

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENTSEL KATI ATIKLARIN FINDIK ATIKLARI
İLE KOMPOSTLANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Murat KAHRAMAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :

Enstitü Anabilim Dalı : Çevre Mühendisliği

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Fulya AYDIN TEMEL

Ekim 2024
GİRESUN

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENTSEL KATI ATIKLARIN FINDIK ATIKLARI
İLE KOMPOSTLANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat KAHRAMAN

Enstitü Anabilim Dalı : Çevre Mühendisliği

Bu tez 11/10/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr.
Nurdan Gamze TURAN
Jüri Başkanı**

**Doç. Dr.
Fulya AYDIN TEMEL
Üye**

**Doç. Dr.
Hüseyin CÜCE
Üye**

**Prof. Dr.
Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü**

BEYAN

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

Murat KAHRAMAN
11/10/2024

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin konu seçiminde ve tez sürecinde yardımlarını esirgemeyen ve beni ailesinin bir parçası olarak görüp destekleyen çok değerli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Fulya AYDIN TEMEL ve kıymetli ailesine çok teşekkür ederim.

Samsun ili Salıpazarı ilçesi İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisinde görev yapan değerli dostum Çevre Mühendisi Oğuzhan TEPE'ye tez yazım aşamasındaki yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca eğitim hayatım boyunca beni yalnız bırakmayan kıymetli desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması Tübitak 1002 - 124Y018 Fındık İşleme Atıkları İle Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Biyoproses Modellemesi ve Süreç Optimizasyonu: Tip 1 Bulanık Regresyon, Sinir Ağlarına Dayalı Yaklaşımlar ve Genetik Algoritma projesi tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ.....	VII
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Kompostlaştırmanın Tanımı	4
2.2. Kompostlaştırılabilir Materyaller	5
2.3. Kompostun Kullanım Alanı	6
2.4. Kompostlaştırma Prosesinin Aşamaları.....	9
2.5. Kompostlaştırma Prosesini Etkileyen Faktörler.....	13
2.5.1. Sıcaklık	13
2.5.2. Karbon/azot (C/N) oranı	13
2.5.3. pH	14
2.5.4. Nem içeriği.....	15
2.5.5. Havalandırma	15
2.5.6. Mikroorganizmalar	16

2.5.7. Porozite ve partikül boyutu	18
2.5.8. Hacim arttırıcı madde	19
2.6. Kompostlaştırma Teknikleri	20
2.6.1. Pasif olarak havalandırılmış statik yığınlar	20
2.6.2. Aktarmalı yığında kompostlaştırma	23
2.6.3. Havalandırılmalı statik yığında kompostlaştırma	26
2.6.4. Kapalı reaktörde kompostlaştırma	27
2.6.4.1. Silo tipi reaktör	28
2.6.4.2. Döner tambur reaktör	29
2.6.4.3. Dikdörtgen yataklar	31
2.6.4.4. Kutu kompostlaştırma yöntemi	32
2.6.4.5. Vermikompost yöntemi	33
2.7. Türkiye’de Kentsel Katı Atık Üretimi ve Bertarafı	34
2.8. Fındık Üretim Atıklarının Değerlendirilmesi	38
 BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM	41
3.1. Atıkların Temini ve Kompostlaştırma Sürecine Hazırlanması	41
3.2. In-vessel Reaktörlerin Kurulması	42
3.3. Atık Kombinasyonlarının Hazırlanarak Reaktörlere Yerleştirilmesi	44
3.4. Kompost Numunelerinde Fizikokimyasal Analizler	44
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI	46
4.1. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin Sıcaklık Değişimine Etkisi	46
4.2. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin pH Değişimine Etkisi	49

4.3. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin Elektriksel İletkenlik Değişimine Etkisi	51
4.4. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin Nem İçeriği Değişimine Etkisi	53
4.5. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin Azot ve Türevlerinin Değişimine Etkisi	56
4.6. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin Toplam Organik Karbon (TOK) ve Karbon/Azot (C/N) Oranı Değişimine Etkisi.....	60
4.7. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin Etkisi	64
 BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	68
 KAYNAKLAR.....	71
 ÖZGEÇMİŞ.....	1

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kompostlaştırma prosesi	10
Şekil 2.2. Sıcaklığın zamanla değişimi	11
Şekil 2.3. Kompostlaştırma sürecinde sıcaklık-zaman ilişkisi	11
Şekil 2.4. Mikrobiyal toplulukta zamana bağlı değişimlerin şematik gösterimi	17
Şekil 2.5. Hava porozitesinin yığın derinliği ile ilişkisi (varsayımsal değerler)	19
Şekil 2.6. Tipik yığın şekilleri ve boyutları.....	22
Şekil 2.7. Yığın kompostlaştırma	24
Şekil 2.8. Yığın kompostlaştırmada kullanılan iş makineleri (Rynk, 1992)	25
Şekil 2.9. Havalandırılmalı yığın kompostlaştırmanın şematik gösterimi	27
Şekil 2.10. Havalandırılmalı yığın kompostlaştırma detayları	27
Şekil 2.11. Silo tipi kompostlaştırma prosesine ait şematik görünüm.....	29
Şekil 2.12. Döner tambur reaktör şematik gösterimi	30
Şekil 2.13. Karıştırmalı dikdörtgen yatakların genel özellikleri	31
Şekil 2.14. Türkiye’de toplanan atık miktarı.....	35
Şekil 2.15. Türkiye’de kişi başına üretilen atık miktarı.....	35
Şekil 2.16. Türkiye’de bertaraf yöntemine göre atık miktarının değişimi.....	36
Şekil 2.17. Türkiye’de 2020 yılı başlıca atık bertaraf yöntemleri	37
Şekil 2.18. Türkiye’de atıklarını kompostlaştırma tesisine gönderen belediye sayısı	37
Şekil 2.19. Türkiye’de kompostlaştırma tesisine gönderilen atık miktarı	38
Şekil 3.1. Kullanılan kentsel katı atıkların karakterizasyonu	41
Şekil 3.2. Öğütülmüş ve elenmiş fındık işleme atıkları	42
Şekil 3.3. Kompostlaştırma reaktörünün görseli	43
Şekil 3.4. Kompostlaştırma reaktörünün havalandırma düzeneği.....	43
Şekil 4.1. Kompostlaştırma sürecinde sıcaklık değişimleri	48
Şekil 4.2. Kompostlaştırma sürecinde pH değişimleri.....	50
Şekil 4.3. Kompostlaştırma sürecinde elektriksel iletkenlik değişimleri.....	52

Şekil 4.4. Kompostlaştırma sürecinde nem içeriği değişimleri.....	55
Şekil 4.5. Kompostlaştırma sürecinde NH_4^+ -N değişimleri.....	57
Şekil 4.6. Kompostlaştırma sürecinde NO_3^- değişimleri	58
Şekil 4.7. Kompostlaştırma sürecinde toplam azot değişimleri	59
Şekil 4.8. Kompostlaştırma sürecinde toplam organik karbon değişimleri	62



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Hammaddelerin bazı fizikokimyasal özellikleri	42
Tablo 3.2. Atıkların yüzdesel karışım oranları	44
Tablo 3.3. Analiz metotları	45
Tablo 4.1. Nihai kompostların fizikokimyasal özellikleri	65



KENTSEL KATI ATIKLARIN FINDIK ATIKLARI İLE KOMPOSTLANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasında ülkemizde tarımsal üretim potansiyeli yüksek olan fındık üretimi atıkları fındık cürufu ve kabuğunun proses verimliliği ve kompost kalitesine olan etkisi araştırılmıştır. Atık biyokütlelerin birlikte kompostlaştırılarak katma değerli ve kullanılabilir bir ürüne dönüştürülmesi için laboratuvar ölçekli in-vessel reaktör tasarlanmış ve yapılmıştır. Nem içeriği oldukça yüksek olan kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasında tüm reaktörlere nem kontrolü amacıyla %5 oranında fındık cürufu eklenmiştir. Fındık kabuğu içermeyen bir kontrol reaktörü olmak üzere %2,5, %5, %7,5, %10 ve %12,5 oranında fındık kabuğu içeren toplam altı reaktör oluşturulmuştur. Atık kombinasyonlarına göre atıklar oluşturulduktan sonra reaktörlerin kapağı kapatılmış ve eş zamanlı olarak sisteme 9 L/dak oranında havalandırma sağlanmış ve kompostlaştırma süreci boyunca havalandırma sürekli olarak gerçekleştirilmiştir. Kompostlaştırma süreci 15 hafta olarak planlanmış ve kompost kalitesinin belirlenmesi amacıyla her bir reaktöründen haftalık örnekleme yapılarak prosesi etkileyen fizikokimyasal parametreler (pH, EC, nem içeriği, NO_4^+-N , NO_3^--N , toplam azot, toplam organik karbon) izlenmiştir. Tüm kompostların fiziko-kimyasal özelliklerine bağlı olarak ideal karışım oranını belirlenmiştir. Tüm fizikokimyasal faktörler bütüncül olarak değerlendirildiğinde %12,5 fındık kabuğu oranının kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasında süreç verimliliği, nihai kompostun kalitesi ve olgunluğu açısından optimum koşulları sağlamıştır. Sonuç olarak, fındık cürufu ve kabuğu ilavesi kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasından elde edilen nihai ürünün kalitesini arttırmıştır. Bu atıkların değerlendirilerek döngüsel ekonomiye kazandırılması ve doğal kaynak kirliliğinin önüne geçilmesi sürdürülebilirlik için önem oluşturmaktadır.

Anahtar kelimeler: Kompostlaştırma, In-Vessel Reaktör, Organik Atık, Tarımsal Atık, Kompost Kalitesi ve Olgunluk

INVESTIGATION OF THE COMPOSTABILITY OF URBAN SOLID WASTES WITH HAZELNUT WASTES

SUMMARY

This study investigated the effect of hazelnut husk and shell, which are hazelnut production wastes with high agricultural production potential in our country, on process efficiency and compost quality in composting municipal solid wastes. A laboratory-scale in-vessel reactor was designed and constructed to convert waste biomass into a value-added and usable product by co-composting. In municipal solid waste composting with very high moisture content, 5% hazelnut husk was added to all reactors for moisture control. A total of six reactors were created, including a control reactor that did not contain hazelnut shells and 2.5%, 5%, 7.5%, 10% and 12.5% hazelnut shells. After the wastes were prepared according to the waste combinations, the reactors were closed and aeration was provided to the system at a rate of 9 L/min simultaneously and aeration was continuously performed throughout the composting process. The composting process was planned as 15 weeks and weekly sampling was done from each reactor and the physicochemical parameters affecting the process (pH, EC, moisture content, $\text{NO}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, total nitrogen, total organic carbon) were monitored to determine the compost quality and maturity. The ideal mixing ratio was determined depending on the physicochemical properties. When all physicochemical factors were evaluated holistically, the 12.5% hazelnut shell ratio provided optimum conditions in terms of process efficiency, quality and maturity of the final compost in municipal solid waste composting. As a result, the addition of hazelnut husk and shell increased the quality of the final product obtained from municipal solid waste composting. Evaluating these wastes and adding them to the circular economy and preventing natural resource pollution are important for sustainability.

Keywords: Composting, In-Vessel Reactor, Organic Waste, Agricultural Waste, Compost Quality and Maturity

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Son zamanlarda artan nüfusla birlikte tüketim alışkanlıklarının değişmesi sonucunda büyük miktarlarda ve çeşitli özelliklerde atıklar ortaya çıkmıştır (Xiao ve ark., 2017). İnsan sağlığını ve diğer canlıların hayatını tehlikeye atmamak, havayı, suyu ve toprağı kirletmemek, hammadde ve enerji potansiyelini kullanmak için katı atıkların doğru yönetimi büyük önem taşımaktadır (Alshehrei ve Ameen, 2021). Belirli bir atık yönetimi hedefine yönelik gerekli/uygun yöntem, teknoloji ve yönetim programlarının seçilmesi ve uygulanması ile toplumların yaşam standartları etkilenmemekte ve sürdürülebilir kalkınma sağlanmaktadır (Tabasaran ve ark., 2016).

Dünya genelinde %33'ü güvenli bir şekilde yönetilemeyen 2,01 milyar ton atık üretilmektedir. Yapılan araştırmalarda dünya nüfusunun 2030 yılında 8,6 milyar, 2050 yılında ise 9,8 milyar olacağı ve bu hızlı büyümede gelişmekte olan ülkelerin katkısının daha fazla olacağı bildirilmektedir. Nüfus artışıyla orantılı olarak ortaya çıkacak atık miktarının da 2050 yılında 3,4 milyar tona ulaşacağı belirtilmektedir (Wang ve ark., 2020). Katı atıklar genel olarak organik atıklar, metal, kağıt, plastik, cam ve diğer atıklardan oluşmaktadır. Katı atıkların dünya genelindeki dağılımı %44 organik atık, %17 kağıt, %12 plastik, %5 cam, %4 metal ve %18 diğer atıklardır. Gelir düzeyinin atık içeriğindeki payları değiştirdiği bilinmekte ve gelir düzeyinin düşmesiyle atık bileşimindeki organik atık miktarının arttığı gözlemlenmektedir (Alshehrei ve Ameen, 2021).

Katı atık bileşiminde yüksek paya sahip olan organik atıkların bertarafında genellikle sürdürülebilir olmayan depolama ve yakma yöntemleri uygulanmaktadır. Düzenli depolama ve yakma süreçlerinde oluşan gaz ve sıvı atıklar nedeniyle kompostlaştırma her geçen gün önem kazanmaktadır. Bu düşük maliyetli katı atık teknolojisi ile katma değerli ürünler elde etmenin yanı sıra atıkların hijyenik hale getirilmesi, bertaraf

sorununun çözülmesi, düzenli depolama alanlarının ömrünün arttırılması ve sera gazı emisyonlarının azaltılması mümkündür (Reyes-Torres ve ark., 2018; Chen ve ark., 2020).

Kompostlaştırma, çiftliklerde, parklarda, tarımda ve bahçelerde kullanılan toprağı zenginleştirmek için oksijen varlığında mikroorganizmalar tarafından atıkların organik kısmının ayrıştırılması işlemidir. Bu proses ile organik atık hacminde %60-90 oranında bir azalma mümkün olmaktadır. Mevcut arazi durumuna, organik madde miktarına, kalifiye personel mevcudiyetine ve bütçeye göre çeşitli kompostlaştırma teknikleri bulunmaktadır. Reaktörsüz sistemler, ajite katı yataklı sistemler ve statik katı yataklı sistemler olarak gruplandırılabilir. Reaktör tabanlı sistemler katı akışına göre dikey veya yatay akışlı reaktörler olarak sınıflandırılır. Ancak, akırsız, yığıla çalışan kompost “kutularını” kullanan bir dizi kompostlaştırma yöntemi de vardır (Haug, 1993). Oluşan atık biyokütle miktarı göz önüne alındığında, kompostlaştırma sürecinin hızlı ve etkili olması oldukça önemlidir. Bu nedenle hem işleme hızını hem de kompost kalitesini artırmak için reaktör tabanlı sistemler tercih edilmektedir. Reaktörler plastik/metal kutu, beton tank veya kap olabilir (Manyapu ve ark., 2018).

Kentsel katı atıklar yüksek nem ve azot içeriğine sahiptir. Bu nedenle, kompostlaştırma sürecinde nem içeriğı ve karbon/azot dengesinin sağlanabilmesi için yüksek karbon/azot oranına sahip kuru hacimli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Son zamanlarda, tarımsal atıklar, turba yosunu, toprak, biyokömür, zeolit, kireç ve uçucu kül gibi kompostlaştırma sürecinde kompostun kalitesini ve olgunluğunu artırmak için çeşitli katkı maddeleri kullanılmıştır. Dünyada tarımsal üretimin artmasıyla birlikte hem mahsul hasat atıklarının hem de organik tarım endüstrisi atıklarının miktarı her geçen yıl artmaktadır. Bu bitki kaynaklı atıklar, ciddi bir organik madde kaynağı olmasının yanı sıra bitki besin maddeleri açısından da önemli bir potansiyele sahiptir. Çiftlik mahsullerinin ve katma değerli ürünlerin üretimi bir dizi organik yan ürün üretir. Ayrıca, tarımsal mahsul kalıntıları, iyi ayrışan ve çok az koku riski taşıyan temiz hammaddelerdir. Öne çıkan örnekler arasında saman, kuru ot, bozulmuş silaj, atık yem, mısır koçanı, küspe, itlaf edilmiş meyve ve sebzeler, pirinç kabukları, fındık kabukları, zeytin, elma, üzüm ve diğer ekinlerin preslenmesinden elde edilen prina yer

alır. Bir kategori olarak, tarımsal artıkların kompostlaşma özellikleri eldeki malzemelere özgü olduğundan geliştirilemez. Tarımsal atıkların yönetiminde geri dönüşümü amaçlayan çevre dostu bir yöntem olan kompostlaştırma teknolojisi, kolay işletilmesi ve uygun maliyeti ile ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasında katkı maddesi olarak besin element değerleri yüksek ve hasat sonrası atık olarak değerlendirilen fındık kabuğu ve cürufunun kompost kalitesi ve süreç verimine olan etkisini araştırılmıştır. Bir ürün artığı olan fındık cürufu, yaklaşık %95 oranında organik madde ile dikkat çekici bir atıktır. Fındık cürufunun ve kabuğunun kompostta kullanılması ile ilgili literatürde çok sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar ise kompostun kalitesi ve süreç veriminin değerlendirilmesi üzerine odaklanmamıştır. Bu çalışmada, yüksek nem içeriği ve düşük karbon/azot oranı nedeniyle katkısız olarak verimli bir şekilde kompostlaştırılmayan kentsel katı atıkların tarımsal atık kullanılarak kompostlaştırılması araştırılmıştır. Fındık cürufunun ve kabuğunun stabilize edilmesi ve biyokütle olarak değerlendirilmesi büyük bir ekonomik kazanım olacaktır. Bu atıkların değerlendirilerek döngüsel ekonomiye kazandırılması ve böylece doğal kaynak kirliliğinin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. Ülkemizde yüksek üretim potansiyeli bulunan fındığın işlenmesi sonucunda oluşan atıklarının kentsel katı atıkların kompostlaştırılması için etkili bir katkı maddesi olarak değerlendirilmiş ve atık olmaktan çıkmıştır.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kompostlaştırmanın Tanımı

Kompostlaştırma, organik atıkların aerobik şartlarda biyolojik olarak parçalanması sonucu kompost adı verilen humusça zengin bir ürün oluşturma işlemidir (Bayındır ve ark., 2021). Çevre Koruma Ajansı (United States Environmental Protection Agency-USEPA)'na göre kompostlaştırma, biyokatıların araziye uygulanmadan önce patojen miktarlarını azaltmak için kullanılan bir yöntemdir. Aynı zamanda atık hacminde de azalma sağlamaktadır (Öztürk, 2017; Bayındır ve ark., 2021). Kompostlaştırma, organik atıkların mineralizasyonu ve humifikasyonu ile stabil bir ürün oluşturan biyokimyasal ve heterojen bir süreçtir (Vigneswaran ve ark., 2016).

Kompostlaştırma, atıkların hacimsel olarak azaltılmasında kullanılabilen bir yöntemdir. Organik atıkların düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmesi yerine geri kazanımını sağlamaktadır (Özkan, 2019; Bayındır, 2021). Kompostlaştırma, çeşitli aerobik mikroorganizmaların enerji, büyüme ve üreme için ihtiyaç duydukları materyali elde etmek için ham organik materyali ayrıştırma sürecidir. Bu ayrışmanın kararlı yan ürünleri, hem ölü hem de canlı mikroorganizmaların biyokütlesi ve hammaddenin bozunmayan kısımları kompost adı verilen son ürünü oluşturur. Kompostlaştırmadan sorumlu organizmalar, hayatta kalmak ve işlev görmek için belirli beslenme ve çevresel koşullara ihtiyaç duymaktadır. Bunlar, yeterli miktarda makro ve mikro besin, oksijen ve sudur. Bu organizmalar, yalnızca belirli sıcaklık ve pH aralıklarında optimum büyüme eğilimindedir (Graves, 2000).

Belirli atıkların tek başına kompostlaştırılması atıkları sterilize etmek için yeterli ısı üretebilir, ancak bitkileri besleyen besin açısından zengin kompostu üretemez. Buna karşılık kompostun, bitki ve hayvanların yaşamını veya sağlığını tehdit etmeden

bitkileri beslemek ve toprağa humus sağlamak gibi çok önemli işlevleri bulunmaktadır. Kompostlar, atıkların biyotransformasyonu sırasında birçok biyolojik ve fiziko-kimyasal işlemin tamamlanmasıyla bu işlevlere ulaşırlar. Tüm işlemler tamamlanmadan kompost olgunlaşmamış kalır (Mathur ve ark., 1993).

2.2. Kompostlaştırılabilir Materyaller

Kentsel katı atıklar, park ve bahçe atıkları, gıda işleme ve tarım endüstrisi atıkları, kentsel arıtma çamurları, endüstriyel arıtma çamurları, kanalizasyon atıkları ve hayvan dışkıları kompostlaştırma çalışmalarında kullanılan materyallerdir (Graves, 2000).

Kentsel katı atıklarının büyük bir kısmı organik içeriğe sahiptir. Kentsel katı atıkların yönetiminde genellikle yakma ve depolama gibi yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler yalnızca zengin karbon içeriğini ve diğer besin maddelerini yok etmekle kalmaz, aynı zamanda atığı su kirliliği, hava kirliliği ve küresel ısınmanın kaynağı haline getirir. Kentsel katı atıkların yönetiminin en etkili yolu, farklı ölçeklerde kullanma yöntemlerini iyileştirmektir. Kompostlaştırma, fayda-maliyet oranı tüm işletme ölçeklerinde 1'in üzerinde kalan birkaç teknolojiden biridir. Kentsel katı atıkların kompostlaştırması ile atık hacmi de azaltılmaktadır (Bayındır ve ark., 2021; Kabak ve ark., 2022)

Bahçe atıklarının ortalama %70'ini çimler, %25'ini yapraklar, %5'ini de çöpler oluşturmaktadır. Bununla birlikte, bu oranlar yıl içerisinde farklılık göstermektedir. Park ve bahçe atıklarının uygun diğer kompostlaştırılabilir materyaller ile karıştırılarak kompostlaştırma sürecine tabi tutulması oluşan kompost içeriğinde iyileşmeyi sağlamaktadır (Haug, 1993; Ermolaev ve ark., 2019).

Gıda işleme ve tarım endüstrisi atıkları olarak meyve atıkları, patates atıkları, yengeç ve balık parçaları, turunç atıkları, elma ve elma işleme sonucu ortaya çıkan atıklar, üzüm işleme tesislerinden çıkan atıklar, çikolata üretim tesisi atıkları, yiyeceklerin işlendiği tesislerden çıkan atıklar ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan atıklar sayılabilmektedir (Uygun, 2012; Aycan Dümenci ve ark., 2021)

Kentsel arıtma çamurları, atıksu arıtma işlemi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Ortalama %97-99 oranında su içeren arıtma çamurlarının içerisinde büyük miktarda azot, fosfor, potasyum elementleri bulunmaktadır. Kompostlaştırma işlemine tabi tutulan kentsel arıtma çamurları bahçe peyzajında ve golf sahalarında kullanılabilir (Smith, 2009).

Endüstriyel atıksuların arıtılması sonucunda ortaya çıkan arıtma çamurlarının bertarafı son derece önemlidir. Kompostlaştırma işlemi sırasında uygun karışımlarda endüstriyel arıtma çamurları kullanılabilir (Aycan ve ark., 2014; Arias ve ark., 2017).

Hayvan dışkıları, besin elementleri açısından oldukça zengin bir atık türüdür. Kanatlı hayvan dışkısı, küçükbaş ve büyükbaş hayvan dışkıları pek çok araştırmanın konusu olmuştur (Melikoglu ve Menekse, 2020; Kabak ve ark., 2022). Bununla birlikte, yerel faaliyetlere bağlı olarak domuz ve at dışkıları da kompostlaştırma materyali olarak kullanılmıştır (Huang ve ark., 2004; Ren ve ark., 2010; Fernández-Hernández ve ark., 2014). Ancak, bu materyalleri pirinç samanı, pirinç kabuğu, talaş ve diğer lifli maddelerle karıştırarak kompostlaştırmak uygulama için daha kaliteli kompost oluşmasını sağlamaktadır (Külcü ve Yaldiz, 2014).

Kanalizasyon atıkları bir diğer kompostlaştırılabilir materyaldir. Bu atıkların nem içeriğinin %90-98 oranında olması kompostlaştırma işlemi için bir dezavantaj olsa da yüksek miktarda bitki besin elementi içermesi nedeniyle kompostlaştırma sürecinde kullanılabilir. Gerekli durumlarda uygun ön işlemlerden sonra katkı maddesi olarak sürece dahil edilebilir (Bayındır, 2021).

2.3. Kompostun Kullanım Alanı

Kompostların nihai kalitesine, kullanım amaçlarına ve önceliklerine göre kullanım alanları belirlenmektedir. Kompostun kalitesi Dewar İndisi olarak bilinen parametreye göre belirlenmektedir. Dewar İndisi, biyolojik aktivitenin göstergesi olarak, kompost

ürününün kendiliğinden ısınmasını ölçen standart bir yöntemdir. Özel ortam sıcaklığına göre kalibre edilmiş izole Dewar kaplarında kompost numunesinin 10 gün boyunca inkübasyonu sonucunda ürettiği en yüksek sıcaklık farkının ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Buna göre, düşük kaliteli kompostlar arazide son örtü toprağı veya kamu ve maden arazilerinin iyileştirilmesinde, orta kaliteli kompostlar fidan üretimi, çim üretimi, ağaçlandırma ve bahçe düzenlemede, yüksek kaliteli kompostlar ise yüksek kaliteli bahçe düzenlemelerde, paketli veya perakende satışlarda ve kaplarda fidan üretiminde kullanılmaktadır (Özkan, 2019).

Kompost mükemmel bir toprak düzenleyicidir. Kompost, toprak yapısını iyileştiren, toprak su dengesini iyileştiren ve toprak besin rezervlerini, özellikle katyon değişim kapasitesini arttıran ayrılmış organik madde katkısı sağlar. Toprak erozyonu, akış, besin ve tortu kayıplarını azaltır. Kompostun toprağı iyileştirici etkileri, kapsamlı kök büyümesini teşvik eder ve genellikle bitki gücünü arttırır. Daha güçlü bitkiler kuraklık, böcekler ve hastalık gibi streslere daha iyi dayanabilir. Toprağı kompost uygulaması, toprağın su tutma kapasitesini ve topraktaki su dengesini iyileştiren organik madde ekleyerek su tasarrufu sağlar. Böylece, su kullanımında verimlilik artar, kuraklık toleransı artar ve sulamaya olan bağımlılık azalır (Vigneswaran ve ark., 2016; De Corato, 2020; Rynk ve Cooperband, 2021).

Kompost, hem ana bitki besinlerini (N, P, K) hem de küçük besinleri veya eser elementleri içerir. Çiftlik alanlarına, peyzajlara ve bahçelere kompost uygulamak, ticari gübre ihtiyacını azaltır. Düzenli kompost uygulamaları toprakta depolanan besinlerin rezervini arttırır. Ayrıca, kompostun toprak yapıcı nitelikleri, toprağın çözünür besinleri yerinde tutma yeteneğini arttırır. Kompostlaştırma işleminde topraktaki besin maddeleri korunur ve organik maddeler bitkinin alabileceğı forma dönüştürülür. Bu işlem ile birlikte toprağın su tutma kapasitesi artmış olur ve bitkiler kuraklığa karşı daha dayanıklı hale gelir (Manavoğlu, 2019; De Corato, 2020; Rynk ve Cooperband, 2021).

Kompostun toprak kaynaklı bitki hastalıklarını azalttığı belirtilmektedir. Fakat bu etki, tüm kompostlar ve tüm hastalıklar arasında tutarlı değildir. Eğer kompostlar

fungisitlere, fumigantlara ve diğer pestisitlere alternatif olarak kullanılabilirse, bunların çevresel etkilerini (toprak özelliklerinin değişmesi, atmosfer veya su kütlelerinin kaybı) ve insan sağlığı üzerinde oluşturduğu sorunları azaltır (Rynk, 1992; Vigneswaran ve ark., 2016; Rynk ve Cooperband, 2021).

