



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TARIMSAL ATIKLARIN BİYOKÜTLE ENERJİ ÜRETİM
POTANSİYELİNİN SERA GAZI EMİSYONLARININ AZALTMASINA
KATKISI VE ÇEVRESEL ETKİLERİ: ŞANLIURFA ÖRNEĞİ**

MAHMUD ELABDULLAH

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Şanlıurfa
2025**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TARIMSAL ATIKLARIN BİYOKÜTLE ENERJİ ÜRETİM
POTANSİYELİNİN SERA GAZI EMİSYONLARININ AZALTMASINA
KATKISI VE ÇEVRESEL ETKİLERİ: ŞANLIURFA ÖRNEĞİ**

MAHMUD ELABDULLAH

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Güzel YILMAZ**

**Şanlıurfa
2025**

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında bana büyük destek veren, bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan, ufkumu açan bakış açısıyla yüksek motivasyon sağlayan danışman hocam sevgili Prof. Dr. Güzel YILMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam süresince bana sağladığı yönlendirmeler, teşvikler ve eleştiriler, bu tezin ortaya çıkmasında önemli bir rol oynamıştır.

Ayrıca, araştırmalarım sırasında yararlandığım Harran Üniversitesi Kütüphanesi'ne ve Türkiye İstatistik Kurumu'na (TÜİK) teşekkür ederim. Sağladıkları kaynaklar ve veriler, çalışmalarımı büyük ölçüde kolaylaştırmıştır. Son olarak, tez sürecinde bana sürekli moral ve motivasyon veren sevgili annem ve babama, tüm aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Onların desteğı, zorlu anlarda bana güç vermiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
SİMGELER	v
KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	8
1.2. Çalışmanın Önemi	8
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	10
2.1. Biyokütle Enerjisi	20
2.1.1. Biyokütle enerjisi kaynakları	22
2.1.1.1. Tarımsal atık kaynaklı biyokütle	23
2.1.1.2. Ormansal atık kaynaklı biyokütle	23
2.1.1.3. Kentsel ve endüstriyel atık kaynaklı biyokütle	24
2.1.1.4. Hayvansal atık kaynaklı biyokütle	25
2.1.2. Biyokütle enerjisinin avantajları	25
2.1.3. Biyokütle enerjisinin dezavantajları	26
2.1.4. Tarımsal atıklardan biyokütle enerji teknolojisi	27
2.2. Tarımsal Atıkların Anız Yakılması ve Çevre	28
2.3. Sera Gazı Emisyonları	30
3. GEREÇ VE YÖNTEM	32
3.1. Çalışma Alanı	32
3.2. Tarımsal Ürün Üretim Verileri	33
3.3. Tarımsal Biyokütle Atıklarının Özelliklerine İlişkin Yapılan Kabuller	34
3.4. Teorik Tarımsal Biyokütle Potansiyelinin Hesaplanması	36
3.5. Teorik Enerji Potansiyeli Hesaplaması	37
3.6. Kullanılabilir Enerji Potansiyeli Hesaplaması	37
3.7. Elektrik Enerji Eşdeğeri Hesaplaması	38
3.8. Sera Gazı Emisyonlarının Hesaplanması	39
3.9. Tarımsal Atıklardan Biyokütle Enerjisi Üretimi Potansiyelinin Sera Gazı Emisyonları Azaltımı ve Çevresel Etkilerinin Analizi	40
3.10. Tarımsal Atıkların Açık Alanda Yakılmasından Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarının Analizi	41
3.11. Ortalama Önleyebilcek Sera Gazı Emisyonları	43
4. BULGULAR	45
5. TARTIŞMA	51
6. SONUÇLAR	52
7. ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	62

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARIMSAL ATIKLARIN BİYOKÜTLE ENERJİ ÜRETİM POTANSİYELİNİN SERA GAZI EMİSYONLARININ AZALTILMASINA KATKISI VE ÇEVRESEL ETKİLERİ: ŞANLIURFA ÖRNEĞİ

MAHMUD ELABDULLAH

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışman: Prof. Dr. Güzel YILMAZ

Yıl: 2025, Sayfa : 64

Bu çalışma kapsamında, Şanlıurfa ili örneğinde tarımsal atıklardan elde edilebilecek biyokütle enerji potansiyeli hesaplanmış ve bu potansiyelin sera gazı emisyonlarının azaltılmasına olan katkısı analiz edilmiştir. 2023 yılı itibarıyla Şanlıurfa’da toplam tarımsal ürün üretimi 5.419.640 ton olarak belirlenmiş; buna bağlı olarak 4.653.570 ton Teorik Tarımsal Biyokütle Potansiyeli (TTBP) hesaplanmıştır. Bu biyokütleden yaklaşık 77.831.140 GJ Teorik Enerji Potansiyeli (TEP), 30.807.666 GJ Kullanılabilir Enerji Potansiyeli (KEP) ve 2.569.362 MWh Elektrik Enerjisi Eşdeğeri (EEeşd.) elde edilebileceği öngörülmüştür. Biyokütle enerjisi kullanımı sonucunda yalnızca 115.621 ton CO₂ eşdeğeri emisyon salımı gerçekleşirken, aynı miktarda enerjinin fosil yakıtlar olan kömür, petrol ve doğalgaz ile üretilmesi durumunda sırasıyla 2.281.591 ton, 1.883.340 ton ve 1.053.437 ton CO₂ eşdeğeri emisyon ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, bu tarımsal atıkların açık alanda yakılması halinde oluşabilecek emisyon miktarının 12.084.379 ton CO₂ eşdeğeri olduğu ve biyokütle enerjisi üretimiyle ortalama 4.210.066 ton CO₂ eşdeğeri emisyonun önlenebileceği belirlenmiştir. Bu azaltım miktarının çevresel eşdeğerleri değerlendirildiğinde; yaklaşık 63 milyon adet ağaç fidanının 10 yıl boyunca büyütülmesine, 1,35 milyon ton atığın geri dönüştürülerek bertaraf edilmesine veya 1.936.630 ton kömürün yakılmasının önlenmesine eşdeğer bir etki yaratmaktadır. Elde edilen bulgular, Şanlıurfa özelinde tarımsal atıkların enerjiye dönüştürülmesinin yalnızca enerji arzına katkı sağlamakla kalmayıp çevresel sürdürülebilirliğe ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik önemli fırsatlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: Tarım, Çevre, Atık, Biyokütle enerjisi, Sera gazı emisyonları

ABSTRACT

MASTER THESIS

TARIMSAL ATIKLARIN BİYOKÜTLE ENERJİ ÜRETİM POTANSİYELİNİN SERA GAZI EMİSYONLARININ AZALTILMASINA KATKISI VE ÇEVRESEL ETKİLERİ: ŞANLIURFA ÖRNEĞİ

MAHMUD ELABDULLAH

HARRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE EDUCATION
ENVIRONMENTAL ENGINEERING DEPARTMENT

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Güzel YILMAZ

Year: 2025, Page : 64

Within the scope of this study, the biomass energy potential derived from agricultural residues in Şanlıurfa province was calculated, and its contribution to the reduction of greenhouse gas emissions was analyzed. As of 2023, the total agricultural production in Şanlıurfa was determined to be 5,419,640 tons, resulting in a Theoretical Agricultural Biomass Potential (TABP) of 4,653,570 tons. From this biomass, approximately 77,831,140 GJ of Theoretical Energy Potential (TEP), 30,807,666 GJ of Usable Energy Potential (UEP), and 2,569,362 MWh of Electricity Equivalent (EEeq) are estimated to be obtainable. The use of biomass energy results in only 115,621 tons of CO₂ equivalent emissions, whereas producing the same amount of energy from fossil fuels such as coal, oil, and natural gas generates 2,281,591 tons, 1,883,340 tons, and 1,053,437 tons of CO₂ equivalent emissions, respectively. Furthermore, open burning of these agricultural residues would cause emissions amounting to 12,084,379 tons of CO₂ equivalent. It was determined that biomass energy production can prevent an average of 4,210,066 tons of CO₂ equivalent emissions. When these emission reductions are evaluated in terms of environmental equivalences, the impact is comparable to planting approximately 63 million tree seedlings and growing them for 10 years, recycling 1.35 million tons of waste, or preventing the combustion of 1,936,630 tons of coal. The findings indicate that converting agricultural residues to energy in Şanlıurfa not only contributes to energy supply but also offers significant opportunities for environmental sustainability and greenhouse gas emission reduction.

KEYWORDS: Agriculture, Environment, Waste, Biomass energy, Greenhouse gas emissions

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	2023 yılında küresel birincil enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı.	2
Şekil 1.2.	2023 yılında fosil yakıt tüketimine bağlı küresel sera gazı emisyonları (Milyar ton/yıl).	2
Şekil 1.3.	1880 ve 2024 yıllarında küresel ortalama sıcaklık artışı.	3
Şekil 1.4.	1880-2024 yılları arasında küresel deniz seviyesi yükselme oranı (mm).	3
Şekil 1.5.	Yenilenebilir enerji kaynakları.	4
Şekil 1.6.	Dünya 2010-2023 yılları arasında teknolojiye göre enerji maliyetinin değişimi (\$/kWh).	5
Şekil 1.7.	Biyokütle enerji üretimi ve yenilenebilirlik döngüsü.	6
Şekil 2.1.	2023 yılında Ankara ilinde ekilebilir tarım alanlarının ilçelere göre oransal dağılımı.	12
Şekil 2.2.	2023 yılında ürün grubuna göre Ankara ilinde ekilebilir tarım alanı ve oranı.	12
Şekil 2.3.	Ankara ilinin ilçelerine göre yıllık önlenen CO ₂ emisyonlarının dağılımı.	13
Şekil 2.4.	Çin'de 1996-2013 yılları arasında eyalet düzeyinde pirinç, buğday ve mısır samanının yakılmasından kaynaklanan CO ₂ emisyonunun göreceli oranları.	15
Şekil 3.1.	Şanlıurfa'nın haritası.	32
Şekil 4.1.	Şanlıurfa ili 2023 yılı tarımsal ürünlerine Ait ÜM, TTBP, TEP ve KEP dağılımı.	46
Şekil 4.2.	Şanlıurfa ili 2023 yılı Tarımsal Ürünlerinden Elde Edilebilecek EEeşd. dağılımı.	47
Şekil 4.3.	Şanlıurfa ili 2023 yılı tarımsal atıklardan elde edilen biyokütle enerjisinin CO ₂ eşdeğeri emisyonu ile aynı enerjinin kömür, petrol, doğalgaz ve açık alan yakımı yoluyla üretilmesi durumunda oluşabilecek emisyonların karşılaştırılması.	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. 2023 Yılında şanlıurfa ilinde ürün tipine göre tarımsal üretim miktarları ve alan dağılımı.	33
Çizelge 3.2. Literatürdeki farklı çalışmalarda belirlenen tarımsal atıkların AÜO, N, AID ve KO için minimum ve maksimum değerleri.	35
Çizelge 3.3. Bu çalışma için kabul edilen AÜO, N, AID ve KO ortalamaları	35
Çizelge 3.4. Elektrik üretim kaynaklarına göre emisyon faktörleri (EF).	39
Çizelge 3.5. 1 ton CO ₂ eşdeğeri emisyonun teknik eşdeğerlikleri.	40
Çizelge 3.6. Şanlıurfa ilinde hesaplanan Tarımsal Atık Miktarları (TAM) ve Alanları (A).	41
Çizelge 3.7. IPCC'ye göre açık alanda tarımsal atık yakımı için emisyon faktörleri (EF).	42
Çizelge 3.8. Sera gazlarına ait 100 yıllık Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) değerleri.	43
Çizelge 4.1. Şanlıurfa ili 2023 yılı tarımsal ürün ÜM ve tarımsal atıklardan elde edilebilecek TTBP, TEP, KEP ve EEeşd.	45
Çizelge 4.2. Tarımsal atıklardan elde edilebilecek biyokütle enerjisi ile fosil yakıt kullanımı ve açık alan yakımına kıyasla önlenebilecek ortalama yıllık CO ₂ eşdeğeri emisyon miktarları.	49
Çizelge 4.3. 4.210.066 ton CO ₂ eşdeğerinin çevresel ve enerji eşdeğerlikleri.	49

SİMGELER

\$	Dolar
A	Yüzey Alanı
g	Gram
N	Nem içeriği
η	Elektrik dönüşüm verimliliği

KISALTMALAR

AID	Alt ısııl değeri
AÜO	Atık/Ürün Oranı
BCO₂eşd.	Biyokütle kaynaklı CO ₂ eşdeğeri
BKA	Belediye Katı Atıkları
CHP	Birleşik Isı ve Güç (Combined Heat and Power)
CH₄	Metan
CO	Karbon monoksit
CO₂	Karbon dioksit
CO₂eşd.	Karbon dioksit eşdeğeri
DCO₂eşd.	Doğalgaz kaynaklı CO ₂ eşdeğeri
EEeşd.	Elektrik enerji eşdeğeri
EF	Emisyon faktörü
GAP	Güneydoğu Anadolu Projesi
GJ	Gigajoule
GWh	Gigawatt saat
ha	Hektar
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
IPCC	Hükûmetlerarası İklim Değişikliği Paneli
KCO₂eşd.	Kömür kaynaklı CO ₂ eşdeğeri
KEP	Kullanılabilir Enerji Potansiyeli
kg	kilogram
KIP	Küresel Isınma Potansiyeli
KIPCH₄	CH ₄ için Küresel Isınma Potansiyeli
KIPCO	CO için Küresel Isınma Potansiyeli
KIPCO₂	CO ₂ için Küresel Isınma Potansiyeli
KIPNO_x	NO _x için Küresel Isınma Potansiyeli
KIPN₂O	N ₂ O için Küresel Isınma Potansiyeli
km²	Kilometrekare
KO	Kullanabilirlik Oranı
kWh	Kilowatt Saat
LCA	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment)
MFA	Malzeme Akış Analizi (Material Flow Analysis)
MJ	Megajoule
mm	Milimetre
MW	Megawatt

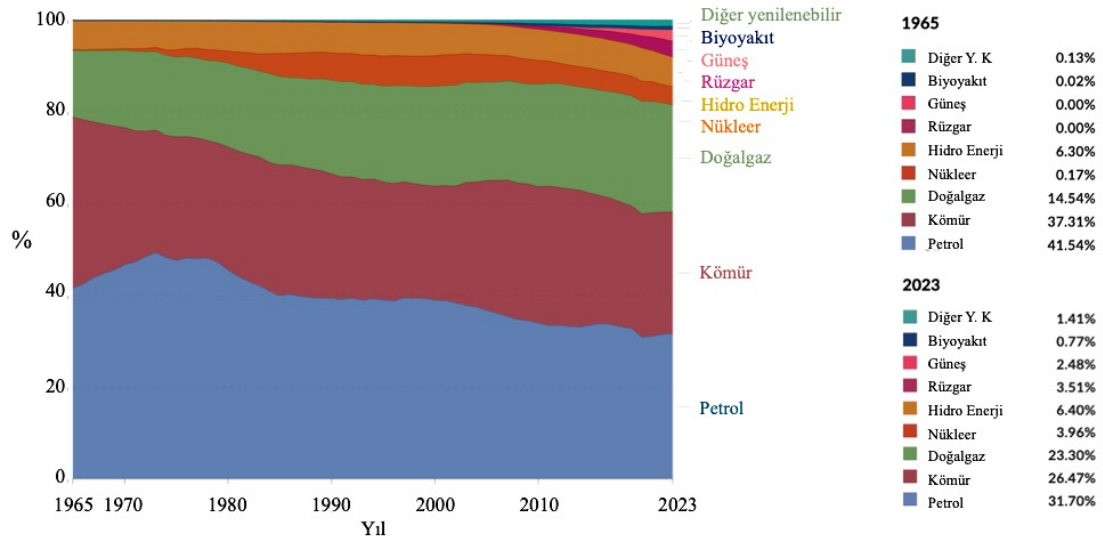
MWh	Megawatt Saat
NO_x	Azot oksitleri
N₂O	Diazot monoksit
Pg	Petagram (10 ¹⁵ gram)
SGT	Sera gazı tipi
SGTE	Sera gazı tipine göre emisyon
TAM	Toplam Atık Miktarı
TEP	Teorik Enerji Potansiyeli
TJ	Terajoule
TTBP	Teorik Tarımsal Biyokütle Potansiyeli
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
TWh	Terawatt saat
ÜM	Üretim Miktarı
YF	Yanma faktörü
YK	Yakıt kütlesi
°C	Santigrat derece

1. GİRİŞ

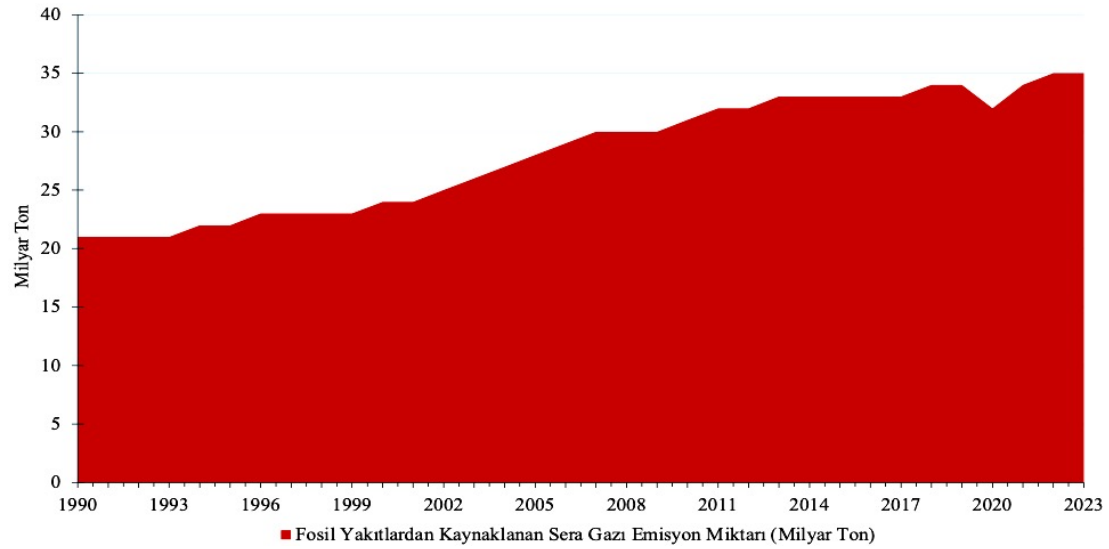
Sanayi Devrimi sonrasında hız kazanan nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler, kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların kullanımında dikkate değer bir artışa neden olmuş ve bu kaynaklara olan bağımlılığı önemli ölçüde artırmıştır. Ancak fosil yakıt rezervlerinin sınırlı oluşu ile bu kaynakların kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan çevresel etkilerin giderek daha görünür hâle gelmesi, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunların derinleşmesine yol açmaktadır. Bu gelişmeler, enerji üretiminde sürdürülebilir, çevreyle uyumlu ve yenilenebilir kaynaklara dayalı alternatif çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Günümüzde, yenilenebilir enerji kaynaklarının teşvik edilmesi; sera gazı emisyonlarının azaltılması, çevresel bozulmanın önlenmesi ve enerji arz güvenliğinin sağlanması açısından stratejik bir önem taşımaktadır (Abbasi ve Abbasi, 2011; Singh, 2021; Soeder, 2020).

Fosil yakıtların tarihçesi incelendiğinde, kömür kullanımının Antik Çağ'a kadar uzandığı, ancak sistematik madenciliğin 17. yüzyılda İngiltere'de başladığı görülmektedir. İlk başlarda yalnızca ısınma amacıyla kullanılan kömür, Sanayi Devrimi ile ekonomik yapının temelini oluşturan bir enerji kaynağı haline gelmiş ve buhar makinelerinin keşfiyle talebi büyük ölçüde artmıştır. 19. yüzyılda sanayileşmenin hızlanmasıyla birlikte kömür, sanayinin temel enerji kaynağı olarak yaygın şekilde kullanılmıştır. Bu süreçte fosil yakıtlar, sanayi makinelerinin çalıştırılması, elektrik üretimi, ısınma ve ulaşım gibi pek çok alanda vazgeçilmez hale gelmiş ve 19. yüzyıldan itibaren kullanımı giderek artmıştır (Simon, 2018).

2023 yılı itibarıyla dünya genelinde birincil enerji tüketiminin %31,7'si petrolden, %26'sı kömürden ve %23,3'ü doğal gazdan karşılanmış olup, fosil yakıtlar toplam enerji tüketiminin %81'ini oluşturmaktadır (Şekil 1.1) (Our World in Data, 2024a). Aynı yıl fosil yakıtların yakılması sonucu atmosfere yaklaşık 35 milyar ton sera gazı salındığı tahmin edilmektedir (Şekil 1.2) (Davenport ve Wayth, 2024). Bu emisyonlar, küresel sıcaklık artışı, deniz seviyelerinin yükselmesi, ekosistem dengesizlikleri ve aşırı hava olaylarının sıklığında artış gibi ciddi çevresel sorunlara neden olmaktadır (Bessou vd., 2011; Das ve Swain, 2024; Warrick vd., 1996).



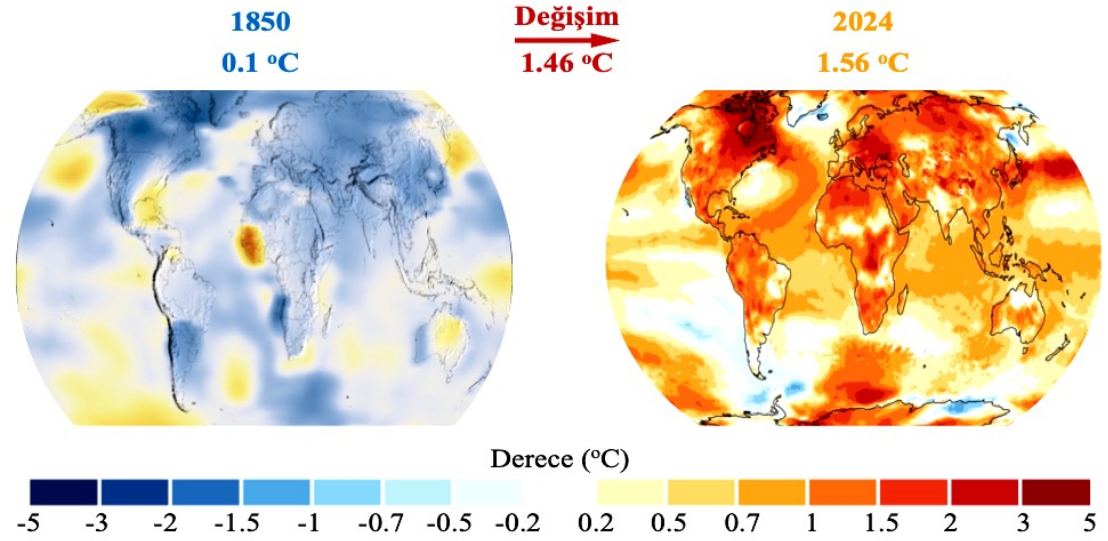
Şekil 1.1. 2023 yılında küresel birincil enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı.



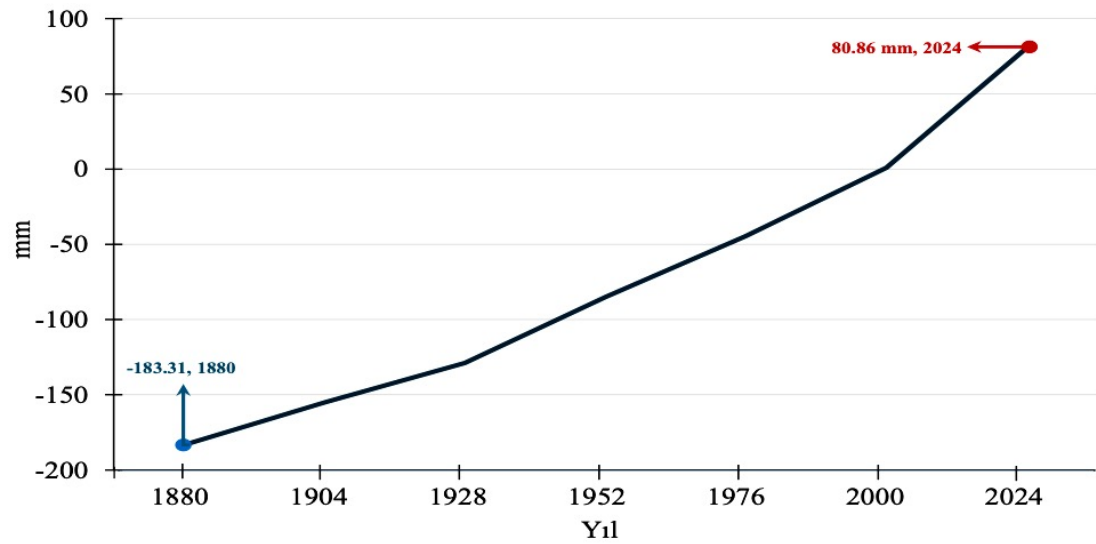
Şekil 1.2. 2023 yılında fosil yakıt tüketimine bağlı küresel sera gazı emisyonları (Milyar ton/yıl).

