

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARITMA ÇAMURU VE BİYOKÜTLE KAYNAKLARININ
BİYORYAKIT ÜRETİM POTANSİYELLERİNİN ATIKTAN
ENERJİYE İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mustafa YURTEN

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

ŞUBAT 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARITMA ÇAMURU VE BİYOKÜTLE KAYNAKLARININ
BİYORYAKIT ÜRETİM POTANSİYELLERİNİN ATIKTAN
ENERJİYE İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mustafa YURTEN

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR

ŞUBAT 2025

Mustafa YURTEN tarafından hazırlanan “Arıtma Çamuru ve Biyokütle Kaynaklarının Biyoyakıt Üretim Potansiyellerinin Atıktan Enerjiye İncelenmesi” adlı tez çalışması 26.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof. Dr. Ömer Hulusi DEDE Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Fatih KARADAĞLI Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç Dr. Gülgün DEDE Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Nazire Pınar TANATTI Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ARITMA ÇAMURU VE BİYOKÜTLE KAYNAKLARININ BİYORYAKIT ÜRETİM POTANSİYELLERİNİN ATIKTAN ENERJİYE İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim. (26/02/2025).

(imza)

Mustafa YURTEN





Değerli eşim Meral ve çocuklarım Esma Canan, Elif Dilara ve Osman Kağan'a...



TEŞEKKÜR

Doktora eğitim sürecinde, zaman gözetmeksizin bilgi ve emeğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR'e, Tez İzleme Kurulu ve Jüri üyelerim Prof. Dr. Ömer Hulusi DEDE'ye, Doç. Dr. Gülgün DEDE'ye, Prof. Dr. Fatih KARADAĞLI'ya, Doç. Dr. Nazire Pınar TANATTI'ya, değerli eşim Öğretmen/Yazar Meral YURTEN'e, canım kızlarım Esma Canan ve Elif Dilara'ya, oğlum Osman Kağan'a ve eğitim hayatım boyunca üzerimde emeği olan herkese sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Bu doktora tezi Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü 2022-7-25-71 proje kodu ile desteklenmiştir.

Mustafa YURTEN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Hipotez	15
3. MATERYAL METOD	17
3.1. Çalışmada Kullanılan Arıtma Çamuru	17
3.2. Biyokütle Numunelerinin Hazırlanması	18
3.3. Biyoyakıt Hazırlama	20
3.4. Malzeme Karakterizasyonu ve Analiz Yöntemleri	26
3.4.1. Lif analizi	26
3.4.2. Yaklaşık (proximate) analiz parametreleri	26
3.4.3. Elementel (ultimate) analiz parametreleri	26
3.4.4. Kalorifik değer analizi	27
3.5. İndeks Değerlerinin Hesaplanması	27
3.6. Numunelerin Yakılması	28
3.7. İstatistiksel Analiz	34
3.8. İmage Analiz	34
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
4.1. Yaklaşık (proximate) analiz	35
4.2. Kalorifik Değerler	38
4.3. Elementel Analiz	40
4.4. Yakıt Kalite İndeksleri	41
4.5. Lignoselülozik Materyal	47
4.6. Gaz Emisyonları	47
4.7. İmaj Analiz Sonuçları	50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	69



KISALTMALAR

AAT	: Atıksu arıtma tesisi
AC	: Kül içeriği
AÇ	: Arıtma çamuru
AD	: Arundo Donax
ASTM	: American Society For Testing and metarials
ATY	: Atıktan türetilmiş yakıt
Bd	: Kütle yoğunluğu
BQI	: Biyokütle kalite indeksi
CFB	: Akışkan yataklı gazlaştırıcı
CV	: Kalorifik değer
DFC	: Aşağı akışlı yakıcı
Ed	: Enerji yoğunluğu
FC	: Sabit karbon
FVI	: Yakıt kalite indeksi
HHV	: Yüksek ısıtma değeri
KM	: Kuru madde
LHV	: Düşük ısıtma değeri
Li	: Tutuşabilirlik indeksi
LSD	: Çoklu karşılaştırma testleri
MC	: Nem içeriği
MSC	: Miscanthus
PQI	: Parametre kalite indeksi
RDF	: Atıktan türetilmiş yakıt
RGD	: Red, Green, Blue
SS	: Arıtma çamuru
TGA	: Termogravimetrik analiz
VM	: Uçucu madde
XRF	: X ışını floransı



SİMGELER

N	: Azot
S	: Kükürt
°C	: Santigrat
NO_x	: Azot Oksitler
SO₂	: Kükürtdioksit
C	: Karbon
H	: Hidrojen
Ca	: Kalsiyum
SiO₂	: Silisyumdioksit
Na	: Sodyum
K	: Potasyum
FeO	: Demiroksit
gr	: Gram
kg	: Kilogram
Gj	: Gigajoule
₺	: Türk Lirası
Mg	: Miligram
Kcal	: Kilo Kalori



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Karaman Atıksu Arıtma Tesisi Arıtma Çamuru Ağır Metal Muhteviyatı ve Sınır Değer Karşılaştırılması.....	18
Tablo 3.2. Yanma ön verileri.....	29
Tablo 4.1. Enerji mahsulü türlerinin (Faktör A) ve karışım oranlarının (Faktör B) arıtma çamurundaki yaklaşık analiz parametreleri üzerindeki etkisine ilişkin varyans analizi (ortalama kareler).....	35
Tablo 4.2. Arıtma çamurundaki enerji mahsullerinin (Faktör A) ve karışım oranının (Faktör B) yaklaşık analiz parametreleri üzerindeki etkisine ilişkin varyans analizi (ortalama kareler).	40
Tablo 4.3. Enerji mahsullerinin (Faktör A) ve karışım oranının (Faktör B), arıtma çamurundan üretilen peletin indeks değerleri üzerindeki etkisine ilişkin varyans analizi (ortalama).....	42
Tablo 4.4 Enerji bitkilerinin organik bileşenleri	47



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Atıksu Arıtma Tesisi (AAT) çamur kurutma.....	17
Şekil 3.2 Dikimi yapılan bitki rizomları ve hasat aşamasındaki Arundo donax bitki plantasyonu.	19
Şekil 3.3 Miscanthus (MSC) ve Arundo (AD) öğütülmüş saman örnekleri.....	19
Şekil 3.4. Arıtma çamuru ve AD ve MSC bitkilerinin analiz için hazırlanması	20
Şekil 3.5. AD ₀ –MSC ₀ pellet hali	21
Şekil 3.6. AD ₁ pellet hali	22
Şekil 3.7. AD ₂ pellet hali	22
Şekil 3.8. AD ₃ pellet hali	23
Şekil 3.9. AD ₄ pellet hali	23
Şekil 3.10. MSC ₁ pellet hali.....	24
Şekil 3.11. MSC ₂ pellet hali.....	24
Şekil 3.12. MSC ₃ pellet hali.....	25
Şekil 3.13. MSC ₄ pellet hali.....	25
Şekil 3.14. AD ₀ -MSC ₀ yanma	29
Şekil 3.15. AD ₁ yanma	30
Şekil 3.16. AD ₂ yanma	30
Şekil 3.17. AD ₃ yanma	31
Şekil 3.18. AD ₄ yanma	31
Şekil 3.19. MSC ₁ yanma.....	32
Şekil 3.20. MSC ₂ yanma.....	32
Şekil 3.21. MSC ₃ yanma.....	33
Şekil 3.22. MSC ₄ yanma.....	33
Şekil 4.1. Enerji bitkileri Arundo donax ve Miscanthus × giganteus karışımının arıtma çamuru nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon içeriği üzerindeki etkisi. Farklı harfler Duncan'ın Çoklu Aralık Testine göre %5 seviyesinde anlamlı farkı ifade etmektedir (SS: Arıtma Çamuru, BC: Enerji Bitkileri).	37
Şekil 4.2. Artan oranda Arundo donax (mavi çizgi) ve Miscanthus × giganteus (kırmızı çizgi) karışımı içeren arıtma çamurunun LHV ve HHV'si.	39
Şekil 4.3. Arıtma çamurunun nihai analizi, biyoenerji bitkileri Arundo donax ve Miscanthus × giganteus ve bunların arıtma çamurunda artan orandaki karışımları	41
Şekil 4.4 Enerji bitkileri Arundo donax ve Miscanthus × giganteus karışımının arıtma çamuru peletlerinde pelet yoğunluğu ve yığın yoğunluğuna etkisi sunulmaktadır (SS: Arıtma Çamuru, BC: Enerji Bitkileri).	43
Şekil 4.5. Arıtma çamuruna uygulanan biyokütle yakıt kalite indeksi, biyoenerji bitkileri Arundo donax ve Miscanthus × giganteus ve bunların arıtma çamurunda artan orandaki karışımları sunulmaktadır (SS: Arıtma Çamuru, BC: Enerji Bitkileri).	45

Şekil 4.6. Arundo donax ve Miscanthus × giganteus'tan kaynaklanan gaz yanma emisyonları ve bunların arıtma çamurunda artan orandaki karışımları (SS: Arıtma Çamuru, BC: Enerji Bitkileri).....	49
Şekil 4.7. AD ₁ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri.....	51
Şekil 4.8. AD ₂ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri.....	52
Şekil 4.9. AD ₃ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri.....	52
Şekil 4.10. AD ₄ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri.....	53
Şekil 4.11. MSC ₁ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri.....	53
Şekil 4.12. MSC ₂ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri.....	54
Şekil 4.13. MSC ₃ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri.....	54
Şekil 4.14. MSC ₄ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri.....	55

ARITMA ÇAMURU VE BİYOKÜTLE KAYNAKLARININ BİYOYAKIT ÜRETİM POTANSİYELLERİNİN ATIKTAN ENERJİYE İNCELENMESİ

ÖZET

Atık su arıtma tesisi atık suları, arıtma çamuru (AÇ) ve arıtılmış su, organik madde ve enerji bitkileri için besin maddeleri açısından zengin olmaları nedeniyle yenilenebilir enerji üretimi ve karbon nötr yeşil enerji politikasının uygulanması açısından önemli kaynaklardır. Doktora çalışmamızda Sakarya İli sınırlarında olan evsel nitelikli atıksu çamuru ile onunla karışımında kullanılacak yerel biyokütle enerji kaynakları kullanılmıştır. Çamurun kül içeriği genellikle yüksek, rutubet oranı yüksek olup uçucu içerik düşük ve dolayısı ile kalorifik değeri de düşüktür. Biyokütle kaynakları arıtma çamurunun bu kötü özelliklerini iyileştirmek için ligno-selülozik kaynaklardan seçilmiştir. Çalışmada, arıtma çamurunun yanma özelliklerini iyileştirmek için arıtma çamurunun *Arundo donax* (AD) ve *Miscanthus × giganteus* (MSC) enerji bitkileri ile bunların karışımlarının biyokütle enerji potansiyeli, yakıt kalitesi ve yanma emisyon özellikleri araştırılmıştır. Çalışmamızda kullanılan bitkilerin biyokütlesi, besin kaynağı olarak atıksu arıtma tesisi atık suları kullanılarak üretilir. Çalışmamıza başlarken karışım oranları; %100 arıtma çamuru, %25 bitki-%75 arıtma çamuru, %50 bitki-%50 arıtma çamuru, %75 bitki-%25 arıtma çamuru ve % 100 bitki olarak belirlenmiştir. Her bir bitki için aynı oranlarla alınarak çalışma yapılmıştır. Yaklaşık ve nihai analiz sonuçları, bitki biyokütlesinin eklenmesinin karışımların yakıt değerini değiştirdiğini, esas olarak kül içeriğini azalttığını ve katı biyoyakıttaki uçucu madde ve karbon içeriğini arttırdığını göstermiştir. Regresyon analizi, arıtma çamuru karışımlarındaki %25, %50 ve %75 biyokütlenin ısıtma değerlerinin HHV (düşük kalorifik değer) ve LHV (düşük kalorifik değer) değerlerini doğrusal olarak arttırdığını göstermiştir. Uçucu maddedeki artış, arıtma çamurunun tutuşabilirlik indeksini önemli ölçüde iyileştirerek, her iki ürün için de %75 biyokütle karışımlarında optimum değer olan 35'e ulaşmıştır. Karışımların NO_x ve SO₂ emisyonlarının değerleri arıtma çamuruna göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Elde edilen genel sonuçlar, enerji bitkilerinden elde edilen biyokütlenin yakılması ile arıtma çamuru arasında sinerjistik bir etki olduğunu göstermektedir. Yaklaşık analiz, elemental analiz, ısıl değer, yakıt endeksleri ve gaz emisyonlarının kapsamlı bir karşılaştırması sonucunda, %50 biyokütle ve %50 arıtma çamurundan oluşan karışık yakıtların yanmayı destekleyebileceğini ve emisyonları azaltabileceğini göstermektedir. Ayrıca çalışmalar göstermiştir ki *Arundo* enerji bitkisi, *Miscanthus* enerji bitkisinden daha iyi biyoyakıt özelliklerine sahiptir. Çalışmanın geneline bakıldığında, atıksu arıtma çamuru ve arıtılmış atık su gibi besin açısından zengin atık su arıtma artıkları kullanılarak biyokütle mahsulü üretimi, atık yönetimi ve biyoenerji hammadde üretimi ve arıtma çamurunun birlikte yakılması için yeniden bitkilendirme açısından daha sürdürülebilir olabileceği düşünülmüştür.



INVESTIGATION OF BIOFUEL PRODUCTION POTENTIALS OF TREATMENT SLUD AND BIOMASS SOURCES FROM WASTE TO ENERGY

SUMMARY

Population growth and industrialization leads to numerous problems, among which environmental issues hold a significant place. An inevitable consequence of industrialization and population growth is solid and liquid waste generation that ranks among the foremost environmental concerns. The treatment of wastewater generated both by human activities and industrial operations is of paramount importance. An outcome of wastewater treatment operations is the “sewage sludge”, which carry and concentrate pollutants. Hence, environmentally safe disposal of such solid materials is crucial.

Wastewater treatment plants are crucial for renewable energy production and the implementation of carbon-neutral green energy policies, as they provide valuable resources such as wastewater, sewage sludge, treated water, organic matter, and nutrients for energy crops. The disposal of sludge can be managed through various methods, including stabilization, minimization, recycling, incineration, landfilling, composting, and agricultural use. However, the application of these methods can result in challenges such as contamination, greenhouse gas emissions, and soil degradation. Therefore, it is essential to manage sewage sludge disposal using sustainable techniques that minimize environmental impact and prevent additional ecological issues.

Within this context, this doctoral study proposed to utilize domestic wastewater sludge within the Sakarya Province, in combination with local biomass energy sources for efficient sludge combustion. This approach aims to address the environmental challenges associated with sewage sludge disposal, while contributing to sustainable waste management and renewable energy production strategies.

Sewage sludge is generally characterized with a high moisture content and low volatile matter, and thereby, its calorific value is low, whereas its ash content remains high. To improve combustion of sludge, co-combustion with renewable biomass fuel sources have been proposed in order to reduce additional fuel consumption, to enhance energy balance, and to improve heat recovery. There are four main advantages of using biomass as fuel. First, the combustion rate can be improved due to the volatile, carbon, and hydrogen contributions of biomass crops. Second, the energy potential of sewage sludge can be increased with additional biomass fuel due to its low ash and high carbon and hydrogen content. Third, the ignition index, ignition performance, and flame stability can be enhanced compared to single sludge combustion. Fourth, the deficiencies related to ash from both sources can be synergistically improved by balancing the mineral composition of the raw material and biomass combustion ash. In line with these advantages, the proposed method aims to improve combustion and generate energy from sludge. Biomass sources have been selected from lignocellulosic resources to improve the poor combustion characteristics of sewage sludge. In the study, the biomass energy potential, fuel quality, and combustion emission

characteristics of sewage sludge with *Arundo donax* (AD) and *Miscanthus × giganteus* (MSC) energy plants and their mixtures were investigated to improve the combustion properties of sewage sludge.

Air-dried biomass samples were ground using an industrial mill to fractions with a particle size of less than 4 mm that were pelletized. By combining sun-dried sludge with Arundo straw at ratios of 0.0%, 25%, 50%, and 75%, different biomass pellets were prepared for experimental analysis and compared with 100% Arundo. In parallel, sewage sludge and *Miscanthus* straw mixtures were prepared at the same ratios. Subsequently, the biofuel was produced in pellet form in an industrial-scale pellet mill used in a biomass combustion plant. For each experimental test, approximately 100 kg of sample was pressed according to a predefined procedure, and the physicochemical composition and properties of the samples were determined using standard test methods such as ...(*iki tane metot ismi veya kodu verebiliriz*)...

The fiber composition, including acid detergent fiber (ADF), acid detergent lignin (ADL), and neutral detergent fiber (NDF), which represent cellulose, hemicellulose, and lignin content, was determined using an analyzer. The moisture content was determined as the difference between sample weight before and after drying using a laboratory oven and a scale. The ash content was determined according to the ASTM D1102 protocol by calculating the mass of the residue after the sample was combusted in open crucibles in a muffle furnace at 550°C. The mass of the ash remaining in the crucible was then compared to the original mass of the sample. The volatile matter content was determined according to ASTM E870. A test sample was burned in covered crucibles at 950°C for 7 minutes. To determine the calorific values, the biomass samples were ground to 1 mm, dried in an oven at 60°C, and then dried at 105°C for 24 hours. After determining the wet weight, the higher heating value (HHV) was directly determined on a 1 g pellet in a bomb-type calorimeter (IKA, C 200) at the reference temperature (25°C). After complete combustion within 6 minutes, the calorimeter displayed calorific values of the sample in kcal kg⁻¹.

A multifactorial analysis of variance (ANOVA) was used to evaluate the effects of the two main biofuels of *Arundo* and *Miscanthus* biomass on the combustion properties of sewage sludge and their interactions on the dependent variables. Additionally, regression analysis was used as an exploratory tool to assess the proportion of variability explained in the dependent variables. Biomass energy indicators were subjected to correlation analysis. The specified analyses were performed at P=0.05 using the StatsDirect statistical software package. To visualize the combustion properties of the tested biomass samples, a laboratory-scale combustion process was employed. Approximately 250 g of dry pellet samples were placed on a perforated flat grate and inserted into the combustion chamber.

This comprehensive approach allowed for a detailed evaluation of the combustion characteristics and energy potential of the biomass samples. The findings provided valuable insights into whether or not biomass samples were suitable as renewable energy sources. The combination of analytical methods and statistical tools ensured a robust and reliable assessment of the biomass properties and their interactions with sewage sludge.

The ignition of the biomass samples was achieved by applying hot air (approximately 350°C) from beneath the grate. Throughout the entire combustion process, the flame combustion phase was recorded using a high-resolution camera placed in front of the combustion system. Image files corresponding to different variants of the combustion process were saved as images with dimensions of 450 × 800 pixels. These images

were analyzed using Image-J software to determine the combustion quality of the pellets. The Image-J program allows for the determination of dominant color intensity through RGB profile analysis of a specific area in the image. In this study, areas in the images that did not represent combustion were darkened to obtain high quality images. Equal areas were created on the image, with a specific number of pixels set to represent 1 cm, and areas of 1 cm in height were established. The average red color intensity was calculated for each of these areas. The proximate and ultimate analysis results demonstrated that the addition of plant biomass increased the fuel value of the mixtures. Primarily, the biomass addition reduced the ash content and increased the volatile matter and carbon content in the solid biofuel.

This detailed analysis provided valuable insights into the combustion characteristics of the biomass samples. Simply, the impact of plant biomass on improving the fuel properties of the mixtures were clarified. The use of advanced imaging and analytical techniques ensured a comprehensive evaluation of the combustion process, and thus, contributing to the optimization of biomass utilization for energy production.

Regression analysis revealed that the addition of 25%, 50%, and 75% biomass to sewage sludge mixtures linearly increased the heating values. The increase in volatile matter significantly improved the flammability index of the sewage sludge, which yielded an optimum value of 35 for both products in the 75% biomass mixtures. The NO_x and SO₂ emission values of the mixtures were found to be lower compared to those of pure sewage sludge. The overall results indicate a synergistic effect between the combustion of biomass derived from energy crops and sewage sludge. A comprehensive comparison of proximate analysis, elemental analysis, heating values, fuel indices, and gas emissions demonstrated that mixed fuels composed of 50% biomass and 50% sewage sludge could support combustion and reduce emissions. Additionally, studies have shown that Arundo energy plant possesses better biofuel properties than Miscanthus energy plant.

In summary, production of biomass crops using nutrient-rich wastewater treatment residues, such as sewage sludge and treated wastewater, can serve for more sustainable for waste management. Such crops can be used as bioenergy feedstock and co-combustion with sewage sludge. This study concluded that mixing sewage sludge with Arundo and Miscanthus energy plants in specific ratios progressively improved the combustion parameters along with increasing biomass ratios. The most significant effect of Arundo plant was observed on ash and volatile matter content. The elemental analyses showed that significant increases in carbon (C) and hydrogen (H) were observed using the LSD test, while nitrogen (N) and sulfur (S) ratios showed a notable decrease. Although the differences were smaller, the contribution of C and H to the energy content in Arundo was higher than that of Miscanthus, likely due to Arundo's higher lignocellulosic content. The observed differences in cellulose, hemicellulose, and lignin content among the energy plants were minor and insignificant. Therefore, the higher heating value (HHV) of the plant samples significantly and similarly supported the HHV of sludge mixtures as the biomass ratio increased.

The addition of energy plants to sewage sludge significantly improved fuel quality index values, including the flammability index, fuel value index, and biomass quality index. Likewise, the addition primarily reduced ash and moisture content of the mixture, while increasing its HHV. NO_x and SO₂ emissions in exhaust gases increased proportionally to nitrogen (N) and sulfur (S) concentrations in sewage sludge, but co-

combustion with biomass reduced these emissions to within permissible standard ranges. Overall, the findings indicated that using nutrient-rich wastewater treatment residues, such as sewage sludge and treated wastewater, for biomass crop production could offer a more sustainable approach to waste management, bioenergy feedstock production, and co-combustion with sewage sludge.



1. GİRİŞ

Atıksu arıtma çamurları, evsel ve endüstriyel atıksuların arıtılması ile ortaya çıkan ve arıtma tesislerinde biriken en yaygın katı atık maddelerden biridir (Özdemir ve Nuhoğlu, 2015). Nüfus artışı ve sanayileşmenin artmasıyla birlikte artan atıksu arıtımı ve arıtma çamurlarının yönetim ve bertarafı çevresel sorunların ilk sıralarında yer almaktadır. Su ile birlikte taşınan kirletici unsurların yoğun biçimde biriktirdiği arıtma çamurlarının işlenmesi ve çevreye en az zarar verecek biçimde uzaklaştırılması atıksu arıtımı kadar önem taşımaktadır (Öztürk ve ark., 2015). Evsel ve endüstriyel atıksuların mevzuatlara uygun arıtılması için son yıllarda ciddi ekonomik yatırımlar yapılmaktadır. Ancak, atıksu arıtma çamurlarının yönetimi ve özellikle nihai bertarafı mevzuatlarla sıkılaştırılmasına rağmen, tam olarak standart hale gelmiş yöntem ve teknikler oturtulamamış, araştırmalar devam etmektedir (Filibeli ve ark., 2022).

TÜİK verilerine göre, 2020 yılında Ülkemiz nüfusu 83.614.362 olarak belirlenmiştir. Arıtma şebekesi ile hizmet verilen nüfusun toplam belediye nüfusuna oranı % 91'dir. Söz konusu nüfusun arıtmaya bağlı olan kısmında 4.96 milyar m³ atıksuyun oluştuğu ve bu atıksuyun 4.36 milyar m³ 'lük kısmının ise atıksu arıtma tesislerinde arıtılarak alıcı ortama deşarj edilmektedir. Atıksu arıtma tesislerinde arıtılan bu atıksuyun sonucunda ise 319.000 ton KM (kuru madde bazında) arıtma çamuru oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca 2021 yılında Türkiye'de toplam çevre harcamaları 66.3 Milyar ₺ olarak tespit edilmiş ve paranın 38,78 Milyar ₺'si sadece atık yönetimine harcanmıştır (TÜİK, 2021).

