

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

**BİYOKÜTLE SANTRALİ KÜLÜ BİTKİ BESİN
ELEMENTLERİNİN GERİ KAZANIMI VE GÜBRE KAYNAĞI
OLARAK KULLANIMI**

DOKTORA TEZİ

Güldane Aşlı TURP

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN 2023

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

**BİYOKÜTLE SANTRALİ KÜLÜ BİTKİ BESİN
ELEMENTLERİNİN GERİ KAZANIMI VE GÜBRE KAYNAĞI
OLARAK KULLANIMI**

DOKTORA TEZİ

Güldane Aşlı TURP

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR

HAZİRAN 2023

Güldane Aslı TURP tarafından hazırlanan “Biyokütle Santrali Külü Bitki Besin Elementlerinin Geri Kazanımı Ve Gübre Kaynağı Olarak Kullanımı” adlı tez çalışması 06.06.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof. Dr. Nurtaç ÖZ Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY Yıldız Teknik Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Ömer Hulusi DEDE Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Ahmet ÇELEBİ Sakarya 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 “BİYOKÜTLE SANTRALİ KÜLÜ BİTKİ BESİN ELEMENTLERİNİN GERİ KAZANIMI VE GÜBRE KAYNAĞI OLARAK KULLANIMI” 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.

(...../...../20.....).

(imza)

Öğrencinin Adı Soyadı

Güldane Aslı TURP



Sevgili çocuklarım Poyraz TURP ve Çınar TURP'a



TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, değerli öngörüler ve tecrübeleri ile doktora eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen ve öğrencisi olmaktan onur duyduğum danışmanım Sayın Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR'e, bilimsel çalışma gayretimi ve ilgimi takdir eden, sonsuz desteklerini ve katkılarını sunan Sayın Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY'a, tez çalışmasının geliştirilmesi için tecrübeleri ile beni aydınlatan Sayın Prof. Dr. Nurtaç ÖZ'e, çalışmalarım sırasında güven ve motivasyon desteğini her zaman hissettiğim, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen eşim Sayın Doç. Dr. Sinan Mehmet TURP'a, her zaman yanımda olan, beni maddi ve manevi olarak destekleyen aileme, uzun süren çalışma saatlerimde benimle birlikte büyüyen çocuklarım Poyraz'a ve Çınar'a yürekten teşekkür ederim.

Bu doktora tezi Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü 2022-7-25-143 proje kodu ile desteklenmiştir.

Güldane Aslı TURP



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	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	5
2. MATERYAL METOT	17
2.1. Biyokül XRD Analizi	17
2.2. Vermikompostlama	17
2.3. Kimyasal Analiz Yöntemleri	19
2.4. Sıralı Fosfor Ekstraksiyonu	20
2.5. Enzim Aktivitesi Analizi	22
2.6. 16S Metagenom Analizi	22
2.7. Toprak Analizi	23
2.8. Biyokül Eklenmiş Vermikompostun Bitki Üzerinde Uygulanması	24
2.8.1. Klorofil bileşenlerinin ekstaksiyonu ve tayini	24
2.8.2. Leghemoglobin tayini	25
2.8.3. Bitki büyüme ölçümleri	25
2.8.4. Bitki yetiştirme	25
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	29
3.1. Vermikompostlamada kullanılan hammadelerin özellikleri	29
3.2. Vermikompostun Karakterizasyonu	32
3.3. Vermikompost uygulamasının fosfor türleşmesine etkisi	36
3.4. Vermikompostta Enzim Aktiviteleri	38
3.5. Vermikompost Prosesinin Mikrobiyal Topluluk Özellikleri	40
3.5.1. Vermikompost numunelerinin bakteri toplulukları	42
3.5.2. Bakteri toplulukları ve enzim aktiviteleri arasındaki ilişki	47
3.6. Vermikompost Uygulamasının Besin Biyoyararlanımı Üzerindeki Etkisi	50
3.6.1. Saksı Deneylerinde Vermikompostun fotosentetik pigmentler üzerindeki etkisi	50
3.6.2. Vermikompostun nodülasyon üzerine etkisi	52
3.6.3. Bitki büyüme parametreleri ve verimleri	54
3.7. Arazi Deneylerinde Vermikompost Uygulamasının Besin Biyoyararlanımı Üzerindeki Etkisi	56
3.7.1. Vermikompostun fotosentetik pigmentler üzerindeki etkisi	56
3.7.2. Vermikompostun nodülasyon üzerine etkisi	58

3.7.3. Bitki büyüme parametreleri ve verimleri	59
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
4.1. Öneriler.....	65
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	77



KISALTMALAR

BK	: Biyokütle külü
XRD	: X-ışını kırınım yöntemi
ICP-OES	: Endüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi
EC	: Elektriksel iletkenlik
OD	: Optik değer
UV	: Ultraviyole
N	: Azot
P	: Fosfor
K	: Potasyum
K_k	: Kompost
Ca	: Kalsiyum
Fe	: Demir
Mg	: Magnezyum
Zn	: Çinko
Cu	: Bakır
Cl	: Klor
Na	: Sodyum
Al	: Alüminyum
P₂O₅	: Fosfor pentoksit
CaCO₃	: Kalsiyum karbonat
HCL	: Hidroklorik asit
HNO₃	: Nitrik asit
H₂O₂	: Hidrojen peroksit
H₂PO₄	: Fosforik asit
HPO₂	: Hidrojen fosfat
NaOCl	: Sodyum hipoklorit
C₂OH₁₄O₄	: Fenolftalein
C₃H₆O	: Aseton
NaOH	: Sodyum hidroksit
QIIME2	: Mikrobiyal ekolojiye ilişkin kantitatif görüşler

TP	: Toplam fosfor
KP	: Kaya fosfat
EC	: Elektriksel iletkenlik
OM	: Organik madde
PCR	: Polimeraz zincir reaksiyonu
PD	: Filogenetik çeşitlilik
PCoA	: Ana koordinatlar analizi
UPGMA	: Aritmetik ortalamalı ağırlıksız çift grup yöntemi
ADG	: Antibiyotiğe dirençli genler
RNA	: Ribo nükleik asit
DNA	: Deoksiribo nükleik asit
GPS	: Küresel konumlandırma sistemi
Chl-a	: Klorofil a
Chl-b	: Klorofil b
FW	: Taze ağırlık
DW	: Nodül kuru ağırlığı
SS	: Solucan sayısı
TSB	: Toplam solucan biyokütlesi
SI	: Solucan çoğalma indeksi
MBK	: Mikrobiyal biyokütle karbonu
BKUK	: Biyokütle uçucu külü
BÇ	: Biyolojik çamur
BÇA	: Biyolojik çamur atığı
KBÇ	: Kompost biyolojik çamur
ÇK	: Çeltik kabuğu
ÇKK	: Çeltik kabuğu külü
VK	: Vermikompost
TÜİK	: Türkiye istatistik kurumu
TEP	: Ton eşdeğer petrol
MLR	: Çoklu Lineer Regrasyon
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BET	: Brunauer-Emmett-Teller

SİMGELER

g	: Gram
°C	: Santigrat derece
m²	: Metrekare
nm	: Nanometre
mA	: Mikroamper
kV	: Kilovolt
µm	: Mikrometre
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
mL	: Mililitre
mg	: Miligram
ha	: Hektar
m	: Metre
kg	: Kilogram
W	: Taze malzemenin numune ağırlığı



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Bitki yetiştirme deneylerinde kullanılan toprakların fizikokimyasal özellikleri (değerler, her biri üç kopya halinde ölçülen üç örneğin ortalama $\pm$ standart sapmasıdır).	24
Tablo 3.1. Sığır gübresinin ve biyokütle külünün (BK) ilk fizikokimyasal özellikleri (değerler, her biri üç tekerrürlü olarak ölçülen üç numunenin ortalama $\pm$ standart sapmasıdır) (Turp ve ark., 2021).	31
Tablo 3.2. Biyokütle külü (BA) vermikompostunun fito-elverişli fraksiyonları ve biyoyararlanım oranları ile birlikte kimyasal analizleri (Turp ve ark., 2021).	34
Tablo 3.3. Artan dozda biyokütle külü ile vermikompost işlemlerinde enzimatik aktiviteler. (Değerler, üç kopyada ortalama $\pm$ standart sapma olarak temsil edilir) (Özdemir ve ark., 2023).	39
Tablo 3.4. K _K , T ₀ , T ₁ , T ₂ , T ₃ örneklerinin 16S metagenomik analizi sonucu bakteri popülasyonunun takım seviyesinde yoğunluğu.	45
Tablo 3.5. Örneklerden (K _K , T ₀ , T ₁ , T ₂ ve T ₃) alınan ilk 20 sınıflandırılmış bakteri cinsinin ısı haritası, maviden kırmızıya renk gradyanı artan tür bolluğunu gösterir. Şekil içindeki sayılar, türlerin bolluk seviyesini % olarak ifade eder.	46
Tablo 3.5. Enzim aktiviteleri ve metagenomik analiz sonuçlarının Çoklu Lineer Regresyonu (MLR)	49
Tablo 3.6. Artan BK solucan gübresi oranları ve karşılık gelen yeterlilik aralıkları ile gübrelenmiş fasulye (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) yaprağının element bileşimi (değerler, üç tekerrür ortalaması $\pm$ standart sapma'sıdır).	55



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 2.1.** Vermikompost uygulaması ile biyokütle santral külü elementlerinin biyoalınabilir forma dönüştürülmesi. 18
- Şekil 2.2.** Sıralı fosfor analizi uygulama prosedürü. 21
- Şekil 2.3.** Önceden gübrelenmiş (K_K) ve verмикompost numunelerinin (T_0 , T_1 , T_2 ve T_3) 16S rRNA amplikon tabanlı mikrobiyom analizi adımları. Ham sıralama verileri, Quantitative Insights into Microbial Ecology (QIIME2) tarafından işlenmiştir. 23
- Şekil 2.4.** Çalışma sahalarında 2021'de büyüme mevsimi boyunca aylık sıcaklık, ortalama güneş enerjisi ve yağış miktarı; Bitlis (A) ve Sakarya (B), Türkiye. 27
- Şekil 3.1.** Biyokütle enerji santrali külünün X-ışını kırınım modeli ve kül tozundaki ana bileşenler (Turp ve ark, 2021). 30
- Şekil 3.2.** T_0 'dan T_3 'e artan dozda biyokütle ile biyokütle külü verмикompost numunelerinin toplam ve biyolojik olarak kullanılabilir element bileşimi (Özdemir ve Turp, 2023). 35
- Şekil 3.3.** Artırılmış dozda biyokütle külü (BK) ile verмикompostlamanın sıralı ekstraksiyon prosedürleriyle fosfor fraksiyonasyonu (Turp ve ark, 2021). 37
- Şekil 3.4.** Yüzde (%) sekans benzerliğinde havuzlanmış beş numunenin nadirlik eğrileri, verмикompostlama mikrobiyotasının tür zenginliğini göstermektedir. X eksenı sıralama derinliğini/örneklerini temsil eder. Y eksenı, farklı özelliklerin sayısı olan tür zenginliği ölçülerini gösterir. 41
- Şekil 3.5.** a) Filogenetik ağaç, b) 16S metagenomik stratejileri için tedavi (K_K , T_0 , T_1 , T_2 ve T_3) grupları için beta çeşitliliği tahminlerinin (Bray-Curtis) bakteriyel PCoA grafikleri. 42
- Şekil 3.6.** Yığılmış çubuk grafik, örnek türlerdeki verмикompost mikroplarının filum seviyesindeki taksonomik bolluğunu gösterir. X eksenı, K_K , T_0 , T_1 , T_2 ve T_3 olan her tür için numunelerin biyolojik kopyalarını temsil eder. Y eksenı takson bolluğunu gösterir. 43
- Şekil 3.7.** K(kompostlanmış) ve BK eklenmiş verмикompostlama örnekleri T_0 (%0,0), T_1 (%3,5), T_2 (%7,0), T_3 (%10,0)'den alınan verмикompost örneklerinin filum seviyesinde bakteri bolluğu. 48
- Şekil 3.8.** Vermikompost uygulamaları T_0 , T_1 , T_2 ve T_3 için klorofil-a, klorofil-b, toplam klorofil ve karotenoid içeriğindeki (taze ağırlık (FW) bazında) değişiklikler (Turp ve ark, 2021). 51
- Şekil 3.9.** T_0 , T_1 , T_2 ve T_3 numuneleri için nodül sayısı (a), nodül kuru ağırlığı (DW) (b) ve fasulye nodülünün (*Phaseolus vulgaris* L.) değişen düzeylerde leghemoglobin içeriği (Turp ve ark, 2021). 53
- Şekil 3.10.** Fasulye bitkisinde arazi çalışması., (a) Bitlis, (b) Sakarya deneme alanı 56

Şekil 3.11. Vermikompost uygulamaları T ₀ (%0.0BK), T ₁ (%3.5BK), T ₂ (%7.0BK) ve T ₃ (%10.0 BK) ile gübreleme yapılmış T ₄ , ve kimyasal gübre ile gübrelenmiş T ₅ uygulamaları için klorofil a, klorofil b, toplam klorofil ve karotenoid içeriğindeki (taze ağırlık (FW) bazında) değişiklikler (Özdemir ve Turp, 2023).	57
Şekil 3.12. Fasulyedeki nodülün leghemoglobin içeriği (a) sıcak kuru-yaz, (b) ılıman bölge) (Özdemir ve Turp, 2023).	58
Şekil 3.13. Kuru fasulyenin (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) sıcak kuru-yaz (Bitlis) ve ılıman (Sakarya) iklim koşullarında biyokütle külü ile zenginleştirilmiş solucan gübresine tepkisi.....	60



BİYOKÜTLE SANTRALİ KÜLÜ BİTKİ BESİN ELEMENTLERİNİN GERİ KAZANIMI VE GÜBRE KAYNAĞI OLARAK KULLANIMI

ÖZET

Son yıllarda biyoatıkları yönetmek için yaygın olarak kullanılan biyokütle yakma tesisleri bitki besin elementi açısından zengin biyokütle külü (BK) üretmekte, ancak BK'nın tarımsal olarak faydalı kullanımı son derece sınırlıdır. Biyokütle külünün en belirgin parametresi pH (13.04) değerinin yüksek olmasıdır. Biyokütle külü için iletkenlik değerleri $27,43 \text{ mS cm}^{-1}$ aralığında kaydedilmiştir. Uçucu külden yanmamış karbon miktarı düşük ve yaklaşık %1.98 değerinde tespit edilmiştir. Endüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) sonuçları, BK'nın temel bileşiminin yüksek konsantrasyonlarda potasyum, fosfor ve kalsiyum içerdiğini, ancak silika, alüminyum ve demir oksitler gibi toprak elementlerinin içeriğinin nispeten düşük olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada tespit edilen bitki besin elementlerinden özellikle P ve K yüksek bulunmuştur. Çalışmada kullanılan kül, biyokütle ham maddesi içinde % 80 tavuk altığı kullanılan örneklerden alınmıştır. BK'daki kümes hayvanı altığından kaynaklanan fosfor ve diğer makro/mikro besinler, bu atığı biyogübreler için değerli bir ham madde kaynağı haline getirmiştir. Bu açıdan, tarımsal-endüstriyel artıklar tarafından üretilen BK, yararlı bir bitki besin kaynağı olarak kabul edilebilir fosfor bileşiklerinin çözündürülmesi için, bir dizi kimyasal reaksiyon ve biyolojik etkileşim yoluyla fosforu biyolojik olarak kullanılabilir formlara dönüştüren süreçler olarak tanımlanabilecek çeşitli teknolojiler geliştirilmiştir.

Sürdürülebilir atık yönetimi ve besin elementlerinin bitkisel üretim döngüsüne tekrar dahil edilebilmesi için çevre dostu atık yönetimi sağlayan vermikompostlama yöntemi ile BK elementlerinin bitki alımına uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır. BK, tavuk altığı, orman ve tarımsal hasat artıklarını yakan biyokütle enerji santralinden temin edilmiş ve nihai azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) içeriklerini elde etmek için, %0.0 (T_0), %3.5 (T_1), %7.0 (T_2) ve %10 (T_3) oranında sığır gübresine karıştırılmıştır. Başlangıçta, karışımlar kokulu gazları uzaklaştırmak için 3 hafta boyunca aerobik olarak kompostlanmıştır ve ardından 60 gün boyunca vermikompostlamaya tabi tutulmuştur. Ardışık fosfor ekstraksiyon sonuçları, vermikompostlamanın toplam fosfor (TP) ve Olsen-P çözünürlüğünü BK dozlarına bağlı olarak sırasıyla %69-%79 ve %5-%8 oranında önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Biyokülün yüksek pH seviyesi, test edilen tüm BK vermikompost numunelerinde, vermikompostlamadan sonra nötr aralık seviyesine gelmiştir. Vermikompost numunelerinin nihai besin bileşimi, T_0 için "N 1.31, P 0.53, K %0.90" (toplam %2.74), T_1 için "N 1.02, P 0.63, K %1.90" (toplam %3.55), T_2 için "N 0.8, P 1.78, K %3.86" (toplam %7.16) ve T_3 için "N 0.84, P 2.64, K %6.32" (toplam %9.94) olmuştur.

İncelenen bütün BK vermikompost örneklerinde, tespit edilen maksimum P fraksiyonları, sırasıyla, zayıf asitte çözünür Fe- ve Al-bağlı P olmuş, ardından çözünmeyen artık fraksiyon, alkalide çözünür ve Olsen fosfor fraksiyonları gelmiştir. Diğer yandan, BK uygulamalarında toplam fosfor (TP) içeriği %1.41 ile %1.77 arasında değişirken kontrol (T_0) için %0.63 olmuştur.

Sonuçlar, BK karışımlarının kompost sıcaklıklarını artırdığını ve vermikompostlama aşamasında başarılı bir solucan aktivitesine izin verdiğini göstermiştir. Tüm solucan gübresi örneklerinde indikatör enzim aktiviteleri sırası ile; üreaz > β -glukosidaz > alkalin fosfataz > asit fosfataz > arilsülfataz şeklindedir. Fosfat çözücü mikroorganizmalar, fosfataz enzimlerini ve enzim aktivatörlerini, düşük moleküler ağırlıklı organik asitleri ve hümik asitleri bir arada kullanarak bitki nutrientlerini çözüp, biyoyararlı forma dönüştürmüştür. Biyokül oranının artması ile fosfataz aktivitesi azalma eğilimi göstermiştir. Bunun yanı sıra tüm numunelerde üreaz enzim aktivitesinin diğer enzim aktivitelerine kıyasla yüksek olmasının sebebinin termofilik faz aşamasının mikrobiyal popülasyonda hızlı bir çoğalma göstermesine bağlanmıştır. Yüksek BK solucan gübresi işlemlerinde hem β -glukosidaz hem de üreazın spesifik aktivitelerindeki azalma, BK'nın büyük ölçüde organik karbon ve nitrojenden yoksun olduğundan bu işlemlerin düşük organik madde ve nitrojen katkısı ile açıklanmıştır. Tüm enzimatik aktivitelerin biyokül oranının artışına bağlı olarak azalması mevcut substrat oranının azalması ve biyokülün en önemli özelliği pH değerinin alkali etkisinin sebep olabileceği öne sürülmüştür.

Sığır gübresi ve BK kullanılarak hazırlanan vermikompost örneklerinin metagenomik analiz sonuçlarına göre, *Proteobakteriler* (K-%23.77, T₀-%18.44, T₁-%24.34, T₂-%23.5, T₃-%27.4) *Bakterioidler* (K-%30.5, T₀-%15.7, T₁-%29, T₂-%11.49, T₃-%13.94) ve *Planctomycetota* (K-%9.44, T₀-%15.32, T₁-%12.5, T₂-%20.3, T₃-%19.85) tüm örneklerde baskın bakteri filumu olarak belirlenmiştir.

Vermikompost numunelerinde enzim aktiviteleri ile mikrobiyal çeşitlilik arasında gerçekleştirilen Çoklu Lineer Regrasyon (CLR) hesaplamalarında yüksek korelasyonlar gözlenmiştir. T₀, T₁, T₂ ve T₃ için enzim aktiviteleri ile bakteri popülasyonu arasındaki çoklu lineer regresyon R² değerleri, sırasıyla 0.90, 0.65, 0.73 ve 0.90 olarak hesaplanmıştır. Besin elementi çözünürlüğü için *Flavobacteriales*, *Burkholderiales*, *Saccharimonadales* ve *Pseudomonadales*'in enzim aktiviteleri üzerindeki uyarıcı etkisi önemli ve pozitif bulunmuştur. Solucan gübrelerindeki enzim aktivitesinin bakteri popülasyonu ile ilişkili olduğu bakteri filumunun asit fosfataz, alkalin fosfataz, arilsülfataz, β -glukosidaz ve üreaz aktivitelerini önemli ölçüde desteklediği görülmüştür. Tüm numunelerde üreaz enzim aktivitesi en yüksek aktivite değerlerini göstermiştir. Üreaz enzimi karmaşık organik azotlu maddenin daha basit formlara dönüştürülmesinde önemli bir rol oynamıştır. Bitki gelişiminde olmazsa olmaz organik içeriklerden biri olan organik azot formlarının üre formuna dönüşümünde etkili olan hidrolitik enzimler üreten *Cytophagales* popülasyonu T₀, T₁, T₂ ve T₃ oranları sırasıyla %8.44, %6.14, %5.97, %8.09' dur.

Bitki besin elementince zengin solucan kompostlarının bitki büyüme ve gelişmesine etkisi fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) bitkisinde denenmiştir. BK ile nutrient içeriği zenginleştirilmiş vermikompost örneklerinin potansiyel gübreleme etkinliği, fasulye bitkisi üzerinde yapılan, bitki yetiştirmeye uygunluk parametreleri; klorofil içeriği, kök nodülasyonu ve leghemoglobin analizleri ile yaprak nutrient analizleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Fasulye bitkisi, topraktan fosfor alımı ve özellikle fosfor gübresine karşı hassas olduğu ve bu bitkide fosfor en sınırlayıcı besin maddesi olarak rapor edildiğinden, model ürün olarak seçilmiştir. Sonuçlar, BK içeren vermikompostun bitkilerinin büyümesini destekleyebileceğini, yapraklardaki klorofil içeriğini artırabileceğini ve biyolojik nitrojen fiksasyonunun aktivasyonuna yardımcı olan leghemoglobin sentezini önemli ölçüde artırdığını ($p < 0.05$) göstermiştir. Sonuç olarak, BK'nın biyo-atıkla solucan gübresi haline getirilmesinin, besin elementi çözünürlüğünü iyileştirebileceğini ve zenginleştirilmiş solucan gübresinin yavaş

salınlımlı gübre üretimi için sürdürülebilir biyo-temelli bir teknoloji olabileceğini göstermiştir. Üretilen vermikompost bitki büyüme ve gelişiminin pozitif etkilemiş, böylece besin elementi döngüsünü kapatmak için geri dönüşüm kapasitesini artıracabileceğini açıkça göstermiştir.





RECOVERY OF PLANT NUTRITIONAL ELEMENTS AND USAGE AS A FERTILIZER SOURCE FROM FLY ASH COMPOSED OF BIOMASS PLANT

SUMMARY

Biomass incineration plants, which have been widely used in recent years to manage crop and forest residue biowaste, produce nutrient-rich biomass ash (BA), but its agricultural use has been limited. Biomass has a high pH (13.04) monitoring feature, the most prominent parameter of its ash. The conductivity values for the biocule are also 27.43 mS cm^{-1} in diameter. The amount of unburned carbon in the fly ash was found to be low and at a value of approximately 1.98%. This proves that the combustion has taken place completely. The Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) results showed that the basic composition of BA includes high concentrations of potassium, phosphorus and calcium, but the content of earth elements such as silica, aluminum and iron oxides is relatively low. Among the plant nutrients determined in this study, especially P and K were found to be high. The ash used in the study was taken from the samples using 80% chicken litter in the biomass raw material. Phosphorus and other macro/micronutrients from poultry litter in the UK make this waste a valuable raw material source for biofertilizers. In this respect, BA produced by agro-industrial residues can be considered as a useful plant food source. Various technologies have been developed for the solubilization of phosphorus compounds, which can be defined as processes that convert phosphorus into bioavailable forms through a series of chemical reactions and biological interactions.

Considering the urgent needs for sustainable waste management, this study aimed to fill the research gap in this field by focusing on vermicomposting method to dissolve potential plant nutrients for crop fertilization. High pH, low solubility of limited plant nutrients, and adverse effects on microbial communities are common disadvantages of BA vermicomposting. BA was collected from the biomass power plant burning poultry litter, forest and crop harvest residues and added to cattle manure to obtain the final nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) contents of 0.0% (T_0), 3.5% (T_1), %, 7.0 (T_2) and 10% (T_3) are included. Initially, the mixtures were precomposted aerobically for 3 weeks to remove toxic gases and then vermicomposted for 60 days. The sequential phosphorus extraction results showed that vermicomposting improved total phosphorus (TP) and Olsen-P solubility by 69%-79% and 5%-8%, respectively, depending on BA doses. The high pH level of the biocule reached the neutral range level after vermicomposting in all BA vermicompost samples tested. The final nutrient composition of the vermicompost samples was “N 1.31, P 0.53, K 0.90%” (2.74% total) for T_0 , “N 1.02, P 0.63, K 1.90%” (total 3.55%) for T_1 , “N 0.8, P 1.78, F 3.86%” (7.16% total) and for T_3 “N 0.84, P 2.64, F 6.32%” (9.94% total).

In all BA vermicompost samples examined, the maximum P fractions detected were weakly acid-soluble Fe- and Al-bonded P, respectively, followed by the insoluble residual fraction, alkali-soluble and Olsen phosphorus fractions. On the other hand,

total phosphorus (TP) content in BA applications varied between 1.41% and 1.77%, while it was 0.63% for control (T₀).

The results showed that mixtures of BA increased fermentation temperatures and allowed successful earthworm activity in the next vermicomposting phase. In all vermicompost samples, the indicator enzyme activities are urease > β -glucosidase > alkaline phosphatase > acid phosphatase > arylsulfatase, respectively. Phosphate-dissolving microorganisms use phosphatase enzymes and enzyme activators, low molecular weight organic acids and humic acids together to dissolve plant nutrients and convert them into bioavailable form. The phosphatase activity tended to decrease with the increase in the biomass ratio. In addition, the reason for the high urease enzyme activity in all samples compared to other enzyme activities was attributed to the rapid proliferation of the thermophilic phase stage in the microbial population. The reduction in the specific activities of both β -glucosidase and urease in high BA vermicompost treatments was explained by the low organic matter and nitrogen contribution of these treatments as BA was largely devoid of organic carbon and nitrogen. It has been suggested that the decrease in all enzymatic activities due to the increase in the biocul ratio, the decrease in the available substrate ratio and the alkaline effect of the pH value, the most important feature of the bioculum.

According to the metagenomic results of vermicompost samples prepared using cattle manure and BA, *Proteobacteria* (K-23.77%, T₀-18.44%, T₁-24.34%, T₂-23.5%, T₃-27.4%) *Bacterioids* (K-30.5%, T₀-15.7%, T₁-29%, T₂-11.49%, T₃-13.94%) and *Planctomycetota* (K-9.44%, T₀-15.32%, T₁-12.5%, T₂-20.3%, T₃-19.85%) were determined as the dominant bacterial phylum in all samples.

High correlations were observed in Multiple Linear Regression (MLR) calculations performed between enzyme activities and microbial diversity in vermicompost samples. The coefficients of determination (R^2) obtained from multiple regressions between enzyme activities and bacterial population for T₀, T₁, T₂, and T₃, were calculated as 0.90, 0.65, 0.73 and 0.90, respectively. The stimulating effect of *Flavobacteriales*, *Burkholderiales*, *Saccharimonadales* and *Pseudomonadales* on enzyme activities was found to be significant and positive. It has been observed that the bacterial phylum, in which the enzyme activity in worm castings is related to the bacterial population, significantly supports acid phosphatase, alkaline phosphatase, arylsulfatase, β -glucosidase and urease activities. Urease enzyme activity showed the highest activity values in all samples. The urease enzyme plays an important role in converting complex organic nitrogenous matter into simpler forms. *Cytophagales* population producing hydrolytic enzymes that are effective in the conversion of organic nitrogen forms, which is one of the indispensable organic ingredients in plant development, to urea form, T₀, T₁, T₂ and T₃ ratios are 8.44%, 6.14%, 5.97%, 8.09%, respectively.

In addition, plant growing trials were conducted to determine the vermicompost effects on common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Potential fertilization efficiency of nutrient-enriched vermicompost samples with BA, parameters of suitability for growing on bean plant; The chlorophyll content was evaluated using root nodulation and leghemoglobin analyzes and leaf nutrient analyzes. The bean plant was chosen as a model crop since it is sensitive to phosphorus uptake from the soil and especially to phosphorus fertilizers, and phosphorus was reported as the most limiting nutrient in this plant. The results showed that BA-containing vermicompost could promote the growth of plants, increase the chlorophyll content in leaves, and significantly increased

leghemoglobin synthesis in the nitrogen fixation of root nodules ($p < 0.05$). As a conclusion, vermicomposting of BA could improve the solubility of nutrients from BA and that nutrient-enriched vermicompost could be a sustainable bio-based technology for slow release fertilizer production. Moreover, vermicomposted nutrient-rich waste material can improve the nodulation and nitrogen fixing ability of legume crops, thereby increasing the recycling capacity to close the nutrient cycle.





1. GİRİŞ

Gelecekte küresel enerji alt yapısında önemli bir rol oynaması beklenen biyokütle enerji santralleri (Chen ve ark., 2018) biyokütlenin termal veya biyolojik olarak işlenmesi ile ısı, elektrik veya katı/sıvı/gaz biyoenerji üretir (Leng ve ark., 2019). Biyokütle enerji üretimi için odun ve odun atıkları, tarımsal ürünler ve bunlardan çıkan atık yan ürünler, hayvansal atıklar, gıda işleme tesisi atıkları, su bitkileri en yaygın kullanılan biyokütle kaynaklarıdır. Enerji ve ısı üretmek için kullanılan biyokütle yakıtları, önümüzdeki yıllarda sürdürülebilir büyüme arayışı ile daha yaygın hale gelecektir (Medina ve ark., 2019).

Biyokütle enerjisi çok eski zamanlardan günümüzde hem geleneksel hem de modern yöntemlerle kullanılmaktadır. Türkiye’de biyokütle hammaddesini enerjiye dönüştürme konusunda dönüşüm teknolojilerinin uygulanması ile yatırım ve teşvikler artmıştır. Biyokütleden elde edilen ısı üretimi toplamı, 2018 yılında ısı üretiminin %10.2 sini temsil etmiştir. Küresel ölçekte toplam elektrik kurulu gücü 2020 yılı itibari ile 126.654 MW’a ulaşmıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın Aralık 2021 itibari ile Türkiye’nin Biyokütle Enerjisi Potansiyelinde yayınladığı sonuçlara göre Türkiye’nin bitkisel kaynaklı atıklarının toplam ekonomik enerji eşdeğeri 1.462.159 TEP/yıl, hayvansal kaynaklı atıklarının ekonomik enerji eşdeğeri 1.084.506 TEP/yıl, belediye kaynaklı atıklarının ekonomik enerji eşdeğerleri 485.858 TEP/yıl, orman kaynaklı atıklarının toplam enerji eşdeğeri 859.899 TEP/yıl olarak belirlenmiştir. Türkiye’nin bitkisel, hayvansal, ormansal, belediye kökenli biyokütle enerjisi ekonomik olarak yıllık toplam 3.892.422 TEP/yıl enerji eşdeğerindedir. Türkiye’de üretim lisansına sahip biyokütle işletme sayısı 242 adet olup lisansa dahil edilen kurulu güç miktarı ise 1.759,57 MWe düzeyindedir. Biyokütle enerjisi kaynağını oluşturan atıklar birçok çevresel faktörden etkilenmektedir. Buna bağlı olarak yıllar arasında enerji üretim miktarları değişkenlik göstermektedir (Ayan, 2022).