1850 yılında küresel ortalama sıcaklık artışı $0,1^{\circ}\text{C}$ seviyesindeyken, 2024 yılı itibarıyla bu artış $1,56^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmış ve toplam sıcaklık değişimi $1,46^{\circ}\text{C}$ olarak kaydedilmiştir (Şekil 1.3) (The Copernicus Climate Change Service (C3S), 2024). Benzer şekilde, deniz seviyelerindeki yükselme 88,86 mm olarak ölçülmüş ve bu durum kıyı bölgelerinde ekolojik dengeyi bozarak sosyo-ekonomik riskleri artırmıştır (Şekil 1.4) (Climate.gov, 2024). Fosil yakıt kullanımının yoğunluğu, çevresel kirliliği artırarak insan sağlığını tehdit etmekte ve ekosistemlerin sürdürülebilirliğini riske atmaktadır. Bu nedenle, enerji üretimi ile çevresel etkiler arasındaki dengenin sağlanması, sürdürülebilir bir gelecek için kaçınılmaz bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır (Açıkalin, 2018; Paşa, 2021; Perera, 2017). Sonuç olarak, fosil yakıtların kullanımı ve yakılmasıyla ortaya çıkan sera gazı emisyonları, günümüzde iklim

değişikliğinin en büyük tetikleyicisi haline gelmiştir.



Şekil 1.3. 1880 ve 2024 yıllarında küresel ortalama sıcaklık artışı.

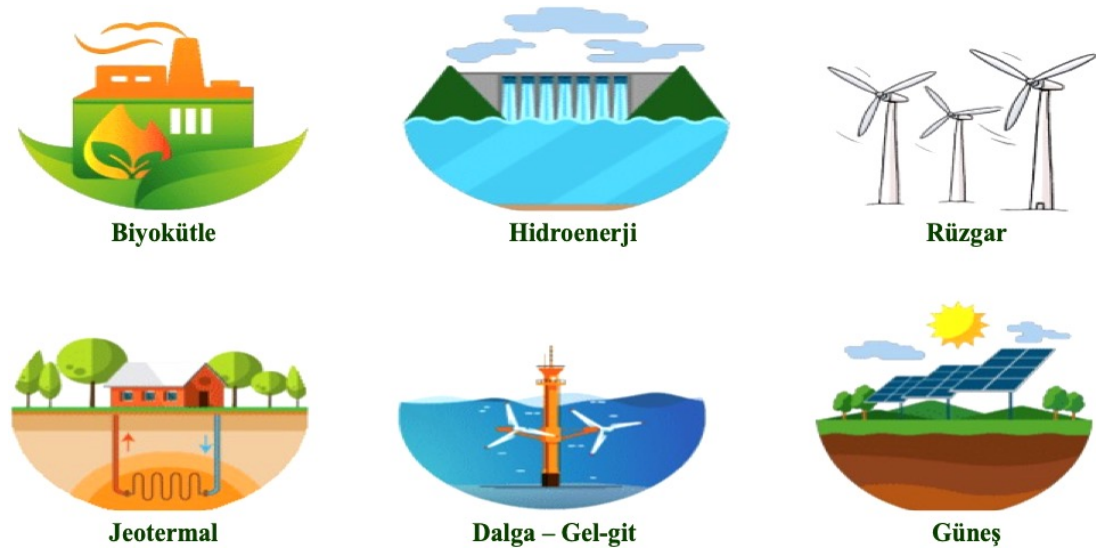


Şekil 1.4. 1880-2024 yılları arasında küresel deniz seviyesi yükselme oranı (mm).

Enerji üretiminde fosil yakıtların kullanımı, elektrik ve ısınma ihtiyaçlarının karşılanmasının yanı sıra ilaç, çelik, çimento ve plastik gibi endüstriyel ürünlerin üretimi ile tarımsal faaliyetlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu süreçler, karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve diazot monoksit (N₂O) gibi sera gazlarının atmosfere salınmasına neden olmaktadır. Bu emisyonları azaltmak için enerji sistemlerinin, sanayinin ve tarımsal üretimin sürdürülebilir şekilde dönüştürülmesi gerekmektedir. Ayrıca, küresel ölçekte enerji yoksulluğu, düşük yaşam standartları ve yetersiz beslenme gibi sorunlarla mücadele edilmesi de büyük önem taşımaktadır (Chandak vd., 2015; Gutowski vd., 2013; Temur, 2017). Bu sorunların çözümüne

yönelik olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretiminde daha yaygın kullanımı kritik bir adımdır.

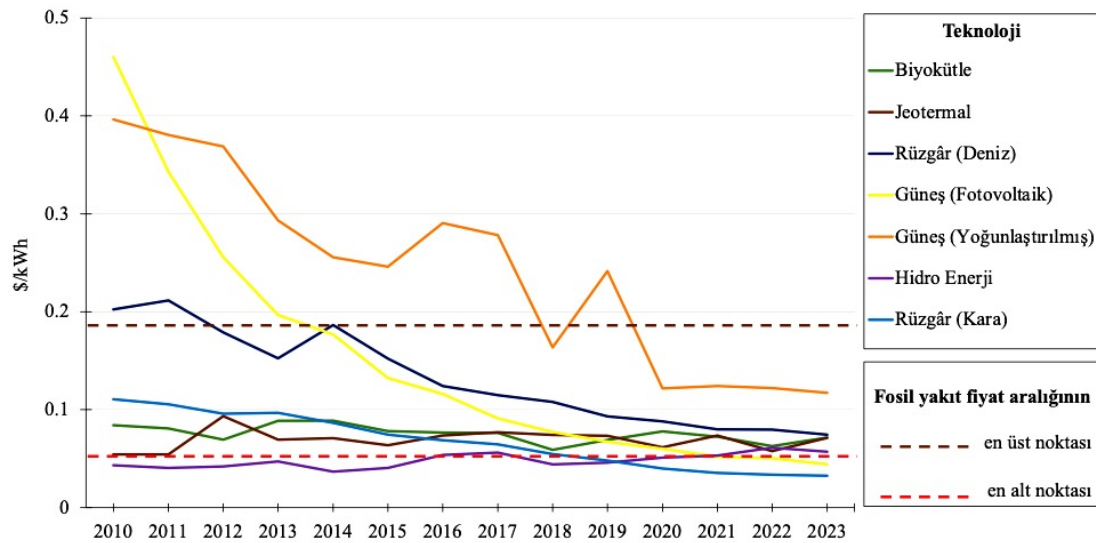
Yenilenebilir enerji, doğal süreçler yoluyla sürekli olarak yenilenen kaynaklardan elde edilen enerjidir. Bu enerji türleri arasında güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle, jeotermal, dalga ve gel-git enerjisi bulunmaktadır (Şekil 1.5) (Gülay, 2008; Ökten, 2023; Taç Altuntaşoğlu, 2005). Yenilenebilir enerji tesisleri, büyük ölçekli sanayi kullanımları için uygun olabileceği gibi, küçük ölçekli yerel uygulamalara da entegre edilebilir. Hem kentsel hem de kırsal alanlarda kullanılabilen bu enerji kaynakları, genellikle elektrifikasyon süreçleriyle birlikte değerlendirildiğinde ısıtma, ulaşım ve sanayi gibi alanlarda verimli bir enerji taşıma sistemi sunmaktadır (Armaroli ve Balzani, 2011, 2016). Rüzgâr, güneş, dalga ve gel-git enerjisi gibi dalgalanan doğaya sahip yenilenebilir enerji kaynakları kesintili üretim özelliklerine sahipken, barajlı hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal enerji gibi kontrol edilebilir yenilenebilir kaynaklar daha stabil ve kesintisiz enerji üretimi sağlayabilmektedir (Infield & Freris, 2020).



Şekil 1.5. Yenilenebilir enerji kaynakları.

Enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, fosil yakıtlarla kıyaslandığında daha düşük sera gazı salınımı, daha az hava kirliliği üretmekte ve çevresel etkileri olumlu yönde dönüştürmektedir (Dikmen, 2019; Ehrlich vd., 2022; Erdoğan, 2020; Lund, 2014; Quaschnig, 2019). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), 2050 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşmak için küresel elektrik üretiminin %90'ının yenilenebilir kaynaklardan sağlanması gerektiğini öngörmektedir. (IEA, 2024). Ayrıca, son yıllarda yenilenebilir enerji sistemlerinin teknolojik

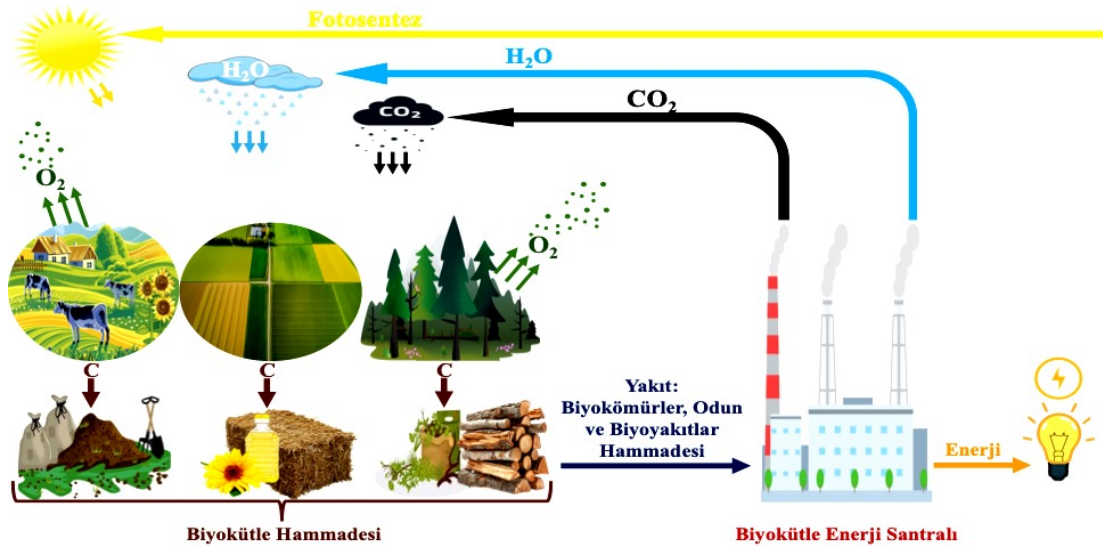
maliyetlerinde büyük bir düşüş yaşanmış, bu da bu enerji kaynaklarının kullanımını daha yaygın ve ekonomik hale getirmiştir (Şekil 1.6) (Our World in Data, 2024b).



Şekil 1.6. Dünya 2010-2023 yılları arasında teknolojiye göre enerji maliyetinin değişimi (\$/kWh).

Yenilenebilir ve düşük sera gazı salınımına sahip enerji üretimi bağlamında biyokütle enerjisi, çevresel ve enerji verimliliği açısından önemli bir rol oynamaktadır. Biyokütle enerjisi tükenmeyen ve sürekli olarak yetiştirilebilen bir enerji türüdür. Biyokütle enerjisi, bitki, hayvansal ürünler ve bazı sanayi ve belediye atıklarından elde edilen bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Fosil yakıtlara (özellikle petrol, gaz ve kömür) olan bağımlılığı azaltır ve bu tükenbilir kaynaklardan atmosfere karbon salınımını engeller. Biyokütle enerjisinin karbon nötr olma potansiyeli vardır; bu, üretim sürecinin atmosfere saldığı karbonu, büyüme, taşıma, işleme ve yakma gibi aşamalarda atmosfere tekrar salınan aynı miktarda karbon ile dengelenmesi durumunda gerçekleşebilir (örneğin, kanola ile üretilen etanolün büyümesi için gerekli olan karbonu salarken, aynı miktarda karbonu atmosferden alması).

Biyokütleyi enerji kaynağı olarak kullanmanın en büyük avantajlarından biri, onun yenilenebilir olmasıdır. Bu, karbon döngüsünün kapalı olduğu ve biyokütlenin temiz bir enerji kaynağı sunduğu anlamına gelir. Biyokütleden salınan karbondioksit, bir sonraki ürünle tekrar yakalanır (Şekil 1.7) (Işık ve Yavuz, 2022; Kumar ve Gayen, 2011). Çevre ve iklim değişikliği açısından sağlanan faydalar ise, tarımsal atıkların açık alanda yakılmasından veya tarlada çürümeye bırakılmasından kaynaklanan büyük CO₂ ve metan salınımlarının engellenmesiyle elde edilebilir.



Şekil 1.7. Biyokütle enerji üretimi ve yenilenebilirlik döngüsü.

Biyokütle kaynakları ve besleme maddeleri, enerji üretimi için özel olarak yetiştirilen enerji mahsulleri, tarımsal ürün artıkları, orman atıkları, yosunlar, odun işleme atıkları, belediye atıkları ve ıslak atıkları içermektedir. Bu kaynaklar, tarım atıkları, orman artıkları, amaçla yetiştirilen otlar, odunsu enerji bitkileri, yosunlar, sanayi atıkları, ayrıştırılmış belediye katı atıkları, kentsel odun atıkları ve gıda atıkları gibi çeşitli biyokütle besleme stoklarından elde edilebilir. Biyokütle kaynakları, farklı biyokütle enerji üretim teknikleri ile enerjiye, elektrik ve ısıya, çeşitli ince kimyasallara ve biyoyakıtlara dönüştürülebilir. Biyokütle temel kaynakları şunlardır (EIA, 2025):

- Özel enerji bitkileri: Otsu enerji bitkileri (switchgrass, miscanthus, bambu, tatlı sorgum, vb.). Odunsu enerji bitkileri (melez kavak, melez söğüt, gümüş akçağaç, doğu pamuk ağacı, vb.).
- Tarımsal ürün artıkları: Mısır sapları, buğday samanı, yulaf samanı, arpa samanı, pirinç samanı, vb.
- Orman atıkları: Kereste hasadından sonra kalan dal, tepe ve kesilmesi mümkün olmayan ağaçlar.
- Yosunlar: Mikroalgler, makroalgler (deniz yosunu), siyanobakteriler.
- Odun işleme atıkları: Talaş, kabuk, dal, yaprak/igne gibi odun işleme yan ürünleri.

- Belediye katı atıkları (BKA): Bahçe atıkları, kağıt, plastikler, lastikler, gıda atıkları, vb.

- Islak atık: Gıda atıkları, organik zengin biyosolidler, hayvancılık gübresi çamurları, sanayi organik atıkları, biyogaz.

Biyokütle, çeşitli dönüşüm yöntemleriyle daha verimli ve kullanışlı enerji kaynaklarına dönüştürülebilir. Bu dönüşüm yöntemleri üç ana kategoriye ayrılır: termal, kimyasal ve biyokimyasal. Termal dönüşümde, biyokütle yüksek sıcaklıklarda işlenerek farklı enerji türlerine dönüştürülür; örneğin, torefaksiyonla odun ve tarımsal atıklar enerji yoğunluğu artırılmış biyokütleyle, pirolizle biyoyağ, odun kömürü, metan ve hidrojen gibi ürünlere, gazlaştırmayla ise sentez gazına dönüştürülür. Kimyasal dönüşümde, Fischer-Tropsch süreci ile sentez gazından sentetik dizel ve jet yakıtı üretilirken, transesterifikasyon yöntemiyle bitkisel ve hayvansal yağlardan biyodizel elde edilir. Biyokimyasal dönüşümde ise, fermentasyonla şeker ve nişasta içeren biyokütleden biyoetanol, anaerobik sindirimle hayvansal ve organik atıklardan biyogaz ve biyometan, kompostlama yöntemiyle ise organik atıklardan tarımsal gübre elde edilir.

Günümüzde biyokütle enerjisinin en büyük kaynağını odun, odun kalıntıları ve tarımsal atıklar oluşturmaktadır. Dünya genelinde yıllık olarak yaklaşık 140 Pg tarımsal biyokütle atığı üretilmektedir; bu miktar, yaklaşık 50 milyar ton petrole eşdeğerdir. Bu atıklar, doğal kaynakların sürdürülebilir şekilde kullanılmasına olanak tanıyan önemli bir enerji kaynağıdır. Tarımsal atıklar, tarım faaliyetleri sırasında üretimden arta kalan ve genellikle atıl kalan organik materyalleri ifade eder. Bu biyokütle, genellikle ürünlerden kalan saplar, yapraklar, kökler, tohumlar ve tohum kabuklarından oluşur. Yaygın örnekler arasında buğday ve pirinç samanı, bagas, tohum kabukları ve kereste işleme atıkları yer alır (Chandak vd., 2015). Bu atıklar, doğrudan yakıt olarak kullanılabileceği gibi, pelet yakıtı, biyogaz üretimi veya diğer yakıt formlarına dönüştürülebilir. Tarımsal biyokütle, fosil yakıtların yerine geçebilecek yenilenebilir bir enerji kaynağı sunarak, enerji üretiminde çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahiptir. Özellikle, bu atıkların enerjiye dönüştürülmesi, sera gazı emisyonlarını düşürerek küresel ısınmanın önlenmesine katkıda bulunabilir. Ayrıca, tarımsal atıklardan enerji üretimi, tarımsal alanlarda daha verimli kaynak kullanımını sağlar, ekonomik kalkınmayı destekler ve yerel enerji güvenliğini artırır.

Bu bağlamda, Şanlıurfa ili, tarımsal üretim açısından önemli bir bölge olup,

buğday, arpa, pamuk ve sebze gibi birçok tarım ürünü yetiştirilmektedir (Benek, 2006; Gürsoy, 2012). Bu ürünlerin işlenmesi ve tarımsal faaliyetler sırasında ortaya çıkan biyokütle atıkları, potansiyel bir enerji kaynağı olarak değerlendirilebilir. Özellikle atık tarımsal biyokütle, yerel enerji üretiminde önemli bir rol oynayabilir ve çevresel sürdürülebilirliği destekleyebilir.

Bu tez çalışmasında, Şanlıurfa ilindeki tarımsal atıkların biyokütle enerji üretimi potansiyeli analiz edilerek, bu potansiyelin sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkıları ve çevresel etkileri incelenmektedir. Bu kapsamda, tarımsal atıkların enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilecek faydalar ve bu süreçlerin çevresel sürdürülebilirliğe olan katkıları değerlendirilecektir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Şanlıurfa ilindeki tarımsal atıklardan biyokütle enerjisi üretim potansiyelinin analizi ve bu potansiyelin sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkısının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Tarımsal üretimden çıkan büyük miktardaki biyokütle atıkları, yenilenebilir enerji üretimi için önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Fosil yakıtların çevresel etkilerinin arttığı günümüzde, bu atıkların biyokütle enerjisine dönüştürülmesi, hem enerji üretim kapasitesini artırmak hem de çevreye olan olumsuz etkileri azaltmak için önemli bir çözüm sunmaktadır. Bu kapsamda, Şanlıurfa'daki biyokütle enerjisi üretiminin çevresel etkileri ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasındaki rolü ele alınacaktır.

Tarımsal atıkların anız yakma yöntemleriyle bertaraf edilmesinin yol açtığı sera gazı emisyonları salınımı sorununun çözülmesi, biyokütle enerji üretiminin sunduğu potansiyellerle incelenecektir. Biyokütle enerjisinden elde edilen elektrik üretiminin, fosil kaynaklı enerji üretimine kıyasla sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde düşürebileceği tespit edilecektir. Ayrıca, biyokütle enerjisi üretiminin çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlama yolları ve Şanlıurfa özelindeki en verimli kullanım yöntemleri üzerinde öneriler geliştirilecektir.

1.2. Çalışmanın Önemi

Bu çalışma, Şanlıurfa ilindeki tarımsal atıklardan biyokütle enerjisi üretiminin, fosil yakıt kullanımının çevresel etkilerini azaltma ve sera gazı emisyonlarını düşürme potansiyelini incelemektedir. Şanlıurfa, tarıma dayalı ekonomik yapısı nedeniyle her yıl büyük miktarda atık üretmektedir ve bu atıkların biyokütle enerjisine dönüştürülmesi, bölgesel ve ulusal enerji talebine katkı

sağlamakla birlikte çevresel etkileri azaltmaya da yardımcı olmaktadır. Fosil yakıtların neden olduğu çevresel sorunlar, özellikle sera gazları ve küresel ısınma üzerindeki etkileri giderek daha belirgin hale gelmektedir. Bu bağlamda, tarımsal biyokütle enerjisi, sürdürülebilir enerji üretimi ve çevre koruma açısından önemli bir alternatif oluşturmaktadır.

Araştırma, anız yakma gibi zararlı uygulamaların önlenmesi için yerel çözümler geliştirmeyi hedeflemektedir. Tarımsal atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi, çevresel etkilerin olumlu yönde iyileştirilmesini sağlayacaktır. Ayrıca, fosil yakıt kullanımından kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının azaltılmasına biyokütle enerjisinin katkıları da değerlendirilecektir. Çalışma, Şanlıurfa'daki tarımsal biyokütle atıklarının enerji üretim potansiyelini inceleyerek, çevresel sürdürülebilirliği artırmaya yönelik somut çözüm önerileri sunmayı amaçlamaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Biyokütle enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde çevresel sürdürülebilirlik ve enerji arz güvenliği açısından önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Tarımsal üretim faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan organik nitelikli atıkların enerji üretiminde kullanılması, hem atık yönetimi açısından bir çözüm sunmakta hem de fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Tarımsal atıkların enerjiye dönüştürülmesi yoluyla elde edilen biyokütle enerjisi, özellikle sera gazı emisyonlarının azaltılmasında etkin bir rol oynamakta, aynı zamanda kırsal kalkınma ve yerel ekonomik faaliyetlerin desteklenmesine olanak tanımaktadır. Türkiye'nin önemli tarımsal üretim merkezlerinden biri olan Şanlıurfa ili, sahip olduğu yüksek biyokütle potansiyeli ile bu alandaki uygulamalar için uygun bir örnek teşkil etmektedir. Literatürde biyokütle enerjisinin çevresel etkileri, sera gazı salınımlarının azaltılması üzerindeki etkileri ve ekonomik katkılarına yönelik çok sayıda çalışma yer almakta olup, söz konusu çalışmalar bu enerji türünün sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, bu bölümde tarımsal atıklardan biyokütle enerjisi elde edilmesine yönelik gerçekleştirilen önceki araştırmalar incelenerek, mevcut literatürdeki yaklaşımlar bilimsel bir bakış açısıyla değerlendirilecektir.

