



Techno-economic analysis and calculation of environmental impacts of biodiesel production from animal fat wastes in Turkey

Fatıma Büşra Aslan¹, Kırılı Mürtezoğlu², Mehmet Melikoğlu^{1*}

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Gebze Technical University, 41400, Kocaeli, Türkiye

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Nearly 112 thousand tons of biodiesel production potential in 2030
- Potential biodiesel worth 2.9 billion TL in 2030
- Pioneer study about biodiesel production from animal fat wastes in Turkey

Keywords:

- Waste fats
- Biodiesel
- Modelling
- Sustainability
- Techno-economic

Article Info:

Research Article

Received: 16.03.2023

Accepted: 13.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1265052

Correspondence:

Author: Mehmet Melikoğlu
e-mail:
mmelikoglu@gtu.edu.tr
phone: +90 262 605 2111

Graphical/Tabular Abstract

The Turkey population base method, designed for animal population forecasting, integrates the average number of animals per capita from the past three years with Turkey's population projection data. Figure A illustrates the forecasted animal population for cattle and sheep, indicating a linear increase anticipated beyond 2022, aligned with the trend observed in animal populations from 2010 to 2021. This method provides a comprehensive and dynamic approach to predicting future animal populations, considering both historical trends and demographic projections.

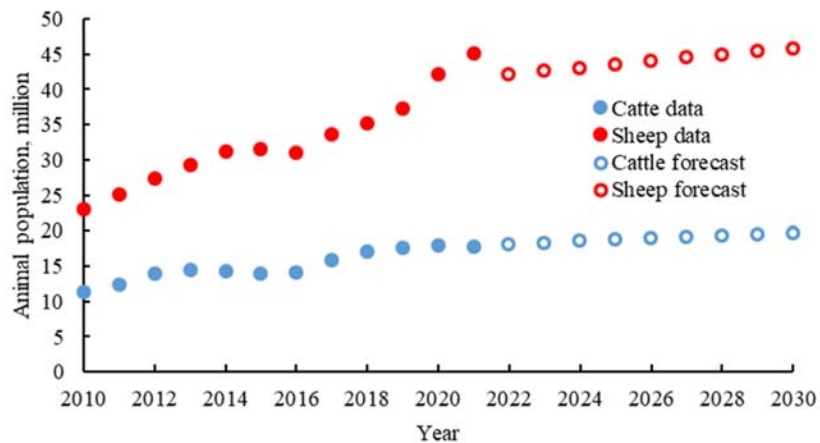


Figure A. Forecasting cattle and sheep population based on Turkey's population

Purpose:

Technical and economic analysis of the utilization of waste animal fats as a raw material in biodiesel production was carried out within the framework of chemical and process engineering.

Theory and Methods:

Biodiesel, a direct substitute for conventional diesel fuel, presents a viable option for the transportation sector. The animal population model for the upcoming years (2022-2030) was derived from Turkey's population base model. Calculating the total amount of waste animal fats and subsequently determining the annual potential biodiesel volume were key steps in the analysis. Consideration of three availability factors (10%, 50%, and 100%) was based on the utilization of a certain parts of waste animal fats as raw materials in biodiesel production.

Results:

In 2030, biodiesel production, with a 100% availability factor, is projected at 112 thousand tons, valued at 2.9 billion TL. Analyzing waste animal fats (10%, 50%, 100%) from 2010-2021 indicates potential averages of 27% 135% and 270% to meet Turkey's biodiesel needs. CO₂ emission reductions, based on 10%, 50%, 100% availability factors during 2010-2021, average approximately 0.029%, 0.146% and 0.292%.

Conclusion:

In line with the obtained results, it reveals the advantages of sustainable disposal of waste fats in biodiesel production, showcasing both economic development and environmental benefits for Turkey. The conclusion emphasizes the significant potential of waste fat-derived biodiesel to surpass the current production capacity, emerging as a substantial contributor to Turkey's biodiesel output alongside vegetable oils.



Türkiye için hayvansal atık yağlarından biyodizel üretiminin tekno-ekonomik analizi ve çevresel etkilerinin hesaplanması

Fatıma Büşra Aslan¹ , Kırالی Mürtezaoğlu² , Mehmet Melikoğlu^{1*}

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- 2030 yılında 112 bin tona yakın biyodizel üretim potansiyeli
- 2030 yılında 2,9 milyar TL değerinde biyodizel potansiyeli
- Hayvansal atık yağlarından Türkiye’de biyodizel üretimi konusunda öncü çalışma

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 06.03.2023

Kabul: 136.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1265052

Anahtar Kelimeler:

Atık yağ,
biyodizel,
modelleme,
sürdürülebilirlik,
tekno-ekonomik

ÖZ

Bu çalışmada hayvansal atık yağlarının (sığır ve koyun) biyodizel üretiminde hammadde olarak kullanılmasında teknik ve ekonomik analiz incelemesi kimya ve süreç mühendisliği çerçevesinde yapılmıştır. Hammadde kaynağı olan hayvansal atık yağlarının belli bir kısmının biyodizel üretiminde kullanılması durumuna göre üç farklı ulaşılabilirlik faktörü (%10=0,1; %50=0,5; %100=1,0) göz önüne alınmıştır. Hesaplamalar sonucunda 2030 yılında %100 ulaşılabilirlik faktörüne göre potansiyel biyodizel üretim miktarı yaklaşık 112 bin ton ve bu miktardaki biyodizelin net değeri yaklaşık 2,9 milyar TL (2022 yılı TL kuru esas alınarak) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, 2010-2021 yılları arasında hayvansal atık yağları %10, %50 ve %100 oranlarında ulaşılabilirlik faktörleri ile toplanıp biyodizel üretiminde kullanılsaydı; Türkiye’nin biyodizel üretiminin ortalama olarak %27, %135 ve %270’inin karşılanabileceği hesaplanmıştır. Bunun sonucunda eğer hayvansal atık yağlarından biyodizel üretilmiş olsaydı, Türkiye’nin hâlihazırda biyodizel üretim kapasitesinin çok üzerinde bir değerlerde (takribi üç katına kadar) olacağı bulunmuştur. Ayrıca, bu çalışmada biyodizelin CO₂ azaltmaları hesaplanmıştır. Son olarak, teorik olarak hesaplanan karbon dioksit (CO₂) emisyonu azaltmaları, literatürden bulunan ulaştırma ile meydana gelen CO₂ emisyon miktarları arasında oran kurulmuştur. 2010-2021 yılları arasında %10, %50 ve %100 oranlarında ulaşılabilirlik faktörlerine göre Türkiye’nin CO₂ emisyonu azaltma miktarları ortalama yaklaşık %0,029, %0,146 ve %0,292 olarak hesaplanmıştır.

Techno-economic analysis and calculation of environmental impacts of biodiesel production from animal fat wastes in Turkey

HIGHLIGHTS

- Nearly 112 thousand tons of biodiesel production potential in 2030
- Potential biodiesel worth 2.9 billion TL in 2030
- Pioneer study about biodiesel production from animal fat wastes in Turkey

Article Info

Research Article

Received: 16.03.2023

Accepted: 13.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1265052

Keywords:

Waste fats,
biodiesel,
modelling,
sustainability,
techno economic

ABSTRACT

In this study, technical and economic analysis of the utilization of waste animal fats (bovine and sheep) as a raw material in biodiesel production was carried out within the framework of chemical and process engineering. Three different availability factors (10=0.1%; 50=0.5%; 100%=1.0) were considered, depending on the use of a certain part of waste animal fats, which are raw materials, in biodiesel production. As a result of the calculations, the potential biodiesel production amount was estimated at approximately 112 thousand tons and the net value of biodiesel was estimated at approximately 2.9 billion TL in 2030 according to the 100% availability factor. If waste animal fats were collected with availability factors of 10%, 50% and 100% among 2010-2021, and used in biodiesel production; it has been calculated that approximately 27% 135% and 270% of Turkey's biodiesel production can be met on average. As a result, it was found that if biodiesel was produced from waste animal fats, it would be much higher (almost up to three times) than Turkey's current biodiesel production capacity. In addition, CO₂ reduction of biodiesel were calculated in this study. Finally, a ratio was established between the theoretically calculated carbon dioxide (CO₂) gas emission reduction and the CO₂ gas emission amounts that occur with transportation found in the literature. According to the availability factors of 10%, 50% and 100% between 2010 and 2021, Turkey's CO₂ emission reduction were found to be approximately 0.029%, 0.146% and 0.292% on average.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : fatimabusraaslan@gtu.edu.tr, kirali@gazi.edu.tr, *mmelikoglu@gtu.edu.tr /
Tel: +90 262 605 2111

1. Giriş (Introduction)

Hayvansal atık yağlar, esas olarak hayvan kesimhanelerinden ve/veya hayvan eti işleme tesislerinden elde edilen atık veya yan ürünlerdir [1, 2]. Et, deri ve gıdada kullanılabilir yağlar alındıktan sonra hayvan kalıntılarının işlenmesiyle yüksek miktarda atık yağ ortaya çıkar. Bunlar; iç organlardan, kafalardan ve dokulardan elde edilen yağlardır [3]. Hayvanların kesiminden sonra oluşan atıklar ise hem insanlar için hem de çevre için büyük bir tehdit oluşturmaktadır [4]. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (United States Environmental Protection Agency), hayvansal yağlar ile petrol yağların bazı ortak fiziksel ve kimyasal özellikler paylaştığını bildirmiştir [5]. Hayvansal yağların doğaya atılması durumunda petrol yağları ile benzer yıkıcı çevresel etkiler oluşturduğu bilinmektedir [5]. Örneğin, suda yaşayan canlıların yağ ile temasına ve sudaki oksijenin tükenmesine yol açar. Mevcut ve gelecek gıda kaynaklarına zarar verir [5]. Hayvanların yaşam alanlarını azaltır veya yok eder. Tüm olumsuz etkiler göz önüne alındığında atık yağların doğada bulunan birçok canlıya ve ekosisteme zarar verdiği anlaşılmaktadır.