Kompostlaştırma sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar ve güçlü biyolojik aktivite, bitkileri, hayvanları ve insanları enfekte edebilen patojenik organizmaları yok eder. Bu nedenle, taze organik kalıntıların doğrudan araziye uygulanmasıyla karşılaştırıldığında kompostlaştırma, bitki ve hayvanlara hastalık bulaştırma riskini azaltmaktadır. Kompostlaştırmanın patojen yıkımı üzerindeki etkileri, patojenik virüsler, bakteriler, mantarlar ve protozoa dahil olmak üzere çok çeşitli patojenler için incelenmiştir (Epstein, 1997; Ryekeboer ve ark., 2002).

Su kalitesini değerlendiren son çalışmalar, sularda hormonların, antibiyotiklerin ve pestisitlerin varlığını belirlemiştir. Bu ksenobiyotik bileşiklerin çoğu doğal olarak oluşmayan bileşiklerdir. Bu bileşiklerin rutin olarak çiftlik hayvanlarına beslendiği veya hayvancılık veya mahsul üretiminde kullanıldığı çiftliklerden kaynaklandığı bilinmektedir. Pestisitler, özellikle atrazin gibi herbisitler, çevrede kalma ve yüzey veya yeraltı sularına ulaşma eğilimindedir. Genellikle bu sentetik organik bileşikleri içeren biyokatıların, gübrelerin, bahçe budamalarının ve mahsul kalıntılarının kompostlaştırılması, onları bozmak için etkili bir yoldur (Rynk, 1992).

Evrensel olarak kabul edilmemesine rağmen, kompostlaştırma, çiftliklerde, yollarda, kumsallarda ve kümes hayvanı ahırlarında hastalık salgınları gibi toplu ölümlerle sonuçlanan durumlarında ölen hayvanların karkaslarını tedavi etmek için çoğu durumda, kompostlaştırma tercih edilen bir tedavi yöntemidir. Ortaya çıkan kompost tipik olarak yerinde kullanılır. Ölü hayvanların kompostlaştırılması, özellikle Amerika Birleşik Devletleri dışında tüm eyaletlerde, illerde ve ülkelerde onaylanmamıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde bile bazı kısıtlamalar bulunmaktadır (Rynk ve Cooperband, 2021).

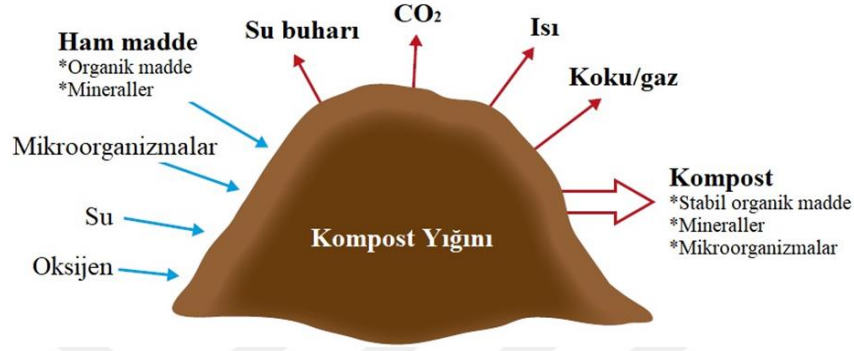
Statik gübre yığınlarından ve aktif olarak kompostlaştırılmış gübre yığınlarından kaynaklanan gaz emisyonlarını karşılaştıran son çalışmalar, gübre yığınlarının kompostlaştırılmasından kaynaklanan metan ve azot oksit gibi sera gazlarının emisyonlarında önemli azalmalar olduğunu göstermektedir (Brooksbank, 2018). Gıda atıkları ve endüstriyel organik atıklar gibi organik atıkların düzenli depolama alanlarından uzaklaştırılması da kaçak sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir. Kompost kullanımı sentetik gübreler, mantar ilaçları ve herbisitlere olan ihtiyacı azalttığından, girdi üretimiyle bağlantılı sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeli vardır. Şu anda, kompostlaştırmanın sera gazları ve küresel ısınma üzerindeki etkisi, kompost yığınlarından metan ve azot oksit gazları yayılabileceğinden hala belirlenmektedir. Bununla birlikte, mevcut bilgiler, özellikle bir toprak düzenleyici ve besin takviyesi olarak kompost kullanımı dikkate alındığında ve genel olarak kompostlaştırmanın olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir (Rynk ve Cooperband, 2021).

2.4. Kompostlaştırma Prosesinin Aşamaları

Kompostlaştırma, organik maddelerin kontrollü koşullar altında mikroorganizmalar tarafından aerobik veya oksijen gerektiren ayrışmasıdır. Kompostlaştırma sırasında mikroorganizmalar oksijen kullanır ve ham maddelerde bulunan organik maddeleri tüketir (Şekil 2.1). Mikroorganizmalar, hammaddelerle ve çevredeki ortamdan gelir veya bitmiş kompost veya aşılama ile geri dönüştürülerek eklenebilir. Kompostlaştırma, ayrıştırıcı mikroorganizmaların büyümesini teşvik eden koşullar oluşturulduğunda ve sürdürüldüğünde hızlı bir şekilde gerçekleşir (Oshins ve Michel, 2021).

Kompostlaştırma, nemli organik materyaller bir araya gelir gelmez başlar. Ayrıştırıcı mikroorganizmalar (bakteri ve mantarlar) her parçacığın yüzeyinde zaten mevcuttur. Hızla mikroorganizmaların sayısı artmaya başlar. Büyüme ve metabolizma için ihtiyaç duydukları enerjiyi gıda olarak hazır bulunan şekerleri, nişastaları ve proteinleri kullanarak sağlarlar. Süreç devam ettikçe ve kolayca parçalanabilen organik maddeler tükendikçe, mikrobiyal topluluklar daha zor organik bileşiklerini metabolize etmek için

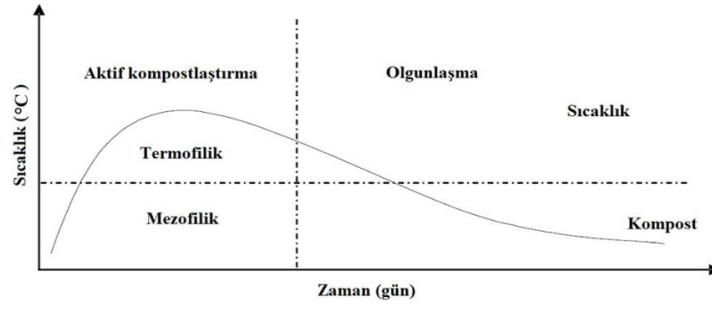
sürece daha iyi adapte olan türlerle yer değiştirirler. Mikroorganizmalar organik madde yapısındaki kimyasal bağları kırarak, organik maddelerden besin maddelerinin büyümesi ve sentezi için enerji elde ederler. Bu işlem sırasında, kimyasal enerjinin bir kısmı ısıya dönüşür (Özkan, 2019; Bayındır, 2021).



Şekil 2.1. Kompostlaştırma prosesi

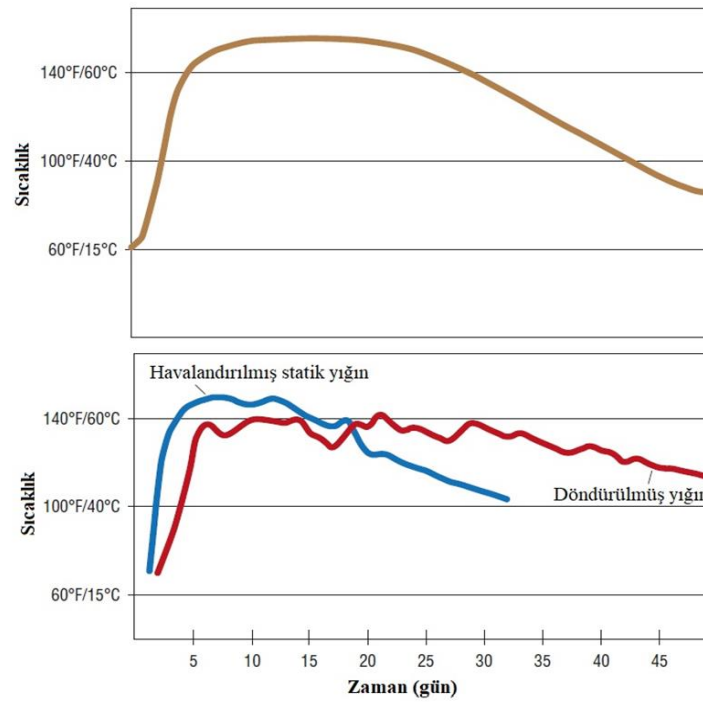
Kompost yığını yalıtım görevi görerek ısı dağılımını yavaşlatır. Sıcaklıklar, mikroorganizmalar engellenene veya ölene kadar yükselmeye devam edebilir. Enerji üretimi tüketilen oksijen miktarı ile orantılıdır. Hızla ayrışan hammaddeler fazlaca oksijen tüketir ve bol miktarda ısı üretir. Mikrobiyal aktivitenin bir sonucu olarak sıcaklıktaki bir artış, tipik olarak bir yığın veya yığın oluşturma sonrasında birkaç saat içinde fark edilir. Bu aşama aktif kompostlaştırma aşamasıdır (Oshins ve Michel, 2021).

Aktif kompostlaştırma aşaması yavaşladıkça, sıcaklıklar kademeli olarak düşer ve son olarak kompost yığınının sıcaklığı ortam hava sıcaklığına yaklaşır. Aktivite ve dolayısıyla sıcaklık, yetersiz havalandırma, düşük nem veya besin eksikliği nedeniyle düşebilir. Bu tip durumlarda bu eksiklikler karıştırma, oksijen takviyesi veya su ilavesi ile giderilebilir. Bu karakteristik sıcaklık artış ve düşüş modeli, kompostlaştırma süreci ilerledikçe meydana gelen ayrışma hızındaki ve türündeki değişiklikleri ve ayrıca komposttaki organik maddenin "kararlılığını" yansıtır (Şekil 2.2) (Özkan, 2019; Bayındır, 2021).



Şekil 2.2. Sıcaklığın zamanla değişimi

Şekil 2.3’de kompostlaştırma sürecinde zamana bağlı sıcaklık değişimi sunulmuştur. Kompostlaştırma sürecinde, belirli bir zamanda kompost yığını içerisinde çok çeşitli sıcaklık, nem ve oksijen koşulları mevcut olabilir. Kompost yığını yüzeyi ortam sıcaklığına, oksijene ve neme yakinken, yığının iç kısmı daha sıcak, oksijensiz ve çok daha nemli olabilir.



Şekil 2.3. Kompostlaştırma sürecinde sıcaklık-zaman ilişkisi

Kompost yığınındaki bu koşullardaki değişiklik, karıştırma ile ve kaplar içinde veya örtüler altında çevreleme ile azaltılır. Hammaddeler ayrıştıkça ve yığın doğru şekilde yönetildikçe koşullar değişir. Bununla birlikte, yığında bulunan ilk oksijen

tüketildiğinden, aerobik ayrışma yavaşlar. Mikroorganizmalar, kompost yığınları için havalandırma yoluyla oksijenlerini alırlar. Sürekli olarak tükenen oksijeni ortama kazandırmak ve gözenek boşluklarında biriken karbondioksit ve diğer gazları uzaklaştırmak için havalandırma yapılması gereklidir. Kompostlaştırmada, malzemelerinin mekanik olarak karıştırılması geçici olarak temiz hava ve oksijen sağlamaktadır. Bu nedenle, oksijen ya basınçlı havalandırma ya da pasif hava değişimi (doğal konveksiyon ve difüzyon) ile sağlanır. Mikroorganizmalar, ihtiyaç duydukları besinler tükendiği veya kullanılmadığı için, yeterli neme sahip olmadıkları veya ihtiyaç duydukları oksijeni alamadıkları için daha az aktif hale gelebilirler. Süreci aktif tutmak için karıştırma, havalandırma veya hammadde takviyesi yapılabilir. Ancak, karıştırma işlemi devam ettiği halde kompost sıcaklığında değişim gözlenmiyorsa aktif aşamanın sona erdiği anlaşılır (Epstein, 1997; Oshins ve Michel, 2021).

Aktif kompostlaştırma aşamasını bir kütleme veya olgunlaşma aşaması izler. Yığının kompost ayrışmaya devam eder, ancak çok daha yavaş bir hızla ve tipik olarak daha düşük sıcaklıklarda bu süreç ilerler. Oksijen tüketim hızı, doğal konveksiyon ve difüzyonun genellikle oksijen talebini zorunlu havalandırma olmadan karşıladığı noktaya düşer. Kompostlaştırma süreci belirli bir noktada durmaz. Materyal yavaş bir hızla parçalanmaya devam eder. Olgun kompost stabildir; yani, düşük seviyede biyolojik aktiviteye sahiptir ve devam eden ayrışma nedeniyle büyüyen bitkilere zarar vermez. Olgunlaşma aşamasında hammadde de bulunan daha kompleks yapıya sahip olan organik maddeler bozunur ve daha kararlı humuslu maddeler oluşur. Bu süreç birkaç hafta sürmektedir. Olgunlaştırmanın tamamlandığını yapılacak olan stabilite testi ile anlaşılmaktadır (Özkan, 2019; Oshins ve Michel, 2021).

2.5. Kompostlaştırma Prosesini Etkileyen Faktörler

2.5.1. Sıcaklık

Kompostlaştırma prosesini etkileyen en önemli faktörlerden biri sıcaklıktır. Öncelikle prosesin hızını belirleyen bir faktördür. Kompostlaştırmayı sağlayacak mikroorganizmalar belirli sıcaklık (20-60°C) arasında aktivitelerini sürdürdüklerinden sıcaklığın ayarlanabilmesi oldukça önemlidir. Karbon içeren moleküller parçalanırken karbon atomları arasındaki bağların kopması ile oluşan kimyasal enerji ısıya dönüşmektedir. Parçalanma arttıkça yığının sıcaklığı ve biyolojik aktivite hızı artar. Sıcaklık aynı zamanda kompost yığınının büyüklüğüne, nem içeriğine, havalandırılmasına ve karbon/azot oranına bağlı olarak değişmektedir (Ölmez, 2013; Kabak, 2021)

Kompostlaştırma sürecinin etkin olarak devam edebilmesi sıcaklığa bağlıdır. Bir araştırmada, 20°C'nin altında kompostlaştırma süreçlerinin ciddi seviyede yavaşladığı hatta durduğu belirtilmiştir (Mosher ve Andersen, 1977). Benzer şekilde, 60°C'nin üstünde mikrobiyal aktivite yavaşlamaktadır. Ayrışma hızının en etkin olduğu sıcaklık değerleri ise 52-60°C arasında olduğu rapor edilmiştir. Kullanılan hammaddeler, patojen içeriyorsa sıcaklığı, havalandırılmalı yığın ve kapalı sistemlerde en az 3 gün 55°C ve üzerinde, yığın sistemlerde ise beş defa karıştırma yapıldıktan sonra en az iki hafta arayla bu değerler sağlanmalıdır (Miller, 1996; Kabak, 2021).

2.5.2. Karbon/azot (C/N) oranı

Hammaddelerdeki karbonun azota nispi oranı, kompostlaştırma sürecini ve kompostun kalitesini etkilemektedir. C/N oranı, proses hızını ve azotun korumasını etkiler. Kompostlaştırma sürecinde, karbon kaybı genellikle azot kaybından daha fazla olur. Bu nedenle kompostun C/N oranı, hammaddelerinkinden önemli ölçüde daha düşük olur. Yine de, başlangıç C/N oranı, nihai ürünün C/N oranında bir etkidir. Genel olarak bahçe bitkisi yetiştirme ve tarımsal kullanım için nihai kompostun C/N oranının

20/1'den az olması istenir. Öte yandan, yüksek C/N oranına sahip kompost ise malç ve erozyon kontrol uygulamalarında çok etkilidir (Rynk ve Schwarz, 2022).

Mikroorganizmaların popülasyonlarını arttırabilmeleri için en önemli besin kaynağı karbon ve azottur. Karbon ana enerji kaynağı, azot ise hücre sentezi için gereklidir. Mikrobiyal büyümenin devamı sırasında bir birim azot için 30 birim karbona ihtiyacı vardır (Epstein,1997). C/N oranı 30'dan düşük olduğunda ortamdaki azotun parçalanması için gerekli olan karbon biter, kötü koku ve amonyak oluşur karbon/azot oranı yüksek olduğunda ise mikroorganizma popülasyonunun artması için ortamda yeterli azot kalmaz, sıcaklık düşer ve degradasyon yavaşlar. İyi işletilen bir kompostlaştırma prosesinde karbon bileşiklerinin biyolojik mineralizasyonu sebebiyle ortamda CO₂ açığa çıkar ve C/N oranı sürekli olarak azalır. C/N oranı çok yüksek olan atıklara, azotlu atıkların ilavesi ile bu oran azaltılabilmektedir. Benzer şekilde C/N oranı çok düşük olan atıklara ise karbonlu atıkların ilavesi ile karbon/azot oranı arttırılabilmektedir (Ölmez, 2013).

2.5.3. pH

Mikrobiyal ortamın ve atık stabilizasyonunun kontrol edilmesi için pH'a önem verilmelidir. Birçok mikroorganizma için uygun pH aralığı 6.0-7.5 arasındadır. Bir kompostlaştırma prosesinin ilk aşamalarında pH 5 civarındadır. Daha sonra, mikroorganizmaların asit senteziyle beraber pH'da bir artış gözlemlenmektedir. Ancak kompost yeteri kadar havalandırılmazsa pH'da düşmeler gözlemlenebilmektedir (Bıtrak, 2013). pH değeri çok düşük ya da çok yüksek kompost yığınlarında pH düzenlemesi yapılması gerekmektedir. Kireç, sodyum bikarbonat, kostik soda veya uygun seyreltik asit ilavesi ile pH ayarlaması yapılabilir.

Kompostlaştırma prosesi üzerindeki hammadde pH'ının etkisi genellikle azdır, ancak genellikle hammadde karışımının neredeyse nötr bir pH'ya sahip olması durumunda en etkili kompostlaştırma gerçekleşir. Karbonhidratlar açısından zengin olan hızla bozulan bazı hammaddeler, kompostlaştırma döngüsünün başlarında yığının pH'ını belirgin bir şekilde düşürebilir. Koku oluşumunu arttıran bu etki, havalandırma ile

engellenebilir. Süreç sonunda oluşan kompostun pH değeri, genellikle hammaddelerinkine yakındır (Ekinci ve ark., 2000; Wang ve ark., 2017)

2.5.4. Nem içeriği

Nem içeriği, kompostlaştırma prosesinin devamlılığı için temel parametredir. Komposttaki nem içeriği hem biyolojik ayrışma hızının yeterli düzeyde gerçekleşmesini sağlamalı, hem de partiküller arasındaki boşluğu ortadan kaldırmayacak şekilde olmalıdır. Nem içeriği için önerilen alt sınır genellikle %40 olmasına rağmen, hızlı bozunma için optimum değer hedef %50'dir. %35'in altına düştüğünde ise mikrobiyal aktivite yavaşlar. Tersine, aşırı nem yoğunluğu arttırdığı ve havalandırmayı engellediği için nemli besleme stokları verimsiz bir şekilde kompostlanır. Önerilen üst sınır tipik olarak %60-65 nem aralığındadır (Özkan, 2019; Rynk ve Schwarz, 2022).

Nem içeriği optimum seviyenin altında olması durumunda ise materyal boşluklarına gereğinden fazla su dolacağından hava girişinde problemler yaşanacaktır. Yeterli hava girişi olmadığında aerobik ortam anaerobik ortama dönüşecektir (Bayındır, 2021). Kompostlaştırma için nem içeriği yüksek olan hammaddeler mekanik olarak susuzlaştırılabilir, fazla su boşaltılabilir ve/veya güneş ve rüzgarla kurutulabilir. En iyi çözüm ise nem içeriği yüksek hammaddeleri kuru hammaddelerle karıştırmaktır (Rynk ve Schwarz, 2022).

2.5.5. Havalandırma

Kompostlaştırma sürecinde oksijen tüketimi oldukça fazladır. Bu nedenle, kompostlaştırma aşamasında son derece önemsenmesi gereken durum kompost yığınının uygun şekilde havalandırılmasıdır. Eğer oksijen veya hava kaynağı sınırlıysa kompostlaştırma yavaş gerçekleşir. Kompost yığınının gözenek boşluklarındaki oksijen konsantrasyonunun en az %5 olması gerekir. Organik maddelerin ayrışması için kompost yığını yeterli miktarda oksijen içermediğinde anaerobik koşullar oluşur. Organik maddeler parçalandıkça CO₂ açığa çıkacağından yine ortamın oksijen

açısından zenginleştirilmesi gerekir, bu da havalandırma işlemi ile sağlanır. Havalandırma doğru aralıklarla ve doğru sürede yapılmaz. Aksi takdirde, kompost yığınının sıcaklığı düşer ve mikrobiyal faaliyet yavaşlar (Bıtrak, 2013).

Kompostlaştırma prosesinde havalandırma işlemi için fiziksel yöntemle kütle karıştırma, konvektif hava akımı sağlama ve mekanik havalandırma yöntemleri kullanılmaktadır. Statik sistemde oksijen, üfürme şeklinde ya da konvektif hava akımı şeklinde karşılanmaktadır. Yığın sistemlerinde ise fiziksel yöntemlerle karıştırma ve konvektif hava akımı yöntemleri ile kullanılmaktadır (Bayındır, 2021).

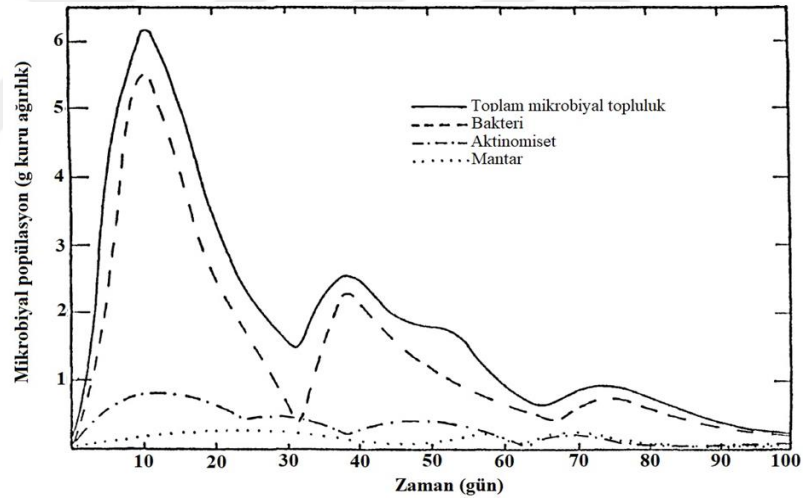
Havalandırma işlemi oksijen sağlamanın yanında kompost içinde sıkışan ısı, su buharı ve diğer gazların uzaklaştırılması için de önemlidir. Aslında ısı giderimi için gereken havalandırma miktarı oksijen sağlamak için gerekenden 10 kat fazla olabilmektedir. Nem içeriğini azaltmak için gereken havalandırma, oksijen sağlamak için gereken havalandırma miktarından fazla ama ısı giderimi için gerekli havalandırmadan azdır. Bu nedenle, ne kadar ve hangi sıklıkla havalandırmanın gerekli olduğu parametre değişimleri gözlenerek belirlenir (Öztürk ve ark., 2015; Öztürk, 2017).

2.5.6. Mikroorganizmalar

Kompostlaştırma, organik besleme stoklarını kolonize eden etki-endojen mikroorganizmalar sayesinde, biyolojik olarak yüksek oranda bozunabilir organik bileşiklerin stabilize organik maddeye dönüştürülmesine izin veren doğal ve ekolojik olarak sürdürülebilir bir biyolojik süreçtir (De Corato, 2020). Biyolojik bir süreç olarak kompostlaştırma, sayısız mikroorganizmayı içerir. Bu organizmalar organik bileşikleri ayrıştırır. Oksijen, nem, sıcaklık, besinler ve pH gibi birkaç önemli faktör mikrobiyolojik popülasyonu etkiler. Birçok organik bileşiğin karmaşık yapısı nedeniyle, birçok mikroorganizma ayrışma sürecine dahil olur (Crawford, 1978; Janshekar ve Fiechter 1982; Jeffries, 1987).

Spesifik bileşikler biyolojik olarak parçalayabilen mikroorganizmaların tanımlanması, kompostlaştırma sürecinde çok faydalıdır (Kruger ve ark., 1973).

Mikroorganizmalar tolere edebildikleri ve çoğalabildikleri sıcaklıklara göre sınıflandırılmaktadır. Buna göre, kriyofiller veya psikrofiller (0-25°C), mezofiller (25-45°C) ve termofiller (>45°C) olarak 3 temel grup bulunmaktadır. Kompostlaştırmada birincil amaç, organik maddeyi en verimli sıcaklık ve diğer koşullarda ayrıştıran organizmalardır. Ancak, insan patojenleri ile kontamine olmuş atıklar kompostlaştırılırken, bu patojenlerin yok edilmesi önemli bir ikincil amaçtır. Bu ise, ancak 55°C'yi aşan termofilik sıcaklıklarda meydana gelir. Mikrobiyoloji kompostlaştırmanın en önemli unsuru olmasına rağmen, bu alanda nispeten az araştırma yapılmıştır. Ölçülmesi kolay olan fiziksel ve kimyasal faktörlerin aksine, biyolojik yönlerin değerlendirilmesi oldukça zordur. Hem mikroorganizma çeşitliliği hem de mikrobiyal popülasyonlar kompostlaştırma süreci boyunca değişmektedir. Bazı araştırmalar komposttan izole edilen çok çeşitli organizmaları göstermektedir (Walke, 1975; Poincelot, 1975 (Onwosi ve ark., 2017)).



Şekil 2.4. Mikrobiyal toplulukta zamana bağlı değişimlerin şematik gösterimi

Kompostlaştırması sırasında zamanın bir fonksiyonu olarak bakterilerin, mantarların, aktinomisetlerin ve maya mantarları ve protozoalar gibi çeşitli mikrobiyal popülasyonların bu proseste görev aldığı belirtilmiştir (Şekil 2.4). Başlangıçta sıcaklığın artmasıyla mezofilik organizmalar görev alırken, sıcaklığın yükselmesi ile yerini termofilik organizmalara bırakır. Termofilik organizmalar kendilerine ait besinleri tükettiklerinde ayrışma yavaşlar ve yığın sıcaklığı azalmaya başlar. Sıcaklıkların azalması ile tekrar mezofilik organizmalar faaliyete geçerek ayrıştırma

işlemine dahil olurlar. İkinci mezofilik dönemde genellikle mantar ve aktinomisetlerden oluşan yeni bir grup organizma topluluğu yıpına hakim olur (Epstein, 1997; Bıtrak, 2013; Awasthi ve ark., 2017; De Corato, 2020).

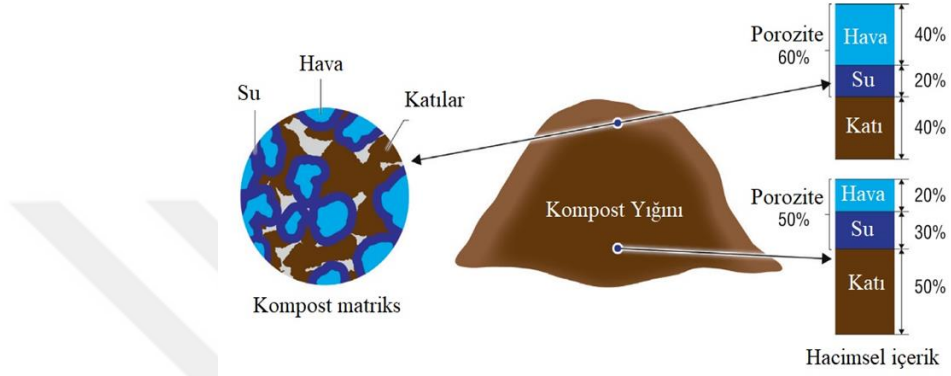
2.5.7. Porozite ve partikül boyutu

Porozite, katı kütle arasındaki su veya hava ile dolu boşluklardır. Serbest hava boşluğu süreç boyunca oluşan gazların serbest dolaşımını sağlayan ve hava porozitesi olarak adlandırılan önemli bir faktördür. Yeterli hava porozitesi mikrobiyal aktivite için oksijen desteği sağlamanın yanısıra, karbondioksit ve diğer metabolik gazların kompost yığını dışına salınmasını sağlar. Etkili bir kompostlaştırma sürecinde istenen oksijen içeriğini oluşturmak için nem içeriği ve hava porozitesi arasında uygun dengeyi bulmak gereklidir.

