

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARITMA ÇAMURUNDA YETİŞEN ENERJİ
BİTKİLERİNİN EMİSYON DEĞERLERİ ÖLÇÜMÜ VE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mihrican İNAN

Enstitü Anabilim Dalı : ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR

Ocak 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARITMA ÇAMURUNDA YETİŞEN ENERJİ
BİTKİLERİNİN EMİSYON DEĞERLERİ ÖLÇÜMÜ VE
DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

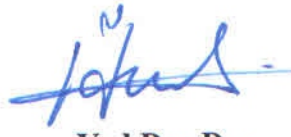
Mihrican İNAN

Enstitü Anabilim Dalı : ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR

Bu tez 02.01.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof.Dr.
Saim ÖZDEMİR
Jüri Başkanı



Yrd.Doç.Dr.
Ömer Hulusi DEDE
Jüri Üyesi



Yrd.Doç.Dr.
Ayşe Bengü SÜNBÜL
Jüri Üyesi

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mihrican İNAN

02.01.2018

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezim boyunca değerli yardım ve katkıları ile beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR'e, maddi manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme, kızlarıma ve eşim Hasan İNAN ile bana akademik çalışma ortamı sağlayan patronum N. Nusret NUHOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: FBYLTEZ 2017-50-01-012) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	vii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Arıtma Çamurlarının Enerji Bitkisi Verimine Etkisi	4
2.2. Biyokütle Kaynaklarının Kül Emisyonu Özellikleri	7
2.3. Yanma Gazı Emisyonları	8
2.4. Biyokütle Yakıtların Yanma Karakterleri	10
2.3. Biyokütle Enerjisi Yasal Mevzuat.....	11
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM	14
3.1. Çalışmada Kullanılan Arıtma Çamuru	14
3.2. Çalışmada Kullanılan Toprak.....	15
3.3. Bitki Yetiştirme Saksıları	16
3.4. Çalışmada Kullanılan Enerji Bitkileri	17

3.5. Deneme Planı	18
3.6. Enerji Bitkilerinde Yapılan Analizler.....	18
BÖLÜM 4.	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	21
4.1. Bitki Verimi ve Kompozisyonu	21
4.2. Enerji İçeriği.....	23
4.3. Bitki Besin Elementi ve Ağır Metal Konsantrasyonu.....	23
4.4. Uygulamaların Kül Kompozisyonuna Etkisi	25
4.5. Yanma Gazı Emisyonları	27
BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	28
KAYNAKLAR	29
ÖZGEÇMİŞ	33

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

EC	: Elektriksel iletkenlik ($\mu\text{hos/cm}$)
ha	: Hektar
HHV	: Üst Isıl Değer
kcal	: Kilo kalori
KJ	: Kilo jul
KM	: Kuru madde
LHV	: Alt ısııl değer
MJ	: Mega Jul
PM	: Partikül Madde
t	: Ton
VOC	: Uçucu Organik Bileşik (Volatile Organic Compaund)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Saksı denemelerinde kullanılan toprağın tekstür analizi	16
Şekil 3.2. Bitki yetiştirmede kullanılan saksı ve çamur besleme yöntemi	17
Şekil 3.3. Arundo bitkisinin toplanması, fidelenmesi ve dikimi	17

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Bitki denemelerinde kullanılan arıtma çamuru ve toprağın fizikokimyasal ve kimyasal özellikleri	15
Tablo 3.2.	Deneme planındaki uygulamalar ve deney ünitesi	18
Tablo 4.1.	Doğal toprak ve arıtma çamurunda yetiştirilmiş deneme bitkilerinin kuru biyokütle verimi, su içeriği, kül içeriği, enerji verimi ve element analizi	21
Tablo 4.2.	Doğal toprak ve arıtma çamurunda yetiştirilmiş deneme bitkilerinin toprak üstü bölümlerinin makro nutrient içeriği (mg/kg KM)	23
Tablo 4.3.	Deneme faktörlerine bağlı olarak Arundo ve Miscanthus bitkilerinin toprak üstü aksamında ağır metal içeriği (mg/kg KM) .	24
Tablo 4.4.	Doğal toprak ve arıtma çamurunda yetiştirilmiş deneme bitkilerinin kül kompozisyonları.....	25
Tablo 4.5.	Doğal toprak ve arıtma çamurunda yetiştirilmiş deneme bitkilerinin gaz emisyonları	26

ÖZET

Anahtar kelimeler: Enerji bitkisi, arıtma çamuru, biyokütle, enerji, emisyon

İki iyi bilinen enerji bitkisi, miskanthus (*Miscanthus x giganteus*) ve kargı (*Arundo donax* L.), arıtma çamurunda yetiştirilerek, arıtma çamurlarının bitki büyümesi, enerji içeriği yanında kül ve yanma gazı emisyonlarına etkisi, doğal toprak uygulaması ile karşılaştırılmalı olarak, saksı denemesinde araştırılmıştır. Doğal toprak uygulaması sentetik gübre ile gübrelenmiş, arıtma çamuru uygulamasına gübre verilmemiştir. Elde edilen araştırma sonuçları, her iki tür bitkinin, gübre ve arıtma çamuru uygulamasında yeterli biyokütle verimi ürettiğini göstermiştir. Kargı çamur uygulamasında daha etkili olurken, miskanthus sentetik gübreleme ile doğal toprak uygulamasında en yüksek verimi vermiştir. Uygulamaların enerji içerikleri birbirinden istatistiki olarak farklı bulunmamıştır. Toprakta ve arıtma çamurunda yetiştirilen *Miscanthus* ve *Arundo* bitkilerinin üst ısıl değeri sırasıyla 17,95-17,62 MJ kg⁻¹ ve 17,31-18,05 MJ kg⁻¹ olarak ölçülmüştür. Arıtma çamuru her iki bitkinin de makro element, mikro element ve ağır metal içeriğini yükseltmiştir. Si kül içeriğinin en fazla bulunan elementi ve seviye *Arundo* bitkisinde daha yüksek bulunmuştur. K ve Ca ikinci en yüksek bulunan element olmuş ve her iki bitki türünde de benzer bulunmuştur. Arıtma çamurunun sağladığı azot, bitkide N konsantrasyonunu yükseltmiş ve bu yanma gazı emisyonlarında NO_x seviyesini yükseltmiştir. NO_x emisyonlarında en yüksek artış, %9,60 ile *Arundo* bitkisinde görülmüştür. SO₂ emisyonları her iki bitkide de benzer bulunmuş ve konsantrasyonlar çok düşük tespit edilmiştir.

EVALUATION OF EMISSIONS VALUES OF ENERGY CROPS GROWING ON SEWAGE SLUDGE

SUMMARY

Keywords: Energy crop, sewage sludge, biomass, energy, emissions

Two well-known energy crops; giant miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) and giant reed (*Arundo donax* L.) were grown on sewage sludge to assess the possible benefits of sewage sludge on the growth, energy content together with ash and exhaust gas emissions, comparing to the natural soil treatment, in pot experiments. The soil treatments were fertilized by conventional fertilizer, whilst, no fertilizer used for sludge treatments. The obtained results showed that, both crop species produced sufficient biomass yield on either conventional fertilizer or sludge treatments. It was found that giant reed appeared more efficient at sludge treatment, whereas giant miscanthus produced the best results at natural soil with conventional fertilizer. The energy content of treatments were not significantly different. High heating values measured for plants cultivated on soil and sludge were in the range of 17,95-17,62 KJ kg⁻¹ and 17,31-18,05 KJ kg⁻¹ for *Miscanthus* and *Arundo*, respectively. Sewage sludge significantly increased the plant macro nutrients and heavy metal content of both species. Si was the dominant element in ash and was higher in *Arundo* plant. K and Ca were secondary high containing elements giving similar results for both plant species. Increasing nitrogen concentration in plant tissue provided by sewage sludge resulted in increasing NO_x in air exhaust gas emissions. Maximum increment on the NO_x emissions occurred as 9,60% with *Arundo* plants. SO₂ emissions were obtained consistent with plant species but, concentration in emissions were very small.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Endüstriyel gelişmeye bağlı olarak dünya enerji ihtiyacı hızla artmakta, yaklaşık elli yıllık bir süreçte fosil yakıt rezervlerinin büyük çoğunluğunun tükeneyeceği tahmin edilmektedir. Buna karşın, enerji tüketimi, ekonomik büyümenin ve toplumsal gelişmenin hızına paralel olarak artmaktadır [1]. Enerji kaynakları sınırlı olan ülkemizde, enerji teminindeki dışa bağımlılık sebebiyle dış ödemeler dengesi olumsuz etkilenmektedir. Enerji teminindeki dar boğazlar, enerji dönüşüm teknolojilerinin farklı enerji kaynaklarından yararlanılmasındaki yetersizliği ve artan enerji maliyetleri, enerjinin verimli kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Hızla azalan fosil yakıt rezervlerinin yerine biyoyakıt kullanılması çevreye zararlı gaz salınımını büyük ölçüde azaltmaktadır. Karşılaştırılırsa, aynı miktarda enerji üretimi için kömür yerine odun kullanıldığında NO_x salınımını %60, SO_x salınımını %85 azalmaktadır.

Enerji maliyetini düşürmek, yüksek verimli enerji üretim tesisleriyle mümkündür. Çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarının aksine, bakım dönemleri dışında sürekli devrede kalabilen, yüksek emre-amadelik özelliği olan biyokütle elektrik üretim santralleri, elektrik arz güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Türkiye'de halihazırda kurulu biyokütle enerjisi ile üretim yapan santrallerin sayıları ülkenin talebine göre oldukça az ve kurulu güçleri de düşüktür. Biyokütle santrallerinde hammadde olarak başta odun olmak üzere, ormanlardan elde edilen artık maddeler, park ve meyve bahçesi budama atıkları, tarımsal ürünlerden geriye kalan artıklar kullanılabilir. Sayılan bu kaynakların arzı dalgalanma gösterdiği, kalite ve standartlarının değişken olduğu ve kontaminasyon içermelerinden dolayı alternatif kaynaklar da aranmaktadır. Bu kaynaklardan öne çıkan enerji bitkisi tarımıdır. Biyokütle termik santrallerinde yakılması hedeflenen bitkiler ısıtma, yakıt ve elektrik enerjisi üretimi gibi pek çok amaçla kullanılabilir.

Günümüzde biyokütle kaynaklarının daha verimli kullanımına yönelik biyokütleden enerji üretiminde daha modern biyokütle teknolojileri kullanılmakta, bu amaçla enerji bitkisi yetiştiriciliği ön plana çıkmaktadır. Enerji tarımında, fiziksel ve kimyasal yapıları itibarıyla biyokütleden enerji eldesine uygun, verimlilik kapasitesi ve enerji içeriği yüksek bitkilerin yetiştiriciliği tercih edilmektedir. Bu amaçla tek veya çok yıllık olarak yetiştirilen miscanthus, panicum, arundo gibi bitkiler hektarda 30 ton gibi enerjice zengin biyokütle verimi verebilmektedir [2].

