



Küresel kimya endüstrisi için iklim nötrlüğü yol haritası

Bu rapor, Uluslararası Kimya Dernekleri Konseyi (ICCA) tarafından görevlendirilen bir çalışmanın sonucu olup, ICIS ve Carbon Minds tarafından yazılmıştır.

Yayın Detayları

BİR CÜMLELİK ÖZET

Bu rapor, küresel kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne ulaşması için dört yol haritası ve anahtar sağlayıcıları belirlemek amacıyla en son bilimsel modelleme yaklaşımlarını ve endüstriyel uzmanlığı kullanmaktadır.

ALINTIDA BULUNACAKLAR AŞAĞIDAKİ GİBİ BULUNABİLİR:

Hermanns, Ronja; Oliveira de Lima, Cassia; Vögler, Oskar; Wilson, James; Zehnder, Stefano; Meys, Raoul. Pathways for the global chemical industry to climate neutrality. June 2024. Cologne. Last updated 17.04.2024

YAYINLAYAN

Carbon Minds

Eupener Straße 165, 50933 Cologne

<https://www.carbon-minds.com/>

ICIS

99 Bishopsgate, EC2M 3AL, London

<https://www.icis.com/>

GÖREVLENDİREN

International Council of Chemical Associations (ICCA)

<https://icca-chem.org/>

YAZARLAR

Ronja Hermanns, Oskar Vögler, Stefano Zehnder, Cassia Oliveira de Lima, James Wilson, Raoul Meys

TEŞEKKÜRLER

Bu proje, çeşitli şirketlerin ve kimya endüstrisi derneklerinin temsilcileriyle geliştirilmiştir. Bu yayını ile, destekleri, teknik uzmanlıkları ve yapıcı tartışmaları için tüm katılımcılara teşekkür etmek istiyoruz. Özellikle, ICCA'nın Enerji ve İklim Değişikliği Liderlik Grubu içindeki Karbon Nötrlüğü Görev Gücü üyelerine teşekkür etmek istiyoruz: Atsumi Nakata, Chantal Yiming Sun, Charles Franklin, Constantinos Bokis, Daisuke Kanazawa, Elena Leonardi, Ignacio Hernandez Bonnett, Ibrahim Eryazici, James Brown, Katsuo Anzai, Nicola Rega, Pranav Tripathi, Tohru Yamamoto, Tomo Hasegawa ve Tomohiro Nakamura. Bu yayının sonuçları ve bulguları, katılımcıların görüşlerini yansıtmak zorunda değildir. Bulguların sorumluluğu yalnızca Carbon Minds ve ICIS'e aittir.

LİSANS

CC BY-NC-SA 4.0

VERSİYON

2024.06_V1.0

Telif Hakkı

Bu raporun içeriği telif hakkına tabidir. Aksi belirtilmedikçe, ticari amaçlar dışında ve alıntıda bulunulduğu takdirde çoğaltma iznlidir.

İÇERİK

1 ÖNSÖZ	4
2 ÖZET	5
3 KİMYASAL ÜRÜNLER YAŞAM TARZIMIZI DESTEKLİYOR	10
4 İKİ AŞAMALI BİR ZORLUK: HAMMADDE VE ENERJİ KULLANIMINDAN KAYNAKLANAN EMİSYONLARI AZALTMA	12
5 ÇALIŞMANIN KAPSAMI	15
6 İKLİM NÖTRLÜĞÜ YOLLARININ MODELLENMESİ – BİLİMSEL TEMEL	19
7 KÜRESEL KİMYA ENDÜSTRİSİ İÇİN BİRÇOK İKLİM-NÖTR YOL MEVCUTTUR.....	21
İKLİM NÖTRLÜĞÜNE ULAŞMAK	21
KARBON HAMMADDE TÜKETİMİ	24
YILLIK İŞLETME MALİYETLERİ VE BİRİKİMLİ SERMAYE HARCAMALARI	28
8 İKLİM NÖTRLÜĞÜ İÇİN KOLAYLAŞTIRICILARA İHTİYAÇ VARDIR	31
PLASTİK ATIKLARINA ERİŞİM.....	31
SÜRDÜRÜLEBİLİR KAYNAKLI BİYOKÜTLE.....	33
DÜŞÜK EMİSYONLU HİDROJEN	34
FOSİL HAMMADDE VE YETERLİ DERECEDE DÜZENLENMİŞ KARBON DEPOLAMA.....	36
UYGUN FİYATLI DÜŞÜK EMİSYONLU ENERJİ	37
9 ÖZET VE SONUÇLAR	38

1 ÖNSÖZ

Uluslararası Kimya Dernekleri Konseyi (ICCA) 2021 yılında yayınladığı iklim nötrlüğü bildirisinde, Paris Anlaşması'na ve kimya endüstrisinin yüzyılın ortasına kadar iklim nötrlüğüne ulaşma hedefine olan desteğini belirtmiştir. ICCA, bu bildiriye uygun olarak, küresel kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne ulaşması için izleyeceği yolları ve temel kolaylaştırıcıları belirlemek üzere bu çalışmayı yaptırmıştır.

Kimya endüstrisinin benzersiz yapısı, iklim nötrlüğüne ulaşmada belirli zorluklara yol açmaktadır. Özellikle kimya endüstrisi, modern yaşam tarzımızı destekleyen karbon içeren ürünler üreten karmaşık ve enerji yoğun operasyonlardan oluşan büyük bir imalat sektörüdür.

Bu çalışma, bilimsel bir modelleme yaklaşımı kullanarak, hammadde seçimi, tedarik ve kullanım ömrü sonu yönetimine özellikle odaklanarak, iklim nötrlüğüne en düşük maliyetle yol açabilecek farklı yolları araştırmaktadır. Bu yollar, gelecekteki kaynak mevcudiyetindeki belirsizlikleri, geri dönüşümün rolünü ve diğer etkinleştirici teknolojileri dikkate almaktadır. Buna ek olarak çalışma, küresel kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne ulaşması için gerekli temel kolaylaştırıcıları da tanımlamaktadır.

Çalışma ICIS ve Carbon Minds tarafından küresel düzeyde toplu olarak yürütülmüştür. Bununla birlikte, raporun, yerel ve bölgesel kimya birlikleri ile birlikte bireysel kimya şirketlerine iklim nötrlüğü yönünde çalışmaları için ışık tutacağına inanıyoruz, ancak izleyecekleri yollar nihayetinde bu raporun kapsamı dışındaki bölgesel özellikleri yansıtacaktır.

2 ÖZET

Kimya endüstrisinin küresel sesi olan Uluslararası Kimya Dernekleri Konseyi (ICCA), Paris Anlaşması'nı ve yüzyılın ortasına kadar iklim nötrlüğüne ulaşma hedefini desteklemektedir¹. Bu kararlılığı teyit etmek amacıyla ICCA, küresel kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne ulaşması için potansiyel yolları ve temel kolaylaştırıcıları (örneğin kaynaklara, altyapıya ve politikalara erişim) belirlemek üzere bir çalışma yaptırmıştır². Bu yönetici özeti, çalışmanın temel bulgularını sunmaktadır.

ARKA PLAN: KÜRESEL KİMYA SEKTÖRÜNÜN ÜSTESİNDEN GELMESİ GEREKEN EN BÜYÜK ZORLUKLARDAN İKİSİ: KARBON HAMMADESİNDEN³ VE ENERJİ KULLANIMINDAN KAYNAKLANAN SERA GAZI EMİSYONLARININ AZALTILMASI.

Günümüzde kimya endüstrisi, kimyasal hammaddelerin (yani kimyasal ürünler üretmek için kullanılan hammaddelerin) karbon içeren değerli ürünlere dönüştürülmesinden kaynaklanan sera gazı (GHG) emisyonları nedeniyle çevresel bir sorunla karşı karşıyadır. Kimyasal ürünler sıklıkla bir yapı taşı olarak karbona dayanır, bu da karbon içeren hammaddeleri kritik bir girdi haline getirir. Ayrıca, bu hammaddeleri ürünlere dönüştürmek için kimya endüstrisi büyük miktarda proses enerjisine ihtiyaç duyar. Dolayısıyla, kimya endüstrisinin değer zinciri boyunca birçok adımda sera gazı emisyonları ortaya çıkmaktadır. Bu emisyonlar temel olarak hammaddeyle ilgili ve proses enerjisiyle ilgili emisyonlar olarak ikiye ayrılabilir.

Hammadde, Proses ve Kullanım Sonu ile İlgili Emisyonlar (Karbon Hammaddesi ile ilgili emisyonlar). Şu anda kimya endüstrisinde kullanılan karbon içeren hammaddelerin çoğu doğal gaz, kömür, nafta ve etan dahil olmak üzere fosil bazlıdır. Bu hammaddelerin çıkarılması ve yeniden işlenmesi süreçleri metan ve CO₂ gibi sera gazlarını açığa çıkarmaktadır. Sera gazı emisyonları ayrıca bu hammaddelerin kimyasal ürünlere dönüştürülme süreçleri sırasında da ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, yaşam döngüsünün sonunda, kimyasal ürünler CCS olmadan geri dönüştürülmez ve yakılmazsa, depolanan karbon da sera gazı emisyonları olarak atmosfere geri salınır.

Enerji Kaynaklı Emisyonlar. Kimyasal üretimi enerji yoğunudur ve genellikle 500 santigrat derecenin üzerinde yeniden işlem sıcaklıkları gerektirir. Bu sıcaklıklar tipik olarak yakıtın yanmasını gerektirir ve bu da azaltılmadığı takdirde doğrudan sera gazı emisyonlarına yol açar. Yakıt kombinasyonunun enerji kaynağı olarak kullanılmasının ötesinde, şebeke elektriği de kimya endüstrisindeki ekipman ve operasyonlara güç sağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

¹ <https://icca-chem.org/news/icca-statement-on-climate-policy/>

² Climate neutrality in this study is defined according to IPCC's net-zero emissions definition. Therefore, climate neutrality is achieved when "anthropogenic emissions of greenhouse gases (GHG) to the atmosphere are balanced by anthropogenic removals over a specified period". These greenhouse gas emissions include carbon dioxide, methane, carbon monoxide, and nitrous oxides among others. IPCC (2018), <https://doi.org/10.1017/9781009157940.008>.

³ Carbon feedstock as a terminology is used, since most chemical products use carbon as a backbone of their chemical structure. This carbon can originate from fossil resources, biomass, recycling plastic waste or CO₂.

Bu nedenle, kimya endüstrisinde iklim nötrlüğünün sağlanması, hem proses enerjisiyle ilgili emisyonların hem de karbon içeren hammadde kullanımından kaynaklanan emisyonların azaltılması gibi ikili bir zorluğun üstesinden gelinmesini gerektirmektedir. Bu raporun birincil odak noktası karbon hammaddesiyle ilgili emisyonlar olmakla birlikte, enerjiyle ilgili emisyonlar modellemeye dahil edilmiş ve yüksek düzeyde ele alınmıştır.

METODOLOJİ: İKLİM-NÖTR BİR KİMYA ENDÜSTRİSİNE YÖNELİK POTANSİYEL YOLLARI ANALİZ ETMEK İÇİN BİLİMSSEL MODELLEME VE ENDÜSTRİ UZMANLIĞI BİR ARADA KULLANILMIŞTIR.

Bu proje, daha önce iklim-nötr bir kimya endüstrisini değerlendiren çeşitli hakemli yayınlarda uygulanmış olan bilimsel bir modelleme yaklaşımı kullanmaktadır⁴. Bu hakemli yayınların bazı bölümleri Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) son raporunun endüstri bölümünde yeniden basılmıştır⁵. Bilimsel modelleme yaklaşımı, kimya endüstrisi için iklim nötrlüğüne giden yolları oluşturmak ve değerlendirmek için maliyet minimizasyonu ile birlikte bir yaşam döngüsü değerlendirmesi kullanır. Bunu yapmak için, endüstri uzmanları tarafından onaylanmış teknik, çevresel ve ekonomik parametreler kullanılır.

Bu çalışma, yüzyılın ortalarına kadar küresel talebin artacağı öngörülen on sekiz büyük hacimli kimyasal⁶ kapsamaktadır. Yaşam döngüsü yaklaşımına göre, (1) proses enerjisinin tedariki, (2) fosil kaynakların çıkarılması, (3) kimyasal hammadde üretimi, (4) kimyasal tesislerin işletilmesi ve son olarak (5) kapsamdaki ürünlerin kullanım ömrünün sona ermesi ile ilgili olanlar da dahil olmak üzere tüm ana kaynaklardan gelen emisyonlar hesaba katılmaktadır⁷. Çalışma, değer zinciri boyunca, CO₂ ve metan dahil olmak üzere IPCC'ye göre tüm sera gazı emisyonlarını dikkate almaktadır⁸. Bu çalışma, kimya endüstrisi ile yakından ilgili faaliyetlere odaklanmak için kullanım aşaması emisyonlarını içermemektedir.

⁴ Raoul Meys et al., Science (2021), <https://doi.org/10.1126/science.abg9853>; Arne Kätelhön et al., Proceedings of the National Academy of Sciences (2019), <https://doi.org/10.1073/pnas.1821029116>; Christian Zibunas et al., Computers & Chemical Engineering (2022), <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107798>.

⁵ Bashmakov et al., 2022: Industry. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change <https://doi.org/10.1017/9781009157926.013>.

⁶ Methanol, ethylene, propylene, benzene, xylenes, toluene, styrene, chlorine, ammonia, hydrogen, ethylene oxide, ethylene glycol, LDPE, LLDPE, HDPE, PP, PET, PVC. Other chemicals that are part of these value chains (framed as "embedded products") have also been included.

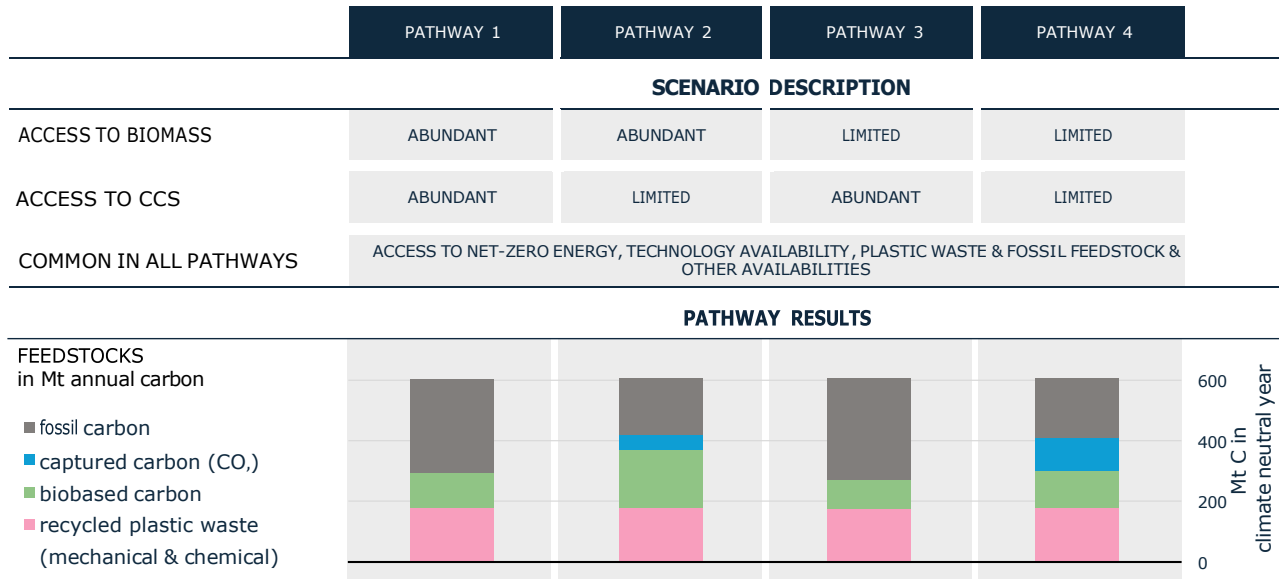
⁷ The life cycle assessment-based approach takes into consideration emissions from scope 1, 2 and 3. For scope 3, categories 3.1 and 3.12 are considered from the GHG Protocol for "purchased goods and "end-of-life" treatment, respectively. (Martin Barrow et al., <https://ghgprotocol.org/scope-3-calculation-guidance-2>)

⁸ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013, The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

Büyük hacimli kimyasalların üretim hacmini karşılamak için, iklim nötrlüğüne ekonomik bir geçiş sağlamak amacıyla teknoloji-nötr bir yaklaşımla geniş bir üretim teknolojisi seti değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, sermaye harcamalarını ve işletme maliyetlerini en aza indirirken mevcut tüm teknolojileri⁹ dikkate alarak esnekliği teşvik etmektedir. Belirli teknolojik seçeneklerin sınırlandırılması, kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne ulaşmayla ilgili zorlukları ele alma kabiliyetini kısıtlayacak ve daha yüksek maliyetlere yol açacak, potansiyel olarak iklim nötr kimyasal ürünleri daha pahalı hale getirecek ve iklim nötrlüğüne daha geniş toplumsal geçişi geciktirecektir. Bilimsel modelleme ve endüstri uzmanlığının benzersiz kombinasyonuna dayanarak, birden fazla iklim-nötr yol için sonuçlar belirlenmiştir.

BULGU #1: KÜRESEL KİMYA SEKTÖRÜ İÇİN İKLİM NÖTR BİRDEN FAZLA YOL MEVCUTTUR.