Gün geçtikçe, küresel nüfusunun artması ve teknolojinin ilerlemesi insanoğlunun enerjiye olan ihtiyacı arttırmaktadır. Konvansiyonel (fosil) yakıtların yanması ile oluşan kükürt oksitler (SO_x), azot oksitler (NO_x), karbon dioksit (CO_2) vb. diğer zararlı gazlar atmosfere salınmaktadır. Bu durum, çevresel sorunlarla birlikte kaynakların tükenmesine de yol açmaktadır. Bunların sonucu olarak yenilenebilir, sürdürülebilir ve temiz alternatif enerji kaynaklarına yönelim 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren artarak önem kazanmıştır. Petrol ekonomisinin temel ihtiyacı karşılamak için etkili bir alternatif olan biyoyakıtların arasından biyodizel ön plana çıkmaktadır. Bunun sebebi, Türkiye’de ve dünyada kullanılan temel taşımacılık sıvı yakıtının dizel (motorin) olmasıdır.

Biyodizel, homojen veya heterojen katalizör varlığında kısa zincirli alkoller ile bitkisel yağlar, atık hayvan ve bitkisel yağların transesterifikasyonu ile elde edilir [6, 7]. Tüm teknikler arasında, yağ asidi esterlerinin fiziksel özellikleri dizel yakıtı çok yakın ve işlem nispeten daha basit olduğundan en yaygın olarak kullanılan yöntem, hayvansal yağların transesterifikasyonudur [6, 8]. Şekil 1’de hayvansal atık yağların transesterifikasyon reaksiyonu stokiyometrik oranları gösterilmiştir [9, 10].

Transesterifikasyon reaksiyonunda homojen katalizör (ör. sodyum hidroksit, NaOH) varlığında; 100 kg hayvan atık yağından 10 kg gliserin ve 100 kg biyodizel elde edilmektedir [10, 11]. Gliserin, reaksiyondaki yan üründür. Toksik olmayan, yenilebilir ve biyoparçalanabilir olmasıyla ilaç, kozmetik, tekstil ve gıda gibi farklı sektörlerde hammadde olarak kullanılabilir [6, 12]. Biyodizel petrol

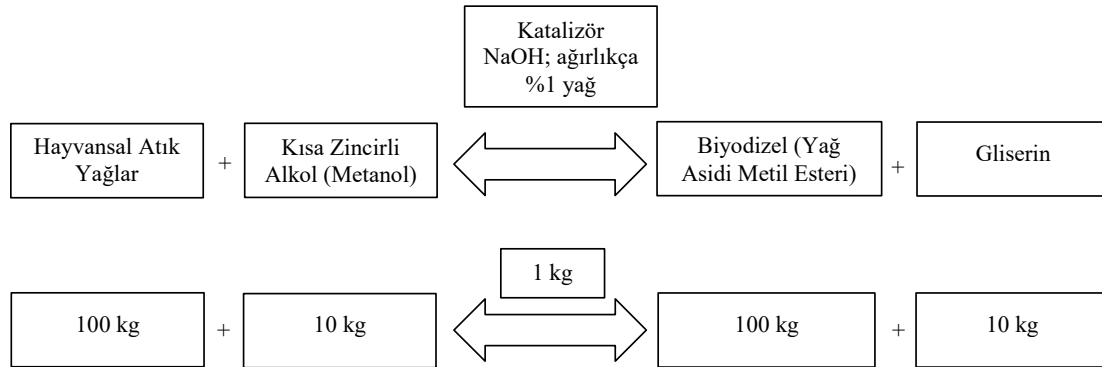
bazlı dizel yakıtı göre, daha düşük kükürt ve aromatik bileşiklere sahiptir. Ayrıca; yenilenebilir, yüksek setan sayısı ve iyi emisyon profili özellikleriyle dikkat çekmektedir [2, 8]. Biyodizelin fizikokimyasal özellikleri (setan sayısı, yoğunluk, viskozite, parlama noktası vb.) dizel yakıtındaki gibi yakıt standartlarını sağlaması durumunda dizel yakıtı alternatif olarak kullanılabilir.

Hayvansal atık yağlardan transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel üretiminin temel basamakları akış şeması olarak Şekil 2’de gösterilmiştir [7, 13–16].

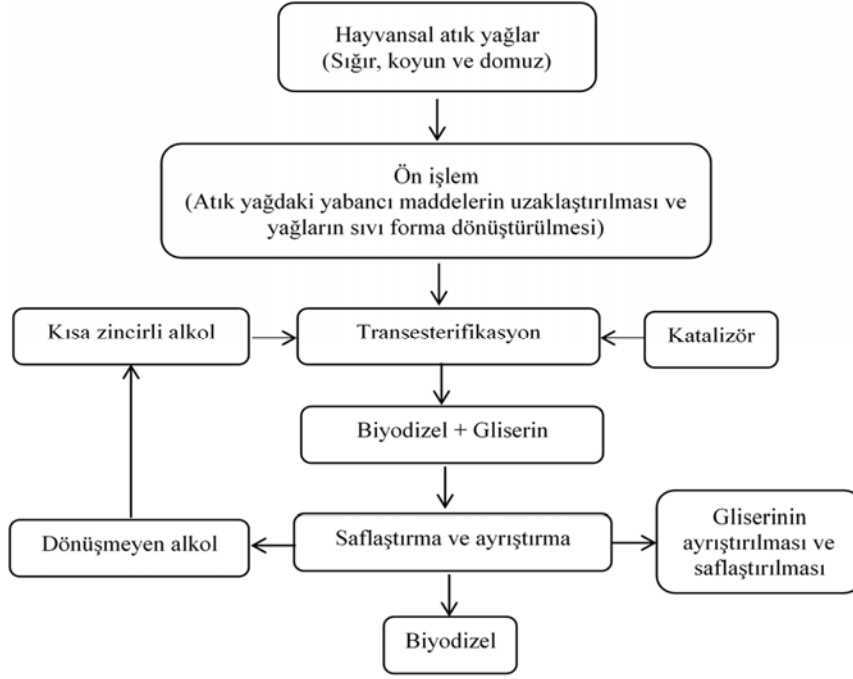
Hayvan atık yağların transesterifikasyonu reaksiyonundan önce hammadde olan atık yağlar ön işleme tabi tutulur. Bu işlemde; atık yağda bulunan yabancı maddeler uzaklaştırılır, reaksiyona girebilecek uygun forma dönüştürülür ve serbest yağ asidi değeri minimum hale getirilir. Çünkü serbest yağ asidinin yüksek olması reaksiyonun verimi düşürmektedir ve bu değer yüksek olması istenmeyen bir durumdur. Reaksiyona hazır hale gelen hayvansal atık yağlar, katalizör varlığında kısa zincirli alkol ile uygun reaksiyon koşullarında tepkimeye girerek biyodizel ve gliserini oluşturur. Yan ürün olarak oluşan gliserinin çeşitli sektörlerde hammadde olarak kullanılması için saflaştırma ve ayırıştırma işlemi yapılır. Reaksiyona girmeyen ve fazla olan alkol sisteme geri gönderilir. Rafinasyon (saflaştırma) işlemleri sonunda elde edilen biyodizel uygun standardizasyonu sağlamanın ardından yakıt olarak kullanılır.

2017 yılında Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), motorin türlerine biyodizel (yerli tarım ürünlerinden ve/veya bitkisel atık yağdan elde edilen) harmanlanması ile ilgili bir tebliğ yayınlamıştır [17]. Tebliğe göre enerjide dışa bağımlılığının ve çevre kirliliğinin azaltılması ve bitkisel atık yağların geri azaltılmasının sağlanması amaçlanmıştır. Motorin türlerinin hacimce en az %0,5 oranında biyodizel ile harmanlanması zorunlu kılınmıştır [17, 18]. Bu süreçle birlikte Türkiye’de biyodizel üretiminin önü açılmıştır. Artan biyodizel tüketimi ile yıllar içerisinde Türkiye’nin petrole olan talebi ve dolayısıyla ülkemizin dışa olan bağımlılığı azalması beklenmektedir. Bu durum petrol ithalatının düşmesini sağlayacak ve Türkiye’nin ekonomisine pozitif yönde katkı sağlayacaktır.

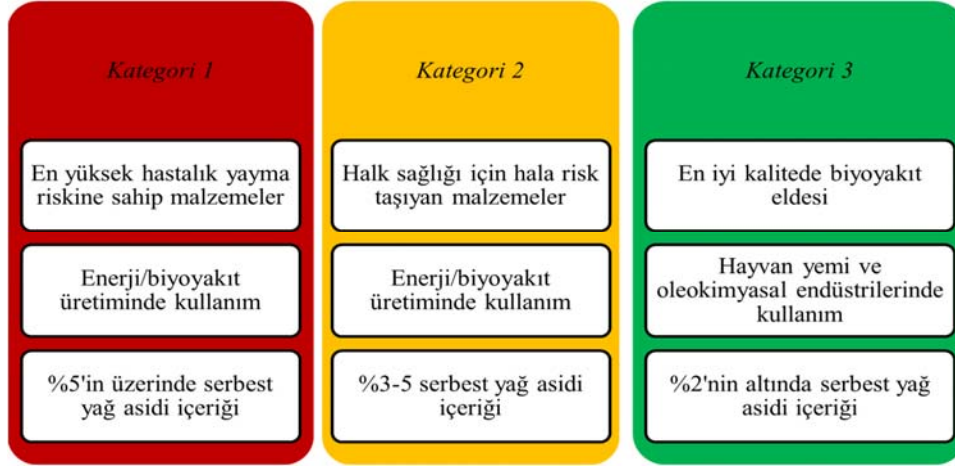
Ülkemizde halk ve hayvan sağlığına yönelik riskleri engellemek amacıyla hayvansal yan ürünlerin kullanımına ilişkin yönetmelik bulunmaktadır [19]. Bu yönetmeliğe göre hayvansal yan ürünler, halk ve hayvan sağlığına karşı oluşturduğu risk seviyesi dikkate alınarak üç kategoride: 1, 2 ve 3 gruplanmaktadır (Şekil 3) [6,20]. Kategori 1 ve 2 işlenmiş yağlar, yüksek riskli kategorisinde yer alıp sınırlı kullanım alanlarına sahiptir. Çünkü halk sağlığı ve çevre için risk oluşturacak malzemeler yer almaktadır. Bu nedenle bu kategoride bulunan hayvansal atık yağa olan talep oldukça azdır ve pazar fiyatı



Şekil 1. Transesterifikasyon reaksiyonunun stokiyometrik oranı (The stoichiometric ratio of the transesterification reaction) [9, 10]



Şekil 2. Hayvansal atık yağından transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel üretiminin temel basamakları (Basic steps of biodiesel production from animal waste fat by transesterification method) [7, 13–16]



Şekil 3. Hayvansal atık yağların sınıflandırılması (Classification of animal waste fats) [6, 20]

düşüktür. Kategori 1 ve 2'deki atık yağlar, biyodizel üretiminde veya diğer endüstriyel uygulamalarda yakıt olarak kullanılır. Kategori 3 işlenmiş yağlar; hayvan yemi, su ürünleri, ilaç, kozmetik ve evcil hayvan yemlerinde kullanılmaktadır [20]. Kategori 3'te bulunan hayvansal yağlar ile biyodizel eldesi yakıtın daha kaliteli olmasını sağlar; ancak, ürünlerin daha yüksek fiyata satılması ve daha teknik uygulamalarda kullanılması nedeniyle biyoyakıt üretiminde kullanılması hâlihazırda pek tercih edilmemektedir [3].

