, GW kapasitesi başına iş veya üretilen ton başına iş) dayalı iki tür çarpan kullanılmaktadır. Çarpanlar, yerel işgücü maliyeti ve işçi verimliliğindeki farklılıkları yansıtmak için bölgeye göre değişmektedir. Ayrıca, farklı proje maliyet dağılımlarını, diğer bir deyişle yatırılan her bir milyon ABD dolarının ne kadarının işçilik ve malzeme harcamalarına ayrıldığını yansıtmak şeklinde enerji alt sektörüne göre de değişmektedir. Çarpanları tahmin etmek için kullanılan başlıca kaynaklar şunlardır:

- Yatırım çarpanları için ulusal istatistiklerden ve uluslararası veri tabanlarından alınan ücret verileri
- İstihdam ve gelir, projeler için maliyet dökümleri ve ortalama ücretler hakkında bilgi sağlayan yasal mali dosyalar
- Akademik, hükümetler arası araştırmalar ve modellenmiş tahminler
- Bireysel şirket ve sektör grubu tahminleri

Alt sektörel analizi desteklemek için yeterli ayrıntıya sahip olduğunda, işletmelere yönelik hükümet anketlerine öncelik verilmiştir. İstihdam ve mali bilgiler her sektördeki büyük şirketlerin yıllık raporlarından çıkarılmıştır, ancak bu yöntem yalnızca halka açık büyük firmalarda yüksek derecede konsolidasyon olan sektörler için kullanılabilir. Uyumlaştırılmış tanımlar ve referans değerlerin açıklanan çerçeveye uyacak şekilde ayarlanmasını sağlamak için akademik ve endüstri kaynaklarından gelen materyaller taranmıştır. Bu kaynaklardan elde edilen değerlerin mevcut olmadığı durumlarda, tahminler benzer teknolojiler için istihdam çarpanlarına dayandırılmıştır. Enerji sektörlerine özgü ücret verilerinin mevcut olmadığı durumlarda, bölgelere göre genelleştirilmiş ücret verileri kullanılmıştır.

İstihdam verilerinin toplanması

Çarpanların kalibrasyonunda ölçüt olarak üzere her yıl dış kaynaklardan zengin bir istihdam verisi koleksiyonu toplanmaktadır. Bu veri kaynaklarına şunlar dahildir:

- Tüm büyük ülkeler için ulusal istatistikler
- ILO istihdam veri tabanları (ILO, 2023b)
- Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü (UNIDO) IndStat ve MinStat veri tabanları (UNIDO, 2023a; UNIDO, 2023b)

- Uluslararası kuruluşlar ve sektör dernekleri tarafından hazırlanan raporlar
- Akademik literatür
- Büyük şirketlerin yıllık raporları
- Şirket görüşmeleri

Verilerin geniş işgücü veri tabanlarından toplandığı durumlarda, Birleşmiş Milletler'in *Enerji İstatistikleri için Uluslararası Öneriler* (UNSD, 2011) belgesinde sunulan ISIC kodlarının tam listesi de dahil olmak üzere enerjiyle ilgili kategorilere odaklanıyoruz. Kapsamımız 0510 (taş kömürü madenciliği), 0610 (ham petrol çıkarımı), 0620 (doğal gaz çıkarımı), 1920 (rafine edilmiş petrol ürünleri imalatı), 2910 (motorlu taşıt imalatı), 3510 (elektrik enerjisi üretimi, iletimi ve dağıtımı), 4322 (sıhhi tesisat, ısı ve iklimlendirme tesisatı) ve 4930 (boru hattı ile taşıma) ve diğerleri gibi kodları içermektedir. ISIC ile Kuzey Amerika Sanayi Sınıflandırma Sistemi (NAICS) veya Avrupa Ekonomik Faaliyetler (NACE) gibi diğer sınıflandırmalar arasındaki eşleştirme, farklı ülkelerden resmi istatistiklerin toplanması için uyumlu bir yaklaşım sağlamıştır. Her durumda mevcut en yüksek ayrıntı düzeyindeki veriler kullanılmıştır.

İstihdamın küresel tedarik zincirleri arasında paylaşılması

Oldukça küreselleşmiş tedarik zincirlerine sahip enerji teknolojileri için istihdam tahminleri, ilgili teknolojilerin nerede konuşlandırıldığından ziyade, dünyanın neresinde yukarı akış üretim kapasitesinin bulunduğunu yansıtmaktadır. Belirli teknolojiler (güneş PV panelleri, rüzgar türbinleri, gaz türbinleri vb.) için bölgesel üretim kapasitesine ilişkin veriler, Enerji Teknolojisi Perspektifleri (ETP) raporu için üretilen dahili IEA veritabanlarından ve diğer kaynaklardan elde edilmiş ve küresel toplam üretim işleri buna göre *GEC Model* bölgeleri arasında yeniden dağıtılmıştır. Yapı malzemeleri ve biyoyakıtlar gibi üretimi çok yerel olan teknolojiler için tüm imalat işlerinin yerel olarak yaratıldığı varsayılmıştır.

12.3 İstihdam için görünüm

Senaryolara göre tahminler, baz yıl istihdamını tahmin etmek için kullanılan aynı girdilerin tümü için IEA senaryo sonuçlarına dayanmaktadır. Bunlar, 2030 yılına kadar gelecek toplam işleri tahmin etmek ve böylece baz yıla göre iş kazançları ve kayıplarındaki değişikliklerin yanı sıra mevcut işlerin ne kadarının korunduğunu tahmin etmek için ilgili iş çarpanlarıyla (bölge ve enerji sektörüne göre farklılaştırılmıştır) çarpılır.

İşgücü verimliliği iyileştirmelerinin modellenmesi

Çarpanlar, işgücü verimliliğindeki gelişmelere ilişkin varsayımları yansıtacak şekilde zaman içinde değişmektedir. İstihdam ve ilgili üretimin (veya ilgili başka bir ölçütün) sektöre özgü tarihsel zaman serilerinin mevcut olduğu durumlarda, tarihsel değişim oranı ileriye doğru genişletilir. Belirli zaman serilerinin mevcut olmadığı durumlarda, BM ve ILO'nun ekonomik faaliyete göre katma değer ve ekonomik faaliyete göre istihdama ilişkin verileri, bölgelere göre tarihsel işgücü verimliliği artış oranlarını hesaplamak için kullanılır ve gelecekteki çarpan iyileştirmelerine uygulanır.

Boru hattındaki yeni projeler için zamanlama istihdamı

Herhangi bir yıl için istihdam tahminlerimiz hem mevcut varlıkların işletilmesindeki işleri hem de yeni projelerin inşasındaki işleri içerdiğinden, yatırım gecelik değerleri, tipik proje teslim zaman çizelgelerine dayalı olarak istihdam yaratmanın ne zaman gerçekleşeceğini yansıtmak için önceki yıllara yayılır. Başka bir deyişle, bir yatırımın ne kadar süreyle ve proje teslimine göre hangi yılda istihdam yarattığını dikkate alıyoruz. Örneğin, yeni bir hidroelektrik baraj yatırımı, yatırımdan önceki planlama ve hazırlık aşamasında bazı işler yaratacaktır. Finansal kapanış gerçekleştiğinde bu işler ortadan kalkar, ancak inşaat ve ekipman üretimi işleri yaratılır. İnşaat tamamlandığında bu işler ortadan kalkar, ardından işletme ve bakım işleri başlar. Yıllık bazda toplam istihdamı anlamak için işler ilgili yıllara atanmıştır.

Temiz enerji ve enerji için devlet harcamaları satın alınabilirlik

IEA, Covid-19 salgını ve enerji krizine yanıt olarak hükümetler tarafından yürürlüğe konulan sürdürülebilir toparlanma politikalarının etkisini değerlendiren *Hükümet Enerji Harcamaları İzleyicisi* (eski adıyla Sürdürülebilir Toparlanma İzleyicisi) çerçevesinde Nisan 2020'den bu yana temiz enerji sektörlerine yönelik hükümet harcamalarını izlemektedir. Ajans, 2022 yılında izleme kapsamını, yerli tüketicileri mevcut küresel enerji fiyatı krizinin etkilerinden korumayı amaçlayan tedbirleri de içerecek şekilde genişletmiştir.

Hükümet harcamalarının temiz enerji ve enerji satın alınabilirliği üzerindeki etkisine ilişkin IEA değerlendirmesi:

- Temiz enerji yatırım desteği veya tüketicinin enerjiyi karşılayabilirliği önlemleri için yapılan hükümet harcamalarının miktarını toplar.
- Temiz enerji yatırım desteği sayesinde harekete geçirilen özel harcama miktarını tahmin eder ve STEPS için GEC modellemesine dahil eder.

2024 yılından bu yana, hükümetin enerji harcamalarının ayrıntılı analizleri *Enerji Politikasının Durumu* yıllık raporunda bulunabilir. Aşağıdaki bölümde, politika toplama sürecini ve toplam temiz enerji dağıtımı üzerindeki etkinin nasıl değerlendirildiğini açıklıyoruz.

13.1 Poliçe tanımlama ve toplama

Temiz enerji teknolojilerine yönelik hükümet harcama politikaları

Hükümet harcama politikaları, başlangıçta Covid-19 pandemisine veya ardından gelen küresel enerji krizine yanıt olarak hükümetin ekonomik toparlanma planlarına dahil edilen temiz enerji yatırım desteği harcamalarını yönlendiren politikalar olarak tanımlanmaktadır. İzleme şu anda sistematik bir şekilde yapılmaktadır ve en son ulusal bütçe duyurularının analizlerini içermektedir.

Yaygın harcama politikaları arasında elektrikli araç pazarlarını geliştirmek için tüketici veya üretici sübvansiyonları, düşük emisyonlu ve verimli ulaşım altyapıları inşa etmek için doğrudan harcama veya kamu-özel sektör ortaklığı (PPP), gelişmekte olan enerji teknolojisi pilot programları için hibeler veya enerji verimli bina yenilemeleri için vergi teşvikleri yer almaktadır.

Hükümet Enerji Harcamaları İzleyicisi'ndeki nicel tahminler, 2020'nin ikinci çeyreğinden Eylül 2024'e kadar hükümetler tarafından yürürlüğe konan ulusal düzeydeki temiz enerji sektörü politikalarına dayanmaktadır ve son eğilimler *Enerji Politikasının Durumu* yıllık raporunda ayrıntılı olarak analiz edilmektedir.

Analizde aşağıdaki harcama türleri dikkate alınmıştır:

- **Toplam mali destek:** IMF Mali Gözlem tanımına göre, Covid-19 krizine yanıt olarak 2020'den itibaren ek harcama ve/veya vazgeçilen gelir şeklinde ödenen tüm hükümet harcamaları. Buna, salgının etkilerini hafifletmek için vatandaşlara ve firmalara yapılan kısa vadeli ekonomik yardım ödemeleri de dahildir.
- **Ekonomik canlanma harcamaları:** toplam mali desteğin bir alt kümesi olarak büyümeyi artırmak için uzun vadeli projelere ve önlemlere yönelik hükümet harcamaları. Örnekler arasında yollar, geniş bant internet, toplu konut iyileştirmeleri, ticari iyileştirmeler için teşvikler vb. gibi altyapı projeleri yer almaktadır. Birçok hükümet, daha önce acil ekonomik ve sağlık desteklerine odaklandıktan sonra 2020'nin ikinci çeyreğinden itibaren bu uzun vadeli perspektif politikalarına yönelme eğiliminde olmuştur. Bu, vatandaşlara ve firmalara yapılan ekonomik yardım ödemelerini içermez; ve sadece özellikle yeni yatırımlara yönelik harcamaları kapsar.
- **Temiz enerji teknolojilerine yönelik devlet harcamaları:** temiz enerji yatırım desteğini hedefleyen devlet harcamaları. Buna tüketici veya üretici sübvansiyonları, vergi indirimleri, kamu alımları, kredi

garantiler, KÖİ sözleşmeleri ve hükümetler tarafından tercih edilen diğer ortak finansman planları. Düzenleyiciler tarafından kamu iktisadi teşebbüslerine (KİT'ler) veya kamu tarafından düzenlenen kuruluşlara yönlendirilen harcamalar bir kenara bırakılarak, yalnızca 2020'nin ikinci çeyreğinden bu yana doğrudan hükümet mali harcamaları dikkate alınmıştır.

Hükümet ve toplam mobilize sürdürülebilir iyileştirme harcamalarını kapsayan son iki kategori, altı kilit sektörde sektörel ve bölgesel bazda karşılaştırılmıştır: düşük emisyonlu elektrik, elektrik şebekeleri, emisyonlu ve verimli ulaşım, enerji verimli binalar ve sanayi, daha temiz yakıtlar ve gelişmekte olan düşük emisyonlu teknolojiler.

Yalnızca yeni varlıklar yaratmayı veya mevcut düşük karbonlu altyapının ömrünü uzatmayı amaçlayan ek harcamalar dikkate alınmıştır. Buna göre, enerji şirketleri veya enerji yoğun endüstriler için Covid-19 ile ilgili likidite önlemleri, ek düşük emisyon faaliyetlerini desteklemedikleri için doğrudan dahil edilmemiştir. Bununla birlikte, enerji firmalarının pandemi boyunca desteklenmesi, yatırım çekme kabiliyetlerini koruduğundan, bu fayda, genel olarak yatırım ortamını iyileştiren politikalarla birlikte harekete geçirilen özel harcamaları değerlendiren sektörel faktörlerin kalibrasyonunda yansımaktadır.

Enerji krizine müdahale politikaları

Satın alınabilirlik desteği, 2021'in dördüncü çeyreğinde gerçekleşen ve Rusya'nın Ukrayna'yı işgaliyle daha da şiddetlenen uluslararası fiyat artışına yanıt olarak hükümetler tarafından yürürlüğe konulan acil tüketici desteğini içermektedir. En yaygın politika araçları, genellikle geçici önlemler olarak yürürlüğe konan geçici tüketici sübvansiyonları veya vergi indirimi/muafiyeti, devlet destekli krediler veya fiyat düzenleme mekanizmalarını içermektedir. Harcamalar, hükümetin bakış açısından, doğrudan bütçe tahsisi, vazgeçilen vergi gelirleri vb. olarak değerlendirilmektedir.