Kimya endüstrisinin iklim nötralitesine geçişinin karmaşık manzarasında gezinirken, kritik bir faktör, biyokütle ve karbon yakalama ve depolama kapasiteleri gibi kilit kaynakların gelecekteki mevcudiyetini çevreleyen belirsizliktir. Bu belirsizliği ele almak ve olası gelecekleri keşfetmek için bu çalışma, bilimsel modelleme yaklaşımına ve sektör geri bildirimlerine dayanan dört farklı senaryo geliştirmiştir. Bu senaryolar, değişen kaynak kullanılabilirliklerini ve teknolojik gelişmeleri temsil edecek şekilde hazırlanmış olup, sektörün ileriye dönük yolu hakkında incelikli ve bilgili bir bakış açısı sağlamaktadır. Senaryoların her biri için iklim nötrlüğüne giden minimum maliyetli bir yol hesaplanmıştır (bkz. Şekil 1).



Şekil 1: Senaryo tanımları ve iklim-nötr yıl için dört iklim-nötr yol için temel sonuçlar. Hammaddede sonuçları, plastik atıkların kullanım ömrü sonu emisyonlarının ele alınmasında ve tüm yollarda plastik kirliliğinin azaltılmasındaki evrensel rolünü vurgulamaktadır. Ayrıca şekil, her bir yolda karbon hammadde olarak biyokütle ve fosil kaynakların çeşitli kullanımlarını göstermektedir. Karbon yakalama depolamasına (CCS) sınırlı erişimi olan 2. ve 4. yollar, alternatif bir karbon hammadde kaynağı olarak düşük emisyonlu hidrojen ile birleştirilmiş karbondioksit kullanmaktadır.

⁹ We consider technologies with a technology readiness level above 6.

Sonuçlar, iklim nötrlüğüne giden tek bir sabit küresel yolun bulunmadığını ve yolların şu anda belirsiz olan mevcut kaynaklara bağlı olarak değişebileceğini vurgulamaktadır.

Her bir yol, mevcut kaynaklara adaptasyonu yansıtan farklı kombinasyonlardaki azaltım stratejilerinden yararlanmaktadır. Bölgesel ayrıntılar içermeyen küresel kapsamına rağmen, sonuçlar, kilit kaynaklara değişen erişimin bölgeler ve ülkeler arasında farklı yollarla sonuçlanacağını göstermektedir. Bununla birlikte, geri dönüşüm teknolojileri (mekanik ve kimyasal), karbon yakalama ve depolama (CCS) ile fosil hammaddeler ve biyokütle gibi temel çözümler tüm yollarda gereklidir.

BULGU #2: KÜRESEL KİMYA ENDÜSTRİSİNİN İKLİM NÖTRLÜĞÜ İÇİN DESTEKLEYİCİLERE İHTİYACI VARDIR.

Bu çalışma, kimya endüstrisini iklim nötrlüğüne götürebilecek dört yol geliştirmiştir. Her bir yol, hammadde olarak geri dönüşüm ve biyo-kütle gibi çözümlerin bir kombinasyonunu dikkate almaktadır. Potansiyeli ortaya çıkarmak için kimya endüstrisinin, Bölüm 8'de daha ayrıntılı olarak açıklanan kimya endüstrisi dışından destekleyicilere ihtiyacı vardır.

Plastik atıklarına erişim. Geri dönüşüm, yakma ve yanlış yönetilen atıklardan kaynaklanan emisyonları azaltır. Şu anda, küresel plastik atıkların yalnızca %9'u geri dönüştürülmektedir¹⁰. Yanlış yönetilen plastik atıkları önlemek ve iklim nötrlüğüne ulaşmak için, geri dönüşüm oranlarının dünya genelinde önemli ölçüde artması gerekmektedir; bu da geliştirilen atık toplama, ayırma ve dağıtım altyapısı, ekonomik ve piyasa teşvikleri ile yasaların ve politikaların uygulanması ile desteklenmelidir.

Ayrıca, kimyasal geri dönüşümün mekanik geri dönüşümle entegre edilmesi de hayati öneme sahiptir. Mekanik geri dönüşüm kaynak açısından verimli iken, kimyasal geri dönüşüm daha geniş bir plastik atık yelpazesini işleyebilir ve polimer bozulması gibi sorunların üstesinden gelebilir. Sıralanmış plastik atıkları değerli bir hammadde olarak kullanarak, kimya endüstrisi plastik yakmadan veya plastik atıkların yanlış yönetilmesinden kaynaklanan potansiyel çevresel etkileri azaltabilir.

Sürdürülebilir bir şekilde temin edilen biyokütle. Biyokütle, büyümesi sırasında atmosferden karbondioksit yakalar ve çeşitli kimyasal ürünlere dönüştürülebilir. Bu, kimya endüstrisinin toplam sera gazı emisyonlarını azaltmasına yardımcı olmak için değerli bir hammadde olmasını sağlar, özellikle bitki büyümesi sırasında CO2 alımı yoluyla yaşam sonu yakma dahil olmak üzere değer zincirinden kaynaklanan emisyonlardan.

Ancak, biyokütle sürdürülebilir bir şekilde temin edilmelidir, böylece ormansızlaşma ve biyolojik çeşitliliğin kaybı önlenmelidir. Ayrıca, büyüyen küresel nüfusu desteklemek için gıda ile rekabetten kaçınılmalıdır. Sonuç olarak, kimya endüstrisinin biyokütle kullanabilmesi için, sürdürülebilir bir şekilde temin edilen biyokütleye güvenilir ve uygun fiyatlı erişime sahip olması gerekmektedir.

¹⁰ OECD, 2022, Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060, <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.

Düşük emisyonlu hidrojen. Mevcut hidrojen üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltmak için ölçeklenebilir alternatifler arasında düşük emisyonlu elektrikle çalışan su elektrolizi ve CCS ile metan reformu bulunmaktadır. Düşük emisyonlu hidrojen, amonyak ve metanol gibi yüksek hacimli kimyasallarla ilişkilendirilen sera gazı emisyonlarını azaltabilir.

Ayrıca, düşük emisyonlu hidrojen, yakalanan CO₂'den, sanayi noktasal kaynaklardan (yani, elektrik santralleri veya sanayilerden yüksek hacim veya yüksek yoğunlukta emisyon) veya havadan Karbon Yakalama ve Kullanımı (CCU) yoluyla kimyasallar üretimini destekleyerek karbon döngüsellğine katkıda bulunur, böylece atmosferdeki CO₂ emisyonunu azaltır veya atmosferik CO₂'yi azaltır. Düşük emisyonlu hidrojenin potansiyeli göz önüne alındığında, kimya endüstrisi yatırımı teşvik etmek için destekleyici politika çerçeveleri ve izin süreçleri gerektirmektedir.

Fosil Hammadde ve Yeterince Düzenlenmiş Karbon Depolama. Dört yolun her biri, fosil hammaddeleri ile Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) teknolojisini birlikte kullanır. İklim nötrlüğüne katkıda bulunabilmek için CCS, kimyasal değer zincirinin çeşitli noktalarından, örneğin ürünlerin ömrü sonunda yakılmasından CO₂'yi yakalar ve ardından bu CO₂'yi uzun vadeli jeolojik depolama alanlarına taşır. Ancak CCS uygulamaları, planlama ve inşaat süreçlerinin uzunluğu, taşımacılık ve depolama altyapısının geliştirilmesi için gereken önemli başlangıç sermayesi ve kamu ile paydaş kabulü gibi zorluklarla karşılaşmaktadır. Etkili CCS uygulaması, altyapıya yatırım yapılmasını kolaylaştırmak ve kamu ile paydaş güvenini artırmak için sağlam ve sürdürülebilir politika desteği gerektirir.

Uygun Fiyatlı Düşük Emisyonlu Enerji. Endüstri iklim nötrlüğüne doğru geçiş yaparken, düşük emisyonlu enerji, düşük, orta ve yüksek sıcaklıkta ısı ve elektrik gerektiren üretim süreçlerinde vazgeçilmez hale gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, CCS ile fosil yakıtlar ve nükleer enerji gibi farklı kaynaklar, düşük emisyonlu enerji sağlayabilir.

Bu kaynakların tam kombinasyonu, yerel olarak mevcut olan kaynaklara ve kimyasal reaksiyon türlerine (örneğin, düşük veya yüksek sıcaklık gerektiren reaksiyonlar) bağlı olarak değişecektir, ancak her biri, böyle bir yatırımı mümkün kılmak için önemli yatırım ve politika desteği gerektirir.

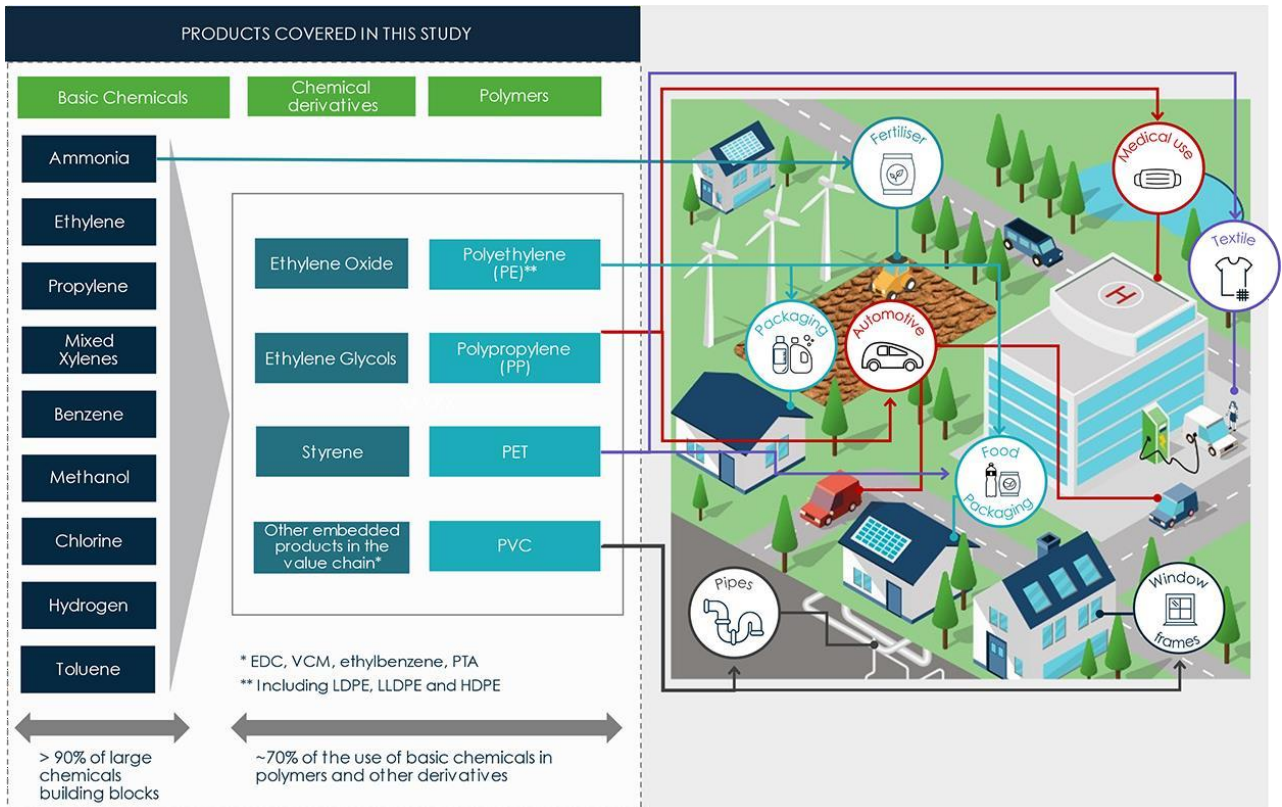
¹⁰ OECD, 2022, Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060, <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.

3 KİMYASAL ÜRÜNLER YAŞAM TARZIMIZI DESTEKLİYOR

Kimya endüstrisi, günlük hayatımızın bir parçası olan çok sayıda ürünün üretiminden sorumludur; bu, Şekil 2'nin sağ tarafında gösterilmektedir. Bu ürünler, tüketici ürünleri, inşaat ve yapı, tarım, otomotiv, tekstil, sağlık hizmetleri ve daha birçok sektör gibi alanlarda mevcut olup, bugün bildiğimiz toplumu destekler. Kimya endüstrisi, bu sektörlerle hammadde, bitmiş ürünler ve diğer üretim faaliyetleri için yardımcı bileşenler sağlayarak destek olmaktadır.

Kimya endüstrisindeki üretim süreçleri, karmaşık bir dönüşüm değer zincirine dayanmaktadır. Bu süreçlerin çoğu, genellikle temel kimyasallar (örneğin etilen, propylen, karışık ksilenler, benzen, amonyak, hidrojen, klor ve metanol) olarak adlandırılan aynı yapı taşlarından başlar. Bu temel kimyasallar kullanılarak, çeşitli kimyasal türevler ve polimerler (örneğin, polipropilen, polietilen, PET, PVC) üretilir.

Bu çalışmada ele alınan ürünler, Şekil 2'nin sol tarafında gösterilmiştir. Bu ürünler, kimya endüstrisindeki önemlerinden dolayı seçilmiştir. İç analizlere göre, bu ürünler endüstri tarafından üretilen temel kimyasalların %90'ından fazlasını temsil ederken, kapsamdaki türevler ve polimerler, bu temel kimyasalların tüketiminin %70'inden fazlasından sorumludur.



Şekil 2: Bu çalışmada ele alınan farklı kimyasal ürünlerin günlük yaşamımızda nasıl kullanıldığını gösteren bir görseldir. Bu görsel, ürünlerin uygulamaları hakkında kapsamlı bir bilgi sunmayı amaçlamamaktadır.

Kimya endüstrisi, birçok diğer sektördeki faaliyetleri destekleyen ve mümkün kılan büyük bir üretim sektörü olarak, küresel ekonomiye önemli bir katkı sağlar. 2017 yılında, kimya endüstrisi, doğrudan, dolaylı ve tetiklenen faydalarla birlikte 5,7 trilyon dolara denk bir ekonomik değere sahipti ve bu, küresel GSYİH'nın %7'sini temsil etmektedir. Sektör ayrıca, doğrudan ve dolaylı olarak dünya çapında 120 milyon istihdamın desteklenmesinden sorumludur.¹¹

Toplum ve küresel ekonomi için öneminin yanı sıra, kimya endüstrisi, sadece kendi operasyonlarına bağlı sera gazı (GHG) emisyonlarını azaltmakla kalmayıp, iklim nötrlüğüne geçişte de önemli bir rol oynayabilir. Isı yalıtımını iyileştiren ve hafiflik sağlayan malzemeler gibi düşük etkili, enerji tasarrufu sağlayan ve emisyonları azaltan çözümler sunarak, kimya endüstrisi diğer sektörlerde sera gazı ayak izlerini azaltmalarında ve iklim nötrlüğüne ulaşmalarında destek olabilir.

¹¹ ICCA and Oxford Economics, 2019, "Catalyzing Growth and Addressing Our Worlds Sustainability Challenges Report."

4 İKİ AŞAMALI BİR ZORLUK: HAMMADDE VE ENERJİ KULLANIMINDAN KAYNAKLANAN EMİSYONLARI AZALTMA

Sera gazı (GHG) emisyonlarının kimyasal değer zincirine nasıl dağıldığını daha net bir şekilde anlayabilmek için, Şekil 3'te bir genel bakış sunulmaktadır. Kimyasal değer zinciri, kaynak temininden (enerji ve hammadde) başlar, ardından dönüşüm süreçleri, kullanım aşaması ve kimyasal ürünlerin ömrünün sonu gelir. Bu her bir aşama içinde GHG emisyonları salınmaktadır.¹²

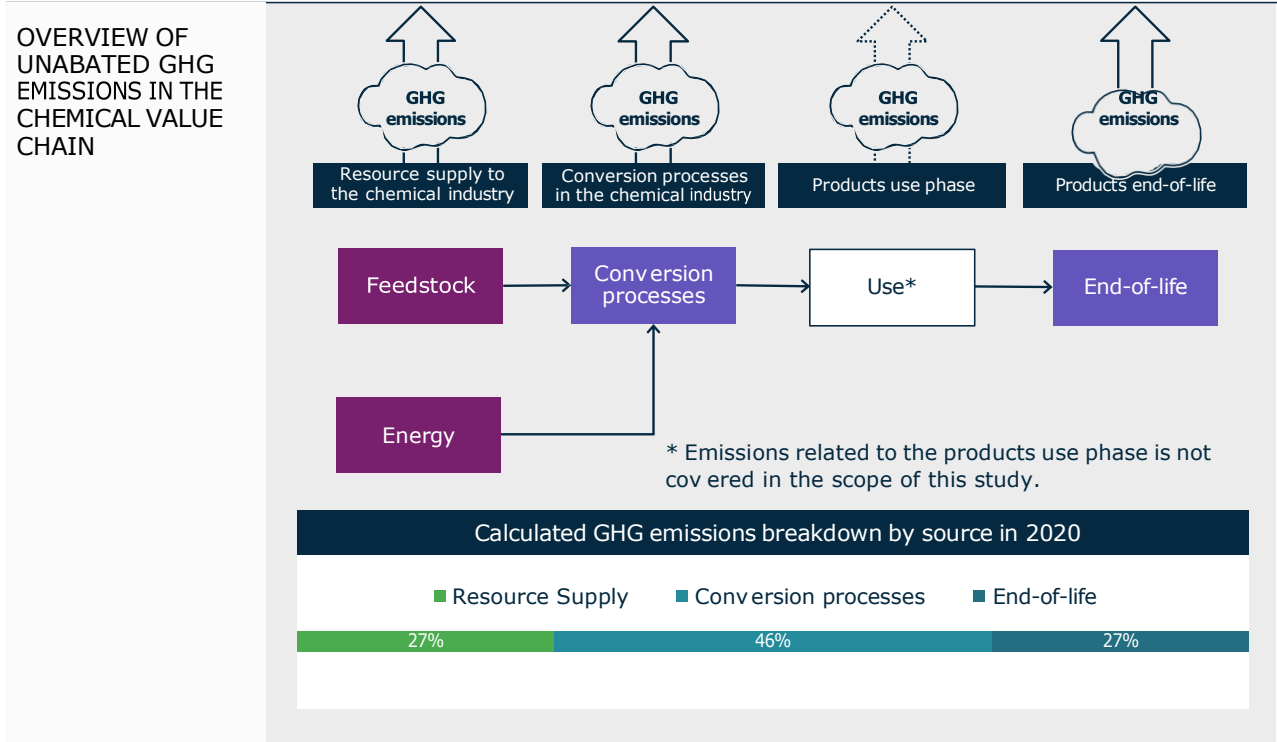
GHG emisyonlarının yaşam döngüsü aşamalarına göre dağılımı, Meng ve arkadaşları tarafından 2020 yılı için belirlenmiş olup, Şekil 3'te gösterilmektedir. Kimya endüstrisine hammadde ve enerji temini, 2020 yılında toplam kimyasal değer zincirinin yaklaşık %27'lik bir GHG emisyonu payını temsil etmektedir. Hammadde dönüşümünden kaynaklanan (işlem enerjisi emisyonları dahil) GHG emisyonları ise %46'lık bir paya sahiptir. Kaynak temini ve dönüşüm süreçlerinden kaynaklanan GHG emisyonları, makul bir çaba ile belirlenebilirken, ürün kullanımı ve ömrünün sonuyla ilgili emisyonlar, ürünlerin birçok sektördeki farklı uygulamaları göz önüne alındığında daha zor bir konu olabilmektedir. Zorlu bir süreç olmasına rağmen, ömrünün sonu aşaması toplam GHG emisyonlarının %27'si olarak değerlendirilmiştir.¹³

Özellikle, bu GHG emisyonları farklı yaşam döngüsü aşamalarında iki kategoride gruplanabilir: (1) hammadde ve yaşam-sonu ile ilgili emisyonlar ve (2) proses enerjisi ile ilgili emisyonlar.