Biyokütle enerji santrallerinin enerji elde etmenin avantajının yanı sıra hammadde depolanması gibi büyük alanlar gerektirmesi de bir dezavantajdır. Ancak tüm dezavantajların yanısıra yenilenebilir yakıt kaynakları olarak kabul edilen biyokütle

enerji santralleri, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında önemli ölçüde katkı sağlar ve fosil yakıt bağımlılığını azaltabilir (Leng ve ark., 2019; Chen ve ark., 2018). Enerji santralleri için yakıt olarak kullanılan orman biyokütlesinin artması biyokütle külü miktarının artmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak biyokütle külünün bertaraf edilmesi çevresel bir sorun haline gelmektedir (da Costa ve ark., 2020).

Biyokütle santralleri yakma şeklinde atık miktarını önemli ölçüde minimize ederken, ciddi miktarda kül atığı ortaya çıkmaktadır. Kül biyokütle hammaddesinin ayrılmaz bir parçasıdır. Örneğin, odunsu biyokütle için kül içeriği tipik olarak %1,5-2 arasında değişirken, tavuk altığı gibi biyokütle kaynaklarında %20'ye kadar çıkmaktadır (Özdemir ve Demir, 2021). Türkiye'de 2018 yılında kül ve cüruf atıkları 23 bin ton/yıl, 2020 yılında ise 19 bin ton/yıl'dır (TÜİK, Atık İstatistikler, 2020). Biyokütle yanması sonucunda üretilen külün depolanması alan gereksinimini artırmaktadır buna bağlı olarak biyokütle külünün bertaraf edilmesinden kaynaklanan çevre sorunları nedeni ile sürdürülebilir etkin bir katı atık yönetimine ihtiyaç duyulmaktadır (Medina ve ark., 2019). Biyokütle kül atıklarını tekrar değerlendirmenin yöntemlerini bulmak oldukça önemlidir. Bu sebeple BK geri kazanımı ile tekrar kullanılacağı ekolojik ve yeni alternatif yöntemler ortaya konulması gerekmektedir.

Başlangıçta odun külü, orman endüstrisi sektörünün bir atık ürünü olarak kabul edilmiştir ve tarım veya orman topraklarının üzerine uygulanarak odun külünün sürdürülebilir ormancılığa olan faydalarına dikkat çekilmiştir. Gerçekten de, bu tür kalıntıları yaktıktan sonra külün geri dönüştürülmesi, potansiyel olarak ormandan kaybedilen mineral besinleri telafi edebilir, böylece hasat artar ve toprak asitliği nötralize edilebilir. Bununla birlikte, besin açısından odun külünün faydalarını değerlendirmenin yanı sıra, kullanımının daha geniş ölçekte savunulabilmesi için orman topraklarındaki bu tür odun külü değişikliklerinin ekolojik sonuçlarının değerlendirilmesi gerekmektedir (Augusto ve ark., 2008).

Biyokütle yakma işlemi sırasında son ürün olarak ortaya çıkan kül makro ve mikro bitki besin maddelerine sahiptir. Büyüme sırasında bitkiler tarafından topraktan alınan potasyum (K), fosfor (P), kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) gibi bitki besin elementlerinin yaklaşık %85-95'i biyokütle külünde akümüle olmaktadır (Vassilev ve ark., 2013). Kül mineral kompozisyonu biyokütle türü, çeşidi ve yetiştirildiği toprak karakterine bağlı olarak değişmekle birlikte P, K, Ca, Mg gibi makro ve Fe, Zn, Cu, Mn gibi mikro bitki besin elementleri bakımından zengin bir değer taşımaktadır. Bu

elementler içinde fosfor gibi kimi elementler sınırlıdır ve klasik atık yönetimi anlayışı olan üretimden atığa olan hattan çıkarılıp döngüsel ekonomiye kazandırılma ihtiyacı vardır (Özdemir ve Turp, 2023). Geçmiş yıllarda fosfor gübresinin yaygın kullanımı ve tarımda artan fosfor talebi önümüzdeki yüzyılda fosfor içeren kaynakların tükenmesini tehdit etmektedir. Hızla artmakta olan fosfor talebi karşısında rezervlerin tahmini ömrü 350 yıldır (Leng ve ark., 2019). Türkiye’de Tarım ve Orman Bakanlığının verilerine göre, fosforlu (%17 P_2O_5) kimyasal gübre kullanımı 2021 yılında 3.726.914 ton olarak belirtilmiştir. Bu bilgiler ışığında 2021 yılında tüketilen saf fosfor miktarı 633.595 ton/yıl P_2O_5 olarak hesaplanabilir. Bu verilere göre biyokütle kaynaklarının yakılması ile elde edilen küllerden tarımda ihtiyaç duyulan fosforlu gübre temin edilebilir. Yakma küllerinden geri kazanılan fosforun bitki yetiştirme döngüsüne katılıp besin maddelerinin gübre olarak geri kazanımı çevresel açıdan etkili ve sürdürülebilir bir atık yönetimi sağlamanın yanı sıra bitkiler için potansiyel bir besin kaynağı olarak yeniden kullanılabilir.

Kanatlı hayvan atığı, tarımsal ürün artıkları ve atık çamur biyokütle külünün fosfor ve potasyum gibi gübre içeriğinin çoğunu yüksek oranlarda içerir. Tarım topraklarında, besin elementlerinin çoğu yalnızca serbest iyonik formlarında alınabilir durumdadır. Ancak termokimyasal işlem sırasında fosforun %80’i bitkiler tarafından daha az erişilebilir olan apatite dönüştürür (Özdemir ve Turp, 2023). Biyokütle külünün toprak uygulamasındaki temel sorulardan biri, kül içindeki bağlı elementlerin çözünür veya biyoyararlı besinlere dönüştürülmesidir. Küldeki elementlerinin çözünürlükleri, büyük ölçüde uygulanan pH değerleri veya asitlik tarafından belirlenmekte (Dede ve Özdemir, 2016) ve kimyasal yöntemler farklı oranlarda geri kazanım sağlamaktadır. Bununla birlikte, kül bileşiminin çok fazla varyasyon gösterdiği için uygulanan farklı yaklaşım ve prosedürler bitki besinlerini etkili bir şekilde geri kazanamamaktadır (Semerci ve ark., 2019). Biyokütle külünün yeniden kullanımı için çevre dostu bir teknoloji olan vermikompost sürdürülebilir bir geri kazanım yöntemi olarak görülmektedir. Vermikompost organik maddenin ayrışmasında solucanlar ve mikroorganizmaların birlikte etkileşimi sonucu mikrobiyolojik bir çözündürme sürecidir. Biyokütle külünün organik madde sığır gübresi ile birleştirilerek besin açısından zengin solucan gübresine dönüştürülmesi besin biyoyararlanımı açısından oldukça önemlidir (Özdemir ve Turp, 2023).

Vermikompostlama sürecinde mikroorganizmalar, solucanlar ve organik materyallerin bozunma ürünleri bir arada fiziksel, kimyasal ve biyoteknik ayrışma süreçlerini gerçekleştirmekte ve elementlerin biyolanınabilir forma dönüşmesi sağlanmaktadır. Vermikompostlama esnasında besin içeriği yüksek organik maddelerin solucanların sindirim sisteminin yanı sıra solucan bağırsağında yaşayan bakterileri tarafından ayrıştırıldığı bilinmektedir. Solucan bağırsağı besinlerin çözünmesi, biyoremediasyon ve yararlı bakteri popülasyonunun güçlendirilmesi sürecinde oldukça önemlidir. Solucan gübresi sisteminde biyokimyasal bozunmanın lideri solucanlar gibi görünse de bakterilerin rolü daha büyüktür. Vermikompostlama prosesinde, mikroorganizmaların aktivite, sayı ve topluluk profillerine göre incelenmesi organik maddelerin ayrışması ve stabilizasyonu açısından önem taşımaktadır (Fu ve ark., 2015; Goswami ve ark., 2021).

Vermikompostlama, *Eisenia fetida* gibi üst katmanlarda yaşayan epigeik solucanların kullanıldığı mezofilik aerobik fermantasyondur. Solucanların mikroorganizmalar üzerindeki doğrudan etkisinin bulunduğu hatta ön bağırsaktan son bağırsağa geçiş sürecinde bazı mikroorganizmaların sindirilip, diğerlerinin hayatta kaldığı veya geliştiği görülmüştür (Wang ve ark., 2021). Mikroorganizmalar gerçekte organik maddenin biyokimyasal bozunmasından sorumlu olsalar da solucanlar substratı parçalayarak ve şartlandırarak, mikroorganizmaların büyümesi için yüzey alanını arttırmaları böylece biyolojik aktivitenin değişmesi ile süreçte önemli bir rol oynarlar (Aira ve ark., 2009). Vermikompost işleminin başlangıcında yoğun solucan aktivitesi sayesinde organik substratın yutulması ve parçalanması ile malzeme hacmi azalır (Ramos ve ark., 2022). Solucanlar, bağırsak geçiş yoluyla organik madde ayrışmasını ön bağırsak ve orta bağırsakta sindirilmesi ve daha sonra arka bağırsak tarafından atılması ile doğrudan mikroorganizmalarla etkileşime geçmesini sağlar. Solucan bağırsağı geçişi, organik maddenin bozunmasını ve minerilizasyonunu hatta fosfor ve potasyum zenginleşmesini hızlandırmak için bakteri topluluğunun yapısını ve işlevini önemli ölçüde değiştirir (Wang ve ark., 2021). Üretilen vermikompost yüksek düzeyde organik madde, besin ve bitki büyümesini destekleyen madde içeren mükemmel bir gübredir (Ramos ve ark., 2022). Solucan kompostunun bitki besin elementlerince zenginleştirilmesi, son kullanıcılar tarafında kabul edilebilirliği için önemli bir faktördür. Bu sayede biyokütle santrali atığı olan biyokülün tekrar bitkisel üretime döndürülmesi ile sürdürülebilir bir atık yönetimi ve bitki üretim sistemi kurgusuna

destek olunabilecektir. Sunulan fiziksel, kimyasal ve biyokimyasal fırsatlara rağmen, vermikompostlama şu anda biyokütle kül besin maddelerinin çözündürülmesi için çok az araştırma konusu edilmektedir ve bu nedenle besin açısından zengin solucan gübresi tarımda etkin bir şekilde kullanılmamaktadır. Vermikompost toprağa uygulandığında, gözenek boyutu düzenlemesi, su ve hava tutma kapasitesi üzerinde iyileştirici etkilere sahiptir, bitki besinlerini tutmak için geniş yüzey alanı oluşturur ve bitki köklerinin mevcut besin maddelerini emmesini sağlayan yavaş ve düzenli bir şekilde rizosfere salınır (Erdal ve Ekinci, 2017). Biyo-atık yönetimi ve besin döngüsü, döngüsel ekonomi ilkelerine dayalı tarımsal sistemlerde sürdürülebilirliğin sağlanmasında hayati bir role sahiptir. Vermikompost, organik bahçe bitkileri ekimi için toprak düzenleyici olarak yaygın bir şekilde kullanılırken, besin açısından zengin solucan gübresinin etkileri hakkında henüz ayrıntılı bir araştırma yapılmamıştır (Koç ve ark., 2019). Ek olarak, besin açısından zengin solucan gübresi ve faydalı mikroorganizmanın farklı tarımsal ekosistemlerde mahsul üzerindeki birleşik etkilerini inceleyen az sayıda çalışma bulunmaktadır. Vermikompost üretiminde hacim arttırıcı madde olan sığır gübresi farklı miktarlarda bitki besin oranı yüksek biyokül ile karıştırılmıştır. Epigeik solucan *Eisenia fetida* kullanılarak organik maddenin biyolojik bozunma ve minerilizasyonu sağlanmıştır. Farklı bitki türleri üzerinde vermikompost gübre uygulamaları ile biyokülün bitki gelişimine sağlamış olduğu etkiler incelenmiştir. Ayrıca vermikompost işlemi esnasında mikroorganizmalar ve solucanlar tarafından gerçekleştirilen enzimatik aktivitelerin analizleri ile kompost olgunluğu hakkında bilgi edinilmiştir.

1.1. Literatür Araştırması

Biyokütle yakma santralleri yüksek miktarlarda biyo-kül (BK) üretmektedir. Bu küller, özellikle uçucu kül olmak üzere, zararlı maddeleri adsorbe edebilen ve insan sağlığına zarar verebilen yüksek bir spesifik yüzey alanına sahiptir. BK'nın çevre yönetimi açısından yeniden kullanılması büyük önem taşımaktadır. Literatürde BK'nın yeniden kullanılması için yapılan; inşaat malzemesi, adsorban malzeme, seramik üretim malzemesi, metal geri kazanım hammadesi ve tarımsal amaçlı gübre vb. pek çok çalışma mevcuttur.

Biyokütle ham maddesi oldukça çeşitlilik göstermektedir. Genelde odun ve orman artıkları olmakla birlikte, bitkisel hasat artıkları, enerji bitkileri, bitkisel kökenli sanayi

artıkları, kümes hayvanı altlıkları, et ve kemik unu gibi biyolojik atıklar endüstriyel yanma için enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Yanma sonrası biyokütle külleri fosfor gibi değerli maddeleri içermekte ancak değerlendirme yerine çöpe atılmaktadır. Dolayısı ile BK'nin döngüsel ve sürdürülebilir bir şekilde toprak uygulaması daha büyük bir potansiyele ve daha iyi bir beklentiye sahiptir. Endüstrilerden gelen biyokütle küllerinin element ve mineral bileşimleri fosfor ekstrakte edilebilirliği ve pH'a bağlı sızabilirlik açısından karakterize edilerek kullanımının arttırılması çeşitli çalışmalara konu olmuştur. Oldukça alkali ($\text{pH} \geq 13$) olan biyokütle külü, kalsiyum, potasyum ve fosfor açısından zengindir. Ancak uygulanan yüksek yanma sıcaklıkları ($>600\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve yüksek pH nedeniyle elementlerin çözünürlükleri ve biyo-yararlanımları düşüktür. BK'nin toplam çözünmüş kütle içeriği, çözeltinin pH değeri 13'ten 5'e düştüğünde %500 artış göstermektedir (Zhang ve ark., 2019). Aynı zamanda, elementlerin çözünürlükleri birbirlerinden önemli ölçüde farklılık gösterir. Örneğin küldeki Ca ve Fe'nin çoğu, K'nin %30'u, Na'nın %32'si, Al'in %48'i, S'nin %25'i ve P'nin %48'i asitte çözünürdür. Biyokülden fosforun geri kazanımı için potansiyeli araştırıldığında asit çözündürme (özellikle H_2SO_4) işlemi ile %90 P geri kazanımı sağlanmıştır (Leng ve ark., 2019). Ayrıca suda çözünürlüklerine göre elementler şu üç kategoriye ayrılmaktadır: (1) kolayca çözünen besin elementleri (K, B, Na, Cl ve S); (2) az çözünür besin elementleri (Ca, Mg, Si, Fe ve Al); ve (3) yüksek oranda çözünmez elementler (P).

Yüksek besin elementi içeriğine sahip biyokütle külünün atık ürünün yönetmenin bir yolu olarak toprağa uygulanabilirliği ile ilgili çevresel risk değerlendirilmesi yapılan çalışmada İspanya da bulunan 15 biyokütle santralinden toplanan dip ve uçucu külü karakterize etmiştir. Numuneler üzerinde yapılan incelemeler sonucu kül içeriğinde bulunan organik kirleticilerin miktarlarının toprağa uygulanması için sınır değerleri aşmadığı sonucuna varılmıştır (Rey-Salguero ve ark., 2016).

Biyokütle yakma santrali külünün bitki besin maddelerini geri kazanmak ve asitlenmeyi önlemek için orman alanlarında tekrar kullanılabilir düşüncesi ile bitkiler üzerinde potansiyel olumlu etkileri araştırıldığında BK içeriğinde düşük oranlarda bulunan N konsantrasyonuna rağmen bitki büyümesini teşvik ettiği bitkinin N alımının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin BK'nın topraktaki organik N minerilasyonunu uyarması olarak yorumlanmıştır (Johansen ve ark., 2021).

Kağıt hamuru ve kağıt endüstrisinden elde edilen biyokütle külü ve çamuru, geri dönüştürülmek ve toprak iyileştiricilerde bileşen olarak kullanılmak üzere muazzam bir potansiyele sahiptir. Bu malzemeler büyük miktarlarda besin ve organik madde sağlayabilir ve geri dönüşümü, depolama ihtiyacını ortadan kaldırır. Ancak bu atıklar doğrudan toprağa uygulanamaz. Verimli toprak pH düzeltilmesi, gübreleme sağlamak, toprak korumasını garanti etmek ve potansiyel sıhhi ve çevresel riskleri azaltmak için bir tür işleme gereklidir. Bu çalışmada, toprak iyileştirici olarak kullanılacak kül bazlı granüllerin fiziko-kimyasal özelliklerini optimize etmek için farklı kül formülasyonları (organik atık eklenmiş veya eklenmemiş) ve stabilizasyon koşulları (iç ve dış mekan) test edilmiştir. Biyokütle uçucu külü (BKUK), biyolojik çamur (BÇ), biyolojik çamur atığı (BÇA) veya kompost biyolojik çamur (KBÇ) farklı bağlayıcı maddelerle kombinasyon halinde granüle edilmiştir. Tüm tanecikli malzemeler, pH 7.9 ila 12.1 arasında değişen alkalindi. Asit nötrleştirme kapasiteleri 45 ila 51 eşdeğer arasında değişiyordu. CaCO_3 , kireçleme malzemesi olarak uygun hale getirir. Organik materyallerin dahil edilmesi, su tutma kapasitesini (%38'e kadar) ve kütle gözenekliliğini (%20'ye kadar) geliştirmiştir. Açık havada stabilizasyon daha hızlı bir karbonasyon sonucunda granüllerin pH'ında azalma göstermiştir. Ayrıca, iç mekanlarda stabilize edilen malzemelerden daha düşük bir elektrik iletkenliği ve daha düşük çözünür tuz içeriği (Ca, Cl, K ve Na) sağlanmıştır. İşleme ve stabilizasyondan sonra, bu kül formülasyonlarından bazıları, Gübreleme Ürünleri Yönetmeliği kapsamında inorganik makro besin gübreleri, kireçleme malzemeleri veya inorganik toprak iyileştiriciler için bileşen olarak kullanılacak kriterleri karşılamıştır (Cruz ve ark., 2023).

Tarımsal bir atık olan çeltik kabuğu (ÇK), Çin, Hindistan, Bangladeş, Brezilya, ABD, Kamboçya, Vietnam, Myanmar ve Güneydoğu Asya gibi pirinç üreten ülkelerde bol miktarda bulunur. Dünya çapında muazzam miktarda yıllık üretime rağmen, şimdiye kadar ÇK'lar yalnızca düşük değerli uygulamalar için geri dönüştürülmüştür. Son yıllarda, pirinç üreten ülkelerdeki birçok pirinç değirmeni, kırsal bölgelerde ev aydınlatmasının yanı sıra değirmen operasyonları için enerji üretimi için bağıl nem kullanmaya başlamıştır. ÇK'ların yanması çeltik kabuğu külü (ÇKK) üretmektedir. Düzenli depolama alanlarında veya açık alanlarda bertaraf edilmesi problemlili olabilir ve ÇKK'nın düşük kütle yoğunluğu nedeniyle ciddi çevre ve insan sağlığı sorunlarına neden olabilir. ÇKK'nın ticari kullanımı yapılarak bertaraf edilmesi için çeşitli yollar

düşünülmüştür. Amorf silika, ÇKK'nın ana bileşenini (%83-90) oluşturur. Amorf silika açısından zengin ÇKK geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. ÇKK'nın silika jel, silikon çip, aktif karbon ve silika sentezi, hafif inşaat malzemeleri ve izolasyon, katalizörler, zeolitler, lityum iyon piller için bileşenler üretiminde kullanımı gibi yüksek değerli uygulamalar ve güncel araştırma araştırmaları, grafen, enerji depolama/kapasitör, karbon yakalama ve ilaç dağıtım araçlarında sunulmaktadır. Gelecekteki potansiyel uygulamalarda ÇKK'nın kullanımı da tartışılmıştır. Amorf silika bakımından zengin ÇKK'nın, pratik uygulamalar için katma değerli silika bazlı malzemelerin üretimi için potansiyel bir düşük maliyetli öncü kaynağı olabileceği öne sürülmüştür (Pode, 2016).

Biyokütle enerji santrali uçucu külünün silis malzemesi üretmek için yeniden kullanılması, çevre için kül depolama tehlikesini azaltmaktır. Kül, uygun ısıtma ön işleminden sonra 1.5 M HCl ile asitle yıkanmıştır. Daha sonra, 2 M NaOH, sodyum silikat elde etmek üzere kalıntı ile doğrudan reaksiyona sokulmuştur. Son olarak, silikayı çöktürmek için çözeltinin asit titrasyonu kullanılmıştır. Sonuçlar, amorf silisin uçucu külden %44.41'den %93.63'e kadar saflıkta ve %20.45 verimle başarılı bir şekilde üretildiğini göstermiştir. Silikanın uçucu külden amorf dönüşümü için optimum kalsinasyon koşulları, 5 saatlik süre ile 611 °C sıcaklık ve yanıt yüzeyi metodolojisi ile modellenen minimum kristallik %17.41 olarak hesaplanmıştır. Spektroskopi analizi, üç boyutlu ağ silikasının doğrusal yapıyı oluşturmak için hidroksile edildiğini ortaya çıkarmıştır. Termal analiz, silanol gruplarının ayrışmasının 400 °C'de kararlı olma eğiliminde olduğunu, ancak külün 1000 °C'ye kadar ayrıştığını göstermiştir. Morfolojik analiz, BET yüzey alanının 24 m arasında değiştiğini göstermiştir. Termal analiz, silanol gruplarının ayrışmasının 400 °C'de kararlı olma eğiliminde olduğunu, ancak külün 1000 °C'ye kadar ayrıştığını göstermiştir. Morfolojik analiz, BET yüzey alanının 24 m arasında değiştiğini göstermiştir. Termal analiz, silanol gruplarının ayrışmasının 400 °C'de kararlı olma eğiliminde olduğunu, ancak külün 1000 °C'ye kadar ayrıştığını göstermiştir. Morfolojik analiz, kül küresel silikaya dönüştürüldüğünde BET yüzey alanının 24 m²/g ile 115 m²/g arasında, aglomerat parçacık boyutunun 380.9 nm ile 178.8 nm arasında değiştiğini göstermiştir. Sonuç olarak, harmanlanmış biyokütle uçucu külünü amorf silika nanoparçacıklara dönüştürmenin mümkün olduğu öne sürülmüştür (Liang ve ark., 2020).

BK yüksek oranda bitki besin elementleri içermektedir ancak bitkiler tarafından alınabilir durumda değildir. Bitki besin elementlerinin biyo-yararlı hala gelmesi aşamasında vermikompost yönteminin aşamaları açısından detaylı incelemeler yapılmış çalışmalar mevcuttur.

Vermikompostlama, solucanların ve mikroorganizmaların eylemi ile çeşitli enzim aktivitelerinin aktivasyonu ve dinamikleri arasındaki ilişkileri içeren organik maddenin biyo-oksidasyonu ve stabilizasyonudur. Çiftçiler (ekstra) para kazanmak ve organik üretim yapmak için, bitki artıklarını ve hayvan gübresini kullanarak kendi vermikompostlarını üretmekte, ancak üretilen nihai ürün hakkında bir bilgi mevcut değildir. Bu nedenle, çalışma Brezilya'nın yarı kurak bölgesinde *Eisenia foetida*, mikrobiyal biyokütle ve enzimatik aktivitenin geliştirilmesinde hayvan gübresi ve sebze yaprakları karışımları ile vermikompostlamanın potansiyelini analiz etmeyi amaçlamıştır. Deneysel tasarım 6×4 faktöriyel şemasında, dört tekrarlı, altı işlemle (sığır gübresi, keçi gübresi, kaju yaprağı ve catanduva yaprağı karışımları) randomize blok uygulaması ile dört zaman aralığında (30, 60, 90 ve 120 vermikompostlama günleri) değerlendirilmiştir. Muameleler, çiftçiler tarafından kullanılan aynı sahada, çevre koşulları ve kalıntı oranlarındaki polietilen saksılara yerleştirilmiştir. Analiz edilen özellikler, solucan sayısı (SS), toplam solucan biyokütlesi (TSB) ve solucan çoğalma indeksi (SI), mikrobiyal biyokütle karbonu (MBK) ve β -glukosidaz, dehidrojenaz, alkalik ve asit fosfataz enzimlerinin aktiviteleridir. Vermikompostlanan sığır gübresi, bitki yaprakları karışımından bağımsız olarak SS, SI, TSB, MBK ve enzimatik aktivite için gözlemlenen en yüksek ortalama değerleri göstermiştir. Genel olarak enzim aktiviteleri, β -glukosidaz > alkalik fosfataz > dehidrojenaz > asit fosfataz şeklinde azalan sırada bulunmuştur. Solucan gübresinin olgunlaşma dinamikleri, mikrobiyal popülasyonda ve substrattaki solucanların sayısı ve biyokütlesinde bir düşüş ve sonuç olarak yeni enzim sentezinde ve kalan enzim havuzunun bozunmasında bir azalma ile karakterize edilmiştir. Mikrobiyal biyokütle ve enzimatik aktivite, vermikompostun kalitesindeki değişikliklerin göstergeleri olarak kabul edilmiştir (da Silva ve ark., 2023).

Vermikompostun (VK) toprak kalitesini ve bitki verimini iyileştirdiği düşünülmektedir. Ancak VK'nin çilek büyümesi ve kalitesi üzerindeki etkisi ve mekanizması iyi bilinmemektedir. Bu çalışma, VK'nin çileğin morfolojik ve fizyolojik indeksleri ile toprağın mikrobiyal özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak ve

VK'nin çileğin büyümesi ve gelişmesi üzerindeki potansiyel mekanizmalarını analiz etme amacı ile yapılmıştır. Güneş serası koşullarında rastgele bir tasarımda bir saksı deneyi yapılmıştır. Deneyler altı farklı hacimsel VK/toprak oranıyla : %100 toprak (kontrol, K); %10 VK + %90 toprak (VK10); %20 VK + %80 toprak (VK20); %30 VK + %70 toprak (VK30); %40 VK + %60 toprak (VK40); %50 VK + %50 toprak (VK50) gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, VK sadece biyokütle üretimi gibi büyüme özelliklerini arttırmakla kalmamış, bitki boyu ve yaprak alanını iyileştirmenin yanı sıra meyve verimini, ortalama meyve ağırlığını ve çözünür şeker ve C vitamini içeriğini iyileştirmiştir. Özellikle, klorofil içeriği ve net fotosentetik oranı beyaz meyve aşamasında önemli ölçüde artmıştır. Ek olarak, %20 ve %30 VK ilavesi, süperoksit dismutaz aktivitesini önemli ölçüde iyileştirmiş ve malondialdehit içeriğini azaltmıştır. Kontrole kıyasla VK uygulamasıyla toprak mikrobiyal ve enzim aktivitesinde, katyon değişim kapasitesinde ve kök aktivitesinde de önemli gelişmeler bulunmuştur. Genel olarak, VK, fotosentez hızı, serbest radikal temizleme ve toprak enzimatik aktivitesindeki artışlara atfedilen çilek büyümesi ve kalitesi üzerinde olumlu bir etki sergilemiştir. Klorofil içeriği ve net fotosentetik oranı beyaz meyve aşamasında önemli ölçüde artmıştır (Zuo ve ark., 2018).

Solucan aktivitesi, mikrobiyal biyokütle ve çeşitli enzim aktivitelerinin aktivasyonu ve dinamikleri arasındaki ilişkilerin incelendiği çalışmada, solucanlı ve solucansız küçük ölçekli reaktörlere düşük ve yüksek oranlarda (sırasıyla 1.5 ve 3 kg) domuz bulamacının uygulandığı bir deney gerçekleştirilmiştir. Hücre dışı enzim aktivitesinin domuz bulamacı oranıyla arttığını bulunmuştur. Uygulanan her iki domuz bulamacı oranında da, genç katmanlardaki solucanların varlığı, solucanlar bulamacı terk ettikten ve katmanlar yaşlandıktan sonra azalan mikrobiyal büyümeyi uyarmıştır. Bu artış, mikrobiyal biyokütle ile enzimler arasındaki korelasyonlar olarak incelenen mikrobiyal enzimlerin ilk aktivasyonu ile ilgiliydi ve bu, hücre içi enzim aktivitesinde bir artış göstermiştir. Yaşlı bulamaçta, tahlil edilen dört enzimin aktivite paterni, uygulanan domuz bulamacının oranına bağlı olarak değerlendirilmiştir (Aira ve ark, 2007).

Besin eksikliği olan topraklar için vermikompost mükemmel bir toprak katkı maddesidir. Dikkatle kontrol edilen bir saksı deneyinde zenginleştirilmiş vermikompostları normal solucan gübresiyle karşılaştırarak topraktaki biyokimyasal dalgalanmaların bulunması hedeflenmiştir. Mika, dolomit ve kaya fosfat (KP) dahil

olmak üzere çeşitli kaya mineralleri, asit lateritik toprağa uygulanmadan önce zenginleştirilmiş solucan gübresi oluşturmak için kullanılmıştır. Solucan gübresinin toprak üzerindeki biyokimyasal etkisinin (15 günlük aralıklarla) nasıl geliştiği araştırılmıştır. Sonuçlar, su sümbülünden hazırlanan geleneksel vermikompost (VK) besin içeriğini, enzimatik aktiviteleri ve toprağın mikrobiyal özelliklerini etkili bir şekilde geliştirmiştir. Bununla birlikte, zenginleştirilmiş VK uygulaması, toprakta mevcut P (geleneksel VK'dan %60 daha yüksek) ve değişebilir K (geleneksel VC'den %10 daha fazla) konsantrasyonunu önemli ölçüde artırmıştır ($p<0.05$). Ayrıca, kaya minerallerinin bir kombinasyonu kullanılarak VK'nın zenginleştirilmesinin, önemli ölçüde daha yüksek üreaz (%35 civarında), asit fosfataz aktivitesi (%93 oranında) ve gelişmiş mikrobiyal biyokütle karbonu (yaklaşık %25) gösterdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, geleneksel VK'nın kaya bazlı zenginleştirilmiş VK'dan daha yüksek toprak organik karbonu gösterdiğini ortaya koymuştur (Das ve ark., 2022).

Vermikompostlama, verimli sığır gübresi arıtımı için biyolojik bir süreçtir, ancak vermikompostlama süresi vermikompostun kalitesini belirler. Çalışmada, sığır gübresi solucan gübresi hazırlama süresinin solucan biyokütlesi üzerindeki etkisini ve solucan gübresinin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerindeki değişiklikleri değerlendirilmiştir. Sığır gübresi *Eisenia andrei* solucanları ile aşılanmıştır ve 0, 15, 30, 45, 60 ve 120 gün boyunca vermikompostlama gerçekleştirmiştir. 44 kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliğin analizi, vermikompostlama sürecinin başlangıç (<45 gün) ve son (45-120 gün) şeklinde aşamalara bölünmüştür. İlk aşama, yüksek mikrobiyal aktivite ve son aşama, vermikompostun yüksek fiziksel-kimyasal dönüşümü ve solucan yoğunluğunda bir artış ile karakterize edilmiştir. Organik madde aromatikliği 45. güne kadar artmış, daha sonra azalmıştır (Ramos ve ark., 2022).

Vermikompostlama işlemi sırasında solucanlar ve mikroorganizmalar organik madde ayrışımı sağlayarak bitkiler için oldukça yararlı bir gübre sağlamaktadır.

