ÇAY BUDAMA ATIKLARININ DEĞERLEME POTANSİYELİ VE UYGULAMA ALANLARI

Arş. Gör. Şefik Tunahan ÇENGEL
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü
ORCID: 0009-0003-0336-6825

Prof. Dr. Mustafa AKBULUT
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü
ORCID: 0000-0003-1028-162X

ÖZET
Çay tarımında gençleştirme budaması, bahçe yenilenmesi ile verim ve yaprak kalitesinin sürekliliğini destekleyen temel bir yönetim uygulamasıdır. Mevzuat kapsamında ruhsatlı çay bahçelerinde budamanın planlı biçimde yürütülmesi ve her yıl alanın yaklaşık onda birinin budamaya alınması, üretim bölgelerinde düzenli ve öngörülebilir bir lignoselülozik biyokütle akımı oluşmasına yol açmaktadır. Bu düzenli budama programı, budama atıklarının toplanması, taşınması ve uygun şekilde yönetilmesini operasyonel açıdan önemli bir konu hâline getirmekte, aynı zamanda budama biyokütlesini sürdürülebilir tarım ve döngüsel biyoekonomi açısından değerlendirilebilir bir kaynak olarak öne çıkarmaktadır. Bu derleme, çay budama atıklarının değerleme potansiyelini ve başlıca uygulama alanlarını tarımsal, çevresel ve endüstriyel boyutlarıyla sistematik biçimde sentezlemeyi amaçlamaktadır. Literatür, budama biyokütlesinin kompost ve organik toprak düzenleyici olarak kullanımının toprak organik maddesini destekleyebildiğini, toprak yapısı ile su tutma kapasitesini iyileştirebildiğini ve besin döngüsüne katkı sağlayabildiğini göstermektedir. Termokimyasal dönüşümle biyokömür üretimi, daha kalıcı karbon fraksiyonlarının toprağa kazandırılması ve karbon depolama potansiyeli açısından öne çıkan bir seçenektir. Ayrıca budama kökenli materyallerden aktif karbon ve biyosorbent üretimi, su ve toprak ortamlarında seçili kirleticilerin giderimine yönelik uygulamalar için potansiyel sunmaktadır. Bununla birlikte, saha ölçeğinde doğrulama, ürün standardizasyonu, ekonomik uygulanabilirlik ve yaşam döngüsü temelli çevresel etki değerlendirmesi gibi alanlarda daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çerçevede, bölge ölçeğinde uygulanabilir yönetim seçeneklerinin geliştirilmesi ve paydaşlar arası koordinasyonun güçlendirilmesi önem kazanmaktadır.
Anahtar Kelimeler: çay budama atıkları, biyokütle değerleme, döngüsel biyoekonomi; biyokömür, yaşam döngüsü değerlendirmesi

VALORIZATION POTENTIAL AND APPLICATION PATHWAYS OF TEA PRUNING RESIDUES

ABSTRACT
Tea rejuvenation pruning is a fundamental management practice that supports plantation renewal while sustaining yield and leaf quality over the long term. Within the current regulatory framework, pruning in registered tea plantations is implemented in a planned and systematic manner, with approximately one-tenth of plantation areas undergoing pruning each year. This structured schedule results in the regular and predictable generation of a lignocellulosic biomass stream across production regions.

Consequently, the collection, transportation, and proper management of pruning residues constitute an operationally significant issue, while at the same time positioning pruning biomass as a potentially valuable resource within sustainable agriculture and the circular bioeconomy. This review aims to systematically synthesize the valorization potential and principal application areas of tea pruning residues across agricultural, environmental, and industrial dimensions. The literature indicates that the use of pruning biomass as compost or organic soil amendments can enhance soil organic matter, improve soil structure and water-holding capacity, and contribute to nutrient cycling. Thermochemical conversion into biochar emerges as a prominent option for introducing more recalcitrant carbon fractions into soils and supporting carbon storage potential. In addition, pruning-derived materials have been investigated as precursors for activated carbon and biosorbent production, offering potential applications for the removal of selected contaminants from water and soil environments. Nevertheless, further field-scale validation, product standardization, economic feasibility analyses, and life cycle-based environmental impact assessments remain necessary. In this context, the development of regionally applicable management options and strengthened stakeholder coordination gain increasing importance.
Keywords: tea pruning residues, biomass valorization, circular bioeconomy, biochar, life cycle assessment

GİRİŞ

Çay bitkisi, toprağa yakın dallanmayı teşvik etmek ve düzgün bir toplama seviyesi oluşturarak sürgün oluşumunu artırmak amacıyla düzenli olarak budanmaktadır (Turumtay, 2020). Ancak çay bitkilerinde düzenli budama uygulamaları, özellikle aşırı budama koşullarında iş gücü maliyetlerini yükseltebilmekte; uygun olmayan zamanda gerçekleştirilen budamalar ise hastalık riskini artırabilmektedir (Uzundumlu ve diğerleri, 2019). Bunun yanında, budama sonucunda ortaya çıkan yüksek miktardaki biyokütle atığı çoğu zaman yakılarak ya da tarlada çürümeye bırakılarak bertaraf edilmekte; bu durum çevresel sorunlara yol açarken ekonomik kayıpları da beraberinde getirmektedir (ARIN ve Çoşkan, 2021; ÖKSÜZ ve Demırci, 2011). Bu nedenle çay bahçelerinde yenileme çalışmalarının planlı biçimde yürütülmesi veya kültürel önlemlerle bu sürenin uzatılması önemli bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır (ARIN ve Çoşkan, 2021). Çay İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından 1993 yılında başlatılan budama projesi de bitkinin gençleştirilmesi ve toprak bakım işlemlerinin uygulanabilmesi amacıyla bu doğrultuda hayata geçirilmiştir. Söz konusu süreçte oluşan atıkların değerlendirilmesi ve sanayiye kazandırılması, hem atık yönetimi hem de kaynak verimliliği açısından önem taşımaktadır (Turumtay, 2020).