Arıtma çamurlarının bertarafı için uygulanan yöntemlere baktığımızda stabilizasyon, minimizasyon, geri dönüşüm, yakma, çamurun araziye depolanması, kompostlaştırma ve tarımsal amaçlı kullanım yer almaktadır (Akdağ ve ark. 2018). Ancak, arıtma çamurları patojen mikroorganizma, ağır metal, biyolojik olarak parçalanmayan sentetik organik maddeler gibi birçok zararlı madde içerir (Singh ve ark, 2020; Karaca ve ark, 2018). Dolayısı ile çevre ve insan sağlığı için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Ekolojik çevreyi korumak ve sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek için çamurun çevreye zarar vermeden temiz ve verimli bir şekilde yönetilmesi önemli bir görevdir. Arıtma çamurlarını zararsız bir şekilde yönetmek için kullanılan anaerobik çürütme, kompostlama, piroliz ve yapı malzemesi yapımı gibi pek çok ara yöntem vardır; fakat,

ana nihai bertaraf yöntemleri düzenli depolama, arazi uygulaması ve yakmadır. Düzenli depolama oldukça kolay, hızlı ve verimli olmasına rağmen, ikincil kirliliğe neden olduğu için kademeli olarak bırakılmıştır (Hossain ve ark, 2020). Araziye uygulama ekonomik bir yöntem olarak görülmekte fakat yine çevre kirliliği ve gıda kontaminasyonuna neden olduğu için riskli görülmektedir (İnce ve İnal, 2024). Anaerobik çürütme, mikrobiyal ayrışma yoluyla organik maddeyi biyogaza dönüştürür, ancak anaerobik sindirim ve ayrışmasının dönüşüm oranı %30-%60'tır ve hacim azalımı düşüktür (Ersoy ve Özbay, 2023). Direk yakma, büyük hacim azaltma, enerji geri kazanımı ve patojenlerin yüksek sıcaklıkta öldürülmesi gibi avantajları nedeniyle arıtma çamuru arıtımı için önemli stratejilerden biri haline gelmiştir (Ateş ve ark, 2024). Bununla birlikte, arıtma çamurları yüksek kül içeriği ve düşük kalorifik değer ile karakterize edilir. İlave olarak sıkışık blok fiziksel yapı nedeniyle oksijen penetrasyonu, yanması ve alev alması zordur. Bu nedenle, yanma performansını iyileştirmek için başka bir yakıt türü ile karıştırmak gerekir (Yurten ve Ozdemir, 2024). Bu amaçla farklı oranlarda ve farklı yakıtlarla birlikte yakma için yüksek kalorifik değerli fosil yakıt kaynakları deneme konusu olmuş ve başarılı sonuçlar rapor edilmiştir. Ancak son yıllarda fosil yakıtlara alternatif olarak, birlikte yakma için yeni bir yakıt olarak biyokütle dikkat çekmektedir. Biyokütle, net CO₂ emisyonlarını azaltmaya yardımcı olan temiz, yenilenebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak kabul edilir (Aydın-Kandemir ve Sarptaş, 2022). Genel olarak biyokütlenin yoğunluğu düşüktür ve akışkan yatak yakma sistemlerinde yanma bölgesinde uçuşmaya ve dışarıya kaçmaya neden olur (Pehlivan ve ark, 2024). Ancak arıtma çamuru ile karşılaştırıldığında, yüksek kalorifik değer, parozite oluşturma ve düşük kül içeriği avantajlarına sahiptir. Biyokütle esas olarak lignin, selüloz ve hemiselülozdan oluşur ve kül olacak inorganik bileşen oranı düşüktür. Bu nedenle, biyokütle ile arıtma çamurunun birlikte yakılması, arıtma çamurlarının yanma yetersizliklerini ortadan kaldırmada ve yanma verimliliğini artırmada etkili olabilmektedir.

Biyokütle, “İthal edilmemek kaydıyla; kentsel atıkların yanı sıra bitkisel yağ atıkları, tarımsal hasat atıkları dâhil olmak üzere tarım ve orman ürünlerinden ve bu ürünler ile atık lastiklerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynakları ve sanayi atık çamurları ile arıtma çamurları olarak tanımlanmaktadır” (Enerji Bakanlığı). Anayasamızın 56. Maddesi içeriğinde yer alan hükümler çerçevesinde Ülkemizde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından her türlü atığın ayrı ayrı yönetilebilmesi amacıyla mevzuat yayımlanmıştır. Ancak sürdürülebilir üretim ve

sürdürülebilir çevrenin temelini oluşturabilmek için mevcut kaynaklardan ziyade atıkların geri dönüşümü ile kaynak israfının engellenmesi temel amaç olmalıdır. Tüm bu veriler ışığında, atıksu arıtma çamurlarının bertarafında daha kolay ve ekonomik olarak daha uygun olan biyokütle ile beraber atıkların bertaraf edilmesi konusunda yapılan bu çalışmanın çevresel bir sorunu ortadan kaldırması planlanmaktadır. Gelecek nesillere daha güzel ve daha yaşanabilir bir çevre bırakmak adına yararlı olacağı kanaati hasıl olan bu çalışmanın uygulama kolaylığı açısından artı değeri ön plana çıkmaktadır.

Birlikte yakma uygulamalarında lokal olarak bölgede bulunan veya yüksek verim verme potansiyeli olan lignoselülozik enerji bitkileri kargı (*Arundo donax*) ile *miscanthus* (*Miscanthus giganteus*) biyokütle bitkileri ön plana çıkmaktadır (Ortega ve ark, 2024). Her iki bitki türü aynı zamanda arıtma çamuru veya arıtılmış atıksu uygulamasına pozitif tepki vermekte ve yüksek kuru madde verimleri elde edilebilmektedir (Vasmara ve ark, 2023). Yerel ve yüksek verimli bu bitkiler enerji bitkisi olarak pek çok çalışmaya konu olmuştur. Akdeniz iklim kuşağında hektara 30 ton verim vermektedirler (Cano-Ruiz ve ark, 2021). Yüksek lignoselüloz içeriği, kalorifik değeri ve düşük kül içeriği nedeniyle arıtma çamurlarının biyoyakıt karakterinin iyileştirilmesinde değerlendirilebilecek malzemelerdir. Her iki bitkinin de lignin ve selüloz içeriği odun yongalarına benzerdir ve çamur ile homojen karışımının sağlandığında yanma için gerekli olan oksijen teması sağlayacak gözeneklilik oluşturma potansiyeli yüksektir. *Arundo* ve *miscanthus* biyokütlesinin alev alma sıcaklığı düşüktür, gerekli aktivasyon enerjisi düşüktür ve karışım halinde zor tutuşan malzemelerin yanma noktasını, yanma performansını iyileştirmektedir (Ozdemir ve ark, 2022). Çevre dostu bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak lignoselülozik enerji bitkileri arıtma çamurları ile birlikte yakma uygulamalarında geniş uygulama beklentilerine sahiptir.

Ülkemizde son yıllarda yürütülen “sıfır atık” uygulaması ilkesi doğrultusunda atık oluşumu engellenemiyor ise atıkların işe yarar hale getirilmesi önem arz etmektedir. Hammadde kaynaklarının sonsuz olmadığı gerçeği ile yola çıkılarak atıktan enerji uygulamalarında, bir atığı başka bir atıkla bertaraf etme seçeneği ile yenilenebilir enerji kaynağı elde edilmesine hizmet etmek amaçlanmıştır. Arıtma çamuru bertaraf alternatifleri bir bütün olarak değerlendirildiğinde, hızlı çözüm oluşturmaları nedeniyle yakma ön plana çıkmaktadır. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki çevresel sorun

olarak karşımıza çıkan arıtma çamurları farklı maddeler ile değişen oranlarda karıştırılarak enerji üretiminde yakıt olarak kullanılabilirlik potansiyeline sahiptir.

Bu alışmada Sakarya İli sınırlarında oluşan evsel nitelikli atıksu çamuru ile onunla karışımda kullanılacak yerel biyokütle enerji kaynakları kullanılacaktır. Genel olarak, arıtma çamuru yüksek kül içeriği ve nispeten düşük uçucu madde ve sabit karbon seviyeleri nedeniyle düşük yakıt kalitesi sergiler. Kurutma ısıl değerini artırabilir; ancak yüksek kül içeriği ve sınırlı uçucu maddeler alev almasını ve tutuşabilirliğini engeller. Yüksek uçucu içerik, hızlı tutuşma ve alevli yanmayı kolaylaştırır (Li ve ark, 2016). Bu bağlamda, biyokütlenin sağladığı yüksek uçucu madde, düşük sıcaklıklarda hızlı tutuşma için avantajlıdır ve yüksek sıcaklıklarda külle ilişkili yaygın sorunları hafifletmeye yardımcı olabilir. Atıksu kullanılarak biyokütle üretimi yapıp bu biyokütlenin yakma sistemlerinde karışım malzemesi olarak kullanılması, birlikte yanmanın uygulanabilirliğini artırarak, istikrarlı bir hammadde temininin sağlanmasını mümkün kılmaya imkan verebilir.

Doğrudan yakma, arıtma çamurundan ısı ve elektrik elde etmek için hala primer yol ve yöntemdir. Kararlı, evre dostu ve sürdürülebilir bir yanma süreci oluşturmak için, iyi yanma kalitesine sahip hammadde bulunabilirliği hayati önem taşır. Biyokütle yanma kalitesi büyük ölçüde hammaddenin yapısal ve kimyasal bileşimine bağlıdır. Düşük nem ve külün yüksek lignoselüloz içeriğiyle birlikte yanma kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiği konusunda fikir birliği olmasına rağmen, biyokütlenin arıtma çamurunun yanma kalitesini iyileştirme etkisini ortaya koymak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu alışma çamur yanması için ek yakıt tüketimini azaltmak, enerji dengesini ve yanma performansını iyileştirmek için yenilenebilir biyokütle yakıt kaynaklarını önermektedir. Biyokütle yakıtı kullanmanın dört ana avantajı ön plana çıkarılarak aşağıdaki hipotezler test edilmiştir. Biyokütle bitkileri uçucu madde, karbon ve hidrojen katkıları nedeniyle arıtma çamurunun yanma hızını iyileştirilebilir. Arıtma amurunun enerji potansiyeli, düşük kül ve yüksek karbon ve hidrojen içeriğinden dolayı ilave biyokütle yakıtı ile artırılabilir. Tutuşma indeksi, tutuşma performansı ve alev stabilitesi, mono çamur yakma ile karışlaştırıldığında geliştirilebilir. Her iki bileşenden gelen külle ilgili eksiklikler, hammaddenin ve biyokütle yanma külünün mineral bileşiminin dengelenmesiyle sinerjik olarak iyileştirilebilir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüz modern toplumlarında her türlü toplumsal aktivite sonucu ortaya çıkan kentsel atıkların giderek artan miktarları, çevresel ve insan sağlığı üzerindeki etkileri nedeniyle kamuoyunda endişe konusu haline gelmektedir. Belediye atıkları içinde atık su arıtma tesisleri tarafından üretilen arıtma çamuru büyük bir hacim oluşturmaktadır. Avrupa Birliği'nde, atık su arıtma tesisleri kişi başına yılda ~30 kg kuru çamur üretmektedir (Van Caneghem ve ark, 2012). Türkiye'de yılda yaklaşık 319.000 ton kuru madde bazında arıtma çamuru ortaya çıkmaktadır (TÜİK, 2021). Patojenler, toksik ağır metaller ve sentetik organik kimyasallar nedeniyle arıtma çamurlarının araziye uygulanmasının giderek azalması, alternatif bertaraf yöntemlerine yönelik araştırmaları teşvik etmektedir. Avrupa birliği atık Çerçeve Direktifi, bu tür kentsel atıkların sürdürülebilir yönetimi için nihai bertarafa enerji amaçlı kullanımını atık hiyerarşisinde düzenli depolamanın önünde olmasını öngörmüştür (Van Caneghem ark, 2012). Yine ülkemizde yürürlükte olan sıfır atık yönetim planına göre bu atıkların bertaraf hacmini azaltacak ve enerji kazanımı sağlayacak termal yöntemler cazip bir çözüm olarak görülmektedir.

Arıtma çamurlarının mono yakılmasının teknik zorluklarından dolayı diğer yakıtlarla belli oranlarda birlikte yakılması en uygun proses olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, biyogenik yapısı nedeniyle atmosfere verilen CO₂ emisyonlarının net azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır. Yanma teknolojileri arasında, akışkan yatak, yakıt esnekliği, iyi karıştırma ve nispeten düşük sıcaklık, yüksek verimlilik, düşük kirletici emisyonları ve patojenlerin yok edilmesi gibi doğal avantajları nedeniyle en umut verici olanıdır (Van Caneghem ve ark, 2012).

Temel olarak yanma, kontrollü bir ortamda bir yakıt ve bir oksidan arasındaki oksidasyon süreci olarak kabul edilir ve bu süreç ısı salınımıyla sonuçlanır. Yakıtlar, bir oksidanla reaksiyona girdiklerinde ısı üreten malzemeler olarak tanımlanır. Geleneksel olarak, yenilenemeyen karbon bazlı fosil malzemeler birincil yakıtlar olarak kabul edilir ve biyokütle diğer yenilenebilir malzemeler alternatif yakıtlar olarak sınıflandırılır. Organik içeriği nedeniyle arıtma çamuru alternatif bir yakıt olarak sınıflandırılabilir ve yanma süreçlerinde kullanılabilir. Ancak, yapısal, fiziksel

ve kimyasal özellikleri nedeniyle tam oksidasyonu zor bir yakıttır. Yakıt karışımlarında % 5-10 üzerinde olması yanma proseslerinde problemlere neden olmaktadır. Bu nedenle, karışımlarda uygun biyokütle kaynaklarının olması yanma fizibilitesini iyileştirmek için önem arz etmektedir.

Birkaç çamur numunesinin termogravimetrik (TG) analizi (TGA) aracılığıyla, Li ve ark, (2015), çamurun yüksek kül içeriği, yüksek yanma sıcaklığı ve zayıf yanma özellikleri sorunları olduğunu bildirmiştir. Bununla birlikte, çamurun yüksek su içeriği ve düşük kalorifik değeri göz önüne alındığında, çamurun yanma özellikleri tek başına oldukça zayıf kalmaktadır. Ayrıca arıtma çamurlarının tek başına değil bu sebepten dolayı kömür ve yüksek kalorifik değere sahip diğer yakıtların karıştırılmasını gerektirir.

Oliveira ve ark, (2017), karışık yakıt hazırlamak için ince odun karbonu ve çamuru karıştırarak yanabilir ürünler üretmiş ve bunu mekanik, kalorifik ve morfolojik özellikleri yönünden analiz etmiştir. Oluşan yakıtın enerji üretiminde kullanılabileceğini ve kömür üzerinde belirli bir ikame etkisi olduğunu ifade etmişlerdir.

Shimizu ve ark. (2007), kuru çamur ve kömürün karışık yanması sırasında akışkan yataklı yakma fırınında NO_x'in emisyon özelliklerini incelemiştir. Çalışmalar, NO_x emisyonunun çamurun yakılmasından etkilendiğini, ancak çamur tek başına yakıldığında yatak malzemesi birikiminden etkilenmediğini bulmuştur.

Folgueras (2004), çamurdaki Ca, K ve Na gibi toprak alkali metallerin SO₂ emisyonunu etkileyen önemli faktörler olduğunu raporlamışlardır. Çamurda bulunan bu toprak alkali metaller, bileşikler oluşturmak için SO₂ ile reaksiyona girebilir. Buna karşılık, çamurda bulunan SiO₂, FeO ve klorür, kükürt giderme etkisini zayıflatmak için SO₂ ile rekabetçi bir reaksiyon oluşturmuştur.

Riaza ve ark. (2019), çalışmasında kömür ve biyokütle yakıtı uçucu verimini ve yakıtın azot dağılımını incelemiştir. Biyokütle numuneleri tarafından salınan yakıt azotunun çoğunun uçucu (%80-%95) olduğunu tespit etmiş ancak kömür için uçucu azotun farklı kömür numunelerine göre önemli ölçüde değiştiğini bulmuşlardır.

Wei ve ark. (2012) kömür ve biyokütlenin birlikte yakılmasında CO, NO_x ve SO_x konsantrasyon dağılımını hesaplamak için sayısal bir simülasyon programı benimsemiştir. Tahmin edilen sonuçlarını akışkanlaştırılmış yanmalı reaktörün deneysel sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak NO_x konsantrasyonunun

reaktör sıcaklığı ile önemli ölçüde arttığını buldular. Hesaplanan sıcaklık aralığında, nihai SO₂ emisyon seviyesi sıcaklıktan önemsiz derecede etkilendiği tespit edilmiştir.

Magdziarz ve Wilk (2013) TG'nin yanmasını, türev termogravimetriyi (DTG) ve çamur, kömür ve iki tür biyokütlenin yanı sıra biyokütle ve kömürle karıştırılmış çamurun birlikte ateşleme koşulları için diferansiyel termal analizini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, ısıtma hızının TG eğrisi üzerindeki etkisinin değiştiğini ve kömürün biyokütle ve çamur ile birlikte yakılmasının ekonomik faydalar sağlayabileceğini göstermiştir.

Wang ve ark. (2007), üç tip endüstriyel çamurun yanma özelliklerini incelemiş ve bunların karışımlarını termogravimetrik analiz (TGA) kullanarak yapmışlardır. Sonuçlar, TGA'daki bir endüstriyel çamur karışımının davranışının, endüstriyel çamur karışımlarının tek tek bileşenlerinin basit bir kombinasyonu ile ifade edilebileceğini göstermektedir.

Jayaraman ve Gökalp (2015), arıtma çamuru ve biyokütlenin piroliz, yanma ve gazlaştırma davranışlarını TGA/MS yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Sonuçlar, gazlaştırma sırasında miscanthus'un aktivasyon enerjisinin arıtma çamuruna kıyasla neredeyse iki katı olduğunu göstermektedir. Biyokütle kömüründe kül bulunması gazlaştırma işlemi sırasında daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Deng ve ark. (2016), farklı sıcaklıklarda yağlı (farklı sektörelere gelen yağ içerikli çamur) çamur ve biyokütlenin birlikte yanma süreçleri arasında farklı etkileşimler gözlemlemiş ve elde ettikleri sonuçlara bakıldığında; yağlı çamura biyokütle eklenmesinin, yağlı çamurun yanma sürecini destekleyebileceğini göstermiştir.

Xie ve Ma (2013) yanma koşulları altında kağıt çamuru, pirinç samanı ve bunların karışımlarının termal özelliklerini ve kinetiğini değerlendirmiştir. Karışımlardaki pirinç samanı yüzdesi %80 olduğunda, ortalama aktivasyon enerjisinin değerinin en küçük olduğunu bulmuşlardır. Bu çalışmada, çamur ve kömür karışımı yakıtın yanma özellikleri üzerine birçok çalışmanın mevcut olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, biyokütle ve çamur karışımı yakıtının yanma özellikleri üzerine yapılan çalışmalar oldukça azdır. Kömür ile karşılaştırıldığında, biyokütle daha geniş bir kaynak yelpazesine sahip olmakla beraber daha düşük N ve S içeriğine ve yanma sürecinde sıfır CO₂ emisyonuna sahiptir. Kömür yerine biyokütle kullanılması, yalnızca çamurun yanma özelliklerini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda kirletici deşarj sorununu da çözebilir.

Katı atıklardan elde edilen yakıtlar ile konvansiyonel fosil yakıtların arasındaki önemli bir karşılaştırmada azot içeriği açısından yapılmaktadır. Bunun nedeni yakıtlardaki azot içeriğinin yanma sonrası oluşan emisyonların karakterizasyonuna, özellikle NO_x içeriğine, önemli ölçüde etki etmesidir. NO_x lerin doğal çevre ve insan sağlığı açısından olumsuz etkileri göz önünde bulundurulduğunda atıkların azot içeriğinin önemi daha da artmaktadır. Diğer atıktan türetilmiş yakıtlara göre arıtma çamurlarının azot içeriği yakıt olarak kullanıma daha uygun olsada, oluşacak emisyonlarda NO_x lerin sürekli takibi sıklıkla önerilen bir uygulamadır.

Angın (2008), Iğdır İli'nde gerçekleştirdiği çalışmada, fiziksel ve kimyasal özellikleri birbirinden farklı topraklara sahip üç ayrı arazide anaerobik arıtma çamurlarını kullanmıştır. Çalışmanın temel amacı arıtma çamurunun bitkisel üretimde toprak verimine olan etkilerinin incelenmesidir. Çalışmada bu amaç doğrultusunda çamur uygulamasının arpa bitkisinin yetişmesi ve verimine olan etkileri araştırılmıştır. Bitki yetiştirme denemelerinde, arıtma çamuru dekar başına 4, 8 ve 12 ton olacak şekilde uygulanmıştır. Uygulamanın arazideki toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerine olan etkilerini ortaya çıkarmak için, 2004 yılında uygulama yapılan arazide, 2005 yılında arpa ekimi öncesi, 2006 ve 2007 yıllarında ise arpa hasadı sonrası bozulmuş ve bozulmamış toprak örnekleri alınmıştır. Çalışma sonucunda, toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri ve arpa bitkisi verimi açısından en uygun uygulama düzeyinin 12 t/da olduğu saptanmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen uygulamada kullanılan arıtma çamurlarının içeriğindeki organik madde ve bitki besin elementleri sayesinde, toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirdiği ve bu iyileştirmenin arpa bitkisinin büyümesi ve verim artışı açısından olumlu etkileri olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada elde edilen tüm bulgular bir bütün halinde incelendiğinde, arıtma çamurlarının toprak özelliklerinin iyileştirilmesinde faydalı olacağı ve bu kullanım şeklinin arıtma çamurları için alternatif bir bertaraf yöntemi sağlayacağı belirlenmiştir.

Kurutulmuş arıtma çamurunun bertarafına yönelik birleşik bir gazlaştırma ve yakma prosesi, pilot ölçekli bir sirkülasyonlu akışkan yataklı (CFB) gazlaştırıcıda ve bir aşağı akışlı yakıcıda (DFC) test edilmiştir. CFB gazlaştırıcısından üretilen gaz, ince katılarla birlikte, düşük azot oksit emisyonuyla gazı ısıtma değerinin geri kazanılması amacıyla yakma için pnömatik olarak DFC'ye taşınmıştır. Ölçülen veriler, tipik çalışma koşulları altında azotun yaklaşık %90'ının gaz fazına salındığını ve gazlaştırıcıda ayrıca N_2 'ye indirgendini gösterdi. Sonraki yakma prosesinde ölçülen NO_x konsantrasyonları, DFC'deki sıcaklığı 1150 °C'nin altında tutan etkili hava

aşamalandırma şeması nedeniyle 220 ± 6 mg/N m³ (hacimce %6 serbest O₂'ye düzeltilmiş) olmuştur. Yakıt-N'nin NO_x'e dönüşümü, element kütle dengesine göre $1 \pm 0,04$ olarak bulunmuştur. DFC'den toplanan uçucu küldeki yanıcı içerik %2,8 olup, sistemdeki %99,2'lik genel yanma verimliliğine karşılık gelmiştir. Sonuç olarak geliştirilen iki aşamalı prosesin, arıtma çamurunun çevre dostu bertarafı için oldukça umut verici olduğunu göstermiştir (Jian-huo ve ark, 2015).

Arıtma çamurunu direkt yakmaktan ise farklı maddeler ile beraber yakma yöntemleri denenmiştir. Yapılan çalışmalardan birinde pirinç kabuğu, arıtma çamuru ve karışımlarının yanma süreçlerindeki termal davranışları termogravimetrik analiz (TGA) ile incelenmiş, cüruflaşma özellikleri X-ışını floresansı (XRF) ve erime sıcaklığı aracılığıyla incelenmiştir. Pirinç kabuğu ve arıtma çamuru karışımlarının yanma süreci, tutuşma ve yanma özellikleri üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Karışımların pirinç kabuğu yüzdeleri %30, 50, 70 ve 100 olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda; malzeme yakma işlemlerinin dehidrasyon, uçucu oksidasyon ve ayrışma/oksidasyon olarak dört ana aşaması olduğu görülmüştür. Karışımların reaktivitesi artan miktarda pirinç kabuğu ile gelişmiş ve sonuçlara bakıldığında, birlikte yakma işlemi sırasında pirinç kabuğu ve arıtma çamuru arasında sinerjistik etkileşimler olduğunu ortaya koymuştur. Tüm birlikte yanma külleri, yüksek amorf SiO₂ içeriğinden dolayı daha düşük bir cüruf potansiyeli olduğunu göstermiştir. Külün yanma özellikleri ve cüruf atma özelliklerine göre karışımlardaki arıtma çamuru oranının %30'u geçmemesi gerektiği belirlenmiştir (Hao Rong ve ark, 2017).