Hammadde, Proses ve Yaşam Sonu ile İlgili Emisyonlar. Çoğu kimyasal ürün karbon içerdiği için, karbon, kimyasal ürünlerin yapılmasında kullanılan hammadde türünden bağımsız olarak vazgeçilmezdir. Bu nedenle, kimya endüstrisi karbon içeren hammaddelere ihtiyaç duyar. Örneğin, fosil hammaddelerin temini, metan ve CO₂ gibi sera gazlarını salan çıkarım ve rafinaj süreçlerini içerir. Biyobazlı hammaddeler için, hammadde temini, atmosferden CO₂ alımını ve hammadde kullanımına yönelik tarım ve işleme süreçleriyle ilişkili GHG emisyonlarını kapsar. Kimya endüstrisine hammadde temin edildikten sonra, bu hammaddeler dönüşüm süreçlerinde kimyasal ürünlere dönüştürülür. Dönüşüm süreçlerinde de GHG emisyonları meydana gelebilir. Ayrıca, yaşam döngüsünün sonunda, plastik gibi kimyasal ürünler yakıldığında, depolanan karbon, emisyonlar engellenmezse, tekrar atmosfere sera gazı emisyonları olarak salınabilir.

¹² Çalışma, yaşam döngüsü değerlendirmesine dayalı bir yaklaşım kullanmaktadır. Ancak bazı okuyucular GHG Protokolü metodolojilerine daha aşina olabilirler. GHG Protokolü sera gazı emisyonlarını Kapsam 1, 2 ve 3 kategorilerine ayırmaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmelerinin ve GHG Protokolünün temelinde yatan metodolojiler temiz bir şekilde birbirlerine aktarılamaz. Bununla birlikte, Şekil 3'te verilen değerler yaklaşık olarak aşağıdaki gibi kategorize edilebilir: (1) dönüşüm süreci emisyonları bir kimya şirketinin Kapsam 1'ine, (2) bir kimya şirketinin satın aldığı güç, ısıtma/soğutma veya buhardan kaynaklanan dolaylı sera gazı emisyonları Kapsam 2'ye ve (3) dolaylı hammadde tedariki ve kullanım ömrü sonu emisyonları sırasıyla Kapsam 3.1 ve 3.12'ye karşılık gelmektedir. Kapsam 3.1 ve 3.12, kimya şirketlerinin yukarı ve aşağı akışında yer alan değer zincirindeki diğer kuruluşların doğrudan emisyonlarını temsil etmektedir.

¹³ Fanran Meng et al., *Proceedings of the National Academy of Sciences* <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>.



Şekil 3: Kimya endüstrisinin sera gazı emisyonlarının kimyasal değer zincirinde nerede yer aldığına dair genel bakış¹⁴. Bu çalışma, kimya endüstrisinin faaliyetleriyle yakından ilgili adımlara odaklanmaktadır. Bu nedenle, ürünlerin kullanım aşamasını içermemektedir.

Enerji ile İlgili Emisyonlar. Proses enerjisi, kimyasal üretim enerji yoğun bir süreç olduğundan, kimyasal değer zincirleri için aynı derecede önemli bir girdidir. Kimyasal üretim, genellikle 500 derece Celsius'tan yüksek reaksiyon sıcaklıklarını gerektirir. Bu yüksek sıcaklıklar tipik olarak yakıt yanmasını gerektirir. Yakıtların temini ve yakılması, eğer engellenmezse, GHG emisyonlarına katkıda bulunabilir. Termal enerjinin yanı sıra, kimya endüstrisi ayrıca elektrik gerektirir. Elektrik, kimya endüstrisindeki ekipman ve operasyonları çalıştırmak için yaygın olarak kullanılır ve eğer bu elektrik, engellenmemiş fosil yakıtlardan sağlanıyorsa, yaşam döngüsü bazında GHG emisyonlarına da katkıda bulunur. Küresel olarak kimya endüstrisinin kullandığı çoğu üretim teknolojisi, verimliliği ve kaynak tüketimini iyileştirecek şekilde optimize edilmiştir. Ancak, mevcut durumda çoğu kimyasal ve polimer üretimi, büyük ölçüde engellenmemiş fosil bazlı hammaddelere ve enerjiye dayanmaktadır, bu da GHG emisyonlarını azaltma konusunda zorluklara yol açmaktadır.

Hammadde ile ilgili ve enerji ile ilgili GHG emisyonlarının kimya endüstrisi üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulduğunda, alternatif enerji ve hammadde kaynaklarının kullanımı ile emisyon azaltım teknolojileri, GHG emisyonlarını azaltmak ve iklim nötr operasyonlar elde etmek için uygulanabilir çözümler havuzunun önemli bir parçasını temsil etmektedir (lütfen BOX 1'e bakınız).

¹⁴ Fanran Meng et al., *Proceedings of the National Academy of Sciences* <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>.

Bu çalışmada “iklim nötrlüğü” terimiyle ne kastedilmektedir?

Bu çalışmada, “iklim nötrlüğü” terimi, IPCC’nin “net sıfır emisyon” tanımına göre belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, iklim nötrlüğü, “insan kaynaklı sera gazı (GHG) emisyonları ve atmosferden bu gazların uzaklaştırılması arasındaki dengenin belirli bir zaman diliminde sağlanması” ile elde edilir ve dolayısıyla atmosferdeki GHG yoğunluğunda herhangi bir değişiklik olmaz. Bu GHG emisyonları, karbondioksit, metan, karbonmonoksit ve azot oksitleri gibi gazları içerir. Kimya endüstrisi bağlamında, iklim nötr operasyonlar elde etmek, endüstrinin temel faaliyetlerinden kaynaklanan GHG emisyonlarının azaltılması ve kalan emisyonların karbon absorpsiyonu yoluyla dengelenmesi anlamına gelir. Çalışmada ele alınan GHG emisyonlarının kapsamı, *Bölüm 5 – Çalışmanın Kapsamı*’nda açıklanmıştır.

5 ÇALIŞMANIN KAPSAMI

Bu çalışmanın kapsamı, küresel kimya endüstrisine, iklim-nötr operasyonlara küresel geçişte karşılaşılan zorluklar ve fırsatlar hakkında net bir bakış sunmayı hedefleyecek şekilde tasarlanmıştır. Bunu başarmak için, bu çalışma akademik titizliği, piyasa ve endüstri uzmanlığını birleştirerek, kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne ulaşmak için maliyet açısından en uygun yolları modellemek amacıyla mevcut en iyi verileri ve sağlam bir modelleme metodolojisini kullanmıştır. Çalışmada dikkate alınan ana girdi parametreleri aşağıda gösterilmiştir:

Anahtar kimyasallar için küresel kimya talebi – Kimya endüstrisi, küresel çapta binlerce farklı kimyasal ürün üreten, birçok farklı üretim girdi, süreç ve teknoloji kullanan karmaşık bir sektördür. Tablo 1, bu çalışmanın kapsamına dahil edilen 18 ürünü listelemektedir. Bu ürünler, endüstrinin ana yapı taşlarını ve küresel olarak üretilen en büyük polimerleri temsil etmektedir. Ayrıca, kapsamda yer alan 18 kimyasalın değer zincirindeki tüm ara ürünler de dikkate alınmıştır.

Tablo 1: Çalışmada ele alınan ürünlerin listesi. Değer zincirlerinin ara ürünleri de dahil edilmiştir.

Ammonia	Methanol	Polypropylene (PP)
Benzene	Mixed xylenes	Polyethylene (LDPE)
Chlorine	Toluene	Polyethylene (LLDPE)
Ethylene	Styrene	Polyethylene (HDPE)
Ethylene glycol	Propylene	Polyvinylchloride (PVC)
Ethylene oxide	Hydrogen	Polyethylene terephthalate (PET)

Bu çalışma yüzyılın ortasına kadar iklim nötrlüğüne ulaşmaya odaklandığından, bu ürünlere yönelik talebin küresel olarak nasıl gelişmesinin beklendiğine dair ileriye dönük bir bakış açısını dikkate almak önemlidir. Bu çalışmada kullanılan ürün talebi verileri, ICIS'in yukarıdaki tabloda belirtilen ürünlerin her birini kapsayan uzun vadeli tahminlerine dayanmaktadır. ICIS'in metodolojisi, kimyasal ürünlere yönelik nihai kullanım talebinden başlayarak ara ürünlere, temel kimyasallara, hammaddeye ve nihayetinde ham petrol ve NGL'lere yönelik talebi oluşturan entegre bir analiz çerçevesine dayanmaktadır. Kimyasal ürünlerin küresel ekonominin çeşitli sektörlerindeki varlığı sayesinde, makroekonomi (örneğin GSYH büyümesi) ve demografi (örneğin nüfus artışı) kimyasal talep için her zaman önemli itici güçler olmuştur. Bununla birlikte, uygulamalardaki değişimler ve düzenleyici ortam gibi ürüne özgü faktörler de, ilgili son kullanım sektörlerindeki eğilimlerle birlikte tahminlerde hesaba katılan önemli faktörlerdir.

Şekil 4'te gösterildiği gibi, küresel nüfus artışı, ekonomik kalkınma ve sürekli gelişen yeni uygulama alanları nedeniyle kimyasallara olan talebin önümüzdeki on yıllar boyunca artmaya devam etmesi beklenmektedir. Şu anda dünya genelinde kullanılan en büyük dört polimere¹⁵ olan talebin, 2020'den yüzyılın ortalarına kadar, aynı dönem için beklenen GSYİH büyümesine paralel olarak, ancak gelecekteki kilit uygulamalardaki belirli gelişmeler de dikkate alınarak, yıllık ortalama %2,2'lik bir büyüme oranında (CAGR) artması beklenmektedir. Bu polimerlere olan talebin 2020'de 328 Mt'dan iklim-nötr yıla kadar 625 Mt'a çıkması beklenirken, temel kimyasallara¹⁶ olan talebin %1,8 YBBO ile 460 Mt'dan 796 Mt'a çıkması beklenmektedir. Bu büyüme oranı, diğer faktörlerin yanı sıra gelişmiş geri dönüşüm nedeniyle polimerlerden daha düşüktür.

Günümüzde ve gelecekte kilit ürünler olan amonyak, metanol ve hidrojenin aynı dönemde %2,4'lük bir CAGR ile büyüyerek 692 milyon tona ulaşması beklenmektedir. Bu ürünlere yönelik talebin, metanol ve amonyağın denizcilik yakıtı olarak ve bazı bölgelerde elektrik üretimi için kullanılması gibi enerji geçişiyle ilgili yeni uygulamalarla artacağı varsayılmaktadır.



Şekil 4: Bu çalışmada kimyasallar ve polimerler için talep tahmini varsayılmıştır. Bu çalışmada dikkate alınan talep görünümü ICIS'in uzun vadeli tahminlerine dayanmaktadır. Etilen glikol, etilen oksit, stiren ve toluen gibi çalışma kapsamındaki diğer ürünler ara ürünler olarak kabul edilmiş ve basitlik açısından bu tabloya dahil edilmemiştir.

Küresel bir endüstri odağı. Bu çalışma, kimya endüstrisinin küresel olarak birleştirilmiş bir düzeyde iklim nötrlüğüne nasıl ulaşabileceğine dair bir görüş sağlamaya odaklanmaktadır.

¹⁵ Four largest polymers: Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), Polyethylene Terephthalate (PET) and Polyvinyl Chloride (PVC).

¹⁶ Basic chemicals: ethylene, propylene, benzene, mixed xylenes, chlorine.

Kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne ulaşması için birden fazla potansiyel yol bulunmaktadır.

Kimya endüstrisi küresel olarak iklim nötr operasyonlar gerçekleştirmeyi hedeflerken, endüstrinin iklim nötrlüğüne geçişi için kilit öneme sahip kaynakların gelecekteki mevcudiyetine ilişkin büyük bir belirsizlik söz konusudur. Sonuç olarak, kilit kaynakların mevcudiyetine ilişkin farklı varsayımlara dayanan farklı minimum maliyet yolları incelenmiştir.

Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (LCIA) yöntemi ve emisyon kapsamı. Bu çalışmada dikkate alınan sera gazları, IPCC'yi¹⁷ takiben karbondioksit, metan ve azot oksitleri içermektedir. Çalışmada kullanılan yaşam döngüsü değerlendirmesine dayalı yaklaşım, kaynakların çıkarılması ve/veya yetiştirilmesi, üretim ve kullanım ömrü sonu için sera gazı emisyonlarını dikkate almaktadır. Kullanım aşaması emisyonlarının çalışma dışında tutulduğunu lütfen unutmayın.¹⁸

İklim nötrlüğüne ulaşmak için geleneksel ve alternatif teknolojiler. İklim nötrlüğüne geçiş, kimya endüstrisinin yalnızca geleneksel, köklü üretim süreçlerinden değil, aynı zamanda emisyonları azaltmaya odaklanan alternatif teknolojilerden de yararlanmasını gerektirecektir. Halihazırda çok sayıda farklı süreç geliştiriliyor olsa da, bu çalışma, sektör temsilcileriyle yapılan görüşmeler sonucunda seçilen ve yüksek teknoloji hazırlık seviyeleriyle karakterize edilen alternatif teknolojilere odaklanmaktadır. Çalışmada dikkate alınan alternatif teknolojiler aşağıda Şekil 5'te özetlenmiştir.

Sermaye harcamaları (CAPEX) ve işletme maliyetleri (OPEX). Ekonomi, iklim nötrlüğüne geçişte çok önemli bir faktördür. Modellemede hem CAPEX hem de OPEX tahmin edilmiştir. OPEX durumunda hammadde piyasa fiyatları da dahil olmak üzere mevcut en iyi referanslar kullanılmıştır. Maliyetler hakkında daha fazla bilgi için yıllık işletme maliyetleri ve kümülatif sermaye harcamaları altındaki 7. Bölüme bakınız.

Alternative technologies considered		
End-of-life Technologies	CO ₂ and H ₂ Technologies	Biomass Technologies
Recycling - Mechanical Recycling - Chemical Recycling Other - Incineration with energy recovery - Incineration with energy recovery and CCS - Landfilling	Carbon Capture and Utilization (CCU) - CO₂ capture from industrial point sources - CO₂ capture via direct air capture (DAC) - Hydrogen via electrolysis - Hydrogen production via natural gas including CCS - CO₂ to methane - CO₂ to methanol - Methanol to olefins/BTX Carbon Capture and Storage (CCS) - CCS with CO₂ from industrial point sources - Hydrogen production via natural gas with CCS	Biomass fermentation - Bioethanol via fermentation - Ethanol dehydration to ethylene Biomass gasification - Biomass gasification to syngas - Methanol to olefins/BTX

Şekil 5: Çalışmada değerlendirilen alternatif teknolojiler

¹⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013, The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

¹⁸ The study uses a life cycle assessment-based approach. Some readers, however, might be more familiar with the methodologies of the GHG Protocol. The GHG Protocol subdivides GHG emissions into Scope 1, 2, and 3 categories. The underlying methodologies for life cycle assessments and GHG Protocol cannot be cleanly translated into each other. However, approximately, the following categories are included in the study: (1) direct Scope 1 emissions of all chemical company processes covered, (2) indirect Scope 2 emissions from purchased power, heating/cooling, and steam, (3) indirect Scope 3.1 emissions from the feedstock supply, and (4) indirect Scope 3.12 emission of the end-of-life emissions. Scope 3.1 and 3.12 represent direct emissions by other entities in the value chain that are upstream and downstream of individual chemical companies.