Çay tarımında her yıl çay bahçelerinin beşte birinin budanması, işlem sonunda kayda değer miktarda çay odunu atığı oluşmasına neden olmaktadır (Atar ve diğerleri, 2021). Atık miktarının yüksekliği, bu materyalin yönetimini operasyonel bir sorun hâline getirmekte ve olası kullanım alanlarının araştırılmasını gerekli kılmaktadır (Çanakçi ve diğerleri, 2024; ÖKSÜZ ve Demırci, 2011). Budama atıklarının uygun biçimde değerlendirilmesi, sürdürülebilir bir üretim döngüsünün desteklenmesine, çevresel kirliliğin azaltılmasına ve ekonomik değerin artırılmasına katkı sağlayabilmektedir (Seth ve diğerleri, 2023). Bu yönüyle çay budama atıkları, biyokütle ve biyoaktif bileşikler bakımından zengin bir kaynak olarak görülmekte; farklı sektörlerde katma değerli ürünlere dönüştürülmesine yönelik çalışmalar giderek artmaktadır (Duarah ve diğerleri, 2024). Bu derleme, çay budama atıklarının bileşimini, potansiyel kullanım alanlarını ve bu atıklardan elde edilebilecek katma değerli ürünleri kapsamlı biçimde incelemeyi amaçlamaktadır (Duarah ve diğerleri, 2024; Seth ve diğerleri, 2023).

Çay tarımında gençleştirme budaması ve planlı budama uygulamalarında, budamanın zamanlaması ile tekniği bitkinin sağlıklı gelişimi, optimum verim ve kaliteli ürün elde edilmesi bakımından kritik öneme sahiptir (Çanakcı ve diğerleri, 2024). Düzenli ve stratejik budama, çay bitkisinin ağaç formuna yönelmesini engelleyerek yaprak hasadını kolaylaştırmakta ve sürgün verimliliğini artırmaktadır (Turumtay, 2020). Ayrıca periyodik budama, bitkinin ömrünü uzatmanın yanında fotosentetik kapasiteyi optimize ederek daha homojen ve kaliteli sürgün gelişimini destekleyebilmektedir (Dönmez ve diğerleri, 2022). Bununla birlikte, düzenli budama programının oluşturduğu sürekli biyokütle akımı, budama atıklarının değerlendirilmesine yönelik araştırmaların artırılmasını gerekli kılmaktadır (Çakmak ve diğerleri, 2024). Türkiye'de çay ve fındık gibi rekabet gücü yüksek tarımsal ürünlerin atıkları; pelet, kompost veya enerji üretimi gibi alanlarda değerlendirilebilmekte olup, benzer yaklaşımlar çay budama atıkları için de uygulanabilir seçenekler sunmaktadır (Yüksek, 2019). Bu derleme, çay budama atıklarını yalnızca bir atık yönetimi problemi olarak değil, döngüsel biyoekonomi içinde değerlendirilebilecek bir biyokütle kaynağı olarak ele almaktadır (Seth ve diğerleri, 2023; Çakmak ve diğerleri, 2024). Bu kapsamda literatür bulguları, tarımsal değerleme yaklaşımları (kompost ve organik düzenleyici uygulamaları), termokimyasal dönüşüm seçenekleri (özellikle biyokömür) ve çevresel/endüstriyel kullanım alanları (aktif karbon ve biyosorbent üretimi) ekseninde sentezlenmiştir (Wang ve diğerleri, 2024; Monlau ve diğerleri, 2012; Monlau ve diğerleri, 2014). Ayrıca saha doğrulaması, ürün standardizasyonu, ekonomik uygulanabilirlik ve yaşam döngüsü temelli çevresel etki değerlendirmesi gibi temel kanıt boşlukları da tartışılmıştır (Osman ve diğerleri, 2023, 2024; Ahmadipour ve diğerleri, 2025; Paudel ve diğerleri, 2024).

1. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

1.1. PLANLI BUDAMA REJİMİ VE LİGNOSELÜLOZİK BİYOKÜTLE AKIMININ OLUŞUMU

Çay budama atıkları gibi lignoselülozik biyokütle kaynakları, biyo-rafineri süreçleri aracılığıyla biyoyakıtlar, biyokimyasallar ve ileri materyaller gibi yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülme potansiyeli taşımaktadır (Çakmak ve diğerleri, 2024). Bu atıkların zengin lignoselülozik içeriği, özellikle selüloz, hemiselüloz ve lignin fraksiyonları sayesinde termokimyasal veya biyokimyasal dönüşüm süreçleri için elverişli bir hammadde tabanı sunmaktadır (Çakmak ve diğerleri, 2024). Ayrıca bu materyallerin yapısında düşük düzeylerde kül, protein ve diğer bileşiklerin bulunması, budama atıklarının fosil yakıtlara alternatif biçimde ısı, güç ve elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesine imkân tanımaktadır (Çanakcı ve diğerleri, 2024). Nitekim çay budama atıkları gibi lignoselülozik biyokütleler, uygun dönüşüm ve kullanım senaryoları altında enerji üretimine anlamlı katkı sağlayabilecek bir alternatif olarak ele alınmaktadır (Turumtay, 2020). Bu potansiyelin önemi, endüstriyel büyüme, şehirleşme ve nüfus artışıyla birlikte enerji talebinin küresel ölçekte yükselmesiyle daha da artmaktadır (Ghonimy ve diğerleri, 2025). Enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesi ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine yaklaşılması bakımından, çay budama atıkları gibi biyokütle kaynaklarının enerji sektörüne entegrasyonu kritik bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (Ghonimy ve diğerleri, 2025; Çanakçi ve diğerleri, 2024). Bu çerçevede lignoselülozik yapıdaki budama atıklarının farklı yöntemlerle değerlendirilerek geri kazanım yoluyla ekonomiye kazandırılması giderek artan bir önem taşımaktadır (Çanakçi ve diğerleri, 2024). Enerji amaçlı kullanımda, bu tür atıkların düşük kalorili linyit kömürü ile harmanlanarak ortak yakma uygulamalarında değerlendirilmesi, enerji gereksiniminin karşılanmasına yönelik dikkate değer bir alternatif sunmaktadır (Turumtay, 2020).

Özellikle termal enerji eldesinde biyobiriket formunda çay atıklarının kullanımı; yüksek ısıl değer (yaklaşık 5254 kCal/kg) ve düşük nem içeriği (%10'dan az) sayesinde fosil yakıtlarla rekabet edebilir bir seçenek olarak raporlanmıştır (Turumtay, 2020).

Küresel enerji talebindeki artış ve fosil yakıt kaynaklarının azalması dikkate alındığında, biyokütle enerjisi önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Shahzad ve diğerleri, 2024). Gelecekte biyokütlenin enerji üretimindeki payının artacağı; bu artışın ise termokimyasal ve biyokimyasal dönüşüm teknolojilerindeki ilerlemelerle hız kazanacağı öngörülmektedir (Shahzad ve diğerleri, 2024). Biyokütlenin yalnızca doğrudan ısınma ve elektrik üretiminde değil, aynı zamanda katı, sıvı ve gaz yakıtlara dönüştürülebilmesi, enerji sistemleri açısından çok yönlü bir kullanım alanı oluşturduğunu göstermektedir (Turumtay, 2020). Bu kapsamda biyokütle kaynaklarının küresel birincil enerjinin yaklaşık %10'unu karşıladığı bildirilmekte (Bilgic, 2014) ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde ormancılık ve tarıma dayalı ekonomiler için kritik bir enerji bileşeni olarak öne çıktığı vurgulanmaktadır (Madhusanka ve diğerleri, 2025). Artan enerji gereksinimi ile fosil yakıtların çevresel etkileri, biyokütle gibi alternatif kaynaklara yönelimi hızlandırmış (Bulut, 2023) ve bu eğilimin uzun vadede güçleneceği öngörülmüştür. Nitekim küresel enerji talebinin 2050 yılına kadar %47 artarak 99 EJ'ye ulaşacağı tahmin edilmekte; bu artışın sürdürülebilir biçimde karşılanabilmesi için biyokütlenin stratejik rolü özellikle vurgulanmaktadır (Salcedo-Puerto ve diğerleri, 2024).

Biyokütle temelli ısıtma, elektrik üretimi ve biyoyakıt üretimi teknolojilerinin, yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmada merkezi bir rol oynadığı ifade edilmektedir (Madhusanka ve diğerleri, 2025). Ayrıca biyokütle enerjisinin sera gazı emisyonlarının azaltılması ve kırsal alanlarda sürdürülebilir kalkınmanın desteklenmesi açısından fosil yakıtlara alternatif bir seçenek olarak önem taşıdığı belirtilmektedir (Ersoy ve Uğurlu, 2024). Özellikle odunsu biyokütlelerin termokimyasal dönüşüm yoluyla yüksek verimli enerjiye dönüştürülmesi, enerji güvenliği ve iklim değişikliğiyle mücadele hedefleriyle birlikte değerlendirildiğinde kritik bir uygulama alanı sunmaktadır (Kan ve diğerleri, 2016; Osman ve diğerleri, 2024). Bu perspektiften bakıldığında hidrotermal sıvılaştırma gibi ileri termokimyasal süreçler, nem içeriği yüksek biyokütlelerin doğrudan biyo-ham petrol ve diğer değerli kimyasallara dönüştürülebilmesi nedeniyle dikkat çekmektedir (Usman ve diğerleri, 2024). Söz konusu teknoloji, biyokütlenin enerji yoğunluğunu artırırken bazı geleneksel termal süreçlere kıyasla daha düşük sıcaklık ve basınç koşullarında çalışabilme avantajı sunmaktadır (Osman ve diğerleri, 2024). Özellikle nem içeriği yüksek biyokütlelerde enerji verimliliğini artırabilmesi, hidrotermal sıvılaştırmayı piroliz veya gazlaştırma gibi yöntemlere kıyasla daha sürdürülebilir bir dönüşüm yolu olarak öne çıkarabilmektedir (Osman ve diğerleri, 2023). Bu yönüyle hidrotermal sıvılaştırma, yüksek enerji yoğunluklu yakıt ve kimyasal üretiminde çevresel sürdürülebilirliği destekleyen ve enerji ekonomisine katkı sunabilen bir potansiyel taşımaktadır (Valipour ve diğerleri, 2024).