Hayvansal atık yağlar biyodizel üretimi için ideal hammaddelerdir. Atık yağların hammadde olarak kullanılması atık yönetimine yardımcı olmasının yanında bertaraf edilme problemini de ortadan kaldırır [21–23]. Atık olarak sınıflandırılan yağların atık yönetimi, ülkenin kalkınması ve çevresel öncelikler için büyük önem arz etmektedir [9]. Hayvansal yağların (sığır, koyun, domuz vs.) kendine özgü yağ asidi içerikleri bulunmaktadır. Tablo 1'de verilen serbest yağ asitlerinin türleri ve kompozisyonu, zincir uzunluğu ve

doymuşluk/doymamışlık derecesi biyodizelin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemektedir [7].

Bu değerler yakıt için oldukça önemlidir [24]. Yüksek doymuşluk derecesi ile biyoyakıt; yüksek kalorifik değer, yüksek setan sayısı ve yüksek oksidasyon kararlılığı gibi avantajlar sunmaktadır [21]. Serbest yağ asidi içeriği ve doymuşluk derecesinin fazla olması daha yüksek yoğunluğa katkıda bulunur.

Avrupa Birliği (AB), 2035 yılından sonra petrol ve dizel yakıtlı araçların satışının yasaklanmasını onaylamıştır [25]. Buna göre 2035 yılından sonra satışı yapılacak yeni araçların CO₂ emisyonunun %100 azaltılacağı ve bu araçların CO₂ emisyonu oluşturmayacağı ifade edilmektedir [25]. Ancak yapılan bu çalışmada hayvansal atık yağlardan biyodizel üretimi en basit haliyle düşünülmüş olup ile ilgili çalışma 2030 yılına kadar bir modelleme içermektedir. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere EPDK'nin yayınladığı bildiri

motorin türlerine yerli tarım ürünlerinden ve/veya bitkisel atık yağdan elde edilen biyodizelin harmanlanması yer almaktadır. Bu duruma ilişkin hayvansal atık yağların da bu amaç doğrultusunda kullanılabilmesi düşünülmüştür. Bu amaçla birlikte hâlihazırda atık olarak ortaya çıkmakta olan hayvansal yağların bu şekilde değerlendirilmesi hem ülke ekonomisine hem de çevreye katkıda bulunabileceği söylenebilir. Sonuç olarak, 2035 yılına kadar hala dizel yakıtlı araçların kullanılacağı ve biyodizel harmanlanmasının zorunlu olduğu bilinmektedir.

Tablo 1. Sığır, koyun ve domuzun yağ asitlerinin yüzdelik oranda kompozisyonu
(Composition of fatty acids of cattle, sheep and pig in percent) [7]

Yağ Asitleri	Sığır	Koyun	Domuz
Miristik (C14:0)	1,6	1,6	2,2
Palmitik (C16:0)	25,1	21,6	21,1
Stearik (C18:0)	12,6	17,7	11,6
Palmitoleik (C16:1)	2,8	2,5	2,1
Oleik (C18:1)	36,5	31,5	38,7
Linoleik (C18:2)	16,5	3,3	10,2
Linolenik (C18:3)	1,1	1,3	0,6
Araşidonik (C20:4)	0,3	-	-
Dokosapentaenoik (C22:5)	0,2	-	-
Dokosaheksaenoik (C22:6)	-	-	-
Toplam doymuşluk	39,4	49,1	40,4
Toplam tekli doymamışlık	39,7	41	47,1
Toplam çoklu doymamışlık	20,9	10	12,5

Tüm bunların ışığında gelecek yıllarda hayvansal atık yağlardan biyodizel üretilmesi hedeflenmektedir. Gelecek on yıl içerisinde hayvansal atık yağlarından elde edilen biyodizelin potansiyel kapasitesi hakkında yorum yapabilmek için fizibilite analizinin yapılması önem arz etmektedir. Kimya Mühendisliği menşeli bir fizibilite analizi, bu alanda yapılacak çalışmaların ve yatırımların daha sağlıklı ve sürdürülebilir olması için gerekli bir süreçtir.

2. Teorik Metot (Theoretical Method)

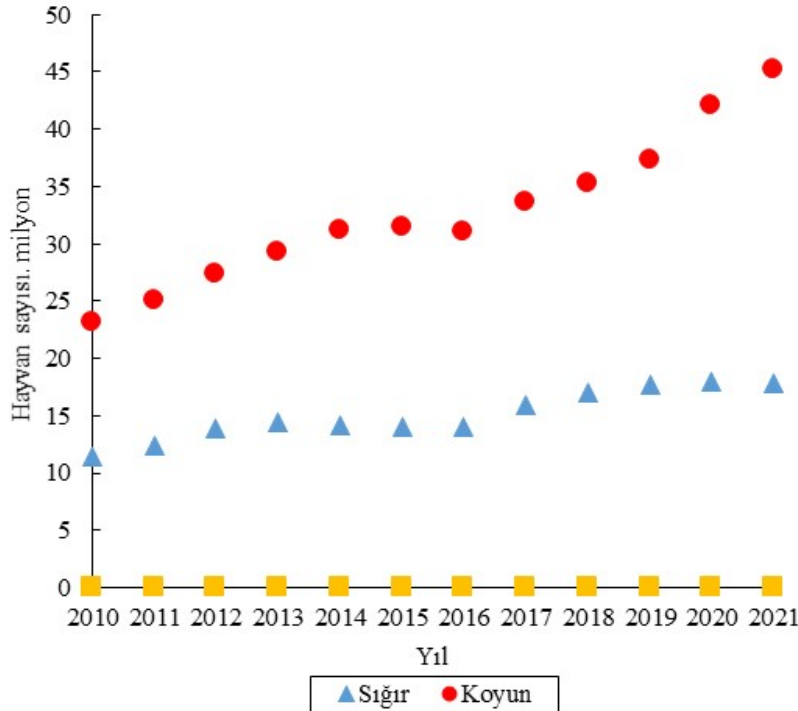
2.1. Hayvan Sayısı Verileri (Animal Population Data)

Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TÜİK) alınan 2010-2021 yılları arasında hayvan sayısı verilerine bakıldığında Türkiye'de domuz eti yaygın olarak tüketilmediği için sığır ve koyuna kıyasla domuz sayısı oldukça düşüktür (Şekil 4) [26]. Bu değerler 900 ve 3 bin değerleri arasındadır. 2015-2016 yılları arasında azalan sığır ve koyun sayıları 2016 yılından sonra özellikle koyun sayısı büyük bir ivme kazanarak artmaya devam etmiştir.

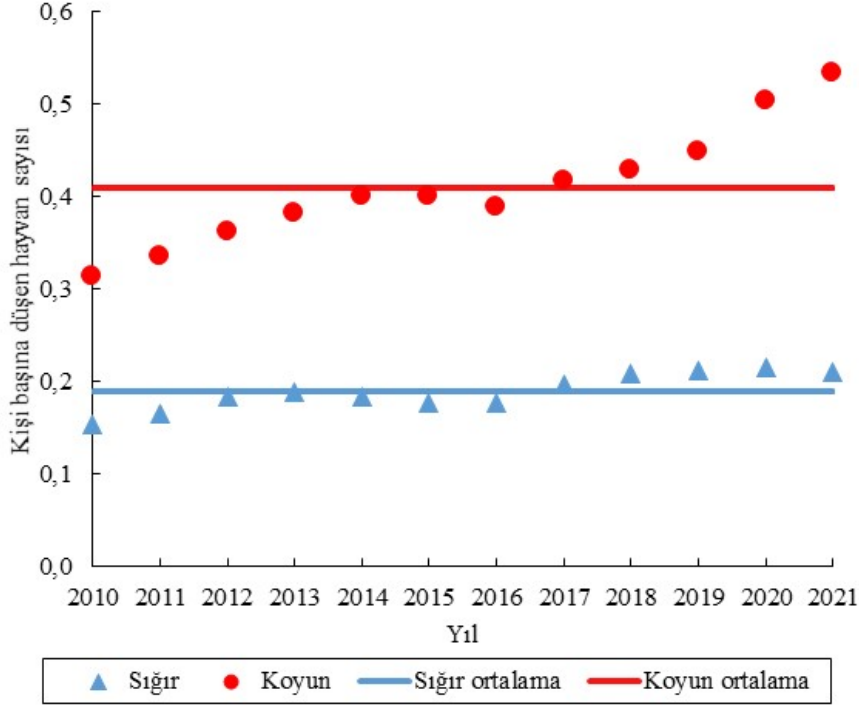
Kişi başına düşen hayvan sayısının (sığır ve koyun) hesaplanması için Türkiye nüfusu verileri TÜİK'ten alınmıştır. 2010-2021 yılları arasında Türkiye nüfusu doğrusal bir şekilde artış göstermiştir [27]. 2010-2021 yılları arasında kişi başına düşen hayvan sayılarını gösteren Şekil 5'e bakıldığında kişi başına düşen ortalama sığır ve koyun sayıları sırasıyla 0,190 ve 0,410 olarak bulunmuştur. Türkiye'de domuz eti tüketiminin yok derecede az olması sebebiyle kişi başına düşen domuz sayısı da oldukça düşük bulunmuştur. Bu nedenle bu çalışmada domuz ile ilgili bir hesaplama yer alamamaktadır.