Çimento endüstrisinde atıktan türetilmiş yakıtların ve arıtma çamurunun birlikte yakılması yoluyla çevresel ve ekonomik faydalar üzerine yapılan bir çalışmada, çimento klinkeri üretiminde atıkların enerji kaynağı olarak kullanılması, döngüsel ekonomiye geçişin ve atmosferdeki karbondioksitin (CO₂) sınırlandırılmasının konusunda umut verici olabileceği kanısında yola çıkarak çimento fırınında kömürün iki atıktan türetilmiş yakıt (RDF) ve arıtma çamuru (SS) ile karıştırılması ile ilişkili çevresel ve ekonomik kazançların analizi yapılmıştır. Yakıtle ilgili CO₂ emisyonlarındaki farklılıklar, yakıt tüketimi verileri, ısıtma değerleri ve ilgili emisyon faktörlerine dayalı olarak iki, üç ve dört bileşenli yakıt karışımları için hesaplamalar yapılmıştır. RDF'lerde %19 ve %43'lük biyokütle içeriği ölçülmüştür. Çimento klinkeri üretim tesisinin varsayılan teknolojik parametreleriyle (günlük 6000 Mg kapasite ve 3,6 GJ birim ısı) yakıtların malzeme dengesi, %90 seviyesindeki RDF ısı ikamesinin yaklaşık 28,6 Mg tasarruf sağladığını göstermiş olup saat başına kömür ve

yakl. RDF'nin saati başına 40 Mg. Toplam ısı tüketiminde SS payının %6'ya çıkarılması, gerçek emisyonların 1 Mg klinker başına 17 kg CO₂ oranında azaltılmasına katkıda bulundu. Çimento fabrikasında ATY kullanımına bağlı çok taraflı faydalar açıkça görülmüştür (Smolinski, 2022).

Torrefaksiyon, yakıtın alev stabilitesini, ışımsal ısı transferini ve enerji yoğunluğunu arttırdığı için toz haline getirilmiş katı yakıtın kalitesini iyileştirmek ve günümüzde alternatif yakıt olarak kullanılması için için umut verici bir yöntemdir. Ham arıtma çamuru, diğer biyokütlelere göre daha az sabit karbon ve daha fazla kül bileşiği içermektedir. Tutuşma süresinin uzaması düşük enerji kalitesine sebebiyet verip nispeten düşük, ısı bir alev oluşturmaktadır. Bu çalışmada, 1340 K'ne kadar farklı sıcaklıklarda numuneler yakılmıştır. Numuneler farklı kalma süreleri (10 dakika veya 30 dakika) için farklı sıcaklıklarda (473 K veya 573 K) hazırlanmıştır. Çalışmada parçacıkların boyut aralığı (150–215 lm ve 255–300 lm) ve O₂ yüzdeleri (%10–40) incelenmiş, parçacıklar soğuk bir taşıyıcı gazdan sıcak bir gaz akışına sürüklenmiş ve birkaç milisaniye sonra söndürülen uçucu bir alevi ateşlemiştir. Yanan parçacıklardaki bu zamansal değişiklikler, yerinde yüksek hızlı fotoğrafçılıkla (7000 kare/s) tespit edilmiştir. Kızartma derecesi alev yapısını etkilemiş ve hızlı ısıtma hızlarında uyumsuz reaktivite ve kurum oluşumu nedeniyle tutuşma gecikmesini değiştirmiştir. En çok yanan çamur parçacıkları, uçucu yanma süresini korurken, nispeten parlak bir uçucu bulut ve büyük bir alev sergilemiştir. Bu gözlemler, yanmaya tabi tutulmuş çamur parçacıklarının toz haline getirilmiş yanmasının iyileştirildiğini doğrulamaktadır. Aynı zamanda farklı şekilde yanmaya tabi tutulan çamur parçacıklarına ait alev parametreleri de (yarıçap, yoğunluk ve yanma süresi) elde edilmiştir (Mock ve ark, 2017).

Pinho ve Mateus (2022), enerji bitkileri üretmek için atık su arıtımını enerji üretimine eklememesini, enerji bitkisi sulanması için tatlı su çekilmesini önlemesi ve aynı zamanda ekilebilir arazi kullanımından kaçınmanın bir yolu olarak 35 farklı enerji bitkisi türünün enerji potansiyelini değerlendirdikleri çalışmada, biyokütle verimi ve enerji üretim potansiyeli olarak iki bitkinin; *Arundo donax* ve *Miscanthus x giganteus* öne çıktığını belirtmektedirler. *Arundo* bitkisinden hektara 6.7 ila 159.6 ton ve *Miscanthus* bitkisinden hektara 110.4 ton biyo verimi alınabileceği belirtilmektedir.

Arundo donax L. (kargı) ve *Miscanthus giganteus* ılıman ve subtropikal bölgelerde genellikle nemli topraklarda yetişen, oldukça verimli, uzun, çok yıllık kamışı

bitkilerdir. Her iki bitki de çeşitli çevresel stres faktörlerine karşı yüksek tolerand ve adaptasyon kapasitesine sahiptir. Bitkiler tohumları ile değil, toprak altı rizomları ile çoğalır ve metrekarede bitki sayısı artışına bağlı olarak verimleri artar. Tohumların yaşamaz olduğuna inanıldığından, bitkinin esas olarak vejetatif olarak çoğaldığı bildirilmiştir. Son zamanlarda, yüksek büyüme hızı ve biyokütle üretimi nedeniyle umut verici bir biyoyakıt kaynağı olarak dikkat çekmeye başlamışlardır. Ayrıca kirli toprakların fitoremediasyonu, su kaynaklarının kirleticilerden temizlenmesi ve karbon tutumu ve yutak oluşturma gibi çeşitli ekosistem hizmetleri ile de ilave avantajları vardır. Bu özellikleri ile habitat restorasyonu ve iklim değişikliğinin hafifletilmesi için kullanılırlar.

Miscanthus fotosentetik olarak C4 ve Arundo C3 fotosentetik metabolizma bitkisi olmasına rağmen, fotosentetik asimilasyonu, biyokütle verimleri ve potansiyel oranları C4 türlerine benzer ve oldukça yüksektir. Her iki enerji bitkisi türünün de fotosentez avantajları nedeniyle kuru biyokütle verimleri hektar başına 15-60 t arasında değişmektedir. Yüksek verime ulaşma potansiyellerine ulaşmayı engelleyen en önemli iki parametre torak rutubeti ve azot mineralidir. Belediye kökenli atıksular ve bunların arıtılması ile ortaya çıkan atıksu arıtma çamurları her iki bileşence de oldukça zengindir ve bio-faydalılıkları bu bitkilerin yıllık hayat döngülerine uygundur. Bu malzemeler bitki sulama ve gübrelemesine uygun hale getirilebirse yok yüksek biyoküteller elde edilebilir ve biyoyakıt olarak değerlendirilebilir.

Kharytonov ve ark, (2024), miscanthus bitkisini gübre elementlerinin farklı organik madde kimyasal gübreden sağlanma durumundaki kuru madde verimi ve gübreden faydalanma yeteneğini araştırdıkları çalışmada, en yüksek biyokütle verimi 12,9 t/ha ile 60 t/ha floküle edilmiş çamur uygulamasından elde edilmiştir. Makro besin elementleri içinde en aktif emilen gübre elementi azot olmuş bunu fosfor ve potasyum takip etmiştir. Bitkilerin çamurdan gelen elementlerden faydalanma etkinliği daha yüksek olmuştur. Fakat yüksek dozlarda çamur uygulaması (60 t/ha) biyokütlerde kül birikim oranını artırmıştır. 20 t/ha floküle edilmiş çamur uygulaması, çevre güvenliği ve yakıt olarak uygunluk açısından optimum uygulama dozu olmuştur.

Cano-Ruiz ve ark, (2021), arıtma çamurlarının A. Donax bitkisinin verim ve enerji değerlerini araştırmak için farklı formlardaki arıtma çamurlarını 50 t ha⁻¹ dozunda uygulanmışlar ve mineral gübre uygulaması ile karşılaştırmışlardır. Çalışma, İspanya'da geliştirilmiştir. İki yetiştirme mevsiminin ardından, bitki biyokütlesi,

Üretim parametreleri ve ısıl değer ile katkı maddelerinin toprak özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Arıtma amuru uygulaması bitki boyu, bitki gövde çapı ve kuru biyokütle verimini % 40'ın üzerinde artırmıştır. Ayrıca, bu bitkilerin yaprakları daha yüksek klorofil (0,39 ila 0,52 mg cm⁻²) ve azot içeriği (%2) ve daha düşük kül içeriği (% 0,9) değerleri göstermiştir. Biyokütlenin kalorifik değeri 18-19 MJ kg⁻¹ arasında değişmiştir. Isıl değerdeki artış kl oranındaki azalışa bağlanmıştır. Ayrıca, toprağa organik arıtma çamuru uygulaması nedeniyle toprak organik karbonundaki artış (%40), topraktaki karbon stokunun artmasına katkıda bulunmuştur.

Ceotto ve ark, (2021), üç yıllık çalışma sürecinde kargı bitkisinin biyokütle verimi, bileşimi İtalya'nın kuzeyindeki Po Vadisi'ndeki bir alanda değerlendirilmiştir. Arundo bitkisinde kuru biomass 30-59 t/ha arasında değişmiş ve mevsim sonunda bir defa hasat yapılan uygulama en yüksek verimi vermiştir.

Gubişov ve ark, (2020), Arıtma çamurlarını oranik madde ve bitki besin elementi sağlaması amacıyla *Arundo donax* bitkilerine uygulayıp, bitkilerinin büyüme parametreleri ve biyokütle verimi üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmada, iki yetiştirme mevsimi boyunca kurutulmuş çamur örnekleri 5 veya 15 t ha⁻¹ dozlarında uygulanmıştır. Arıtma amuru dozuna bağlı olarak, bitki başına sürgün sayısı, bitkilerin boyu, ve bitki gövde çapları kontrol uygulamasına kıyasla istatistiki olarak önemli oranda artmıştır. Biyokütle verimi, arıtma çamuru uygulama dozuna bağlı olarak 1,2-2,7 kat artmıştır.

Ceotto ve ark, (2015), *Arundo donax* L. Enerji bitkisini Akdeniz iklim kuşağında 5 yıl boyunca sulu sığır gübresini farklı dozlarda azot sağlayacak şekilde uygulamışlar ve biyokütle verimini takip etmişlerdir. Bitki maksimum biyokütle verimine üçüncü yılda ulaşmış ve hektara verim 18-51 ton arasında değişim göstermiştir. Yıllık olarak 10 mm ve 20 mm sığır gübresini uygulamaları gübre uygulanmayan kontrol ile karşılaştırıldığında, sığır gübresini kuru madde verimi ve verim stabilitesini önemli ölçüde artırmıştır. Azot alımı başına ürettiği kuru madde miktarı 216 kg olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda, toprağa uygulanan azotun geri kazanım verimliliği 0,12 ila 0,39 arasında değişmiştir. Hasat edilen biyokütlenin N içeriği, yanma için yüksek kaliteli biyokütle hammaddesi için kılavuz değer olarak kabul edilen %0,6 N eşiğinin altında tespit edilmiştir.

Bosso ve ark., (2016), verimliliği düşük, efektif kullanımı olmayan marjinal alanlarda enerji bitkisi yetiştiriciliğinin çevresel etki analizini inceledikleri çalışmada Arundo

bitkisini marjinal alanda ve kıyaslamalı olarak verimli tarla toprağında denemişlerdir. Her iki bitki yetiştirme sisteminde de toprağa karbon bağlanması ve depolanması atmosfere salınan sera gazı emisyonlarının iki katı civarında olmuş verimli toprakta 6464 kg CO₂eq ha⁻¹ ve marjinal alanda 5757 kg CO₂eq ha⁻¹ olarak hesaplanmıştır. 12 yıllık deneme periyodunda verimli toprakta hektara 40 ton ve verimsiz marjinal toprakta hektara 18 ton kuru biyokütle verimi sağlanmıştır.

Voća ve ark., (2021), evsel nitelikli atıksu arıtma çamurunun *Miscanthus x giganteus* enerji bitkisine olan etkisini alana farklı dozlarda arıtma çamuru 1,66, 3,22 ve 6,44 t/ha uygulayarak Hırvatistan koşullarında incelemişlerdir. Artan dozlarda uygulanan arıtma çamuru dozlarına paralel olarak birim kuru madde verimi istatistiki olarak farklı olmamış ve hektardan ortalama 20 ton verim elde edilmiştir. Kuru maddenin içeriği istatiki olarak farklı olmadan % 2 oranında kül, % 50 selüloz, %24 hemiselüloz, % 14 lignin olarak bulunmuştur. Sonuç olarak çamurunun en büyük miktarının uygulanmasının *Miscanthus* biyokütlesinin özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı rapor edilmiştir.

Dubis ve ark., (2020), 2013-2018 yılları arasında Kuzeydoğu Polonya'da miskantus bitkisini 100 ve 160 kg N ha⁻¹ eşdeğer oranlarda uygulanan arıtma çamurunun ile gübrelemişler ve sonuçları biyokütle verimi ve enerji verimliliği yönünden değerlendirmişlerdir. Azot kaynağından bağımsız olarak optimum gübre oranı 160 kg N ha⁻¹olarak belirlenmiş ve en yüksek biyokütle verimi 19,8 Mg ha⁻¹ kuru madde ve en yüksek enerji çıktısı 272-275 GJ ha⁻¹ elde edilmiştir. Gübre için enerji ihtiyacı mineral gübre içeren üretim teknolojilerinde (19-24 GJ ha⁻¹) bulunmuştur. Mineral gübrelerin arıtma çamuru ile yer değiştirilmesi, *miscanthus* biyokütlesinin üretimindeki enerji girdilerini %32-34 oranında azaltmıştır. Enerji kazanımı, bitkiye 160 kg N ha⁻¹ eşdeğer bir oranda arıtma çamuru verildiğinde en yüksek olmuştur (259 GJ ha⁻¹). Enerji verimliliği oranı, gübreleme olmaksızın üretim teknolojisinde zirveye ulaşmıştır (24,7). *Miscanthus* bitkilerine mineral gübreler yerine arıtma çamuru verildiğinde enerji verimliliği %43-52 daha yüksek olmuştur.

Lopushniak ve ark., (2024), enerji bitkilerinin biyokütle verimi yetiştirildiği bölgeden de etkilenmektedir. Bu çalışmada, *miscanthus* bitkisi farklı toprak verimlilik seviyelerinde arıtma çamuru uygulanarak yetiştirilmiş, Ukrayna'da *miscanthus*un en yüksek kuru biyokütle verimini 29,8 t/ha ve brüt enerji çıktısı 578 GJ/ha arıtma çamuru uygulamasından elde edilmiştir.

Literatürde verilen değerlere göre kargı bitkisinin selüloz içeriği %27,7 ile %46,5; hemiselüloz içeriği %13,9 ile %29 ve lignin içeriği ise %9,6 ile %25,9 arasında değişim göstermektedir (Vasmara ve ark, 2023). Biyokütlenin ana bileşenlerinin termal ayrışması genel olarak 170-280 °C arasında gerçekleşir. Hemiselüloz ayrışması daha düşük sıcaklıklarda, selülozun orta derecelerde ve lignin ayrışması daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. Arıtma çamuru gibi yanmayan veya yanması zor ve zaman alan bileşenlerin termal ayrışması 440 °C'den sonra başlar. Kül oranı yükseldikçe termal ayrışma 580 °C'nin üzerine çıkabilir (Kharytonov ve ark, 2024). Bu çalışmada zor yanan arıtma çamurlarının yanma süresi ve yanma verimliliğinin biyokütle bileşenleri ile iyileşmesi beklenmektedir.

Arıtma çamuru ve biyokütle kaynaklarının farklı fiziksel yapı ve kimyasal bileşimleri önemli ölçüde farklı sorunlara neden olabilmektedir. Örneğin bitkisel biyokütlerde yaygın olan yüksek alkali elementler toz emisyonu oluşumuna neden olurken, arıtma çamuru yüksek kül içeriği nedeniyle alev oluşmamasına ve cürufanma sorunlarına neden olmaktadır. Arıtma çamuru yakma santrallerinde rutubet ve uçucu kül büyük bir sorundur ve istenmeyen bu özellikler biyoyakıt optimizasyonu ile iyileştirilebilir. Kurutma, öğütme, parçacık boyutu ve yakma işlemi farklı işlenebilirlik vb. nedeniyle oldukça farklı olabilir. Dolayısı ile yakılacak karışımların yanma özelliklerinin önceden bilinmesi ve optimum yanma için en optimum yakma paçallarının kullanımı gibi biyokütle operasyonları kullanılabilir. Bu sorunlar ele alınmadan önce, uygun biyokütle yakıtları önceden belirlenmelidir.

Yakıtların endeksler kullanılarak değerlendirilmesi araştırmacılar ve uygulayıcılar için oldukça yararlı, pratik araçlar sunmaktadır. Biyoyakıt endeks değerlerine göre sınıflandırılması uzman olmayanlar tarafından bile kolayca anlaşılabilir ve çok yararlı bilgiler sağlar. Kalite endeksleri, çeşitli örneklerin hızlı, basitleştirilmiş ve nesnel bir şekilde karşılaştırılmasını mümkün kılan kullanışlı bir araç oldukları için biyoyakıt karşılaştırmasına yardımcı olabilmektedir. Biyokütleden enerji uygulamaları hakkında çok sayıda çalışma olmasına rağmen, biyokütle örneklerinin kalite sınıflandırılması hakkında çok sınırlı sayıda çalışma vardır (Rocha ve ark, 2020). Vasileiadou ve ark, (2021), proksimate ve ultimate kompozisyon değerlerini kullanarak tarımsal yan ürün ve artıklarının biyokütle yakıt karakterizasyon endeks değerleri ile ortaya koymuşlardır.

Endeks değerlerine ilave olarak, Polesek-Karczewska ve ark, (2018) yanma karakterini görselleştirmek için imaj analiz yöntemlerini kullanarak incelemişler ve bu yöntemin yanma iyileştirme çalışmalarında başarı ile kullanılabileceğini önermişlerdir.

Sonuç olarak bu çalışmada, çamur ve biyokütle belirli bir oranda karıştırılmış ve elde edilen numunelerin yanma özellikleri borulu fırın yakma deneyi ile incelenmiştir. Maddeler ve çamur arasındaki sinerjik etki, farklı biyokütle çamuru türlerinin karıştırılması ve yakılmasıyla da kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

2.1. Hipotez

Atıktan enerji üretim sistemleri, hem katı atıkların bertarafında ve hem de yenilenebilir enerji üretim perspektifinde son yıllarda giderek önem kazanmakta ve kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu bağlamda biyokütle enerji santralleri yenilenebilir enerji üretiminde önemli bir yere sahiptir. Biyokütle santrali tarımsal ve endüstriyel biyokütleden yararlanmanın yanı sıra evre kirliliğini azaltmak içinde faydalıdır (Cheng ve ark, 2014). Biyokütle kaynakları, yenilenebilir enerji (Gebreegziabher ve ark, 2014) retimine ve sera gazı (GHG) emisyonlarının azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltabilir (Leng ve ark, 2019)

Literatürde amur birlikte yakımı üzerine birçok çalışma olmasına rağmen, çamurun karmaşık bileşimi ve biyokütle türlerinin çeşitliliği nedeniyle birlikte yakma davranışını ve etkileşimini araştırmak için daha fazla çalışma gerekliliği vardır. Bu nedenle, bu çalışma solar kurutulmuş çamur ve lignoselülozik enerji bitkisi biyokütle karışım oranlarının yanma deneyleri yoluyla yanma davranışları araştırmaktadır. Seçilen biyokütle bitkisi türleri atıksu arıtma çamuru ve arıtılmış su uygulamalarına pozitif tepki vermekte ve daha yüksek biyokütle üretme potansiyeli olan bitkilerdir. Yakıt karakteri temel biyokütle katı yakıt parametreleri ve emisyon özellikleri indeks değerleri kullanılarak araştırılmıştır. Karışımlara artan oranlarda biyokütle eklenmesinin sinerjik etkileri yanma aşamasının yenilikçi ve özgün yöntem olan imaj analizleri ile araştırılmıştır.

Genel olarak atıksu arıtma çamurları, yüksek kül içeriği ve nispeten düşük düzeyde uçucu madde ve sabit karbon nedeniyle düşük yakıt kalitesine sahiptir. Arıtma amurunun kurutulması kalorifik değerini artırır; ancak yüksek düzeyde kül ve nispeten düşük düzeyde uçucu madde, alevli yanmayı zorlaştırır ve tutuşmayı engeller. Bu alışma aynı zamanda biyokütle karışımının tutuşabilirliği iyileştirdiği hipotezini

de test etmektedir. Çamura bitki biyokütlesinin eklenmesinin biyoyakıtın tutuşabilirlik endekslerini önemli ölçüde geliştireceğı beklenmektedir. Çünkü, yüksek uçucu madde içeriğı, hızlı yanmayı ve daha alevli yanmayı teşvik etmektedir (Li ve ark, 2016). Bu bağlamda, bitki biyokütlesinin sağladığı yüksek uçucu içerik, yüksek sıcaklıklarda külle ilgili yaygın sorunları önlemek amacıyla düşük sıcaklıklarda hızlı tutuşma açısından faydalıdır. Dolayısıyla kül ile ilgili problemlerin daha az olacağı beklenmektedir.



3. MATERYAL METOD

3.1. Çalışmada Kullanılan Arıtma Çamuru

Çalışmada kullanılan evsel nitelikli arıtma çamuru, Adapazarı, Erenler, Serdivan, Arifiye, Sapanca ilçelerinin kent merkezi evsel atıksuları ile ön arıtıma tabi tutulmuş ve limit değerleri sağlamış endüstriyel atıksuların arıtımını sağlayan Sakarya Büyükşehir Belediyesi'ne ait Karaman Evsel Atıksu Arıtma Tesisi'nden temin edilmiştir. Karaman atıksu arıtma tesisi 750.000 eşdeğer nüfusa hizmet etmektedir. Arıtma tesisine günde yaklaşık 160.000 m³ atıksu girmekte ve arıtım işlemi neticesinde günlük yaklaşık olarak 100 ton çamur keki ortaya çıkmaktadır. Uygulanan arıtma sistemi uzun havalandırmalı aktif çamur sistemi olduğundan arıtmadan çıkan çamur aerobik stabilize edilmiş, BOİ'i büyük oranda giderilmiş stabil arıtma çamuru kabul edilmektedir. Çamur yoğunlaştırma prosesinden sonra dekantörden çıkan yaklaşık %20 kuru maddeye sahip çamur kekleri kullanılmıştır. Çamur kekleri ardından deneysel kullanım için beton zemin üzerine ince katman olarak serilerek doğal güneş kurutma koşulları altında %90 kuruluğa ulaşıncaya kadar iki günde kurutulmuştur (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Atıksu Arıtma Tesisi (AAT) çamur kurutma

Tablo 3.1 Karaman Atıksu Arıtma Tesisi Arıtma Çamuru Ağır Metal Muhteviyatı ve Sınır Değer Karşılaştırılması

	Arıtma (mg.kg ⁻¹)	Çamuru Sınır* (mg.kg ⁻¹)	Değer
Kurşun(Pb)	36,7	750	
Kadmiyum(Kd)	1,08	10	
Krom (Cr)	173	1000	
Bakır (Cu)	78	1000	
Nikel (Ni)	28	300	
Çinko (Zn)	327	2500	
Civa (Hg)	0,912	10	

* Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik
Arıtma çamurunun ağır metal muhteviyatı “Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik” ağır metal standartlarına göre toprakta kullanılabildiği bir sakınca bulunmamaktadır (Şaşmaz, 2023).