Çeltik kabuğu biyokömürünün (400 °C, 0,5 saat) Çin'deki farklı toprak türlerinde toprak fosforunun dönüşümü üzerindeki etkilerini değerlendirmek için asit kırmızısı toprak, organik kahverengi toprak ve tuzlu toprak kullanılarak dokuz haftalık bir mikrokozmos inkübasyon deneyi yapılmıştır. Toprağın fiziko-kimyasal özellikleri, mikrobiyal biyokütle, fosfataz aktiviteleri, fosfat çözen bakteriler ve bakteri topluluğu özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, pirinç kabuğu biyokül incelenen üç toprağın pH'ını 0,1-0,2 birim önemli ölçüde modüle ettiğini ve toprak gravimetrik su içeriğini

kontrollere göre %0,3-1,4 oranında artırdığını göstermiştir. Biyokül eklenmesi, incelenen tüm topraklarda Olsen-P ve mikrobiyal biyokütle karbonunu önemli ölçüde artırmıştır ve bu, kısmen biyokül uygulama hızına bağlanmıştır. Bu sonuçlar, pirinç kabuğu biyokül ile yapılan işlemin, toprak bakterileri için daha uygun büyüme koşulları sağlayabildiğini ve toprak fosfor mevcudiyetini ve ilgili enzimleri önemli ölçüde artırabildiğini göstermiştir. Ayrıca, zaman içinde istatistiksel olarak farklılık gösteren geçici taksonomik atamalar oluşturmak için Illumina MiSeq pyrosequencing kullanılarak her üç toprakta da bakteri toplulukları araştırılmıştır. Temel bileşen analizlerine sahip bir ısı haritasının sonuçları, biyokül asit kırmızısı toprak ve tuzlu toprak gibi bozulmuş topraklarda bakteri topluluklarının yapısını şekillendirme eğiliminde olduğunu göstermiştir. En önemli değişiklik asit kırmızısı toprakta gözlemlenmiştir. Biyokül, *Thiobacillus*, *Pseudomonas* ve *Flavobacterium* topraklarda değişen derecelerde; üçünün de fosfat çözen bakteri türleri olduğu bildirilmektedir. Sonuç olarak, biyokül, fosfat çözücü bakteriler üzerinde olumlu bir etkiye sahip ve fosfor kullanılabilirliğinin artmasına katkıda bulunmuştur (Liu ve ark., 2017).

Çamur solucan gübresindeki yüksek antibiyotik içeriğini ve bunlara karşılık gelen antibiyotiğe dirençli genleri (ADG'ler) azaltmak hala zordur. Bir biyo-gübre olarak vermikompostun çevresel riskini azaltmak için, bu çalışma susuzlaştırılmış çamurun vermikompostlanması sırasında antibiyotik ve ADG seviyelerini azaltmak için biyokül ilavesinin fizibilitesini araştırmıştır. Bunu başarmak için sırasıyla %1.25 mısır koçanı ve %5 pirinç kabuğu biyokülü çamura eklendi ve ardından *Eisenia fetida* tarafından 60 gün boyunca solucan gübresi haline getirilmiştir. Mısır koçanı biyokülü ile karıştırılan çamur, organik maddenin ayrışmasını ve nemlenmesini arttırmıştır. Daha yüksek biyokül konsantrasyonu, bakterilerin hem sayısını hem de çeşitliliğini destekledi ve baskın cinsleri farklılaştırmıştır. Biyokül ilavesinin bir sonucu olarak antibiyotik seviyesi önemli ölçüde azalmıştır ($p < 0.05$) ve tetrasiklin tamamen çıkarılmıştır. Biyokül eklenmemiş kontrole göre, erm F ve tet X genleri, mısır koçanı biyokül işlemiyle önemli ölçüde azalmıştır ($p < 0.05$). Bu çalışmada, biyokül ilavesinin, biyokülün tipine ve konsantrasyonuna bağlı olarak, çamur solucan gübresindeki antibiyotik ve ADG kirliliğini azaltabileceği öne sürülmüştür (Kui ve ark., 2020).

Tropikal tarım, potansiyel olarak katma değerli ürünlerin doğal bir kaynağı olarak kullanılabilecek büyük miktarlarda lignoselülozik kalıntılar üretir. Lignoselülozun

karmaşıklığı, endüstriyel ölçekte işlemeyi zorlaştırır. Verimi artırmak ve bu değerli kaynağın boşa gitmesini önlemek için yeni işleme teknikleri geliştirilmektedir. Hemiselülozlar, farklı omurga bileşimlerine ve dekorasyonlarına (metilasyonlar ve asetilasyonlar gibi) sahip çeşitli polisakaritleri içerir ve bitki hücre duvarına yapısal stabilite kazandıran karmaşık bir çerçevenin parçasını oluşturur. Bu biyopolimerleri parçalayabilen organizmalar arasında solucanlar (*Eisenia fetida*), çok çeşitli lignoselülozik substratları hızla parçalamaktadır. Bu yetenek muhtemelen solucan bağırsağında bulunan enzimlerden ve simbiyotik mikroorganizmalardan kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada, benzer C/N oranlarına ancak farklı hemiselüloz içeriğine sahip iki substrat seçilmiştir. Hurma lifi ve kahve kabuğu sırasıyla nispeten yüksek (%28) ve düşük (%5) hemiselüloz içeriğine sahiptir. Solucanların beslenmesi için bir hemiselüloz substratı organik pazar atığı ile karıştırarak solucan gübresi karışımı hazırlanmıştır. Ksilanaz aktivitesi solucan bağırsağında belirlendi ve hemiselülozu parçalayan bakterilerin izolasyonu için bir seçim kriteri olarak kullanılmıştır. Ksilanaz aktivitesi, fizikokimyasal özelliklerine rağmen her iki substrat için de benzerdi. Solucan bağırsağından izole edilen ksilanolitik suşlar, 16S rRNA geninin sekans analizi ile tanımlanmıştır. Sonuçlarımız, izole edilen dört *Actinobacteria*, iki *Proteobacteria* ve bir *Firmicutes*'un, *E. fetida*'nın bağırsağında mikrobiyota tarafından ksilanolitik bozunmanın aktif katılımcıları olduğunu göstermiştir. Bakterilerin çoğu pH 7 ve 28 °C'de daha aktif ve daha yüksek aktivitelere sahip olanların, solucan bağırsağı için bildirilen mikro ortamla çakışan fakültatif olarak anaerobik olduğu bildirilmiştir (Ordoñez-Arévalo ve ark., 2022).

Evsel katı atığın organik fraksiyonundan elde edilen dört parti ticari kompost kimyasal ve mikrobiyolojik açılarından analiz edilmiştir. Kültürlenebilir bakteriler farklı sıcaklıklarda izole edilmiştir, koloni morfolojisi ile ölçülmüştür, 16S dizilimi ile taksonomik olarak tanımlanmış ve oksin ve siderofor üretimi, fosfat çözünmesi ve peptit mineralizasyonu dahil olmak üzere bitki büyümesini destekleyen fenotipler için taranmıştır. Buna paralel olarak, toplam topluluk, kültürden bağımsız DNA metabarcoding ile değerlendirilmiştir. Bitkilerin bu kompost numunelerinden bakteri seçme, alma ve dahili olarak çoğaltma kapasitesi, elde edilen bakterilerin yeniden izole edildiği, miktarının belirlendiği ve kimliklerinin yukarıdaki gibi belirlendiği asma in vitro köklendirme çelikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Mevsimin fonksiyonu olarak kompost bakteri bileşiminde büyük farklılıklar gözlemlenmiştir ve kış numunesi yaz

numunelerinden oldukça farklı olduğu görülmüştür. *Bacillales* ve *Actinomycetales* kültürlenebilir topluluklara hakim olurken, *Alteromonadales*, *Oceanospirillales* ve *Flavobacteriales* tüm toplulukta hakim olmuştur. Zorlu kompostlaştırma döngüsü koşullarına rağmen, ana girdi substratlarının bitki doğası, kültürlenebilir bakterilerin %82'sinin test edilen bitki büyümesini teşvik eden fenotiplerden bir veya daha fazlasına sahip olduğunun garanti edilmesinde belirleyici görünmüştür. Gübreleme rolünün yanı sıra mikroorganizmalar kompostun, bitki yararlı maddelerinin toprak içine taşınması için potansiyel bir aşılama taşıyıcısı olduğu da kanıtlanmıştır (Tondello ve ark., 2022).

Solucanlar, karasal ekosistemlerde organik madde ayrışmasında önemli bir rol oynamaktadır. Solucanlar, bağırsak geçişi yoluyla organik madde ayrışmasını, yani organik maddenin ön bağırsak ve orta bağırsakta sindirilmesi ve özümsemesi ve arka bağırsak tarafından atılması yoluyla doğrudan mikroorganizmalarla etkileşime girer. Bununla birlikte, solucanlar tarafından yutulan mikrobiyal topluluğun, solucanların farklı bağırsak bölümlerindeki geçiş süreçlerine nasıl tepki verdiği açık değildir. Solucanları beslemek için gübrelenmiş inek gübresi kullanılmış ve bakteriyel 16S rRNA gen sıralama analizi için vermikompost ve ön bağırsak, orta bağırsak ve arka bağırsak içeriklerinden örnek alınmıştır. Solucan bağırsak geçişinin, baskın filum Proteobakterilerin bolluğunu azalttığı gözlemlenmiştir ve *Bacteroidetes*, *Actinobacteria*, *Chloroflexi* ve *Acidobacteria*'yı arttırmıştır. Zenginleştirme analizi sonuçları, solucan gübresine kadar uzanan farklı bağırsak segmentlerinde yutulan bakteri topluluğu üzerinde farklı seçici uyarıcı ve inhibe edici etkiler ortaya koyulmuştur. FAPROTAX verileri, C ve N metabolik mikroplarının solucan bağırsağında zenginleştiğini göstermiştir. Fermantasyon ve metanogeneze yer alan mikroplar arka bağırsakta ve denitrifikasyon mikropları ön bağırsakta zenginleştirilmiştir. Korelasyon ve biyokimyasal analizlerin sonuçları birleştirildiğinde, solucan bağırsağı geçişi, organik maddenin bozunmasını ve mineralizasyonunu, fosfor ve potasyumun zenginleşmesini hızlandırmak için bakteri topluluğunun yapısını ve işlevini önemli ölçüde değiştirmiştir. Çalışma, solucanların bağırsak geçiş sürecinin karasal ekosistemlerdeki organik madde dinamiklerini düzenlemede önemli bir rol oynadığını göstermiştir (Wang ve ark., 2021).

BK eklenerek vermikompostlama yöntemi ile bitki besin elementlerinin geri kazanımına ait sürecin incelenmesinin dışında, bir çok ülkenin gündemine giren

atıkların sürdürülebilir ekonomiye tekrar kazandırılması konusunda, biyokütle yakma tesislerinden ortaya çıkan kül atığının verimkompostlanmasının ekonomik boyutunda incelenmesi ileride yatırımının yapılması için bir fikir sağlayabilir.

Atıkların geri kazanımı yoluyla bertaraf edilmesi için uygulanan verimkompost üretiminin ekonomik boyutuda bir fizibilite çalışması ile fındık zürufu ve arıtma çamurunun kompostlaştırılmasına ilişkin teknik veriler kullanılarak; verimkompost üretimi, ihracatı, ithalatı ve fiyat verileri TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) gibi kurumlardan elde edilen bilgiler derlenmiştir. 2015 yılında yapılan çalışmada, araştırma sonucunda verimkompost üretim tesisinin karlılığının yüksek, kayıp olasılığının ise daha düşük olduğunu göstermiştir. Yaklaşık 130 bin ABD (Amerika Birleşik Devletleri) doları tutarında ilk yatırımı olan solucan gübresi üretim tesisi, ekonomik ömrü boyunca 1,28 milyon ABD dolarılık değer sağlamıştır. Araştırma sonucunda ayrıca verimkompost üretim maliyetinin kilogram başına 0,2 dolar olduğunu ortaya koymuştur (Ceyhan ve ark., 2015). Verimkompost üretim tesisi yüksek karlılık ve düşük risk düzeyine sahip bir yatırım olmasının yanı sıra biyokütleküllü, arıtma çamuru gibi atıkların bertarafına ek bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Ayrıca bu şekilde atık malzemelerin sürdürülebilir ekonomiyede katkısı sağlanmış olacaktır. Diğer yandan atık döngüsündeki bitki besin elementlerinin ve organik maddenin tekrar bitki üretim döngüsüne dahil edilmesi ile elde edilen ekonomik avantaj, çevresel etilerinin minimizasyonu, enerji kullanım etkinliği ve dış kaynaklara olan bağımlılığın azaltımı pek çok çalışma tarafından ortaya koyulmuştur (Stolarski ve ark., 2017; Ozdemir et al., 2019; Yetilmezsoy ve ark., 2022; Turp ve ark., 2023). Bu yönleriyle solucan gübresi üretimi atık yönetimine ekonomik ve ekolojik çözüm sağlarken, bitki besin elementlerince zengin BK eklenmesi nihai ürünün katma değerini daha da yükseltme potansiyeli sunmaktadır.



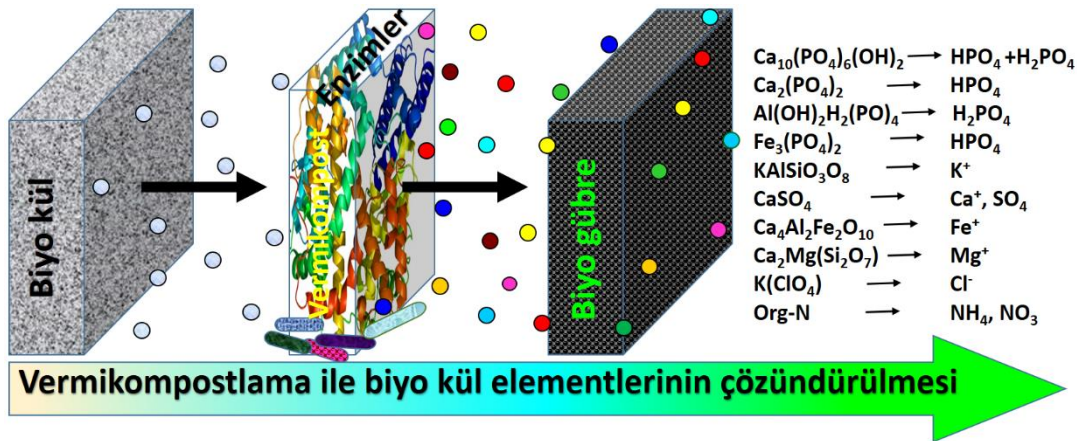
2. MATERYAL METOT

2.1. Biyokül XRD Analizi

Kül tozu numunelerinin kristal yapısını belirlemek için tamamlayıcı X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi kullanıldı. Toz numuneler üzerinde XRD ölçümlerini gerçekleştirmek için 40 mA akım kullanıldı. Analiz Rigaku difraktometre (Rigaku, Tokyo, Japonya) kullanılarak 40 kV ve 130 mA'da Cu K radyasyonu kullanılarak 5–50° tarama açısında ve 0.5° min⁻¹ tarama hızında yapıldı. Elde edilen kırınım desenlerini analiz etmek için alet yazılımı kullanıldı.

2.2. Vermikompostlama

Vermikompostlama, solucan aracılı biyolojik bir bozunma sürecidir. Vermikompost prosesi, yüksek su tutma kapasitesine sahip besin açısından zengin gübre eldesi ile sonuçlanır. Besinlerin çözünmesi, biyoremediasyon ve faydalı bakteri popülasyonunun güçlendirilmesi sürecinde solucanlar önemli bir rol oynar (Goswami ve ark., 2021). Milyonlarca yıl maruz kaldıkları patojen bakterilere karşı geliştirmiş oldukları bağışıklık sistemi sayesinde bitkinin verimliliğini arttırarak kök ve kök çevresindeki hastalıklara karşı direnç sağlar. Solucanların sindirim sisteminde bulunan çok sayıda yararlı mikroorganizma, azot fıkse eden bakteriler ve enzimler bulunur (Şekil 2.1). Organik maddenin vermikompost sürecinde dahil olan mikroorganizmalar, karmaşık organik bileşikleri (lignin, selüloz, hemiselüloz) parçalayarak daha basit formlara dönüştürür ve çok çeşitli hücre dışı hidrolitik enzimler (selülaz, proteaz, üreaz, fosfataz, lipaz, β -glukosidaz gibi) üretir (da Silva ve ark., 2023). Bu enzimler ve yoğun bitki besin elementleri bitkilerde sağlıklı ve hızlı bir gelişim sağlar. Benzer mekanizmalar ile biyokütle santrali külündeki bitki besin elementlerinin çözündürülerek bitki alınabilir forma geçirilmesi test edilmiştir.



Şekil 2.1. Vermikompost uygulaması ile biyokütle santral külü elementlerinin biyoalınabilir forma dönüştürülmesi.

Bu çalışmada, yerel bir vermikompostlama şirketi tarafından süt sığırcı gübresi ve Sakarya Türkiye’de bulunan biyokütle enerji santralinden sağlanan kül kullanılarak vermikompost numuneleri hazırlanmıştır. Biyokütle yakma santralinde talaş, ormancılık artıkları, fındıkkabukları ve ağaç talaşı yataklı kümes hayvanı altlığı biyokütle malzemesi olarak kullanılmaktadır. Türkiye kompost yönetmeliğinin solucan kompostundaki N, P ve K toplamı için maksimum %7.0 (N, P_2O_5 , K_2O) toplam değer belirlenmiştir (Resmî Gazete, 2018). Sığırcı gübrelerinde bu üç element NPK’nın oranı % 2 civarındadır. Yönetmelikte verilen sınır değer ile biyokülün yüksek pH’sı (>13) ve solucanların küle tolerans kapasitesi dikkate alınarak, kompost örneklerinde sırasıyla (T_0) %0 (kül içermeyen), (T_1) %3.5, (T_2) %7.0, ve (T_3) %10.0 nihai NPK içeriği elde etmek için hesaplanan biyokül miktarı homojen olarak ham sığırcı gübresine karıştırılmıştır. Bu oranlar, başlangıçtaki sığırcı gübresindeki NPK ve küledeki P ve K değerleri dikkate alınarak $M_1 \times C_1 = M_2 \times C_2$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Bu formülde M_2 önceden planlanmış %3.5, %7.0 ve %10.0 NPK oranlarını içerecek şekilde, sığırcı gübresine eklenmesi gereken kül miktarı hesabını göstermektedir.

Sığırcı gübresi ve biyokül ile elde edilen karışımlar solucanlar üzerinde olumsuz etkileri oluşturabilecek uçucu ve toksik maddeleri ortadan kaldırmak için 21 gün boyunca aerobik olarak kompostlanmıştır (Özdemir ve ark., 2019). Karışımlar daha sonra dikdörtgen açık kutulara doldurulmuş (uzunluk×genişlik×derinlik=50×34×30 cm) ve epigeik (yüzeyde yaşayan) solucanlar, vermikompost üretimine izin vermek için her bir ayrı kutuya (kg malzeme başına 10 solucan) eklenmiştir (Namlı ve ark., 2014). Kutulara her uygulamada 3 kg yem (kuru ağırlık bazında) ile başlanmış ve haftalık

aralıklarla aynı miktarda materyal yüzeye eklenmiştir. Her bir işlem için vermikompost oluşturan materyaller oda sıcaklığında ($25\pm 2^{\circ}\text{C}$) karanlık bir yerde bekletilmiştir. Vermikompostlama süresince, yığın yüzeyine su püskürtülerek nem içeriği $\%60\pm 2$ 'de tutulmuştur. Olgun bir kompost elde etmek için 60 gün boyunca vermikompostlama yapılmıştır (Özdemir ve ark., 2019).

Sığır gübrelerinin pH değeri 7.00-7.50 arasında değişim göstermektedir. Solucanlar için pH aralığı 5.00-8.50 arasında gösterilmekte, fakat nötral pH derecelerinde maksimum faaliyet göstermektedir (Yadav ve Garg, 2011). Biyokül uygulanmış örneklerde pH değerinin 8.00'ın üzerine çıkmayacak şekilde kül karışımları hazırlanmıştır.

2.3. Kimyasal Analiz Yöntemleri

Vermikompost denemeleri sonunda, olgunlaşmış olarak elde edilen numuneler sabit bir ağırlığa ulaşana kadar 78°C 'de kurutma fırınında kurutulmuştur. Kurumuş örnekler ardından 2 mm elekten elenmiş ve bu örneklerle kimyasal analizler uygulanmıştır (Turp ve ark., 2021).

Vermikompost numunelerinin pH ve elektriksel iletkenliği (EC), 1:5 oranına uygun olarak, 5 g kuru malzeme üzerine 50 ml saf su eklenmiş ve mekanik çalkalayıcıda 1 saat çalkalandıktan sonra süzüntüde ölçüm yapılmıştır. pH değeri pH metre (Schott CG 840, Hollanda) ve EC değeri EC elektrodu (HACH, HQ14D, ABD) ile ölçülmüştür.

Numunelerin organik madde (OM) analizi, fırın kuru (105°C) örneklerin 550°C 'de, 4 saat süreyle yakılması ilkesine göre % olarak hesaplanmasıyla belirlenmiştir (Turp ve ark., 2021).

Vermikompost örneklerinin azot kapsamı, bileşikler içindeki azotun derişik sülfürik asit ile amonyağa dönüştürülmesi ve amonyağın ortam içinde amonyum sülfat halinde tutulması prensibine dayanan Kjeldahl metodu ile belirlenmiş ve % olarak ifade edilmiştir. Toplam Kjeldahl azotu = amonyak azotu + organik azot (Turp ve ark., 2021)

Vermikompost numunelerinin toplam element analizleri için 250 mg örnek 6 mL HNO_3 (%65) ve 1 mL H_2O_2 (%30) asit karışımı eklenerek mikrodalga sindirim sisteminde (Soriso-Bg, İtalya) parçalanmıştır. Bitkinin yararlanabileceği besin

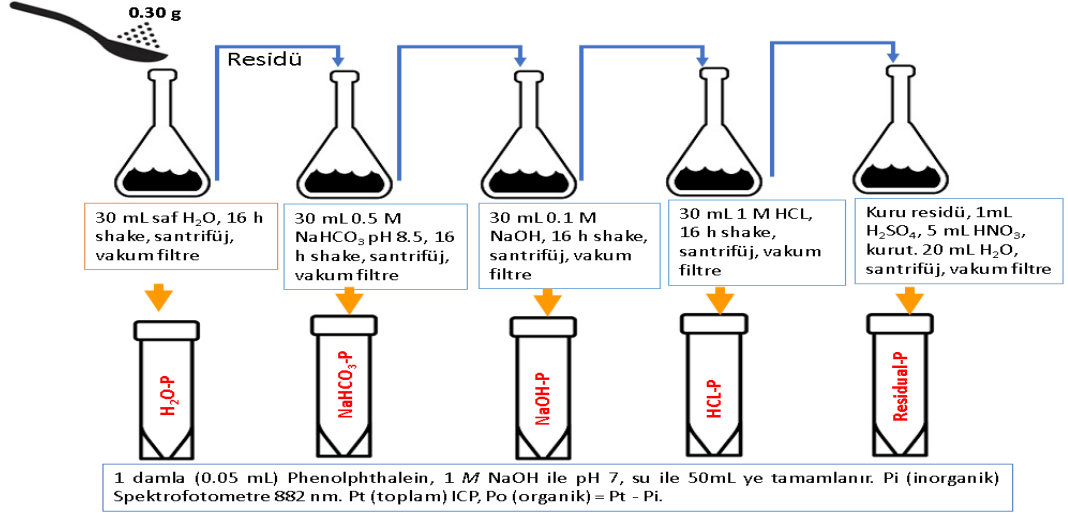
elementleri ise Amonyum bikarbonat-DTPA yöntemine göre 0,005 M DTPA ile ekstraksiyondan sonra belirlenmiştir. Bu işlemin bir sonraki adımında sindirimi gerçekleştirilen numuneler soğutulmuş ve ultra saf su (Merck Millipore, Molsheim, Fransa) ile Whatman filtre kağıdından (0,45 µm) süzülerek seyreltilmiş ve daha sonra hacmi 50 mL'ye tamamlanmıştır (Turp ve ark., 2021). Toplam ve bitki tarafından alınabilir besin elementleri, bir Endüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) (Spectro Arcos, Kleve, Almanya) kullanılarak ölçülmüştür. Toprak numunelerinde bulunan bitki alınabilir P, 0.5 M NaHCO₃ (pH = 8.5) ekstraksiyonundan sonra spektrofotometrik yöntemlerle ölçülmüştür. Biyoyararlı bitki besin elementi oranı, ekstrakte edilebilir ve indirgenabilir fraksiyonlardaki besin elementi içeriğinin toplam besin elementi içeriğine oranı olarak tanımlanmıştır. Vermikompostlamanın besin elementi çözündürme verimliliği, aşağıdaki denklem kullanılarak ekstrakte edilen element miktarı olarak tahmin edilmiştir (2.1):

$$\text{Çözündürme etkinliği (\%)} = \frac{\text{Biyo yararlı fraksiyon}}{\text{Toplam fraksiyon}} \times 100 \quad (2.1)$$

2.4. Sıralı Fosfor Ekstraksiyonu

Çalışmanın ana hipotezi olan solucan kompostu uygulamasının biyo-külde kristal yapıda (apatit) ve Al-, Fe-, Ca- ile bileşik durumdaki fosfor bileşenlerinin, ne kadarının bitki alınabilir forma getirdiğini test etmek için sıralı fosfor analizi yapılmıştır. Yöntem olarak Codling (2006) tarafından ahır gübrelerinde uygulaması yapılan ve önerilen modifiye Hedley ve ark. (1982) sıralı ekstraksiyon prosedürü kullanılmıştır (Şekil 2.2). Bu yöntemde sırasıyla;

- (1) Deiyonize su (su ekstraktı P),
- (2) Olsen fosfor (0,5 M NaHCO₃ (pH 8.5) ekstraksiyonu),
- (3) Alkali çözünür P (0,1 M NaOH ekstraksiyonu),
- (4) Kolayca asitte çözünen P (1 M HCl ekstraksiyonu (Al- ve Fe-fosfatlar ve adsorbe edilmiş P),
- (5) Artık P (6 mL HNO₃ ile sindirim) (%65) ve 1 mL H₂O₂ (%30) asit karışımı) dir.



Şekil 2.2. Sıralı fosfor analizi uygulama prosedürü.

Yukarıda özetlenen ekstraksiyon prosedürünü takiben, önceki adımın tortusu 16 saat çalkalandı ve 15.000 rpm'de 10 dakika santrifüjlendi ve süpernatantlar 0.22 µm bir filtreden süzüldü. Başlangıçta 250 mg fırında kurutulmuş numune tartılarak 50 mL'lik bir santrifüj tüpüne alındı, 30 mL deiyonize su eklendi ve malzeme 16 saat çalkalanadı, santrifüjlendi ve ardından vakumla süzüldü. Santrifüj tüpündeki ve filtre çeperindeki tortu, özütleme tüpünde durulandı ve tüm özütler için çalkalama/filtreleme döngüsü tekrarlandı. Numuneler soğutulduktan sonra yaklaşık 20 mL deiyonize H₂O ilave edildi. Her numuneye 1 damla (0.05 mL) fenolftalein (C₂OH₁₄O₄) indikatörü eklendi ve pH 7.0 olana kadar 1 M NaOH çözeltisi ilave edildi. Ekstrakttaki P içeriği, fosfomolibdat mavisi yöntemine göre bir spektrofotometre (Model U-2001, Hitachi Corp., Japonya) kullanılarak belirlendi. Absorbans değerleri 712 nm dalga boyunda ölçülmüştür.

Bu yöntemde I. ve II. aşamalarda tespit edilen fosfor; hareketli (bitki alınabilir) fosfor, III. aşamada tespit edilen fosfor; yarı hareketli fosfor (AlPO₄, FePO₄), IV. aşama tespit edilen fosfor; hareketsiz fosfor (AlPO₄, Fe₃(PO₄)₂, Ca₃(PO₄)₂ ve apatit formdaki fosfor Ca₅(PO₄)₃OH), V. aşama tespit edilen fosfor; kalan (çözünmez) fosfor olarak tanımlanmaktadır. Planlanan bu çalışmada I. ve II. aşamalardaki çözünmüş fosfor miktarı oranının artırılması beklenmektedir. Bu iki aşamadaki miktarlar arttırılırsa kurulan deneysel hipotezin başarılı olduğu kararına varılacaktır.

2.5. Enzim Aktivitesi Analizi

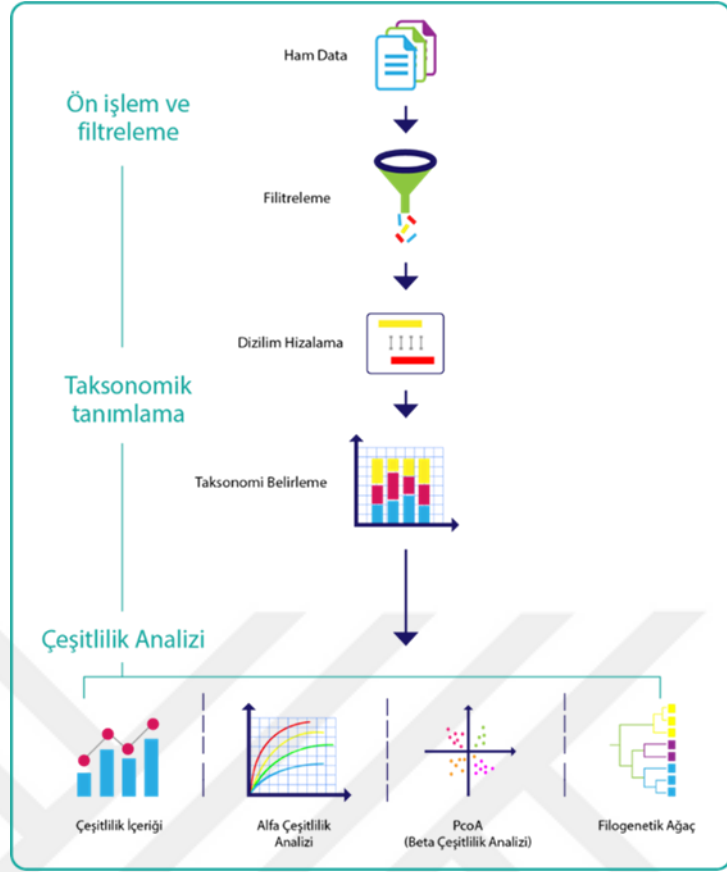
Olgunlaştırılmış 1 g ıslak vermikompost numuneleri üzerinde enzim aktivite analizi yapılmıştır. β -glukosidaz, asit ve alkalın fosfataz ve arilsülfatazın taze numune numuneleri, her bir enzimin renksiz substratları ile p-nitrofenil ile inkübe edilerek değerlendirilmiştir. Asit fosfataz ve alkalın fosfataz aktiviteleri kolorimetrik yöntemle analiz edilmiş ve enzim aktiviteleri p-nitrofenol g^{-1} solucan gübresi h^{-1} olarak ifade edilmiştir (Busato ve ark., 2012).

β -glukosidaz aktivitesi, numunelerin nitrofenil- β -D-glukopiranosid substratı ile inkübasyonundan sonra elde edilen p-nitrofenol miktarının belirlenmesiyle ölçülmüştür. Serbest p-nitrofenoller, 400 nm'de bir spektrofotometre ile ölçülmüştür. Üreaz aktivitesi, substrat olarak üre çözeltisi ile 1 g solucan gübresi ile analiz edilmiş ve salınan NH_4 , UV spektrometresi ile 578 nm'de ölçülmüş ve nemsiz bazda μg amonyum g^{-1} solucan gübresi h^{-1} olarak ifade edilmiştir (Özdemir ve Turp, 2023).

2.6. 16S Metagenom Analizi

16S rRNA gen amplikon analizi, QIIME2 (Quantitative Insights into Microbial Ecology) ile gerçekleştirilmiştir. Kütüphane oluşturmak için, 16S rRNA geni spesifik primerler ile çoğaltıldıktan sonra saflaştırma yapılmıştır. PCR aşamasında, illumina ikili indeksler ve adaptörler Nextera XT index kiti kullanılarak eklenmiştir ve sonra saflaştırma yapılmıştır. Real time PCR ile oluşturulan kütüphanelerin konsantrasyonu ölçülerek 4 nM'a seyreltilerek normalizasyonu yapılmıştır. Normalizasyonu yapılmış olan örnekler havuzlama (pooling) yöntemi ile birleştirilmiştir. Kütüphane hazırlandıktan sonra sequencing by synthesis yöntemi ile her yeni d NTP eklendiğinde, eklenen bazın floresan ışıması optik olarak gözlemlenip kaydedilmiştir. Sekanslama sonrasında üretilmiş olan data, analiz için ham dataya (FASTA formatına) dönüştürülmüştür (Şekil 2.3).