2.2. Hayvan Sayısı Modelinin Geliştirilmesi (Development of Animal Population Model)

2022 yılı sonrası hayvan sayısı verileri literatürde bulunmadığı için Türkiye nüfus menşeli bir hayvan sayısı modeli geliştirilmiştir. Türkiye'nin ekonomisi sürekli değişkenlik gösteren bir modele sahip olduğundan son 10 yıldaki kişi başına düşen hayvan sayısı verilerinin doğru ve kesin sonuç vermeyeceği düşünülmüştür. Bu nedenle uzun dönemli model verisi yerine bugünlerdeki durumu en iyi şekilde yansıtabilmesi için son 3 yılın kişi başına düşen hayvan sayılarının verileri ile hesaplama yapmanın daha sağlıklı sonuçlar vereceği



Şekil 4. 2010-2021 yılları arasında sığır, koyun ve domuz sayıları
(Number of cattle, sheep and pigs between 2010 and 2021) [26]



Şekil 5. 2010-2021 yılları arasında kişi başına düşen sığır ve koyun sayıları (Number of cattle and sheep per capita between 2010 and 2021)

öngörülmüştür. Son 3 yılın alınma sebebi, bu süreçte yaşanan ekonomik kriz, Covid-19 salgını gibi normal süreçte rastlanması çok düşük olasılıkla olan geliştirilen modellerde sapma ortaya çıkabilecek mücbir koşulları ortaya çıkarmıştır.

Son 3 yıla ait (2019-2021) kişi başına düşen ortalama hayvan sayısı ve Türkiye'nin geçmişe dönük ve gelecek yıllarındaki nüfusu Eş. 1 kullanılarak hayvan sayısı modellenmiştir. Türkiye'nin 2022 yılı sonrası nüfus projeksiyonu TÜİK'ten alınmıştır [28]. Eş. 1'deki $KBH_{sbt,3}$ sığır ve koyun için sırasıyla 0,2128 ve 0,4952 olarak sabit alınmıştır.

$$P_{hayvan}(t) = P_{insan}(t) \times KBH_{sbt,3} + \varepsilon(t) \quad (1)$$

2.3. Toplam Hayvansal Atık Yağ Miktarının Bulunması (Finding the Total Amount of Animal Waste Fat)

Toplam hayvansal atık yağ miktarının hesaplanması için geçmiş yıllarda kesilen hayvan sayısı verileri kullanılmıştır. Çünkü dünya genelinde ya da Türkiye'de her yıl tüm hayvanlar kesilmemektedir. Belli bir kısmı et, süt üretimi ve hayvan sayısının korunması için yıllar bazında beslenmeye ve bakılmaya devam edilmektedir. Aşağıdaki Tablo 2'de 2010-2021 yılları arasında kesilen hayvanların toplam hayvan sayısına oranı verilmiştir [29]. Ortalama kesilen sığır ve koyunun yüzdesel oranları sırasıyla yaklaşık %26 ve %40 olarak bulunmuştur.

Gelecek yıllar içerisinde kesilecek hayvan sayısının tahmini için Eş. 2 kullanılmıştır.

$$P_{kh}(t) = P_{hayvan}(t) \times (\%KH_{ort.}) + \varepsilon(t) \quad (2)$$

Eş. 2'de yer alan KH_{ort} sığır ve koyun değerleri için sırasıyla %26 ve %40 alınmıştır.

Tablo 2. 2010-2021 yılları arasında kesilen hayvanların toplam hayvan sayısına göre yüzdesel oranları (Percentage of slaughtered animals according to the total number of animals between 2010 and 2021) [29]

Yıl	Sığır (%)	Koyun (%)
2010	25,79	41,97
2011	25,24	42,75
2012	24,59	39,22
2013	23,98	38,23
2014	24,79	38,51
2015	26,49	40,65
2016	28,37	42,85
2017	27,18	39,33
2018	28,43	40,16
2019	27,46	39,02
2020	26,79	37,51
2021	28,76	37,91

Tablo 3. Hayvanların ortalama canlı ağırlık, karkas, atık yağ ve atık yağ oranları (Average live weight, carcass weight, waste fat weight and waste fat ratios of animals)

Hayvan	Canlı ağırlık (kg)	Karkas ağırlık (kg)	Atık yağ miktarı (kg)	Atık yağ oranı (%)	Kaynaklar
Sığır	393	205,5	14,9	3,8	[22]
Koyun	60	37,5	1,8	3	[31]

Sığır ve koyun kesiminden sonra ortaya çıkan atık yağ miktarları literatürden bulunmuştur ve Tablo 3'te listelenmiştir. Et ve Süt Kurumu'ndan Türkiye'deki yerli sığır ve koyun ırklarının ortalama canlı ağırlıkları sırasıyla yaklaşık 375 kg ve 69 kg olarak bulunmuştur [30].

Tablo 3'te verilen canlı ağırlık ve atık yağ miktarları ile doğru orantı kurularak Türkiye'deki sığır ve koyun için hayvan başına atık yağ miktarları sırasıyla 14,22 kg ve 3,45 kg olarak hesaplanmıştır.

1 baş sığır ve 1 baş koyuna düşen atık yağ miktarları bulunduktan sonra sığır ve koyun için sırasıyla Eş. 3 ve Eş. 4 kullanılarak herhangi bir yıldaki hayvansal atık yağ miktarı hesaplanmıştır.

$$SAY(t) = P_{kh}(t) \times HBAY_{sbt} + \varepsilon(t) \quad (3)$$

$$KAY(t) = P_{kh}(t) \times HBAY_{sbt} + \varepsilon(t) \quad (4)$$

Her bir hayvan için atık yağ miktarı bulunduktan sonra toplam atık yağ miktarı Eş. 5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$THAY(t) = SAY(t) + KAY(t) \quad (5)$$

2.4. Potansiyel Biyodizel Üretim Miktarının Bulunması (Finding Potential Amount of Biodiesel Production)

Ham madde kaynağı olan hayvansal atık yağlarının belli bir kısmının biyodizel üretiminde kullanılması ihtimaline göre üç farklı ulaşılabilirlik faktörü (%10=0,1; %50=0,5; %100=1,0) göz önünde bulundurulmuştur. Toplam hayvansal atık yağ miktarının hesaplanması sonucunda Eş. 6 ile yıllara göre potansiyel biyodizel miktarı bulunmuştur.

$$B_{HAY}(t) = THAY(t) \times B_{hayo} / \rho_b \times UF + \varepsilon(t) \quad (6)$$

B_{hayo} stokiyometrik olarak 1 kg hayvansal atık yağdan üretilen kg cinsinden biyodizel miktarıdır. Bu değer 1 olarak sabit alınmıştır.

Potansiyel biyodizel üretim kapasitelerine göre biyodizelin Türk lirası (TL) cinsinden net değeri Eş. 7 kullanılarak hesaplanmıştır. Biyodizel yoğunluğu 0,87 kg/L'dir [32]. Biyodizelin enerji içeriği 33,0 MJ/L, dizelin enerji içeriği 35,8 MJ/L olarak bulunmuştur [33]. 2022 yılı dizel fiyatı ortalama 24 TL olarak sabit alınmıştır [34].

$$ND_{b2022}(t) = B_{HAY}(t) \times \frac{El_b}{El_d} \times F_d(t) + \varepsilon(t) \quad (7)$$

2.5. Biyodizel Üretim Oranının Bulunması (Finding the Biodiesel Production Ratio)

Türkiye'de bitkisel yağlar veya atık yemeklik yağlardan elde edilen biyodizelin yıllık üretim kapasiteleri Tablo 4'te verilmiştir [35].

Bu çalışmada hesaplanan potansiyel biyodizel verileri ile Türkiye'de hâlihazırda üretilen biyodizel üretim kapasiteleri arasında üretim oranı aşağıda gösterilen Eş. 8 ile yapılmıştır.

$$\text{Üretim oranı} = \left(\frac{\text{Potansiyel biyodizel üretim miktarı}}{\text{Türkiye'de üretilen biyodizel üretim miktarı}} \right) \times 100 \quad (8)$$

2.6. Biyodizelin CO₂ Gazı Azaltma Oranının Bulunması (Finding the CO₂ Gas Reduction Ratio of Biodiesel)

1 litre (L) dizel yakıtın yanması ile yaklaşık 2,68 kg CO₂ gazı açığa çıkmaktadır. [36]. Hayvan yağlarından elde edilen biyodizel, dizel yakıtı göre %80 daha az CO₂ emisyonu oluşturmaktadır [7]. Buna

göre hayvansal atık yağlardan elde edilen biyodizelde 2,14 kg CO₂ emisyonu daha az olmaktadır.

Tablo 4. Türkiye'de üretilen biyodizelin yıllık ton cinsinden üretim miktarları
(Annual production amounts of biodiesel produced in Turkey in tons) [35]

Yıl	Biyodizel üretimi (Ton)	Biyodizel üretimi* (Litre)
2010	7 460	8 574 713
2011	11 646	13 386 207
2012	17 729	20 378 161
2013	21 876	25 144 828
2014	32 240	37 057 471
2015	69 216	79 558 621
2016	64 105	73 684 336
2017	65 603	75 406 317
2018	108 376	124 570 415
2019	118 391	136 082 094
2020	74 576	85 719 255
2021	59 394	68 269 316

*Biyodizelin yoğunluğu: 870 kg/m³

Soya fasulyesinden elde edilen biyodizelde litre başına 2,48 kg CO₂ emisyonu meydana gelmektedir [36]. Hayvan atık yağlarından elde edilen biyodizel, soya fasulyesinden elde edilen biyodizele kıyasla %30 daha az CO₂ emisyonu yapmaktadır [7]. Bu durumda 0,74 kg CO₂ daha az açığa çıkmaktadır. Tablo 5'te TÜİK'ten alınan ulaştırma sektöründe oluşan CO₂ emisyon miktarları ton cinsinden verilmiştir [37].