3.2. Biyokütle Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada biyokütle enerji bitkisi olarak bölgeden kendiliğinden yetişen Arundo donax L. ve bitki üreticilerinden temin edilen Miscanthus × giganteus fideleri enerji bitkisi plantasyonları oluşturmak için Mart 2019'da Karaman'ın atıksu arıtma tesisi yakınına dikilmiştir. Arundo ve Miscanthus'un rizomları 1 m² bitki yoğunluğunda, sıralar arası 1 m aralıkla ekilmiştir. Bitki dikimleri beş bitkiden oluşan bir sıra halinde düzenlenmiş ve parsel başına 50 bitkiden oluşmuştur (Şekil 3.2). Ekimden önce toprak yüzeyine 10 t ha⁻¹ dekantör çıkışı arıtma çamuru (2 t ha⁻¹ KM) uygulanmış ve döner çapa kullanılarak toprakla karıştırılmıştır. Deneyde kullanılan arıtma çamurunun kalitesi, evsel nitelikli arıtma çamurlarının tarımsal uygulamaları için yönetmelik standardını karşılamaktadır. Bitkiler yaz aylarında aynı tesisten temin edilen arıtılmış deşarj suyu ile sulanmıştır. Birinci vejetasyon dönemi bitkileri hasat edilmemiştir. Kasım 2021'deki ikinci yetiştirme sezonunun sonunda bitkiler toprak yüzeyinden

kesilerek hasat edilmiş ve denge nem içeriğine ulaşana kadar açık havada güneşte kurutulmuştur.



Şekil 3.2 Dikimi yapılan bitki rizomları ve hasat aşamasındaki Arundo donax bitki plantasyonu.

Hava kuruluğa gelen bitki örnekleri bir bütün olarak traktör kuyruk mili ile çalışan bitki parçalayıcıdan geçirilerek öğütülmüş ve biyoyakıt karışımlarında kullanılabilir duruma getirilmiştir (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3 Miscanthus (MSC) ve Arundo (AD) öğütülmüş saman örnekleri

Ardından, kutulmuş arıtma çamuru kekleri, öğütülmüş lignoselülozik enerji bitkisi örnekleri Talo 3.1’deki değerler referans alınarak biyoyakıt karışımları hazırlanmıştır.

Tablo 3.1. Numune Karışım Tablosu

	% 0 (Çamur içerisindeki bitki oranı)	% 25 (Çamur içerisindeki bitki oranı)	% 50 (Çamur içerisindeki bitki oranı)	% 75 (Çamur içerisindeki bitki oranı)	% 100 (Çamur içerisindeki bitki oranı)
AD	AD ₀ 5 kg çamur	AD ₁ (3,75 kg çamur + 1,25 kg bitki)	AD ₂ (2,5 kg çamur + 2,5 kg bitki)	AD ₃ (1,25 kg çamur, 3,75 kg bitki)	AD ₄ 5 kg bitki
MSC		MSC ₁ (3,75 kg çamur, 1,25 kg bitki)	MSC ₂ (2,5 kg çamur, 2,5 kg bitki)	MSC ₃ (1,25 kg çamur, 3,75 kg bitki)	MSC ₄ 5 kg bitki

Homojen karışım haline getirilen numuneler, ayrı ayrı 5 kg ağırlığında paketlenmişlerdir. Ardından pellet makinesinde preslenerek pellet biyoyakıt haline getirilmiştir.

**Şekil 3.4.** Arıtma çamuru ve AD ve MSC bitkilerinin analiz için hazırlanması

3.3. Biyoyakıt Hazırlama

Tablo 1’de gösterilen biyokütle numuneleri daha sonra katı biyoyakıt haline getirmek için ticari olarak kullanılan endüstriyel ölçekli bir pelet makinesinde silindirik pelet formuna getirilmiştir. Pelet değirmeninin parametreleri 8 mm’lik bir pelet çapına

ayarlanmıştır. Karışımlar, dönen bir delikli pres vasıtasıyla pelet değirmenine sürekli olarak beslenmiştir. Bitki parçaları (lifler) ile kalıp ve silindirler yüzeyi arasındaki sürtünme nedeniyle pelet presinde ısınma gerçekleşir. Yüksek sıcaklık, enerji bitkisi biyokütle bileşenindeki doğal bağlayıcı ligninin yumuşamasına neden olur ve bu durum saman parçacıklarının pelet presinin pres kanalında birbirine bağlanmasını gerçekleştirir. Parçacıkların sürtünmesinden dolayı kalıptan çıktıktan sonra peletlerin sıcaklığı 70 °C civarında ölçülmüştür. Her deneysel test için, önceden tanımlanmış bir prosedüre göre yaklaşık 5 kg numune preslenmiş ve sonraki deneylerde kullanılmıştır. Peletler genellikle belirli kalite kriterlerini geçmek zorundadır, en önemlisi ise dayanıklılık ve sağlamlıktır. Pellet kalitesini artırmak için özel yapıştırıcı veya buhar sistemi kullanılmamış, pellet fiziksel özellikleri peletlemeden hemen sonra dağılım, deformasyon göstermemiş, lignin içeriği, uygulanan presleme basıncı ve ortaya çıkan sürtünme sıcaklığı pelet dayanıklılığı için yeterli olmuştur (Şekil 3.5-3.13).



Şekil 3.5. AD₀ –MSC₀ pellet hali



Şekil 3.6. AD₁ pellet hali



Şekil 3.7. AD₂ pellet hali



Şekil 3.8. AD₃ pellet hali



Şekil 3.9. AD₄ pellet hali



Şekil 3.10. MSC₁ pellet hali



Şekil 3.11. MSC₂ pellet hali



Şekil 3.12. MSC₃ pellet hali



Şekil 3.13. MSC₄ pellet hali

3.4. Malzeme Karakterizasyonu ve Analiz Yöntemleri

3.4.1. Lif analizi

Numunelerin fiziko-kimyasal bileşimi ve özellikleri standart test yöntemleri ve laboratuvar ekipmanı kullanılarak belirlenmiştir. Hücre duvarı lif bileşimi; asit deterjan lifleri (ADF), asit deterjan lignini (ADL) ve nötr deterjan lifleri (NDF), selüloz, hemiselüloz ve lignin içeriğini ifade etmek için otomatik bir lif analiz cihazı (Velp Scientifica, İtalya) kullanılarak Van Soest yöntemine göre belirlenmiştir. İçerikleri hesaplamak için şu denklemler kullanılmıştır; Hemiselüloz=NDF-ADF, Selüloz=ADF – ADL (Turp ve ark., 2023).

3.4.2. Yaklaşık (proximate) analiz parametreleri

Nem içeriği, fırında kurutma yöntemi kullanılarak numunelerin kurutma öncesi ve sonrası ağırlıkları arasındaki fark alınarak belirlenmiştir. Numuneler 105 °C’de sabit tartıma gelene kadar (yaklaşık olarak 4 saat) kurutulmuştur.

$$\text{Nem içeriği} = [(\text{ilk ağırlık} - \text{kuru ağırlık}) / \text{ilk ağırlık}] \times 100 \quad (3.1)$$

Kül içeriği ASTM D1102 protokolüne göre numunenin kül fırınında 550 °C’de açık krozelerde 4 saat yakılmasından sonra kalıntının kütlesi hesaplanarak belirlenmiştir. Daha sonra krozede kalan külün kütlesi numunenin orijinal kütlesiyle karşılaştırılmıştır.

$$\text{Kül içeriği} = [(\text{kuru ağırlık} - \text{kül ağırlığı}) / \text{kuru ağırlık}] \times 100 \quad (3.2)$$

Uçucu madde içeriği ASTM E870’e göre belirlenmiştir. Birer gram test numunesi kapaklı krozelerde 950°C’de 7 dakika süreyle yakılmıştır. Uçucu maddelerin yüzdesi kütle kaybına göre hesaplanmıştır.

$$\text{Uçucu madde içeriği} = [(\text{ilk ağırlık} - \text{son ağırlığı}) / \text{ilk ağırlık}] \times 100 \quad (3.3)$$

Daha sonra sabit karbon, aşağıdaki denklem kullanılarak tahmin edilmiştir.

$$\text{Sabit karbon (FC)} = 100 - (\text{Nem} + \text{Uçucu Madde} + \text{Kül}) \quad (3.4)$$

3.4.3. Elementel (ultimate) analiz parametreleri

Numunelerin karbon (C), hidrojen (H), nitrojen (N) ve kükürt (S) nihai analizi, ASTM D5373-14 yöntemine göre bir CHN628 Analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Toplam oksijen (O), aşağıdaki şekilde çıkarma yoluyla belirlenmiştir:

$$O = 100 -(C+H+N+S) \quad (3.5)$$

3.4.4. Kalorifik değer analizi

Isıl değerleri belirlemek için biyokütle numuneleri sırasıyla 1 mm'de öğütüldü, 60°C'de fırında kurutuldu ve ardından 105°C'de 24 saat süreyle kurutuldu. Islak ağırlığın belirlenmesinin ardından, daha yüksek ısıtma değeri (HHV), referans sıcaklıkta (25°C) bomba tipi bir kalorimetrede (IKA, C 200) 1 g'lık bir hap üzerinde doğrudan belirlendi. 6 dakika içinde tam yanma gerçekleştikten sonra kalorifik değer kalorimetre ekranında Kcal kg⁻¹ cinsinden okundu. Düşük kalorifik değer (LHV), aşağıdaki gibi HHV ölçümleri ve hammadde numunelerinin nem içeriği kullanılarak analitik bir formülle tahmin edildi.

$$LHV=HHV(1-MC/1000)-Ps(MC/1000)\Delta H_v \quad (3.6)$$

MC, 60°C'deki nem içeriğini (g kg⁻¹) temsil ederken, Ps numune ağırlığıdır (1,00 ± 0,01 g) ve Hv, suyun buharlaşma ısısıdır (2,54 MJ kg⁻¹).

3.5. İndeks Değerlerinin Hesaplanması

Yığın yoğunluğu Bd (kg m⁻³) ASTM 873-82 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Hazırlanan peletin bireysel yoğunluğu Pd (kg m⁻³), pelet boyutlarına göre ve tek bir peletin kütesinin hacmine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Daha sonra enerji yoğunluğu (Ed), denklem (3.7) kullanılarak Bd kütle yoğunluğunun HHV ile çarpılmasıyla tahmin edilmiştir.

$$Ed=Bd\times HHV \quad (3.7)$$

burada Ed enerji yoğunluğudur (MJ m⁻³), Bd kütle yoğunluğudur (kg m⁻³) ve HHV (MJ kg⁻¹).

Yakıt değer endeksi (FVI), Özdemir ve arkadaşlarına göre HHV, kütle yoğunluğu, nem ve kül içeriğine göre tahmin edilmiştir (2022). Denklem (3.8) kullanılarak:

$$FVI=(HHV\times Bd)/(MC\times AC) \quad (3.8)$$

burada, kuru bazda HHV (MJ kg⁻¹), Bd (kg m⁻³), MC nem içeriği ve AC kül içeriği (%).

Arundo, Miscanthus ve bunların karışımlarından üretilen peletlerin yakıt özellikleri, harmanlamayla elde edilen herhangi bir iyileşmeyi ifade etmek için bir kalite endeksiyle karşılaştırılmıştır. Biyokütle kalite indeksi (BQI), Rocha ve ark. tarafından

değiştirilen yöntemlere dayanmaktadır (2020). Çeşitli biyokütleden üretilen pellet kalitesini belirlemek amacıyla yapılmıştır. BQI'yi tahmin etmek için enerji potansiyelini olumlu ve olumsuz etkileyen en ilgili parametreler, literatürdeki referans değerleri kullanılarak parametre kalite indeksinin (PQI) belirlenmesine tabi tutulmuştur (Rocha ve ark, 2020; Vasileiadou ve ark, 2021). PQI'yi elde etmek için kullanılan denklem şöyledir:

$$PQI=((x_{ölçülen}-x_{optimal})/(x_{threshold}-x_{optimal})) \quad (3.8)$$

burada $x_{ölçülen}$, i parametresinin ölçülen değeridir, $x_{optimal}$, her parametre için en uygun değerdir ve $x_{threshold}$, çalışma aralığı içindeki her parametre için maksimum veya minimum değerdir. Eşik ve optimal değerler Espinoza-Monje ve ark. tarafından önerilen referans değerlerinden elde edilmektedir (2023). HHV, kül, nem, karbon, hidrojen, nitrojen, oksijen ve kükürt içerikleri için. PQI belirlenmesinin ardından biyokütle kalite indeksi (BQI), Rocha ve ark. tarafından önerilen denklem kullanılarak belirlenmektedir (2020).:

$$BQI=\sum_{(i=1)}^8 PQI_i \quad (3.9)$$

burada BQI, değerlendirilen sekiz parametrenin her birinin PQI'sinin toplamı olan, üretilen peletin kalite endeksidir; daha düşük bir endeks, yakıt olarak biyokütlenin daha yüksek kalitesini temsil etmektedir.

Tutuşabilirlik indeksi (I_i), Denklem 3.9 kullanılarak belirlenmiştir.

$$I_i=(HHV-81 \times FC)/(VM+MC) \quad (3.10)$$

burada CV, $Kcal\ kg^{-1}$ cinsinden kalorifik değerdir, FC sabit karbondur (%), VM uçucu maddedir (%) ve MC nem içeriğidir (%).

3.6. Numunelerin Yakılması

Pelet halinde olan MSC ve AD enerji bitkileri tarafımızca yapılan yanma ünitesinde yakılmış ve yakma verilerine göre hazırlanan Tablo 3.1. de verilmiştir.

Tablo 3.2. Yanma ön verileri

Numune İsmi	Numune Miktarı (gr)	Yanma Süresi(dk.)	Toplam Süre(dk)
AD ₀	250	---	5
AD ₁	250	2,25	---
AD ₂	250	2,25	---
AD ₃	250	0,5	---
AD ₄	250	1,15	---
MSC ₁	250	1,49	---
MSC ₂	250	1,3	---
MSC ₃	250	0,53	---
MSC ₄	250	1,2	---

Yanma öncesinde Şekil 3.7 ile Şekil 3.15 arasında fotoğrafları verilen peletlerin ve yanma sırasında numunelerden elde edilen görüntüler her bir numune için Şekil 3.16 ile Şekil 3.24 arasında aşağıda verilmiştir. AD₀-MSC₀ peletlerinde karışım olmadığı ve sadece AAT çamuru olduğundan dolayı aynı fotoğraf içerisinde verilmiştir. Sadece AAT çamurunun olduğu peletlerde 5 dakikalık süre içerisinde yakıcı ile yakılmaya çalışılmış ama yanma gerçekleşmemiştir.

**Şekil 3.14.** AD₀-MSC₀ yanma



Şekil 3.15. AD₁ yanma



Şekil 3.16. AD₂ yanma



Şekil 3.17. AD₃ yanma



Şekil 3.18. AD₄ yanma



Şekil 3.19. MSC_1 yanma



Şekil 3.20. MSC_2 yanma



Şekil 3.21. MSC_3 yanma



Şekil 3.22. MSC_4 yanma

3.7. İstatistiksel Analiz

Arundo ve Miscanthus biyokütlesinin iki ana faktörünün arıtma çamurunun yanma özellikleri üzerindeki etkilerini ve bunların bağımlı değişkenler üzerindeki etkileşimlerini değerlendirmek için çok faktörlü bir varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Ek olarak, bağımlı değişkenlerde açıklanan değişkenliğin oranını değerlendirmek için bir keşif aracı olarak regresyon analizi kullanılmıştır. Biyokütle enerji göstergeleri korelasyon analizine tabi tutulmuştur. Yukarıdaki analizler StatsDirect istatistiksel yazılım paketi (V2.7.2, StatsDirect, Ltd., Altrincham, Cheshire, UK) içerisinde $P=0.05$ değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Tabloların grafiğini çizmek için Microsoft Excel 2019 kullanılmıştır.

3.8. İmage Analiz

Test edilen biyokütle örneklerinin yanma özelliklerini görselleştirmek için Polesek-Karczewska ve ark. (2018) tarafından tanımlanan modifiye edilmiş laboratuvar tipi yakma işlemi kullanılmıştır. Yaklaşık 250 gr'lık kuru pelet numunesi delikli düz bir ızgara üzerine konulmuş ve yanma odasına yerleştirilmiştir. Biyokütle örneklerinin tutuşması, ızgaranın altından uygulanan sıcak hava (yaklaşık 350 °C) ile sağlanmıştır. Tüm yanma süreci boyunca alevin yanma aşaması, yanma sisteminin önüne yerleştirilen yüksek çözünürlüklü bir kamera kullanılarak kaydedilmiştir. Yanma süreçlerinin farklı varyantlarına karşılık gelen görüntü dosyaları 450 × 800 piksel boyutunda görüntüler olarak kaydedilmiş ve bu görüntüler peletlerin yanma kalitesini belirlemek için Image-J yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Image-J programı, görüntüdeki belirli bir alanın RGB profil analizi ile baskın renk yoğunluğunun belirlenmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada kırmızı renk yoğunluğu belirlenmeden önce, daha iyi sonuçlar elde etmek için görüntülerde yanmayı temsil etmeyen alanlar karartılmıştır. Görüntü üzerinde eşit alanlar oluşturulmuş ve belirli bir piksel sayısı 1 cm olarak belirlenmiş ve 1 cm yüksekliğinde alanlar oluşturulmuştur. Bu alanların her biri için kırmızı renk yoğunluğu ortalamaları hesaplanmıştır (Özdemir ve ark, 2022).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Yaklaşık (proximate) analiz

Yaklaşık analizin parametreleri, yani biyokütledeki nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon içeriği, enerji içeriğini, enerji geri kazanım oranını ve besleme stoğunun yanma için uygunluğunu belirleyen belirleyici bir faktördür. Varyans analizi (ANOVA) sonuçları, biyokütlenin tüm yaklaşık parametrelerinin (nem, kül, uçucu, sabit karbon içerikleri, LHV ve HHV), arıtma çamurunun biyokütle karışım oranlarından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. (Tablo 4.1). Buna göre enerji mahsulü x karışım oranı etkileşimi, sabit karbon içeriği hariç tüm yaklaşık parametreler için her zaman anlamlı olmuştur (Tablo 4.1). Şekil 4.1., arıtma çamuru enerji ürünü karışımlarının biyokütlenin yaklaşık özelliklerinin ortalama değerlerini göstermektedir. Enerji bitkisi biyokütlesinin eklenmesi, sabit karbon hariç enerji bitkisi türlerinin etkileşim etkisine bağlı olmaksızın nemi, külü ve sabit karbon içeriğini önemli ölçüde azaltır, aksine uçucu maddeyi artırır.

Tablo 4.1. Enerji mahsulü türlerinin (Faktör A) ve karışım oranlarının (Faktör B) arıtma çamurundaki yaklaşık analiz parametreleri üzerindeki etkisine ilişkin varyans analizi (ortalama kareler).

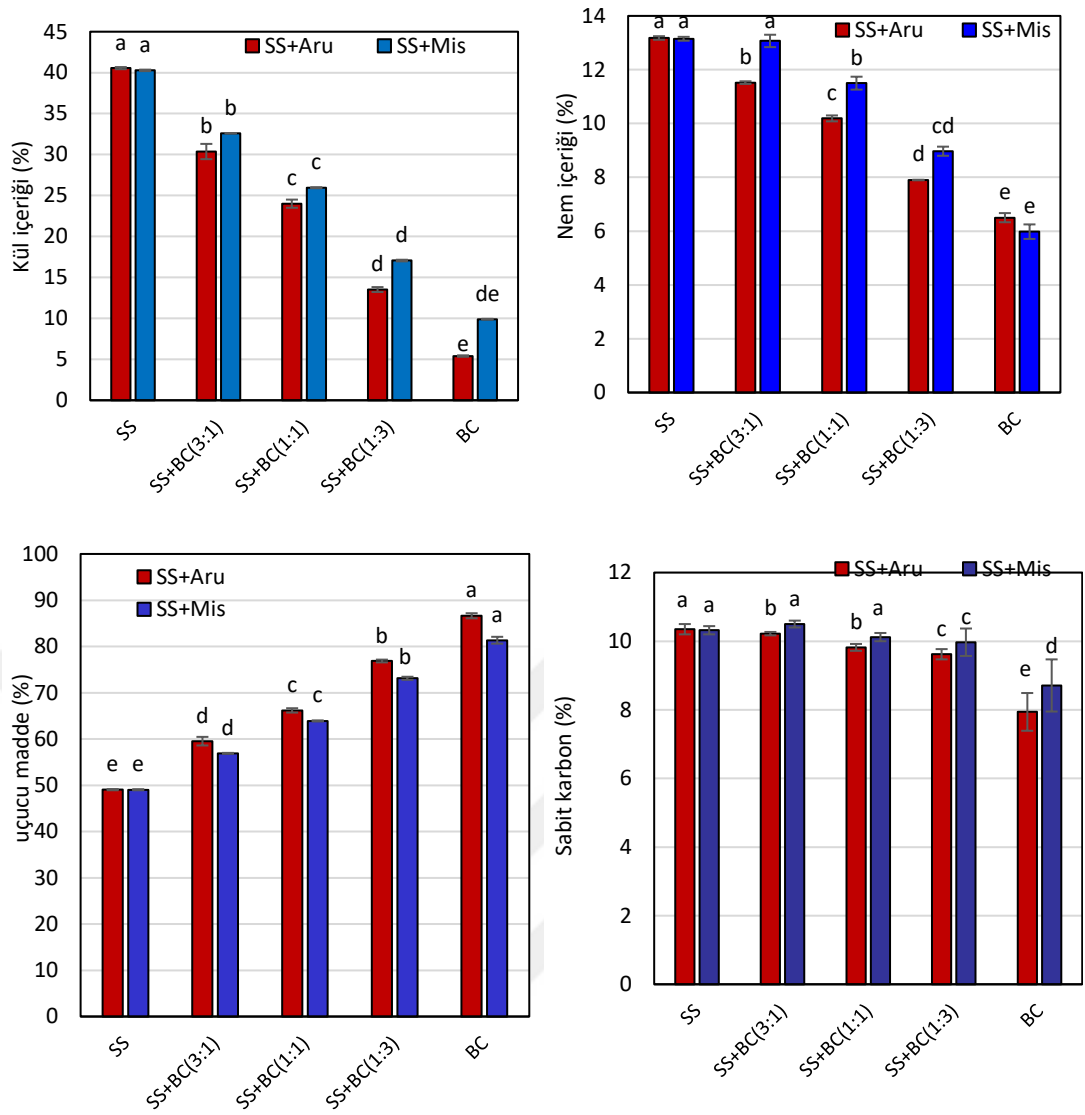
Değişkenler	df	Nem	Kül içeriği	Uçucu madde	Sabit karbon	LHV	HHV
Ürünler (A)	1	3.53***	43.10***	58.55***	0.85**	2.70 ^{ns}	0.19 ^{ns}
Karışım (B)	4	48.45***	1003.69***	1129.47***	4.19***	10.06**	17.15***
A×B	4	1.29***	4.95***	5.57***	0.12 ^{ns}	1.00*	0.33**
Kalan	20	0.10	0.15	0.25	0.13	1.13	0.04
Toplam	29						

ns, *, **, ***: anlamlı değil ve sırasıyla $P < 0,05$, $0,01$ ve $0,001$ olasılık düzeylerinde anlamlı.

Nem içeriği, ham arıtma çamurunun net enerji içeriğini ve yanma sürecini belirleyen temel parametredir. Bu çalışma, nem içeriğinin %5,98 (saf Miscanthus peleti) ile 18,18 (saf arıtma çamuru peleti) arasında olduğunu belirlemiştir. Enerji bitkileri ile birlikte peletleme için uygun çamur nem içeriği %10-15 olarak rapor edilmiştir (Özdemir ve Demir, 2021). Miscanthus ve Arundo karışımlarından üretilen hammadde, uygun peletlemenin beklenen değerlerini temsil etmektedir. Şekil 4.1.'den, karışımların nem

içeriğinin, pelet yakıtındaki mahsul biyokütle oranıyla doğrusal olarak azaldığı görülebilmektedir. Arıtma çamurunun özelliklerinin kaynağına, arıtma prosesine ve ortam çevre koşullarına bağlı olarak değişebileceğini unutmamak çok önemlidir. Çamurdaki nispeten yüksek nem içeriği, kısmen sonuçlarla tutarlı olan higroskopik (nemçeker) yapısına atfedilebilir. Ayrıca yüksek su içeriği, üretilen biyoyakıtların biyolojik aktivitesini olumlu yönde etkileyerek enerji ve dayanıklılık parametrelerini azaltmaktadır (Öğleni ve Özdemir, 2010). Dolayısıyla, enerji mahsulü karışımlarından üretilen peletler, yaklaşık % 10'luk istenen su içeriğini karşılamaktadır. Bu tür nem içeriği, her iki enerji ürünü için de 1:1'lik bir karışımda elde edilmiştir. Nem sonucu, yoğunlaştırılmış biyokütle için optimum nem içeriği dahilinde önceki çalışmalarla tutarlıdır (Kijo-Kleczkowska ve ark, 2016).

