

Biyokömür Teknolojisi: Küresel Potansiyel, Uygulamalar ve Stratejik Analiz Raporu

Özet (Executive Summary)



Natural World Teknoloji LTD tarafından hazırlatılan bu rapor, biyokömür teknolojisini, modern dünyanın atık yönetimi, yenilenebilir enerji üretimi ve iklim değişikliğiyle mücadele gibi en kritik sorunlarına çoklu fayda sunan, kadim kökenlere sahip dönüştürücü bir çözüm olarak incelemektedir. Biyokütlenin oksijensiz bir ortamda termokimyasal dönüşümü olan piroliz işlemiyle elde edilen biyokömür, tarımsal ve çevresel uygulamalarda yüksek katma değerli bir ürün haline gelmiştir. Bu teknoloji, sadece atıkların bertaraf edilmesine yönelik bir çözüm sunmakla kalmayıp, aynı zamanda değerli katı (biyokömür), sıvı (piroliz yağı) ve gaz (sentez gazı) ürünlerin üretilmesini sağlar.

Bu çalışma, biyokömürün tarihsel kökeni olan Amazon'un Terra Preta topraklarından ¹ modern reaktör tasarımlarına ³, küresel hammadde potansiyeline ⁵ ve ABD, Çin, Almanya gibi ülkelerin stratejik uygulamalarına ⁶ kadar konunun tüm yönlerini kapsamaktadır. Analizler, teknolojinin ekonomik ölçeklenebilirliğinin yalnızca biyokömürün tarımsal değerine değil, aynı zamanda sentez gazı ve piroliz yağı gibi eş ürünlerden elde edilen gelirlere ⁹ ve karbon kredisi piyasaları ⁹ gibi destekleyici politika mekanizmalarına güçlü bir şekilde bağlı olduğunu göstermektedir. Bu bütüncül yaklaşım, teknolojinin tam potansiyelini ortaya çıkarmak için atılması gereken adımların önemini vurgulamaktadır. Sonuç olarak, rapor, biyokömürün küresel bir çözüm olarak yaygınlaşması için Ar-Ge yatırımlarının artırılması, ürün standardizasyonu ve döngüsel ekonomiyi teşvik eden entegre politikaların benimsenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

1. Temel Kavramlar ve Tarihsel Perspektif

1.1. Biyokömür: Bilimsel ve Uygulamalı Tanımlar



Biyokömür, bilimsel olarak, biyokütlenin oksijenin sınırlı olduğu bir ortamda piroliz adı verilen termokimyasal dönüşümü sonucunda elde edilen, karbon (C) bakımından zengin, gözenekli ve katı bir materyal olarak tanımlanmaktadır.¹³ Bu materyalin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri, üretimde kullanılan biyokütle kaynağına, işlem sıcaklığına ve piroliz süresine bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilir.¹⁵ Örneğin, piroliz sıcaklığının artırılması, biyokömürün karbonizasyon derecesini artırarak hidrojen-karbon molar oranını düşürür ve kimyasal kararlılığını yükseltir.¹⁶ Biyokömürün bu benzersiz yapısı, ona yüksek bir özgül yüzey alanı ve adsorpsiyon kapasitesi kazandırır.¹⁷ Uygulamalı açıdan bakıldığında ise biyokömür, en yaygın olarak tarım sektöründe toprak verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan bir toprak düzenleyici olarak değerlendirilir.¹³ Toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirme yeteneği, tarımsal üretimi destekleyen temel bir fayda sunar.¹⁴ Bunun yanı sıra, biyokömür, yüzlerce hatta binlerce yıl boyunca bozulmadan kalabilen yapısı sayesinde atmosferik karbonu uzun vadeli olarak depolayan bir karbon yutağı olarak kritik bir rol oynar.¹¹ Bu özelliği, onu iklim değişikliğiyle mücadelede yenilikçi bir araç haline getirmiştir. Teknolojinin diğer kullanım alanları arasında su ve hava arıtma sistemlerinde toksik elementlerin ve sera gazlarının adsorpsiyonu¹⁹ ve inşaat sektöründe karbon nötr yapı malzemeleri, özellikle de beton ve yalıtım ürünleri için bir katkı maddesi olarak kullanımı bulunmaktadır.¹⁷ Ayrıca, biyokömür karbonu, süperkapasitörler ve piller gibi elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinde de kullanılmaktadır.²¹

1.2. Biyokömür Reaktörü: Tanım ve Çeşitleri

Biyokömür reaktörü, piroliz reaksiyonunun gerçekleştiği, farklı türdeki biyokütle hammaddelerini işlemek üzere tasarlanmış, kapalı ve oksijensiz bir ortam sağlayan temel ekipmandır.¹⁷ Reaktörün tasarımı, üretim hattının enerji verimliliğini ve operasyonel kararlılığını doğrudan etkilediği için hayati önem taşır.²⁵ Bu reaktörler, işlem modlarına, ısı transfer hızlarına ve yapısal özelliklerine göre çeşitli tiplere ayrılır.