Tablo 5. Ulaşım sektöründe çevreye salınan yıllık CO₂ miktarları
(Annual amounts of CO₂ released to the environment in the transportation sector) [37]

Yıl	Ulaşım sektörü CO ₂ emisyonu, ton
2010	44 382 598
2011	Veri yok
2012	Veri yok
2013	Veri yok
2014	Veri yok
2015	74 271 577
2016	80 207 781
2017	83 064 082
2018	82 902 425
2019	80 745 148
2020	79 032 479

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

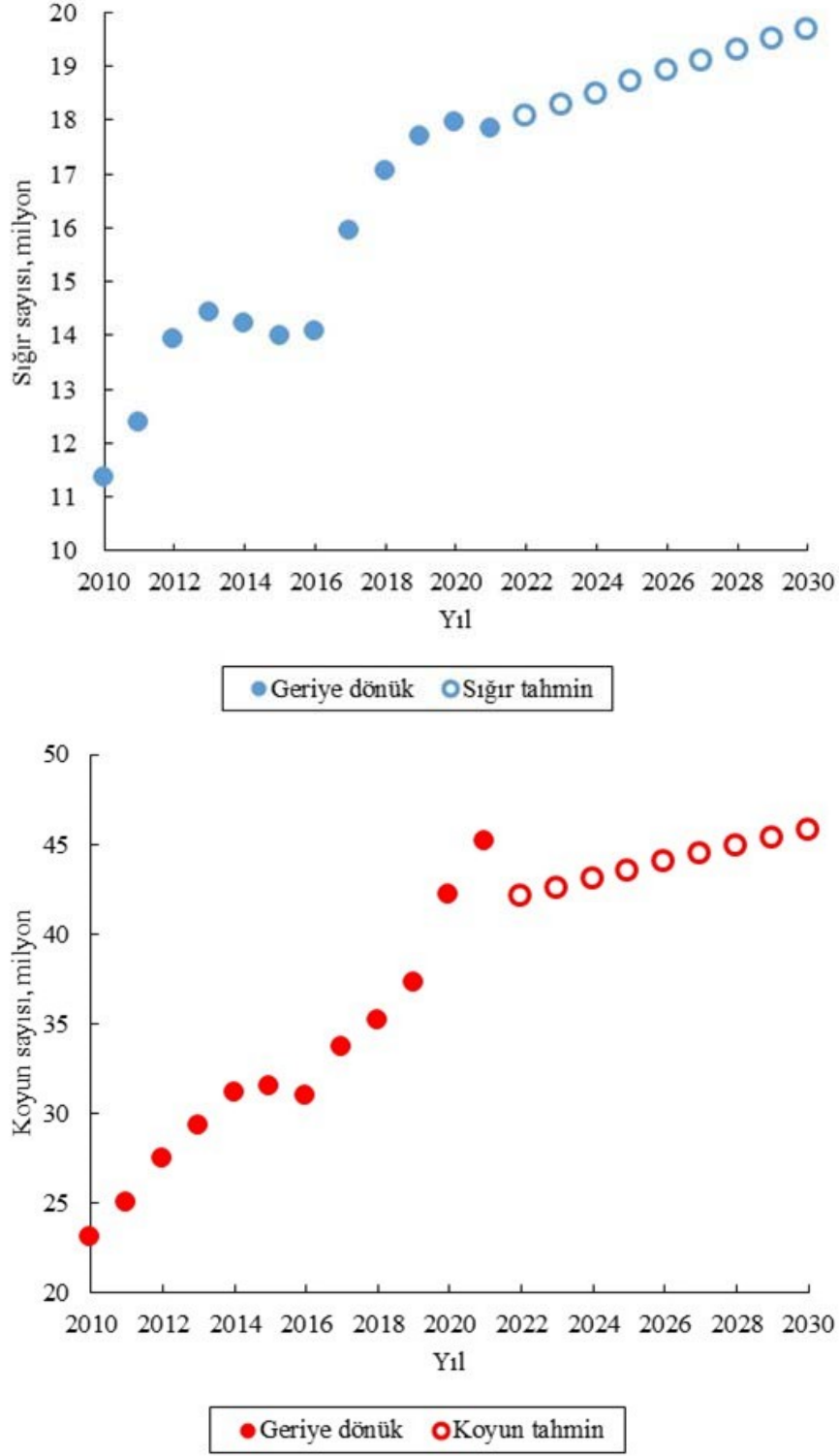
3.1. Hayvan Sayısı Tahmini (Forecasting Animal Population)

Türkiye için nüfus menşeli yöntem geliştirilerek son 3 yılın ortalama kişi başına düşen hayvan sayısı ve Türkiye'nin nüfus projeksiyon verileri kullanılmıştır. Elde edilen tahmini hayvan sayıları Şekil 6'da sığır ve koyun için verilmiştir.

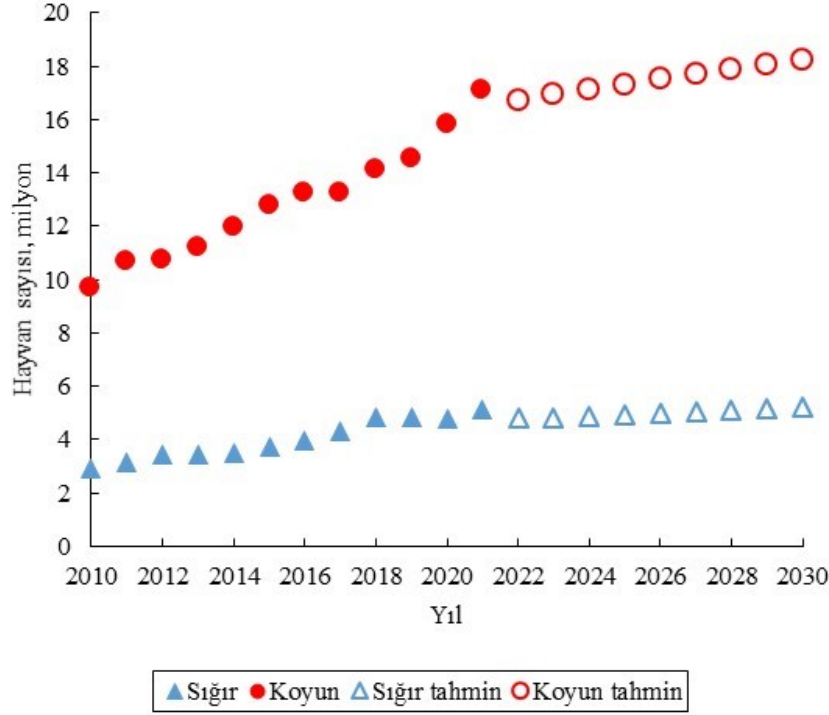
2010-2021 yılları arasındaki hayvan sayısını paralel olarak 2022 yılı sonrasında hayvan sayısının doğrusal bir şekilde artacağını tahmin edilmektedir.

3.2. Toplam Hayvansal Atık Yağ Miktarı (Total Amounts of Animal Waste Fats)

Elde edilen tahmini hayvan sayısı ve ortalama kesilen hayvan (sığır ve koyun) yüzdesel oranları çarpılarak gelecek yıllardaki kesilecek sığır ve koyun sayıları Şekil 7'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 6. 2022 yılı sonrası hayvan (sığır ve koyun) sayılarının tahmini
(Forecasting animal (cattle and sheep) population after year 2022)



Şekil 7. 2021 yılı sonrası kesilecek tahmini sığır ve koyun sayıları (Forecasting number of cattle and sheep to be slaughtered after year 2021)

Geçmişe dönük ve gelecek yıllarda kesilecek hayvan sayısının bulunması ile hayvanların kesiminden ortaya çıkan hayvan türlerine göre ve toplam atık yağ miktarları Tablo 6'da yıllara göre hesaplanmıştır.

Tablo 6. 2010-2030 yılları arasında sığır, koyun ve toplam atık yağ miktarları (Amount of cattle, sheep and total animal waste fats between 2010 and 2030)

Yıl	Sığır atık yağ (ton)	Koyun atık yağ (ton)	Toplam atık yağ (ton)	Veri Türü (Veri veya Model sonucu)
2010	41 694	20 060	61 754	Veri
2011	44 457	22 151	66 608	Veri
2012	48 660	22 264	70 925	Veri
2013	49 165	23 173	72 338	Veri
2014	50 128	24 823	74 951	Veri
2015	52 704	26 514	79 218	Veri
2016	56 793	27 484	84 278	Veri
2017	61 630	27 417	89 047	Veri
2018	68 892	29 256	98 147	Veri
2019	69 060	30 111	99 171	Veri
2020	68 439	32 708	101 148	Veri
2021	73 012	35 449	108 461	Veri
2022	68 059	34 676	102 735	Model sonucu
2023	68 863	35 085	103 948	Model sonucu
2024	69 661	35 492	105 153	Model sonucu
2025	70 445	35 891	106 337	Model sonucu
2026	71 214	36 283	107 497	Model sonucu
2027	71 968	36 667	108 634	Model sonucu
2028	72 704	37 042	109 746	Model sonucu
2029	73 424	37 409	110 832	Model sonucu
2030	74 125	37 766	111 891	Model sonucu

Türkiye'de kesilen tüm hayvanlardan 2010, 2020 ve 2030 yıllarında yaklaşık olarak 62 bin, 101 bin ve 112 bin ton hayvansal atık yağının ortaya çıkabileceği hesaplanmıştır. Bu miktarda atık yağın

sürdürülebilir bir şekilde bertaraf edilmesi ve/veya biyodizel üretiminde kullanılması Türkiye için elzemdir.

3.3. Potansiyel Biyodizel Üretim Miktarı ve Dizel Net Değerleri (Potential Biodiesel Production Amount and Diesel Net Worth)

Elde edilen toplam hayvansal atık yağ miktarı üç farklı ulaşılabilirlik faktörü göz önünde bulundurularak potansiyel biyodizel üretim miktarları ton ve litre cinsinden hesaplanmıştır. Aynı zamanda hayvansal atık yağlardan üretilmesi beklenen biyodizelin, dizele eşdeğer ve dizel net değeri (TL) de hesaplanmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar ulaşılabilirlik faktörüne göre Tablo 7-9'da listelenmiştir.