İklim-nötr pathway'lerin tanımı

Bu çalışmada kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne ulaşması için dört farklı yol modellenmiştir; bu da tek bir küresel yol değil, birden fazla potansiyel yol olduğunu göstermektedir. Temel kaynakların farklı mevcudiyeti farklı yollara yol açtığından, her bölgenin bölgedeki temel kaynakların mevcudiyetine, kurulu altyapıya, ekonomik faktörlere ve yürürlükteki politika ortamına göre farklı bir strateji uygulaması makuldür.

Her senaryo için, biyokütle ve CCS'nin mevcudiyetine ilişkin farklı bir dizi varsayım, bu kaynakların kimya endüstrisi için küresel ölekte gelecekteki mevcudiyetine ilişkin belirsizliği hesaba katmak için kullanılmıştır. Bununla birlikte, plastik atıkların tüm yollarda eşit derecede mevcut bir kaynak olduğu varsayılmıştır. Plastik geri dönüşümünün, yanlış yönetilen plastik atıkların ve hız kesmeyen yakma işleminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasında önemli olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, tüm yollarda iddialı geri dönüşüm oranları varsayılmıştır. Tüm yolları etkinleştirmek için düşük emisyonlu elektriğe tam erişim varsayılmıştır. Yollar aşağıda açıklanmış ve Şekil 6'da özetlenmiştir.

- **Yol Haritası #1: Bol Biyokütle ve CCS** – Bu yol haritasında, biyokütle ve karbon yakalama ve depolama (CCS) kimya endüstrisi için bol miktarda mevcut kabul edilmektedir;
- **Yol Haritası #2: Bol Biyokütle ve Sınırlı CCS** – Yol haritası #1'in tersine, bu yol haritasında kimya endüstrisi için CCS'nin mevcudluğu sınırlı kabul edilirken, biyokütle mevcudiyeti yol haritası 1 ile aynı düzeydedir;
- **Yol Haritası #3: Bol CCS ve Sınırlı Biyokütle** – Bu yol haritası, biyokütlenin mevcudluğunun sınırlı, ancak CCS kapasitesinin yol haritası 1 ile aynı düzeyde olduğunu varsayar;
- **Yol Haritası #4: Sınırlı Biyokütle ve CCS** – Yol haritası 4, hem biyokütle hem de CCS'nin kimya endüstrisi için mevcudluğunun sınırlı olduğu durumu temsil eder

Bu farklı kaynak kullanılabilirliklerini göz önünde bulundurarak, maliyetleri en aza indirirken ve sera gazı emisyonlarını kademeli olarak sınırlandırırken küresel kimyasal talebini karşılamak için en uygun üretim süreci karışımını belirledik, böylece yüzyılın ortalarına kadar iklim açısından nötr operasyonlar gerçekleştirilebilir. Elde edilen sonuçlar Bölüm 7'de gösterilmektedir.

	PATHWAY 1	PATHWAY 2	PATHWAY 3	PATHWAY 4
SCENARIO DESCRIPTION				
ACCESS TO BIOMASS	ABUNDANT	ABUNDANT	LIMITED	LIMITED
ACCESS TO CCS	ABUNDANT	LIMITED	ABUNDANT	LIMITED
COMMON IN ALL PATHWAYS	ACCESS TO NET-ZERO ENERGY, TECHNOLOGY AVAILABILITY, PLASTIC WASTE & FOSSIL FEEDSTOCK & OTHER AVAILABILITIES			

Şekil 6: Farklı pathway'lerdeki kaynak kullanılabilirliğinin özeti.

6 İKLİM NÖTRLÜĞÜ YOLLARININ MODELLENMESİ – BİLİMSEL TEMEL

Bu çalışma, çeşitli kimyasal üretim bölgelerinden gelen geniş endüstri uzmanı bilgisini bilimsel bir modelleme yaklaşımıyla birleştirmektedir. Bu bilimsel modelleme yaklaşımının merkezinde, kimya endüstrisi için özel olarak tasarlanmış bilimsel bir yaşam döngüsü değerlendirmesine dayalı maliyet minimizasyon metodolojisinin kullanılması yer almaktadır. Bu metodoloji, Science, PNAS veya Nature gibi prestijli dergilerde yer alan birçok hakemli dergi makalesinde kullanılmıştır¹⁹. Ayrıca, bu bilimsel modelleme yaklaşımına dayanan önceki sonuçlar, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) 2022 tarihli son raporunda Sanayi için Bölüm 11'de yeniden basılmıştır²⁰. Modelleme yaklaşımının tam bir açıklaması yeterli talep üzerine sağlanabilecek olsa da, aşağıda basitleştirilmiş bir açıklama verilmiştir.

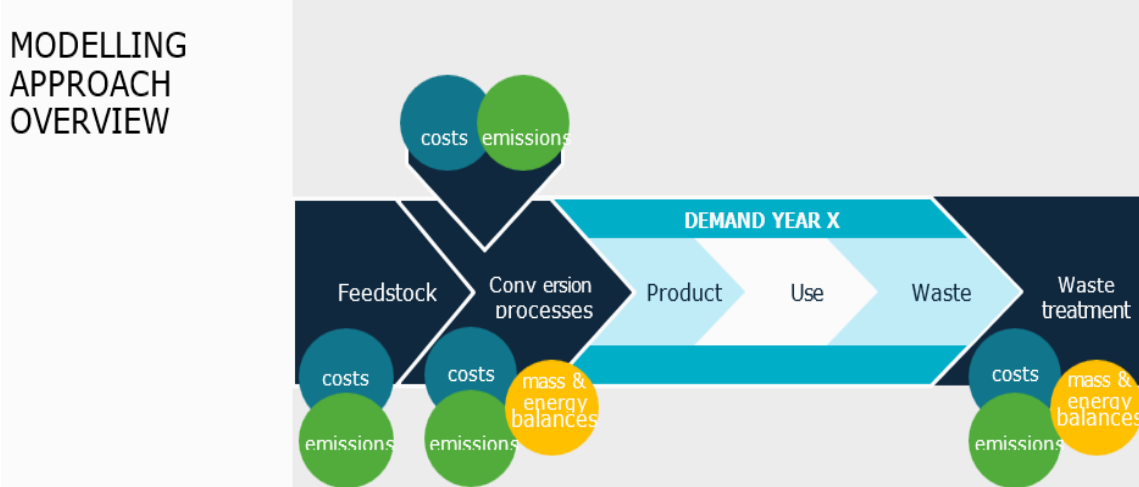
Temelde, bilimsel modelleme yaklaşımı, küresel kimya endüstrisi için belirli bir zaman diliminde, yani bir referans yıldan iklim nötrlüğünün sağlandığı yıla kadar, minimum maliyetli iklim nötr yolları tanımlamaktadır. Bu maliyet minimizasyon yollarının belirlenmesi, belirli bir yıllık sera gazı emisyonu hedefine ulaşmak için kapsam dahilindeki kimyasal ürünlerin yaşam döngüsü boyunca tüm süreçlerin toplam maliyetlerini minimize eden doğrusal bir maliyet minimizasyon modeli kullanılarak yapılır. Her bir yıldaki toplam maliyetler sermaye harcamalarını (CAPEX) ve işletme maliyetlerini (OPEX) içerir. CAPEX, tesisin kendisi ve tesisi işletmek için gereken altyapı ile ilgili tüm yatırımları kapsarken OPEX hem değişken hem de sabit işletme maliyetlerini kapsamaktadır. Modeldeki değişken işletme maliyetleri, kimya endüstrisinden dışarıdan temin edilen hammadde, enerji ve kamu hizmetleri için piyasa fiyatlarını yansıtmaktadır. Sabit işletme maliyetleri bakım, genel idare, tesis genel giderleri, vergiler, sigorta, laboratuvar hizmetleri ve diğer ilgili maliyetler gibi giderleri içerir.

Bilimsel modelleme yaklaşımı, yıllık emisyon limitlerini varsayarken CO2 ve metan gibi IPCC tarafından tanımlanan tüm sera gazı emisyonlarını hesaba katmaktadır²¹. Yıllık emisyon limiti, zaman çizelgesi boyunca her yıl sera gazı emisyonlarına karşılık gelir ve ICCA, Carbon Minds ve ICIS'in üzerinde mutabık kalınan varsayımlarına dayanır.

¹⁹ Raoul Meys et al., Science (2021), <https://doi.org/10.1126/science.abg9853>; Arne Kätelhön et al., Proceedings of the National Academy of Sciences (2019), <https://doi.org/10.1073/pnas.1821029116>; Christian Zibunas et al., Computers & Chemical Engineering (2022), <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107798>.

²⁰ Bashmakov et al., 2022: Industry. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change <https://doi.org/10.1017/9781009157926.013>.

²¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013, The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.



Şekil 7: Kimyasal değer zincirleri için maliyet-minimum iklim-nötr pathwayler için bilimsel modelleme yaklaşımı.

Gerçekçi iklim-nötr yollara ulaşmak için, bu bilimsel modelleme yaklaşımı aynı zamanda her yıl hammadde kimyasal üretime ve atık arıtmaya kadar kimyasal değer zincirinin ayrıntılı modellerini kullanmaktadır (bkz. Şekil 7). Bu modeller, hammadde, dönüşüm süreçleri ve kapsam dahilindeki 18 kimyasalla ilişkili atık artımı için ayrıntılı kütle ve enerji dengelerine dayanmaktadır. Örneğin metanol, proses enerjisinin yanı sıra soğutma ve proses suyu gibi yardımcı hizmetleri sağlamak için elektrik, buhar ve termal enerji kullanılarak sentez gazından üretilir. Hammadde olarak metanol üretimi, örneğin kömür veya doğal gaz gerektirir. Hem proses enerjisi hem de hammadde modeldeki diğer prosesler tarafından üretilir, yani tedarik prosesleri bunları en düşük maliyetle sağlamak için kullanılacaktır. Böylece, ayrıntılı kütle ve enerji dengeleri, zaman çizelgesi boyunca nihai talep ve emisyon sınırlamalarını, herhangi bir hammadde veya enerji kaynağı tedarikini hesaba katmadan yerine getirecek kesin kombinasyonu veya süreçleri bulmak için kullanılır.

Her yıl belirli bir yıllık kimyasal ürün ve atık talebinin yanı sıra belirli bir emisyon sınırlamasına sahip olsa da, değer zincirleri yıllık bazda tanımlanmaktadır. Yıllar arasındaki "matematiksel bağlantılar", yıllar arasındaki zamansal bağımlılıkları hesaba katmaktadır.²² Bu zamansal bağımlılıklar, örneğin, yalnızca belirli bir yıla kadar inşa edilen kapasitelerin sonraki yıllarda faaliyete geçmesini sağlamaktadır.

Son olarak, biyokütle ve ayrıştırılmış plastik atık gibi alternatif hammaddelerin beklenen mevcudiyeti ve beklenen CCS kapasiteleri, gelecekteki farklı sınır koşullarını yansıtmak için bilimsel modelleme yaklaşımına yıllık bazda dahil edilmiştir. Bu sınır koşulları, örneğin, belirli bir teknoloji veya hammaddenin mevcut olmadığı veya beklenenden daha düşük miktarlarda mevcut olduğu durumları yansıtmaktadır. Bu şekilde, bilimsel modelleme yaklaşımı, gelecekteki farklı kimya endüstrisi kurulumlarını temsil etmek için çeşitli senaryoların ve varsayımların geliştirilmesini sağlar.

Bilimsel modelleme yaklaşımı kapsamlı ve kimya endüstrisi için çok sayıda iklim-nötr yol belirleme kapasitesine sahip olsa da, bu çalışmanın kapsamı dört olası minimum maliyetli iklim-nötr yola odaklanmıştır. Bunların her biri için, sera gazı emisyonları, karbon hammaddesinin türüne göre dağılımı, enerji talebi ve kümülatif maliyetler de dahil olmak üzere modelden elde edilen sonuçlar, yüzyılın ortalarında iklim-nötr bir kimya endüstrisi için sunulmaktadır.

²² Christian Zibunas et al., Computers & Chemical Engineering (2022), <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107798>.

7 KÜRESEL KİMYA ENDÜSTRİSİ İÇİN BİRÇOK İKLİM-NÖTR YOL MEVCUTTUR

Sonuçlarımız, küresel kimya endüstrisi için iklim nötrlüğünün dört yolla da mümkün olduğunu göstermektedir. Bu dört yol, kimya sektöründe kullanılan ürün ve üretim süreçlerinin çeşitliliğinin yanı sıra gelecekteki hammadde mevcudiyeti, politikalar, altyapı ve ekonomi, örneğin kaynak ve enerji fiyatlarındaki belirsizliği temsil etmektedir. Tüm bu parametrelerin bölgeler arasında farklılık göstermesi muhtemeldir. Bu nedenle, küresel ve bölgesel kimya endüstrisi tek bir iklim-nötr yol ve tek bir sonuç seti ile temsil edilemez. Şekil 8, CCS ve biyokütle gibi belirsiz temel kaynaklara erişim gibi yola özgü parametrelerin yanı sıra tüm yollar arasında ortak olan parametreler hakkında üst düzey bir genel bakış sunmaktadır. Bu çalışmanın sonraki tüm sonuçları, iklim nötrlüğünün elde edildiği yüzyılın ortasındaki belirli bir yıl olarak tanımlanan iklim nötr bir yıl için gösterilmiştir. Bu iklim-nötr yıl için, iklim nötrlüğünün nasıl sağlandığını, toplam proses enerji talebini, karbon hammadde tüketimini, yıllık OPEX'i ve toplam CAPEX'i vurguluyoruz.

	PATHWAY 1	PATHWAY 2	PATHWAY 3	PATHWAY 4
SCENARIO DESCRIPTION				
ACCESS TO BIOMASS	ABUNDANT	ABUNDANT	LIMITED	LIMITED
ACCESS TO CCS	ABUNDANT	LIMITED	ABUNDANT	LIMITED
COMMON IN ALL PATHWAYS	ACCESS TO NET-ZERO ENERGY, TECHNOLOGY AVAILABILITY, PLASTIC WASTE & FOSSIL FEEDSTOCK & OTHER AVAILABILITIES			

Şekil 8: Münferit iklim-nötr yollarının tanımı

İKLİM NÖTRLÜĞÜNE ULAŞMAK

Şekil 9, küresel kimya endüstrisi çeşitli yollarla iklim nötrlüğüne ulaştığında emisyonların ve atmosferden emilimin nasıl dengelendiğine dair bir anlık görüntü sunmaktadır. Şekil, her bir yol için çift çubukla ayrıntılı bir karşılaştırma sunmaktadır: bir çubuk sera gazı emisyonlarını, diğer çubuk ise giga-ton (Gt) CO₂-eşdeğeri cinsinden sera gazı emisyonu emilimini temsil etmektedir²³. Örneğin, biyo-bazlı (veya DAC-CCU) kimyasallar iklim-nötr yılda üretilir ve yakılırsa, emilim (bitki büyümesinden veya DAC-CCU'dan) negatif bir çubuk olarak gösterilecek ve emisyon net sıfır sera gazı emisyonu ile sonuçlanacak şekilde pozitif bir çubuk olarak gösterilecektir. Buna karşılık, CCS atmosfere emisyon yaymadığı veya atmosferden emilim yapmadığı için, her iki çubukta da görünmez ve ayrı olarak gösterilir.

²³ CO₂-equivalents, or carbon dioxide equivalent, is a metric used to compare the emissions of various greenhouse gases based on their global warming potential relative to that of carbon dioxide. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013, The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

İlk çubuk hammadde ve enerji ile ilgili sera gazı emisyonlarını temsil etmektedir. Hammaddeyle ilgili emisyonlar, hammaddelerin tedarikiyle (çıkarma ve rafine etme süreçleri), hammaddelerden kimyasallara dönüşüm süreçleriyle ve kullanım ömrünün sonuyla ilgili sera gazlarını içerir. Enerji ile ilgili emisyonlar, kimyasal değer zincirlerindeki enerji tedarikinden kaynaklanmaktadır. Şekil 9'da, çıkarma ve rafine etme süreçlerinden kaynaklanan enerjiyle ilgili ve hammaddeyle ilgili emisyonlar, kaynak tedarikinden kaynaklanan sera gazı emisyonları olarak özetlenmiştir. Bu nedenle, emisyon çubuğu yalnızca artık emisyonları - endüstri içinde yakalanmayan, kullanılmayan veya depolanmayanları yansıtmaktadır. Bu artık emisyonlar, teknolojik sınırlamalar veya sınırlı yakalama oranları, CO₂ yakalamanın ekonomik uygulanabilirliği veya diğer yakalanmayan sera gazı emisyonları nedeniyle eksik yakalamadan kaynaklanabilir. İklim nötrlüğüne ulaşmak için, yakalanmayan artık emisyonlarla başa çıkmak çok önemlidir. Şekil 9'daki sağ çubuk, öncelikle biyokütle büyümesi ve doğrudan hava yakalama gibi mekanizmalar yoluyla atmosferden emilen CO₂'yi göstermektedir. İster biyokütleden ister doğrudan havadan kaynaklansın, yakalanan bu CO₂, yollarda kritik bir karbon hammaddesi olarak hizmet eder. CO₂ absorpsiyon mekanizmaları yoluyla azaltılan artık emisyonlardan farklı olarak, süreçlerden yakalanan CO₂ jeolojik oluşumlarda tutulur. Bu durum, jeolojik CO₂ depolamasının yıllık miktarının her bir yol için çubuk diyagramının altında gösterildiği Şekil 9'da ölçülmektedir.