Enerji krizine müdahale politikalarından elde edilen nicel tahminler, Eylül 2021'den bu yana hükümetler tarafından yürürlüğe konan politikalara dayanmaktadır ve yalnızca bu önlemleri desteklemenin hükümetler tarafından karşılanan toplam doğrudan maliyetine ilişkin resmi hükümet tahminlerinden türetilmiştir. Buna göre, kamu hizmetleri ve enerji ile ilgili diğer KİT'ler aracılığıyla kanalize edilebilecek diğer piyasa altı fiyat sübvansiyonlarını kapsamamaktadır.

Tahsilat süreci

IEA, üyelerinin sıra G20 üyeleriyle işbirliği içinde hükümet harcama politikalarına ilişkin verileri bağımsız olarak toplamaktadır.

Hükümet Harcama Takibi'nde ele alınan tüm politikalar ve bunlara karşılık gelen bütçeler, enerji politikalarının mevcut durumunu sağlayan ve enerji verimliliği, yenilenebilir teşvikler, kritik mineraller, metan azaltımı ve inovasyon politikaları hakkındaki bilgileri bir araya getiren benzersiz bir havuz olan IEA Enerji Politikası Envanteri ve ilgili Politikalar ve Önlemler (PAMS) Veritabanında mevcuttur. Her kayıt, politikanın kısa bir özetini ve orijinal kaynağa bağlantıları içermekte ve politika türü, teknoloji ve sektöre göre etiketlenmektedir.

PAMS veri tabanındaki binlerce politika arasında 75 ülkeyi kapsayan temiz enerji teknolojileri ve enerji satın alınabilirliği için 1 200 hükümet destek politikası bulunmaktadır. Hükümetin sürdürülebilir iyileşme harcamaları kaydedilmiş ve mevcut bilgilere göre resmi olarak yürürlüğe giren zaman çizelgelerine atfedilmiştir. Harekete geçirilen toplam harcama, ilan edilen tüm yıllara eşit olarak yayılmıştır. Her bütçe kalemi ayrıca hedeflediği tedbir veya teknoloji ile etiketlenmiştir.

13.2 Genel temiz enerji yatırımı üzerindeki etkinin değerlendirilmesi

Hükümetin iyileştirme harcamalarının genel temiz enerji dağıtımı üzerindeki etkisi, sektör ve coğrafya başına seferberlik faktörleri kullanılarak değerlendirilir. Bu değerlendirme en son politikaların etkisini değerlendirmek için kullanılır ancak toplam temiz enerji yatırımı için bir tahmin olarak kullanılmaz, bunun yerine ana GEC Modeli çıktılarından elde edilir.

Devlet harcamalarının özel yatırımları çekme kabiliyeti bağlamlar arasında büyük farklılıklar gösterir ve mali müdahalenin türü, ölçeği ve zamansallığından yerel ekonomik ve mali bağlamlara özgü unsurlara ve giderek artan küresel ticari eğilimlere kadar birçok farklı faktöre bağlıdır.

Seçilen yaklaşım, kısmen tarihsel eğilimlerden alınan sınırlı sayıda bilinen faktöre dayalı olarak bu harekete geçirme etkisini yaklaşık olarak tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Değerlendirme, özellikle farklı bölgelerdeki ekonomik krizin gelişimi ve Covid-19 kurtarma politikalarının ex-post değerlendirmeleri hakkında veriler elde edildikçe sürekli olarak tamamlanmakta ve geliştirilmektedir. IEA, özellikle belirli bir politika türünün harekete geçirilen kamu dolarlarının etkinliğini nasıl artırdığını daha iyi değerlendirmeye çalışmak ve yaklaşımı sahada görülen gerçek yatırımlara dayalı olarak kalibre etmek için bu modelleme yaklaşımını geliştirmeyi amaçlamaktadır.

13.2.1 Temiz enerji yatırım desteği için harekete geçirici faktörlerin değerlendirilmesi

Geçmiş seferberlik faktörleri (her bölge için teknoloji başına bir tane), IEA'nın enerji yatırım veri tabanından yararlanılarak geçmiş yatırım ve devlet desteği seviyelerinden türetilmiştir. Bu tarihsel mobilizasyon faktörleri daha sonra değişen yatırım koşullarını yansıtabilecek şekilde kalibre edilmiştir. IEA, mobilizasyon faktörlerinin kalibre edilmesine yardımcı olmak için IEA verilerinden veya küresel finans kaynaklarından alınan bir dizi endeks kullanmıştır. Bu endeksler ham veri noktalarını (örneğin GSYİH büyümesi), ikili değişkenleri (örneğin bu destekleyici politika bölgede mevcut mu) ve uzman derecelendirme değişkenlerini (örneğin 1-5 ölçeğinde, belirli bir bölgedeki belirli bir pazar ne kadar olgun) kullanabilir. Bu kalibrasyon için kullanılan endeksler şunlardır:

- **Makroekonomik faktörler:** GSYİH büyüme oranı, sermaye maliyeti, ülkenin/bölgenin kredi risk derecesi.
- **Enerji sektörünün sağlığı:** likidite desteğinin sağlanıp sağlanmadığı, söz konusu temiz enerji önlemi için piyasanın olgunluğu.
- **Destekleyici politika ortamı:** destekleyici mali olmayan politikaların varlığı (örneğin elektrikli araçlar için öncelikli park yeri), dağıtımı destekleyen piyasa veya fiyatlandırma mekanizmaları (örneğin tamamen elektrikli özel elektrik tarifeleri), idari destek/yük derecesi (örneğin izin onayı için tipik zaman çizelgeleri), uygulanan politika mekanizmalarının etkinliği/olgunluğu (örneğin politikanın kaç yıldır yürürlükte olduğu).
- **Maliyet etkinliği:** önlemler için geri ödeme süresi veya alternatiflere karşı maliyet rekabeti (örn. LCOE'ler).

13.2.2 Uygulama zaman çizelgelerinin belirlenmesi

Birçok sürdürülebilir iyileşme politikası yakın vadede gerçekleşmeyecek projeleri veya yatırımları hedeflemektedir (örneğin uzun teslim süreleri olan açık deniz rüzgar projeleri veya CCUS pilotları). Analiz aynı zamanda bazı harcamaların uzun vadeli özel sektör harcamalarının veya katılımının artması için nasıl zemin hazırladığını da göz önünde bulundurmaktadır (örneğin liman ve yakıt altyapısı ve inovasyona destek). Seferber edilen toplam sürdürülebilir toparlanma harcamalarının sahada ne zaman gerçekleştiğini, üç spesifik adımı ve ilgili gecikmeleri dikkate alarak belirlemektedir:

- Uygulanabilir projeler için politika duyurusundan ödemeye kadar geçen ortalama süre (IEA'da yapılan politika değerlendirmelerinden).
- Finansal kapanıştan etkin işletmeye kadar geçen ortalama süre (Dünya Enerji Yatırımı verilerimizden).

- Belirli devlet desteklerinin (örneğin altyapının desteklenmesi, inovasyon finansmanı, araştırma, piyasa reformları) bir etki yaratması için ortalama gecikme (büyük altyapı projelerinin zaman çizelgeleri temel alınarak tahmin edilmiştir).

İlk iki adım, finansmanın yürürlüğe girdiği yıla göre bu yatırımların devreye girdiği yılın ertelenmesiyle yansıtılır. Sonuncusu ise sonraki yıllar için özel harcama seferberlik faktörünün artırılmasıdır.

Hanehalkı enerji harcamaları analizi

2022 enerji krizi, hane halkı bütçeleri üzerinde önemli bir baskı yaratmış ve en kırılgan hane halkları ve toplulukların en çok etkilendiği satın alma gücü sorunlarını ön plana çıkarmıştır. Enerji dönüşümünün başarısının bu hane halklarının ve toplulukların dahil edilmesine bağlı olduğunu kabul eden IEA, hane halkı enerji harcamalarını ve bu maliyetlerin hane halkı gelirine oranını gelir dilimine göre değerlendirmek için yeni bir analiz geliştirmiştir. Bu analiz, enerji fiyatlarının ve tüketim eğilimlerinin gelir dilimleri üzerindeki etkisinin ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesini sağlarken, teşviklerin nasıl dağıtıldığına dair de içgörüler sunmaktadır.

14.1 Tanımlar ve kapsam

- **Hanehalkı enerji harcamaları:** Bu, hanehalklarının konut tüketimi (örneğin ısıtma, soğutma, aydınlatma, yemek pişirme ve cihazlara güç sağlama) için yaptıkları enerji maliyetlerinin yanı sıra otomobiller ve iki veya üç tekerlekli araçlar gibi özel ulaşım için yakıt harcamalarını içerir. Trenler, otobüsler, uçaklar veya gemiler dahil olmak üzere toplu taşıma ile ilgili maliyetler bu analize dahil edilmemiştir. Elektrikli araçlar veya ısı pompaları gibi son kullanım temiz enerji ekipmanlarına yönelik sermaye harcamaları bu analize dahil edilmemiştir.
- **Hanehalkı harcanabilir geliri:** Hanehalkının brüt gelirinden vergiler ve sosyal güvenlik primleri gibi diğer zorunlu ödemeler sonra harcamak ve tasarruf etmek için sahip olduğu para miktarını ifade eder. Ücretler, maaşlar, emekli maaşları, sosyal yardımlar ve faiz veya temettü gibi mülk gelirlerinden kişisel vergiler ve sosyal sigorta programlarına yapılan katkılar düşüldükten sonra elde edilen geliri içerir.
- **Harcanabilir gelir ondalık dilimi:** Harcanabilir sıralı dağılımında, ondalık dilimler dağılımı on eşit parçaya bölen dokuz değerdir. Spesifik olarak:
 - İlk ondalık dilim, hanelerin %10'unun altına düştüğü gelir düzeyini temsil etmektedir.
 - Beşinci ondalık dilim, veri setindeki medyan harcanabilir gelire işaret etmektedir.
 - Dokuzuncu dilim, hanelerin %90'ının altında gelir düzeyini temsil etmektedir.
- **En yoksul %10:** Bu, hanehalkı harcanabilir gelir dağılımının ilk ondalık dilimini ifade etmektedir.
- **En Zengin %10:** Hanehalkı harcanabilir gelir dağılımının dokuzuncu dilimini ifade etmektedir.

Biyokütle geleneksel kullanımına ilişkin harcamalar, ihtiyatlı bir yaklaşımla bunların tamamının bedeli ödenmemiş biyokütle olduğu varsayılarak bu analizin dışında tutulmuştur. Bununla birlikte, biyokütle geleneksel kullanımı, örneğin biyokütle toplamak için harcanan ve aksi takdirde üretken faaliyetler için kullanılacak zamanın fırsat maliyeti de dahil olmak üzere önemli doğrudan ve dolaylı maliyetlere neden olabilir. Yükselen piyasa ve gelişmekte olan ekonomilerde (EMDE'ler), geleneksel biyokütle kullanımı hane halkı enerji talebinin yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır.

Bu analiz, enerji fiyat tavanları gibi tüketiciler tarafından ödenen enerji fiyatlarını doğrudan etkileyen devlet sübvansiyonlarını dikkate almaktadır. Son yıllarda bazı ülkelerde düşük gelirli haneler için harcanabilir gelirin önemli bir bölümünü oluşturan enerji yardımı çekleri gibi hanelere yapılan doğrudan ödemeleri içermez.

14.2 Girdi verileri

Bu analiz için girdi verileri çok kaynaklardan alınmıştır. Ulusal tüketici harcama anketleri, akademik yayınlar ve kurumsal raporlar, hanehalkı enerji tüketimini ve harcamalarını gelir dilimine göre değerlendirmek için kullanılmıştır. Benzer kaynaklar, her bölgedeki gelir dilimine göre hane halkı büyüklüğünü tahmin etmek için de kullanılmıştır. Hanehalkı gelir dağılımlarını oluşturmak için kullanılan tanımların çeşitliliği göz önüne alındığında, toplanan verilerin karşılaştırılabilirliğini sağlamak için özel dikkat gösterilmiş ve gerektiğinde uyumlaştırma uygulanmıştır.

Her bir GEC Model bölgesi için gelir dilimine göre hanehalkı harcanabilir gelir veri seti, Dünya Bankası tarafından sağlanan kişi başına ham harcanabilir gelir veri setinden türetilmiştir.

Konut sektöründeki enerji tüketimi, karayolu yolcu hafif hizmet araçları, iki ve üç tekerlekli araçların yanı sıra yakıt ve sektör bazında hane halkı, enerji erişimi ve son kullanıcı fiyatlarına ilişkin veriler GEC Modelinden gelmektedir.

14.3 Metodoloji

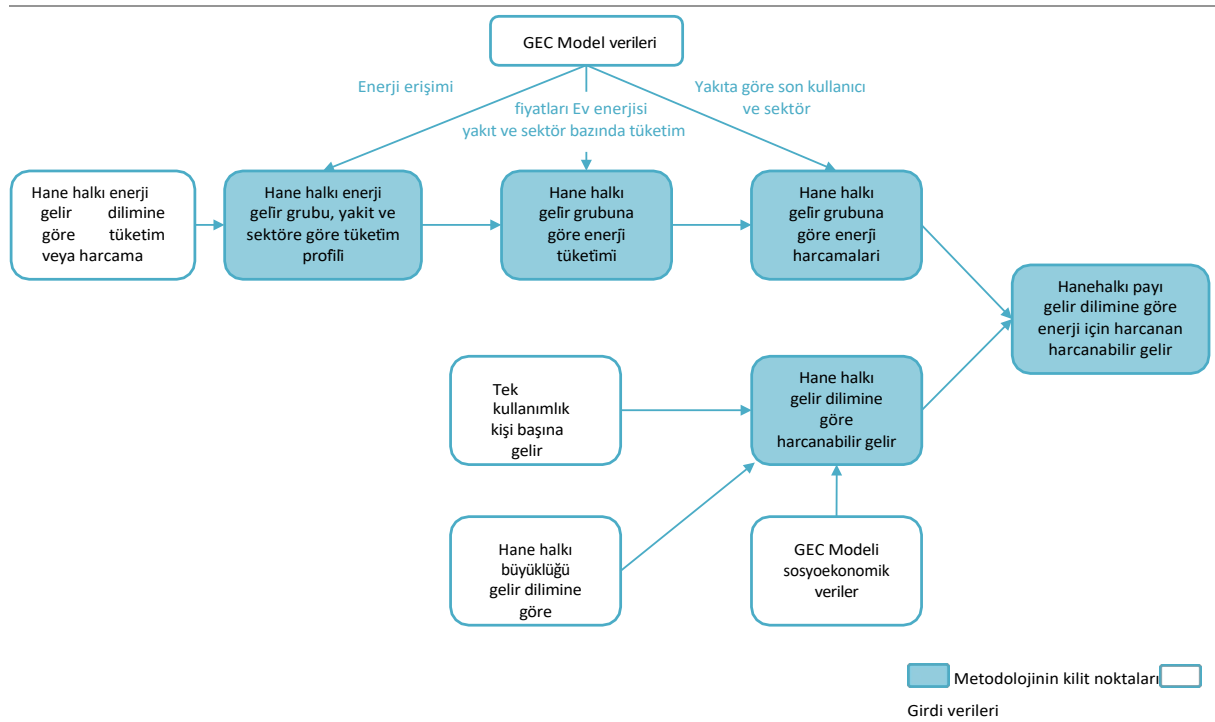
Analiz, GEC Modelinde temsil edilen her bölge için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu bölgesel sonuçlar daha sonra gelişmiş ekonomiler ve GOÜ için veri sağlamak üzere bir araya getirilir. Bu metodoloji sadece geçmiş verilere uygulanır ve gelecek projeksiyonları için kullanılmaz.