Türkiye gibi biyokütle açısından zengin ülkelerde biyokütle enerjisinin modern enerji kullanımında fosil yakıtların yerini alabilecek yenilenebilir nitelikte olduğu ve çevresel faydalar sunduğu bildirilmektedir (Bilgen ve diğerleri, 2015). Bu yaklaşımlar, biyokütle kaynaklarının daha verimli değerlendirilmesi yoluyla enerji bağımsızlığının güçlendirilmesine ve karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine ilerlemede önemli katkılar sağlayabilmektedir (Dimitriadis ve Bezergianni, 2016).

1.1.1. Çay Budama Atıklarının Fiziksel ve Kimyasal Bileşimi

Çay budama atıkları (*Camellia sinensis* residues), yapısal özellikleri bakımından sert odunsu gövde materyallerine benzerlik gösteren kompleks bir lignoselülozik biyokütle niteliğindedir (Atar ve diğerleri, 2021). Bu materyalin kimyasal ve fiziksel karakterizasyonu, enerji geri kazanımı, termokimyasal dönüşüm ve malzeme üretimi süreçlerindeki teknik uygunluğun ve proses verimliliğinin belirlenmesi açısından temel bir öneme sahiptir (Atar ve diğerleri, 2021; Bongomin ve diğerleri, 2024; Tutuş ve diğerleri, 2015).

Yapılan analizler, atık çay odunu liflerinin %77.09 holoselüloz, %47.18 selüloz ve %28.94 lignin içerdiğini göstermektedir (Atar ve diğerleri, 2021). Bu kompozisyon, materyalin hem yapısal dayanımı hem de dönüşüm davranışı açısından dikkate değer bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Atar ve diğerleri, 2021). Literatürde bildirilen diğer bulgular da, çay atıklarının kağıt hamuru üretimi açısından yeterli lif mukavemeti sunmamasına karşın, yüksek lignin içeriği nedeniyle özellikle piroliz ve gazlaştırma gibi termokimyasal dönüşüm süreçlerinde yüksek stabilite ve enerji yoğunluğu sağlayabildiğini doğrulamaktadır (Bongomin ve diğerleri, 2024; Tutuş ve diğerleri, 2015). Bu yönüyle çay budama atıkları, lif temelli klasik kullanım alanlarından ziyade enerji ve karbon temelli ürün uygulamalarında daha belirgin bir teknik avantaj sunmaktadır (Bongomin ve diğerleri, 2024; Tutuş ve diğerleri, 2015).

Enerji özellikleri bakımından değerlendirildiğinde, çay budama biyokütlesinden elde edilen peletlerin alt veya üst ısıl değerlerinin 14–15.5 MJ/kg aralığında değiştiği bildirilmektedir (Kokilavani ve diğerleri, 2025). Bazı uygulamalarda bu değerin 16.7 kJ/g düzeyine ulaştığı ve çam türleriyle rekabet edebilir bir enerji performansı sergilediği de raporlanmıştır (Bardant ve diğerleri, 2021). Bunun yanında, torrefaksiyon ya da hafif piroliz işlemi uygulanan çay atıklarında üst ısıl değerin %43.9 oranında artarak 24.36 MJ/kg düzeyine kadar yükselebildiği gösterilmiştir (Ünyay ve diğerleri, 2025). Bu bulgular, ön işlem teknolojilerinin çay budama atıklarının yakıt kalitesini iyileştirmede belirgin bir rol oynadığını ve materyalin enerji yoğunluğunu artırarak daha yüksek performanslı biyokütle yakıtlarına dönüştürülebileceğini ortaya koymaktadır (Ünyay ve diğerleri, 2025; Bardant ve diğerleri, 2021).

Çevresel performans göstergeleri bakımından da çay budama atıkları dikkat çekici özellikler sergilemektedir. Çay budama atıklarının linyit kömürü ile harmanlanması durumunda kül içeriğinin %12'den %6'ya, kükürt içeriğinin ise %1.15'ten %0.69'a düştüğü bildirilmiş; bu durumun daha çevreci bir yakıt profili oluşturduğu belirtilmiştir (Turumtay, 2020). Ayrıca düşük emisyon değerleri, özellikle %0.05 CO ve 7 ppm NOx düzeyleri, bu biyokütlenin sürdürülebilir enerji sistemlerinde daha temiz bir kaynak olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir (Kokilavani ve diğerleri, 2025). Bu nedenle çay budama atıklarının fiziksel ve kimyasal bileşimi, yalnızca enerji geri kazanımı açısından değil, aynı zamanda çevresel performans, emisyon azaltımı ve termokimyasal süreç tasarımı bakımından da önemli bir değerlendirme zemini sunmaktadır (Turumtay, 2020; Kokilavani ve diğerleri, 2025).