Modelimizde, CO₂ jeolojik depolama kapasitesi önemli bir kısıtlama olarak hizmet etmektedir. Depolama için uygun geniş jeolojik oluşumların varlığına rağmen, öngörülen kapasite çeşitli zorluklardan önemli ölçüde etkilenmektedir. Bunlar arasında depolama tesislerinin planlanması ve inşası ile ilgili zorluklar, gereken önemli başlangıç yatırımları ve CO₂ taşıma ve depolama altyapısının geliştirilmesini destekleyecek düzenleyici çerçevelerin zorunluluğu yer almaktadır. Enerji Geçişleri Komisyonu'na (ETC) göre, gelişmiş petrol geri kazanım tekniklerinin kullanımı da dahil olmak üzere jeolojik depolama için potansiyel kapasite yılda 5 Gt CO₂'ye kadar ulaşabilir²⁴.

Bununla birlikte, bu kapasitenin tamamı doğrudan kimya endüstrisinin kullanımına sunulmayacaktır. Modelimiz, bilimsel literatürün taranması ve endüstri paydaşlarıyla yapılan kapsamlı görüşmelere dayanarak, toplam CO₂ depolama kapasitesinin %25 ila %50'sini muhafazakar bir şekilde kimya endüstrisine tahsis etmektedir. Bu yöntem, teorik potansiyel ile fiili kullanılabilirlik arasındaki kritik boşluğu vurgulayarak, öngörülen kapasitelerin arka planında CO₂ depolamanın potansiyel kullanılabilirliğini çevreleyen belirsizliği netleştirmeyi amaçlamaktadır. CCS kapasitesindeki farklılık, dört yol boyunca emisyon profillerinin ve azaltım stratejilerinin şekillendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

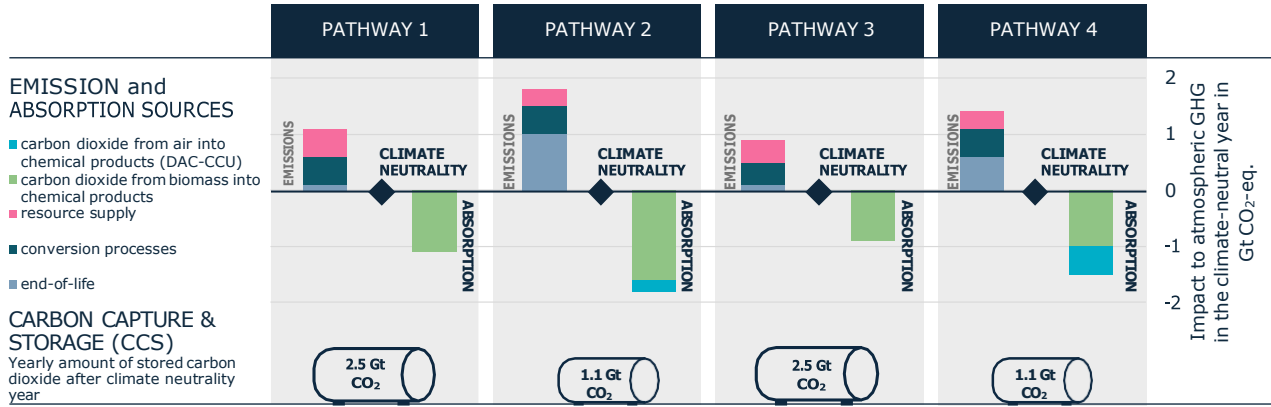
²⁴ Energy Transitions Commission, "Carbon Capture, Utilisation and Storage in the Energy Transition: Vital but Limited," 2022, <https://www.energy-transitions.org/publications/carbon-capture-use-storage-vital-but-limited/>.

Yol 1 ("Bol biyokütle ve CCS") ve 3 ("Bol CCS") daha cömert bir CCS kapasitesinden yararlanarak daha yüksek hacimde CO2'nin yakalanmasını ve depolanmasını sağlar. Yıllık yaklaşık 2,5 Gt CO2 depolama kapasitesi her iki yolda da tamamen kullanılmaktadır. Bu avantaj, atmosferik emisyonların azaltılması anlamına gelmektedir ve bu emisyonların büyük bir kısmı kimyasal değer zincirindeki dönüşüm süreçlerinden ve kaynak tedarikinden kaynaklanmaktadır. Yol 1 ve 3'te, yüksek CO2 depolama kullanımı, Doğrudan Hava Yakalama yoluyla atmosferden doğrudan CO2 emilmeden, yalnızca biyokütle yoluyla CO2 emilimine yol açmaktadır.

Buna karşılık, 2 ("Bol biyokütle ve sınırlı CCS") ve 4 ("Sınırlı biyokütle ve CCS") yolları daha katı CCS kısıtlamalarıyla başa çıkmak zorundadır. Bu kısıtlamalar nispeten daha yüksek emisyonlara yol açmaktadır ve bu durum özellikle sektörün değer zincirinin kullanım ömrü sonu aşamasında fark edilmektedir. Yol 4 ("Sınırlı biyokütle ve CCS"), kimyasalların ve plastiklerin yakılmasından kaynaklanan kullanım ömrü sonu emisyonları için depolama kapasitelerini hala büyük ölçüde kullansa da, kullanım ömrü sonu aşamasından kaynaklanan sera gazı emisyonları yol 2'ye kıyasla daha düşüktür. Yol 2'de ("Bol biyokütle ve sınırlı CCS"), 1,1 Gt CO2 depolama kapasitesi esas olarak biyokütlenin fermantasyonu ve gazlaştırılmasından kaynaklanan biyojenik CO2 emisyonlarını depolamak için kullanılır. Bu kısıtlamalardan kaçınmak ve yine de iklim nötrlüğüne ulaşmak için, biyokütle büyümesine bağımlılık ve doğrudan hava yakalamanın stratejik uygulaması, 1. ve 3. yollara kıyasla artmaktadır.

Teknoloji-nötr bir yaklaşıma bağlı kalarak, modelimiz potansiyel ölçeklenebilirliğini ve esnekliğini kabul ederek doğrudan hava yakalama yeteneklerine bir üst sınır getirmemektedir. Bununla birlikte, biyokütle kullanımı, yenilenebilir karbon hammadde olarak kimya endüstrisi için çok önemli olmakla birlikte, kendi zorluklarını da beraberinde getirmektedir. Bunlar arasında, artan küresel nüfus nedeniyle gıda güvenliği açısından risk oluşturan ve biyoçeşitliliği tehdit eden arazi rekabeti de yer almaktadır. Sonuç olarak, biyokütle, sürdürülebilir kullanımını sağlamak için modelimizde kısıtlı bir kaynak olarak ele alınmaktadır. Bilimsel literatürün kapsamlı bir incelemesi ve kapsamlı bir paydaş katılımı süreci sayesinde, biyokütlenin sürdürülebilir kullanılabilirliğini, daha az ve daha bol biyokütleye sahip yollar için sırasıyla yılda 8,5 EJ ve 37,4 EJ arasında belirledik. Bu kısıtlama, kimya endüstrisinde biyokütle kullanımının sürdürülebilir sınırlar içinde kalmasını sağlayarak çevresel, sosyal ve endüstriyel ihtiyaçlar arasında dikkatli bir denge kurulmasını yansıtmaktadır.

Yol 2, biyokütle kaynaklarına bol erişiminden faydalanarak iklim nötrlüğüne yönelik stratejisi dahilinde nispeten daha yüksek artık emisyonları karşılayabilmesini sağlamaktadır. Bu bol biyokütle erişimi, doğal süreçler yoluyla daha fazla miktarda CO2'yi etkili bir şekilde emen sağlam bir tampon görevi görür. Buna karşılık, sınırlı biyokütle ile kısıtlanan 4. yol, emisyon yönetimi konusunda daha katı bir yaklaşım benimsemelidir. Yol 4'te biyokütle karbon hammaddesine bu sınırlı erişim, artık emisyonların azaltılmasını ve doğrudan hava yakalama teknolojilerine daha fazla güvenilmesini gerektirmektedir. Bu teknolojiler, kimya endüstrisinin biyokütleden elde edilen karbon açığını telafi ederek iklim nötrlüğüne ulaşabilmesini sağlayarak, yolun karbon hammadde gereksinimlerini tamamlamak için gereklidir.



Şekil 9: Üstteki şekil - İklim nötr yılında atmosferik sera gazı üzerindeki etki. Yaşam döngüsü aşamalarından kalan emisyonlar, biyokütle büyümesinden veya doğrudan hava tutma yoluyla havadan CO₂ emilimi ile dengelenir. Alt şekil - İklim nötr yılına ulaşıldığında jeolojik oluşumlarda depolanan yıllık karbondioksit miktarı.

KARBON HAMMADDE TÜKETİMİ

Şekil 10, iklim-nötr yılda karbon içeren temel kimyasalları (etilen, propilen, benzen, toluen, ksilenler ve metanol) üretmek için kullanılan karbonun kaynağına göre dağılımını göstermektedir. Bu toplam temel kimyasal miktarı yaklaşık olarak 600 Mt karbondan oluşmaktadır, y ekseninde gösterildiği gibi. Bu temel kimyasallar, polietilen veya polipropilen gibi kapsam dahilindeki diğer tüm karbon bazlı ürünleri üretmek için kullanılır. Temel kimyasalların yanı sıra, amonyak üretmek için gereken karbon hammadde de gösterilmektedir. Amonyakın kendisi karbon içermemekle birlikte, bazı yollarda amonyak üretmek için kullanılan hidrojen yine de karbon içeren bir hammadde olan doğal gazdan elde edilmektedir. Yollardaki farklılıkları vurgulamak için karbon kaynakları vurgulanmıştır. Bu kaynaklar geri dönüştürülmüş karbon, biyojenik karbon, hava ile yakalanan karbon ve fosil karbondan oluşmaktadır.

Geri dönüştürülmüş karbon, plastik atıkların mekanik ve kimyasal geri dönüşümünden kaynaklanır. Kimyasal geri dönüşüm nafta gibi kimyasal hammaddelerin yerini alırken, mekanik geri dönüşüm plastik üretimi için geri dönüştürülmüş granüller üretir. Bu geri dönüştürülmüş granüller, plastik üretmek için gereken temel kimyasalların miktarını azaltır.

Biyobazlı karbon, tarımsal atıklar veya özel enerji bitkileri gibi biyokütlenin kimyasal üretim için değerli hammaddelere dönüştürülmesinden elde edilir. Örneğin, etanol biyokütlenin fermantasyonu yoluyla üretilir ve daha sonra kimya endüstrisinde temel bir yapı taşı olan etileni oluşturmak için katalitik olarak dehidre edilir. Buna ek olarak, biyokütle gazlaştırılarak sentez gazına ve ardından metanol sentezine dönüştürülerek metanole dönüştürülebilir. Bu metanol daha sonra metanolden olefinlere/aromatiklere teknolojileri kullanılarak olefinlere ve aromatiklere dönüştürülebilir. Bu çok yönlülük, biyokütleyi çeşitli kimyasal üretim süreçleri için son derece uyarlanabilir ve temel bir girdi haline getirmektedir.

Doğrudan Havadan Yakalama (DAC) veya endüstriyel noktasal kaynaklardan elde edilen yakalanan karbon (CCU), sera gazı emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Endüstriyel noktasal kaynaklar, hidrojen üretimi için buhar metan reformasyonu, etilen oksit üretimi gibi yüksek CO₂ yayan prosesler ve fermantasyon ve gazlaştırma gibi biyokütle dönüşüm prosesleri gibi bir dizi prosesi kapsamaktadır. Özellikle, CO₂ biyokütle dönüşümünden yakalandığında, sistem içinde karbon kullanım verimliliğinde bir artışa yol açar. Yakalanan bu CO₂ daha sonra düşük emisyonlu hidrojen ile birleştirilerek metanol ve metan gibi değerli CO₂ bazlı kimyasallar üretilir.

Fosil karbon, nafta, doğal gaz, etan ve propan gibi fosil hammadde kaynaklarından gelir.

Geri dönüştürülmüş karbon, tüm yollarla mümkün olan en üst düzeyde kullanılır ve bu, iklim nötr yılı itibarıyla 176 ile 177 Mt karbonu temsil eder. Bu miktarlar, OECD'nin Küresel Hedef Politikası Senaryosu'na²⁵ göre, yanlış yönetilen plastik atıkları en aza indirmek için gereken gelecekteki geri dönüşüm oranlarından türetilmiştir ancak bu hedefi başarmak için başka politika setleri de olabilir. OECD'nin ilgili geri dönüşüm oranları, kapsamdaki plastiklere, polietilen (LD, LLD, HD), polipropilen, polietilen tereftalat (PET) ve polivinil klorür (PVC) gibi maddelere uygulanır. Polistiren, poliamid, polikarbonatlar ve poliüretanlar gibi diğer plastikler kapsamamaktadır ve bu nedenle bu çalışma dahilinde yer almayan ek geri dönüşüm potansiyelleri sağlayabilirler. Geri dönüşüm oranlarındaki artış, mekanik geri dönüşümün yanı sıra kimyasal geri dönüşümün de uygulanmasını gerektirir. Mekanik geri dönüşüm kaynak verimliliği sağlarken, kimyasal geri dönüşüm daha geniş bir plastik atık yelpazesini işleyebilir ve polimer bozulması gibi sorunları aşabilir. Sınıflandırılmış plastik atıkları değerli bir hammadde olarak kullanarak, kimya endüstrisi çevresel ayak izini büyük ölçüde azaltabilir. Geri dönüşümün çevresel faydaları sadece kimyasal değer zinciri²⁶ için sera gazı emisyonlarının azaltılmasını değil, aynı zamanda yanlış yönetilen plastik atıklardan kaynaklanan kirliliği de hafifletir. Bu nedenle, dünya genelinde geri dönüşüm oranlarının artırılması, geliştirilmiş atık toplama ve ayırma altyapısı ve ekonomik teşviklerle desteklenen, iklim değişikliğiyle mücadeleye katkıda bulunur ve okyanus gibi ekosistemlerin kirlenmesini azaltır.

Biyolojik kaynaklı karbonun kullanımı, yollar arasında 95 ile 193 Mt karbon arasında değişmektedir. Biyokütle mevcudiyeti, yol 3 ve 4'te ("Bol CCS ve Sınırlı biyokütle & CCS") sınırlı iken, yol 1 ve 2'de biyokütleyle bol erişim vardır ("Bol biyokütle & CCS" ve "Bol biyokütle"). Tüm yollarla biyokütlelerin fermantasyonu maksimum düzeyde kullanılır. Yol 1 ve 2'de bol biyokütle ile 118 Mt karbon, yol 3 ve 4'te ise sınırlı biyokütle erişimi ile 27 Mt karbon sağlar.

²⁵ OECD, 2022, Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060, <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.

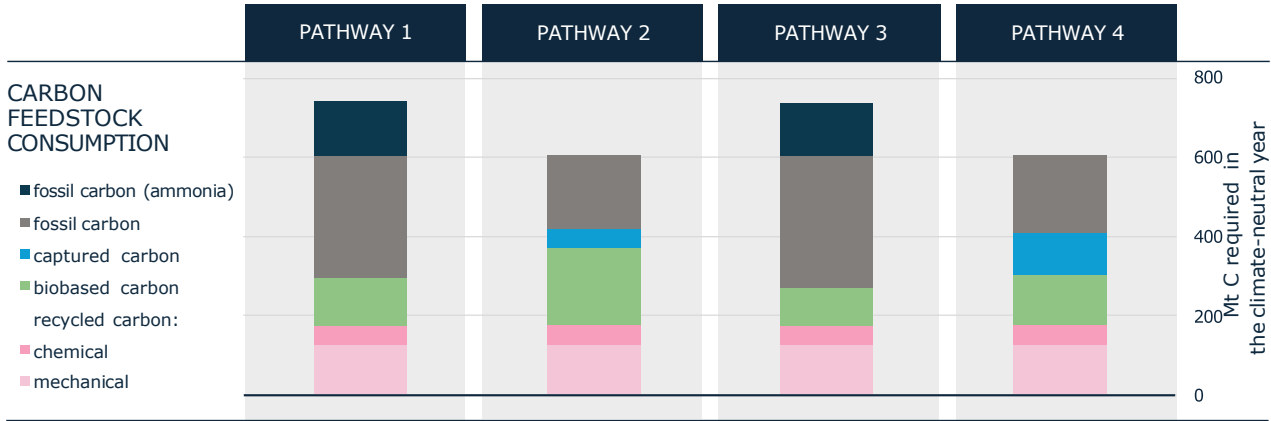
²⁶ Jeswani, Harish, et al. "Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery." *Science of the Total Environment* 769 (2021): 144483.

Hermanns, Ronja, et al. "Comparative life cycle assessment of pyrolysis–recycling Germany's sorted mixed plastic waste." *Chemie Ingenieur Technik* 95.8 (2023): 1259-1267.

Fermantasyona ek olarak, yol 2, 3 ve 4 biyokütle gazlaştırmasını kullanır ve bu, sırasıyla 75 Mt karbon ("Bol biyokütle"), 68 Mt karbon ("Bol CCS") ve 97 Mt karbon ("Sınırlı biyokütle & CCS") olarak temsil edilir. Gazlaştırma, genellikle metanolden olefin ve aromatik bileşikler üretme süreçleriyle biyolojik kaynaklı propilen ve benzen üretmek için kullanılır. Gazlaştırma kullanımının yollar arasında değişiklik göstermesi, propilen ve benzen üretmek için diğer seçeneklerden etkilenir. Örneğin, yol 2'de ("Bol biyokütle"), sadece benzen gazlaştırma ile üretilirken, propilen fermantasyondan elde edilen biyolojik kaynaklı etilenden üretilir. Yol 3'te, bol CCS kapasitesine sahip olan yerde ise, benzen ve propilen fosil hammadde kaynaklarından üretilir.