Ulusal hane halkı enerji tüketim ve harcama verileri uyumlaştırılmış, ekstrapole edilmiş ve konut sektöründe ve özel ulaşımda kullanılan her yakıt için gelir dilimine göre bölgesel enerji tüketim profilleri geliştirmek üzere birleştirilmiştir. Enerji erişiminde zorluklarla karşılaşan bölgelerde, bu tüketim profilleri, erişimi olmayanların daha düşük gelir dilimlerinde olduğu varsayımına dayanarak, GEC Modelinden elde edilen enerji erişim verilerini hesaba katacak şekilde ayarlanır. Bu profiller daha sonra GEC Modelinden alınan ortalama hane halkı enerji tüketimi verilerine uygulanır. Yakıt ve sektör bazında son kullanıcı fiyatları daha sonra bu verilere uygulanarak gelir dilimine göre hane başına enerji harcamaları elde edilir.

Dünya Bankası'ndan alınan ham harcanabilir gelir veri seti, GEC Model bölgelerindeki hanehalkı harcanabilir gelirini tahmin etmek için GEC Modelinden alınan sosyo-ekonomik veriler ve gelir dilimine göre hanehalkı büyüklüğü dağılımı verileri ile entegre edilmiştir.

Son olarak, enerji tüketim verileri ve harcanabilir gelir verileri birleştirilerek, gelir dilimine göre ayrıştırılmış olarak, hanehalkı harcanabilir gelirinin enerji için harcanan payı hesaplanmaktadır.

Şekil 14.1 ► Her bir GEC Modeli bölgesi düzeyinde uygulanan satın alınabilirlik analizi metodolojisine genel bakış



IEA. Tüm hakları saklıdır.

Metodoloji GEC Modelinin tüm bölgelerine uygulandıktan sonra, sonuçlar gelişmiş ekonomiler ve GOÜ'ler için veri sağlamak üzere toplanmıştır. Yeni harcanabilir gelir dağılımlarının toplam düzeyde oluşturulmadığına dikkat etmek önemlidir. Bunun yerine, toplam değerler, her bir bölgedeki hanehalkı sayısına dayalı ağırlıklarla, bölgesel düzeyde karşılık gelen kuantil verilerinin ağırlıklı ortalaması olarak hesaplanır. Örneğin, GOÜ'lerdeki en yoksul %10'luk kesimin enerji tüketimi, bu gruptaki ülkelerin her birinde en yoksul %10'luk kesim tarafından tüketilen enerjinin ağırlıklı ortalamasıdır. Bu yaklaşım, herhangi bir gelir grubunda tek bir ülkenin aşırı temsil edilmemesini sağlar.

14.4 Sonuçlar

Bu analiz üç temel çıktı üretir:

- Gelir dilimine göre enerji tüketimi
- Gelir dilimine göre enerji harcaması
- Gelir dilimine göre enerji için harcanan hanehalkı harcanabilir gelirinin payı

Hem hanehalkı harcanabilir geliri hem de enerji harcamaları verileri ulusal istatistikler, ulusal anketler ve diğer güvenilir kaynaklarla karşılaştırılmıştır.

Sunulan sonuçlar, 2019'dan 2023'e kadar olan 5 yıllık ortalamayı temsil etmekte olup, son yıllarda hanehalklarını etkileyen krizlerin etkisini aşırı vurgulamadan mevcut durumu doğru bir şekilde yansıtmaktadır.

Ondalık analizde, bazen dokuz ondalık değer tarafından tanımlanan on eşit dilimin ortalamasını veya medyanını temsil eden on değer rapor edilmektedir. Ancak ulusal istatistikler ve gelir dağılımı verileri ülkeler ve kaynaklar arasında farklılık gösterebilmekte, bu da doğrudan karşılaştırma yapmayı zorlaştırmaktadır. Bunu ele almak için, bu analizdeki tüm veri noktaları karşılaştırılabilirlik açısından uyumlaştırılmıştır. Ancak bu süreç, veri setinin uç noktalarında, özellikle de %0-10 ve %90-100 aralıklarında bazı belirsizliklere yol açabilir. Bu istatistiksel artefaktların sonuçları ve çıkarımları etkilemesini önlemek için, bu analizde yalnızca dokuz ondalık değer sunulmuştur.

Terminoloji

Bu ekte rapor boyunca kullanılan terminoloji hakkında genel bilgiler verilmektedir: yakıt, süreç ve sektör tanımları; bölgesel ve ülke gruplandırmaları; kısaltmalar ve akronimler.

Tanımlar

Gelişmiş biyoenerji: Fosil yakıt alternatiflerine kıyasla önemli yaşam döngüsü sera gazı emisyonu tasarrufu sağlayabilen ve olumsuz sürdürülebilirlik etkilerini en aza indirebilen atık ve artıklardan ve gıda dışı bitkisel hammaddelerden (geleneksel kullanımları hariç) üretilen sürdürülebilir yakıtlar. Gelişmiş biyoenerji hammaddeleri ya tarım arazileri için gıda ve yem bitkileri ile doğrudan rekabet etmez ya da sadece daha önce biyoyakıtlar için gıda bitkisi hammaddeleri üretmek için kullanılan araziler üzerinde geliştirilir. Bu tanım, ABD mevzuatında "gelişmiş biyoyakıtlar" için kullanılan ve yaşam döngüsü sera gazı azaltımının en az %50 olmasını esas alan ve dolayısıyla şeker kamışı etanolünü de içeren tanımdan farklıdır.

Tarım: Çiftliklerde, ormancılıkta ve balıkçılıkta kullanılan tüm enerjiyi içerir.

Tarım, ormancılık ve diğer arazi kullanımı (AFOLU) emisyonları: Tarım, ormancılık ve diğer arazi kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarını içerir.

Amonyak (NH₃): Kimya sektöründe hammadde olarak, yakıt hücrelerinde doğrudan yanma süreçlerinde yakıt olarak veya hidrojen taşıyıcı olarak kullanılabilen bir azot ve hidrojen bileşiğidir. Düşük emisyonlu bir yakıt olması için amonyak, düşük emisyonlu kaynaklardan üretilen elektrik kullanılarak üretilen hidrojenden ve düşük emisyonlu kaynaklardan üretilen elektrik kullanılarak Haber prosesi yoluyla ayrıştırılan azottan üretilmelidir.

Havacılık: Bu ulaşım modu hem yurtiçi hem de uluslararası uçuşları ve bunların havacılık yakıtlarının kullanımını içerir. Yurtiçi havacılık, aynı ülkede kalkış ve iniş yapan uçuşların yanı sıra askeri amaçlı uçuşları da kapsar. Uluslararası havacılık, kalkış yerinden başka bir ülkeye inen uçuşları kapsar.

Yedek üretim kapasitesi: Ana elektrik şebekesine bağlı hane ve işletmeler, kesinti durumunda elektrik sağlayabilecek bir tür yedek elektrik üretim kapasitesine de sahip olabilir. Yedek jeneratörler tipik olarak dizel veya benzinle beslenir. Kapasite birkaç kilovat kadar küçük olabilir. Bu kapasite, ana elektrik şebekesine bağlı olmayan mini-şebeke ve şebeke dışı sistemlerden farklıdır.

Batarya depolama: Talep üzerine elektriği emmek ve serbest bırakmak için tersine çevrilebilir kimyasal reaksiyonlar kullanan enerji depolama teknolojisi.

Biyodizel: Biyokütleden elde edilen ve dizel motorlarda kullanılan sıvı biyoyakıtlar. Transesterifikasyon yoluyla üretilen bitkisel yağlardan elde edilen biyodizel, hidrojenize bitkisel yağ (HVO), gazlaştırma gibi termal işlemlerle üretilen biyodizel ve fermantasyon kullanılarak yapılan biyodizeli içerir. Düşük emisyonlu bir yakıt olması için biyoenerji dışı girdilerin (HVO için hidrojen veya transesterifikasyon için metanol gibi) düşük emisyonlu hidrojenden elde edilmesi gerekir.

Biyoenerji: Biyokütle hammaddelerinden ve biyogazdan elde edilen katı, sıvı ve gaz ürünlerdeki enerji içeriği. Katı biyoenerji, sıvı biyoyakıtlar ve biyogazları içerir.

Karbon, yakalama ve depolama ile biyoenerji (BECCS): CO₂'nin biyojenik bir kaynaktan (örn. biyoyakıt tesisi) yakalandığı ve kalıcı olarak depolandığı herhangi bir enerji yolunu içeren teknoloji.

Biyogaz: Organik maddenin oksijensiz bir ortamda anaerobik çürütülmesi ile üretilen metan, CO₂ ve az miktarda diğer gazların karışımı.

Biyogazlar: Hem biyogaz hem de biyometanı içerir.

Biyojet gazyağı: HEFA ve Fischer-Tropsch ile biyokütle gazlaştırma gibi dönüşüm yolları aracılığıyla biyokütleden üretilen kerosen ikamesi. Biyojenik karbondioksitten üretilen sentetik gazyağı hariçtir.

Biyometan: Biyometan, biyogazın "yükseltilmesi" (biyogazda bulunan CO₂ ve diğer kirleticileri ortadan kaldıran bir işlem) veya katı biyokütlelerin gazlaştırılması ve ardından metanlaştırılması yoluyla üretilen neredeyse saf bir metan kaynağıdır. Yenilenebilir doğal gaz olarak da bilinir.

Binalar: Konut ve hizmet binalarında kullanılan enerjiyi içerir. Hizmet binaları ticari ve kurumsal binaları ve diğer belirtilmemiş içerir. Bina enerji kullanımı alan ısıtma ve soğutma, su ısıtma, aydınlatma, cihazlar ve pişirme ekipmanlarını içerir.

Bunkerler: Hem uluslararası denizcilik bunkerlerini hem de uluslararası havacılık bunkerlerini içerir.

Kapasite kredisi: Bağlı olduğu şebekede talebin en yüksek olduğu zamanlarda güvenilir bir şekilde elektrik üretmesi beklenebilecek kapasitenin oranı.

Karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS): Sera gazı emisyonlarının önlenmesine yardımcı olabilecek bir dizi ilgili teknoloji için kullanılan bir şemsiye terimdir. CO₂ yakalama (yakıt yanmasından, endüstriyel süreçlerden veya doğrudan atmosferden), CO₂ kullanımı (üretimde girdi veya hammadde olarak) ve CO₂ depolamayı (yeraltı jeolojik oluşumlarında, karada veya açık denizde) içerir.

Karbondioksit (CO₂): Bir kısım karbon ve iki kısım oksijenden oluşan bir gazdır. Önemli bir sera (ısı hapseden) gazıdır.

Karbondioksit giderimi (CDR): CO₂'nin atmosferden kalıcı olarak uzaklaştırılmasıyla sonuçlanan süreç. GEC Modelinde bu, biyojenik kaynaklardan (BECCS) veya havadan (DACs) yakalanan CO₂'nin kalıcı olarak depolanması yoluyla gerçekleştirilebilir.

Temiz pişirme: Katı biyoenerji (üç taşlı ateş gibi), kömür veya gazyağı kullanılarak yapılan geleneksel pişirmeye kıyasla daha az zararlı kirlenici salın, daha verimli ve çevresel açıdan daha sürdürülebilir pişirme teknikleri. Geliştirilmiş katı biyoenerji ocakları, biyogaz/biyodijester sistemleri, elektrikli ocaklar ve sıvılaştırılmış petrol gazı, doğal gaz veya etanol ile çalışan ocakları içerir.

Temiz enerji: Enerji alanında, temiz enerji yenilenebilir kaynaklardan, nükleerden ve CCUS ile donatılmış fosil yakıtlardan üretimi; batarya depolamayı ve elektrik şebekelerini içerir. Verimlilikte temiz enerji, havacılık yakıtları ve evsel navigasyon hariç olmak üzere binalarda, sanayide ve ulaşımda enerji verimliliğini içerir. *Son kullanım* uygulamalarında temiz enerji, yenilenebilir kaynakların doğrudan kullanımını; elektrikli araçları; binalarda, sanayide ve uluslararası deniz taşımacılığında elektrifikasyonu; hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtların kullanımını; sanayide CCUS ve doğrudan hava karbon yakalama ve depolamayı içerir. *Yakıt tedarikinde*, temiz enerji düşük emisyonlu yakıtlar sıvı biyoyakıtlar ve biyogazlar, düşük karbonlu hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtları içerir.

Kömür: Hem birincil kömürü (yani linyit, koklaşabilir ve buhar kömürü) hem de türetilmiş yakıtları (örneğin patent yakıtı, kahverengi kömür briketleri, kok fırını kok kömürü, gaz kok kömürü, gaz işleri gazı, kok fırını gazı, yüksek fırın gazı ve oksijen çelik fırını gazı) içerir. Turba da dahildir.

Kömür yatağı metanı (CBM): Kömür damarlarında bulunan metanı ifade eden geleneksel olmayan doğal gaz kategorisi.