Isı transfer hızına göre reaktörler, yavaş ve hızlı piroliz modlarında çalışabilirler. Yavaş piroliz, 5-7 °C/dk gibi düşük ısıtma hızlarında gerçekleşir ve birincil ürün olarak daha fazla biyokömür üretirken, hızlı piroliz 300 °C/dk'nın üzerindeki hızları içerir ve esas olarak biyo-yağ üretimine odaklanır.¹⁵ Çalışma moduna göre ise reaktörler kesikli, yarı kesikli ve sürekli olarak

sınıflandırılır. Kesikli reaktörler biyokömür odaklı üretim için kullanılırken, sürekli reaktörler daha verimli olup yüksek üretim kapasiteleri sunar ancak daha fazla teknik uzmanlık ve sermaye yatırımı gerektirir.¹⁵ Yapısal tasarıma göre ise sabit yataklı, akışkan yataklı, döner fırın, helezon (auger) ve çukur fırınları gibi çeşitli popüler reaktör tipleri mevcuttur.³ Bu reaktörlerin kısmi yanma veya harici ısıtma gibi farklı ısıtma yöntemleri kullanabilmesi, teknolojinin esnekliğini artırmaktadır.¹⁵

1.3. Tarihsel Köken: Terra Preta ve Kadim Medeniyetler



Biyokömür teknolojisinin kökenleri, Amazon Havzası'ndaki yerli medeniyetlerin binlerce yıl önce oluşturduğu, "Hint kara toprağı" olarak da bilinen Terra Preta do Indio olarak anılan topraklara dayanmaktadır.¹ Bu antropolojik (insan yapımı) topraklar, çevresindeki doğal, ince ve besin açısından fakir tropik topraklardan çok daha verimlidir.

Terra Preta'nın ayırt edici koyu rengi, içinde bulunan biyokömür, seramik parçacıkları ve organik atıkların sonucudur.¹ Amazon medeniyetlerinin, bitkisel artıkları yakarak veya toprağı bilinçli olarak biyokömür ekleyerek mahsul verimini artırma becerisinin tesadüfi mi yoksa kasıtlı mı olduğu tartışılabilir, bu toprakların bugün bile yerel pazarlarda sakı toprağı olarak satılacak kadar verimli kalması, biyokömürün topraktaki kalıcılığına dair güçlü bir ampirik kanıt sunmaktadır.¹

Terra Preta fenomeni, biyokömürün topraktaki kalıcılığının (yüzlerce hatta binlerce yıl) ¹⁵, onu kompost gibi diğer organik maddelerden ayıran en önemli özellik olduğunu göstermektedir. Bu uzun süreli kalıcılık, biyokömürün karbonu atmosferden çekerek toprağı hapsedme ve böylece küresel iklim değişikliğiyle mücadelede kalıcı bir çözüm sunma potansiyelini doğrulamaktadır.¹¹ Bu nedenle IPCC gibi uluslararası kuruluşlar, biyokömürü iklim hedeflerine ulaşmak için vazgeçilmez bir negatif emisyon teknolojisi olarak görmektedir.²²

Terra Preta, teknolojik bir yenilik gibi görünen bu çözümün, aslında insanlık tarihi boyunca toprak verimliliğini ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemek için kullanılmış kadim bir bilgiye dayandığını ortaya koymaktadır.

2. Çalışma Prensipleri ve Ürün Analizi

2.1. Piroliz Süreci ve Reaktör Çalışma Prensipleri

Biyokömür üretimi, biyokütlenin yüksek sıcaklık ve oksijensiz ortamda kontrollü bir şekilde ayrıştırıldığı piroliz reaksiyonu temelinde gerçekleşir. Süreç, hammaddenin ön işlemden

geçirilmesiyle başlar. Biyokütlenin nem içeriği %15'in altına düşürülür ve parçacık boyutu 5-20 mm aralığına getirilir.¹⁸ Bu ön işlem, reaktörün enerji verimliliğini ve işlem kalitesini artırmak için zorunludur. Özellikle hayvan gübresi gibi nemli biyoküteller, pirolizden önce kurutulmalıdır.³⁰ Ön işlemde geçen malzeme, bir konveyör aracılığıyla biyokömür reaktörüne beslenir ve doğal gaz veya dizel gibi harici bir yakıtla ön ısıtılarak reaksiyon sıcaklığına ulaşması sağlanır.¹⁷

Sıcaklık 380-450°C aralığına geldiğinde, biyokütlenin yapısındaki organik maddeler termo-kimyasal reaksiyonlara girerek dehidrasyon, demetilasyon ve organik buharlaşmaya uğrar.¹⁷ Oksijensiz ortam, karbonun CO₂'ye dönüşmesini engelleyerek büyük bir kısmının katı formda, yani biyokömür olarak kalmasını sağlar.¹⁸ Yüksek piroliz sıcaklıkları ve daha uzun reaksiyon süreleri, biyokömürün karbonizasyon derecesini artırır ve hidrojen-karbon molar oranını düşürerek ürünün kararlılığını yükseltir.¹⁶ Reaksiyonun tamamlanmasının ardından, sıcak biyokömür, su soğutmalı konveyörler aracılığıyla boşaltılarak sıcaklığı 45°C'nin altına düşürülür ve depolama için hazır hale getirilir.¹⁷

2.2. Üretilen Ana Ürünler ve Derinlemesine Analizi



Piroliz reaksiyonu, biyokütleyi üç ana değerli ürüne dönüştürür: katı biyokömür, sıvı piroliz yağı ve gaz sentez gazı.¹⁸ Bu eş ürünlerin ticari olarak değerlendirilmesi, biyokömür üretiminin ekonomik verimliliğini artırmaktadır.