Li (2022) çalışmasında, Çin'in tarımsal atıklarının biyokütle enerjisine dönüştürülerek sera gazı emisyonlarının azaltılma potansiyelini incelemiştir. Çin'de tarımsal faaliyetler ve kırsal yaşam büyük miktarda sera gazı salımına neden olmakta ve mahsul yetiştirme, üretim ve işleme süreçlerinde önemli miktarda tarımsal atık ortaya çıkmaktadır. Çalışmada, 2009-2018 yılları arasındaki istatistiksel veriler analiz edilerek, Çin'deki tarımsal biyokütle kaynaklarının toplam miktarı ve sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeli hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, bu dönemde tarımsal atıkların standart kömür eşdeğeri 280,0711 milyon ton olarak belirlenmiş ve eğer tamamı kömür yerine kullanılsaydı, 4,474,483 milyon ton karbon dioksit salımı önlenebilirdi. Ayrıca, bu atıkların anaerobik işlemlerle, karbonizasyonla veya yakıt olarak tamamen yakılması durumunda metan (CH_4) emisyonlarının 12,024 milyon ton, azot oksit (N_2O) emisyonlarının ise 185,000 ton azaltılabileceği hesaplanmıştır. Bu veriler, tarımsal biyokütle kaynaklarının etkin kullanımının kömür tüketimini azaltarak CO_2 , CH_4 ve N_2O emisyonlarını düşürebileceğini ve karbon nötrlüğüne katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Yu ve ark. (2023) araştırmalarında, Çin-Jiangxi Eyaleti'ndeki tarımsal atık sistemini inceleyerek sera gazı azaltımına yönelik en etkili kullanım yöntemlerini

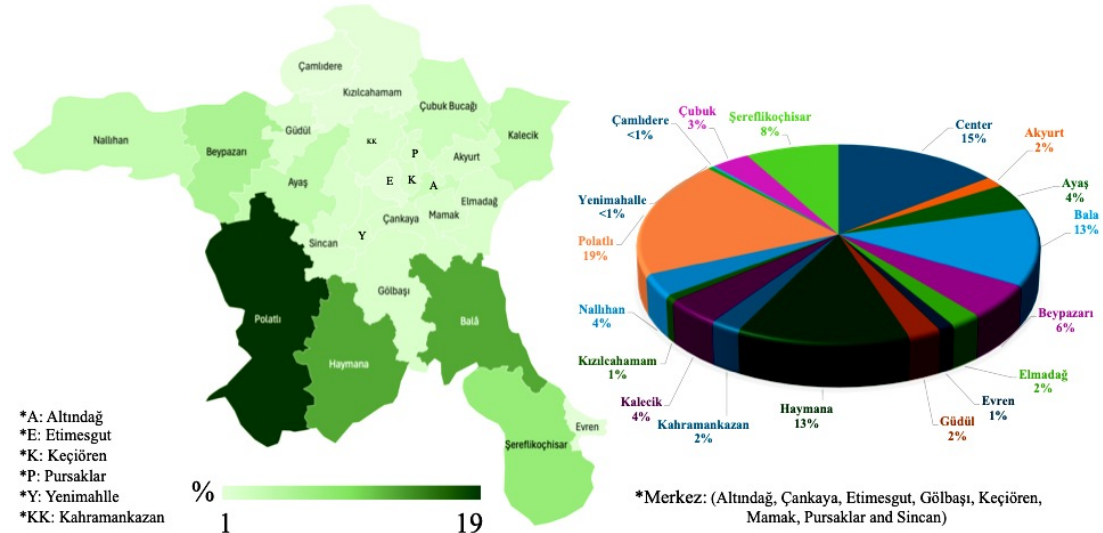
analiz etmiştir. 2020 yılı verilerine dayalı olarak Malzeme Akış Analizi ‘‘Material Flow Analysis’’ (MFA), Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ‘‘Life Cycle Assessment’’ (LCA) ve optimizasyon modelleri uygulanmıştır. Sonuçlar, biyogaz tesislerinde saman ve hayvan gübresinin birlikte işlenmesinin sera gazı azaltımına en büyük katkıyı sağladığını göstermektedir. Tarımsal atık kullanım oranının artırılmasıyla sera gazı azaltım potansiyelinin yaklaşık 3,3 kat arttığı belirlenmiş, optimizasyon modeline göre Jiangxi’de maksimum sera gazı azaltım kapasitesi $16,44 \times 10^8$ ton CO₂eqd. olarak hesaplanmıştır. Çalışma, enerji dönüşümünün sera gazı azaltımında temel bir faktör olduğunu vurgularken, biyokütle enerji tesislerinin kapasitesinin artırılması ve düşük maliyetli yakıt teknolojilerinin uygulanması gerektiğini önermektedir.

Avcıoğlu ve ark. (2019) çalışmalarında, Türkiye’deki tarımsal biyokütle artıklarının enerji potansiyelini değerlendirmiştir. Araştırmada, çeşitli ülkelerde yapılan çalışmalar kullanılarak Türkiye’deki tarımsal artıkların teorik ve kullanılabilir enerji potansiyeli hesaplanmıştır. 2015 yılı verilerine göre, tarla bitkilerinden 59.432 kiloton ve bahçe bitkilerinden 15.652 kiloton artık elde edilmiştir. Tarla bitkileri arasında en yüksek biyokütle miktarı buğday, mısır ve arpadan sağlanırken, bahçe bitkilerinde fındık, zeytin ve üzüm öne çıkmıştır. Teorik enerji potansiyeli tarla bitkileri için 908.119 TJ, bahçe bitkileri için 90.354 TJ olarak hesaplanmış, kullanılabilir enerji potansiyeli sırasıyla 298.955 TJ ve 65.491 TJ olarak belirlenmiştir. Araştırmada, biyokütle artıklarının enerji üretiminde kullanılabilirliğinin coğrafi konum, mahsul verimi, hasat yöntemleri ve mevcut kullanım alanları gibi faktörlere bağlı olduğu vurgulanmış, Türkiye’deki tarımsal biyokütle artıklarının enerji üretimi açısından değerlendirilme potansiyelinin mevcut kullanım alışkanlıkları nedeniyle düşük kaldığı belirtilmiştir.

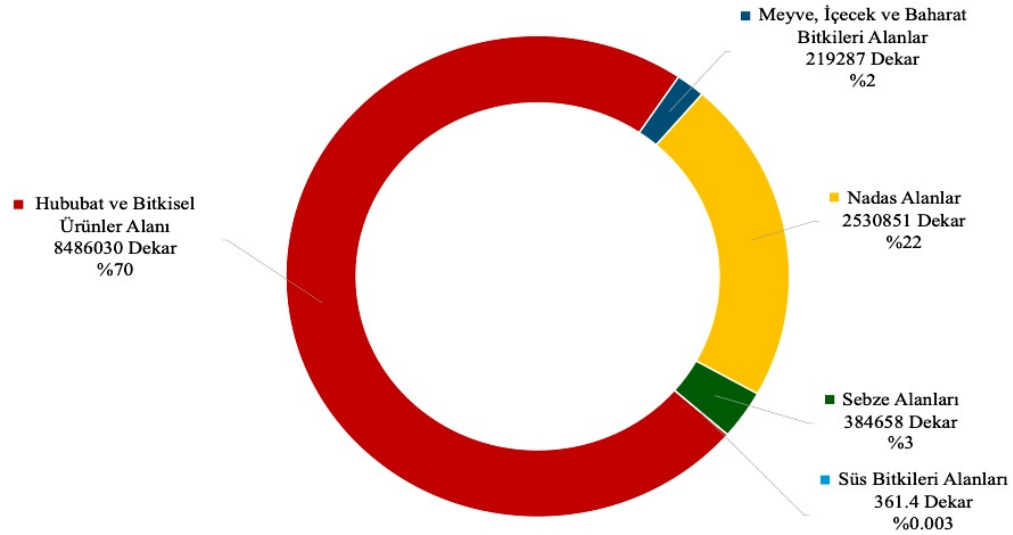
Akyürek (2019) tarafından yapılan araştırmada, Türkiye’nin Akdeniz Bölgesi’nde tarımsal atıkların ve belediye katı atıklarının biyogaz üretimi yoluyla enerji potansiyeli ve sera gazı emisyonlarını azaltma etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında bu atıklardan yıllık 1.942,6 milyon m³ biyogaz üretilbileceği ve bunun 11,11 TWh enerji üretim kapasitesine karşılık geldiği hesaplanmıştır. Elde edilen biyogazın fosil yakıt yerine kullanılmasıyla yıllık 27 milyon ton CO₂ emisyonu azaltımı sağlanabileceği belirlenmiştir.

Alahmad ve Taşkesen (2024) çalışmalarında, Ankara ilindeki hayvansal ve tarımsal atıklardan biyokütle enerjisi üretim potansiyelini hesaplamışlardır (Şekil 2.2 ve 2.3). Araştırma, 2023 yılına ait TÜİK verilerini kullanarak, hayvansal

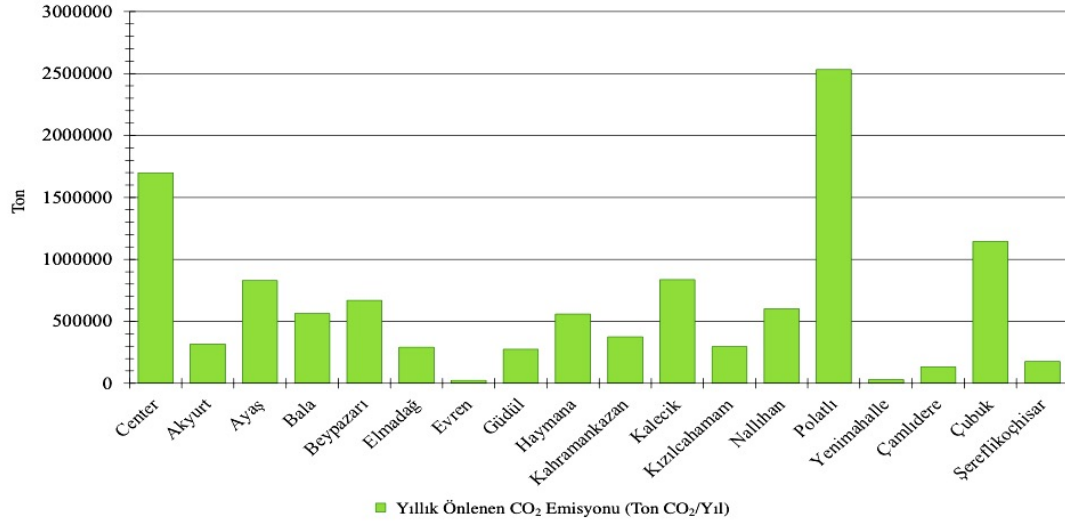
atıklardan yıllık 15.223.395 MWh, tarımsal atıklardan ise 4.146.518 MWh elektrik üretilbileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, bu biyokütle enerjisi kaynaklarından yıllık 11.352.833 ton CO₂ emisyonunun önleneyeği hesaplanmıştır (Şekil 2.4). Çalışmada, biyogaz üretiminin enerji üretimi ile sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeli vurgulanmış ve biyokütle enerjisinin çevreye sağladığı önemli katkılar ele alınmıştır.



Şekil 2.1. 2023 yılında Ankara ilinde ekilebilir tarım alanlarının ilçelere göre oransal dağılımı.



Şekil 2.2. 2023 yılında ürün grubuna göre Ankara ilinde ekilebilir tarım alanı ve oranı.



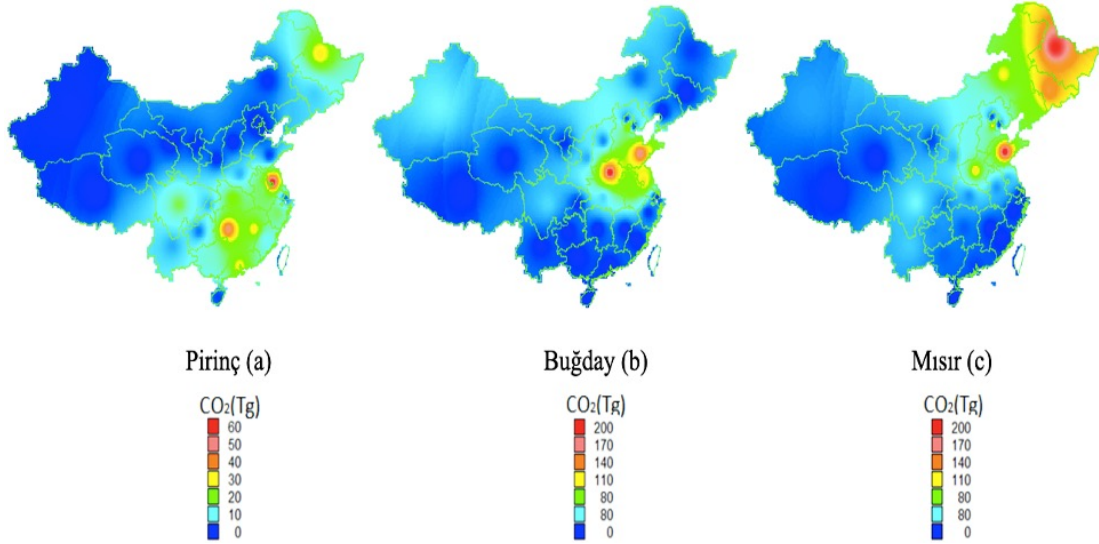
Şekil 2.3. Ankara ilinin ilçelerine göre yıllık önlenebilir CO₂ emisyonlarının dağılımı.

Fitri ve ark. (2023) çalışmalarında, Batı Nusa Tenggara (BNT) bölgesinde tarımsal üretimden kaynaklanan atıkların biyokütle enerjisi üretimi açısından potansiyeli değerlendirilmiştir. Araştırmada, pirinç samanı, mısır samanı ve mısır kozalaklarının sırasıyla %85,91, %82,26 ve %88,25 oranında atık üretimine katkı sağladığı belirlenmiştir. BNT bölgesinde bu tarımsal atıklardan elde edilebilecek toplam ısı değerinin 42,4 PJ seviyesine ulaşabileceği öngörülmektedir. Çalışmada ayrıca, tarımsal atıkların biyoyakıt üretimi için önemli bir kaynak olduğu ve biyokütle enerjisine dönüştürülmesinin fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak sera gazı emisyonlarını düşürebileceği vurgulanmaktadır. Özellikle pirinç samanının açık alanda yakılmasının yüksek CO₂ emisyonuna neden olduğu belirtilmiş ve bu tür atıkların enerjiye dönüştürülmesinin çevresel etkileri minimize ederek sürdürülebilir enerji yönetimine katkı sağlayabileceği ifade edilmiştir.

Weldemichael ve Assefa (2016) çalışmalarında, Alberta'nın biyokütle kaynaklarının enerji üretimi ve sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyelini incelemişlerdir. Çalışma, Alberta'nın biyokütle kaynaklarının 458 PJ enerji potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymakta ve bu kaynakların kullanımıyla, 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarının %11-15 oranında azaltılabileceği ve toplam enerji talebinin %14-17'sinin biyokütle ile karşılanabileceği sonucuna varmaktadır. Ayrıca, biyokütle, Alberta'nın toplam elektrik tüketiminin %29'unu veya toplam iç yükünün %28'ini karşılayabilir. Araştırma, biyokütle temelli enerji üretiminin çevresel etkileri azaltma ve enerji talebini karşılama açısından önemli bir fırsat sunduğunu vurgulamaktadır. Yazarlar, biyokütlenin enerji stratejileri geliştirilirken dikkate alınması gereken bir kaynak olduğunu belirtmişlerdir.

H. Li ve ark. (2019) çalışmalarında, Çin'in tarıma dayalı eyaletlerinden biri olan Anhui'deki biyokütle enerji santrallerinin mevcut durumunu ve sera gazı emisyonları azaltım etkilerini incelemişlerdir. 2016 yılı itibarıyla, Anhui Eyaleti'nde toplam 23 adet saman tabanlı biyokütle santrali kurulmuş olup, bu santrallerin toplam kapasitesi 6560 MW'ye ulaşmıştır. Çalışmada, biyokütle üretiminin 2016 yılında 41.84 milyon ton olduğu ve bu üretimin coğrafi olarak heterojen bir şekilde dağıldığı vurgulanmıştır. Ayrıca, biyokütle enerji santrallerinin kurulu kapasitesinin biyokütle kaynaklarıyla uyumsuz olduğu belirtilmiştir. Anhui'deki biyokütle santralleri, 2016 yılında yaklaşık 3.44 milyon ton CO₂eşd. sera gazı emisyonunu azaltmıştır. Bu tür santrallerin büyük ölçekli gelişimi, özellikle biyokütle yoğunluğunun düşük olduğu bölgelerde gelecekteki zorlukları beraberinde getirmektedir.

Sun ve ark. (2016) çalışmalarında, Çin'de tarımsal ürün artıklarının açık alanda yakılmasının CO₂ emisyonlarına etkisini incelemiştir. Araştırmada, pirinç, buğday ve mısır saplarının laboratuvar ölçümlerine dayalı CO₂ emisyon faktörleri kullanılarak, 1996-2013 yılları arasındaki emisyon miktarı hesaplanmıştır. Coğrafi bilgi sistemleri (GIS) yardımıyla 31 eyaletteki emisyon dağılımı belirlenmiş ve mekânsal dağılım, 5 yıllık ortalama değişim ve ana tarımsal artık türlerinin katkıları analiz edilmiştir (Şekil 2.5). Çalışma, tarımsal artıkların açık alanda yakılmasının 2707,34 Tg CO₂ salınımına neden olduğunu ve bu miktarın 1996-2013 yılları arasındaki toplam konut kömürü tüketiminin %45,09'una denk geldiğini ortaya koymuştur. Emisyonların özellikle Shandong, Henan, Jiangsu, Hebei ve Heilongjiang eyaletlerinde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Araştırma, sera gazı emisyonlarını azaltmak için üç temel öneride bulunmuştur: (i) tarımsal artıkların tarlaya geri kazandırılması, (ii) biyokütle kullanım verimliliğinin artırılması ve (iii) biyokütle enerjisinin ticarileştirilmesi. Çalışma ayrıca, farklı bölgelerde tarımsal artıkların bileşenlerindeki farklılıkların CO₂ emisyon tahminlerinde belirsizliklere yol açabileceğini ve daha sağlıklı politika oluşturabilmek için veri toplama süreçlerinin iyileştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.



Şekil 2.4. Çin'de 1996-2013 yılları arasında eyalet düzeyinde pirinç, buğday ve mısır samanının yakılmasından kaynaklanan CO₂ emisyonunun göreceli oranları.

Matsumura ve ark. (2005) çalışmalarında, Japonya'daki tarımsal atıkların enerji kaynağı olarak kullanımını ele almaktadır. Çalışma, pirinç samanı ve pirinç kabuğu gibi başlıca tarımsal atıkların üretim miktarları ve kullanılabilirlikleri üzerine odaklanmıştır. Çalışma, bu atıkların enerji üretiminde ne kadar kullanılabileceğini, maliyetlerini ve sera gazı emisyonlarını değerlendirmektedir. Pirinç atığı yıllık 12 milyon ton kuru üretim potansiyeline sahipken, bu atıkların enerji üretiminde kullanılması için küçük ölçekli santrallerde bile yılda sadece 2 ay süreyle çalışabileceği belirtilmiştir. Elde edilen elektrik, Japonya'nın toplam elektrik talebinin %0.47'sini karşılamakta ve maliyeti, mevcut elektrik fiyatlarının iki katı olmaktadır. Ayrıca, bu atıkların kullanımı ile elde edilen ısının, Japonya'da ağır yağ ile sağlanan ısının %10'unu karşılayacağı belirtilmiştir. Ancak, bu tür bir enerji üretimi için mali teşvikler ve verimli teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Çalışma, Japonya'nın 2010 sonrası tarımsal atıkların verimli kullanımına yönelik çabalarının, Kyoto Protokolü çerçevesinde sera gazı emisyonlarını azaltmaya katkı sağlayabileceğini vurgulamaktadır.

Waş ve ark. (2020) çalışmalarında, Ukrayna'daki tarımsal biyogaz üretim potansiyelini ve bunun sera gazı emisyonlarının azaltılması ile enerji üretimi üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada, Ukrayna'nın enerji bağımsızlığını artırma ve iklim değişikliğiyle mücadele etme noktasında tarımsal biyogaz üretiminin önemli bir fırsat sunduğu vurgulanmıştır. Ancak, ülkedeki tarımsal işletmelerin parçalı yapısı, biyogaz tesislerinin ekonomik uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır. Bulgular, belirli bölgelerde teknik olarak kullanılabilir hayvansal atıkların doğal gaz ihtiyacının %11'ini veya elektrik talebinin %19'unu

karşılayabileceğini göstermektedir. Sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik teorik potansiyelin %5-6,14 arasında olduğu, ancak teknik olarak ulaşılabilir seviyenin %2,3-%2,8 arasında değiştiği belirlenmiştir. Çalışma ayrıca, biyogaz tesislerinin ekonomik performansının büyüklüğe bağlı olarak değiştiğini ve büyük ölçekli tesislerin yatırım geri dönüş sürelerinin daha kısa olduğunu ortaya koymuştur.

Alatzas ve ark. (2019) Yunanistan'daki tarımsal atıkların biyokütle enerjisi üretim potansiyelini incelemiştir. Çalışmada, Girit, Tesalya ve Mora bölgelerindeki lignoselülozik biyokütle miktarının yıllık 2.132.286 ton olduğu belirlenmiş ve bu miktarın İtalya ve Portekiz gibi diğer Akdeniz ülkeleriyle benzer olduğu vurgulanmıştır. Özellikle, zeytin çekirdekleri, zeytin budama atıkları ve pamuk çırçır atıkları yılda 100.000 tonun üzerinde önemli biyokütle kaynakları olarak tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, Messina bölgesinde küçük ölçekli bir gazlaştırma tesisinin kurulmasına yönelik bir örnek olay ele alınmış ve bu tesisin yılda 7.956 ton biyokütle kullanarak 6.630 MWh elektrik ve 8.580 MWh ısı enerjisi üretebileceği belirtilmiştir. Araştırma, biyokütle enerjisi kullanımının tarımsal geliri artırma, istihdam yaratma ve çevresel sürdürülebilirliği destekleme açısından önemli katkılar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Polat Bulut (2023) çalışmasında, Sivas ilindeki tarımsal atıklardan elde edilebilecek biyokütle enerjisi potansiyelini hesaplamış ve ArcGIS programı ile sayısal haritalar oluşturmuştur. Çalışmada, 2022 yılı itibarıyla Sivas ilinin tarımsal atıklardan 4017 TJ enerji potansiyeli elde edilebileceği, bu enerjinin Sivas'ın nüfusunun %48'inin enerji ihtiyacını karşılayabileceği belirtilmiştir. Şarkışla, Kangal ve Yıldızeli ilçelerinin tarımsal atıklardan en yüksek enerji potansiyeline sahip olduğu, en fazla katkıyı ise buğdayın sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Sivas'ın toplam enerji ihtiyacının %70'inden fazlasının biyokütle enerjisi ile karşılanabileceği vurgulanmıştır. Bu bulgular, biyokütle enerjisinin çevre dostu, sürdürülebilir ve ekonomik bir enerji kaynağı olarak önemini ortaya koymaktadır.

Aybek ve arkadaşları (2015) çalışmalarında, fosil yakıtların azalmasıyla birlikte biyogazın yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak önem kazandığını vurgulamışlardır. TÜİK 2014 verilerini kullanarak Kahramanmaraş ilindeki hayvansal ve bitkisel atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyelini belirlemiş ve bunu sayısal haritalarla göstermişlerdir. Çalışmada, ilin toplam biyogaz enerji potansiyelinin yaklaşık 2.177 TJ/yıl olduğu, bunun %95'inin hayvansal atıklardan sağlandığı tespit edilmiştir. İlçeler bazında en yüksek biyogaz potansiyeli Elbistan'da, en düşük ise Nurhak'ta bulunmuştur. Tarımsal atıklardan biyogaz üretimi

için yerinde tesislerin kurulmasının ekonomik açıdan daha verimli olacağı, bu süreçte teknik eğitim ve finansal destek sağlanması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, biyogaz üretiminin çevresel faydalar sağladığı, tarımsal üretime katkıda bulunarak bölge ekonomisine olumlu etkiler sunduğu ifade edilmiştir. Çalışmada, biyogaz üretim sürecinde optimal koşulların sağlanması gerektiği, C/N oranı ve fermantasyon süreçlerinin dikkatle yönetilmesi halinde verimliliğin artırılacağı belirtilmiş, biyogazın kojenerasyon sistemleri ile entegre edilerek hem elektrik hem de ısı enerjisi üretiminde kullanılabileceği önerilmiştir.

Akbaş ve Aydoğan (2023) çalışmalarında, Gümüşhane ilinin 2013-2022 yılları arasındaki tarımsal üretim kaynaklı biyokütle enerji potansiyelini incelemiştir. Çalışmada, tahıllar, meyveler, sebzeler ve kuru baklagiller temel alınarak tarımsal biyokütle enerji potansiyeli hesaplanmış ve Türkiye ile Karadeniz Bölgesi'ndeki değerlerle karşılaştırılmıştır. 2022 yılı verilerine göre, Gümüşhane ilinde toplam 5,00 MW biyokütle enerjisi üretilebileceği belirlenmiş, bu değer Türkiye biyokütle enerji potansiyelinin %0,28'ine, Karadeniz Bölgesi'nin ise %2,89'una denk geldiği tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, biyokütle atıklarının büyük oranda değerlendirilmediği, bu durumun çevre kirliliğine yol açtığı ve biyokütle enerjisi üretiminin teşvik edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Özellikle küçük ölçekli aile işletmelerinin yaygın olduğu Türkiye'de, biyokütle enerji üretim tesislerinin kamu desteğiyle büyük firmalar veya kooperatifler aracılığıyla kurulmasının daha uygun olacağı ifade edilmiştir.