Enerji tarımı yapılan bitkiler arasında hızlı büyüyen yüksek kuru madde üreten ağaçlar Salix, Populus ve Eucalyptus ile çok yıllık Miscanthus, Arundo bitkiler en yaygın olanlarıdır. Bu ağaç ve bitki türlerinin en karakteristik özelliği lignin, selüloz ve hemiselüloz gibi yüksek enerji değeri olan bileşikleri içermeleridir. Bitki türleri, ağaç türlerine kıyasla birim alanda iki kattan daha yüksek biyokütle üretebilmektedir. Örneğin deneysel çalışmalarda miscanthus (*Miscanthus* spp.) ve arundo (*Arundo donax*) plantasyonlarından 30 t KM/ha'dan daha yüksek verimler elde edilmiştir [3], enerjice zengin bileşikleri içerdikleri için birim alan enerji verimleri de yüksek bulunmuştur [4].

Enerji bitkileri üretimi için harcanan enerjiden daha fazla enerji sağlanabilmesi için, bu bitkilerin üretiminin daha ekonomik bitkisel üretim girdileri kullanılarak yapılması büyük önem taşımaktadır [4]. Bu bitkilerin biyokütle verimi en fazla gübre kullanılarak, gübre kaynaklarından da azot ile sağlanmaktadır. Dolayısı farklı ekosistemlerde bitkilerin üretim potansiyelinin araştırıldığı çalışmalar sentetik azot gübresi kullanılarak yapılmıştır [5]. Bitkisel üretimde enerji maliyetini daha da aşağıya çekmek için, çok yıllık enerji bitkileri gibi üretimde fazla miktarda bitki besin elementi tüketen çok yıllık bitkilerin gübre ihtiyaçlarının uzun dönem etkili organik atıklardan sağlanması daha sürdürülebilir bir seçenektir. Bu kaynaklardan birisi de, her geçen yıl daha fazla ortaya çıkan ve bertaraf alternatifleri bulunması gereken arıtma çamurlarıdır. Arıtma çamurlarının enerji bitkilerinin üretiminde kullanılması sınırlı olmakla birlikte biyokütle verimi ile ilgili veriler ümit verici görülmektedir [6, 7]. Arıtma çamurlarının çok yıllık bitkilerin üretiminde gübre kaynağı olarak kullanılması ile marjinal alanlar bitkisel üretimi uygun hale

getirilmekte [8], topraklardan azot sızma kaybı azaltılmakta [9], en önemlisi arıtma çamurlarına sürdürülebilir bertaraf alternatifi sağlanmaktadır. Modern biyokütle kaynakları ve teknolojilerinin kullanılması; toprak ve su kirliliğinin azaltılması, sera gazlarının denetimine ve dengelenmesine yardımcı olması, erozyon ve orman yangını denetiminin sağlanması gibi çevresel üstünlükler sağlamaktadır.

Ülkemizde üretilen yıllık evsel nitelikli çamur miktarının 1,38 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir [10]. Oluşan çamur miktarının giderek artması arıtma çamuruna bir sorun gözüyle bakılmasına neden olmakta bu sebeple büyük bir kısmı ya katı atık depolama sahalarında ya da arazide depolanmak suretiyle bertaraf edilmektedir. Bunun sonucunda da çamurların yararlı kullanımları göz ardı edilmektedir. Ancak arıtma çamurlarının içerdiği yüksek miktarda organik madde ve gübre mineralleri nedeniyle gıda ve yem bitkisi olarak kullanılmayan enerji bitkilerinin yetiştirilmesinde kullanımı, ekonomiye katkısı açısından üzerinde önemle durulması gereken yöntemlerden birisidir [10]. Bilhassa verim kapasitesi düşük marjinal alanların enerji bitkileri ile değerlendirilerek üretkenliğinin artırılmasında çamurların kullanılması hem ekolojik hem de ekonomik bir katkı sağlamaktadır. Arıtma çamurlarının toprağa uygulanmasıyla hem nihai bertaraf gerçekleşmekte hem de çamur içeriğindeki bitki besin elementleri topraktaki doğal döngülerine girmektedir [11].

Enerji bitkileri sentetik gübre kullanılarak veya bitki besin elementi yüksek organik atıklarla yetiştirilmiş, fakat kül ve gaz emisyonları ile yapılmış sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, evsel nitelikli arıtma çamurlarının nihai bertaraf olarak enerji bitkilerinin yetiştiriciliğinde değerlendirilmesi hedeflenerek *Miscanthus* ve *Arundo* bitkilerinin biyokütle verimine etkisi, enerji değerine etkisi ve çevresel açıdan önemli kül ile gaz emisyonlarına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla *Miscanthus x giganteus* ve *Arundo donax* bitkilerine arıtma çamurlarından geçen kirletici maddelerin varlığı bitki ve kül analizleri ile incelenmiş, toprak ve arıtma çamuru ortamlarında yetiştirilen bitkilerin yanma gazları emisyonlarına etkisi ortaya koyulmuştur.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Arıtma Çamurlarının Enerji Bitkisi Verimine Etkisi

Yenilenebilir enerji kaynakları, eksilmeden sürekli üretilen, fosil yakıtlar gibi çevreye zarar vermeyen; güneş, rüzgâr, hidrolik, jeotermal, hidrojen, dalga, gelgit, biyokütle gibi çeşitli kaynaklardır. Doğal kaynaklardan elde edilen yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının özellikle çevre, ekonomi ve enerji güvenliği olmak üzere pek çok açıdan faydası ve diğer kaynaklara kıyasla göreceli üstünlükleri bulunmaktadır, fosil enerji kaynakları tersine zamanla tükenmezler [12]. Alternatif ve yenilenebilir enerji teknolojileri içinde önemli kaynaklardan biri biyokütledir. Bu kaynaklardan elde edilen enerjiye ise biyokütle enerjisi denilmektedir [13]. Biyokütle enerjisinde kullanılan hammaddeler; odun, ormanlardan elde edilen artık maddeler, meyve bahçeleri ve parklarda budanan ağaç dalları, tarımsal ürünler ve tarımsal artıklar olarak sayılmaktadır. Biyokütle enerji kaynakları, katı, sıvı ve gaz formlarında; alan ısıtma, yakıt ve elektrik enerjisi gibi birçok amaçla kullanılabilir. Biyokütle enerjisi, biyokütle hammaddeleriyle elektrik veya ısı üreten sistemleri; biyoyakıt ise biyokütle ile elde edilen katı, sıvı veya gaz haldeki yakıtları ifade etmektedir [13].

Enerji bitkileri tarımı son yıllarda büyük ilgi görmüş, biyokütle, biyogaz, biyoetanol, biyodizel, piroliz ve gazlaştırma yöntemleri ile enerji kazanılmaktadır [14]. Dünyanın farklı bölgelerinde o bölgeye özel amaca yönelik verimliliği yüksek enerji bitkileri yetiştirilmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada biyokütle enerji bitkileri *Miscanthus giganteus* ile *Arundo donax* bitkilerinin enerji karakterleri incelenmiştir. Her iki tür bitki de kuzey yarım kürede yüksek verim potansiyelleri ve enerji içerikleri ile tanınmaktadır. Bu bağlamda, bir Çevre Mühendisliği çalışması olması nedeniyle, sürdürülebilir enerji bitkisi tarımında, gübre kaynağı olarak organik atık

kaynaklarından faydalanılma imkanı düşünülmüş ve atıksu arıtma tesislerinden çıkan arıtma çamurlarının enerji bitkileri üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Organik gübre ve toprak düzenleyici olarak uygun özellikler taşıyan arıtma çamurlarının enerji bitkilerinde kullanılmaları ile hem çamur bertarafı gerçekleşebilmekte hem de sürdürülebilir, düşük maliyetli enerji ham maddesi tedariki gerçekleştirilebilir.

Lag-Brotonsve ark. [11], yaptıkları çalışmada arıtma çamuru kompostu uyguladıkları ıslah edilmiş arazide *Cynara cardunculus* bitkisinde biyokütle ve tohum verimini incelemişler ve verimini kontrol uygulamasına kıyasla biyokütlede %68 tohum veriminde %40 daha fazla artış sağladığını belirtmişlerdir. Acaroğlu ve Aksoy [5] iç Anadolu bölgesinde dikimden itibaren 3 yıl boyunca elde edilen biyokütle verimi ve harcanan enerji miktarını inceledikleri çalışmada; *Miscanthus* bitkisinin biyokütlesinin her yıl arttığını ve buna bağlı olarak yetiştirme için harcama enerjisinin sürekli olarak düştüğünü göstermişlerdir (enerji tüketimi sırası ile 7826, 2362, 1818 MJ/t). Biyokatılardaki azot ve fosforun büyük kısmı organik formdadır ve zamanla gerçekleşen mineralizasyon sonucunda bitkiler tarafından alınabilir formlara dönüşebilmektedir. Yapılan çalışmalarda da bu özellik sayesinde, arazide bir defada verilen biyokatı ile bitki büyüme veriminin 2 yıl devam ettiği gözlenmiştir [15]. Helios ve ark. [15], *Spartina pectinata* bitkisini farklı dozlarda arıtma çamuru vererek, bitki büyümesi, biyokütle verimi ile makro ve mikro element kapsamı yönünden araştırdıkları çalışmada, 2,4 t/ha (100 kg N/ha) arıtma çamuru (kuru madde) uygulamasının en yüksek biyokütle verimini verdiğini, bitki makro ve mikro element içeriğinin ise çamur verilmemiş uygulama ile farklılık göstermediğini tespit etmişlerdir.

Antonkiewicz ve ark. [16], hektara 0, 10, 20, 40, 60 ton/KM arıtma uyguladıktan sonra, araziye *Phalaris arundinacea* L. ve *Miscanthus × giganteus* bitkilerini dikmişler, 6 yıl boyunca verim ve topraktan aldıkları ağır metalleri takip etmişlerdir. Bitki verimi artan arıtma çamuru uygulamalarında artış göstermiş ve en yüksek verim, *Miscanthus* bitkisinde hektara 20 ton/KM arıtma çamuru uygulamasında, *Phalaris* bitkisinde 40 ton uygulamasında tespit edilmiştir. Artan

arıtma çamuru dozları her iki bitkide de ağır metal konsantrasyonunu yükseltmiş ve uzun vadede bitkilerin ağır metal akümülatörü özelliklerinden faydalanılabileceği belirtilmiştir. Kolodziej ve ark. [6] Miscanthus bitkisine, artan dozlarda arıtma çamuru uyguladıkları (0, 10, 20, 40, 60 t/ha km), altı yıllık arazi çalışmasında 25 t/ha biyokütle verimine ulaştıklarını ve düşük çamur dozlarının 10-20 t/ha yüksek verim için yeterli olduğunu bildirmişlerdir. Sonbahardan ilkbahara doğru bitki hasadının geciktirilmesi ile bitki kuruluk oranı yükselmiş fakat, verim gerilemiştir. Aynı çalışmada net brüt kalorifik değerler sırası ile 16,2-16,8 MJ/kg ve 17,7-18,2 MJ/Kg olarak tespit edilmiştir.