Yakalanan karbon, yol 2 ve 4'te sınırlı CCS erişimi olan yollarla kullanılır ("Bol biyokütle" ve "Sınırlı biyokütle & CCS"), sırasıyla 49 ve 106 Mt karbonu temsil eder. Her iki yol boyunca, metan, yakalanan CO₂ ve düşük emisyonlu hidrojen kullanılarak üretilir. Bu metan, doğalgaz boru hatlarına ve süreçlerine yönlendirilir ve toplam doğalgaz talebinin sırasıyla %66'sını ve %80'ini karşılar. Yol 2'de ("Bol biyokütle"), yakalanan karbon sadece metan üretimi için kullanılır (49 Mt karbon), oysa yol 4'te ("Sınırlı biyokütle ve CCS"), yakalanan karbon metan (89 Mt karbon) ve metanol (17 Mt karbon) üretiminde kullanılır. Metanol, metanol talebini karşılamak ve olefinler ve benzen gibi temel kimyasallar üretmek için daha da kullanılır.

Son olarak, fosil karbon, iklim nötr yılında 186 ile 335 Mt karbon arasında değişen miktarlarla hala en büyük karbon hammadde kaynaklarından biridir. Bu büyük fosil hammadde oranları, tüm yollarla CCS kullanımı sayesinde mümkündür (Bkz. Şekil 10). Bu nedenle, bol CCS yolları ("Bol biyokütle & CCS", %60 ve "Bol CCS", %63), sınırlı CCS yollarına kıyasla ("Bol biyokütle", %31 ve "Sınırlı biyokütle & CCS", %33) çok daha fazla fosil karbon kullanır. Ancak, tüm yollarla CCS maksimum düzeyde kullanılır; bu kullanım, depolama kapasitesinin sınırlamaları ("Bol biyokütle" ve "Sınırlı biyokütle & CCS") veya teknik sınırlamalar ("Bol biyokütle & CCS" ve "Bol CCS") nedeniyle kısıtlıdır. Bol CCS kapasitesine sahip yollarda CCS potansiyellerinin maksimum kullanımı, fosil karbon kullanımını artırır ve böylece fosil karbon yalnızca karbon içeren kimyasallar için değil, aynı zamanda doğal gaz temelli amonyak üretimi için de kullanılabilir. Burada, fosil karbon ayrıca amonyak üretmek için kullanılır (amonyak için fosil karbon), bu da sırasıyla "Bol biyokütle & CCS" ve "Bol CCS" yollarında 139 ve 131 Mt ek fosil karbon talebine yol açar.



Şekil 10: İklim nötr yılı temel kimyasallar talebini üretmek için gereken karbon hammadde tüketiminin dağılımı. İklim nötr yılında karbon hammadde kaynakları, geri dönüştürülmüş karbon (mekanik ve kimyasal), biyolojik kaynaklı karbon, fosil karbon ve amonyak üretimi için fosil karbon olarak ölçülen Mt karbon cinsinden belirlenmiştir. Amonyak üretimi için gereken fosil karbon, bazı yollarda Şekil 1'de yer almamakla birlikte, burada dahil edilmiştir

TOPLAM PROSES ENERJİ TALEBİ

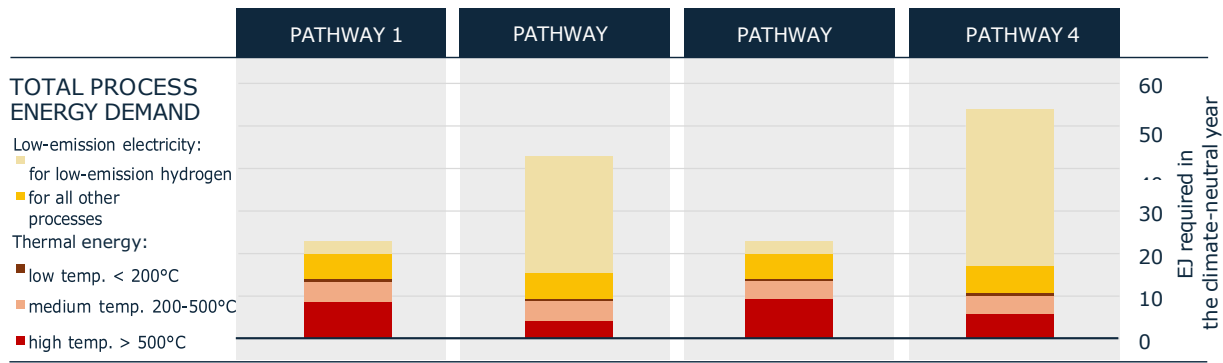
Şekil 11, toplam enerji talebinin bir kesitini göstermektedir ve bu talep, iklim nötr yılında düşük emisyonlu elektrik ve termal enerji olarak ayrılabilir. Termal enerji, sırasıyla 200°C'nin altındaki, 200°C ile 500°C arasındaki ve 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarla tanımlanan düşük, orta ve yüksek sıcaklıkta ısıdan oluşmaktadır. Bu toplam proses enerji talebi, kimya endüstrisindeki süreçleri işletmek için gereken tüm enerji girdilerini içerir; temel kimyasalların üretiminden işleme, kimyasal ürünlere kadar ve geri dönüşüm gibi yaşam sonu süreçlerine kadar. Şekil 11'in üst diyagramı, her yol için iklim nötr yılına ait toplam proses enerji talebini EJ cinsinden sunmaktadır. Şekil 11'in alt kısmı ise her yol için düşük emisyonlu hidrojen üretmek amacıyla ek elektrik talebini göstermektedir.

Düşük ve orta sıcaklıkta ısı talebi, tüm yollar boyunca sabit kalmaktadır. Düşük ve orta sıcaklıkta proses enerjisi, birçok kimyasal süreçte kullanılır, örneğin temel kimyasalların plastiklere işlenmesi gibi. Ayrıca, düşük ve orta sıcaklıkta ısı, CO2 yakalama katalizörlerinin yenilenmesi gibi yeni süreçlerde de gereklidir. Düşük ve orta sıcaklıkta proses enerjisi, çeşitli kaynaklardan sağlanabilir; bunlar arasında fosil yakıtların doğrudan yakılması, CCS veya biyokütle ile birleşik kullanım, nükleer enerji ya da ısı pompaları, dirençli ısıtıcılar veya buhar kazanları aracılığıyla düşük emisyonlu elektrik yer alır.

Buna karşılık, yüksek sıcaklıkta termal enerji talebi yollar arasında farklılık gösterirken her zaman en büyük kısmı temsil eder. Yüksek sıcaklıkta termal enerji, istenilen sıcaklıklara ulaşmak için yakma işlemi gerektirir; örneğin, temel kimyasalların üretimi için buhar kırıcılarında olduğu gibi. Yakma enerjisi, fosil yakıtlar ve kimyasal işleme kaynaklı yakıt gazlarının CCS ile birleşik kullanımı, biyokütle veya düşük emisyonlu hidrojen gibi çeşitli kaynaklarla sağlanabilir.

Bu nedenle, en iyi enerji kaynağı bölgesel erişilebilirlik ve süreç tasarımına bağlıdır. Yol 1 ve 3, yüksek sıcaklıkta proses enerjisine daha fazla bağımlılık gösterir ve bu enerji, esas olarak fosil hammadde kaynaklarından (doğal gaz veya nafta gibi) üretilen amonyak ve temel kimyasalların üretimi için kullanılır. Yol 2 ve 4 ise, CCS'ye sınırlı erişime sahip olduğundan, amonyak üretimi, karbon yakalama ve kullanım (CCU) ve diğer hidrojen talepleri için düşük emisyonlu hidrojen üretmek amacıyla büyük miktarda ek elektrik gerektirir.

Düşük emisyonlu elektrik, iklim nötr bir kimya endüstrisinde mevcut ve gelişen süreçlerin işletilmesi için tüm yollarla gereklidir. Düşük emisyonlu elektrik gerektiren gelişen süreçler arasında, yakalanan karbondioksitin yüksek basınca sıkıştırılması ve ardından jeolojik formasyonlara taşınması ve depolanması veya elektrikle çalışan buhar kazanları yer alır. Düşük emisyonlu elektrik, kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne ulaşabilmesi için temel bir gereklilik olsa da, bu elektriğin temini bölgesel erişilebilirliğe bağlıdır.



Şekil 11: İklim nötr yılında her yol için proses enerji talebinin bir kesiti, temel kimyasalların üretiminden işleme, nihai ürünlere ve yaşam sonu süreçlerine kadar olan enerji talebinin türlerine göre toplamını gösterir. Bu, geri dönüşüm de dahil olmak üzere, amonyak üretimi için düşük emisyonlu hidrojen üretimi, karbon yakalama ve kullanım (CCU) ve diğer hidrojen talepleri için gereken elektrik ihtiyacını da içerir.

YILLIK İŞLETME MALİYETLERİ VE BİRİKİMLİ SERMAYE HARCAMALARI

Şekil 12 iki kısımdan oluşmaktadır. Üst kısımda yıllık işletme maliyetleri, alt kısımda ise birikimli sermaye harcamaları trilyon USD cinsinden sunulmaktadır. Yıllık işletme maliyetleri diyagramı, iklim nötr yılında her yol için yıllık sabit ve değişken işletme maliyetlerini göstermektedir. Yıllık sabit işletme maliyetleri, 18 kimyasalın değer zincirinde faaliyet gösteren tüm tesislerin sabit maliyetlerini, tüm ara kimyasalların üretimi ile geri dönüşüm ve atık işleme işlemlerini içerir. Değişken işletme maliyetleri ise kimya endüstrisine sağlanan tüm kaynaklar ve enerji tedariklerinin maliyetlerini, ayrıca atık toplama ve CO2 depolama altyapısının maliyetlerini içerir. Hata çubukları, sürdürülebilir kaynaklı biyokütle, düşük emisyonlu elektrik ve fosil hammadde gibi belirli değişken maliyetlere ilişkin bir duyarlılık analizini göstermektedir. Bu duyarlılık analizinde, sürdürülebilir kaynaklı biyokütle, düşük emisyonlu elektrik veya fosil hammadde için beklenen temel fiyatlar 0.5 ve 1.5 katsayısı ile değiştirilmiştir. Birikimli sermaye harcamaları, iklim nötr yılına kadar modelleme zaman çizelgesinde yapılan tüm yatırımların toplamını temsil etmektedir.

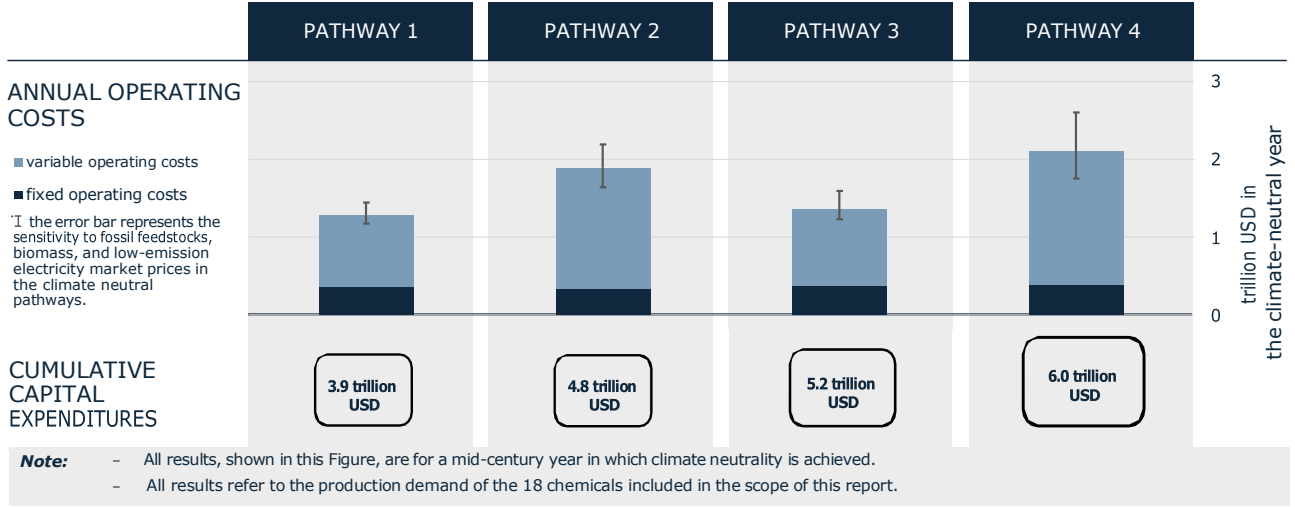
Tüm yollar, iklim nötr yılında yıllık sabit işletme maliyetlerini yaklaşık 0.4 trilyon USD olarak göstermektedir. Sabit işletme maliyetleri, bir tesisi işletirken ortaya çıkan tüm maliyetleri içerir; örneğin iş gücü maliyetleri, vergiler, sigorta, bakım ve diğer tesis genel giderleri. Bu çalışmada, 18 kimyasalın değer zincirindeki tüm tesislerin sabit maliyetleri, tüm ara kimyasalların üretimi ve geri dönüşüm ve diğer atık işleme işlemleri de dahil olmak üzere hesaplanmıştır.

Değişken yıllık işletme maliyetleri, yollar arasında 0.9 ile 1.7 trilyon USD arasında değişiklik göstermektedir. Değişken işletme maliyetleri, birkaç büyük maliyet faktörü tarafından belirlenmektedir. Bu maliyet faktörleri, düşük emisyonlu elektriğin fiyatı, biyokütlenin fiyatı ve fosil hammaddelerin fiyatlarıdır; bunlar arasında nafta, etan, propan ve doğal gaz yer almaktadır. Düşük emisyonlu elektriğin fiyatı, tüm yollar boyunca önemli bir maliyet faktörü olarak öne çıkarken, biyokütlenin fiyatı özellikle yol 2'de ("Bol biyokütle") belirleyici bir rol oynamaktadır, fosil hammaddelerin fiyatları ise yol 1 ve 3'ün değişken maliyetlerini etkilemektedir ("Bol biyokütle & CCS" ve "Bol CCS"). Yolların ana maliyet faktörlerine ilişkin duyarlılık analizi, değişken maliyetlerin 0.3 ile 0.9 trilyon USD arasında değiştiğini göstermektedir; "Bol biyokütle" ve "Sınırlı biyokütle & CCS" yollarındaki aralıklar, yol 1 ve 3'teki aralıklardan ("Bol biyokütle & CCS" ve "Bol CCS") iki kat daha yüksektir. Farklı maliyet aralıkları, fosil hammaddelerin diğer kaynaklarla kıyaslandığında, örneğin biyokütle gibi, nispeten düşük fiyatlı kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Farklı yolların toplam işletme maliyetlerini karşılaştırdığında, bol CCS'ye sahip yolların ("Bol biyokütle & CCS" ve "Bol CCS") diğer yollara göre daha düşük maliyetler ortaya koyduğu gözlemlenmektedir. Bu daha düşük toplam maliyetler, CCS ile birleşik olarak nispeten düşük fiyatlı fosil hammaddelerinin güçlü bir şekilde kullanılmasına bağlanabilir. Buna karşılık, sınırlı CCS'ye sahip yollar, biyokütle, düşük emisyonlu hidrojen veya yakalanan CO₂ gibi alternatif hammaddeler kullanarak daha yüksek işletme maliyetlerine yol açmaktadır. Özellikle, bu yolların düşük emisyonlu hidrojen üretmek için ek düşük emisyonlu elektrik talebinin önemli ölçüde artması, maliyetlerin yükselmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, yol 4 ("Sınırlı biyokütle & CCS") en yüksek işletme maliyetlerine sahiptir. Yol 2 ve 4'ü işletme maliyetleri açısından daha rekabetçi hale getirebilmek için, uygun fiyatlı düşük emisyonlu elektriğe ihtiyaç vardır.

Birikimli sermaye harcamaları, yollar arasında önemli ölçüde farklılık göstermekte olup, 1.5 kat farkla 3.9 trilyon USD ile 6.0 trilyon USD arasında değişmektedir. Burada, yol 2 ("Bol biyokütle") ve yol 3 ("Bol CCS"), yaklaşık 5 trilyon USD'lik sermaye harcamalarına sahip benzer bir aralıkta yer almaktadır, ancak Bol biyokütle yolunda sermaye harcamaları biraz daha düşük olup, 4.8 trilyon USD'ye düşmektedir. Bu nedenle, fosil odaklı bir kimya endüstrisine kıyasla biyokütleyle daha fazla yönelmiş bir kimya endüstrisinin, gelişmiş karbon yakalama ve depolama altyapısına sahip olmasının benzer bir birikimli sermaye harcaması olması mümkündür. Birikimli sermaye harcamalarında dikkat çeken bir diğer yol ise yol 1 ("Bol biyokütle & CCS") olup, en düşük birikimli sermaye harcamasına (3.9 trilyon USD) sahiptir.

Başka bir deyişle, mevcut fosil tabanlı teknolojilerle maliyet etkin alternatif teknolojileri entegre edebilir. Örneğin, biyokütlenin fermente edilmesi, biyokütle gazifikasyonuna kıyasla yalnızca sermaye harcamalarının üçte biri kadarını gerektirir. Bu nedenle, biyokütle mevcutsa, fermente işlemi geniş çapta kullanılır ("Bol biyokütle & CCS" ve "Bol biyokütle"). Buna karşın, Sınırlı biyokütle & CCS yolu, birçok yeni teknoloji ve altyapıya yapılan yatırımlar nedeniyle en yüksek birikimli sermaye harcamalarını gerektirir.