Sevgili ve Nacar Koçer (2023) çalışmalarında, Elazığ ilinin bitkisel üretiminden kaynaklanan kullanılabilir tarımsal atık miktarını ve bu atıkların enerji potansiyelini teorik olarak hesaplamışlardır. Araştırmada, Elazığ ili için 2018 yılına ait bitkisel üretim istatistiklerinden yararlanılmış, tarla bitkileri, meyve ağaçları budama atıkları ve sera atıkları gibi bitkisel materyallerin biyokütle potansiyeli belirlenmiştir. Tarla bitkilerinin kuru biyokütle miktarı 147,041.178 ton/yıl, meyve ağaçlarının budama atıkları için kuru biyokütle potansiyeli 190,170.742 ton/yıl ve sera atıkları için kuru biyokütle miktarı ise 1,994.59 ton/yıl olarak hesaplanmıştır. Toplamda, Elazığ ilindeki bu atıklardan elde edilebilecek ısı kapasite sırasıyla 2,696,862.28 GJ/yıl, 3,725,145.38 GJ/yıl ve 34,506.34 GJ/yıl olarak bulunmuştur. Çalışma, Elazığ'ın tarımsal üretimi ve biyokütle potansiyelinin, bölgesel enerji üretimi ve atık yönetimi açısından önemli fırsatlar sunduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, Elazığ'daki tarım dışı kullanılmayan arazilerin üretime kazandırılmasıyla, biyokütle üretiminin artacağı ve bölgedeki temiz enerji üretimi ile ekonomik ve çevresel faydaların elde edileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Polat (2020) çalışmasında, Afyonkarahisar, Bilecik, Burdur, Bursa, Denizli, Eskişehir, Isparta, Kocaeli, Kütahya, Sakarya, Uşak ve Yalova illerini kapsayan bölgede tarımsal atıkların biyokütle enerji potansiyelini analiz etmiştir. Çalışmada, 2018 yılı verilerine dayanarak buğday, arpa, mısır, ayçiçeği ve şekerpancarı atıklarından elde edilebilecek toplam biyokütle enerji potansiyelinin 6185.33 GWh olduğu belirlenmiştir. Bu miktarın, Türkiye'nin toplam tarımsal biyokütle potansiyeli içinde %9.25 ila %9.75 oranında bir paya sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, biyokütle enerji potansiyelinin en yüksek olduğu ilin Eskişehir (%23.66) ve en düşük olduğu ilin Yalova (%0.14) olduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak, Türkiye'nin tarımsal atık açısından büyük bir enerji kaynağı potansiyeline sahip olduğu ve bu atıkların enerji üretimi ile bitki besleme maddesi olarak değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmiştir.

Çakal ve Çelik (2021) çalışmalarında, Türkiye'de en fazla ekilen tarımsal ürünlerin atıklarının biyogaz üretim potansiyelini incelemişlerdir. Çalışma, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerinden yararlanarak, tarım arazilerinin %30.40'ını oluşturan ürünlerin biyogaz potansiyelini hesaplamıştır. Çalışmada, Türkiye genelindeki tarımsal atıklardan elde edilebilecek toplam biyogaz miktarının 240673168 m³/yıl olduğu ve bu biyogazın enerji eşdeğerinin 5463.19 TJ/yıl olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Şanlıurfa'nın biyogaz enerjisi eşdeğerinin, elektrik ihtiyacının %21.16'sını karşılayabileceği bulunmuştur. Çalışma, tarımsal atıklardan elde edilebilecek biyogazın enerji üretimi ve şehirlerin elektrik ihtiyacını karşılama potansiyeli üzerine önemli değerlendirmelere yer vermektedir.

Karabaş (2019) çalışmasında, Sakarya ilindeki tarımsal biyokütle atıklarının enerji potansiyelini incelemiştir. Çalışmada, Sakarya'nın coğrafi ve iklimsel özellikleri göz önünde bulundurularak, tarla bitkileri ve meyve ağaçlarından elde edilen atıkların miktarı ve bu atıkların enerji üretimindeki potansiyeli teorik olarak hesaplanmıştır. 2017 yılı verilerine dayanan hesaplamalara göre, tarla bitkilerinden elde edilen biyokütle atığı miktarı 974.990,8 ton/yıl ve toplam ısı kapasitesi 618.419.362 GJ/yıl, meyve ağaçlarının budama atıklarının ise 28.304.823,6 ton/yıl ve 566.096.472 GJ/yıl olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, bitkisel biyokütlenin enerji potansiyelinin göz ardı edilemeyecek ölçüde yüksek olduğunu ve enerji sürdürülebilirliği için önemli bir kaynak olduğunu vurgulamaktadır.

Al (2021) çalışmasında, Şanlıurfa ilindeki tarımsal atıkların biyokütle enerji üretimi potansiyelini ve çevresel etkilerini incelemiştir. Çalışmada, Şanlıurfa'nın

Türkiye'deki önemli tarım üretim alanlarından biri olduğu, buğday, mısır ve pamuk gibi ürünlerin yüksek üretim oranlarına sahip olduğu vurgulanmıştır. Bu atıkların ısı değeri analiz edilerek, biyokütle enerji santrali için en uygun atık oranı belirlenmiştir. Çalışmaya göre, 30 MW'lık bir biyokütle enerji santrali için yaklaşık 210 bin ton tarımsal atık gerekli olup, bu atıkların enerji üretimindeki rolü ve çevresel faydaları tartışılmıştır. Ayrıca, biyokütle enerji santrali kurulumunun bölgedeki enerji güvenliği ve istihdam üzerindeki olumlu etkileri de ele alınmıştır.

Tanrıverdi (2022) tez çalışmasında, Adana ilinin Ceyhan, İmamoğlu, Karaisali, Karataş, Kozan, Sarıçam, Seyhan, Yumurtalık ve Yüreğir ilçelerinde 205 çiftçi ile anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, buğday (%36,1), arpa (%21,5), mısır (%9,5) ve soya (%7,5) gibi ürünlerin en yaygın olarak yetiştirildiği tespit edilmiştir. Bu ürünlerin ekili alanlarının biyokütle enerji eşdeğerleri hesaplanmış ve buğday, mısır, narenciye, ayçiçeği, pamuk ve soya gibi bitkisel ürünlerin enerji üretiminde en yüksek potansiyele sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca, anız yangınlarına karşı çiftçilerin farkındalık seviyesinin yüksek olduğu, %84,4 oranında "Anız yakılmalı mı?" sorusuna "Hayır" cevabı verildiği ve %88,3'ünün anız yakmayı zararlı gördüğü gözlemlenmiştir. Çiftçilerin %55,1'lik kısmı biyokütle enerjisi konusunda bilgi sahibi olmadığını belirtmiş, %46,8'lik kesim ise tarımsal atıkların işlenmesi durumunda bu atıkları bekletebileceğini ifade etmiştir. Çalışma, Adana ilindeki tarımsal atıkların biyokütle enerji üretiminde kullanılması potansiyelini değerlendirerek, çevresel etkilerin azaltılmasında önemli bir katkı sağlanabileceği sonucuna ulaşmıştır.

Kayahan ve Çarman (2023) çalışmalarında, Konya'daki tarımsal faaliyetler sonucu ortaya çıkan atıkların biyokütle ve biyogaz enerji potansiyelini incelemişlerdir. Çalışmada, hayvansal üretimden kaynaklanan sera gazı emisyonları (gübre ve enterik fermantasyon kaynaklı) yıllık 1.578.108 ton CO₂e olarak hesaplanırken, bitkisel üretimde (buğday, arpa, ayçiçeği, mısır, şeker pancarı) geleneksel tarım yöntemleri ile 120.564 ton CO₂, koruyucu tarım teknikleri ile ise 36.175 ton CO₂ emisyonu gerçekleştiği belirlenmiştir. Hayvan gübrelerinden elde edilebilecek biyogaz enerjisi potansiyeli 259.780.000 kWh/yıl olarak hesaplanırken, tarımsal üretim kaynaklı biyokütle enerji potansiyeli ise 4.508,05 GWh olarak bulunmuştur. Çalışma, tarımsal atıkların enerji üretiminde kullanımının çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik önem taşıdığını ve koruyucu tarım uygulamalarının sera gazı emisyonlarını %70'e varan oranda azaltılabileceğini ortaya koymaktadır.

Saeed ve ark. (2015) çalışmalarında, Pakistan'ın elektrik arzında büyük bir

sorunla karşı karşıya olduğunu ve şehirlerdeki elektrik arzının kesintili olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma, Pakistan'da büyük bir tarımsal sektör bulunduğunu ve bu sektörden çıkan atıkların elektrik üretiminde kullanılabilecek önemli bir enerji kaynağı oluşturduğunu göstermektedir. Yazarlar, bu tarımsal atıkların, biyokütle jeneratörleri kullanılarak elektrik üretimi için değerlendirilebileceğini ve yıllık tarım atıkları üretiminin, Pakistan'ın yıllık elektrik ihtiyacının %76'sını karşılayabileceğini öne sürmüşlerdir. Çalışma, tarımsal atıkların elektrik üretiminde kullanılmasının, mevcut fosil yakıt kaynaklarına kıyasla daha sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm sunduğunu vurgulamaktadır.

Ozturk ve Bascetincelik (2006) çalışmalarında, Türkiye'deki tarımsal biyokütle potansiyelini türler, miktarlar ve bölgesel dağılımlar açısından belirlemeyi amaçlamışlardır. Araştırmada, tarımsal atıklardan elde edilebilecek enerji potansiyeli stoichiometrik analizlerle değerlendirilmiş ve toplam kalorifik değerin 2002–2003 üretim dönemi için yaklaşık 363.1 PJ/yıl olduğu bulunmuştur. Çalışma, biyoyakıtların enerji üretimindeki mevcut rolünün minimal olduğunu, ancak en verimli kullanım yönteminin Birleşik Isı ve Güç "Combined Heat and Power" (CHP) üretimi olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, Türkiye'de küçük ölçekli enerji üretim tesislerinin, özellikle zeytinyağı veya pamuk tohumu yağı gibi endüstriyel tarımsal biyokütlenin bol olduğu bölgelerde, büyük ölçekli tesislere göre daha uygun olduğunu belirtmiştir. Çalışma, tarımsal atıkların enerji üretiminde verimli bir şekilde kullanılabilmesi için çeşitli yasal, kurumsal ve teknolojik engellerin aşılması gerektiğine de dikkat çekmektedir.

Mevcut literatür, tarımsal atıkların biyokütle enerji üretiminde kullanımının, sera gazı emisyonlarını azaltma ve çevresel etkileri iyileştirme açısından büyük potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır. Çeşitli çalışmalar, biyokütle enerjisinin fosil yakıtların yerine geçerek karbon salınımını azaltabileceğini ve sürdürülebilir enerji üretim yöntemlerine katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, bu tür enerjilerin yerel düzeyde değerlendirilmesi, tarımsal atıkların daha verimli bir şekilde kullanılması ve enerji üretiminin optimize edilmesi için kritik öneme sahiptir. Tarımsal atıkların açık alanlarda yakılması, salınan sera gazlarının olumsuz etkilerini artırmakta ve hava kalitesini bozarak çevresel problemlere yol açmaktadır. Bu bağlamda Şanlıurfa gibi tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu il, biyokütle enerji potansiyelinin doğru bir şekilde belirlenmesi, çevresel etkilerin minimize edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

2.1. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, Türk Dil Kurumu Sözlüğü'nde, belirli bir sürede sınırlı bir biyolojik ortamda bulunan canlı organizmaların toplam kütlesi olarak tanımlanır. Aynı zamanda bir organik karbon kaynağı olarak da kabul edilir ve biyolojik kökenli fosil olmayan organik madde kütlesidir (Tanrıverdi, 2022). Biyokütle enerjisi, yenilenebilir, çevre dostu, her yerde üretilen ve elektrik üretimi ile taşıtlar için yakıt elde edilebilen stratejik bir enerji kaynağıdır. Aynı zamanda ekonomik ve sosyal gelişmelere olanak sağlar (Karaosmanoğlu, 2006). Biyokütle, insan ve doğa faaliyetleri tarafından üretilen tüm organik maddelerin türetilmiş bol ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır (Wang et al., 2010).

Artan enerji ihtiyacını, çevre kirliliği yaratmadan ve tükenmeyen kaynaklardan sağlamak, biyokütle enerjisinin en önemli avantajlarından biridir. Tarımsal ve bitkisel kaynakların tükenmezliği, biyokütle enerji kaynağının sınırsız olduğu anlamına gelir. Biyokütle enerjisi doğru şekilde değerlendirildiğinde, karbondioksit emisyonlarının azalmasına, enerji arz güvenliğinin sağlanmasına ve Gayri Safi Yurt İçi Hasıla'nın (GSYİH) artmasına katkı sağlayabilir (AL, 2021; Tanrıverdi, 2022).

Biyokütle enerjisi, hayvan ve bitki atıklarının işlenmesi ile elde edilen ve dünyada yaygın olarak kullanılan bir enerji kaynağıdır. Bu enerji kaynağı, biyoyakıtlar ve canlı organizmalardan elde edilen her türlü yakıtı içerir. Ayrıca, biyokütle enerjisi çevre kirliliğine neden olmayan ve sürdürülebilir kalkınmayı destekleyen bir kaynaktır (Şensöz et al., 2006; Türkoğlu Elitaş, 2016).

Biyokütle, bitkisel ve hayvansal atıklar, gıda, orman yan ürünleri ve kentsel atıkları içeren organik madde olarak tanımlanabilir. Fosil yakıtların sınırlı olması ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin giderek daha fazla fark edilmesi, biyokütleyi giderek daha önemli bir enerji kaynağı haline getirmektedir. Biyokütle enerjisi, biyoyakıtlar ve canlı organizmalardan elde edilen her türlü yakıt olarak tanımlanır ve sürdürülebilir kalkınma sağlandığı sürece çevre kirliliğine neden olmayan bir kaynaktır. Ayrıca biyokütle, fotosentez yoluyla güneş enerjisinin toplandığı ve depolandığı bir ortamdır (Kazaz, 2018).

Biyokütle, çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Örneğin; ısınma, elektrik üretimi, katı, sıvı ve gaz yakıt üretimi ve kimyasal madde elde edilmesi gibi farklı uygulama alanlarına sahiptir. Biyokütle yakma işlemleriyle ısı ve/veya elektrik üretilirken, gazlaştırma süreçleriyle elde edilen gaz ürünleri ısıya veya elektriğe dönüştürülebilir. Ayrıca sıvı yakıtlar ve kimyasal maddeler üretiminde de

kullanılabilir. Şekerli, nişastalı veya selülozik bitkilerden etanol gibi sıvı yakıtlar; yağ bitkilerinden ise biyodizel üretilebilir (Kazaz, 2018).

Biyokütle enerjisinin avantajları arasında, kendi kendine yeten enerji sistemleri kurma imkanı, kırsal alanlarda istihdam yaratma, çevreye daha az zarar verme ve her yerde yetiştirilebilmesi yer almaktadır. Ayrıca biyokütle, yerel elektrik üretimi için önemli avantajlar sağlar, çünkü depolamaya uygundur ve iletim kayıpları minimum seviyededir. Ancak biyokütle enerjisinin dezavantajları da mevcuttur: üretim maliyetleri geleneksel yakıtlara göre daha yüksek olabilir; bu, ham madde temini, toplanması, taşınması ve depolanmasının maliyetli olmasından kaynaklanır. Biyoenerji, toprak bazlı bir enerji türü olduğundan, talebin artması, tarım alanları ve doğal habitat üzerinde baskı oluşturabilir. Ayrıca, biyokütle üretimi için fazla su kullanımı ve kimyasal gübrelerin kullanımı çevre üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Diğer bir dezavantaj ise biyokütlenin yüksek teknoloji gerektirmesi ve büyük yerleşim alanlarına ihtiyaç duymasındır; bu da tarım arazileriyle rekabet yaratır ve fosil yakıtlara kıyasla enerji verimliliklerini düşürür (Kazaz, 2018).

Biyokütle, kentsel çöpler, endüstriyel atıklar, tarımsal atıklar, odun, ormancılık atıkları, etanol ve biyodizel gibi ürünlerin işlenmesi sonucu elde edilen katı, sıvı ve gaz yakıtların tamamını kapsar. Biyokütle, fotosentez yoluyla güneş enerjisinin toplandığı ve depolandığı ortamlarda meydana gelen organik maddeleri ifade eder (Türkoğlu Elitaş, 2016).

Biyokütle enerjisi, diğer enerji türlerine kıyasla sera gazı emisyonlarını engelleyerek küresel iklim krizinin önüne geçebilecek potansiyele sahiptir. Ayrıca kolay depolanabilir olması, bu enerji kaynağının tercih edilmesinin başlıca nedenlerindendir. Biyokütlenin kaynağını bitkisel ve hayvansal ürünler ile evsel ve endüstriyel atıklar oluşturmaktadır. Tarım atıkları, orman ürünleri, organik atıklar, su bitkileri, evsel ve sanayi atıkları, biyokütle enerjisi üretiminde kullanılır. Biyokütleden enerji elde edilmesinde, kullanılacak ham madde ve elde edilmek istenen yakıt türü dönüşüm süreçlerini belirler. Bu süreçler, fiziksel, fizikokimyasal, biyokimyasal ve termokimyasal işlemlerle gerçekleştirilir. Ülkemizde her yıl yaklaşık 184.593.134 ton bitki üretilmekte ve bu üretimden elde edilen yaklaşık 62.206.754 ton bitkisel atıkla yılda 6.009.049 TEP enerji üretilebilmektedir (Tanrıverdi, 2022).

2.1.1. Biyokütle enerjisi kaynakları

Biyokütle enerjisi, organik kökenli maddelerin fiziksel, kimyasal veya biyolojik dönüşüm süreçleriyle enerjiye çevrilmesiyle elde edilen yenilenebilir bir enerji türüdür. Fosil kaynaklara olan bağımlılığı azaltması, yerel kaynakların değerlendirilmesini sağlaması ve karbon döngüsünü dengelemesi bakımından çevresel sürdürülebilirlik açısından önem taşımaktadır. Biyokütle enerjisi üretiminde kullanılan kaynaklar genel olarak beş ana grupta incelenmektedir: tarımsal atıklar, orman ürünleri ve atıkları, kentsel atıklar, endüstriyel organik atıklar ve hayvansal atıklardır (Kazaz, 2018; Tanrıverdi, 2022; Türkoğlu Elitaş, 2016).

2.1.1.1. Tarımsal atık kaynaklı biyokütle

Tarımsal biyokütle kaynakları, bitkisel üretim sürecinde ortaya çıkan organik atık ve artıkların enerji üretiminde değerlendirilmesiyle oluşur. Bu kaynaklar, hasat sonrası geriye kalan sap, saman, kabuk, çekirdek, anız, yaprak, kök gibi kalıntıları ve tarımsal ürünlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan organik atıkları kapsamaktadır. Türkiye’de mısır sapı, buğday samanı, ayçiçeği koçanı, pamuk sapı, fındık kabuğu, zeytin çekirdeği gibi ürün artıklarının toplam yıllık potansiyeli oldukça yüksektir (Tanrıverdi, 2022; Türkoğlu Elitaş, 2016).

Bunun yanında enerji bitkileri de bu grup altında değerlendirilmektedir. Şeker kamışı, sorgum, tatlı darı, kanola, kolza, keten ve aspir gibi bitkiler, yüksek verimlilikte biyoyakıt üretimi sağlayan türler arasında yer almaktadır. Özellikle şekerli veya nişastalı içeriğe sahip bitkilerden etanol gibi alkollü biyoyakıtlar üretilirken, yağlı tohumlardan biyodizel elde edilmektedir. Tarımsal atıkların yakılması, piroliz veya gazlaştırma gibi termokimyasal yöntemlerle işlenmesi ya da biyokimyasal dönüşümle biyogaz üretimi yaygın biçimde uygulanmaktadır (Tanrıverdi, 2022; Türkoğlu Elitaş, 2016).

Türkiye’de yılda ortalama 50-60 milyon ton tarımsal atığın ortaya çıktığı ve bu miktarın büyük kısmının enerji üretimi potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir. Ancak bu potansiyelin henüz büyük ölçüde atıl durumda olduğu, yalnızca sınırlı bölgelerde biyokütle santralleri yoluyla değerlendirildiği görülmektedir (Tanrıverdi, 2022).

2.1.1.2. Ormansal atık kaynaklı biyokütle

Orman kaynaklı biyokütle, orman ürünleri üretimi sırasında veya doğal yollarla oluşan organik materyallerin enerji üretiminde değerlendirilmesini kapsamaktadır. Bunlar arasında ağaç dalları, yapraklar, odun parçaları, kesim

kalıntıları, talaş, kabuk, reçine ve kurumuş odun gibi çeşitli artıklar yer almaktadır. Ayrıca mobilya, kereste ve kâğıt üretimi yapan sektörlerde oluşan odun artıkları da bu gruba dahil edilmektedir (Tanrıverdi, 2022; Türkoğlu Elitaş, 2016).

Türkiye'de orman varlığı yaklaşık 23 milyon hektardır ve yıllık odun üretimi sonrasında 6-7 milyon metreküp civarında orman atığı ortaya çıkmaktadır. Bu atıkların enerji üretimi amacıyla değerlendirilmesi, hem ekonomik katkı sağlamakta hem de yangın riski taşıyan kuru maddelerin ormandan uzaklaştırılmasıyla çevresel fayda yaratmaktadır. Özellikle kırsal kesimlerde bu tür atıkların geleneksel yöntemlerle ısınmada kullanıldığı bilinmekle birlikte, modern biyokütle santrallerinde yüksek verimle enerjiye dönüştürülmesi, çok daha sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır (Tanrıverdi, 2022; Türkoğlu Elitaş, 2016).

Orman biyokütlesi doğrudan yakılarak elektrik ve ısı üretiminde kullanılabileceği gibi, torrefaksiyon, gazlaştırma veya biyokömür üretimi gibi ileri teknolojilerle de değerlendirilebilmektedir (Tanrıverdi, 2022; Türkoğlu Elitaş, 2016).

2.1.1.3. Kentsel ve endüstriyel atık kaynaklı biyokütle

Kentleşmenin artmasıyla birlikte ortaya çıkan evsel ve endüstriyel organik atıklar, önemli bir biyokütle kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Bu grup; belediye atıkları, organik mutfak artıkları, bahçe ve park atıkları, kâğıt-karton atıkları, tekstil sanayi artıkları, atık yağlar, gıda işleme atıkları ve atık su arıtma tesislerinde oluşan çamurları içermektedir (Tanrıverdi, 2022; Türkoğlu Elitaş, 2016).

Bu atıklar anaerobik sindirim, kompostlama, yakma ve gazlaştırma gibi çeşitli yöntemlerle enerjiye dönüştürülebilir. Özellikle evsel atıkların anaerobik çürütülmesiyle biyogaz elde edilirken, düzenli depolama sahalarında oluşan çöp gazları (deponi gazı) da doğrudan elektrik üretiminde kullanılabilir. Türkiye’de 2023 yılı itibarıyla yaklaşık 90’dan fazla katı atık depolama alanında biyogaz üretim tesisleri faaliyet göstermektedir. Bu tesislerdeki gazın ısı değeri 18-27 MJ/m³ aralığında değişmekte olup, yerel enerji ihtiyacını karşılamada önemli bir rol üstlenmektedir (Tanrıverdi, 2022; Türkoğlu Elitaş, 2016).

Endüstriyel atıkların da enerji potansiyeli büyüktür. Özellikle gıda sanayisi (meyve-sebze işleme, şeker fabrikaları, un ve yağ sanayi vb.) ile içecek üretimi (bira, süt vb.) sonucu oluşan organik atıklar, biyogaz üretimi açısından değerlendirilmektedir. Bunun yanında, bazı tekstil ve deri sanayi atıkları da uygun ön

işlemlerle biyokütle kaynağı hâline getirilebilmektedir (Tanrıverdi, 2022; Türkoğlu Elitaş, 2016).