Nem içeriğinin yanı sıra kül içeriği de katı biyokütlenin önemli bir parametresidir ve biyokütlenin yanmaz içeriğini ifade etmektedir (Bianchini ve ark, 2015). Kül, termal ayrışma üzerindeki katalitik etkisi (Yang ve ark, 2023) ve kalorifik değere olumsuz katkısı nedeniyle biyokütlerde istenmeyen bir parametredir. Genel olarak enerji bitkileri, atıksu arıtma çamuruna göre daha düşük kül içeriğine sahiptir (Özdemir ve Demir, 2021). Bu çalışmada belirlenen en düşük kül içeriği % 5,40 (saf Arundo peleti), en yüksek ise % 40,55 (saf arıtma çamuru peleti) olarak belirlenmiş ve pelet üretimi için bitki biyokütlesinin tamamı kullanılmıştır. Biyokütle bitkilerindeki kül içeriğinin daha yüksek olması, Arundo ve Miscanthus bitkilerinin yapraklarının gövdeden daha fazla mineral içermesiyle ilişkilendirilebilir (Nazlı ve ark, 2018). Bununla birlikte, bitki numunelerindeki düşük kül, arıtma çamuruna kıyasla daha yüksek enerji mahsul oranlarındaki karışımların kül içeriğini önemli ölçüde azaltmıştır. Miscanthus ve Arundo biyokütlesi arasındaki kül içeriğindeki farklılıklar, daha büyük yaprak biyokütlesi ile ilişkili olabilir. Arundo ve Miscanthus peletleri için sırasıyla 0,995 ve 0,998'lik regresyon katsayıları (R^2) ile karışımlardaki kül içeriği ve enerji mahsulü oranı arasında da iyi bir doğrusal ilişki vardır. Arundo ve Miscanthus için enerji mahsullerinin oranı % 75 arttığında bu oran sırasıyla % 40,55'ten % 13,52'ye ve % 40,28'den % 17,06'ya yükselmiştir. Bu nedenle, düşük kül içeriği nedeniyle yanma işlemine olumlu katkı sağlanması ve böylece külden kaynaklanan sorunların azalması beklenmektedir.



Şekil 4.1. Enerji bitkileri *Arundo donax* ve *Miscanthus × giganteus* karışımının arıtma çamuru nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon içeriği üzerindeki etkisi. Farklı harfler Duncan'ın Çoklu Aralık Testine göre %5 seviyesinde anlamlı farkı ifade etmektedir (SS: Arıtma Çamuru, BC: Enerji Bitkileri).

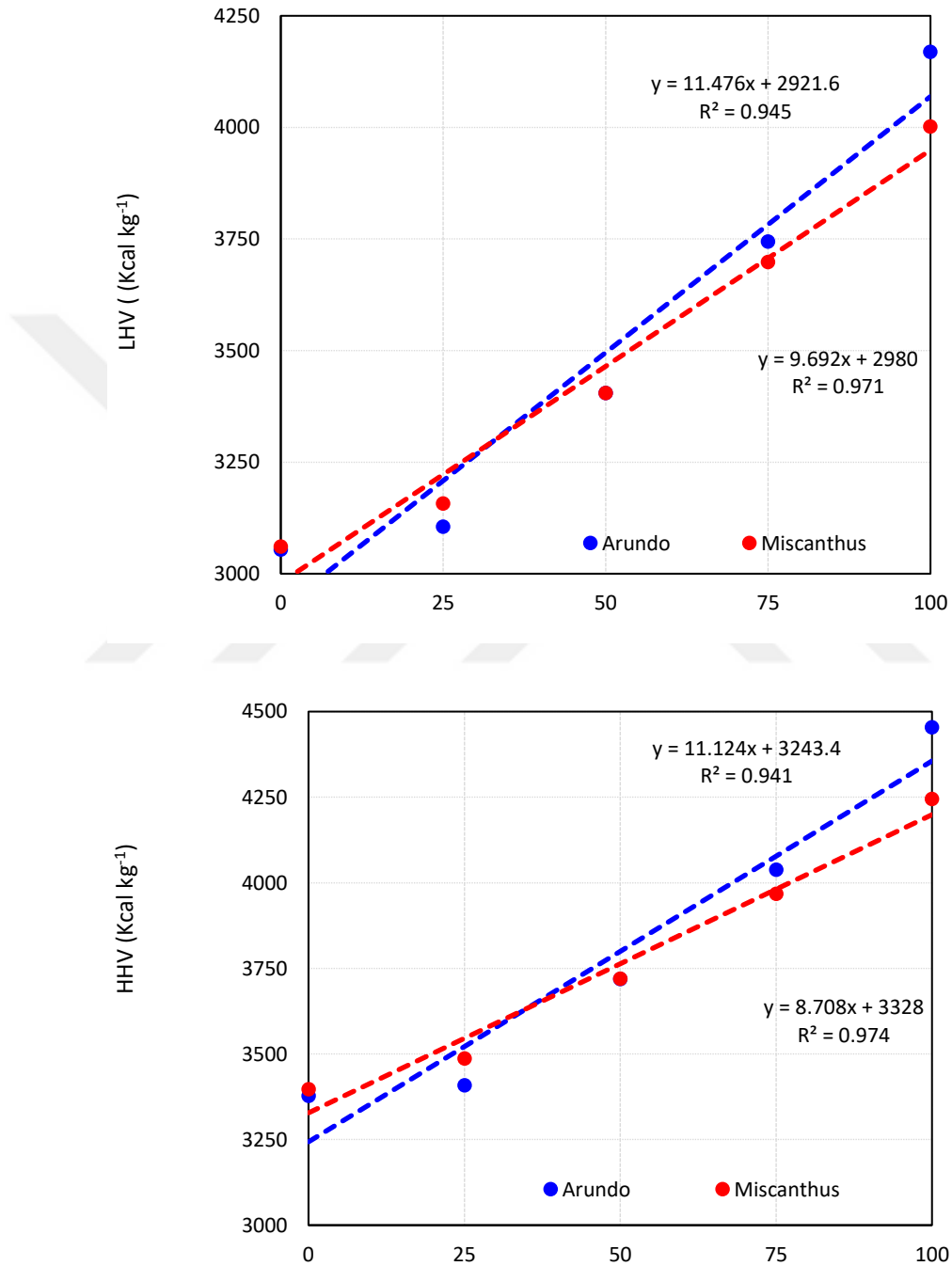
Uçucu madde içeriği, katı biyokütle yakıt kalitesinin çok önemli ve etkili bir göstergesidir ve belirlenen değerlerdeki değişim, biyokütle kaynakları, karışım oranı ve bunların etkileşimi açısından önemlidir (Tablo 4.2.). Uçucu madde, buharlaşma aşaması sırasında biyokütlenin termal bozunmasından oluşan gaz fazını temsil eder ve biyokütlenin tutuşmasını kolaylaştırır (Li ve ark, 2016). Bu durum uygun yanma reaksiyonlarına yol açar (Chen ve ark, 2019). Öte yandan uçucu maddenin yüksek olması, yakma işlemi sırasında büyük miktarlarda aerosol emisyonu yaratma potansiyeline işaret etmektedir. Uçucu madde içeriği saf çamur, *Miscanthus* ve *Arundo* için sırasıyla %49.05, %81.35 ve %86.64 olmuştur. Elde edilen uçucu madde, enerji bitkileri karışımları içeren çamurda %56,90 ila 76,86 arasındaydı. Genellikle

mahsuller ve çim türleri için uçucu madde içeriği doğal olarak yüksektir. Arıtma çamuru, Arundo ve Miscanthus biyokütlesinde belirlenen uçucu madde, literatürde bildirilen değerlerle kısmen tutarlıdır. Beklendiği gibi, her iki enerji ürünü de çamur karışımındaki uçucu maddeye önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Sabit karbon, uçucu bileşenlerin salınmasından sonra kalan katı kalıntı olarak tanımlanır ve kalan nem ve külün kütle içeriğini temsil etmektedir. Daha yüksek oranda sabit karbon, ısıtma değeri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğundan daha yüksek kalitede biyokütleye yol açar (Kijo-Kleczkowska ve ark, 2016). Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, sabit karbon içeriği %7,94 (saf Arundo) ile %10,35 (saf arıtma çamuru peleti) arasında değişmektedir. Arıtma çamuru, Arundo ve Miscanthus için literatürde bildirilen daha yüksek ve daha düşük sabit karbon içeriği, besleme stoğunun hazırlanmasına ve uygulanan deneysel yöntemle bağlıdır. Ancak bu çalışmada belirlenen değerler, daha önce yapılan çalışmalarda bildirilen saf biyokütle ve karışımları için üst sınırlara yakın çıkmıştır.

4.2. Kalorifik Değerler

Varyans analizi, bitki türlerinin HHV değerlerinin önemli ölçüde farklı olmadığını göstermiştir. Ancak karışım oranları ve etkileşim, yüksek ısıtma değerini güçlü bir şekilde etkilemiştir (Şekil 4.2.). Ortalama HHV sırasıyla: arıtma çamuru ($14,14 \text{ MJ kg}^{-1}$), Miscanthus ($17,76 \text{ MJ kg}^{-1}$) ve Arundo ($18,63 \text{ MJ kg}^{-1}$) olarak bulunmuştur. Biyokütlenin karışım oranı HHV'yi önemli ölçüde geliştirmiş ve Arundo karışımları için daha belirgin bir hal almıştır. Arundo ve Miscanthus'un farklı bileşimleri net kalorifik değerdeki farklılıkları açıklayabilmektedir. Buna göre, test edilen tüm karışımlar için alt ısıtma değeri (LHV) HHV ile tutarlıdır. Regresyon analizi, her iki bitki türünün de Şekil 2'de derlenen hemen hemen aynı regresyon katsayısı (R^2) 0,97 ile LHV ve HHV'yi doğrusal olarak arttırdığını göstermektedir. Arıtma çamuru, enerji bitkisi türleri ve bunların karışımları için elde edilen enerji parametreleri bunun doğru olduğunu göstermektedir. Arıtma çamurunun LHV ve HHV değerlerinin enerji açısından zengin lignoselülozik malzeme ile iyileştirilmesinin mümkün olduğunu ortaya çıkarmıştır. Saf arıtma çamuruna kıyasla karışımlarda LHV ve HHV'nin artması enerji yoğunlaşmasını açıkça tanımlamaktadır. Literatür verilerine göre LHV değerleri arıtma çamuru için $12-15 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Schnell ve ark, 2020), Arundo için $15-18 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Oginni ve Singh, 2019; Carnevale ve ark, 2022) ve Miscanthus için $15-19 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Park ve ark, 2020) dir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara paralel olarak sunulan

LHV içeriği yukarıdaki verilere dayanmaktadır. Arıtma çamurunun enerji değerlerinin nem içeriğine bağlı olarak büyük ölçüde farklılık gösterdiği bilinmektedir (Bianchini ve ark, 2015). Bu çalışmadaki çamur numunesi, güneş enerjisiyle kurutma altında sabit ağırlığa kadar kurutulması nedeniyle stabil LHV ve HHV özelliklerini sergileyerek herhangi bir etkileşim göstermemektedir (Chen ve ark, 2019).



Şekil 4.2. Artan oranda Arundo donax (mavi çizgi) ve Miscanthus × giganteus (kırmızı çizgi) karışımı içeren arıtma çamurunun LHV ve HHV'si.

4.3. Elementel Analiz

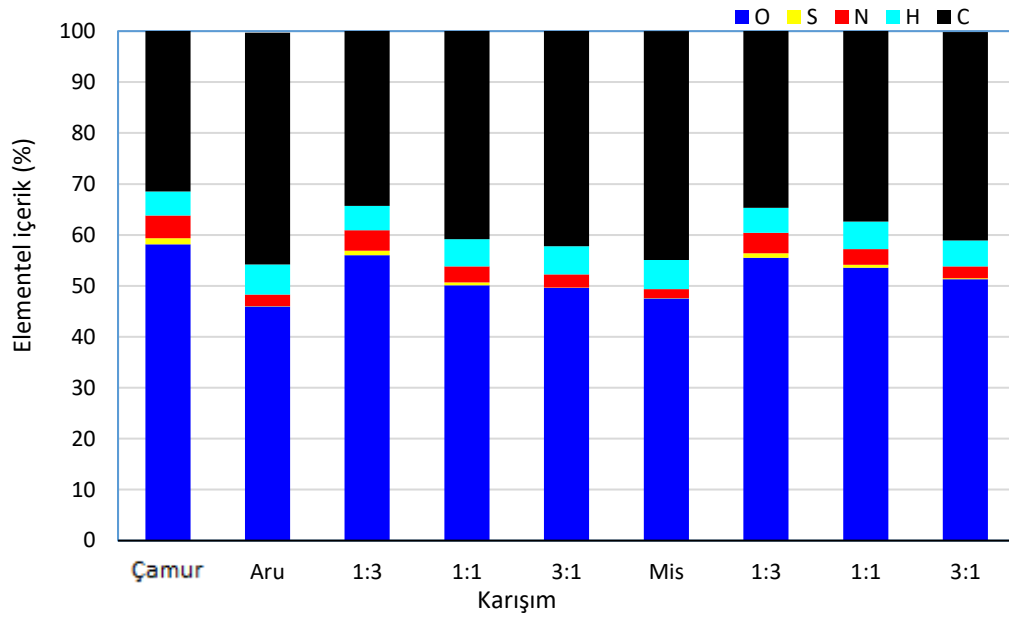
Biyokütlenin kimyasal bileşimi enerji potansiyeli, yakma verimliliği, gaz ve katı emisyonlarında önemli bir rol oynar. C, H, N, S ve O biyokütle malzemelerinin ana bileşenleri olduğundan, kalorifik değer ile karbon içeriği arasında doğrusal bir ilişki vardır (Yang ve ark, 2023). Karbon, hidrojen, nitrojen, kükürt ve oksijen içeriğini gösteren çamur, Arundo ve Miscanthus'un nihai analizi Tablo 4.2'de sunulmuştur. İstatistiksel analizler çoğu etkileşimde önemli farklılıklar göstermiştir. Daha yüksek C ve H içeriği ısı değeri artırırken, daha yüksek oksijen içeriği azaltmaktadır (Özdemir ve Demir, 2021). Aynı zamanda oksijen, yakma sırasında CO₂ ve H₂O üreterek reaksiyona girer ve bu da tam yanmayı destekler (Anyaocha, 2022). Şekil 4.3, her iki bitki türünün karbon ve hidrojen içeriklerinin çamurunkinden daha yüksek olduğunu, bunun da karışımlarda daha yüksek kalorifik değere yol açtığını göstermiştir. Etkileşim etkileri ayrıca, karışımların Arundo içeriğindeki artışla birlikte peletlerin karbon içeriği değerinin de hafifçe arttığı doğrulanmıştır.

Tablo 4.2. Arıtma çamurundaki enerji mahsullerinin (Faktör A) ve karışım oranının (Faktör B) yaklaşık analiz parametreleri üzerindeki etkisine ilişkin varyans analizi (ortalama kareler).

Değişkenler	df	Karbon	Hidrojen	Azot	Sülfür	Oksijen
Ürünler (A)	1	5.896 ^{ns}	0.147 ^{ns}	0.00 ^{ns}	0.002 ^{ns}	12.416*
Karışım (B)	4	142.901***	1.242**	6.210***	1.474***	120.954***
A×B	4	3.975*	0.057 ^{ns}	0.429 ^{ns}	0.009 ^{ns}	3.582 ^{ns}
Kalan	20	1.480	0.119	0.509	0.008	2.034
Toplam	29					

ns, *, **, ***: anlamlı değil ve sırasıyla P < 0,05, 0,01 ve 0,001 olasılık düzeylerinde anlamlı.

Biyokütleyi potansiyel bir biyoyakıt olarak değerlendirirken, karbon ve hidrojen yanma sürecindeki temel unsurlardır. Bu nedenle daha iyi enerji üretimi için daha yüksek karbon ve hidrojen içeriği arzu edilir. Literatürde C içeriği değerleri arıtma çamuru için %33-50 (Schnell ve ark, 2020), Arundo için %42-49 (Oginni ve Singh, 2019) ve Miscanthus için % 42-49 (Baxter ve ark, 2014.) şeklindedir ve elde edilen sonuçlarla tutarlıdır. H içeriği için, arıtma çamuru için %3-4 (Schenel ve ark, 2020), Arundo için %6-6,4 (Ge ve ark, 2016) ve Miscanthus için %3,5-6,3 (Blandzija ve ark, 2016) değerleri rapor edilmiş olup elde edilen sonuçlarla tutarlıdır.



Şekil 4.3. Arıtma çamurunun nihai analizi, biyoenerji bitkileri *Arundo donax* ve *Miscanthus × giganteus* ve bunların arıtma çamurunda artan orandaki karışımları .

N ve S, biyokütlenin yanması sırasında zararlı gaz emisyonlarını etkilediğinden, bu elementlerin konsantrasyonları mümkün olduğu kadar düşük olmalıdır. İstatistiksel analiz, arıtma çamurundaki N içeriğinin enerji bitkileri karışımıyla doğrusal olarak azaldığını göstermiştir. Benzer şekilde, arıtma çamurunun S içeriği, karışımdaki arıtma çamurunun oranıyla birlikte artmıştır. Literatür verilerine göre nitrojen içeriğine ilişkin değerler %0,1 ila %7,3 arasında değişirken, kükürt içeriği %0,0 ila %2,5 arasında değişmektedir (Kijo-Kleczkowska ve ark, 2016). Çalışmalardan elde edilen gözlemlenen veriler literatür kaynaklarıyla karşılaştırıldığında değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür.

4.4. Yakıt Kalite İndeksleri

Biyokütle yakıt kalitesinin değerlendirilmesi için çeşitli yöntemler vardır. Bu modeller için esas olarak yaklaşık ve nihai analiz parametreleri kullanılmaktadır. Bu parametrelere ek olarak katı yakıt için kullanılan ham maddenin türüne bağlı olarak yakma işleminde enerji ve işletme uygunluğunu tahmin etmek için fiziksel özellikler ve emisyon parametreleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada yakıt kalitesini sınıflandırmak için literatürde önerilen ortak fiziko-kimyasal özellikler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'de karşılaştırma yapmak için kullanılan indeksler ve enerji yoğunluğu, tutuşabilirlik, yakıt değeri ve biyokütle kalite indeksine göre yakıt

sınıflandırması gösterilmektedir. Sonuç olarak bitki türleri, karışım oranları ve pelet birim yoğunluğu dışındaki tüm indeks değerlerine ilişkin etkileşimler arasında önemli farklılıklar göstermektedir (Tablo 4.3). Bu nedenle incelenen indeksler iyi bir potansiyel göstermiş ve biyokütlenin biyoyakıt olarak yakıt kalitesini tahmin etmede bir araç olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Tablo 4.3. Enerji mahsullerinin (Faktör A) ve karışım oranının (Faktör B), arıtma çamurundan üretilen peletin indeks değerleri üzerindeki etkisine ilişkin varyans analizi (ortalama).

Değişkenler	df	PD	BD	BQI	Ed	FVI	Tutuşabilirlik İndeksi
Ürünler (A)	1	82.01 ^{ns}	11070.70**	20.54***	3.58**	6687.86***	1.85**
Karışım (B)	4	42771.70***	51626.10***	486.89***	3.33***	34005.40***	137.70***
A×B	4	283.49 ^{ns}	2258.19***	2.13*	0.40***	2797.36***	2.82***
Kalan	20	3555.33	38.47	0.50	0.03	15.92	0.15
Toplam	29						

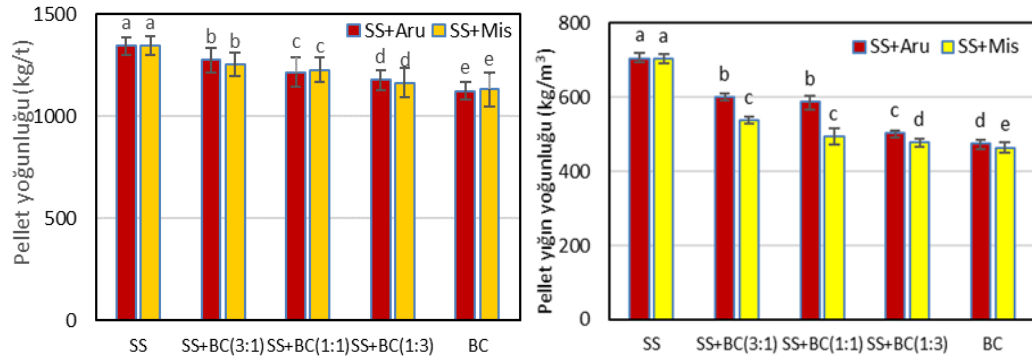
ns, *, **, ***: anlamlı değil ve sırasıyla $P < 0,05$, $0,01$ ve $0,001$ olasılık düzeylerinde anlamlı.

Peletler, ham biyokütleyle kıyasla sahip oldukları standart özellikler, yüksek kalorifik değer, yüksek yoğunluk ve dolayısıyla düşük nakliye, depolama ve yönetim maliyetleri gibi belirgin avantajlara sahip kompakt bir biyokütle yakıtı sağlamaktadır. Düşük nem içeriği ve yüksek yığın yoğunluğu ($>600 \text{ kg/m}^3$) sayesinde peletler, iyi yanma özelliklerine sahip yüksek enerji performanslı yakıtlar olarak kabul edilir.

Pelet birim yoğunluğu, hacim ağırlığı ve HHV sıkıştırılmış biyoyakıtın enerji yoğunluğunu belirlemektedir. Çalışmada tespit edilen yoğunluk verileri, hammaddelerden veya bunların karışımlarından üretilen peletler arasında önemli farklılıklar göstermiştir (Tablo 4.3). Hacim ağırlıkları düşük olan Arundo veya Miscanthus'un yoğunluğu nispeten daha yüksek olan arıtma çamuruna eklenmesi pelet birim yoğunluğu ve hacim ağırlığını gösteren kütle yoğunluğunu önemli ölçüde azaltmıştır.

Pellet yığın yoğunluğu saf arıtma çamurlarında 705 kg/m^3 olarak tespit edilmiş, Arundo karışımının % 25 oranında 600 ve % 50 karışımında 588 kg/m^3 olarak, standart kabul edilen 600 kg/m^3 değerine yakın bulunmuştur. Miscanthus karışımlarında ise bütün uygulamalarda 600 kg/m^3 değerinin altında gerçekleşmiştir (Şekil 4.4). Arundo bitkisinde tespit edilen yığın yoğunluğunun daha yüksek olması, bu bitkinin partikül yoğunluğunun daha yüksek olması, lignin oranının daha yüksek olması nedeniyle güçlü yapıştırıcı bağ oluşturması ve karışıma daha iyi uyum sağlamasından

kaynaklanabilir. Miscanthus bitkisinin gövdesi daha süngerimsi yapı göstermesi ve kimyasal yapısının farklı olması nedeniyle yığın yoğunluğu daha düşük gerçekleşmiş olabilir.