Nem içeriği kompostlaştırma süreci için önemli bir unsur olmasına rağmen materyaller arasındaki boşluğu doldurması nedeniyle oksijen seviyesi azalır. Hava porozitesinin yığın derinliği ile ilişkisi varsayımsal değerle Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Optimum hava porozitesi birçok faktöre bağlıdır ve genellikle %30-60 arasında olması istenmektedir. Düşük hava porozitesi oksijen yetersizliğine ve dolayısıyla anaerobik koşulların oluşmasına yol açar. Hava porozitesini dengede tutabilmek için, partikül boyutunun dağılımı ve kompost yığınının düzenli çevrilmesi ile mümkündür (Albuquerque ve ark., 2008; Öztürk ve ark. 2015).

Mikrobiyal aktivite, genellikle organik partiküllerin yüzeylerinde oluşmaktadır. Kompostlaştırma materyalinin partikül boyutunun büyük olması, mikrobiyal aktiviteyi engellemekte ve parçalanma hızını düşürmektedir. Kompostlaştırma prosesinde, oksijen difüzyonunun sağlanabilmesi için optimum partikül boyutu ile mümkün olur (USEPA, 1994). Bu boyut atık türüne göre değişim göstermektedir. Örneğin, hayvan dışkısı ile kompostlaştırma yapılacaksa 0,5-2,5 aralığının, arıtma çamurları ile süreç yürütülecekse 1,6 cm’den daha büyük partikül boyutlarının gerekli olduğu belirtilmektedir (Gouin 1992; Rynk 1992; Bayındır, 2021).

Nihai kompostun partikül boyutu dağılımı, gaz ve su değişimini ve özellikle su tutma kapasitesini belirlediği için önemlidir (Zhang ve Sun, 2014). Kompostlaştırma kullanılan maddelerin partikül boyutları, yavaş ayrışma olacağından çok büyük olmamalı aynı zamanda partikül boyutu da kompakt bir kütle oluşturabileceği ve dolayısıyla gözenekliliği azaltabileceği için çok küçük de olmamalıdır (Bernal ve ark., 2009).



Şekil 2.5. Hava porozitesinin yığın derinliği ile ilişkisi (varsayımsal değerler)

2.5.8. Hacim arttırıcı madde

Partiküllerin bozunumu ve yığının oturması nedeniyle porozite azalır. Sürece yeterli hava porozitesi sağlayabilmek adına yığının karıştırılmasının yanısıra hacim arttırıcı madde eklemesi yapılabilmektedir. Bununla birlikte, hacim arttırıcı maddeler, hacim ağırlığını azaltmak için de kompostlaştırma proseslerinde kullanılırlar. Fıstık kabuğu, yaprak, saman, ağaç kabuğu, mısır koçanı, kağıt, yonga ve talaş gibi çeşitli maddeler hacim arttırıcı olarak kompostlaştırma sürecinde araştırılmıştır. Bu materyaller arasında nem emme kapasitesi, kullanım kolaylığı ve karbon içeriği gibi bazı önemli avantajları nedeniyle yonga yaygın olarak kullanılmaktadır. Hacim arttırıcı madde ayrıştığında hava akımı için kullanılabilir hacimde azalmalar olmaktadır (Ölmez, 2013; Öztürk ve ark., 2015).

2.6. Kompostlaştırma Teknikleri

Kompostlaştırma prosesi katı atıkların bertarafında uygulanan ideal, alternatif bir yöntem olup dünya genelinde farklı modellemeleri kullanılmaktadır. Kompostlaştırma prosesi, genel olarak açık ve kapalı sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Seçilen yöntem kaliteye, sermaye yatırımına, işgücü yatırımına, zaman yatırımına, yönetim tercihlerine, operatör becerilerine, arazi ve hammadde mevcudiyetine bağlıdır. Açık ve kapalı sistemlerde işletme şartlarına, kullanılan makine ve ekipmanlara göre kendi içinde dallara ayrılmaktadır. Büyük ölçekli kompostlaştırmada kullanılmak üzere geliştirilmiş dört kompostlaştırma yöntemi, pasif yığınlar, aktarmalı yığınlar, havalandırılmış statik yığınlar ve kapalı reaktör sistemlerdir (Graves, 2000; Michel ve ark., 2021). Kompostlama yöntemleri aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli kriterlere göre kategorilere ayrılabilir:

- Havalandırma türü (pasif, basınçlı)
- Sınırlama seviyesi (açık, örtülü, reaktör)
- Karıştırma derecesi (statik, döndürme)
- Malzeme hareketi (kesikli, sürekli)

2.6.1. Pasif olarak havalandırılmış statik yığınlar

Pasif olarak havalandırılmış statik yığın yöntemi ile kompostlaştırma için doğal ayrışma, konvektif havalandırma ve kompost oluşumu için uzun bir süre geçmesi gerekir. C/N oranını, nem içeriğini, yığın yapısını, yığın gözenekliliğini ve yoğunluğunu ayarlamak için birkaç defa hammadde birleştirilebilir. Ancak, bir yığın oluşturulduktan sonra, genellikle aylarca yığın bozulmadan bırakılır ve daha sonra nadiren döndürülür.

Pasif olarak havalandırılan bir yığında, havalandırma öncelikle termal konveksiyonla sağlanır. Kompostlaştırma sırasında üretilen ısı, malzemelerin içindeki gazların sıcaklığını artırır. Sıcak gazlar kompost kütesinden yükselir ve yığının tabanında veya yanlarında daha düşük bir basınç oluşturur. Serin ve temiz hava daha sonra yığın yan yüzeylerinden derinlere doğru hareket eder. Havalandırma oranı, iç gaz ile ortam

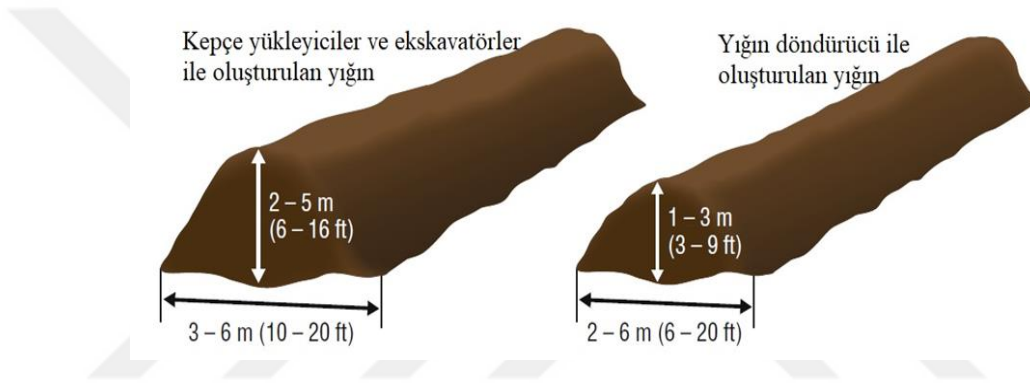
havası arasındaki sıcaklık farkı, gaz bileşimi ve kompostlaştırma ortamı tarafından sunulan hava akışına karşı gösterilen direnç ile belirlenir. Bu nedenle, güvenilir pasif hava hareketi, termal konveksiyonu harekete geçiren ısıyı yaratmak ve süreç boyunca yığında gözenekli bir fiziksel yapıyı koruyarak elde edilir. İyi havalandırılmış bir pasif kompost yığını için yığın hacminin yaklaşık yarısı sıvı içermeyen hava porozitesinden oluşmalıdır (Haug, 1993; Veeken ve ark., 2003).

Statik yığınlar yalnızca pasif hava hareketine bağlı olduğundan, aerobik koşulların korunması oldukça zordur. Yığınlar büyüdükçe ve yoğun hammaddeler dahil edildiğinde zorluk artar. Oksijen difüzyonu ve hava hareketleri, sıkıştırılmış malzemelerin büyük kütleleri ile kısıtlanır (Shell, 1955; Fogiel, 1998). Bu nedenle, büyük pasif yığınların çekirdeğindeki oksijen konsantrasyonları düşük olma eğilimindedir (hacimce <%1 oksijen). Normal olarak, aerobik koşullar, yığın yüzeyinden yalnızca bir metre veya birkaç fit uzakta ve belki de yığın içinde oluşan hava kanalları boyunca mevcuttur. Kompost yığını iyi bir yapıya, geniş bir hava porozitesine ve düşük kütle yoğunluğuna sahip olup homojen ise oksijen dağılımı iyileşir. Hammaddeler ayrışıp giderek daha az oksijen talep ettikçe, aerobik koşullar giderek daha derine nüfuz eder (Michel ve ark., 2021b).

Pasif olarak havalandırılmış statik yığın yöntemi ile kompostlaştırmada önemli faktör zamandır. Pasif olarak havalandırılmış statik yığınlarda iç kısımlardaki düşük oksijen içeriği ve malzemelerin nadiren döndürülmesi nedeniyle kompostlaştırma süreci yavaş ilerler. Sadece iki veya üç kez döndürülen büyük pasif yığınlar, olgun kompost üretmek için 6 aya ihtiyaç duyar. Döndürme olmadan, büyük yığınlardan kompost hasadı için 1 yıl veya daha fazla süre beklemek gerekebilir. Uzun kompostlaştırma periyodu nedeniyle önemli bir diğer faktör alan ihtiyacıdır. Alan gereksinimi daha büyük yığınların kapasitesi ile bir miktar azaltılsa da sahanın bir veya daha fazla yıl kısmen kompostlanmış hammaddeyi tutacak kadar geniş bir alana sahip olması gerekir (Michel ve ark., 2021b).

Çoğu statik yığın basitçe bağımsız yığınlardır. Bu yığınların boyutu ve konfigürasyonları, hammaddelere ve operatörlerin bunları nasıl yönetmeyi seçtiğine

bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Yığınlar, genellikle 2-5 m arasında değişen, orta veya nispeten büyük olma eğilimindedir. Normal olarak, bağımsız bir yığının genişliği, yüksekliğinin iki katından biraz daha azdır (Şekil 2.6). Bununla birlikte, daha geniş uzatılmış yığınlar da kullanılmaktadır. Yüksekliği 10 metreyi aşan son derece büyük pasif yığınlarda kompost makineleri kullanılır. Bu aşırı büyük yığınlar, yüksek yangın riski oluşturmaktadır. Belirli bir işletim için uygun yığın boyutu, hammaddelere, istenen kompostlaştırma süresine ve diğer yönetim ve saha faktörlerine bağlıdır. Yığın yüksekliği, kısmen yığını oluşturmak için kullanılan ekipmanın erişimiyle sınırlıdır (Öztürk ve ark., 2015; Michel ve ark., 2021b).



Şekil 2.6. Tipik yığın şekilleri ve boyutları

Pasif yığınlarla kompostlaştırma işlemi genellikle küçük ve orta büyüklüklerdeki yerleşim yerleri için uygundur. Bu yaklaşım en iyi şekilde yapraklar, çalılar, ağaç kabuğu, talaşlar ve at ahır yatakları gibi çiftlik artıkları gibi yavaş yavaş ayrışan hammaddeler için kullanılır. Ayrıca, hayvan ölümlerini kompostlaştırmak için kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu sistemde, organik maddelerin doğal hava hareketlerinden yararlanması için küçük yığınlar halinde tasarlanır. Bu yığınlar olgunlaşmaya kadar karıştırılmadan bekletilir. Pasif kompostlaştırmanın dezavantajı, yığın kontrol edilemediği durumda yani yığın çok fazla ısındığında veya sıkıştığında anaerobik koşullar başlar ve koku problemi oluşur (Ölmez, 2013; Michel ve ark., 2021b).

Statik yığın yöntemi, zaman ve alan mevcutsa ve kokular kontrol edilebilirse kompostlaştırma için ekonomik ve başarılı bir yaklaşım olabilir. Pasif

kompostlaştırma yöntemi, minimum işçilik ve ekipman gerektirir. Yığınlar döndürüldüğünde veya hareket ettirildiğinde koku sorunları potansiyeli artar. Bununla birlikte, pasif olarak havalandırılmış statik yığınlarda hayvan ölümlerini kompostlaştırmanın başarısı, kokuların etkili bir şekilde yönetilebileceğini göstermektedir. Özellikle ağaç yaprakları gibi neredeyse tamamen yılın belirli bir zamanında açığa çıkanlar olmak üzere birçok hammadde için uzun bir kompostlaştırma döngüsü pratik olabilmektedir. Bu durumda, malzeme 1,5 yıl boyunca kompostlaşmaya devam edebilir. Daha sonra kompost, sonbaharda gelen yapraklara yer açmak için ilkbahar ve yaz aylarında satılabilir veya saha dışına taşınabilir.

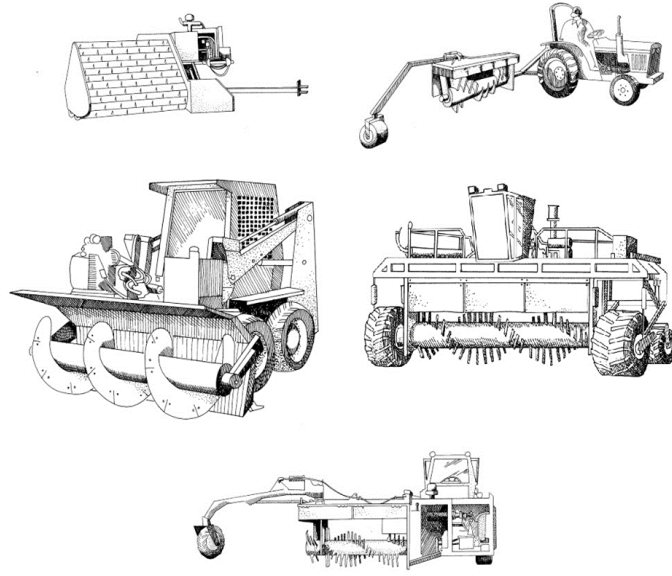
2.6.2. Aktarmalı yığında kompostlaştırma

Aktarmalı yığın kompostlaştırma en çok kullanılan kompostlaştırma yöntemlerinden biridir. Aktarmalı yığın kompostlaştırmada uzun dar yığınlar halinde organik hammadde karışımları yerleştirilir ve düzenli olarak karıştırılır (Şekil 2.7). Yığınlar genellikle hakim rüzgar yönüne dik açıda ve sahanın eğimine paralel olarak oluşturulur. Birçok saha, yığınlara yıl boyunca yapılacak işlemlere izin veren beton veya asfalttan oluşan iyileştirilmiş bir yüzeyden oluşur. Diğer alanlar, iyi drene edilmiş açık arazilerdir. Aktarmalı yığın kompostlaştırma için aktif kompostlaştırma aşaması, besleme stoklarına, dönüş aralıklarına ve kompostun kullanım amacına bağlı olarak tipik olarak 8 - 16 hafta sürer. Tipik bir yığın yaklaşık 6 - 8 kez döndürülür (Öztürk ve ark., 2015; Öztürk, 2017; Kabak, 2021).



Şekil 2.7. Yığın kompostlaştırma

Bu sistemde yığınlar alt-üst edilerek karıştırılır. Bu karıştırma sayesinde yığının gözenekliliği artar ve hava girişi sağlanır. Dahası yığın homojen bir yapıya bürünür ve yığın eşit bir şekilde kompostlaşabilir. Çok fazla karıştırma ise partikül boyutunu fazlasıyla düşüreceğinden gözenekliliği azaltır. Bu durum, yığına hava girişinin engellenmesini dolayısıyla sürecin verimi azaltır. Yığını çevirme işleminde kullanılan ekipmanlar yığının büyüklüğünü, şeklini ve yığınlar arası mesafeyi belirler (Bayındır, 2021). Tesisin büyüklüğüne göre kullanılan makinenin türü de değişiklik göstermektedir. Küçük ve orta ölçekli tesislerde önden yüklemeli iş makineleri kullanılırken, orta ve büyük ölçekli tesislerde özel çevirme ekipmanları kullanılmaktadır (Şekil 2.8) (Rynk, 1992).



Şekil 2.8. Yığın kompostlaştırmada kullanılan iş makineleri (Rynk, 1992)

Yığınlar öncelikle pasif hava hareketiyle havalanır (Michel, 1999). Hava değişim hızı, yığın boyutu, hammadde özellikleri ve ortam sıcaklıklarıyla ilgili olarak yığının gözenekliliğine ve sıcaklığına bağlıdır. Küçük yığınlar hızla ısı kaybederler ve nemi buharlaştırmak, patojenleri ve yabancı ot tohumlarını öldürmek için gerekli olan sıcaklıklara ulaşamayabilirler. Yığın yükseklikleri tipik olarak 1 - 2 m arasında değişir ancak 3-4 m'ye kadar yüksek olabilir. Genişlik, kısa yığınlar için 3 m, büyük makinelerle döndürülen yığınlar için 8 m'ye kadar büyük ölçüde değişir. Üçgen veya parabolik şekilli aktarmalı yığınlar, yüksek olduklarından kabaca iki kat daha geniş olma eğilimindedir. Yamuk yığınlarının genişliği, döndürme ekipmanı tarafından belirlenir. Prensip olarak, bir yığın, dönüşler arasında yüzeyden merkeze, ortam konsantrasyonunda (%20,9) başlayan ve yalnızca tam merkezde %1-2'ye ulaşan bir oksijen konsantrasyonu gradyanı oluşturacak şekilde boyutlandırılmalıdır. Düşük oksijen konsantrasyonlarına merkezden çok önce ulaşırsa, malzemenin büyük bir kısmı anaerobiktir ve döndürüldüğünde koku salınımı muhtemeldir. Yığının merkezindeki oksijen konsantrasyonlarını %5-6'da tutmak, genellikle kompostlaştırma sürecini hızlandıracaktır (Michel ve ark., 2021b).

Kompostlaştırma sürecinde yığınlar küçülmeye başladığında, yerden tasarruf etmek ve ısıyı korumak için birleştirilebilirler. Daha sonra ara sıra bir kepçeli yükleyici, beko

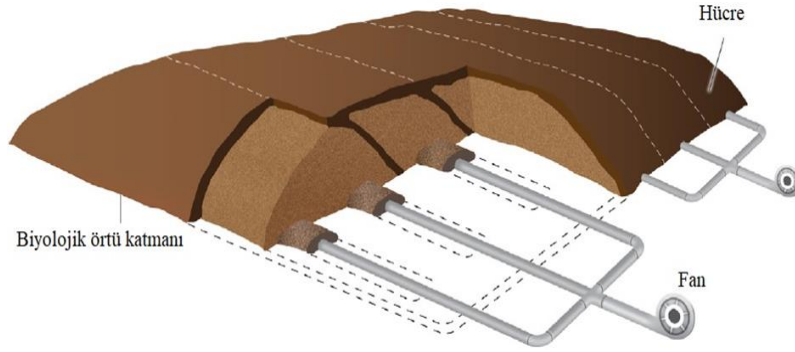
veya ekskavatör ile döndürülebilirler. Bu tür dönüşler, kompostörün durumuna bağlı olarak ayda bir veya yılda sadece iki veya üç kez olabilir. Her dönüş biyolojik aktiviteyi uyarır ve tek tip stabil bir kompost ürünü üretmek için gereken süreyi azaltır. Yığınların ara sıra ve zamanında döndürülmesi ve ayrıca gerektiğinde su eklenmesi yangınları önler ve yüksek kaliteli kompostla sonuçlanabilir (Graves, 2000).

2.6.3. Havalandırmalı statik yığında kompostlaştırma

Statik yığınların pasif havalandırması zordur. Oksijen dağılımını iyileştirmek için bazı kompostlaştırma teknikleri, hava akışını yığının daha derinlerine yönlendirmek için borular ve hava plenumları gibi havalandırma yardımcılarını kullanır (De Silva ve Yatawara, 2017).

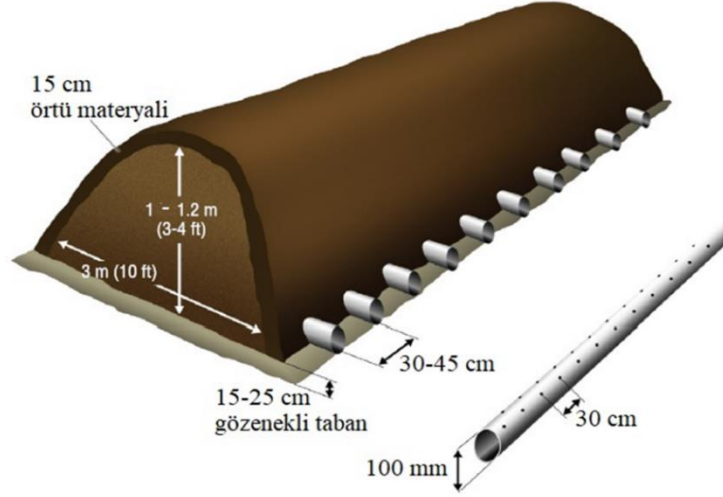
Havalandırmalı statik yığınlarda kompostlaştırma açıkta veya üzeri sundurma ile kapatılmış yerlerde yapılmaktadır. Havalandırma sistemi ise pasif havalandırma ve basınçlı havalandırma olarak yine iki farklı şekilde yapılmaktadır. Pasif havalandırmalı statik yığınlarda, yığının içine gömülü ve bir ucu açık delikli borular vardır. Yığındaki sıcak gazlar yukarı doğru çıkarken borularla yığın içerisine taze hava girişi olur ve yığından yukarı doğru salınır. Basınçlı havalandırma sistemlerinde ise negatif (emme) ve pozitif (basınçlı) havalandırma yapılmaktadır. Negatif basınçlı sistemler genellikle koku sorununu önlemek için tercih edilir. Koku kontrolü emilen havanın biyofiltreye verilmesi ile gerçekleşmektedir. Basınçlı havalandırma sistemleri kompost sürecinin kontrolünü ve daha büyük kompost yığınının oluşmasına olanak sağlar (Rynk, 1992; Michel ve ark., 2021b).

Havalandırmalı statik yığın yöntemi, hammaddelerin homojen ve nispeten düşük yoğunluklu bir karışımını, delikli borular veya gözenekli bir tabanı, nemi emmek ve yığını yalıtım için saman, talaş veya kompost gibi kararlı emici malzemeden bir taban tabakasını ve ısıyı, nemi, kokuları ve amonyağı tutan en az 15 cm kalınlığında, sağlam, kaba malzemeden bir dış katmanı içermektedir. Yığının genişliği boyunca birbirine paralel uzanan bir dizi delikli plastik boru aracılığıyla yığının içine hava verir (Şekil 2.9-2.10).



Şekil 2.9. Havalandırılmalı yığın kompostlaştırmanın şematik gösterimi

Borular, boruların açık uçları yığının yanlarının ötesine uzanacak şekilde emici taban üzerinde durur. Önceden karıştırılmış kompostlaştırma besleme stokları, tipik olarak 1-2 m olmak üzere istenen yüksekliğe kadar havalandırma borularının üzerine yerleştirilir. Örtü tabakası daha sonra yığının üzerine yerleştirilir. Ardından yığın, döndürülmeden birkaç hafta ila birkaç ay boyunca yerinde kompostlanır. Eğer yığın döndürülürse, borular kalıcı olarak çıkarılır (Patni, 2000; Michel ve ark., 2021a).



Şekil 2.10. Havalandırılmalı yığın kompostlaştırma detayları

2.6.4. Kapalı reaktörde kompostlaştırma

Kapalı reaktörde kompostlaştırma organik maddeleri kapalı bir yapı veya reaktör içerisinde ayrıştırmaya işlemidir. Reaktör tabanlı sistemler katı akışına göre dikey veya yatay akışlı reaktörler olarak sınıflandırılır. Bununla birlikte, akışsız, yığınla

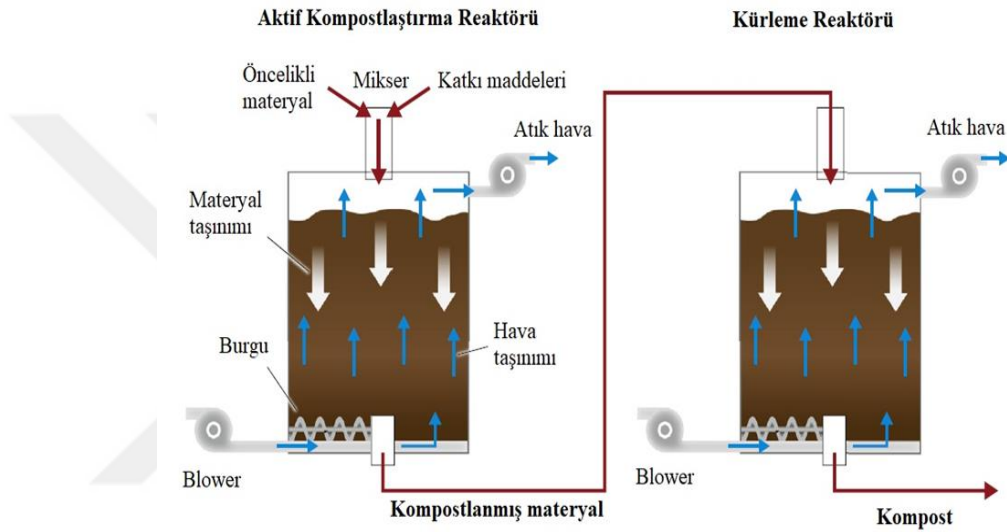
alışan kompost “kutularını” kullanan bir dizi kompostlaştırma yöntemi vardır. Reaktör tabanlı sistemler hem işleme hızını hem de kompost kalitesini artırmak için tercih edilmektedir. “Kap içi (in-vessel)” veya “reaktör” terimi genellikle bu sistemler için kullanılır. Sistem plastik/metal kutu, beton tank veya kap olabilir (Haug, 1993; Manyapu ve ark., 2018).

Diğer yöntemlere göre süreç daha iyi kontrol edilmektedir ancak ilk yatırım maliyeti oldukça fazladır. Kompost sürecini hızlandırmak için basınçlı havalandırma ve mekanik çevirme işlemleri uygulanmaktadır. Mekanik sistemler, ortam koşullarını (oksijen konsantrasyonu, sıcaklık, hava akımı) kontrol etmek, süreyi kısaltmak ve kokuyu azaltmak için kullanılmaktadır. Diğer yöntemlere nazaran kapalı reaktörde kompostlaştırma daha az arazi ve işçi gereksinimi yönünden tercih edilmektedir. Günümüzde aktif kompostlaştırma (hızlı fermantasyon) kapalı reaktörlerde uygulanırken, yavaş kompostlaştırma için yığın metodu uygulanmaktadır. Aktif kompostlaştırma için gerekli süre yaklaşık 1-2 hafta iken kompostun olgunlaşması için 4 - 12 hafta gerekmektedir (Bayındır, 2021; Michel ve ark., 2021c).