Enerji bitkisi olarak lignoselülozik özellik gösteren ağaçsı ve otsu bitki türleri değerlendirilmekte ve bilimsel çalışmalara konu olmaktadır. Farklı bitkiler enerjice zengin bileşikler selüloz, hemiselüloz ve lignin kompozisyonu bakımından farklı olmakla birlikte genelde bu üç bileşeni fazla miktarda içermektedir. Karakteristik olarak ağaçsı türler lignin, otsu türler selüloz bakımından zenginlik göstermektedir. Borkowska ve Molas [17], dört farklı çok yıllık ağaçsı ve otsu lignoselülozik enerji bitkisinin verimlerini takip ettikleri çalışmada, en yüksek kuru madde verimini dört yıllık ortalama olarak 16,5 t/ha kuru madde ile miscanthus bitkisinin verdiğini, aynı koşullarda iki farklı ağaçsı söğüt türünün 8,8-10,2 t/ha kuru madde verimi ile en düşük verimi verdiğini belirtmektedir. Başka bir çalışmada, Pidlisnyuk ve ark. [18] miscanthus bitkisinin ağır metallerce kirletilmiş marjinal alanlarda yüksek biyokütle verimi üretebildiğini, bu nedenle ağır metallerce kirletilmiş toprakların temizlenmesinde kullanılabileceğini fakat metal alma kapasitesinin düşük olduğunu belirtmektedirler.

Farklı çevre koşulları ve farklı bitki türlerinde farklılık göstermekle birlikte organik kökenli evsel ve tarımsal atıklar ile ahır gübrelere genelde enerji bitkilerinin, birim alan başına biyokütle ve dolayısı ile enerji verimlerini yükseltmektedir. Organik atıkların verim artırıcı kaynak olarak değerlendirilmesi, sentetik gübreye olan ihtiyacı azalttığı veya ortadan kaldırdığı için üretim maliyetini düşürülebilmekte, üretim ve çevre açısından sürdürülebilirlik sağlamak ve atık yönetiminde karbon nötr kapalı döngü modelinin gerçekleştirilmesine izin vermektedir. Kapalı döngü atık

yönetim modeli son yıllarda üzerinde yoğun çalışmaların yapıldığı araştırma alanlarından birisidir.

2.2. Biyokütle Kaynaklarının Kül Emisyonu Özellikleri

Otsu bitkilerin kül miktarı, hızlı büyümeleri, topraktan daha fazla mineral almaları gibi nedenlerle, odunsu bitkilerin kül oranından daha yüksektir. Kül miktarı ve kompozisyonu, enerji bitkilerinin enerjiye çevrilmesinde en belirleyici parametrelerden birisidir. Kül içindeki özellikle alkali metaller hem enerji dönüşüm verimini azaltmakta ve hem de, yakma ve ısı dönüştürme ünitelerinde cüruf oluşumu, korozyon ve kurum bağlamasına neden olarak işletme parametrelerini olumsuz etkilemektedir. Kül içindeki mineraller K, Cl, N ve S biyokütlenin yanma kalitesini belirleyen temel elementlerdir. K ve C külün erime sıcaklığını düşürür, yüzeylerin camsı madde ile kaplanmasını sağlar, cüruf oluşturur ve korozyona neden olur. N ve S yüksek konsantrasyonlarda NO_x ve SO₂ emisyonu oluşturur [14]. Belirtilen olumsuzlukların oluşmaması için genel olarak yüksek Si/K ve Ca/K oranları istenir, bu durumda cüruflaşma daha azdır [19]. Monti ve ark. [20], potansiyen enerji bitkilerinin yanma küllerindeki mineral kompozisyonu (C, N, Al, Ca, Cl, Fe, K, Mg, Na, P, S, Si) araştırdıkları çalışmalarında bitki türleri arasında önemli farklılıklar tespit etmişlerdir. Örneğin Cynara bitkisi, cüruf, is ve korozyon oluşumuna neden olan mineralleri fazla miktarda içerirken, silisyumu en az içeren bitki türü olmuştur. Tatlı sorgum ve Arundo bitkileri yapraklarında fazla miktarda azot içermiştir. Araştırmacılar, enerji üretimini maksimize etmek ve kül emisyonlarını azaltmak için yaprağı azaltılmış bitki türlerini veya yapraksız yakmayı önermiştir.

Di Nasso ve ark. [21], İtalya'da *Arundo donax* bitkisinin gübrelemeye bağlı olarak kül içeriği ve kompozisyonunu araştırdıkları bir çalışmada, azot dozu artışına bağlı olarak verimin yükseldiği, kül oranının arttığını fakat kül içindeki Si oranının azaldığını belirtmektedir. Arundo genel olarak kül oranı yüksek enerji bitkisi olarak değerlendirilmiştir.

Bitki ve yanma külü mineral kompozisyonu arazi koşulları ve uygulanan gübre kaynaklarından etkilenmektedir. Örneğin, Kolodziej ve ark. [22], enerji bitkisi sorgumu artan arıtma çamuru dozlarında yetiştirmişler ve çamur dozuna paralel olarak kül oranı yükselmiştir. Çalışmada artan arıtma çamurları, toprağın pH değerini düşürerek makro ve mikro elementleri biyo-alınabilir duruma getirmiş, N, Cd, Zn, Ni, Cu ve daha az düzeyde K, P, Mg ve Cr bitki dokularında artış göstermiştir. Ociepa-Kubicka ve ark. [7] yaptıkları çalışmada ise arıtma çamuru uyguladıkları ve suni gübre ile yetiştirdikleri *Miscanthus giganteus* bitkisinde, makro element, iz element ve ağır metallerin arıtma çamuru verilmiş bitkide daha yüksek olduğunu, Zn 57,0–62,5 mg/kg, Cd 0,88–1,18 mg/kg, Pb 3,70–3,90 mg/kg ve Ni 3,15–3,90 mg/kg aralığında tespit etmişlerdir. Açığa çıkan kül Atık Yönetimi Genel Esasları Yönetmeliği'ne göre “Tehlikesiz Atık” olarak sınıflandırılmıştır. Başka bir çalışmada, Smith ve Slater [23], üç farklı enerji bitkisini sentetik gübre ve arıtma çamuru kompostu, tavuk gübresi ve ahır gübresi uygulayarak denedikleri çalışmalarında, her durumda olmamakla birlikte bitki mineral kompozisyonunun gübre kaynağından etkilendiğini bildirmişlerdir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada da saf arıtma çamuru ve sentetik gübre ile gübrelenmiş toprakta iki önemli enerji bitkisinin yakılmasından sonra kül kompozisyonu incelenmiş, yetiştirme ortamının kül miktarı ve içeriğine etkisi araştırılmıştır.

2.3. Yanma Gazı Emisyonları

Biyokütle veya fosil yakıtlarda ön plana çıkan yanma gazları O_2 ve CO_2 yanında, yönetmeliklerde sınır değerler konulan CO, NO, NO_x, SO₂ gazlarıdır. Klor içeren yakıtlarda, bazı durumlarda HCl gazı da oluşabilmektedir. CO genellikle yanma hücrelerine verilen oksijen oranı ile ilişkilendirilmekte, SO₂ ise yakıtın sülfür içeriğine bağlı olmaktadır. Biyokütle yakıtların sülfür içeriği az olduğu için genellikle emisyon değerlerinin çok altında kalmaktadır. Biyokütle yakıtlarda en dikkati çeken ise NO_x gazlarıdır. NO ve NO₂ gazlarının toplamını ifade eden NO_x gazları ya çok yüksek (> 1000°C) sıcaklıklarda yanma sonucu havanın N₂ ve O₂ gazlarının birleşmesi ile veya daha az oranda da yakıtın içindeki azotlu bileşiklerin yanmasıyla oluşur. Biyokütle

kaynaklar genelde 600-800 °C sıcaklık aralığında yakılır, dolayısı ile NO_x gazlarının oluşum kaynağı yakıt kaynağının azot oranıdır. Jeguirim ve ark. [24], çalışmalarında miskanthus ve arundo türü bitkilerin, yanma karakterleri ile hava emisyonlarını incelemişler, bitkilerin yanma karakterleri farklı olmakla birlikte benzer emisyon değerleri verdiklerini (26,8 mmol/g CO, CO₂, VOC ve $1,8 \times 10^{13}$ partikül/g) rapor etmişlerdir.

Atık gazın bileşimi, yakıtın kompozisyonu ve yanma bölgesine verilen havanın miktarı ile alakalıdır. Biyokütle yakıtlar, bu nedenle, fosil yakıtlara karşı avantajlıdır, çünkü sülfür ve azot içerikleri daha azdır. Bu nedenle daha az SO_x emisyonu ortaya çıkar ve sıcaklık kontrol edildiğinde, havanın azotunun oksitlenmesinin önüne geçilerek NO_x emisyonları azaltılabilir [25]. Genel olarak, otsu lignoselülozik biyoküteller, ağaçsı biyokütellerden daha fazla N ve Cl içerir. Otsu bitkilerin samanlarında Cl 4900 ppm'e kadar çıkabilmektedir [26]. Biyokütle yakılırken, bağlı azot NO_x emisyonları oluşturur, Cl ise hidrojen klorür (HCL), gaz klor (Cl₂), alkali klorürler ve poliklorlanmış dibenzo-p-dioksin ile dibenzofuran (PCDD/F) oluşturur [25]. Kömüre kıyasla, enerji bitkileri daha düşük konsantrasyonlarda SO_x, NO_x ve HCl verir.

İdeal yanma, yakıttaki tüm maddelerin tam okside olması olarak tanımlanır. İdeal yanmada yakıtın ana bileşenleri (C, H, S, N, O) atık gaz içinde CO₂, H₂O, SO₂, N₂ ve O₂ formunda olmalıdır. Eğer tam yanma gerçekleşmez ise, eksik yanmada istenmeyen gazlar CO, uçucu organik bileşikler (VOC), polycyclic aromatik hidrokarbonlar (PAH), PM, PCDD/F, ve az miktarda da olsa amonyak (NH₃) oluşur. Eksik yanmaya neden olan faktörler, O₂ eksikliği, yanma hücresinde yetersiz yakıt, hava karışımı, düşük yakma sıcaklığı ve kısa kalış süresi gibi faktörlerdir [25]. Biyokütle yakma tesislerinde tam oksitlenmenin sağlanabilmesi için yanma hücresinde yakıt, oksijen karışımının %13 O₂ oranı ile yakılması önerilmektedir.

Görüldüğü gibi yanma gazları emisyonu sadece yakıtın kompozisyonuna bağlı değil, aynı zamanda yakma koşullarından da etkilenmektedir. Bununla birlikte SO₂, HCL ve NO_x emisyonları çoğunlukla biyoyakıtın bileşimi ile korelasyonlu bulunmaktadır.

Bu nedenle biyokütlerde yüksek oranda azot, kükürt ve klor istenmemektedir. Yapılan bu çalışmalarla da arıtma çamurlarında yetiştirilen *Miscanthus giganteus* ile *Arundo donax* bitkilerinin enerji değeri yanında, yanma karakterini etkileyen kül miktarı ve kompozisyonu ile hava emisyonları incelenmiş, biyokütle mineral kompozisyonunun yanma emisyonlarına etkisi araştırılmıştır.

2.4. Biyokütle Yakıtların Yanma Karakterleri

Biyokütle yakıtlar küçük ölçekli sobalar, katı yakıt kat kalorifer kazanlarından, büyük ölçekli güç santrallerine kadar ısıtma ve enerji elde amaçlı kullanılırlar. Yanma kalitesini belirleyen temel parametreler, başta rutubet oranı olmak üzere, enerji bağı karbon bileşikleri oran ve çeşitleri, kül oranı ve kül mineral kompozisyonudur.