Hayvansal atık yağlarının %10'unun kullanılması halinde 2030 yılında yaklaşık 11 bin ton biyodizel üretilbileceği öngörülmektedir. Ayrıca, bu miktarda üretililecek olan biyodizelin dizel karşılığı net değeri, yaklaşık olarak 296 milyon TL'sidir. Bu da hayvansal atık yağlardan biyodizel üretiminin Türkiye ekonomisine sağlayacağı olası katkıyı net bir şekilde göstermektedir. Hayvansal atık yağların ulaşılabilirlik faktörü %100 olduğunda yani hayvanların kesiminden sonra ortaya çıkan atık yağlarının tamamının biyodizel üretimi için kullanılması dâhilinde bu değerler 10 katına çıkmaktadır. Hayvansal atık yağların %100 ulaşılabilirlik faktörüne göre 2030 yılında biyodizel üretimi 112 bin ton olup takribi 2,9 milyar TL kazanç sağlanması beklenmektedir. Biyodizel üretim ve tüketiminin önümüzdeki yıllarda artacak olması göz önüne alındığında [38] hayvansal atık yağların enerji üretmek için kullanılması ile Türkiye ekonomisi için oldukça kârlı bir adım olacağı düşünülmektedir.

3.4. Biyodizel Üretim Oranı (Biodiesel Production Ratio)

2010-2021 yılları arasında teorik olarak hesaplanan biyodizel üretim miktarı ile Türkiye'nin biyodizel üretim kapasitesi karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar üç farklı ulaşılabilirlik faktörüne göre Tablo 10-12'de listelenmiştir.

Tablo 7. %10 ulaşılabilirlik faktörüne göre 2010-2030 yılları arasında potansiyel biyodizel üretim miktarı ve dizel net değeri (Potential biodiesel production amount and diesel net value between 2010 and 2030 according to 10% availability factor)

%10 Ulaşılabilirlik Faktörü				
Yıl	Potansiyel biyodizel üretimi (L)	Biyodizelin dizel eşdeğeri (L)	Dizel net değer (TL)	Potansiyel biyodizel üretimi (Ton)
2010	7 098 191	6 543 025	163 575 633	6 175
2011	7 656 065	7 057 267	176 431 666	6 661
2012	8 152 268	7 514 660	187 866 506	7 092
2013	8 314 759	7 664 443	191 611 067	7 234
2014	8 615 077	7 941 272	198 531 794	7 495
2015	9 105 545	8 393 380	209 834 490	7 922
2016	9 687 079	8 929 431	223 235 765	8 428
2017	10 235 277	9 434 753	235 868 821	8 905
2018	11 281 316	10 398 979	259 974 469	9 815
2019	11 398 975	10 507 435	262 685 881	9 917
2020	11 626 159	10 716 850	267 921 253	10 115
2021	12 466 763	11 491 709	287 292 724	10 846
2022	11 808 595	10 885 017	272 125 436	10 273
2023	11 947 999	11 013 519	275 337 974	10 395
2024	12 086 563	11 141 246	278 531 138	10 515
2025	12 222 606	11 266 648	281 666 203	10 634
2026	12 356 029	11 389 635	284 740 884	10 750
2027	12 486 710	11 510 095	287 752 387	10 863
2028	12 614 521	11 627 910	290 697 760	10 975
2029	12 739 342	11 742 969	293 574 230	11 083
2030	12 861 061	11 855 168	296 379 195	11 189

Tablo 8. %50 ulaşılabilirlik faktörüne göre 2010-2030 yılları arasında potansiyel biyodizel üretim miktarı ve dizel net değeri (Potential biodiesel production amount and diesel net value between 2010 and 2030 according to 50% availability factor)

%50 Ulaşılabilirlik Faktörü				
Yıl	Potansiyel biyodizel üretimi (L)	Biyodizelin dizel eşdeğeri (L)	Dizel net değer (TL)	Potansiyel biyodizel üretimi (Ton)
2010	35 490 956	32 715 127	817 878 167	30 877
2011	38 280 325	35 286 333	882 158 330	33 304
2012	40 761 339	37 573 301	939 332 529	35 462
2013	41 573 795	38 322 213	958 055 337	36 169
2014	43 075 383	39 706 359	992 658 971	37 476
2015	45 527 726	41 966 898	1 049 172 452	39 609
2016	48 435 396	44 647 153	1 116 178 827	42 139
2017	51 176 387	47 173 764	1 179 344 105	44 523
2018	56 406 582	51 994 894	1 299 872 346	49 074
2019	56 994 876	52 537 176	1 313 429 403	49 586
2020	58 130 793	53 584 251	1 339 606 264	50 574
2021	62 333 815	57 458 545	1 436 463 618	54 230
2022	59 042 973	54 425 087	1 360 627 179	51 367
2023	59 739 997	55 067 595	1 376 689 868	51 974
2024	60 432 817	55 706 228	1 392 655 688	52 577
2025	61 113 031	56 333 241	1 408 331 015	53 168
2026	61 780 143	56 948 177	1 423 704 422	53 749
2027	62 433 548	57 550 477	1 438 761 936	54 317
2028	63 072 605	58 139 552	1 453 488 799	54 873
2029	63 696 712	58 714 846	1 467 871 149	55 416
2030	64 305 304	59 275 839	1 481 895 974	55 946

Tablo 9. %100 ulaşılabilirlik faktörüne göre 2010-2030 yılları arasında potansiyel biyodizel üretim miktarı ve dizel net değeri (Potential biodiesel production amount and diesel net value between 2010 and 2030 according to 100% availability factor)

%100 Ulaşılabilirlik Faktörü				
Yıl	Potansiyel biyodizel üretimi (L)	Biyodizelin dizel eşdeğeri (L)	Dizel net değer (TL)	Potansiyel biyodizel üretimi (Ton)
2010	70 981 911	65 430 253	1 635 756 334	61 754
2011	76 560 650	70 572 666	1 764 316 659	66 608
2012	81 522 678	75 146 602	1 878 665 058	70 925
2013	83 147 590	76 644 427	1 916 110 674	72 338
2014	86 150 766	79 412 718	1 985 317 941	74 951
2015	91 055 452	83 933 796	2 098 344 905	79 218
2016	96 870 793	89 294 306	2 232 357 654	84 278
2017	102 352 773	94 347 528	2 358 688 209	89 047
2018	112 813 164	103 989 788	2 599 744 692	98 147
2019	113 989 752	105 074 352	2 626 858 805	99 171
2020	116 261 586	107 168 501	2 679 212 529	101 148
2021	124 667 630	114 917 089	2 872 927 236	108 461
2022	118 085 947	108 850 174	2 721 254 357	102 735
2023	119 479 993	110 135 189	2 753 379 736	103 948
2024	120 865 633	111 412 455	2 785 311 377	105 153
2025	122 226 061	112 666 481	2 816 662 030	106 337
2026	123 560 287	113 896 354	2 847 408 844	107 497
2027	124 867 097	115 100 955	2 877 523 873	108 634
2028	126 145 210	116 279 104	2 906 977 598	109 746
2029	127 393 423	117 429 692	2 935 742 298	110 832
2030	128 610 608	118 551 678	2 963 791 948	111 891

Tablo 10. %10 ulaşılabilirlik faktörüne göre yıllık biyodizel üretim oranı (Annual biodiesel production ratio based on 10% availability factor)

%10 Ulaşılabilirlik Faktörü			
Yıl	Potansiyel biyodizel üretimi (L)	Biyodizel üretimi (L)	Üretim oranı (%)
2010	7 098 191	8 574 713	82,78
2011	7 656 065	13 386 207	57,19
2012	8 152 268	20 378 161	40,00
2013	8 314 759	25 144 828	33,07
2014	8 615 077	37 057 471	23,25
2015	9 105 545	79 558 621	11,45
2016	9 687 079	73 684 336	13,15
2017	10 235 277	75 406 317	13,57
2018	11 281 316	124 570 415	9,06
2019	11 398 975	136 082 094	8,38
2020	11 626 159	85 719 255	13,56
2021	12 466 763	68 269 316	18,26

Tablo 11. %50 ulaşılabilirlik faktörüne göre yıllık biyodizel üretim oranı (Annual biodiesel production ratio based on 50% availability factor)

%50 Ulaşılabilirlik Faktörü			
Yıl	Potansiyel biyodizel üretimi (L)	Biyodizel üretimi (L)	Üretim oranı (%)
2010	35 490 956	8 574 713	413,90
2011	38 280 325	13 386 207	285,97
2012	40 761 339	20 378 161	200,02
2013	41 573 795	25 144 828	165,34
2014	43 075 383	37 057 471	116,24
2015	45 527 726	79 558 621	57,23
2016	48 435 396	73 684 336	65,73
2017	51 176 387	75 406 317	67,87
2018	56 406 582	124 570 415	45,28
2019	56 994 876	136 082 094	41,88
2020	58 130 793	85 719 255	67,82
2021	62 333 815	68 269 316	91,31

Tablo 12. %100 ulaşılabilirlik faktörüne göre biyodizel üretim oranı (Annual biodiesel production ratio based on 100% availability factor)

%100 Ulaşılabilirlik Faktörü			
Yıl	Potansiyel biyodizel üretimi (L)	Biyodizel üretimi (L)	Üretim oranı (%)
2010	70 981 911	8 574 713	827,81
2011	76 560 650	13 386 207	571,94
2012	81 522 678	20 378 161	400,05
2013	83 147 590	25 144 828	330,67
2014	86 150 766	37 057 471	232,48
2015	91 055 452	79 558 621	114,45
2016	96 870 793	73 684 336	131,47
2017	102 352 773	75 406 317	135,74
2018	112 813 164	124 570 415	90,56
2019	113 989 752	136 082 094	83,77
2020	116 261 586	85 719 255	135,63
2021	124 667 630	68 269 316	182,61

Bu çalışma kapsamında teorik olarak hayvan atık yağlarından elde edilen biyodizelin üretim miktarı ile Türkiye'nin hâlihazırda bulunan biyodizel üretim kapasitesi arasında kıyaslaması yapılmıştır. 2010-2021 yılları arasında hayvansal atık yağları %10, %50 ve %100 oranlarında ulaşılabilirlik faktörleri ile elde edilip biyodizel üretiminde kullanılsaydı; Türkiye'nin biyodizel üretiminin ortalama olarak yaklaşık %27, %135 ve %270'ini karşılanabileceği hesaplanmıştır. Bunun sonucunda eğer hayvan yağlarından biyodizel üretilmiş olsaydı Türkiye'nin biyodizel üretim kapasitesinin çok üzerinde bir değerlerde olacağı hesaplanmış ve kanıtlanmıştır.