Şekil 12: İklim nötrlüğüne ulaşmak için her yolun gerekli maliyetlerinin bir kesiti. Üstteki şekil, iklim nötr yılında sabit ve değişken işletme maliyetlerine bölünmüş işletme maliyetlerini trilyon USD cinsinden göstermektedir. Yıllık sabit işletme maliyetleri, 18 kimyasalın değer zincirinde faaliyet gösteren tüm tesislerin sabit maliyetlerini içerir. Yıllık değişken işletme maliyetleri, tüm kaynaklar, enerji tedarikleri, atık toplama ve CO2 depolama altyapısının maliyetlerini içerir. Ayrıca, hata çubuğu, fosil hammaddelerinin, biyokütlenin ve düşük emisyonlu elektriğin fiyatlarına göre işletme maliyetlerinin duyarlılığını göstermektedir. Alt kısımdaki şekil, birikimli sermaye harcamalarını trilyon USD cinsinden temsil etmektedir.

8 İKLİM NÖTRLÜĞÜ İÇİN KOLAYLAŞTIRICILARA İHTİYAÇ VARDIR

Bu çalışma, kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne geçişi için dört potansiyel yol geliştirmiştir. Her yol, geri dönüşüm ve CO2 ile biyokütlenin hammadde olarak kullanılması gibi çözümlerin bir kombinasyonundan oluşmaktadır. Ancak bu çözümleri etkili bir şekilde uygulamak için, plastik atıklara erişim, sürdürülebilir kaynaklı biyokütle, düşük emisyonlu hidrojen, yeterince düzenlenmiş karbon yakalama ve depolama (CCS), uygun fiyatlı düşük emisyonlu enerjiye erişim ve destekleyici politikalar gibi kritik faktörlere ihtiyaç vardır. Aşağıdaki bölümler, endüstrinin iklim nötrlüğüne geçişini destekleyen her bir faktörün rolünü ve şu anda karşılaşılan zorlukları incelemektedir; bu da sera gazı (GHG) azaltımına yönelik çok yönlü bir yaklaşımın gerekliliğini vurgulamaktadır. Ayrıca, bu geçişleri kolaylaştırmada düzenleyici çerçevelerin ve altyapı gelişiminin önemi de vurgulanmaktadır; bu da kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne geçişi için bu faktörlerin entegrasyonunun ne kadar kritik olduğunu anlamaya yönelik temel oluşturur.

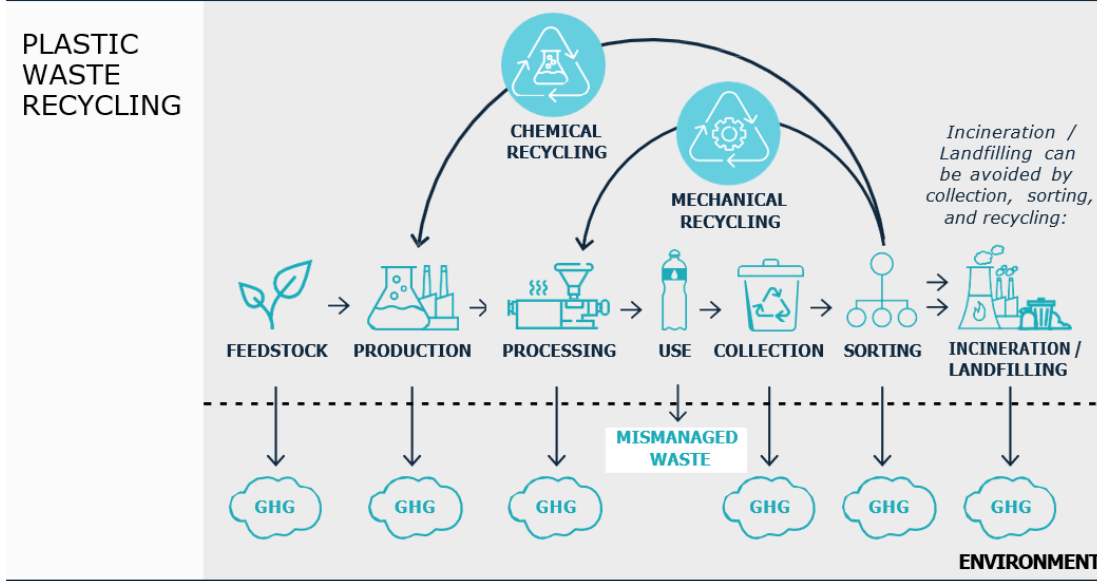
PLASTİK ATIKLARINA ERİŞİM

Bölüm 7'de gösterildiği gibi, plastik atık tüm yollar için karbon hammadde olarak önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 13, plastiklerin üretimden kullanımına ve yaşam sonuna kadar olan yaşam döngüsünü göstermektedir. Yaşam sonu aşamasında, plastik atıklar ya depolama alanlarına gönderilebilir, enerji geri kazanımı ile yakılabilir veya geri dönüştürülmek üzere gönderilebilir. Plastik atıkların depolanması ve yakılması, karbon kaybına yol açarken, geri dönüşüm süreçleri plastiklerin karbon içeriğini kimyasal değer zincirine geri kazandırır. Geri dönüşüm, yakmadan kaynaklanan sera gazı (GHG) emisyonlarını azaltır ve yanlış yönetilen atıklardan kaynaklanan kirliliği engeller. Bu şekilde, geri dönüşüm, kimya endüstrisindeki karbonun döngüsel akışını önemli ölçüde artırarak, sera gazı azaltma stratejileri için çift fayda sağlar.

Mekanik geri dönüşüm, plastik atıkları doğrudan yeni plastik ürünler için ham maddelere dönüştürürken, malzemenin kimyasal yapısını değiştirmez ve böylece karbonu plastik ekonomisi içinde kilitli tutar. Bu süreç, köklü teknolojilere dayanır. Ancak mekanik geri dönüşümün bazı sınırlamaları vardır. Ardışık geri dönüşüm döngüleriyle, polimer özellikleri bozulmaya eğilimlidir, bu da bunların belirli uygulamalarda kullanılmasını sınırlandırabilir. Bu, işleme koşullarına bağlı bozulma veya virgin-material'da²⁷ ilk başta kullanılan katkı malzemelerinden kaynaklanabilir. Mekanik geri dönüşüme kıyasla, kimyasal geri dönüşüm hala gelişmekte olan bir sektördür. Ancak, mekanik geri dönüşümün karşılaştığı bazı zorluklara çözüm sunar. Kimyasal geri dönüşüm, plastik atıkları moleküler yapı taşlarına ayırır ve bu yapı taşları, kimyasallar ve benzeri özelliklere sahip plastikler üretmek için yeniden hammadde olarak kullanılabilir.

²⁷ Ragaert et al., 2017: Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste; Waste Management; <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>

Ayrıca, kimyasal geri dönüşüm, karışık ve kirlenmiş plastik atık akışları dahil olmak üzere daha geniş bir plastik atık yelpazesıyla başa çıkabilir. Avantajlarına rağmen, kimyasal geri dönüşüm, kimyasal yapıyı bozmak ve plastik üretimi için değer zinciri boyunca daha fazla enerji gerektirir. Kimyasal geri dönüşümün mekanik geri dönüşümle entegrasyonu, değer zincirine yeniden işlenebilecek plastik atık miktarını maksimize etmek için önemlidir.



Şekil 13: Plastik geri dönüşümüne şematik genel bakışı. Geri dönüşüm stratejilerinin uygulanması, çevresel ayak izini azaltır, ham plastıklara olan bağımlılığı en aza indirir ve değer zinciri boyunca sera gazı emisyonlarını hafifletir. Kullanım aşamasındaki emisyonlar, bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

Geri dönüşümün inkâr edilemez avantajlarına rağmen, küresel geri dönüşüm oranları düşük kalmaya devam etmektedir; plastik atıkların yalnızca %9'u geri dönüştürülmekte ve %22'den fazlası yanlış şekilde atılmaktadır²⁸. Küresel plastik talebinin artmaya devam etmesiyle, geri dönüşüm oranlarını artırmak, plastik geri dönüşümünün faydalarını en iyi şekilde kullanmak için daha da kritik hale gelmektedir. Bu, destekleyici politikalar ve plastik atık toplama ve ayırma için ileri düzey altyapılara yapılacak yatırımları gerektirir. Bu yatırımlar yalnızca çevresel kirliliği azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda plastik atıkların kimya endüstrisinde hammadde olarak verimli bir şekilde yeniden entegrasyonunu sağlayacaktır.

Özetle, mekanik ve kimyasal geri dönüşüm teknolojilerinin benimsenmesi, kimya endüstrisinde iklim nötrlüğüne ulaşmak için hayati önem taşımaktadır ve kimyasal değer zincirinde karbon emisyonlarını azaltmak için potansiyel fırsatlar sunmaktadır. Geri dönüşümün teşvik edilmesi, yanlış yönetilen plastiklerin miktarını ve çevresel ayak izini potansiyel olarak azaltmak için ek seçenekler sunar. Ancak bu faydalar, ileri düzey atık yönetimi altyapısının kurulmasına, yenilikçi geri dönüşüm çözümlerine yapılan yatırımlara ve bu girişimleri harekete geçirmek için uygun politikalar ve teşviklerin uygulanmasına bağlıdır.

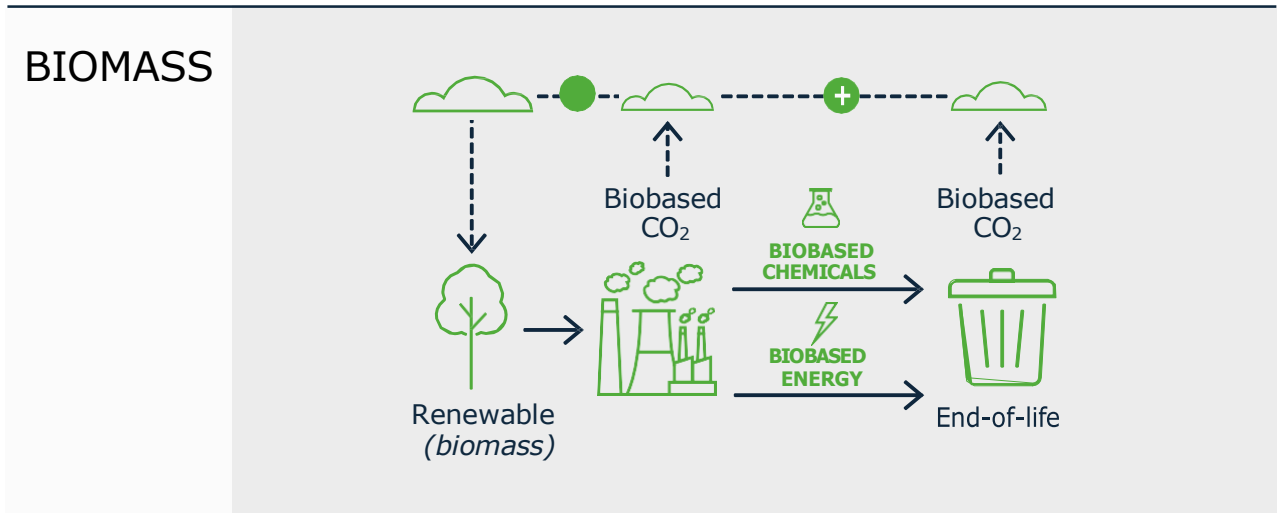
²⁸ OECD, 2022, Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060, <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.

SÜRDÜRÜLEBİLİR KAYNAKLI BİYOKÜTLE

Bölüm 7'deki sonuçlarımız, biyokütlenin dört belirlenen yol boyunca karbon hammadde olarak kritik rolünü vurgulamaktadır (Şekil 10'a bakınız) ve iklim nötrlüğüne geçişi yönlendirmedeki önemli rolünü ortaya koymaktadır. Şekil 14, biyokütleden döngüsel karbon prensibini göstermektedir. Biyokütle, büyüme aşamasında atmosferdeki CO₂'yi yakalar. Bu biyokütle, kimya endüstrisinde, biyokütle fermente edilerek etilen gibi temel kimyasalların üretimi için, ardından katalitik dehidrasyonla, biyokütle gazifikasyonu ve ardından metanol senteziyle metanol üretimi için hammadde olarak kullanılabilir.

Hammadde olarak rolünün yanı sıra, biyokütle aynı zamanda kimya endüstrisinde bir enerji kaynağı olarak da hizmet eder; yüksek sıcaklıkta ısı, düşük emisyonlu elektrik ve buhar sağlar. Biyokütle, değer zincirinde hareket ederken ve yaşam sonuna ulaştığında, biyolojik temelli ürünlerde depolanan karbon, CO₂ veya diğer sera gazları olarak atmosfere geri salınır ve böylece biyojenik karbon döngüsünü tamamlar.

Bu döngü, atmosferden yakalanan biyojenik karbonu sonunda geri salınarak döngüsel bir sistemi koruyan bir denge oluşturur. Kimyasal dönüşüm süreçlerinde veya yaşam sonu aşamasında karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojilerinin daha fazla entegrasyonu, bir karbon yutağı oluşturulmasına olanak tanır. Bu, yakalanan karbonun atmosfere geri salınmak yerine depolanması sayesinde değer zinciri boyunca net negatif emisyonlara yol açabilir.



Şekil 14: Biyokütlenin kimya endüstrisinde sürdürülebilir bir hammadde olarak yaşam döngüsü.

Fotosentez yoluyla CO₂ yakalamadan biyolojik temelli kimyasallar ve enerji üretimine, ve nihayetinde yaşam sonuna kadar olan süreçleri kapsar. Bu döngü, minimal net emisyonları vurgular ve biyokütlenin döngüsel ekonomi uygulamalarını geliştirmedeki rolünü ön plana çıkarır.

Bununla birlikte, biyokütlenin sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kullanıma potansiyeline rağmen, kimya endüstrisinde biyokütle kullanımında bazı zorluklar bulunmaktadır. Biyokütle yetiştiriciliği, gıda güvenliği ve ormansızlaşma gibi risklerden kaçınmak için arazi kullanımında hassas bir denge gerektirir.

Enerji Geçişleri Komisyonu raporu²⁹, sürdürülebilir biyokütlenin çevresel bozulmayı önlemek için katı kriterlere uyması gerektiğini vurgular ve alternatiflerin bulunmadığı durumlarda dikkatli bir şekilde kullanılmasını savunur. Sürdürülebilir kullanım için bu çerçevede, kimyasal üretim için biyokütle arzı ile bu arzın sürdürülebilirlik gereksinimlerini karşılama arasındaki gerilimi ortaya koyar. Stratejinin önemli bir parçası, biyokütle kullanımını malzeme veya karbon hammadde olarak önceliklendirmektir; örneğin, kimya endüstrisinde. Biyokütleyi bir enerji kaynağı yerine hammadde veya malzeme olarak kullanmak genellikle daha avantajlı olarak kabul edilir, çünkü bu yaklaşım karbon içeriğini ürünlerde tutar ve karbon depolama süresini uzatır.

İklim nötrlüğüne ulaşmak için biyokütle kullanımındaki zorlukları ele alırken, kimya endüstrisinin sürdürülebilir şekilde temin edilen ve ekonomik olarak erişilebilir biyokütleyle güvenli erişim sağlaması kritik öneme sahiptir.

Genel olarak, biyokütle kullanımı, kimya endüstrisinin değer zincirindeki sera gazı emisyonlarını azaltmak için umut verici bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Biyokütlenin stratejik kullanımı, güçlü altyapılar, yenilikçi teknolojiler ve sürdürülebilir uygulamalarla desteklendiğinde, endüstrinin iklim nötrlüğüne doğru ilerlemesinde önemli bir faktör olacaktır. Ancak, kaynakların dikkatli bir şekilde yönetilmesi ve ekonomik ve çevresel hedeflerle uyum sağlanması gereklidir.