Biyokütle yakıtlarının temel bileşimini, karbon (C), hidrojen, (H), oksijen (O), ardından azot (N), sülfür (S) ve klor (Cl) oluşturur. Diğer elementler, K, Ca, P, Na, Mg ve ağır metaller Zn, Cr, Cu, Ni, Pb, Cd, As çok daha az oranlarda bulunur. Enerji üretiminde birinci derecede rol alan C, O, H biyokütlenin %95 ve üzerini oluşturur. Lignoselülozik enerji bitkilerinde organik bileşikler üç temel bileşen selüloz, hemiselüloz ve lignin'den meydana gelir [27]. Biyokütle yakıtlar kullanıma yönelik ya katı (ör. pellet), sıvı (ör. biyoetanol) ya da gaz (ör. biyogaz) yakıtlara dönüştürülür. Bu biyoyakıt kaynaklarını ürüne dönüştürmek için iki temel yol; biyokimyasal dönüştürme (metanojenik ve etanol fermentasyonu) ve termokimyasal dönüştürme (yakma, gazifikasyon, piroliz) ile yapılabilir. Ardından biyokütle enerjisi, termal, elektrik veya mekanik enerjiye dönüştürülür. Biyokütlenin yakılarak termal enerjiye dönüştürülmesinde en önemli parametre üst ısıl değerdir (HHV). Yanma sırasında, lignin, selüloz, hemiselüloz, nem içeriği ve element bileşimi gibi biyokütlenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kalorifik değer, ısı enerjisi eldesi ve emisyonları etkiler [28].

Biyokütle yakıtlarının hacim ağırlığı düşük, bu nedenle enerji yoğunlukları düşüktür. Besleme oranını artırmak için ya yakma hücresinin büyütülmesi veya biyokütlenin preslenerek yoğunlaştırılması önerilmektedir. Briket ve pellet haline getirme en fazla

kullanılan tekniklerdir. Yüksek lignoselülozik madde kapsamı ve karbon içeriği ile düşük kül oranı, N ve S içeriği ile yaprağı olmayan bitki gövdelerinin yakıt kalitesi daha iyi ve üst kalorifik değeri daha yüksektir [2]. Sonbaharda erken olgunlaşmış kurumaya başlayan bitkiler ile kış ve ilkbaharda hasat edilen bitkilerin yine kalori değeri ve yanma özellikleri daha iyi olmaktadır. Sonbaharda olgunlaşmaya başlayan bitkilerin içerdikleri mineralleri kışa doğru, kök bölgesine, rizomlara transfer ettikleri bilinmekte [20] ve bu şekilde bitki kül içeriği gerilemektedir.

Robson ve ark. [29], bitkinin erken veya geç yaşlanma durumunun bitki verimi ve enerji verimi ile kalitesini etkilediğini belirtmektedir. Erken bitki yaşlanması verimi düşürdüğünü fakat bitkide rutubet oranı ile mineral içeriğini düşürdüğünü, geç olgunlaşmış bitkilerin kışa doğru tam sularını kaybetmeden ve mineral oranını düşürmeden girdiği için yanma karakterlerinin olumsuz etkilendiğini belirtmektedir.

Lewandowski ve ark. [30], iyi bir biyokütle yakıtının yüksek biyokütle verimi ve yanma kalitesine sahip olmasını, yanma kalitesinin ise rutubet oranı ile kül ve küldeki K, Cl, S oranlarının düşük olması ile sağlanabileceğini bildirmektedir. Bahsedilen özelliklerinin iyileşmesinin, bitki hasadının 3-4 ay gecikmesi ile sağlanabilmektedir. Bu sürede kül oranı 40 g/kg'dan 25'e, K 9 g/kg'dan 4'e, Cl 4 g/kg'dan 1'e, N 5 g/kg'dan 4'e, ve rutubet 564 g/kg'dan, 291 g/kg'a düşmüştür. Benzer şekilde bütünleşik proje olarak AB ülkelerinde yapılan bir çalışmada kışın hasadı yapılan *Miscanthus* bitkisinde üç önemli enerji bileşiği; lignin 76-115 g/kg, selüloz 412-529 g/kg ve hemiselüloz oranı 235-338 g/kg arasında değişim göstermiştir. Denenen bitkiler arasında en yüksek lignin ve selüloz oranına *Miscanthus × giganteus* olmuştur [31]. Brosse ve ark. [14], literatür çalışmasında yine en popüler enerji bitkisi *Miscanthus*'un selüloz oranının %40-60, hemiselülozun %20-40 ve lignin oranının %10-30 arasında değişim gösterdiğini bildirmektedir.

2.5. Biyokütle Enerjisi Yasal Mevzuat

Uluslararası düzeyde karbondioksit salınım vergilerinin miktarı ve sıkı kontrolü, yenilenebilir enerji kaynaklarına uygulanan teşvik ve prim sistemleri gibi enerji ve

çevre politikaları enerji kaynakları ve çeşitlendirilmesinde belirleyici olan faktörlerdir. Uluslararası boyutta imzalanan Kyoto protokolü, Paris COP21 sera gazı oluşturan fosil yakıtların azaltılmasını öngörmektedir. Bununla beraber fosil yakıtlar halen en ucuz kaynaklardır ve yenilenebilir enerji kaynaklarının, biyokütle kaynakları dahil, enerji maliyeti daha yüksek seyretmektedir. Fiyat farklılığı ve dalgalanmaları biyokütle enerjisi ekonomisini de belirlemektedir. Diğer yönden fosil kaynakları yetersiz ülkeler, enerji güvenliğini sağlama, çeşitlilik oluşturma gibi nedenlerle iç kaynaklarına destek ve teşvikler sağlamaktadır. Avrupa birliği 2020 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının oranını %20'ye çıkarmaya hedeflemektedir [32]. Bu senaryoya göre biyokütle yakıtına olan talebin her geçen yıl arttığı öngörülmektedir. Sıvı yakıt biyokütle ham madde kaynaklarına olan rekabet, yine biyokütle yakma endüstrisinin rekabetini etkileyici faktör olacaktır.

Türkiye'deki mevcut enerji kullanımının %70'inin çevreye zararlı fosil yakıtlardan karşılandığı ve kullanılan toplam enerjinin %72 oranında ithal edildiği bilinmektedir [13]. 2009 yılında yayınlanan Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi'ne göre 2023 yılında yenilenebilir enerjinin toplam üretimdeki payının %30'a çıkarılması hedeflenmektedir. Bu hedef değere bakıldığında, Türkiye zengin biyokütle enerjisi potansiyelini değerlendiremediği ve halen enerji ithalatçısı durumunda olduğu anlaşılmaktadır [13].

Biyokütle enerjisi alternatif enerji kaynakları içerisinde, rüzgar ve güneş gibi kesikli değil, sürekli enerji sağlayabilen bir kaynaktır. Biyokütle enerjisinin kolay depolanabilir olması diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre avantaj sağlar. Türkiye'nin enerji politikalarında yenilenebilir enerji, ağırlıklı olarak, yerli kaynak olma ve enerjide dış ülkelere olan bağımlılığı azaltma işlevi çerçevesinde değerlendirilmiştir. 2005 yılında yürürlüğe giren 5346 sayılı "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun" yenilenebilir kaynakların kullanımının geliştirilmesini sağlamıştır [33]. Bu Kanunun amaçları; yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, güvenilir, ekonomik ve kaliteli biçimde ekonomiye kazandırılması, kaynak çeşitliliğinin artırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılması, atıkların

değerlendirilmesi, çevrenin korunması ve bu amaçların gerçekleştirilmesinde ihtiyaç duyulan imalat sektörünün geliştirilmesidir. Bu kanunda yapılan 2010 yılı değişikliği ile biyokütle santralleri, güneş enerjisi ile birlikte en fazla fiyat alım desteği garantisi verilen kaynak olmuştur. İlave olarak tesis kurulumları, ekipmanların yerli kaynaklardan temin edilmesi şartıyla destekleme kapsamına alınmıştır.

2009 yılında yayınlanan Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi'ne göre 2023 yılında yenilenebilir enerjinin toplam üretimdeki payının %30'a çıkarılması hedeflenmektedir. Biyokütle bazında ise konu ile alakalı Çevre Kanunu da önemli bir konumdadır. Biyokütle santrallerine yönelik takip edilmesi gereken kanunlar, ikincil mevzuat, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu kararları ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı duyurularını kapsamaktadır. 2007 yılında yürürlüğe giren Enerji Verimliliği Kanunu ve 2012- 2013 yıllarını kapsayan Enerji Verimliliği Strateji Belgesi ise; ağırlıklı olarak enerji israfının önlenmesi, enerjinin etkin kullanımı ve çevre korunumu konuları üzerinde durmuşlardır. Enerji Verimliliği Strateji Belgesi çalışmalarına göre, 2023 yılında Türkiye'nin enerji yoğunluğunun (milli gelir başına tüketilen enerji miktarı) 2011 yılı değerine göre en az %20 oranında azaltılması hedeflenmektedir [34].

Tüm bu gelişmelere karşın, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusunda arzu edilen sonuçlar alınamamıştır. Fosil enerji kaynaklarının fiyat seyrinin yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişimini belirlemeye devam etmesi öngörülmektedir.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE METOT

3.1. Çalışmada Kullanılan Arıtma Çamuru

Deneyleerde Sakarya'da bulunan Karaman Evsel Atıksu Arıtma Tesisi'nden temin edilen arıtma çamuru kullanılacaktır. Tesis, 90.000 m³/gün kapasite ile çalışan uzun havalandırmalı aerobik aktif çamur ünitesinden oluşmaktadır. Havalandırma havuzunda oluşturulan aktif çamur buradan yoğunlaştırma ünitesine oradan da belt filtreye verilmekte sonuç olarak %20 kuru madde içeren arıtma çamuru oluşmaktadır. Çalışmada bu belt filtreden çıkan çamur kekleri kullanılmıştır.

Arıtma çamuru önce 70 °C'de kurutulup, ardından parçalanıp, 2 mm elek çapından elenerek analize hazır hale getirilmiştir. pH, arıtma çamuru numunesi 1:5 (w/v) oranında saf su ile seyreltilip, süzüntü süspansiyonunda ölçülmüştür [35]. Elektriksel iletkenlik (EC) yine aynı süspansiyonda EC elektrodu ile ölçülmüştür. Organik madde modifiye Walkley–Black yaş yakma yöntemiyle yüzde (%) olarak belirlenmiştir [36]. Toplam azot Kjeldahl yöntemiyle belirlenmiştir [35]. Çamur fosfor içeriği ise NaHCO₃ ile ekstrakte edilen çözeltilerdeki P spektrofotometrede mg/kg olarak belirlenmiştir [37]. Yaklaşık 250 mg toprak örneği 6 ml HNO₃ (65%), 1 ml H₂O₂ (30%) asit karışımında mikrodalga yakma sisteminde (Sorisoİe-Bgİtaly) çözündürülerek hazırlanan numunelerde makro ve mikro elementler ile ağır metal ölçümü ICP-OES (Spectro Arcos, Kleve, Germany) yapılmıştır. Arıtma çamurunun kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Arıtma çamuru, sistemin uzun havalandırmalı aktif çamur sistemi arıtma tesisi olmasından dolayı aerobik olarak yeterince çürütölmektedir. Bu esnada BOİ, organik madde ve kısmen indikatör mikroorganizma giderimi sağlandığından, USEPA tarafından belirlenen kriterler çerçevesinde B sınıfı (arazide bitkisel üretimde kısıtlı

kullanıma uygun) kategorisine girmektedir. Ayrıca arıtma çamuru tarımsal amaçlı bertaraf risk oluşturmayacak şekilde limit değerleri sağlamasının yanı sıra içerdiği ağır metal seviyeleri bakımından da tarımsal arazilerde uygulanmasında bir sakınca bulunmamaktadır [8].