2.6.4.1. Silo tipi reaktör

Silo tipi reaktör, üstten besleme yapılıp alttan burgu yardımıyla kompost ürünün dışarı alındığı bir tahıl silosuna benzeyen dikey olarak konumlanan bir reaktördür (şekil 2.11). Her gün bir burgu, kompostu silonun tabanından ikinci aşamaya geçer ve daha sonra hammaddeler st kısımdan yüklenerek silodan ayrılan malzemenin yarattığı boşluğu doldurur. Malzemeler kapta çok az karıştırıldığından, besleme stokları bu sistemlere yüklenirken önceden karıştırılmalı ve uygun şekilde boyutlandırılmalıdır. Bazı sistemler havalandırma için fanları kullanırken, diğerleri pasif havalandırma ile çalışır. Fan kullanıldığında, silo tabanından hava verilir. Atık hava, silonun st kısmından toplanır. Siloda çeşitli derinliklerde sıcaklıklar izlenir. Silo tipi reaktörlerde kompostlaştırma süresi 14 gün olup her gün reaktörün on dörtte biri fermantasyon ürünü olarak reaktörden uzaklaştırılmaktadır. Bu işlemden sonra atık ikinci bir siloda olgunlaştırmaya bırakılır. Bu sistemler dikey konumda bulunduğu için gerekli alan miktarını azalmaktadır. Atık reaktörde karıştırılmadığı için yüklenmeden önce atığın

iyice karıştırılmasına dikkat edilmelidir. Bu tür sistemler için kompostlaştırma süreleri 14 - 28 gündür, bu nedenle sürekli modda çalıştırılırsa silo hacminin 1/14 - 1/28'i tipik olarak çıkarılır ve günlük olarak değiştirilir. Sıkıştırma, sıcaklık kontrolü, sızıntı suyu, malzeme hareketi ve hava dağıtımı ile ilgili zorlukları bulunmaktadır. Silo içindeki kompost malzemelerine erişimin olmaması başka bir endişe kaynağıdır. Kabın içinde düşük nem veya sıcak nokta gibi bir komplikasyon gelişirse, içeriğin tamamı çıkarılması gerekir (Öztürk ve ark., 2015; Michel ve ark., 2021c).



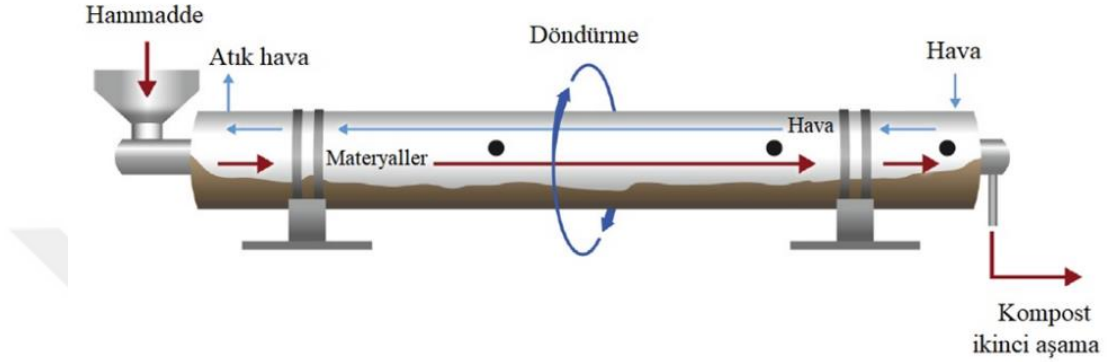
Şekil 2.11. Silo tipi kompostlaştırma prosesine ait şematik görünüm

2.6.4.2. Döner tambur reaktör

Döner tamburlu reaktörler, 20. yüzyılın ortalarında Dano ve Eweson tamburlarından başlayarak, kentsel katı atıkları kompostlaştırmak için uzun süredir kullanılmaktadır. Gübre, hayvan ölümleri, bahçe kırpıntıları, kaynakla ayrılmış organik maddeler ve gıda artıkları dahil olmak üzere çeşitli hammaddelerin kompostlaştırılması için artık birçok durumda bulunurlar. Kompost karışımı tüpün üst kısmına yüklenir (Haug, 1993).

Bu sistemde hammaddeyi havalandırmak, karıştırmak ve sistem içinde taşımak için dönen tambur kullanılmaktadır. Tank büyük bir rulmana monte edilmiştir ve dişli ile döndürülür. Bu sistemde üretilen kompost, aktarmalı yığın veya havalandırmalı statik

yığında 1 - 3 ay arasında olgunlaşmaya tabi tutulmalıdır (Öztürk ve ark., 2015). Hava, hammaddenin gidiş yönünün tam tersi gidiş yönüne doğru verilir. Deşarj yakın kompost taze hava ile soğutulmaktadır. Silonun tam ortasında ısınmış hava, komposta nüfuz eder ve yeni beslenen hammadde işlemi başlatmak için yüksek sıcaklıktaki hava ile temas eder (Şekil 2.12) (Graves, 2000; Michel ve ark., 2021c).



Şekil 2.12. Döner tambur reaktör şematik gösterimi

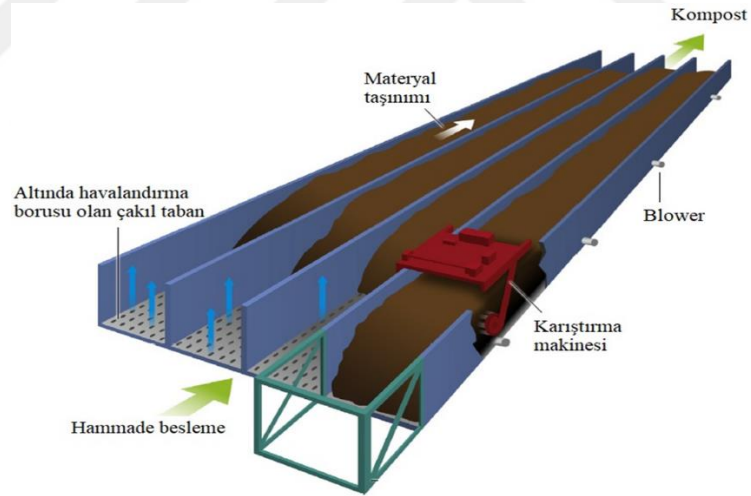
Tambur bölmeli veya bölmesiz olarak iki farklı şekilde çalıştırılabilir. Bölmesiz tambur aralıksız olarak hammaddeyi nakleder. Bekletme süresi tamburun dönme hızı ve dönen eksenin eğimine bağlı olarak değişmektedir. Bölmeli tamburlarda ise bölmesiz tambur kompostlaştırmaya göre daha etkili bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Tank iki veya üç kısma ayrılabilir. Bölmeler arası transfer kapıları bulunmaktadır. Gün sonunda tamburun deşarj tarafındaki kapı açılır, içeriği boşaltılır. Daha sonra diğer bölmeler tek tek açılarak boşaltılır. Tamburun boşaltma işlemi bittikten sonra birinci bölme tekrar hammadde ile doldurulur. Beton karıştırıcılar, besleme karıştırıcıları ve eski beton fırınları gibi eldeki teçhizatlar kullanılarak daha küçük kompost tankları oluşturulabilir. Bu sistemler, ticari modellere göre daha basit olmasına karşın aynı işlevi görmektedir (Öztürk ve ark., 2015).

Biyolojik katılar için kullanılan ticari ölçekli reaktörler çok büyüktür, çapı 3-4 m ve uzunluğu 40 m'ye kadar olabilmektedir. Bu büyüklükteki bir varil, 3 günlük kalma süresi ile günde yaklaşık 45 ton kapasiteye sahiptir. Küçük ölçekli uygulamalar için kullanılan tamburların boyutları 1,5-3 m çapında ve 3-15 m uzunluğunda değişir. Sadece birkaç istisna dışında, döner tamburlar birinci aşama kompostlaştırma olarak

kullanılır. Döner tamburlar için kalma süresi tipik olarak 3-5 gün aralığındadır. Tamburdaki süre kısa olmasına rağmen, bu sistemin yüksek sıcaklıkları ve sürekli çalkalanması ayrışmayı hızlandırır (Michel ve ark., 2021c).

2.6.4.3. Dikdörtgen yataklar

Bu sistemde hem düzenli olarak karıştırma hem de kontrollü havalandırma yapılmaktadır. Kompostlaştırma işlemi yatak olarak adlandırılan uzun ince kanallar içinde gerçekleşmektedir. Karıştırma işlemi duvarlar üzerine oturtulan döndürme mekanizmaları ile yapılmaktadır. Karıştırmalı yatak sisteminde bir yükleyici yardımıyla atıklar yatağın ön kısmına yerleştirilir. Karıştırıcılar ray üzerinde ilerlerken hem kompostlaştırılabilir malzemeyi karıştırır hem de ileri doğru taşır. Kompostlaştırılabilir malzeme karıştırıcının dönen bandı sayesinde daha küçük parçalara da dönüştürülmüş olur (Şekil 2.13) (Öztürk ve ark., 2015).



Şekil 2.13. Karıştırmalı dikdörtgen yatakların genel özellikleri

Ticari olarak kullanılan karıştırmalı dikdörtgen yatakların çoğu havalandırma borularından ya da yatak tabanına gömülmüş ve üzeri ızgara veya çakılla kapatılmış havalandırma sistemlerinden oluşur. Kompost karıştırma sırasında üfleyicilerle havalandırılarak soğutulur. Yataklar farklı havalandırma bölgelerine ayrılmıştır ve bir yatakta birkaç üfleyici kullanılmaktadır. Reaktördeki hava miktarı, sıcaklık sensörü ve zaman ayarlayıcı ile kontrol edilmektedir. Sistemin kapasitesi yatakların uzunluğuna

ve yatak sayısına bağılı olarak değışebilmektedir. Piyasadaki sistemlerde genel olarak yatak genişliğı 1,8 - 6 m arasında, derinliğı ise 0,9 - 3 m arasında değışmektedir. Karıştırıcılar duvar üzerinde hareket ettiğinden iki duvar arasındaki mesafe yatak boyunca eşit olmalıdır. Yatakların karıştırıcıların boyutları ile uyumlu olması gerekmektedir. Karıştırmalı dikdörtgen yatak sisteminde birden fazla yatak kullanılabilir. Karıştırıcıyı bitişik yataklar arasında transfer edecek bir sistem varsa, tek bir karıştırıcı birden fazla yatakta kullanılabilir. Ekipmanı korumak ve kompostlaştırma için uygun şartları sağlamak için yatakların üzeri kapatılmaktadır. Kompostlaştırma süresi yatak uzunluğı ve karıştırma sıklığına göre belirlenir. Karıştırıcılar her döndüğünde kompostlaştırılabilir malzemeyi 3 m ileri taşır. Yatağın boyu 30,5 metre ise günde bir sefer karıştırma ile 10 günde kompostlaştırma gerçekleştirilmiş olur. Ticari sistemler için önerilen kompostlaştırma süresi 2 - 4 haftadır (Öztürk ve ark., 2015).

2.6.4.4. Kutu kompostlaştırma yöntemi

Kutu kompostlaştırma belki de en basit reaktör bazlı kompostlaştırma yöntemidir. Malzemeler duvarlar ve genellikle bir çatı tarafından tutulur. Deponun kendisi basitçe ahşap çitallı duvarlar (çatılı veya çatısız), bir tahıl ambarı veya bir toplu depolama binası olabilir. Binalar veya çöp kutuları, malzemelerin daha fazla istiflenmesine ve serbest duran yığınlardan daha iyi zemin kullanımına izin verir. Kutular ayrıca hava sorunlarını ortadan kaldırabilir, kokuları içerebilir ve daha iyi sıcaklık kontrolü sağlayabilir. Esasen, kutu kompostlaştırma yöntemi, havalandırmalı statik yığın yöntemi gibi çalışır. Bunlar, tankın tabanında bazı zorunlu havalandırma araçları bulundurur. Hammadde çok az döndürölür veya hiç döndürölmez. Kutulardaki malzemenin ara sıra karıştırılması süreci canlandırabilir. Birkaç kutu kullanılıyorsa, kompostlaştırma malzemeleri periyodik olarak bir kutudan diğetine art arda taşınabilir. Havalandırılmış yığın için önerilen ilkelerin ve yönergelerin çoğı, bu sistem için de geçerlidir. Nispeten yüksek kutular, havanın transferi için daha fazla sıkıştırma derecesi ve daha fazla malzeme derinliğı gerektirir (Rynk, 1992).

2.6.4.5. Vermikompost yöntemi

Vermikompostlama, solucan aktivitesi ile organik atıkların stabilizasyonu yoluyla vermikompost üretimini içeren kompostlaştırmada nispeten yeni bir yöntemdir. Mikroorganizmalar, organik maddenin biyokimyasal ayrışmasına neden olan enzimleri üretir, ancak solucanlar, taze organik maddenin parçalanması ve yutulması yoluyla mikrobiyal popülasyonların dolaylı olarak uyarılmasında yer aldıkları için, proses aktivitesinin önemli itici güçleridir (Lazcano ve ark., 2008).

Bu, mikrobiyal kolonizasyon için daha büyük bir yüzey alanı ile sonuçlanır, böylece mikrobiyolojik aktivite önemli ölçüde artar. Son 30 yılda, mezofilik bir süreçte organik katı atıkları parçalamak için solucanların kullanımını içeren vermikompostlama olarak adlandırılan sürece ilgi giderek artmıştır (Huang ve ark., 2004; Mohee ve Soobhany, 2014; Emperor ve Kumar, 2015).

Bireysel süreçlerin doğasında var olan sınırlamalar nedeniyle, kompostlaştırma ve vermikompostlamanın birlikte entegrasyonu, sürecin kısılması, patojen azaltımı ve daha iyi ürün kalitesi elde etmenin yanı sıra çeşitli atıkların stabilizasyonu için giderek daha fazla ilgi görmektedir (Ndegwa ve Thompson, 2001; Nair ve ark., 2006; Lazcano ve ark., 2008). Bununla birlikte, entegre sistemin, substrattaki besin maddelerinin mevcudiyetini arttırma ve ağır metallerin mevcudiyetini azaltma kabiliyetine sahip olduğu tahmin edilmektedir. Vermikompost, solucan gübresi olarak da adlandırılmaktadır. Vermikompostlama için uygun solucan seçimi, atık stabilizasyon oranını etkilediği için en önemli adımdır. Atık yönetimi ve çamur stabilizasyon uygulamalarında kullanılabilecek potansiyele sahip çok sayıda solucan türü bulunmaktadır. Organik atıklarını doğal olarak kolonileştirme yeteneğine sahip, yüksek oranda organik madde tüketimi, sindirim ve asimilasyon yapabilen, çok çeşitli çevresel stresleri tolere edebilen, çok sayıda koza üreterek üreme oranları yüksek, kuluçka süresi kısa, hızlı yavruların yetişkinlere büyüme ve olgunlaşma hızları vermikompostlama sürecinde kullanılmaya uygundur (Domínguez ve Edwards, 2004; Smith, 2009; Reddy ve Pattnaik, 2009).

Çok az solucan türü tüm bu özellikleri sergiler ve aslında *Eisenia andrei* (Bouché), *Eisenia fetida* (Savigny), *Dendrobaena veneta* (Savigny) ve daha az ölçüde *Perionyx excavatus*'un (Perrier) ve *Eudrilus eugeniae* (Kinberg). Vermikompostlanma işleminde sadece beş tanesi yaygın olarak kullanılmıştır. Araştırmalar, birçok organik atığın *Eisenia*, *Eudrilus*, *Dendrobaena*, *Perionyx* ve *Pheretima* cinsi solucan türlerinin büyümesi ve üremesi için gerekli olan geniş mikroorganizma popülasyonlarını sağlayabildiğini göstermiştir (Mohee ve Soobhany, 2014). Vermikompost yönteminde yaygın olarak tercih edilen solucanlar *Eisenia fetida* türleridir. Bu solucanlar hızlı bir şekilde besinleri tüketirler. Bunun sonucunda ise daha kısa bir zaman diliminde gübre üretimi sağlanır. Adaptasyon yeteneği oldukça iyi olan bu solucan türleri farklı coğrafyalarda yaşayabilmektedir (Edwards ve Bohlen, 1996; Dominguez ve Edwards, 2011).

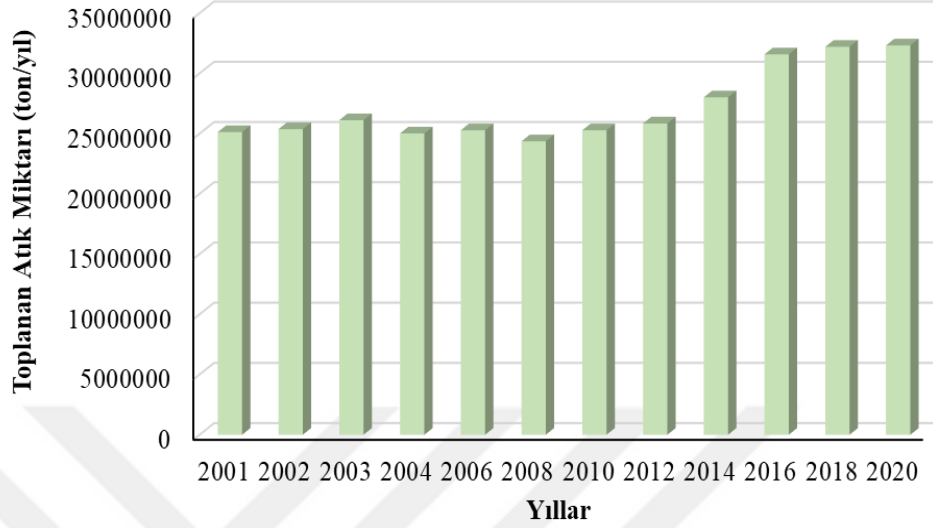
Vermikompost yönteminde kompost üretiminin en önemli aşaması solucanların mamasının doğru hazırlanmasıdır. Hazırlanma aşamasında mamanın fermentasyon işleminden geçmesi gerekmektedir (Tchobanoglous ve ark., 1993). Bu solucanların, sıcaklığın 0°C'nin altına düşmesi yaşamlarını tehdit ederken, 7-8°C arasında olduğunda ise kısıtlı yaşam sürdürebilmektedirler. En uygun yaşam şartları 15-25°C sıcaklıkları arasındadır. Kompostlaştırma süreci için ise ortam sıcaklık değerinin 15-30°C aralığında olması önerilir (Rostami ve ark., 2009).

Vermikompost üretiminde yığın kompostlaştırma, reaktör tabanlı sistemler gibi farklı yöntemler uygulanmaktadır. Prosesi maliyet, üretim amacı, iş gücü ve makine tercihlerinden etkilenmektedir.

2.7. Türkiye’de Kentsel Katı Atık Üretimi ve Bertarafı

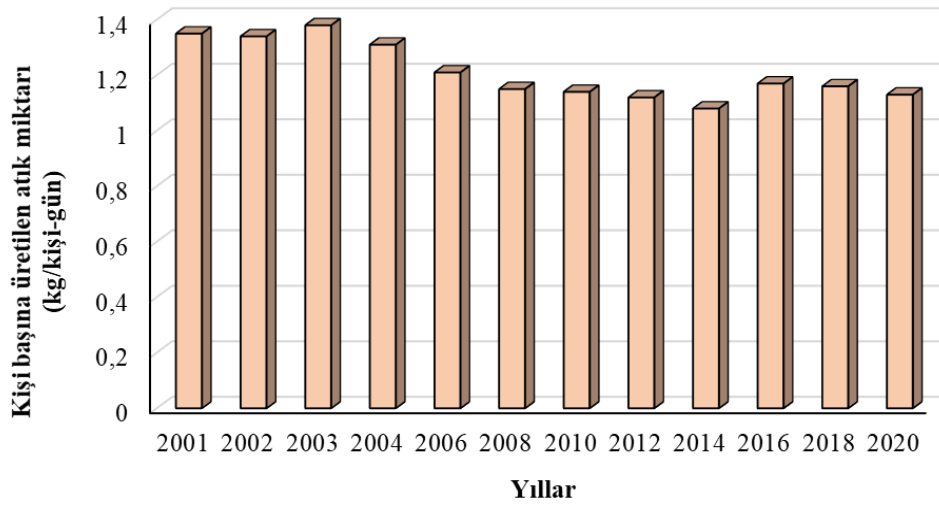
Türkiye’de üretilen atık miktarı da yıllara göre artış göstermiştir. Bu artışta, nüfusun artması ve teknolojinin gelişmesiyle ürün çeşitliliğinin ve tüketim alışkanlıklarının değişmesinin etkisi büyüktür. Şekil 2.14’te Türkiye’de toplanan atık miktarlarının yıllara göre değişimi gösterilmektedir (TÜİK, 2022). Şekilde görüldüğü üzere, toplanan atık miktarında yıllara göre değişimler olmakla birlikte genel bir artış

gözlennmektedir. Üretilen katı atık miktarı 2001 yılında yaklaşık 25 milyon ton iken, 2020 yılında %28 artarak yaklaşık 32 milyon ton'a ulaşmıştır.



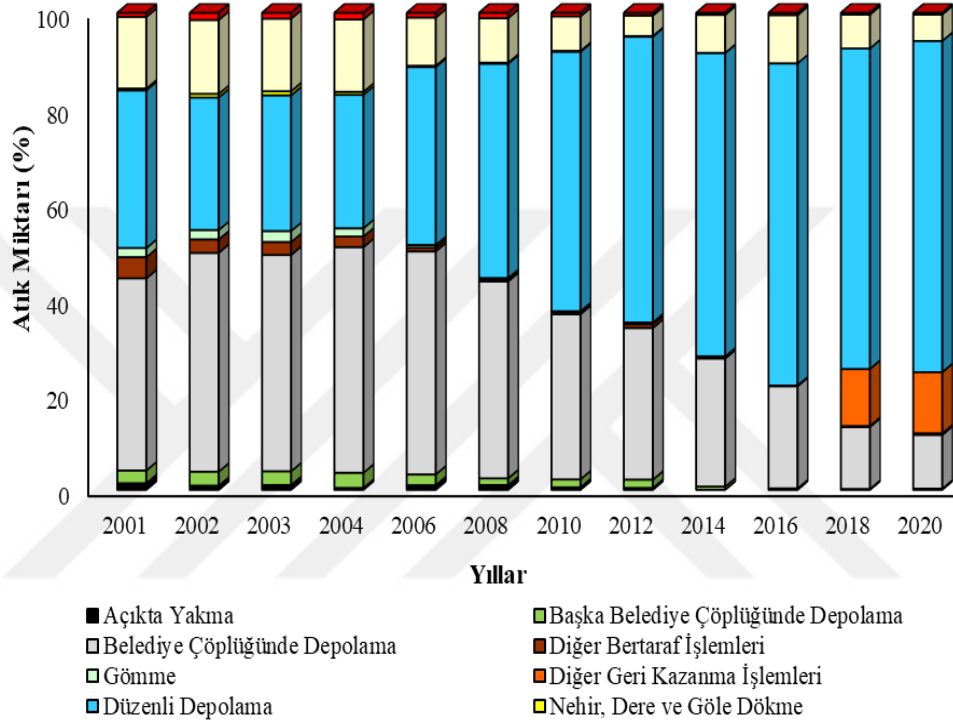
Şekil 2.14. Türkiye’de toplanan atık miktarı

Kişi başına üretilen atık miktarı da yıllara bağlı olarak değişim göstermekle birlikte genel bir azalma eğilimi söz konusudur. 2001 yılında kişi başına üretilen atık miktarı 1,35 kg/gün iken 2020 yılında 1,13 kg/gün’e düşmüştür. Türkiye genelinde kişi başına üretilen atık miktarı 19 yılda yaklaşık olarak %16 oranında azalmıştır. Şekil 2.15’de Türkiye genelinde kişi başına üretilen atık miktarının zamana bağlı değişimi verilmektedir (TÜİK, 2022).



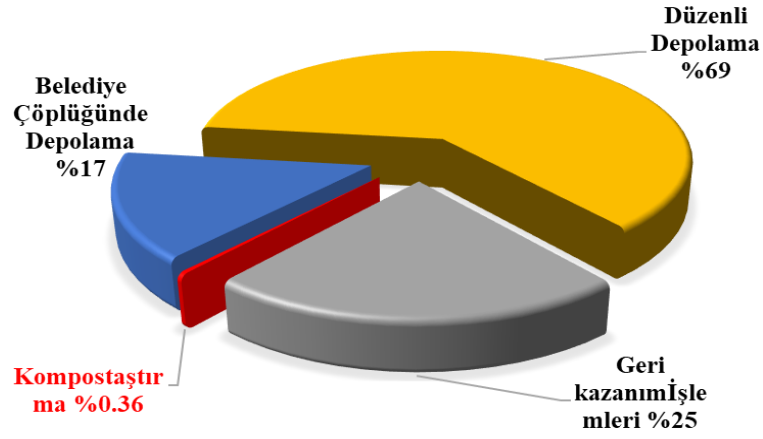
Şekil 2.15. Türkiye’de kişi başına üretilen atık miktarı

Ülke genelinde toplanan katı atıkların 2001-2020 yılları arasındaki bertaraf yöntemleri Şekil 2.16’da gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, 2001 yılından itibaren 2008 yılına kadar başlıca bertaraf yöntemi belediye ve başka belediye çöplüğüne dökme olmuştur. 2008 yılından sonra ise düzenli depolama yöntemi ile bertaraf edilen atık miktarında artış gözlenirken geri kazanım işlemleri 2018 yılında başlamıştır.



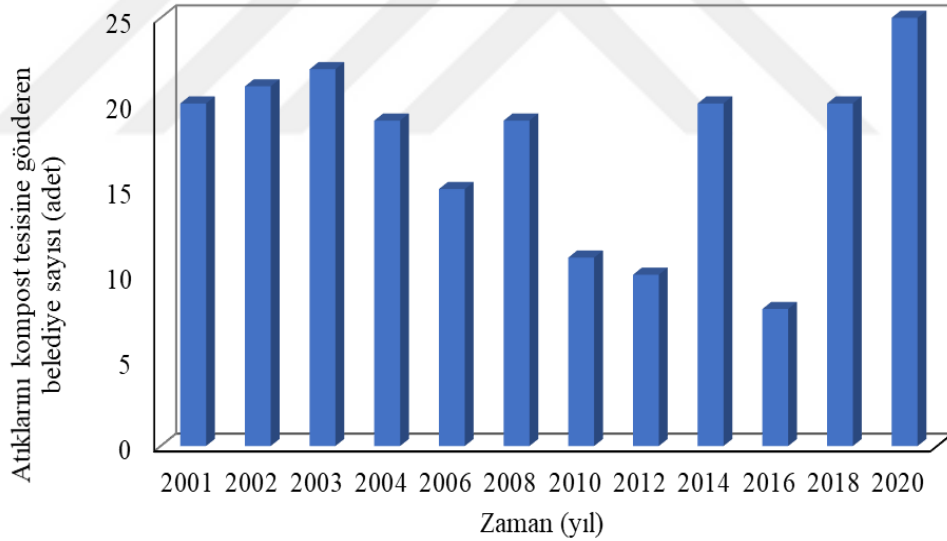
Şekil 2.16. Türkiye’de bertaraf yöntemine göre atık miktarının değişimi

Şekil 2.17’de Türkiye’de 2020 yılı başlıca atık bertaraf yöntemlerinin dağılımı verilmiştir (TÜİK, 2022). 2020 yılı verileri incelendiğinde ise başlıca bertaraf yönteminin düzenli depolama olduğu görülmektedir. Bu dağılım içerisinde kompostlaştırma yönteminin oldukça düşük bir orana sahip olduğu dikkat çekmektedir. Kompostlaştırma eski dönemlere dayanan ve toplulukların tarımsal faaliyetleri için uyguladığı bir yöntem olmasına ve son zamanlarda pek çok alternatif kompostlaştırma yöntemi gelişmesi rağmen ülkemizde bu bertaraf yöntemi oldukça geri planda kalmıştır.