2.1.1.4. Hayvansal atık kaynaklı biyokütle

Hayvancılık faaliyetleri sonucu ortaya çıkan büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanı gübreleri ile mezbaha ve süt işleme tesislerindeki organik atıklar, biyokimyasal dönüşüm süreçleriyle biyogaz üretiminde kullanılmaktadır. Bu atıklar, anaerobik ortamda fermentasyona uğratarak metan açısından zengin biyogaz oluşturur. Biyogaz, hem elektrik hem ısı üretiminde hem de arıtılarak doğalgaz şebekesine verilebilecek biyometan üretiminde kullanılabilir (Tanrıverdi, 2022; Türkoğlu Elitaş, 2016).

Türkiye, büyükbaş ve küçükbaş hayvancılıkta önemli bir potansiyele sahiptir. 2023 yılı itibarıyla yaklaşık 18 milyon büyükbaş, 57 milyon küçükbaş ve 350 milyonun üzerinde kanatlı hayvan mevcuttur. Bu hayvanlardan yıllık yaklaşık 150 milyon ton civarında gübre oluştuğu tahmin edilmektedir. Bu miktar, modern biyogaz tesislerinde işlendiğinde yıllık yaklaşık 1,5-2 milyar m³ biyogaz üretme kapasitesine ulaşabilir (Tanrıverdi, 2022; Türkoğlu Elitaş, 2016).

Hayvansal atıkların biyogaz tesislerinde değerlendirilmesi, çevresel açıdan da büyük avantajlar sunmaktadır. Özellikle metan gazı salınımının azaltılması, kötü koku ve yeraltı suyu kirlenmesinin önlenmesi gibi çevresel kazanımlar söz konusudur. Ayrıca, fermentasyon sonrası geriye kalan “Digestat” maddesi, tarımsal gübre olarak değerlendirilebilmektedir (Tanrıverdi, 2022; Türkoğlu Elitaş, 2016).

2.1.2. Biyokütle enerjisinin avantajları

Biyokütle enerjisi, birçok yönden diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla avantajlı özellikler taşımaktadır. Başlıca avantajları aşağıda sıralanmıştır (Tanrıverdi, 2022):

- Yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır: Bitkisel ve hayvansal atıkların döngüsel olarak yeniden üretilmesi, biyokütle kaynaklarının sürekli olarak temin edilebilirliğini sağlamaktadır.
- Karbon nötr potansiyele sahiptir: Biyokütle, fotosentez sürecinde atmosferden aldığı karbondioksiti salarak karbon dengesini korumakta, bu yönüyle sera gazı salımını azaltmaktadır.

- Enerji üretimi kesintisiz yapılabilir: Güneş veya rüzgâr enerjisinden farklı olarak biyokütle, iklim koşullarına bağlı olmadan sürekli enerji üretimi sağlayabilmektedir.

- Depolanabilir niteliktedir: Biyokütle hammaddeleri uzun süreli depolanarak istenildiğinde enerji üretiminde kullanılabilir; bu da enerji arz güvenliğine katkı sağlamaktadır.

- Yerli kaynakların kullanılması mümkündür: Bölgesel olarak temin edilebilen biyokütle kaynakları, ithal yakıt ihtiyacını azaltarak enerji bağımsızlığını güçlendirmektedir.

- İstihdam yaratmaktadır: Biyokütle üretim zinciri; tarımsal faaliyetler, toplama, taşıma, işleme ve işletme süreçlerinde çok sayıda kişiye istihdam olanağı sağlamaktadır.

- Kırsal kalkınmayı desteklemektedir: Tarımsal üretime dayalı bölgelerde ekonomik hareketliliği artırmakta ve yerel refahı güçlendirmektedir.

- Çevre dostudur: Fosil yakıtların aksine asit yağmurlarına sebep olmayan, düşük kükürt içeren temiz bir enerji türüdür.

- Enerji üretimi farklı ölçeklerde gerçekleştirilebilir: Küçük, orta veya büyük ölçekli santraller kurulabildiği için hem bireysel hem de endüstriyel kullanıma uygundur.

- Teknolojik altyapısı gelişmiştir: Biyokütle enerji üretiminde kullanılan dönüşüm teknolojileri (yakma, gazlaştırma, anaerobik çürütme vb.) günümüzde etkin biçimde kullanılmaktadır.

- Tarım alanlarının verimliliğini destekleyebilir: Bazı biyokütle artıkları, işleme sonrasında organik gübre olarak kullanılabilir, bu da toprak kalitesinin artmasına katkı sağlar.

2.1.3. Biyokütle enerjisinin dezavantajları

Biyokütle enerjisi çevresel ve ekonomik faydalar sağlamakla birlikte, bazı

olumsuz etkiler de barındırmaktadır. Bu dezavantajlar şu şekilde sıralanabilir (Tanrıverdi, 2022):

- Doğal orman alanlarının tehdit edilmesi riski bulunmaktadır: Enerji ormancılığı amacıyla doğal ormanların tahrip edilmesi, biyoçeşitliliğin azalmasına ve ekosistem dengesinin bozulmasına neden olabilmektedir.
- Geniş tarım alanı gerektirmektedir: Enerji bitkilerinin yetiştirilmesi için büyük arazilere ihtiyaç duyulmakta, bu da gıda üretimi ile rekabet riskini doğurmaktadır.
- Atıkların ön işleme tabi tutulması gereklidir: Biyokütle hammaddeleri genellikle enerjiye dönüştürülmeden önce ayrıştırma, kurutma ve taşıma gibi işlemlerden geçirilmelidir; bu da ek maliyet oluşturmaktadır.
- Enerji verimliliği fosil yakıtlara göre düşüktür: Özellikle hacimsel enerji yoğunluğu bakımından biyokütle, kömür, petrol ve doğalgaza kıyasla daha az verimli olabilmektedir.
- Kimyasal gübre ve pestisit kullanımı çevresel sorunlara yol açabilir: Enerji bitkilerinin tarımsal üretiminde yoğun kimyasal kullanımına bağlı olarak toprak ve su kirliliği riski artmaktadır.
- Lojistik ve taşıma maliyetleri yüksektir: Biyokütle kaynaklarının toplama, taşıma ve depolama süreçleri karmaşık ve maliyetlidir; bu durum özellikle uzak bölgelerden temin edilen biyokütle için verimliliği azaltmaktadır.

2.1.4. Tarımsal atıklardan biyokütle enerji teknolojisi

Tarımsal atıklar, biyokütle enerji üretimi için önemli bir kaynak teşkil etmekte olup uygun teknolojilerle çevre dostu enerjiye dönüştürülebilmektedir. Biyokütle enerji teknolojileri genel olarak termik ve biyolojik sistemler olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir (Kazaz, 2018; Türkoğlu Elitaş, 2016). Her iki sistemde de tarımsal atıkların değerlendirilmesi mümkündür ve enerji dönüşüm süreçlerinde bu atıklar çeşitli şekillerde kullanılmaktadır.

Termik sistemler arasında ilk sırada yer alan doğrudan yakma yöntemi, sap, saman, mısır koçanı, zeytin çekirdeği ve benzeri tarımsal artıkların kurutularak

yüksek sıcaklıkta yakılması esasına dayanır. Bu yöntemle ısı enerjisi elde edilmekte ve bu ısı buhar türbinleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Özellikle büyük ölçekli enerji santrallerinde kömür ile birlikte tarımsal atıkların birlikte yakılması, hem maliyeti düşürmekte hem de çevresel etkileri azaltmaktadır. Gazlaştırma yöntemi ise tarımsal atıkların oksijensiz veya sınırlı oksijen ortamında yüksek sıcaklıkta işlenmesiyle karbonmonoksit, hidrojen ve metan gibi yanıcı gazların üretilmesini sağlar. Elde edilen bu gaz, enerji üretiminde motor ve türbin sistemlerinde kullanılmaktadır. Bir diğer termik yöntem olan piroliz, tarımsal atıkların oksijensiz ortamda yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak biyoyağ, biyogaz ve biyokömür elde edilmesini sağlar. Hızlı piroliz teknikleri sayesinde sıvı yakıt üretim verimi artırılmakta ve bu yakıtlar gerek ısıtma gerekse elektrik üretimi amacıyla değerlendirilebilmektedir (Kazaz, 2018; Türkoğlu Elitaş, 2016).

Biyolojik sistemlerde ise, organik içerik bakımından zengin tarımsal atıklar enerji üretiminde kullanılmaktadır. En yaygın yöntem olan anaerobik sindirim (havasız ortamda fermentasyon) sürecinde, özellikle hayvansal gübrelerle birlikte yüksek nem içeren tarımsal artıklar mikroorganizmalar tarafından parçalanmakta ve ortaya çıkan biyogaz (çoğunlukla metan) çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılamada kullanılmaktadır. Bu yöntem küçük ve orta ölçekli çiftliklerde enerji ihtiyacını karşılamak için uygulanabilirliği yüksek bir teknolojidir. Alkol fermentasyonu yöntemiyle ise şeker ve nişasta içeren tarımsal atıklardan biyoetanol elde edilmektedir. Mısır, buğday ve şeker kamışı gibi ürünlerden elde edilen biyoetanol, özellikle ulaşım sektöründe alternatif yakıt olarak değerlendirilmektedir. Bunların yanında, araştırma aşamasında olan biyofotoliz yöntemi, tarımsal atıklar yerine daha çok algler gibi mikrobiyal biyokütle kullanarak güneş enerjisi yardımıyla hidrojen üretimini hedeflemektedir. Ayrıca, karbonlaştırma (torrefaction) yöntemi, odunsu yapıya sahip tarımsal atıkların havasız ortamda düşük sıcaklıklarda ısıtılmasıyla enerji içeriği yüksek, taşınabilir ve depolanabilir katı yakıtların elde edilmesini sağlar (Kazaz, 2018; Türkoğlu Elitaş, 2016).

Sonuç olarak, tarımsal atıklar; termik sistemlerde doğrudan yakma, gazlaştırma ve piroliz yöntemleriyle, biyolojik sistemlerde ise anaerobik sindirim ve fermentasyon teknikleriyle enerjiye dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm süreci, hem atık yönetimi açısından çevresel fayda sağlamakta hem de fosil yakıt bağımlılığını azaltarak sürdürülebilir enerji üretimine katkı sunmaktadır.

2.2. Tarımsal Atıkların Anız Yakılması ve Çevre

Dengesiz ve bilinçsiz tarımsal uygulamalar, giderek daha fazla dünyanın doğal dengesini bozmakta ve çevreye zarar vermektedir (Yılmaz et al., 2015). Anız, hasat ve harman işlemleri sonrasında tarlada kalan kök, sap, yaprak ve diğer bitki artıklarından oluşan tarımsal atıklardır. Bu atıkların toprakta doğal yollarla ayrışması, özellikle kurak ve yarı kurak iklim koşullarında oldukça uzun bir zaman almaktadır. Toprak neminin yetersiz olması ve mikroorganizma faaliyetlerinin yavaşlaması, bu ayrışma sürecini daha da geciktirmektedir. Bu nedenle bazı üreticiler, toprak hazırlığını kolaylaştırmak amacıyla anız yakma yöntemini tercih etmektedir (Dilber & Güler, 2015; Tanrıverdi, 2022; Yılmaz et al., 2015).

Anızın yakılması, toprak yüzeyindeki bitkisel artıkların hızla bertaraf edilmesini sağlasa da, toprak ekosistemi üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratmaktadır. Organik madde içeriği önemli ölçüde azalmaktadır ve bu durum, toprağın verimliliğini doğrudan etkileyen mikroorganizmaların yaşam alanlarının yok olmasına yol açmaktadır. Özellikle toprağın ilk 3 santimetrelilik katmanındaki mikroorganizmalar, anız yangınlarından en fazla zarar gören canlı grubunu oluşturmaktadır (Dilber & Güler, 2015; Tanrıverdi, 2022).

Tarımsal atık yakımı sonucu atmosfere çeşitli kirleticiler salınmaktadır. Bu kirleticiler arasında partikül maddeler ve gaz formundaki bileşikler yer almaktadır. Partikül maddeler, organik maddelerin tam olarak yanmaması, gazların yanma sonrası yoğunlaşması veya organik yapıların kısmen yanması sonucu oluşmaktadır. PM100, PM10 ve PM2.5 gibi farklı çaplara sahip Askıda Katı Maddeler (AKM) özellikle insan sağlığı açısından ciddi riskler taşımaktadır. Gaz formundaki kirleticiler arasında ise karbon monoksit (CO), metan (CH₄) ve azot oksit türevleri (NO₂, N₂O) yer almaktadır. Bu kirleticiler, hem solunum yolu hastalıklarına yol açmakta hem de küresel ısınmayı hızlandırmaktadır (Tanrıverdi, 2022; Yılmaz et al., 2015).

Toprağın canlı yapısı, verimliliğin sürdürülebilirliğinde temel rol oynamaktadır. Anız yangınları, toprağın fiziksel özelliklerinde bozulmalara yol açmakta, yapıyı gevşetmekte ve su tutma kapasitesini azaltmaktadır. Ayrıca, toprak işleme araçlarının verimli çalışmasını engellediği düşünülen kalıntılar, yakılarak yok edilse de uzun vadede toprak sağlığı üzerinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Anız yakılması sırasında salınan zararlı gazlar, hava kalitesini düşürmekte ve çevresel kirliliği artırmaktadır (Dilber & Güler, 2015; Tanrıverdi, 2022).

Tarım topraklarının yapısal özellikleri dikkate alındığında, toprak katı, sıvı ve

gaz fazlarından oluşmaktadır. Katı fazın büyük kısmı inorganik maddelerden oluşurken, %5'lik kısmı organik maddelerden meydana gelmektedir. Bu organik maddenin yalnızca %1'lik kısmını toprak canlıları oluşturmaktadır. Bu canlılar, toprağın üretkenliğini sağlayan temel unsurlar arasında yer almaktadır. Anız yakma işlemi, bu canlıların yaşamını tehdit etmekte ve toprağın biyolojik dengesini bozmaktadır (Dilber & Güler, 2015).

Tarım üretimi açısından bakıldığında, biçim sonrası tarlada kalan sap, yaprak ve kavuz gibi organik atıkların parçalanma süreci oldukça yavaştır. Özellikle C/N oranının yüksek olması, bu süreci daha da zorlaştırmaktadır. Toprağa karıştırılmayan bu bitkisel artıklar, çiftçiler tarafından genellikle yakılarak bertaraf edilmektedir. Ancak yapılan araştırmalar, anız yakılan arazilerdeki yıllık toprak kaybının, yakılmayan alanlara göre iki katına çıktığını göstermektedir (Dilber & Güler, 2015; Tanrıverdi, 2022).

Ülkemizde tarım üretimi oldukça yaygın olup, milyonlarca tonluk anız artığı meydana gelmektedir. Bu atıkların çoğu tarlada bırakılmakta ya da yakılmaktadır. Anızın toprak altına karıştırılması toprağın yapısını iyileştirirken, yakılması bu yapıyı bozmakta ve çevresel ile tarımsal sürdürülebilirliği tehdit etmektedir.

2.3. Sera Gazı Emisyonları

Sera gazları, atmosferdeki gazlar arasında yer alarak, Dünya'nın sıcaklık dengesini etkileyen bileşiklerdir. Bu gazlar, güneş ışığını geçirebilir ancak yeryüzünden yansıyan ısıyı tutarak gezegenin sıcaklığını artırır. Bu olay, "sera etkisi" olarak bilinir ve küresel ısınmanın temel sebeplerinden biridir. Karbon dioksit (CO₂), metan (CH₄), azot oksitler (N₂O), ozon (O₃) ve florlu gazlar, en yaygın sera gazlarından (Reza et al., 2024; Wikipedia, 2025).

Sera gazı emisyonlarının başlıca kaynakları fosil yakıtların yakılması, tarım uygulamaları, ormanların kesilmesi, endüstriyel üretim ve atık yönetimi gibi insan faaliyetleridir. Fosil yakıtlar, enerji üretimi, ulaşım ve sanayi sektörlerinde yoğun bir şekilde kullanılır. Bu süreçte büyük miktarlarda CO₂ salınımı gerçekleşir. Tarımda ise özellikle metan, hayvancılıkla ilgili olarak hayvanların sindirim süreçlerinden ve azot oksit, gübreleme uygulamalarından kaynaklanır. Ayrıca, ormanların kesilmesi, karbon depolayan bitkilerin yok olmasına yol açar, bu da atmosfere daha fazla CO₂ salınmasına neden olur (Klein et al., 2008; Reza et al., 2024; Shurpali et al., 2019; Wikipedia, 2025).

Sera gazı emisyonları, global sıcaklık artışına yol açarak iklim değişikliğine neden olur. Bu süreç, deniz seviyelerinin yükselmesi, aşırı hava olaylarının artması, kuraklık ve sellerin şiddetinin artması gibi etkiler yaratır. Ayrıca, bu gazlar ozon tabakasına zarar vererek, insanların sağlığını tehdit eden UV ışınlarının daha fazla yüzeye ulaşmasına sebep olur. Karbon dioksit ve metan gibi gazlar, atmosferde uzun süre kalabildiği için, iklim değişikliğinin etkileri daha da derinleşmektedir. İnsan sağlığına etkileri, solunum yolları hastalıkları, kalp hastalıkları ve kanser gibi ciddi sağlık problemlerini içerir (Erdoğan, 2020; Reza et al., 2024; Shurpali et al., 2019; Wikipedia, 2025).

Sera gazı emisyonlarının etkileri ekonomik açıdan büyük kayıplara yol açmaktadır. İklim değişikliği nedeniyle tarımsal verimlilikte azalma, su kaynaklarının azalması ve ekosistem hizmetlerinin kaybı ekonomik zorluklara neden olur. Ayrıca, doğal afetlerin artışı, özellikle seller, kasırgalar ve kuraklık, altyapı hasarlarına yol açarak büyük maliyetlere sebep olmaktadır. Sera gazlarının olumsuz etkileri, sosyal yapıyı da tehdit eder; kıyı bölgelerinde yaşayan topluluklar deniz seviyesinin yükselmesi nedeniyle yerinden edilebilir, yoksulluk oranı artabilir ve göç dalgaları yaşanabilir (Metz, 2009; Reza et al., 2024; Wikipedia, 2025).

Küresel sera gazı emisyonlarını azaltmak için birçok uluslararası anlaşma ve strateji geliştirilmiştir. Bunlar arasında Paris Anlaşması, ülkelerin sera gazı emisyonlarını sınırlama ve ısınmayı 1.5-2°C arasında tutma hedefi koymaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, enerji verimliliği, elektrikli araçlar ve düşük karbonlu endüstriyel üretim gibi çözümler, sera gazı emisyonlarını azaltmak için önemli stratejilerdir. Ayrıca, ormanların korunması ve karbon emme kapasitesinin artırılması, doğal iklim çözümleri arasında yer almaktadır. Bu önlemler, sera gazı emisyonlarını kontrol altına almak ve iklim değişikliğini sınırlamak için kritik öneme sahiptir (Metz, 2009; Reza et al., 2024; Shurpali et al., 2019; Wikipedia, 2025).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Çalışma Alanı

Şanlıurfa ili, Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde, 30°–36° kuzey enlemleri ile 37°–40° doğu boylamları arasında yer almakta ve deniz seviyesinden ortalama 518 metre yüksekliktedir. Doğusunda Mardin, batısında Gaziantep, kuzeybatısında Adıyaman, kuzeyinde Diyarbakır ve güneyinde Suriye ile sınır komşusu olan il, 18.584 km² yüzölçümüyle Türkiye'nin tarım potansiyeli yüksek illerinden biridir. Türkiye'nin toplam tarım alanlarının yaklaşık %4,9'unu oluşturan Şanlıurfa, bu oranla Konya ve Ankara'nın ardından üçüncü sırada yer almaktadır (Şekil 3.1) (Bengisu, 1968; e-Kitap, 2022).



Şekil 3.1. Şanlıurfa'nın haritası.

Yarı kurak iklim özelliklerine sahip olan ilde yıllık ortalama yağış miktarı 462 mm'dir. Yüzey şekilleri itibarıyla %60,4 dalgalı arazi, %22 dağlık alan, %16,3 ova ve %1,3 yayla karakteri gösteren topografya, tarımsal çeşitliliği desteklemektedir (Bengisu, 1968). Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) kapsamında sağlanan sulama olanakları, tarımsal faaliyetlerin genişlemesine katkı sağlayarak Şanlıurfa'yı bölgenin tarımsal üretiminde stratejik bir konuma taşımıştır (Benek, 2005). Bu bağlamda, Şanlıurfa ilinin tarımsal üretimden kaynaklanan atıklarının biyokütle enerji üretiminde değerlendirilmesi, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik katkılarının araştırılması açısından önemli bir örnek alan oluşturmaktadır.

3.2. Tarımsal Ürün Üretim Verileri

Bu çalışma kapsamında, Şanlıurfa ilinin tarımsal üretim verileri, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayımlanan 2023 yılına ait istatistikler esas alınarak değerlendirilmiştir (TÜİK, 2025a, 2025b). Bu veriler, ilin tarımsal üretim kapasitesini ve ürün çeşitliliğini kapsamlı biçimde ortaya koymakta; aynı zamanda tarım alanlarının kullanımı ve yıllık üretim miktarları hakkında ayrıntılı bilgi sunmaktadır. Şanlıurfa, özellikle buğday, mısır ve pamuk gibi stratejik öneme sahip tarımsal ürünler bakımından Türkiye'nin önde gelen üretim merkezlerinden biri konumundadır. Ayrıca meyve ve sebze üretimi de ilin tarımsal ekonomisinde önemli bir yere sahiptir.

2023 yılı verilerine göre Şanlıurfa toplam tarımsal üretimi 5.419.640 ton, ilin toplam tarımsal üretim alanlarının büyük bir bölümü tahıllar ve diğer bitkisel ürünlere olup, bu kategoride toplam 928.746,1 hektar alanda üretim gerçekleştirilmiştir. En yüksek üretim miktarları, buğday (1.719.000 ton) ve mısır (1.552.000 ton) ürünlerinde kaydedilmiştir. Pamuk üretimi ise 881.000 ton olarak gerçekleşmiştir. Sebze grubunda en fazla üretim, domates (257.482 ton) ve biber (182.474 ton) ürünlerinde gözlemlenmiştir. Meyve üretimi açısından ise antep fıstığı (59.848 ton) ve zeytin (8.377 ton) öne çıkmaktadır (Çizelge 3.1). Bu veriler, Şanlıurfa'nın hem üretim kapasitesinin büyüklüğünü hem de biyokütle enerji üretimi açısından sahip olduğu potansiyeli ortaya koymaktadır.

Çizelge 3.1. 2023 Yılında şanlıurfa ilinde ürün tipine göre tarımsal üretim miktarları ve alan dağılımı.

Ürün gurupu	Ürün tipi	Üretim miktarı ÜM (ton/yıl)	Toplam (ton/yıl)	Alan A (ha)
Tahıl ve diğer bitkisel ürünleri	Arpa	384.000	3.902.560	928.746,1
	Ayçiçeği	19.137		
	Buğday	1.719.000		
	Çeltik	1.761		
	Darı	31		
	Mısır	1.552.000		
	Mercimek	170.766		
	Nohut	4.870		
	Pamuk	881.000		
	Patates	2.856		
	Şeker Pancarı	50.672		
	Soya Fasulyesi	557		
	Sorgum	90		
	Triticale	270		
	Yerfıstığı	52		
Sebze ürünleri	Fasulye, Taze	161	546.468	10.793,6
	Karpuz	59.167		
	Kavun	14.553		
	Biber	182.474		
	Salatalık	7.254		
	Patlıcan	25.377		
	Domates	257.482		
Meyve, içecek ve baharat ürünleri	Üzüm	4.699	86.110	183.818,8
	İncir	134		
	Elma	657		
	Armut	126		
	Kayısı	166		
	Şeftali	463		
	Nektarin	232		
	Erik	1.261		
	Badem	9.833		
	Antep Fıstığı	59.848		
	Ceviz	314		
	Zeytin	8377		
Genel Toplam	-	5.419.640	5.419.640	1.123.358,5

3.3. Tarımsal Biyokütle Atıklarının Özelliklerine İlişkin Yapılan Kabuller

Biyokütle, yaşayan veya yakın geçmişte yaşamış organizmalardan elde edilen, fosilleşmemiş biyolojik materyalleri ifade etmektedir. Tarımsal faaliyetler sonucu ortaya çıkan atıklar da biyokütle kapsamında değerlendirilmekte ve enerji üretiminde önemli bir kaynak olarak kullanılmaktadır. Tarımsal atıkların biyokütle enerji potansiyeli; iklim koşulları, hasat yöntemi, ürün türü, Üretim Miktarı (ÜM), Atık/Ürün Oranı (AÜO), Nem içeriği (N), Alt Isıl Değer (AID) ve Kullanılabilirlik Oranı (KO) gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Avcıoğlu

et al., 2011; Avcıoğlu et al., 2019; Büyükgüngör, 1984; Riva et al., 2014; Tumen Özdil & Caliskan, 2022). Bu çalışma kapsamında, tarımsal atık türlerine göre AÜO (ton atık/ton ürün), N (%), AID (GJ/ton) ve KO (%) değerleri, literatürde yer alan farklı çalışmalardan derlenmiş; minimum ve maksimum değerlerin ortalaması esas alınarak hesaplamalara dâhil edilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 3.2’de, bu çalışma kapsamında hesaplanan ortalama değerler ise Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Literatürdeki farklı çalışmalarda belirlenen tarımsal atıkların AÜO, N, AID ve KO için minimum ve maksimum değerleri.