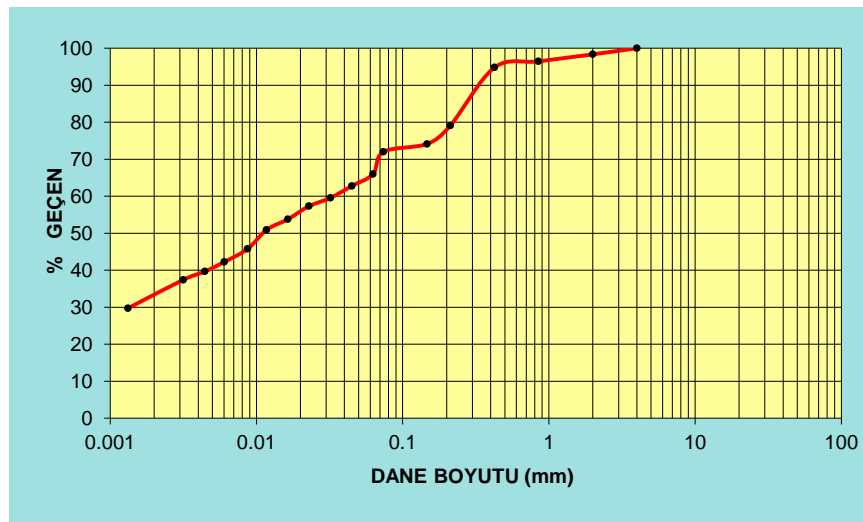
Tablo 3.1. Bitki denemelerinde kullanılan arıtma çamuru ve toprağın fizikokimyasal ve kimyasal özellikleri.

Parametre	Arıtma çamuru	Toprak
pH	7.4	7.8
EC ($\mu\text{s cm}^{-1}$)	1998	456
Organik madde (%)	58	1.83
CaCO ₃ (%)	-	14.32
Toplam N (%)	3.62	0.23
P mg kg ⁻¹	315000	18.02
K mg kg ⁻¹	12000	618.06
Ca mg kg ⁻¹	72000	6219
Mg mg kg ⁻¹	26000	636
Fe mg kg ⁻¹	121.9	6.98
Cu mg kg ⁻¹	19	4.21
Mn mg kg ⁻¹	277	4.47
Zn mg kg ⁻¹	1436	2.14
Cd mg kg ⁻¹	3	<0.05
Pb mg kg ⁻¹	34	<0.05
Cr mg kg ⁻¹	243	1.23
Ni mg kg ⁻¹	79	0.92

3.2. Çalışmada Kullanılan Toprak

Çalışmada Sakarya bölgesinden temin edilen tarla toprağı kullanılmıştır. Toprak örneğı hava kurusu haline geldikten sonra, 2 mm'lik elekten geçirilerek analize hazır hale getirilmiştir. Toprak örneklerinin kum, kil ve silt yüzdeleri Bouyoucos hidrometre yöntemiyle belirlenmiştir. Toprak örneğı 1:5 oranında saf su ile sulandırılarak süspansiyon 15 dakikalık aralarla 3 kez karıştırıldıktan ve 15 dakika beklendikten sonra pH belirlenmiştir. Elektriksel iletkenlik (EC) değerleri pH ile aynı yöntem kullanılarak EC ölçer ile belirlenmiştir[35]. Organik madde modifiye Walkley–Black yaş yakma yöntemiyle yüzde (%) olarak belirlenmiştir [36]. Toprak

örneklerinin kireç içerikleri Scheibler kalsimetresi ile volümetrik metotla yüzde (%) olarak belirlenmiştir. Toplam azot Kjeldahl yöntemiyle belirlenmiştir[35]. Elverişli fosfor NaHCO_3 ile ekstrakte edilen çözeltideki P spektrofotometrede mg/kg olarak belirlenmiştir [37]. Yaklaşık 250 mg toprak örneği 6 ml HNO_3 (65%), 1 ml H_2O_2 (30%) asit karışımında mikrodalga yakma sisteminde (Soriso-BgItaly) çözündürülerek hazırlanan numunelerde K ve ağır metal ölçümü ICP-OES (SpectroArcos, Kleve, Germany) yapılmıştır. Toprağın bünye (tekstür) karakteri Şekil 3.1.'de verilmiştir. Toprağın kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.1.'de verilmiştir.

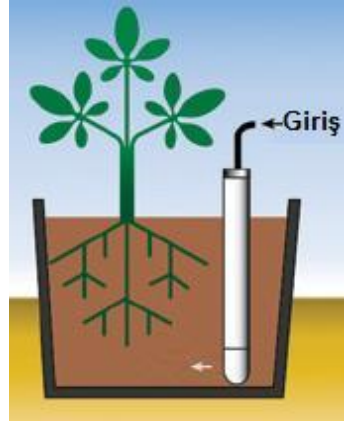


Şekil 3.1. Saksı denemelerinde kullanılan toprağın tekstür analizi

Toprak çok yıllık enerji bitkilerinin yetiştirilmesine uygun, kumlu-killi-tın karakterlidir. Tektür analizi bileşenleri kum (>0.2 mm) %28, silt veya tın ($0.002-0.2$ mm) %38 ve kil (<0.002 mm) %34 olarak tespit edilmiştir.

3.3. Bitki Yetiştirme Saksıları

İçine arıtma çamuru ve doğal toprak doldurularak bitki dikiminde kullanılan saksılar 30 cm derinlik ve 0.1 m^2 yüzey alanı olacak şekilde seçilmiştir ($V=0.30 \times 0.18 \times 0.18 \times 3.14 = 0,03 \text{ m}^3$), yaklaşık 30 L. Bitki yetiştirme saksıları tartılabilir lisimetre prensibine göre hazırlanmış, drenaj delikleri bulunmamaktadır. Bitki yetiştirme saksısı ve arıtma çamuru besleme yöntemi Şekil 3.2.'de verilmiştir.

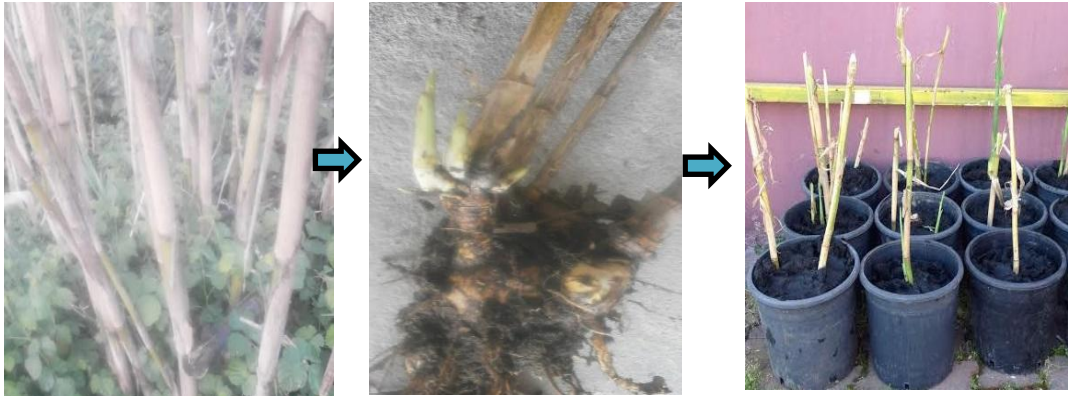


Şekil 3.2. Bitki yetiştirmede kullanılan saksı ve çamur besleme yöntemi

Bitki yetiştirme saksısına %80 rutubet içeren filtre keki arıtma çamuru doldurulmuş ve içine bitki dikilmiştir. Bundan sonraki su tüketimine bağlı olarak hacim kaybı ek %4 KM içerikli çamur beslemesi ile takviye edilmiştir. İçine toprak doldurulan saksılara ilave bir toprak ilavesi yapılmamıştır. Bitki dikilen saksılar normal çevre koşullarında bir yetiştirme mevsimi boyunca büyütülmüştür.

3.4. Çalışmada Kullanılan Enerji Bitkileri

Çalışmada enerji bitkisi olarak, Sakarya bölgesinden toplanan *Arundo donax* ve *Miscanthus × giganteus* bitkileri kullanılmıştır. Enerji bitkileri erken ilkbaharda rizomlardan yeni bitki oluşumu aşamasında toplanmış, rizomlar birer bitki olacak şekilde bölünmüş ve ardından hazırlanmış saksılara dikilmiştir (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Arundo bitkisinin toplanması, fidelenmesi ve dikiminin gerçekleştirilmesi.

3.5. Deneme Planı

Saksı denemeleri iki faktörlü ($A \times B$, A iki seviye ve B iki seviyeli) $2 (A) \times 2 (B)$ faktörlü ANOVA deneme planına göre hazırlanmıştır. A faktörüne arıtma çamuru ve toprak, B faktörüne iki farklı bitki türü *Arundo* ve *Miscanthus* yerleştirilmiştir. Çalışma 3 tekerrürlü olarak, toplam 12 bitki yetiştirme ünitesinde gerçekleştirilmiştir (Tablo 3.2.).

Tablo 3.2. Deneme planındaki uygulamalar ve deney ünitesi

A_1B_1	A_1B_2	A_2B_1	A_2B_2
A_1B_1	A_1B_2	A_2B_1	A_2B_2
A_1B_1	A_1B_2	A_2B_1	A_2B_2

A_1 Normal toprak, B_1 *Arundo donax*, A_2 Saf arıtma çamuru, B_2 *Miscanthus giganteus*

3.6. Enerji Bitkilerinde Yapılan Analizler

Bitkiler sonbaharda ilk don tarihinden itibaren kurumaya başlamışlardır. Bitkilerin yaprakları kuruduğu anda hasatları gerçekleştirilmiştir. Hemen toprak üstünden kesilen bitkilerin kuru madde verimleri ile kimyasal içerik analizleri yapılmıştır. Hasat edilen bitki örnekleri önce hava kuru olarak kurutulmuş ve ardından 78 °C’de sabit ağırlığa gelene kadar kurutulmuştur. Bitki rutubet oranı 105 °C’de yine sabit ağırlığa kadar kurutulmuş numunelerde gravimetrik yöntemle bulunmuştur. Bitkide kül ve organik madde içeriği, 550 °C’de numunelerin 4 saat süreyle yakılması ve organik madde kayıplarının fırın kuru ağırlık ilkesine göre % olarak hesaplanmasıyla belirlenmiştir. Bitki toplam azot içeriği Kjeldahl metodu ile belirlenmiş ve % olarak ifade edilmiştir. Bitki örneklerindeki mineral madde ve ağır metal konsantrasyonları, 250 mg numunenin 6 ml HNO₃ (65%), 1 ml H₂O₂ (30%) asit karışımında, mikrodalga çözüldürücüde (SorisoIe-BgItaly) 10 dakika 170 °C, 15 dakika 200 °C, 10 dakika 100 °C ve 10 dakika 100 °C olmak üzere toplam 45 dakika yakılmasıyla elde edilen numunelerde yapılmıştır. Numuneler soğutulduktan sonra ultra saf su ile 25 ml’ye tamamlanmış ve uygun seyreltmeler yapılarak analiz çözeltileri hazırlanmıştır. Stok çözeltiler, ekstraksiyon çözeltisi ile numunedeki element konsantrasyonunu içine alacak şekilde seyreltilerek en az 5 kalibrasyon çözeltisi hazırlanmıştır. Tanık deney

numunesi ise, deney numunesi alınmadan, numune yerine saf su kullanılarak ve deney numunesine uygulanan bütün işlemler aynen uygulanarak hazırlanmıştır. Kalibrasyon çözeltileri, deney çözeltileri ve tanık deney numunelerindeki ağır metallerinin absorbanları ICP- OES (SpectroArcos, Kleve-Germany) spektroskopisinde ölçülmüş ve sonuçlar mg/kg biriminde kuru ağırlık olarak ifade edilmiştir.