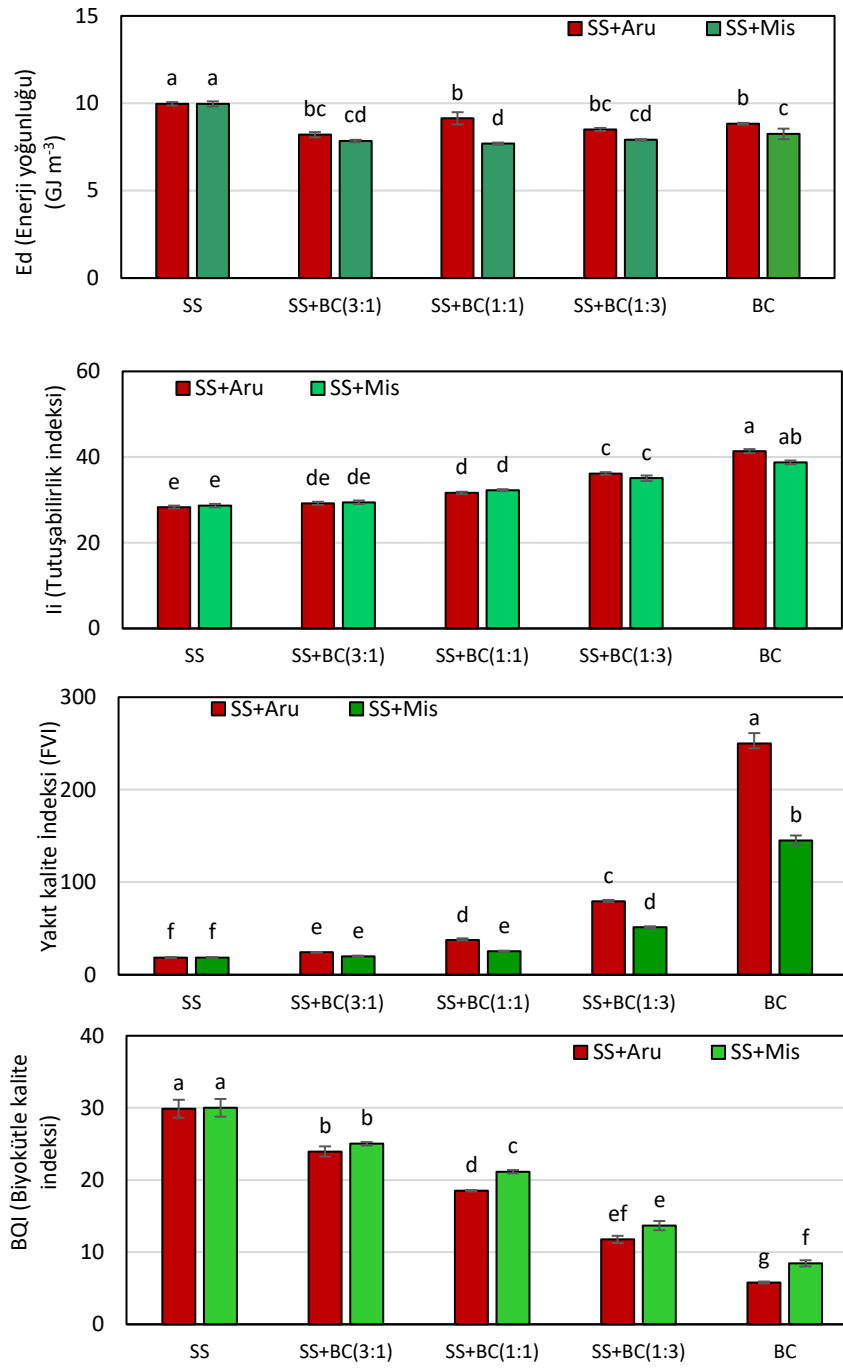
Şekil 4.4 Enerji bitkileri *Arundo donax* ve *Miscanthus × giganteus* karışımının arıtma çamuru peletlerinde pelet yoğunluğu ve yığın yoğunluğuna etkisi sunulmaktadır (SS: Arıtma Çamuru, BC: Enerji Bitkileri).

Pelet yoğunluğu, açık ve kapalı gözenekler hariç birim hacim başına parçacık kütlesi olarak tanımlanır. Peletleme işlemi değişkenleri (sıcaklık, basınç), biyokütle türleri ve özellikleri ve karıştırma oranları peletlerin yoğunluğunu etkiler. Bu çalışmada uygulanan sıcaklık ve basınç bütün akışımlarda aynıdır, farklılık sadece bitki türleri ve karışım oranlarından kaynaklanmıştır. Biyokütle türüne ve bunların ilgili karışımına bağlı olarak, artan biyokütle eklemesi oranlarında pelet yoğunluğunun azalması makro gözenek oranının azalması fakat mikro gözeneklerinin büzülmesine neden olmuş ve bu da daha küçük boşluk oranı ile sonuçlanmış, fakat arıtma çamuru ile biyokütle partikülü arasındaki temas yüzeyini artırmıştır. Dolayısı ile arıtma çamurundan kaynaklanan yapısal özellik makro ve mikro gözenek oranının düşük olmasından dolayı yanma yetersizliğine pozitif etki beklenmektedir.

Yanma karakteristiklerini araştırmak için termogravimetrik analiz yöntemlerini uygulayan Jiang ve ark, (2014), pelet yoğunluğunun basınç, çamur oranı ve sıcaklık gibi parametreler arttıkça arttığını göstermiştir. İlave olarak arıtma çamuru içinde biyokütle arttıkça yüksek sertlikte peletler elde edilmiş, çamur eklenmesi biyokütlenin heterojenliğinden kaynaklanan pelet sertliğini azaltmıştır. Peletleme için optimum nem içeriği %10-15 arasında gerçekleşmiştir. Biyokütle içindeki özellikle lignin oranı biyokütlenin daha fazla sıkışmasına, porozitenin azalmasına (Siyal ve ark, 2023) ve daha düzgün, pürüzsüz yüzeye sahip pelet oluşumuna imkan vermektedir (Şekil 3.8-3.15).

Pelet şekillerinin pürüzsüz, porozitenin düşük ve yoğunluklarının yüksek olmasına neden olan doğal bağlayıcılar bitki biyokütlesi kaynaklı öncelikli olarak lignin ve arıtma çamuru kaynaklı protein bileşikleridir (Kaliyan ve Morey, 2010). Çalışmada incelenen biyokütle kaynakları ve arıtma çamuru peletlerinin yoğunluk değerleri çamur oranına bağlı olarak yükselmiş, pürüzsüzlük özellikleri ise biyokütle oranıyla doğrusal ilişki göstermiştir. Çamurdaki azot oranının yüksek olması protein oranının yüksek olmasından kaynaklanmakta ve proteinin denatürasyon sıcaklığının yaklaşık 57 °C civarında olması ile biyokütle kaynaklı ligninin yumuşama sıcaklığının 75 °C civarında olması presleme aşamasında doğal bağlayıcı görevi görmüş ve yoğunluklar artmıştır. Bu bulgulara göre, pelet yoğunluklarının Arundo bitkisinde istatistiki olarak daha yüksek olması bu biyokütlenin Miscanthus biyokütlesine kıyasla daha yüksek lignin oranına sahip olmasından kaynaklanmış olabilir.

Bununla birlikte, pelet yoğunluğundaki önemli değişikliğe rağmen birim hacim başına GJ'ye dayalı enerji yoğunluğu, yığın yoğunluğunun azalmasına karşın bitki biyokütlesi ilavesiyle karışımın HHV'sinin artması nedeniyle işlemler arasında nispeten düşük bir varyasyon göstermiştir. Bitki örneklerinin arıtma çamuru örneklerine kıyasla daha yüksek enerji değeri, biyokütle-arıtma çamuru karışımlarının enerji içeriklerini yükseltmiştir. Ayrıca, karışım sonuçları, yakıt yoğunluğu ile kül içeriğindeki iyileşme arasında bir denge olduğunu göstermiştir. Arıtma çamuru pelet yoğunluğunu artırırken, bitki biyokütlesi enerji yoğunluğunu artırıcı etkide bulunmuştur. Yine bitki biyokütlesi artışı peletlerde tespit edilen kül oranını düşürmüş dolayısı ile enerji yoğunluğu endeks değerinde tespit edilen varyasyon düşük gerçekleşmiştir. Ayrıca Arundo karışımının Miscanthus'a kıyasla daha yüksek yığın yoğunluğu ve enerji yoğunluğu sağladığı da belirtilmektedir (Şekil 4.4). Bitki biyokütlesi eklenmiş peletlerde tespit edilen enerji içeriğinin yüksek olması, biyokütle yakıtı endeks değerlerini de iyileştirmiştir. Bulgular arıtma çamuru enerjinin bitki biyokütlesi ile iyileştirilebileceğini göstermiştir.



Şekil 4.5. Arıtma çamuruna uygulanan biyokütle yakıt kalite indeksi, biyoenerji bitkileri *Arundo donax* ve *Miscanthus × giganteus* ve bunların arıtma çamurunda artan orandaki karışımları sunulmaktadır (SS: Arıtma Çamuru, BC: Enerji Bitkileri).

Yapılmış olan bir çalışmaya göre, biyokütlerdeki yüksek C ve H içeriği, yakıt peletlerinin enerji değerlerini (Ulusoy ve ark, 2021) ve ayrıca kütle yoğunluğundaki değişimi artırabilmektedir. Bununla birlikte, arıtma çamuru ve enerji bitkisi mahsulü karışımı peletlerine yönelik enerji yoğunluğu Ed değerleri, daha önce bildirilen değerler aralığında (Wang ve ark, 2020) olup bu durum çalışmada denenen malzemelerin biyoyakıt üretimi için uygunluğunu göstermektedir. Yakıt değeri

endeksinden elde edilen sonuçlar, yüksek düzeyde arıtma çamuru içeren numunelerin daha düşük bir FVI değeri sunduğunu göstermektedir. FVI, Ed'in nem ve kül içeriğine olan oranını ölçmektedir. Enerji yoğunluğu düşük ancak kül ve nem içeriği yüksek olan numuneler, Vasileiadou ve ark. gibi daha önceki çalışmalarla uyumlu olan FVI indeksini azaltmıştır (Şekil 4.5). Enerji yoğunluğu ile kül içeriği arasında bir ilişki olduğunu ifade etmiştir. Çamur karışımı peletlerdeki enerji mahsullerinin, saf çamur peletlerine kıyasla kül içeriğinin azalması ve sabit karbon ve enerji yoğunluğunun artması nedeniyle yakıt kalitesini iyileştirdiği bulunmuştur. Sonuç olarak FVI indeksi Arundo karışımları için %76, Miscanthus karışımları için ise %64'ü göstermektedir.

Biyokütle yakıt parametrelerini olumlu veya olumsuz etkileyen PQI'nin toplamını ifade eden BQI, incelenen hammadde kaynaklarını ve bunların karışımlarını daha kapsamlı bir şekilde sınıflandırır. Şekil 4.5'teki BQI sonuçları, Arundo ve Miscanthus'un karışımındaki miktarların artmasıyla indeks değerini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Karışımın BQI değerlerinin aralığı 25,3 ila 11,77 aralığında belirlenmiştir. Bu aralık, farklı biyokütle için bildirilen değerlerle karşılaştırıldığında dar bir aralıktır (Rocha ve ark, 2020; Espinoza-Monje ve ark, 2023). Yapılan çalışmalara göre düşük BQI, biyokütle yakıt kalitesinin arttığını gösterir (Rocha ve ark, 2020). Bu varsayıma dayanarak her iki enerji bitkisi türü de indeks değerini doğrusal olarak azaltmıştır. Ancak Arundo'nun olumlu etkisi daha belirgindir. Bu, Arundo'nun Miscanthus'tan daha fazla lignoselüloz içeren kimyasal bileşim özellikleriyle açıklanabilir. Çünkü lignin, selüloz ve hemiselüloz daha fazla karbon fakat daha az oksijen içerir (Özdemir ve Demir, 2021).

Genel olarak arıtma çamuru, yüksek kül içeriği ve nispeten düşük düzeyde uçucu madde ve sabit karbon nedeniyle düşük yakıt kalitesine sahiptir. Arıtma çamurunun kurutulması ısıtma değerini artırır; ancak yüksek düzeyde kül ve nispeten düşük düzeyde uçucu madde, alevli yanmayı bozar ve tutuşmayı hızlandırır. Bu çalışma aynı zamanda biyokütle karışımının tutuşabilirliği iyileştirdiği hipotezini de test etmektedir. Çamura bitki biyokütlesinin eklenmesi, %25'lik bir karışımındaki peletin tutuşabilirlik endekslerini önemli ölçüde değiştirdi. Çamur karışımına %75 bitki biyokütlesi ilavesi ile kademeli tutuşabilirlik 35'in üzerine çıkmıştır. Bununla birlikte, biyokütle tesislerinin yalnızca %75'inin katılımı, bir kazanda verimli bir şekilde kullanılabilen tutuşabilirlik indeksi değerlerini 35'in üzerine çıkarmıştır (Gajera ve ark, 2023). Yüksek uçucu içerik, hızlı yanmayı ve daha alevli yanmayı teşvik eder (Li ve ark, 2016). Bu bağlamda, mahsul biyokütlesinin sağladığı yüksek uçucu içerik, yüksek

sıcaklıklarda külle ilgili yaygın sorunları önlemek amacıyla düşük sıcaklıklarda hızlı tutuşma açısından faydalıdır.

4.5. Lignoselülozik Materyal

Enerjice zengin biyokütle bitkilerinin, en önemli enerji yoğun organik bileşenleri, enerji yoğunluklarına göre sırasıyla, lignin, hemiselüloz ve selülozdur (Vassilev ve ark, 2012). Selüloz ve hemiseliloz miktarı *Miscanthus × giganteus* bitkisinde daha yüksek tespit edilmiş, lignin değerinin ise *Arundodonax* bitkisinde daha yüksek olduğu bulunmuştur. Önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi, selüloz, hemiselüloz ve lignin içeriği ve miktarı bitki türlerinin karakteristik özelliğidir, bitki besin elementi ve miktarının miktar ve kompozisyona etkisi oldukça sınırlıdır (Brosse ve ark, 2012). Biyokütle kompozisyonu sonuçları, selülozun %35-40, hemiselülozun %25-30 ve ligninin %25-30 aralığında değişim gösterdiğini belirten literatür bilgileri ile uyum içindedir (Vassilev ve ark, 2010; Lygin ve ark, 2011). Literatürde verilen aralıklar içinde değişim, bitki türleri arasındaki farklılık, yetiştirme koşulları, bitki hasat zamanı ve analizi yapılan bitki bölümü ile kullanılan analitik yöntemden kaynaklanmaktadır (Monti ve ark, 2008; Di Nasso ve ark, 2010; Helios ve ark, 2014).

Tablo 4.4 Enerji bitkilerinin organik bileşenleri

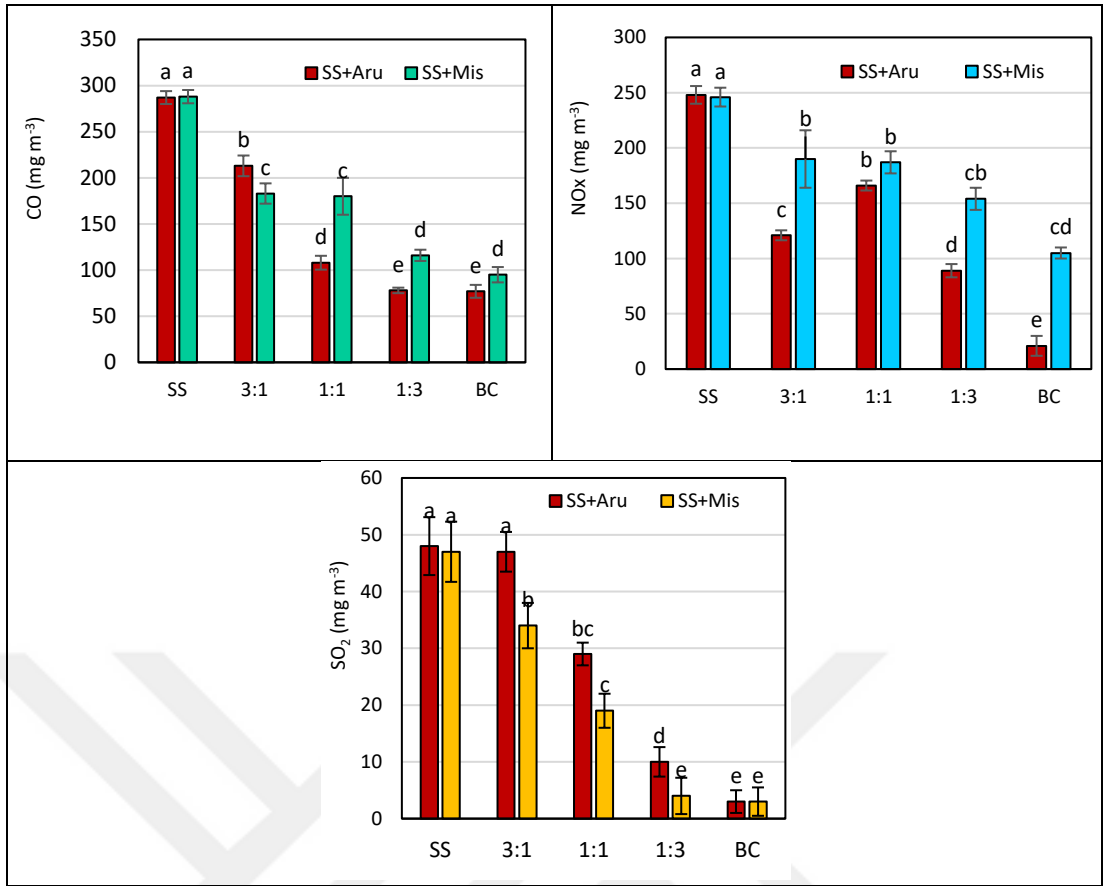
	MSC	AD
Selülöz	49,05	40,52
Karışım	26,3	25,1
Lignin	11,04	16,92

4.6. Gaz Emisyonları

Arıtma çamuru içeren biyokütle peletlerinin yanması sırasında, hava kalitesini ve dolayısıyla insan sağlığını önemli ölçüde etkileyebilecek hem partikül hem de gaz emisyonlarına neden olabilmektedir. Biyokütlenin kimyasal içeriğine bağlı olarak ön plana çıkan gaz emisyonlar; azot oksitler (NO_x) ve kükürt oksitler (SO_x), karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbonlar (C_xH_y) ve partikül madde (PM) gibi standart laboratuvar koşulları altında ölçülen bileşiklerdir (Ozdemir ve ark, 2018). Bu nedenle, emisyonu neden olan kirleticilerinde incelenmesi önem taşımakta ve yönetmeliklerde izin verilen limit değerlere uygunlukları açısından değerlendirmeleri

gerekmektedir. İdeal-tam yanma koşullarında, baca gazı emisyonunda sadece CO₂, N₂ ve H₂O olması beklenir. Bununla birlikte, gerçek uygulamalarda, kullanılan hammaddelerde bulunan çeşitli kirleticiler, yüksek yanma sıcaklığı, yakıtı gerekli miktarda oksijenle karıştırmak için düşük türbülans ve biyokütle bileşenlerinin tamamen tüketilmesini sağlamak için optimum kalma süresi gibi çeşitli faktörler nedeniyle biyokütle yakıtlarının mükemmel yanması neredeyse gerçekleşmez. Bu nedenle, gaz emisyonlarında NO_x, SO_x ve CO tespit edilebilir ve konsantrasyonları yakılan yakıtın bileşiminden büyük ölçüde etkilenir.

Dolayısı ile biyokütlenin yanması sırasında, ortaya çıkan gaz halindeki kirleticilerin emisyon özellikleri biyokütle kalitesinin önemli göstergeleridir. Bu nedenle yakıt kalitesini ifade etmek için gaz emisyonları araştırılmıştır. Biyokütlenin yakılmasında SO₂ ve NO_x, biyokütleden yayılan en önemli kirleticiler olarak kabul edilmektedir. Çamur, Arundo ve Miscanthus ve bunların karışımları için egzoz gazı emisyonlarındaki değişiklikleri (CO, NO_x ve SO₂) saf bitki biyokütlesine kıyasla artan çamur oranlarıyla göstermektedir. Beklendiği gibi bitki biyokütlesi katılım oranları CO, NO_x ve SO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltmıştır (Şekil 4.6). Ek olarak, NO_x ve SO₂ emisyonları yakıttaki nitrojen ve kükürt içeriğiyle pozitif korelasyon göstermiştir. Dolayısıyla arıtma çamuru alınan arıtma tesisleri için oran daha yüksek ve anlamlıdır ($p < 0.01$). Bu çalışmada N içeriği %4,46 (saf çamur) ile %2,33 (1:3 çamur:Miscanthus) aralığında olduğu tespit edilmiştir. Yakıtın N içeriğine bağlı olarak ortalama NO_x emisyonları, Miscanthus ile karıştırılanlarla karşılaştırıldığında Arundo tedavileri durumunda %21 oranında daha azdır. Bu, biyokütlenin yanması sırasında üretilen NO_x emisyonlarının çoğunun yakıtı bağlı nitrojenden kaynaklandığı gerçeğiyle açıklanabilir. Biyokütlerdeki artan N içeriği normalde yanma işlemi sırasında NO_x emisyonlarını artırır (Öztürk ve Dinçer, 2020). Bununla birlikte, arıtma çamuru ve enerji mahsulü karışımları için ölçülen NO_x emisyonları, ulusal ve Avrupa'da izin verilen 300 mg Nm⁻³ standardının altında çıkmıştır (SKHKK, 2009; Villeneuve ve ark, 2012).



Şekil 4.6. *Arundo donax* ve *Miscanthus × giganteus*'tan kaynaklanan gaz yanma emisyonları ve bunların arıtma çamurunda artan orandaki karışımları (SS: Arıtma Çamuru, BC: Enerji Bitkileri).

Öte yandan, karışımların O₂, CO₂ ve CO gibi hava emisyonlarından etkilendiğini gösteren hiçbir istatistiksel kanıt yoktur. O₂, CO₂ ve CO konsantrasyonları için benzer sonuçlar Garcia-Marever ve ark. tarafından rapor edilmiştir (2015). Araştırmacılar gözlemlerini, eksik yanmanın oksidasyonuna ve biyoyakıtın doğal oksijen içeriği ve yanma sıcaklıkları nedeniyle CO ve CO₂ emisyonlarının iyileşmesine bağlamışlardır. Bu sonuçlar Wang ve ark.'nın sonuçlarıyla tutarlıdır (2020). Gaz emisyonlarına maruz kaldıktan sonra yanma koşullarının değiştirilmesinin etkili bir şekilde azaltılabileceğini bulmuştur.

Yine pelet haline getirilmiş biyoyakıt malzemelerinin enerji değeri üzerinde büyük öneme sahip parametreleri olan yaklaşık analiz (kül, uçucu madde, rutubet, sabit karbon) değerleri ile elementel analiz (CHNS) analizleri yapılmıştır. İlave olarak yanma gazı analizleri (Oksijen, Karbondioksit, karbonmonoksit, azot oksit, azotdioksit ve kükürtdioksit) gerçekleştirilmiştir.

4.7. İmaj Analiz Sonuçları

Biyokütle peletine uygulanan standart prosedürlerle yapılan yakın ve nihai analizlere ek olarak, yanma davranışlarını da bir görüntü analizi prosedürü kullanarak değerlendirdik. Bu ek yanma davranışı modeli ana hipotezlerimizi tamamlayıcı bilgiler sağlamaktadır (Yılmaz ve ark, 2018). Çünkü önceki bir araştırma atık su çamurunun farklı lignoselozik biyokütlerle birlikte yakılmasının yanma davranışını iyileştirebileceğini ve enerji değerlerini dengeleyebileceğini öne sürmüştür. Görüntü analizi yaklaşımlarının yanma davranışına hızlı bir yanıt verdiği ve yanma kalitesinin önemli dinamik göstergeleri olduğu gösterilmiştir (Soosai ve ark, 2021).