Sekans sonuçlarından elde edilen verilere göre alfa ve beta çeşitlilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Beta çeşitlilik; türlerin dağılımının 5 farklı grup (K_K , T_0 , T_1 , T_2 ve T_3) arasındaki değişimi ya da 5 farklı gruptaki tespit edilen tür içeriğinin birbirine benzerliğini ya da farklılığını göstermektedir. Beta çeşitlilik analizi için Bray-Curtis farklılığı ana koordinat analizi (PCoA) kullanılmıştır. Alfa çeşitliliği, her bir numunede saptanan farklı türlerin sayısıdır. Alfa çeşitlilik analizi için Phylogenetic Diversity (PD) çeşitlilik metrisi kullanılmıştır.



Şekil 2.3. Önceden gübrelenmiş (K_K) ve vermikompost numunelerinin (T_0 , T_1 , T_2 ve T_3) 16S rRNA amplikon tabanlı mikrobiyom analizi adımları. Ham sıralama verileri, Quantitative Insights into Microbial Ecology (QIIME2) tarafından işlenmiştir.

Bakteri topluluğu arasındaki ilişkiyi cinse göre belirlemek için UPGMA (aritmetik ortalama ile ağırlıklandırılmamış çift grup yöntemi; Sokal ve Michener 1958), matrisinden filogenetik bir ağaç ve Euclidean metrisi ile oluşturulmuştur.

2.7. Toprak Analizi

Hazırlanan vermikompostların bitki büyümesi ve gelişim etkisi fasulye bitkisinde incelenmiştir. Bu amaçla Türkiye'nin doğusunda Bitlis İli, Tatvan İlçesi'nde (GPS 38.509441 K, 42.341652 D, deniz seviyesinden yükseklik: 1690 m) bulunan önceden kuru tarım uygulanan çiftçi arazisinden toprak örnekleri alınmıştır. Ilıman bölge deneme toprağı Türkiye'nin kuzeybatısındaki Sakarya ilinden seçilmiştir (GPS 40.859905 K, 30261186 D, deniz seviyesinden yüksekliği: 31 m). Topraklar, ekim gerçekleştirilmeden hemen önce yüzey horizonlarından (0-20 cm) örneklenmiştir. Bu deneysel toprakların seçilmiş kimyasal özellikleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Bitki yetiştirme deneylerinde kullanılan toprakların fizikokimyasal özellikleri (değerler, her biri üç kopya halinde ölçülen üç örneğin ortalama $\pm$ standart sapmasıdır).

Parametre	Bitlis bölgesi toprağı	Sakarya bölgesi toprağı
pH	7.45 $\pm$ 0.04	7.93 $\pm$ 0.15
EC (dS m ⁻¹)	0.34 $\pm$ 0.02	0.18 $\pm$ 0.21
Organic madde (%)	1.16 $\pm$ 0.03	2.11 $\pm$ 0.03
Kjeldahl N (%)	0.10 $\pm$ 0.07	0.65 $\pm$ 0.24
P (mg kg ⁻¹)	45.94 $\pm$ 1.15	24.05 $\pm$ 0.68
K (mg kg ⁻¹)	83.66 $\pm$ 2.40	74.25 $\pm$ 1.52
Ca (mg kg ⁻¹)	390.00 $\pm$ 8.80	19.35 $\pm$ 0.66
Mg (mg kg ⁻¹)	180.70 $\pm$ 2.10	2.61 $\pm$ 0.41
Fe (mg kg ⁻¹)	29.04 $\pm$ 1.25	85.02 $\pm$ 10.78
Mn (mg kg ⁻¹)	32.38 $\pm$ 1.87	20.69 $\pm$ 1.83
Zn (mg kg ⁻¹)	2.94 $\pm$ 0.16	3.41 $\pm$ 4.05

EC, elektriksel iletkenlik; dS, deciSiemens.

2.8. Biyokül Eklenmiş Vermikompostun Bitki Üzerinde Uygulanması

Kendine özgü büyüme özelliklerine sahip fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.), Ahlat, Tatvan, Bitlis, Türkiye Çiftçiler Odası'ndan temin edilmiştir. *Rhizobium leguminosarum biovar phaseoli* ve fosfat çözücü bakteri içeren bakteriyel materyal, Ankara, Türkiye Toprak, Gübre ve Su Kaynakları Merkez Araştırma Enstitüsü'nden temin edildi. Fosfor bitkiler için en sınırlayıcı besin maddesi olarak bilinmektedir. Fosforun yeterlilik aralığının altına düşmesi konusunda büyük oranda hassasiyet gösteren fasulye model ürün olarak seçilmiştir (Mesquita ve ark., 2018). Biyokütle külü eklenerek elde edilmiş vermikompostun, saksı ve arazi uygulamaları fasulye bitkisi üzerinde uygulanmıştır.

2.8.1. Klorofil bileşenlerinin ekstaksiyonu ve tayini

Çiçeklenme döneminde, tam büyüklüğe ulaşmış yaprakların klorofil içeriğini tahmin etmek için klorofil analizi yapılmıştır (Özdemir ve ark., 2021). Her deneme setinden 100 mg yaprak numunesi bir santrifüj tüpüne yerleştirilmiş ve üzerine 4 mL solvent (%80 aseton (C₃H₆O) + %20 damıtılmış su) ilave edilmiştir. Numuneler daha sonra +4 °C'de beyaz yaprak dokusu elde edilinceye kadar buzdolabında bekletilmiş, ve ardından 3000 rpm'de 10 dakika santrifüjlenmiştir. Daha sonra süpernatant numuneleri çıkarılarak cam küvete aktarılmıştır. Örneklerin absorbansı, klorofil-a için 645 nm, klorofil-b için 663 nm ve karotenoidler için 470 nm dalga boyunda bir spektrofotometre kullanılarak okutulmuştur. Klorofil içerikleri, Özdemir ve ark.

(2021) tarafından tarif edilen Tan ve Francis, 1962 metodolojisi kullanılarak belirlenmiştir.

$$Klorofil(a)(mg/g) = (OD\ 663 \times 12.7) - (OD\ 645 \times 2.59) \frac{V}{1000 \times W} \quad (2.2)$$

$$Klorofil(b)(mg/g) = (OD\ 645 \times 22.9) - (OD\ 663 \times 4.68) \frac{V}{1000 \times W} \quad (2.3)$$

$$Karotenoid\ (mg/g) = (1000 \times OD\ 470) - (Klor-a \times 1.82) - (Klor-b \times 85.02) / 198 \quad (2.4)$$

Formüllerde, OD optik yoğunluk değeri; V kullanılan çözücü hacmi (ml); ve W taze malzemenin numune ağırlığıdır (g).

2.8.2. Leghemoglobin tayini

Azot sabitleme aktivitesini tahmin etmek için bir gram taze kırmızı renk iç nodül, damıtılmış su ile temiz bir şekilde yıkanarak, 5 mL soğutulmuş damıtılmış su ile buzla soğutulmuş bir havanda ezilmiştir. Nodül homojenatları dört kat tülbenkten süzülmüştür ve katı nodül parçacıklarını çıkarmak için süzüntü 500 x g'de (yerçekimi çarpı) 2 dakika santrifüjlenmiştir. Nihai süpernatant bakteroidleri çökeltmek için 15 dakika boyunca 12.000 x g'de tekrar santrifüjlenmiştir. Süpernatanttaki leghemoglobin içerikleri, 540 nm'de Larueand Child yöntemine dayalı bir spektrofotometre (Shimadzu UV-3000, Japonya) kullanılarak tahmin edilmiştir.

2.8.3. Bitki büyüme ölçümleri

Bitkiler çiçeklenme aşamasındayken bitki başına toplam nodül sayısı sayılmıştır. Nodüller köklerden ayrılarak, toprak parçacıklarını uzaklaştırmak için dikkatlice yıkanmıştır. Sabit ağırlığa ulaşılan kadar 80°C'de basınçlı hava fırınında kurutulmuştur ve ardından bitki başına nodül biyokütlesini tahmin etmek için tartılmıştır. Toprak üstü sürgünler zarflara konularak 60 °C'de 7 gün kurutulmuştur ve kuru ağırlıkları kaydedilmiştir.

2.8.4. Bitki yetiştirme

Farklı oranlarda biyokütle eklenen vermikompost örneklerinin potansiyel gübre etkinliği fasülye üzerinde saksı ve arazi yetiştirme deneyleri ile değerlendirilmiştir.

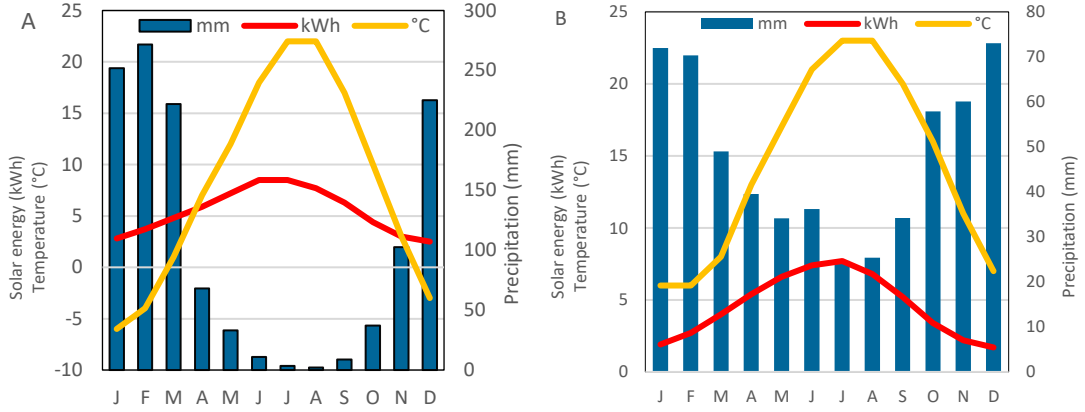
Saksı deneyleri, iki faktörlü ve üç yinelemeli olarak tamamen tesadüf parselleri deneme desenine göre kurulmuştur. Solucan gübresi uygulaması birincil faktör, tohumlara mikrobiyal aşılama ise ikincil faktör olarak kabul edilmiştir. Fasülye tohumları %1 sodyum hipoklorit (NaOCl) kullanılarak 3 dakika boyunca sterilize edilmiş, beş kez steril damıtılmış su ile durulanmış ve petri kaplarında nemli filtre kağıdı üzerinde oda sıcaklığında çimlendirilmiştir. 3 gün sonra çimlenen tohumlara,

Rhizobium leguminosarum biovar *phaseoli* ve fosfat çözündürücü bakteri içeren turba bazlı ticari bir aşılama malzemesi eklenmiştir. Aşılanan fideler 1.5 L'lik siyah silindirik saksılara (çap × yükseklik = 8.2 × 30cm) dört farklı vermikompost katkı maddesi (%0, %3.5, %7.0, %10.0 NPK) içeren nemli toprağa nakledilmiştir. Nodülasyonu sağlamak için tam çimlenmeden sonra her bitkinin kök bölgesine 2 mL inokülant şırınga ile enjekte edilerek ikinci bir aşılama yapılmıştır. Aşılanmış ve aşılanmamış bitkiler, sırasıyla 25/18 °C'de aydınlık/karanlık koşullarda, 16/8 saatlik bir fotoperiyotla (bir organizma tarafından alınan günlük aydınlatma periyodu) bir bitki büyüme kabininde yetiştirilmiştir. Işık yoğunluğu, 60 µmol m⁻² s⁻¹ fotosentetik olarak aktif radyasyon akışında ve %70 bağıl nemde tutulmuştur (Turp ve ark., 2021).

Çalışma kapsamında üretilen vermikompostların bitki yetiştirmeye uygunluğu, fasulye bitkisinde araştırılmıştır. Tarla deneyleri, 2021 yetiştirme mevsiminde, iki farklı agro-iklim koşulunda gerçekleştirilmiştir. Sıcak, kuru yaz deneme alanı, Türkiye'nin doğusundaki Bitlis İli'ndeki Tatvan İlçesi'nde, ılıman bölge deneme alanı Türkiye'nin kuzeybatısındaki Sakarya ilinden seçilmiştir. Denemelerin gerçekleştirildiği toprakların seçilen fizikokimyasal özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Bitlis deneme sahası uzun dönemli iklim verilerine göre Dsa (Kıtasal soğuk, kuru-sıcak yaz) iklim sınıflandırmasına sahiptir. 1959 ile 2020 arasındaki dönem için ortalama yıllık yağış yaklaşık 1046 mm'dir (büyüme mevsimi boyunca 137 mm, Mayıs-Ağustos), çoğunluğu kış ve ilkbaharda meydana gelir (Şekil 2.4). Aylık ortalama hava sıcaklığı -8.5 ila 29.3 °C arasında değişim göstermekte, tipik olarak Ocak ayı en düşük değerleri göstermektedir. Büyüme mevsimi boyunca, ortalama hava sıcaklığı ortalama 18,9 °C, güneş ışığı 9,1 saat olarak gerçekleşmiştir.

Sözü edilen uzun dönemli verilere göre, Sakarya deneme sahasının iklimi Köppen iklim sınıflandırmasına göre Cfa (Ilıman, kurak mevsim olmayan, sıcak yaz) olarak sınıflandırılmıştır. Nispeten homojen bir dağılım olan 1951–2021 için yıllık ortalama yaklaşık 843 mm yağışa (Mayıs-Ağustos büyüme mevsimi boyunca 225 mm) sahiptir.



Şekil 2.4.Çalışma sahalarında 2021'de büyüme mevsimi boyunca aylık sıcaklık, ortalama güneş enerjisi ve yağış miktarı; Bitlis (A) ve Sakarya (B), Türkiye.

Hava sıcaklıkları Ocak ayında 2.9 °C'nin altına düşerken, Ağustos ayında 29.5 °C'nin üzerine çıkar. Büyüme mevsimi boyunca ortalama hava sıcaklığı 21.3 °C ve ortalama güneş ışığı alma saati 8.0 saattir.

Arazi deneyleri tesadüf blokları deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak düzenlenmiştir. Deney beş seviyede besin yönünden zengin solucan gübresi içeren tek ana faktörden oluşmaktadır: $T_0 = 0.0\%$, $T_1 = 3.5\%$, $T_2 = 7.0\%$, $T_3 = 10.0\%$ biyokütle kül solucan gübresi, $T_4 =$ gübrelenmemiş kontrol ve $T_5 =$ gübreli kontrol (Gıda ve Tarım Bakanlığı Sakarya İl Müdürlüğü, toprak analiz laboratuvarı tarafından tavsiye edilen miktarlarda) uygulanmıştır. Ekim sırasında tavsiye edilen vermikompost miktarları tohumun 5 cm kenarına ve 5 cm altına yerleştirilmiştir. Kuru fasulye tohumları, *Rhizobium leguminosarum biovar phaseoli* ve fosfat çözücü bakteri içeren *rhizobia* aşılama ile aşılandıktan sonra Mayıs ayı başında toprağa ekilmiştir. Bakteri aşılama tohumları, elle doğrudan nemli toprağa yerleştirilmiştir. Parseller 4 m uzunluğunda tasarlanmış ve her parselde sıra genişliği 45 cm olan 4 sıra yer almıştır. Bloklar arası mesafe 2 m, parseller arası mesafe 1.0 m'dir. Yabancı ot mücadelesi, ek sulama, zararlı ve hastalık kontrolü dahil olmak üzere yetiştirme uygulamaları bölgesel önerilere uygun olarak yapılmıştır. Yetiştirme süresi her iki lokasyon için de 4 aydır (Özdemir ve Turp, 2023).



3. BULGULAR VE TARTIŞMA

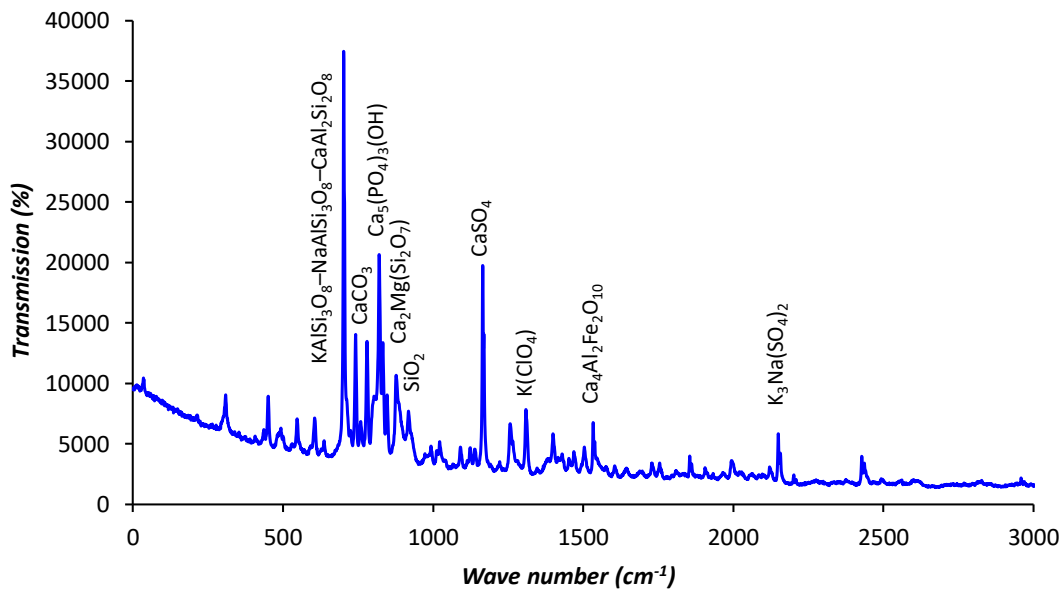
3.1. Vermikompostlamada kullanılan hammadelerin özellikleri

Biyokütle enerji santralleri, biyokütle yakıtlarını yakarak büyük miktarda enerji sağlamaktadır. Bununla birlikte, uçucu kül ve taban külü olmak üzere büyük miktarlarda biyokütle enerji santrali külü üretirler. Büyük miktarda işlenmemiş kül atığının toprak kirliliği, su ötrofikasyonu, hava kirliliği ve yeraltı suyu kirliliği gibi ciddi çevresel sorunlara neden olabileceği düşünülmektedir. Biyokütle tesislerinden çıkan külün azaltılması, geri dönüştürülmesi ve pasifleştirilmesi, biyokütle enerjisinin sürdürülebilir gelişimi ve kullanımı için acilen çözülmesi gereken önemli konular haline gelmiştir (Xie ve ark., 2022).

Biyokütle yakıt ham maddesi olan organik bileşikler, doğal olarak karbon, oksijen, hidrojen ve nispeten daha az miktarda alkali metaller olan potasyum, sodyum, magnezyum ve kalsiyum gibi mineral tuzlardan meydana gelir. Bu organik malzemeler yakıldığında karbon, hidrojen ve oksijen azalır. Öte yandan, potasyum, sodyum, kalsiyum ve magnezyum oksitleri kül olarak kalır (Özdemir ve Demir, 2021). Kül, yanma sonrası kalıntıdır ve bu alkali metal oksitler, küllerdeki ana aktif maddelerdir. Biyokütlerde kül içeriği genellikle odun için küçüktür, ancak bazı biyokütler için oran %20'ye kadar ulaşabilir. Biyokütle külünün kimyasal ve fiziksel özellikleri çeşitli ve karmaşıktır. Birçok çalışmada biyokül karakterizasyonlarının anlaşılabilmesi farklı analitik yaklaşımlar ve tekniklerin birleşimi ile elde edilmiştir. Çok sayıda çalışma kül parçacıklarının kristal, amorf, opak, yuvarlak, nano boyutlu boşluklara sahip gözenekli bir yapı sergilediğini göstermiştir (Ondrasek ve ark., 2021).

Biyokütle külü doğal olarak alkalidir. Biyokütle külünün en belirgin parametresi pH (13.04) değerinin yüksek olmasıdır (Tablo 3.1). Biyokül için iletkenlik değerleri de 27.43 mS cm^{-1} aralığında kaydedilmiştir. Uçucu külden yanmamış karbon miktarı düşük ve yaklaşık %1.98 değerinde tespit edilmiştir. Bu da yanmanın tam olarak gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Tablo 3.1'de fosfor ve diğer bitki besinlerini ayrıca külün ağır metal içeriğini göstermektedir (Turp ve ark., 2021).

Biyokül için gerçekleştirilen X ışını difraktometre (XRD) analiz sonucunda Şekil 3.1’ de görüldüğü gibi hidroksiapatit (%15.6), feldispatlar (%15.6), anhidrit (%13.8), kalsit (%12.5), akermanit (%9.7), kuvars (%9.4), potasyum klorit (%9.3), kahverengi millerit (%6.2), aftitalit (%4.8), hematit (%2.1) ve diyopsit (%1.1) BK'nın en yüksek kristal bileşimleridir. Baskın pik olan Hidroksiapatit yüksek Ca ve P içerikleri ile tutarlıdır. Bu kristal formlar Ca ve P içeren biyokütlenin 800 °C’in üzerindeki sıcaklıkta yanması ana mineral fazı olarak tanımlanır ve apatitin çözünürlüğü diğer içeriklere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Leng ve ark., 2019).



Şekil 3.1. Biyokütle enerji santrali külünün X-ışını kırınım modeli ve kül tozundaki ana bileşenler (Turp ve ark., 2021).

ICP-OES sonuçları, BK'nın temel bileşiminin yüksek konsantrasyonlarda potasyum, fosfor ve kalsiyum içerdiğini, ancak silika, alüminyum ve demir oksitler gibi toprak elementlerinin içeriğinin nispeten düşük olduğunu göstermiştir (Tablo 3.1). Bu çalışmada tespit edilen bitki besin elementlerinden özellikle P ve K yüksek bulunmuştur. Çalışmada kullanılan kül, biyokütle ham maddesi içinde % 80 tavuk altığı kullanılan örneklerden alınmıştır. BK'daki kümes hayvanı altığından kaynaklanan fosfor ve diğer makro/mikro besinler, bu atığı biyo-gübreler için değerli bir ham madde kaynağı haline getirir. Bu açıdan, tarımsal-endüstriyel artıklar tarafından üretilen BK, yararlı bir bitki besin kaynağı olarak kabul edilebilir (Karwal ve Kaushik, 2020). Kül mineral kompozisyonu, yakmada kullanılan ham madde kaynaklarına göre çok değişiklik gösterebilmektedir. Bu çalışmada saptanan değerler

önceki çalışmalarda rapor eden değerler arasında bulunmakta (Fahimi ve ark., 2020), onlardan farklı olarak tavuk gübresi kül değerlerine daha yakın durumdadır (Luyckx ve ark., 2020).

Tablo 3.1. Sığır gübresinin ve biyokütle külünün (BK) ilk fizikokimyasal özellikleri (değerler, her biri üç tekerrürlü olarak ölçülen üç numunenin ortalama $\pm$ standart sapmasıdır) (Turp ve ark., 2021).

Parametre	Sığır Gübresi	Biyokütle Külü (BK)
pH	7.23 $\pm$ 0.15	13.04 $\pm$ 0.20
EC (dS m ⁻¹)	2.43 $\pm$ 0.34	27.43 $\pm$ 0.55
Organic madde (%)	89.35 $\pm$ 0.81	1.98 $\pm$ 0.01
C/N	17.25 $\pm$ 1.60	ND
Toplam N (%)	1.76 $\pm$ 0.25	ND
P (mg g ⁻¹)	4.62 $\pm$ 0.44	131 $\pm$ 1.56
K (mg g ⁻¹)	6.14 $\pm$ 1.52	171 $\pm$ 1.56
Ca (mg g ⁻¹)	19.35 $\pm$ 0.66	116
Mg (mg g ⁻¹)	2.61 $\pm$ 0.41	33.4
Fe (mg kg ⁻¹)	785.02 $\pm$ 10.78	26042
Mn (mg kg ⁻¹)	20.69 $\pm$ 1.83	2948
Zn (mg kg ⁻¹)	342.41 $\pm$ 4.05	1222

EC, elektriksel iletkenlik; dS, deciSiemens; ND, tespit edilmemiştir.

Biyokütle külü ve sığır gübresinin fiziko-kimyasal parametreleri, istatistiksel olarak önemli farklılık ($p < 0.01$) göstermiştir (Tablo 3.1). Biyokütle külünden farklı olarak, sığır gübresi yüksek organik madde ve azot oranı, düşük EC ve mineral elementler olarak karakterize olmuştur. Özellikle makro bitki besin elementleri P ve K sığır gübresinde oldukça düşük orandadır. Dolayısı ile sığır gübresini BK ile destekleyerek temel bitki besin elementleri olan NPK bakımından dengeli ve zenginleştirilmiş biyo atık kökenli gübre üretme potansiyeli sunmaktadır.

Bitkiler, büyüme ve gelişmeleri için gerekli olan bitki besin elementlerini ancak, çözeltiden çözünür formda olduklarında alabilir. Solusyonda organik veya inorganik formda fakat bitkiler için alınabilir formda olmayan elementlerin çözünür forma geçmesi gerekir. Özellikle fosforun alınamaz formların alınabilir formlara dönüştürülmesi doğal koşullarda mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilir. Mikrobiyal çözünme, fosfor salınımına etki eden mekanizmalar pH'yı düşürerek asitlerin üretilmesi ve katyonların ortamdan çekilmesi ile gerçekleştirilir. Bitki besin elementlerinin transformasyonunda etkili mikrobiyal konsorsiyum, bitki beslenmesini ve sağlığını destekleyen yararlı bir mikrobiyal karışımdır ve bağlı nutrientlerin çözündürülmesinde giderek daha yaygın kullanılır olmuştur. Kül orijinli nutrientler,

mikrobiyal mekanizmalar ile çözündürölüp, özellikle organik maddelerle birleştğinde organik gübre görevi görebilirler. Nutrientçe zenginleştirilmiş biyo gübrelerin bitki büyümesini arttırdığı mekanizmalar çoktur. Örneğin, inorganik fosfor bileşiklerinin ana çözünme mekanizması olan organik asitlerin, sideroforların, protonların, hidroksil iyonlarının ve CO₂'in çözündürme etkileri. Mikrobiyal çözündürme, yüksek fosfor içeriği ile karakterize edilen farklı atık türlerinin yakılmasından elde edilen küllerde bulunan fosforun yararlı forma dönüştürülmesinde de kullanılabilir. Fosfor bileşiklerinin çözündürölmesi için, bir dizi kimyasal reaksiyon ve biyolojik etkileşim yoluyla fosforu biyolojik olarak kullanılabilir formlara dönüştüren süreçler olarak tanımlanabilecek çeşitli teknolojiler geliştirilmiştir. Fosfat çözücü mikroorganizmalar, fosfataz enzimlerini ve enzim aktivatörlerini, düşük moleküler ağırlıklı organik asitleri ve hümit asitleri bir arada kullanarak bitki nutrientlerini çözüp, biyoyararlı forma dönüştürür. Bu çalışmada vermikompostlama yoluyla bahsedilen mekanizmalardan faydalanılmaya ve BK içindeki nutrientleri biyoyararlı forma dönüştürme üzerinde çalışılmıştır.

3.2. Vermikompostun Karakterizasyonu

Biyokül (BK) vermikompost numuneleri (T₀, T₁, T₂ ve T₃) %0, %3.5, %7.0 ve %10 NPK içerecek şekilde artan dozda kül ilave edilmesi ile elde edilmiştir. BK eklenerek elde edilen bitki besin elementi zenginleştirilmiş numunelerin, vermikompostlama işleminden sonra biyolojik olarak kullanılabilir element bileşimleri Tablo 3.2 ve Şekil 3.2'de toplu olarak gösterilmiştir. Biyokülün yüksek pH seviyesi, test edilen tüm BK vermikompost numunelerinde, vermikompostlamadan sonra nötr aralık seviyesine gelmiştir. Tüm solucan gübresi örneklerinde yüksek çözünürlüğe sahip besin elementleri nedeni ile iletkenlik yüksek olmuştur (>13 mS cm⁻¹). Vermikompostta artan BK dozu seyreltme etkilerinden dolayı karışımlardaki organik madde ve Kjeldahl nitrojen içeriğini kayda değer ölçüde azaltmıştır. BK ilavesi ayrıca tüm solucan gübresi uygulamalarında ölçülen makro ve mikro bitki besin elementlerini azot hariç önemli ölçüde arttırmıştır. Vermikompost örneklerine eklenen BK miktarı arttıkça elde edilen nihai vermikompost numunelerinde makro ve mikro besin elementlerinin tümü önemli ölçüde artmıştır. Vermikompost numunelerinin nihai besin bileşimi, T₀ için "N 1.31, P 0.53, K %0.90" (toplam %2.74), T₁ için "N 1.02, P 0.63, K %1.90" (toplam %3.55), T₂ için "N 0.8, P 1.78, K 3.86" (toplam %7.16) ve T₃ için "N 0.84, P 2.64, K %6.32" (toplam %9.94) olmuştur. Bu sonuçlar, BK'dan gelen

makro ve mikro elementlerle birlikte sığır b bresinden gelen yüksek OM'nin vermikompostlama yöntemi ile bir araya getirilmesinin, tarımsal kökenli atıkların hem toprak ıslahı için ve hemde tarımsal bitkilerin g brelenmesinde kullanılacabilecek önemli bir kaynak olabileceğini göstermektedir (Lukashe ve ark., 2019;  zdemir ve ark., 2019).

Tablo 3.2'de görüleceği gibi, vermikompost  retiminde BK eklenmesi demir hariç tüm bitki besin elementlerinin biyolojik olarak kullanılabilir fraksiyonlarını artırmıştır. Diğer yandan, artan BK dozlarında, biyoyararlı fraksiyon oranı incelenen bütün bitki besin elementlerinde azalmıştır. Elementlerin bileşik fazdan, solusyona geçişi, adsorbsiyon, desorbsiyon kinetikleri, pek çok fiziksel, kimyasal ve biyolojik faktör tarafından etkilenmektedir (Dede ve ark., 2017). Kompostlama ve vermikompostlama süreçlerinde, bitki besin elementlerinin kullanılabilir besin maddelerindeki artış, organik maddenin mikroorganizmalar tarafından mineralize edilmesi (Ozdemir ve ark., 2019), ayrışma sonucu asit üretiminin sonucu olarak (Semerci ve ark., 2019), BK ve organik maddeye bağlı elementlerin     nmesi ile ilişkilendirilmiştir (Ozdemir ve ark., 2020). Biyolojik kullanılabilir fraksiyonların artmasının tersine vermikomposttaki BK konsantrasyonu arttı  a tüm besin elementlerinin biyoyararlı fraksiyonlarının yüzdesi azalmıştır. Bu azalışta BK'dan kaynaklanan pH etkisinin önemli olduğu düşünülmektedir. Kompost uygulamalarına inorganik madde ilavesi ile, özellikle kireç ilavesi, pek çok elementte     n rl ğ  azalttığı rapor edilmiştir (Singh and Kalamdhad, 2013; Dede ve ark., 2023). Buna ilave olarak, vermikompost içeriğindeki ağır metal konsantrasyonları ise yönetmelik sınırları içerisinde seyretmiştir. Kadmiyum ağır metali incelenen tüm örneklerde tespit edilmemiş, kurşun çok düşük seviyelerde gözlemlenmiştir. Çinko ve bakır seviyesi, biyoyakıt bileşiminde broyler tavuk altlığının yüksek oranda olmasından dolayı yüksek tespit edilmiştir. Çünkü,  inko, bakır, mangan gibi elementler tavuk yemlerine katkı maddesi olarak karıştırılmaktadır. Artan BK seviyelerinde nikel konsantrasyonundaki artış, bu elementin de k l kaynaklı olduğunu göstermektedir. BK'nin pH etkisinden dolayı, ağır metallerin vermikompost içindeki pasivasyonu sağlanmış, çevresel etki oluşturma riskleri minimize edilmiştir.

Tablo 3.2. Biyokütle külü (BA) vermikompostunun fito-elverişli fraksiyonları ve biyoyararlanım oranları ile birlikte kimyasal analizleri (Turp ve ark., 2021).