Bitki örneklerinde lignini, selüloz ve hemiselüloz Van Soest ve ark [38] yöntemi kullanılarak fibertek sistem (FOSS Tecator, Hillerød, Denmark) ile yapılmıştır. Bu yöntemde neutral detergent fibre (NDF), acid detergent fibre (ADF), ve acid detergent lignin (ADL) içerikleri tespit edildikten sonra; selüloz = ADF - ADL; hemiselüloz = NDF - ADF ve lignin ADL şeklinde ifade edilmektedir.

Bitki örneklerinin enerji içeriği bomb kalorimetre’de Zema ve ark. [39] yöntemi kullanılarak tayin edilmiştir. Bu yöntemde numuneler 1 mm’de öğütülerek, önce 60 °C ve ardından 105°C’de kurutulmakta ve rutubet içeriği belirlenmektedir. Ardından numune hacmi bilinen küvetin içine doldurularak referans sıcaklık 25°C’de üst ısıl değeri (HHV) kalori olarak ölçülmektedir. Ardından 60°C’deki alt ısıl değeri denklem 1’de gösterildiği gibi formülle tahmin edilmektedir.

$$LHV = HHV \left(1 - \frac{WC}{1000}\right) - P_s \left(\frac{WC}{1000}\right) \Delta H_v (3.1)$$

WC, 60 °C’deki rutubet içeriği (g/kg); P_s, numune ağırlığı (1.03 ± 0.01 g); ΔH_v, suyun buharlaşma ısısı (2.54 MJ kg⁻¹).

Yanma gazları için öğütülmüş bitki örnekleri önce pelletlenmiştir. Pellet numuneler, biyokütle yakıtları yakılması için tasarlanan akışkan yataklı pilot yakma tesisinde yakılırken, yanma gazları (SO₂, CO, CO₂, O₂, NO_x), multi gaz analizatörü (TESTO 350 M XL-454) kullanılarak sürekli olarak ölçülmüştür. Yakma deneylerinde ortaya çıkan kül, kapsadığı mineraller için, daha önce belirtilen yöntemler kullanılarak mineral analizine tabi tutulmuştur. Bu deneyler akredite laboratuvarından hizmet alımı ile gerçekleştirilmiştir.

Denemeler tesadüf parselleri deneme desenine göre üç tekrarlamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bitki ve kül örnekleri için toplanmış veriler, istatistiki farklılıkların tespiti için varyans analizine (ANOVA) tabi tutulmuş, istatistiki olarak önemi çıkmış ortalamalar çoklu karşılaştırma testi LSD ile %5 seviyesinde kıyaslanmıştır.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Bitki Verimi ve Kompozisyonu

Arıtma çamuru ve doğal toprakta geleneksel gübreleme yöntemi ile yetiştirilen iki enerji bitkisi türü *Arundo donax* ve *Miscanthus × giganteus*'un kuru biyokütle verimleri ve istatistiki analiz sonuçları Tablo 4.1.'de verilmiştir. Deneme ortalaması olarak arıtma çamurunda yetiştirilen bitkiler, doğal toprak uygulamasında yetiştirilen bitkilerle kıyasla, daha fazla kuru biyokütle üretmişlerdir. Arıtma çamuruna *Arundo donax* bitkisi, *Miscanthus × giganteus*'dan daha fazla tepki vermiş, bunun sonucunda, arıtma çamurunda yetiştirilen *Miscanthus × giganteus*'un biyokütle verimi *Arundo donax* bitkisinden istatistiki olarak daha düşük belirlenmiştir. Toprakta yetiştirilen bitkilerin büyüme dinamiği, arıtma çamurunda yetiştirilen bitkilerin büyümesinden daha hızlıdır. Bununla birlikte, adaptasyon döneminden sonra, çamur üzerinde yetiştirilen bitkiler, toprakta yetişenler gibi belirgin bir büyüme göstermiştir [6, 22].

Arıtma çamuru üzerinde yetiştirilen deneysel bitkilerde, maksimum biyokütle verimi 2,06 kg m² olarak ölçülmüştür (Tablo 4.1.). Her iki bitki türünün de biyokütle verimi ortalamaları, toprak ortamında daha düşük gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, arıtma çamurlarının bitkilere yeterli bitki besin elementi sağlayabildiğini göstermektedir [6, 23, 39]. *Arundo* bitkisinin biyokütlesinin toprakta yetişenden daha fazla olması, arıtma çamurunun içerdiği yüksek miktardaki bitki elementlerine (Tablo 3.1.) ve bunları bitkilere sağlayabildiğine bağlanabilir. Bu bulgular, farklı atık maddelerini enerji bitkilerinde gübre sağlayıcı olarak deneyen önceki çalışmalarla uyum içindedir [23]. Ancak, bu çalışmada biyokütle verimleri birinci yıl üzerinden değerlendirilmiştir. Çok yıllık enerji bitkilerinde biyokütle verimi, alanı tam olarak kapladıkları yıla kadar kademeli olarak artış göstermekte, toprak yüzeyini tamamen

kapladıkları optimum bitki sıklığında en yüksek biyokütle verimine ulaşmaktadır [5, 20, 21].

Tablo 4.1. Doğal toprak ve arıtma çamurunda yetiştirilmiş deneme bitkilerinin kuru biyokütle verimi, su içeriği, kül içeriği, enerji verimi ve element analizi.

Parametre	Bitki türleri					
	<i>Miscanthus x giganteus</i>			<i>Arundo donax</i>		
	Toprak	Çamur	Fark (%)	Toprak	Çamur	Fark (%)
Kuru biyokütle verimi (kg m ⁻²)	1,73	1,89	8,46	1,81	2,25	19,55
Su içeriği (%)	11,62	11,43	1,63	12,83	11,74	8,49
Kül içeriği (%)	5,96	5,47	6,15	3,76	3,23	14,10
Uçucu madde (%)	73,45	74,24	1,06	75,42	76,63	1,58
Sabit karbon (%)	18,59	18,31	1,50	19,82	19,15	3,38
Selüloz (%)	48,82	49,55	1,47	39,77	40,63	2,12
Hemiselüloz (%)	27,15	26,76	1,44	23,54	24,29	3,09
Lignin (%)	10,94	10,63	2,83	16,48	16,82	2,02
LHV (MJ kg ⁻¹)	16,43	16,09	2,07	16,89	16,26	3,73
HHV (MJ kg ⁻¹)	17,95	17,62	1,84	17,31	18,05	4,10
C (%)	49,08	49,73	1,31	47,97	48,86	1,82
O (%)	36,59	37,67	2,87	40,53	39,28	3,08
H (%)	5,72	5,70	0,35	5,77	5,68	1,56
N (%)	0,49	0,53	9,30	0,99	1,02	2,94
S (%)	0,09	0,11	9,09	0,12	0,11	8,33

Enerjice zengin biyokütle bitkilerinin, en önemli enerji yoğun organik bileşenleri, enerji yoğunluklarına göre sırasıyla, lignin, hemiselüloz ve selülozdur [40]. Bitkilerin hücre duvarı bileşeni olarak rol alan bu bileşenlerin miktarı bitki türlerinde istatistiki olarak önemli derecede farklı bulunmuş, ancak arıtma çamurunun etkisi önemli bulunmamıştır (Tablo 4.1.). Selüloz ve hemiseliloz miktarı *Miscanthus x 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 [14]. Biyokütle kompozisyonu sonuçları, selülozun %35-40, hemiselülozun %25-30 ve ligninin %25-30 aralığında değişim gösterdiğini belirten literatür bilgileri ile uyum içindedir [4, 19]. Literatürde verilen aralıklar içinde değişim, bitki türleri arasındaki

farklılık, yetiştirme koşulları, bitki hasat zamanı ve analizi yapılan bitki bölümü ile kullanılan analitik yöntemden kaynaklanmaktadır [15, 20, 21].

4.2. Enerji İçeriği

Farklı uygulamalarda yetiştirilen bitkilerin, enerji ham maddesi özelliği taşıyan toprak üstü aksam kuru biyokütlerinde belirlenen enerji içeriği değerleri Tablo 4.1.'de verilmiştir. Doğal toprak ve arıtma çamuru uygulamasında yetiştirilen *Arundo* bitkisinde, kuru bazda tespit edilen üst ısıl değer (HHV),sırası ile 17,31 – 18,05 MJ/kg, *Miscanthus* bitkisinde ise 17,55 – 17,62 MJ/kg arasında değişim göstermiş ve bitki türleri ve yetiştirme ortamları arasında istatistiki olarak farklılık tespit edilmemiştir. Yakıtların enerji değerleri esas olarak hammaddenin karbon içeriğine göre hesaplanır, bu nedenle enerji değeri önemli ölçüde biyokütlenin karbon içeriğinden etkilenir [2, 39, 40].Bu çalışmada, doğal toprak ve arıtma çamurunda yetiştirilmiş, farklı türdeki bitkilerin benzer enerji değerlerine sahip olması, bitkilerin benzer karbon içeriğine sahip olmasından kaynakladığı izlenimi vermektedir. Enerji içeriğini belirleyen bir diğer parametre de yakıtın sahip olduğu kül miktarıdır [14, 15]. Aynı zamanda, arıtma çamuru uygulamalarında oransal olarak daha düşük kül içeriğinin saptanması, istatistiki olarak önemli olmasa bile bu uygulamaların daha yüksek karbon içeriği ve enerji değeri vermelerine neden olabilir. Diğer yandan her iki bitki türü için doğal toprak ve arıtma çamuru uygulamasında tespit edilen üst ısıl değerleri (HHV), literatürde bu bitkiler için verilen değerlerle uyum içindedir [3, 7, 30].

4.3. Bitki Besin Elementi ve Ağır Metal Konsantrasyonu

Bitki yetiştirme ortamı olarak arıtma çamuru, doğal toprak uygulamasına kıyasla, bitki dokularında tespit edilen makro besin elementi ve ağır metal içeriğini istatistiki olarak önemli ölçüde etkilemiştir (Tablo 4.2. ve Tablo 4.3.). Bitkiler arasında istatistiki olarak önemli fark olmamakla birlikte, arıtma çamuru uygulamasında tespit edilen K, P, Ca, Mg konsantrasyonları doğal toprak uygulamasında tespit edilen değerlerden istatistiki olarak daha yüksek bulunmuştur. İstatistiki olarak önemsiz

olmakla birlikte *Arundo* bitkisi K, Ca ve Mg, *Miscanthus* bitkisi ise P biriktirme eğilimli olmuştur. Bitkide tespit edilen Na ve Cl konsantrasyonları uygulamalardan istatistiki olarak farklı derecede etkilenmemiştir. Diğer yandan bitki dokularında tespit edilen N miktarı *Arundo* bitkisinde istatistiki olarak *Miscanthus* bitkisinden daha yüksek tespit edilmiştir (Tablo 4.1.). Bilindiği gibi N bitki büyümesinde birinci derecede etkili elementtir fakat, bitkide tespit edilen N yetiştirme ortamlarından istatistiki olarak önemli derecede etkilenmemiştir.