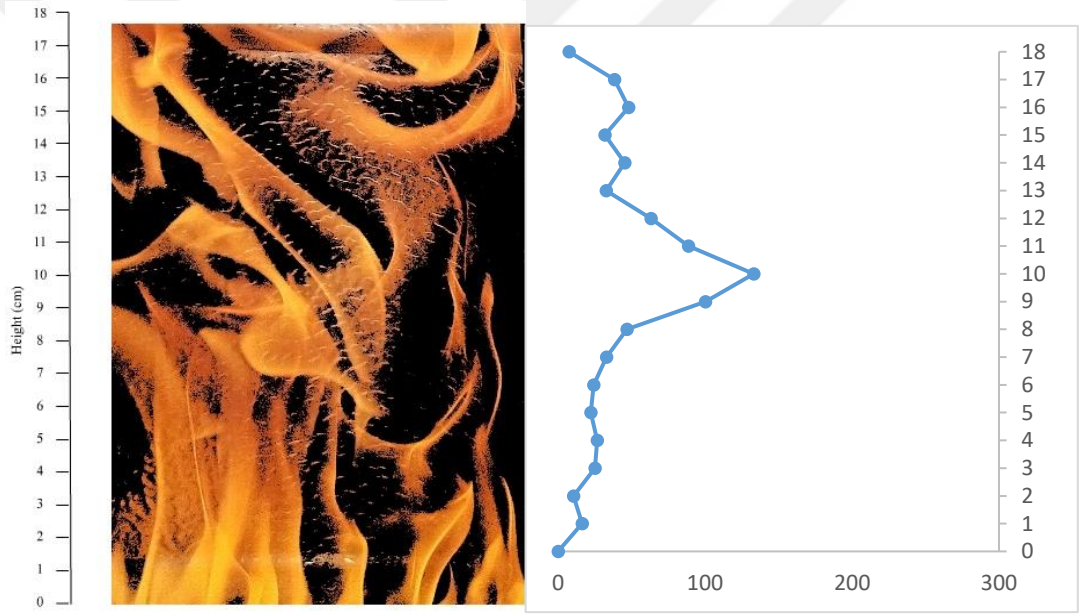
Bu çalışmada, AD ve MSC olarak adlandırılan yakıt peletlerinin yanma işlemi sırasında elde edilen yanma özellikleri görüntü analizi yazılımı kullanılarak ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Gri tonlama yoğunluğunu ve buna karşılık gelen RGB yoğunluklarını elde etmek için alev görüntüleri seçilmiş ve Python ile donatılmış ImageJ yazılımı kullanılarak işlenmiştir.

Sadece arıtma çamurlarından elde edilen AD₀ ve MSC₀ pelet numuneleri 5 dakikalık yanma süresi boyunca yanmamıştır. Genel olarak AD ve MSC pelet numunelerinin yanma durumuna bakıldığında MSC peletleri AD pelet numunelerinden daha hızlı yanmıştır.

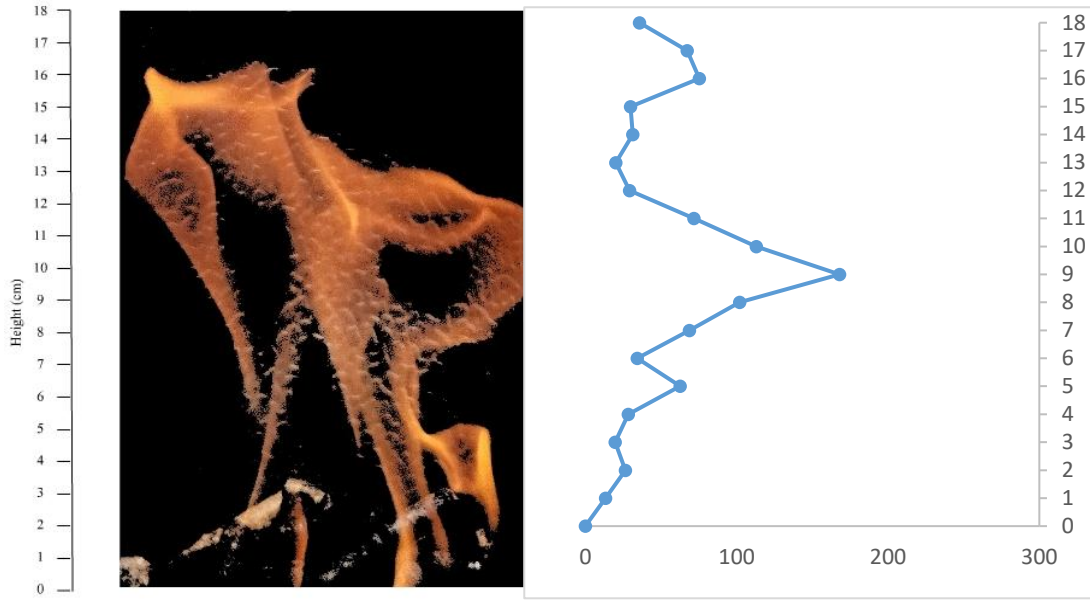
Image-J yazılımı, Origin-pro yazılımı tarafından tam yanma süresi analiz edilerek elde edilen en iyi temsili yanma resminin tam yanma süresinde görüntü veri analizi için kullanılmıştır. Elde edilen görüntüler, arka planı koyulaştırarak doğruluğu azaltmaktan kaçınarak düşük yoğunluklu pikselleri kaldırmak için ön işleme tabi tutulmuştur. Bu nedenle, görüntüdeki siyah rejim bu konumda hiçbir yanma veya alev oluşumu gerçekleşmediğini temsil etmektedir. Alev görüntülerindeki renk ve kırmızı renk yoğunluğunun ortalamasından elde edilen alev zenginliğini belirlemek için belirli sayıda piksel 1 cm ve ızgaralar kullanılarak dikdörtgen alanlar olarak ayarlanmıştır. Bu ızgaraların her birinden tahmin edilen kırmızı renk yoğunluğu ortalamalarının toplamı her bir numune için Şekil 4.6 ve Şekil 4.13 arasında sunulmuştur. Kırmızı renk alevi hızla büyümüş ve AD peletleri için net bir salınım davranışı gözlenmiştir.

Bu model, başarılı bir yakma için temel ihtiyacı tahmin etmek amacıyla enerji açısından zengin atıksu arıtma çamuru üzerinde lif açısından zengin biyokütle arasındaki pozitif ilişkiye ikna edici bir destek sağlamıştır. Aslında bu yöntem, alev

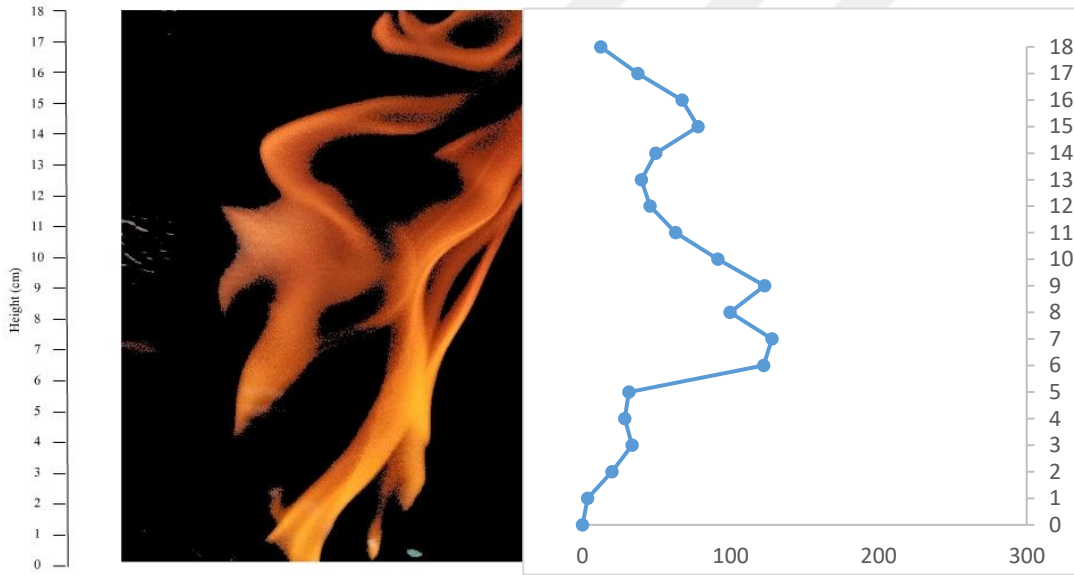
rejiminin daha iyi anlaşılması ve mevcut çalışmada test edilen biyokütlenin yanma özelliklerinin ayırt edilmesi için faydalı sonuçlar sağlamıştır. Benzer görüntü analizi deneyleri, biyokütle alevinin tutuşma süresinin, zenginliğinin ve kırmızı renk yoğunluğunun AD ve MSC pelet yakıtlarındaki karışım oranıyla arttığını göstermiştir. Bu nedenle, bu çalışmanın sonucuna bakıldığında AD ve MSC enerji bitkilerinin arıtma çamuru ile yüksek oranlarda karıştırılması ile elde edilen pelet kombinasyonlarının arıtma çamurunun yakıt ve yanma özelliklerini geliştirdiği sonucuna varılmıştır. Özellikle, AD₂ numunesinin en yüksek kırmızı renk yoğunluğuna ulaşması, bu peletin yanma özelliklerinin diğer numunelere göre daha üstün olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, MSC₂'nin daha iyi bir yanma performansı sergilediğini ve dolayısıyla enerji üretiminde daha etkili bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır.



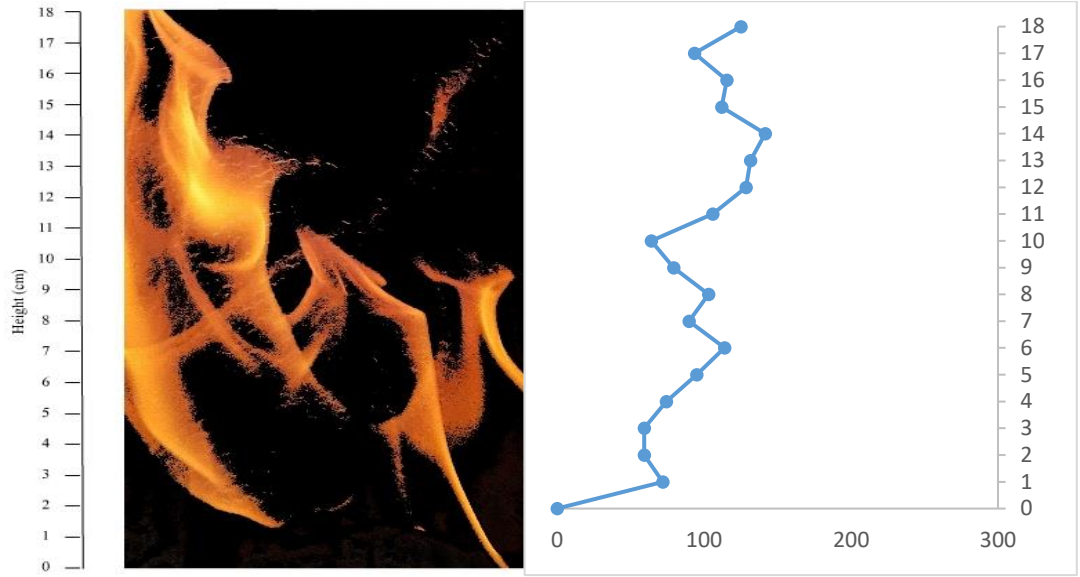
Şekil 4.7. AD₁ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri



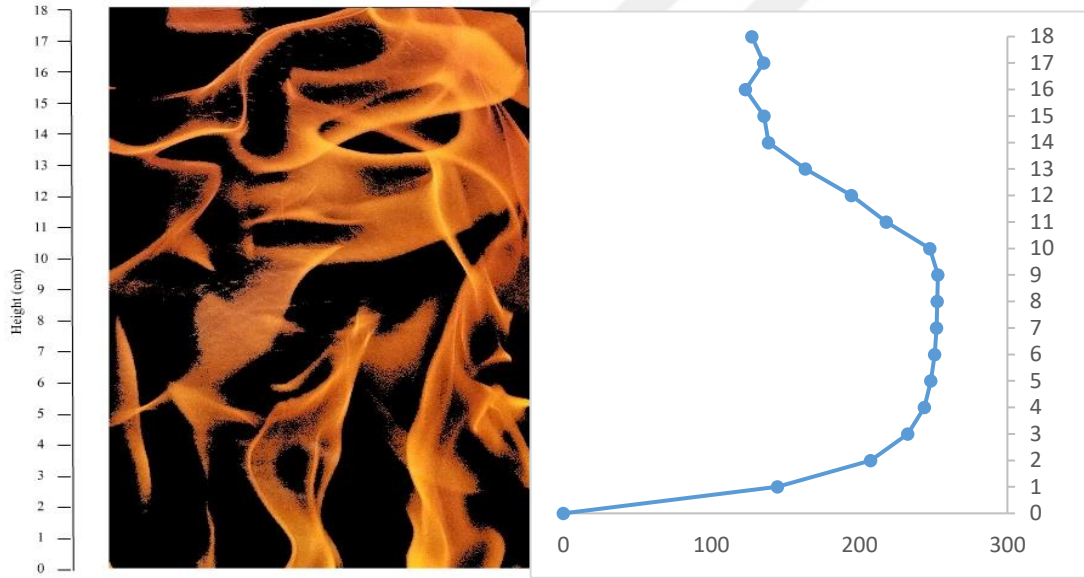
Şekil 4.8. AD₂ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri



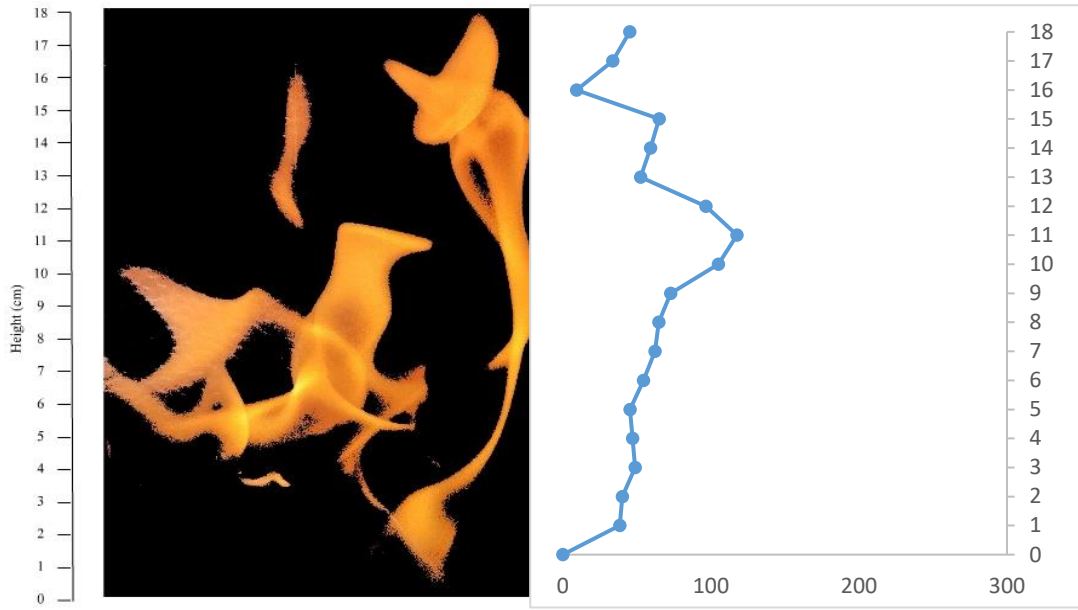
Şekil 4.9. AD₃ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri



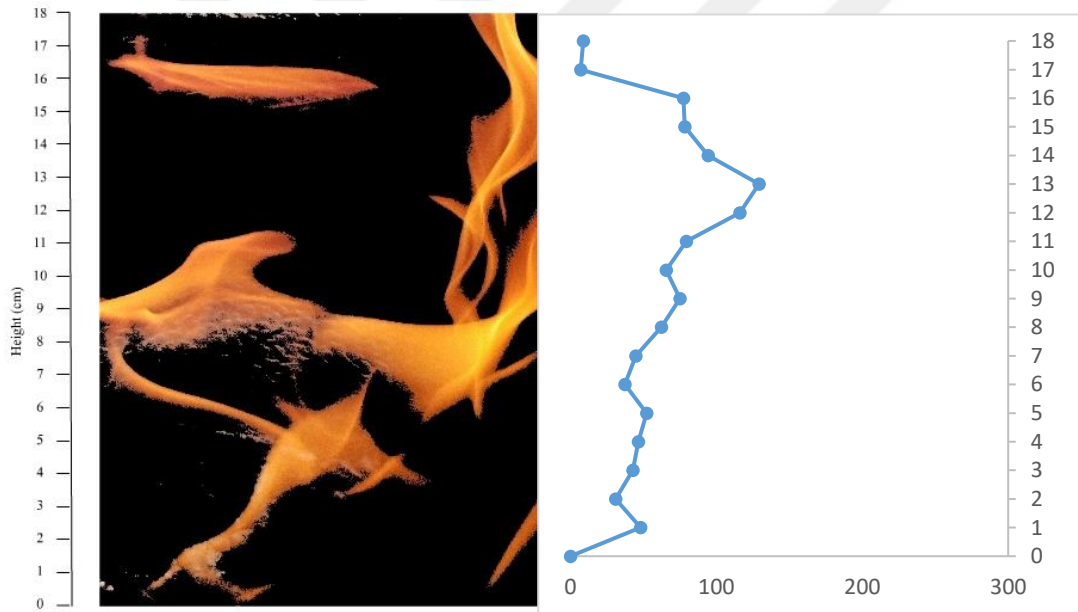
Şekil 4.10. AD₄ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri



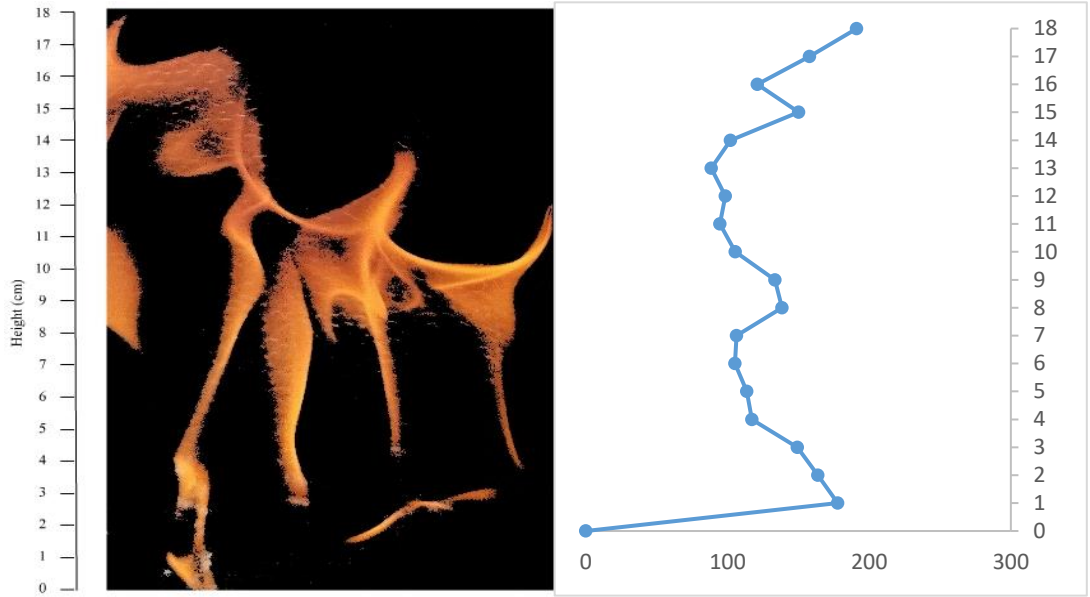
Şekil 4.11. MSC₁ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri



Şekil 4.12. MSC₂ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri



Şekil 4.13. MSC₃ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri



Şekil 4.14. MSC₄ Pelet için uygulanan görüntü analizi ve kırmızı renk piksel yoğunluk değerleri

Atıksu arıtma çamurlarının enerji bitkisi karışımı bazlı peletlerin yanması, bunların saf arıtma çamurundan daha yüksek reaktivite ile karakterize edildiğini göstermiştir. Bu bulgular, atıksu arıtma çamurunun lignoselülozik enerji bitkileri ile karışımlarını inceleyen ve yakıttaki daha yüksek biyokütle katkısının daha düşük tutuşma sıcaklığına neden olduğunu bildiren diğer yazarların (Ozdemir ve ark, 2022) bulguları ile uyum içindedir. Karışımda enerji bitkisi biyokütlesi arttıkça alev hacminin arttığı, kırmızı renk tonunun yükseldiğini bildiren gözlemler ile uyum içindedir (Polesek-Karczewska ve ark, 2018; Pehlivan ve ark, 2024). Biyoyakıt karışımındaki arıtma çamuru oranının artması yanma aşamasında uçucu maddelerin salınımını yavaşlatır (Jiang ve ark, 2014). Arıtma çamuru oranının artışına paralel olarak, yanma süresinin uzaması, alev hacminin azalması görülen etkiler arasındadır. Bunun tersine, karışımdaki bitki biyokütlesi artışına bağlı olarak tutuşma süresinin kısılması ve alev hacminin artması biyokütlenin pozitif etkisini göstermektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, atık su arıtma tesisinde arıtılan atıksulardan yetiştirilen enerji bitkileri ile arıtma çamurunun harmanlanması ve karışımın yanmasını artırmak için *Arundo donax* L. ve *Miscanthus × giganteus* enerji bitkilerinin etkileri belirlenmiştir. Enerji bitkilerinin hammadde bileşimi, enerji içeriği, kalite endeksi ve gaz emisyonları üzerindeki etkileri çok faktörlü ANOVA ile analiz edilen tamamen rastgele blok tasarım deneyi çerçevesinde araştırılmıştır. Enerji bitkileri biyokütle değişikliğinin yaklaşık, nihai analiz parametreleri, ısıtma değeri, biyokütle kalite endeksi ve yanma emisyonları üzerindeki etkileri, enerji mahsulü türleri ve karışım oranları için istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıda sıralanan sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Arıtma çamuruna % 25, % 50 ve % 75 oranında *Arundo* ve *miscanthus* biyokütle samanı eklenmesi peletleme aşamasında iki malzeme arasında temas yüzeylerini artırmış, makro poroziteyi azaltarak özellikle çamurda mikro porozite oluşumunu teşvik ederek peletlerinin yoğunluğunu azaltmıştır. *Arundo* % 25 ve kısmen % 50 oranında standart yığın yoğunluğu arzu edilen değeri olan 600 kg/m³ limit değerini sağlamıştır.
- 2) Arıtma çamuru ile *Arundo* ve *Miscanthus* enerji bitkilerinin belirli oranlarda karıştırılması ile artan bitki biyokütle oranına bağlı olarak yaklaşık analiz parametreleri giderek yükselmiştir. *Arundo* enerji bitkisinin en belirleyici etkisinin ise kül ve uçucu madde içeriği üzerinde bulunduğu belirlenmiştir.
- 3) Araştırılan tüm nihai analizler arasında, LSD testiyle elde edilen C ve H'deki anlamlı artışların aksine, N ve S'nin oranlarında önemli bir azalma göstermiştir. Farklılıklar daha küçük olmasına rağmen, *Arundo* bitkisindeki C ve H'nin enerji içeriğinin katkısının *Miscanthus*'unkinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- 4) Enerji bitkilerinin selüloz, hemiselüloz ve lignin içeriklerinde gözlemlenen farklılıkların küçük ve önemsiz olduğu görülmüştür. Bu nedenle, bitki örneklerinin üst ısı değeri (HHV), biyokütle oranının artmasında çamur karışımlarının HHV'sini benzer şekilde ve önemli ölçüde desteklemiştir.