Parametre	Toplam Fraksiyon				Fito-elverişli Fraksiyonlar				Biyoyararlanım (%)			
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃
pH	6.81	7.69	7.74	7.76	-	-	-	-	-	-	-	-
EC (mS ⁻¹)	13.4	15.6	16.7	19.9	-	-	-	-	-	-	-	-
OM (%)	69.7	64.0	63.1	57.0	-	-	-	-	-	-	-	-
N (%)	2.71	2.20	1.88	1.82	2.13	2.01	1.76	1.72	92.20	91.40	93.60	94.50
K (mg kg ⁻¹)	14,100	33,000	37,100	45,700	14,071	14,966	11,592	10,656	99.79	45.35	31.25	23.32
Ca (mg kg ⁻¹)	29,800	60,600	60,600	72,700	7360	8495	6696	7833	24.70	14.02	11.05	10.77
Mg (mg kg ⁻¹)	17,600	14,100	5800	1100	3710	2353	1736	1773	21.08	16.69	29.93	16.12
Fe (mg kg ⁻¹)	6491	4973	4965	5657	87	23	24	18	1.351	0.46	0.48	0.32
Mn (mg kg ⁻¹)	216	548	524	601	38	57	66	64	17.71	10.45	12.45	10.56
Cu (mg kg ⁻¹)	43	87	95	122	5	13	19	21	12.02	15.53	19.63	17.52
Zn (mg kg ⁻¹)	275	553	623	773	103	143	161	166	37.42	25.84	25.87	21.46
Ni (mg kg ⁻¹)	52	72	79	90	6	7	7	6	11.54	9.72	8.86	6.67
Pb (mg kg ⁻¹)	8	11	12	11	1	2	3	3	12.50	18.8	25.00	27.27
Cd (mg kg ⁻¹)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

BK daki en önemli element fosfordur. Fosfor, azottan sonra ikinci gübre besin maddesidir ve yenilenemez kaynak olarak kabul edilmiştir. BK nın P konsantrasyonu %13.1 P ($\times 2.2916 = \% 30.0 \text{ P}_2\text{O}_5$) seviyesindedir. BK içindeki fosfor seviyesi %8.3-13.0 aralığında değişim göstermekte ve %13-17 P içeren bazı doğal fosfor maden kaynakları ile (kayaç fosfat) karşılaştırılabilir seviyededir (Smol, 2019). Vermikomposttaki toplam ve mevcut alınabilir P içerikleri sırasıyla 5300 ila 2920 (T₀), 63,200 ila 10.820 (T₁), 148,000 ila 10.940 (T₂) ve 228,000 ila 10,600 mg kg⁻¹ (T₃) aralığındadır ve en yüksek ekstrakte edilebilir oranı T₁ uygulamasında %17 lik bir oranla ortaya çıkmaktadır. Solucan kompostu numunelerinde artan BK oranı ile çözünme oranı ciddi oranda gerilemiştir (T₃ te %4). Vermikomposttaki P'nin daha

yüksek konsantrasyonu ve düşük çözünme oranları, yakma işlemi sırasında çözünmeyen fosfat formlarıyla indüklenen biyokütle Ca, Al ve Fe nin varlığı ile açıklanmıştır. Ca ve Fe, daha yüksek yanma sıcaklıklarında oluşan Ca-P, Fe-P ve apatitin kristal yapılarındaki P-bağlamanın da kaynağı olan biyokütle külünün ana bileşenleri olarak tanımlanır (Leng ve ark., 2019). Yüksek yanma sıcaklıklarında Ca/P molar oranındaki artış, daha yüksek Ca-P kristallliği ve düşük su ile ekstrakte edilebilir bir P olduğunu bildirmiştir (Özdemir ve Demir, 2021).



Şekil 3.2. T₀'dan T₃'e artan dozda biyokütle ile biyokütle külü vermikompost numunelerinin toplam ve biyolojik olarak kullanılabilir element bileşimi (Özdemir ve Turp, 2023).

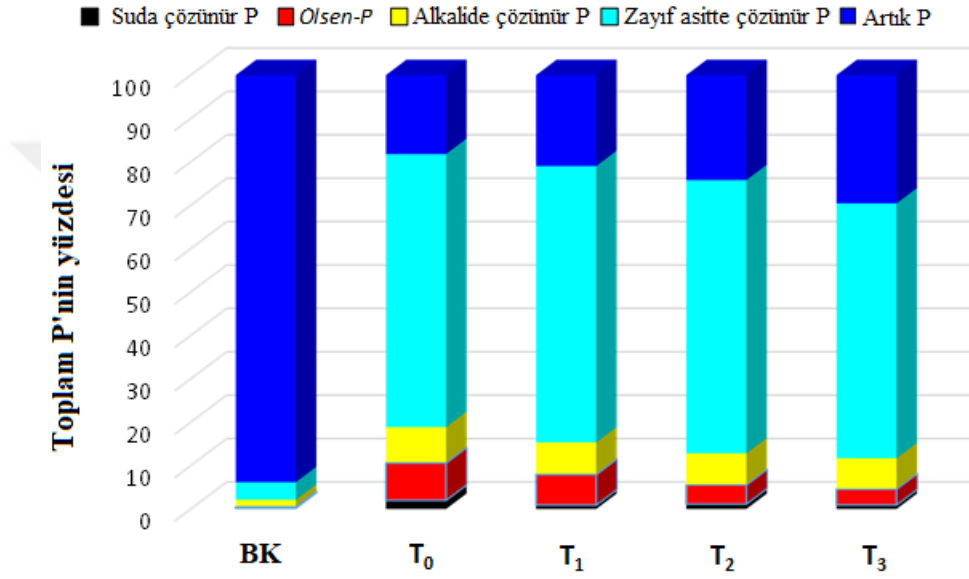
Bununla birlikte, kararlı toprak koşullarında Ca-P, Al-P ve Fe-P'den oluşan orta derecede kararsız havuzun biyoyararlanımı, hem toprak pH'ına hem de orta derecede kararsız havuz tarafından doldurulan bitki alımıyla sudan çıkarılabilir P'nin azalmasına bağlıdır (Karwal ve Kaushik, 2021).

3.3. Vermikompost uygulamasının fosfor türleşmesine etkisi

Fosfor (P), tarımda kritik bir besin elementidir ve bu nedenle çoğu gübrenin ana bileşenidir. Günümüz modern tarımı mineral bazlı gübrelere bağımlıdır, çünkü fosforlu gübrenin önemli bir kısmı, fosfat kayası gibi birincil P kaynaklarından temin edilmektedir. Fosfor sınırlı bir elementtir. Bu nedenle, fosfor rezervlerini genişletmenin en önemli kaynaklarından biri olarak, insan atık akışlarından gelen P'nin tekrar bitkisel üretim sistemlerine döndürülmesi görülmektedir.

Termokimyasal atık kaynaklarından gelen P'nin en önemli özelliği, yüksek sıcaklıklarda değişik minerallerle farklı bileşikler oluşturması ve hareketsiz forma geçmesidir. Bu çalışmada sabit-kararlı fosfor bileşiklerinin biyolojik yöntemlerle bitkiye yararlı forma dönüştürülmesi hedeflenmiştir. Türleşme deneyinin sonuçları P'nin çoğunun ham BK da kristalize, oksitler ya da Ca-fosfatlar, Al-fosfatlar ya da Fe-fosfatlar şeklinde kararlı bir formda olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte Şekil 3.3'de gösterildiği gibi biyoyararlı fosfor fraksiyonları H_2PO_4 , HPO_2 ve çözünebilir organik-P mikrobiyal bozunma, asidik çözünme ve organik kompleksleşme mekanizmasıyla tüm vermikompost uygulanan BK karışımlarında önemli ölçüde artmıştır ($p < 0.05$) (Semerci ve ark., 2019; Liu ve ark., 2020). Vermikompostlama işlemi sonunda Olsen-P'nin $T_0 > T_1 > T_2 > T_3$ sırasıyla azaldığı görülmüştür. Kül katılımını artırarak çözülmüş fosfor fraksiyonlarını azaltan karışımdaki kül miktarına bağlı olarak ölçülen tüm fosfor fraksiyonları için işlemler arasında önemli bir fark bulunmuştur (Şekil 3.3). İncelenen bütün BK vermikompost örneklerinde, tespit edilen maksimum P fraksiyonları, sırasıyla, zayıf asitte çözünür Fe- ve Al-bağlı P olmuş, ardından çözünmeyen artık fraksiyon, alkalide çözünür ve Olsen fosfor fraksiyonları gelmiştir. Diğer yandan, BK uygulamalarında toplam fosfor (TP) içeriği %1.41 ile %1.77 arasında değişirken kontrol (T_0) için %0.63 olmuştur. Solucan kompostuna BK eklenmesi, TP içeriğini önemli ölçüde ($p < 0.05$) artırmıştır. Sonuçlar, vermikompostun BK'daki çözünürlüğü ve biyolojik olarak kullanılabilir (hemen alınabilir ve yavaş alınabilir form) P seviyesini T_1 , T_2 ve T_3 uygulamaları için sırasıyla

%79, %76 ve %69 artırdığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, ana bileşen, zayıf asitte çözünebilir form olan Fe-bağlı fraksiyondur. Tablo 3.2 ve Şekil 3.2'den görüleceği gibi BK'nın toplam Fe içeriği oldukça zengin, fakat biyoyayalı Fe oranı en düşük olan elementtir. Bu, Fe'in ağırlıklı olarak P gibi minerallerle bileşik yaptığını göstermektedir. Vermikompost uygulamaları BK kökenli fosfor bileşiklerini çözümleyerek transformasyona uğratmada etkili olmuştur. Yarı hareketli fraksiyonların yüksek olması, vermikompostta tutulan fosforun ötrofikasyona neden olarak çevresel etkilerinin azaltılmasına da katkıda bulunabilir formdadır.



Şekil 3.3. Artırılmış dozda biyokütle külü (BK) ile vermikompostlamanın sıralı ekstraksiyon prosedürleriyle fosfor fraksiyonasyonu (Turp ve ark., 2021).

Solucan kompostunda P'nin daha yüksek konsantrasyonu ve düşük çözünme oranları, yakma işlemi sırasında çözünmeyen fosfat formlarıyla indüklenen biyokütlede Ca, Al ve Fe'nin varlığı ile açıklanmıştır. Leng ve ark. (2019), inceledikleri kül örneklerinde fosfor oranının % 8.3-13 (P) olmasına rağmen, biyoyararlı P oranının 800 mg kg⁻¹, toplam fosforun % 0.7 sinden küçük olduğunu bildirmektedir. Bağlı fosforun, mikrobiyal ve kimyasal yollarla biyoyararlı forma dönüştürülmesi aşağıdaki reaksiyon yollarıyla tarif edilmektedir:



Verilen denklemler, farklı fosfor bileşiklerinin tam asidik çözünmesi için teorik olarak, her bir fosfor bileşiği için gerekli asit miktarının 3 mol H^+ olduğunu göstermektedir. BK bazik karakterli, MgO , K_2O , CaO , $CaCO_3$ ve $Ca(OH)_2$ gibi diğer asitte çözünen bileşenleri de içerdiği için, pratikte daha fazla asit gerekir (Semerci ve ark., 1018). İfade edilen bu reaksiyonlar spesifik bakterilerin enzimleri ile gerçekleştirilebileceği gibi, organik maddenin dekompozyonu sırasında ortaya çıkan zayıf asitlerin sentezlenmesi sonucuyla da gerçekleşebilir.

Biyokütle külünün ana bileşenleri olarak tanımlanan Ca ve Fe, daha yüksek yanma sıcaklıklarında oluşan apatitin Ca-P, Fe-P kristal yapılarındaki P-bağlayıcı da kaynağıdır (Leng ve ark., 2019). Yüksek yanma sıcaklıkları altında P ve Ca kombinasyonu ile hidroksiapatit oluşumu önceki çalışmalarda bildirilmiştir (Özdemir ve ark., 2021).

Yüksek yanma sıcaklıklarında Ca/P molar oranındaki artışın, Ca-P kristalliğinde ve düşük suda ekstrakte edilebilir P'de daha yüksek olduğu rapor edilmiştir (Zwetsloot ve ark., 2015). Bu çalışmada tespit edilen yüksek oranda Ca-P, Al-P ve Fe-P'den oluşan orta derecede kararsız bir birikimin biyoyararlanımı, hem toprak pH'ına bağlıdır hem de sabit toprak koşullarında bitki alımıyla suda çözünür P'yi azaltmıştır (Liu ve ark., 2019). Bu durum, sürecin orta derecede kararsız birikim tarafından doldurulduğunu göstermekle kalmaz, aynı zamanda BK vermikompostun mevcut P'de yavaş salınımı için daha büyük oranların sağlanabileceğini göstermiştir. Sonuçlara göre, vermikompostta hali hazırda bulunan Olsen-P ve dirençli hidroksiapatit formlarından daha yüksek olan P fraksiyonu yoluyla orta derecede mevcut olan önceki bulgularımızla uyumlu bulunmuştur (Turp ve ark., 2021). Bu gerçeğe bakılmaksızın, toprak P-havuzu, pH ve organik maddenin ayrışmasındaki olası değişikliklerin uzun vadede P biyoyararlanımını etkileyebileceği kabul edilmiştir (Turp ve ark., 2019; Özdemir ve ark., 2021).

3.4. Vermikompostta Enzim Aktiviteleri

Vermikompostun olgunluğunu değerlendirmek için farklı özelliklere dayanan birtakım kriterler ve parametreler kullanılmaktadır. Bunlardan biri olan enzim aktiviteleri hammaddelerin kimyasal bileşenlerinin ayrışma aşamaları ve kalitesi üzerinde oldukça etkili olmakla beraber gübre olarak uygulandığı toprakta mikrobiyal topluluklarının çeşitliliğini artırır (Alidadi ve ark., 2016). Vermikompostta meydana gelen organik

madde dönüşümü ve besin elementi transformasyonunun göstergesi olarak enzim aktiviteleri kullanılmaktadır. Biyokül ilavesinin farklı hidrolitik enzim aktiviteleri üzerindeki etkileri ile ilgili olarak BK'nın artması kontrole kıyasla incelenen tüm enzim aktivitelerini önemli ölçüde ($p < 0.01$) azaltmıştır (Tablo 3.3). Biyokütle küllü eklenmemiş kontrol vermikompost uygulamasında bulunan bütün enzimler daha yüksek aktivite sergilemiştir. Tüm solucan gübresi numunelerinde ortalama enzim aktivitelerinin sıralamaları üreaz > β -glukosidaz > alkalın fosfataz > arilsülfataz > asit fosfataz şeklindedir (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. Artan dozda biyokütle küllü ile vermikompost işlemlerinde enzimatik aktiviteler. (Değerler, üç kopyada ortalama $\pm$ standart sapma olarak temsil edilir) (Özdemir ve ark., 2023).

Numuneler	Asit fosfataz ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)	Alkali fosfataz ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)	Arilsülfataz ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)	β -glukozidaz ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)	Üreaz ($\mu\text{g NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
T ₀	70.8 $\pm$ 2.1a	103.3 $\pm$ 8.5a	99.4 $\pm$ 10.0a	113.7 $\pm$ 6.4a	296.7 $\pm$ 11.2a
T ₁	64.7 $\pm$ 3.0b	99.3 $\pm$ 6.0b	87.3 $\pm$ 11.0b	105.3 $\pm$ 3.8b	252.0 $\pm$ 4.0b
T ₂	58.6 $\pm$ 2.5c	81.3 $\pm$ 5.0c	82.0 $\pm$ 3.6c	88.3 $\pm$ 1.5c	214.6 $\pm$ 3.5c
T ₃	49.7 $\pm$ 2.5d	80.0 $\pm$ 4.6c	66.7 $\pm$ 0.64d	67.4 $\pm$ 2.5d	106.4 $\pm$ 7.8d
Önem seviyesi	0.01**	0.01**	0.01**	0.01**	0.05*

İstatistiki önem seviyesi: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

Fosforun apatit gibi minerallerden çözünmesi genel olarak yavaştır ve yalnızca asidik ortamlarında veya güçlü bitki kökü veya mikrobiyal aracılı proton ve asit salınımı altında, örneğin yüksek H^+ , düşük Ca^{2+} ve OH^- konsantrasyonunun etkisi altında çözünür. Biyokülde apatit formda bulunan fosforun bitkilerin alabileceği forma mikrobiyal olarak çözündürülmesi için bazı bakteri grupları etkili bir şekilde kullanılmıştır. Fosfor çözündürülmesi, hümik ve fulvik asitler gibi organik asitlerin ile organik maddenin ayrışmasıyla ortaya çıkan citrat, malat vb organik asitler ve P'yi çözen mikroorganizmaların varlığıyla artırılabilir. Özellikle fosfataz ve arilsülfataz gibi hidrolitik bakteriyel enzimlerin apatit formda bulunan fosforun çözünür ve kullanılabilir duruma getirebilmektedir. Numunelerde besin içeriğinin yoğun olduğu fosfor mineralizasyonunun durumunu değerlendirmek için fosfataz aktivitesi kullanılmıştır. BK oranının artması ile fosfataz aktivitesi azalma eğilimi

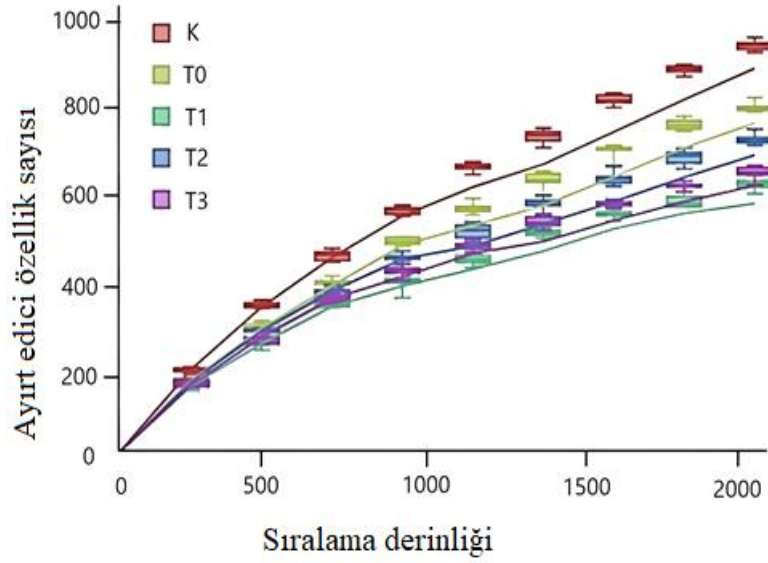
göstermiştir. Bunun yanı sıra tüm numunelerde üreaz enzim aktivitesinin diğer enzim aktivitelerine kıyasla yüksek olmasının sebebinin termofilik faz aşamasının mikrobiyal popülasyonda hızlı bir çoğalma göstermesine bağlanmıştır. Yüksek BK solucan gübresi işlemlerinde hem β -glukosidaz hem de üreazın spesifik aktivitelerindeki azalma, BK'nın büyük ölçüde organik karbon ve nitrojenden yoksun olduğundan bu işlemlerin düşük organik madde ve nitrojen katkısı ile açıklanmıştır. Tüm enzimatik aktivitelerin BK oranının artışına bağlı olarak azalması mevcut substrat oranının azalması ve biyokütle külünün en önemli özelliği pH değerinin alkali etkisinin sebep olabileceği öne sürülmüştür (Karwal ve ark., 2020; Özdemir ve ark., 2023). Benzer şekilde %50 tarımsal biyokütle atığı, %30 mutfak atığı, %20 uçucu kül içeren kompost substrat kombinasyonunun, pH 8.15'de maksimum mikrobiyal ve enzimatik aktivite sergilediği ve iyi bir kompost kalitesine ulaştığı bildirilmektedir (Mandpe ve ark., 2019).

3.5. Vermikompost Prosesinin Mikrobiyal Topluluk Özellikleri

Vermikompostlama, biyokütlenin solucan bağırsağında fiziksel olarak parçalanması yoluyla ayrışma süreci yanı sıra, geniş bir mikroorganizma yelpazesinin biyokütle ile karışması sonucu mineralizasyon süreçlerini hızlandırır. Bununla birlikte, solucan kompostu bakteri topluluklarının çeşitliliğini arttırmakta, madde transformasyonlarına sinerjistik etki sağlamaktadır.

BK, azot ve önemsiz miktarda organik karbon dışında toprakta bulunanlara benzer tüm elementleri içermektedir (Özdemir ve Demir, 2021). Bu nedenle, azot dışında, mikroorganizma ve bitkilerin metabolizması ve büyümesi için gerekli olan diğer tüm temel elementler, BK'da hali hazırda mevcuttur. Sadece biyoyararlı forma dönüştürülmesi gerekmektedir. Kompost ve vermikompost uygulamalarında bu mineralleri biyoyararlı forma dönüştüren ilgili mikroorganizma topluluklarının enzimleridir.

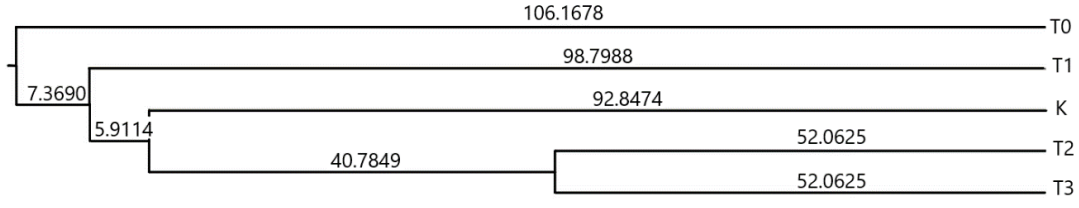
Metagenom analizi, vermikompostlama sürecindeki metabolik faaliyetlerden sorumlu mikrobiyal toplulukların genetik karmaşıklığı hakkında daha kapsamlı açıklamalar sağlamaktadır (Borker ve ark., 2022). Sığır gübresi ve BK kullanılarak hazırlanan vermikompost örneklerinin metagenomik sonuçlarına göre, tek bir örnekte tür zenginliğini belirlemek için yapılan alfa çeşitlilik analizi Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



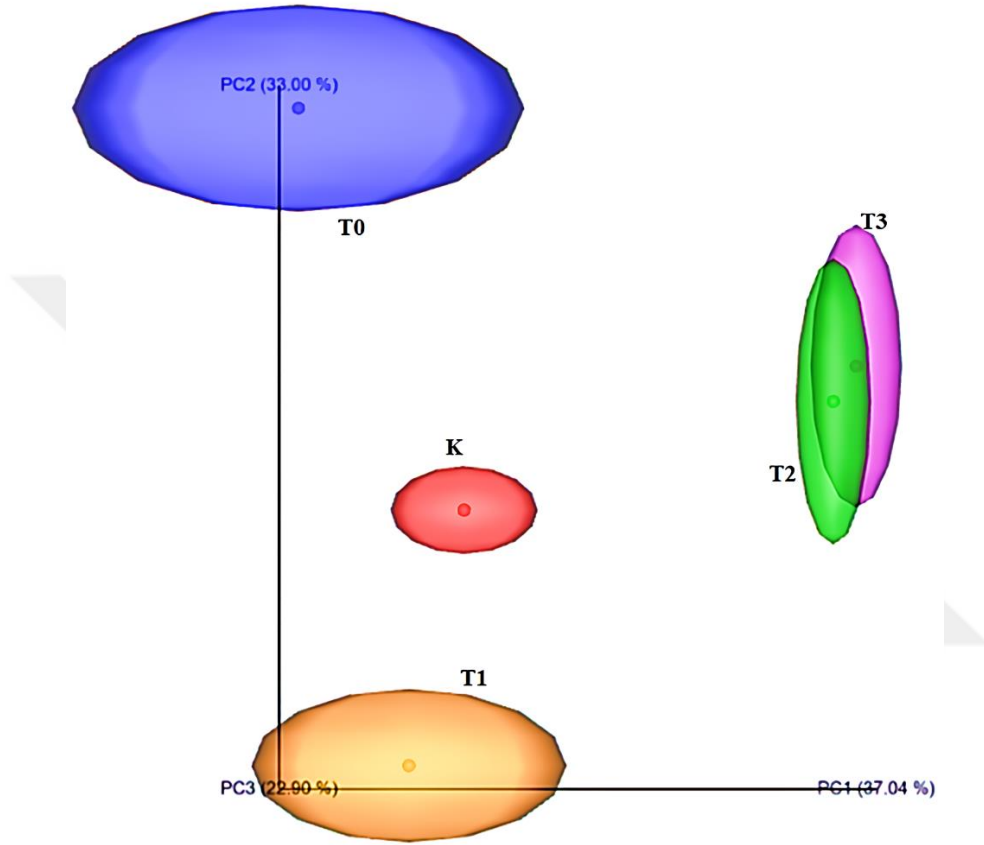
Şekil 3.4.Yüzde (%) sekans benzerliğinde havuzlanmış beş numunenin nadirlik eğrileri, vermikompostlama mikrobiyotasının tür zenginliğini göstermektedir. X eksenı sıralama derinliğini/örneklerini temsil eder. Y eksenı, farklı özelliklerin sayısı olan tür zenginliği ölçülerini gösterir.

Çizgilerin sağa paralel olması analiz için okuma sayısının yeterli miktarda olduğunu göstermiştir. Beta çeşitlilik analizinde, deneysel örnekler arasındaki mikrobiyal topluluk içindeki çeşitlilik hesaplanmıştır. Şekil 3.5'e göre, solucan sindirimine uğramış T_0 , T_1 'de mikrobiyal biyokütle, solucansız uygulama K_K 'ya kıyasla artmaktadır. T_0 , en yüksek mikrobiyal çeşitliliğe sahip örnektir. T_2 ve T_3 numuneleri ayrıca benzer çeşitlilikte mikrobiyal topluluklar içerir. Solucanlar, diğer örneklerle kıyasla karıştırılmamış T_0 örneğinin mikrobiyal çeşitliliğinde önemli bir rol oynamıştır. Biyo-kül içeriğindeki artış, T_2 ve T_3 numunelerindeki mikrobiyal toplulukların sayısını olumsuz yönde etkilemiştir (Belyaeva ve ark., 2009).

Solucan gübresinden sonra, T_0 (%0.0), T_1 (%3.5), T_2 (%7.0) ve T_3 (%10.0) profillerinin bakteri toplulukları Şekil 3.5'te gösterildiği gibi kümelenmiştir. T_2 ve T_3 numunelerinin bakteri toplulukları benzer bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Sonuçlar, BK oranlarının vermikompost uygulamasındaki dağılım modellerinde bakteri topluluklarını etkileyebileceğini ortaya koymuştur.



(a)



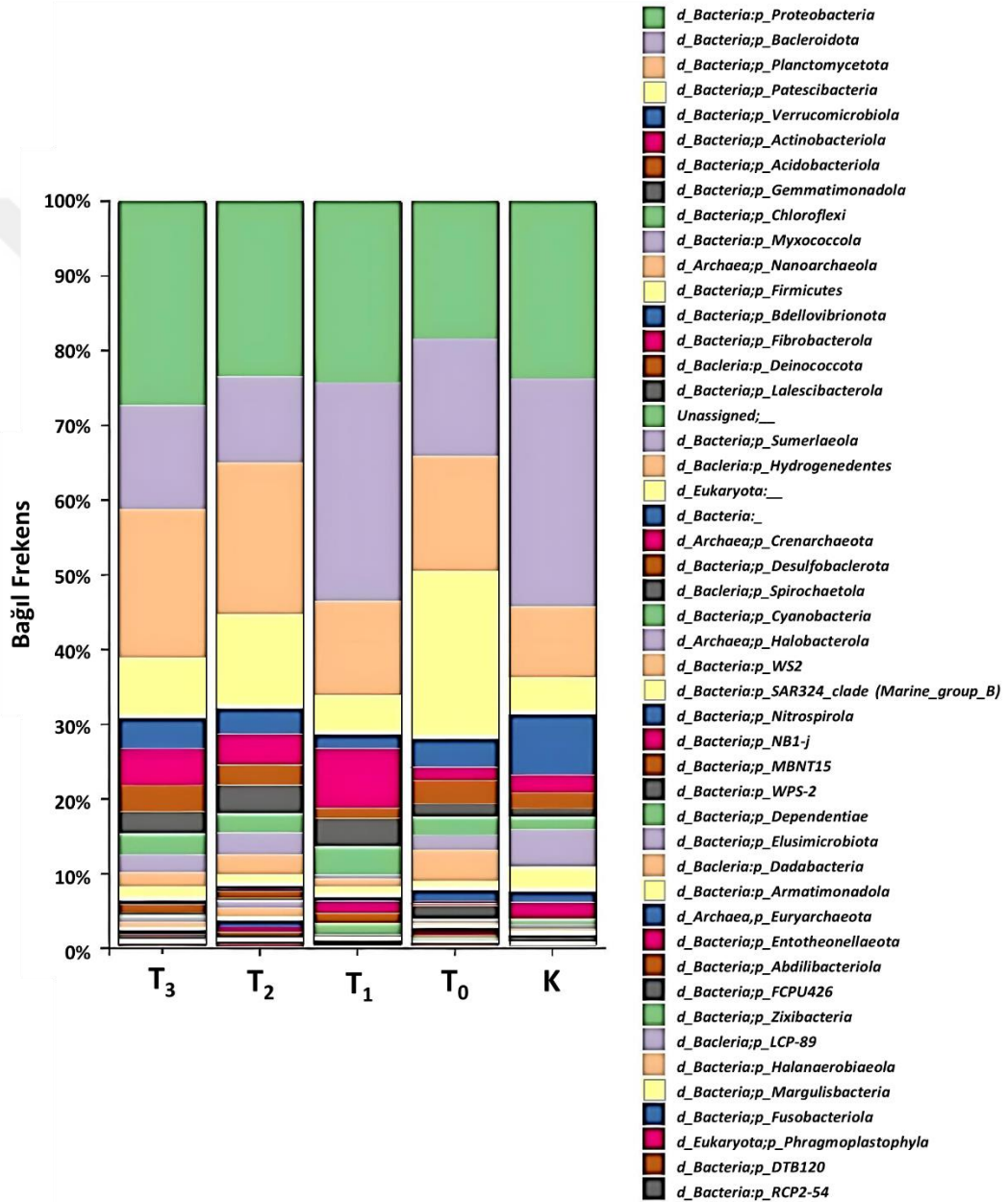
(b)

Şekil 3.5. a) Filogenetik ağaç, b) 16S metagenomik stratejileri için tedavi (K_K, T₀, T₁, T₂ ve T₃) grupları için beta çeşitliliği tahminlerinin (Bray-Curtis) bakteriyel PCoA grafikleri.

3.5.1. Vermikompost numunelerinin bakteri toplulukları

Mikroorganizmalar, vermicompostlama sürecinde gerçekleşen besin dönüşümünün ana gücü olarak kabul edilmektedir. Solucan gübresi oluşumu sırasında solucanların aktivitesi ile mikroorganizmaların etkileyebileceği yüzey alanı artmakta ve buna bağlı olarak bitki besin elementi değeri yüksek gübrelerin üretimini kolaylaştırmaktadır (Ramos ve ark., 2022; Khan ve ark., 2022). Vermikompost bakterilerinin çeşitliliği ve fonksiyonel potansiyeli hakkında bilgi vermek için yapılan analiz sonucunda filum

seviyesindeki bakteri topluluk yapısı Şekil 3.6'da gösterilmiştir. *Proteobakteriler* (K_K -%23.77, T_0 -%18.44, T_1 -%24.34, T_2 -%23.5, T_3 -%27.4) *Bakteriyoidler* (K_K -%30.5, T_0 -%15.7, T_1 -%29, T_2 -%11.49, T_3 -%13.94) ve *Planctomycetota* (K_K -%9.44, T_0 -%15.32, T_1 -%12.5, T_2 -%20.3, T_3 -%19.85) tüm örneklerde baskın bakteri filumu olarak belirlenmiştir (Turp ve ark., 2023). Bu bulgular, solucan gübresi uygulamalarına ilişkin önceki çalışmalarla uyumludur (Aira ve ark., 2016; Wang ve ark., 2021).



Şekil 3.6. Yığılmış çubuk grafik, örnek türlerdeki vermikompost mikroplarının filum seviyesindeki taksonomik bolluğunu gösterir. X eksen, K_K , T_0 , T_1 , T_2 ve T_3 olan her tür için numunelerin biyolojik kopyalarını temsil eder. Y eksen takson bolluğunu gösterir.