Tarımsal ürün	Atık tipi	Min.-Maks. (Referans*)			
		AÜO (ton Atık/ton Ürün)	N (%)	AID (GJ/ton)	KO (%)
Arpa	Saman	1.08–1.36 ⁽¹⁻³⁾	11–15 ^(2,3,7;16;20;22;24)	17.5–19.5 ^(1-3;5;7;16;22)	15 ^(2;16)
Ayçiçeği	Sap	0.70–3.50 ⁽¹⁻⁷⁾	14–60 ^(2,3;7;20;22)	13.2–18.0 ^(2,3;5-8)	60 ⁽³⁾
Buğday	Saman	0.50–1.75 ^(1-4;6;8-12)	10–15 ^(2,3;7;8;10;16;20)	13.9–19.5 ^(1-9;16;22;24)	15 ^(2;16)
Çeltik	Sap	0.45–1.75 ^(1,3;9;13)	10–25 ^(8;15;22)	8.8–16.7 ^(3;8;22;9;14)	60 ⁽³⁾
Darı	Saman	1.40–3.00 ^(8;13;9;14;15)	15–15 ^(8;15)	12.5–15.5 ^(8;14;25)	60 ⁽²⁵⁾
Mısır	Sap	0.70–2.50 ^(2-4;6;8;12;14;15)	40–65 ^(2,3;5;16;20)	13.8–18.5 ^(1-3;5;16;22;24)	60 ^(3;16)
Mercimek	Saman	0.67–1.67 ^(7;16)	15–15 ⁽⁷⁾	17.1–17.1 ⁽⁷⁾	10 ⁽⁷⁾
Nohut	Saman	1.30–1.50 ^(7;11-13;15)	15–15 ⁽⁷⁾	15.6–15.6 ⁽¹⁶⁾	90 ^(7;16)
Pamuk	Sap	1.10–3.50 ^(1;5;9;11-13)	60–60 ^(3;10;15;22)	14.6–18.2 ^(1;3;4;9;14;22;24)	60 ⁽³⁾
Patates	Kök,Yaprak	0.45–0.45 ^(7;15;16)	20–95 ^(7;15;16)	16.0–16.0 ^(7;16)	95 ^(7;16)
Şeker Pancarı	Yaprak	0.13–0.13 ^(4;16;17)	15–75 ^(7;16;20;22)	14.6–18.0 ^(1;4;5;16;22)	15 ^(7;16)
Soya Fasulyesi	Saman	0.76–3.50 ^(1;9;10;15;13;18)	5–15 ^(7;15;16;22)	14.7–19.4 ^(7;14;15;16;25)	60 ⁽¹⁾
Sorgum	Saman	1.25–2.60 ^(8;13;14;15)	15–60 ^(8;15;25)	12.4–17.0 ^(14;21;25)	60 ⁽²⁵⁾
Triticale	Saman	0.99–1.10 ^(1;3;19)	15–60 ^(1;3)	17.8–17.8 ⁽²²⁾	60 ⁽³⁾
Yerfıstığı	Saman-Sap	2.10–2.30 ^(13;14;15)	15–22 ^(3;15)	11.2–20.7 ^(14;21;22)	80 ⁽³⁾
Fasulye, Taze	Sap	1.40–1.50 ^(11;12;15;16;20)	5–15 ^(7;15;16)	14.7–14.7 ⁽²⁵⁾	15 ⁽¹⁶⁾
Karpuz	Sap	0.30–0.30 ^(16;20)	25–25 ⁽²⁰⁾	16.3–16.3 ⁽²¹⁾	100 ⁽²⁶⁾
Kavun	Sap	0.30–0.30 ^(16;20)	25–25 ⁽²⁰⁾	16.1–16.1 ⁽²¹⁾	100 ⁽²⁶⁾
Biber	Sap	0.40–0.65 ^(16;20)	25–25 ⁽²⁰⁾	17.8–17.8 ⁽²¹⁾	100 ⁽²⁶⁾
Salatalık	Sap	0.10–0.10 ^(16;20)	25–25 ⁽²⁰⁾	16.2–16.2 ⁽²¹⁾	100 ⁽²⁶⁾
Patlıcan	Sap	0.64–0.65 ^(16;20)	25–25 ⁽²⁰⁾	17.7–17.7 ⁽²¹⁾	100 ⁽²⁶⁾
Domates	Sap	0.30–0.45 ^(16;17;20)	25–25 ⁽²⁰⁾	15.7–15.7 ⁽²¹⁾	95 ⁽¹⁶⁾
Üzüm	Budama	0.39–0.58 ^(2;16;17;21)	40–50 ^(2;22)	18.0–18.9 ^(16;21)	80 ⁽¹⁶⁾
İncir	Budama	0.21–0.21 ⁽²⁾	55–55 ⁽²⁾	18.0–18.4 ^(2;16)	80 ⁽¹⁶⁾
Elma	Budama	0.19–0.19 ^(16;17)	40–80 ^(16;20;22)	17.8–20.0 ^(5;16;22)	80 ⁽¹⁶⁾
Armut	Budama	0.14–1.50 ^(2;17;21)	35–40 ⁽²⁾	18.0–18.4 ^(2;16;21;22)	80 ⁽¹⁶⁾
Kayısı	Budama	0.19–2.84 ^(17;21;22)	40–80 ^(1;2;20;23)	19.3–20.8 ^(16;21;22;25)	80 ⁽¹⁶⁾
Şeftali	Budama	0.30–1.30 ^(2;17;21)	35–45 ^(2;16;20)	18.0–20.4 ^(16;21;22)	80 ⁽¹⁶⁾
Nektarin	Budama	0.40–0.40 ^(2;23)	70–70 ^(20;23)	18.0–18.4 ^(16;22)	80 ⁽²³⁾
Erik	Budama	0.19–1.64 ^(1;21)	40–80 ^(21;22)	20.2–20.2 ⁽²¹⁾	80 ⁽²³⁾
Badem	Budama	0.28–0.61 ^(1;2;21)	35–40 ^(2;22)	18.0–19.3 ^(16;21;22)	70 ^(16;21)
Antep Fıstığı	Budama	4.80–4.80 ⁽²¹⁾	35–35 ⁽²⁾	18.0–19.0 ^(1;2)	80 ⁽¹⁶⁾
Ceviz	Budama	0.26–0.44 ^(2;16;17;21)	50–80 ^(16;21)	19.0–19.0 ⁽¹⁶⁾	50 ⁽¹⁶⁾
Zeytin	Budama	1.14–1.25 ⁽²⁾	35–45 ⁽²⁾	18.1–18.8 ^(2;16;25)	50 ⁽¹⁶⁾

Referans*: ¹(Öztürk ve Başçetinçelik, 2006); ²(Riva ve ark., 2014); ³(Sümer ve ark., 2016); ⁴(Ergüdenler ve Işığür, 1994); ⁵(Karabaş, 2019); ⁶(Milhau ve Fallot, 2013); ⁷(Şahin ve ark., 2024); ⁸(Ackom ve ark., 2013); ⁹(Butt ve ark., 2013); ¹⁰(Chen ve ark., 2009); ¹¹(Cuiping ve ark., 2004); ¹²(Zhou ve ark., 2011); ¹³(Avcıoğlu ve ark., 2011); ¹⁴(Iye ve Bilsborrow, 2013); ¹⁵(Okello ve ark., 2013); ¹⁶(Görgülü, 2019); ¹⁷(Gökçek ve Mert, 2023); ¹⁸(Büyükgüngör, 1984); ¹⁹(Diken ve Kayışoğlu, 2020); ²⁰(Tunçez ve Soylu, 2022); ²¹(Sevgili ve Koçer, 2023); ²²(Skoulou ve Zabaniotou, 2007); ²³(Dursun, 2020); ²⁴(Al, 2021); ²⁵(Demirel ve ark., 2019); ²⁶(Ertop ve Atılğan, 2019).

Çizelge 3.3. Bu çalışma için kabul edilen AÜO, N, AID ve KO ortalamaları

Tarımsal ürün	Atık tipi	Ortalama			
		AÜO (ton Atık/ton Ürün)	N (%)	AİD (GJ/ton)	KO (%)
Arpa	Saman	1.22	13	18.5	15
Ayçiçeği	Sap	2.10	37	15.6	60
Buğday	Saman	1.12	12	16.7	15
Çeltik	Sap	1.10	17	12.7	60
Dan	Saman	2.20	15	14.0	60
Mısır	Sap	1.60	52	16.1	60
Mercimek	Saman	1.17	15	17.1	10
Nohut	Saman	1.40	15	15.6	90
Pamuk	Sap	2.30	60	16.4	60
Patates	Kök,yaprak	0.45	57	16.0	95
Şeker Pancarı	Yaprak	0.13	45	16.3	15
Soya Fasulyesi	Saman	2.13	10	17.0	60
Sorgum	Saman	1.92	37	14.7	60
Triticale	Saman	1.04	37	17.8	60
Yerfıstığı	Saman-Sap	2.20	18	15.9	80
Fasulye, Taze	Sap	1.45	10	14.7	15
Karpuz	Sap	0.30	25	16.3	100
Kavun	Sap	0.30	25	16.1	100
Biber	Sap	0.52	25	17.8	100
Salatalık	Sap	0.10	25	16.2	100
Patlıcan	Sap	0.64	25	17.7	100
Domates	Sap	0.37	25	15.7	95
Üzüm	Budama	0.48	45	18.4	80
İncir	Budama	0.21	55	18.2	80
Elma	Budama	0.19	60	18.4	80
Armut	Budama	0.82	37	18.2	80
Kayısı	Budama	1.51	60	20.0	80
Şeftali	Budama	0.80	40	19.2	80
Nektarin	Budama	0.40	70	18.2	80
Erik	Budama	0.91	60	20.2	80
Badem	Budama	0.44	37	18.6	70
Antep Fıstığı	Budama	4.80	45	18.5	80
Ceviz	Budama	0.35	65	19.0	50
Zeytin	Budama	1.19	40	18.4	50

3.4. Teorik Tarımsal Biyokütle Potansiyelinin Hesaplanması

Teorik Tarımsal Biyokütle Potansiyeli (TTBP), tarımsal atıklardan elde edilebilecek toplam biyokütle miktarını ifade etmektedir. Bu değer, kurutulmuş bitki materyalinden elde edilebilecek atık miktarının hesaplanmasında temel alınmaktadır. TTBP; tarımsal ürünlerin tipine, yıllık üretim miktarına (ÜM), artık/ürün oranına (AÜO) ve nem içeriğine (N) faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. TTBP, aşağıda verilen Denklem 3.1 ile hesaplanmıştır (Görgülü, 2019; Şahin et al., 2024; Tumen Özdil & Caliskan, 2022).

$$TTBP = M \times AO \times \left[\frac{100 - N}{100} \right] \quad (3.1)$$

Bu denkelmde:

- TTBP: Teorik tarımsal biyokütle potansiyeli (ton/yıl),

- ÜM: Tarımsal ürünün üretim miktarını (ton/yıl),
- AÜO: Artık/Ütün Oranı (Oransal değer),
- N: nem içeriğini yüzdelik oranı (%).

3.5. Teorik Enerji Potansiyeli Hesaplaması

Bu çalışmada teorik enerji potansiyeli (TEP) hesaplamalarında, her bir tarımsal ürün için belirlenen alt ısı değerleri (AID) esas alınmıştır. TEP, teorik tarımsal biyokütle potansiyeli (TTBP) ile alt ısı değerlerinin çarpılması yoluyla elde edilmiştir. Hesaplamalar Denklem 3.2. kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Avcıoğlu et al., 2019; Tumen Özdil & Caliskan, 2022). Her bir tarımsal ürün için ayrı ayrı hesaplanan TEP değerleri, toplam TEP'in belirlenmesinde temel alınmıştır.

$$TEP = TTBP \times AID \quad (3.2)$$

Bu denklemde:

- TEP: Her tarımsal ürünün kurutulmuş biyokütlesinden elde edilebilecek teorik enerji potansiyelini (GJ/yıl),
- TTBP: Her tarımsal ürün atığın için teorik biyokütle potansiyeli (ton/yıl),
- AID: Her bitki atığına ait alt ısı değeri (GJ/ton) belirtir.

3.6. Kullanılabilir Enerji Potansiyeli Hesaplaması

Bu çalışma kapsamında, her bir tarımsal ürün için tanımlanan kullanılabilirlik oranı (KO), biyokütleden enerji üretiminde değerlendirilebilecek miktarın belirlenmesinde temel bir parametre olarak kabul edilmiştir. Tarla ve bahçe bitkisi kalıntılarından elde edilebilecek kullanılabilir enerji potansiyeli (KEP), teorik enerji potansiyelinin kullanılabilirlik oranı ile çarpılması yoluyla hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, aşağıda verilen Denklem 3 kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Avcıoğlu et al., 2019; Tumen Özdil & Çalışkan, 2022).

$$KEP = TEP \times \left[\frac{KO}{100} \right] \quad (3.3)$$

Bu denklemde:

- KEP: Kullanılabilir enerji potansiyeli (GJ/yıl)
- TEP: Teorik enerji potansiyeli (GJ/yıl)
- KO: Tarımsal ürünün biyokütlesinin enerji üretimi için kullanılabilirlik oranını belirtir (%).

3.7. Elektrik Enerji Eşdeğeri Hesaplaması

Kullanılabilir Enerji Potansiyeli (KEP) hesaplamaları sonucunda elde edilen enerji miktarı, elektrik enerjisi eşdeğerine (EEeşd.) dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm, elde edilen enerji potansiyelinin elektrik üretimi açısından verimliliğini ve pratik kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Dönüşümde, 1 GJ = 0.278 MWh dönüşüm katsayısı esas alınmıştır (AKHTARI et al., 2018; AKSA ENERJİ, 2017; Energy Conversion Tables, 2016; Units & Conversions Fact Sheet , 2007; VÄÄRÄLÄ, 2023).

Hesaplamalarda, tarımsal atıklara dayalı biyokütle enerji santrallerinde ortalama %30 net elektrik dönüşüm verimliliği (η) dikkate alınmıştır (Brasil et al., 2020; Caputo et al., 2005; Farooq & Kumar, 2013; IRENA, 2015). Elektrik enerjisi eşdeğeri, aşağıda verilen Denklem 3.4 ile hesaplanmıştır:

$$EE_{esd.} = [KEP \times 0.278] \times \eta \quad (3.4)$$

Bu denklemde:

- EEeşd.: Elektrik enerjisi eşdeğeri (MWh),
- KEP: Kullanılabilir enerji potansiyeli (GJ),
- 0.278: GJ'nin MWh cinsinden dönüşüm katsayısı (MWh/GJ),

- η : Net elektrik dönüşüm verimliliği (%).

3.8. Sera Gazı Emisyonlarının Hesaplanması

Çalışmada, Şanlıurfa ilinde tarımsal atıklardan elde edilen biyokütle kaynaklı elektrik enerjisi üretimi sonucu oluşacak sera gazı emisyonları hesaplanmıştır. Hesaplamalar, Hükûmetlerarası İklim Değişikliği Paneli “Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC) tarafından enerji üretiminden kaynaklanan CO₂eşd. hesaplama yöntemi esas alınarak gerçekleştirilmiş; üretim teknolojisine ait yakıtın emisyon faktörü (EF) verileri kullanılmıştır (IPCC, 2006b). Elde edilen emisyon miktarları, karbon dioksit eşdeğeri (CO₂eşd.) cinsinden ifade edilmiştir.

Ayrıca, aynı miktarda elektrik enerjisinin kömür, doğalgaz ve petrol gibi fosil yakıt kaynaklarından elde edilmesi durumunda oluşacak sera gazı emisyonları da hesaplanarak, biyokütle ve fosil yakıt kaynaklı üretimlerin emisyon düzeyleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, biyokütle enerjisinin sera gazı emisyonlarının azaltılmasına olan katkısı ortaya konulmuştur.

Sera gazı emisyonlarının karbon dioksit eşdeğeri (CO₂eşd.) cinsinden hesaplamaları, IPCC tarafından önerilen yöntemle dayanılarak; Denklem 3.5 ve Çizelge 3.4’te verilen ortalama emisyon faktörleri (EF) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (IPCC, 2006b; SAK et al., 2019; WNA, 2011).

$$TonCO_2esd. = EEesd. \times EF \quad (3.5)$$

Bu denklemde:

- CO₂eşd.: Toplam karbondioksit eşdeğeri emisyon (ton CO₂eşd./yıl),
- EEeşd.: Elektrik enerjisi eşdeğeri (MWh/yıl),
- EF: Üretim teknolojisine göre belirlenen emisyon faktörü (ton CO₂eşd./MWh).

Çizelge 3.4. Elektrik üretim kaynaklarına göre emisyon faktörleri (EF).

Elektrik üretim kaynağı	Miktar	Sera gazı emisyonları faktörü (EF)		
		En düşük	Ortalama	En Yüksek
Biyokütle	Ton CO ₂ eşd./MWh	0.01	0.045	0.101
Kömür	Ton CO ₂ eşd./MWh	0.756	0.888	1.310
Petrol	Ton CO ₂ eşd./MWh	0.547	0.733	0.935
Doğalgaz	Ton CO ₂ eşd./MWh	0.49	0.41	0.65

3.9. Tarımsal Atıklardan Biyokütle Enerjisi Üretimi Potansiyelinin Sera Gazı Emisyonları Azaltımı ve Çevresel Etkilerinin Analizi

Bu çalışma kapsamında, sera gazı emisyonlarının azaltım potansiyelinin belirlenmesinde Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından geliştirilen “Greenhouse Gas Equivalencies Calculator” aracı kullanılmıştır (EPA, 2024a, 2024b). Bu araç, biyokütle enerjisi üretiminin çevresel etkilerini değerlendirmek ve 1 ton karbondioksit eşdeğeri (CO₂eşd.) emisyonun çevresel karşılıklarını somutlaştırmak amacıyla tercih edilmiştir.

Hesaplanan ortalama önlenebilir CO₂eşd. değeri esas alınarak, 1 ton CO₂eşd. emisyonun çevresel eşdeğerlikleri analiz edilmiştir. Bu analiz, biyokütle enerjisinin emisyon azaltımındaki etkisini ve çevresel katkılarını ortaya koymaktadır. Çizelge 3.8’de, 1 ton CO₂eşd. emisyonun teknik eşdeğerlikleri verilmiştir.

Çizelge 3.5. 1 ton CO₂ eşdeğeri emisyonun teknik eşdeğerlikleri.

Etki	Eşdeğerlik Açıklaması	Miktar	Birim
Biyokütle Enerjisinin Sera Gazı Emisyonunu Azaltmadaki Eşdeğer Etkileri	10 yıl boyunca büyütülen ağaç fidanı	15	Adet
	Geri dönüştürülerek bertarafı önlenecek atık	0.321	Ton
	Geri dönüştürülen çöp torbası	77.1	Adet
	1 yıl çalışan rüzgar türbini kapasitesi	0.0003	Adet
	1 yıl karbon emen orman alanı	0.00091	km ²
	Tarıma dönüştürülmekten korunan orman alanı	0.000005	km ²
Enerji Kullanımı Eşdeğeri	Tüketilen benzin miktarı	386.1	L
	Tüketilen dizel miktarı	337	L
	Yakılan kömür miktarı	0.46	Ton
	Hanehalkının yıllık toplam enerji tüketimi	0.122	Hane/Yıl
	Hanehalkının yıllık sadece elektrik tüketimi	0.189	Hane/Yıl

Bu analiz, tarımsal atıkların biyokütleyle dönüştürülmesi ile elde edilen enerji üretiminin, sera gazı emisyonlarını azaltma kapasitesini ve çevresel katkılarını ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

3.10. Tarımsal Atıkların Açık Alanda Yakılmasından Kaynaklanan Sera Gazı

Emisyonlarının Analizi

Bu çalışmada, tarımsal atıkların açık alanda yakılmasından kaynaklanan sera gazı emisyonları, IPCC 2006 Rehber Dokümanı'na dayalı Tier 1 metodolojisi kullanılarak hesaplanmıştır (IPCC, 2006a). İlk olarak, her ürün grubuna ait yıllık Tarımsal Atık Miktarı (TAM), daha önce açıklanan Üretim Miktarı (ÜM) ve Atık/Ürün Oranı (AÜO) verileri kullanılarak Denklem 3.6 ile hesaplanmıştır. Elde edilen TAM değerleri üç ana ürün grubu altında sınıflandırılmış ve Şanlıurfa ili özelinde, her grup için tarım alanı (A) verileriyle birlikte Çizelge 3.5'te sunulmuştur. Ardından, tarımsal atıkların yakıt kütlesi (ton/ha) hesaplanmıştır. Bu hesaplama, her bir ürün grubuna ait Toplam Atık Miktarı (TAM) ile ekili Alan (A) verilerine dayalı olarak Denklem 3.7 ile yapılmıştır (IPCC, 2006a).

$$TAM(ton/yl) = M \times AUO \quad (3.6)$$

Bu denklemde:

- TAM: Tarımsal atık miktarı (ton/yıl),
- ÜM: Ürün miktarı (ton/yıl),
- AÜO: Atık/Ürün Oranı (Kat).

Çizelge 3.6. Şanlıurfa ilinde hesaplanan Tarımsal Atık Miktarları (TAM) ve Alanları (A).

Ürün Grubu	TAM (ton/yıl)	A (ha)
Tahıllar, Nadas, Süs ve Diğer Bitkisel Ürünler	6.906.238	803.015
Sebze Ürünleri	217.990	183.819
Meyveler, İçecek ve Baharat Bitkileri	123.747	10.794

$$YK(ton/ha) = \frac{TAM}{A} \quad (3.7)$$

Açık alanda yakılan tarımsal atıklardan kaynaklanan sera gazı emisyonları, IPCC Tier 1 metodolojisine göre Denklem 3.8 ile hesaplanmıştır. Bu yöntem, tarım alanlarında meydana gelen yangınlardan kaynaklanan sera gazı türlerinin (CO₂, CO, CH₄, NO_x, N₂O) miktarlarını tahmin etmeye yöneliktir.

$$SGTE(ton/yl) = A \times YK \times YF \times EF_{SGT} \times 10^{-3} \quad (3.8)$$

Bu denklemde:

- SGTE: Sera gazı türüne göre yıllık emisyon miktarı (ton/yıl),
- A: Yakılan alan (ha),
- YK: Yakıt kütlesi (ton/ha),
- YF: Yanma faktörü (bu çalışmada 0,80 olarak alınmıştır),
- EF: Sera gazı türüne göre emisyon faktörü (g/kg kuru madde) (Çizelge 3.6),
- 10^{-3} : Ton dönüşüm katsayısıdır (1 g/kg = 10^{-3} ton).

Çizelge 3.7. IPCC'ye göre açık alanda tarımsal atık yakımı için emisyon faktörleri (EF).

Sera Gazı Türü (SGT)	CO ₂	CO	CH ₄	NO _x	N ₂ O
EF (g/kg)	1515	92	2,7	2,5	0,07

Üçüncü aşamada, elde edilen sera gazı emisyonları çevresel etkilerinin daha kapsamlı değerlendirilmesi amacıyla toplam karbondioksit eşdeğerine (CO₂eşd.) dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm, IPCC tarafından belirlenen her bir sera gazının 100 yıllık Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) katsayılarına dayanarak Denklem 3.9 kullanılarak yapılmıştır.

$$CO_{2eşd.} = (CO_2 \times KIP_{CO_2}) + (CH_4 \times KIP_{CH_4}) + (N_2O \times KIP_{N_2O}) + (CO \times KIP_{CO}) + (NO_x \times KIP_{NO_x}) \quad (3.9)$$

Bu denklemde:

- CO₂eşd.: Toplam karbondioksit eşdeğeri emisyon (ton),
- CO₂, CH₄, N₂O, CO: Hesaplanan sera gazı türü göre miktarları (ton),

KIPCO₂, KIPCH₄, KIPN₂O, KIPCO ve KIPNO_x: katsayılarıdır. Her bir sera gazı için 100 yıllık Küresel Isınma Potansiyeli katsayısıdır. KIP değerleri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Sera gazlarına ait 100 yıllık Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) değerleri.