Şekil 2.17. Türkiye’de 2020 yılı başlıca atık bertaraf yöntemleri

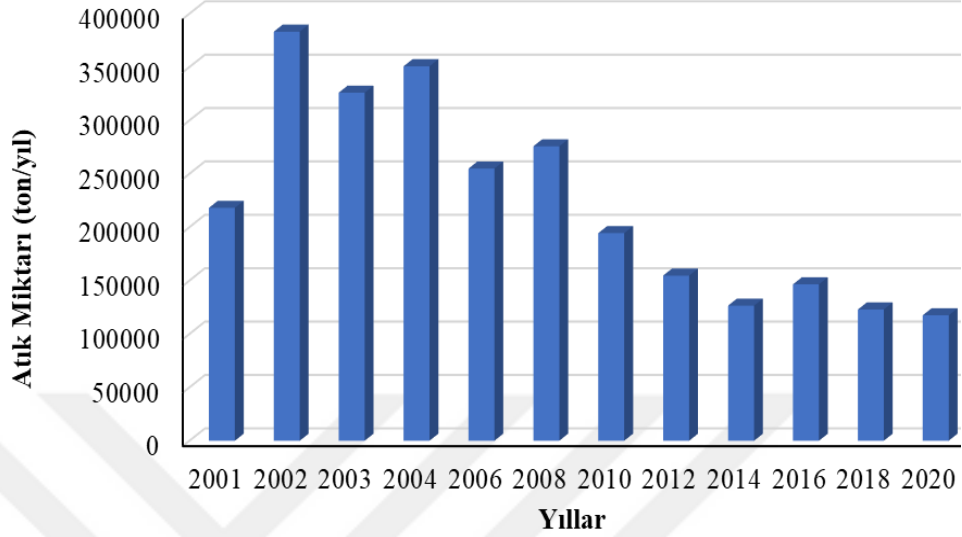
Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre Türkiye’de atıklarını bertaraf etmek amacıyla kompostlaştırma tesisine gönderen belediye sayısı Şekil 2.18’de verilmiştir (TÜİK, 2022).



Şekil 2.18. Türkiye’de atıklarını kompostlaştırma tesisine gönderen belediye sayısı

2001-2020 yılları arasındaki veriler incelendiğinde belediye sayısının bazı yıllarda oldukça azaldığı görülmekle birlikte 2020 yılında 25 belediye atıklarının kompostlaştırılmasını tercih etmiştir. Bununla birlikte, yıl bazında genel olarak belediye sayısında artış gözlenirken, kompostlaştırma ile bertaraf edilen atık miktarında ise ciddi bir azalma söz konusudur (Şekil 2.19). 2020 yılında maksimum belediye sayısına ulaşıldığında kompostlanan atık miktarı 117462 ton ile sınırlı

kalmıştır. İlgili şekillerden de görüleceği üzere 2002 yılında 21 belediye 383120 ton/yıl atığın kompostlaştırılmasını sağlamıştır.



Şekil 2.19. Türkiye’de kompostlaştırma tesisine gönderilen atık miktarı

2.8. Fındık Üretim Atıklarının Değerlendirilmesi

Kompostlaştırma sürecinde çoğu durumda, birincil besleme stoğu (hayvansal atıklar, biyo-katı maddeler gibi) yüksek nem içeriğine ve azot içeriği sahiptir. Bu nedenle, nem içeriği ve karbon/azot dengesinin sağlanabilmesi için yüksek karbon/azot oranına sahip kuru hacimli katkı maddeleri genellikle büyük talep görmektedir. Katkı maddelerinin genellikle dış kaynaklardan alınması gerektiğinden, maliyet ve bulunabilirlik önemli faktörlerdir (Rynk ve Schwarz, 2022).

Son zamanlarda, tarımsal atıklar, turba yosunu, toprak, biyokömür, zeolit, kireç ve uçucu kül gibi kompostlaştırma sürecinde kompostun kalitesini ve olgunluğunu artırmak için çeşitli katkı maddeleri kullanılmıştır (Aycan Dümenci ve ark., 2021; Li ve ark., 2021; Rynk ve ark., 2021; Yılmaz ve ark., 2022).

Dünyada tarımsal üretimin artmasıyla birlikte hem mahsul hasat atıklarının hem de organik tarım endüstrisi atıklarının miktarı her geçen yıl artmaktadır. Bu bitki kaynaklı atıklar, ciddi bir organik madde kaynağı olmasının yanı sıra bitki besin maddeleri

açısından da önemli bir potansiyele sahiptir. Küresel tarımsal atıkların en az üçte biri çevre açısından güvenli bir şekilde bertaraf edilmemektedir. Tarımsal atıkların bertarafı için açık depolama, düzenli depolama ve yakma yaygın olarak kullanılan yöntemleridir (Kaza ve ark., 2018). Ancak bu yöntemler, kontrolsüz atık ayrışımı ile karakterize edilir ve bu nedenle kolayca toprak, su ve havanın kirlenmesine yol açabilir (Hansen ve Cheong, 2019). Sonuç olarak, tarımsal atıkların bertarafı için kontrol edilebilir ve çevre dostu yaklaşımlara ilişkin artan ilgi bulunmaktadır (Qu ve ark., 2020). Tarımsal atıkların yönetiminde geri dönüşümü amaçlayan çevre dostu bir yöntem olan kompostlaştırma teknolojisi, kolay işletilmesi ve uygun maliyeti ile ön plana çıkmaktadır.

Bir kategori olarak, tarımsal artıkların kompostlaşma özellikleri eldeki malzemelere özgü olduğundan genelleştirilemez. Tarımsal atıklar kompostlaştırma sürecinde üç grup altında değerlendirilebilir. Birinci grup kalıntı sürekli olarak kurudur, nitrojeni düşüktür ve orta derecede iyi ayrışır (örn. saman, mısır sapları, küspe). Çoğu gübre gibi ıslak besleme stokları ile kompostlaştırma için uygun katkı maddeleridir. İkinci grup tarımsal kalıntı ise özellikle güçlü bir yapıya sahiptir ve iyi hacim arttırıcı maddelerdir (örneğin, fındık kabukları ve pirinç kabukları). Son grup ise genellikle nem ve azot içeriği yüksektir ve hızla bozunur (örneğin, kullanılmayan meyveler, sebze itlafları, bozulmuş silajlar). Bu atıkların kompostlaştırma için daha kuru hammaddelerle birleştirilmesi gerekir. Genel olarak, tarımsal mahsul kalıntıları, iyi ayrışan ve çok az koku riski taşıyan temiz hammaddelerdir (Rynk ve Schwarz, 2022).

Bu çalışmada kullanılan fındık cürufu fındığın hasat atığı fındık kabuğu ise fındık işleme atığıdır. Bir ürün artığı olan fındık cürufu, yaklaşık %95 oranında organik madde ile dikkat çekici bir atıktır. Türkiye yaklaşık 600000 ton/yıl ile dünyanın en büyük fındık üreticisidir (Karaosmanoğlu, 2022). Türkiye’de besleyici bileşenlere sahip çok sayıda fındık ağacı vardır. Ancak, fındığın sadece iç kısmı besin olarak kullanılmakta, geri kalan kısımlar ihmal edilmekte ve atık olarak değerlendirilmektedir. Kuru bazda fındık cürufunun 200000 ton/yıl olduğu tahmin edilmektedir. Büyük bir hacme sahip olan ve lignoselülozik biyokütle olan fındık cürufu genellikle tarlaya bırakılma veya yakma yöntemleriyle bertaraf edilmektedir.

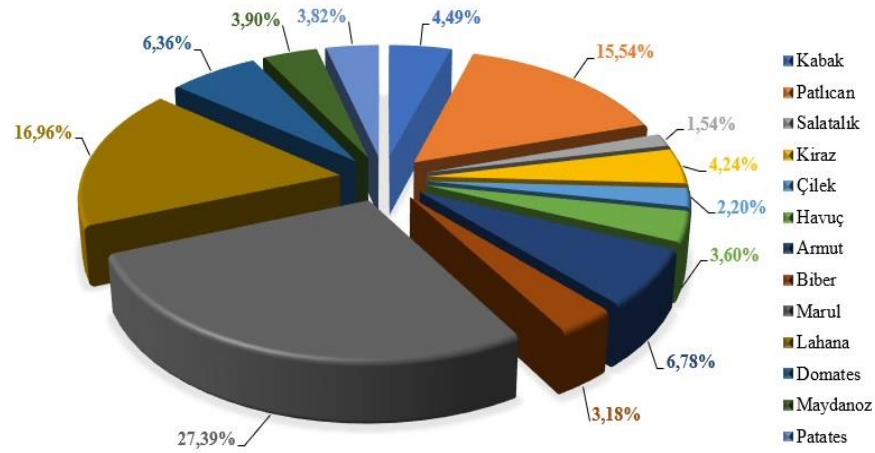
Ancak, çiftçiler ve fındık işleme tesisleri için önemli bir sorun teşkil etmektedir (Güney, 2013; Ceylan ve Topçu, 2014). Fındık atıklarının doğal sentez gazı üretimi ve enerji kaynağı olarak (Boubaker ve ark., 2015; Haykiri – Acma, 2006), fındık kabuğunun yakıt üretiminde alternatif biyokütle olarak (Güney, 2013), renk ve ağır metal gideriminde alternatif adsorbent olarak (Demirtaş ve ark., 2002; Kobya, 2004; Bayrak ve ark., 2006; Bulut ve Tez, 2007; Ferrero, 2007; Demirtaş ve ark., 2008) kullanımı üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Ancak, fındık cürufunun ve kabuğunun kompostta kullanılması ile ilgili literatürde çok sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar ise kompostun kalitesi ve süreç veriminin değerlendirilmesi üzerine odaklanmamıştır.

Bu çalışmada, yüksek nem içeriği ve düşük C/N oranı nedeniyle katkısız olarak verimli bir şekilde kompostlaştırılamayan kentsel katı atıkların tarımsal atık kullanılarak kompostlaştırılması araştırılmıştır. Ülkemizde yüksek üretim potansiyeli bulunan fındığın işlenmesi sonucunda oluşan atıklarının kentsel katı atıkların kompostlaştırılması için etkili bir katkı maddesi olarak değerlendirilmiş olup atık olmaktan çıkmıştır. Fındık cürufunun ve kabuğunun stabilize edilmesi ve biyokütle olarak değerlendirilmesi büyük bir ekonomik kazanım olacaktır. Bu atıkların değerlendirilerek döngüsel ekonomiye kazandırılması ve böylece doğal kaynak kirliliğinin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Atıkların Temini ve Kompostlaştırma Sürecine Hazırlanması

Kentsel katı atıkları, Ordu ili sebze ve meyve halinden temin edilmiştir. Kentsel katı atıkların ağırlıkça ayrı tür ve miktarlarda olacak şekilde hazırlanmıştır. Kullanılan kentsel atıkların karakterizasyonu Şekil 3.1’de verilmiştir. Atıklar 60 mm’den küçük boyutlarda olacak şekilde kesilmiştir. Her bir kompostlaştırma işlemi için aynı türden atıkların eşit miktarları kullanılmıştır. Ana besleme stoğu olan ve kompostlaştırma süreci için hazırlanan atıklar 4 saat içerisinde reaktörlere yerleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Kullanılan kentsel katı atıkların karakterizasyonu

Fındık cürufu ve kabuğu doğrudan tarımsal arazilerden, çiftçiden temin edilmiştir. Ürünler laboratuvara getirildikten sonra Retsch ZM 200 ile öğütülmüş ve Retsch AS 200 ile 10-20 mm partikül boyutuna elenen fındık cürufu ve kabuğu kompostlaştırma sürecine kadar uygun kaplarda saklanmıştır (Şekil 3.2).

Tablo 3.1’de kompostlaştırma sürecinde kullanılacak hammadde ve katkı maddelerinin bazı fizikokimyasal özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.2. Öğütülmüş ve elenmiş fındık işleme atıkları

Tablo 3.1. Hammaddelerin bazı fizikokimyasal özellikleri

Parametre	Kentsel katı atık	Çötenak	Kabuk
pH	5,45	4,7	4,04
Elektriksel İletkenlik (mS/cm)	1,15	3,46	4,45
Nem İçeriği (%)	74,95	0,23	0,01
Toplam Azot (%)	0,6	1,59	0,4
Toplam Organik Karbon (%)	24,14	44,56	44,8
Karbon/Azot	40,23	28,03	112

3.2. In-vessel Reaktörlerin Kurulması

Kompostlaştırma işlemi, havalandırmalı in-vessel reaktörlerde gerçekleştirilecektir. Bu reaktörler 52 cm uzunluğunda, 35 cm genişliğinde, 20 cm derinliğinde ve toplam hacmi 36400 cm³ (0,0364 m³) olacak şekilde tasarlanmıştır. Reaktörler, kompost üretiminin kademeli olarak izlenmesi için yarı saydam plastikten imal edilmiştir (Şekil 3.3). Hava akışı, reaktör içinde dikey ve yatay konumlarda monte edilecek hava dağıtım boruları ile sağlanmıştır. Ana boru, reaktörün tabanından 5 cm yükseklikte olacak şekilde reaktöre monte edilmiştir. Hava dağıtım boruları olarak 2 cm çapında PVC delikli borular kullanılmıştır. Hava dağıtım boruları üzerine çapraz olarak yaklaşık 3 mm çapında delikler açılmıştır (Şekil 3.4). Havalandırma için 9 L/dk kapasiteli pompa ile kullanılmıştır. Sıcaklık değişimini izlemek ve gaz çıkışı sağlamak üzere reaktörün üst orta kısmına 2 cm çaplı bir delik açılmıştır.



Şekil 3.3. Kompostlaştırma reaktörünün görseli



Şekil 3.4. Kompostlaştırma reaktörünün havalandırma düzeneği

3.3. Atık Kombinasyonlarının Hazırlanarak Reaktörlere Yerleştirilmesi

Çalışmada 6 adet in-vessel reaktör oluşturulacak olup her bir reaktör için atıkların karışım oranları Tablo 3.2’de verilmiştir. Hacimsel olarak 36,4 litre kapasiteye sahip her bir reaktörün %90 doluluk kapasitesine göre atık kombinasyonları tasarlanmıştır. Atık kombinasyonlarına göre atıklar reaktörlere yerleştirildikten sonra reaktörlerin kapağı kapatılacak ve eş zamanlı olarak sisteme havalandırma sağlanacaktır. Kompostlaştırma süreci 15 hafta olarak planlanmıştır. Kompostlaştırma süreci boyunca havalandırma sürekli olarak gerçekleştirilecektir. Daha önce yapılan çalışmalardan yola çıkılarak her bir reaktör için 9 L/dak havalandırma oranı kullanılacaktır (Kabak, ve ark. 2022, Bayındır ve ark., 2022; Yılmaz ve ark., 2022).

Tablo 3.2. Atıkların yüzdesel karışım oranları

Reaktör	Pazar Atığı (%)	Çotanak(%)	Fındık Kabuğu(%)
1	100	5	0
2	97,5	5	2,5
3	95	5	5
4	92,5	5	7,5
5	90	5	10
6	87,5	5	12,5

3.4. Kompost Numunelerinde Fizikokimyasal Analizler

Kompostlaştırma prosesi süresince hazırlanan karışımlarda prosesi etkileyen fizikokimyasal parametreler periyodik ve tekerrürlü olarak yapılmıştır. Analizler için haftada bir kez her bir reaktörden yaklaşık 100 g numune toplanmıştır. Kompostlaştırma süreci 15 hafta olarak planlanmıştır. Kompostların kalitesini izlemek için alınan taze örneklerde pH, elektriksel iletkenlik, nem içeriği, $\text{NO}_4^+\text{-N}$ ve $\text{NO}_3\text{-N}$, toplam organik karbon ve toplam azot analizleri yapılmıştır. Haftalık olarak gerçekleştirilen analizlerde kullanılan standart yöntemler Tablo 3.3’de verilmiştir. Örneklem yapıldığı anda pH, elektriksel iletkenlik, nem içeriği, $\text{NO}_4^+\text{-N}$ ve $\text{NO}_3\text{-N}$ analizleri yürütülmüş olup toplam organik karbon ve toplam azot analizleri için numuneler kilitli poşet içerisinde derin dondurucuda -40°C ’de muhafaza edilmiştir.

Atık karışımının sıcaklık değişimi ise reaktörlerin üst orta kısmına monte edilen termometre yardımıyla düzenli olarak izlenmiştir.

Tablo 3.3. Analiz metotları

Parametre	Analiz Yöntemi	Kaynak
T (°C)	Dijital termometre	FCQAO, 2002
Nem İçeriği (%)	105°C’de kurutulması ile oluşan ağırlık kaybı	FCQAO, 2002
pH	1:10 (ağırlık/hacim); pH metre	FCQAO, 2002
Elektriksel iletkenlik (mS/cm)	1:10 (ağırlık/hacim); EC metre	FCQAO, 2002
Toplam organik karbon (%)	Elemental analiz cihazı ile tayin	FCQAO, 2002
Toplam azot (%)	Elemental analiz cihazı ile tayin	FCQAO, 2002
NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	1:10 (ağırlık/hacim) oranında CaCl ₂ ile ekstraksiyon sonrası spektrofotometrik ölçüm	FCQAO, 2002
NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	1:10 (ağırlık/hacim) oranında CaCl ₂ ile ekstraksiyon sonrası spektrofotometrik ölçüm	FCQAO, 2002

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, kentsel katı atıkların laboratuvar ölçekli in-vessel reaktörlerde kompostlaştırılmasında fındık cürufu ve kabuğunun kompost kalitesi ve süreç verimine olan etkisini araştırmak ve kompostlaştırma sürecini etkileyen faktörler izlenmiştir. Kompostlaştırmada süreç kontrolü, ana süreç faktörlerinin izlenmesi ve bu faktörlerde gerekli ayarlamaların yapılmasıyla gerçekleştirilir. Kompostlaştırma süreçlerini etkileyen ana faktörler sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik, nem içeriği, karbon içeriği, azot içeriği ve karbon/azot oranıdır.

4.1. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin Sıcaklık Değişimine Etkisi

Sıcaklık, kompostlaştırma sürecinin başarısını belirlemek için kullanılan önemli ve güvenilir bir faktördür. Kompostlaştırma süreci sırasında açığa çıkan ısı, mikrobiyal aktiviteler nedeniyle biyokimyasal aktiviteyi etkiler (Rynk ve Ziegenbein, 2021). Mikroorganizmalar organik maddedeki kimyasal bağları parçalayarak besin sentezi için enerji elde eder. Bu işlem sırasında kimyasal enerjinin bir kısmı ısıya dönüşür. Ayrıca, sıcaklığın artmasıyla biyokimyasal reaksiyonlar daha hızlı gerçekleşir, dolayısıyla ayrışma hızlanır. Organik maddenin hızlı ayrışması oksijen tüketimini ve ısı üretimini artırır (Godlewska ve ark., 2017). Yalıtım görevi gören hammadde sayesinde ısı yayılma hızı yavaşlar ve yığının sıcaklığı artar. Sıcaklıktaki artış, malzemenin sterilizasyonunu ve uçucu bileşiklerin ve nemin uzaklaştırılmasını sağlar. Ancak, daha düşük sıcaklıklarda (<40°C) organik madde daha yavaş ayrışır, besinler korunur ve daha az koku ve uçucu bileşenler açığa çıkar. Organik maddenin ayrışması sonucu oluşan sıcaklık artışı birkaç saat içinde fark edilebilir. Kompostlaştırma işleminin herhangi bir aşamasında sıcaklık seviyesindeki tutarsız değişiklikler, süreçte bir sorun olduğunu gösterir. Yetersiz havalandırma, düşük nem içeriği veya besin

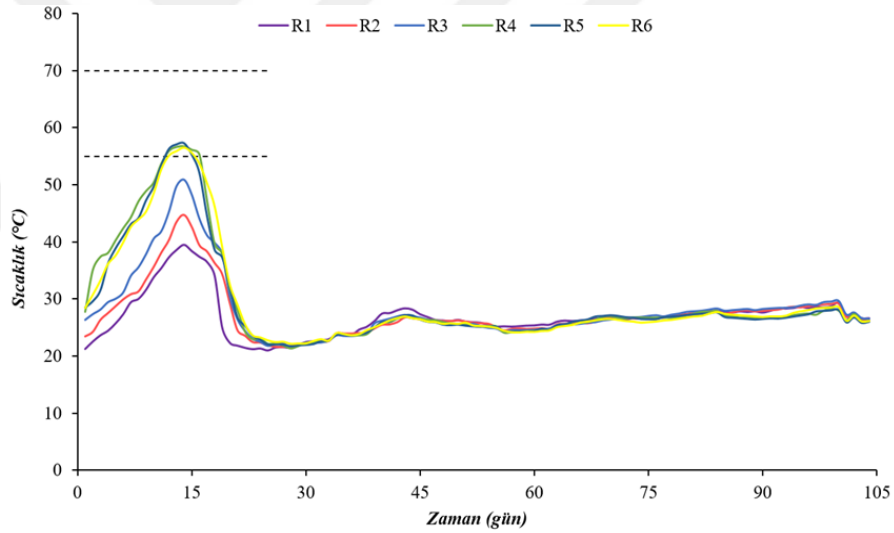
kaybı nedeniyle mikrobiyal aktivite ve dolayısıyla sıcaklık azalabilir. Tersine, ısı birikimi mikroorganizmaları olumsuz yönde etkileyecek sıcaklık yükselmelerine neden olabilir (Aslaksen ve ark., 2007). Bu gibi durumlarda, havalandırmanın artırılması, yığının karıştırılması ve nem içeriğinin ayarlanması kompostlaştırma sürecini daha verimli hale getirecektir (Michel ve ark., 2021).

Bu nedenle, kompost yığınındaki sıcaklık değişiklikleri düzenli olarak izlenmeli ve değerlendirilmelidir. Aktif gübreleme aşaması sırasında, hammaddenin sıcaklığı karakteristik olarak hızlı bir şekilde 50-71°C'ye yükselir. Daha sonra mikrobiyal aktivitenin azalmasıyla birlikte sıcaklıklar giderek azalarak ortam hava sıcaklığına yakın bir değere ulaşır (Cáceres ve ark., 2018). Bu referanslara göre sıcaklıkta beklenenden farklı bir artış veya azalma gözlenirse önlem alınması gerekebilir. Kompostlaştırma işlemi sırasında mikroorganizmaların geliştiği sıcaklık aralıkları psikrofilik (<20°C), mezofilik (20-45°C) ve termofilik (45-75°C) olarak gruplandırılır (Epstein, 1997; Manu ve ark., 2021). Gruplar arasındaki sınırlar kesin olmadığı gibi, farklı sıcaklıklarda farklı mikroorganizma türlerinin de var olduğunu bilmek önemlidir. Termofilik sıcaklıklarda daha hızlı bir organik madde ayrışması elde edilir. Ayrıca kompostlaştırma prosesinde hammaddelerdeki patojenlerin, yabancı ot tohumlarının ve sinek larvalarının yok edildiği termofilik sıcaklıklara ulaşılması istenir (Agnew ve Leonard, 2003).

Kompostlaştırma sürecinin ana hedeflerinden biri, hastalığa neden olan organizmalardan arınmış kompost üretmektir. Patojen giderimi, sıcaklık ve maruz kalma süresinin bir fonksiyonudur. Besleme stoklarındaki patojen sayısını hastalığa neden olma riski oluşturmayacak seviyelere (%99,9) düşürmek gereklidir. Kompostlaştırma sürecinde diğer organizmalarla rekabet, dirençli patojenlerin ortadan kaldırılmasında etkili olsa da ısı en etkili yok edicidir. Farklı ülkelerin kompost kalitesi için farklı kuralları ve düzenlemeleri vardır. Bununla birlikte, sıcaklık/zaman ilişkisi neredeyse evrensel bir kuraldır. Patojen imhasında istenilen etkinin sağlanabilmesi için gerekli sıcaklıklara ulaşılması ve bu sıcaklık değerlerinde yeterli süre kalması gerekmektedir (Oshins ve Michel, 2021; Xiao ve ark., 2017). Bu nedenle, kompostlaştırma yönergelerinde minimum bir sıcaklık ve bu sıcaklığa maruz kalma

süresi belirtilmektedir. Ancak optimum sıcaklık değeri, hammaddenin ve nihai ürünün özelliklerine bağlı olarak değişebilen bir hedeftir.

US EPA, patojenleri yok etmek için eşik sıcaklığının, havalandırılmalı statik yığın veya kap içi kompostlaştırma işleminde üç gün boyunca 55°C'nin üzerine çıkması gerektiğini belirtir. Bununla birlikte, statik yığın kompostlaştırma prosesinde on beş gün veya daha uzun bir süre boyunca 55°C'nin üzerinde kalması gerekir (Bernal ve ark., 2009; US EPA, 1985). Bazı ülkeler, özel hammaddeler için bu değerin 60°C hatta 65°C olması gerektiğini belirtmektedir. 55°C'de yabancı ot tohumlarının bir kısmı birkaç saatte yok edilebilirken, çoğunun yok edilebilmesi için 60°C'nin üzerine çıkılması gerekmektedir. Üstelik bazı türler bu yüksek sıcaklıklarda bile hayatta kalabilmektedir (Dahlquist ve ark., 2007).



Şekil 4.1. Kompostlaştırma sürecinde sıcaklık değişimleri

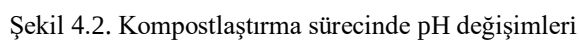
Tüm kompostlaştırma süreçlerinde oluşan sıcaklık değişimleri Şekil 4.1'de sunulmuştur. Sıcaklık tüm reaktörlerde ikinci haftaya kadar hızla artmıştır. Diğer araştırmalarda da benzer sonuçlar bulunmuştur (Oviedo- Ocaña, ve ark., 2015; Mahapatra ve ark., 2022). Daha sonra mezofilik faz bitmiş ve termofilik faz başlamıştır. Şekil 4.1'den görüldüğü gibi, tüm reaktörlerde ikinci haftaya kadar yığınların sıcaklıklarında artış olmuştur. Fındık kabuğu içermeyen R1 reaktöründe maksimum sıcaklık 39,5°C'de kalmıştır. %2,5 oranından fındık kabuğu içeren R2

reaktöründe sıcaklık değişimi 12 ila 15. günler arasında 40°C'nin üzerinde olmasına rağmen maksimum 44,7°C'ye ulaşarak patojenleri yok etmek için önerilen sıcaklık değerine ulaşamamıştır. Ağırlıkça %5 oranında fındık kabuğu eklenen R3 reaktöründeki yığında elde edilen maksimum sıcaklık ise 55°C olan eşik değerine yaklaşmış ancak bu değer azalmaya eğilimi göstermiştir. R4, R5 ve R6 reaktörleri için maksimum sıcaklıklar sırasıyla 56,7°C, 57,3°C ve 56,5°C olarak kaydedilmiştir. Reaktör tipi kompostlaştırma için USEPA tarafında önerilen eşik değerlerde kalma süreleri ise R4 reaktöründeki yığın için 5 diğerleri için ise 4 gün olmuştur. Tüm reaktörler arasındaki sıcaklık farkları öncelikle kentsel katı atığın yüksek nem içeriği ve düşük karbon içeriği sonucu mikroorganizmaların aktivitelerinin ve organik maddenin ayrışmasının artmasından kaynaklanmıştır. R3-R6 reaktörlerindeki sıcaklıklar üçüncü haftadan itibaren 40°C'nin altına düşmüştür. Fındık kabuğu ilavesiyle kompost yığınlarında patojen ve yabancı ot tohumlarının yok edilmesi için gereken eşik sıcaklık değerlerine ulaşılmış, bu değerlerde istenilen süre geçmiş ve kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasında fındık kabuğu kullanılarak proses verimi artırılmıştır.

4.2. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin pH Değişimine Etkisi

pH kompostlaştırma prosesi için önemli bir parametredir. Kompostlaştırma prosesindeki geniş mikroorganizma spektrumu ve doğal tamponlama kapasitesi, prosesin geniş bir pH aralığında ilerlemesine olanak sağlar. Bu nedenle, etkili kompostlaştırma için sürecin başında dikkate alınmaz. Ancak, kompostlaştırma amacıyla kullanılacak hammaddenin çok düşük (<5,5) veya çok yüksek (>9,0) pH değerine sahip olması durumunda pH değerini dengeleyecek katkı maddelerinin kullanılması faydalı olabilmektedir. Düşük pH değerlerinde mikrobiyal aktivite engellenirken yüksek pH değerleri ise NH₃-N buharlaşmasına yol açarak nihai kompost kalitesini azaltabilir. Kompostlaştırma sürecinin başlangıcında hammaddelerin 6,5-8,0 pH aralığında olması tercih edilmektedir. Kompostlaştırma işlemi sırasında hammadde ve proses koşullarına bağlı olarak gerçekleşen

Kompostlaştırma prosesinin ilk aşamalarında hammadde içeriğindeki karbon bileşikleri tamamen CO₂'e oksitlenemez. Asetat, propiyonat ve bütirat gibi organik asitler oluşur ve pH değeri hızla düşer. pH değeri organik asitlerin ayrışmasıyla yükselirken oksijen mevcut olduğunda nötr değerlere yaklaşır. Havalandırmanın yetersiz olduğu durumlarda organik asit oluşumu devam ederek pH değerinin yükselmesine engel olur. Organik asitler genellikle hızlı bir şekilde ayrışır ve hammaddeye bağlı olarak pH düşüşü çok kısa sürer. Bu aşamadan sonra pH değeri ya sabit kalır ya da amonyum (NH₄⁺-N) oluşumu ve bunun ardından gelen dönüşüm nedeniyle hafifçe yükselir. NH₄⁺-N normalde zamanla gaz halindeki amonyağa (NH₃) dönüşür. Amonyak buharlaşması yüksek pH değerlerinde (>7,5-8,0) büyük ölçüde artar. Amonyak buharlaşması, kompostlaştırma sürecinde ciddi bir koku sorununa neden olur ve nihai kompostun azot içeriğini azaltır. Bu gibi durumlarda daha fazla asidik hammadde veya katkı maddesi eklenerek azot kaybı sınırlandırılabilir. Ayrıca, hammadde ve katkı maddeleri ile karbon/azot oranı yaklaşık 30:1 değerine ayarlanarak amonyakın mikrobiyal proteine dönüştürülmesi ile azot kaybı engellenebilir. Bu çalışmada, pH değerlerindeki değişimler Şekil 4.2'de görselleştirilmiştir.