Bazı araştırmalar, solucanların, yutulan gıdanın bileşimini yansıtan bir mikrobiyal bakteri alt popölasyonu oluşturabileceğini öne sürmektedir (Dominguez ve ark., 2019; Perez-Losada ve ark., 2022; Wang ve ark., 2017). Solucan sindiriminden geçmeyen K örneğinde baskın bakteri filumu *Bakteriyoidler*, *Proteobakteriler* ve *Planctomycetota* T₀, T₁, T₂ ve T₃ örnekleri ile benzerlik göstermektedir. K_K ve T₁ ile T₀, T₂ ve T₃ karşılaştırıldığında, *Bakteriyoidlerin* oranında azalma eğilimi bulunmuştur. Hayvan bağırsaklarında ve derilerinde yaygın olarak görülen *Bakteriyoidlerin* büyük bir kısmını, ham madde olarak kullanılan sığır gübresi ile temsil edilmektedir (Tang ve ark., 2023).

Bacterioidata familyası içinde bulunan fırsatçı bir patojen olarak adlandırılan *Flavobacterium* cinsinin tüm örnekler arasında K_K ve T₁ örneklerinde öne çıkması K_K için kompostlama esnasında ki yüksek ısıya ve biyokülün alkali pH değerinde direnç gösteremediği şeklinde yorumlanırken T₁ için eklenen BK oranının vermikompostlama esnasında P dönüşümünü sağlamak için ideal olduğu sonucuna varılabilir (Tablo 3.4).

T₀, T₁, T₂ ve T₃ uygulamalarında önemli pozitif korelasyonu bulunan *Bakteriyoid* filyumuna ait baskın cins olarak belirlenen *Chyophagales* nispi bolluklarında *Chryseolinea* bakterilerinin organik materyalleri mikro besinlere dönüştüren önemli remineralizörler olarak nitrojen fiksasyonunda kayda değer roller oynadığı bildirilmiştir (Tao ve ark., 2019).

Takım seviyesinde bakteri bolluğu örnekler üzerinde daha ayrıntılı bilgiler elde etmemizi sağlarken vermikompostlama aşamasında aktif rol oynayan bakterilerin enzim aktiviteleri ile anlamlı tahmin verileri bulunmuştur. Bu tahmin verileri sayesinde tam olarak hangi bakterinin fosfor çözünürlüğünü sağladığı takım seviyesinde bakteri bolluğu ile kanıtlanmıştır.

Tablo 3.4. KK, T0, T1, T2, T3 örneklerinin 16S metagenomik analizi sonucu bakteri popülasyonunun takım seviyesinde yoğunluğu.

Bakteri	K _K	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃
<i>Cytophagales</i>	12,6553227	8,442360646	6,140980796	5,968560668	8,090037887
<i>Flavobacteriales</i>	8,672570475	3,429336906	11,58701846	2,306779106	3,231557834
<i>Pseudomonadales</i>	7,144844214	1,771228697	2,879381037	1,997707549	3,162221727
<i>Polyangiales</i>	4,59245178	1,181811416	0,400750539	2,140985754	2,010747097
<i>Sphingobacteriales</i>	4,37453635	1,1267396	1,408418078	0,143278205	0,178292846
<i>Chitinophagales</i>	3,864521513	1,405075538	2,038499849	1,664074013	0,928608573
<i>Pirellulales</i>	3,097181009	1,583686835	1,864764067	3,94424431	4,605898522
<i>Burkholderiales</i>	2,888538576	1,40358711	0,71115847	3,979040445	3,508902261
<i>Opitutales</i>	2,74944362	0,848403662	1,248581158	0,42164729	0,619072382
<i>Verrucomicrobiales</i>	2,359977745	0,110143633	0,127406241	0,247666612	0,21048461
<i>Fibrobacterales</i>	2,158290059	0,261963236	1,533507841	0,319305715	0,237723795
<i>Phycisphaerales</i>	2,098015579	8,458733348	4,792791123	4,132552808	3,246415571
<i>Candidatus_Kaiserbacteria</i>	1,894009644	4,551611223	1,779054414	1,813492713	1,562538692
<i>Rhizobiales</i>	1,877781899	1,659596636	3,634552572	1,770509252	2,312854419
<i>Chthoniobacterales</i>	1,706231454	0,345315175	0,034747157	0,006140495	0,096575292
<i>R7C24</i>	1,65522997	0,186053435	0,023164771	0,020468315	0,039620632
<i>Planctomycetales</i>	1,543954006	1,400610255	3,599805416	2,433682659	3,206794938
<i>Xanthomonadales</i>	1,393267804	0,404852274	0,37526929	0,403225806	0,203055741
<i>Bacillales</i>	1,337629822	0,436109251	0,597651092	0,614049451	0,671074462
<i>Sphingomonadales</i>	1,279673591	1,41549453	0,817716417	0,280415916	0,240200084

Gram-negatif bakteri toplulukları, *Proteobacteria* gibi filumların çoğunu içerir. Solucanların mikroorganizmalar üzerindeki etkileri dikkate alındığında gram negatif bakterilerin solucan bağırsağında gram pozitif bakterilere göre nispeten daha yüksek oranlarda hayatta kalabileceğini gösterilmiştir (Aira ve ark., 2016; Tao ve ark., 2019).

Beş vermikompost numuneden (K_K, T₀, T₁, T₂ ve T₃) en yaygın 20 filumun nispi bollukları karşılaştırılarak hiyerarşik bir ısı haritası Tablo 3.4'te oluşturulmuştur. Filum düzeyinde, numuneler arasında 47 bakteri filumu tahmin edilmiş ve numunelerin çoğu farklı oranlarda olmakla birlikte, benzer filumları paylaşmışlardır.

Bu sonuçlar, artan miktarda BK eklemesinin vermikompostta filum seviyesinde bakterilerin varlığına önemli bir etkide bulunmadığı fakat, oransal çokluklarını etkilediğini göstermektedir.

Tablo 3.5. Örneklerden (K_K, T₀, T₁, T₂ ve T₃) alınan ilk 20 sınıflandırılmış bakteri cinsinin ısı haritası, maviden kırmızıya renk gradyanı artan tür bolluğunu gösterir. Şekil içindeki sayılar, türlerin bolluk seviyesini % olarak ifade eder.

Bakteri	K _K (%)	T ₀ (%)	T ₁ (%)	T ₂ (%)	T ₃ (%)
<i>Bacteroidota</i>	30.58	15.78	29.30	11.50	13.94
<i>Planctomycetota</i>	9.45	15.33	12.58	20.31	19.85
<i>Patescibacteria</i>	4.94	22.52	5.26	12.61	8.08
<i>Proteobacteria</i>	23.78	18.44	24.34	23.55	27.41
<i>Verrucomicrobiota</i>	8.10	3.79	1.87	3.46	4.09
<i>Gemmatimonadota</i>	1.13	1.82	3.71	3.82	2.91
<i>Actinobacteriota</i>	2.33	1.71	8.01	4.10	4.89
<i>Nanoarchaeota</i>	0.03	4.16	1.02	2.64	1.87
<i>Fibrobacterota</i>	2.16	0.26	1.53	0.32	0.24
<i>Latescibacterota</i>	-	1.75	0.05	0.20	0.27
<i>Myxococcota</i>	4.97	1.98	0.55	2.97	2.41
<i>Crenarchaeota</i>	-	0.44	0.02	0.62	0.22
<i>Acidobacteriota</i>	2.21	3.11	1.35	2.67	3.55
<i>Deinococcota</i>	0.10	0.28	1.38	0.92	1.07
<i>Hydrogenedentes</i>	0.26	0.37	0.06	1.18	0.77
<i>Chloroflexi</i>	1.64	2.42	3.81	2.55	2.76
<i>Halobacterota</i>	0.26	0.21	0.10	0.06	0.19
<i>Spirochaetota</i>	0.36	0.15	0.38	0.31	0.24
<i>Firmicutes</i>	3.3105	1.2473	1.4015	1.5638	1.9464
<i>Bdellovibrionota</i>	1.4373	1.5168	0.6069	0.3561	0.2749

Birçok çalışma, sığır gübresi ekleyerek topraktaki organik madde içeriğini artırmanın topraktaki biyolojik aktiviteyi artırabileceğini kanıtlamıştır. Uygulanan atık organik maddeler asidik ve alkali fosfataz aktivitelerinde artışa neden olmaktadır (Bhunja ve ark., 2023). Diğer yandan organik madde ayrıştırıcı dehidrojenaz aktivitesi, toprak kalitesinin ve mikrobiyal aktivitenin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (Turp ve ark., 2023). Bu çalışmada gözlemlenen sonuçlar, BK eklenmiş vermikompost

örneklerinde bakteri çeşitliliğine bağlı olarak enzim metaboizmalarının da güçlü olabileceğinin indirek göstergesi olabileceğini göstermektedir.

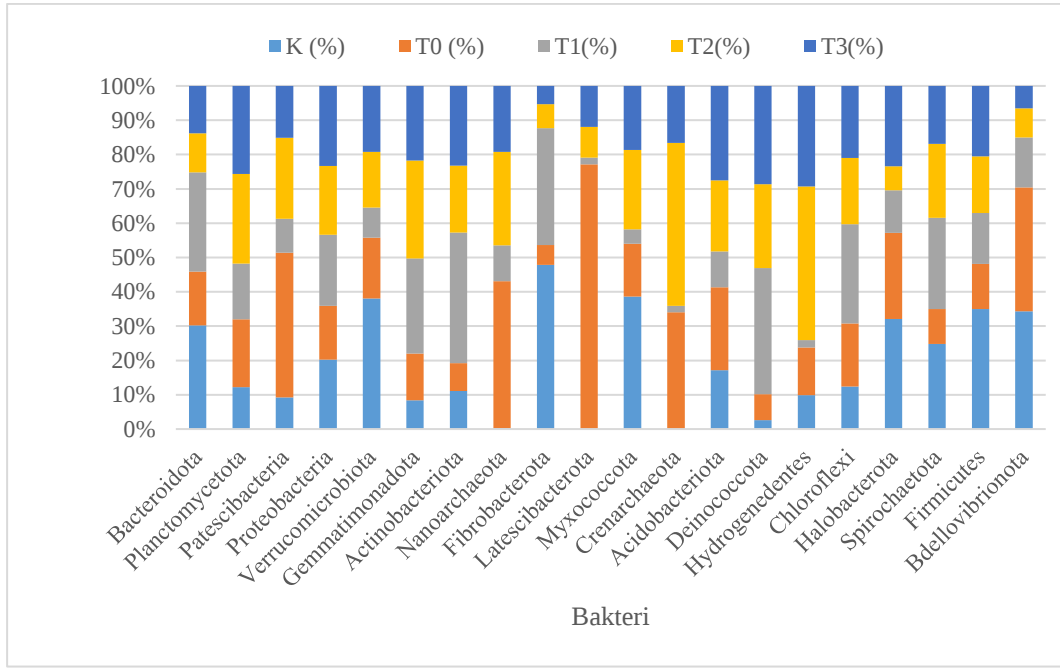
3.5.2. Bakteri toplulukları ve enzim aktiviteleri arasındaki ilişki

Solucanların bağırsaklarında makromolekülleri sindirmeye ve parçalamaya yardımcı olan sindirim enzimleri bulunur. Bu enzimler, organik maddenin çözünmesinde önemli bir rol oynar ve mikrobiyal aktivite için bir gösterge olarak kabul edilir (Karwal ve ark., 2020). Çok sayıda mikroorganizma tarafından üretilen fosfataz enzimleri BK'da bulunan P'nin kullanılabilirliğini arttırarak P'yi çözünür duruma getirmektedir. Hidrolitik enzimlerin üretimi uçucu külden P salınımını arttırır (Busato ve ark., 2012). Vermikompostlama sürecinde, fosfataz enzim aktivitesi apatit formundaki P'yi çözer ve bitkinin yararlanabileceği hale getirir. Fosfatazlar, substrat aralıklarına (karışık veya spesifik) ve optimum pH'a (asit veya alkalın) göre farklı sınıflara ayrılabilir. *Proteobacteria*, *Bacteroidota*, *Firmicutes* ve *Actinobacteriota* filumları ile *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium* ve *Burkholderia* cinsi, fosfor çözücü bakteriler olarak tanımlanmıştır (Wu ve ark., 2023; Khan ve ark., 2022) ve bu filumların tamamı, tüm vermikompost örneklerinde gözlemlenmiştir (Şekil 3.6).

Vermikompost örneklerinde metagenomik analizler sonucu tespit edilen bu bakteri sınıflarının popülasyonu Şekil 3.7'da gösterilmiştir. *Proteobakterilerin* oransal çokluğu, BK miktarın artmasıyla vermikompost örneklerinde T₀, T₁, T₂ ve T₃ için sırasıyla %18.44, %24.34, %23.55 ve %27.41'e yükselmiştir. *Proteobakteriler*, karbon, nitrojen ve kükürt döngüsü ile ilişkili çeşitli bakterileri içerir. Enzim aktivitesindeki varyasyon, mevcut organik madde substratından farklı bakteri popülasyonuna bağlı olabilir (Hou ve ark., 2023). Araştırmalar, nitrojen döngüsünde hayati rol oynayan bazı mikroorganizmaların *Proteabacteria* olduğunu göstermiştir. Bu bilgiler ışığında *Proteabacteria* tüm örneklerde üreaz enzim aktivitesinde artışa neden olmuştur (Bao ve ark., 2022; Xu ve ark., 2023). *Bacteriodata* ve *Planctomycetota* diğer baskın filumlardır. *Bacteriodata* bolluğu T₀, T₁, T₂ ve T₃ için sırasıyla %17.78, %29.30, %11.50 ve %13.94 idi. *Planctomycetota* filumu T₀, T₁, T₂ ve T₃ için %15.33, %12.58, %20.31 ve %19.85'tir.

Önceki çalışmalar, *Planctomycetota*'nın farklı bir habitata iyi adapte olduğunu, mikrobiyal topluluklarda yüksek bollukları koruduğunu ve doğal ortamlarda nitrojen metabolizmasına katılma konusunda olağanüstü bir yeteneğe sahip olduğunu bildirmiştir (Gao ve ark., 2022; Suarez ve ark., 2022). T₁ numunesindeki *Bacteriodata*

filumunun yüksek konsantrasyonu aynı zamanda alkali fosfataz enzim aktivitesi değeri üzerinde de etkisini göstermiştir. *Bacteroidata* filumuna ait *Flavobacterium* baskın popülasyonu, T₁ (%11.50)'de organik fosforu harekete geçirerek T₀, T₂ ve T₃ e oranla daha yüksek aktivite sergilemiştir. *Flavobacterium* baskın türü için T₀, T₂ ve T₃ değerleri sırasıyla %3.43, %2.31 ve %3.23 idi (Tablo 3.4). Bu değerler dikkate alındığında solucan sindiriminden geçirilmenin *Flavobacterium* üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmasına rağmen, sığır gübresine BK ilavesi fosfataz enzim aktivitesi üzerinde olumlu etki göstermiştir (Lidbury ve ark., 2022).



Şekil 3.7. K(kompostlanmış) ve BK eklenmiş vermikompostlama örnekleri T₀ (%0.0), T₁ (%3.5), T₂ (%7.0), T₃ (%10.0)'den alınan vermikompost örneklerinin filum seviyesinde bakteri bolluğu.

Tüm numunelerde üreaz enzim aktivitesi en yüksek aktivite değerlerini göstermiştir (Tablo 3.3). Üreaz enzimi karmaşık organik azotlu maddenin daha basit formlara dönüştürülmesinde önemli bir rol oynar. Bitki gelişiminde olmazsa olmaz organik içeriklerden biri olan organik azot formlarının üre formuna dönüşümünde etkili olan hidrolitik enzimler üreten *Cytophagales* popülasyonu T₀, T₁, T₂ ve T₃ oranları sırasıyla %8.44, %6.14, %5.97, %8.09 dur (Tablo 3.4). Üreaz enzimi organik maddeden gelen bileşenler üzerine etkilidir fakat, bakteriyel yan ürünler pH üzerinde etkili olarak BK'den gelen minerallerin çözünmesi üzerine etkide bulunabilir.

Üreaz enzim aktivitesi (Tablo 3.3) T₀>T₁>T₂>T₃ şeklinde sıralanmıştır. Örneklerdeki üreaz enzim aktivitesinin kademeli olarak azalması, bakteri popülasyonu içinde paralel

bir düşüş göstermiştir. Bunun nedeni azot çözen bakterilerin çeşitliliği ve bakteri bolluğu ile BK oranının artıp besin değerinin düşmesi ve artan pH değerlerinin bakteriyel bolluk ve enzimatik aktiviteye etkisi ile ilgili olabileceğini düşündürmektedir.

Sığır gübresi ve BK eklenerek vermikompostlanan örnekler üzerinde yapılan enzim aktivitesi ve metagenomik analiz sonuçları takım seviyesi bakteri popülasyonu (Tablo 3.4) verileri kullanılarak, çoklu lineer regresyon uygulaması ile elde edilen sonuçlar Tablo 3.5 'te sergilenmiştir. Tablodaki değerler incelendiğinde takım seviyesinde bakteri topluluğunun enzimleri uyardığını göstermektedir. Sonuçlardan anlaşıldığı üzere vermikompostlama prosesi esnasında solucanların mikrobiyal kolonizasyon ve ayrışma için varolan yüzey alanını artıran organik maddenin parçalanması ve homojenleştirilmesi yoluyla dolaylı olarak mikrobiyal popülasyonları uyarmasından kaynaklanmaktadır (da Silva ve ark., 2023; Aira ve ark., 2007).

Tablo 3.6. Enzim aktiviteleri ve metagenomik analiz sonuçlarının Çoklu Lineer Regresyonu (MLR)

Enzim aktivitesi	Uygulama	Bakteri Populasyonu (%)	R ²
Acid phosphatase ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ hr}^{-1}$), Alkaline phosphatase ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ hr}^{-1}$), Arylsulphatase ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ hr}^{-1}$), β-glucosidase ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ hr}^{-1}$), Urease ($\mu\text{g NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)	T ₀	<i>Candidatus_Kaiserbacteria</i>	4.55%
		<i>Candidatus_Magasanikbacteria</i>	4.24%
		<i>Woeseearchaeales</i>	4.16%
		<i>Saccharimonadales</i>	4.04%
		<i>Flavobacteriales</i>	3.43%
	T ₁	<i>Rhizobiales</i>	3.63%
		<i>Planctomycetales</i>	3.60%
		<i>Pseudomonadales</i>	2.88%
		<i>Alphaproteobacteria</i>	2.67%
		<i>Actinomarinales</i>	2.41%
	T ₂	<i>Saccharimonadales</i>	5.11%
		<i>Flavobacteriales</i>	2.31%
		<i>Actinomarinales</i>	2.01%
		<i>Planctomycetales</i>	2.43%
		<i>Burkholderiales</i>	3.98%
	T ₃	<i>Burkholderiales</i>	3.51%
		<i>Flavobacteriales</i>	3.23%
		<i>Pseudomonadales</i>	3.16%
		<i>Rhizobiales</i>	2.31%
		<i>Saccharimonadales</i>	2.91%

Bu çalışmada solucan gübrelerindeki enzim aktivitesinin bakteri popülasyonu ile ilişkili olduğu ve Tablo 3.5 'teki bakteri filumunun asit fosfataz, alkalik fosfataz,

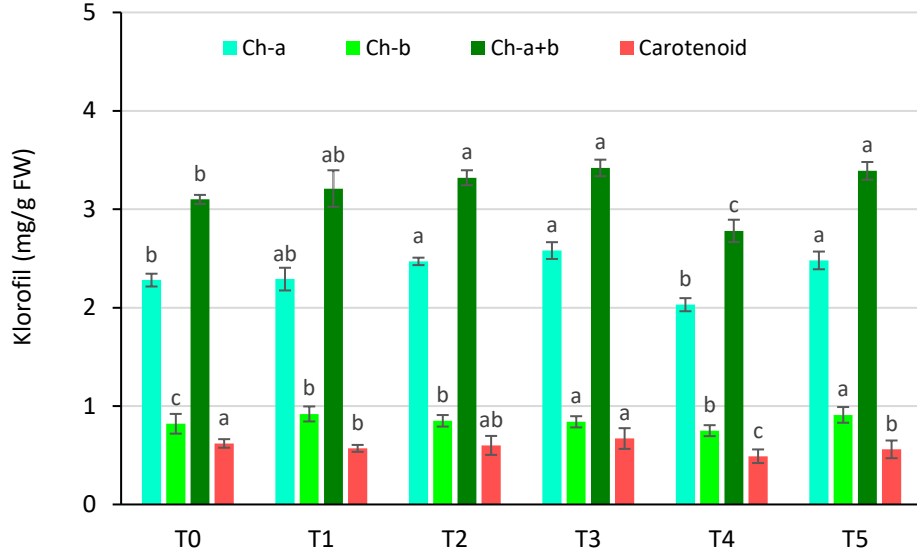
arilsülfataz, β -glukosidaz ve üreaz aktivitelerini önemli ölçüde desteklediği görülmüştür. Enzim aktiviteleri ve mikrobiyal topluluk arasındaki pozitif korelasyon gösteren baskın bakterilerle, vermikompost uygulaması ile amaçlanan fosfor geri kazanımının artırması sağlanabilir.

3.6. Vermikompost Uygulamasının Besin Biyoyararlanımı Üzerindeki Etkisi

3.6.1. Saksı Deneylerinde Vermikompostun fotosentetik pigmentler üzerindeki etkisi

Organik zenginleştirme ve mikrobiyal çeşitliliğin birleşimi yoluyla toprak kalitesinin korunması, sürdürülebilir tarım ve mahsul verimliliğinin anahtarıdır. Biyokütle santrallerinden kaynaklanan BK ve diğer organik atık süreçlerinden kaynaklanan biyo-atıkların, katma değer eklenmiş ürün olarak tarımsal üretim süreçlerine kazandırılması döngüsel atık yönetimi konusunda önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu amaçla, BK ile nutrient içeriği zenginleştirilmiş vermikompost örneklerinin potansiyel gübreleme etkinliği, fasulye bitkisi üzerinde yapılan, bitki yetiştirmeye uygunluk parametreleri; klorofil içeriği, kök nodülasyonu ve leghemoglobin analizleri ile yaprak nutrient analizleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Fasulye bitkisi, topraktan fosfor alımı ve özellikle fosfor gübresine karşı hassas olduğu ve bu bitkide fosfor en sınırlayıcı besin maddesi olarak rapor edildiğinden, model ürün olarak seçilmiştir.

Bitki yaprak klorofilleri, fotosentez için en önemli pigmentlerdir ve klorofil miktarı bitkinin sağlıklı mı yoksa stresli mi olduğunu sınıflandırmada temel gösterge olarak kabul edilir (Özdemir ve ark., 2021). Klorofil içeriği sonuçları, artan BK solucan gübresi ve fotosentetik pigment içeriği arasında doğrusal bir bağ olduğunu ortaya koymuştur. Solucan kompostunda BK tarafından sağlanan besin konsantrasyonu arttığında, Chl-a, Chl-b ve bunların toplam içerikleri, BK içermeyen solucan gübresi (T_0) uygulamasına kıyasla fasulye yaprağında artış göstermiştir ($p<0.01$). BK eklenen örneklerin tamamında, istatistiki olarak benzer şekilde, tespit edilen daha yüksek klorofil seviyeleri, rizosfer besin havuzunda gerçekleşen nutrient transformasyonları ve nutrientlerin bitki alımı için uygun hale gelmesine bağlanmıştır (Sharma ve ark, 2019). Toplam klorofil içeriğinin aksine, karotenoid içeriği, artan BK dozlarıyla kademeli olarak azalış göstermiştir (Şekil 3.8). Bu sonuçlar, BK'nın besin zenginleştirmesine ve vermikompostlama uygulamasıyla iyileştirilmiş bitkisel biyoyararlanımı ile açıklanabilir (Lukashe ve ark, 2019).



Şekil 3.8. Vermikompost uygulamaları T₀, T₁, T₂ ve T₃ için klorofil-a, klorofil-b, toplam klorofil ve karotenoid içeriğindeki (taze ağırlık (FW) bazında) değişiklikler (Turp ve ark., 2021).

Yapraklardaki klorofil içeriğindeki bir değişikliğin, bitkilerin besin elementi mevcudiyeti de dahil olmak üzere çevresel stres faktörlerine verdiği refleksin fotosentetik etkinliğinin bir göstergesi olarak kabul edilebileceği belirtilmektedir (Sharma ve ark., 2019). Yaprakların pigment içeriğinin değişimi, fizyolojik stres faktörlerine bağlı olarak ya klorofil biyosentezini azaltmakta ya da klorofilin bozulmasına neden olmaktadır (Taibi ve ark., 2016). Solucan gübresi uygulamasına fotosentetik pigmentte kayda değer artışlar gösteren sonuçlar, nohut (*Cicer arietinum* L.) yaprakları, özellikle su eksikliği stres koşullarında (Hosseinzadeh ve ark., 2018) ve fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) bitkilerinde (Valdez-Perez ve ark., 2011) yapılan önceki sonuçlar ile uyum içindedir. Ayrıca önceki çalışmalarda karotenoidlerin klorofil moleküllerini oksidatif streslere karşı koruduğu açıklanmıştır (Abd-Alla ve ark., 2014; Taibi ve ark., 2016). Klorofil içeriği genellikle bitki yapraklarındaki N içeriğinin bir göstergesidir ve bitkilerin fotosentetik verimliliğini izlemek için uygun bir araç olarak kullanılır (Özdemir ve ark., 2021). Fasulye bitkilerinin klorofil içeriği, T₀ ile karşılaştırıldığında BK eklenen vermikompost işlemlerinde benzer bulunmuştur. Bu nedenle, yukarıdaki bilgiler ışığında, bitkilere yeterli inorganik N'nin BK vermikompostu ve simbiyotik azot fiksasyonu tarafından sağlandığı sonucuna varılabilir. Baklagil bitkileri ihtiyaç duydukları azotu hem mineral formda topraktan ve hem de simbiyotik azot bağlama yoluyla atmosferden karşılayabilmektedir. Klorofil değerleri sonuçları, organik madde ve nutrientlerce zenginleştirilmiş

vermikompost uygulamalarının, fasulye bitkisinin ihtiyaç duyduğu azot ve diğer nutrientlerin talebinde destek olabildiğini göstermiştir.

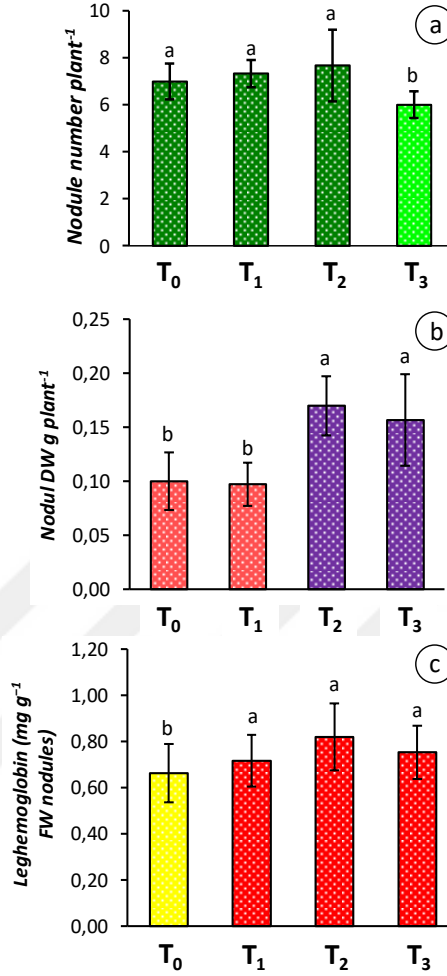
3.6.2. Vermikompostun nodülasyon üzerine etkisi

Toprağa BK vermikompost eklenmesi topraktaki hem organik madde (OM) hem de temel bitki besinlerini zenginleştirmiş ve solucan gübresindeki artan BK dozları bitki başına nodül sayısı ($p > 0.05$), nodül kuru ağırlığı ($p > 0.01$) ve nodül leghemoglobin içeriği ($p > 0.05$)'ne istatistiki olarak önemli etkide bulunmuştur. Nodül sayısındaki varyasyon nispeten küçük bulunmuş, ancak tüm BK vermikompost uygulamaları, %3.5 NPK eşdeğeri BK içeren (T_1 hariç) uygulaması hariç, bitki başına nodülün kuru ağırlığı bakımından, BK içermeyen T_0 uygulamasına kıyasla daha yüksek sonuçlar vermiştir (Şekil 3.9 a-b).

Bitki başına nodül kuru ağırlığındaki maksimum artış (%4,5'e kadar) T_2 'nin BK solucan gübresi uygulamasına yanıtı olarak gözlenmiş ve aynı istatistiki grup T_3 'te kontrole kıyasla istatistiksel olarak benzer bulunmuştur (T_0 : BK içermeyen solucan gübresi). Bitki başına nodül kuru ağırlığındaki artış, BK'sız kontrol ile karşılaştırıldığında %17'ye kadar çıkmıştır (Şekil 3.9b). Benzer şekilde nodüllerin leghemoglobin içeriği, BK'sız solucan gübresi ile karşılaştırıldığında sırasıyla T_2 , T_3 ve T_1 'in BK solucan gübresi uygulamalarıyla artış göstermiştir (Şekil 3.9c). T_2 , T_3 ve T_1 için leghemoglobin içeriğinde sırasıyla %12, %11 ve %10'luk bir artış gözlenmiştir.

Tüm solucan gübresi muamelelerinin benzer miktarda OM ve sıgır gübresi bazlı bitki besin maddeleri içermesine rağmen, solucan gübresindeki BK miktarının artırılmasının solucan gübresindeki temel bitki besin maddelerini (özellikle P ve K) ve iz elementleri zenginleştirdiği kaydedilmiştir. Bu nedenle, vermikomposttaki ilave BK besin maddeleri ve OM'nin bir arada ortak etkileri, nodül kuru ağırlığını ve leghemoglobin içeriğini artırarak, nodül oluşumu ve nitrojen fiksasyon aktivitesi üzerinde sinerjistik etkiler sağlamıştır. BK eklenen numunelerde daha yüksek nodül sayısı ve nodül kuru ağırlığı, atmosferik nitrojen fiksasyonu için kök nodüller içinde kurulduktan sonra nitrojeni sabitleyebilen *Rhizobia*'nın artan aktivitesini desteklemektedir (Chekanai ve ark., 2018). Solucan gübresi hazırlama ve bitki yetiştirme dönemlerinde toprakta kolayca ayrışabilen OM ile birlikte BK'dan inorganik besinlerin salınması bitki besinlerini eklediğinden, büyümeyi teşvik eden bileşikler (örn. hümik asitler), baklagil bitkisi ile diazotropik *Rhizobium* bakterileri arasındaki simbiyotik ilişkinin uyarılmasına neden olmuştur. Bu nedenle, artan nodül

oluşumu ve nodüllerdeki leghemoglobin konsantrasyonu, düşük OM toprağına besin açısından zengin BK vermikompost uygulamasına bağlanabilir (Paliya ve ark., 2019).



Şekil 3.9. T₀, T₁, T₂ ve T₃ numuneleri için nodül sayısı (a), nodül kuru ağırlığı (DW) (b) ve fasulye nodülünün (*Phaseolus vulgaris* L.) değişen düzeylerde leghemoglobin içeriği (Turp ve ark., 2021).

Simbiyotik nitrojen fiksasyonu ve fotosentez, karbon ve enerji metabolizması dahil olmak üzere baklagil bitkilerinin büyüme ve gelişmesinde yer alan en önemli iki metabolik süreç tarafından hassas bir şekilde düzenlenir (Schulze, 2004). Bu nedenle, BK solucan gübresi işlemlerinde artan nodülasyon ve leghemoglobin içeriği, fotosentetik hızı kontrol eden klorofil pigmentlerinin artan miktarlarına (Boudjabi ve ark., 2019) ve solucan gübresinin sinerjistik etkileri veya biyolojik nitrojen fiksasyonu yoluyla bitki büyümesi için yeterli nitrojen takviyesine bağlanabilir.