1.1.2. Budama Atıklarının Toplanması, Taşınması ve Lojistik Boyutu

Biyokütle tabanlı yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşılmasında karşılaşılan temel sınırlılıklardan biri, hammaddenin erişilebilirliği, toplanabilirliği ve etkin biçimde mobilize edilebilmesidir (Bayraktar, 2025). Bu durum, özellikle coğrafi koşulların zorlayıcı olduğu üretim bölgelerinde daha belirgin hâle gelmektedir (Bayraktar, 2025; Şahin, 2025). Doğu Karadeniz Bölgesi'nin topoğrafik yapısı, yerleşim deseni ve üretim alanlarının parçalı dağılımı, çay budama atıklarının lojistiğini yalnızca teknik bir taşıma problemi olmaktan çıkararak stratejik bir kaynak yönetimi meselesine dönüştürmektedir (Bayraktar, 2025; Erdoğdu, 2008).

Türkiye'de çay üretiminin yaklaşık %67'si Rize'de yoğunlaşmakta; kalan üretim ise ağırlıklı olarak Trabzon, Artvin ve Giresun illerinde gerçekleştirilmektedir (Efe, 2024). Bu bölgesel yoğunlaşma, endüstriyel ve tarımsal kökenli çay atıklarının da belirli üretim havzalarında büyük hacimlerde birikmesine yol açmaktadır (Efe, 2024). Nitekim yıllık yaklaşık 203.483 ton düzeyinde endüstriyel ve tarımsal çay atığının yönetilmesi gerektiği; bu biyokütlenin doğrudan yakılması durumunda yaklaşık 3.550.811.664 MJ termal enerji potansiyeli sunabileceği bildirilmektedir (Efe, 2024). Bu büyüklük, çay budama ve işleme atıklarının yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir artık materyal değil, bölgesel ölçekte planlanması gereken önemli bir enerji ve biyokütle kaynağı olduğunu göstermektedir (Efe, 2024; Bayraktar, 2025).

Bununla birlikte biyokütle kaynaklarının düşük yığın yoğunluğu, dağınık mekânsal dağılımı ve çoğu zaman mevsimsel karakter göstermesi, toplama ve taşıma maliyetlerini artıran başlıca risk faktörleri arasında yer almaktadır (Erdoğdu, 2008). Özellikle Trabzon ve Rize gibi dağlık ve engebeli arazi yapısına sahip illerde, hammaddenin mobilizasyonu önemli bir operasyonel bariyer oluşturmaktadır (Bayraktar, 2025; Şahin, 2025). Eğimli arazilerde makine kullanımının sınırlanması, yol altyapısının değişkenliği, parsellerin küçük ve parçalı yapıda olması ve biyokütlenin dağınık noktalarda ortaya çıkması, lojistik zincirin verimliliğini düşürebilmektedir (Bayraktar, 2025; Erdoğdu, 2008; Şahin, 2025). Bu nedenle çay budama atıklarının ekonomik olarak değerlendirilebilmesi, yalnızca dönüşüm teknolojilerinin başarısına değil, aynı zamanda toplama ve taşıma altyapısının etkinliğine de bağlı görünmektedir (Bayraktar, 2025; Mutlu ve Özyörük, 2022).

Taşıma ve dağıtım sürecinde ortaya çıkan kayıplar da sistem verimliliği bakımından kritik öneme sahiptir. Enerji dönüşüm sürecinin atığın üretildiği fabrikalarda ya da bu noktalara çok yakın toplama merkezlerinde gerçekleştirilmesinin stratejik açıdan daha uygun olduğu belirtilmektedir (Efe, 2024). Taşıma mesafesi arttıkça elektriksel enerjide %15'e, termal enerjide ise %50'ye varan verim kayıpları ve dağıtım zararları gözlemlenebilmektedir (Efe, 2024). Bu durum, çay atıklarının merkezi olmayan, bölgesel olarak kümelenmiş ve kaynağa yakın dönüşüm modelleriyle değerlendirilmesinin önemini artırmaktadır (Efe, 2024; Mutlu ve Özyörük, 2022). Bu çerçevede, toplama, kümeleme ve dağıtım aşamalarını birlikte ele alan matematiksel optimizasyon modellerinin uygulanması, lojistik maliyetlerin azaltılması ve sistem verimliliğinin artırılması bakımından stratejik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (Mutlu ve Özyörük, 2022).

Sonuç olarak, çay budama atıklarının enerji, biyomalzeme veya diğer katma değerli ürünlere dönüştürülmesinde teknik potansiyel kadar lojistik uygulanabilirlik de belirleyici bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır (Bayraktar, 2025; Efe, 2024). Bu nedenle bölgesel ölçekte kurulacak değerleme sistemlerinde biyokütlenin mekânsal dağılımı, taşıma mesafesi, arazi yapısı, toplama organizasyonu ve dönüşüm tesislerinin konumlandırılması birlikte değerlendirilmelidir (Erdoğdu, 2008; Mutlu ve Özyörük, 2022; Şahin, 2025).