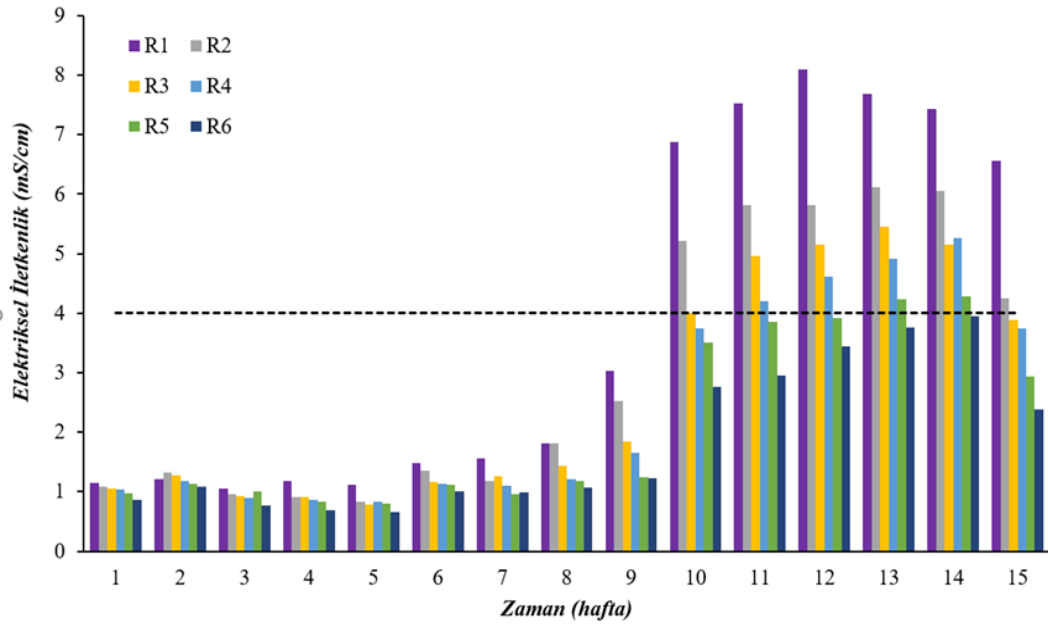
Kentsel katı atığın kompostlaştırıldığı R1 reaktöründe sürecin ilk haftasında yığının pH değeri 5,45 olarak ölçülürken farklı oranlarda fındık kabuğu içeren R2, R3, R4, R5 ve R6 reaktörlerinde pH değerlerinin sırasıyla 7,79, 7,85, 7,91, 8,04 ve 8 olduğu belirlenmiştir. Fındık kabuğu katkısı pH değerinin kompostlaştırma sürecinin başlangıcında tercih edilen değer aralığına gelmesini sağlamıştır. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, organik maddenin hızlı ayrışması ve çok sayıda organik asit oluşumu nedeniyle pH değerleri aktif kompostlaştırma aşamasında azalma eğilimi göstermiştir. Sürekli havalandırmanın etkisi ile oksijen varlığında organik asitlerin hızlı ayrışması pH değerlerini tüm reaktörlerde yükseltmiştir. Tüm atık kombinasyonlarının bulunduğu reaktörlerde organik asitlerin hızlı ayrışmasının bir sonucu olarak pH değerlerinin azalma süresi yaklaşık iki hafta sürmüştür. Tüm yığınlarda, pH değeri üçüncü haftadan itibaren hızla artış göstermiş ve sekizinci haftadan itibaren ihmal edilebilecek salınımlar göstererek stabil kalmıştır.

Nihai kompostların son pH değerleri ise R1’de 7,37, R2’de 7, R3’de 6,86, R4’de 6,75, R5’de 6,62 ve R6’da 6,41 olarak bulunmuştur. Fındık kabuğu ilavesi ile yapılan kompostlaştırma işlemlerinin pH değerleri proses sonunda azalmış olmakla birlikte kentsel katı atığın katkısız olarak kompostlaştırıldığı kontrol reaktörü istenen optimum aralığın dışında kalmıştır. Bununla birlikte, en yüksek fındık kabuğu oranına sahip R6 reaktörü optimum aralığa yakın bir pH seviyesine sahip olarak tercih edilen limit değerlerini sağlayamadığı belirlenmiştir.

4.3. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin Elektriksel İletkenlik Değişimine Etkisi

Elektrik iletkenlik kompostun tuz içeriğini doğrudan yansıtabilen bir parametredir. Topraktaki tuz birikimi arazi bozulumunu etkileyen önemli faktörlerden biridir. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde tarımsal üretimi azaltır. Tuzluluk, toprak çözeltisinin düşük ozmotik potansiyeli, iyon toksisitesi ve iyon dengesizliği nedeniyle bitki büyümesini engeller ve bu da besin alımını daha da azaltır. Ayrıca biyokütleyi, mikrobiyal aktiviteyi ve organik madde dönüşümünü azaltır. Elektriksel iletkenlik aynı zamanda kompost olgunluğunun da bir göstergesidir. İyonların sıcaklığından,

toplam konsantrasyonundan ve değeriğinden etkilenir. Elektriksel iletkenlik genellikle kompostlaştırma işleminin ilk aşamasında yükselir. Artışın, güçlü mikrobiyal aktivitenin, organik materyallerin basit bileşiklere bozunmasını hızlandırması ve hızla çok sayıda mikromoleküler organik asit ve suda çözünebilen mineraller (fosfat, sülfat, amonyum, sodyum ve potasyum gibi iyonlar) üretmesiyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir (Gao ve ark., 2010; Ma ve ark., 2022). Daha sonra, süreç boyunca elektriksel iletkenlik giderek azalır. Bu durum, tuzların süzülmesi, organik asitlerin ayrışması ve dolayısıyla olgunlaşma süreci ile açıklanmaktadır (Wichuk ve McCartney, 2010). Kompostlaştırma süreci boyunca takip edilen kompostun elektriksel iletkenlik değeriğinin yüksek olması durumunda seyreltme teknikleri ve/veya tuz adsorpsiyon potansiyelleri ile birlikte elektriksel iletkenliği azaltmak için bazı katkı maddeleri kullanılabilir. Şekil 4.3'te bu çalışmada tüm reaktörlerin elektriksel iletkenlik değeriğlerinde gözlenen değerişimler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.3. Kompostlaştırma sürecinde elektriksel iletkenlik değerişimleri

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi tüm reaktörlerde izlenen elektriksel iletkenlik değeri benzer değerişim eğilimi sergilemiştir. Elektriksel iletkenlik, tüm reaktörlerde onikinci haftaya kadar artmıştır. Bu durum, organik maddenin ayrışmasıyla artan

mikrobiyolojik aktivitenin bir sonucu olarak üretilen mikromoleküler organik asit ve çeşitli iyonların (NH_4^+ , H^+ ve HCO_3^-) oluşması ile açıklanmaktadır (Ma ve ark., 2022). Daha sonra, küçük moleküler organik asitlerin ve birkaç tuz iyonunun makromoleküler H_2S 'e (humik asit gibi) dönüşmesiyle elektriksel iletkenlik değerlerinde keskin bir düşüş gözlenmiştir (Yuan ve ark., 2016). Diğer çalışmalarda da benzer eğilimler gözlemlenmiştir (Qu ve ark., 2020; Chung ve ark., 2021). Kompostlaştırma işleminin sonunda, fındık kabuğu içeren reaktörlerde elektriksel iletkenlik değeri 2,38 ila 4,25 mS/cm arasında değişirken, fındık kabuğu içermeyen kontrol reaktöründe 6,56 mS/cm değerinde olarak ölçülmüştür.

Fındık kabuğu miktarı arttıkça, elektriksel iletkenlik içeriği de azalmıştır. Son kompost için optimum elektriksel iletkenliğin <3 mS/cm (Soumar'e ve ark., 2002; Ma ve ark., 2022) ve/veya <4 mS/cm (Chung ve ark., 2021; Dhanker ve ark., 2021) olması tercih edilmektedir. Buna göre, R3-R6 reaktörlerinden elde edilen son kompostların elektriksel iletkenlik içeriklerinin uygun olduğu belirlenmiştir.

4.4. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin Nem İçeriği Değişimine Etkisi

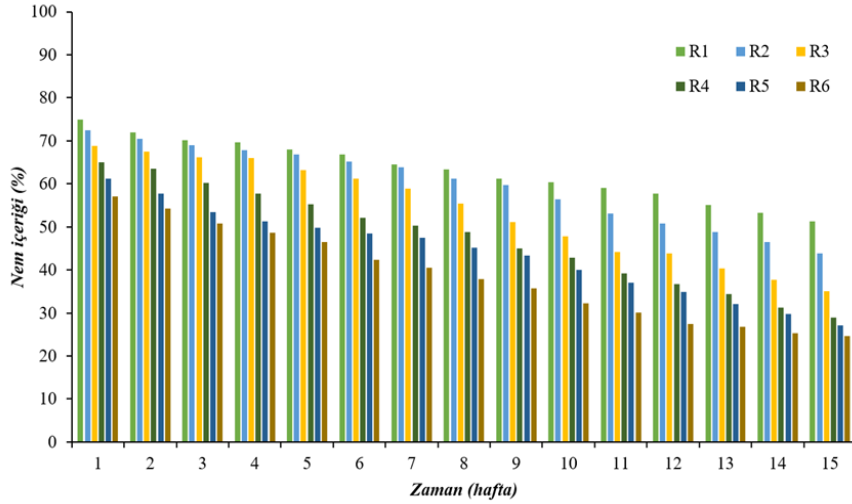
Kompostlaştırma işlemi sırasındaki nem içeriği, organik maddenin ayrışmasında biyolojik aktiviteyi etkileyen en önemli faktördür. Ayrıca, kompostlaştırma prosesinin işleyişini ve kompost özelliklerini etkileyen en önemli özelliklerinden biri de başlangıç nem içeriğidir. Hammaddeleri çevreleyen nem, mikroorganizmaların hareketini ve metabolik süreçlerini destekler. Nem, biyokimyasal reaksiyonlar için ortam oluşturarak besinlerin çözünmesine ve taşınmasına olanak tanırken hammadde parçacıkları arasında bulunan oksijenin suda çözünmesi ve difüzyon yoluyla mikroorganizmalara aktarılmasını da sağlamaktadır (Godlewska ve ark., 2017). Bu nedenle, kompostlaştırma prosesinin başlangıcında ve proses boyunca nem içeriğinin yeterli seviyede olması gerekmektedir. Kompostlaştırma işleminde nem içeriğinin %40-65 arasında tutulması istenmektedir (Manu ve ark., 2021; Oshins ve Michel, 2021). Hızlı ayrışma için tercihen %50-60 arasında olması tavsiye edilir. Kompostlaştırma işlemi ilerledikçe nem içeriği düşme eğilimi gösterir. Bu nedenle,

kompostlaştırma prosesinde kullanılacak hammaddelerin başlangıç nem içeriğinin %50 ile %60 arasında olması tavsiye edilmektedir (Epstein, 1997; Aslaksen ve ark., 2007; Oshins ve Michel, 2021).

Nem içeriğindeki artış veya azalma, prosesi ve nihai kompostun kalitesini etkiler. Çünkü, nem içeriğinin yetersiz olması (<%35) biyolojik aktiviteyi yavaşlatır, fazlalığı ise oksijen transferini engeller (Rynk ve Schwarz, 2022). Biyolojik aktivite %15’lik nem içeriğinin altında durmakla birlikte yürütülen çalışmalar %40’ın altına düştüğünde kompostlaştırma sürecinin önemli ölçüde yavaşladığını bildirmiştir. Düşük nem içeriğine ulaşıldığında prosese su veya ıslak hammaddeler eklenmelidir (Aslaksen ve ark., 2007; Rynk ve Ziegenbein, 2021). Nem içeriği arttıkça katı parçacıkları çevreleyen sıvı film tabakası kalınlaşır. Aşırı nem aynı zamanda malzemenin sıkışmasına ve gözenek alanının azalmasına da neden olur. Bu da, gözeneklerdeki hava akışını engeller (Cáceres ve ark., 2018). Oksijen suda daha yavaş difüze olduğundan anaerobik aktiviteye geçiş sıvı film tabakasının kalınlaşmasıyla başlar. Yüksek nem içeriğine (>%65) ulaşıldığında yığın döndürülerek kurutulmalı veya kuru katkılar eklenmelidir (Zhou ve ark., 2022). Kompost yığınının başlangıçta ve süreç boyunca yeterli miktarda nem içeriğine sahip olup olmadığı izlenmelidir.

Proseste nem içeriğindeki azalma, hammaddenin başlangıçtaki nem içeriğinin yetersiz olmasından kaynaklanabileceği gibi aşırı havalandırma ve ortam sıcaklığından da kaynaklanabilir. İklim koşulları ve hammaddelerin uygun şekilde dengelenmemesi, yüksek nem içeriğine neden olabilir. İyi harmanlanmış bir yığının nem içeriği yüzeyden içeriye doğru ilerledikçe artar. Ancak besleme stokları iyi karıştırılmazsa veya eşit olmayan hava akışı varsa yüzey ile çekirdek arasındaki nem farkı artar. Bir hammaddenin kompostlaştırmaya uygun olup olmadığını, hammadde karışım oranlarını, proseste ki kompost yığınlarının durumunu ve kompostun olgunluğunu belirlemek için nem içeriği ölçülmelidir. Ayrıca nem içeriği ölçümü, başlangıçta hammaddelerdeki karbon/azot oranını dengelemek ve komposttaki besin konsantrasyonlarını hesaplamak için de önemlidir (Rynk ve Ziegenbein, 2021). Kompostlaştırma işleminde %40-60 nem içeriği ile mikroorganizmaların nem ihtiyaçları karşılanırken, oksijen ihtiyaçları da ekonomik olarak karşılanır.

Kompostlaştırma işleminin sonunda biyolojik aktiviteyi engellemek için nihai kompostun nem içeriğinin %30 altında olması gerekmektedir (Aslaksen ve ark., 2007). Kompostlaştırma işlemi sırasında nem içeriğindeki değişiklikler Şekil 4.4 karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.4. Kompostlaştırma sürecinde nem içeriği değişimleri

Kentsel katı atığın nem içeriği kompostlaştırma işleminin başlangıcında %60'ın üzerindedir. Fındık kabuğunun oranının artmasıyla kompostlaştırma işlemin başlangıcında karışımların nem içeriğini azaltmıştır. Ancak, sadece R5 ve R6 reaktörlerindeki yığınların nem içeriği %60'ın altına düşmüştür. Nem içeriği %50 - 60 arasında olduğunda hızlı ayrışma meydana gelmiştir. Kompostlaştırma işleminde, nem kaybı, organik maddenin biyolojik olarak parçalanmasıyla oluşan ısıyı tetiklediği için ayrışma oranının bir faktörü olarak kabul edilir. Şekil 4.4'de görüldüğü gibi, tüm reaktörlerde yığınların nem içerikleri kompostlaştırma işlemi sırasında kademeli olarak azalmıştır. R1 reaktöründeki yığında nem kaybı %31,67 iken son kompostun nem içeriği %51,22 olarak hesaplanmıştır. Kontrol grubunda gözlemlenen bu durum ve son kompostun yüksek nem içeriği, kompostlaştırma işleminin verimli bir şekilde gelişmediğini göstermiştir. Diğer yandan, artan oranlarda fındık kabuğu içeren R2, R3, R4, R5 ve R6 reaktörlerinde nem kayıpları sırasıyla %39,44, %48,95, %55,41, %55,61 ve %57,00 olarak belirlenmiştir. Gözlemlenen yüksek nem kayıpları sonucunda, son kompostların nem içerikleri ise sırasıyla %43,85, %35,14, %28,99, %27,14 ve %24,57

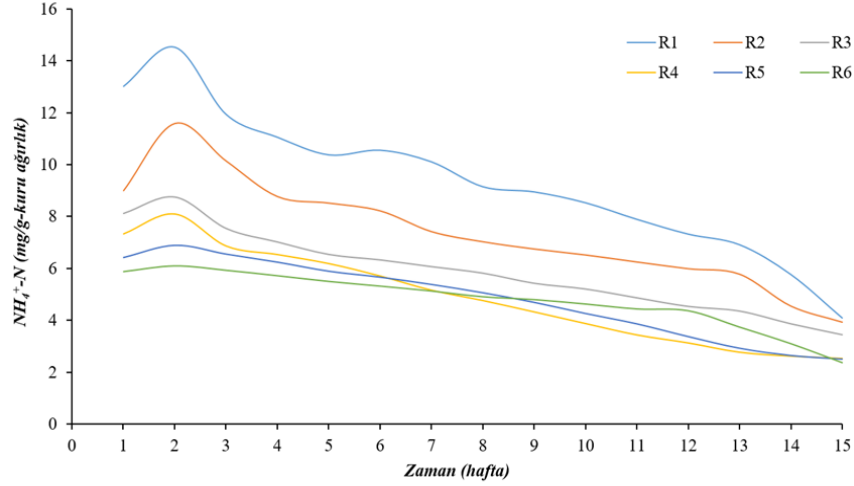
olmuştur. Fındık kabuğu miktarı arttıkça, nem içeriği de azalmıştır. Son kompost için optimum nem içeriğininin <%30 olması tercih edilmektedir.

Buna göre, R4-R6 reaktörlerinden elde edilen son kompostların nem içeriklerinin uygun olduğu belirlenmiştir.

4.5. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin Azot ve Türevlerinin Değişimine Etkisi

Azot (N), biyokimyasal süreçlerde önemli bir besindir. Azotlu bileşikler çoğunlukla mikroorganizmaların faaliyetleri nedeniyle sürekli olarak değişir. Bir hammadde öncelikle organik azot ve daha az miktarda nitrat (NO_3^-) ve amonyum (NH_4^+) içerir. Azot'un NO_3^- ve NH_4^+ formları suda çözünebildikleri ve mikroorganizmalar ve bitkiler tarafından doğrudan kullanılabilirdiği için “kullanılabilir azot” olarak değerlendirilmektedir. Azot dönüşümü, amonifikasyon, nitrifikasyon, denitrifikasyon ve biyolojik immobilizasyon olarak adlandırılan dört aşamada gerçekleşir (Wang ve ark., 2017; Cáceres ve ark., 2018; Lu ve ark., 2018; Shan ve ark., 2021). Hammaddelerdeki organik azot, kompostlaştırma işleminin ilk aşamasında biyolojik olarak ayrışmaya başlar. Amonifikasyonda mikroorganizmalar organik azotu NH_4^+ 'a dönüştürürken NH_4^+ 'nın bir kısmını daha sonra amonyak gazına (NH_3) dönüştürülür. Bu iki azot türevi pH ve diğer çevre koşullarının belirlediği bir dengeye ulaşır. Asidik koşullar NH_4^+ oluşumunu teşvik ettiği ve NH_3 'ün düşük buhar basıncı genellikle yığından gaz halinde NH_3 emisyonlarının oluşumuna neden olduğu için yüksek pH ve sıcaklık koşullarında denge, NH_3 oluşturmaya doğru hareket eder. Amonifikasyon, nitrifikasyonun ilk ve hız sınırlayıcı adımıdır. Kompostlaştırma işlemleri sırasında NH_4^+ değerindeki değişiklikler Şekil 4.5 tüm reaktörler için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. NH_4^+ miktarı ilk haftada R1 reaktöründe 13,03 mg/g iken artan fındık kabuğu ilavesi ile 5,89 mg/g'a kademeli bir azalma göstermiştir. Tüm reaktörlerde aktif kompostlaştırmanın gerçekleştiği ikinci haftada konsantrasyonlar en üst seviyelerine çıkmıştır. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi aktif kompostlaştırma aşamasından sonra NH_4^+ miktarında azalma belirlenmiştir. Bu durum NH_4^+ oksitlenerek dönüşümünün yani yığınlarda nitrifikasyon sürecinin başladığının göstergesidir. Süreç sonunda ise, başlangıç içeriğine de bağlı olarak en fazla NH_4^+ içeren son kompost R1

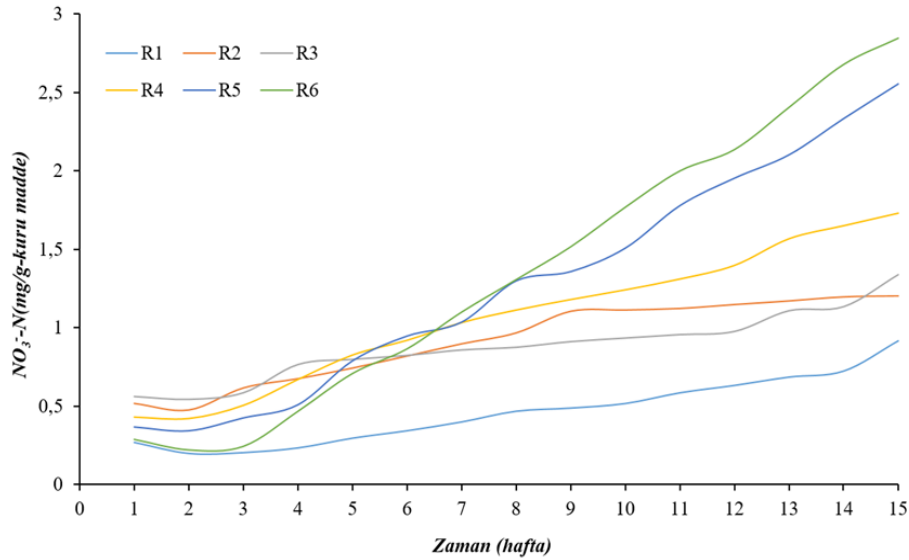
reaktöründen elde edilmiştir. En düşük içerik ise 2,38 mg/g değeri ile %12,5 fındık kabuğu içeren R6 reaktöründen elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Kompostlaştırma sürecinde $\text{NH}_4^+\text{-N}$ değişimleri

Nitrifikasyon, NH_4^+ 'nın oksitlenerek nitrit (NO_2^-) ve nitrat (NO_3^-)'a dönüşümünü hızlandırmak ve NH_3 buharlaşmasını azaltmak için kritik bir adımdır (Wang ve ark., 2019). Nitrifikasyon bakterileri, NH_4^+ 'nın biyooksidasyonunda önemli bir rol oynarlar (Yang ve ark., 2015; Awasthi ve ark., 2016b). Bu nedenle, ekzojen nitrifikasyon bakterileri ile aşılama, nitrifikasyonu arttırmak, azot kaybını azaltmak ve kompost kalitesini iyileştirmek için kullanılan pratik bir yöntemdir. Bununla birlikte, yaygın nitrifikasyon bakterilerinin çoğu 40°C 'nin üzerindeki sıcaklıklara dayanamayan mezofilik bakteriler olduğundan, kompostlaştırmanın termofilik aşaması sırasında nitrifikasyon zayıftır (Satoh ve ark., 2004; Li ve ark., 2013; Chen ve ark., 2018; Wang ve ark., 2019). Denitrifikasyon, mikroorganizmaların sırasıyla NO_3^- 'ü, NO_2^- , NO , N_2O ve N_2 'ye dönüştürdüğü bir adımdır (Li ve ark., 2016). Genellikle dört redüktaza karşılık gelen dört enzimatik indirgeme reaksiyonunu içeren anoksik kompostlaştırma ortamında meydana gelir: nitrat redüktaz (Nar), nitrit redüktaz (Nir), nitrik oksit redüktaz (Nor) ve nitroz oksit redüktaz (Nos) (Shan ve ark., 2021). Nir ve Nos, denitrifikasyonda önemli bir rol oynar (Li ve diğerleri, 2016). Biyolojik immobilizasyon, inorganik nitrojen bileşiklerinden organik nitrojen bileşiklerine geçiş adıımıdır. Kompostlaştırma süreci boyunca mikrobiyal protein oluşur ve mikroorganizmalar, proteinleri sentezlemek için inorganik azotu azot kaynağı olarak

kullanır (Shan ve ark., 2021). Kompostlaştırma işlemleri sırasında NO_3^- değerindeki değişiklikler Şekil 4.6 tüm reaktörler için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kontrol reaktörünün ilk hafta sonunda belirlenen NO_3^- içeriği 0,269 mg/g iken artan oranlarda fındık kabuğu ilave edilen reaktörlerde içerikte artış gözlenmiştir. Aktif kompostlaştırma aşamasının ardından üçüncü haftadan itibaren kompostlaştırma işlemi boyunca tüm reaktörlerde NO_3^- içerikleri kademeli olarak artış göstermiştir. Kompostlaştırma süreci sonunda, ürünlerin NO_3^- konsantrasyonları R1’de 0,914 mg/g, R2’de 1,203 mg/g, R3’de 1,338 mg/g, R4’de 1,732 mg/g, R5’de 2,553 mg/g ve R6’da 2,843 mg/g olarak bulunmuştur. Şekil 4.6’da gösterildiği gibi, NO_3^- kompostlaştırma sırasında birikim göstermiş ve proses sonunda maksimum değerlerine ulaşmıştır. Sonuçlar, fındık kabuğu ilavesinin yapıldığı reaktörlerin kontrol reaktörüne kıyasla daha yüksek NO_3^- birikimi sağlayarak inhibisyonu ortadan kaldırabildiğini göstermiştir.

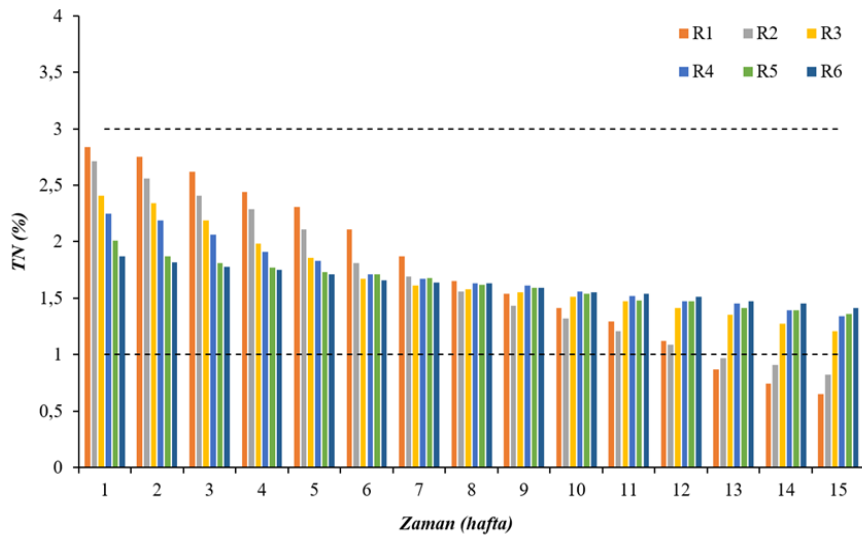


Şekil 4.6. Kompostlaştırma sürecinde NO_3^- değişimleri

Azot kaybı, koku kirliliğine, ekipman korozyonuna, asit yağmuruna ve atmosferde azot birikmesine neden olur. Aynı zamanda nihai ürünün tarımsal kullanılabilirliğini de sınırlayabilir. Kompostlaştırma sırasında azotun dönüşümünden kaynaklanan gaz emisyonları nedeniyle büyük miktarlarda toplam azot (TN) kaybolur. Toprağın ve dolayısıyla bitki gelişiminin iyileştirilmesi amacıyla azotlu gübre takviyesine ihtiyaç duyulmaması için son ürünün toplam azot değerinin %1’in üzerinde olması

gerekmektedir. Ancak, toplam azot değeri %3'ten büyük olmamalıdır. Bu durumda kompostun olgunlaşmamış olduğu kabul edilir (Barker, 1997).