2.2.1. Biyokömür

Biyokömür, piroliz işleminden sonra kalan karbonca zengin (%70-90) katı kalıntıdır.²⁰ Yüksek gözenekliliğe sahip yapısı, ona geniş bir yüzey alanı kazandırır ve bu sayede su ve besin maddelerini depolama yeteneği artar.¹⁷ Tarım alanında, toprağın su tutma kapasitesini artırması, mineral gübrelerin yıkanmasını azaltması ve özellikle asidik toprakların pH'ını düzenlemesi ¹⁵ gibi çok sayıda faydası bulunur. Bu özellikleri, biyokömürün toprağın biyolojik aktivitesini artırmasına ve ürün verimliliğini yükseltmesine katkı sağlar.¹⁴ Ayrıca, biyokömür, zararlı ağır metalleri ve toksik molekülleri adsorbe ederek toprak kirliliğini azaltmakta ¹⁹, su arıtma süreçlerinde etkili bir filtreleme malzemesi olarak kullanılmakta ³¹ ve binalarda karbon nötr yalıtım malzemesi veya beton katkısı olarak değerlendirilmektedir.¹⁷

2.2.2. Sentez Gazı (Syngas)

Sentez gazı, başlıca hidrojen (H₂), karbon monoksit (CO) ve karbondioksit (CO₂) içeren yanıcı bir gaz karışımıdır.³² Piroliz reaksiyonu sırasında oluşan bu gazlar, tesisin kendi enerji ihtiyacını karşılayan bir sistem olarak geri dönüştürülebilir ve böylece dış enerji bağımlılığı ortadan kalkar.¹⁸ Sentez gazı, gaz motorlarında elektrik ve ısı üretimi için (CHP tesisleri) yakıt olarak kullanılabileceği gibi ³⁴, kimya endüstrisinde metanol ve amonyak gibi temel hammaddelerin

sentezinde de kullanılabilmektedir.³²

2.2.3. Piroliz Yağı (Pyrolysis Oil)

Hızlı piroliz reaksiyonundan yüksek verimle elde edilen piroliz yağı, piroliz gazlarının yoğuşması sonucu oluşan koyu renkli, kıvamlı bir sıvıdır.¹⁵ Piroliz yağı, petrol naftası gibi kimyasal bir hammadde kaynağı olarak işlenebilir.²¹ Ayrıca, içten yanmalı motorlar için dizel yakıtına alternatif bir biyoyakıt olarak test edilmektedir.³⁵ Yapılan deneysel çalışmalar, piroliz yağının dizel yakıtı ile belirli oranlarda karıştırılarak kullanılabileceğini göstermekle birlikte, emisyon ve motor performansına olan etkileri üzerine araştırmalar devam etmektedir.³⁵

Ürün Adı	Temel Özellikleri	Başlıca Kullanım Alanları
Biyokömür	Yüksek karbon içeriği (%70-90), gözenekli yapı, yüksek su ve besin tutma kapasitesi, yüzlerce yıl süren kalıcılık. ¹⁸	Toprak düzenleyici (tarım), karbon yutağı (iklim), yapı malzemesi katkısı, su/hava arıtma, enerji depolama. ¹⁷
Sentez Gazı	Hidrojen, karbon monoksit ve metan içeren yanıcı gaz karışımı. ³³	Elektrik ve ısı üretimi, piroliz tesisinin kendi kendine enerji ihtiyacını karşılama, kimya endüstrisinde hammadde. ¹⁸
Piroliz Yağı	Piroliz gazlarının yoğuşmasıyla elde edilen koyu renkli sıvı. ²¹	Kimyasal hammadde, içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt. ²¹

3. Küresel Hammadde Potansiyeli ve Sıralaması

3.1. Küresel Biyokütle Atık Kaynaklarının Analizi



Dünya Bankası verilerine göre, küresel atık miktarı sürekli artış göstermekte olup, 2050 yılına kadar yıllık 3,40 milyar tona ulaşması beklenmektedir.³⁸ Bu atıkların piroliz teknolojisiyle değerlendirilmesi, atık yönetiminde hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli bir çözüm sunmaktadır. Organik atıkların piroliz yoluyla değerli ürünlere dönüştürülmesi, depolama ve bertaraf maliyetlerini azaltmanın yanı sıra, yeni bir gelir akışı yaratmaktadır.⁵