1.2. TARIMSAL DEĞERLEME: KOMPOST VE ORGANİK DÜZENLEYİCİ UYGULAMALAR

Çay budama atıklarının kompostlanması ve organik düzenleyici olarak kullanımı, toprağın besin elementleri açısından zenginleşmesine katkı sağlayarak kimyasal gübre bağımlılığını azaltma potansiyeli taşımakta; aynı zamanda toprak yapısını iyileştirerek su tutma kapasitesini artırabilmektedir (Thamarai ve diğerleri, 2025). Bu yaklaşım, tarımsal verimliliği sürdürülebilir biçimde desteklemenin yanında atık yönetimi ve döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (Thamarai ve diğerleri, 2025).

Ayrıca kompost uygulamaları, toprağın organik karbon içeriğini artırarak iklim değişikliğiyle mücadele bağlamında da işlevsel bir kazanım sunabilmektedir (Thamarai ve diğerleri, 2025). Kompostlamaya ek olarak, lignoselülozik biyokütlenin anaerobik sindirimi yoluyla biyogaz üretimi ve süreç yan ürünlerinin, özellikle digestatın, değerlendirilmesi tarımsal değerlemenin enerji boyutunu güçlendiren tamamlayıcı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (Osman ve diğerleri, 2023, 2024). Bu süreçlerden elde edilen ürünler hem enerji üretiminde hem de toprak iyileştirme uygulamalarında kullanılabilmekte; ancak sistem performansının maliyet-etkinlik ve çevresel etki bakımından güvenilir biçimde ortaya konulabilmesi için tekno-ekonomik analizler ile yaşam döngüsü değerlendirmelerinin birlikte ele alınması gerekmektedir (Osman ve diğerleri, 2023, 2024). Öte yandan lignoselülozik biyokütleden türetilen digestatın termokimyasal işlenmesi, tarımsal uygulamalarda karşılaşılan mevsimsellik ve biyolojik bozunma gibi sınırlılıkları azaltarak daha süreklilik arz eden bir atık yönetimi alternatifi sunabilmektedir (Wang ve diğerleri, 2024). Benzer biçimde entegre sistem yaklaşımları; enerji çıktılarının artırılması, süreç yan ürünlerinin yeniden kullanımı ve çevresel faydaların maksimize edilmesi yönüyle sürdürülebilir kaynak yönetimi perspektifini güçlendirmektedir (Alengebawy ve diğerleri, 2024; Marzban ve diğerleri, 2024). Bu nedenle lignoselülozik atıkların toprağa geri kazandırılmasının, toprak organik karbonunu ve su tutma kapasitesini destekleyerek toprak degradasyonunu azaltabileceği ve biyolojik döngüleri teşvik ederek sürdürülebilir tarıma katkı sağlayabileceği bildirilmektedir (Shakeel ve diğerleri, 2026).

Bu tür uygulamaların geniş ölçekte benimsenmesi, yalnızca teknik uygunluğa değil, aynı zamanda sistem düzeyinde optimizasyona da bağlıdır (Ahmadipour ve diğerleri, 2025). Biyokütle enerji sistemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik yeni optimizasyon yaklaşımları ve teknolojilerin geliştirilmesi bu nedenle kritik bir gereklilik olarak görülmektedir (Ahmadipour ve diğerleri, 2025). Ayrıca çevresel sürdürülebilirliği korurken yatırım, işletme ve bakım maliyetlerini azaltmayı hedefleyen çok kriterli karar verme araçları ile gelişmiş optimizasyon tekniklerinin, sistem tasarımı ve işletiminde etkin biçimde kullanılabileceği vurgulanmaktadır (Ahmadipour ve diğerleri, 2025; Paudel ve diğerleri, 2024). Bu yaklaşımlar, tarımsal atıkların değerlenmesini hızlandırarak döngüsel biyotekonomiye katkı sunarken, enerji güvenliği ve iklim değişikliğiyle mücadele hedeflerini de destekleyebilmektedir (Koul ve diğerleri, 2021).

Anaerobik çürütme ve kompostlama, organik atıkların sürdürülebilir yönetiminde birbirini tamamlayan roller üstlenerek hem toprağın iyileştirilmesine hem de biyoenerji üretimine olanak tanımaktadır (Lin ve diğerleri, 2018; Sharma ve diğerleri, 2024). Bu dönüşüm süreçleri, biyogaz ve biyogübre gibi değerli ürünlerin elde edilmesini sağlayarak atık yönetimi sorunlarına ekonomik ve ekolojik boyutları birlikte içeren çözümler sunmaktadır (Rincón ve diğerleri, 2019; Sharma ve diğerleri, 2024). Bununla birlikte biyokütle valorizasyonunun avantaj ve sınırlılıklarının, çevresel belirsizlikler dikkate alınarak ve özellikle yaşam döngüsü değerlendirmesi metodolojisiyle analiz edilmesi kritik önem taşımaktadır (Osman ve diğerleri, 2024). Nitekim lignoselülozik biyokütlenin biyoenerjiye dönüştürülmesi ile toprak iyileştirme uygulamalarının birlikte ele alınması, sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi hedefleriyle doğrudan ilişkilendirilmektedir (Mujtaba ve diğerleri, 2023; Shakeel ve diğerleri, 2026). Bu doğrultuda biyo-rafineri konseptleri, lignoselülozik biyokütlenin biyoyakıt ve biyoürünlere dönüştürülmesine yönelik entegre yaklaşımlar geliştirmekte (Sulis ve diğerleri, 2025) ve fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılmasıyla çevresel etkilerin en aza indirilmesini hedeflemektedir (Awasthi ve diğerleri, 2020).