3.5. Biyodizelin CO₂ Gazı Azaltma Miktarları (CO₂ Emission Reduction Amounts of Biodiesel)

Yine bu bölümde de hayvansal atık yağların farklı ulaşılabilirlik faktörüne göre 3 farklı durumu (%10, %50 ve %100) göz önünde bulundurulmuştur. Teorik olarak hayvansal atık yağlardan elde edilen biyodizelin; dizel (petrol menşeli) yakıtı göre CO₂ emisyon azaltma ve soyadan üretilmiş biyodizelle göre CO₂ emisyon azaltma miktarları

hesaplanmıştır. Hayvansal atık yağdan elde edilen biyodizel ile yukarıdaki bahsedilen yakıtların CO₂ emisyon azaltma miktarlarının kıyaslanması Tablo 13-15'te verilmiştir.

Tablo 13. %10 ulaşılabilirlik faktörüne göre CO₂ emisyonu azaltma miktarları
(CO₂ emission reduction based on 10% availability factor)

%10 Ulaşılabilirlik Faktörü		
Yıl	Dizel yakıtı göre CO ₂ azaltma miktarı (kg)	Soya biyodizeline göre CO ₂ azaltma miktarı (kg)
2010	15 235 557	5 281 054
2011	16 432 978	5 696 112
2012	17 498 028	6 065 287
2013	17 846 799	6 186 181
2014	18 491 401	6 409 617
2015	19 544 142	6 774 526
2016	20 792 347	7 207 187
2017	21 968 999	7 615 046
2018	24 214 217	8 393 299
2019	24 466 760	8 480 838
2020	24 954 387	8 649 862
2021	26 758 660	9 275 272
2022	25 345 968	8 785 594
2023	25 645 186	8 889 312
2024	25 942 599	8 992 403
2025	26 234 602	9 093 619
2026	26 520 980	9 192 885
2027	26 801 474	9 290 112
2028	27 075 808	9 385 204
2029	27 343 724	9 478 071
2030	27 604 981	9 568 629

Tablo 14. %50 ulaşılabilirlik faktörüne göre CO₂ emisyonu azaltma miktarları
(CO₂ emission reduction based on 50% availability factor)

%50 Ulaşılabilirlik Faktörü		
Yıl	Dizel yakıtı göre CO ₂ azaltma miktarı (kg)	Soya biyodizeline göre CO ₂ azaltma miktarı (kg)
2010	76 177 787	26 405 271
2011	82 164 890	28 480 562
2012	87 490 138	30 326 436
2013	89 233 994	30 930 904
2014	92 457 003	32 048 085
2015	97 720 711	33 872 628
2016	103 961 735	36 035 935
2017	109 844 996	38 075 232
2018	121 071 087	41 966 497
2019	122 333 802	42 404 188
2020	124 771 934	43 249 310
2021	133 793 301	46 376 359
2022	126 729 838	43 927 972
2023	128 225 929	44 446 558
2024	129 712 997	44 962 016
2025	131 173 009	45 468 095
2026	132 604 900	45 964 427
2027	134 007 368	46 450 560
2028	135 379 039	46 926 018
2029	136 718 622	47 390 353
2030	138 024 905	47 843 146

Tablo 15. %100 ulaşılabilirlik faktörüne göre CO₂ emisyonu azaltma miktarları
(CO₂ emission reduction based on 100% availability factor)

%100 Ulaşılabilirlik Faktörü		
Yıl	Dizel yakıtı göre CO ₂ azaltma miktarı (kg)	Soya biyodizeline göre CO ₂ azaltma miktarı (kg)
2010	152 355 574	52 810 542
2011	164 329 780	56 961 124
2012	174 980 275	60 652 872
2013	178 467 988	61 861 807
2014	184 914 005	64 096 170
2015	195 441 421	67 745 256
2016	207 923 470	72 071 870
2017	219 689 992	76 150 463
2018	242 142 174	83 932 994
2019	244 667 603	84 808 375
2020	249 543 868	86 498 620
2021	267 586 602	92 752 717
2022	253 459 676	87 855 944
2023	256 451 858	88 893 115
2024	259 425 995	89 924 031
2025	262 346 018	90 936 190
2026	265 209 800	91 928 853
2027	268 014 736	92 901 120
2028	270 758 078	93 852 036
2029	273 437 244	94 780 707
2030	276 049 809	95 686 292

Sonuçlara bakıldığında %10 ulaşılabilirlik faktörüne göre 2030 yılında dizel yakıtı kıyasla yaklaşık 27 bin ton CO₂ emisyon gazından azaltma sağlanacağı hesaplanmıştır. Soyadan elde edilen biyodizelin dizele kıyasla çevreye 9 bin ton CO₂ gazın teorik olarak daha az salınabileceği hesaplanmıştır. Ulaşılabilirlik faktörü arttığında CO₂ emisyon azaltmaları da doğru orantılı artış göstermektedir. Böylece, çevreye salınan zararlı gazların azaltılması sağlanacaktır.

3.6. Biyodizelin CO₂ Gazı Azaltma Oranları (CO₂ Gas Reduction Ratio of Biodiesel)

Ulaşım sektöründe kullanılan dizelin yanması sonucu ortaya çıkan CO₂ emisyon miktarları verilmiştir. Buna ek olarak, önceki bölümde teorik olarak hesaplanan biyodizelin CO₂ emisyon miktarları ile arasında incelemesi yapılmıştır ve üç farklı ulaşılabilirlik faktörüne göre CO₂ emisyon oranları Tablo 16-18'de listelenmiştir.

Tablo 16. %10 ulaşılabilirlik faktörüne göre CO₂ emisyon oranı
(CO₂ emission ratio based on 10% availability factor)

%10 Ulaşılabilirlik Faktörü			
Yıl	TÜİK Ulaşım sektörü CO ₂ emisyonu, ton	CO ₂ azaltma miktarı, ton	Oran (%)
2010	44 382 598	15 236	0,034
2011	-	16 433	-
2012	-	17 498	-
2013	-	17 847	-
2014	-	18 491	-
2015	74 271 577	19 544	0,026
2016	80 207 781	20 792	0,026
2017	83 064 082	21 969	0,026
2018	82 902 425	24 214	0,029
2019	80 745 148	24 467	0,030
2020	79 032 479	24 954	0,032

Tablo 17. %50 ulaşılabilirlik faktörüne göre CO₂ emisyon oranı (CO₂ emission ratio based on 50% availability factor)

%50 Ulaşılabilirlik Faktörü			
Yıl	TÜİK Ulaşım sektörü CO ₂ emisyonu, ton	CO ₂ azaltma miktarı, ton	Oran (%)
2010	44 382 598	76 178	0,172
2011	-	82 165	-
2012	-	87 490	-
2013	-	89 234	-
2014	-	92 457	-
2015	74 271 577	97 721	0,132
2016	80 207 781	103 962	0,130
2017	83 064 082	109 845	0,132
2018	82 902 425	121 071	0,146
2019	80 745 148	122 334	0,152
2020	79 032 479	124 772	0,158

Tablo 18. %100 ulaşılabilirlik faktörüne göre CO₂ emisyon oranı (CO₂ emission ratio based on 100% availability factor)

%100 Ulaşılabilirlik Faktörü			
Yıl	TÜİK Ulaşım sektörü CO ₂ emisyonu, ton	CO ₂ azaltma miktarı, ton	Oran (%)
2010	44 382 598	152 356	0,343
2011	-	164 330	-
2012	-	174 980	-
2013	-	178 468	-
2014	-	184 914	-
2015	74 271 577	195 441	0,263
2016	80 207 781	207 923	0,259
2017	83 064 082	219 690	0,264
2018	82 902 425	242 142	0,292
2019	80 745 148	244 668	0,303
2020	79 032 479	249 544	0,316

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlara göre 2010-2020 yılları arasında kesilen hayvanlardan ortaya çıkan atık yağlar %10, %50 ve %100 oranında geri kazanılıp biyodizel üretiminde kullanılıyorsa, ulaşım sektöründen ortaya çıkan CO₂ emisyonlarının ortalama yaklaşık olarak %0,029, %0,146 ve %0,292'si bertaraf edilebilecekti. Sera gazlarının içerisinde yer alan CO₂ gazı, ulaşım sektöründe kullanılan fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu da hayvansal atık yağlardan biyodizel üretiminin Türkiye'nin en önemli sera gazı emisyon kaynaklarından (CO₂ gazı) biri olan ulaştırma sektörüne sağlayacağı faydayı net bir şekilde ortaya koymaktadır.

4. Simgeler (Symbols)

B _{HAY}	: Litre cinsinden biyodizel miktarı
B _{hayo}	: Hayvansal atık yağ başına düşen biyodizel miktarı
CO ₂	: Karbon dioksit
E _{I_b}	: Biyodizelin enerji içeriği
E _{I_d}	: Dizelin enerji içeriği
F _d	: Dizelin ortalama satış fiyatı
HBAY _{sbt}	: Hayvan başına düşen sabit atık yağ miktarı
kg	: Kilogram
KAY	: Koyun atık yağı miktarı
KBH	: Kişi başına düşen hayvan sayısı
KBH _{sbt,3}	: Son 3 yıla ait ortalama kişi başına düşen hayvan sayısı
KH _{ort}	: Ortalama kesilen hayvan sayısı
L	: Litre
m ³	: Metreküp
MJ	: Megajoule
ND _{b2022}	: Biyodizelin Türk lirası cinsinden net değeri

NO _x	: Azot oksitler
P _{hayvan}	: Hayvan sayısı
P _{insan}	: İnsan nüfusu
P _{kh}	: Kesilecek hayvan sayısı
R ²	: Determinasyon katsayısı
SAY	: Sığır atık yağı miktarı
SO _x	: Kükürt oksitler
THAY	: Toplam hayvan atık yağ miktarı
UF	: Ulaşılabilirlik Faktörü
\$: Amerikan doları
ρ _b	: Biyodizel yoğunluğu
°C	: Santigrat derece
%	: Yüzde
ε	: Rastgele hata terimi