Küresel biyokütle potansiyeli, tarımsal ve ormancılık atıklarının biyokömür üretimi için en bol ve sürdürülebilir kaynaklar olduğunu göstermektedir. Bu durum, özellikle bu atıkların yoğun olarak bulunduğu kırsal alanlarda, merkezi olmayan, yerinde üretim

modellerinin ekonomik olarak daha cazip hale gelmesini sağlamaktadır.³⁹

3.2. Hammadde Kategorilerinin Detaylı İncelemesi ve Sıralaması

Biyokömür üretimi için kullanılabilecek biyokütle ve biyolojik atık kaynakları, önem ve potansiyel açısından şu şekilde sıralanabilir:

1. **Tarımsal Atıklar:** Küresel olarak yıllık 2 milyar ton civarında üretilen tarımsal atıklar ⁵, biyokömür için en yoğun bulunan ve en bol kaynaklardan biridir. Mısır koçanı, buğday samanı, pirinç kabuğu, zeytin pirinası ¹⁷ ve fındık zurufu ⁴⁰, bu kategorinin başlıca örnekleridir.⁴¹ Bu atıklar, piroliz işlemi için uygun özellikler sunmakta ve geniş bir coğrafi yayılıma sahiptir.
2. **Orman ve Ormancılık Atıkları:** Yıllık 0.2 milyar tonluk bir hacme sahip olan ormancılık atıkları ⁵, ağaç dalları, talaş, kesim artıkları ve yapraklar gibi materyalleri içerir.⁴¹ Meşe ve akçaağaç gibi sert ağaçlar, yüksek lignin içerikleri sayesinde en kaliteli ve stabil biyokömürü verirken, çam gibi yumuşak ağaçlar ekonomik açıdan uygun bir alternatiftir.¹⁶
3. **Endüstriyel Atıklar:** Yıllık 9.1 milyar tonluk en büyük hacme sahip olan bu kategori ⁵, kağıt ve odun işleme atıkları, gıda işleme tesislerinden çıkan posalar ve diğer organik artıkları kapsar.⁵ Biyokömür üretimi, bu atıkların bertaraf edilmesine çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunar.
4. **Hayvansal Atıklar:** Sığır, koyun, tavuk gibi hayvanlardan elde edilen gübreler biyokömür kaynağı olarak kullanılabilir.⁴¹ Ancak, yüksek nem içeriği nedeniyle pirolizden önce ön kurutma işlemine tabi tutulmaları gerekmektedir.³⁰ Bu kaynaklardan üretilen biyokömürler, yüksek fosfor içeriğiyle gübre olarak değerini artırmaktadır.¹⁵
5. **Belediye Katı Atıkları:** Organik içerikli kentsel atıklar, biyokömür üretimi için uygun bir kaynaktır. Gıda atıkları, park ve bahçe atıkları, piroliz reaktörlerinde işlenebilir.²⁷ Piroliz, bu atıkların hacmini önemli ölçüde azaltarak depolama ve taşıma maliyetlerini düşürmektedir.²⁹

Hammadde Kategorisi	Küresel Hacim (Yıllık)	Piroliz Uygunluğu	Başlıca Örnekler	Kullanım Notu
Tarımsal Atıklar	~2 milyar ton ⁵	Yüksek	Mısır koçanı, buğday samanı, fındık zurufu ⁴⁰	Geniş coğrafi dağılım, düşük ön işlem maliyeti
Orman Atıkları	~0.2 milyar ton ⁵	Yüksek	Ağaç dalları, talaş, kesim artıkları ⁴²	Yüksek lignin içeriği, stabil biyokömür üretimi ⁴²
Endüstriyel Atıklar	~9.1 milyar ton ⁵	Yüksek	Kağıt, odun ve gıda işleme atıkları	Atık bertaraf sorununa çözüm

			²¹	sunar ²⁹
Hayvansal Atıklar	N/A	Orta	Hayvan gübresi ⁴¹	Ön kurutma gerektirir, yüksek fosfor içeriği ¹⁵
Belediye Atıkları	~1.7 milyar ton ⁵	Orta-Düşük	Organik mutfak ve bahçe atıkları ⁴¹	Pirolizle hacim ve kirlilik azaltılır ⁴⁴

4. Ülke Bazlı Uygulama ve Entegrasyon Analizi

Biyokömür teknolojisinin uluslararası alandaki uygulamaları, her ülkenin yerel kaynak potansiyeline, ekonomik yapısına ve çevresel politikalarına göre farklılık göstermektedir. Bu çeşitlilik, teknolojinin küresel potansiyeline rağmen yerel koşulların belirleyiciliğini açıkça ortaya koymaktadır.

4.1. ABD (United States)



ABD'de biyokömür, toprak sağlığı ve iklim dostu tarım araç kutusunun güçlü bir parçası olarak görülmektedir.⁴⁶ Ülkede tarımsal (badem ağacı budama artıkları, kabuklar) ve orman atıkları (orman kalıntıları) başlıca işlenen biyokütle kaynaklarıdır.⁴⁶ Minneapolis gibi şehirler, kamusal üretim modellerini benimseyerek odun atıklarını biyokömüre dönüştürmektedir.⁴⁸ Politikalar, teknolojinin tam potansiyeline ulaşabilmesi için kritik bilgi boşluklarını doldurmaya, özel yatırım engellerini azaltmaya ve sürdürülebilir

hammadde tedarik zincirleri oluşturmaya odaklanmıştır.⁶

Biochar Research Network Act gibi yasal düzenlemeler, farklı topraklarda ve bölgelerde biyokömürün potansiyelini test etmek için ulusal bir araştırma ağı kurmayı amaçlamaktadır.⁶ Bu entegre yaklaşım, hem çevresel faydalar sağlamakta hem de kırsal ekonomiler için yeni iş alanları yaratmaktadır.

4.2. Rusya (Россия)

Rusya, geniş ormanları ve tarımsal üretim alanları nedeniyle, mutlak anlamda en yüksek biyokömür potansiyeline sahip ülkelerden biri olarak öne çıkmaktadır.⁴⁹ Ancak, mevcut kaynaklarda Rusya'daki spesifik biyokömür reaktörü projelerine veya bu teknolojiyi destekleyen ulusal politikalara dair detaylı bilgilere rastlanmamıştır. Bu durum, teknolojinin potansiyelinin henüz tam olarak keşfedilmediği veya geniş ölçekte ticarileştirilmediği şeklinde yorumlanabilir.

4.3. Çin (中国)

Çin'in biyokömür stratejisi, ülkenin muazzam biyokütle atık potansiyeli ve iddialı karbon nötr hedefleriyle doğrudan bağlantılıdır.⁷ Tarımsal sap ve saman gibi atıklar ana hammadde kaynaklarıdır.⁷ Tsinghua Üniversitesi'nde yapılan bir çalışma, sürdürülebilir biyokömür üretiminin yılda 921 milyon ton CO₂ eşdeğeri kadar karbondioksiti atmosferden uzaklaştırma potansiyeline sahip olduğunu belirtmektedir.⁴⁸ Hükümet, gönüllü karbon kredisi piyasası (CCER) gibi mekanizmalarla bu alandaki yatırımları teşvik etmektedir.¹² Biyokömür, maliyeti ton CO₂ başına 90 ABD doları civarında olan, BECCS veya DACCS gibi daha pahalı negatif emisyon teknolojilerine göre ekonomik bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.⁷ Ülkedeki pilot projeler ağırlıklı olarak biyokömürün toprağı iyileştirme ve mahsul verimini artırma gibi tarımsal faydalarına odaklanmaktadır.⁷

4.4. Ukrayna (Україна)



Ukrayna, biyokömür teknolojisini yerel atık sorunlarına pratik bir çözüm olarak ele almaktadır. Ülkede, bir İngiliz şirketi olan Tellus Conservation tarafından Rivne bölgesinde ormancılık ve ağaç işleme atıklarını (talaş, kesim artıkları) işlemek üzere bir pilot proje planlanmıştır.⁵¹ Projenin ana ekonomik motivasyonu, hammadde kaynağı (kuzeydeki ormanlar) ve nihai pazar (güneydeki tarım arazileri) arasındaki lojistik maliyetlerini en aza indirmektir. Tesisin yıllık 2.000 ton biyokütle işleme kapasitesine sahip olması ve üretim sürecinde oluşan termal enerjiyi de değerlendirmesi öngörülmektedir.⁵¹

4.5. Fransa

Fransa, biyokömür üretimini endüstriyel ölçekte biyo-rafinerilerle entegre eden ileri bir model benimsemiştir. SOLER Group gibi şirketler, orman yönetimi ve ağaç endüstrisi atıklarını kullanarak sadece biyo-karbon değil, aynı zamanda yerel topluluklar için yenilenebilir elektrik ve ısı (28.000 MWh/yıl) üretmektedir.⁵³ Biyokömür, ülkede hem tarım hem de inşaat sektörlerinde kalıcı bir karbon yutağı olarak kullanılmaktadır.²³ Bu entegre yaklaşım, kaynak verimliliğini maksimize etmekte ve döngüsel ekonomiye katkı sağlamaktadır.²³

4.6. Almanya (Deutschland)

Almanya'daki biyokömür piyasası, AB Gübre Ürünü Yönetmeliği'nin getirdiği katı düzenlemeler

ve EBC (Avrupa Biyokömür Sertifikası) gibi gönüllü sertifikasyon standartlarıyla şekillenmektedir.⁸ Ülkede biyo-organik atıklar, kompost ve gübre başlıca hammadde kaynakları olarak işlenmektedir.⁸ Bu sıkı kalite kontrol mekanizmaları, biyokömürün zararlı madde içermemesini garanti ederek hem konvansiyonel hem de organik tarımda güvenle kullanılmasını sağlamaktadır.⁸ Almanya'da çiftçiler, biyokömürü toprağa doğrudan karıştırarak veya gübreye katkı maddesi olarak kullanarak toprak verimliliğini artırmaktadır.⁸

4.7. Hollanda (Nederland)

Hollanda, biyokömürün potansiyelini biyo-tabanlı ekonomi ve karbon giderme politikaları bağlamında değerlendirmektedir.¹⁰ Hollanda'da biyokömür uygulamaları için iş modelinin ekonomik olarak cazip hale gelmesi, karbon kredisi piyasalarının gelişmesine ve piroliz yağı ile sentez gazı gibi eş ürünlerden elde edilen ek gelirlere bağlıdır.¹⁰ Bu durum, biyokömürün yaygınlaşması için finansal teşvik mekanizmalarının ve politika desteğinin kritik önemini göstermektedir.

4.8. Türkiye



Türkiye'de biyokömür teknolojisi, yerel yönetimlerin pilot projeleri ve akademik çalışmalarla gelişim göstermektedir. İzmir Büyükşehir Belediyesi'nin HORIZON 2020 hibe programı kapsamında hayata geçirdiği sürekli beslemeli üretim tesisi, park ve bahçe budama atıklarını işlemektedir.²⁷ Tesis, ayda 15 ton biyokömür üreterek, bir aracın 75.000 km'de saldıgı 15.000 kg CO₂'ye eşdeğer karbon salımını engellemeyi hedeflemektedir.²⁷ Elde edilen biyokömür, toprak şartlarının kötü olduğu

ağaçlandırma alanlarında ve parklarda toprak düzenleyici olarak kullanılmaktadır.²⁷ Ayrıca, Türkiye'de zeytin kabuğu gibi gıda işleme atıklarının biyokömüre dönüştürülmesine yönelik projeler de yürütölmektedir.¹⁷ Bu projeler, yerel atık sorunlarına çözüm üretirken aynı zamanda sıfır karbon politikalarına hizmet etme amacı taşımaktadır.²⁷

Ülke	İşlenen Ana Atıklar	Birincil Uygulama Alanları	Önemli Politika/Ekonomik Faktör
ABD	Tarımsal ve orman atıkları ⁴⁶	Tarım, iklim çözümü, enerji ⁴⁶	Federal fonlar, karbon kredisi piyasaları, Ar-Ge ⁶
Rusya	Orman ve tarım atıkları	N/A	Geniş potansiyel, düşük ticari

			benimseme ⁴⁹
Çin	Tarımsal atıklar (saman) ⁷	Tarım, iklim çözümü ⁷	Karbon nötr hedefleri, CCER piyasası ⁷
Ukrayna	Ormancılık ve ağaç atıkları ⁵¹	Tarım, ısı ve enerji üretimi ⁵²	Lojistik verimliliğe odaklanan pilot projeler ⁵¹
Fransa	Orman ve ağaç endüstrisi atıkları ²³	Tarım, inşaat, enerji ²³	Endüstriyel biyo-rafineriler, entegre üretim ⁵³
Almanya	Odun, biyo-organik atıklar ⁸	Tarım, hayvan yemi katkısı ⁸	Sıkı regülasyonlar ve EBC sertifikası ⁸
Hollanda	Biyokütle atıkları ¹⁰	Tarım, CDR politikaları ¹⁰	Karbon kredisi gelirlerine bağımlı iş modeli ¹⁰
Türkiye	Park, bahçe ve gıda atıkları ¹⁷	Tarım, yerel atık yönetimi ²⁷	Yerel yönetim pilot projeleri, AB hibe programları ²⁷

5. Sonuç ve Gelecek Projeksiyonları



Biyokömür teknolojisi, piroliz süreci aracılığıyla atık biyokütleyi çevresel, ekonomik ve sosyal faydalar sunan çok yönlü bir ürüne dönüştürme potansiyeline sahiptir. Piroliz, organik atıkları değerli kaynaklara dönüştürerek döngüsel ekonomiyi desteklemekte ³⁸, sentez gazı ve piroliz yağı ile yenilenebilir enerji üretimi sağlamakta ²⁹ ve toprağın kalitesini ve verimini artırarak gıda güvenliğine katkıda bulunmaktadır.¹⁴ En önemlisi, biyokömürün yüzlerce yıl boyunca karbonu kalıcı olarak hapsetme yeteneği, onu küresel iklim değişikliğiyle mücadelede nadir bulunan, etkili ve kanıtlanmış bir çözüm olarak konumlandırmaktadır.¹⁷

Piyasayı etkileyen temel zorluklar, sürdürülebilir hammadde tedarik zincirlerinin kurulması ⁶, ürün standardizasyonu ve kalite kontrol mekanizmalarının yetersizliği ⁵ ve yüksek başlangıç sermayesi gereksinimidir.⁵⁷ Bu zorluklara rağmen, büyüyen gönüllü karbon kredisi piyasaları ¹⁰ ve biyokömürün inşaat, su arıtma ve enerji depolama gibi yüksek değerli sektörlerle entegrasyonu ²¹ önemli fırsatlar yaratmaktadır.

Biyokömürün küresel bir çözüm olarak tam potansiyeline ulaşması için aşağıdaki adımların atılması gerektiği görülmektedir:

- **Ar-Ge ve Yatırım Teşviki:** Biyokömürün farklı toprak ve iklim koşullarındaki uzun vadeli etkilerini inceleyen araştırmalara fon sağlanması ve pilot projelerin finansal olarak

desteklenmesi gerekmektedir.⁶

- **Standartlaşma ve Sertifikasyon:** Ürünün tutarlılığını ve güvenliğini sağlamak amacıyla uluslararası standartların (EBC gibi) yaygınlaştırılması, biyokömürün küresel pazarda kabulünü artıracaktır.⁸
- **Entegre Politikalar:** Biyokömürün çoklu faydalarını (tarım, enerji, atık yönetimi, iklim) bütüncül bir yaklaşımla ele alan, karbon kredisi ve eş ürün gelirlerini teşvik eden entegre politikaların geliştirilmesi, iş modellerini ekonomik olarak sürdürülebilir hale getirecektir.¹⁰
- **Yerel Üretim Modellerinin Teşviki:** Kırsal alanlarda bolca bulunan atık kaynaklarını değerlendiren, küçük ölçekli ve merkezi olmayan üretim tesislerinin desteklenmesi, hem atık sorununa yerel çözümler sunacak hem de kırsal kalkınmaya katkı sağlayacaktır.³⁹

Alıntılanan çalışmalar

1. Terra Preta or Amazon Dark Soil, What it is and its composition - Biochar, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://biochar.co.uk/terra-pret/>
2. Terra preta – Wikipédia, a enciclopédia livre, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://pt.wikipedia.org/wiki/Terra_preta
3. TÜBA BİYOKÜTLE ENERJİSİ RAPORU, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TUBA-978-625-8352-01-6.pdf>
4. Reactors for biochar production: (a) fixed bed, (b) earthen kiln, (c)... - ResearchGate, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Reactors-for-biochar-production-a-fixed-bed-b-earthen-kiln-c-rotary-kiln-d_fig1_365853194
5. Biochar Market Size, Share & Analysis | Growth Report [2032] - Fortune Business Insights, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biochar-market-100750>
6. Biochar Policy Project – NCAT, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.ncat.org/biochar-policy-project/>
7. 生物炭：中国实现碳中和的可能路径 - Dialogue Earth, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://dialogue.earth/zh/3/60047172/>
8. Pflanzenkohle: Einsatzmöglichkeiten im Öko-Landbau, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.oekolandbau.de/bio-in-der-praxis/oekologische-landwirtschaft/oekologischer-pflanzenbau/duengung-und-naehrstoffmanagement/bodenverbessere/pflanzenkohle-einsatzmoeglichkeiten-im-oeko-landbau/>
9. Biochar Economics: A Cost-Effectiveness Analysis, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://biochar-us.org/presentation/biochar-economics-cost-effectiveness-analysis>
10. Applications and potential of biochar use in the Netherlands - CE ..., erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://cedelft.eu/publications/applications-and-potential-of-biochar-use-in-the-netherlands/>

11. Biochar - Wikipedia, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://en.wikipedia.org/wiki/Biochar>
12. 开启中国碳市场建设新征程, 激发全社会绿色低碳转型内生动力 - 生态环境部, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202508/t20250826_1126176.shtml
13. Biyokömür; Tanımı, Kullanımı ve Tarım Topraklarındaki Etkileri Elif GÜNAL*1 , Halil ERDEM1, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20203015178>
14. Biyokömür; Tanımı, Kullanımı ve Tarım Topraklarındaki Etkileri Elif GÜNAL*1 , Halil ERDEM1 - DergiPark, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/612541>
15. Biyokömür Teknolojisi - Appropedia, the sustainability wiki, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.appropedia.org/Biochar_Technology/tr
16. Biyokömürün Molar H/C Oranı Nedir? - Beston Group, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.bestongroup.com/tr/industry-news/what-is-molar-h-c-ratio-of-biochar/>
17. Biyokömür Üretim Ekipmanları - Karbon Nötrüne Yeşil Çözümler - Beston Group, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.bestongroup.com/tr/biochar-production-equipment/>
18. Biyokütle Piroлиз Tesisi - Kârlı ve Sürdürülebilir Kazan-Kazan Seçeneği - Beston Group, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.bestongroup.com/tr/biomass-pyrolysis-plant/>
19. Tarım ve Tarımda Biyokömür Kullanımı - Beston Group, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.bestongroup.com/tr/industry-news/biochar-use-in-agriculture-and-farming/>
20. Biyokömür - EnviCo, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://envico.com.tr/biyokomur/>
21. BİYOKÖMÜR: ÜRETİMİ ve KULLANIM ALANLARI 1Gökçen AKGÜL 1Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Ener - DergiPark, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/400128>
22. Énergie, stockage de carbone et restauration des sols : le biochar est-il un produit miracle ? | Cirad, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.cirad.fr/les-actualites-du-cirad/actualites/2024/le-biochar-est-il-un-produit-miracle>
23. Discover biochar, its properties and use - Carbon Centric, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://carbon-centric.fr/en/discover-biochar-use/>
24. BİYOKÜTLEDEN ÜRETİLEN KARBON ALTLIK ÜZERİNDE ZNO NANO-PARÇACIKLARIN BİRİKTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU DEPOSITION A - DergiPark, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1841594>
25. Biyokömür Reaktörü | Sürekli ve Akıllı Çalışma Modu - Beston Group, erişim tarihi Ağustos 27, 2025,

- <https://bestonmachinery.com/tr/biochar-production-equipment/reactor/>
26. Bio-char - First-Tree B.V., erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://firsttree.eu/en/cms/products/bio-char/>
 27. Haberler | Bitki atıkları ekonomiye kazandırılıyor, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.izmir.bel.tr/tr/Haberler/bitki-atiklari-ekonomiye-kazandiriliyor/46119/156>
 28. Le biochar revient en force pour fertiliser les sols et séquestrer le carbone, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://lareleveetlapeste.fr/le-biochar-revient-en-force-pour-fertiliser-les-sols-et-sequestrer-le-carbone/>
 29. Biyokütle Piroliz Tesisi | Ömür Boyu Satış Sonrası Hizmet - Beston Group, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://bestonmachinery.com/tr/biomass-pyrolysis-plant/>
 30. Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştayı Bildiriler Kitabı, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/ktae/Belgeler/calistaybildirikitabi.pdf>
 31. History - Biochar Now, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://biocharnow.com/history/>
 32. Sentez gazı - Vikipedi, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://tr.wikipedia.org/wiki/Sentez_gaz%C4%B1
 33. Sentez gazı üretimi için katalizörler - candcs, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.candcs.de/tr/%C3%BCr%C3%BCn-uygulamas%C4%B1/sentez-gaz%C4%B1/>
 34. Biyokütle Gazlaştırma - Upgrade Enerji, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <http://www.upgradeenerji.com.tr/upgrade/gazlastirma>
 35. Pirolize Edilmiş Lastik Yağı Kullanılarak Elde Edilen Yakıtın Tek Silindirli Dizel Motor Performans ve Emisyonlara Etkisi - DergiPark, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1393064>
 36. Biyokütle atıklardan elde edilen alternatif yakıt kullanımının motor performans ve emisyonlara etkisi - DSpace@AKÜ, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://acikerisim.aku.edu.tr/xmlui/handle/11630/9056>
 37. Biorfe Biochar Biyokömür Tarım Kömürü 1 kg Fiyatı - Hepsiburada, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.hepsiburada.com/biorfe-biochar-biyokomur-tarim-komuru-1-kg-pm-HBC00002O9TRD>
 38. 2023 Sürdürülebilirlik Raporu - Biotrend Enerji, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.biotrendenerji.com.tr/Files/slider/Biotrend_2023_surdurulebilirlik_Raporu.pdf
 39. Biochar Reactor, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://biocharreactor.com/>
 40. Tarımsal Atıklardan Elde Edilen Biyokömürün Toprak Kalitesi Üzerine Etkisi, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://kadirliubfd.com/index.php/kubfd/article/download/38/46/1261>
 41. Biyokütle Nedir? - Aydem Enerji, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.aydemenerji.com.tr/blog/196/biyokutle-nedir-/>
 42. Odun Biyokömürü Üretimi: Orman Atığından Yeşil Hazineye, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.pyrolysismachine.com/tr/wood-biochar-production/>

43. Biyokömür Sistemi - MSE Teknoloji, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://mseteknoloji.com.tr/urun/enerji-sistemleri/biyokomur-sistemi>
44. Belediye Katı Atık Piroliz Geri Dönüşüm Tesisi, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.pyrolysismachine.com/tr/municipal-solid-waste-pyrolysis/>
45. BİYOKÖMÜRÜN (BIOCHAR) TOPRAĞIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <http://acikerisim.harhan.edu.tr:8080/xmlui/handle/11513/3597>
46. Biochar - American Farmland Trust, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://farmland.org/biochar>
47. ARTi - Pyrolysis Reactors & Biochar Solutions, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.arti.com/>
48. Biochar Market Size, Share and Industry Statistics - 2035 - Fact.MR, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.factmr.com/report/3781/biochar-market>
49. Countries with the largest biochar carbon dioxide removal potential (Mt... | Download Scientific Diagram - ResearchGate, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Countries-with-the-largest-biochar-carbon-dioxide-removal-potential-Mt-CO-2-e-year-1_fig2_374617060
50. 环保桥与时科生物签约，合作开发生物炭项目，挖掘农业减排固碳潜力, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.climatebridge.com/news/134.html>
51. Rivne Region Explores Biochar Production Project with UK Partner - Oj - Odessa Journal, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://odessa-journal.com/a-british-company-is-investing-in-biochar-production-in-the-rivne-region>
52. British Company, Tellus Conservation Proposes Biochar Production in Ukraine's Rivne Region, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://biochartoday.com/news/british-company-tellus-conservation-proposes-biochar-production-in-ukraines-rivne-region/>
53. SOLER Group: Solutions for Nature, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://soler-group.com/>
54. Biokohle/Pflanzenkohle als Bodenzusatz - OpenAgrar, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00057111/AS_Pflanzenkohle.pdf
55. Biobased economy: biomassa als grondstof | Duurzame economie | Rijksoverheid.nl, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/duurzame-economie/biobased-economy>
56. Biochar from human waste could solve global fertiliser shortages, study finds - The Guardian, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.theguardian.com/science/2025/aug/11/biochar-from-human-waste-could-solve-global-fertiliser-shortages-study-finds>
57. Biochar Market Size, Share & Growth Analysis Report, 2030, erişim tarihi Ağustos 27, 2025, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biochar-market>