Bunun yanında biyokütle enerji sistemlerinin etkinliği, sürdürülebilir enerji dönüşümü ve sıfır atık hedeflerine ilerlemede belirleyici bir rol oynamaktadır (Marzban ve diğerleri, 2025). Özellikle biyokütle arzındaki tutarsızlık gibi pratik zorluklar dikkate alındığında, sistem optimizasyonu enerji üretim verimliliğinin artırılması açısından kritik görünmektedir (Ahmadipour ve diğerleri, 2025). Bu kapsamda anaerobik sindirim, atık yönetimi ve yenilenebilir enerji üretimi için umut vadeden bir biyoteknoloji olarak öne çıkmakta (Osman ve diğerleri, 2023) ve tarımsal kalıntılar gibi bol bulunan ancak yeterince değerlendirilmeyen biyokütle kaynaklarının katma değerli ürünlere dönüştürülmesinde yüksek potansiyele sahip olduğu belirtilmektedir (Wang ve diğerleri, 2018). Benzer biçimde, anaerobik sindirimin uygulamadaki başarısı; lignoselülozik biyokütle gibi karmaşık hammaddelerin biyogaza verimli biçimde dönüştürülebilmesi için ön işlem tekniklerinin geliştirilmesini gerektirmektedir (Osman ve diğerleri, 2023; Vu ve diğerleri, 2020). Bu bağlamda biyolojik tekniklerin, lignoselülozik atıkların anaerobik çürütme verimliliğini artırmada kritik rol oynadığı; yapısal karmaşıklığın parçalanmasıyla metan veriminin yükseltilebildiği ve enerji verimliliğinin optimize edilebildiği bildirilmektedir (Gao ve diğerleri, 2022; Hashemi ve diğerleri, 2020). Ayrıca biyokütlenin anaerobik sindirimi, atık yönetimi ve yenilenebilir enerji üretimi için öne çıkan biyoteknolojik seçeneklerden biri olarak değerlendirilmektedir (Alengebawy ve diğerleri, 2024).

SONUÇ

Çay tarımında gençleştirme budaması sonucu ortaya çıkan lignoselülozik atıklar, geleneksel bir bertaraf sorunu olmaktan ziyade döngüsel ekonomi için yüksek değerli bir biyokütle kaynağıdır. Yapılan incelemeler, bu atıkların zengin selüloz ve lignin içeriği sayesinde termokimyasal dönüşüm süreçlerine (piroliz, gazlaştırma) son derece uygun olduğunu göstermektedir. Özellikle düşük emisyon profili ve yüksek ısıl değeri, çay budama odununu fosil yakıtlara karşı sürdürülebilir bir alternatif haline getirmektedir.

Tarımsal açıdan ise budama atıklarının kompost veya biyokömür formunda toprağa geri kazandırılması; toprak yapısını iyileştirme, su tutma kapasitesini artırma ve karbon depolama potansiyeli açısından kritik kazanımlar sunmaktadır. Ancak bu potansiyelin ekonomiye tam anlamıyla kazandırılabilmesi için Doğu Karadeniz'in zorlu topoğrafyasına uygun lojistik modellerin geliştirilmesi ve kaynağa yakın, bölgesel dönüşüm tesislerinin planlanması stratejik bir zorunluluktur. Sonuç olarak, planlı bir atık yönetimi mekanizmasıyla çay budama artıkları, bölge ekonomisi için çevreci ve katma değerli bir ham maddeye dönüştürülebilir.

KAYNAKÇA

Ababor, S., Tamiru, M., Alkhtib, A., Wamatu, J., Kuyu, C. G., Teka, T. A., Terefe, L. A., & Burton, E. (2023). The use of biologically converted agricultural byproducts in chicken nutrition. *Sustainability, 15*(19), 14562. https://doi.org/10.3390/su151914562

Ajmal, M., Shi, A., Awais, M., Ullah, M. S., Saeed, R., Uddin, S., Ahmad, I., Zhou, B., & Xu, Z. (2020). Optimization of pilot-scale in-vessel composting process for various agricultural wastes on elevated temperature by using Taguchi technique and compost quality assessment. *Process Safety and Environmental Protection, 140*, 34–45. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.001

Alharbi, A., & Ghonimy, M. (2025). Environmental benefits of olive by-products in energy, soil, and sustainable management. *Sustainability, 17*(10), 4722. https://doi.org/10.3390/su17104722

Ansar, A., Du, J., Javed, Q., Adnan, M., & Javaid, I. (2025). Biodegradable waste in compost production: A review of its economic potential. *Nitrogen, 6*(2), 24. https://doi.org/10.3390/nitrogen6020024

Arcak, S., Kütük, A. C., Haktanır, K., & Çaycı, G. (1997). The effects of tea wastes on soil enzyme activity and nitrification. *DergiPark (Istanbul University).* https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/20547/218981

Arın, A., & Çoşkan, A. (2021). The effect of biochar applications on the pH of the Black Sea region soil and the biological activity parameters. *DergiPark (Istanbul University).* https://dergipark.org.tr/tr/pub/sduzfd/issue/66191/1001831