Bu bağlamda, yeterli besin takviyesi ve artan fotosentez, klorofil ve leghemoglobin aktivitesi arasındaki birbirini destekleyen pozitif ilişkinin başlıca nedenleri olabilir. BK'nın vermikompostu zenginleştirdiğini ve BK vermikompost gübrelemesi ile

fasulye yetiştiriciliğinde gözlemlenen faydaların, ürüne yeterli besin takviyesi yapılmasından kaynaklandığını belirtmekte fayda vardır (Özdemir ve ark., 2021). Nodül kuru ağırlığı ve leghemoglobin konsantrasyonu sırasıyla %10, %25 ve %10'a kadar yükselmiştir. Bu nedenle, besin açısından zengin tarımsal-endüstriyel kaynak uygulamasının, baklagil yetiştirme sistemlerinde tarımsal uygulamaların sürdürülmesi, bitki besin elementi döngüsünün kapatılması ve çevre dostu atık yönetimi için faydalı olabileceği sonucuna varılmıştır.

3.6.3. Bitki büyüme parametreleri ve verimleri

Yaprak analizi yoluyla, bitki besin elementlerinin yeterlilik aralıklarının doğru bir şekilde değerlendirilmesi yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu çalışmada, BK vermikompost nutrientlerinden fasulye bitkilerinin yararlanma etkinliği yaprak analizlerine dayalı makro ve mikro besin elementlerinin analizi ve yeterlilik aralıkları ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

BK elementlerince zenginleştirilmiş vermikompost uygulamalarına tepki olarak, fasulye bitkilerinin yaprak dokusunda azot, fosfor, kükürt, demir ve çinko seviyelerinde önemli farklılıklar gözlenmiştir (Tablo 3.6). BK eklenen solucan gübresi, T₀ kontrol uygulamasına kıyasla N, Fe ve Zn konsantrasyonlarını önemli ölçüde artmıştır ($p < 0.01$). Tersine, vermikompostta BK dozu arttıkça yaprak dokusu kükürt (S) içeriği azalmıştır. Analiz sonuçları, yaprak dokusunda N, P, Fe ve Mn'nin belirtilen yeterlilik aralığının altında gözlemlenmiştir (Mesquita ve ark., 2018). Daha önceki çalışmalarda bahsedildiği gibi, bu çalışmada kullanılan BK önemli bir makro ve mikro bitki besin kaynağı özelliği göstermiştir ve vermikompost uygulaması biyo-atık karışımındaki çözünürlüğünü artırmıştır, ancak bu elementler fasulye bitkileri için yetersiz olabilir. Artan BK dozu, vermikompost karışımındaki N içeriğini azaltmıştır (Tablo 3.1). İlave olarak yapılan saksı çalışması sonucu yeterlilik seviyesi bakımından tam arazi koşullarını sağlayamamış olabilir.

Tablo 3.7. Artan BK solucan gübresi oranları ve karşılık gelen yeterlilik aralıkları ile gübrelenmiş fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) yaprağının element bileşimi (değerler, üç tekerrür ortalaması $\pm$ standart sapma'sıdır).

Parametre	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	Yeterlilik seviyesi
N (g kg ⁻¹)	30.7 $\pm$ 1.3	36.5 $\pm$ 0.7	44.9 $\pm$ 0.6	34.7 $\pm$ 1.1	58.63–62.32
P (g kg ⁻¹)	3.2 $\pm$ 0.1	3.7 $\pm$ 0.1	4.2 $\pm$ 0.3	3.9 $\pm$ 0.2	4.93–5.52
K (g kg ⁻¹)	26.8 $\pm$ 1.0	25.4 $\pm$ 0.9	25.6 $\pm$ 0.9	25.8 $\pm$ 0.9	24.80–28.05
Ca (g kg ⁻¹)	13.8 $\pm$ 0.2	13.4 $\pm$ 0.2	13.1 $\pm$ 0.1	13.0 $\pm$ 0.1	13.07–14.35
Mg (g kg ⁻¹)	4.4 $\pm$ 0.1	4.3 $\pm$ 0.1	4.8 $\pm$ 0.1	4.7 $\pm$ 0.1	4.67–5.31
S (g kg ⁻¹)	2.2 $\pm$ 0.2	2.1 $\pm$ 0.1	1.9 $\pm$ 0.1	1.5 $\pm$ 0.1	1.85–2.14
Fe (mg kg ⁻¹)	104.4 $\pm$ 1.1	114.7 $\pm$ 2.3	126.8 $\pm$ 2.6	138.3 $\pm$ 3.0	197.78–253.22
Mn (mg kg ⁻¹)	36.8 $\pm$ 1.0	41.5 $\pm$ 0.9	43.2 $\pm$ 0.9	48.7 $\pm$ 1.3	57.02–73.73
Cu (mg kg ⁻¹)	8.7 $\pm$ 0.1	8.4 $\pm$ 0.1	8.8 $\pm$ 0.1	8.2 $\pm$ 0.1	7.45–9.10
Zn (mg kg ⁻¹)	54.0 $\pm$ 1.4	48.7 $\pm$ 1.5	49.8 $\pm$ 1.4	48.4 $\pm$ 1.5	47.08–56.03

Vermikompost uygulamalarında artan BK dozları karışımlarda, T₁'e kıyasla bitkiler tarafından alınabilir olan Olsen-P içeriğini azaltmıştır. Bu nedenle, yapraktaki düşük P içeriğinin nedeni, yüksek dozda BA uygulamaları ile fasulye bitkilerinin yetersiz P alımı veya deneyde kullanılan spesifik bitkinin genotip özellikleri ile ilgili olabilir. Öte yandan, yüksek BK uygulamaları altındaki bitkilerde buna göre en yüksek N, P ve Fe içerikleri ölçülmüştür. Ek olarak, ölçülen tüm yaprak besin elementi konsantrasyonları, fasulye bitkisi için önceki literatürde bildirilen aralık değerler içinde yer almıştır (Smith ve ark., 2019). Vermikompost nutrientlerinden faydalanmanın indikatörü olarak daha net sonuçların gözlenebilmesi için arazi denemelerinin yapılması ve bitki büyüme performanslarının gözlenmesi daha doğru sonuçlar verebilir. Aşağıdaki bölümde aynı fasulye çeşitinin arazi çalışmalarında elde edilen sonuçları değerlendirilmiştir.

3.7. Arazi Deneylerinde Vermikompost Uygulamasının Besin Biyoyararlanımı Üzerindeki Etkisi

3.7.1. Vermikompostun fotosentetik pigmentler üzerindeki etkisi

Artan dünya nüfusu ile birlikte ortaya çıkan gıda üretimi ve atık yönetimi iki önemli çözülmesi gereken sorundur. Biyokütle kaynaklı atıkların gıda üretimi için geri dönüşümlü olarak kullanımı, bu çifte zorluğa kısmen çözüm oluşturmak için bir fırsat olarak görülmektedir. Biyokütle yakma santralleri tarafından üretilen biyokütle yakma artıklarının yönetimi, biyokütlenin enerji amaçlı kullanımının yönünde çözülmesi gereken önemli bir darboğazdır. Bu çalışmanın amacı, tarımsal kullanım alanı olmayan bitki besin elementlerince zengin, fakat pH'sı yüksek biyokütle yanma külünün vermikompostlama yoluyla potansiyel olarak tehlikeli atıklar grubundan çıkarıp bitkisel üretimde kullanımı için bir yönetim tekniğini araştırmaktır.

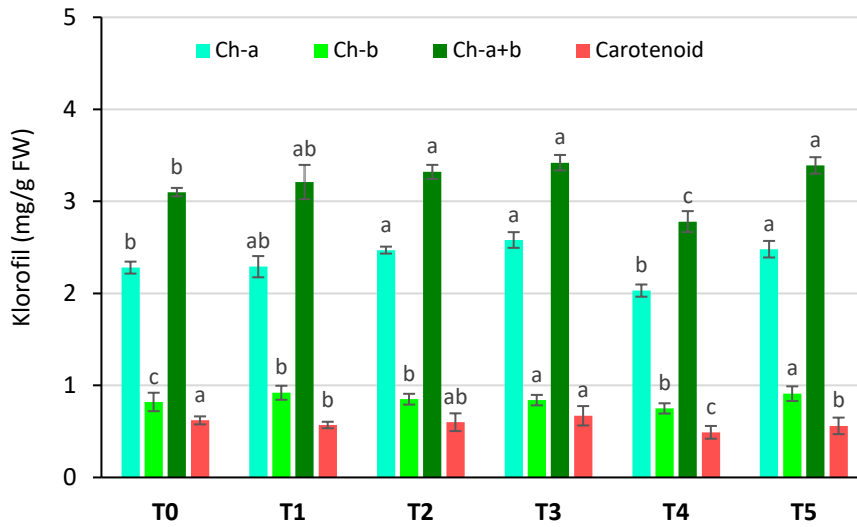
Vermikompostlama, solucanların organik kalıntıları bitki büyümesi için bir substrat olarak kullanılabilecek komposta dönüştürdüğü bir süreçtir. Vermikompostlamada hem mikrobiyal süreçler ve ona eşlik eden solucan sindirim süreçleri bir arada biyokütle yakma külünü organik bazlı gübre haline getirebilir. Bu çalışmada üretilen vermikompostların arazi koşullarında fasulye bitkisine etkisi Bitlis ve Sakarya koşullarında iki farklı tarla denemesinde araştırılmıştır (Şekil 3.10). Saksı çalışmasında olduğu gibi, fasulye bitkisinde bitki büyümesi ve gelişine etkisi seçilmiş parametreler; klorofil analizleri, azot fiksasyonu parametreleri ile biyokütle ve kuru tohum verimleri incelenmiştir.



Şekil 3.10. Fasulye bitkisinde arazi çalışması, (a) Bitlis, (b) Sakarya deneme alanı

Klorofil analizleri, BK eklenmiş vermikompost numunelerinin istatistiki olarak benzer değerler gösterdiğini, en yüksek toplam klorofil (3.49 mg g^{-1}) ve karotenoidlerin (0.92 mg g^{-1}) T_3 uygulamasının fasulye yapraklarında kaydedilmiş ve solucan gübresi eklenmemiş T_4 numunelerine kıyasla önemli ölçüde ($p < 0.05$) yüksek olduğunu

göstermiştir (Şekil 3.11). Gübresiz kontrolde (T₄) biraz daha düşük klorofil ve karotenoid içeriği değeri, bitkilerin yetersiz besin elementi durumunu göstermiştir. BK içeren uygulamaların klorofil değerleri gübre verilmiş uygulama (T₅) istatistiki olarak benzer bulunmuştur. Klorofil ve karotenoid içeriğindeki artış, vermikompost uygulaması ve bakteri aşılması ile sağlanan doku bitki besin elementi içerikleri ile ilişkilendirilmiştir. Bu açıdan bakıldığında, klorofil içeriği seviyesinin yüksek olmasının fotosentez hızını artıracığı ve buna bağlı olarak da tohum verimine pozitif katkı sağlayacağı düşünülmüştür (Mathobo ve ark, 2017).

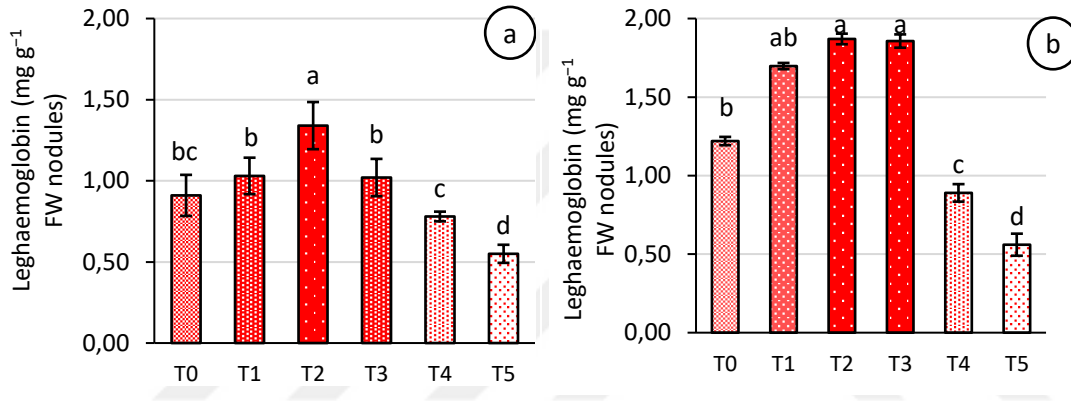


Şekil 3.11. Vermikompost uygulamaları T₀ (%0.0BK), T₁ (%3.5BK), T₂ (%7.0BK) ve T₃ (%10.0 BK) ile gübreleme yapılmış T₄, ve kimyasal gübre ile gübrelenmiş T₅ uygulamaları için klorofil a, klorofil b, toplam klorofil ve karotenoid içeriğindeki (taze ağırlık (FW) bazında) değişiklikler (Özdemir ve Turp., 2023).

Birçok çalışmada, artan klorofil içeriğinin, sulama ve ılıman çevre koşulları altında yaprakların yaşlanmasını geciktirdiğini ve bunun, mevcut çalışma bulgularını doğrulayarak, yaprak dokusunda yeterli fosfor varlığına neden olduğunu bildirmiştir (Karakurt ve ark., 2009; Klaedtke ve ark., 2012). Fasulye yapraklarındaki klorofil içeriği ile fotosentetik oranı arasındaki pozitif korelasyon, kompost uygulaması ve rhizobia aşılması durumunda da rapor edilmiştir (Keles ve ark., 2019; Gülmezoğlu ve Ezgi, 2020). *Rhizobium* bakterileri ile aşılama özellikle bitkilerin azot dengesini sağlamakta ve toprağa organik madde uygulaması bunu desteklemektedir. Bu çalışmada da tohumlar ekimden önce fasulyeye özgü *Rhizobium* bakterileri ile aşılanmıştır. Vermikompost kökenli nutrientler biyolojik azot fiksasyonundan gelen azot klorofil oranını bir arada pozitif etkilemiş olabilir.

3.7.2. Vermikompostun nodülasyon üzerine etkisi

Fasulye bitkisine özgü *Rhizobium* spp. içeren aşı ile tohumların aşılama, gübre verilmiş uygulama ve gübrenmemiş kontrol ile karşılaştırıldığında her iki bölgede de leghemoglobin içeriği açısından önemli farklılıklar göstermiştir (Şekil 3.12). Kuru sıcak yaz mevsimi iklimine sahip Bitlis bölgesinde, en yüksek leghemoglobin içeriği, vermikompostta (1.34 mg g^{-1} nodül dokusu) 7.0 NPK içeren T₂ uygulamasında gözlenmiştir, bunu T₁ ve T₃ (1.13 ve 1.12 mg g^{-1} nodül dokusu) takip etmiştir (Şekil 3.10). Daha ılıman iklim koşullarında yer alan Sakarya bölgesinde, leghemoglobin içeriği, nodül dokusunda 1.70 mg g^{-1} (T₁) ila 1.87 mg g^{-1} (T₂) arasında değişirken, vermikompost uygulamalarında önemli ölçüde daha yüksek bulunmuştur.



Şekil 3.12. Fasulyedeki nodülün leghemoglobin içeriği (a) sıcak kuru-yaz, (b) ılıman bölge) (Özdemir ve Turp, 2023).

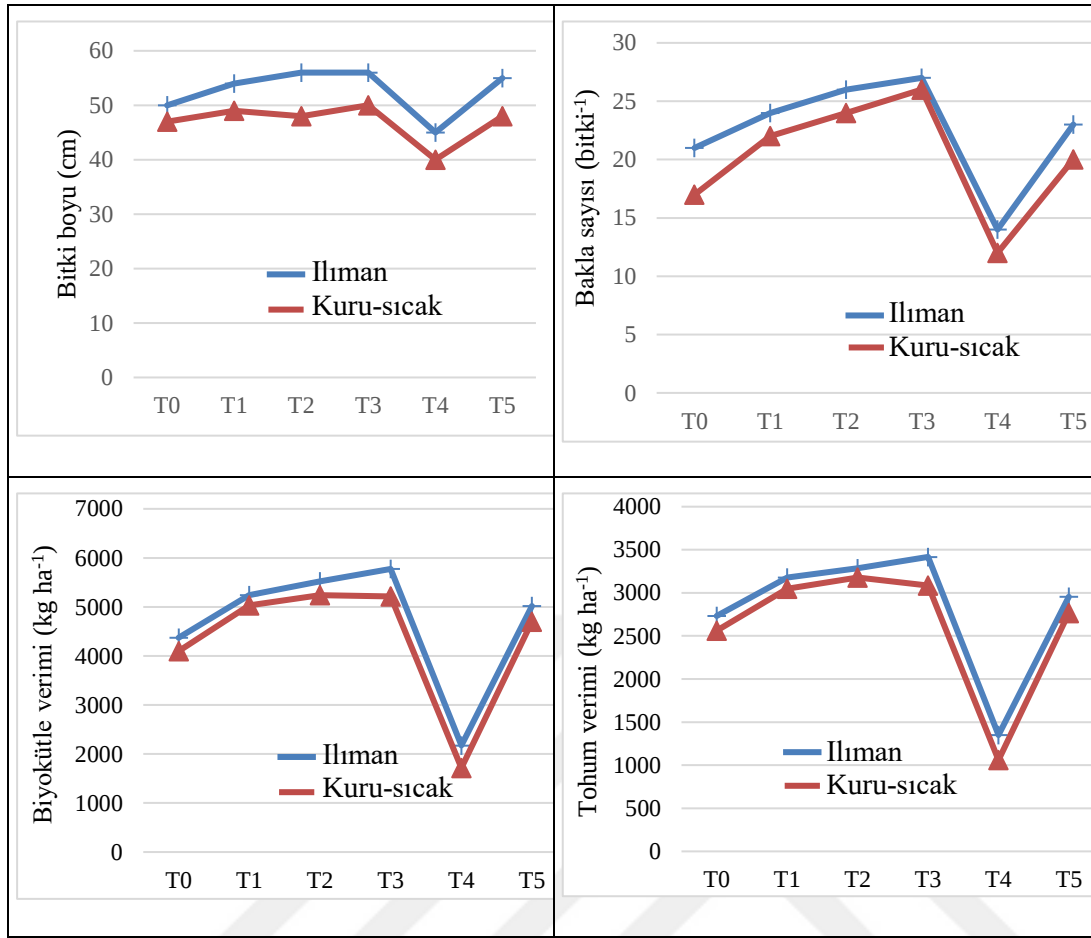
Leghemoglobin içeriği, biyolojik nitrojen fiksasyon prosesi üzerinde doğrudan etkisi olan önemli bir parametredir. Azot fiksasyonu etkinliğinin indirek indikatörü olarak kullanılır, yüksek etkinlik yüksek azot fiksasyonunu gösterir. Vermikompost uygulamalarında, leghemoglobin içeriğindeki iyileşme, bitki kökünün dengeli besin alımına bağlı olabilir ve bu, solucan gübresinden besin maddelerinin yavaş salımına bağlanmıştır. Stres koşullarında ve topraktan mineral azot alımında leghemoglobin etkinliği geriler. Tespit edilen sonuçlar, *Rhizobium* aşılama, yetiştirme uygulamaları ve tarımsal-çevresel iklim koşullarının belirlenen fasulye çeşidine bağlı olarak hem nodülasyon hem de azot fiksasyonu parametrelerinde önemli artışlar gösterdiğini kanıtlamıştır. Bu sonuçlar ya doğrudan aşılama suşları tarafından ya da dolaylı olarak ilişkili mikrobiyal topluluğun ve bunların büyümeyi teşvik eden maddelerinin aktivitesinin uyarılmasıyla elde edilmiştir (Gülmezoğlu ve Ezgi, 2020; Ndlovu ve ark., 2017). Nitrojen sabitleyici enzimin sinerjistik etkisi ve *Rhizobium*'un

alkalin fosfataz aktivitesi, daha yüksek BK dozlarında maksimum leghemoglobin içeriğini açıklamıştır. Alkalın fosfataz, en aktif fosforilasyon enzimi olarak kabul edilmiştir ve geniş bir optimum pH aralığında bitkinin fosfor talebini karşılayabilmektedir (Turan ve ark., 2019). P azot fiksasyonu ve leghemoglobin aktivitesinde önemli role sahiptir ve vermikompost uygulamalarının yüksek leghemoglobin seviyesinde etkisinin olabileceğini göstermiştir. İlave olarak, toprağa vermikompost uygulaması, toprağın fiziksel yapısı, su tutma kapasitesi ve pH gibi fiziko-kimyasal özelliklerini iyileştirerek bitkinin stres koşullarından etkilenmesinin önüne geçmiş olabilir.

3.7.3. Bitki büyüme parametreleri ve verimleri

Vermikompost uygulamalarının bitkinin fotosentetik parametreleri ile azot fiksasyonu parametrelerini pozitif etkileyerek, bitkisel verimlilik parametrelerine yansımaları beklenmektedir. Bu hipotezi destekler şekilde, uygulamaların, bitki boyu ve bitki başına bakla sayısı üzerindeki etkileri, her iki tarımsal iklim koşulunda da (Bitlis ve Sakarya) istatistiksel olarak önemli ($p < 0.01$) bulunmuştur. Hem bitki boyu hem de bitkide bakla sayıları ılıman bölgede sıcak iklim koşullarına göre önemli ölçüde daha yüksek bulunmuştur. Bitki boyu ve bakla sayısı sırasıyla ($40.34\text{--}55.74\text{ cm bitki}^{-1}$) ve ($13.56\text{--}27.07\text{ bakla bitki}^{-1}$) aralığında $T_3 > T_2 > T_1 \geq T_5 > T_0 > T_4$ eğilimi göstererek değişmiştir (Şekil 3.13).

T_1 , T_2 , T_3 uygulamalarında daha yüksek bir bitki boyu ve bitki başına artan bakla sayısının oluşumu, bakteri aşılamanın olumlu rolü ile birlikte kül besin elementlerinin ve bitki köklerinin etkili biyoyararlanımına bağlanmıştır (Bilal ve ark., 2021). BK oranlarındaki değişikliğin, rizosferdeki besinlerin çözünürlüğünü, erişilebilirliğini ve simbiyotik nitrojen fiksasyonunu (Turp ve ark., 2021) artırmada büyük rol oynadığı bilinmektedir. Bitlis bölgesinde, sıcak-kurak yaz iklim koşullarında bakla sayısındaki azalma, hem çiçeklerin yaşlanmasından hem de sıcak ve kuraklık stresinden dolayı çiçeklerin dökülmesinden kaynaklanmış olabilir. Önceki çalışmalar, fotosentezin azalmasına neden olan kuraklık stresinin çiçek gelişimini ve bakla dolmasını önleyerek çiçeklerin yaşlanmasına yol açtığını belirtmektedir (Mathobo ve ark., 2017). Yüksek bitki boyu ve yüksek bitkide bakla sayısı biyokütle verimi ve tohum verimini pozitif eklemektedir.



Şekil 3.13. Kuru fasulyenin (*Phaseolus vulgaris* L.) sıcak kuru-yaz (Bitlis) ve ılıman (Sakarya) iklim koşullarında biyokütle külü ile zenginleştirilmiş solucan gübresine tepkisi.

Verim parametreleri ile birlikte biyokütle ve tohum verimi bulguları, biyokütle yanma külü ve bakteri aşılamanın bitki boyunun ve bitkideki bakla sayılarının verime katkıda bulunan karakterleri üzerindeki olumlu katkısı nedeniyle, BK vermikompostun her iki parametreyi ve bu sonuçları önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Biyokütle ve tohum verimi sonuçları, T₁, T₂ ve T₃'ün biyokütle külü içeren işlemlerinin, araştırılan tarımsal-çevresel koşullardan bağımsız olarak diğer işlemlerle karşılaştırıldığında biyokütle veriminde ve tohum veriminde önemli ($p < 0.05$) bir artış sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, en yüksek dozda biyokütle külü vermikompostla yetişmiş bitkiler (T₃), ılıman bölgede 3417 kg tohum verimi ha⁻¹ ile en yüksek kuru biyokütleyi (5774 kg kuru biyokütle ha⁻¹) sağlamıştır. Hem biyokütle verimi ve hem de tohum verimi büyükten küçüğe doğru T₃ > T₂ > T₁ ≥ T₅ > T₀ > T₄ şeklinde sıralanmıştır. En yüksek biyokütle ve tohum veriminin gelişimi, vermikompost (Namli ve ark., 2017) tarafından sağlanan besinlerin etkin kullanımına, ekimden önce tohuma aşıl原因an nitrojen sabitleyici rhizobia ve fosfat çözen bakterilerle simbiyotik ilişkisine

bağlanmıştır. Pek çok araştırmacı, yararlı mikroorganizmaların, stres koşullarında (Ndlovu ve ark., 2017; Maldonado ve ark., 2020) veya baklagil bitkilerindeki simbiyotik ilişkilerde (Xiao ve ark., 2017) rizosfer bölgesindeki mevcut olmayan besin maddelerini çözündürerek toprak besin maddelerinin alımını teşvik ettiğini bildirmiştir. Kompost mikroorganizmalarının ayrışma işlemi sırasında uçucu bileşikler ve çeşitli organik asitler salgılama yeteneği, P biyoyararlılığı için önemli bir rol oynamaktadır. P çözündürücü cinse ait çeşitli bakterilerin, bitki büyümesine daha fazla yardımcı olarak büyümeyi teşvik edici maddeler ürettiği (Turan ve ark., 2019) buna bağlı olarak BK eklenmiş vermikompost uygulamalarında bitki boyu ve bakla oluşumunun kısa sürede gerçekleşmesi açıklamıştır.

Sıcak kuru iklim koşullarında (Bitlis) toprak fosfor içeriğinin (Tablo 2.1) daha yüksek olmasına rağmen biyokütle ve tohum verimindeki düşüş, stres koşulları nedeniyle bitki boyunda ve bitki başına düşen bakla sayısında azalma ile açıklanmıştır (Turp ve Ozdemir, 2023). İlave olarak, çiçeklenme ve bakla doldurma aşamaları sırasında sıcak ve kuraklık stresi nedeniyle azalan bakla sayıları ve klorofil içeriğinden kaynaklanmış olabilir (Sozen ve ark., 2018). Bitki yetiştirme dönemi süresince Bitlis deneme alanındaki kümülatif yağış miktarı (68.3 mm) ve çimlenmeyi sağlamak için yapılan ilave 30 mm'lik sulama suyu, Sakarya deneme alanında gerçekleşen kümülatif yağış miktarından (231 mm) daha düşük olmuştur.



4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Biyokütle yakma tesislerinden ortaya çıkan atık kül, bitki besin elementleri açısından oldukça zengindir. Biyokütle yakma santrallerinde üretilen BK'nın kullanım yüzdesi bazı avrupa ülkelerinde %50-100 (Birleşik Krallık - Danimarka) arasında değişmektedir. İnorganik madde olarak BK'nın çeşitli uygulamalarda kullanımı göz önüne alındığında, farklı alanlarda çok sayıda uygulaması olmasına rağmen, tarımda kullanımı diğer sektörler göre sınırlı olduğu ve çok fazla miktarda kullanılmadığı anlaşılmaktadır. Ülkemizde, biyokütle külünün bitkilere gübre olarak doğrudan uygulanması yüksek pH değeri ve biyo-elverişsiz besin içeriği nedeniyle göz ardı edilmektedir. Birkaç çalışma, BK'nın bitki kompozisyonu üzerinde herhangi bir fitotoksisiteye neden olmadan toprak sağlığını ve mahsul verimini iyileştiren bir özelliğe sahip olduğunu bildirmiştir. Fosfatların külden çözünürlüğü ve bitkiler tarafından alınabilirliği, biyokütlenin ısı işlemi sırasında oluşan mineral P formlarına bağlıdır. Yüksek sıcaklık sırasında kül içinde bulunan mineraller farklı sıcaklık derecelerinde eriyerek birbiri ile bileşik oluşturmaktadır. Fosfor en çok kalsiyum, ardından demir, alüminyum ve mangan ile bileşikler oluşturmaktadır. Kül içinde bulunan bitki besin elementleri çoğunlukla asit uygulama prosesleri ile çözündürülmekte, diğer minerallerden ayrılarak saflaştırılmakta ve gübre halinde geri kazanımı yapılmaktadır. Bu süreçlerin verimlilikleri kül kompozisyonuna bağlı olarak değişmekte ve maksimum % 80 seviyesinde geri kazanım yapılabilmektedir. Biyokütle külünde bulunan mineraller çoğunlukla mutlak gerekli bitki besin elementleridir ve çevreye dost biyolojik yöntemlerle işlenerek tekrar zararsız bir şekilde bitki üretim süreçlerine döndürülebilir ve % 100 geri dönüşüm sağlanabilir. Biyolojik ve biyoteknik yöntemlerden öne çıkan prosesler kompostlama ve vermikompostlama süreçleridir. Kompostlama süreçlerinin BK'nın bitki besin elementi kompozisyonu ve biyoyararlı olma durumunu inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır.

BK'dan besin maddelerinin sürdürülebilir bir şekilde geri kazanımı sağlanarak, tekrar bitkisel üretimde tarımsal amaçlı kullanımı potansiyel bir sürdürülebilir gübre kaynağı olabilir. BK'nın besin elementlerini organik bazlı gübre kaynaklarına dönüştürmek

için vermicompostlama yöntemi güvenilir ve düşük teknolojisi ile bir alternatiftir. Aynı zamanda, solucan gübresi hali hazırda ticari değeri olan kıymetli bir üründür ve gübre içeriği BK ile zenginleştirildiğinde daha kabul edilebilir bir son ürün haline dönüştürülebilir. Çalışmada kullanılan biyokütle yanma külünün P içeriği 131 mg g^{-1} , %30 P_2O_5 eşdeğerliğinde fosfor gübresi sağlama potansiyelindedir. Türkiye’de 2021 yılında kullanılan kimyasal gübre çeşitlerinden fosforlu gübre olarak adlandırılan P_2O_5 gübre miktarı 3.726.914 ton (% 17 P_2O_5) olarak kaydedilmiştir. Etken madde P_2O_5 bazında fosfor miktarı 633.575 ton/yıl olarak hesaplanmıştır. Sakarya biyokütle yakma tesisinden ortaya çıkan atık kül miktarı yaklaşık yılda 6.300 ton’dur. Türkiye genelinde ise yılda 23.000 ton olarak tahmin edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan biyokütle yakma tesisi külünün P içeriği % 13.1 olarak bulunmuştur. Bu bilgiler doğrultusunda 23.000 ton biyokütle yakma tesisi külünden 6.900 ton/yıl ($13.1 \text{ P} \times 2.2916 = \%30 \text{ P}_2\text{O}_5$) fosfor elde etmek mümkündür. Bu varsayımlara göre ülke genelinde tüketilen fosforlu gübrenin %1.08’lik bir kısmı sadece biyokütle yakma tesislerinde ortaya çıkan külden karşılanabilir. Yakma tesislerinin sayısı ve kurulu gücü artmaya devam etmektedir, doğal olarak ortaya çıkacak kül miktarı da artış gösterecektir.

Ahır gübrelere gibi biyo atıklar da kayda değer miktarda fosfor ve diğer bitki besin elementlerini içermektedir. Vermikompost uygulamaları T_1 %79, T_2 %76 ve T_3 %69 oranında bağlı fosforu bitkiler için hemen ve yavaş alınabilir formlara çözüldürmüştür. Etkin bir biyo atık ve biyo kütle santrali külü yönetimi ile oranlar daha da artırılabilir. Solucan gübresi sektörü büyüyen ve atık sektöründe kabul görebilecek bir alandır. Atıkların pratik olarak kullanılabilen solucan gübresi haline getirilmesi ile döngüsel atık yönetimi sistemi kurulabilir ve gübre ihtiyacının iç kaynaklardan karşılanma oranı yükseltilebilir.

Sığır gübresinin, farklı oranlarda biyokütle külü eklenerek vermicompostlanması sonucunda, solucan aktivitesi ve mikrobiyal topluluk, enzim aktiviteleri üzerinde güçlü bir etki sergilemiştir. BK karışımlarının kompost sıcaklıklarını artırdığını ve vermicompostlama aşamasında başarılı bir solucan aktivitesine izin verdiğini göstermiştir. Tüm solucan gübresi örneklerinde indikatör enzim aktiviteleri sırası ile; üreaz > β -glukosidaz > alkalın fosfataz > arilsülfataz > asit fosfataz şeklindedir. Bu, enzim aktiviteleri ile bakteri popülasyonu arasında yüksek korelasyonlar tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, vermicompostlama aşamalarında biyokütle kül içeriği yüksek olan hidroksiapatit formundaki fosforu çözen enzim aktiviteleri ile

mikrobiyal çeşitlilik arasındaki ilişkiye ışık tutmaktadır. *Flavobacteriales* (Bakteri Popülasyonu (%); T₀-3.43%, T₂-2.31%, T₃-3.23%), *Burkholderiales* (Bakteri Popülasyonu(%)); T₂-3.98%, T₃-3.51%), *Saccharimonadales* (Bakteri Popülasyon(%); T₀-4.04%, T₂-5.11%, T₃-2.91% ve *Pseudomonadales* (Bakteri Popülasyonu(%)); T₁-2.88%, T₃-3.16% bakteri çeşitleri enzim aktiviteleri üzerinde olumlu etki göstermiştir. T₀, T₁, T₂ ve T₃ için enzim aktiviteleri ile bakteri popülasyonu arasındaki çoklu lineer regresyonlardan elde edilen determinasyon katsayısı (R^2) değerleri sırasıyla 0.90, 0.65, 0.73 ve 0.90 olarak belirlenmiştir. Solucan kompostu uygulaması ile biyokül içeren numunelerde birbirini destekleyen deneyler sonucunda apatit formdaki fosforun biyokütle içerisinde çözünmesinde solucan sindirimi ve mikroorganizmaların önemi ortaya konulmuştur. Ayrıca mikroorganizmaların varlığı, P'nin çözündüğünü ve dinamiklerinin devam ettiğini kanıtlamıştır.

Bu araştırma yapılan deneylere ek olarak, vermikompost ile besin açısından zenginleştirilmiş biyo-gübre, fasulye bitkileri için temel bitki besin kaynağı olarak denenmiştir. BK içeren vermikompost besin maddeleri ile kök nodülü oluşumu arasındaki etkileşimler ve bunların nitrojen fiksasyon verimliliği hakkındaki bilgi boşluğu doldurulmuştur. Nodülasyon ve leghemoglobin konsantrasyonları, %7.0 NPK'nin (T₂) esas olarak nodülün kuru kütlelerini ve leghemoglobin içeriğini desteklediği görülmüştür. Ayrıca, mevcut sonuçlar solucan gübresi üretme işleminde BK'nın aşırı alkaliliğine karşı duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Solucanların hayatta kalmalarını, aktivitelerini ve besinlerin çözünürlüğünü en üst düzeye çıkarmalarına izin veren yeterli fiziko-kimyasal ve kimyasal özellikler sağlamak için vermikompostlama uygulamasından önce yüksek pH değerinin ayarlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

4.1. Öneriler

Biyokütle santrali atığı olan biyokütle külünün tarımsal amaçlı kullanımına yönelik kül minerallerinin vermikompostlama yolu ile çözündürme ve nihai solucan kompostu ürünü bitki besin elementlerince zenginleştirmek amacı ile yapılan bu çalışmada, test edilen hipotezler doğrulanmıştır. Ancak, çözündürme ve geri kazanım süreçlerini kesin bir şekilde anlamak için bu alanda gelecekte yapılacak ilave bazı araştırmalara hala ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, mevcut çalışmada yer almayan ancak gelecekteki çalışmada dahil edilebilecek öneriler aşağıda özetlenmiştir.

(1) Bitki besin elementlerinin dönüştürülmesinden sorumlu bakteri topluluğunun yanında mayalar ve mantar cinsleri de dahil olmak üzere tüm mikrobiyal topluluğu değerlendirmek, çözünme üzerine reaksiyon mekanizması hakkında iyi bir fikir verebilir ve solucanların BK ile zenginleştirilmiş biyo-atık substratları yutması sırasında olumsuz alkalinite ve elektriksel iletkenlik açısından sistemin davranışını tanımlamaya yardımcı olabilir.

(2) Vermikompostlama işleminde bakteri gruplarının asitleştirilmesiyle zenginleştirilmesinden sonra fosforun olası çözünmesi hakkında veri sağlanarak, özellikle asit çözünmesine ihtiyaç duyan daha az kararsız Fe- ve Al-’ ye bağlı P fraksiyonlarının dönüşümü ve bitki biyoyararlanım etkisini anlamak için uygulanabilir.

(3) Bu çalışmada incelenen besin elementi açısından zengin solucan kompostu örneklerine besin elementi kullanım etkinliği ve ürün tepkisi ile ilgili konular incelenerek, mahsul tepkisi, ekonomik uygulanabilirlik ve son kullanıcının kabul kriterleri açısından ürün hakkında bilgi sağlanabilir.

(4) Çalışma ayrıca, özellikle yüksek nem içeren ve kompostlama işlemi sırasında asidik koşullar oluşturan gıda atıkları gibi diğer saflara da genişletilmelidir. Çeşitli bakış açılarından farklı bulgular sağlanabilir (örneğin, yığın neminin optimizasyonu ve BK kompostlama sürecinde başlıca bitki besin maddeleri olan P, Ca, Mg ve Fe'ye ne olduğunun belirlenmesi).

(5) Fosforun biyokütle yakma tesisi külü gibi büyük ölçekli atık akımlarından geri kazanılması, fosfat kayası gibi yenilenemeyen fosfat kaynaklarına olan bağımlılığın hafifletilmesine önemli bir katkı sağlayabilir. Vermikompostun biyokütle külü nütrientlerince zenginleştirilmesi, kompostlanmış ürünün nihai ticari değerini de arttırmasına katkıda bulunabilir.

KAYNAKLAR

- Abd-Alla, M. H., El-Enany, A. W. E., Nafady, N. A., Khalaf, D. M., Morsy, F. M. (2014). Synergistic interaction of *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* and arbuscular mycorrhizal fungi as a plant growth promoting biofertilizers for faba bean (*Vicia faba* L.) in alkaline soil. *Microbiological Research*, 169(1), 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.07.007>
- Aira, M., Olcina, J., Pérez-Losada, M., Domínguez, J. (2016). Characterization of the bacterial communities of casts from *Eisenia andrei* fed with different substrates. *Applied Soil Ecology*, 98, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.002>
- Aira, M., Domínguez, J. (2009). Microbial and nutrient stabilization of two animal manures after the transit through the gut of the earthworm *Eisenia fetida* (Savigny, 1826). *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), 1234-1238. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.073>
- Aira, M., Monroy, F., Domínguez, J. (2007). Earthworms strongly modify microbial biomass and activity triggering enzymatic activities during vermicomposting independently of the application rates of pig slurry. *Science of the total Environment*, 385(1-3), 252-261. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.06.031>
- Alidadi, H., Hosseinzadeh, A., Najafpoor, A. A., Esmaili, H., Zanganeh, J., Takabi, M. D., Piranloo, F. G. (2016). Waste recycling by vermicomposting: Maturity and quality assessment via dehydrogenase enzyme activity, lignin, water soluble carbon, nitrogen, phosphorous and other indicators. *Journal of environmental management*, 182, 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.025>
- Augusto, L., Bakker, M. R., Meredieu, C. (2008). Wood ash applications to temperate forest ecosystems potential benefits and drawbacks. *Plant and Soil*, 306(1-2), 181-198. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9570-z>
- Ayan, A. (2022). *Biyokütle enerjisinin Türkiye'deki kullanım olanaklarının değerlendirilmesi* (Master's thesis, Maltepe Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Bao, J., Lv, Y., Qv, M., Li, Z., Li, T., Li, S., Zhu, L. (2022). Evaluation of key microbial community succession and enzyme activities of nitrogen transformation in pig manure composting process through multi angle analysis. *Bioresource Technology*, 362, 127797. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127797>
- Belyaeva, O. N., Haynes, R. J. (2009). Chemical, microbial and physical properties of manufactured soils produced by co-composting municipal green waste with coal fly ash. *Bioresource Technology*, 100(21), 5203-5209. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.032>

- Bhunja, S., Bhowmik, A., Pramanik, A., Mallick, R., Mukherjee, J. (2023). Successive cultivation of cabbage and spinach by land application of recycled slaughterhouse waste: Benefit to farmers and agro-ecosystem health. *Environmental Technology & Innovation*, 29, 102967. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102967>
- Bilal, S., Hazafa, A., Ashraf, I., Alamri, S., Siddiqui, M. H., Ramzan, A., Qamar, N., Sher, F., Naeem, M. (2021). Comparative effect of inoculation of phosphorus-solubilizing bacteria and phosphorus as sustainable fertilizer on yield and quality of mung bean (*Vigna radiata* L.). *Plants*, 10(10), 2079. <https://doi.org/10.3390/plants10102079>
- Borker, S. S., Thakur, A., Khatri, A., Kumar, R. (2022). Quality assessment, safety evaluation, and microbiome analysis of night-soil compost from Lahaul valley of northwestern Himalaya. *Waste Management*, 149, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.003>
- Busato, J. G., Lima, L. S., Aguiar, N. O., Canellas, L. P., Olivares, F. L. (2012). Changes in labile phosphorus forms during maturation of vermicompost enriched with phosphorus-solubilizing and diazotrophic bacteria. *Bioresource Technology*, 110, 390-395. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.126>
- Boudjabi, S., Kribaa, M., Chenchouni, H. (2019). Sewage sludge fertilization alleviates drought stress and improves physiological adaptation and yield performances in Durum Wheat (*Triticum durum*): a double-edged sword. *Journal of King Saud University-Science*, 31 (3), 336-344. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.12.012>
- Ceyhan, V., İzzet, A. K. Ç. A., Kızılkaya, R., Veselova, A., Novikova, K. (2015). The financial feasibility of hazelnut husk and sewage sludge based vermicompost production. *Eurasian Journal of Soil Science*, 4(4), 259-265.
- Chekanai, V., Chikowo, R., Vanlauwe, B. (2018). Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to nitrogen, phosphorus and rhizobia inoculation across variable soils in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 266, 167-173. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.010>
- Chen, H., Wang, J., Zheng, Y., Zhan, J., He, C., Wang, Q. (2018). Algal biofuel production coupled bioremediation of biomass power plant wastes based on *Chlorella* sp. C2 cultivation. *Applied Energy*, 211, 296-305. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.058>
- Cruz, N., Avellan, A., Ruivo, L., Silva, F. C., Römken, P. F. A. M., Tarelho, L. A. C., Rodrigues, S. M. (2023). Biomass ash-based soil improvers: Impact of formulation and stabilization conditions on materials' properties. *Journal of Cleaner Production*, 391, 136049. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136049>
- Codling, E. E. 2006. Laboratory characterization of extractable phosphorus in poultry litter and poultry litter ash. *Soil Science*, 171, 858-864. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000228059.38581.97>
- da Costa, T. P., Quinteiro, P., Tarelho, L. A., Arroja, L., Dias, A. C. (2020). Life cycle assessment of woody biomass ash for soil amelioration. *Waste Management*, 101, 126-140. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.006>

- Das, D., Abbhishek, K., Banik, P., Swain, D. K. (2022). Comparative evaluation of changes in soil bio-chemical properties after application of traditional and enriched vermicompost. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102956. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102956>
- da Silva, L. F., da Silva, E. F., Morais, F. M. S., Portela, J. C., de Oliveira, F. H. T., de Freitas, D. F., Antunes, L. F. S. (2023). Potential of vermicomposting with mixtures of animal manure and vegetable leaves in the development of *Eisenia foetida*, microbial biomass, and enzymatic activity under semi-arid conditions. *Journal of Environmental Management*, 330, 117169. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117169>
- Dede, G., Ozdemir, S. (2016). Effects of elemental sulphur on heavy metal uptake by plants growing on municipal sewage sludge. *Journal of Environmental Management*, 166, 103-108. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.015>
- Dede, G., Ozdemir, S., Dede, O. H., Altundag, H., Dündar, M. S., Kızıloglu, F. T. (2017). Effects of biosolid application on soil properties and kiwi fruit nutrient composition on high-pH soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14, 1451-1458. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1252-z>
- Dede, G., Sasmaz, Z. B., 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>
- Domínguez, J., Aira, M., Kolbe, A. R., Gómez-Brandón, M., Pérez-Losada, M. (2019). Changes in the composition and function of bacterial communities during vermicomposting may explain beneficial properties of vermicompost. *Scientific Reports*, 9(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46018-w>
- Erdal, İ., Ekinci, K. (2017). Effects of vermicomposts obtained from rose oil processing wastes, dairy manure, municipal open market wastes and straw on plant growth, mineral nutrition, and nutrient uptake of corn. *Journal of Plant Nutrition*, 40(15), 2200-2208. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1346677>
- Fahimi, A., Bilo, F., Assi, A., Dalipi, R., Federici, S., Guedes, A., Bontempi, E. (2020). Poultry litter ash characterisation and recovery. *Waste Management*, 111, 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.010>
- Fu, X., Huang, K., Cui, G., Chen, X., Li, F., Zhang, X., Li, F. (2015). Dynamics of bacterial and eukaryotic community associated with stability during vermicomposting of pelletized dewatered sludge. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 104, 452-459. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.07.015>
- Gao, W., Liu, P., Ye, Z., Zhou, J., Wang, X., Huang, X., Deng, X., Ma, L. (2022). Divergent prokaryotic microbial assembly, co-existence patterns and functions in surrounding river sediments of a Cu-polymetallic deposit in Tibet. *Science of The Total Environment*, 851, 158192. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158192>
- Goswami, L., Gorai, P. S., Mandal, N. C. (2021). Microbial fortification during vermicomposting: a brief review. *Recent Advancement in Microbial Biotechnology*, 99-122. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822098-6.00011-2>

- Gulmezoglu, N., Ezgi, İ. Z. C. I. (2020). Ionic responses of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under salinity stress and humic acid applications. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(3), 1317-1331. <https://doi.org/10.15835/nbha48311950>
- Hosseinzadeh, S.R., Amiri, H., Ismaili, A., (2018). Evaluation of photosynthesis, physiological, and biochemical responses of chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. Pirouz) under water deficit stress and use of vermicompost fertilizer. *Journal of Integrative Agriculture*, 17 (11), 2426–2437. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61874-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61874-4)
- Hou, T., Zhou, Y., Cao, X., Li, W., Zhang, S., Zhao, Y., Chen, L., An, Q., Meng, L. (2023). Effects of microbial inoculum on microbial community and enzyme activity involved in nitrogen-sulfur metabolism during sewage sludge composting. *Science Total Environmental*, 858, 159954. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159954>
- Johansen, J. L., Nielsen, M. L., Vestergård, M., Mortensen, L. H., Cruz-Paredes, C., Rønn, R., Ekelund, F. (2021). The complexity of wood ash fertilization disentangled: Effects on soil pH, nutrient status, plant growth and cadmium accumulation. *Environmental and Experimental Botany*, 185, 104424. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104424>
- Karakurt, Y., Unlu, H., Unlu, H., Padem, H. (2009). The influence of foliar and soil fertilization of humic acid on yield and quality of pepper. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B–Soil and Plant Science*, 59(3), 233-237. <https://doi.org/10.1080/09064710802022952>
- Karwal, M., Kaushik, A. (2020). Co-composting and vermicomposting of coal fly-ash with press mud: changes in nutrients, micro-nutrients and enzyme activities. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 100708. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100708>
- Karwal, M., Kaushik, A. (2021). Bioconversion of lawn waste amended with kitchen waste and buffalo dung in to value-added vermicompost using *Eisenia foetida* to alleviate landfill burden. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23, 358-370. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01101-7>
- Keles, R., Bayrak, H., Imriz, G. (2019). Determination of grain yield and leaf chlorophyll content of some dry bean (*Phaseolus vulgaris* L) varieties. *Journal of Global Innovation Agriculture Society Science*, 7(2), 53-57. <https://doi.org/10.22194/JGIASS/7.838>
- Khan, H., Akbar, W. A., Shah, Z., Rahim, H. U., Taj, A., Alatalo, J. M. (2022). Coupling phosphate-solubilizing bacteria (PSB) with inorganic phosphorus fertilizer improves mungbean (*Vigna radiata*) phosphorus acquisition, nitrogen fixation, and yield in alkaline-calcareous soil. *Heliyon*, 8(3), e09081. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09081>
- Klaedtke, S. M., Cajiao, C., Grajales, M., Polanía, J., Borrero, G., Guerrero, A., Rivera M., Rao, I., Beebe, S.E., León, J. (2012). Photosynthate remobilization capacity from drought-adapted common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines can improve yield potential of interspecific populations within the secondary gene pool. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 4(4), 49-61. <https://doi.org/10.5897/JPBCS11.087>

- Koç, İ., Ögün, E., Namlı, A., Mendes, M., Kutlu, E., Yardım, E. N. (2019). The effects of wood vinegar on some soil microorganisms. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17:2437-2447. https://doi.org/10.15666/aeer/1702_24372447
- Kui, H., Jingyang, C., Mengxin, G., Hui, X., Li, L. (2020). Effects of biochars on the fate of antibiotics and their resistance genes during vermicomposting of dewatered sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122767. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122767>
- Leng, L., Bogush, A. A., Roy, A., Stegemann, J. A. (2019). Characterisation of ashes from waste biomass power plants and phosphorus recovery. *Science of the Total Environment*, 690, 573-583. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.312>
- Liang, G., Li, Y., Yang, C., Zi, C., Zhang, Y., Hu, X., Zhao, W. (2020). Production of biosilica nanoparticles from biomass power plant fly ash. *Waste Management*, 105, 8-17. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.033>
- Lidbury, I. D., Scanlan, D. J., Murphy, A. R., Christie-Oleza, J. A., Aguilo-Ferretjans, M. M., Hitchcock, A., Daniell, T. J. (2022). A widely distributed phosphate-insensitive phosphatase presents a route for rapid organophosphorus remineralization in the biosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(5), e2118122119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2118122119>
- Liu, S., Meng, J., Jiang, L., Yang, X., Lan, Y., Cheng, X., Chen, W. (2017). Rice husk biochar impacts soil phosphorous availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types. *Applied Soil Ecology*, 116, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.020>
- Liu, J., Qi, W., Li, Q., Wang, S. G., Song, C., Yuan, X. Z. (2020). Exogenous phosphorus-solubilizing bacteria changed the rhizosphere microbial community indirectly. *Biotechnology*, 10(4), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-2099-4>
- Lukashe, N. S., Mupambwa, H. A., Green, E., Mnkeni, P. N. S. (2019). Inoculation of fly ash amended vermicompost with phosphate solubilizing bacteria (*Pseudomonas fluorescens*) and its influence on vermi-degradation, nutrient release and biological activity. *Waste Management*, 83, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.038>
- Luyckx, L., de Leeuw, G. H. J., Van Caneghem, J. (2020). Characterization of poultry litter ash in view of its valorization. *Waste Biomass Valorization*, 11, 5333-5348. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00750-6>
- Maldonado, S., Rodríguez, A., Ávila, B., Morales, P., González, M. P., Araya Angel, J. P. A., Stoll, A. (2020). Enhanced crop productivity and sustainability by using native phosphate solubilizing rhizobacteria in the agriculture of arid zones. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7 4, 263. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.607355>
- Mandpe, A., Paliya, S., Kumar, S., Kumar, R. (2019). Fly ash as an additive for enhancing microbial and enzymatic activities in in-vessel composting of organic wastes. *Bioresour Technology*, 293, 122047. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122047>

- Mathobo, R., Marais, D., Steyn, J. M. (2017). The effect of drought stress on yield, leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agric. Water Management*, 180, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.005>
- Medina, J. M., del Bosque, I. S., Frías, M., de Rojas, M. S., Medina, C. (2019). Design and properties of eco-friendly binary mortars containing ash from biomass-fuelled power plants. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103372. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103372>
- Mesquita, M.A.M., Silveira, P.M. Leandro, W.M., Flores, R.A., Maranhão, D.D.C. (2018). DRIS standards for nutritional evaluation of *Phaseolus vulgaris* in Cerrado, Goiás state, Brazil. *Aust. Australian Journal of Crop Science*, 12 (02), 274–280. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.02.pne766>
- Namli, A., Mahmood, A., Sevilir, B., Ozkir, E. (2017). Effect of phosphorus solubilizing bacteria on some soil properties, wheat yield and nutrient contents. *Eurasian Journal Soil Science*, 6(3), 249-258. <https://doi.org/10.18393/ejss.293157>
- Ndlovu, T. J., Mariga, I. K., Mafeo, T. P. (2017). Influence of *Rhizobium phaseoli* inoculation and phosphorus application on nodulation and yield of two dry bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars. *International Journal Of Agriculture & Biology*, 19, 1332–1338.
- Ondrasek, G., Kovačić, M. B., Carević, I., Štirmer, N., Stipičević, S., Udiković-Kolić, N., Rengel, Z. (2021). Bioashes and their potential for reuse to sustain ecosystem services and underpin circular economy. *Renew Sustain Energ Review*. 151, 111540. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111540>
- Ordoñez-Arévalo, B., Huerta-Lwanga, E., de los Ángeles Calixto-Romo, M., Dunn, M. F., Guillén-Navarro, K. (2022). Hemicellulolytic bacteria in the anterior intestine of the earthworm *Eisenia fetida* (Sav.). *Science Total Environmental*, 806, 151221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151221>
- Ozdemir, S., Ozdemir, S., Yetilmezsoy, K. (2019). Agro-economic and ecological assessment of poultry abattoir sludge as bio-nutrient source for walnut plantation in low-fertility soil. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(6), 13225. <https://doi.org/10.1002/ep.13225>
- Ozdemir, S., Dede, G., Dede, O. H., Turp, S. M. (2019). Composting of sewage sludge with mole cricket: stability, maturity and sanitation aspects. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16 (10), 5827–5834. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-02192-4>
- Ozdemir, S., Turp, S. M., Oz, N. (2020). Simultaneous dry-sorption of heavy metals by porous adsorbents during sludge composting. *Environmental Engineering Research*, 25(2), 258-265. <https://doi.org/10.4491/eer.2019.071>
- Ozdemir, S., Ozdemir, S., Ozer, H., Yetilmezsoy, K. (2021). A techno-sustainable bio-waste management strategy for closing chickpea yield gap. *Waste Management*, 119, 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.030>
- Ozdemir, S., Demir, M. S. (2021). Biofuel characteristics and combustion emissions of poultry litter and lignocellulosic biomass. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(3), e13555. <https://doi.org/10.1002/ep.13555>

- Ozdemir, S., Turp, G. A. (2023). The impact of the pyroligneous acid-assisted biomass ash vermicompost on dry beans through climatic and agroecosystem changes. *Journal of Material Cycle Waste Management*, 25(1), 490-500. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01556-w>
- Paliya, S., Mandpe, A., Kumar, S., Kumar, M.S. (2019). Enhanced nodulation and higher germination using sludge ash as a carrier for biofertilizer production. *Journal of Environmental Management*, 250, 109523. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109523>
- Pérez-Losada, M., Narayanan, D. B., Kolbe, A. R., Ramos-Tapia, I., Castro-Nallar, E., Crandall, K. A., & Domínguez, J. (2022). Comparative analysis of metagenomics and metataxonomics for the characterization of vermicompost microbiomes. *Frontiers in Microbiology*, 13, 854423. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.854423>
- Pode, R. (2016). Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1468-1485. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.051>
- Ramos, R. F., Santana, N. A., de Andrade, N., Romagna, I. S., Tirloni, B., de Oliveira Silveira, A., Jacques, R. J. S. (2022). Vermicomposting of cow manure: Effect of time on earthworm biomass and chemical, physical, and biological properties of vermicompost. *Bioresource Technology*, 345, 126572. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126572>
- Rey-Salgueiro, L., Omil, B., Merino, A., Martínez-Carballo, E., Simal-Gándara, J. (2016). Organic pollutants profiling of wood ashes from biomass power plants linked to the ash characteristics. *Science of the Total Environment*, 544, 535-543. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.134>
- Resmi Gazete, 2018. Tarımda kullanılan organik, mineral ve mikrobiyal gübre kaynaklarına ilişkin yönetmelik, Sayı 30341.
- Sozen, O., Karadavut, U., Ozcelik, H., Bozoglu, H., Akcura, M. (2018). Genotype x environment interaction of some dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Legume Research-An International Journal*, 41(2), 189-195. <https://doi.org/10.18805/LR-354>
- Smith, M. R., Veneklaas, E., Polania, J., Rao, I. M., Beebe, S. E., Merchant, A. (2019). Field drought conditions impact yield but not nutritional quality of the seed in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *PLoS One*, 14 (6), e0217099. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217099>
- Schulze, J. (2004). How are nitrogen fixation rates regulated in legumes?. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167(2), 125-137. <https://doi.org/10.1002/jpln.200320358>
- Semerici, N., Kunt, B., Calli, B. (2019). Phosphorus recovery from sewage sludge ash with bioleaching and electrodialysis. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 144, 104739. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104739>
- Sharma, B., Vaish, B., Singh, U.K., Singh, P., Singh, R.P., 2019. Recycling of organic wastes in agriculture: an environmental perspective. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 13 (2), 409-429. <https://doi.org/10.1007/s41742-019-00175-y>

- Singh, J., Kalamdhad, A. S. (2013). Effects of lime on bioavailability and leachability of heavy metals during agitated pile composting of water hyacinth. *Bioresour Technology*, 138, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.151>
- Smol, M. (2019). The importance of sustainable phosphorus management in the circular economy (CE) model: the Polish case study. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21, 227-238. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0794-6>
- Stolarski, M. J., Krzyżaniak, M., Warmiński, K., Tworkowski, J., Szczukowski, S., Olba-Zięty, E., Gołaszewski, J. (2017). Energy efficiency of perennial herbaceous crops production depending on the type of digestate and mineral fertilizers. *Energy*, 134, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.19>
- Suarez, C., Dalcin Martins, P., Jetten, M. S., Karačić, S., Wilén, B. M., Modin, O., Persson, F. (2022). Metagenomic evidence of a novel family of anammox bacteria in a subsea environment. *Environmental Microbiology*, 24(5), 2348-2360. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.16006>
- Taïbi, K., Taïbi, F., Abderrahim, L.A., Ennajah, A., Belkhodja, M., Mulet, J.M. (2016). Effect of salt stress on growth, chlorophyll content, lipid peroxidation and antioxidant defence systems in *Phaseolus vulgaris* L. *South African Journal of Botany*, 105, 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.03.011>
- Tang, M., Wu, Z., Li, W., Shoaib, M., Aqib, A. I., Shang, R., Yang, Z., Pu, W. (2023). Effects of different composting methods on antibiotic-resistant bacteria, antibiotic resistance genes, and microbial diversity in dairy cattle manures. *Journal of Dairy Science*, 106(1), 257-273. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22193>
- Tao, K., Zhang, X., Chen, X., Liu, X., Hu, X., Yuan, X. (2019). Response of soil bacterial community to bioaugmentation with a plant residue-immobilized bacterial consortium for crude oil removal. *Chemosphere*, 222, 831-838. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.133>
- Tondello, A., Fasolo, A., Marcato, S., Treu, L., Bonato, T., Zanardi, W., Baldan, B. (2022). Characterization of bacterial communities isolated from municipal waste compost and screening of their plant-interactive phenotypes. *Science of The Total Environment*, 806, 150592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150592>
- Turan, V., Schröder, P., Bilen, S., Insam, H., Juarez, M. F. D. (2019). Co-inoculation effect of *Rhizobium* and *Achillea millefolium* L. oil extracts on growth of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and soil microbial-chemical properties. *Scientific Reports*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51587-x>
- Turp, G. A., Turp, S. M., Ozdemir, S., Yetilmezsoy, K. (2021). Vermicomposting of biomass ash with bio-waste for solubilizing nutrients and its effect on nitrogen fixation in common beans. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101691. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101691>
- 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>

- Turp, G. A., Celebi, A., Ozdemir, S. (2023). Enhancing energy potential of sweet sorghum by biomass ash compost in the context of climate change and agroecosystem. *Industrial Crops and Products*, 199, 116776. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116776>
- Turp, G. A., Ozdemir, S., Yetilmezsoy, K., Oz, N., Elkamel, A. (2023). Role of vermicomposting microorganisms in the conversion of biomass ash to bio-based fertilizers. *Sustainability*, 15(11), 8984. <https://doi.org/10.3390/su15118984>
- Valdez-Perez, M. A., Fernández-Luqueño, F., Franco-Hernandez, O., Cotera, L. F., Dendooven, L. (2011). Cultivation of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in limed or unlimed wastewater sludge, vermicompost or inorganic amended soil. *Scientia Horticulturae*, 128 (4), 380–387. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.01.016>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. *Fuel*, 105, 40-76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041>
- Wang, N., Wang, W., Jiang, Y., Dai, W., Li, P., Yao, D., Wang, H. (2021). Variations in bacterial taxonomic profiles and potential functions in response to the gut transit of earthworms (*Eisenia fetida*) feeding on cow manure. *Science of the Total Environment*, 787, 147392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147392>
- Wang, F., Zhang, W., Miao, L., Ji, T., Wang, Y., Zhang, H., Ding, Y., Zhu, W. (2021). The effects of vermicompost and shell powder addition on Cd bioavailability, enzyme activity and bacterial community in Cd-contaminated soil: a field study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 215, 112163. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112163>
- Wu, Q., Wan, W. (2023). Insight into application of phosphate-solubilizing bacteria promoting phosphorus availability during chicken manure composting. *Bioresour Technol.* 373, 128707. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128707>
- Xiao, X., Fan, M., Wang, E., Chen, W., Wei, G. (2017). Interactions of plant growth-promoting rhizobacteria and soil factors in two leguminous plants. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(23), 8485-8497. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8550-8>
- Xie, H., Ren, C., Zhao, B., Liu, S., Zhu, D., Guan, H., Yang, H. (2022). Characterization and use of biomass power plant ash in sulfoaluminate cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 325, 126667. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126667>
- Xu, S., Jia, K., Zheng, Y., Chen, W., Wang, Z., Wei, D., Wei, Y. (2023). Phosphorus transformation behavior and phosphorus cycling genes expression in food waste composting with hydroxyapatite enhanced by phosphate-solubilizing bacteria. *Bioresour Technol.* 128882. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128882>

- Yetilmezsoy, K., Ilhan, F., Kiyan, E., Bahramian, M. (2022). A comprehensive techno-economic analysis of income-generating sources on the conversion of real sheep slaughterhouse waste stream into valorized by-products. *Journal of Environmental Management*, 306, 114464. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.1144>
- Zhang, Y., Zhang, G., Wei, M., Gao, Z., Tian, M., He, F. (2019). Comparisons of acid and water solubilities of rice straw ash together with its major ash-forming elements at different ashing temperatures: an experimental study. *Sustainability*, 11(7), 1989. <https://doi.org/10.3390/su11071989>
- Zuo, Y., Zhang, J., Zhao, R., Dai, H., Zhang, Z. (2018). Application of vermicompost improves strawberry growth and quality through increased photosynthesis rate, free radical scavenging and soil enzymatic activity. *Scientia Horticulturae*, 233, 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.023>
- Zwetsloot, M. J., Lehmann, J., Solomon, D. (2015). Recycling slaughterhouse waste into fertilizer: how do pyrolysis temperature and biomass additions affect phosphorus availability and chemistry? *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(2), 281-288. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6716>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Güldane Aslı TURP

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2017, Bitlis Eren Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Turp, G. A., Turp, S. M., Ozdemir, S., Yetilmezsoy, K. (2021). Vermicomposting of biomass ash with bio-waste for solubilizing nutrients and its effect on nitrogen fixation in common beans, *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101691. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101691>
- Ozdemir, S., Turp, G. A. (2023). The impact of the pyroligneous acid-assisted biomass ash vermicompost on dry beans through climatic and agroecosystem changes, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(1), 490-500. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01556-w>
- Turp, G. A., Ozdemir, S., Yetilmezsoy, K., Oz, N., Elkamel, A. (2023). Role of vermicomposting microorganisms in the conversion of biomass ash to bio-based fertilizers. *Sustainability*, 15(11), 8984. <https://doi.org/10.3390/su15118984>