Sera Gazı Türü (SGT)	CO ₂	CO	CH ₄	NO _x	N ₂ O
KIP (tonCO ₂ eşd.)	1	3	28	30	298

3.111. Ortalama Önlenebilir Sera Gazı Emisyonları

Bu çalışma kapsamında, tarımsal atıklardan biyokütle enerjisi üretilmesiyle yıllık olarak önlenebilecek ortalama sera gazı emisyonları hesaplanmıştır. Bu hesaplama, tarımsal atıklardan kaynaklanan CO₂ eşd. (BCO₂eşd.) emisyonlarının; kömür (KCO₂eşd.), petrol (PCO₂eşd.), doğalgaz (DCO₂eşd.) ve açık alanda yakma (ACO₂eşd.) gibi alternatif senaryolara göre karşılaştırılması esasına dayanmaktadır. Her bir senaryoda, ilgili enerji kaynağından kaynaklanan CO₂eşd. miktarından tarımsal atıklardan elde edilen biyokütle kaynaklı CO₂eşd. miktarı çıkarılmış ve bu dört senaryonun ortalaması alınarak ortalama önlenebilecek CO₂eşd. hesaplanmıştır (Denklem 3.10).

$$Ort.\nlenebilenCO_2eşd. = \frac{(KCO_2eşd. - BCO_2eşd.) + (PCO_2 - BCO_2eşd.) + (DCO_2 - BCO_2eşd.) + (ACO_2eşd. - BCO_2eşd.)}{4} \quad (3.10)$$

Bu denklemde:

- KCO₂eşd.: Kömür kullanımından kaynaklanan karbon dioksit eşdeğeri emisyonu
- PCO₂eşd.: Petrol kullanımından kaynaklanan karbon eşdeğeri emisyonu
- DCO₂eşd.: Doğalgaz kullanımından kaynaklanan karbon dioksit eşdeğeri emisyonu
- ACO₂eşd.: Tarımsal atıkların açık alanda yakılmasından kaynaklanan karbon dioksit eşdeğeri emisyonu
- BCO₂eşd.: Tarımsal atıklardan elde edilen biyokütle enerjisi kullanımından

kaynaklanan karbon dioksit eşdeğeri emisyonu

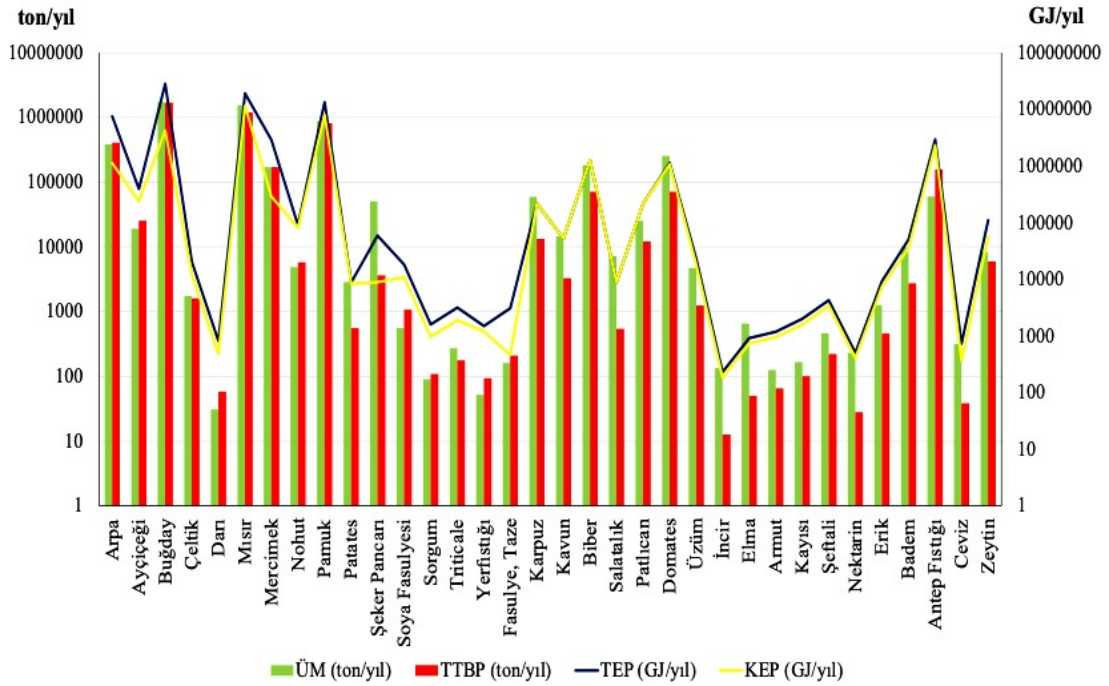
4. BULGULAR

Bu çalışmada, Şanlıurfa ilinde üretilen çeşitli tarımsal ürünlerin atıklarından elde edilebilecek biyokütle potansiyeli ile bu potansiyelin enerji üretimi, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkısı ve çevresel etkileri analiz edilmiştir. Hesaplamalar, tarımsal ÜM, TTBP, TEP, KEP ve EEeşd. verilerine dayanmaktadır. Elde edilen bulgular, Şanlıurfa ilinin önemli bir biyokütle enerji potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. 2023 yılı verilerine göre, il genelinde toplam 5.419.640 ton tarımsal üretimden yaklaşık 4.653.570 ton TTBP elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu miktarın yaklaşık 77.831.140 GJ TEP'ye, 30.807.666 GJ KEP'ye ve 2.569.362 MWh elektrik enerjisine eşdeğer olduğu hesaplanmıştır (Çizelge 4.1).

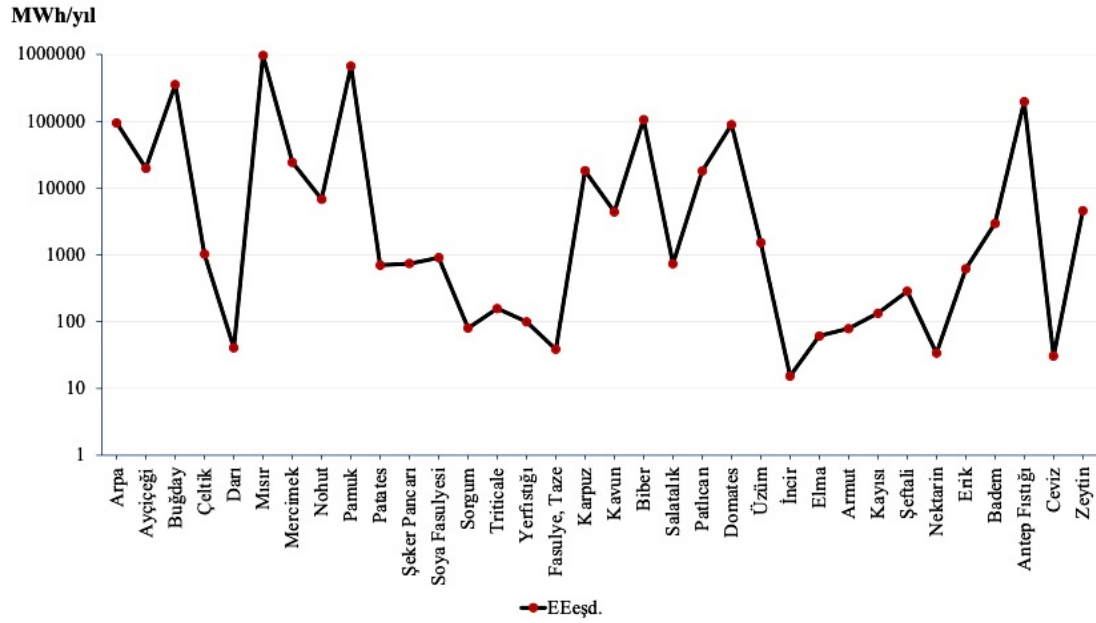
Çizelge 4.1. Şanlıurfa ili 2023 yılı tarımsal ürün ÜM ve tarımsal atıklardan elde edilebilecek TTBP, TEP, KEP ve EEeşd.

Ürün Tipi	ÜM (ton/yıl)	TTBP (ton/yıl)	TEB (GJ/yıl)	KEP (GJ/yıl)	EEeşd. (MWh/yıl)
Arpa	384.000	407.578	7.540.186	1.131.028	94.328
Ayçiçeği	19.137	25.318	394.965	236.979	19.764
Buğday	1.719.000	1.694.246	28.293.915	4.244.087	353.957
Çeltik	1.761	1.608	20.419	12.251	1.022
Darı	31	58	812	487	41
Mısır	1.552.000	1.191.936	19.190.170	11.514.102	960.276
Mercimek	170.766	169.827	2.904.038	290.404	24.220
Nohut	4.870	5.795	90.407	81.366	6.786
Pamuk	881.000	810.520	13.292.528	7.975.517	665.158
Patates	2.856	553	8.842	8.400	701
Şeker Pancarı	50.672	3.623	59.056	8.858	739
Soya Fasulyesi	557	1.068	18.152	10.891	908
Sorgum	90	109	1.600	960	80
Triticale	270	177	3.149	1.889	158
Yerfıstığı	52	94	1.492	1.193	100
Fasulye, Taze	161	210	3.089	463	39
Karpuz	59.167	13.313	216.995	216.995	18.097
Kavun	14.553	3.274	52.718	52.718	4.397
Biber	182.474	71.165	1.266.735	1.266.735	105.646
Salatalık	7.254	544	8.814	8.814	735
Patlıcan	25.377	12.181	215.603	215.603	17.981
Domates	257.482	71.451	1.121.785	1.065.695	88.879
Üzüm	4.699	1.241	22.826	1.8261	1.523
İncir	134	13	230	184	15
Elma	657	50	919	735	61
Armut	126	65	1.185	948	79
Kayısı	166	100	2.005	1.604	134
Şeftali	463	222	4.267	3.414	285
Nektarin	232	28	507	405	34
Erik	1.261	459	9.272	7.418	619
Badem	9.833	2.726	50.698	35.489	2.960
Antep Fıstığı	59.848	157.999	2.922.976	2.338.381	195.021
Ceviz	314	38	731	365	30
Zeytin	8.377	5.981	110.054	55.027	4.589
Toplam	5.419.640	4.653.570	77.831.140	30.807.666	2.569.362

Çizelge 9'deki veriler incelendiğinde, üretim miktarı açısından en yüksek değerlere sahip tarımsal ürünler buğday (1.719.000 ton/yıl), mısır (1.552.000 ton/yıl) ve pamuk (881.000 ton/yıl) olarak öne çıkmaktadır. Biyokütle potansiyeli (TTBP) açısından ise ilk sırada mısır (1.191.936 ton/yıl), ikinci sırada buğday (1.694.246 ton/yıl) ve üçüncü sırada pamuk (810.520 ton/yıl) yer almaktadır. Enerji potansiyelleri açısından değerlendirme yapıldığında; TEP açısından en yüksek değer 28.293.915 GJ ile buğdayda, ardından 19.190.170 GJ ile mısırdaki ve 13.292.528 GJ ile pamukta gözlemlenmiştir. KEP açısından en yüksek katkı 11.514.102 GJ ile mısır, 7.975.517 GJ ile pamuk ve 4.244.087 GJ ile buğday tarafından sağlanmaktadır. EEEşd. açısından ise mısır 960.276 MWh ile ilk sırada yer almakta, ardından pamuk 665.158 MWh ve buğday 353.957 MWh ile gelmektedir (Şekil 4.1 ve 4.2 bkz.).



Şekil 4.1. Şanlıurfa ili 2023 yılı tarımsal ürünlerine Ait ÜM, TTBP, TEP ve KEP dağılımı.



Şekil 4.2. Şanlıurfa ili 2023 yılı Tarımsal Ürünlerinden Elde Edilebilecek EEEşd. dağılımı.

Tarımsal ürünler arasında yapılan karşılaştırmalar, ÜM ile TTBP, TEP ve KEP değerleri arasında doğrudan bir orantı olmadığı ortaya koymuştur. Bu durum, her ürünün AÜO, N, AID ve KO'nın farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada aşağıda verilen örnekler, bu farklılıkların etkisini net bir biçimde ortaya koymaktadır:

- Buğday ve Pamuk:

- Buğday: 1.719.000 ton ÜM → 1.694.246 ton TTBP, 28.293.915 GJ TEP, 4.244.087 GJ KEP, 353.957 MWh EEEşd.

- Pamuk: 881.000 ton ÜM → 810.520 ton TTBP, 13.292.528 GJ TEP, 7.975.517 GJ KEP, 665.158 MWh EEEşd.

Her iki ürün de yüksek üretim miktarına sahiptir; ancak pamuk, buğdaya kıyasla daha düşük üretim miktarına rağmen daha fazla kullanılabilir enerji potansiyeli (KEP) ve elektrik enerjisi eşdeğeri (EEEşd.) üretmiştir. Bu durum, pamuğun atık/ürün oranının, alt ısı değerinin ve kullanılabilirlik oranının buğdaydan daha yüksek olduğunu göstermektedir.

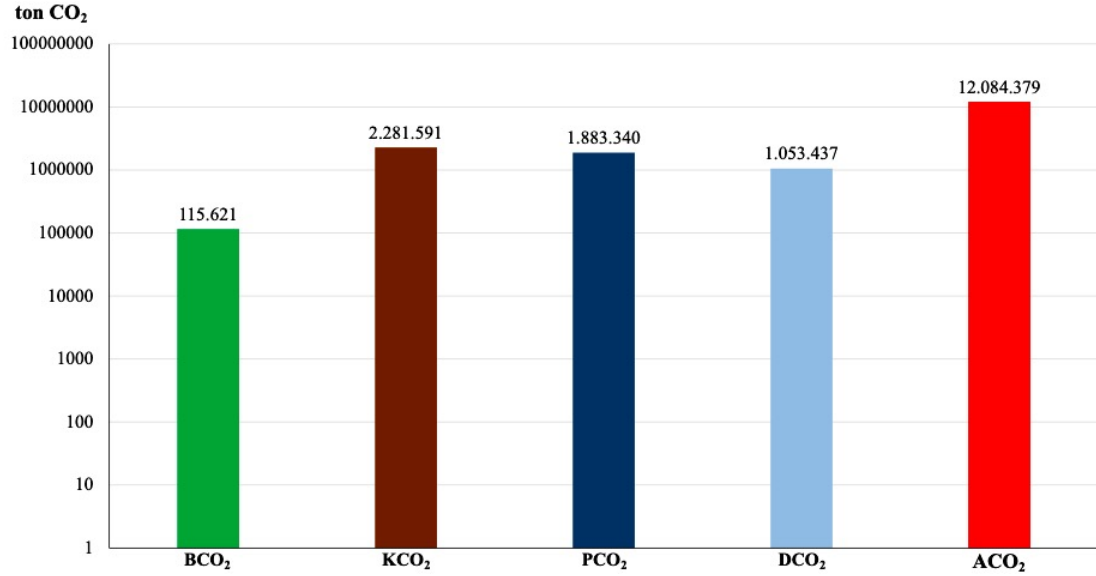
- Ayçiçeği ve Şeker Pancarı:

- Ayçiçeği: 19.137 ton ÜM → 25.318 ton TTBP, 394.965 GJ TEP, 236.979 GJ KEP, 19.764 MWh EEeşd.

- Şeker Pancarı: 50.672 ton ÜM → 3.623 ton TTBP, 59.056 GJ TEP, 8.858 GJ KEP, 739 MWh EEeşd.

Bu durumda, üretim miktarı daha düşük olan ayçiçeği, şeker pancarına kıyasla çok daha yüksek enerji potansiyeline sahiptir. Bu fark, ayçiçeği atıklarının daha yüksek enerji içeriğine sahip olmasından ve daha verimli şekilde dönüştürülebilmesinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, tarımsal atıklara dayalı biyokütle enerji planlaması ve yatırımlarında yalnızca üretim miktarları değil, ürünlerin atık özellikleri de dikkate alınmalıdır.

Tarımsal atıklardan elde edilebilecek biyokütle enerjisi, fosil yakıt kullanımına alternatif bir kaynak olarak değerlendirildiğinde, önemli miktarda sera gazı emisyonunun önlenebileceği ortaya konmuştur. Hesaplamalara göre, biyokütle kaynaklı enerji üretimi durumunda yıllık 115.621 ton CO₂ eşdeğeri (Şekil 4.3: BCO₂) emisyon ortaya çıkmaktadır. Aynı miktarda enerjinin kömürden üretilmesi hâlinde bu değer 2.281.591 ton (Şekil 4.3: KCO₂), petrolden sağlanması durumunda 1.883.340 ton (Şekil 4.3: PCO₂) ve doğalgazdan sağlanması hâlinde 1.053.437 ton CO₂eşd (Şekil 4.3: DCO₂) olarak hesaplanmıştır. Bu verilere göre biyokütle kullanımı, kömür kaynaklı sera gazı emisyonunu yaklaşık %95 oranında azaltmaktadır. Buna ek olarak, tarımsal atıkların açık alanda yakılması hâlinde ortaya çıkan emisyon miktarı ise 12.084.379 ton CO₂eşd. düzeyindedir (Şekil 4.3: ACO₂). Bu miktar, biyokütle enerji üretimi sürecinde oluşan emisyonun yaklaşık 104 katı olup, bu uygulamanın çevresel zararı açıkça ortaya koymaktadır. Bu bağlamda hesaplanan bu biyokütle enerjisi potansiyeli, yalnızca fosil yakıtların yerine geçerek değil, aynı zamanda açık alan yakımlarının da önüne geçerek toplamda hem fosil yakıtlar hem açık alanda yakılmasından ortalama 4.210.066 ton CO₂eşd. emisyonun önlenmesini sağlamaktadır (Çizelge 4.2).



Şekil 4.3. Şanlıurfa ili 2023 yılı tarımsal atıklardan elde edilen biyokütle enerjisinin CO₂ eşdeğeri emisyonu ile aynı enerjinin kömür, petrol, doğalgaz ve açık alan yakımı yoluyla üretilmesi durumunda oluşabilecek emisyonların karşılaştırılması.

Çizelge 4.2. Tarımsal atıklardan elde edilebilecek biyokütle enerjisi ile fosil yakıt kullanımı ve açık alan yakımına kıyasla önlenebilecek ortalama yıllık CO₂ eşdeğeri emisyon miktarları.

BCO ₂ eşd.	KCO ₂ eşd.	PCO ₂ eşd.	DCO ₂ eşd.	ACO ₂ eşd.	Biyokütle Ortalama Önsenebilen Ö-CO ₂ eşd.
115.621	2.165.970	1.767.719	937.816	11.968.758	4.210.065

Biyokütle enerjisinin 4.210.066 ton CO₂eşd. sera gazı azaltımı, çeşitli çevresel ve enerji tasarrufu karşılıklarıyla açıklanabilir. Bu miktar, 10 yıl boyunca yaklaşık 63 milyon ağaç fidanının karbon tutumu, 1.351.431 ton atığın geri dönüştürülerek bertarafı ve 513.628 hanenin yıllık enerji ihtiyacının karşılanmasına eşdeğer görülmüştür. Ayrıca 1.263 adet rüzgar türbini kapasitesi veya 1.936.630 ton kömürün yakılmaması anlamına gelmektedir (Çizelge 4.3). Bu eşdeğerlikler, biyokütle enerjisinin sadece sera gazı azaltımına değil, aynı zamanda sürdürülebilir atık yönetimi, orman koruma ve enerji arz güvenliğine de önemli katkılar sağladığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.3. 4.210.066 ton CO₂ eşdeğerinin çevresel ve enerji eşdeğerlikleri.

Etki Alanı	Eşdeğerlik Açıklaması	Miktar	Birim
Biyokütle Enerjisinin Sera Gazı Emisyonunu Azaltmadaki Eşdeğer Etkileri	10 yıl boyunca büyütülen ağaç fidanı	63.150.990	Adet
	Geri dönüştürülerek bertarafı önlenen atık	1.351.431	Ton
	Geri dönüştürülen çöp torbası	324.596.089	Adet
	1 yıl çalışan rüzgar türbini kapasitesi	1.263	Adet
	1 yıl karbon emen orman alanı	3.831	Km ²
	Tarıma dönüştürülmekten korunan orman alanı	21,05	Km ²
Enerji Kullanımı Eşdeğeri	Tüketilen benzin miktarı	1.625.506.483	Litre
	Tüketilen dizel miktarı	1.418.792.242	Litre
	Yakılan kömür miktarı	1.936.630	Ton
	Hanehalkının yıllık toplam enerji tüketimi	513.628	Hane/Yıl
	Hanehalkının yıllık elektrik tüketimi	795.702	Hane/Yıl

Elde edilen bulgular, Şanlıurfa ilinin tarımsal atıklarından kaynaklanan biyokütle potansiyelinin oldukça yüksek olduğunu ve bu potansiyelin uygun şekilde değerlendirilmesi hâlinde çevresel faydalarının önemli boyutlara ulaşabileceğini ortaya koymaktadır. Mevcut durum itibarıyla bu potansiyelin büyük bir kısmı değerlendirilememekte ve tarımsal atıklar çoğunlukla açık alanda yakılarak hem enerji kaybına hem de çevresel tahribata yol açmaktadır. Bu durum, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji politikalarının gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Ayrıca, biyokütle enerjisi kullanımı sadece sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda kırsal kalkınmaya da hizmet etmektedir. Yerel kaynakların değerlendirilmesi ile hem enerji arz güvenliği desteklenmekte hem de çiftçilere alternatif gelir kaynakları yaratılmaktadır. Bu doğrultuda Şanlıurfa ili özelinde kurulacak biyokütle enerji tesisleri, hem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacak hem de ekonomik fayda sağlayacaktır.

5. TARTIŞMA

Bulgular, Şanlıurfa ilinin tarımsal atıklara dayalı önemli bir biyokütle enerji potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen TTBP, TEP, KEP ve EEeşd. değerleri, tarımsal atıkların enerjiye dönüştürülmesinin hem enerji arz güvenliğine katkı sağladığını hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir.

Tarımsal üretim miktarı yüksek olan buğday, mısır ve pamuk gibi ürünlerin enerji potansiyeli bakımından öne çıkması beklenen bir sonuç olmakla birlikte, bazı ürünlerin düşük üretim miktarlarına rağmen yüksek enerji çıktısı sunması dikkat çekicidir. Özellikle ayçiçeği gibi ürünlerin yüksek enerji potansiyeli, tarımsal atıkların sadece miktar bakımından değil, içerdiği enerji yoğunluğu açısından da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bulgular, tarımsal atıklardan enerji üretiminde yalnızca üretim miktarına değil, atık özelliklerine ve enerjiye dönüşüm verimliliğine dayalı çok boyutlu bir değerlendirme yapılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu durum, biyokütle yatırımları için öncelikli ürünlerin belirlenmesi ve yerel koşullara uygun stratejilerin geliştirilmesi açısından önem arz etmektedir.

Sera gazı emisyonları açısından elde edilen veriler, biyokütle enerjisinin fosil yakıtlara kıyasla önemli ölçüde daha düşük CO₂ salımıyla enerji üretebildiğini göstermektedir. 2.281.591 ton CO₂eşd. yerine 115.621 ton CO₂eşd. gibi bir emisyon farkı, çevre politikaları açısından biyokütlenin önemini artırmaktadır. Bu bağlamda, Şanlıurfa özelinde geliştirilecek biyokütle temelli enerji sistemlerinin, Türkiye'nin emisyon azaltım hedeflerine katkı sunabileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular, Şanlıurfa ilinde tarımsal atıklardan enerji üretimi yoluyla hem enerji arzının çeşitlendirilebileceğini hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlanabileceğini göstermektedir. Bu durum, hem yerel kalkınma hem de ulusal çevre politikaları açısından biyokütle enerjisinin stratejik önemini ortaya koymaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, Şanlıurfa ili özelinde tarımsal atıklardan elde edilebilecek biyokütle enerji potansiyeli hesaplanmış ve bu potansiyelin sera gazı emisyonlarının azaltılmasına olan katkısı analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, bölgedeki tarımsal atıkların önemli bir biyokütle enerjisi kaynağı olduğunu ve bu kaynağın fosil yakıtlara kıyasla çok daha düşük sera gazı emisyonu oluşturduğunu göstermektedir. Böylece, biyokütle enerjisi çevresel sürdürülebilirliğe kayda değer katkı sağlamaktadır.