4.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TL	: Türk lirası

5. Sonuçlar (Conclusions)

Kimya ve süreç mühendisliği çerçevesinde hammadde olarak kullanılabilir olan hayvansal atık yağlarından biyodizel üretiminin teknik ve ekonomik analiz yapılmıştır. Hayvansal atık yağlarının biyodizel üretiminde kullanılması fikri çerçevesinde atık yağların bertarafından kaynaklı atık yönetimi ve petrol menşeli dizel yakıtın çevresel etkilerinin azaltılması sonucundaki CO₂ emisyon azaltmaları incelenmiştir. Türkiye için nüfus menşeli hayvan sayısı modeli geliştirilmiştir. 2030 yılı için yaklaşık olarak 112 bin ton atık yağ elde edileceği hesaplanmıştır. Bunun doğrultusunda %10, %50 ve %100 ulaşılabilirlik faktörüne göre 2030 yılında sırasıyla yaklaşık olarak 13 bin, 64 bin ve 129 bin m³ potansiyel biyodizel üretimi gerçekleştirileceği hesaplanmıştır. Bu miktarlarda üretilen biyodizelin dizel karşılığı net değeri %10, %50 ve %100 ulaşılabilirlik faktörüne göre 2030 yılında sırasıyla yaklaşık olarak 296 milyon, 1,4 milyar ve 2,9 milyar TL (2022 yılı piyasa değerine göre) olacağı bulunmuştur. 2010-2021 yılları arasında hayvansal atık yağları biyodizel üretiminde kullanılıyorsa %10, %50 ve %100 ulaşılabilirlik faktörlerine göre Türkiye'deki biyodizel üretiminin ortalama yaklaşık %27, %135 ve %270'ini karşılanabileceği hesaplanmıştır. Bunlara ek olarak, biyodizelin yanması sonucu oluşturacağı CO₂ emisyon azaltma miktarı 2010-2021 yılları arasında %10, %50 ve %100 oranlarında ulaşılabilirlik faktörlerine göre Türkiye'nin CO₂ emisyon azaltma miktarları ortalama yaklaşık %0,029, %0,146 ve %0,292 olarak hesaplanmıştır. Hayvansal atık yağın sürdürülebilir bir şekilde bertaraf edilmesi ve biyodizel üretiminde kullanılmasının hem çevre için hem de Türkiye'nin ekonomik kalkınmasına sağlayacağı faydalar ortaya konmuştur. Yakıtın yanması sonucu atmosfere yayılacak zararlı gazların miktarında düşüş olması beklenmektedir.

Kaynaklar (References)

- Alajmi F., Hairuddin A.A., Adam N.M., Abdullah L.C., Recent trends in biodiesel production from commonly used animal fats, International Journal of Energy Research., 42 (3), 885–902, 2018.
- Banković-Ilić I.B., Stojković I.J., Stamenković O.S., Veljković V.B., Hung, Y.T., Waste animal fats as feedstocks for biodiesel production, Renewable and Sustainable Energy Reviews., 32, 238–254, 2014.
- Chudziak C., Haye S., Final report Task 4a of ENER/C1/2013-412, Indirect emissions from rendered animal fats used for biodiesel. Ecofys, 2016.
- Singh A., Rashid M., Impact of animal waste on environment, its management strategies and treatment protocols to reduce environmental contamination, Veterinary Science Research Journal, 8 (1), 1–12, 2017.

5. Environmental Protection Agency. Vegetable Oils and Animal Fats. <https://www.epa.gov/emergency-response/vegetable-oils-and-animal-fats>. Yayın tarihi 2007. Erişim tarihi Ağustos 22, 2022.
6. Ramos M, Dias A.P.S, Puna J.F., Gomes J., Bordado J.C., Biodiesel Production Processes and Sustainable Raw Materials, *Energies*, 12 (23), 2019.
7. Toldrá-Reig F, Mora L, Toldrá F., Trends in Biodiesel Production from Animal Fat Waste, *Applied Sciences*, 10 (10), 2020.
8. Balat M., Balat H., Progress in biodiesel processing, *Applied Energy*, 87 (6), 1815–1835, 2010.
9. Cinel A. M., Forecasting and Analysing Sustainability of Biodiesel Production from Waste Cooking Oils in Turkey Till 2030 and Generating Decision Support Tools and Sustainability Scenarios, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2019.
10. Silitonga A.S., Atabani A.E., Mahlia T.M.I., Masjuki H.H., Badruddin I.A., Mekhilef S., A review on prospect of *Jatropha curcas* for biodiesel in Indonesia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (8), 3733–3756, 2011.
11. Melikoglu M., Cinel A.M., Food waste-water-energy nexus: Scrutinising sustainability of biodiesel production from sunflower oil consumption wastes in Turkey till 2030, *Environmental Technology and Innovation*, 17, 100628, 2020.
12. Luo X., Ge X., Cui S., Li Y., Value-added processing of crude glycerol into chemicals and polymers, *Bioresource Technology*, 215, 144–154, 2016.
13. Alleman T.L., McCormick R.L., Christensen E.D., Fioroni G., Moriarty K., Yanowitz J., Biodiesel handling and use guide (5. baskı), United States: Nova Science Publishers, 1-98, 2016.
14. Atabani A.E., Silitonga A.S., Badruddin I.A., Mahlia T.M.I., Masjuki H.H., Mekhilef S., A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (4), 2070–2093, 2012.
15. Kirubakaran M., Arul Mozhi Selvan V., A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 390–401, 2018.
16. Ramadhas A. S., Jayaraj S., Muraleedharan C., Biodiesel production from high FFA rubber seed oil, *Fuel*, 84, 335–340, 2005.
17. Resmi Gazete. Motorin Türlerine Biodizel Harmanlanması Hakkında Tebliğ. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/06/20170616-8.htm>. Yayın tarihi Aralık 21, 2019. Erişim tarihi Ağustos 8, 2022.
18. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. Petrol Piyasası Yıllık Sektör Raporu Listesi. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu>. Yayın tarihi 2022. Erişim tarihi Ağustos 12, 2022.
19. Resmi Gazete. İnsan Tüketimi Amacıyla Kullanılmayan Hayvansal Yan Ürünler Yönetmeliği. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/12/20111224-3.htm>. Yayın tarihi Aralık 24, 2011. Erişim tarihi Ağustos 4, 2022.
20. European Fats Processors and Renderers Association. Rendered fat. <https://efpra.eu/rendered-products/rendered-fat/>. Yayın tarihi 211. Erişim tarihi Ağustos 22, 2022.
21. Adewale P., Dumont M., Ngadi M., Recent trends of biodiesel production from animal fat wastes and associated production techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 574–588, 2015.
22. Chavarria-Hernandez J., Ordóñez L., Barahona-Pérez L. F., Castro-Gomez M., Paredes-Cervantes S., Perspectives on the utilization of waste fat from beef cattle and fowl for biodiesel production in Mexico, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 92 (5), 899–905, 2017.
23. Janaun J., Ellis N., Perspectives on biodiesel as a sustainable fuel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (4), 1312–1320, 2010.
24. Kumbhar V., Pandey A., Sonawane C. R., El-Shafay A. S., Panchal H., Chamkha, A. J., Statistical analysis on prediction of biodiesel properties from its fatty acid composition, *Case Studies in Thermal Engineering*, 30, 101775, 2022.
25. BBC TopGear. EU approves 2035 ban on selling petrol and diesel cars. <https://www.topgear.com/car-news/business/eu-approves-2035-ban-selling-petrol-and-diesel-cars>. Yayın tarihi: Şubat 14, 2023. Erişim tarihi: Temmuz 19, 2023.
26. Türkiye İstatistik Kurumu. Hayvansal Üretim İstatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Hayvansal-Uretim-Istatistikleri-Haziran-2021-37208>. Yayın tarihi Ağustos 13, 2021. Erişim tarihi Temmuz 24, 2022.
27. Türkiye İstatistik Kurumu. Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuc-lari-2021-45500>. Yayın tarihi Şubat 4, 2022. Erişim tarihi Temmuz 24, 2022.
28. Türkiye İstatistik Kurumu. Nüfus Projeksiyonları. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Nufus-Projeksiyonlari-2018-2080-30567>. Yayın tarihi Şubat 21, 2018. Erişim tarihi Temmuz 24, 2022.
29. Türkiye İstatistik Kurumu. Kırmızı Et Üretim İstatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Red-Meat-Production-Statistics-2020-2021-45671>. Yayın tarihi Mayıs 6, 2022. Erişim tarihi Ağustos 31, 2022.
30. Et ve Süt Kurumu. Kırmızı Et . <https://www.esk.gov.tr/tr/11009/Et>. Erişim tarihi Eylül 7, 2022.
31. Jayathilakan K., Sultana K., Radhakrishna K., Bawa, A. S., Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: A review, *Journal of Food Science and Technology*, 49 (3), 278–293, 2012.
32. da Cunha M.E., Krause L.C., Moraes M.S.A., Faccini C.S., Jacques R.A., Almeida S.R., Rodrigues M.R.A., Caramão E. B., Beef tallow biodiesel produced in a pilot scale, *Fuel Processing Technology*, 90 (4), 570–575, 2009.
33. Harahap F., Silveira S., Khatiwada D., Cost competitiveness of palm oil biodiesel production in Indonesia, *Energy*, 170, 62–72, 2019.
34. Opet. Fiyat Arşivi. <https://www.opet.com.tr/akaryakit-fiyatlari-arsivi>. Yayın tarihi Şubat 16, 2022. Erişim tarihi Şubat 16, 2023.
35. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. LPG Piyasası Yıllık Sektör Raporu Listesi. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-108-1002/lpgyillik-sektor-raporlari>. Yayın tarihi 2022. Erişim tarihi Ağustos 16, 2022.
36. Coronado C.R., de Carvalho J.A., Silveira J.L., Biodiesel CO2 emissions: A comparison with the main fuels in the Brazilian market, *Fuel Processing Technology*, 90 (2), 204–211, 2009.
37. Türkiye İstatistik Kurumu. Sera Gazı Emisyon İstatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2020-45862>. Yayın tarihi Mart 30, 2022. Erişim tarihi Ekim 11, 2022.
38. Sürer E, Solmaz H, Yılmaz E, Calam A, İpci D., Investigation of the effect of carbon nanotube addition to diesel-biodiesel blend on engine performance and exhaust emissions, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (2), 1055–1064, 2023.