Kompostlaştırma proseslerindeki toplam azot değişimleri Şekil 4.7'de verilmiştir. R1 reaktöründeki yığılda son kompostun toplam azot içeriği %0,65 iken toplam azot kaybı %77,11 olarak hesaplanmıştır. Kontrol grubunda gözlemlenen ve son kompostun düşük toplam azot içeriği, kompostlaştırma işleminin verimli bir şekilde gelişmediğini göstermiştir. Diğer yandan, artan oranlarda fındık kabuğu içeren R2, R3, R4, R5 ve R6 reaktörlerinde toplam azot içerikleri sırasıyla %0,82, %1,21, %1,34, %1,36 ve %1,41 olarak belirlenmiştir. Toprağın gübre ihtiyacını karşılamak için, son kompostun toplam azot değerinin %1-3'ün arasında ancak 1'e yakın olması gerekir. Kontrol reaktörü ve %2,5 fındık kabuğu içeren reaktörler hariç tüm reaktörlerden elde edilen son kompostların toplam azot içerikleri %1-3 arasında bulunmuştur. Bu durum, kompostlaştırma işleminin verimli bir şekilde geliştiğini ve olgun kompostların elde edildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, kompostlaştırma sonunda artan oranlarda fındık kabuğu ilave edilen reaktörlerin kümülatif azot kayıpları, başlangıç toplam azot değerlerine göre %69,74'dan %24,6 değerine kadar azalmıştır. En düşük toplam azot kaybı ise %12,5 oranında fındık kabuğu ilave edilen reaktörden %24,6 olarak elde edilmiştir. Azot kayıplarının başlangıçtaki toplam azotun %21-77'si arasında değiştiği bildirilmiştir (Chan ve ark., 2016). Açıkça, fındık kabuğu ilavesinin kompostlaştırma işlemi sırasında toplam azot kaybını azaltmada belirgin bir etkisi olduğu görülmüştür.



Şekil 4.7. Kompostlaştırma sürecinde toplam azot değişimleri

Bununla birlikte, $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ oranı kompostta olgunluk endekslerinden biridir. Aynı zamanda azotun mineral formlarının oksidasyon indeksi veya nitrifikasyon indeksi olarak da bilinir. Dolayısıyla $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ değeri ne kadar düşük olursa olgunluk da o kadar yüksek olur (Bernal ve ark., 2017). $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ oranının 3'ün altında olması kompostun olgunlaştığını gösterir (Zhang ve ark., 2016). Kompostlaştırma işlemleri sırasında $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ oranındaki değişimler tüm reaktörler için hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Tüm uygulamalardan elde edilen kompostlardaki $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ oranları değişirken kompostlaştırma işlemi boyunca bu oranlar azalmıştır. En yüksek $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ oranı, en yüksek NH_4^+ miktarı ve en düşük NO_3^- miktarına sahip olan R1 (4,46) reaktörü için kaydedilmiştir. Bunu takiben, %2,5, %5, %7,5, %10 ve %12,5 fındık kabuğu içeren reaktörlerden elde edilen son ürünlerin $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ oranları ise sırasıyla 3,26, 2,58, 1,45, 0,96 ve 0,84 olarak hesaplanmıştır. En düşük $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ oranı R6 reaktöründen elde edilmiştir. $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ oranının 3'ün üzerindeki değerleri kompostun olgunlaşmamış olduğunu göstermektedir. $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ oranının sıfır değerine yaklaşması ise elde edilen nihai ürünün çok olgun kompost olduğunu ve nitrifikasyonun tamamlandığını göstermektedir (Bernal ve ark., 1998).

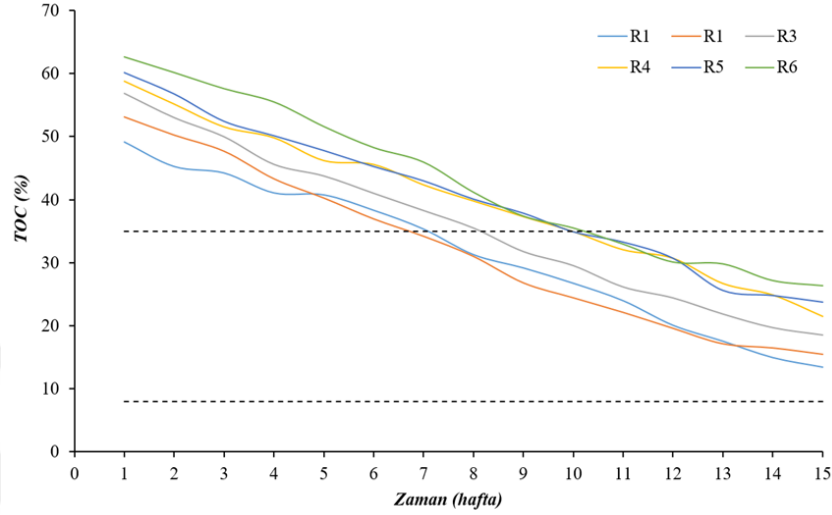
4.6. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin Toplam Organik Karbon (TOK) ve Karbon/Azot (C/N) Oranı Değişimine Etkisi

Kompostlaştırma işlemi sırasında hammaddelerin organik karbon içerikleri, hammaddelerin nemlenme derecesini yansıtır. Hammaddelerdeki organik karbon bileşenleri arasında hemiselüloz, selüloz, lignin ve ayrıca nişasta, oligosakkaritler, sakaroz, fruktoz ve amino asitler gibi suda çözünür formdaki organik maddeler bulunur (Said-Pullicino ve ark., 2007). Kompleks bir yapıya sahip olan ve bitki hücre duvarının ana bileşenlerinden biri olan hemiselülozlar, kompostlaştırma işlemi sırasında mikroorganizmaların ihtiyaç duyduğu karbonhidratlara parçalanabilmektedir. Hemiselülozlar selüloz mikrofiberlerinin yüzeyine ve birbirlerine bağlanır. Selüloz bitki hücre duvarının ana iskelet yapısıdır. Amorf ve kristal bölgeleri olan selüloz, hemiselüloz ve lignin ile iç içe geçmiştir (Loow ve ark., 2017).

Selülozun parçalanması hemiselülozdan daha zordur. Ancak, birbirine kenetlenen bir ağ sayesinde hücre duvarını sertleştiren lignin, mikroorganizmalar tarafından kısmen parçalanabilmektedir. Yapılan çalışmalar selüloz ve ligninin yüksek sıcaklıkta aktinomisetler ve mantarlar tarafından parçalandığını göstermektedir (Epstein, 1997). Yüksek sıcaklıktaki mantarlar hücre dışı enzimler salgılar ve miselyumları organik maddeyi gübreye dönüştürmek için mekanik bir iç içe geçme etkisi gösterir. Kompostlaştırma prosesinde mikroorganizmalar için malzeme ve enerji kaynağı suda çözünebilen organik maddelerdir. Organik maddelerin sudaki çözünürlüğü, organik maddenin dönüşüm derecesine ve malzemelerin stabilitesine bağlıdır (Loow ve ark., 2017; Yu ve ark., 2019).

Organik madde veya organik karbon kritik parametrelerdir çünkü kompostlaştırma sonrasında oluşan kompost genellikle toprağı bu bileşenlerle zenginleştirmek için kullanılır. Karbon, organik maddeyi oluşturan moleküllerin omurgasıdır (Stehouwer ve ark., 2021). Mikroorganizma hücresinin yapısı ve çeşitli organik moleküllerin sentezi için karbon gereklidir. Ayrıca, mikroorganizmaların kuru kütlelerinin yaklaşık %50'sini oluşturur. Kompostlaştırma işleminde mikroorganizmaların temel enerji kaynağı karbondur. Kompostlaştırma süreci ilerledikçe metabolik aktivite azaldıkça karbon içeriğı ve CO₂ oluşum hızı da azalır (Epstein, 1997). Hammaddelerin kompostlaştırılması sırasında karbon içeren ayrışma gazları karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve karbon monoksittir (CO). Kompostlaştırma sırasında karbon kaybı, oluşan gazlardan ve organik maddenin mineralizasyonundan kaynaklanmaktadır (Said-Pullicino ve ark., 2007; Cui ve ark., 2016). Kompostlaştırma proseslerindeki toplam organik karbon içeriğindeki değişimler Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi tüm yığınların toplam organik karbon içerikleri düşmüştür. R1, R2, R3, R4, R5 ve R6 reaktörlerinde bulunan yığınlarının kompostlaştırılmasından sonra elde edilen son kompostun toplam organik karbon içerikleri sırasıyla %13,44, %15,47, %18,55, %21,45, %23,76 ve %26,34 olmuştur. Bununla birlikte, yığınların toplam organik karbon kayıpları R1 için %72,66, R2 için %70,89, R3 için %67,38, R4 için %63,49, R5 için %60,49 ve R6 için %57,92 olarak hesaplanmıştır. Hammaddelerin kompostlaştırılması sırasında karbon kaybı, organik maddenin mineralizasyonu ve CO₂, CH₄ ve CO gibi gazlara dönüşümünden kaynaklanmaktadır (Cui ve ark., 2016).

Kentsel katı atıkların fındık kabukları ile birlikte kompostlaştırılması toplam organik karbon kayıplarını azaltmış, en az toplam organik karbon kaybı ise %12,5 oranında fındık kabuğu içeren yığında gerçekleşmiştir.



Şekil 4.8. Kompostlaştırma sürecinde toplam organik karbon değişimleri

Hammaddelerin karbon ve azot içerikleri kompostlaştırma sürecini ve son kompostun kalitesini etkiler. Kompostlaştırma sürecinin ana aktörleri olan mikroorganizmalar, protein üretimi ve hücrel çoğalma için azota, enerji ihtiyaçları ve büyüme için ise karbona ihtiyaç duyarlar. Genel olarak mikroorganizmalar ağırlıkça birim azot başına 10-15 birim karbona sahiptir. Ancak, solunum yoluyla sürekli karbon kaybedilir. CO₂ olarak kaybedilen karbonu geri kazanmak için azottan yaklaşık 25 kat daha fazla karbon kaynağı tüketmeleri gerekmektedir. Bu nedenle, kompostlaştırma işleminin başlangıcında kompostlaştırılacak hammaddelerin seçilip karıştırılmasında karbon ve azot içeriğinin uygun oranlarda tutulması oldukça önemlidir. Karbon/azot oranı, kompostlaştırma prosesinin başlangıcında ve proses boyunca mikrobiyal faaliyetler, proses verimliliği ve nihai kompostun kalitesi için yeterli seviyede olmalıdır. Çok düşük veya çok yüksek karbon/azot oranına sahip hammaddelerin kompostlaştırılmasında, prosesin ve nihai kompostun kalitesini artırmak için diğer hammaddelerle karıştırmak karbon/azot oranının dengelenmesinde önemli bir yönetim stratejisidir. Başarılı bir kompostlaştırma sürecin sağlanması için süreç başlangıcında karbon/azot oranının 20/1 - 60/1 arasında olması tercih edilmektedir.

Ancak, bireysel hammaddeler veya bunların karışımları için 25/1 – 40/1 arasındaki karbon/azot oranının ideal olduğu kabul edilmektedir (Rynk ve Schwarz, 2022). karbon/azot oranının 20/1'in altında olması, mikroorganizmaların karbonu hızla tükettiği ve tüm azotun, amonyak ve nitröz oksit gibi uçucu azot bileşikleri olan hücrel bileşiklere dönüştürülmediği anlamına gelir (Cerde ve ark., 2018). Bu durumda, sürecin başlangıcındaki toplam azot içeriğinin neredeyse yarısı kaybolur ve amonyak mikrobiyal aktiviteyi engelleyebilir (Wang ve Zeng, 2018). Azot eksikliği nedeniyle karbon/azot oranı 40/1'in üzerinde olduğunda hücrel üreme yavaşlar. Bu, karbonu parçalayacak yeterli mikroorganizmanın oluşmamasına ve kompostlaştırma sürecinin yavaşlamasına neden olur. Süreç başlangıcında yüksek karbon/azot oranı kompostlaştırma verimliliğini azaltır ve süreç yönetimini karmaşıktırır (Haug, 1993; Xiao ve ark., 2017). Hammaddenin azot içeriği öncelikle karbon/azot oranının parametresidir (Rynk ve Schwarz, 2022). Ancak idealden daha yüksek bir başlangıç oranı kompostlaştırma verimliliğini azaltabilirken daha yavaş proseslerde kontrollü yönetim uygulanabilir.

Karbon/azot oranı oldukça önemli olmasına rağmen tek başına anlamlı bir parametre değildir. Neredeyse tüm hammaddelerdeki azot tamamen biyolojik olarak parçalanabilirken, lignin içeren karbon bileşiklerin biyolojik olarak parçalanabilirliği diğerlerinden farklıdır (Sanchez-Monedero ve ark., 2018). Bu durum kompostlaştırma sürecini ve nihai kompostun kalitesini etkilediği için karbon/azot oranı dikkatle ayarlanmalıdır (Wong ve ark., 2012). Hammaddelerin karbon/azot oranını ayarlamak için katkı maddeleri, hacim artırıcılar ve mikrobiyal ilaveler gibi uygulamalar yapılabilmektedir. Böylece kompostun verimliliği ve kalitesi artar (Manu ve ark., 2021; Zhou ve ark., 2022). Başlangıçtaki karbon/azot oranı nihai kompostun karbon/azot oranının bir göstergesidir. Çünkü kompostlaştırma işlemi sırasında organik karbon mineralleştikçe karbon/azot oranı azalır. Tarım ve bahçecilikte azot hareketsizliğine neden olabileceğinden kompostun karbon/azot oranı 20/1'den az (tercihen <18/1) olmalıdır. Daha yüksek karbon/azot oranına sahip kompost, malçlama ve erozyon kontrolü için kullanılabilir (Wang ve Zeng, 2018; O'Neill ve Rynk, 2021; Rynk ve Schwarz, 2022).

Bu çalışmada, artan oranlarda fındık kabuğu ilave edilen R1-R6 reaktörlerinde ise yığınlarının başlangıç karbon/azot oranları kademeli olarak azalırken artan oranlarda fındık kabuğu ilavesi edilen reaktörlerde ise karbon/azot oranları artmıştır. Kompostlaştırma prosesleri sonunda tüm yığınların karbon/azot oranı kademeli olarak azalmış ve son kompostların karbon/azot oranları ise R1 için 20,68, R2 için 18,87, R3 için 15,33, R4 için 16,01, R5 için 17,47 ve R6 için 18,68 olarak bulunmuştur. Son kompostun olgun ve kabul edilebilir kalitede olması için karbon/azot oranının 20'nin altında olması gerekir (Vitinaqailevu ve Rajashekhar Rao, 2019; Bayındır ve ark., 2022; Kabak ve ark., 2022). Sonuç olarak, kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasında fındık kabuğu ilave edilen tüm yığınların karbon/azot oranı olgun ve kaliteli kompost için yeterli sınıra ulaşmıştır.

4.7. Kentsel Katı Atıkların Kompostlaştırılmasında Fındık Kabuğu İlavesinin Etkisi

Bu çalışmada, kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasında laboratuvar ölçekli in-vessel reaktörler tasarlanmış ve tarımsal atık olan fındık cürufu ve kabuğunun kompost kalitesi ve süreç verimliliğine olan etkisini araştırılmıştır. 15 hafta boyunca haftalık örneklemeler yapılarak besleme stoklarında kompostlaştırma sürecini etkileyen faktörler izlenmiştir. Kompostlaştırma süreçlerini etkileyen fizikokimyasal faktörler sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik, nem içeriği, karbon içeriği, azot içeriği ve karbon/azot oranıdır.

İncelenen tüm parametreler açısından elde edilen nihai kompostların fizikokimyasal özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Tablo 4.1'de görüldüğü üzere, fındık kabuğu kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasında proses verimliliği ve kompost özellikleri üzerinde olumlu etkiye sahip olmuştur. İşlemin başlangıcında parametrelerin optimum aralıkta olmasını sağlayarak etkili bir kompostlaştırma işleminin uygulanmasını desteklemiştir. Fındık kabuğu ilavesi ile kompost içerisindeki toplam azot ve organik karbon kayıplarının daha az olduğu gözlenmiştir.

Ayrıca incelenen son kompostların özellikleri literatürde verilen olgunluk standartlarına göre değerlendirildiğinde, fındık kabuğu içeren kompostların kontrol reaktöründen elde edilen komposta göre daha olgun olduğu görülmüştür.

Tablo 4.1. Nihai kompostların fizikokimyasal özellikleri

Fizikokimyasal Parametreler	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Sıcaklık (°C)	39,50	44,70	0,1	56,70	57,30	56,50
pH	7,37	7,00	6,86	6,75	6,62	6,41
Elektriksel İletkenlik (mS/cm)	6,56	4,25	3,93	3,81	2,84	2,38
Nem İçeriği (%)	51,22	43,85	35,14	28,99	27,14	24,57
Toplam Azot (%)	0,65	0,82	1,21	1,34	1,36	1,41
AmonyumAzotu/NitratAzotu	4,46	3,26	2,58	1,45	0,96	0,84
Toplam Organik Karbon (%)	13,44	15,47	18,55	21,45	23,76	26,34
Karbon/Azot Oranı	20,18	18,87	15,33	16,01	17,47	18,68

Kompostlaştırma sürecini doğru bir şekilde yöneterek, yüksek katma değerli ürünler geliştirmenin yanı sıra, atıkları hijyenik hale getirmek, sera gazı emisyonlarını azaltmak ve böylece çevreyi korumak gibi ciddi avantajlara sahiptir. Sıcaklık, biyokimyasal reaksiyonların hızını ve patojenik mikroorganizmaların kontrolünü sağladığı için kompostlaştırma sürecini değerlendirmede güvenilir ve önemli bir parametredir. Sıcaklık ve zaman arasındaki ilişki, patojen kontrolünde küresel bir kural olarak kullanılır. Kompost yığınları belirli sıcaklıklara ulaşmalı ve patojen kontrolü için bu sıcaklık değerlerini yeterli bir süre boyunca korumalıdır. Tablo 4.1 incelendiğinde fındık kabuğu oranının %10'dan fazla olduğu reaktörlerde kompost yığınlarının hijyenik hale geldiği görülmektedir.

İşlem sonunda, kontrol reaktöründen elde edilen nihai kompostun pH değeri istenen optimum aralığın dışında kalmış iken fındık kabuğu içeren reaktörlerde nihai kompostların pH değerleri optimum aralıkta olduğu belirlenmiştir. Bu durum fındık kabuğu ilavesinin hem süreç başlangıcında hem de elde edilen üründe istenilen pH seviyelerinin sağlanmasında etkili olduğunu göstermektedir.

Tüm reaktörlerden elde edilen nihai kompostların elektriksel iletkenlik değerleri incelendiğinde findık kabuğu oranının %5 ve daha fazlasının bulunduğu reaktörlerde elektriksel iletkenlik açısından tarımsal olarak kullanılabilir seviyelerde olması nedeniyle, kentsel katı atıkların kompostlaştırılması sırasında findık kabuğu ilavesinin önemli bir katkı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Kentsel katı atıkların yüksek organik madde ve nem içeriği nedeniyle hızla gerçekleşen biyolojik bozunma sonucunda nem içeriğinin dengelenmesinde findık kabuğu oranının arttırılması etkili olmuştur. Nihai kompostlardaki nem içeriğinin %7,5 ve daha fazla oranda findık kabuğu içeren reaktörlerde istenen optimum seviyenin altında olduğu gözlemlenmiştir.

Nihai kompostun tarımda kullanılabilirliği için azot kayıplarının mümkün olduğunca düşük olması önerilir. Kentsel katı atıklar için findık kabuğu ilavesiyle azot kayıplarının azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, azot kayıpları findık kabuğu miktarının artırılmasıyla daha da azalmıştır. Toplam azot kaybı, yalnızca tarımsal kullanım için kompost kalitesini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda kokuya, asit yağmuruna ve ekipman korozyonuna da yol açmaktadır. Buna göre, findık kabuğunun azot kaybını azaltmada önemli rol oynadığı görülmüştür.

$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ oranı kompostta olgunluk endekslerinden biridir ve bu oran ne kadar düşükse olgunluk seviyesi o kadar yüksektir. Findık kabuğu oranının %7,5 ve daha fazla olması durumunda bu oran istenilen aralığa ulaşmıştır. Bununla birlikte, en olgun kompost %12,5 oranında findık kabuğu içeren reaktörden elde edilmiştir. Bu nedenle, findık kabuğu ilavesi kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasından elde edilen nihai ürünün kalitesini arttırmıştır.

Kentsel katı atıklara findık kabuğu ilavesinin artmasıyla toplam organik karbon kayıpları azalmıştır. Düşük organik karbon kayıpları, nihai kompostun tarımda kullanılabilirliği açısından önemlidir. Toplam organik karbon kayıpları findık kabuğu miktarının artırılmasıyla daha da azalmıştır. Buna göre, findık kabuğunun karbon kaybını azaltmada önemli rol oynadığı belirlenmiştir.

Mikroorganizmalar birim azot başına ağırlıkça 10 ila 15 birim karbona sahip olsalar da, solunum yoluyla sürekli olarak karbon kaybederler. Kaybedilen karbonu geri kazanmak için azottan yaklaşık 25 kat daha fazla karbon kaynağına ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle, kompostlaştırma prosesinde süreç başlangıcında ihtiyacı karşılamak için süreç sonunda ise tarımsal kullanım için optimum aralıklarda olması istenir. Karbon/azot oranı tüm reaktörlerde proses sırasında azalmıştır. Fındık kabuğu içeren reaktörlerde nihai kompostların karbon/azot oranı kontrol reaktörüne daha uygun bulunmuştur.

Tüm fizikokimyasal faktörler bütüncül olarak değerlendirildiğinde %12,5 fındık kabuğu oranının kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasında süreç verimliliği, nihai kompostun kalitesi ve olgunluğu açısından optimum koşulları sağlamıştır.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Artan kentleşme ve sanayileşme sürecinde ciddi çevre sorunlarıyla karşılaşmakta ve bu nedenle çevre dostu çözümler büyük önem taşımaktadır. Atık yönetimi kararlarını bireysel ve kurumsal düzeyde yönlendirmek ve sıralamak için tasarlanmış kavramsal bir çerçeve olan atık yönetimi hiyerarşisi, atıkların önlenmesine ve azaltılmasına öncelik verir. Yeniden kullanımı, geri dönüşümü, geri kazanımı ve son olarak imhayı içerir. Gelişmekte olan ülkelerdeki katı atıkların önemli bir kısmı gıda atıkları, tarımsal atıklar, hayvan gübresi ve belediye kanalizasyon çamuru gibi organik atıklardan oluşmaktadır.

Organik atıkların arıtım yöntemlerinden biri olan kompostlaştırma, düşük yatırım ve işletme maliyetleri, sosyal ve çevresel faydaların daha fazla olması ve pazarlanabilir bir nihai ürün elde edilebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Kompostlaştırma, organik atıkları bitki büyümesi için substrat ve besin kaynağı olarak kullanılabilecek stabil ve güvenli bir ürüne dönüştüren biyokimyasal bir işlemdir. Kompostun toprağa uygulanması gübreye olan bağımlılığı azaltmakta ve ürün kalitesini arttırmaktadır.

Bu çalışmada, kentsel katı atıkların laboratuvar ölçekli in-vessel reaktörlerde kompostlaştırılmasında fındık cürufu ve kabuğunun kompost kalitesi ve süreç verimine olan etkisini araştırılmıştır. Fındık cürufu ve fındık kabuğu nem kontrolü ve kompost olgunluğu için katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Ağırlıkça farklı oranda fındık kabuğu eklenen beş reaktör oluşturulmuştur. Fındık kabuğunun etkisinin belirlenmesi için fındık kabuğu ilavesi yapılmayan kontrol reaktörü hazırlanmıştır. Fındık cürufu ise tüm reaktörlere ağırlıkça %5 oranında ilave edilmiştir.

Kompostlaştırma sürecinde biyokimyasal reaksiyonlar kendiliğinden meydana gelir ancak kullanılan atıkların fizikokimyasal özellikleri kompostlaştırma prosesinin

amaçlarına uygun olmayabilir. Bu nedenle, kaliteli ve yeterli olgunlukta kompost ürününün istenilen zamanda elde edilebilmesi için proses kontrolü gerekmektedir.

Proses kontrolü, ana proses göstergelerinin izlenmesi ve bu göstergelere göre gerekli ayarlamaların organize edilmesiyle yapılır. Proses izlemede sıcaklık ana göstergedir. Buna ek olarak pH, elektriksel iletkenlik, nem içeriği, azot ve türevleri, toplam organik karbon içeriği, karbon/azot oranı ve yığınların ağırlık kaybı haftalık olarak izlenmiştir. Fizikokimyasal parametreler baz alınarak elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekliyle özetlenebilir:

- Kentsel katı atıkların yüksek nem içeriği termofilik aşamaya geçişi engellemiştir. Bununla birlikte fındık cürufunun lifli yapısı ve düşük nem içeriği, reaktörlerde nem içeriğini zamanla dengelemiş ve termofilik aşama sadece R4, R5 ve R6 reaktörleri için sağlamıştır.
- Nihai ürünlerin pH değerleri, fındık kabuğu ilavesi yapılmayan reaktörde optimum aralığın üzerinde bulunurken fındık kabuğu ilavesi yapılan R6 reaktörü hariç diğer reaktörlerde nihai ürünlerin pH değerleri optimum aralıkta bulunmuştur. R6 reaktöründen elde edilen son kompost ise optimum aralığa yakın olmakla birlikte tercih edilen limit değerlerini sağlayamamıştır.
- Elektriksel iletkenlik değerleri fındık kabuğu oranının artmasıyla azalmıştır.
- Fındık kabuğu miktarı arttıkça, elektriksel iletkenlik içeriği azalmıştır. Optimum elektriksel iletkenlik değerleri ise R3-R6 reaktörlerinden elde edilen son kompostlarda belirlenmiştir.
- Nem içeriği açısından değerlendirildiğinde tüm reaktörlerde yüksek oranda nem kaybı oluşmasına rağmen R4, R5 ve R6 reaktörlerinden elde edilen son kompostların nem içeriklerinin %30'un altında kalarak tercih edilen limitlere uygun olduğu belirlenmiştir.
- $\text{NH}_4^+\text{-N}$ miktarı, fındık kabuğu içeren proseslere kıyasla kontrol reaktöründe daha yüksek bulunmuştur.
- Artan oranlarda fındık kabuğu ilavesi ile toplam azot kayıpları azalmıştır. En yüksek azot kaybı kontrol grubunda gerçekleşmiştir.
- Kontrol grubundan alınan nihai ürünün $\text{NH}_4^+\text{-N/NO}_3^-\text{-N}$ değerleri fındık kabuğu eklenen reaktörlere göre yüksek bulunmuştur. Fındık kabuğu oranı arttıkça $\text{NH}_4^+\text{-N/NO}_3^-\text{-N}$ değerleri azalmıştır.