Yapılan hesaplamalar doğrultusunda, tarımsal atıkların değerlendirilmesiyle yılda yaklaşık 115.621 ton CO₂ eşdeğeri sera gazı emisyonunun önlenilebileceği belirlenmiştir. Aynı enerji miktarının fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğalgaz) aracılığıyla üretilmesi hâlinde ise toplamda yaklaşık 4.210.066 ton CO₂ eşdeğeri emisyon salımı meydana geleceği öngörülmektedir. Ayrıca, bu atıkların açık alanda yakılması hâlinde yaklaşık 12 milyon ton CO₂ eşdeğeri emisyon oluşabileceği tespit edilmiştir.

Elde edilen bulgular, tarımsal atıklardan elde edilen biyokütle enerjisinin, hem enerji üretiminde alternatif bir kaynak olarak değerlendirilebileceğini hem de iklim değişikliğiyle mücadelede stratejik bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, Şanlıurfa ilinin tarımsal atık potansiyeli enerji üretimi açısından önemli bir kaynak teşkil etmekte olup, bu kaynağın etkin kullanımı bölgenin enerji ihtiyacının karşılanmasına katkı sağlarken çevresel açıdan da sürdürülebilir kalkınmayı destekleyecektir.

7. ÖNERİLER

Araştırma bulguları doğrultusunda, tarımsal atıklardan elde edilen biyokütle enerjisinin etkin kullanımına yönelik aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Tarımsal atıkların açık alanda yakılmasını engelleyecek yasal düzenlemeler hayata geçirilmeli ve denetim mekanizmaları güçlendirilmelidir.

- Atık yönetimi ve enerji dönüşüm süreçlerine ilişkin mevcut yasal düzenlemeler güncellenmeli, biyokütle enerjisi üretimini kolaylaştıracak ve teşvik edecek mevzuat altyapısı oluşturulmalıdır.

- Çiftçilere yönelik bilinçlendirme ve eğitim programları düzenlenmeli; tarımsal atıkların enerji üretimi için değerli bir kaynak olduğu vurgulanmalıdır.

- Tarımsal atıkların toplanması, depolanması ve taşınmasına yönelik teknik altyapı yatırımları artırılmalı, üretici kooperatifleri desteklenmelidir.

- Biyokütle enerji tesislerinin kurulumu için fizibilite çalışmaları yapılmalı ve bu alandaki yenilenebilir enerji yatırımları teşvik edilmelidir.

- Tarımsal biyokütleyle dayalı enerji üretiminin çevresel ve ekonomik etkileri kapsamlı şekilde değerlendirilerek, ilgili alanlarda araştırma-geliştirme (AR-GE) faaliyetleri desteklenmelidir.

KAYNAKLAR

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2011). *Renewable energy sources: Their impact on global warming and pollution*. PHI Learning Pvt. Ltd., New Delhi.
- Ackom, E. K., Alemagi, D., Ackom, N. B., Minang, P. A., & Tchoundjeu, Z. (2013). Modern bioenergy from agricultural and forestry residues in Cameroon: Potential, challenges and the way forward. *Energy Policy*, 63, 101–113.
- Açıkalin, N. (2018). Sürdürülebilir kalkınmada yenilenebilir enerji kaynaklarının rolü: Türkiye ve Almanya’da rüzgâr enerjisi üzerine yasal ve kurumsal bir değerlendirme [Yayımlanmamış doktora tezi]. Bursa Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Akbaş, T., & Aydoğan, Y. (2023). Gümüşhane ili tarımsal biyokütle enerji eşdeğer potansiyeli. In Turgut, C., Kurt Karakuş, P. B., & Ögüt, S. (Eds.), 6. *Uluslararası Tarım Çevre ve Sağlık Kongresi (ICAEH)* (pp. 159–171). Aydın Adnan Menderes Üniversitesi.
- Akhtari, S., Sowlati, T., & Griess, V. C. (2018). Integrated strategic and tactical optimization of forest-based biomass supply chains to consider medium-term supply and demand variations. *Applied Energy*, 213, 626–638.
- Aksa Enerji. (2017). *Aksa Enerji Sürdürülebilirlik Raporu 2016*.
- Akyürek, Z. (2019). Energy recovery and greenhouse gas emission reduction potential of bio-waste in the Mediterranean region of Turkey. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(3), 482–490.
- Al, K. (2021). Biyokütle enerji santralleri için tarımsal atıklar: Şanlıurfa ilinde tarımsal atık ve artıkların değerlendirilmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4(2), 67–76.
- Alahmad, H., & Taşkesen, E. (2024). Calculating the biomass energy production potential from animal and agricultural wastes in Ankara Province. In A. Turşucu & A. T. Ülgen (Eds.), *Theoretical and experimental approaches in scientific studies* (1st ed., pp. 66–93). Yaz Yayınları.
- Alatzas, S., Moustakas, K., Malamis, D., & Vakalis, S. (2019). Biomass potential from agricultural waste for energetic utilization in Greece. *Energies*, 12(6), 1–20.
- Altuntaşoğlu, Z. T. (2005). Yenilenebilir enerji Avrupa Birliği ve Türkiye müktesebatı. *TMMOB Türkiye 5. Enerji Sempozyumu*, 249–261.
- Armaroli, N., & Balzani, V. (2016). Solar electricity and solar fuels: Status and perspectives in the context of the energy transition. *Chemistry – A European Journal*, 22(1), 32–57.
- Armaroli, N., & Balzani, V. (2011). Towards an electricity-powered world. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3193–3222.
- Arslan, Z. F., Alperen, A., Arslan, R., & Ceylan, F. (2023). Ülkesel ve bölgesel ölçekte Türkiye’nin bitkisel atık miktarları. *Düzce Üniversitesi Ziraat*

- Avcioğlu, A. O., Dayioğlu, M. A., & Türker, U. (2019). Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey. *Renewable Energy, 138*, 610–619.
- Avcioğlu, A. O., Türker, U., Atasoy, Z. D., & Koçtürk, D. (2011). Tarımsal kökenli yenilenebilir enerjiler: Biyoyakıtlar (1. basım). Nobel Akademik Yayıncılık.
- Aybek, A., Bilgili, M. E., & İspir, M. A. (2015). Kahramanmaraş ilinde bazı tarımsal atıkların biyogaz enerji potansiyelinin belirlenerek sayısal haritalarının oluşturulması. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 29(2)*, 25–37.
- Benek, S. (2005). GAP’ın Şanlıurfa ilinin sosyo-ekonomik yapısında meydana getirdiği değişme/gelişmeler. *Marmara Coğrafya Dergisi, 1(11)*, 123–146.
- Benek, S. (2006). Şanlıurfa ilinin tarımsal yapısı, sorunları ve çözüm önerileri. *Coğrafi Bilimler Dergisi, 4(1)*, 67–91.
- Bengisu, M. (1968). *Urfa ilinin coğrafyası*. ŞURKAV Kütüphanesi.
- Bessou, C., Ferchaud, F., Gabrielle, B., & Mary, B. (2011). Biofuels, greenhouse gases and climate change. In E. Lichtfouse, M. Hamelin, M. Navarrete, & P. Debaeke (Eds.), *Sustainable agriculture* (Vol. 2, 1st ed., pp. 365–468). Springer Netherlands.
- Bilheimer, E. (2023, March 28). Exploring energy: Woody biomass. *The Northcoast Environmental Center*. <https://www.yournec.org/>
- Brasil, A. C. M., Brasil, A., & Malico, I. (2020). Evaluation of the electrical energy potential of woody biomass in the near region of the hydropower plant Tucuruí-Brazil. *Waste and Biomass Valorization, 11(5)*, 2297–2307.
- Butt, S., Hartmann, I., & Lenz, V. (2013). Bioenergy potential and consumption in Pakistan. *Biomass and Bioenergy, 58(1)*, 379–389.
- Büyükgüngör, H. (1984). Tarımsal kökenli atıkların enerji kaynağı olarak kullanılması. *İkinci Uluslararası Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Sempozyumu Yayın*, 129–136.
- Caputo, A. C., Palumbo, M., Pelagagge, P. M., & Scacchia, F. (2005). Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: Effects of logistic variables. *Biomass and Bioenergy, 28(1)*, 35–51.
- Chandak, S. P., Chari, K. R., & Memon, M. A. (2015). Converting waste agricultural biomass into energy: Experiences and lessons learnt from a capacity building and technology demonstration project in India. *Journal of the Japan Institute of Energy, 94(10)*, 1129–1147.
- Chen, L., Xing, L., & Han, L. (2009). Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(9)*, 2689–2695.
- Climate.gov. (2023, Ağustos 22). Climate change: Global sea level. *Climate.gov*. <https://www.climate.gov/>

- Cuiping, L., Yaynyongjie, C., W., & Haitao, H. (2004). Study on the distribution and quantity of biomass residues resource in China. *Biomass and Bioenergy*, 27(2), 111–117.
- Çakal, S., & Çelik, S. (2021). Türkiye genelinde en çok yetiştirilen tarımsal ürünlerin atıklarının biyogaz potansiyelinin belirlenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(1), 1–11.
- Das, A., & Swain, P. K. (2024). Navigating the sea level rise: Exploring the interplay of climate change, sea level rise, and coastal communities in India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(11), 1010.
- Davenport, J., & Wayth, N. (2024). 2024 | 73rd edition Statistical Review of World Energy.
- Demirel, B., Gürdil, G., Alp, K., & Gadalla, O. (2019). Biomass energy potential from agricultural production in Sudan. *Erciyes Tarım ve Hayvan Bilimleri Dergisi (ETHABD)*, 2(2), 35–38.
- Diken, B., & Kayışoğlu, B. (2020). Determination of biomass potential from field products waste in Tekirdağ province. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 16(3), 12–17.
- Dikmen, A. Ç. (2019). Türkiye’de güneş ve rüzgar enerjisinden elektrik üretiminin sera gazı emisyonları ve çevre maliyetinin azalmasına katkıları. *Journal of Turkish Studies*, 14(2), 275–293.
- Dilber, E., & Güler, M. (2015). Anız yakma tarım çevre ilişkileri. *11. Tarla Bitkileri Kongresi, Çanakkale, Türkiye*.
- Dursun, N. (2020). Hayvansal ve bitkisel atıklar kaynaklı biyokömür üretim potansiyelinin belirlenmesi: Malatya ili örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 720–727.
- e-Kitap. (2022). *Urfa’nın tarihi coğrafyası*. Kültür ve Turizm Bakanlığı. <https://ekitap.ktb.gov.tr/>
- Ehrlich, R., Geller, H. A., & Cressman, J. R. (2022). *Renewable energy* (3rd ed.). CRC Press.
- Energy Conversion Tables. (2016, May 2). *Canada Energy Regulator Org.* <https://apps.cer-rec.gc.ca/>
- EPA. (2024a). Greenhouse gas equivalencies calculator. *US Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/>
- EPA. (2024b). Greenhouse gas equivalencies calculator – Calculations and references. *US Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/>
- Erdoğan, S. (2020). Enerji, çevre ve sera gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(1), 277–303.
- Ergüdenler, A., & Işığışür, A. (1994). Agricultural residues as a potential resource for environmentally sustainable electric power generation in Turkey. *Renewable Energy*, 5(5–8), 786–790.

- Ertop, H., & Atilgan, A. (2019). Bitkisel üretimde ortaya çıkan atıkların potansiyel biyogaz enerji değerlerinin belirlenmesi: Sera yetiştiriciliği örneği. *ISPEC International Conference on Agriculture, Animal Science and Rural Development - III*, 968–978.
- Farooq, M. K., & Kumar, S. (2013). An assessment of renewable energy potential for electricity generation in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20(C), 240–254.
- Fitri, H., Gürdil, G. A. K., Demirel, B., Cevher, E. Y., & Roubík, H. (2023). Biomass potential from agricultural residues for energy utilization in West Nusa Tenggara (WNT), Indonesia. *GCB Bioenergy*, 15(11), 1405–1414.
- Gökçek, Ö. B., & Mert, R. A. (2023). Niğde ilinin hayvansal ve tarımsal atık miktarlarının ve enerji potansiyelinin belirlenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 39(3), 417–429.
- Görgülü, S. (2019). Burdur ilinin hayvansal ve bazı tarımsal atık kaynaklı biyogaz potansiyelinin belirlenmesi. *ECJSE*, 6(3), 543–557.
- Gutowski, T. G., Allwood, J. M., Herrmann, C., & Sahni, S. (2013). A global assessment of manufacturing: Economic development, energy use, carbon emissions, and the potential for energy efficiency and materials recycling. *Annual Review of Environment and Resources*, 38(1), 81–106.
- Gülay, A. N. (2008). Yenilenebilir enerji kaynakları açısından Türkiye'nin geleceği ve Avrupa Birliği ile karşılaştırılması [Yayımlanmış yüksek lisans tezi]. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*.
- Gürsoy, S. (2012). Güneydoğu Anadolu Bölgesinde tarımsal üretimin gelişmesinde mekanizasyonun rolü. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 1(2), 339–346.
- IEA. (2024, May 30). Rapid rollout of clean technologies makes energy cheaper, not more costly. *International Energy Agency*. <https://www.iea.org/>
- Infield, D., & Freris, L. (2020). *Renewable energy in power systems* (2nd ed.). Wiley.
- IPCC. (2006a). *Agriculture, forestry and other land use* (2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 4).
- IPCC. (2006b). *Energy* (2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 2, 1st ed.). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IRENA. (2015). *Biomass for heat and power*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/>
- Işık, S., & Yavuz, S. (2022). Biyokütleden elde edilen biyoyakıtlara genel bir bakış. *European Journal of Science and Technology*, 1(34), 193–201.
- Iye, E. L., & Bilsborrow, P. E. (2013). Assessment of the availability of agricultural residues on a zonal basis for medium- to large-scale bioenergy production in

- Nigeria. *Biomass and Bioenergy*, 48, 66–74.
- Karabaş, H. (2019). Sakarya ilinin bitkisel biyokütle açısından atık miktarının ve enerji potansiyelinin araştırılması. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2(1), 35–43.
- Karaosmanoğlu, F. (2006). Biyoyakıt teknolojisi ve İTÜ araştırmalar. *İTÜ Enerji Çalıştayı ve Sergisi*, 110–146.
- Kayahan, N., & Çarman, K. (2023). Konya ilinde bitkisel ve hayvansal üretimde atık potansiyeli ve emisyonların belirlenmesi. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 11(7), 1215–1221.
- Kazaz, O. (2018). *Biomass energy potential of Turkey* [Yayımlanmış yüksek lisans tezi]. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Klein, C. A. M. de, Pinares-Patino, C., & Waghorn, G. C. (2008). Greenhouse gas emissions. In *Environmental impacts of pasture-based farming* (pp. 1–32). CAB International.
- Kumar, M., & Gayen, K. (2011). Developments in biobutanol production: New insights. *Applied Energy*, 88(6), 1999–2012.
- Li, D. (2022). Analysis of agricultural biomass energy use and greenhouse gas reduction evidence from China. *Journal of Environmental and Public Health*, 2022(1), 1–11.
- Li, H., Min, X., Dai, M., & Dong, X. (2019). The biomass potential and GHG (greenhouse gas) emissions mitigation of straw-based biomass power plant: A case study in Anhui Province, China. *Processes*, 7(9), 1–14.
- Lund, H. (2014). *Renewable energy systems* (2nd ed.). Elsevier.
- Matsumura, Y., Minowa, T., & Yamamoto, H. (2005). Amount, availability, and potential use of rice straw (agricultural residue) biomass as an energy resource in Japan. *Biomass and Bioenergy*, 29(5), 347–354.
- Metz, B. (2009). Greenhouse gas emissions. In *Controlling climate change* (pp. 30–50). Cambridge: Cambridge University Press.
- Milhau, A., & Fallot, A. (2013). Assessing the potentials of agricultural residues for energy: What the CDM experience of India tells us about their availability. *Energy Policy*, 58(1), 391–402.
- Okello, C., Pindozi, S., Faugno, S., & Boccia, L. (2013). Bioenergy potential of agricultural and forest residues in Uganda. *Biomass and Bioenergy*, 56, 515–525.
- Our World in Data. (2024a). Energy consumption by source, world. <https://ourworldindata.org/>
- Our world in data. (2024b). *Levelized cost of energy by technology, World*. <https://ourworldindata.org/>
- Ozturk, H. H., & Bascetincelik, A. (2006). Energy exploitation of agricultural biomass potential in Turkey. *Energy Exploration & Exploitation*, 24(4),

- Ökten, M. (2023). Yüzüncü kuruluş yılında Türkiye'nin enerji görünümü, hedefleri ve gelecek projeksiyonu. *Turkish Journal of Engineering Research and Education*, 2(1), 52–60.
- Paşa, P. (2021). Yenilenebilir enerji finansmanında yeşil tahvil: Türkiye değerlendirme [Yayımlanmış yüksek lisans tezi]. Trakya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Perera, F. (2017). Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: Solutions exist. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(1), 1–17.
- Polat, M. (2020). Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü görev alanı dahilinde bulunan illerin tarımsal atık biyokütle enerji potansiyelinin belirlenmesi. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B - Teorik Bilimler*, 8(1), 133–142.
- Polat Bulut, A. (2023). Sivas ili tarımsal atıklarının biyokütle enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve sayısal haritalarının oluşturulması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 676–684.
- Quaschnig, V. (2019). *Renewable energy and climate change* (C. Hanser, Ed., 2nd ed.). Wiley.
- Reza, M., Rahimpour, M. R., Makarem, M. A., & Meshksar, M. (2024). Advances and technology development in greenhouse gases: Emission, capture and conversion. Elsevier.
- Riva, G., Foppapedretti, E., & Caralis, C. (2014). *Handbook on renewable energy sources - biomass*. Energy Supply.
- Saeed, M. A., Irshad, A., Sattar, H., Andrews, G., Phylaktou, H. N., & Gibbs, B. M. (2015). Agricultural waste biomass energy potential in Pakistan. In *Proceedings of the International Bioenergy (Shanghai) Exhibition and Asian Bioenergy Conference* (21–23 October 2015, Shanghai, P.R. China).
- Sak, T., Gönen, Ç., & Kara, E. E. (2019). Niğde İlinde güneş enerjisi santrallerinin yaygınlaştırılması ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasının potansiyeli. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2), 327–335.
- Sevgili, S., & Koçer, N. N. (2023). Elazığ İlinde bitkisel kökenli tarımsal biyokütle potansiyeli ve enerji üretimi amacıyla değerlendirilmesi. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 1(1), 51–64.
- Shurpali, N., Agarwal, A. K., & Srivastava, V. (Eds.). (2019). *Greenhouse gas emissions: Challenges, technologies and solutions*. Springer Singapore.
- Simon, P. (2018). *Burning up: A global history of fossil fuel consumption* (1st ed.). Pluto Press.
- Singh, S. (2021). Energy crisis and climate change. In P. Singh, S. Singh, G. Kumar, & P. Baweja (Eds.), *Energy: Crises, challenges and solutions* (pp. 1–17).

Wiley.

- Skoulou, V., & Zabaniotou, A. (2007). Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1698–1719.
- Soeder, D. J. (2020). Fossil fuels and climate change. In *Fracking and the environment* (1st ed., pp. 155–185). Springer International Publishing.
- Sun, J., Peng, H., Chen, J., Wang, X., Wei, M., Li, W., Yang, L., Zhang, Q., Wang, W., & Mellouki, A. (2016). An estimation of CO₂ emission via agricultural crop residue open field burning in China from 1996 to 2013. *Journal of Cleaner Production*, 112(4), 2625–2631.
- Sümer, S. K., Say, S. M., & Çiçek, G. (2016). Çanakkale ilinin tarla ürünleri artık ve enerji potansiyelinin belirlenmesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 31(2), 240–240.
- Şahin, O., Hürdil, G. A. K., Demirel, B., & Dağtekin, M. (2024). Sivas İlinde tarımsal üretim faaliyetleri ve tarımsal üretim sonucu açığa çıkan tarımsal atıkların biyogaz enerji potansiyeli. *Erciyes Tarım ve Hayvan Bilimleri Dergisi*, 7(2), 149–154.
- Şensöz, S., Demiral, İ., & Gerçel, H. F. (2006). Olive bagasse (*Olea europea* L.) pyrolysis. *Bioresource Technology*, 97(3), 429–436.
- Tanriverdi, E. A. (2022). Adana ilinin tarımsal atık kaynaklı biyokütle potansiyelinin araştırılması [Yayımlanmış yüksek lisans tezi]. Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Temur, B. (2017). Küresel ısınmanın Türkiye’de tarım sektörü üzerine etkisi: Bir ARDL modeli uygulaması [Yayımlanmış yüksek lisans tezi]. Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- The copernicus climate change service (C3S). (2024). *Global climate highlights 2024*. The Copernicus Climate Change Service (C3S) Org. <https://climate.copernicus.eu/>
- Tumen Özdil, N. F., & Çalışkan, M. (2022). Energy potential from biomass from agricultural crops: Development prospects of the Turkish bioeconomy. *Energy*, 249(123770), 1–12.
- Tunçez, F. D., & Soylu, S. (2022). Konya ilinin toplanabilir bitkisel artık ve hayvansal atık kaynaklı metan potansiyeli. *Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi*, 11(2), 112–127.
- TÜİK. (2025a). *Bitkisel üretim istatistikleri*. Türkiye İstatistik Kurumu, Merkezi Dağıtım Sistemi. <https://biruni.tuik.gov.tr/>
- TÜİK. (2025b). *Popüler istatistikler, veritabanları (MEDAS)*. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). <https://www.tuik.gov.tr/>
- Türkoğlu Elitaş, M. N. (2016). Türkiye’de biyokütle enerji kaynaklarının araştırılması ve OECD ülkeleri ile karşılaştırılması [Yayımlanmış yüksek

lisans tezi]. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Units & conversions fact sheet. (2007, April 15). Massachusetts Institute of Technology. <https://indico.ictp.it/>
- Väärälä, J. (2023). *Design considerations for efficient operation of seasonal borehole thermal energy storage for a district heating system* [Master's thesis]. Aalto University.
- Wang, P., Zhan, S., Yu, H., Xue, X., & Hong, N. (2010). The effects of temperature and catalysts on the pyrolysis of industrial wastes (herb residue). *Bioresource Technology*, 101(9), 3236–3241.
- Warrick, R. A., Azizul Hoq Bhuiya, A. K., & Mirza, M. Q. (1996). The greenhouse effect and climate change. In R. A. Warrick & Q. K. Ahmad (Eds.), *The implications of climate and sea-level change for Bangladesh* (1st ed., pp. 35–96). Springer Netherlands.
- Wąs, A., Sulewski, P., Krupin, V., Popadynets, N., Malakrawlikowska, A., Szymańska, M., Skorokhod, I., & Wysokiński, M. (2020). The potential of agricultural biogas production in Ukraine—Impact on GHG emissions and energy production. *Energies*, 13(21), 5755.
- Weldemichael, Y., & Assefa, G. (2016). Assessing the energy production and GHG (greenhouse gas) emissions mitigation potential of biomass resources for Alberta. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4257–4264.
- Wikipedia. (2025). *Greenhouse gas emissions*. Wikipedia The Free Encyclopedia. <https://en.wikipedia.org/>
- WNA. (2011). *Comparison of lifecycle greenhouse gas emissions of various electricity generation sources*. <https://world-nuclear.org/>
- Yılmaz, G., Bilgili, A., Toprak, D., Almaca, A., & Mermut, A. (2015). Anız yakmanın karbondioksit salınımına etkisi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 18(1), 26–32.
- Yu, B., Liu, X., Ji, C., & Sun, H. (2023). Greenhouse gas mitigation strategies and decision support for the utilization of agricultural waste systems: A case study of Jiangxi Province, China. *Energy*, 265(126380), 1–13.
- Zhou, X., Wang, F., Hu, H., Yang, L., Guo, P., & Xiao, B. (2011). Assessment of sustainable biomass resource for energy use in China. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 1–11.