DÜŞÜK EMİSYONLU HİDROJEN

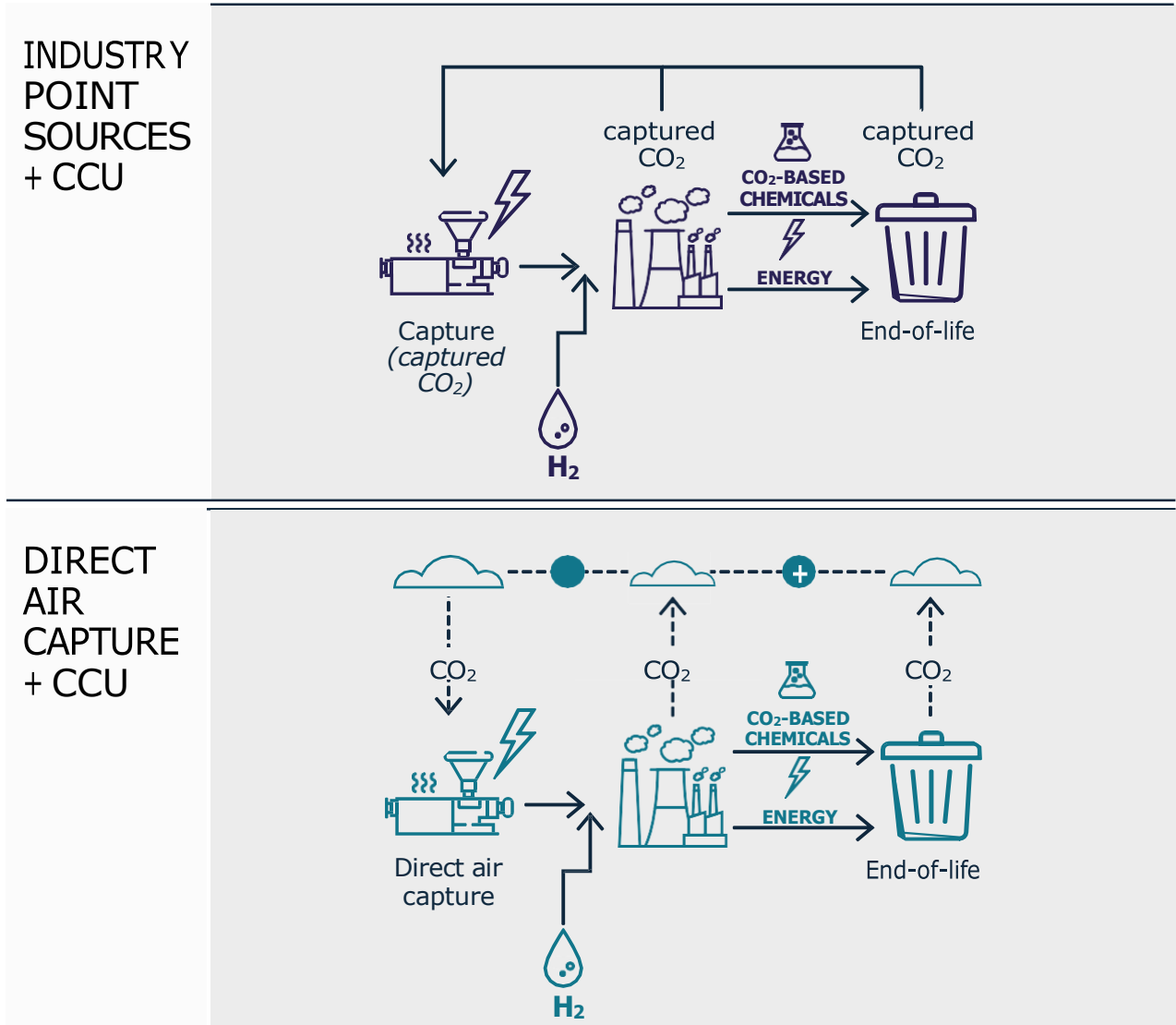
Biyokütle ve geri dönüşümün yanı sıra, bu çalışmanın sonuçları, düşük emisyonlu hidrojenin gelecekteki iklim nötr kimya endüstrisinde kritik bir rol oynayacağını ve çeşitli hammadde karışımının önemini vurgulamaktadır. Düşük emisyonlu hidrojen, amonyak ve metanol üretimiyle ilişkili sera gazı emisyonlarını azaltmak için değerli bir hammadde olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, düşük emisyonlu hidrojen, yakalanan CO₂'yi değerli kimyasal hammaddeye dönüştürmek için kullanılabilir ve böylece Karbon Yakalama ve Kullanımı (CCU) süreçleri aracılığıyla karbon döngüsünü kapatır. Şekil 15, CCU'nun temel ilkesini göstermektedir; bu süreç, endüstriyel nokta kaynaklarından veya doğrudan hava yakalama (DAC) yoluyla atmosferik CO₂'yi kullanabilir. CCU yoluyla üretilen hammaddeler arasında metan ve metanol bulunur, bunlar da diğer birçok kimyasal ürünün üretiminde kullanılır.

Önemli bir nokta, daha önce yakalanan ve hammadde olarak kullanılan CO₂'nin işleme sırasında veya yaşam sonu aşamasında atmosfere geri salınacağıdır. Eğer doğrudan havadan yakalama (DAC) ile yakalanan karbon, atmosfere geri salınırsa, bir karbon döngüsü oluşur. Karbon yakalama ve depolama süreçleri kimyasal dönüşüm veya yaşam sonu aşamasına daha fazla uygulanırsa, bir karbon yutağı oluşturulabilir ve bu da değer zinciri boyunca net negatif emisyonlara yol açar, çünkü karbon atmosferden dışarıda tutulur.

²⁹ Energy Transition Commission (2021), "Bioresources Within A Net-Zero Emissions Economy"; <https://www.energy-transitions.org/publications/bioresources-within-a-net-zero-economy/>

Düşük emisyonlu hidrojenin kimya endüstrisindeki faydalarını etkili bir şekilde kullanabilmek için, kimya endüstrisinin buna güvenilir ve uygun maliyetle erişimi olması gerekmektedir. Özellikle, hidrojen üretimi, depolama ve taşınması için sağlam ve düşük maliyetli altyapıların geliştirilmesi çok önemlidir. Bu altyapılar, hidrojenin benzersiz özelliklerini dikkate alacak şekilde tasarlanmalı ve hidrojenin kullanıcıya güvenli ve verimli bir şekilde teslim edilmesini sağlamalıdır; bunun yanı sıra hidrojenin kaçarak yayılmasını en aza indirmeye yönelik önlemler de alınmalıdır.

Son olarak, destekleyici düzenleyici çerçeveler ve finansal teşvikler, düşük emisyonlu hidrojen kullanımına geçişi teşvik etmek için kritik öneme sahiptir. Bu teşvikler, ekonomik engellerin aşılmasına yardımcı olacak ve hidrojen altyapısı ve teknolojilerine yatırım yapılmasını teşvik edecektir. Birlikte, bu önlemler, kimya endüstrisinin hidrojenin iklim nötrlüğü için önemli bir etkinleştirici olarak tam potansiyelinden yararlanmasını sağlayacaktır.

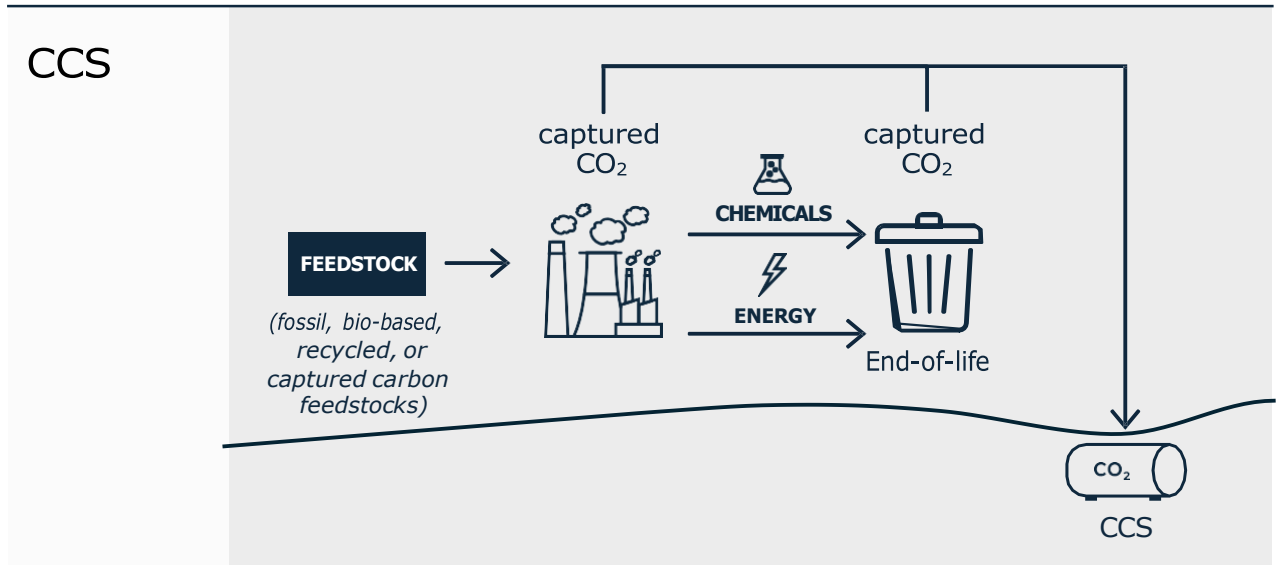


Şekil 15: CCU (üstte) ve doğrudan havadan yakalama (altta) ile düşük emisyonlu hidrojenin birleşimi, değer zinciri boyunca sera gazı emisyonlarını en aza indirerek değerli temel kimyasallar sağlar. Kimya endüstrisindeki endüstriyel nokta kaynakları, egzoz akımlarında yüksek CO₂ konsantrasyonlarına sahip süreçleri içerir; bunlara örnek olarak buhar metan reformasyonu, etilen oksit üretimi ve atık yakma işlemleri verilebilir.

FOSİL HAMMADDE VE YETERLİ DERECEDE DÜZENLENMİŞ KARBON DEPOLAMA

Dört yolun tamamı, Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) ile birleşik fosil hammadde kullanmaktadır (bkz. Şekil 10). İklim nötr bir kimya endüstrisinde fosil yakıtların kullanımının devam edeceği tahminleri, kapsamlı karbon yönetimi stratejilerinin önemini vurgulamaktadır ve CCS'nin çevresel ayak izini azaltmada bütüncü bir bileşen olarak rolünü öne çıkarmaktadır.

Şekil 16, CO₂ yakalama ve depolama ilkesini göstermektedir. CCS teknolojisi, kimyasal değer zincirindeki kaynaklarda karbon dioksit (CO₂) emisyonlarını yakalayarak, CO₂'nin atmosfere salınmasını engeller. CCS süreci üç ana adıma ayrılabilir: yakalama, taşıma ve depolama. Yakalama aşaması, sanayi tesislerinde üretilen diğer gazlardan CO₂'nin ayrılmasını içerir, örneğin etilen oksit üretimi, biyokütle gazifikasyonu ve fermantasyon veya kimyasalların ve plastiklerin kullanım ömrü sonunda. CO₂ yakalandıktan sonra, genellikle boru hatlarıyla, jeolojik depolama için uygun bir alana sıkıştırılır ve taşınır. Bu depolama, CO₂'yi güvenli bir şekilde tutabilen yer altındaki kaya formasyonlarında gerçekleşir ve böylece atmosferden etkili bir şekilde izole edilir.



Şekil 16: Kimya sanayisinde Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) süreci, fosil, biyobazlı, geri dönüştürülmüş veya yakalanmış karbon gibi çeşitli hammadde kaynaklarından CO₂ emisyonlarının nasıl yakalandığını gösterir. Diyagram, değer zincirinde salınan CO₂'nin nasıl yakalanabileceğini göstermektedir.

Ancak, potansiyel faydalarına rağmen, kimya sanayisinde CCS'nin benimsenmesi birkaç zorlukla karşı karşıyadır. Önemli bir zorluk, CCS projelerinin planlanması, inşa edilmesi ve devreye alınması için gereken uzun sürelerdir. Ayrıca, özel CO₂ taşıma ve depolama altyapısının geliştirilmesi, önemli bir başlangıç yatırımı ve düzenleyici destek gerektirmektedir³⁰.

CCS kullanımından etkili bir şekilde faydalanabilmek için, kimya sanayisinin güvenilir ve ekonomik CCS erişimine ihtiyacı vardır. Büyük ölçekli CCS genişlemesiyle ilgili zorlukların üstesinden gelmek, proje geliştirmeyi kolaylaştıracak düzenleyici süreçlerin hızlandırılmasını, taşıma ve depolama ihtiyaçlarını desteklemek için CO2 altyapısına yapılan yatırımları ve güven inşa eden paydaş katılımını gerektirecektir. Ayrıca, yakalama, taşıma ve depolama tekniklerindeki teknolojik ilerlemeler, CCS çözümlerinin verimliliğini ve maliyet etkinliğini artırmak için hayati öneme sahiptir.

UYGUN FİYATLI DÜŞÜK EMİSYONLU ENERJİ

Analizimiz, iklim nötr bir kimya endüstrisine ulaşmak için geniş bir proses enerjisi yelpazesi gerektiğini göstermektedir (bkz. Bölüm 7). Bu çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılamak için fosil yakıtlar ve CCS, biyokütle, düşük emisyonlu hidrojen, nükleer enerji, CCS ile atık ve düşük emisyonlu elektrik gibi çeşitli kaynaklar kullanılabilir.

Özellikle yüksek sıcaklıkta işleyen proseslerde, örneğin mevcut buhar krakerleri ve reformerlerde, 500°C'nin üzerindeki sıcaklıkları sağlamak için genellikle yanma işlemi gereklidir. Fosil yakıtlar, Karbon Yakalama, Kullanım ve Depolama (CCUS) teknolojileri ile kombinlendiğinde bu prosesler için geçerli bir enerji kaynağıdır. Alternatif olarak, biyokütle, düşük emisyonlu hidrojen ve CO2 ile düşük emisyonlu hidrojen veya biyokütleden türetilen sentetik yakıtlar da geçerli seçenekler sunmaktadır.

Enerji portföyü, düşük emisyonlu elektrik gibi nükleer enerji kaynakları ve CCS ile plastik atıkların enerji geri kazanımı gibi kaynaklarla daha da çeşitlendirilebilir. Bu kaynaklar, düşük ve orta ısıyla buhar sağlamak için uygundur. Ayrıca, düşük sıcaklık ve orta sıcaklıkta buhar; ısı pompaları, elektrikli kazanlar veya elektrikli dirençli ısıtıcılar kullanılarak doğrudan elektrifikasyon yoluyla üretilebilir. Burada önemli olan nokta, doğrudan elektrifikasyonla elde edilen proses enerjisinin etkinliğinin, kullanılan elektriğin emisyon faktörlerine bağlı olmasıdır. Dolayısıyla, doğrudan elektrifikasyon yalnızca düşük emisyonlu elektrik mevcutsa sera gazı emisyonlarını azaltabilir. Küresel enerji endüstrisi daha fazla yenilenebilir enerji entegre ettikçe, elektrik kesintisizlik yönetimi, güvenilir elektriğe ve dolayısıyla proses enerjisine sürekli erişim sağlamak açısından kritik hale gelir.

Genel olarak, enerji kaynakları ve teknolojilerinin seçimi, büyük ölçüde bölgesel erişilebilirlik, mevcut altyapı ve politik teşviklere bağlı olacaktır. Bu bağımlılık, yerel koşulları ve küresel çevresel hedefleri göz önünde bulunduran, kimya endüstrisinin iklim nötrlüğü hedeflerine verimli ve etkili bir şekilde ulaşmasını sağlayacak koordineli bir yaklaşımın gerekliliğini vurgulamaktadır.

³⁰ Energy Transition Commission (2022), "Carbon Capture, Utilisation and Storage in the Energy Transition: Vital but Limited"; <https://www.energy-transitions.org/publications/carbon-capture-use-storage-vital-but-limited/>

9 ÖZET VE SONUÇLAR

Kimya endüstrisi, günlük yaşamımızın bir parçası olan ürünler üreten ve diğer sektörlerde sera gazı (GHG) emisyonlarını azaltmaya yardımcı olan büyük bir üretim sektörüdür. İklim nötrlüğü sağlamak için kimya endüstrisi, enerji tüketimi ve karbon hammaddelerinden (karbon, çoğu kimyasal ürünün önemli bir bileşenidir) kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltma konusunda çift bir zorlukla karşı karşıyadır; bunların her ikisi de bugün büyük ölçüde fosil temellidir. Bu zorluğun üstesinden gelmek, yenilikçi çözümler ve kimyasal değer zincirleri ile politika yapıcılar arasında yoğun bir çaba gerektirir.

Bu raporda, kimyasal üretimde kullanılan çok çeşitli hammaddeleri inceledik ve küresel kimya endüstrisinin yüzyıl ortasına kadar iklim nötrlüğüne ulaşması için niceliksel yolları, çeşitli hakemli yayınlarda uygulanmış bilimsel bir modelleme yaklaşımıyla inceledik. İklim nötrlüğüne ekonomik bir geçiş sağlamak amacıyla teknoloji-tarafsız ve maliyet minimizasyonu odaklı bir yaklaşım benimsedik. Bu yaklaşım, belirli teknolojik seçenekleri kısıtlamanın, iklim nötr kimyasal ürünleri daha pahalı hale getirebileceği ve iklim nötrlüğüne geçişi geciktirebileceği düşünülerek tercih edilmiştir.

Bu çalışmanın ilk önemli bulgusu, küresel kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne ulaşması için birden fazla yol olduğudur. Kaynak mevcudiyeti ve teknolojik ilerlemeler gibi çeşitli faktörleri dikkate alarak dört yol belirledik. Bu sonuçlar, tek bir çözümün yeterli olmadığına dikkat çekmekte ve bölgesel bağlamlara ve kaynak mevcudiyetine uygun stratejilerin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Bu çalışmanın ikinci önemli bulgusu, kimya endüstrisinin iklim nötrlüğüne geçişini kolaylaştıran dışsal etmenlerin kritik rolünü vurgulamaktadır. Plastik atıklara, sürdürülebilir şekilde temin edilen biyokütle, düşük emisyonlu hidrojene, yeterince düzenlenmiş karbon depolamaya ve uygun fiyatlı ve güvenilir düşük emisyonlu enerjiye erişim, kimya endüstrisinin değer zincirlerinde sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilecek çözümlerin uygulanmasına olanak sağlayacak anahtar etmenler olarak ortaya çıkmaktadır. Kimya endüstrisi, Karbon Yakalama ve Kullanım (CCU) yoluyla kendi değer zincirlerinin dışındaki diğer sektörlerden gelen emisyonları da azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak, bu etmenlerin tam potansiyelini açığa çıkarmak, kapsamlı politika çerçeveleri, sağlam altyapı yatırımları ve sektörler arası paydaş iş birliği gerektirmektedir.

Bu çalışma; teknolojik yenilik, politika desteği ve endüstri iş birliğini kullanarak çok yönlü bir yaklaşım benimsemenin gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu bulguları dikkate alarak ve tespit edilen kolaylaştırıcıların desteğiyle, küresel kimya endüstrisi, iklim nötrlüğüne giden yoldaki engelleri aşabilir ve küresel ölçekte iklim değişikliğiyle mücadelede katkıda bulunabilir.