Aşık, B. B., & Kütük, C. (2015). Çay atığı kompostunun çim alanların oluşturulmasında kullanım olanağı. *DergiPark (Istanbul University).* https://dergipark.org.tr/en/pub/ziraatuludag/issue/16760/174259

Aslan, Ş., Yıldız, S., & Öztürk, M. (2021). Biosorption of Cu2+ from synthetic wastewater by tea waste sorbent: kinetics, equilibrium and thermodynamics. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 27*(3), 360. https://doi.org/10.5505/pajes.2020.27374

Atar, İ., Başboğa, İ. H., Karakuş, K., & Mengeloğlu, F. (2021). Yüksek yoğunluklu polietilen bazlı polimer kompozitlerin bazı özellikleri üzerine atık çay odunu lifleri ve MAPE'nin etkisi. *DergiPark (Istanbul University).* https://dergipark.org.tr/tr/pub/turkjforsci/issue/65510/991612

Atılgan, A., Ersen, N., & Peker, H. (2014). Investigation of the possibility coloring on wood materials of paint obtained from waste tea extracts. *DergiPark (Istanbul University).* https://dergipark.org.tr/en/pub/kastorman/issue/17230/179949

Awasthi, M. K., Yan, B., Şar, T., Gómez-García, R., Ren, L., Sharma, P., ... & Taherzadeh, M. J. (2022). Organic waste recycling for carbon smart circular bioeconomy and sustainable development: A review. *Bioresource Technology, 360*, 127620. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127620

Bakoğlu, A., & Çatal, M. İ. (2022). Farklı taban gübresi, organik gübre uygulaması ve biçim zamanlarının çay bitkisinde (*Camellia Sinensis* (L.) O. Kuntze) verim üzerine etkileri. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences, 7*(4), 502. https://doi.org/10.35229/jaes.1181338

Balci-Torun, F., Özdemir, K. S., Mavuş, R., & Torun, M. (2021). Siyah çay üretim atıklarından konsantre çay ekstraktı üretiminde krema oluşum koşullarının ve bileşiminin belirlenmesi. *GIDA / The Journal of Food, 46*(2), 339. https://doi.org/10.15237/gida.gd20145

Bardant, T. B., Setiawan, A., Haq, M. S., Prasetia, H., Mastur, A. I., Harianto, S. P., ... & Noguchi, R. (2021). Simulation of Gamboeng tea product manufacturing process and their role in reducing environmental impact. *Management and Production Engineering Review.* https://doi.org/10.24425/mper.2021.137681

Bayraktar, D. K. (2025). Sustainability potential and utilization of agricultural bioenergy in Turkey. *BioResources, 20*(4), 8695–8712. https://doi.org/10.15376/biores.20.4.8695-8712

Bongomin, O., Nzila, C., Mwasiagi, J. I., & Maube, O. (2024). Comprehensive thermal properties, kinetic, and thermodynamic analyses of biomass wastes pyrolysis via TGA and Coats-Redfern methodologies. *Energy Conversion and Management X, 24*, 100723. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100723

Çakmak, T. G., Saricaoglu, B., Özkan, G., Tomaş, M., & Çapanoğlu, E. (2024). Valorization of tea waste: Composition, bioactivity, extraction methods, and utilization. *Food Science & Nutrition, 12*(5), 3112–3128. https://doi.org/10.1002/fsn3.4011

Duarah, P., Haldar, D., Singhania, R. R., Dong, C. D., Patel, A. K., & Purkait, M. K. (2024). Sustainable management of tea wastes: resource recovery and conversion techniques. *Critical Reviews in Biotechnology, 44*(2), 255–274. https://doi.org/10.1080/07388551.2022.2157701

Efe, Ş. (2024). Industrial tea waste and energy potential. *DergiPark (Istanbul University).* https://doi.org/10.5281/zenodo.14670859

Erdoğdu, E. (2008). An exposé of bioenergy and its potential and utilization in Turkey. *Energy Policy, 36*(6), 2182–2190. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.041

Kokilavani, R., Khoiyang, S., Kotal, H., Mukherjee, R., & Jana, S. K. (2025). Converting pruned tea plants into biomass pellets: A sustainable energy source. *European Journal of Sustainable Development Research, 9*(2). https://doi.org/10.29333/ejosdr/16287

Öksüz, M., & Demirci, M. (2011). Türkiye'de çay artıklarından kafein üretimi. *DergiPark (Istanbul University).* https://dergipark.org.tr/tr/pub/ataunizfd/issue/2995/41549

Seth, D., Athparia, M., Singh, A., Rathore, D., Venkatramanan, V., Channashettar, V., ... & Kataki, R. (2023). Sustainable environmental practices of tea waste—a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research, 32*(12), 7449–7465. https://doi.org/10.1007/s11356-023-30848-3

Turumtay, H. (2020). Investigation of combustion potential of tea pruning waste biomass mixed with lignite coal. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 21*(2), 135–144. https://doi.org/10.17474/artvinofd.655079

Tutuş, A., Kazaskeroğlu, Y., & Çiçekler, M. (2015). Evaluation of tea wastes in usage pulp and paper production. *BioResources, 10*(3), 5407–5416. https://doi.org/10.15376/biores.10.3.5407-5416

Yüksek, T. (2019). The effect of different type of feeding materials on red California worm number and weight. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences, 4*(1), 1–6. https://doi.org/10.35229/jaes.477726