- Azot bileşenlerinde olduğu gibi en yüksek karbon kaybı kontrol reaktöründe gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, düşük toplam organik karbon kayıpları %12,5 fındık kabuğu içeren reaktörde gözlenmiştir.
- Kompostlaştırma prosesleri sonunda tüm yığınların karbon/azot oranı kademeli olarak azalmış ve kontrol reaktörü hariç fındık kabuğu ilavesi yapılan tüm reaktörlerde son kompostların karbon/azot oranları ise olgun ve kaliteli kompost için yeterli sınıra ulaşmıştır. Bununla birlikte, R3, R4 ve R5 reaktörlerinden elde edilen son ürünlerin karbon/azot oranları ise tarım ve bahçecilik uygulamaları için tercih edilen limit değerinden düşük bulunmuştur.
- Son kompostun olgun ve kabul edilebilir kalitede olması için karbon/azot oranının 20'nin altında olması gerekir. Sonuç olarak, kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasında fındık kabuğu ilave edilen tüm yığınların karbon/azot oranı R1 için 20,68, R2 için 18,87, R3 için 15,33, R4 için 16,01, R5 için 17,47 ve R6 için 18,68 olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada, kullanılan atıklar ülkemizde değerlendirilmeyen, doğrudan depolanarak veya toprağa bırakılarak bertaraf edilen atıklardır. Bu atıkların değerlendirilerek doğal kaynak kirliliğinin önüne geçilmesi ve döngüsel ekonomiye kazandırılması söz konusudur. Bu çalışma ile ülkemizde yüksek üretim potansiyeli bulunan fındığın işlenmesi sonucunda oluşan atıklarının kentsel katı atıkların kompostlaştırılmasında etkili bir katkı maddesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Fındık cürufunun ve kabuğunun stabilize edilmesi ve biyokütle olarak değerlendirilmesi büyük bir ekonomik kazanım olacaktır ve düzenli depolama sahalarının yükünde hafiflemesine olanak sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Agnew, J.M., Leonard, J.J., The physical properties of compost, *Compost Science and Utilization*, 11, 238–264, 2003.
- Alshehrei, F., Ameen, F., Vermicomposting a management tool to mitigate solid waste, *Saudi Journal of Biological Science*, 28, 3284–3293, 2021.
- Arias, O., Viña, S., Uzal, M., Soto, M., Composting of pig manure and forest green waste amended with industrial sludge, *Science of The Total Environment*, 586, 1228–1236, 2017.
- Aslaksen, P.M., Benedetti, F., Bingel, U., Brown, C., Büchel, C., Colagiuri, B., Colloca, L., Crawford, C., Doering, B.K., Eippert, F., El-Deredy, W., Enck, P., Finniss, D., Finset, A., Flaten, M.A., Flor, H., Frisaldi, E., Gollub, R.L., Guo, J.-Y., Ingvar, M., Jensen, K., Jonas, W.B., Jones, A., Klinger, R., Klosterhalfen, S., Koban, L., Kong, J., Linde, K., Lovibond, P.F., Luo, F., Lyby, P.S., Marchand, S., Meissner, K., Miller, F.G., Moerman, D.E., Peciña, M., Petersen, G.L., Petrovic, P., Price, D.D., Rief, W., Ruzic, L., Vase, L., Wager, T.D., Walach, H., Wang, J.-Y., Weimer, K., Zubieta, J.-K., *Compost Science and Technology, Placebo and Pain*, Elsevier Science, 2007.
- Awasthi, M.K., Pandey, A.K., Khan, J., Bundela, P.S., Wong, J.W.C., Selvam, A., Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting, *Bioresource Technology*, 168, 214–221, 2014.
- Awasthi, M.K., Wang, Q., Ren, X., Zhao, J., Huang, H., Awasthi, S.K., Lahori, A.H., Li, R., Zhou, L., Zhang, Z., Role of biochar amendment in mitigation of nitrogen loss and greenhouse gas emission during sewage sludge composting, *Bioresource Technology*, 219, 270–280, 2016.
- Awasthi, M.K., Li, J., Kumar, S., Awasthi, S.K., Wang, Q., Chen, H., Wang, M., Ren, X., Zhang, Z., Effects of biochar amendment on bacterial and fungal diversity for co-composting of gelatin industry sludge mixed with organic fraction of municipal solid waste, *Bioresource Technology*, 246, 214–223, 2017.
- Aycan Dümenci, N., Cagcag Yolcu, O., Aydın Temel, F., Turan, N.G., Identifying the maturity of co-compost of olive mill waste and natural mineral materials: Modelling via ANN and multi-objective optimization, *Bioresource Technology*, 338, 125516, 2021.
- Aycan, N., Turan, N.G., Ozgonenel, O., Optimization of process parameters for composting of pulp/paper mill sludge with hazelnut kernel using a statistical method, *Environmental Protection Engineering*, 40, 127–138, 2014.

- Aydın Temel, F., Cagcag Yolcu, O., Turan, N.G., Artificial intelligence and machine learning approaches in composting process, *Bioresource Technology*, 370, 128539, 2023.
- Barker, A. V., *Composition and Uses of Compost*, ACS Symposium Series, American Chemical Society, Washington, DC, 140–162, 1997.
- Bayındır, Y., Cagcag Yolcu, O., Aydın Temel, F., Turan, N.G., Evaluation of a cascade artificial neural network for modeling and optimization of process parameters in co-composting of cattle manure and municipal solid waste, *Journal of Environmental Management*, 318, 115496, 2022.
- Bayrak, Y., Yesiloglu, Y., Gecgel, U., Adsorption behavior of Cr(VI) on activated hazelnut shell ash and activated bentonite, *Microporous and Mesoporous Materials*, 91, 107–110, 2006.
- Bernal, M.P., Albuquerque, J.A., Moral, R., Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment, *Bioresource Technology*, 100, 5444–5453, 2009.
- Bernal, M.P., Paredes, C., S´anchez-Monedero, M.A., Cegarra, J., Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes, *Bioresource Technology*, 63, 91–99, 1998.
- Bernal, M.P., Sommer, S.G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., Michel, F.C., Current Approaches and Future Trends in Compost Quality Criteria for Agronomic, Environmental, and Human Health Benefits, *Advances in Agronomy*, 144, 143–233, 2017.
- Boubaker, K., de Franchi, M., Colantoni, A., Monarca, D., Cecchini, M., Longo, L., Allegrini, E., Di Giacinto, S., Biondi, P., Menghini, G., Prospective for hazelnut cultivation small energetic plants outcome in Turkey: Optimization and inspiration from an Italian model, *Renewable Energy*, 74, 523–527, 2015.
- Brooksbank, K., *Composting to avoid methane production*, Department of Primary Industries and Regional Development, Government of Western Australia, 2018.
- Bulut, Y., Tez, Z., Adsorption studies on ground shells of hazelnut and almond, *Journal of Hazardous Materials*, 149(1), 35–41, 2007.
- Cáceres, R., Malińska, K., Marfà, O., Nitrification within composting: A review. *Waste Management*, 72, 119–137, 2018.
- Cerda, A., Artola, A., Font, X., Barrena, R., Gea, T., Sánchez, A., Composting of food wastes: Status and challenges, *Bioresource Technology*, 248, 57–67, 2018.
- Ceylan, S., Topçu, Y., Pyrolysis kinetics of hazelnut husk using thermogravimetric analysis, *Bioresource Technology*, 156, 182–188, 2014.
- Chan, M.T., Selvam, A., Wong, J.W.C., Reducing nitrogen loss and salinity during “struvite” food waste composting by zeolite amendment, *Bioresource Technology*, 200, 838–844, 2016.

- Chen, H., Awasthi, M.K., Liu, T., Zhao, J., Ren, X., Wang, M., Duan, Y., Awasthi, S.K., Zhang, Z., Influence of clay as additive on greenhouse gases emission and maturity evaluation during chicken manure composting, *Bioresource Technology*, 266, 82–88, 2018.
- Chen, J., Jin, C., Sun, S., Yang, D., He, Y., Gan, P., Nalume, W.G., Ma, Y., He, W., Li, G., Recognizing the challenges of composting: Critical strategies for control, recycling, and valorization of nitrogen loss, *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107172, 2023.
- Chung, W.J., Chang, S.W., Chaudhary, D.K., Shin, J.D., Kim, H., Karmegam, N., Govarathanan, M., Chandrasekaran, M., Ravindran, B., Effect of biochar amendment on compost quality, gaseous emissions and pathogen reduction during in-vessel composting of chicken manure, *Chemosphere*, 283, 131129, 2021.
- Crawford, D. L., Lignocellulose decomposition by selected streptomyces strains, *Applied Environmental Microbiology*, 35(6), 1041-1045, 1978.
- Cui, E., Wu, Y., Zuo, Y., Chen, H., Effect of different biochars on antibiotic resistance genes and bacterial community during chicken manure composting, *Bioresource Technology*, 203, 11–17, 2016.
- Dahlquist, R.M., Prather, T.S., Stapleton, J.J., Time and Temperature Requirements for Weed Seed Thermal Death, *Weed Science*, 55(6), 619–625, 2007.
- De Corato, U., Agricultural waste recycling in horticultural intensive farming systems by on-farm composting and compost-based tea application improves soil quality and plant health: A review under the perspective of a circular economy, *Science of The Total Environment*, 738, 139840, 2020.
- De Silva, S., Yatawara, M., Assessment of aeration procedures on windrow composting process efficiency: A case on municipal solid waste in Sri Lanka, *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management*, 8, 169-174, 2017.
- Dhanker, R., Chaudhary, S., Goyal, S., Garg, V.K., Influence of urban sewage sludge amendment on agricultural soil parameters, *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101642, 2021.
- Dominguez, J. and Edwards, C.A., Vermiculture Technology, Earthworms, Organic Waste and Environmental Management, In: Sherman (Eds), Relationships between composting and vermicomposting: relative values of the products, Second Edition, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1-14, 2011.
- Edwards, C.A. and Bohlen, P.J., *Biology and Ecology of Earthworms*, Tihrd Edition, Hall, New York, 426, 1996.
- Ekinci, K., Keener, H.M., Elwell, D.L., Composting Short Paper Fiber with Broiler Litter and Additives: Part I: Effects of Initial pH and Carbon/Nitrogen Ratio On Ammonia Emission, *Compost Science & Utilization*, 8 (2), 160-172, 2000.
- Epstein, E., *The Science of Composting*, CRC Press LLC, Florida, 504, 1997.
- Ermolaev, E., Sundberg, C., Pell, M., Smårs, S., Jönsson, H., Effects of moisture on emissions of methane, nitrous oxide and carbon dioxide from food and garden waste composting, *Journal of Cleaner Production*, 240, 118165, 2019.

- FCQAO, Methods Book for Analysis of Compost, Federal Compost Quality Assurance Organisation, Stuttgart, Germany, 2002.
- Fernández-Hernández, A., Roig, A., Serramiá, N., Civantos, C.G.O., Sánchez-Monedero, M.A., Application of compost of two-phase olive mill waste on olive grove: Effects on soil, olive fruit and olive oil quality, *Waste Management*, 34(7), 1139–1147, 2014.
- Ferrero, F., Dye removal by low cost adsorbents: Hazelnut shells in comparison with wood sawdust, *Journal of Hazardous Materials*, 142, 144–152, 2007.
- Fogiel, A.C., Experimental verification of the natural convective transfer of air through a composting media, Michigan State University, Department of Agricultural Engineering, Yüksek Lisans Tezi, 1998.
- Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region, 2005. Raw Materials Used for Composting.
- Gajalakshmi, S., Abbasi, S.A., Solid waste management by composting: State of the art, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 38(5), 311–400, 2008.
- Gao, M., Liang, F., Yu, A., Li, B., Yang, L., Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios, *Chemosphere*, 78, 614–619, 2010.
- Gers, F. A., Schmidhuber, J., Cummins, F., Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM, *Neural Computation*, 12(10), 2451–2471, 2000.
- Godlewska, P., Schmidt, H.P., Ok, Y.S., Oleszczuk, P., Biochar for composting improvement and contaminants reduction. A review, *Bioresource Technology*, 246, 193–202, 2017.
- Gouin, F.R., Using Compost Sawage sludge in the production and maintenance of ornamental plants, Maryland Cooperative Extension, University of Maryland, Department of Horticulture, 1992.
- Graves, R.E., Chapter 2 Composting Environmental Engineering. Part 637, 88, 2000.
- Guney, M.S., Utilization of hazelnut husk as biomass, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 4, 72–77, 2013.
- Hansen, C.L., Cheong, D.Y., Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering, Third Edition., Academic Press, p. 673–716, 2019.
- Haug, T.R., The Practical Handbook of Compost Engineering, CRC Tailor & Francis Group Press, Boca Raton, 1993.
- Haykiri-Acma, H., The role of particle size in the non-isothermal pyrolysis of hazelnut shell, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 75, 211–216, 2006.
- Hochreiter, S, Schmidhuber, J., LSTM can solve hard long time lag problems, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 473–479, 1996.
- Hochreiter, S., Schmidhuber, J., Long short-term memory, *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780, 1997.

- Huang, G.F., Wong, J.W.C., Wu, Q.T., Nagar, B.B., Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust, *Waste Management*, 24, 805–813, 2004.
- Janshekar, H. and A. Fiechter., On bacterial degradation of lignin, *European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology*, 14, 47-50, 1982.
- Jefferies, T.W., Physical, chemical and biochemical considerations in the biological degradation of wood, pp. 213-230, 1987.
- Jiang, T., Schuchardt, F., Li, G., Guo, R., Zhao, Y., Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting, *Journal of Environmental Sciences*, 23(10), 1754–1760, 2011.
- Kabak, E.T., Cagcag Yolcu, O., Aydın Temel, F., Turan, N.G., Prediction and optimization of nitrogen losses in co-composting process by using a hybrid cascaded prediction model and genetic algorithm, *Chemical Engineering Research*, 437, 135499, 2022.
- Karaosmanoğlu, H., Lipid characteristics, bioactive properties, and mineral content in hazelnut grown under different cultivation systems, *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(7), 16717, 2022.
- Koby, M., Removal of Cr(VI) from aqueous solutions by adsorption onto hazelnut shell activated carbon: kinetic and equilibrium studies, *Bioresource Technology*, 91, 317–321, 2004.
- Külcü, R., Yaldiz, O., The composting of agricultural wastes and the new parameter for the assessment of the process, *Ecological Engineering*, 69, 220–225, 2014.
- Lazcano C, Gomez-Brandon M, Dominguez J., Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure, *Chemosphere*, 72, 1013, 2008.
- Li, L., Guo, X., Zhao, T., Li, T., Green waste composting with bean dregs, tea residue, and biochar: Effects on organic matter degradation, humification and compost maturity, *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101887, 2021.
- Li, Q., Guo, X., Lu, Y., Shan, G., Huang, J., Impacts of adding FGDG on the abundance of nitrification and denitrification functional genes during dairy manure and sugarcane pressmud co-composting, *Waste Management*, 56, 63–70, 2016.
- Loow, Y.L., New, E.K., Yang, G.H., Ang, L.Y., Foo, L.Y.W., Wu, T.Y., Potential use of deep eutectic solvents to facilitate lignocellulosic biomass utilization and conversion, *Cellulose*, 24, 3591–3618, 2017.
- Ma, R., Liu, Y., Wang, J., Li, D., Qi, C., Li, G., Yuan, J., Effects of oxygen levels on maturity, humification, and odor emissions during chicken manure composting, *Journal of Cleaner Production*, 369, 133326, 2022.
- Ma, R., Liu, Y., Wang, J., Li, D., Qi, C., Li, G., Yuan, J., Effects of oxygen levels on maturity, humification, and odor emissions during chicken manure composting, *Journal of Cleaner Production*, 369, 133326, 2022.
- Mahapatra, S., Ali, M.H., Samal, K., Assessment of compost maturity-stability indices and recent development of composting bin, *Energy Nexus*, 6, 100062, 2022.

- Manu, M.K., Li, D., Liwen, L., Jun, Z., Varjani, S., Wong, J.W.C., A review on nitrogen dynamics and mitigation strategies of food waste digestate composting, *Bioresource Technology*, 334, 125032, 2021.
- Manyapu, V., Mandpe, A., Kumar, S., Synergistic effect of fly ash in in-vessel composting of biomass and kitchen waste, *Bioresource Technology*, 251, 114–120, 2018.
- Mathur, S.P., Owen, G., Dinel, H., Schnitzer, M., Determination of compost biomaturity. I. Literature review, *Biological Agriculture & Horticulture*, 10, 65–85, 1993.
- Melikoglu, M., Menekse, Z.K., Forecasting Turkey's cattle and sheep manure based biomethane potentials till 2026, *Biomass and Bioenergy*, 132, 105440, 2020.
- Meyer-Baese, A., Schmid Volker, J.J., Pattern Recognition and Signal Analysis in Medical Imaging: Second Edition, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2014.
- Michel, F., O'Neill, T., Robert, R., Forced aeration composting, aerated static pile, and similar methods, in: Elsevier, *The Composting Handbook-A How-to and Why Manual for Farm, Municipal, Institutional and Commercial Composters*, p. 197–269, 2021a.
- Michel, F., O'Neill, T., Rynk, R., Passively aerated composting methods, including turned windrows, in: Elsevier, *The Composting Handbook A How-to and Why Manual for Farm, Municipal, Institutional and Commercial Composters*, p. 935, 2021b.
- Michel, F., O'Neill, T., Rynk, R., Contained and in-vessel composting methods and methods summary, in: *The Composting Handbook-A How-to and Why Manual for Farm, Municipal, Institutional and Commercial Composters*. Elsevier, p. 271–305, 2021c.
- Michel, F.C., Managing compost piles to maximize natural aeration, *BioCycle*, 40(3), 56-58, 1999.
- Miller, F.C., Heat Evolution During Composting of Sewage sludge: Science of Composting, Editör: Bertoldi, M., USA, p. 106-117, 1996.
- Mohee, R., Soobhany, N., Comparison of heavy metals content in compost against vermicompost of organic solid waste: Past and present, *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 206–213, 2014.
- Mohee, R., Boojhawon, A., Sewhoo, B., Rungasamy, S., Somaroo, G.D., Mudhoo, A., Assessing the potential of coal ash and bagasse ash as inorganic amendments during composting of municipal solid wastes, *Journal of Environmental*, 159, 209-217, 2015.
- Mosher, D. and Anderson, R.K., Composting Sewage Sludge by High-Rate Suction Aeration Techniques, EPA interim report, 614, 1977.
- Nair J, Sekiozoic V., Anda M., Effect of pre-composting on vermicomposting of kitchen waste, *Bioresource Technology*, 97, 2091, 2006.

- Ndegwa P.M., Thompson S.A., Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids, *Bioresource Technology*, 76, 107–112, 2001.
- O'Neill, T., Rynk, R., Odor management and community relations, *The Composting Handbook*, Elsevier, 549–565, 2021.
- Onwosi, C.O., Igbokwe, V.C., Odimba, J.N., Eke, I.E., Nwankwoala, M.O., Iroh, I.N., Ezeogu, L.I., Composting technology in waste stabilization, On the methods, challenges and future prospects, *Journal of Environmental Management*, 190, 140–157, 2017.
- Oshins, C., Michel, F., The composting process, *The Composting Handbook, A How-to and Why Manual for Farm, Municipal, Institutional and Commercial Composters*, Elsevier, 35, 2021.
- Oviedo-Ocaña, E.R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellon, L.F., Hoyos, L.V., Gonzales, S., Barrena, R., Komilis, D., Sanchez, A., Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: correlation among physical, chemical and biological indices, *Waste Management*, 44, 63–71, 2015.
- Öztürk, İ., Demir, İ., Altınbaş, M., Arıkan, O.A., Çiftçi, T., Çakmak, İ., Öztürk, L., Yıldız, Ş., Kiriş, A., *Kompost El Kitabı, İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, İstanbul/Turkey*, 2015.
- Öztürk, M., *Hayvan gübresinden ve atıklarından kompost üretimi*, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2017.
- Petric, I., Mustafic, N., Dynamic modeling the composting process of the mixture of poultry manure and wheat straw, *Journal of Environmental Management*, 161, 392–401, 2015.
- Poincelot, R. P., *The Biochemistry and Methodology of Composting*, Connecticut Agricultural Experiment Station, New Haven, CT,
- Qu, J., Zhang, L., Zhang, X., Gao, L., Tian, Y., Biochar combined with gypsum reduces both nitrogen and carbon losses during agricultural waste composting and enhances overall compost quality by regulating microbial activities and functions, *Bioresource Technology*, 314, 123781, 2020.
- Reddy MV, Pattnaik S., Vermi-composting of municipal (Organic) solid waste and its implications. In: Singh, S.M., editor. *Earthworm Ecology and Environment*. India, Lucknow, International Book Distributing Co., p.1139, 2009.
- Ren, L., Schuchardt, F., Shen, Y., Li, G., Li, C., Impact of struvite crystallization on nitrogen losses during composting of pig manure and cornstalk, *Waste Management*, 30, 885–892, 2010.
- Reyes-Torres, M., Oviedo-Ocaña, E.R., Dominguez, I., Komilis, D., Sánchez, A., A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies, *Waste Management*, 77, 486–499, 2018.
- Rostami, R. Nabaei, A. and Eslami, A., Survey of optimal temperature and moisture for worms growth and operating vermicompost production of food wastes, 1(2), 105–112, 2009.

- Ryckeboer, J., Cops, S., Coosemans, J., The fate of plant pathogens and seeds during anaerobic digestion and aerobic composting of source separated household wastes, *Compost Science and Utilization*, 10(3), 204-216, 2002.
- Rynk, R., *On-Farm Composting Handbook*, Monographs of the Society for Research in Child Development. Natural Resource, Agriculture and Engineering Service, Ithaca, New York, 1992.
- Rynk, R., Black, G., Gilbert, J., Biala, J., Bonhotal, J., Schwarz, M., Cooperband, L., Why compost, *The Composting Handbook-A How-to and Why Manual for Farm, Municipal, Institutional and Commercial Composters*, Elsevier, 2021.
- Rynk, R., Cooperband, L., Why compost, *The Composting Handbook-A How-to and Why Manual for Farm, Municipal, Institutional and Commercial Composters*, 935, 2021.
- Rynk, R., Schwarz, M., Compost feedstocks, in: *The Composting Handbook A How-to and Why Manual for Farm, Municipal, Institutional and Commercial Composters*, Elsevier, 935, 2022.
- Rynk, R., Ziegenbein, J., Process Management, *The Composting Handbook*, Elsevier, 501–548, 2021.
- Saadaoui, E., Ghazel, N., Romdhane, C. B., Massoudi, N., Phosphogypsum potential uses and problems a review, *International Journal of Environmental Studies*, 74(4), 558-567, 2017.
- Said-Pullicino, D., Erriquens, F.G., Gigliotti, G., Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity, *Bioresource Technology*, 98, 1822–1831, 2007.
- Sanchez-Monedero, M.A., Cayuela, M.L., Roig, A., Jindo, K., Mondini, C., Bolan, N., Role of biochar as an additive in organic waste composting, *Bioresource Technology*, 247, 1155–1164, 2018.
- Satoh, K., Takizawa, R., Sarai, M., Sato, N., Takahashi, R., Tokuyama, T., Two kinds of ammonia-oxidizing bacteria isolated from biologically deodorizing plants in cold district, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 98, 207–210, 2004.
- Shan, G., Li, W., Gao, Y., Tan, W., Xi, B., Additives for reducing nitrogen loss during composting: A review, *Journal of Cleaner Production*, 307, 127308, 2021.
- Shell, B.J., The mechanism of oxygen transfer through a compost material, Doctoral thesis, Department of Civil and Sanitary Engineering, Michigan State University Libraries, 1955.
- Smith, S.R., A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge, *Environment International*, 35(1), 142–156, 2009.
- Soumaré, M., Demeyer, A., Tack, F.M., Verloo, M., Chemical characteristics of Malian and Belgian solid waste composts, *Bioresource Technology*, 81(2), 97–101, 2002.

- Stehouwer, R., Cooperband, L., Rynk, R., Compost characteristics and quality soils, *The Composting Handbook*, 737–775, 2021.
- Tabasaran, O., Kranert, M., Öztürk, İ., *Katı Atık Yönetimi ve Teknolojileri*. İstac, İstanbul/Türkiye, 2016.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S.A., *Integrated Solid Waste Management, Engineering Principle and Management Issue*, McGraw Hill Inc, New York, 1993.
- TÜİK 2022, Türkiye İstatistik Kurumu, <https://www.tuik.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 19.03.2024
- USEPA, *Composting yard trimmings Municipal solid waste*, USA, 1994.
- Veeken, A.H.M., Timmermans, J., Szanto, G.L., Hamelers, H.V.M., *Design of passively aerated compost systems on the basis of compaction-porosity-permeability data*, European Compost Network, 2003.
- Vigneswaran, S., Kandasamy, J., Johir, M.A.H., *Sustainable Operation of Composting in Solid Waste Management*, *Procedia Environmental Sciences*, 35, 408–415, 2016.
- Vitinaqailevu, R., Rajashekhar Rao, B.K., *The role of chemical amendments on modulating ammonia loss and quality parameters of co-composts from waste cocoa pods*, *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8, 153–160, 2019.
- Walke, R., *The preparation, characterization and agricultural use of bark-sludge compost*, United of New Hampshire, Durham, NH, Doktora Tezi, 1975.
- Wang, J., Liu, Z., Xia, J., Chen, Y., *Effect of microbial inoculation on physicochemical properties and bacterial community structure of citrus peel composting*, *Bioresource Technology*, 291, 121843, 2019.
- Wang, S., Yan, W., Zhao, F., *Recovery of solid waste as functional heterogeneous catalysts for organic pollutant removal and biodiesel production*, *Chemical Engineering Journal*, 401, 126104, 2020.
- Wang, S., Zeng, Y., *Ammonia emission mitigation in food waste composting: A review*, *Bioresource Technology*, 248, 13–19, 2018.
- Wang, S.P., Zhong, X.Z., Wang, T.T., Sun, Z.-Y., Tang, Y.Q., Kida, K., *Aerobic composting of distilled grain waste eluted from a Chinese spirit-making process the effects of initial pH adjustment*, *Bioresource Technology*, 245, 778–785, 2017.
- Wichuk, K.M., McCartney, D., *Compost stability and maturity evaluation - A literature review*, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37, 1505–1523, 2010.
- Wong, J.W.C., Selvam, A., Zhao, Z., Karthikeyan, O.P., Yu, S.M., Law, A.C.W., Chung, P.C.P., *In-vessel co-composting of horse stable bedding waste and blood meal at different C/N ratios: Process evaluation*, *Environmental Technology*, 33, 2561–2567, 2012.

- Xiao, R., Awasthi, M.K., Li, R., Park, J., Pensky, S.M., Wang, Q., Wang, J.J., Zhang, Z., Recent developments in biochar utilization as an additive in organic solid waste composting: A review, *Bioresource Technology*, 246, 203–213, 2017.
- Yang, F., Li, G., Shi, H., Wang, Y., Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting, *Waste Management*, 36, 70–76, 2015.
- Yılmaz, E.C., Aydın Temel, F., Cagcag Yolcu, O., Turan, N.G., Modeling and optimization of process parameters in co-composting of tea waste and food waste: Radial basis function neural networks and genetic algorithm, *Bioresource Technology*, 363, 127910, 2022.
- Yu, H., Xie, B., Khan, R., Shen, G., The changes in carbon, nitrogen components and humic substances during organic-inorganic aerobic co-composting, *Bioresource Technology*, 271, 228–235, 2019.
- Yuan, J., Chadwick, D., Zhang, D., Li, G., Chen, S., Luo, W., Du, L., He, S., Peng, S., Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting, *Waste Management*, 56, 403–410, 2016.
- Zhang, L., Sun, X., Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar, *Bioresource Technology*, 171, 274–284, 2014.
- Zhang, Z., Liu, D., Qiao, Y., Li, S., Chen, Y., Hu, C., “Mitigation of carbon and nitrogen losses during pig manure composting: A meta-analysis, *Science of the Total Environment*, 783, 147103, 2021.
- Zhou, Y., Xiao, R., Klammersteiner, T., Kong, X., Yan, B., Mihai, F.C., Liu, T., Zhang, Z., Kumar Awasthi, M., Recent trends and advances in composting and vermicomposting Technologies, A review, *Bioresource Technology*, 360, 127591, 2022.

ÖZGEÇMİŞ

Murat KAHRAMAN, İlkokul, ortaokul ve liseyi Medine Uluslararası Türk Okulu'nda tamamlayarak 2016 yılında Medine Uluslararası Türk Okulu'ndan mezun oldu. 2016 yılında başladığı Giresun Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünü 2020 yılında bitirdi. Yüksek lisans eğitimini Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında 2024 yılında tamamladı.