Tablo 4.2. Doğal toprak ve arıtma çamurunda yetiştirilmiş deneme bitkilerinin toprak üstü bölümlerinin makro nutrient içeriği (mg/kg KM).

Uygulama	K	P	Ca	Mg	Na	Cl
Çamur <i>Arundo</i>	2,92a	0,42a	1,71a	0,58a	0,06	0,13
Toprak <i>Arundo</i>	1,94b	0,29b	0,89b	0,35b	0,05	0,11
Çamur <i>Miscanthus</i>	2,81a	0,48a	1,68a	0,55a	0,09	0,16
Toprak <i>Miscanthus</i>	1,88b	0,34b	0,81b	0,26b	0,07	0,12
LSD0.05	0,089	0,036	0,145	0,095	n.s.	n.s.

Aynı sütundaki ortalamaların, aynı harfi alması, LSD çoklu karşılaştırma testi sonucuna göre %95 ihtimal sınırında istatistiki olarak benzer olduğunu göstermektedir, n.s. istatistiki olarak önemli değil.

Yakıt ham maddesinin kimyasal özelliği, potansiyel olarak yanma emisyonlarından hem hava emisyonu hem de gaz emisyonuna etki eder [41]. K, Cl, N ve S gibi mineral içeriği, biyokütle yanma kalitesinde önemli bir rol oynar [14]. *Arundo* bitkisinin ortalama N içeriği (%1,01) *Miscanthus* bitkisinde ölçülenden (%0,51) daha fazla bulunmuştur. K, S ve Cl toz partikül PM1 emisyonlarının kaynağını oluşturur. K değeri (%0,24) *Arundo* bitkisinde daha yüksek tespit edilirken, S (%0,11) ve Cl (%0,01) *Miscanthus* bitkisinden istatistiki olarak daha yüksek bulunmamıştır. Bununla birlikte *Miscanthus*PM1 oluşturan elementler; K %0,22, Cl %0,01, S %0,10 bakımından daha düşük konsantrasyona sahip bitki olarak belirlenmiştir.

Bitki türlerine bağlı olmaksızın, arıtma çamurunun etkisiyle *A.donax* ve *M.giganteus* bitkilerinin biyokütlesinde ağır metal konsantrasyonu yükselmiştir. Genel olarak doğal toprakta yetişen bitkilerde makro nutrient ve ağır metal konsantrasyonları, arıtma çamurunda yetişen bitkilerde tespit edilen değerlerden daha düşük bulunmuştur. Bununla birlikte, tespit edilen değerler atık maddeler kullanılarak yetiştirilen enerji bitkilerinde tespit edilen mineral konsantrasyonları ile uyum

içindedir[6, 7]. Diğer yandan enerji bitkilerinin topraktan kaldırdığı ağır metal miktarı düşük olmakla birlikte, uzun dönemde, kirletilmiş toprakların fitoremediasyon teknolojileri ile temizlenebileceğini öneren çalışmalar da bulunmaktadır [7, 16]. Enerji bitkilerinin bu amaçla kullanılması yenmeyen bitkiler olduğu için artı avantaj da sağlayabilmektedir.

Tablo 4.3. Deneme faktörlerine bağlı olarak *Arundo* ve *Miscanthus* bitkilerinin toprak üstü aksamında ağır metal içeriği (mg/kg KM).

Uygulama	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Çamur <i>Arundo</i>	1,12a	2,02a	6,21a	2,46b	2,53a	51,79a
Toprak <i>Arundo</i>	0,38b	0,29b	1,27b	0,92c	0,19c	10,91c
Çamur <i>Miscanthus</i>	1,11a	1,71a	6,64a	3,05a	1,83b	43,65b
Toprak <i>Miscanthus</i>	0,29b	0,38b	1,39b	0,81c	0,18c	11,22c
LSD0.05	0,330	0,811	0,975	1,241	0,872	4,860

Aynı sütündeki ortalamaların, aynı harfi alması, LSD çoklu karşılaştırma testi sonucuna göre %95 ihtimal sınırında istatistiki olarak benzer olduğunu göstermektedir, n.s. istatistiki olarak önemli değil.

4.4. Uygulamaların Kül Kompozisyonuna Etkisi

Biyokütle yakıtlarının kül miktarı ısı değer ve yanma kalitesini etkiler [23]. Bitkisel kaynaklı biyoyakıtların külü içinde genellikle Si, K, P, Ca, Mg, S, Na, Al, Fe ve Mn minerallerinin oksit formları bulunur. *Miscanthus* ve *Arundo* bitkilerinin yanma deneylerinden sonra kalan külünde yapılan analizlerde elde edilen kül bileşimi sonuçları Tablo 4.4.'de sunulmuştur. Bu Tablodan anlaşılacağı gibi her iki bitkide de baskın olan element Si olmuş, ancak *Arundo* bitkisinde %10 oranında daha yüksek bulunmuştur. İkincil yüksek konsantrasyonlu element olarak K ve Ca her iki bitki ve toprak, çamur uygulamaları için istatistiki olarak benzer bulunmuştur. Küldeki mineral örnekleri tüm yetiştirilen bitki ve uygulamalar için benzerdir. Genel olarak, Na, Al, Fe ve Mn gibi elementlerin kül içindeki toplam miktarı %1'in altında bulunmuştur.

Bitkisel kaynaklı biyoyakıtların kül miktarı ve külün element bileşimi biyokütlenin yanma prosesini ve enerji dönüştürme verimliliğini etkiler. Bu nedenle, kül yüzdesi ve P, K, S, Cl gibi mineral elementlerinin korozyon, cüruf, is, kurum oluşumu ve çevre kirliliğine neden olan zararlı emisyonları önlemek ve yanma verimi açısından,

daha az olması istenir [20, 23, 24]. Enerji bitkilerinin kül bileşimi, bitki tür çeşitliliğine, yetiştirme koşullarına ve uygulanan gübreleme programlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [30, 31]. Bu çalışmada, incelenen tüm elementlerin konsantrasyonu her iki bitki türü için büyütüldüğü uygulamaya bağlı bulunmuştur. Örneğin, arıtma çamurunda yetişen *Miscanthus* ve *Arundo* bitkilerinde Si, K, ve Ca mineralleri toprakta yetiştirilen bitkilere kıyasla yüksek, Al ve Fe ise düşük konsantrasyonlarda bulunmuştur. Ayrıca *Miscanthus* bitkisinin külünde P değeri *Arundo* bitkisinin külündeki miktardan daha fazla bulunmuştur. Atık uygulamalarının bitki mineral içeriğine etkisi, arpa ve mısır samanları gibi diğer biyokütle küllerinde de gözlenmiştir [6].

Tablo 4.4. Doğal toprak ve arıtma çamurunda yetiştirilmiş deneme bitkilerinin kül kompozisyonları.

Parametre (%)	Bitki türleri					
	<i>Miscanthus x giganteus</i>			<i>Arundo donax</i>		
	Toprak	Çamur	Fark (%)	Toprak	Çamur	Fark (%)
Si	24	23	%4	33	33	0
K	7	7	0	8	9	0
Ca	9	9	0	8	7	14
Mg	3	0	0	2	2	0
P	3	4	0	1	1	0
Al	<1	<1	0	1	1	0
Na	<1	<1	0	<1	<1	0
Fe	<1	<1	0	<1	<1	0
Mn	<1	<1	0	<1	<1	0
S	<1	<1	0	<1	<1	0
O	46	47	2	47	46	2

Külde ağır metal konsantrasyonunun yüksek olması bertaraf edilme zorluğu olduğundan ve yeniden besin maddesi olarak külü kullanma imkanı vermediğinden dolayı istenmez [8]. Tablo 4.3.'de görüldüğü gibi, arıtma çamuru uygulamalarında bitkide ağır metal konsantrasyonu yükselmiştir. Pb, Ni, Cr konsantrasyonları Arıtma çamurunda yetişen bitkilerde, doğal toprakta yetişene kıyasla daha yüksek değerdedir. Bununla birlikte, çamur uygulamasındaki kül ağır metal değerleri, benzer çalışmalarla elde edilen değerlerle aynı aralıktadır [2]. Enerji bitkilerinin

hiperakümülatör özelliği göstermemesi bu açıdan değerlendirildiğinde, kül emisyonlarının daha az tehlikeli atık özelliği kazandırabilir [16].

4.5. Yanma Gazı Emisyonları

Tablo 4.5. arıtma çamuru ve doğal toprakta yetiştirilmiş *Miscanthus* ve *Arundo* bitkilerinin yanma gazı emisyonlarında tespit edilen varyasyonları göstermektedir. Sonuçlardan da görüleceği gibi, arıtma çamurunda yetişen her iki bitki için NO_x ve SO_x değerleri artış eğiliminde olmuştur. NO_x emisyonu azot içeriği ile doğru orantılı bulunmuş, bu nedenle azot içeriği yüksek *Arundo* bitkisinde NO_x emisyonu daha yüksek ve istatistiki olarak önemli bulunmuştur. Ortalama olarak NO_x emisyon değerleri arıtma çamurunda yetiştirilen *Miscanthus* ve *Arundo* bitkilerinde, toprak uygulamasına kıyasla, sırası ile %5,61 ve %9,6 daha yüksek gerçekleşmiştir. Bitki biyokütlesinde yüksek S ve N konsantrasyonları NO_x ve SO_x emisyonlarına neden olmaktadır [14]. Biyokütle yakıtlarda NO_x emisyonunun ana kaynağı, organik maddeye bağlı N olmaktadır [40]. Arıtma çamuru uygulaması bitkide N oranını artırmakla birlikte, her iki bitkinin NO_x emisyon değeri, yönetmeliklerde takip edilen limit değer olan 300 mg/Nm³'ün altındadır [25, 42].

Tablo 4.5. Doğal toprak ve arıtma çamurunda yetiştirilmiş deneme bitkilerinin gaz emisyonları.

Parametre	Bitki türleri					
	<i>Miscanthus x giganteus</i>			<i>Arundo donax</i>		
	Toprak	Çamur	Fark (%)	Toprak	Çamur	Fark (%)
O ₂ (%)	18,42	18,23	1,03	18,11	18,47	1,95
CO ₂ (%)	2,45	2,37	3,26	2,51	2,43	3,18
CO (mg m ⁻³)	1222	1189	2,70	1116	1172	3,12
NO (mg m ⁻³)	148	152	2,63	157	166	5,42
NO _x (mg m ⁻³)	158	169	6,51	160	177	9,60
SO ₂ (mg m ⁻³)	8	9	11,11	9	10	10,00

Hava emisyonunda O₂, CO₂ ve CO miktarlarına çalışmada denenen uygulamaların etkisini gösteren herhangi bir istatistiksel veri veya çalışma bulunmamaktadır. Biyoyakıtın iç oksijen içeriği ve yanma sıcaklıkları, tamamlanmamış yanmanın

oksidasyonunu geliştirir ve bu CO ve CO₂ emisyonlarının iyileşmesine neden olur [43].