Kömürden gaza (CTG): Çıkarılan kömürün önce sentez gazına (hidrojen ve karbon monoksit karışımı) ve ardından sentetik metana dönüştürüldüğü süreç.

Kömürden sıvıya (CTL): Kömürün sıvı hidrokarbonlara dönüştürülmesi. Kömürün gazlaştırılarak sentez gazına (hidrojen ve karbon monoksit karışımı) dönüştürülmesi ve daha sonra Fischer- Tropsch veya metanol-benzin sentezi süreçleri kullanılarak birleştirilerek sıvı yakıt üretilmesi ya da kömürün doğrudan hidrojenle reaksiyona sokulduğu daha az gelişmiş doğrudan kömür sıvılaştırma teknolojileri aracılığıyla gerçekleştirilebilir.

Koklaşabilir kömür: Çelik yapımında (kimyasal indirgeyici ve ısı kaynağı olarak) kullanılabilen ve yüksek fırın yükünü destekleyebilecek kok kömürü üreten kömür türü. Bu kalitedeki kömür yaygın olarak metalürjik kömür olarak da bilinir.

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP): Elektrik üretmek amacıyla yüksek sıcaklıkta ısı üretmek için güneş ışığını toplayan ve yoğunlaştıran güneş termal enerji üretim teknolojisi.

Konvansiyonel sıvı biyoyakıtlar: Gıda mahsulü hammaddelerinden üretilen yakıtlar. Genellikle birinci nesil biyoyakıtlar olarak adlandırılır ve şeker kamışı etanolü, nişasta bazlı etanol, yağ asidi metil esteri (FAME), düz bitkisel yağ (SVO) ve palmiye, kolza tohumu veya soya fasulyesi yağından üretilen HVO'yu içerir.

Ayrıştırma analizi: Toplam göstergede bir değişikliğe yol açan önceden tanımlanmış bir dizi faktörün göreceli katkısını ölçmek için bir toplam göstergeyi ayrıştıran istatistiksel yaklaşım. GEC Modeli, Logaritmik Ortalama Bölünme Endeksi (LMDI) türünde bir eklemeli endeks ayrıştırması kullanır.

Talep tarafı entegrasyonu (DSI): İki tür önlemden oluşur: enerji verimliliği ve elektrifikasyon gibi yük şeklini etkileyen eylemler ve talep tarafı tepkisi gibi yükü yöneten eylemler.

Talep tarafı müdahalesi (DSR): Toplam elektrik talebini etkilemeden yük eğrisini zaman içinde kaydırmak veya talebi geçici olarak kesmeyi veya belirli bir süre için talep yoğunluğunu ayarlamayı içeren yük atma gibi yük profilini etkileyebilecek eylemleri tanımlar.

Doğrudan hava yakalama (DAC): Sıvı çözücüler veya katı sorbentler kullanarak CO₂'yi doğrudan atmosferden yakalayan bir CCUS türüdür. Genellikle CO₂'nin derin jeolojik oluşumlarda kalıcı olarak depolanması veya yakıt, kimyasal, yapı malzemesi veya diğer ürünlerin üretiminde kullanılması ile birleştirilir. Kalıcı jeolojik CO₂ depolama ile birleştirildiğinde, DAC bir karbon giderme teknolojisidir ve doğrudan hava yakalama ve depolama (DACs) olarak bilinir.

Sevk edilebilir üretim: Arz ile talebi eşleştirmek için güç çıkışı kolayca kontrol edilebilen, yani maksimum nominal kapasiteye çıkarılabilen veya sıfıra indirilebilen teknolojileri ifade eder.

Elektrik talebi: Toplam brüt elektrik üretimi eksi kendi kullanım üretimi, artı net ticaret (ithalat eksi ihracat), eksi iletim ve dağıtım kayıpları olarak tanımlanmıştır.

Elektrik üretimi: Kendi kullanımı için gerekli üretim de dahil olmak üzere, sadece elektrik veya kombine ısı ve güç santralleri tarafından üretilen toplam elektrik miktarı olarak tanımlanır. Bu aynı zamanda brüt üretim olarak da adlandırılır.

Son kullanım sektörleri: Sanayi (yani imalat, madencilik, kimyasal üretim, yüksek fırınlar ve kok fırınları), ulaştırma, binalar (yani konutlar ve hizmetler) ve diğer (yani tarım ve diğer enerji dışı kullanım).

Enerji yoğun endüstriler: Demir ve çelik, kimyasallar, metalik olmayan mineraller (çimento dahil), demir dışı metaller (alüminyum dahil) ve kağıt, kağıt hamuru ve baskı üretimi ve imalatını içerir.

Enerji ile ilgili ve endüstriyel proses CO₂ emisyonları: Yakıt yanmasından ve endüstriyel süreçlerden karbondioksit emisyonları. Buna yakıtlardan, alevlenmeden veya taşıma ve depolamadan kaynaklanan CO₂'den kaynaklanan kaçak emisyonlar dahil değildir. Aksi belirtilmedikçe, GEC Modelinden bildirilen CO₂ emisyonları enerji ile ilgili ve endüstriyel proses CO₂ emisyonlarını ifade eder.

Enerji sektörü sera gazı (GHG) emisyonları: Enerji ve sanayi sektörlerinden kaynaklanan enerji ile ilgili ve endüstriyel proses CO₂ emisyonları artı kaçak ve bacalı metan (CH₄) ve azot dioksit (N₂O) emisyonları.

Enerji hizmetleri: Yararlı enerjiye bakınız.

Etanol: Yalnızca biyoetanolü ifade eder. Etanol, karbonhidrat oranı yüksek herhangi bir biyokütlenin fermente edilmesiyle üretilir. Şu anda etanol nişasta ve şekerlerden yapılmaktadır, ancak ikinci nesil teknolojiler, çoğu bitki maddesinin büyük kısmını oluşturan lifli malzeme olan selüloz ve hemiselülozdan yapılmasına izin verecektir.

Fischer-Tropsch sentezi: Sentetik yakıtlar üretmek için katalitik üretim süreci. Doğal gaz, kömür ve biyokütle hammaddeleri kullanılabilir.

Fosil yakıtlar: Kömür, doğal gaz, petrol ve turbayı içerir.

Gaz yakıtlar: Doğal , biyogazlar, sentetik metan ve hidrojeni içerir.

Gazlar: Gaz yakıtlara bakınız.

Gazdan sıvıya (GTL): Sentez gazı (hidrojen ve karbon monoksit karışımı) üretmek için metanın oksijen veya buharla reaksiyonunu ve ardından Fischer-Tropsch katalitik sentezi kullanılarak sentez gazından sıvı ürünlerin (dizel ve nafta gibi) sentezini içeren süreç. Süreç, kömürden sıvıya dönüştürmede kullanılabileceği benzer.

Jeotermal: Jeotermal enerji, Dünya'nın alt yüzeyinden elde edilen ısıdır. Su ve/veya buhar jeotermal enerjiyi yüzeye taşır. Jeotermal enerji, özelliklerine bağlı olarak ısıtma ve soğutma amacıyla kullanılabilir veya sıcaklık yeterliyse temiz elektrik üretmek için kullanılabilir.

Isı (son kullanım): Fosil veya yenilenebilir yakıtların yanmasından, doğrudan jeotermal veya güneş ısı sistemlerinden, ekzotermik kimyasal işlemlerden ve elektrikten (dirençli ısıtma veya ortam havasından ve sıvılardan elde edilebilen ısı pompaları yoluyla) elde edilebilir. Bu kategori, binalarda alan ve su ısıtma ve pişirme, tuzdan arındırma ve endüstride proses uygulamaları dahil olmak üzere çok çeşitli son kullanımları ifade eder. Soğutma uygulamalarını içermez.

Isı (tedarik): Yakıtların yanmasından, nükleer reaktörlerden, jeotermal kaynaklardan ve güneş ışığının yakalanmasından elde edilir. Isıtma veya soğutma için kullanılabilir veya taşıma veya elektrik üretimi için mekanik enerjiye dönüştürülebilir. Satılan ticari ısı, elektrik üretimine tahsis edilen yakıt girdileri ile birlikte toplam nihai tüketimin bir parçası olarak raporlanır.

Ağır sanayiler: Demir ve çelik, kimyasallar ve çimento.

Hidrojen: Hidrojen enerji sisteminde bir enerji taşıyıcısı, endüstriyel bir hammadde olarak veya hidrojen bazlı yakıtlar üretmek için diğer girdilerle birleştirilerek kullanılır. Aksi belirtilmedikçe, hidrojen düşük emisyonlu hidrojeni ifade eder.

Hidrojen bazlı yakıtlar: Düşük emisyonlu hidrojen bazlı yakıtlara bakınız.

Hidroelektrik: %100 verimlilik varsayımıyla hidroelektrik santrallerinde üretilen elektriğin enerji içeriği. Pompaj depolamalı ve deniz (gelgit ve dalga) santrallerinden elde edilen çıktıyı hariç tutar.

Geliştirilmiş ocaklar: Orta ve ileri düzey geliştirilmiş biyokütle ocakları (ISO kademesi >2). Temel geliştirilmiş ocakları (ISO kademe 0-2) hariç tutar.

Endüstri: Sektör, imalat ve inşaat endüstrilerinde kullanılan yakıtı kapsamaktadır. Ana sanayi dalları arasında demir ve çelik, kimya ve petrokimya, çimento, alüminyum ve kağıt hamuru ve kağıt bulunmaktadır. Enerjiyi başka bir forma dönüştürmek veya yakıt üretimi için endüstriler tarafından kullanılan enerji hariç tutulur ve 'Diğer Enerji' sektörü altında ayrı olarak raporlanır. Yüksek fırınlarda ve kok fırınlarında yakıt dönüşümü için bir istisna vardır, bunlar demir ve çelik içinde raporlanır. Malların taşınması için kullanılan yakıtların tüketimi ulaştırma sektörünün bir parçası olarak raporlanırken, arazi araçlarının tüketimi sanayi altında raporlanmaktadır.

Uluslararası havacılık bunkerleri: Uluslararası için uçaklara teslim edilen havacılık yakıtlarını ifade eder. Havayolu şirketlerinin karayolu taşıtları için kullandıkları yakıtlar hariç tutulmuştur. Yurtiçi/uluslararası ayrımı, havayolunun uçuşuna göre değil, kalkış ve iniş yerlerine göre belirlenir.

Uluslararası denizcilik yakıtları: Uluslararası seyrüsefer yapan tüm bayraklara ait gemilere teslim edilen yakıtları kapsar. Uluslararası seyrüsefer denizde, iç göllerde ve su yollarında ve kıyı sularında gerçekleşebilir. Yurtiçi seyrüsefer yapan gemiler tarafından yapılan tüketim hariç tutulmuştur. Yurtiçi/uluslararası ayrımı, geminin bayrağı veya uçuşuna göre değil, kalkış limanı ve varış limanına göre belirlenir. Balıkçı gemileri ve askeri güçler tarafından yapılan tüketim hariç tutulmuş ve bunun yerine konut, hizmetler ve tarım kategorisine dahil edilmiştir.

Yatırım: Yatırım, enerji arz kapasitesi, enerji altyapısı ve enerjinin nihai kullanımı ve verimliliği için devam eden sermaye harcamaları olarak ölçülür. Tüm yatırım verileri ve projeksiyonları, bir projenin yaşam döngüsü yapılan harcamaları yansıtır, yani harcanan sermaye, gerçekleştiği yıla atanır. Yakıt tedarik yatırımları petrol, gaz, kömür ve düşük emisyonlu yakıtlar için üretim, dönüşüm ve nakliye içerir. Enerji sektörü yatırımları, üretim, elektrik şebekeleri (iletim, dağıtım ve kamuya açık elektrikli araç şarj cihazları) ve batarya depolamanın yeni yapımlarını ve yenilemelerini içerir. Enerji verimliliği yatırımları binalarda, sanayide ve ulaşımda yapılanları içerir. Diğer son kullanım yatırımları arasında yenilenebilir kaynakların doğrudan kullanımı; elektrikli araçlar; binalarda, sanayide ve uluslararası deniz taşımacılığında elektrifikasyon; hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtların kullanımı; fosil yakıt bazlı sanayi tesisleri; sanayide CCUS ve DACS/DACU yer almaktadır. Yatırım verileri aksi belirtilmedikçe 2023 yılı ABD doları cinsinden reel olarak sunulmuştur.

Hafif hizmet araçları (LDV'ler): Binek otomobilleri ve hafif ticari araçları (brüt araç ağırlığı <3,5 ton) içerir.

Hafif sanayiler: Enerji yoğun olmayan endüstrileri içerir: gıda ve tütün, makine, ulaşım ekipmanları, tekstil, ağaç hasadı ve işleme, madencilik ve taş ocakçılığı ve inşaat.

Linyit: Düşük enerji içeriği ve genellikle uzun mesafeli taşımayı ekonomik olmaktan çıkaran yüksek nem seviyeleri nedeniyle elektrik sektöründe, çoğunlukla linyit madenlerine yakın bölgelerde kullanılan kömür türü. GEC Modelindeki linyit verileri, yüksek nem ve sınırlı hava erişimi koşulları altında ölü bitki örtüsünün kısmi ayrışmasından oluşan bir katı olan turbayı da içermektedir.

Sıvı biyoyakıtlar: Etanol, biyodizel ve biyojet yakıtları dahil olmak üzere biyokütle veya atık hammaddesinden elde edilen sıvı yakıtlar. Bunlar, hammadde ve bunları üretmek için kullanılan teknolojilerin kombinasyonuna ve ilgili olgunluklarına göre geleneksel ve gelişmiş biyoyakıtlar olarak sınıflandırılabilir. Aksi belirtilmedikçe, biyoyakıtlar enerji eşdeğeri benzin, dizel ve gazyağı hacimleriyle ifade edilir.

Sıvı yakıtlar: Petrol, sıvı biyoyakıtlar (enerji eşdeğeri benzin ve dizel hacimleri olarak ifade edilir), sentetik petrol ve amonyak içerir.

Düşük karbonlu elektrik: Yenilenebilir enerji teknolojileri, hidrojen bazlı üretim, nükleer enerji ve CCUS ile donatılmış fosil yakıtlı enerji santrallerini içerir.

Düşük ısıtma değeri: Üretilen suyun buhar olarak kaldığı ve ısının geri kazanılmadığı varsayıldığında, bir birim yakıtın tamamen yanmasıyla açığa çıkan ısı.

Düşük emisyonlu yakıtlar: Modern biyoenerji, düşük emisyonlu hidrojen ve düşük emisyonlu sentetik metanı içerir.

Düşük emisyonlu hidrojen bazlı yakıtlar: Düşük emisyonlu hidrojenden elde edilen amonyak, metanol ve diğer sentetik hidrokarbonları (gazlar ve sıvılar) içerir. CO₂ gibi karbon girdileri fosil yakıtlardan veya proses emisyonlarından kaynaklanmamaktadır. Hidrojen bazlı, GEC Modelini kullanan yayınlardaki şekillerde hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtları ifade etmek için kullanılır.

Düşük emisyonlu hidrojen bazlı sıvı yakıtlar: Sadece amonyak, metanol ve sentetik gazyağı gibi sentetik sıvı hidrokarbonları içeren düşük emisyonlu hidrojen bazlı yakıtların bir alt kümesi.

Deniz enerjisi: Gelgit hareketi, dalga hareketi veya okyanus akıntılarından elde edilen ve elektrik üretimi için kullanılan mekanik enerjiyi temsil eder.

Orta distilatlar: Jet yakıtı, dizel ve ısıtma yağını içerir.

Mini-şebekeler: Ana elektrik şebekelerine bağlı olmayan, bir dizi haneyi ve/veya diğer tüketicileri birbirine bağlayan küçük elektrik şebeke sistemleri.

Modern enerji erişimi: Hanelerin asgari düzeyde elektriğe erişimini; hanelerin daha az zararlı ve daha sürdürülebilir pişirme ve ısıtma yakıtlarına ve sobalara erişimini; üretken ekonomik faaliyetlere olanak sağlayan erişimi ve kamu hizmetlerine erişimi içerir.

Modern gazlı biyoenerji: Biyogazlara bakınız.

Modern sıvı biyoenerji: Biyo-benzin, biyodizel, biyojet gazyağı ve diğer sıvı biyoyakıtları içerir.

Modern yenilenebilir enerji kaynakları: Geleneksel biyoenerji kullanımı ve diğer düşük verimli veya sürdürülebilir olmayan uygulamalar dışındaki yenilenebilir enerji kaynakları. Biyogazlar, hidroelektrik, jeotermal enerji, sıvı biyoyakıtlar, modern katı biyoenerji, okyanus enerjisi, güneş enerjisi, rüzgarı içerir.

Modern katı biyoenerji: Biyokütlenin geleneksel kullanımı dışındaki tüm katı biyoenerji ürünlerini içerir (bkz. katı biyoenerji tanımı). Ayrıca yakıtın küçük parçalar halinde kesilmesini gerektiren veya genellikle pelet gibi işlenmiş biyokütle kullanan orta ve gelişmiş biyokütle ocaklarında (ISO kademesi > 2) katı biyoenerji kullanımını da içerir.

Doğal gaz: Çoğunlukla metandan oluşan gaz halinde bir fosil yakıt. Sıvılaştırılmış veya gaz halindeki yataklarda oluşur. Hem sadece gaz halinde hidrokarbon üreten sahalarından kaynaklanan ilişkili olmayan gazı hem de ham petrolle birlikte üretilen ilişkili gazı ve kömür madenlerinden geri kazanılan metanı (kömür ocağı gazı) içerir. Doğal gaz sıvıları, üretilmiş gaz (belediye veya endüstriyel atıklardan veya kanalizasyondan üretilen) ve havalandırılan veya alevlenen miktarlar dahil edilmemiştir. Metreküp cinsinden gaz verileri brüt kalorifik değer bazında ifade edilir ve 15 °C'de ve 760 mm Hg'de (Standart Koşullar) ölçülür. Ton petrol eşdeğeri olarak ifade edilen gaz verileri, esas olarak diğer yakıtlarla karşılaştırma amacıyla, net kalorifik bazdadır. Net ve brüt kalorifik değer arasındaki fark, yakıtın yanması sırasında oluşan su buharının gizli buharlaşma ısısidir (gaz için net kalorifik değer brüt kalorifik değerden %10 daha düşüktür).

Doğal gaz sıvıları (NGL'ler): Doğal üretiminde, saflaştırılmasında ve stabilizasyonunda üretilen sıvı veya sıvılaştırılmış hidrokarbonlardır. NGL'ler doğal gazın ayırıcılarda, saha tesislerinde veya gaz işleme tesislerinde sıvı olarak geri kazanılan kısımlarıdır. NGL'ler etan (doğal gaz akışından çıkarıldığında), propan, bütan, pentan, doğal benzin ve kondensatları içerir, ancak bunlarla sınırlı değildir.

Sıfıra yakın emisyonla sahip malzeme üretim kapasitesi: Başlangıçtan itibaren önemli ölçüde emisyon azaltımı sağlayacak - ancak başlangıçta sıfıra yakın emisyonlu malzeme üretiminin (aşağıdaki tanıma bakınız) gerisinde kalan - ve zaman içinde emisyonları azaltmaya devam etmeyi planlayan, böylece daha sonra ek sermaye yatırımı olmadan sıfıra yakın emisyonlu üretime ulaşabilecek kapasite.

Sıfıra yakın emisyonlu malzeme üretimi: Çelik ve çimento için, IEA'nın 'G7 Üyelerinde Net Sıfır Emisyonlu Ağır Sanayi Sektörlerine Ulaşmak' (IEA, 2022b) başlıklı çalışmasında tanımlanan sıfıra yakın emisyonlu sera gazı emisyon yoğunluğu eşiklerine ulaşan üretim; eşikler çelik için metalik girdinin hurda payına ve çimento için klinker-çimento oranına bağlıdır. Alüminyum, gübre ve plastik gibi diğer enerji yoğun emtialar için, sıfıra yakın emisyonlu çelik ve çimentoya yönelik değerlendirmelere eşdeğer emisyon yoğunluğunda azalma sağlayan üretim.

Sıfıra yakın emisyonlu malzeme üretim kapasitesi: Faaliyete geçtiğinde sıfıra yakın emisyonlu malzeme üretimini en başından itibaren gerçekleştirecek kapasite (bkz. önceki tanım).

Şebeke gazları: Doğal gaz, biyometan, sentetik metan ve hidrojen gibi bir boru hattı gaz şebekesinde ayrı olarak veya karıştırılarak taşınan gaz yakıtlar.

Enerji dışı kullanım: Enerji ürünlerinin enerji dışı üretimi için hammadde olarak kullanılması, Örneğin, gübre üretmek için kullanılan doğal gazın yanı sıra, ürünlerin bir ürün olarak kullanılmasını içermeyen doğrudan kullanımlar için

enerji kaynağı veya dönüşüm girdisi olarak, örneğin yağlama, sızdırmazlık, yol kaplaması, koruma, çözücü olarak kullanım.

Yenilenemeyen atıklar: Kentsel veya endüstriyel atıklardaki plastikler gibi biyogenik olmayan atıklar.

Nükleer: Ortalama dönüşüm verimliliğinin %33 olduğu varsayıldığında, bir nükleer enerji santrali tarafından üretilen elektriğin birincil enerji eşdeğerini ifade eder.

Şebekeden bağımsız sistemler: Bireysel haneler veya tüketici grupları için bağımsız sistemler.

Açık deniz rüzgarı: Açık denizde, genellikle okyanusta kurulan rüzgar türbinleri tarafından üretilen elektriği ifade eder.

Petrol: Hem konvansiyonel hem de konvansiyonel olmayan petrol üretimini içerir. Petrol ürünleri rafineri gazı, etan, sıvı petrol gazı, uçak benzini, motor benzini, jet yakıtları, gazyağı, gaz/dizel yağı, ağır fuel , nafta, beyaz ispiptolar, madeni yağlar, bitüm, parafin, mumlar ve petrol kokunu içerir.

Diğer enerji sektörü: Dönüşüm endüstrileri tarafından enerji kullanımını ve birincil enerjinin nihai tüketici sektörlerde kullanılabilecek bir forma dönüştürülmesindeki enerji kayıplarını kapsar. Düşük emisyonlu hidrojen ve hidrojen bazlı yakıtların üretimi, biyoenerji işleme, gaz işleri, petrol rafinasyonu, kömür ve gaz dönüşümü ve sıvılaştırılmasındaki kayıpları içerir. Ayrıca kömür madenlerinde, petrol ve gaz çıkarımında ve elektrik ve ısı üretiminde enerjinin kendi kullanımını da içerir. Transferler ve istatistiksel farklılıklar da bu kategoriye dahildir. Yüksek fırınlarda ve kok fırınlarında yakıt dönüşümü bu kategoride hesaba katılmaz.

Diğer sanayi: Gıda işleme, makine, tekstil, ulaşım ekipmanları, ağaç işleme, inşaat ve madencilik (bkz. "Hafif sanayiler") ile başka bir yerde belirtilmeyen diğer sanayileri içeren bir sanayi dalı kategorisidir. Bazen enerji yoğun olmayan sanayiler olarak da adlandırılır.

Binek araçlar: Moped veya motosiklet dışında, yolcu taşımaya yönelik motorlu kara taşıtları. Öncelikli olarak yolcu taşımak için tasarlanmış ve kullanılan minibüsleri içerir. Hafif ticari araçlar, motorlu otobüsler, şehir içi otobüsler ve minibüsler/mini otobüsler hariçtir.

Enerji üretimi: Elektrik santralleri, ısı santralleri ve birleşik ısı ve güç santrallerinde yakıt kullanımını ifade eder. Hem ana faaliyet üreticisi tesisler hem de kendi kullanımları için yakıt üreten küçük tesisler (otoprodüktörler) dahildir.

Proses emisyonları: Malzemeleri kimyasal veya fiziksel olarak dönüştüren endüstriyel süreçlerden kaynaklanan CO₂ emisyonları. Kayda değer bir örnek, kalsiyum karbonat kirece dönüştürüldüğünde ve bu da klinker üretmek için kullanıldığında CO₂'nin salındığı çimento .

Üretken kullanımlar: Ekonomik bir amaca yönelik olarak kullanılan enerji: tarım, sanayi, hizmetler ve enerji dışı kullanım. Ulaştırma sektöründen gelen bazı enerji talepleri (örneğin yük) üretken olarak değerlendirilebilir ancak ayrı olarak ele alınmaktadır.

Nadir toprak elementleri (REE'ler): Periyodik tablodaki 17 kimyasal elementten oluşan bir grup, özellikle 15 lantanit artı skandiyum ve itriyum. REE'ler rüzgar türbinleri, elektrikli araç motorları ve elektrolizörler dahil olmak üzere bazı temiz enerji teknolojilerinin temel bileşenleridir.

Yenilenebilir kaynaklar: Elektrik ve ısı üretimi için biyoenerji, jeotermal, hidroelektrik, güneş fotovoltaikleri (PV), CSP, rüzgar ve deniz (gelgit ve dalga) enerjisini içerir.

Konut: Alan ısıtma ve soğutma, su ısıtma, aydınlatma, aletler, elektronik cihazlar ve pişirme dahil olmak üzere haneler tarafından kullanılan enerji.

Karayolu taşımacılığı: Tüm karayolu araç türlerini (binek otomobiller, iki/üç tekerlekli araçlar, hafif ticari araçlar, otobüsler ve orta ve ağır yük kamyonları) içerir.

Hizmetler: Ofisler, mağazalar, oteller, restoranlar gibi ticari tesislerde ve okullar, hastaneler, devlet daireleri gibi kurumsal binalarda kullanılan enerji. Hizmetlerde enerji kullanımı alan ısıtma ve soğutma, su ısıtma, aydınlatma, cihazlar, pişirme ve tuzdan arındırmayı içerir.

Şeyl gazı: Şeyl olarak sınıflandırılan yaygın bir kayaç içinde bulunan doğal gaz. Şeyl oluşumları düşük geçirgenlik ile karakterize edilir ve geleneksel bir rezervuara kıyasla gazın kayadan akma kabiliyeti daha sınırlıdır. Şeyl gazı genellikle hidrolik çatlatma kullanılarak üretilir.

Nakliye/navigasyon: Bu taşımacılık alt sektörü hem yurtiçi hem de uluslararası deniz taşımacılığını ve bunların deniz yakıtlarının kullanımını kapsamaktadır. Yurtiçi seyrüsefer, iç su yollarında ve ulusal deniz yolculuklarında (herhangi bir ara yabancı liman olmadan aynı ülkede başlar ve biter) malların veya insanların taşınmasını kapsar. Uluslararası seyrüsefer, mal veya yolcu taşıyan uluslararası seferler sırasında tüketilmek üzere herhangi bir uyruktan ticari gemilere (yolcu gemileri dahil) teslim edilen yakıt miktarlarını içerir.

Güneş enerjisi: Güneş fotovoltaiklerini ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisini içerir.

Güneş fotovoltaikleri (PV): Güneş fotovoltaik hücrelerinden üretilen elektrik.

Katı biyoenerji: Odun kömürü, yakacak odun, tezek, tarımsal kalıntılar, odun atıkları ve diğer katı atıkları içerir.

Katı yakıtlar: Kömür, modern katı biyoenerji, geleneksel biyokütle kullanımı ve endüstriyel ve belediye atıklarını içerir.

Buhar kömürü: Esas olarak enerji santrallerinde ve daha az ölçüde sanayide ısı üretimi veya buhar yükseltme için kullanılan kömür türü. Tipik olarak, buhar kömürü çelik üretimi için yeterli kalitede değildir. Bu kalitedeki kömür yaygın olarak termal kömür olarak da bilinir.

Sentetik metan: Düşük karbonlu sentetik metan, biyogenik veya atmosferik bir kaynaktan düşük karbonlu hidrojen ve CO₂'nin metanlaştırılması yoluyla üretilir.

Sentetik petrol: Hidrojen (H₂) ve karbon monoksit (CO) karışımı olan sentez gazından Fischer-Tropsch dönüşümü veya metanol sentezi yoluyla üretilen düşük karbonlu sentetik petrol.

Sıkı petrol: Genellikle hidrolik çatlatma kullanılarak şeyl veya diğer çok düşük geçirgenlikli oluşumlardan üretilen petrol. Bu bazen hafif sıkı petrol olarak da adlandırılır. Sıkı petrol, yalnızca sıkı ham petrolü içeren Amerika Birleşik Devletleri hariç sıkı ham petrol ve kondensat üretimini içerir (ABD sıkı kondensat hacimleri doğal gaz sıvılarına dahildir).

Toplam enerji arzı (TES): Sadece yurtiçi talebi temsil eder ve elektrik ve ısı üretimi, diğer enerji sektörü ve toplam nihai tüketim olarak ayrılır.

Toplam nihai tüketim (TFC): Çeşitli son kullanım sektörleri tarafından gerçekleştirilen tüketimin toplamıdır. TFC şu sektörlerdeki enerji talebine : sanayi (imalat, madencilik, kimyasal üretimi, yüksek fırınlar ve kok fırınları dahil), ulaştırma, binalar (konut ve hizmetler dahil) ve diğer (tarım ve diğer enerji dışı kullanımlar dahil). Uluslararası denizcilik ve havacılık yakıtları, ulaştırma sektörüne dahil edildiği dünya düzeyi hariç tutulmuştur.

Toplam nihai enerji tüketimi (TFEC): Öncelikle Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinin 7.2 numaralı hedefine yönelik ilerlemeyi izlemek için tanımlanmış bir değişkendir. Son kullanım sektörlerine göre toplam nihai tüketimi içerir ancak enerji dışı kullanımı hariç tutar. Dünya düzeyi hariç olmak üzere, uluslararası denizcilik ve havacılık yakıtlarını hariç tutar. Tipik olarak, TFEC'in payda olduğu toplam nihai enerji tüketimindeki yenilenebilir enerji payının hesaplanması bağlamında kullanılır (Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 7.2.1).

Toplam birincil enerji talebi (TPED): Bkz. toplam enerji arzı.

Geleneksel biyokütle kullanımı: Katı biyokütlenin üç taşlı ateş veya basit sobalar (ISO Kademe 0-2) gibi temel teknolojilerle, genellikle bacasız veya kötü çalışan bacalarla kullanılması.

Taşımacılık: Faaliyetin gerçekleştiği ekonomik sektöre bakılmaksızın ulusal topraklar içinde malların veya insanların taşınmasında kullanılan yakıtlar ve elektrik. Bu, kamu yollarını kullanan araçlara veya demiryolu araçlarında kullanılmak üzere teslim edilen yakıt ve elektriği; yurtiçi seyrüsefer için gemilere teslim edilen yakıtı; yurtiçi havacılık için uçaklara teslim edilen yakıtı ve yakıtların boru hatları yoluyla tesliminde tüketilen enerjiyi içerir. Uluslararası denizcilik ve havacılık yakıt ikmal tesislerine teslim edilen yakıt sadece dünya düzeyinde sunulmakta ve yerel düzeyde ulaştırma sektörünün dışında tutulmaktadır.

Kamyonlar: Ticari araçların tüm boyut kategorilerini içerir: hafif kamyonlar (brüt araç ağırlığı 3,5 tondan az); orta yük kamyonları (brüt araç ağırlığı 3,5 ila 15 ton); ve ağır yük kamyonları (>15 ton).

Azaltılmamış kömür: CCUS olmayan tesislerdeki kömür tüketimi.

Hız kesmeyen fosil yakıt kullanımı: CCUS olmayan tesislerde fosil yakıt tüketimi.

Azaltılmamış gaz: CCUS olmayan tesislerdeki doğal gaz tüketimi.

Faydalı enerji: Son kullanıcıların ihtiyaçlarını karşılamak için kullanabilecekleri enerji. Bu aynı zamanda enerji hizmet talebi olarak da adlandırılır. Kullanım noktasındaki dönüşüm kayıplarının bir sonucu olarak, faydalı enerji miktarı çoğu teknoloji için karşılık gelen nihai enerji talebinden daha düşüktür. Elektrik kullanan ekipmanlar genellikle diğer yakıtları kullanan ekipmanlardan daha yüksek dönüşüm verimliliğine sahiptir, bu da tüketilen bir birim enerji için elektriğin daha fazla enerji hizmeti sağlayabileceği anlamına gelir.

Değer ayarlı seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (VALCOE): Hem maliyetler hem de sisteme sağlanan değer hakkında bilgi içerir. LCOE'ye dayalı olarak, enerji üretim teknolojileri için daha eksiksiz bir rekabet gücü ölçütü sağlamak üzere enerji, kapasite ve esneklik değeri tahminleri dahil edilir.

Değişken yenilenebilir enerji (VRE): Herhangi bir zamanda maksimum çıktısı değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcudiyetine bağlı olan teknolojileri ifade eder. VRE, rüzgar enerjisi, güneş PV, nehir tipi hidroelektrik, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (termal depolamanın dahil olmadığı) ve deniz (gelgit ve dalga) gibi geniş bir teknoloji yelpazesini içerir.

Sıfır-karbona hazır binalar: Sıfır karbona hazır bir bina yüksek enerji verimliliğine sahiptir ve ya doğrudan yenilenebilir enerji ya da elektrik veya bölgesel ısı gibi tamamen karbonsuzlaştırılabilen bir enerji kaynağı kullanır.

Sıfır emisyonlu araçlar (ZEV'ler): Egzoz borusundan CO₂ olmadan çalışabilen araçlar (bataryalı elektrikli, plug-in hibrit ve yakıt hücreli araçlar).

Bölgesel ve ülke gruplandırmaları

GEC Modelinden elde edilen sonuçlar genellikle aşağıdaki bölgesel gruplandırmalarla sunulmaktadır:

Gelişmiş ekonomiler: OECD bölgesel gruplaması ve Bulgaristan, Hırvatistan, Kıbrıs^{1,2}, Malta ve Romanya.

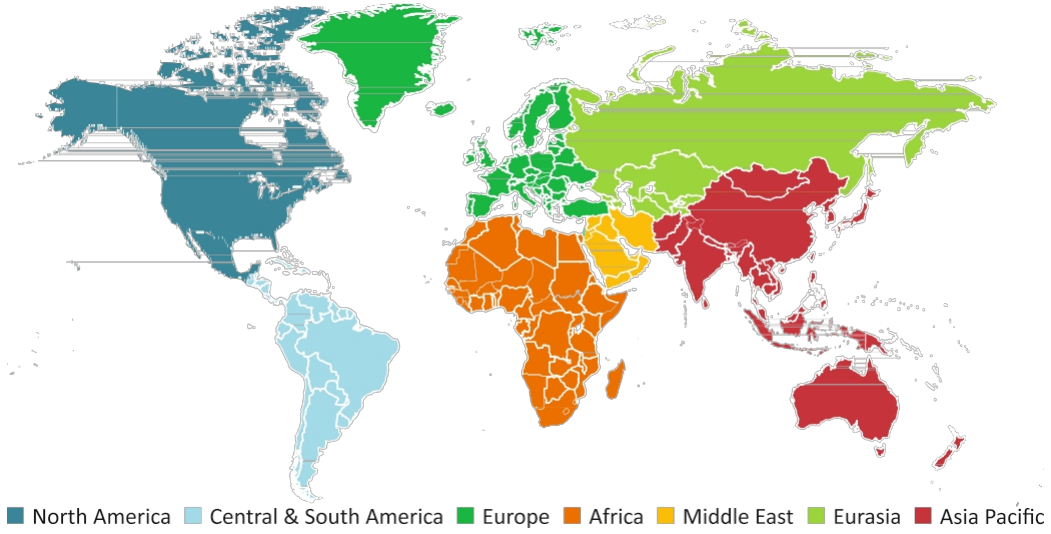
Afrika: Kuzey Afrika ve Sahraaltı Afrika bölgesel grupları.

Asya Pasifik: Güneydoğu Asya bölgesel gruplaması ve Avustralya, Bangladeş, Kore Demokratik Halk Cumhuriyeti (Kuzey Kore), Hindistan, Japonya, Kore, Moğolistan, Nepal, Yeni Zelanda, Pakistan, Halk Cumhuriyeti (Çin), Sri Lanka, Çin Taipei ve diğer Asya Pasifik ülkeleri ve bölgeleri³

Hazar: Ermenistan, Azerbaycan, Gürcistan, Kazakistan, Kırgızistan, Tacikistan, Türkmenistan ve Özbekistan.

Orta ve Güney Amerika: Arjantin, Bolivya Çokuluslu Devleti (Bolivya), Brezilya, Şili, Kolombiya, Kosta Rika, Küba, Curaçao, Dominik Cumhuriyeti, Ekvador, El Salvador, Guatemala, Guyana, Haiti, Honduras, Jamaika, Nikaragua, Panama, Paraguay, Peru, Surinam, Trinidad ve Tobago, Uruguay, Venezuela Bolivar Cumhuriyeti (Venezuela) ve diğer Orta ve Güney Amerika ülkeleri ve bölgeleri⁴

Şekil A.1► GEC Modeli bölgesel gruplandırmaları



IEA. CC BY 4.0.

Not: Bu harita, herhangi bir bölgenin statüsüne veya egemenliğine, uluslararası sınırların ve hudutların belirlenmesine ve herhangi bir bölgenin, şehrin veya alanın adına hâlel getirmez.

Çin: Çin (Halk Cumhuriyeti) ve Hong Kong, Çin'i kapsar.

Gelişmekte olan Asya: Avustralya, Japonya, Kore ve Yeni Zelanda hariç Asya Pasifik bölgesel gruplaması.

Yükselen piyasa ve gelişmekte olan ekonomiler: Gelişmiş ekonomiler bölgesel gruplamasına dahil olmayan diğer tüm ülkeler.

Avrasya: Hazar bölgesel gruplaması ve Rusya Federasyonu (Rusya).

Avrupa: Avrupa Birliği bölgesel gruplandırması ve Arnavutluk, Belarus, Bosna Hersek, Kuzey Makedonya, Cebelitarık, İzlanda, İsrail⁽⁵⁾, Kosova, Karadağ, Norveç, Sırbistan, İsviçre, Moldova Cumhuriyeti, Türkiye Cumhuriyeti, Ukrayna ve Birleşik Krallık.

Avrupa Birliği: Avusturya, Belçika, Bulgaristan, Hırvatistan, Kıbrıs^{1,2}, Çek Cumhuriyeti, Danimarka, Estonya, Finlandiya, Fransa, Almanya, Yunanistan, Macaristan, İrlanda, İtalya, Letonya, Litvanya, Lüksemburg, Malta, Hollanda, Polonya, Portekiz, Romanya, Slovak Cumhuriyeti, Slovenya, İspanya ve İsveç.

IEA (Uluslararası Enerji Ajansı): Avustralya, Avusturya, Belçika, Kanada, Çek Cumhuriyeti, Danimarka, Estonya, Finlandiya, Fransa, Almanya, Yunanistan, Macaristan, İrlanda, İtalya, Japonya, Kore, Litvanya, Lüksemburg, Meksika, Hollanda, Yeni Zelanda, Norveç, Polonya, Portekiz, Slovak Cumhuriyeti, İspanya, İsveç, İsviçre, Türkiye, Birleşik Krallık ve Amerika Birleşik Devletleri.

Latin Amerika ve Karayipler: Orta ve Güney Amerika bölgesel gruplaması ve Meksika.

Orta Doğu: Bahreyn, İran İslam Cumhuriyeti (İran), Irak, Ürdün, Kuveyt, Lübnan, Umman, Katar, Suudi Arabistan, Suriye Arap Cumhuriyeti (Suriye), Birleşik Arap Emirlikleri ve Yemen.

OECD dışı: OECD bölgesel gruplandırmasına dahil olmayan diğer tüm ülkeler.

OPEC Dışı: OPEC bölgesel gruplandırmasına dahil olmayan diğer tüm ülkeler.

Kuzey Afrika: Cezayir, Mısır, Libya, Fas ve Tunus.

Kuzey Amerika: Kanada, Meksika ve Amerika Birleşik Devletleri.

OECD (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı): Avustralya, Avusturya, Belçika, Kanada, Şili, Kosta Rika, Çek Cumhuriyeti, Kolombiya, Danimarka, Estonya, Finlandiya, Fransa, Almanya, Yunanistan, Macaristan, İzlanda, İrlanda, İsrail, İtalya, Japonya, Kore, Letonya, Litvanya, Lüksemburg, Meksika, Hollanda, Yeni Zelanda, Norveç, Polonya, Portekiz, Slovak Cumhuriyeti, Slovenya, İspanya, İsveç, İsviçre, Türkiye Cumhuriyeti, Birleşik Krallık ve Amerika Birleşik Devletleri.

OPEC (Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü): Cezayir, Angola, Kongo Cumhuriyeti (Kongo), Ekvator Ginesi, Gabon, İran İslam Cumhuriyeti (İran), Irak, Kuveyt, Libya, Nijerya, Suudi Arabistan, Birleşik Arap Emirlikleri ve Bolivarcı Venezuela Cumhuriyeti (Venezuela).

Güneydoğu Asya: Brunei Darussalam, Kamboçya, Endonezya, Lao Demokratik Halk Cumhuriyeti (Lao PDR), Malezya, Myanmar, Filipinler, Singapur, Tayland ve Viet Nam. Bu ülkelerin hepsi Güneydoğu Asya Uluslar Birliği (ASEAN) üyesidir.

Sahra Altı Afrika: Angola, Benin, Botsvana, Kamerun, Kongo Cumhuriyeti (Kongo), Fildişi Sahili, Kongo Demokratik Cumhuriyeti, Ekvator Ginesi, Eritre, Etiyopya, Gabon, Gana, Kenya, Esvatini Krallığı, Madagaskar, Mauritius, Mozambik, Namibya, Nijer, Nijerya, Ruanda, Senegal, Güney Afrika, Güney Sudan, Sudan, Tanzanya Birleşik Cumhuriyeti (Tanzanya), Togo, Uganda, Zambiya, Zimbabve ve diğer Afrika ülkeleri ve bölgeleri.⁶

Ülke notları

¹ Türkiye Cumhuriyeti'nin Notu: Bu belgede "Kıbrıs" ile ilgili olarak yer alan bilgiler adanın güney kesimine ilişkindir. Adada Kıbrıslı Türk ve Rumları temsil eden tek bir otorite bulunmamaktadır. Türkiye, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'ni (KKTC) tanımaktadır. Birleşmiş Milletler çerçevesinde kalıcı ve adil bir çözüm bulunana kadar Türkiye "Kıbrıs meselesi"ne ilişkin tutumunu koruyacaktır.

² OECD ve Avrupa Birliği'nin tüm Avrupa Birliği Üye Devletleri tarafından not edilmiştir: Kıbrıs Cumhuriyeti, Türkiye Cumhuriyeti hariç Birleşmiş Milletler'in tüm üyeleri tarafından tanınmaktadır. Bu belgedeki bilgiler Kıbrıs Cumhuriyeti Hükümeti'nin etkin kontrolü altındaki alanla ilgilidir.

³ Bireysel veriler mevcut değildir ve aşağıdaki ülkeler için toplu olarak tahmin edilmiştir: Afganistan, Butan, Cook Adaları, Fiji, Fransız Polinezyası, Kiribati, Makao (Çin), Maldivler, Yeni Kaledonya, Palau, Papua Yeni Gine, Samoa, Solomon Adaları, Doğu Timor ve Tonga ve Vanuatu.

⁴ Bireysel veriler mevcut değildir ve aşağıdakiler için toplu olarak tahmin edilmiştir: Anguilla, Antigua ve Barbuda, Aruba, Bahamalar, Barbados, Belize, Bermuda, Bonaire, Sint Eustatius ve Saba, İngiliz Virgin Adaları, Cayman Adaları, Dominika, Falkland Adaları (Malvinas), Grenada, Montserrat, Saint Kitts ve Nevis, Saint Lucia, Saint Pierre ve Miquelon, Saint Vincent ve Grenadinler, Saint Maarten (Hollanda kısmı), Turks ve Caicos Adaları.

⁵ İsrail'e ilişkin istatistik veriler ilgili İsrail makamları tarafından ve onların sorumluluğu altında sağlanmaktadır. Bu verilerin OECD ve/veya IEA tarafından kullanılması, Golan Tepeleri, Doğu Kudüs ve Batı Şeria'daki İsrail yerleşimlerinin uluslararası hukuk açısından statüsüne hâle getirmez.

⁶ Bireysel veriler mevcut değildir ve toplu olarak tahmin edilmektedir: Burkina Faso, Burundi, Cabo Verde, Orta Afrika Cumhuriyeti, Çad, Komorlar, Cibuti, Gambiya, Gine, Gine-Bissau, Lesotho, Liberya, Malavi, Mali, Moritanya, Sao Tome ve Principe, Seyşeller, Sierra Leone ve Somali.

Fosil yakıt tedarik bölgeleri

Model açıklamasında belirtildiği üzere, fosil yakıt tedarik modülleri, GEC Modelinin geri kalanında kullanılan bölgelere göre farklı bir bölgesel dağılıma sahiptir. Bu, tedarik modüllerinin fosil yakıt üreten ülkelerin ve bölgelerin özelliklerini daha doğru bir şekilde yakalamasını sağlar. Bu modüller için bölgesel dağılım aşağıdaki gibidir :

Petrol ve doğal gaz tedarik modülü bölgeleri

GEC Model petrol ve doğal gaz tedarik modülü 113 bölgeden oluşmaktadır ve bunlardan 102 ülke tek tek modellenmiştir. Boru hattı ve sıvılaştırılmış doğal gaza göre ayrıştırılmış ticaret hacimleri aşağıdaki 20 bölge için modellenmiştir: Kanada, Meksika, Amerika Birleşik Devletleri, Brezilya, Diğer Orta ve Güney Amerika, Avrupa Birliği, Diğer Avrupa, Avrupa'daki diğer geçiş ekonomileri, Kuzey Afrika, Batı Afrika, Doğu Afrika, Rusya, Hazar, Orta Doğu, Japonya ve Kore, Avustralya ve Yeni Zelanda, Çin, Hindistan, Güneydoğu Asya ve Diğer Asya Pasifik.

Petrol ve doğal gaz modülünde ayrı ayrı modellenen 102 ülke, 20 doğal gaz ticaret bölgesine aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır:

Kanada: Kanada.

Meksika: Meksika.

Birleşik Devletler: Birleşik Devletler.

Brezilya: Brezilya.

Diğer Orta ve Güney Amerika: Arjantin, Bolivya, Şili, Kolombiya, Küba, Ekvador, Guyana, Paraguay, Peru, Trinidad ve Tobago, Uruguay ve Venezuela.

Avrupa Birliği: Danimarka, Estonya, Fransa, Almanya, İtalya, Hollanda, Polonya, Romanya, Slovenya ve İsveç.

Diğer Avrupa ülkeleri: Grönland, İsrail, Norveç ve Birleşik Krallık.

Avrupa'daki diğer geçiş ekonomileri: Ukrayna.

Kuzey Afrika: Cezayir, Libya, Mısır, Tunus ve Fas.

Batı Afrika: Angola, Benin, Kamerun, Orta Afrika Cumhuriyeti, Çad, Kongo, Demokratik Kongo Cumhuriyeti, Ekvator Ginesi, Gabon, Gambiya, Gana, Gine, Gine-Bissau, Fildişi Sahili, Liberya, Moritanya, Nijer, Nijerya, Senegal, Sierra Leone ve Togo.

Doğu Afrika: Botswana, Eritre, Etiyopya, Kenya, Madagaskar, Mozambik, Namibya, Seyşeller, Somali, Güney Afrika, Güney Sudan, Sudan, Tanzanya ve Uganda.

Rusya: Rusya.

Hazar: Azerbaycan, Kazakistan, Türkmenistan ve Özbekistan.

Orta Doğu: Bahreyn, İran, Irak, Ürdün, Kuveyt, Lübnan, Umman, Katar, Suudi Arabistan, Suriye, Birleşik Arap Emirlikleri ve Yemen. Suudi Arabistan ve Kuveyt'e ait veriler Bölge'deki üretimin %50'sini içermektedir.

Japonya ve Kore: Japonya ve Kore.

Avustralya ve Yeni Zelanda: Avustralya ve Yeni Zelanda.

Çin: Çin.

Hindistan: Hindistan.

Güneydoğu Asya: Brunei Darussalam, Endonezya, Malezya, Filipinler, Tayland ve Viet Nam.

Diğer Asya Pasifik: Bangladeş ve Pakistan.

Kömür tedarik modülü bölgeleri

19 ülke GEC Model kömür tedarik modülünde bireysel olarak modellenmiştir: Avustralya, Brezilya, Kanada, Şili, Çin, Kolombiya, Hindistan, Endonezya, Japonya, Kore, Meksika, Moğolistan, Mozambik, Yeni Zelanda, Rusya, Güney Afrika, Amerika Birleşik Devletleri, Venezuela ve Vietnam.

Kısaltmalar

ACEA	Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği
AC	alternatif akım
AFOLU	tarım, ormancılık ve diğer arazi kullanımı
AIM	Havacılık Entegre Modeli
APS	Açıklanmış Bağışlar Senaryosu
ASEAN	Güneydoğu Asya Ülkeleri Birliği

ASIF	faaliyet, yapı, yoğunluk ve yakıt kullanımı
ATJ	alkolden jete
BECCS	CCUS ile donatılmış biyoenerji
BEV	bataryalı elektrikli araçlar
CAPEX	sermaye harcamaları
CBM	kömür yatağı metanı
CCGT	kombine çevrim gaz türbini
CCUS	karbon yakalama, kullanma ve depolama
CDR	karbondioksit giderimi
CH₄	metan
CHP	birleşik ısı ve güç; kojenerasyon terimi bazen kullanılır
CO	karbon monoksit
CO₂	karbondioksit
CO₂-eq	karbondioksit eşdeğeri
CSP	yoğunlaştırılmış güneş enerjisi
CTG	kömürden gaza
CTL	kömürden sıvıya
DAC	doğrudan hava yakalama
DACU	doğrudan hava yakalama ve kullanma
DACS	doğrudan hava yakalama ve depolama
DC	doğru akım
DRI	doğrudan indirgenmiş demir
DSİ	talep tarafı entegrasyonu
DSO	dağıtım sistemi operatörü
DSR	talep tarafı müdahalesi
EAF	elektrik ark ocağı
EHOB	ekstra-ağır petrol ve bitüm
EOR	gelişmiş petrol geri kazanımı
EPC	Mühendislik, tedarik ve inşaat
ESG	çevresel, sosyal ve yönetim
ETP	Enerji Teknolojisi Perspektifleri
ETSAP	Enerji Teknolojisi Sistem Analizi Programı
AB ETS	Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi
EV	elektrikli araç
EVSE	Elektrikli araç tedarik ekipmanları
FAME	yağ asidi metil esteri
FAO	Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
FCEV	yakıt hücreli elektrikli araç
DOĞRUDAN YABANCI YATIRIM	doğrudan yabancı yatırım
FTE	Tam zamanlı istihdam
KAZANÇLAR	Sera Gazı - Hava Kirliliği Etkileşimleri ve Sinerjileri
GSYİH	gayri safi yurtiçi hasıla
GEC Modeli	Küresel Enerji ve İklim Modeli
SERA GAZI	sera gazları
GIMF Modeli	Küresel Entegre Parasal ve Mali Model
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
GLOBIOM	Küresel Biyosfer Yönetim Modeli
GTL	gazdan sıvıya
H₂	Hidrojen
HEFA	hidrojene esterler ve yağ asitleri

HFO	ağır fuel oil
HRS	hidrojen yakıt ikmal istasyonları
HSR	yüksek hızlı demiryolu
HVO	hidroişlem görmüş bitkisel yağ
IAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
BUZ	içten yanmalı motor
ICS	geliştirilmiş biyokütle ocakları
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IGCC	entegre gazlaştırma kombine çevrimi
IIASA	Uluslararası Uygulamalı Sistem Analizi Enstitüsü
ILO	Uluslararası Çalışma Örgütü
IMF	Uluslararası Para Fonu
IMO	Uluslararası Denizcilik Örgütü
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
ISCED	Uluslararası Standart Eğitim Sınıflandırması
ISIC	Uluslararası Standart Sanayi Sınıflandırması
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
JRC	Ortak Araştırma Merkezi
LCOE	seviyelendirilmiş elektrik maliyeti
LOHC	sıvı organik hidrojen taşıyıcı
LCV	hafif ticari araç
LDV	hafif hizmet aracı
LED	ışık yayan diyot
LMDI	logaritmik ortalama divisia endeksi
LNG	sıvılaştırılmış doğal gaz
LPG	sıvılaştırılmış petrol gazı
LRMC	Uzun dönem marjinal maliyet
AKAKDO	arazi kullanımı, arazi kullanım değişikliği ve ormancılık
MAGICC	Sera Gazı Kaynaklı İklim Değişikliğinin Değerlendirilmesi için Model
MoMo	Hareketlilik Modeli
MTOMR	Orta Vadeli Petrol Piyasası Raporu
NAICS	Kuzey Amerika Sanayi Sınıflandırma Sistemi
NACE	Avrupa Ekonomik Faaliyetler Nomenklatürü
NDC'ler	Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkıları
NEA	Nükleer Enerji Ajansı
NGL'ler	doğal gaz sıvıları
NGV	doğal gazlı araç
NH3	amonyak
NOX	azot oksitleri
N2O	azot oksit
NZE	2050'ye Kadar Net Sıfır Emisyon Senaryosu
İŞLETME VE BAKIM	İşletme ve bakım
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı
OnSSET	Açık Kaynaklı Mekansal Elektrifikasyon Aracı
OPEC	Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü
OPEX	operasyonel harcamalar
PEM	polimer elektrolit membran veya proton değişim membranı
PLDV	binek hafif hizmet aracı
BAŞBAKAN	partikül madde

PM2.5	ince partikül madde
PPA	güç satın alma anlaşması
PPP	kamu-özel sektör ortaklığı
PV	fotovoltaik
SDG	Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi
SDS	Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu
SMR	buhar metan reformasyonu
SO2	sülfür dioksit
SOEC	Katı oksit elektrolizör hücreleri
ADIMLAR	Belirtilen Politikalar Senaryosu
SUV'lar	Spor hizmet araçları
SVO	Düz bitkisel yağ
T&D	iletim ve dağıtım
TCP	Teknoloji İşbirliği Programı
TES	toplam enerji tedarığı
TFC	toplam nihai tüketim
TFEC	toplam nihai enerji tüketimi
TIMES Modeli	Entegre MARKAL-EFOM Sistem Modeli
TRL	Teknoloji Hazırlık Seviyesi
TSO	iletim sistemi operatörü
UCL	Londra Üniversitesi Koleji
BM	Birleşmiş Milletler
UNIDO	Birleşmiş Milletler Endüstriyel Kalkınma Örgütü
USGS	Birleşik Devletler Jeolojik Araştırma
VALCOE	değere göre düzeltilmiş seviyelendirilmiş elektrik maliyeti
VRE	değişken yenilenebilir enerji
AOSM	ağırlıklı ortalama sermaye maliyeti
WEM	Dünya Enerji Modeli
WEO	Dünya Enerji Görünümü
DSÖ	Dünya Sağlık Örgütü
ZEV	sıfır emisyonlu araç
ZCRB	sıfır karbona hazır bina

Referanslar

- Aboumahboub ve diğerleri (2010), Optimal Configuration of a Renewable-based Electricity Supply Sector, https://www.researchgate.net/publication/228870612_Optimal_Configuration_of_a_Renewable-based_Electricity_Supply_Sector
- Ang, B. (2004), Enerjide politika oluşturma için ayrıştırma analizi: tercih edilen yöntem hangisi? Enerji Politikası Cilt 32, Sayı 9, s. 1131-1139, [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00076-4)
- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe/Federal Institute for Geosciences and Natural Resources) (2023), BGR Energy Study 2023 - Data and Developments Concerning German and Global Supplies (Summary), https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Energie/Produkte/energy_study_2023_summary_en.html
- BNEF (Bloomberg New Energy Finance) (2023), 2023'te En İyi 10 Enerji Depolama Trendi, <https://about.bnef.com/blog/top-10-energy-storage-trends-in-2023/>
- CEDIGAZ (2024), Cedigaz veritabanları, <https://www.cedigaz.org/databases/>
- Cole, W., Frazier, A. W., & Augustine, C. (2021), Yardımcı Ölçekli Batarya Depolama için Maliyet Tahminleri: 2021 Güncellemesi, <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79236.pdf>
- Dargay, J., Gately, D., & Sommer, M. (2007), Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030, https://www.researchgate.net/publication/46523642_Vehicle_Ownership_and_Income_Growth_Worldwide_1960-2030
- Econoler, ve diğerleri (2011), SOĞUTMA BENZETME ÇALIŞMASI Bölüm 1: Haritalama Bileşeni Raporu, https://www.clasp.ngo/wp-content/uploads/2021/01/RAC-benchmarking_1-Mapping-component.pdf
- Energy Institute (2024), Statistical Review of World Energy, <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- ENTSO-E (Avrupa Elektrik İletim Sistemi Operatörleri Ağı) (2024), Şeffaflık Platformu, <https://transparency.entsoe.eu/>
- Avrupa Komisyonu, (2024), Binek otomobiller ve hafif ticari araçlar için gerçek dünyadaki CO2 emisyonu farkının gelişimine ilişkin 2019/631 Tüzüğü'nün (AB) 12(3) Maddesi uyarınca Komisyon raporu, https://climate.ec.europa.eu/document/download/b644d4fe-1385-4b56-98d9-21e7e9f3601b_tr?filename=report.pdf
- Financial Times (2020), Elektrikli otomobil maliyetleri geleneksel motorlardan daha yüksek olmaya devam edecek, <https://www.ft.com/content/a7e58ce7-4fab-424a-b1fa-f833ce948cb7>
- GBPN ve CEU (Global Buildings Performance Network ve Central European University) (2012), https://www.gbpn.org/wp-content/uploads/2014/06/08.CEU-Technical-Report-copy_0.pdf
- Heide ve diğerleri (2010), Gelecekte yüksek oranda yenilenebilir bir Avrupa'da rüzgar ve güneş enerjisinin mevsimsel optimum karışımı, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110001291>
- Hofmann ve diğerleri, (2021), Yenilenebilir Güç Potansiyellerini ve Zaman Serilerini Hesaplamak için Hafif Bir Python Paketi, Journal of Open Source Software, 6(62), 3294, <https://doi.org/10.21105/joss.03294>
- ICCT (Uluslararası Temiz Ulaşım Konseyi) (2022), AVRUPA'DA PLUG-IN HİBRİT ARAÇLARIN GERÇEK DÜNYA KULLANIMI, <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/real-world-ph-ev-use-jun22-1.pdf>
- IEA (Uluslararası Enerji Ajansı) (2024a), Veri ve istatistikler, <https://www.iea.org/data-and-statistics>

IEA (2024b), Enerji Teknolojisi Perspektifleri, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2024>

IEA (2024c), Politikalar veritabanı, <https://www.iea.org/policies/about>

IEA (2024d), Küresel Enerji ve İklim Modeli 2023 temel girdi verileri, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/global-energy-and-climate-model-2023-key-input-data>

IEA (2024e), Global Hydrogen Review 2024, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>

IEA (2024f), Bataryalar ve Güvenli Enerji Geçişleri, <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>

IEA (2024g), Veri ve İstatistikler: Gerçek Zamanlı Elektrik Takipçisi, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/real-time-electricity-tracker>

IEA (2024h), Veri ve istatistikler: Enerji için Hava Durumu İzleyicisi, www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/weather-for-energy-tracker

IEA (2023), Fosil Yakıt Sübvansiyonları, <https://www.iea.org/topics/energy-subsidies>

IEA (2022a), Elektrikli Araçlar Girişimi, <https://www.iea.org/programmes/electric-vehicles-initiative>

IEA (2022b), G7 Üyelerinde Ağır Sanayi Sektörlerinde Net Sıfıra Ulaşılması, <https://www.iea.org/reports/achieving-net-zero-heavy-industry-sectors-in-g7-members>

IEA (2019), Temiz enerji geçişlerinde malzeme verimliliği, <https://www.iea.org/reports/material-efficiency-in-clean-energy-transitions>

IEA-ETSAP (Enerji Teknolojisi Sistemleri Analiz Programı) (2024), TIMES, <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times>

IIASA (Uluslararası Uygulamalı Sistem Analizi Enstitüsü) (2023), GAINS Teknik Raporları, https://gains.iiasa.ac.at/models/gains_tech_reports.html

IIASA (2022), Küresel Biyosfer Yönetim Modeli, <https://iiasa.ac.at/models-tools-data/globiom>

ILO (Uluslararası Çalışma Örgütü) (2023a), Uluslararası Standart Meslek Sınıflaması (ISCO), <https://ilostat.ilo.org/resources/concepts-and-definitions/classification-occupation/>

ILO (2023b), ILOSTAT, <https://ilostat.ilo.org/data>

ILO (2003), Kayıt dışı istihdamın istatistiksel tanımına ilişkin kılavuz ilkeler, <https://www.ilo.org/resource/guidelines-concerning-statistical-definition-informal-employment-0>

IMF (Uluslararası Para Fonu) (2024), Dünya Ekonomik Görünüm Veritabanı, <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2024/April>

IMO (Uluslararası Denizcilik Örgütü) (2021), Dördüncü Sera Gazı Çalışması 2020, <https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>

IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) (2021), IPCC Altıncı Değerlendirme Raporu, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

IPCC (2018), 1,5°C Küresel Isınma, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf

IRENA (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı) (2020), 2019'da Yenilenebilir Enerji Üretim Maliyetleri, <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>

- IUCN (Uluslararası Doğa Koruma Birliği) (2008), Korunan Alan Yönetim Kategorileri Uygulama Kılavuzu, <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/pag-021.pdf>
- James, B. ve diğerleri (2018), Ulaşım Uygulamaları için Doğrudan H2 PEM Yakıt Pili Sistemlerinin Seri Üretim Maliyet Tahmini: 2018 Güncellemesi, www.energy.gov/sites/default/files/2020/02/f71/fcto-sa-2018-transport-fuel-cell-cost-analysis-2.pdf
- JATO (2021), Elektrikli Araçlar: Bir Fiyatlandırma Mücadelesi 2021, <https://info.jato.com/electric-vehicles-a-pricing-challenge>
- Kannan ve diğerleri (2007), UK MARKAL Dokümantasyonu, <https://www.ucl.ac.uk/energy-models/models/uk-markal/uk-markal-documentation>
- Koplow, D. (2009), Fiyat Aralığı Yaklaşımını Kullanarak Enerji Sübvansiyonlarını Ölçmek: Neleri dışarıda bırakıyor?, https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1631668
- Krause, J. (2017), Hafif Hizmet Araçları CO2 Emisyon Azaltımı Maliyet Eğrileri ve Maliyet Değerlendirmesi - DIONE Modeli, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC108725>
- Krause, J., & Donati, A. (2018), Ağır vasıta CO2 emisyon azaltım maliyet eğrileri ve maliyet değerlendirmesi - DIONE CO2 modelinin geliştirilmesi, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/cba78e70-8e25-11e8-8a53-01aa75ed71a1/language-tr>
- LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) (2012), Bottom-Up Enerji Analiz Sistemi - Metodoloji ve Sonuçlar, <https://international.lbl.gov/publications/bottom-energy-analysis-system>
- NREL (National Renewable Energy Laboratory - United States) (2011), DOĞU RÜZGAR ENTEGRASYONU VE İLETİMİ ÇALIŞMASI, <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/47078.pdf>
- NREL (2010a), Western Wind and Solar Integration Study, <https://www.nrel.gov/grid/wwsis.html> NREL (2010b), National Solar Radiation Database, <https://nsrdb.nrel.gov/>
- OECD (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı) (2024), Tarihsel nüfus verileri, <https://www.oecd.org/en/data.html>
- OECD-FAO (Gıda ve Tarım Örgütü) (2018), OECD-FAO Tarımsal Görünüm 2018-2027, https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2018-2027_agr_outlook-2018-tr
- OGJ (Oil and Gas Journal) (2023). Küresel petrol ve doğal gaz rezervlerinin her ikisi de artıyor, <https://www.ogj.com/general-interest/economics-markets/article/14302481/global-oil-and-natural-gas-reserves-both-increase>
- Olsen, D. (2013), Grid Integration of Aggregated Demand Response, Part I: Load Availability Profiles and Constraints for the Western Interconnection, <https://eta.lbl.gov/publications/grid-integration-aggregated-talep>
- Oxford Economics, (2024a), Küresel Ekonomik Model, Nisan 2024 Güncellemesi, <https://www.oxfordeconomics.com/service/subscription-services/macro/global-economic-model/>
- Oxford Economics (2024b), TradePrism, <https://www.oxfordeconomics.com/service/subscription-services/macro/tradepism/>
- Saint-Drenan, Y. (2020), Çevresel koşulları içeren rüzgar türbini güç eğrileri için parametrik bir model, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120306613>
- Danimarka Teknik Üniversitesi (2016), Ship-Desmo, <https://gitlab.gbar.dtu.dk/oceanwave3d/Ship-Desmo>

Thompson, S. ve diğerleri (2018), Doğrudan hidrojen yakıt hücresi elektrikli araç maliyet analizi: Sistem ve yüksek hacimli üretim tanımı, doğrulaması ve görünümü. Journal of Power Sources, pp. 304-313, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.100>

Tsiropoulos, I., Tarvydas, D., & Lebedeva, N. (2018), Mobilite ve sabit depolama uygulamaları için Li-ion piller, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC113360>

Ueckerdt ve diğerleri (2013), System LCOE: What are costs of variable renewables?, https://www.mcc-berlin.net/uploads/media/Ueckerdt_Hirth_Luderer_Edenhofer_System_LCOE_2013.pdf

UN DESA (Birleşmiş Milletler Ekonomik ve Sosyal İşler Dairesi) (2022), World Population Prospects 2022, https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf

UN DESA (2018), World Urbanization Prospects, <https://population.un.org/wup/>

UN DESA (2008), Tüm Ekonomik Faaliyetlerin Uluslararası Standart Sanayi Sınıflandırması Revizyon 4, https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesm/seriesm_4rev4e.pdf

UNESCO (Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü) (2006), ISCED 1997 Uluslararası Standart Eğitim Sınıflandırması, https://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/international-standard-classification-of-education-1997-en_0.pdf

UNIDO (Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü) (2023a). Endüstriyel İstatistik Veritabanı (INDSTAT), <https://stat.unido.org/database/INDSTAT%204%202023,%20ISIC%20Revision%204>

UNIDO (2023b), Madencilik ve Kamu Hizmetleri İstatistikleri Veritabanı (MINSTAT), <https://stat.unido.org/database/MINSTAT%202023,%20ISIC%20Revision%204>

Birleşmiş Milletler (2024), BM Büyük Veri - AIS Verileri, <https://unstats.un.org/bigdata/task-teams/ais/index.cshtml>

Birleşmiş Milletler (2023), Review of Maritime Transport 2023, <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>

UNSD (Birleşmiş Milletler İstatistik Bölümü) (2011), Enerji İstatistikleri için Uluslararası Tavsiyeler, <https://unstats.un.org/unsd/energystats/methodology/ires/>

ABD EIA (Birleşik Devletler Çevre Bilgi İdaresi) (2023), Yıllık Enerji Görünümü 2023 Varsayımları: Petrol ve Gaz Arzı Modülü, <https://statics.teams.cdn.office.net/evergreen-assets/safelinks/1/atp-safelinks.html>

USGS (United States Geological Survey) (2015), U.S. Geological Survey Amerika Birleşik Devletleri rezerv büyümesi değerlendirmesi, doi:10.3133/sir20155091

USGS (2012a), An Estimate of Undiscovered Conventional Oil and Gas Resources of the World, doi:10.3133/fs20123042

USGS (2012b), Rezerv artışından kaynaklanan dünya konvansiyonel petrol ve gaz kaynaklarına (Amerika Birleşik Devletleri dışında) potansiyel ilavelerin değerlendirilmesi, doi:10.3133/fs20123052

Ventana Systems Inc. (2024), Vensim, <https://vensim.com/>

Waide (2011), Waide, P. (2011), Cihaz Enerji Verimliliği Uyumlaştırmasından Elde Edilen Başarı Fırsatları ve CO2 Tasarrufları, Navigant Consulting ve CLASP, Londra ve Brüksel.

WEPROG (Weather & Energy PROGnoses) (2010), MSEPS Sistemi ve Uygulamaları, <https://www.weprog.com/information>

Dünya Bankası (2024), Dünya Kalkınma Göstergeleri, <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>

Dünya Bankası (2018), What a Waste 2.0, <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>

CEPII (Centre d'Etudes Prospectives et d'Informations Internationales / İleriye Dönük Çalışmalar ve Uluslararası Bilgi Merkezi) (2010), BACI: Ürün Düzeyinde Uluslararası Ticaret Veritabanı. 1994-2007 Versiyonu, https://www.cepii.fr/pdf_pub/wp/2010/wp2010-23.pdf

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)

Bu çalışma IEA Sekreteryasının görüşlerini yansıtmaktadır, ancak IEA'nın bireysel üye ülkelerinin veya herhangi bir fon sağlayıcı veya işbirliğisinin görüşlerini yansıtmak zorunda değildir. Bu çalışma, herhangi bir özel konu veya durum hakkında profesyonel tavsiye niteliği taşımamaktadır. IEA, çalışmanın içeriği (eksiksizliği veya doğruluğu dahil) ile ilgili olarak açık veya zımni hiçbir beyan veya garanti vermez ve çalışmanın herhangi bir şekilde kullanılmasından veya çalışmaya güvenilmesinden sorumlu olmayacaktır.



Konu için ve IEA'nın [Uyarı](#) için [CC lisanslı](#) [İçerik](#), bu çalışma lisanslıdır altında a [Yaratıcı](#) [Müşterekler](#) [Atıf](#) [4.0](#) [Uluslararası Lisans](#).

Aksi belirtilmedikçe, şekil ve tablolarda sunulan tüm materyaller IEA verileri ve analizlerinden elde edilmiştir.

IEA Yayınları Uluslararası
Enerji Ajansı Web Sitesi:
www.iea.org
İletişim bilgileri: www.iea.org/contact

Fransa'da IEA tarafından dizildi - Ekim 2024
Kapak tasarımı: IEA
Fotoğraf kredileri: © GettyImages

Gözden geçirilmiş versiyon, Ekim 2024 Bilgi
bildirimi şu adreste bulunabilir:
www.iea.org/corrections



lea