- 5) Arıtma çamuruna enerji bitkilerinin eklenmesi, tutuşabilirlik indeksi, yakıt değeri indeksi ve biyokütle kalite indeksi dahil olmak üzere yakıt kalite indeksi değerlerini önemli ölçüde iyileştirmiş ve esas olarak kül ve nem içeriğini azaltmış ve HHV'yi arttırmıştır.
- 6) Arıtma çamurundaki artan Azot (N) ve Kükürt (S) konsantrasyonları, gaz emisyonlarındaki NO_x ve SO₂'yi artırmıştır, ancak biyokütle ile birlikte yakma sonucunda emisyonlar, Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde izin verilen standartlar dahilindeki aralıkları yakalamıştır.
- 7) Çalışmanın geneline bakıldığında, atıksu arıtma çamuru ve içeriği açısından besin zenginliği bulunan atıksu arıtma tesisinde arıtılmış atıksu kullanılarak yetiştirilen enerji bitkilerinin üretimi, atık yönetimi ve biyoenerji hammadde üretimi ve arıtma çamurunun birlikte yakılması için yeniden bitkilendirme açısından daha sürdürülebilir olabileceğini göstermiştir.
- 8) İçerik olarak, arıtma çamurlarının bölgelere göre farklılık gösterecek olması ihtimali göz önüne alındığında, arıtma çamurunun bertarafı için enerji bitkileri ile pelet yapılarak bertarafının sağlanması, yenilenebilir kaynakları kullanarak atık bertarafı için uygun bir yöntem olabileceğini göstermiştir.
- 9) Günlük güneş alma süresinin uzun olduğu ve arıtma çamurunun güneş ışığı ile kurutulabileceği bölgelerde yöntemin uygulanabilir olduğu düşünülmektedir.
- 10) Yaklaşık analiz, elemental analiz, ısı değeri, yakıt endeksleri ve gaz emisyonlarının kapsamlı bir karşılaştırması sonucunda, %50 biyokütle ve %50 arıtma çamurundan oluşan karışık yakıtların yanmayı destekleyebileceğini ve emisyonları azaltabileceğini göstermektedir.
- 11) Yapılan çalışmalarda, Arundo enerji bitkisinin Miscanthus enerji bitkisinden daha iyi biyoyakıt özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir.
- 12) Literatür verileri göz önüne alındığında Miscanthus bitkisi için 12,9-60 ton/ha, Arundo bitkisi için 30-59 ton/ha verim alındığı belirlenmiştir. Miscanthus bitkisi için düşük verim 12,9 ton arıtma çamuruna ve yüksek verim 60 ton arıtma çamuruna ihtiyaç duyulmaktadır (1:1 oranında karışım ve hava kuru olarak ağırlık). Arundo bitkisi için düşük verimde 30 ton arıtma çamuruna ve yüksek verimde 59 ton arıtma çamuruna ihtiyaç duyulmaktadır (1:1 oranında karışım ve hava kuru olarak ağırlık).

Tez projesi çerçevesinde incelenen biyokütle enerji bitkisi türlerinin bölgede yetiştirilmesinin iklimsel olarak uygun olması, kuru biyokütle verimlerinin yüksek olması, biyotkütlenin yenilenebilir bir enerji kaynağı olması, evsel nitelikli arıtma çamurlarının yakılarak bertarafında ümitvar birlikte yakma malzemesi olması ve atık bertarafı için fosil ve tükenbilir yakıtlarının yerine kullanılabileceğini göstermesi, doktora tezimizin sıfır atık felsefesine uygun olması sebepleri söz konusu çalışmanın endüstriyel boyutlarda uygulanabileceğini göstermiştir.

Çalışmanın sınırlamaları arasında ise gerçek ölçekli birlikte yakma için ekipman seçimi, ölçeği ve kül emisyonlarının da olması gelmektedir. Farklı akışkan yataklı kazan türü kullanıldığında sonuçları farklı olabilir. Arıtma çamurlarının enerji bitkileri ile birlikte yakılması hakkında daha derinlemesine bilgi sahibi olmak için, kaynaktan enerjiye kapsamlı bir yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yapılması birlikte yakma sistemi hakkında daha fazla bilgi sağlayabilir.



KAYNAKLAR

- Akdağ, A. S., Atak, O., Atımtay, A. T., & Sanin, F. D. (2018). Co-combustion of sewage sludge from different treatment processes and a lignite coal in a laboratory scale combustor. *Energy*, 158, 417-426.
- Amin, Z., Salihoğlu, N. K. (2021). Evaluation of free water removal from different sludge by solar energy utilization. *Environ. Eng. Res.* 26(3): 200088. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.088>
- Anyaocha, K. E. (2022). Synergistic perspective on biomass co-utilization in thermochemical processes. *Bioresour Technol Report*. 101043. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101043>
- Ateş, A. E., Ateş, S., Aydın, M. İ., Selçuk, H., Aydın, S. (2024). Avrupa Ülkelerinde Çamur Bertaraf Stratejilerine Etki Eden Faktörler. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(3), 1447-1460
- Aydın-Kandemir, F., Sarptaş, H. (2022). Toprak Üstü Biyokütle Potansiyelinin CBS ve Uzaktan Algılama ile Belirlenmesi–Yeni Bir Yaklaşım. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(70), 165-178.
- Aydın, S., Ulvi, A., Bedük, F., Aydın, M. E. (2022). Pharmaceutical residues in digested sewage sludge: Occurrence, seasonal variation and risk assessment for soil. *Sci Total Environ.* 817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152864>
- Baxter, X. C., Darvell, L. I., Jones, J. M., Barraclough, T., Yates, N. E., Shield, I. (2014). *Miscanthus* combustion properties and variations with *Miscanthus* agronomy. *Fuel*, 117, 851-869. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.003>
- Belloulid, M. O., Hamdi, H., Mandi, L., Ouazzani, N. (2019). Solar drying of wastewater sludge: a case study in Marrakesh, Morocco. *Environ Technol.* 40(10), 1316-1322. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1421713>
- Bianchini, A., Bonfiglioli, L., Pellegrini, M., Sacconi, C. (2015). Sewage sludge drying process integration with a waste-to-energy power plant. *Waste Manage.* 42, 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.020>
- Bilandzija, N., Jurisic, V., Voca, N., Leto, J., Matin, A., Sito, S., Kricka, T. (2017). Combustion properties of *Miscanthus x giganteus* biomass–Optimization of harvest time. *J Energy Inst.* 90(4), 528-533. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.05.009>
- Bosco, S., o Di Nasso, N. N., Roncucci, N., Mazzoncini, M., Bonari, E. (2016). Environmental performances of giant reed (*Arundo donax* L.) cultivated in fertile and marginal lands: a case study in the Mediterranean. *European Journal of Agronomy*, 78, 20-31.

- Brosse, N., Dufour, A., Meng, X., Sun, Q., Ragauskas, A., (2012), Miscanthus: a fast growing crop for biofuels and chemicals production. *Biofuel. Bioproduct. Biorefining.* 6(5), 580-598.
- Cano-Ruiz, J., Fernández, J. R., Alonso, J., Mauri, P. V., Lobo, M. C. (2021). Value-added products from wastewater reduce irrigation needs of *Arundo donax* energy crop. *Chemosphere*, 285, 131485.
- Carnevale, M., Longo, L., Gallucci, F., Santangelo, E. (2022). Influence of the harvest time and the airflow rate on the characteristics of the *Arundo* biochar produced in a pilot updraft reactor. *Biomass Conv. Bioref.* 12, 2525–2539. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01241-8>
- Ceotto, E., Castelli, F., Moschella, A., Diozzi, M., Di Candilo, M. (2015). Cattle slurry fertilization to giant reed (*Arundo donax* L.): biomass yield and nitrogen use efficiency. *BioEnergy Research*, 8, 1252-1262.
- Ceotto, E., Vasmara, C., Marchetti, R., Cianchetta, S., Galletti, S. (2021). Biomass and methane yield of giant reed (*Arundo donax* L.) as affected by single and double annual harvest. *GCB Bioenergy*, 13(3), 393-407.
- Chen, J., He, Y., Liu, J., Liu, C., Xie, W., Kuo, J., Zhang, X., Li, S., Liang, J., Sun, S., Buyukada, M., Evrendilek, F. (2019). The mixture of sewage sludge and biomass waste as solid biofuels: Process characteristic and environmental implication. *Renew Energ.* 139, 707-717. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.119>
- Cheng, S., Li, Z., Gao, R., Wang, X., & Mang, H. P. (2014). Methodology development of evaluating agricultural biomass potential for biomass power plant in China. *Energy Procedia*, 61, 13-16.
- Chinsung Mock, Hookyung Lee, Sangmin Choi, Vasilije Manovic (2017). Flame structures and ignition characteristics of torrefied and raw sewage sludge particles at rapid heating rates. Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.055>, 200, 467-480.
- Combustion Characteristics and Slagging during Co-Combustion of Rice Husk and Sewage Sludge Blends, *Energies*, (2017), 10(4), 438; <https://doi.org/10.3390/en10040438>
- Cano-Ruiz, J., Plaza, A., Pinilla, P., Mauri, P. V., Lobo, M. C. (2021). Valorization of treated sewage sludge for *Arundo donax* production in a field experiment. *Industrial Crops and Products*, 170, 113702.
- Dede G., Saşmaz Z. Banu, Ozdemir S., Caner C., Dede C., (2023), Investigation of heavy metal and micro-macro element speciation in biomass ash enriched sewage sludge compost, *Journal of Environmental Management*, 344, 118330, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118330>.
- Di Nasso, N. N., Angelini, L. G., Bonari, E., (2010), Influence of fertilisation and harvest time on fuel quality of giant reed (*Arundo donax* L.) in central Italy. *Eur. J. Agron.* 32(3), 219-227.
- Dramé, S. I., Oba, O. A., Pasaoglulari Aydinlik, N. (2023). Environmental and ecological risk assessment of municipal sewage sludge management using a sustainable solar drying system. *Water Sci Technol.* 88 (1): 151-168. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.199>

- Dubis, B., Jankowski, K. J., Załuski, D., Sokólski, M. (2020). The effect of sewage sludge fertilization on the biomass yield of giant miscanthus and the energy balance of the production process. *Energy*, 206, 118189.
- Ersoy, Ö., Özbay, M. (2023). Marmara Bölgesinde Bulunan Organize Sanayi Bölgelerinin Atık Su Arıtma Tesislerinde Oluşan Arıtma Çamurlarının Enerji Kaynağı Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi. *Bilim Armonisi*, 6(1), 64-81.
- Espinoza-Monje, J. F., Saiz, G., Cifuentes, G., Muñoz, R., Valdebenito, F., Ramírez, G., Ariz, S., Azócar, L. (2023). Management of invasive shrubs to mitigate wildfire through fuel pellet production in central Chile. *Fuel*, 354, 129342. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129342>
- Filibeli, A., Ayol, A., Büyükkamacı, N. (2022). Arıtma Çamurlarının Yönetimi ve Maliyeti: Gediz Havzası Arıtma Çamuru Yönetimi Projesi. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 23(1), 79-90.
- First published: (11 April 2017), <https://doi.org/10.1002/cjce.22861>Citations: 11, the canadian journal of hemical engineering
- Gajera, B., Datta, A., Gakkhar, N., Sarma, A., (2023). Torrefied mustard straw as a potential solid biofuel: A study with physicochemical characterization, thermogravimetric and emission analysis. *Bioenerg. Res.* <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10600-y>
- Garcia-Maraver, A., Perez-Jimenez, J. A., Serrano-Bernardo, F., Zamorano, M. (2015). Determination and comparison of combustion kinetics parameters of agricultural biomass from olive trees. *Renew Energ.* 83, 897-904. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.049>
- Ge, X., Xu, F., Vasco-Correa, J., Li, Y. (2016). Giant reed: A competitive energy crop in comparison with miscanthus. *Renew Sustain Energ Rev.* 54, 350-362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.010>
- Gebreegziabher, T., Oyedun, A. O., Luk, H. T., Lam, T. Y. G., Zhang, Y., & Hui, C. W. (2014). Design and optimization of biomass power plant. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(8), 1412-1427.
- Gubišová, M., Horník, M., Hřčková, K., Gubiš, J., Jakubcová, A., Hudcovicová, M., Ondřejčková, K. (2020). Sewage sludge as a soil amendment for growing biomass plant *Arundo donax* L. *Agronomy*, 10(5), 678.
- Helios W., Kozak M., Malarz W., Kotecki A., (2014), Effect of sewage sludge application on the growth, yield and chemical composition of prairie cordgrass (*Spartina pectinata* Link.). *J. Elem.* 19(4), 1021-1036.
- Hossain, N., & Morni, N. A. H. (2020). Co-pelletization of microalgae-sewage sludge blend with sub-bituminous coal as solid fuel feedstock. *BioEnergy Research*, 13(2), 618-629.
- İnce, E. R., İnal, F. E. (2024). Kentsel Arıtma Çamurunun Ispanak Bitkisinin Gelişimi ve Mineral Besin Elementi İçeriğine Etkisi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19(2), 119-127.
- Jiang, L., Liang, J., Yuan, X., Li, H., Li, C., Xiao, Z., Zeng, G. (2014). Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The density and hardness of pellet. *Bioresource technology*, 166, 435-443.

- <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=cevre-ve-enerji-103&dil=1>, Erişim Tarihi: 26.07.2023
- <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle>, Erişim Tarihi : 25.12.2021.
- İlker Angin Aritma Çamurlarının Fiziksel Ve Kimyasal Toprak Düzenleyicisi Olarak Kullanımı, (2008), Doktora Tezi Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı Danışman: Prof. Dr. A. Vahap Yağanoğlu, 97 sayfa.
- Karaca, C., Sözen, S., Orhon, D., & Okutan, H. (2018). High temperature pyrolysis of sewage sludge as a sustainable process for energy recovery. *Waste management*, 78, 217-226.
- Khanlari, A., Tuncer, A. D., Sözen, A., Şirin, C., Gungor, A. (2020). Energetic, environmental and economic analysis of drying municipal sewage sludge with a modified sustainable solar drying system. *Solar Energy*, 208, 787-799. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.039>
- Kharytonov, M., Martynova, N., Babenko, M., Kovrov, O., Frolova, L., González, P. H. (2024). Application of flocculated sewage sludge for growing miscanthus on post-mining lands. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1), 403-419.
- Kijo-Kleczkowska, A., Środa, K., Kosowska-Golachowska, M., Musiał, T., Wolski, K. (2016). Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass. *Fuel*, 170, 141-160. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.026>
- Leng, L., Bogush, A. A., Roy, A., & Stegemann, J. A. (2019). Characterization of ashes from waste biomass power plants and phosphorus recovery. *Science of the Total Environment*, 690, 573-583.
- Li, J., Paul, M. C., Younger, P. L., Watson, I., Hossain, M., Welch, S. (2016). Prediction of high-temperature rapid combustion behaviour of woody biomass particles. *Fuel*. 165, 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.061>
- Lopushniak, V. I., Hrytsuliak, H. M., Kotsyubynsky, A. O., Voloshin, Y. D., Hoisan, T. S., Sidelov, A. V. (2024). Bioenergetic efficiency of growing miscanthus with sewage sediment. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1415, No. 1, p. 012053). IOP Publishing.
- Lygin, A.V., Upton, J., Dohleman, F.G., Juvik, J., Zabortina, O.A., Widholm, J.M., Lozovaya, V.V., (2011), Composition of cell wall phenolics and polysaccharides of the potential bioenergy crop–Miscanthus. *GCB Bioenergy*. 3(4), 333-345.
- Monti, A., Di Virgilio, N., Venturi, G., (2008), Mineral composition and ash content of six major energy crops. *Biomass Bioenerg.* 32(3), 216-223.
- Multi-Case Study on Environmental and Economic Benefits through Co-Burning Refuse-Derived Fuels and Sewage Sludge in Cement Industry by Karolina Wojtacha-Rychter 1ORCID and Adam Smoliński 2, *Materials* 2022, 15(12), 4176; <https://doi.org/10.3390/ma15124176>
- M.R. Soosai, Y.C. Joshya, R.S. Kumar, I.G. Moorthy, S. Karthikumar, N.T.L. Chi, A. Pugazhendhi, (2021) Versatile image processing technique for fuel science: a review, *Sci. Total Environ.* 14646.

- Nazli, R. I., Tansi, V., Öztürk, H. H., Kusvuran, A. (2018). Miscanthus, switchgrass, giant reed, and bulbous canary grass as potential bioenergy crops in a semi-arid Mediterranean environment. *Industrial Crops Prod.* 125, 9-23. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.090>
- Oginni, O., Singh, K. (2019). Pyrolysis characteristics of *Arundo donax* harvested from a reclaimed mine land. *Industrial Crops Prod.* 133, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.014>
- Ogleni, N., Ozdemir, S. (2010). Pathogen reduction effects of solar drying and soil application in sewage sludge. *Tr J Agric Forest.* 34(6), 509-515. <https://doi.org/10.3906/tar-0908-300>
- Ortega, Z., Bolaji, I., Suárez, L., Cunningham, E. (2024). A review of the use of giant reed (*Arundo donax* L.) in the biorefineries context. *Reviews in Chemical Engineering*, 40(3), 305-328.
- Ozdemir, S., Dede, O. H., Inan, M., & Turp, S. M. (2018). Effects of sewage sludge on energy content and combustion emissions of energy crops. *Int. J. Agric. Biol.* 20(7), 1575-1580.
- Ozdemir, S., Dede, O. H., Inan, M., Turp, S. M. (2018). Effects of sewage sludge on energy content and combustion emissions of energy crops. *Int. J. Agric. Biol.* 20(7), 1575-1580. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0671>
- Ozdemir, S., Şimşek, A., Ozdemir, S., Dede, C. (2022). Investigation of poultry slaughterhouse waste stream to produce bio-fuel for internal utilization. *Renew Energ.* 190, 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.113>
- Ozdemir, S., Yetilmezsoy, K., Nuhoglu, N. N., Dede, O. H., & Turp, S. M. (2020). Effects of poultry abattoir sludge amendment on feedstock composition, energy content, and combustion emissions of giant reed (*Arundo donax* L.). *Journal of King Saud University-Science*, 32(1), 149-155.
- Ozdemir, S.; Demir, M.S. (2021). Biofuel characteristics and combustion emissions of poultry litter and lignocellulosic biomass. *Environ. Prog. Sustain. Energ.* e13555. <https://doi.org/10.1002/ep.13555>
- Ozturk, M., Dincer, I. (2020). An efficient waste management system with municipal solid waste incineration plant. *Greenhouse Gases: Sci Technol.* 10(4), 855-864. <https://doi.org/10.1002/ghg.1955>
- Özer, B., Yay, A.E. (2021). Comparative life cycle analysis of municipal waste management systems: Kırklareli/Turkey case study. *Environ Sci Pollut Res.* 28, 63867–63877. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12247-0>
- Park, J. H., Choi, Y. C., Lee, Y. J., Kim, H. T. (2020). Characteristics of miscanthus fuel by wet torrefaction on fuel upgrading and gas emission behavior. *Energies.* 13(10), 2669. <https://doi.org/10.3390/en13102669>
- Parlak, N., Ozdemir, S., Yetilmezsoy, K., Bahramian, M. (2021). Mathematical modeling of thin-layer solar drying of poultry abattoir sludge. *Int J Environ Res.* 15, 177-190. <https://doi.org/10.1007/s41742-020-00308-8>
- Pinho, H. J., Mateus, D. M. (2022). Cultivation of Energy Crops in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: An Overview. In *International Conference on Environmental Science and Technology* (pp. 327-336). Cham: Springer International Publishing.

- Rocha, S., Candia, O., Valdebenito, F., Espinoza-Monje, J. F., Azócar, L. (2020). Biomass quality index: Searching for suitable biomass as an energy source in Chile. *Fuel*, 264, 116820. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.1168>
- Pehlivan, U., Ozdemir, S., Ozer, H., Dede, O. H. (2024). Fuel properties and incineration behavior of poultry litter blended with sweet sorghum bagasse and pyrolysis oil. *Journal of Environmental Management*, 357, 120844.
- Sapmaz, S., Kılıçaslan, I., (2023). Energy analysis of sewage sludge energy conversion processes for Turkey-investigation of existing drying and combustion plants. *Biomass Conv. Bioref.* 13, 2449–2458. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02773-x>
- Schnell, M., Horst, T., Quicker, P. (2020). Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. *J Environ Manage.* 263, 110367. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.11036>
- Singh, V., Phuleria, H. C., & Chandel, M. K. (2020). Estimation of energy recovery potential of sewage sludge in India: Waste to watt approach. *Journal of Cleaner Production*, 276, 122538.
- Siyal, A. A., Yang, L., Ali, B., Hassan, M., Zhou, C., Li, X., Dai, J. (2023). Characterization and quality analysis of biomass pellets prepared from furfural residue, sawdust, corn stalk and sewage sludge. *Fuel Processing Technology*, 241, 107620.
- S. Polesek-Karczewska, T. Turzynski, D. Karda s, (2018), Front velocity in the combustion of blends of poultry litter with straw, *Fuel Process. Technol.* 176307-315.
- SKHKK (2009). Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği. Issue 27277.
- TÜİK, 2023. Waste Statistics (2022). Turkish Statistical Institute. Newsletter. 14 November 2023, Issue 49570.
- Turp, G. A., Özdemir, S. (2023), Effect of biomass ash vermicompost on Sorghum bicolor var. saccharatum (L.) Mohlenbr under hot and dry agro ecological condition. *Environmental Research and Technology*, 6(1), 46-53. <https://doi.org/10.35208/ert.1226092>
- Ulusoy, B., Anicic, B., Lin, W., Lu, B., Wang, W., Dam-Johansen, K., Wu, H. (2021). Interactions in NOX chemistry during fluidized bed co-combustion of residual biomass and sewage sludge. *Fuel*, 294, 120431. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120431>.
- Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., (2010), An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*. 89(5), 913-933.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G., Morgan, T.J., (2012), An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*. 94, 1-33.
- Vasileiadou, A., Zoras, S., Iordanidis, A. (2021). Fuel Quality Index and Fuel Quality Label: Two versatile tools for the objective evaluation of biomass/wastes with application in sustainable energy practices. *Environ Technol Innov.* 23, 101739. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101739>

- Vasmara, C., Galletti, S., Cianchetta, S., Ceotto, E. (2023). Advancements in Giant Reed (*Arundo donax* L.) Biomass Pre-Treatments for Biogas Production: A Review. *Energies*, 16(2), 949.
- Villeneuve, J., Palacios, J. H., Savoie, P., Godbout, S. (2012). A critical review of emission standards and regulations regarding biomass combustion in small scale units (< 3 MW). *Bioresour Technol.* 111, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.061>
- Voća, N., Leto, J., Karažija, T., Bilandžija, N., Peter, A., Kutnjak, H., Poljak, M. (2021). Energy properties and biomass yield of miscanthus x giganteus fertilized by municipal sewage sludge. *Molecules*, 26(14), 4371.
- Wang, Y., Liu, Y., Yang, W., Zhao, Q., Dai, Y. (2020). Evaluation of combustion properties and pollutant emission characteristics of blends of sewage sludge and biomass. *Sci Total Environ.* 720, 137365. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137365>
- Xu, P., Cheng, S., Han, Y., Zhao, D., Li, H., Wang, Y., Zhang, G., Chen, C. (2020). Natural variation of lignocellulosic components in miscanthus biomass in china. *Frontiers Chemistry*, 8, 595143. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.595143> .
- Yakamercan, E., Aygün, A. (2023). Health risk assessment of metal (loid) s for land application of domestic sewage sludge in city of Bursa, Türkiye. *Environ Monit Assess.* 195, 733. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11302-w>.
- Yalçın, G. Yavuz, R. Taşpınar, K. Yılmaz, M. Ateş, Ö. (2010), Eskişehir Atıksu Arıtma Tesislerinden Çıkan Çamurların Farklı Münavebe Sistemlerinde Kullanılması, T.C. Tarım Ve Köyişleri Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar Genel Müdürlüğü, Eskişehir.
- Yang, X., Li, H., Wang, Y., Qu, L. (2023). Predicting higher heating value of sewage sludge via artificial neural network based on proximate and ultimate analyses. *Water* 15, no. 4: 674. <https://doi.org/10.3390/w15040674>
- Yılmaz, E., M. Wzorek, S. Akçay, Co-pelletization of sewage sludge and agricultural wastes, *J. Environ. Manag.* 216 (2018) 169e175, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.012>.
- Yurten, M., Ozdemir, S. (2024). Enhancing biomass fuel properties of municipal sewage sludge with carbon-rich and low ash energy crops common reed and miscanthus. *Industrial Crops and Products*, 222, 120128.
- Zhu, Yao Yao, Qing-gang Lu, Ming Gao, Zi-qu Ouyang (15 June 2015), Fuel Experimental investigation of gasification and incineration characteristics of dried sewage sludge in a circulating fluidized bed Author links open overlay panelJian-guo Volume 150, Pages 441-447.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad :Mustafa YURTEN

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2007, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
- Yükseklisans** : 2011, Fırat Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2017 yılında özel sektörde Şantiye Müdürü olarak çalıştı.
- 2010-2011 yıllarında Sakarya İl Çevre ve Orman Müdürlüğünde Çevre Mühendisi olarak çalıştı.
- 2011 yılından beri Sakarya Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğünde çalışmaktadır.
- 4 yıl ÇED ve Çevre İzinlerinden Sorumlu Şube Müdürlüğü yaptı.
- Haliz hazırda aynı işyerinde Çevre Yüksek Mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Yurten M., Özdemir S. (2024). Enhancing biomass fuel properties of municipal sewage sludge with carbon-rich and low ash energy crops common reed and miscanthus. *Industrial Crops and Products*, 222 (5).