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma *Miscanthus* ve *Arundo* bitkileri toprak ve arıtma çamurunda yetiştirilmiş ve oluşan bir yıllık mahsulün enerji verimi, besin ve ağır metal içeriği, kül ve hava emisyon özellikleri analizleri yapılmıştır. Çalışmanın önemli sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Arıtma çamuru her iki bitkinin büyüme ve biyokütle oluşumunu etkilemiştir ama etkisi *Arundo*'da *Miscanthus*'dan daha yüksektir. Enerji verimi, bitki türleri, besin kaynağı, büyüme ortamının toprak ya da arıtma çamuru olmasından etkilenmemiştir. Makro bitki besin elementleri ve ağır metaller genellikle çamurda yetişen bitki biyokütlesinde daha fazladır. Bitkinin yetiştirildiği yere göre ağır elementler değişik değerler göstermiştir. Makro element ve ağır metaller *Arundo* bitkisi biyokütlesinde birikme eğilimi göstermiştir.

Her iki bitki türünde de Si kül emisyonlarının dominant elementi olmuştur. Ancak, *Arundo* bitkisinde daha baskındır. İkincil yüksek değer K ve Ca olup iki bitkide de aynı miktarlardadır. Arıtma çamurunda yetişen ya da doğal toprakta yetişen bitkilerin küllerinde mineral içeriği benzer değerlerdedir.

Arıtma çamuru yetişen bitkideki N değerini arttırdığı için bitkinin emisyon değerinde NO_x miktarın da yüksek olmaktadır. NO_x emisyonları %9,60 oranıyla en fazla *Arundo* bitkisinde oluşmaktadır. Ayrıca *Miscanthus*'da NO_x emisyonu çamur uygulamasında az da olsa artmıştır. Bu yüzden emisyon bitki türleri ile tutarlı fakat konsantrasyon emisyonları çok küçüktür. SO₂ emisyonu bitki türleri ile tutarlıdır ancak çok düşük oranlarda farklılık gösterir.

KAYNAKLAR

- [1] Balat, M., Use of biomass sources for energy in Turkey and a view to biomass potential. *Biomass Bioenerg.* 29(1), 32-41, 2005.
- [2] Baxter, X. C., Darvell, L. I., Jones, J. M., Barraclough, T., Yates, N. E., Shield, I., Miscanthus combustion properties and variations with Miscanthus agronomy. *Fuel*, 117, 851-869, 2014.
- [3] Angelini, L. G., Ceccarini, L., Di Nasso, N. N., Bonari, E., Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass Bioenerg.* 33(4), 635-643, 2009.
- [4] Lygin, A.V., Upton, J., Dohleman, F.G., Juvik, J., Zabolina, O.A., Widholm, J.M., Lozovaya, V.V., Composition of cell wall phenolics and polysaccharides of the potential bioenergy crop–*Miscanthus*. *GCB Bioenergy.* 3(4), 333-345, 2011.
- [5] Acaroglu, M., Aksoy, A.S., The cultivation and energy balance of *Miscanthus x giganteus* production in Turkey. *Biomass Bioenerg.* 29, 42-48, 2005.
- [6] Kolodziej, B., Antonkiewicz, J., Sugier, D., *Miscanthus x giganteus* as a biomass feedstock grown on municipal sewage sludge. *Ind. Crop. Prod.* 81, 72-82, 2016.
- [7] Ociepa-Kubicka, A., Pachura, P., Kacprzak, M. Effect of unconventional fertilization on heavy metal content in the biomass of giant miscanthus. *Desalination Water Treat.* 57(3), 1230-1236, 2016.
- [8] Dede, G., Ozdemir, S., Dede, O.H., Altundag, H., Dundar, M. S., Kiziloglu, F.T., Effects of sewage sludge on nutrient availability for kiwi fruits under high pH soil conditions. *Fresenius Environ. Bull.* 24(5 A), 1762-1766, 2015.
- [9] Esperschuetz, J., Bulman, S., Anderson, C., Lense, O., Horswell, J., Dickinson, N., Robinson, B. H., Production of biomass crops using biowastes on low-fertility soil: 2. Effect of biowastes on nitrogen transformation processes. *J Environ. Quality.* 45(6), 1970-1978, 2016.

- [10] Özdemir, S., Nuhoglu, N.N., Arıtma Çamurları. Sakarya Üniveristesi Yayınları, No: 120, 2015.
- [11] Lag-Brotons, A., Gomez, I., Navarro-Pedreno, J., Mayoral, A.M., Curt, M.D., Sewage sludge compost use in bioenergy production – a case study on the effects on *Cynara cardunculus* L energy crop. *J. Cleaner Production*. 79, 32-40, 2014.
- [12] Midilli, A., Dincer, I., Ay, M., Green energy strategies for sustainable development. *Energy Policy*. 34(18), 3623–3633, 2006.
- [13] Balcı, P., Evren, Y., Biyokütle enerjisi Karacabey’in kırsal kalkınması için bir potansiyel olabilir mi? *Planning*, 25(3), 227-237, 2015.
- [14] Brosse, N., Dufour, A., Meng, X., Sun, Q., Ragauskas, A., Miscanthus: a fast growing crop for biofuels and chemicals production. *Biofuel. Bioproduct. Biorefining*. 6(5), 580-598, 2012.
- [15] Helios W., Kozak M., Malarz W., Kotecki A., Effect of sewage sludge application on the growth, yield and chemical composition of prairie cordgrass (*Spartina pectinata* Link.). *J. Elem.* 19(4), 1021-1036, 2014.
- [16] Antonkiewicz, J., Kołodziej, B., Bielińska, E. J., The use of reed canary grass and giant miscanthus in the phytoremediation of municipal sewage sludge. *Environ. Sci. Pollut. R.* 23(10), 9505-9517, 2016.
- [17] Borkowska, H., Molas, R., Yield comparison of four lignocellulosic perennial energy crop species. *Biomass Bioenerg.* 51, 145-153, 2013.
- [18] Pidlisnyuk, V., Stefanovska, T., Lewis, E.E., Erickson, L.E., Davis, L.C., Miscanthus as a productive biofuel for phytoremediation. *Critical Reviews Plant Sci.* 33, 1-19, 2014.
- [19] Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*. 89(5), 913-933, 2010.
- [20] Monti, A., Di Virgilio, N., Venturi, G., Mineral composition and ash content of six major energy crops. *Biomass Bioenerg.* 32(3), 216-223, 2008.
- [21] Di Nasso, N. N., Angelini, L. G., & Bonari, E., 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, 2010.
- [22] Kołodziej, B., Antonkiewicz, J., Stachyra, M., Bielińska, E. J., Wiśniewski, J., Luchowska, K., Kwiatkowski, C., Use of sewage sludge in bioenergy production-a case study on the effects on sorghum biomass production. *Eur. J. Agron.* 69, 63-74, 2015.

- [23] Smith, R., Slater, F. M. 2010. The effects of organic and inorganic fertilizer applications to *Miscanthus × giganteus*, *Arundo donax* and *Phalaris arundinacea*, when grown as energy crops in Wales, UK. *Gcb Bioenergy*. 2(4), 169-179, 2010.
- [24] Jeguirim, M., Dorge, S., Trouvé, G., Thermo gravimetric analysis and emission characteristics of two energy crops in air atmosphere: *Arundo donax* and *Miscanthus giganteus*. *Bioresour. Technol.* 101, 788-793, 2010.
- [25] Villeneuve, J., Palacios, J.H., Savoie, P., Godbout, S., A critical review of emission standards and regulations regarding biomass combustion in small scale units (< 3MW). *Bioresour. Technol.* 111, 1-11, 2012.
- [26] Obernberger, I., Thek, G., Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass Bioener.* 27(6), 653-669, 2004.
- [27] Godin, B., Lamaudière, S., Agneessens, R., Schmit, T., Goffart, J. P., Stilmant, D., Delcarte, J., Chemical characteristics and biofuel potential of several vegetal biomasses grown under a wide range of environmental conditions. *Ind. Crop. Product.* 48, 1-12, 2013.
- [28] Jensen, E., Robson, P., Farrar, K., Thomas Jones, S., Clifton-Brown, J., Payne, R., Donnison, I., Towards *Miscanthus* combustion quality improvement: the role of flowering and senescence. *GCB Bioenergy*. 9, 891-908, 2017.
- [29] Robson, P., Mos, M., Clifton-Brown, J., Donnison, I., Phenotypic variation in senescence in *Miscanthus*: towards optimising biomass quality and quantity. *Bioenergy Research*. 5, 95–105, 2012.
- [30] Lewandowski, I., Clifton-Brown, J. C., Andersson, B., Basch, G., Christian, D. G., Jorgensen, U., Teixeira, F., Environment and harvest time affects the combustion qualities of genotypes. *Agron. J.* 95(5), 1274-1280, 2003.
- [31] Hodgson, E.M., Lister, S. J., Bridgwater, A.V., Clifton-Brown, J., Donnison, I.S., Genotypic and environmentally derived variation in the cell wall composition of *Miscanthus* in relation to its use as a biomass feedstock. *Biomass Bioener.* 34(5), 652-660, 2010.
- [32] Council Directive 2009/28/EC. European Parliament and of the Council of 23 April on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing. Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. *Official J. Eur. Union*, 2009.
- [33] Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, Tarih: 10.05.2005, Sayı: 5346.

- [34] Peker, O.P., The Opportunities and Limits of Bioenergy for a Sustainable Energy System in Turkey. MSc. Thesis, Lappeenranta University of Technology, Lut School of Energy Systems, 2016.
- [35] Kalra, Y.P., Maynard, D.G., Methods manual for forest soil and plant analysis. Forestry Canada, Northwest Region, Northern forest Centre, Edmonton, Alberta. Information Report NORX319, 1991.
- [36] Ryan, J., Estefan, G., Rashid, A., Soil and Plant Analysis Laboratory Manual. Second Edition. Jointly published by the International Center for Agricultural Research in the Dry Areas ICARDA and the National Agricultural Research Center NARC. Available from ICARDA, Aleppo, Syria. 172, 2001.
- [37] Pierzynski, G.M., Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters. Southern Cooperative Series Bulletin No. 396, 2000.
- [38] Van Soest, P.V., Robertson, J.B., Lewis, B.A., Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J Dairy Sci.* 74(10), 3583-3597, 1991.
- [39] Zema, D.A., Bombino, G., Andiloro, S., Zimbone, S.M. 2012. Irrigation of energy crops with urban wastewater: Effects on biomass yields, soils and heating values. *Agric. Water Manag.* 115, 55-65, 2012.
- [40] Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G., Morgan, T.J., An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel.* 94, 1-33, 2012.
- [41] Carroll, J. P., Finnan, J. M., Biedermann, F., Brunner, T., Obernberger, I., Air staging to reduce emissions from energy crop combustion in small scale applications. *Fuel.* 155, 37-43, 2015.
- [42] SKHKK, 2009. Regulation of control of industrial air pollution. Official Gazette. Issue. 27277.
- [43] Garcia-Maraver, A., Perez-Jimenez, J.A., Serrano-Bernardo, F., Zamorano, M., Determination and comparison of combustion kinetics parameters of agricultural biomass from olive trees. *Renew. Energ.* 83, 897-904, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Mihrican İNAN, 16.05.1982'de Kırcaali'de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2000 yılında Ali Dilmen Süper Lisesinden mezun oldu.2000 yılında Kocaeli Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümüne girdi ve 2005 yılında mezun oldu. 2005 yılında özel sektörde çalışmaya başladı. 2014 yılında Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı.